December. 2023

다목적 방사광가속기 (Korea-4GSR) 상세설계 보고서



2023. 12.

포항가속기연구소

목 차

서문

1장. TDR 요약

2장. 연구분야

2.1 서론 ····· 2-1

2.1.1 초기 10기 빔라인 ····· 2-2

2.1.2 4GSR 저장링 주요 변수 ····· 2-4

2.1.3 4GSR의 광원 ····· 2-7

2.1.4 10기의 빔라인 소개 ····· 2-10

2.1.5 빔라인 구축 일정 ····· 2-20

2.2 제안 빔라인 및 활용분야 ····· 2-21

2.2.1 바이오신약-바이오소각산란 빔라인 ····· 2-21

2.2.2 소재 구조 분석 빔라인 ····· 2-48

2.2.3 연엑스선 나노프로브 빔라인 ····· 2-77

2.2.4 나노스케일 각분해 광전자분광 빔라인 ····· 2-117

2.2.5 결맞음 엑스선 회절 빔라인 ····· 2-141

2.2.6 결맞음 소각산란 빔라인 ····· 2-171

2.2.7 실시간 엑스선 흡수분광학 빔라인 ····· 2-206

2.2.8 생체분자 나노 결정학 빔라인 ····· 2-267

2.2.9 고에너지 현미경 빔라인 ····· 2-299

2.2.10 나노 프로브 빔라인 ····· 2-331

2.2.11 데이터센터 ····· 2-359

3장. 방사광가속기

3.1 가속장치 설계 ····· 3-1

3.1.1 개요 ····· 3-1

3.1.2 저장링 설계 ····· 3-8

3.1.3 빔 동역학 ····· 3-22

3.1.4 입사 장치 ····· 3-63

3.1.5 저장링 입사 장치 ····· 3-120

3.1.6 전자석 시스템 ····· 3-128

3.1.7 삽입장치 및 광원 ····· 3-185

3.1.8 진공 시스템 ····· 3-197

3.1.9 RF 시스템 ····· 3-224

3.1.9-1 부스터링 RF 시스템 ····· 3-263

3.1.10 전자석 전원장치 ····· 3-280

3.1.11 빔 진단 및 제어 ····· 3-295

3.1.12 빔 불안정성 및 제어 ····· 3-410

3.2 빔 안정성 ····· 3-423

3.2.1 서론 ····· 3-423

3.2.2 빔요동 분석 ····· 3-428

3.3 정밀측량 및 정렬 ····· 3-435

3.3.1 정밀측량 및 정렬 ····· 3-435

3.3.2 정밀 측량 장비 구축 및 정렬팀 구성 ····· 3-442

3.3.3 장치 정렬 ····· 3-447

3.3.4 거더 시스템 ····· 3-452

4장. 빔라인

4.1 빔라인/프론트엔드 진공 부품 ····· 4-1

4.1.1 빔라인 진공부품 설계 개요 ····· 4-1

4.1.2 프론트엔드 설계 기준 ····· 4-2

4.1.3 진공 부품 ····· 4-7

4.1.4 프론트엔드 진공계 ····· 4-19

4.1.5 Interlock System ····· 4-20

4.2 빔라인 제어/DAQ ····· 4-27

4.2.1 개요 ····· 4-27

4.3 빔라인 광학장치 ····· 4-41

4.3.1 빔라인 광학장치 설계 개요 ····· 4-41

4.3.2 빔라인 광학장치 설계 목표 ····· 4-43

4.3.3 빔라인 광학장치 설계 기준 ····· 4-44

4.3.4 분광기 ····· 4-60

4.3.5 거울장치 ····· 4-70

4.3.6 광학장치 설계 및 제작공정 ····· 4-79

4.3.7 광학장치 시험 및 검사 ····· 4-81

5장. 기반시설

5.1 4GSR 기반시설 개요 ····· 5-1

5.1.1 도입 ····· 5-1

5.1.2 목표 ····· 5-1

5.1.3 구성 ····· 5-2

5.1.4 소요면적 ····· 5-7

5.1.5 부지 및 배치 ····· 5-7

5.1.6 유틸리티 ····· 5-8

5.1.7 건물 지붕 및 외벽 ····· 5-9

5.1.8 사용 인원 ····· 5-9

5.1.9 주차 ····· 5-10

5.2 가속장치와 빔라인 장치용 건물 ····· 5-11

5.2.1 저장링 터널 ····· 5-12

5.2.2 저장링 터널 지붕 ····· 5-13

5.2.3 실험홀과 복도 ····· 5-14

5.2.4 선형가속기동 ····· 5-15

5.2.5 RF 동 ····· 5-16

5.3 연구 및 지원시설 ····· 5-17

5.3.1 본부동 및 부속시설 ····· 5-17

5.4 구조공학 및 기계공학 ····· 5-21

5.4.1 건물 설계 하중 ····· 5-21

5.4.2 선형가속기 터널, 저장링 터널 및 실험홀 바닥의 평활도 및 허용범위 ··· 5-21

5.4.3 진동 기준 ····· 5-22

5.4.4 소음 (noise) 기준 ····· 5-23

5.4.5 기계장치 ····· 5-24

5.5 기계설비 ····· 5-25

5.5.1 LCW 시스템 ····· 5-26

5.6 전기설비 ····· 5-39

5.6.1 수변전설비 ····· 5-39

5.6.2 배전설비 ····· 5-40

5.6.3 예비전원설비 ····· 5-43

5.6.4 피뢰 및 접지설비 ····· 5-45

6.1 방사선안전관리 정책 ····· 6-1
6.1.1 방사선안전 요건 ····· 6-1
6.1.2 구역관리 및 안전관리 절차 ····· 6-3
6.2 방사선차폐 ····· 6-4
6.2.1 방사선원 및 차폐설계 고려사항 ····· 6-4
6.2.2 반실험식을 이용한 가속기 차폐외형 설계 ····· 6-8
6.2.3 몬테카를로 코드(FLUKA)를 이용한 방사선차폐 상세설계 ····· 6-15
6.3 방사화 평가 및 환경영향 ····· 6-32
6.4 방사선 안전시스템 ····· 6-33
6.4.1 방사선감시시스템 ····· 6-33
6.4.2 개인안전연동시스템(Personnel Safety & Interlock System) ····· 6-48

7장. 공정제안

머리말

2021년 10월부터 다목적방사광가속기 구축사업이 본격적으로 시작되었습니다. 우리나라에서는 드물게 단일기관이 구축사업을 책임지는 경우에서 벗어나, 한국기초과학지원연구원과 포항가속기연구소가 공동으로 가속기 건설에 참여하고 있습니다. 지난 2년여의 기간 동안, 참여하신 두 기관 연구 인력들의 헌신적인 노력으로 핵심인 4 GeV 급 방사광가속기와 10기의 빔라인, 그리고 이를 포함하는 가속기 건물과 부속 설비들에 대한 상세설계를 마치고, 가속기와 빔라인 분야의 상세설계 내용을 본 문서에 담게 되었습니다. 이에 그동안 수고해 주신 모든 참여자 여러분께 사업단장으로서 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

그동안 다수의 가속기 건설 프로젝트가 우리나라에서 진행되었습니다. 그중 방사광가속기 분야는 포항가속기연구소가 PLS, PLS-II, PAL-XFEL 등 다수의 설비를 구축하고 운영한 경험이 있으며, 이를 바탕으로 다목적방사광가속기의 설계가 완성되었습니다. 앞서 언급한 방사광 설비들의 성능과 연구 업적이 세계적으로 인정받고 있기에, 본 설계 역시 그보다 더 높은 수준을 목표로 하여 진행되었음을 말씀드립니다. 이 설계대로 구축이 완성되면 세계 최고 수준의 방사광가속기가 새롭게 오창에 자리 잡게 될 것입니다. 그리고 10기의 최신 빔라인이 준비되면, 국내 방사광 이용자들이 보다 쉽게 빔타임을 배정받을 수 있게 되며, 국내 업체들도 산업체 우선 지원용 빔라인을 통해 방사광을 활용할 수 있게 될 것입니다.

이제 건물과 가속기, 빔라인을 설계대로 구축하는 일이 남았습니다. 이를 위해 정부의 여러 부처를 거쳐야 하는 각종 논의와 허가 절차가 빠르게 진행되기를 바라며, 특히 필요한 예산이 적절하게 지원되어 많은 과학자들과 산업체가 염원하는 다목적방사광가속기가 적기에 활용될 수 있기를 진심으로 바랍니다.

이 문서의 완성에 참여하신 모든 분들께 다시 한번 감사의 말씀을 드립니다.

2024년 1월

다목적방사광가속기구축사업단 사업단장

고인수

머리말

2021년부터 시작된 다목적방사광가속기 구축사업은 한국기초과학지원연구원이 주관기관 그리고 포항가속기연구소가 공동연구기관 자격으로 양 기관의 협력 체제로 추진되고 있습니다. 양 기관의 전문성에 근거해서 가속기와 빔라인은 포항가속기연구소가 담당하고, 건물과 기반시설은 한국기초과학지원연구원이 담당하고 있습니다. 포항가속기연구소가 지난 35년간 방사광가속기를 성공적으로 구축하고 운영해 온 경험과 기술력이 있었기에 핵심 파트인 가속기와 빔라인이 포항가속기연구소에 맡겨진 것입니다. 포항가속기연구소가 그동안 추진했던 대형연구시설 구축사업의 성공은 그동안 쌓아온 경험과 기술력이 발휘된 결과이고, 무엇보다도 참여자들의 열정이 있었기에 가능했습니다. 2023년 말에 완성된 가속장치와 빔라인 상세설계보고서는 포항가속기연구소의 경험과 기술력, 그리고 열정이 집약된 결과라고 생각합니다.

포항제철과 포항공대를 설립하신 고 박태준 포스코 회장이 포항방사광가속기 준공식에서 하신 말씀을 소개하고 싶습니다. “이제부터 첫 삽을 뜨게 될 이 역사적인 사업이 결실을 맺는 날이 바로 우리나라가 과학기술의 선진국으로 우뚝서는 그 날이 올 것입니다”. 그 말씀대로 지난 35년 동안 포항가속기연구소가 추구했던 지향점은 최고 성능의 구현이었습니다. 가속기 성능에서부터 개별 장치에 이르기까지 세계 최고성능을 달성하려는 노력이 있어 왔습니다.

방사광가속기는 가속기 성능에 대한 국가 간 경쟁이 매우 치열한 분야입니다. 전 세계의 거의 모든 방사광가속기가 전 세계 유저에게 오픈되어 있기에 가속기 성능에 대한 평가와 비교는 매우 쉽게 이루어지고 전파됩니다. PAL-XFEL은 외국인 이용자가 30%에 이르는데, PAL-XFEL의 우수성에 대한 국제적인 평가가 빠르게 확산된 것도 그러한 이유입니다.

이제 상세설계결과에 근거해서 장치 제작이 추진될 텐데, 세계 최고성능을 달성하겠다는 열정을 잊지 않도록 해야 합니다. 우리가 경험한 것처럼, 자료를 많이 찾고, 더 많이 고민할 때 최고성능이 달성되는 것이지, 돈을 많이 투입해야 하는 것은 결코 아닙니다. 실력과 노력이 부족하면 돈에 의존하게 됩니다. 최고가 아니면 과감히 국산화를 포기하고 우수한 장치를 선택해야 합니다.

부디 다시 한번 열정을 불태워서 세계 최고 성능의 방사광가속기를 만들어 냈으면 합니다. 다목적방사광가속기를 세계 최고로 만들겠다는 열정으로 포항가속기연구소에 주어진 국가적 임무를 완수했으면 합니다.

2024년 1월

포항가속기연구소 소장

강흥식

머리말

지난해(2023년) 초 포항가속기연구소에 다목적방사광가속기 구축지원단이 구성된 지 1년만에 다목적방사광가속기 상세설계보고서(Technical Design Report)가 완성되었습니다. 사업의 기초를 마련하신 사업단장님, 구축지원단을 구성하신 포항가속기연구소 소장님, 구축지원단 팀장님 및 팀원께 감사와 존경의 마음을 가지고 있습니다.

2021년에 완성된 다목적방사광가속기 개념설계보고서(Conceptual Design Report)가 물리적 개념을 담고 있다면 2023년 완성된 상세설계보고서는 개념설계를 실제로 실현하기 위해, 필요한 공학적 설계를 제시합니다. 개념설계보고서와 함께 상세설계보고서에는 포항가속기연구소에서의 PLS, PLS-II, PAL-XFEL 등 30여년에 걸친 방사광가속기 건설 및 운영 경험이 집약되어 있습니다.

상세설계보고서 작성에 노고를 아끼지 않으신 빔물리진단제어팀, 진공고주파팀, 전자석삽입 장치팀, 빔라인과학팀, 빔라인장치공학팀, 방사선차폐해석팀, 사업관리팀의 팀장님 및 팀원께 한 번 더 감사드립니다. 우리의 땀과 정성이 성공적인 다목적방사광가속기 구축과 운영으로 이어져 우리나라 과학 발전에 크게 공헌할 수 있기를 기원합니다.

2024년 1월

포항가속기연구소 4GSR구축지원단 부단장

박성주

머리말

많은 관심속에 4GSR 구축이 진행되고 있습니다. 특히, 빔라인의 경우, 과학자들이 직접 활용하여 연구결과를 도출해 내는 수단이 되고 있기 때문에, 각 빔라인에서 사용 가능한 빛 에너지, 실험기법, 성능, 실험장치의 구성 등은 많은 과학자들에게 첨예한 관심사입니다.

지난 2021년 4월, 다양한 분야의 전문가들로 구성된 빔라인 기술검토위원회를 통해 많은 논의를 거쳐 4GSR에 구축되어질 초기 10기 빔라인이 선정되었습니다. 이 10기의 빔라인이 4GSR 빔라인의 모든 것을 대변하지는 않습니다. 이것을 시작으로 앞으로 수십년은 지속해서 발전시켜야 할 4GSR 빔라인의 시대를 여는 마중물로 생각하면 좋겠습니다. 이 10기 빔라인은 3기의 산업체 우선 지원 빔라인과 7기의 기초원천연구지원 빔라인으로 구성되어 있습니다. 실험기법으로는 소각산란분광학, 광전자분광학, 흡수분광학, 단백질 결정구조 분광학 그리고 이미징 분광학 등이 있습니다.

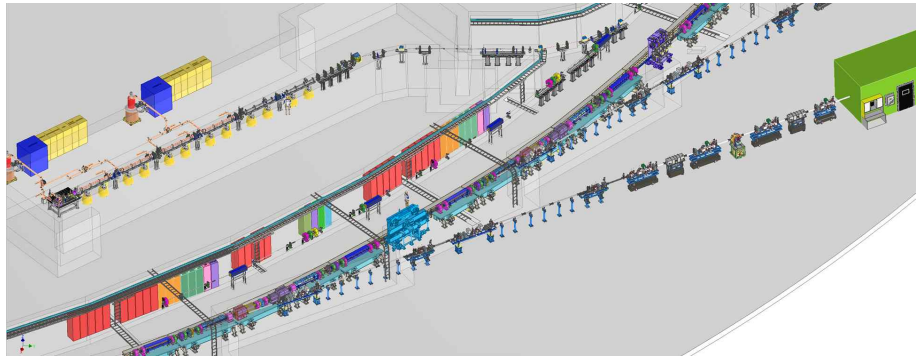
포항가속기연구소 4GSR 구축지원단 빔라인과학/장치공학팀은 이들 빔라인들이 4GSR의 특성인 고휘도, 결맞음성 그리고 작은 에미턴스(emittance)들을 잘 활용할 수 있도록 빔라인 및 실험장치를 설계하고, 동시에 전 세계적인 빔라인으로 자리매김할 수 있도록 국내외의 과학자들과 많은 논의를 하고 있습니다. 2023년 한 해 동안 10기 빔라인을 위한 광원의 종류, 휨 자석 (Bending Magnet) 그리고 삽입장치 (Undulator) 및 특성을 결정하고, 각 빔라인의 레이아웃을 결정했으며, 이들 빔라인 및 실험장치를 구체화하기 위한 상세 설계를 진행하였습니다.

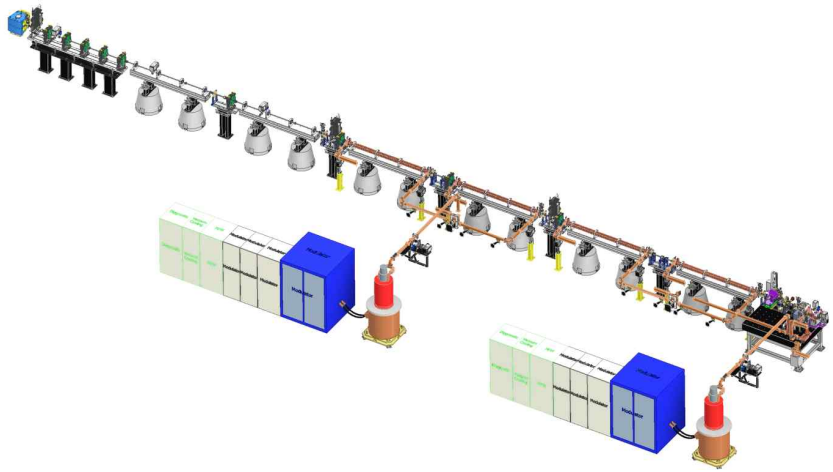
초기 10기 빔라인들이 앞으로의 4GSR 빔라인 활용에서의 마중물 역할을 다하기 위하여, 각 빔라인에서 제안하고 있는 기본 특성을 성취하고, 동시에 이들 빔라인들을 활용하고자 하는 과학자들의 의견 역시 진지하게 듣고 설계에 반영하였습니다. 그리하여, 각 빔라인 및 실험장치들을 세계적인 과학 발전과 함께하는 최고 성능의 빔라인 및 실험장치로 구축될 것입니다.

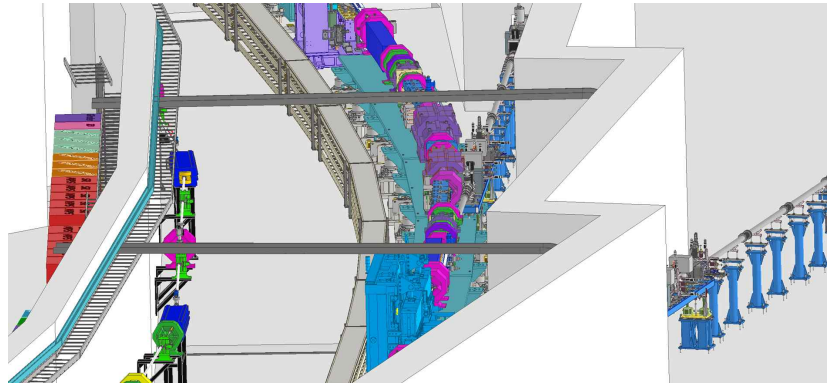
2024년 1월

포항가속기연구소 4GSR구축지원단 빔라인과학/장치공학팀 팀장

김기정







1장. TDR 요약

1 저장링 래티스 보완 ('23.2 파라미터 관리위원회)

○ 저장링 입사효율 향상을 위하여 28개 ID 직선구간 중 2개의 직선구간에 12.1 m의 high-beta 직선구간을 도입, 저장링 선형에 따른 부스터 선형 설계

1. 보완사유

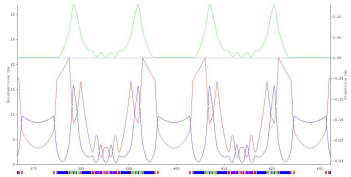
○ 다목적 방사광가속기 국제자문회의('22.10) 시 최상의 삽입 장치 휘도 달성을 위한 직선 섹션의 베타함수 최적화 권고로 저장링 입사효율 향상을 위한 저장링 래티스 보완이 필요

<다목적 방사광가속기 국제자문회의('22.10.13) 권고사항>
□ 최상의 언듈레이터 휘도 달성을 위하여 직선(ID) 섹션의 베타함수를 최적화할 것을 권장

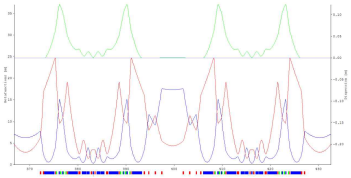
2. 주요내용

○ 28개의 ID 직선구간(수정 길이 6.06 m) 중 입사구간을 포함한 2개의 직선구간에 12.1 m의 high-beta 직선구간을 도입하여 Dynamic Aperture를 크게 하므로 다음과 같은 장점을 지니며, 주요 파라미터인 빔에너지, 저장링 둘레, 빔에미턴스 등은 변동이 없음

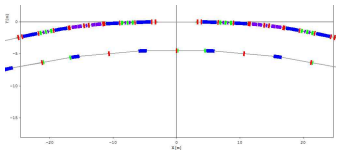
- **(ID 직선구간 베타함수 감소)** ID 직선구간 베타함수가 8.79 m에서 6.25 m로 감소하여 ID 방사광의 휘도가 30% 증가함
- **(입사 킥커 설계 용이)** 길어진 입사구간을 활용하여 입사 킥커의 세기를 3 mrad 수준으로 낮출 수 있음 (PLS-II의 경우 9 mrad)



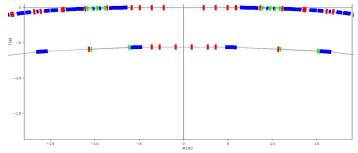
[기존 저장링 래티스 twiss function]



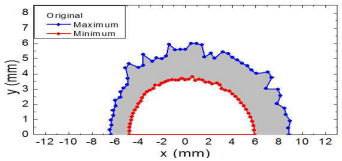
[수정된 래티스의 twiss function]



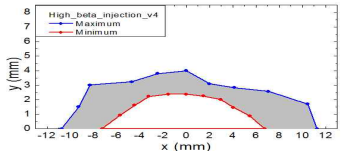
[기존 저장링 입사부와 부스터링]



[수정된 저장링 입사부와 부스터링]

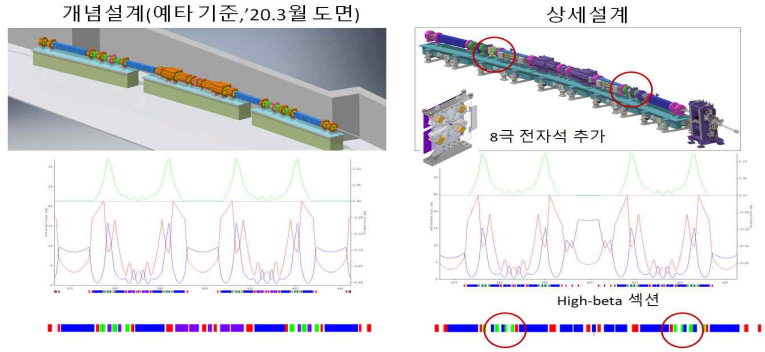


[기존 래티스에서의 dynamic aperture]



[수정된 래티스에서의 dynamic aperture]

○ 팔극 전자석을 추가 반영하여 전자빔의 2차 모멘텀(Second order tune dependence on momentum)을 줄이는 효과로 전자빔의 수명 증가



< 다목적방사광가속기 가속장치 주요 파라미터 >

구 분	CDR	TDR
Energy / GeV	4	4
Symmetry / Sub-Symmetry	28	2 / 28
Straight Sections: No & Length / m	28 / 6.5	28 / 6.06 **(Injection Section: 9.5112 m)**
저장링 Circumference / m	798.8	799.3
저장링 Nat. Emittance / pm rad	58 (CB: 1.6 T) 61 (CB: 2.0 T)	61.57 (without IDs) 52.55 (with 9 IDs)
Regular hor/ver @ coupling	55 / 6 @ 10%	58 / 6 @ 10%
Energy spread [%]	0.12	0.126
Bunch Length / mm	4.6 (w/o HC) 16.1 (with HC)	3.6 (w/o HC) 14.4 (with HC)
Horizontal beta function at the ID center / m	8.79	6.25
저장링 RF frequency / MHz	499.877	499.593
최대 빔 전류 / mA	400	400
저장링 Harmonic Number	1332	1332
부스터 Circumference / m	756.86	772.89
부스터 Harmonic Number	1262	1288
부스터 Nat. Emittance / nm rad	6.906	7.886
부스터 Injection Energy / GeV	0.2	0.2
부스터 Extraction Energy GeV	4	4
부스터 RF frequency / MHz	499.879	499.594
Linac RF frequency / MHz	2999.27	2997.56

2 빔라인 파라미터 확정 ('23.10 파라미터 관리위원회)

○ 「다목적방사광가속기구축사업」의 예비타당성조사 시 확정한 빔라인 사양을 준수하며 이용자그룹의 의견을 수렴하여 최적화된 파라미터 확정

빔라인명	예타보고서 사양	상세 설계 사양	활용	비고
1. 바이오신약 – 바이오소각산란 (산업우선지원)	• 빔에너지: 5~20 keV • 실험기법: Bio-SAXS	• 빔에너지: 5~20 keV (동일) • 실험기법: Solution SAXS • 분해능: 8~4000 Å (SAXS) △E/E < 2 × 10^{-4} • 광원: IVU24	바이오	• 8~25 keV 최적화 • SDD (시료와 검출기 사이 거리) 6 m까지 확보 • 자동화시스템 도입
2. 소재 구조 분석 (산업우선지원)	• 빔에너지: 5~40 keV • 실험기법: XRD (Powder XRD), XAFS	• 빔에너지: 5~40 keV (동일) • 실험기법: Powder XRD, XAFS • 분해능: △E/E < 2 × 10^{-4} • 광원: IVU24	소재, 에너지	• HRPD, XAFS 실험기법 구현
3. 연엑스선 나노프로브 (산업우선지원)	• 빔에너지: 0.1~5 keV • 빔크기: 1 μm 이하 필수 • 실험기법: XPS, XAS	• 빔에너지: 0.1~5 keV (동일) • 빔크기: 100 nm~10 μm • 분해능: △E/E < 1.5 × 10^{-4} @400 eV, 4 keV • 실험기법: XPS, XAS • 광원: EPU78 + IVU24	반도체, 소재	• EPU+IVU Tandem ⇒ 0.1~5 keV • 2개의 Branch 빔라인 설계 • Beam size - 100 nm (Soft X-ray) 이하 - 10 μm (Tender X-ray) 이하
4. 나노스케일 각분해 광전자분광	• 빔에너지: 0.1~2 keV • 빔크기: < 100(H) × 100(V) nm^2 • 공간 분해능: 30 nm 이하 • 실험기법: Nano-ARPES	• 빔에너지: 0.05~2 keV (범위 충족) • 빔크기: 100 nm~10 μm • 공간 분해능: 100 nm 이하 • 분해능: △E/E < 10^{-4} • 실험기법: ARPES • 광원: EPU98	반도체, 소재	• 50~200 eV 최적화 • 2개의 Branch 빔라인 설계` • Beam size - 100 nm (NanoARPES) 이하 - 10 μm (MicroARPES) 이하
5. 결맞음 X-선 회절	• 빔에너지: 3~30 keV • 빔크기: 1 μm 이하 • 실험기법: XRD, CDI	• 빔에너지: 3~30 keV (동일) • 빔크기: 1.5 μm • 실험기법: XRD, CDI • 광원: IVU22	반도체, 소재, 지질, 화학	• Micrometer beam Focusing
6. 결맞음 소각산란	• 빔에너지: 4~40 keV • 실험기법: SAXS/WAXS (GI기법 포함), XPCS	• 빔에너지: 8~30 keV (실험기법 충족) • 빔크기: < 5 μm (XPCS) < 50 μm (SAXS/WAXS) △E/E < 1 × 10^{-4} • 실험기법: SAXS/WAXS (GI기법 포함), XPCS • 광원: IVU20	소재, 화학	• 결맞음 빔의 확보 (Wave front preserve)
7. 실시간 엑스선 흡수분광학	• 빔에너지: 5~40 keV • 실험기법: XAFS	• 빔에너지: 4~40 keV (범위 충족) • 빔크기: 100 μm 미만 • 분해능: △E/E < 2 × 10^{-4} • 실험기법: XAFS • 광원: IVU24	에너지, 환경, 소재, 지질	• XES 기반 실시간 엑스선 흡수 분광 실험장치 고려
8. 생체분자 나노 결정학 빔라인	• 빔에너지: 5~20 keV • 분해능: 1 Å 이하 • 실험기법: MX	• 빔에너지: 5~20 keV (동일) • 빔크기: 1 × 1 ~ 13 × 13 $μm^2$ • 분해능: 0.7~3.5 Å • 실험기법: MX • 광원: IVU20	바이오	• 8~25 keV 최적화 • NanoMX • 신약 개발 지원
9. 고에너지 현미경 빔라인	• 빔에너지: 5~100 keV • 분해능: 0.1 μm (100 m 기준) • 실험기법: Projection imaging	• 빔에너지: 5~100 keV (동일) • 분해능: 0.3~0.5 μm • 실험기법: Projection imaging • 광원: Centerbend • 시료위치: 100 m (실험허치: 120 m)	소재, 에너지, 바이오	• Bending Magnet • 근거리 허치 제외 (백색광 사용)
10. 나노 프로브	• 빔에너지: 5~25 keV • 실험기법: Ptychography, XRS, XRF	• 빔에너지: 5~25 keV (동일) • 빔크기: 50 nm 이하 @10 keV • 분해능: △E/E < 1.5 × 10^{-4} • 실험기법: Ptychography/XRF • 광원: IVU24	반도체, 소재, 에너지, 환경, 화학	• Nano beam focusing 추구 • 5f-블록원소 및 RI물질 위한 설계 → Radiation Safety Protocol 준비 후 실험 가능

3 선형가속기 전자총 방식(열음극→광음극) 확정에 따른 설계

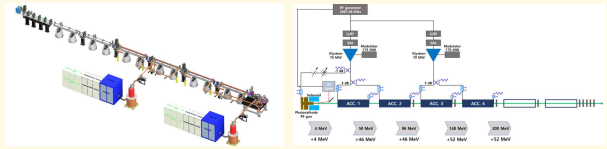
<사양변경 추진 경과>

· 전자총 방식을 광음극 전자총으로 결정 ('22.4월, CDR 내부검토위원회)

※ 사업단(KBSI) 3명, 포항가속기연구소 7명, 기초과학연구원(IBS) 1명 참여

· 검증된 사양, 전자빔 저에미턴스 특성 부합 등으로 사양변경은 타당함, 전자총 시스템 예비품 구성 필요 ('22.5월, 연구재단 전문평가위원회)

· 사양변경을 최종 승인함 ('22.10월, 사업추진위원회)



< 선형가속기 구성도 >

○ 선형가속기는 200 MeV의 에너지를 갖는 전자빔을 생성하며, 개념설계 당시 PLS-II 구축 경험에 기초하여 검토한 열음극 전자총 대신, 성능, 제작, 운영에 있어서 우위를 갖는 RF 광음극 전자총을 사용함에 따라, 특징적으로 낮은 emittance와 낮은 에너지 분포를 가짐

< 선형가속기 parameters >

Parameters	Single-bunch mode	Multi-bunch mode
Energy	200 MeV	200 MeV
Frequency	2997.56 ± 0.1 MHz	2997.56 ± 0.1 MHz
Emittance (at 200 MeV)	≦ 10 nm	≦ 10 nm
Bunch charge (charge stability)	0.01 to 1 nC (2%)	1 to 3 nC (5%)
Pulse duration	6~8 ps FWHM	≈128 ns (64 bunches)
Repetition rate	2 Hz (60 Hz)	2 Hz

○ 광음극 전자총은 Cu-cathode를 채택하였고 주파수는 2997.56 MHz이며, PAL-XFEL에서 개발된 광음극 전자총을 참고하여 설계

※ 열음극 전자총은 낮은 빔에너지, 긴 펄스로 빔품질이 낮음 (에미턴스 200 nm), 광음극 전자총은 높은 에너지, 저에미턴스 (10 nm) 이하로 입사 시 빔손실 없음

< 전자총 시스템 설계 parameters >

Parameters	Single bunch mode		Multi-bunch mode	
	CDR	TDR	CDR	TDR
Beam energy	100 kV	4 MeV	100 kV	4 MeV
Charge	0.01~2.5 nC	0.01~1 nC	3~5 nC	1~3 nC
Pulse length	≤ 1 ns	≤ 20 ps	100~400 ns	≈128 ns (64 pulses)
Repetition rate	2 Hz	2 Hz	2 Hz	2 Hz

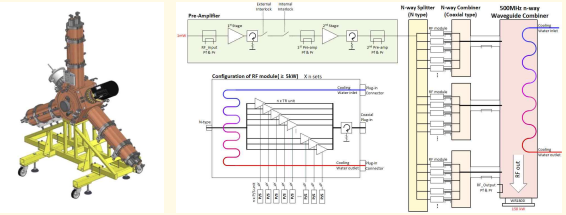
④ 저장링 고주파 방식 확정 (상전도 고주파 방식)

<사양변경 추진 경과>

· 저장링 고주파시스템 방식을 상전도 방식으로 결정 ('22.4월, CDR 내부검토위원회)
※ 사업단(KBSI) 3명, 포항가속기연구소 7명, 기초과학연구원(IBS) 1명 참여

· 국내외 **초전도 공동기 고장 발생 시 신속한 대응이 어려운 점**과 **수리 기간이 장기간 필요**한 초전도에 비하여 효과적인 유지관리 및 운영비용 절감 기대, 사업기간 내 구축 용이하며 극저온 냉각시설에 대한 해외 의존도를 낮출 수 있고 **이용자에게 안정적인 서비스를 제공할 수 있어** 상전도 방식(초전도→상전도)이 합리적임 ('22.5월, 연구재단 전문평가위원회)

· 사양변경을 최종 승인함 ('22.10월, 사업추진위원회)



< 상전도 고주파 공동기(HOM Damped Cavity)와 고출력 RF 시스템(SSPA) >

○ 4GSR은 3세대에 비해서 emittance가 낮기 때문에 Cavity High Order Mode (HOM)가 빔 불안정성에 많은 영향을 미치게 되므로 HOM 영향을 줄이기 위해서 cavity에 HOM absorber 적용한 설계가 도입됨

○ 저장링에서 한 바퀴마다 자석에 의하여 1.098 MeV, 삽입장치에 의하여 0.720 MeV 그리고 진공챔버 등에 의해 0.060 MeV가 손실되므로 한 바퀴당 손실 총 에너지는 1.878 MeV이므로 손실 에너지를 보충하고 안정적인 빔 운영을 위해 3.5 MV RF voltage 결정되었고 이러한 RF voltage는 EU-HOM Damped Cavity를 사용하여 생성함

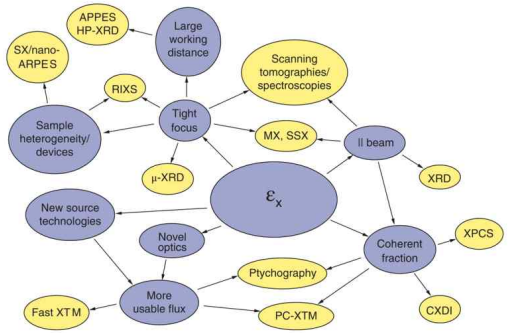
< 고주파 주요 parameters >

Parameters	CDR	TDR
RF frequency [MHz]	499.8773	499.593
# cavities / total Voltage	3 × 초전도 / 3.5 MV	10 × nc / 3.5 MV
# buckets: total / gap	1332 / 267	1332 / 308
Harmonic RF system	3rd, passive, 초전도	3rd, active, NC, 800 kV
Average current [mA]	400	400
Top up operation	yes	yes
Accelerating Voltage [MV]	3.5	3.5
Revolution frequency [MHz]	0.37528	0.37528
Total energy loss per turn [MeV]	1.8	1.878

2장. 연구분야

2.1 서론

포항의 Pohang Light Source-II (PLS-II)에 이어 2023년 현재 충북 오창에 건설이 진행되고 있는 다목적 방사광가속기(이하 4GSR)는 기존 3세대에서 사용해 오던 DBA (Double bend achromat) 혹은 TBA (Tripple bend achromat) lattice system을 MBA (Multi-bend achromat)으로 전환함으로써 전자빔의 emittance를 획기적으로 줄인 것이 특징 중 하나다. 이로 인해, Photon Brilliance 및 emittance는 10^{22}~10^{23} photons/mm^2/mrad^2/0.1% bandwidth, 100 pm·rad로 되어, 빛 에너지에 따라 정도의 차이는 있으나, 약 100배 정도의 개선된 성능을 확보할 것으로 예측되며, 공간 및 에너지 분해능 개선이 기대된다. 작은 빔의 크기, 고휘도, Coherence fraction의 증가는 4GSR의 대표적인 특성이며, 이들 특성을 잘 활용할 수 있는 실험기법들은, 분광학뿐만 아니라, Scanning 기반의 실험들, RIXS, Coherent Diffraction Imaging (CDI), XPC, 타이코그래피, In-situ 실험기법들 등 매우 다양하다. 또한, 4GSR의 도래로 인해 개선된 성능은 <그림 2.1.1>에서 보는 바와 같이 직간접적으로 다양한 실험기법에 영향을 주고, 새로운 실험기법의 도입을 가능하게 할 것으로 예측된다.



<그림 2.1.1> 4GSR의 등장으로 인한 실험적 방법 및 기술들 간의 상호 영향

2.1.1 초기 10기 빔라인

한국을 비롯하여 최근 전 세계의 방사광가속기는 3세대 방사광의 높은 활용도를 기반으로 4세대 방사광가속기(4th Generation Synchrotron Radiation)로의 성능향상을 추진하고 있다. 스웨덴의 MAX-IV를 시작으로 브라질의 시리우스, 미국의 APS-U, 스위스의 SLS-II, 영국의 DLS-II 그리고 미국의 ALS-U 등은 4GSR로의 성능향상이 완료되었거나, 현재 진행 중 혹은 앞으로 계획 중인 facility의 예로 들 수 있다. 한국의 다목적방사광가속기인 4GSR은 2027년 12월 완공을 목표로 충북 청주 근교의 오창에 건설이 진행되고 있다. 초기에 건설될 10기 빔라인은 현재 PLS-II의 빔라인 활용도와 4GSR의 빔특성을 고려하여, 각 분야의 전문가로 구성된 빔라인기술검토회의 위원들의 심도 있는 논의를 통해 최종 선정되었다.

4GSR에 건설될 초기 10기 빔라인은 아래의 <표 2.1.1.1>에 나타나 있다. 이들 빔라인 중 3기의 빔라인, ① 바이오 신약-바이오 소각산란 (BioPharma-BioSAXS), ② 소재 구조 분석 (Material Structure Analysis), ③ 연엑스선 나노프로브 (Soft X-ray NanoProbe) 빔라인은 산업체 우선 빔라인으로, 산업체에서 필요로 하는 High throughput 기술 위주의 빔라인으로 구축될 예정이다. 나머지 7기 빔라인, ④ 나노스케일 각분해 광전자분광 (Nanoscale Angle Resolved Photoemission Spectroscopy, NanoARPES), ⑤ 결맞음 X-선 회절 (Coherent X-ray Diffraction, CoXRD), ⑥ 결맞음 소각산란빔라인 (Coherent Small-angle X-ray Scattering, CoSAXS), ⑦ 실시간 엑스선 흡수분광학 (Real-Time X-ray Absorption Fine Structure, Real-TimeXAFS), ⑧ 생체분자 나노결정학빔라인 (Bio-Nano Crystallography, BioNC), ⑨ 고에너지 현미경 (High Energy Microscopy, HEM), ⑩ 나노프로브 (Nano-Probe) 빔라인은 선도적 기초 원천 연구 빔라인으로 건설될 예정이다.

<표 2.1.1.1> 4GSR 초기 10기 및 빔라인의 사양

빔라인	예타보고서 사양	상세설계 사양	활용	비고
1. 바이오신약 – 바이오소각산란 (산업우선지원)	• 빔에너지: 5~20 keV • 실험기법: Bio-SAXS	• 빔에너지: 5~20 keV (동일) • 실험기법: Solution SAXS • 분해능: 8~4000 Å (SAXS) $\triangle E/E < 2 \times 10^{-4}$ • 광원: IVU24	바이오	• 8~25 keV 최적화 • SDD (시료와 검출기 사이 거리) 6 m까지 확보 • 자동화시스템 도입
2. 소재 구조 분석 (산업우선지원)	• 빔에너지: 5~40 keV • 실험기법: XRD (Powder XRD), XAFS	• 빔에너지: 5~40 keV (동일) • 실험기법: Powder XRD, XAFS • 분해능: $\triangle E/E < 2 \times 10^{-4}$ • 광원: IVU24	소재, 에너지	• HRPD, XAFS 실험기법 구현
3. 연엑스선 나노프로브 (산업우선지원)	• 빔에너지: 0.1~5 keV • 빔크기: 1 μm 이하 필수 • 실험기법: XPS, XAS	• 빔에너지: 0.1~5 keV (동일) • 빔크기: 100 nm~10 μm • 분해능: $\triangle E/E < 1.5 \times 10^{-4}$ @400 eV, 4 keV • 실험기법: XPS, XAS • 광원: EPU78 + IVU24	반도체, 소재	• EPU+IVU Tandem ⇒ 0.1~5 keV • 2개의 Branch 빔라인 설계 • Beam size - 100 nm (Soft X-ray) 이하 - 10 μm (Tender X-ray) 이하
4. 나노스케일 각분해 광전자분광	• 빔에너지: 0.1~2 keV • 빔크기: < 100(H) × 100(V) nm² • 공간 분해능: 30 nm 이하 • 실험기법: Nano-ARPES	• 빔에너지: 0.05~2 keV (범위 충족) • 빔크기: 100 nm~10 μm • 공간 분해능: 100 nm 이하 • 분해능: $\triangle E/E < 10^{-4}$ • 실험기법: ARPES • 광원: EPU98	반도체, 소재	• 50~200 eV 최적화 • 2개의 Branch 빔라인 설계 • Beam size - 100 nm (NanoARPES) 이하 - 10 μm (MicroARPES) 이하
5. 결맞음 X-선 회절	• 빔에너지: 3~30 keV • 빔크기: 1 μm 이하 • 실험기법: XRD, CDI	• 빔에너지: 3~30 keV (동일) • 빔크기: 1.5 μm • 실험기법: XRD, CDI • 광원: IVU22	반도체, 소재, 지질, 화학	• Micrometer beam Focusing
6. 결맞음 소각산란	• 빔에너지: 4~40 keV • 실험기법: SAXS/WAXS (GI기법 포함), XPCS	• 빔에너지: 8~30 keV (실험기법 충족) • 빔크기: < 5 μm(XPCS) < 50 μm (SAXS/WAXS) $\triangle E/E < 1 \times 10^{-4}$ • 실험기법: SAXS/WAXS (GI기법 포함), XPCS • 광원: IVU20	소재, 화학	• 결맞음 빔의 확보. (Wave front preserve)
7. 실시간 엑스선 흡수분광학	• 빔에너지: 5~40 keV • 실험기법: XAFS	• 빔에너지: 4~40 keV (범위 충족) • 빔크기: 100 μm 미만 • 분해능: $\triangle E/E < 2 \times 10^{-4}$ • 실험기법: XAFS • 광원: IVU24	에너지, 환경, 소재, 지질	• XES 기반 실시간 엑스선 흡수분광 실험장치 고려
8. 생체분자 나노 결정학 빔라인	• 빔에너지: 5~20 keV • 분해능: 1 Å 이하 • 실험기법: MX	• 빔에너지: 5~20 keV (동일) • 빔크기: 1 × 1 ~ 13 × 13 μm² • 분해능: 0.7~3.5 Å • 실험기법: MX • 광원: IVU20	바이오	• 8~25 keV 최적화 • NanoMX • 신약개발 지원
9. 고에너지 현미경 빔라인	• 빔에너지: 5~100 keV • 분해능: 0.1 μm (100 m 기준) • 실험기법: Projection imaging	• 빔에너지: 5~100 keV (동일) • 분해능: 0.3~0.5 μm • 실험기법: Projection imaging • 광원: Centerbend • 시료위치: 100 m (실험허치: 120 m)	소재 에너지 바이오	• Bending Magnet • 근거리 허치 제외 (백색광 사용)
10. 나노 프로브	• 빔에너지: 5~25 keV • 실험기법: Ptychography, XRS, XRF	• 빔에너지: 5~25 keV (동일) • 빔크기: 50 nm 이하@10 keV • 분해능: $\triangle E/E < 1.5 \times 10^{-4}$ • 실험기법: Ptychography/XRF • 광원: IVU24	반도체, 소재, 에너지, 환경, 화학	• Nano beam focusing 추구 • 5f-블록원소 및 RI 물질 위한 설계→ Radiation Safety Protocol 준비 후 실험 가능

2.1.2 4GSR의 저장링 주요 변수

4GSR의 광원은 기존 3GSR과 비교하여 더 높은 광자빔 에너지와 경 X-선 영역에서 최대 100배 이상의 밝은 brilliance를 가져 다양한 스펙트럼에서 더욱 밝은 방사광을 생성할 수 있을 것으로 예측된다. 따라서, 더욱 미세한 실험이 가능할 것으로 기대되며, 반도체, 신소재, 이차 전지, 신약 개발, 생명과학, 디스플레이 등의 연구가 발전할 것으로 기대된다. <표 2.1.1.1>, <표 2.1.2.1> 그리고 <표 2.1.2.2>는 현재 설계 중인 저장링의 주요 변수 <표 2.1.1.1> 및 삽입 장치 <표 2.1.2.1>과 휨 자석 <표 2.1.2.2>에서의 빔크기 (σ_x, σ_y) 및 빔 Divergence (σ'_x, σ'_y)이다.

<표 2.1.2.1> 4GSR 저장링의 주요 변수

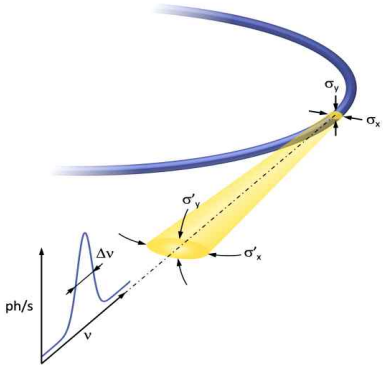
Parameter	Value	Unit
Energy	4.0	[GeV]
Circumference	799.297	[m]
Current	400.0	[mA]
Harmonic number	1332	[-]
Number of bunches	1024	[-]
Charge per bunch	1.041	[nC]
Charge per bunch	1.0	[nC]
Sigma z (without HC / with HC)	3.664 / 14.655	[mm]
Natural emittance	61.567	[pm]
Coupling Constant	0.1	[-]
Horizontal emittance	58.398	[pm]
Vertical emittance	5.839	[pm]
Energy Spread	0.126378	[-]

<표 2.1.2.2> 삽입 장치(Insertion Device, ID)에서의 전자빔의 크기 및 빔 divergence

Parameter	Value	Unit
Beta_x at ID	6.334	[m]
Beta_y at ID	2.841	[m]
Alpha_x at ID	-0.000002	[-]
Alpha_y at ID	-0.000002	[-]
Eta_x at ID	0.000204	[m]
Eta_y at ID	0	[m]
Etap_x at ID	0.000204	[-]
Etap_y at ID	0	[-]
Sigma x (horizontal beam size) at ID	19.235	[μm]
Sigma x' (horizontal divergence) at ID	3.036	[μrad]
Sigma y (vertical beam size) at ID	4.082	[μm]
Sigma y' (vertical divergence) at ID	1.434	[μrad]

<표 2.1.2.3> 휨 자석(Bending Magnet, BM)에서의 전자빔의 크기 및 빔 divergence

Parameters	Values	Unit
Beta_x at center bend	0.355511	[m]
Beta_y at center bend	3.412	[m]
Alpha_x at center bend	0.000002	[-]
Alpha_y at center bend	0.000002	[-]
Eta_x at center bend	0.000653	[m]
Eta_y at center bend	0	[m]
Etap_x at center bend	0.000653	[-]
Etap_y at center bend	0	[-]
Sigma x (horizontal beam size) at center bend	4.631	[μm]
Sigma x' (horizontal divergence) at center bend	12.817	[μrad]
Sigma y (vertical beam size) at center bend	4.539	[μm]
Sigma y' (vertical divergence) at center bend	1.308	[μrad]



<그림 2.1.2.1> Schematic of the parameters source sizes ($\sigma_{x,y}$) and divergences ($\sigma'_{x,y}$)

2.1.3 4GSR의 광원

초기 10기 빔라인을 위한 광원으로 1개의 휨 자석(Bending Magnet, BM), 2개의 Elliptically Polarized Undulator (EPU), 그리고 8개의 In-vacuum undulator (IVU)가 도입될 예정이다.

9번 빔라인 고에너지현미경(HEM)의 경우, BM (Center bend)을 광원으로 활용할 예정이며, BM의 자기장의 크기는 2 Tesla이고, 자석의 길이는 186 mm이다. 이때 BM의 bending radius는 6.6 m이다.

4번 빔라인 NanoARPES는 주기가 98 mm인 타원편광삽입 장치를 광원으로 사용할 예정이다. 3번 빔라인 연 X-선 나노프로브는 0.1~5 keV의 빛 에너지를 사용 가능하게 설계해야 하기 때문에, 광원으로 주기가 98 mm인 타원편광삽입 장치와 24 mm인 in-vacuum undulator를 광원으로 사용할 예정이다.

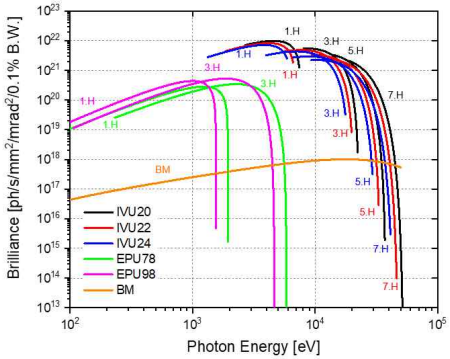
이 외의 경 X-선 영역을 필요로 하는 빔라인들은 각각의 주기가 20 mm, 22 mm인 in-vacuum undulator를 광원으로 사용할 예정이다. <표 2.1.3.1>은 각 빔라인을 위한 광원의 요약표이다.

<표 2.1.3.1> 빔라인 광원 요약

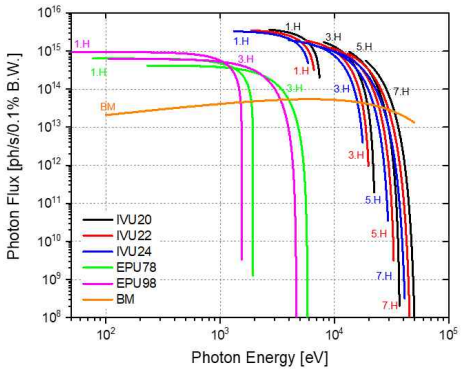
BL #	Exp.	Type	Periods length [mm]	# of Periods	Total Length [mm]	PE (Min) [keV]	PE (Max) [keV]
1	BioPharma-BioSAXS	IVU	24	125	3000	5	20
2	Mat. Structure	IVU	24	125	3000	5	40
3	Soft X-ray NanoProbe	EPU	78	25	2000	0.1	3
		IVU	24	62	1500	2	5
4	NanoARPES	EPU	98	36	3600	0.05	2
5	CoXRD (CDI)	IVU	22	136	3000	3	30
6	CoSAXS	IVU	20	150	3000	4	40
7	RealTimeXAFS	IVU (Tapered)	24	125	3000	5	40
8	BioNC	IVU	20	150	3000	5	20
9	HEMicroscopy	Bending Magnet				5	100
10	NanoProbe	IVU	24	125	3000	5	25

○ Brilliance 및 Photon Flux

이들 광원으로부터 방출된 빛 에너지의 Brilliance 및 Photon Flux는 <그림 2.1.3.1>과 <그림 2.1.3.2>에 나타나 있다.



<그림 2.1.3.1> 4GSR 초기 10기 빔라인의 광원에 따른 휘도



<그림 2.1.3.2> 4GSR 초기 10기 빔라인의 광원에 따른 광속

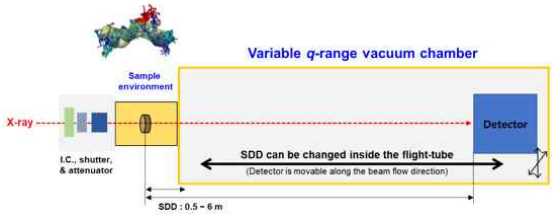
<표 2.1.3.2> Specification of Photon Source

Undulator	Unit	IVU20	IVU22	IVU24	EPU78	EPU98	BM
Period length	[mm]	20	22	24	78	98	-
Periods	-	150	136	125	25	36	-
Total length	[m]	3.0	3.0	3.0	2.0	3.62	0.186
K_{max}	-	1.90481	2.3007	2.7458	K_V, 6.95 K_C, 4.39 K_H, 5.65	K_V, 9.24 K_C, 6.07 K_H, 8.05	-
B_{max}	[T]	1.02	1.1271	1.2253	B_V, 0.954 B_C, 0.602 B_H, 0.776	B_V, 1.0096 B_C, 0.6633 B_H, 0.8799	2
Gap_{min}	[mm]	5	5	5	15	15	-
ε_{1st}	[eV]	2699.6	1893.9	1336.4	77.48/ 96.31/ 114.77	35.49/ 40.97/ 46.39	(ε_c) 21280.8
Total power	[kW]	12.46	14.97	17.94	Max. : 8.60	Max. : 13.75	1357.83
Max. power density	[W/mrad^2]	164.1	164.13	165.5	24.28	38.06	Lin. Pow. Density (kW/mrad) 0.216
Max. central cone	[mrad]	Σ_x0.0092 Σ_y0.0089	Σ_x0.0109 Σ_y0.0106	Σ_x0.01292 Σ_y0.01265	Σ_x0.06512 Σ_y0.06507	Σ_x0.0724 Σ_y0.0724	-

2.1.4 10기의 빔라인 소개

가. 바이오 신약-바이오 소각산란 (BioPharma-BioSAXS)

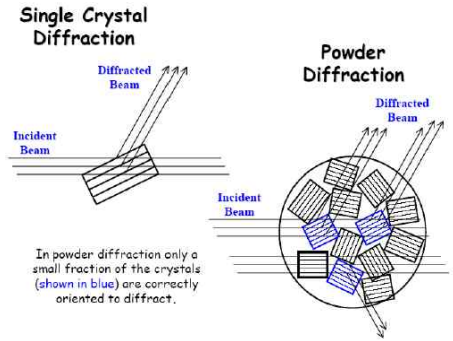
소각 X-선 산란 기법은 다양한 종류의 생물 고분자, 고분자 블렌드, 고분자 공중합체, 나노입자, 액정, 콜로이드, 합금 및 금속 등, 유/무기 시스템 재료의 구조분석을 신속하고 정확하게 하기 위해 이용되는 강력한 기법이다. 바이오신약-바이오소각산란 빔라인에서는 용액 소각 X-선 산란 기법을 활용하여 용액 상태의 단백질, DNA, RNA, 지질, 바이러스 등 시료에 대한 분자 구조 특성 정밀 분석이 가능하므로, 생물학적 거대 분자의 세부 사항까지 분석이 가능하다.



<그림 2.1.4.1> Variable q-range vacuum chamber 모식도

나. 소재 구조 분석 (Material Structure Analysis)

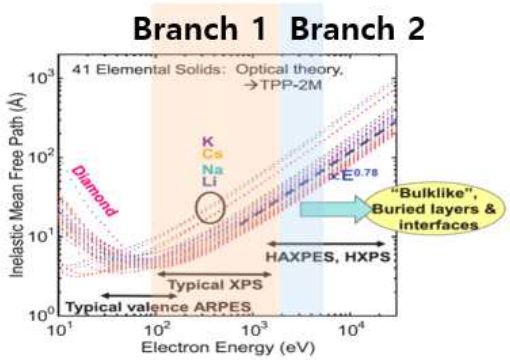
X-선 분말 회절법은 결정성을 띠는 모든 재료에 대한 측정이 가능하다. 분말 회절법은 규칙 된 원자 배열을 가지는 결정질 재료에 X-선을 조사하여 결정격자 내 원자 사이의 거리를 분석함으로써 결정구조를 파악하는 기법이다. 단색 X-선이 결정질 재료에 조사되면 재료 내 원자 사이의 거리에 따라 Bragg 법칙에 만족하는 회절 X-선 데이터를 얻을 수 있으며, 측정 단색 빔의 에너지를 통해 회절 데이터에서 원자 사이 거리를 분석할 수 있다. 이는 알려진 고유 원자간 거리(d-spacing) 정보를 통해 원자들의 상대적 위치(간격)를 분석하여 결정구조를 파악한다. 소재 구조 분석 (Material Structure Analysis) 빔라인은 5~40 keV의 고에너지 영역대를 제공하는 경 X-선 빔라인이며, 산업 우선 지원 빔라인으로 구축될 예정이다. 소재 구조 분석 빔라인은 국내외 기초과학 연구와 산업체의 기술개발 연구에 광범위하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.



<그림 2.1.4.2> X-선 분말 회절법을 이용한 단결정 X-선 회절 측정법과 다결정 X-선 회절 측정법

다. 연엑스선 나노프로브 (Soft X-ray NanoProbe)

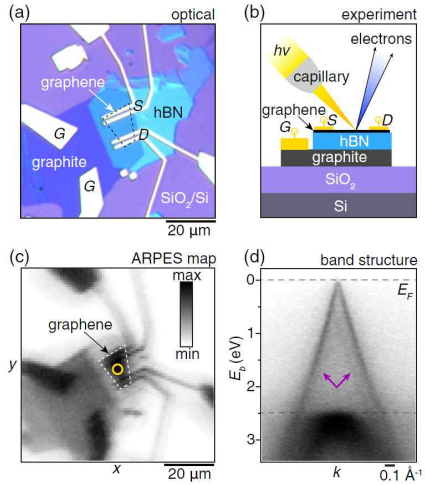
Soft X-ray NanoProbe 빔라인은 전통적인 soft X-ray 영역(수 eV~2,000 eV)을 넘어 최근 각광받고 있는 tender X-ray 영역(2,000 eV~5,000 eV)을 포함하는 광원을 제공할 수 있는 빔라인으로 구축될 예정이다. 이 빔라인을 활용한 실험기법은 이미 화학적 및 전자적 특성 연구 분야에서 뛰어난 성과를 내고 있는 광전자분광학(Photoemission Spectroscopy)과 X-선 흡수분광학(X-ray Absorption Spectroscopy)이 적용될 예정이다. 최근에는 고집적 반도체 소자, 친환경 촉매, 이차 전지 등과 같은 다양한 소재 및 재료 연구의 중요성이 높아짐에 따라 고공간 분해능 및 sub-surface (interface 및 bulk)에서 분석 가능한 깊은 probing-depth에서의 특성 분석을 필요로 하는 실험 수요가 높아지고 있다. 이 빔라인은 0.1~5 keV의 넓은 영역의 빛 에너지를 cover 해야 하므로, 광원을 영역별 두 개로 분리하여 soft X-ray 고공간분해 nanoscopy 이미징에 집중한 Soft X-ray-XPS/XAS (Branch 1) 실험장치와 tender X-ray를 활용한 Tender-XPS/XAS (Branch 2) 실험장치가 구축될 예정이다. 이를 통해 더 많은 응용 분야에서 경쟁력 있는 빔라인 실험장치로 자리매김할 수 있을 것으로 기대한다.



<그림 2.1.4.3> 전자의 운동에너지에 따른 표면으로부터의
탈출 깊이 차이를 알 수 있는 Universal Curve

라. 나노스케일 각분해 광전자분광 (NanoARPES)

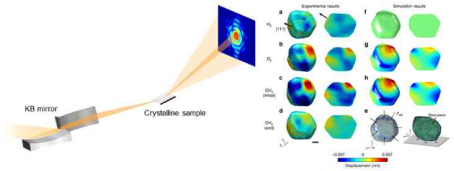
각도 분해 광전자 분광기법(ARPES)은 물질 내부 전자의 밴드 구조를 정확하게 분석할 수 있는 유일한 수단이다. 현재 국내에는 집속할 수 있는 광자빔의 크기가 10 μm 수준이기 때문에 공간해상도의 한계가 있으며, 시료의 성분이 균일하지 않은 물질들이나 반도체 소자와 같이 전위를 가해야 하는 경우에는 측정 수준이 100 nm급 이하의 광자 빔이 필요하다. 이러한 시료의 전자구조를 시료의 구조와 표면의 구조 차이에 따른 전자구조의 차이를 구분하여 측정하기 위해서 나노 크기의 광자빔을 생성시킬 수 있는 빔라인의 건설이 매우 중요하다. 이와 함께 산업 현장에서 반도체의 공정이 수 nm 범위로 작아지고 있고 첨단 나노신소재들의 나노크기에서 발현되는 독특한 전자구조를 정확하게 측정할 수 있는 장비가 국내에는 전무한 실정이다. 4세대 저장링에서 방출하는 X-선의 경우는 3세대 방사광가속기에 비하여 전자빔의 퍼짐(emittance)이 작으므로 광원의 크기가 작고 광원의 퍼짐(divergence)이 줄어들기 때문에 광자빔을 집속하는 데 월등히 유리하다. 이 때문에 얻을 수 있는 장점은 첫 번째가 단색광을 파장 한계 공간해상도(wavelength limited spatial resolution)까지 집속시킬 수 있다. 두 번째 장점은 작은 갭과 강한 자기장을 가지는 삽입 장치를 이용할 수 있어서 방출되는 X-선의 광속(photon flux)의 향상이 가능하다. 이 광속의 증가와 공간해상도의 향상으로 100 nm급 이하의 공간 분해능을 가진 ARPES 실험이 가능하다.



<그림 2.1.4.4> micro 크기 광자빔을 이용하여 작동 중인 소자의
전자적 도핑된 시료의 ARPES 실험결과 nm-급 미세공정의
소자들을 연구하기 위해서는 nm-급 광자빔을 만들 수 있는
nano-ARPES 빔라인이 필수적인 도구임

마. 결맞음 X-선 회절 (CoCDI)

결맞음 엑스선 회절 빔라인은 4GSR 광원의 결맞음 특성을 가장 적극적으로 활용하는 빔라인 중 하나이다. 본 빔라인은 결맞음 엑스선을 활용함으로써 나노 입자, 바이오 소재(세포), 에너지 소재(전지, 촉매 등) 등 다양한 물질의 고해상도 이미징을 통해 기존 이미징 기술이 갖는 시료의 제약성과 분해능의 한계를 뛰어넘어 물질의 내부에 대한 정보(전자 밀도분포, 원소 조성분포, 결함 등)를 제공할 수 있다. 재료의 특성은 재료에 내재된 결함이나 공간적 불균일에 의존한다. 따라서 재료의 변형과 구조의 국부적 공간분포를 분석함에 따라 기술적으로 중요한 물리적 현상을 밝혀낼 수 있다. 결맞음 엑스선 회절 빔라인의 핵심 목표는 결맞음성이 우수한 4GSR 광원을 고도로 집속하여 결맞는 엑스선 회절 이미징 기법의 분해능을 10 nm 이하로 개선하는 것이다. 아울러 광원을 1마이크론 수준으로 집속하여 회절 기법으로 관찰 가능한 최소 도메인 크기를 1마이크론 수준으로 개선하는 것 역시 중요한 목표 중 하나이다. 본 빔라인에서는 이를 통해 기존의 기술적 한계를 극복하고, 나아가 결맞음 엑스선 회절 이미징 및 마이크로빔 회절 기법으로 하여금 차세대 에너지/반도체/바이오 소재 분야 난제 연구에 활용도를 높이고자 한다.

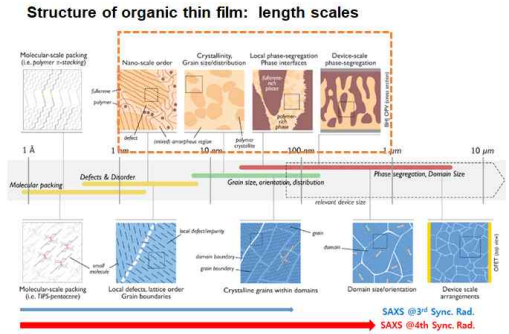


<그림 2.1.4.5> 브래그 결맞음 엑스선 회절 이미징
셋업 개략도 및 Pt 나노결정의 3차원 변형 필드 이미지

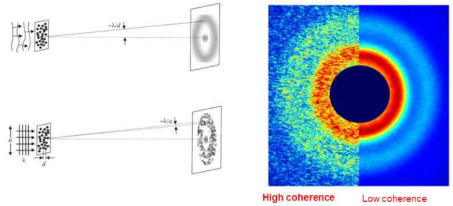
바. 결맞음 소각산란 (CoSAXS)

반도체, 유기 태양전지, OLED, 디스플레이, 환경 오염 센서 등의 주재료가 되는 유기 박막, 무기 박막, 양자점, 나노 패터닝 물질은 <그림 2.1.4.6>에서 보는 바와 같이 수 Å에서 μm 단위에 이르는 구조를 가지며, 이 구조를 이해하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면, 이 구조 또는 형태가 소자들의 성능과 깊은 관계가 있기 때문이다. 특히 제작 공정상의 문제점을 개선하기 위해, 온도 변이 또는 용매 기체 분위기에서 이러한 물질의 시간 또는 온도에 따른 구조 변이를 탐색하고자 하는 실험 환경은 매우 중요하다. 즉 새로운 촉매 또는 용매를 이용한, 제어 가능한 In Situ 환경에서 분자 단위로 성장하는 표면 유기층의 구조 또는 형태의 연구는 매우 중요하다.

결맞음 소각산란 빔라인에서 구현하고자 하는 실험기법은 결맞음 X선 빔을 이용한 마이크로 소각산란 기법(μSAXS, Small Angle X-ray Scattering)과 X선 광자 상관분광법(XPCS, X-ray Photon Correlation Spectroscopy)이다. 이 기법들은 수 Å에서 μm 단위에 이르는 다양한 구조를 가지는 유기 물질의 구조 또는 실시간 변이를 연구하는 데 매우 적합한 방법이다. 4GSR의 언듈레이터 광원에서 나오는 고휘도의 광특성, 즉 매우 작은 emittance와 고강도의 flux로 인해 In Situ time-resolved 실험(1~2 msec 수준의 시간분해능)이 가능해지며, 결맞음 빔을 이용하여 고분자, 유기분자들의 Relaxation 거동을 관찰하는 동역학 연구를 가능하게 하는 XPCS 실험을 가능하게 할 것이다.



<그림 2.1.4.6> 길이 수준에 따른 유기 박막의 구조와 형태

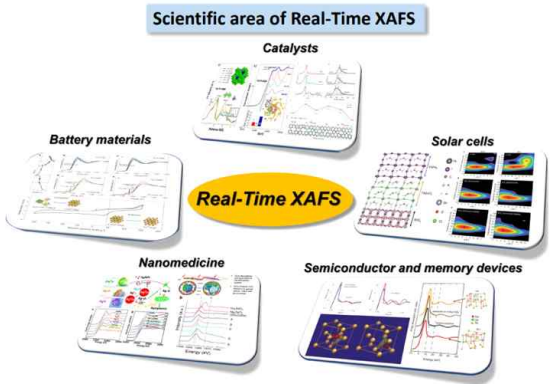


<그림 2.1.4.7> 결맞음 빔과 speckle 패턴

사. 실시간 엑스선 흡수분광학(RealTimeXAFS) 빔라인

실시간 엑스선 흡수분광학 빔라인은 '엑스선 흡수분광학'을 기반으로 수 밀리초 영역의 매우 짧은 측정시간을 갖는 '고속 엑스선 흡수분광학'과 물질의 점유 전자 상태(occupied state)에 관한 정보를 연구할 수 있는 'X-선 방출분광학'을 융합한 빔라인이다. 고속 엑스선 흡수분광법은 이차 전지, 촉매반응, 결정상 전이 등 다양한 반응 메커니즘에 관한 연구를 가능케 할 것이다. 더 나아가, 수 밀리초의 짧은 반응 시간에 따른 구조 변화를 추적함으로써 구조 변화에 대한 동역학(dynamics)을 이해하는 데에도 쓰일 것이다. X-선 방출분광학은 페르미 준위 아래에 위치한 점유 전자구조를 연구하는 분광법으로 물질의 가전자대(valence band)를 비롯하여 결합 궤도 함수에 대한 상태 밀도 함수를 연구할 수 있다. X-선 방출분광학을 전도대(conduction band)에 대한 정보를 얻을 수 있는 엑스선 흡수분광학과 결합하면 물질의 가전자대와 전도대의 전자 상태(electronic structure)를 모두 관찰할 수 있다.

실시간 엑스선 흡수분광학 빔라인이 제공할(고속) 엑스선 흡수분광학과 X-선 방출분광학은 이차 전지와 촉매를 비롯한 다양한 차세대 소재 개발에 새로운 지평을 여는 필수적인 실험기법이 될 것이다.

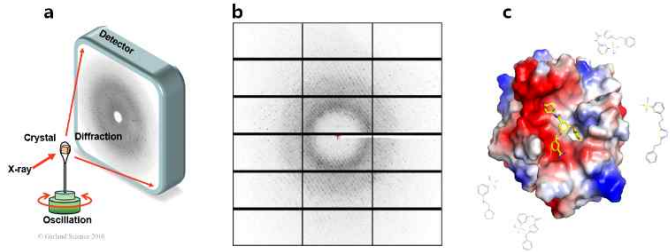


<그림 2.1.4.8> Scientific area of Real-Time XAFS

아. 생체분자 나노 결정학 (BioNX) 빔라인

생체고분자 결정학이란 결정화된 생체고분자에 X-선을 조사해 회절을 측정하고, 이를 분석해 생체고분자의 삼차원 구조를 원자분해능으로 규명하는 기법으로 단백질, DNA, RNA와 같은 생체고분자들의 복합체 및 단분자와 결합체 등의 삼차원 구조를 알아낼 수 있다. 현재까지 알려진 200,000여 개의 생체고분자 원자분해능 구조 중 85%가 생체고분자 결정학을 통해 규명되었다. 2016년부터는 해마다 10,000개의 새로운 생체고분자 결정학 구조가 보고되고 있다(RCSB PDB: Homepage).

이러한 고해상도 삼차원 구조를 통해 생체분자들이 어떻게 상호작용하는지, 그것이 생명현상에서 어떻게 기능하는지, 건강 및 질병에 어떻게 기여하는지 등을 이해할 수 있다. 생화학, 분자생물학, 유전학, 약학 등의 발전에 지대한 공헌을 해 오고 있으며, 최근에는 신약 개발 연구에 적극 활용되고 있다.



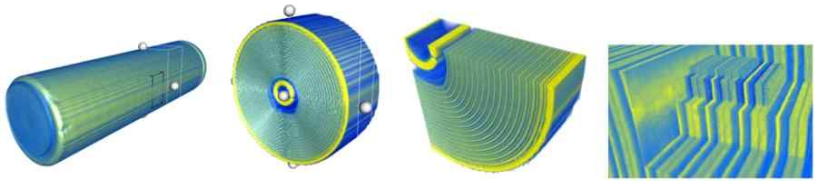
<그림 2.1.4.9> 생체고분자결정학. (a) 생체고분자결정학 장치 구성, (b) CCD 검출기로 얻은 생체고분자 단결정의 X선 회절 패턴 [PLS-II 5C 빔라인 회절 패턴 데이터], (c) X-선 회절을 분석해 규명한 생체고분자의 원자분해능 삼차원 구조

자. 고에너지 현미경(HEMicroscopy)

X-선 투영 영상은 가장 널리 활용되는 X-선 기법으로 Non-destructive, see-through imaging이 가능하여 의료(진단), 산업(검사), 보안(수출·입) 전반에 필수적인 검사기법으로 사용되고 있다.

고에너지 현미경 빔라인은 Commercial 한 고해상도 X-선 투영 영상 장치 수준의 투과력 및 대면적 영상획득이 가능하다. 100 keV 이상 X-선 사용을 위해서는 백색광을 사용해야 하고 광원의 critical energy가 높아야 한다. 대면적 영상획득을 위해서는 광원을 휨 자석 및 wiggler를 사용해야 하고 빔라인의 길이가 아주 긴 long beamline 이어야 한다.

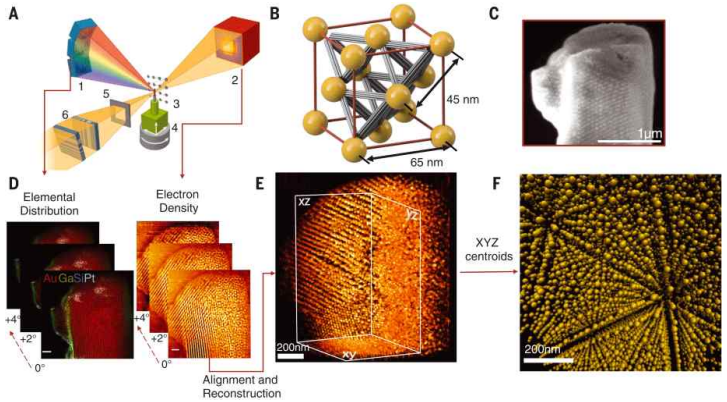
고에너지 현미경 빔라인은 Korea-4GSR에서 두 번째로 긴 빔라인으로 건설될 것이다. 고에너지 현미경 빔라인의 광원은 휨 자석에서 발생되는 폭 11 μm, 높이 9.9 μm의 크기로 5~100 keV 범위에서 다색광을 생산하고 샘플 위치에서 폭 200 mm, 높이 28 mm 크기의 빔을 제공한다. 학술적 연구를 위한 단색광도 제공하는데, DMM을 이용하여 5~40 keV 범위에서 단색광을 제공한다. 고에너지 현미경 빔라인 전체 길이는 121 m이고, 광원 차단 및 열적 부하를 감소시키는 프론트엔드(23 m), 광원의 특성을 결정하는 광학허치(20 m), 실험 구역까지 빔을 전달하는 롱-스풀(50 m), 최종 실험 허치(26 m)로 구성된다. 실험 허치가 위치한 실험 구역은 저장링과 건물 외벽을 공유하지만, 별도의 건물에 건설되며 내부 편의시설 및 출입문은 인접한 나노-프로브 빔라인과 공유한다.



<그림 2.1.4.10> 배터리 X선 투영 영상

차. 나노프로브(NanoProbe) 빔라인

반도체나 배터리 등 에너지 소재 분야는 성능향상을 위해 소자의 크기와 구조를 나노미터 레벨로 축소하여 성능을 향상시키는 방향으로 진화하고 있다. 이들 작은 내부구조와 복잡한 화학 구성분포를 분석하기 위해서 대표적으로 광학현미경, 캔틸레버를 활용해 표면을 이미징 할 수 있는 원자간력 현미경, 전자의 높은 에너지를 활용해 수 pm까지 공간해상도를 높일 수 있는 전자 현미경 등 많은 도구들이 현재 분석 도구로써 활용되고 있다. 여기서, 엑스선을 활용한 현미경은 나노 크기의 작은 구조를 관측할 수 있을 뿐만 아니라 구성성분의 공간적 분포 또한 관측할 수 있다. 그래서 방사광가속기에서 발생하는 높은 X-선 선속은 나노스케일 이미지를 빠른시간 내 관측할 수 있어 많은 과학 분야에서 분석 도구로 활용되고 있다. 그 중, 경엑스선 에너지 (> 3 keV) 영역을 활용한 실험기법들은 시료에 대해 특별한 처리 혹은 파괴 과정 없이 표면뿐만 아니라 내부에 대한 전자 밀도 분포, Elemental composition, 결정성, Strain, 산화 정도 등 다양한 정보를 3차원으로 제공해 줄 수 있다. 나노프로브 빔라인은 4GSR 고유의 작은 광원으로 기존보다 10배에서 최대 30배 정도 높은 결맞음 선속을 가진 나노집속빔을 제작하고 이를 스캐닝 프로브로 제공한다. 이는 나노빔을 활용한 스캐닝 프로브인 타이코그래피를 포함한 결맞음 현미경 기법들에서 얻어지는 이미지들을 기존 방사광가속기보다 더욱 빠르게 획득할 수 있고 동시에 수십 나노미터 공간해상도의 화학조성 분포를 XFM이나 SXM으로 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

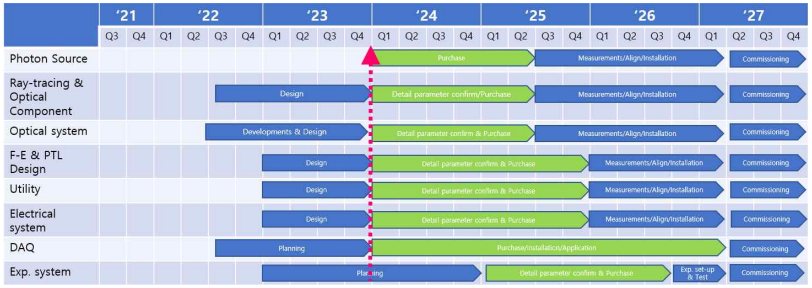


<그림 2.1.4.11> 나노입자의 3차원 구조분석

2.1.5 빔라인 구축 일정

빔라인의 전체적인 구축 일정은 아래와 같다. 2023년까지는 각 빔라인의 구축 목표 및 구체적인 빔라인 설계가 진행되었다. 2024년부터는 설계된 빔라인의 상세 변수를 확인하고, 삽입장치, 광학장치, PTL 등의 구매가 진행될 예정이다. 2026년 말에는, 구매된 주요 장치들의 설치가 완료될 것으로 예상되며, 2027년 하반기부터는 설치된 각 장치의 commissioning이 진행될 예정이다.

저장링의 시운전이 완료되면, 방사광을 이용한 빔라인 시운전이 2028년 이후 수행될 것으로 예상하고 있다.



<그림 2.1.5.1> 빔라인 건설 일정

참고문헌

[1] An Introduction to Synchrotron Radiation:Techniques and applications, 2nd edition, Philip Willmott, 2019, John Wiley & Sons Ltd.

[2] C. Fadley, S. Mamsak, J. Elect. Spec. and Rel. Pheno. 195, 409(2014).

[3] R. Muzzio et. al., Phys. Rev. B 101 201409(R)(2020).

[4] D. Kim, et. al., Nat. Commun, 9, 3422(2018).

[5] J. Rivnay, et al., Chem. Rev.112, 5488(2012).

[6] F. Veen, F. Pfeiffer, J. Phys.: Condens. Matter 16, 5003(2004).

[7] Crystal structure from PDB code 4O97.

[8] Lang et al., e-Journal of Nondestructive Testing 28(3)(2023).

[9] A. Michelson, et al., Science 376, 203(2022).

2.2 제안 빔라인 및 활용분야

2.2.1 바이오신약-바이오소각산란 빔라인 (BioPharma-BioSAXS)

가. 소개

바이오신약-바이오소각산란 빔라인은 소각 X-선 산란(small angle X-ray scattering 또는 SAXS) 기법을 기반으로 용액상 생체고분자(biological macromolecule)의 전반적인(overall) 구조적 특성 분석과 구조 전이 연구를 수행한다. 용액 상태에서 시료의 SAXS 측정은 1~2 nm 수준의 낮은 분해능의 정보를 얻을 수 있다. 생물학적 고분자의 생리현상이 활성화될 수 있는 고유의 생리학적인 용액 환경에 적용 가능하며, 생리학적 조건에서 결정성·비결정성 생체고분자의 구조 특성 분석과 다양한 실험 환경 조건(온도, 압력, pH, UV/Visible, 이온 강도, 리간드, 전기장, 자기장 등등)에 따른 구조적 안정성 및 구조 전이 연구 수행이 가능하다. 이러한 장점으로 인해 용액 SAXS 기법은 X-선 결정학(X-ray crystallography), 핵자기공명 분광법(Nuclear Magnetic Resonance), 저온전자현미경(Cryo-electron Microscopy) 기법과 같은 생체고분자의 고해상도 구조 분석 방법과 함께 활용성이 매우 증대되었다. 그 결과, 방사광으로부터 제공되는 강한 세기의 X-선을 이용한 용액 SAXS 측정법은 생체고분자에서 다양한 나노 구조(유기/무기 나노 입자, 고분자, 액정, 콜로이드, 금속) 시스템에 이르기까지 나노 구조 특성 분석을 위한 표준 분석기법(standard tool)으로 활용되고 있다. 지난 10년 동안, 세계적인 방사광 시설에 BioSAXS 전용 빔라인이 구축되어 나노연구, 구조생물학 분야, 의약 분야, 신약 개발, 및 바이오 등 기초과학 및 응용과학 분야의 발전에 폭넓게 기여하고 있다. 최근 바이오·제약 분야에서는 바이오·단백질 치료제의 구조, 기능, 및 작동 원리 규명, 그리고 오리지널 바이오의약품 대비 바이오시밀러의 생물학적 동등성 입증을 위한 근거 제시 등의 목적으로 바이오의약품의 특성 분석을 위한 워크플로(workflow) 단계에 BioSAXS 분석기법을 포함하기 시작하였다.

본 바이오신약-바이오소각산란 빔라인은 바이오·제약 분야 산업체의 수요에 대한 대응과 관련 분야 인력 양성을 위한 산업우선지원 빔라인(industry priority support BL)으로 분류되어 구축된다. 본 빔라인 구축의 주요 전략으로는, 4세대 원형 방사광 기반의 높은 휘도(high brilliance)와 낮은 퍼짐(low divergence)의 X-선을 효율적으로

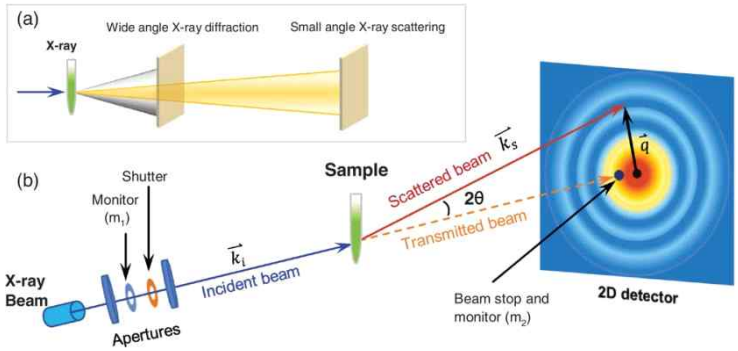
활용하기 위하여 많은 시료 개수를 고속 처리(high-throughput) 할 수 있는 실험 환경 시스템 구축(자동 시료 교환 로봇, 가변 q-범위 진공관, in-line SEC-SAXS)에 초점을 맞추고자 한다.

(1) 빔라인 실험기법

X-선이 지나가는 위치에 시료를 놓는다면, 전자는 그들의 작은 질량 때문에 X-선을 산란시킨다. 이때 광자의 에너지가 전자의 결합 에너지와 다르다면 X-선 파장에 변화가 없는, 즉 광자와 전자 사이에 에너지 교환이 없는 탄성 산란만이 실제 소각 X-선 산란 분석에 고려되고, 반면에 비탄성 산란은 배경(background)으로 작용한다. 데이터 분석 측면에서 양질의 용액 SAXS 데이터 획득을 위해 이상 단순 분산 용액(ideal monodisperse solution) 시료에 의한 산란 데이터를 얻어야 한다. 이상적 성질은 입자들이 상호작용을 갖지 않는 용액 상태를 의미하는 것으로, 실제 실험에서 용액을 희석시키거나 또는 염(salt) 등의 화학물질을 넣어줌으로써 입자들의 상호작용을 감소시킨다. 단순 분산 용액에서 모든 입자들은 크기나 모양에 있어서 모두 같다고 가정하며, 실제 단분산의 정도는 크기 배제 크로마토그래피(size exclusion chromatography 또는 SEC)와 광 산란(light scattering)을 통해서 확인한다. 용액이 이상 단순 분산 성질을 가질 때, 모든 입자는 독립적으로 산란을 일으키고 시료에 의해 얻어진 산란 세기는 모든 단일분자들의 기여의 합으로 단순화시킬 수 있다. 따라서 실험적으로 얻은 산란 세기 I(q)는 (수식 2.2.1.1)과같이 나타낼 수 있다.

$$I(q) = N i_1(q) \quad \text{(수식 2.2.1.1)}$$

여기서, $i_1(q)$는 단일분자에 의한 산란 세기, N은 시료 내 입자의 개수이다.



<그림 2.2.1.1> X-선 소각/광각산란 기법 모식도

용액 SAXS 기법은 <그림 2.2.1.1>과 같이 시준된 단색광 X-선을 용액 시료에 조사하고 낮은 각도에서 산란된 X-선을 대면적 2차원 검출기를 통해 산란패턴을 얻는다. 검출기에 의해 기록된 산란패턴은 산란 벡터(q) 혹은 산란 각도(2Θ)로 표현한다. 산란 벡터 $q = 4\pi\sin\Theta/\lambda$로 정의되며, λ는 X-선의 파장을 의미한다. 용액 시료의 경우, 용액 내 입자는 대게 무작위로 배열되어 있기 때문에 등방성 산란을 보이며 2차원 이미지를 구형 평균화하여 1차원 산란 곡선을 얻을 수 있다. 산란 곡선의 세기(I)는 q의 함수로 정의할 수 있으며, I(q)는 다음과 같이 정의한다.

$$I(q) = N_P V^2 \Delta\rho^2 F(q) S(q) \quad \text{(수식 2.2.1.2)}$$

N_P는 입자 수, V는 부피, $\Delta\rho$는 균일한 입자와 용매 사이의 전자밀도차이(electron density contrast), F(q)는 form factor (개별 입자의 평균 구조 특성 정보), S(q)는 structure factor (입자 간 위치 상관관계에 따른 구조 특성 정보)를 의미한다. 생체고분자의 용액 SAXS 실험에 사용되는 묽은 용액(dilute solution)의 경우 S(q)는 1에 가까운 값을 보인다. 실험적으로 얻은 산란 곡선 I(q)로부터 시료의 구조적 정보(크기, 모양)를 얻기 위해서는 산란 곡선의 적절한 변환과 분석 과정이 필요하며, 이를 통하여 얻을 수 있는 중요한 구조적 정보는 다음과 같다.

첫 번째, 관성 반지름(radius of gyration 또는 R_g)은 거대분자 질량의 중심으로부터 분자 내 모든 점 사이 거리의 근 평균 제곱의 값으로 표시할 수 있으며, 거대분자의 유효 크기를 의미하며 다음과 같이 정의한다.

$$R_g^2 = \frac{\int r^2 \rho(r) dr}{\int \rho(r) dr} \quad \text{(수식 2.2.1.3)}$$

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{1}{3} q^2 R_g^2 \quad \text{(수식 2.2.1.4)}$$

실험적으로 얻어진 산란 곡선을 (수식 2.2.1.3), (수식 2.2.1.4)를 적용하여 In(I) vs. q^2 곡선의 형태로 변환 후 소각 영역의 기울기(Guinier approximation, $q \cdot R_g < 1.3$)를 통해서 R_g를 계산한다. 같은 분자량을 갖고 있는 생체고분자의 경우, 접힘 (folding) 상태에 있는 생체고분자의 R_g값이 펴짐 (unfolding) 상태의 R_g 값보다 더 작음이 일반적이다.

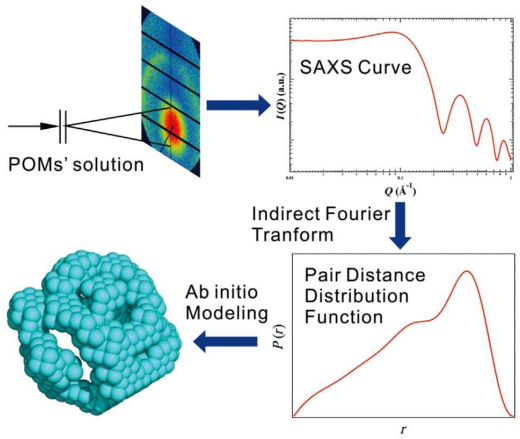
두 번째, 거리 분포 함수(Pair distance distribution function, P(r))는 거대분자 내

모든 점들 간 거리에 대한 분포도이며, 입자의 특정 함수(characteristic function)로 불리는 γ(R)은 임의의 주어진 한 점으로부터 거리 R의 위치에서 입자 내 한 점을 발견할 수 있는 확률을 나타낸다. 이 확률을 부피 V와 반지름 R을 갖는 구의 표면에 대하여 적분한 것이 바로 거리 분포 함수 P(r)이다. 산란 곡선 I(q)의 간접 퓨리에 변환(indirect Fourier transformation)을 통해 P(r) 함수를 얻을 수 있으며 (수식 2.2.1.5)와 같이 정의한다.

$$P(r) = \frac{1}{2\pi^2}\int_0^\infty I(q)qr\sin(qr)dq \quad \text{(수식 2.2.1.5)}$$

P(r) 함수를 통해 거대분자의 정확한 크기와 전반적인 (overall) 모양을 예측할 수 있다. 일반적으로 접힘 상태에 있는 생체고분자의 경우 대칭-단일 봉우리 (symmetrical single peak) P(r) 함수 패턴을 보이는 반면에, 펴짐 상태에 있는 생체고분자의 경우 비대칭-다중 봉우리 (asymmetrical multipeak) P(r) 함수 패턴을 나타낸다.

세 번째, 용액 SAXS 기법으로부터 생체고분자의 3차원 모델을 얻기 위해 순이론적 모양 결정법(ab initio shape determination method)을 이용할 수 있다. 용액 SAXS 데이터 분석 측면에서 순이론적 모양 결정법은 담금질(simulated annealing) 기법을 기반으로 실험적으로 얻은 SAXS 데이터에 가장 일치하는 dummy atoms 또는 dummy residues들의 배열 형태(configuration)를 찾는 방식이다. 현재 사용 가능한 ab initio modelling 분석 소프트웨어는 (1) DAMMIN (ab initio shape determination by simulated annealing using a single phase dummy atom model), (2) DAMMIF (Rapid ab initio shape determination by simulated annealing using a single phase dummy atom model, (3) GASBOR (ab initio reconstruction of a protein structure by a chain-like ensemble of dummy residues)가 대표적이다. 동일한 실험데이터에 대하여 여러 번 반복(multirun)하여 얻은 ab initio envelope 모델들은 서로 일치되는 정도를 비교·분석 후 가장 대표성(the most representative)을 갖는 모델을 선택하게 된다. 이외에도 시료의 종류, 상태, 그리고 시료의 부분적인 결정구조(atomic structure) 정보 여부에 따라서 rigid body modelling, mixtures & flexible system을 위한 다양한 구조 분석 소프트웨어를 활용할 수 있다. <그림 2.2.1.2>는 생체고분자 시료의 2차원 산란패턴으로부터 3차원 용액 모델을 얻기 위한 데이터 처리 및 분석 절차를 보여준다.



<그림 2.2.1.2> Ab-initio shape determination method를 활용한 3차원 모델링

(2) 빔라인 설계 고려사항

용액 SAXS 기법을 통해 위에서 언급한 방법을 활용한 용액상 시료의 정확한 구조적 정보를 얻기 위하여 양질의 산란패턴을 얻는 것은 필수적이다. 이를 위하여 바이오신약-바이오소각산란 빔라인 다음을 고려하여 설계하였다.

- SAXS 실험에서는 소각영역의 산란패턴 데이터를 얻는 것이 중요하며 시료 위치에서 시준된 빔이 필수적이다. 이를 위하여, 3중 슬릿(slit) 시스템을 사용한다. 이 시스템은 3개의 슬릿을 이용하여 빔 성형, 빔 시준 및 기생빔 제거 과정을 통해 결과적으로 시준된 빔이 시료에 조사된다. 3중 슬릿 시스템은 각 슬릿의 위치에 따라 산란패턴의 최소 각(혹은 최소 q 값)이 결정되기 때문에, 슬릿 간 거리 상관관계를 고려하여 그 위치를 결정한다.

- 용액 SAXS 기법의 시료는 물을 기본으로 한 용매에 생체고분자를 희석하여 준비하는데, 물(0.33 electrons/$Å^3$)과 생체고분자(~0.43 electrons/$Å^3$)의 전자 밀도 차이가 매우 작다. 버퍼(buffer) 용액을 만들기 위하여 물에 다른 화학물질을 추가하면 그 차이는 더 줄어든다. 용액상 생체고분자에 의한 산란패턴을 검출하기 위하여 background 산란의 영향을 줄이는 것이 중요하기 때문에 정교한 실험장치를 구성한다.

- 용액 SAXS 기법으로 양질의 데이터 확보를 위하여 단분산성 시료가 요구된다. 시료의 응집(aggregation)과 올리고머(oligomer)는 그 숫자가 작다고 하더라고 부피가 크기 때문에 전체적인 산란패턴과 구조해석에 큰 문제를 일으킨다. 단분산 시료를

얻기 위하여, in-line SEC-SAXS 기법을 도입하여 다분산성 재료를 분리/정제하여 단분산 시료의 산란패턴만 효율적으로 검출할 수 있도록 하여, 기존 측정에 어려움이 있던 시료(크기가 크고, 일시적인 복합체, 유연한 소재)들의 구조 정보를 제공할 수 있도록 한다.

- SAXS 기법은 가용 q-범위를 확보하기 위하여 시료-검출기 간 거리(sample to detector distance 또는 SDD) 조절이 필요하며 SDD를 빠르고 정확하게 변경하기 위한 장치 설계가 중요하다. 본 빔라인은 시료 위치를 고정하고 검출기의 위치를 변경하게 하며 background 산란을 최소화하기 위한 환경과 다양한 실험을 위한 환경 구축이 용이하도록 설계한다.

- 본 빔라인에서 수행될 용액상 생체고분자와 그들 복합체 구조 분석 및 다양한 조건에서 구조 전이 과정 추적 정보를 얻기 위하여 준비된 방대한 양의 시료 처리가 요구된다. 이를 위하여 자동 시료 교환 로봇을 도입하여, 시료의 고속 처리(high-throughput)가 가능하도록 한다.

- 빔은 집속을 통하여 시료 위치에서 빔 크기를 작게(~수십 μm)하여, 마이크로 플루이딕스와 같이 직경이 매우 작은 크기의 cell을 이용한 실험이 가능하도록 한다.

- 생체고분자에 X-선이 조사되는 동안 발생할 수 있는 용액상 고분자 재료의 degradation 혹은 aggregation 억제를 위하여, 빔 노출시간을 짧게 한다. 4GSR의 광원특성인 낮은 emittance로 인한 높은 brilliance의 빔특성으로 짧은 시간 노출로도 충분한 산란패턴이 검출될 수 있다.

(3) 빔라인의 활용 분야

용액 SAXS 기법을 이용한 활용의 예는 다음과 같다.

- 유연한 링커(flexible linkers)로 연결되어있는 다중 도메인(multi-domain) 단백질, 본질적으로 무질서한(intrinsically disordered) 단백질의 구조를 정량적으로 특성화한다.

- 단백질 고유의 자연상태(native state)와 변성상태(denatured state)의 구조 이해를 통해 단백질 및 단백질 의약품의 구조적 거동과 안정성을 밝힌다.

- 최근 mRNA 백신 및 치료제가 각광 받고 있으며, 지질나노입자(lipid nano particle 또는 LNP)는 효과적인 mRNA 전달 시스템으로 이용되고 있으며, 용액에서 mRNA-LNP의 구조적 안정성에 대해 연구한다.

- 실시간 SEC-SAXS 기법으로 분리/정제로 단분산성 생체고분자 재료의 용액상 구조

변화 연구에 활용한다.

나. 빔라인 설계 목표 및 특징

본 바이오신약-바이오소각산란 빔라인은 용액 SXAS 기법을 제공하여 용액상 생체고분자와 그들 복합체의 3차원 구조 및 구조 전이 연구로 바이오의약품 특성 분석에 기여한다. 높은 빔 플럭스를 가지며 시준된 빔이 시료에 조사 되어야 한다. 많은 양의 시료를 고속으로 처리하기 위한 자동 시료 교환 장치를 도입으로 high-throughput으로 데이터를 수집하고, 가변 q-범위를 위한 진공관 구축과 고품질의 데이터를 얻기 위해 시료 환경을 고정하여 background에 의한 산란을 최소화하도록 한다. 이를 위해 본 빔라인은 <표 2.2.1.1>의 사양을 목표로 한다.

<표 2.2.1.1> 바이오신약-바이오소각산란 빔라인 목표 사양

구 분	내 용
광원	In-vacuum undulator 24
에너지	5 ~ 20 keV
에너지 해상도	$\triangle E/E < 2 \times 10^{-4}$
빔 크기 (@ 시료 위치)	31 × 9 μm^2 (FWHM) @ 11.95 keV
측정가능 구조 크기	10 ~ 4000 Å
빔 세기	~10^{13} ph/s @ 11.95 keV
시료 검출기간 거리	0.5 ~ 6 m
실험기법	Solution SAXS/WAXS, in-line SEC-SAXS
실험장치	Automatic sampler changer robot HPLC system for SEC-SAXS

언듈레이터 광원은 빔 퍼짐이 작고 높은 빔 플럭스를 갖는다. 이러한 특징은 소각 영역을 높은 분해능으로 측정하고, 짧은 측정시간 대비 높은 신호 대 잡음비로 데이터를 얻을 수 있게 한다. 이를 통해 자동 시료 교환 시스템을 접목한 high-throughput 도입이 가능하다. 용액 SAXS 기법의 시료를 고려하여 제공하는 에너지 범위는 5~20 keV이다. 고정된 검출기 크기에서 에너지를 변화하면, 저에너지일 경우 소각 영역을 더 확보할 수 있고, 고에너지일 경우 시료에 대한 투과성이 좋아지므로 상대적으로 두꺼운 시료 측정이 가능하다. 이러한 빔 에너지 특성을 감안하여 실험 목적에 적합한 에너지를 선택할 수 있도록 한다. 생체고분자 재료의 경우 용액 SAXS 실험에서 주로 사용하는 에너지는 12~15 keV 영역대(λ~1 Å)이다. 이 에너지 영역에서는 X-선으로 인한 시료의 degradation 및 aggregation을 줄일 수 있고 실험 중 X-선 노출에 의해 발생할 수 있는 fouling을 억제할 수 있다.

빔 크기는 31 × 9 μm^2 (H × V, FWHM)으로 시료 위치에 집속하여 사용한다. 작은 빔은 매우 작은 크기의 cell을 이용하여 시료의 양이 미세한 고순도 생체고분자의 용액 SAXS 실험을 가능하게 한다.

높은 brilliance의 빔을 활용하여 짧은 빔 노출시간에 충분한 산란 강도 I를 얻고자 한다. 바이오신약-바이오소각산란 빔라인에서 주로 이용하는 생체고분자 재료는 X-선에 노출되었을 때, 시료의 degradation 혹은 aggregation 발생할 수 있기 때문에 짧은 빔 노출로 충분한 산란 강도를 얻는 것이 중요하다. 이에 바이오신약-바이오소각산란 빔라인에서는 3 m 길이의 IVU24를 광원으로 사용하여 높은 flux의 빔을 제공한다.

X-선이 조사되는 동안 용액상 고분자 재료는 광분해에 의해 하이드록실 라디칼이 생성될 수 있으며, 높은 분자량의 원소는 자유 라디칼을 형성하기 때문에 재료의 degradation 혹은 aggregation을 최소화하기 위하여 빔 노출시간을 최소 0.1초로 할 예정이다. 이는 3세대 광원 대비 약 1/50~1/100 수준인데, 높은 플럭스의 빔을 사용하는 4GSR 빔라인에서는 충분한 산란패턴을 검출할 수 있을 것으로 예상한다.

본 빔라인은 단백질-단백질 복합체 구조 정보 및 다양한 환경 조건에서의 구조 전이 과정 추적 정보를 얻기 위하여, 많은 후보 물질과 환경 조건이 요구됨에 따라 high-throughput 실험이 필수적이다. 로봇 시스템을 활용한 시료 교환 자동화 및 측정 자동화로 대량의 시료를 단시간 내에 측정할 수 있도록 하여 대상 물질의 구조해석과 신약 개발에 높은 효율성을 제공한다.

용액상 생체고분자에 의한 산란패턴을 검출하기 위하여 background 산란의 영향을 줄이는 것이 중요하기 때문에 일관되고 정교한 실험장치 구성이 필수적이며, 시료 교환 로봇 이용 시 In-vacuum capillary mode를 사용하여 공기에 의한 background 산란영향을 최소화하여 data quality를 높일 예정이다.

본 빔라인은 측정하고자 하는 시료가 다양하고 넓은 q-범위가 요구되기 때문에, SDD의 변경은 필수적이다. SDD를 빠르고 정확하게 변경하기 위하여 가변 q-범위 진공관 시스템을 도입한다. 가변 q-범위 진공관 시스템을 제작하여 검출기를 그 안에 위치하여 효과적으로 SDD를 변경하도록 한다. 이는 SDD 변경(0.5~6 m)에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있고, 자동 시료 교환 로봇을 고정된 위치에 두어 실험장치의 안정성을 높일 수 있다. <표 2.2.1.2>는 본 빔라인에서 SDD를 변경함에 따른 q-범위와 측정 가능 구조의 크기(d-spacing, $d=2\pi/q$)를 나타낸다. 본 빔라인에서 측정할 수 있는 최소 측정 크기는 최소 SDD(0.5 m)에서 8.5 Å, 최대 측정 크기는 최대 SDD(6 m)에서 4476 Å으로 계산된다.

<표 2.2.1.2> SDD 별 q-범위와 측정 가능 구조 크기 (d-spacing)

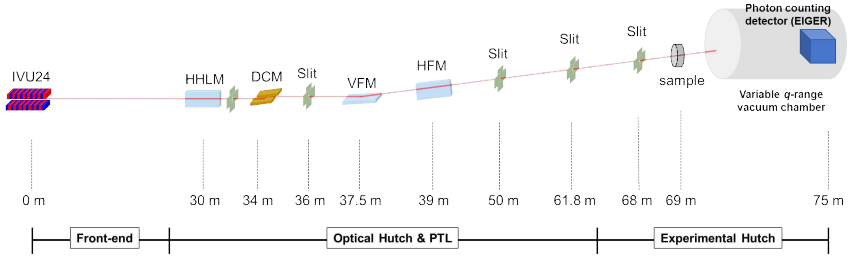
SDD (m)	q-range (Å-1)	d-spacing (Å)
0.5	0.0168 ~ 0.739	8.5 ~ 373
1	0.00842 ~ 0.372	16.9 ~ 746
2	0.00421 ~ 0.186	33.7 ~ 1492
3	0.00281 ~ 0.124	50.6 ~ 2238
4	0.00211 ~ 0.0932	67.4 ~ 2984
5	0.00168 ~ 0.0746	84.3 ~ 3730
6	0.0014 ~ 0.0621	101.1 ~ 4476

다. 빔라인 배치도(layout)와 광 경로 (ray-tracing) 설계

바이오신약-바이오소각산란 빔라인은 길이 75 m이다. 프론트엔드(front-end 또는 FE), 광자빔전송구간(photon-beam transfer line 또는 PTL) 및 실험허치(experimental hutch 또는 EH)로 구성된다. FE는 광원을 차폐하고 언듈레이터의 중앙원추빔(central cone radiation)만 통과시킨다 (4장 참고). PTL은 이 빔을 가공하고 시료 위치에 집속 되도록 하며 PTL 구간 전체를 광학허치(optical hutch 또는 OH)로 덮어 차폐한다. EH에서는 내부에 시료를 위치하고 용액 SAXS 실험을 수행한다. EH 외부에 마련된 공간에서 빔라인 장치 제어와 데이터 분석을 진행한다.

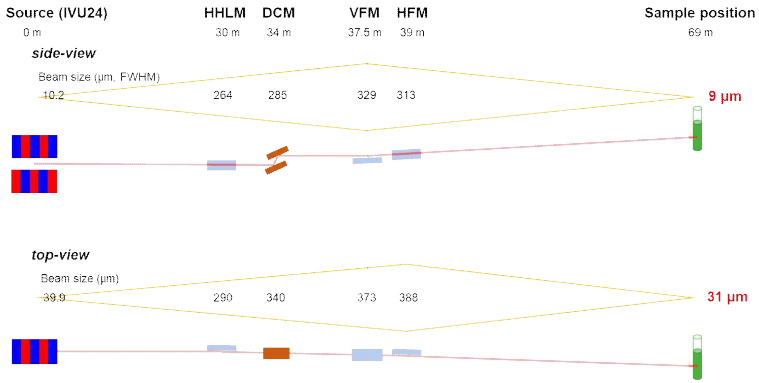
주요 구성품 배치도를 <그림 2.2.1.3>에 나타냈다. 광원으로 IVU24를 사용한다. FE를 빠져나온 빔은 열부하거울(high heat load mirror 또는 HHLM)을 지나며 고조파빔이 제거되고 열량이 낮아진다. 이 거울 장치는 빔을 수평 방향으로 반사하게 해 진동에 안정하다. 이중결정 단색화장치(double crystal monochromator 또는 DCM)를 거쳐 단색화된 빔은 수직 방향 집속거울(vertical focusing mirror 또는 VFM)과 수평 방향 집속거울(horizontal focusing mirror 또는 HFM)을 사용해 시료 위치에 집속하며 집속된 빔 크기는 수평 방향 30.8 μm × 수직 방향 8.6 μm (FWHM)이다. 시료에 X-선이 조사되기에 앞서 삼중 슬릿을 통과시켜 빔을 시준한다. 삼중 슬릿은 각 빔을 정형, 빔 시준 및 기생빔을 제거해 줌으로써 소각영역의 산란패턴을 얻을 수 있도록 하는 역할을 하며 슬릿 간 거리의 상관관계를 고려하여 최소 각을 제공할 수 있도록 그 위치를 결정한다. 빠른 속도 (high frame out) 및 높은 개수 속도(high count rate)를 가지는 대면적 photon counting 검출기를 사용한다. 이 검출기를 가변 q-range

진공관 안에 위치하여 SDD 변경을 효율적으로 한다. 상세한 빔라인 배치는 라. 빔라인 구성품 항목 <표 2.2.1.3>에 정리했다.



<그림 2.2.1.3> 바이오신약-바이오소각산란 빔라인 배치도

바이오신약-바이오소각산란 빔라인 광 경로는 <그림 2.2.1.4>에 나타내었다. 빔라인 시뮬레이션은 OASYS 프로그램의 ShadowOui를 사용하여 계산하였으며, 본 빔라인에서 수행할 용액 SAXS 실험에 주로 사용 예정인 에너지 영역 중 가장 높은 빔 flux를 나타내는 11.95 keV를 기준으로 하였다. 이 에너지에서 광원은 수평 방향 39.9 μm × 수직 방향 10.2 μm (FWHM)이며, 발산각(divergence)은 수평 방향 9.9 μrad, 수직 방향 9.1 μrad이다. HHLM에 의한 빔 경로는 outboard 방향이며, DCM에 의한 빔 offset은 upward 방향으로 25 mm으로 한다. 집속 거울에 의한 빔 경로 변화는 VFM에 의하여 upward 방향, HFM에 의하여 outboard 방향이다. 시료위치에서 집속된 빔의 offset은 최종 upward 방향으로 197.1 mm, outboard 방향으로 358.8 mm이다.



<그림 2.2.1.4> 바이오신약-바이오소각산란 빔라인
광 경로 및 빔크기 요약, 빔 크기는 FWHM으로 기재

라. 빔라인 구성품

상세한 빔라인 구성품 배치는 <표 2.2.1.3>에 정리했다. 표준 설계를 따르는 FE는 4장에 기술하였다.

<표 2.2.1.3> 바이오신약-바이오소각산란 빔라인 component

거리 (m)	항 목	사 양	용 도
0	Undulator	IVU24	광원
28	Beam attenuator	diamond, Si으로 구성	빔 정렬 및 monitoring을 위한 빔 attenuator
28.5	Slit	4-way slit, UHV	High heat load 미러 입사빔 conditioning
29	Diagnostic	Current signal output	Beam position & profile defining
30	High heat load mirror	Flat mirror 2-stripe coating (Pt, Rh)	High heat load 감쇄 및 High harmonics 감쇄
32	Slit	4-way slit, UHV	White beam conditioning
33	Diagnostic	Current signal output	Beam position & profile defining
34	DCM	Si (111), fixed exit design	Monochromator
36	Slit	4-way slit, UHV	빔 집속 미러 입사빔 conditioning
36.5	Diagnostic	Current signal output	Beam position & profile defining
37.5	VFM	Tangential Cylinder, Rh coating	수직 방향 빔 집속
39	HFM	Tangential Cylinder, Rh coating,	수평 방향 빔 집속
40	Diagnostic	Current signal output	Beam position & profile defining
50	Slit	4-way slit, HV	Monochromatic beam conditioning
51	Diagnostic	Current signal output	Beam position & profile defining
61.8	Slit	4-way slit, HV	Monochromatic beam collimation
62.5	Diagnostic	Current signal output	Beam position & profile defining
68	Slit	4-way slit, HV	parasitic beam rejection
69	Sample environment	ARINAX robot	시료 자동 교환 장치
69.3~75.8	Variable *q*-range vacuum chamber	-	진공관 내 검출기 위치, SDD 조절
69.5~75	2D detector	Eiger2 X 4M	산란패턴 검출

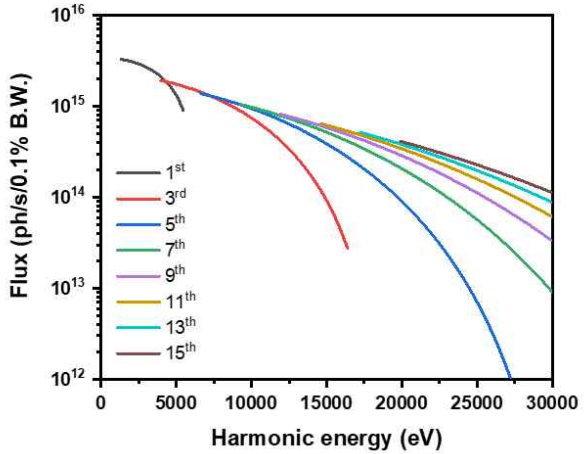
(1) 광원: IVU24

5~20 keV 영역의 X-선 사용을 위해 IVU24를 광원으로 선택하였다. IVU22도 해당 영역에서 X-선을 제공하나, IVU24가 언듈레이터 간격(undulator gap)을 더 넓게 사용할 수 있다 (5~20 keV에서 연속적인 에너지 스펙트럼을 보이기 위하여 IVU22는 gap을 5.58 mm까지 좁게 해야 하고, IVU24는 6.46 mm까지 좁게 해야 한다). IVU24가 IVU22보다 결맞음 선속(coherent flux)이 20%가량 낮으나, 이것이 용액 SAXS 기법에는 문제가 되지 않는다. 앞서 광 경로 설계에서 보인 바와 같이 시료에 조사되는 빔의 공간결맞음길이(spatial coherence length)가 1 μm 미만 수준으로 용액 SAXS 기법에 적합하다 (<그림 2.2.1.4> 참고). IVU24의 사양을 아래 <표 2.2.1.4>에 요약했다.

<표 2.2.1.4> IVU24 광원 사양

구 분	내 용
Undulator	IVU24
Total length	3 m
Period length	24 mm
Period number (N)	125
Deflection Constant (K)	2.747 @ 5 mm of gap 2.108 @ 6.46 mm gap
Max. Magnetic Field (B)	1.225 @ 5 mm of gap
Total power	17.9 kW @ 5 mm gap 10.58 kW @ 6.46 mm gap
Max. power density	165 kW/mrad^2 @ 5 mm gap 125 kW/mrad^2 @ 6.46 mm gap

이 광원을 사용했을 때 PTL로 들어오는 홀수 차 조화빔의 스펙트럼을 <그림 2.2.1.5>에 보였다. IVU24의 간극은 5 mm부터 15 mm 사이이고 광량은 5~20 keV 사이에서 1 × 10^{15} ~ 4 × 10^{14} 광자/초/0.1% 밴드폭이다.

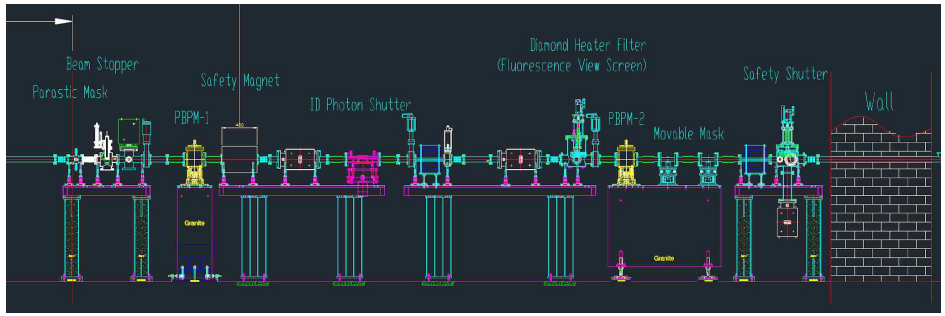


<그림 2.2.1.5> IVU24 광원의 빔 Flux

IVU24 광원을 사용하면 언듈레이터 간격이 5 mm일 때 최대 K값(deflection coefficient)은 2.747, 최대 출력은 17.9 kW이다. IVU24로부터 인출된 빔의 출력을 FE에서 mask 및 slit을 활용하여 적절히 감쇠시켜 PTL 구간 광학장치들의 손상을 방지하여, 빔라인의 안정적인 운용을 가능하도록 한다.

(2) 프론트엔드 (FE)

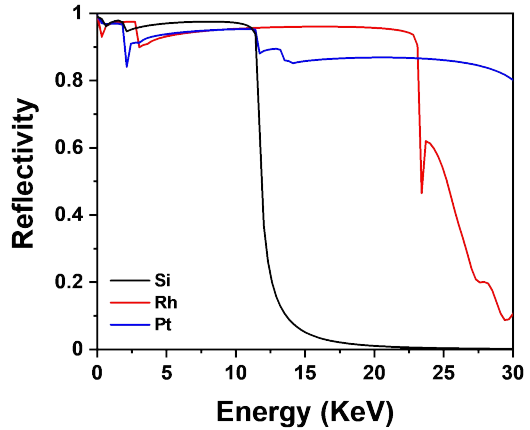
FE는 IVU 빔라인의 표준 설계를 따른다 (<그림 2.2.1.6>). 구성품은 4장에 기술하였다.



<그림 2.2.1.6> 프론트엔드의 장치 구성도

(3) 열부하거울장치

열부하거울 (High heat load mirror 또는 HHLM) 장치는 광원으로부터 30 m 지점에 위치한다. 이 거울은 FE를 빠져나온 빔을 받아 수평 방향으로 반사하게 하여, 최종 실험허치에서 빔의 수직 방향 offset을 최소화한다. 한다. 이때, 높은 광자에너지 대역의 빔을 흡수해 뒤에 위치한 이중결정 단색화장치(DCM)의 단색화결정에 열부하를 낮춘다. 본 빔라인에서는 사용하고자 하는 빔 에너지에 따라 실리콘 (Si), 로듐 (Rh), 백금 (Pt) 거울면을 사용할 것이다. 이 거울은 하나의 실리콘 기판 위에 각각 로듐 및 백금 두 줄 코팅을 진행하고 코팅하지 않은 면은 Si 거울면으로 사용한다. 거울면은 빔 입사각을 2.6 mrad으로 하며 <그림 2.2.1.7>은 거울면 재료별 반사도를 나타낸다. Si 거울면은 12 keV 이상의 불필요한 빔을 흡수하여 DCM 결정면의 열적 부하를 줄여준다. 5~10 keV 영역에서는 높은 반사도(> 0.9)를 유기하기 때문에, 이 영역의 빔을 사용할 때는 Si 거울면을 사용한다. 비슷한 원리로, Rh 코팅면은 10~20 keV 영역의 빔을 사용할 때, Pt 코팅면은 20 keV 이상의 빔을 사용할 때 이용한다.



<그림 2.2.1.7> 2.6 mrad 입사각에서 Si, Rh, Pt 거울면의 반사율

<표 2.2.1.5>는 HHLM의 사양을 보여준다. HHLM으로 입사되는 백생광의 크기는 1 mm × 1 mm이고 입사각이 2.6 mrad 일 때, 거울면에 닿는 빔 면적(footprint)은 1 mm × 385 mm인데, 입사빔 전체를 수용할 수 있도록 코팅면의 크기는 20 mm × 800 mm으로 한다. 거울면에서 흡수하는 열량은 OASYS 내 SRW code 활용하여

예측하였으며, 최대 총열량은 158.791 W, 최대 열량은 0.216 W/mm^{2}으로 계산되었다.

거울의 실리콘 기판의 크기는 800 mm × 60 mm으로 하며, 그 형상은 거울 옆면에 notch 홈을 파고 Indium foil, Cu pad, cooper pipe를 이용한 냉각 방식을 사용한다 (4장의 거울 형상 (Notch) 참고). 거울면의 낮은 slope error와 roughness는 빔의 모양과 높은 광량을 유지하는 데 필수적이다. Slope error가 높은 거울은 반사 빔의 왜곡으로 인해 예상 빔 크기와 광량을 얻어낼 수 없게 된다. 이런 문제를 최소화하기 위하여 slope error는 0.1 μrad 이하, roughness는 0.2 nm 이하로 한다.

<표 2.2.1.5> 광학허치 내 high heat load 제거용 거울장치 사양

	HHLM
광원으로부터 거리 (m)	30
Incident Angle	2.6 mrad
Shape	Flat
Radius (km)	> 100
Surface Normal direction	Horizontal
Substrate	Si
Coating Materials (Thickness, nm)	Rh (50), Pt (50)
Beam size (H × V) @ 11.95 keV (μm × μm, in FWHM)	290 × 264
Footprint(H × V) @ 11.95 keV (mm × mm, in FWHM)	0.302 × 105
Substrate size (L × W) (mm × mm)	800 × 60
Focus distance (mm)	-
Roughness (nm)	< 0.2
Slope error (μrad, RMS)	< 0.1
Max total heat load (W)	< 158.791
Max surface heat load (W/mm^2)	< 0.216

(4) 이중결정 단색화장치

단색화를 위한 이중결정 단색화장치(DCM)는 수직 방향으로 빔을 반사하는 구조를 택했으며, 단색화결정은 (111) 반사면의 Si을 사용한다. Si (111) 단결정의 경우 낮은 에너지 영역에서 수평 방향 DCM은 수직 방향 DCM에 비해 반사율이 현저하게 낮은 값을 보인다 (5 keV 일 때 60% 미만). 광원으로부터 발생하는 X-선을 온전하게

사용하기 위하여 수직 방향 DCM을 사용한다. 단색광의 에너지를 변경하더라도 입사광과 출사광의 단차(offset)는 바뀌지 않도록 하며 표준 DCM의 단차는 25 mm 이다 (4장 DCM 관련 자료 참고).

빔의 수직 발산각이 DCM 내 결정이 갖는 Darwin width보다 작으면 회절 과정에서 발생하는 빛의 손실을 무시할 수 있다. 5~20 keV 범위에서 입사광의 수직 방향 빔퍼짐이 15 μrad 이하이므로, 단색화된 광자에너지의 분해능 (ΔE/E)은 2.0×10^{-4} 미만으로 예상된다. DCM의 분해능은 다음과 같은 식에 의해 계산되었다.

$$\Delta E/E = \cot\theta_B[\omega_D^2 + \phi^2]^{1/2} \quad \text{(수식 2.2.1.6)}$$

이 식에서, θ_B는 첫 번째 DCM 결정의 브래그 각도 (혹은 빔 입사각), ω_D는 Si 결정의 Darwin width, ϕ는 빔 퍼짐각을 의미한다.

결정의 기울임(피치각 또는 pitch)은 5.673~23.291° 범위에서 조정해 본 빔라인의 광자에너지 범위인 5~20 keV를 충족시킨다. 입사빔의 크기가 수평 방향 340 μm × 수직 방향 285 μm인데, 전체 광자에너지 범위에서 빔을 수용하기 위해 첫 번째 결정의 크기는 60 mm × 15 mm, 두 번째 결정은 첫 번째 결정에서 반사된 빔을 수용하면서 단차를 25 mm로 유지할 수 있도록 길이를 150 mm으로 한다. 출사광의 방향을 정밀조정 하기 위해 두 번째 결정의 피치각 및 롤각(roll)을 압전 구동(piezoelectric actuator)한다. DCM 출사광의 위치 변동을 진단장치인 UHV-QPBM에서 확인하고, 피드백 (feed-back) 시스템을 구성하여 빔 위치를 일정하게 한다.

<표 2.2.1.6> 단색화장치 사양

에너지 범위	5~20 keV
결정 종류	Si (111)
브래그 각도	5.673°~23.291°
각도 분해능	< 0.25 μrad
모터 속도	~ 0.5°/sec
Offset	25 mm
진공도	< 10^{-8} mbar
모션 축	Bragg, gap, roll, pitch, piezo roll and pitch for feedback

DCM은 결정면은 사이드 냉각 방식을 채택하고 액체질소 냉각을 통해 결정의 열변형을 최소화한다 (4장의 분광기 참고). DCM 첫 번째 결정면에서 흡수하는 열량은 OASYS 내 SRW code 활용하여 예측하였으며. 최대 총열량은 73.35 W, 최대 열량은 16.303 W/mm^{2}으로 계산되었다. 현재 PLS-II의 DCM의 첫 번째 결정면이 bottom 냉각 방식을 채택하고 <표 2.2.1.7>에 나타나 있는 cryocooler 사양으로 40 W/mm^{2}까지의 열량을 제어하고 있으므로, 이보다 향상된 사이드 냉각 방식을 채택하게 되면, 본 빔라인에서 사용하는 DCM 결정면의 열부하 제어가 가능할 전망이다.

<표 2.2.1.7> DCM Cryocooler 사양

냉각 전력	0 ~ 3,000 W
액체질소 유량	0 ~ 20 L/min (0 ~ 90 Hz)
냉각 루프 압력	2 ~ 10 bar
압력 안정성	< 1 mbar (rms) / < 5 mbar (P-V)
냉각 루프 온도	77~100 K

(5) 집속 거울 장치

시료 위치에서 빔 집속을 위해 광원으로부터 37.5 m 지점에 수직 방향 집속 거울(VFM)과 39 m 지점에 수평 방향 집속 거울(HFM)을 둔다. 이 두 거울 장치는 모두 빔 진행 방향으로 굽혀진 형태(tangential ellipse)이다. 빔 집속은 시료 위치인 69 m 지점으로 하여, 집속 거울로부터 초점 위치 간 거리는 VFM이 31.5 m, HFM이 30 m이다. HHLM과 마찬가지로 입사각은 2.6 mrad으로 하고, 각각 Rh와 Pt의 두 줄 코팅을 한다. 이를 통해 고조파를 한 번 더 제거한다. <표 2.2.1.8>에 빔 집속 거울 장치의 사양을 나타내었다. 시료 위치인 69 m 지점에서 집속된 빔의 크기는 반치폭으로 수평 31 μm, 수직 9 μm이다.

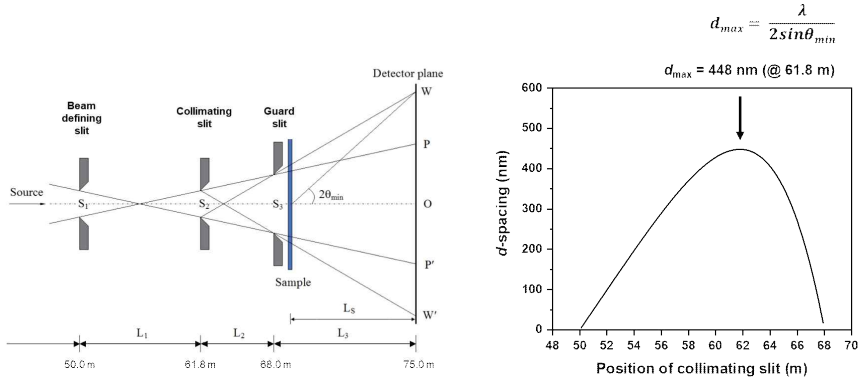
<표 2.2.1.8> 빔 집속 거울장치 사양

	VFM	HFM
광원으로부터 거리 (m)	37.5	39
Incident Angle	2.6 mrad	2.6 mrad
Shape	Tangential Ellipse	Tangential Ellipse
Surface Normal direction	Vertical	Horizontal
Substrate	Si	Si
Coating Materials (Thickness, nm)	Rh (50)	Rh (50)
Beam size(H × V) @ 11.95 keV (μm × μm, FWHM)	373 × 329	388 × 313
Footprint(H × V) @ 11.95 keV (mm × mm, FWHM)	0.373 × 126	149 × 0.313
Substrate size(L × W) (mm × mm)	800 × 60	800 × 60
Source distance (m)	37,500	39,000
Focus distance (m)	31,500	30,000
Roughness (nm)	< 0.2	< 0.2
Slope error (μrad, RMS)	< 0.1	< 0.1

(6) 빔 시준장치

바이오신약-바이오소각산란 빔라인은 극소 각 영역에서 실험을 진행하는데, 이를 위하여 3중 슬릿 시스템을 사용하여 빔을 시준하고 산란의 최소각을 결정한다. 빔 정형 슬릿(beam defining slit)으로 적합한 빔 크기로 조절하고, 빔 시준 슬릿(collimating slit)을 사용하여 X-선 빔을 시준한 뒤, 가드 슬릿(guard slit)으로 기생 X-선 산란을 막는다. 최종적으로 잘 시준된 X-선을 시료에 조사하여 용액 SAXS 실험을 진행한다. 각 슬릿의 상세 설명은 다음과 같다. 빔 정형 슬릿(beam defining slit)은 X-선을 정밀하게 정형하여 적합한 빔 크기로 조정하는 장치이다. 빔 시준 슬릿(collimating slit)은 시준된 빔만 사용하기 위하여 발산하는 빔 제거 및 장치에 의해서 발생한 기생빔을 1차적으로 제거하는 장치이다. 가드 슬릿(guard slit)은 시료와 가장 가깝게 위치하는 슬릿으로 앞선 두 개의 슬릿으로부터 발생한 기생빔을 감쇄시키는 장치이다. 이러한 이유로 빔 시준 장치를 구성하는 슬릿 장치는 바이오신약-바이오소각산란 빔라인에서 필수적이다. 슬릿은 정확하게 X-선을 가공할 수 있도록 4개의 텅스텐 edge를 블레이드 형태로 만들어 X-선을 상하좌우 방향으로 자른다. 이를 통해 빔 정형시 발생하는 산란빔 발생을 최소화한다.

3중 슬릿 시스템은 슬릿 갭(gap)과 슬릿 간 간격의 상관관계에 의해 산란 최소각을 계산할 수 있으며, 이 값을 이용해 산란 결과로부터 얻을 수 있는 최대 특징 크기를 유도할 수 있다. <그림 2.2.1.8>은 빔 시준 장치 개략도와 시준 슬릿 위치에 따른 본 빔라인에서 도달할 수 있는 최소각에 따른 최대 특징 크기를 계산한 결과이다. 이 결과로부터 빔 정형 슬릿(beam defining slit)은 광원으로부터 50 m, 빔 시준 슬릿(collimating slit)은 61.8 m 가드 슬릿(guard slit)은 68 m 지점에 위치한다.



<그림 2.2.1.8> 빔 시준 개략도/빔 정형 슬릿의 gap을 0.46 × 0.46 mm^{2}으로 하였을 때 빔 시준 슬릿 장치의 위치에 따른 실험 가능한 특성 크기 (d-spacing)

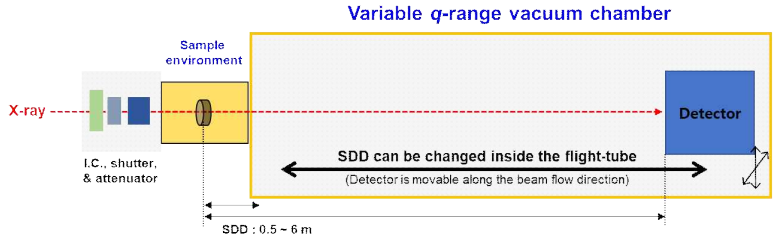
(7) 빔 진단장치

빔의 형상 및 위치 정보를 정확하게 파악하는 것은 광원으로부터 발생한 빔이 실험허치까지 정확하게 전달되는지 확인하고 실험을 수행하기 위해 필요한 사항이다. 프론트엔드에 2개의 PBPM (Photon Beam Position Monitor)을 설치하여 광원으로부터 방출된 빔의 위치 및 빔 profile을 정확하게 파악할 수 있다. 프론트엔드에 설치된 PBPM을 저장링과 연계성을 통해 실시간 빔 위치 및 궤도 수정을 가능하게 한다 (4장 PBPM 참고). PTL 구간의 빔 진단을 위하여 광학장치 이후에는 빔 형상 및 위치 정보를 확인할 수 있는 wire monitor와 screen monitor를 설치하여, 빔이 각 광학장치를 통과한 후 빔 모양을 확인한다 (4장 참고). DCM과 거울장치에 의한 빔 경로 이후, slit으로 인한 빔의 모양 변화를 위하여 사용한다. Wire monitor는 36.5 m, 40.0 m, 50.5 m, 62.3 m 지점에 위치하며 빔에 의한 금속(wire)의 광전자 방출을 이용하여 빛의 세기를 공간적 분포를 측정한다. Screen monitor는 33.5 m, 36.8 m, 40.5 m, 51 m, 62.8 m에 위치하며 입사된 빔을 흡수하여 형광을 발생시킴으로 빔의 위치와 모양을 확인한다.

마. 실험허치

(1) 가변 q-범위 진공관

용액 SAXS 기법은 2D 대면적 검출기를 통하여 산란패턴을 획득한다. 특정 실험 셋팅 조건에서 얻을 수 있는 산란 각도의 범위는 2D 검출기의 검출 면적(detector active area), 빔 가리개(beam stop)의 직경, 시료와 검출기 사이 거리 (sample-to-detector distance 또는 SDD)의 관계에 의해 결정된다. 즉, SDD가 길면 low-q 영역(소각 영역)의 산란패턴을 얻을 수 있고, 반대로 SDD가 짧으면 high-q 영역(광각 영역)의 산란패턴을 얻을 수 있다. 용액 SAXS 실험기법은 측정하고자 하는 시료 입자 크기에 따른 다양하고 넓은 q-범위에서 산란데이터 확보가 요구되기 때문에, SDD의 변경은 필수적이다. 측정하고자 하는 특징 구조의 크기(d-spacing)는 $d=2\pi/q$로 계산하며 SDD에 따른 q-범위와 d-범위는 <표 2.2.1.2>에서 확인할 수 있다. SDD를 빠르고 정확하게 변경하기 위하여 가변 q-범위 진공관 시스템을 도입한다.



<그림 2.2.1.9> Variable q-range vacuum chamber 모식도

<그림 2.2.1.9>와 같이 2D 검출기를 진공관 내에 위치하고 레일(rail)을 통해 X-선 진행 방향으로 이동하며 SDD를 0.5 m에서 6 m까지 변경한다. 또한 입사되는 X-선을 기준으로 수직/수평 방향으로 2D 검출기를 이동할 수 있도록 하여 검출기 위치 정렬을 용이하게 한다. 검출기 앞에 photo-diode 타입의 beam stop을 위치하여 direct beam으로부터 검출기를 보호하는 동시에, 입사되는 X-선 세기에 비례하여 photo-diode로부터 발생되는 전류값을 전압-진동수-카운트로 전환하여 시료 용액과 (백그라운드) 용매에 대한 정확한 X-선 투과도를 계산한다.

용액 SAXS 실험은 이용자들의 요구에 따라 다양한 시료 환경 구축이 동반한다. 가변 q-범위 진공관을 사용하면 SDD 변경을 위해 검출기 위치가 바뀌는 대신에 시료 위치가 고정되어 향후 다양한 응용 실험을 위한 환경 구축이 용이할 것으로 기대한다.

(2) 2D 검출기

시료에 X-선이 입사하여 소각에서 발생하는 산란패턴을 획득하기 위하여 4세대 방사광가속기에 적합한 photon counting 방식의 대면적 2D 검출기를 사용한다. 일반적으로 생체고분자와 용매 사이의 전자밀도 차이가 매우 작다. 따라서 용매에 의한 산란 데이터로부터 보정된 생체고분자의 산란데이터 세기는 매우 낮다. 그러므로 높은 신호 대 잡음비의 데이터를 얻기 위하여 검출기에 의한 노이즈가 거의 없는 검출기가 요구된다. 또한 생체고분자의 여러 외부 환경 조건에서의 구조 전이 변화는 μs~ms 단위에서 발생함으로, 높은 시간분해능 (temporal resolution) 데이터를 획득하기 위하여 빠른 속도 (high frame rate), 높은 개수 속도 (high count rate), 작은 픽셀 크기(small pixel size)의 2차원 검출기가 요구된다. 바이오신약-바이오소각산란 빔라인에서 사용 예정인 검출기 사양은 다음 <표 2.2.1.9>에 나타내었다.

<표 2.2.1.9> 2D 검출기 사양

	Eiger2 X 4M
Type	2D detector
Active area (W × H) (mm^2)	155.1 × 162.2
Pixel array (W × H) (pixels)	2068 × 2162
Pixel size (W × H) (μm^2)	75 × 75
Count rate (photons/s/pixel)	10^7
Frame rate	1120 Hz (8 bit) / 560 Hz (16 bit)

(3) 자동 시료 교환 로봇

생체고분자 3차원 구조 해석 및 다양한 외부 환경 조건에서 구조 전이 과정 연구를 위하여, 안정적인 단백질 구조 결정 및 그 구조 안정성을 갖는 최적의 용매 조건 탐색하거나 스크리닝하기 위하여 많은 양의 시료에 대한 용액 SAXS 실험이 필요하다. High-throughput 실험으로 많은 양의 시료를 고속 처리해야 한다. 이를 위하여 자동 시료 교환 로봇 시스템을 도입한다. 자동 시료 교환 로봇은 ARINAX 사의 BioSAXS를 사용할 예정이다. 시료 자동 교환 로봇으로 최소 5 μL의 시료를 자동으로 quartz capillary에 위치하도록 하여 X-선을 조사한다. 로봇이 자동으로 시료를 loading /unloading, washing 하는데 약 50초의 시간이 소요되며 한 번에 최대 96개의 시료를 loading 할 수 있다. 시료의 빔 노출시간을 10초로 하면, 1시간에 60개의 시료를 측정할 수 있을 전망이다. 생체분자 시료의 경우 X-선에 의해 시료가 radiation damage로 변성될 수 있는데, 이런 효과를 최소화하기 위하여 20~35 μL의 시료를 quartz capillary에서 흐르도록 하면서 용액 SAXS 실험을 진행하는 동적모드를 추가적으로 제공한다. 시료의 특성에 맞도록 보관 및 측정 온도를 각각 4~40 ℃와 2~60 ℃ 범위에서 조절 가능하다. 바이오신약-바이오소각산란 빔라인에서 사용 예정인 자동 시료 교환 로봇의 사양은 다음 <표 2.2.1.10>에 나타내었다.

<표 2.2.1.10> 자동 시료 교환 로봇 사양

Performance	
Solution transfer volume	5 ~ 200 μL
Typical cycle time - loading/unloading - cleaning (wash, rinse, dry)	50 s 15 s / 15 s 20 s
Sample Containers	96-well microplates 96-deep well microplates 4 × 8 wells Eppendorf strips (200 μL) 4 × 3 individual 1.5 mL wells (buffers)
Control	
Sample exposure modes	1. Static 2. Flow (0.05 ~ 20 μL/s)
Temperature control - exposure - storage	2~60 ℃ 4~40 ℃
Control panel	Video assisted automatic liquid positioning
Dimension (W x H x D)	
Main unit	550 × 800 × 1100 mm^3
Fluid management rack	837 × 576 × 900 mm^3
Control rack	712 × 576 × 900 mm^3

(4) SEC-SAXS 시스템

용액 시료의 정확한 구조 분석을 위해서는 단 분산성 시료로부터의 SAXS 데이터 획득이 필수적이다. 하지만 생체고분자 시료는 용액상에서 원치 않은 올리고머(oligomer)와 응집 (aggregation) 등의 혼합물 (mixture) 형태로 존재할 수 있다. 이런 경우 혼합물 내 각 구성요소(component)에 의한 산란이 모두 합쳐진 구형 평균화된 산란데이터가 얻어지게 되어 데이터 분석에 한계가 있다. 이를 해결하기 위하여 크기와 분자량에 따라 시료를 실시간 분리함과 동시에 각 구성요소에 대한 산란데이터 획득이 가능한 in-line Size exclusion chromatography (SEC)-SAXS 실험기법을 도입한다. SEC를 통해 분리 및 정제된 시료를 다양한 검출기로 실시간 분석함과 동시에 소각 X-선 산란 실험이 수행되기 때문에, 혼합물 내 각 구성요소의 구조 정보를 정확하게 얻을 수 있다. 혼합물의 분리를 위한 컬럼 선택 시 이동상과 고정상 사이의 상호작용이 없도록 하여 시료가 그 크기에 의해서 분리되도록 한다. 단백질 시료를 분석할 UV 검출기와 UV 발색단을 가지지 않는 유기/무기물 시료를 분석할 RI 검출기를 함께 구축하여, 다양한 용액 환경 조건에서 다 분산성 시료의 정확한 용액상 3차원 구조연구에 이용한다.

추가적으로, Multi angle light scattering (MALS)와 Dynamic light scattering (DLS)을 SEC와 연계하여 사용한다. MALS 분석 기기를 활용하여 SEC로부터 분리 및 정제된 시료의 분자량, 크기 및 크기 분포도를 얻을 수 있다. DLS 분석 기기는 수 nm ~ 수 μm의 시료가 용액에 분산되어 있을 때 발생하는 브라운 운동(Brownian motion)의 속도를 확산계수(diffusion coefficient)로 정량화하여 시료 입자의 크기와 크기 분포도를 계산할 수 있다. 위 두 가지 광산란 (light scattering) 검출기 시스템 도입으로 인하여 제공되는 시료 입자의 분자량, 크기 및 크기 분포도에 대한 구조적 정보는 SAXS 데이터 분석으로부터 얻은 구조적 정보와 교차 점검(cross-check) 함으로써 데이터 분석의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

바이오신약-바이오소각산란 빔라인에서 사용 예정인 SEC-SAXS 시스템의 장치 및 역할을 다음 <표 2.2.1.11>에 정리하였다.

<표 2.2.1.11> SEC-SAXS 시스템 장치 및 역할

장치	역할
PUMP	시료 흐름 속도 제어
column	크기와 분자량에 따른 시료 분리
UV detector	특정 발색단 빛을 흡수하는 원리를 이용하는 검출기
RI detector	시료의 농도에 따른 굴절률 차이를 이용하는 검출기
MALS (18 angle research grade)	18개 검출기로부터 얻어진 광산란 신호를 이용한 분자량과 크기 측정
DLS	확산계수 정량화를 통한 크기 측정
software	시스템 제어 및 데이터 처리

바. 데이터량

바이오신약-바이오소각산란 빔라인에서는 대면적 2차원 검출기를 사용하여 TIFF 형식의 데이터를 제공한다. 산란패턴의 2차원 이미지와 이를 처리하여 획득한 1차원 산란곡선의 데이터의 용량은 총 20 MB이다. 본 빔라인에서는 자동 시료 교환 로봇 시스템을 활용한 high-throughput 실험, SEC-SAXS 시스템을 활용한 실험으로 일 최대 400 GB의 데이터 용량 발생이 예상된다. 실험의 종류를 고려하면 연간 최대 40 TB의 데이터 용량이 발생할 것으로 예상한다.

사. 건설일정

<표 2.2.1.12> 빔라인 건설 일정

	2023년				2024년				2025년				2026년				2027년			
도면 작업					■	■	■	■	■	■										
전산 해석					■	■	■	■	■	■										
발주							■	■	■	■	■	■								
소프트웨어 준비											■	■	■	■	■	■	■			
입고 및 검수												■	■	■	■	■	■			
설치													■	■	■	■	■	■		
커미셔닝																	■	■	■	■

참고문헌

[1] FEBS Letters, 589, 2570-2577 (2015)

[2] Chemical Reviews 116, 11128-11180 (2016)

[3] Nature Methods 6, 606 (2009)

[4] Current Opinion in Structural Biology 58, 197-213 (2019)

[5] Advanced Energy Materials 11, 2002821 (2021)

[6] Quarterly Reviews of Biophysics 36, 147-227 (2003)

[7] Current Research in Structural Biology 2, 164-170 (2020)

[8] Journal of Structural Biology 180, 226–234 (2012)

[9] Quarterly Reviews of Biophysics 40, 191 (2007)

[10] Chemistry A European Journal 24, 6639-6644 (2018)

[11] BioChemist 42, 36-42 (2020)

[12] Nature Methods 6, 606 (2009)

[13] Lab Chip 16, 1161-1170 (2016)

[14] Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1021, 165941 (2022)

[15] Structure 22, 1862–1874 (2014)

[16] Scientific Reports 11, 5655 (2021)

[17] Journal of American Chemical Society 142, 15697−15710 (2020)

[18] Journal of American Chemical Society 143, 20109−20121 (2021)

[19] Physical Chemistry Chemical Physics 19, 17143−17155 (2017),

[20] Polymers 11, 2104 (2019)

[21] Molecular Pharmaceutics 17, 2809–2820 (2020)

[22] PNAS 115, E3351-E3360 (2018)

[23] ACS Nano 15, 6709−6722 (2021)

[24] Bioinformatics 34, 1944-1946 (2017)

[25] Journal of the Korean Physical Society, submitted (Ha et al.)

[26] Frontiers in Pharmacology 13, 947005 (2022)

[27] Journal of X-ray science and Technology 20, 331-338 (2012)

2.2.2 소재 구조 분석 빔라인 (Material Structure Analysis)

가. 소개

물질의 구조에 관한 연구는 화학, 물리학, 재료과학, 지구과학, 생물학 등 다양한 과학 분야에서 중요하게 다뤄진다. 다양한 분야에서 물질의 구조를 규명함으로써 소재의 특성을 연구하는 데 기본적인 특성과 연관되는 구조적 정보를 제공한다. 결정성을 띠는 물질의 구조를 규명하는 효과적인 방법은 X-선 회절 실험이다. X-선 회절 실험으로 분석이 어려운 금속 원소들의 산화상태, 배위수, 단위 구조 정보 등은 X-선 흡수 분광 실험이 주로 이용된다. 4GSR 다목적 방사광가속기의 소재 구조 분석 (Material Structure Analysis) 빔라인은 물질의 구조 규명에 적극적으로 활용되는 고분해능 분말 회절(High Resolution Powder Diffraction 또는 HRPD)과 X선 흡수 미세구조 (X-ray Absorption Fine Structure 또는 XAFS) 기법을 활용하여 물질의 구조를 파악하는 연구를 목적으로 한다. 또한, 본 빔라인의 해당 기법은 방사광을 필요로 하는 산업체 수요조사에서 높은 수요로 조사되어 산업우선지원 빔라인으로 분류되었다.

Bending magnet을 광원으로 활용하는 포항 가속기 연구소 PLS-II의 고분해능 분말회절 9B 빔라인과 다르게 본 빔라인에서는 언듈레이터 광원의 높은 플럭스와 낮은 발산각을 활용하고 장치의 구성을 통한 측정시간 단축으로 산업체를 비롯한 이용자들의 높은 수요 충족이 기대된다.

본 보고서에서는 HRPD와 XAFS 기법을 제공하는 소재 구조 분석 빔라인 설계에 관해 설명한다.

나. 빔라인 개요

소재 구조 분석 빔라인에서 구현하고자 하는 실험기법은 아래와 같다.

- 고분해능 분말 회절 (High-Resolution Powder X-ray Diffraction 또는 HRPD)
- X-선 흡수 미세구조 (X-ray Absorption Fine Structure 또는 XAFS)
- 실시간 X-선 회절 (In-situ X-ray Diffraction 또는 In-situ XRD)

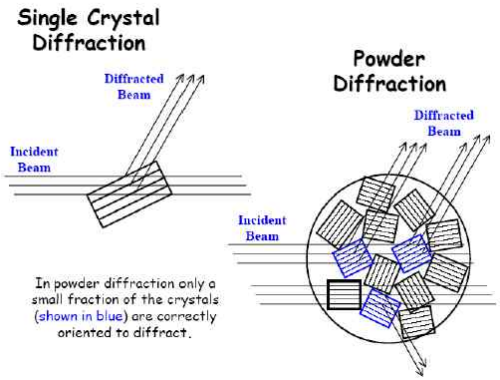
HRPD와 XAFS 기법은 단색화장치(Monochromator)로부터 입사되는 단색 빔을 활용하는 기법이다. HRPD를 포함하는 XRD 기법은 물질의 원자간 거리(d-spacing)를

측정함에 목적이 있다. XAFS 기법은 원소 종류에 따라 상이한 흡수단의 에너지를 에너지 스캔을 통하여 물질의 흡수 계수를 측정하는 것에 목적이 있다. HRPD와 XAFS 기법은 단색 빔을 연구에 활용하는 기법으로 단색화장치의 에너지 분해능과 정밀한 Spectral energy를 위한 Bragg 각 조정이 중요하다.

다. 빔라인 실험기법

(1) 고분해능 분말회절 (HRPD)

X-선 회절 기법은 결정성을 띠는 재료를 측정하여 결정구조를 분석할 수 있다. 단색 빔이 결정질 물질에 조사 되면 결정격자 간 거리에 따라 Bragg 조건을 만족하는 각도에서 회절된 빔이 나오게 된다. 회절 되어 나오는 X-선은 검출기의 각도를 조정(Scan) 하며 측정함으로써 규칙 배열된 원자들의 상호 거리를 파악할 수 있는 정보를 제공한다. 이를 활용하면 알려진 물질들의 고유 원자간 거리 정보와 비교 및 분석을 통해 원자들의 상대적 위치를 파악할 수 있고, 이는 결정구조를 규명하는 데 활용된다. X-선 회절을 통한 결정구조 분석은 단결정 재료를 이용하여 얻어지는 회절 결과를 분석하는 것이 정확하지만, 모든 물질은 단결정화하여 회절 결과를 얻을 수 없으므로 다수의 단결정 물질의 결과를 보여주는 다결정성 (Polycrystalline) 분말을 활용한 분말회절 기법이 일반적으로 이용된다 (<그림 2.2.2.1> 참고). 분말회절 기법으로 측정되는 회절 패턴은 1차원 결과로 얻어지므로 물질의 결정구조 또는 구조인자(Structure factor)를 정확히 파악하기 위해서는 회절 피크 (Peak) 위치와 모양의 정확도가 중요하다. 정확한 회절 Peak 위치와 모양은 측정의 각 분해능과 관련이 있다. 분말회절 기법에서 기구적(instrumental)으로 생성되는 회절빔의 폭 확장(Peak broadening)을 최소화하고, 광원의 낮은 발산각을 활용하여 회절 되어 나오는 빔의 각 분해능을 높여 측정하는 것을 고분해능 분말 회절 기법이라 한다. 각 분해능은 검출기의 종류와 장치 구성에 따라 약 1/100 또는 1/1000 수준으로 구현할 수 있으며, 이는 각 분해능 파트에서 자세히 설명한다. 해외 유사 분말회절 빔라인에 제공하는 우수한 각 분해능 값은 Multi-Analyzer Crystals 검출시스템을 이용하여 측정하고, 그 값은 약 0.005° 정도이다.



<그림 2.2.2.1> 단결정과 다결정 재료를 이용한 분말회절 측정법

회절 결과로부터 얻어지는 Peak 특성 분석은 아래와 같은 정보를 제공한다.

- 결정구조 (Crystal structure): 가상의 결정구조를 기반으로 알려진 물질 원자들의 상대적 위치와 측정된 물질의 상대적 원자간 거리를 관찰 및 비교하여 결정구조를 파악한다.

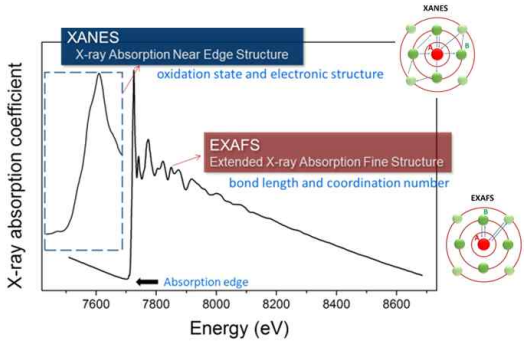
- 잔류응력 (Residual stress): 물질 내 잔류응력은 결정격자의 왜곡을 초래한다. 이는 회절 결과에서 원자간 거리의 변화로 관찰되며, 변화되는 원자간 거리를 정밀하게 측정 및 비교함으로써 잔류응력 계산이 가능하다.

- 상전이 (Phase transition) 또는 상식별 (Phase identification): 외부 조건으로 인한 물질 내 상전이 또는 새로운 상의 형성을 변화되는 원자간 거리와 Peak의 특성 변화를 통해 분석할 수 있다.

(2) X-ray Absorption Fine Structure (XAFS)

X-선 흡수 미세구조 기법은 시료를 투과하기 전·후의 X-선 세기에 대한 정보를 얻고 이를 Beer-Lambert 법칙에 적용하여 시료의 흡광 계수를 분석하는 기법이다. 원소는 서로 다른 흡수단 (Absorption edge) 에너지를 가지므로 입사하는 X-선 에너지를 변화시킴으로써 특정 원소를 선택적으로 분석할 수 있다. XAFS 결과는 X-선 흡수단 근방구조(X-ray Absorption Near Edge Structure, XANES)와 이어서 얻어지는 X-선 흡수 미세구조(Extended X-ray Absorption Fine Structure, EXAFS)로 이루어지며,

흡수단으로부터 약 1 keV 이내의 에너지 영역에 대한 X-선 흡광 계수를 측정한다 (<그림 2.2.2.2> 참고). XANES 분석은 내각 준위의 전자를 최외각 준위의 비어있는 궤도 함수로 여기시키는 과정에서 관찰되는 에너지를 측정하는 분석이다. XANES 분석을 통해 산화상태, 공유결합성, 배위 (coordination) 등 정보를 얻을 수 있다. EXAFS 분석은 X-선 조사를 통해 발생한 광전자가 이웃 원자에 부딪혀 역산란 (backscattering) 되는 과정 중 흡수되는 X-선 에너지를 측정하는 분석이다. EXAFS 분석을 통해 특정 원소 주변의 배위수 (Coordination number), 결합 길이 (Bonding length) 등 정보를 얻을 수 있다. XAFS 기법은 에너지 스캔을 통해 원소의 흡수 계수를 측정함으로, 10^{-4} 수준의 에너지 분해능을 가진 정확한 단색 빔과 높은 Flux가 빔라인 설계에서 고려되어야 한다.



<그림 2.2.2.2> X-선 흡수단 근방구조(XANES)와 X-선 흡수 미세구조(EXAFS)로 이루어진 XAFS 결과 그래프

(3) In-situ X-ray Diffraction(In-situ XRD)

분말 회절 기법은 분말 시료를 이용하여 고분해능을 가진 방사광 회절 패턴으로 분석함으로 정확한 결정구조와 구조인자를 분석하는 것에 목적이 있다. 하지만 분말의 정적 상태에 대한 회절 결과를 측정하는 것은 실제 환경에서의 구조 변화와 거동을 예측하기 어렵기 때문에 물질의 구조 변화에 대한 정확한 이해에 어려움이 있다. 최근 분말 회절 기법은 온도, 기체 흡착, 전기화학 변화 등 다양한 환경에 놓인 시료의 구조 변화와 그 과정에 대한 분석 수요가 증가하고 있다. 실험 환경을 실제 환경과 유사하게 묘사하여 구조 변화를 추적함으로써 물질에 대한 메커니즘을 더욱 정확하게 이해할 수 있고, 특히 준안정 상태에서의 구조에 대한 이해를 높일 수 있어 동역학적

분석 또는 실시간 변화 분석에 대한 중요도가 증가하고 있다. In-situ XRD 측정은 연구 수요와 그 중요도가 증가함에 따라 짧은 시간 내에 회절 데이터를 측정할 수 있기 때문에 해외 분말 회절 빔라인에서 적극적으로 도입하고 있다. 회절기를 이용한 분말회절 기법은 시료로부터 얻어지는 회절 패턴을 Angle-scan 방식으로 측정하므로 검출기의 2Θ scan을 위한 측정시간이 요구되지만, In-situ XRD 기법은 일반적으로 2D 검출기 또는 Position Sensitive Detector (PSD)를 활용하여 투과법(Transmission geometry)으로 Capillary 시료로부터 회절 되는 Debye-Scherrer ring 회절 패턴을 측정하므로 짧은 시간 내에 측정할 수 있다. 이를 활용하면 실제 환경과 유사한 상태의 시료에 대한 회절 데이터 측정이 가능하고 다양한 형태의 외부 조건 변화에 따른 결정구조를 분석할 수 있으므로 물질의 실시간 변화 또는 동역학적 현상에 대한 결정구조 분석이 가능하다.

라. 빔라인 설계 목표

<표 2.2.2.1> 소재 구조 분석 빔라인의 목표 사양

	내 용
광 원	In-vacuum Undulator 24 mm Period
에너지 범위	5~40 keV
에너지 분해능 @20 keV	ΔE/E < 2 × 10^{-4}, Si (111) ΔE/E < 3 × 10^{-5}, Si (311)
빔 크기 (H × V) 20 keV, 13th harmonic	~2000 × 1000 μm^2 FWHM (@73 m for HRPD)
빔 세기 @sample, 20 keV, 13th harmonic	> 10^{13} ph/s

(4) 에너지 범위 (Photon energy range)

본 빔라인에서 제공하는 기법들의 가용 에너지 범위는 5~40 keV이다. 고분해능 분말회절 기법은 20 keV를 주된 에너지로 제공한다. XAFS 기법은 Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pt, Au, Zr, Nd, Mo, Ru, Pd, Ag, Sn, Sb 등 주기율표에 존재하는 원소 대부분을 측정하기 위해 5~40 keV 에너지 영역에서 에너지를 제공한다.

(5) 빔 크기 (Beam size)

소재 구조 분석 빔라인은 광원으로부터 입사되는 빔을 거울 장치를 통해 수직 방향으로 시준된 natural 빔을 실험허치 내 시료 위치에 제공한다. 빔 크기는 13th harmonic으로 20 keV 에너지의 빔을 입사하는 경우 Total sigma 기준으로 수평 방향 19.00 μm, 수직 방향 4.33 μm이며, 발산각은 수평 방향 11.69 μrad, 수직 방향 11.39 μrad이다. 따라서 실험허치내 시료에 도달하는 빔 크기는 수평 방향 ~2000 μm, 수직 방향 1000 μm이다. 실험에 사용하는 빔 크기는 시료 스테이지 전단에 위치한 슬릿을 이용하여 반가폭(FWHM) 이하의 크기로 조정하여 사용한다.

(6) 각 분해능(Angular resolution)

고분해능 분말회절 기법의 우수한 각 분해능은 단색화장치 결정의 재료와 Bragg 각에 의해 결정되는 에너지 분해능과 관련되어 있다. 에너지 분해능은 (수식 2.2.2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta\epsilon}{\epsilon}=\frac{\delta\lambda}{\lambda}=\cot\theta_B(\psi^2+\omega^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{(수식 2.2.2.1)}$$

θ_B : Bragg angle of a monochromator

ψ : Effective divergence of the incident beam

ω : Darwin width of the reflection at the chosen wavelength

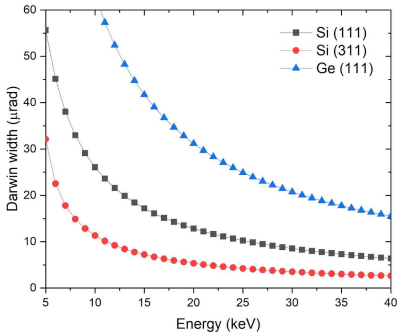
Darwin width는 (수식 2.2.2.2)로 표현될 수 있으며, 본 보고서에서는 결정면과 파장에 따라 변화하는 Darwin width를 X-ray calculations website에서 확인하였고, 이를 이용하여 각 분해능을 계산하였다.

$$\omega=\frac{2r_e\lambda^2}{\pi V}|F(h)|\frac{K}{\sin 2\theta_B} \quad \text{(수식 2.2.2.2)}$$

r_e : Classical electron radius, V : The volume of the unit cell

$F(h)$: the structure factor, K : the polarization factor

고분해능 분말회절 기법은 20 keV를 주 에너지로 사용할 예정이며, 단색화장치는 5~40 keV의 에너지 영역을 제공할 수 있도록 두 종류의 회절면 Si (111)과 Si (311)을 설치한다. 두 회절면의 가용 에너지에 대한 Darwin width의 변화는 <그림 2.2.2.3>에 나타내었다. Ge (111)은 분말회절 기법을 제공하기 위한 실험장치인 Multi-Analyzer Crystal(MAC)에 설치되는 결정의 회절면이다.



<그림 2.2.2.3> 에너지에 따른 Si (111), Si (311), Ge (111)의 Darwin width 그래프

분말회절 패턴의 반가폭은 빔의 발산과 단색화장치의 Darwin width에 의해 결정되고, 단색화장치의 두 결정과 Analyzer Crystal의 결정 하나로 실험장치를 구성하는 경우 (수식 2.2.2.3)을 통해 계산할 수 있다. (수식 2.2.2.3)을 통해 분말회절 패턴의 반가폭은 결정들의 Darwin width, 파장에 대한 Bragg 각, 광원과 광학장치에 의해 결정되는 빔 발산(divergence)이 결정하는 것을 알 수 있다.

$$\Delta(2\theta)_{FWHM} = \left[\Delta_A^2 + \left(\frac{\Delta_M^2}{2}\right)\left(\frac{\tan\theta_A}{\tan\theta_M} - 2\frac{\tan\theta}{\tan\theta_M}\right)^2 + \sigma_V^2\left(1 + \frac{\tan\theta_A}{\tan\theta_M} - 2\frac{\tan\theta}{\tan\theta_M}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} + \frac{\sigma_H^2}{16}\left(\frac{1}{\tan 2\theta} + \tan\theta_A\right) \quad \text{(수식 2.2.2.3)}$$

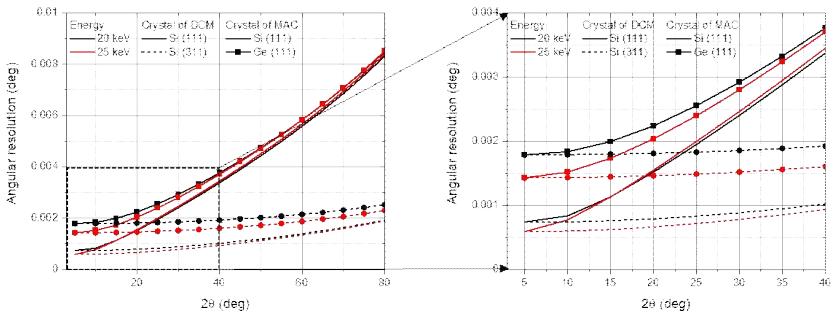
Δ_M : Darwin width of monochromator, Δ_A : Darwin width of analyzer crystal,

θ_M : Bragg angle of monochromator, θ_A : Bragg angle of analyzer crystal

σ_V : Vertical divergence of incident beam, σ_H : Horizontal divergence of incident beam

<그림 2.2.2.4>는 단색화장치의 Si (111)과 Si (311) 결정면에서 Analyzer Crystal의 결정으로 Si (111)과 Ge (111)을 사용할 때, (수식 2.2.2.2)와 (수식 2.2.2.3)을 이용하여 회절 데이터에 대한 각 분해능 결과를 보여준다. <그림 2.2.2.4>의 20 keV 에너지에서 시료로부터 회절되는 빔을 측정하기 위한 검출기의 2Θ 위치에 대한 각 분해능 결과이다. 소재 구조 분석 빔라인의 경우, 단색화장치 앞단에 시준 거울을 설치하여 수직 방향으로 시준된 빔을 제공할 예정이므로 각 분해능 계산에서 수직 발산은 σ_V = 0로 고려하여 계산하였다. 주 에너지로 사용할 예정인 20 keV 에너지에서 단색화장치의 결정 회절면에 따른 각 분해능은 Si (111)에 비해 Si (311)에서 우수한 각

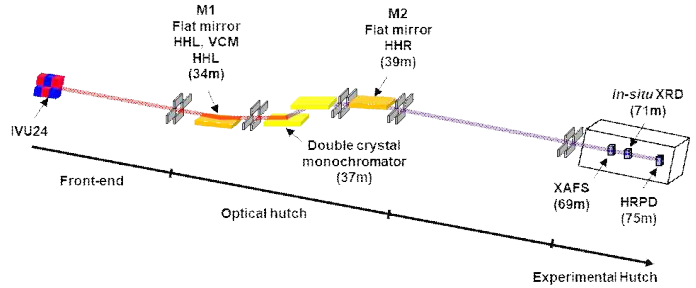
분해능으로 관찰되었다. 이는 Si (311)이 Si (111)에 비해 작은 Darwin width를 가지기 때문이다. 또한, Analyzer Crystal의 결정으로 Si (111)과 Ge (111)를 사용하는 경우를 비교하면 검출기 2Θ가 40° 이하에서 약 0.0035° 이하의 각 분해능을 보여주고 Analyzer Crystal의 종류에 따른 각 분해능 차이는 해당 범위에서는 크지 않음을 알 수 있다. 주 에너지가 20 keV 이상의 고에너지임을 고려할 때 큰 Darwin width, 즉 큰 Acceptance angle을 갖는 Ge (111)을 사용하는 것이 높은 flux의 회절빔 강도를 얻는 것에 유리하여 Analyzer Crystal의 결정은 Ge (111)으로 결정하였다.



<그림 2.2.2.4> 단색화장치 Si (111)과 Si (311), Analyzer Crystal Si (111)과 Ge (111)에 따른 20 keV 에너지에 대한 검출기 2Θ 각에 따른 각 분해능 변화

마. 빔라인 구성

(1) 빔라인 배치도



<그림 2.2.2.5> 소재 구조 분석 빔라인의 삽입 장치와 광학장치 및 실험허치 배치 개략도

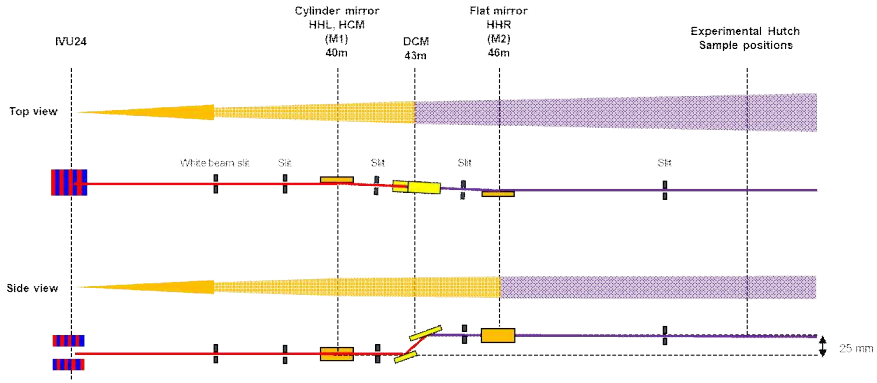
(2) 빔라인 구성표

<표 2.2.2.2> 소재 구조 분석 빔라인의 광학장치 구성표

거리 (m)	항 목	사 양	용 도
0	Undulator	IVU24	Source
15.7	Parasitic mask	0.6 mrad	Parasitic photon beam 제거
16.0	Beam stopper		
	MGV		
17.0	PBPM1	4 blade type	광자빔 위치 진단
17.5	Safety magnet		빔 덤프용 Magnet
	Lead Collimator spool		
	MGV		
19.0	Fixed mask	0.46 mrad	수평 방향 빔 제거 3.5 kW 열량 흡수
20.8	Photon shutter	Gildcop absorber 사용	광학장치 보호 및 빔 차폐
	PGV		
	Lead collimator spool		
21.8	Fast close shutter		
22.0	PBPM2	4 blade type	Orbit 조정 및 빔 위치 진단
22.5	Movable mask	4 way slit, UHV, LCW	Central cone 외 빔 제거
	Lead collimator spool		
23.8	Safety shutter		
	MGV		
	White beam filter	Graphite 두께: 0.5, 1, 2 mm Diamond 두께 : 0.1, 0.2, 0.5mm	빔라인 정렬 시 low energy 제거하여 광학장치 파손 예방
	Fluorescent screen monitor	Fluorescent metal screen, current signal output	빔 profile 진단
	Whit beam Slits	4-way slit, UHV	High heat load mirror 입사 빔 conditioning
40.0	Horizontal collimating mirror	Cylinder mirror 1-stripe coating (Double layer Rh and Pt) Sagittal radius ~239.999 mm	High heat load 제거 High energy photon 제거 수직방향 빔 Collimation
	Pink slit	4-way slit, UHV	DCM 입사빔 conditioning
	Fluorescent screen monitor (YAG+CCD)	Fluorescent metal screen, current signal output	빔 profile 진단
43.0	DCM	Si (111)/Si (311) pair, fixed exit design	광원 단색화
	FCS		
	Mono slit	4-way slit, UHV	High harmonics rejection mirror 입사 빔 conditioning
	Fluorescent screen monitor (YAG+CCD)	Fluorescent metal screen, current signal output	빔 profile 진단
46.0	High harmonics rejection mirror	Horizontal Flat mirror 3-stripe coating (Si bare, Rh, Pt)	High harmonics 감쇄
	FCS		
	beam profile diagonastic	scDBPM or Nano beam position monitor	빔 profile 진단
	Be window	Double-side polished, ?-um-thick	UHV 구간 종료
	Mono slit	4-way slit, HV	입사 빔 conditioning
	Pre ionization chamber		
	Attenuator	8-channel(Al, Ti 두께별 + block)	빔 정렬을 위한 빔 세기 감쇄
	Mono slit	4-way slit, HV	입사 빔 conditioning
	Fluorescent screen monitor (YAG+CCD)	Fluorescent metal screen, current signal output	빔 profile 진단
	Ionization chamber		XAFS를 위한 입사빔 I_0 측정
	Sample stage		XAFS
	Ionization chamber		XAFS를 위한 입사빔 I_T 측정
	Ionization chamber		XAFS를 위한 입사빔 I_R 측정
	Flight beam path	2D 검출기용 시료 스테이지와 함께 motion	In-situ XRD를 위한 bypass 입사빔 전달
	Ionization chamber		In-situ XRD와 HRPD를 위한 입사빔 I_0 측정
	Flight beam path	2D 검출기용 시료 스테이지와 함께 motion	In-situ XRD를 위한 bypass 입사빔 전달
	Sample stage		In-situ XRD 2D 검출기용 시료 스테이지
	2D detector and manipulator	XYZ, yaw, pitch motion	2D 검출기 대형 2D 검출기 위치 제어 HRPD 기법 제공 시 bypass
	Flight beam path		HRPD를 위한 bypass 입사빔 전달
	Diffractometer, sample stage and Multi-Analyzer Crystals detector	3 circle diffractometer θ, 2θ, ω(sample rotation)	HRPD

(3) 빔라인 광 경로

빔라인 시뮬레이션은 OASYS 환경에서 SRW/ShadowOui 프로그램을 이용한 ray-tracing을 통해 수행하였다. <그림 2.2.2.6>은 20 keV 에너지의 시뮬레이션 결과로, 언듈레이터에서 방출되는 광원이 40 m에 위치한 시준 거울에서 수직 방향으로 시준되고 단색화장치에서 빔을 단색화하여 실험허치 내 위치한 시료까지 natural 한 빔으로 제공된다.



<그림 2.2.2.6> 소재 구조 분석 빔라인의 삽입 장치로부터 실험허치까지 광 경로

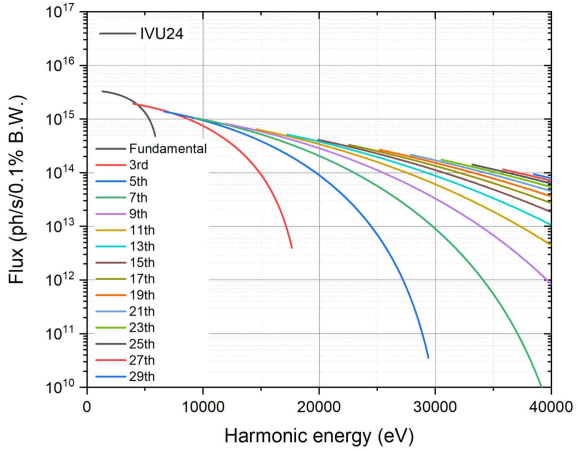
바. 광원

(1) 언듈레이터 (In-vacuum Undulator)

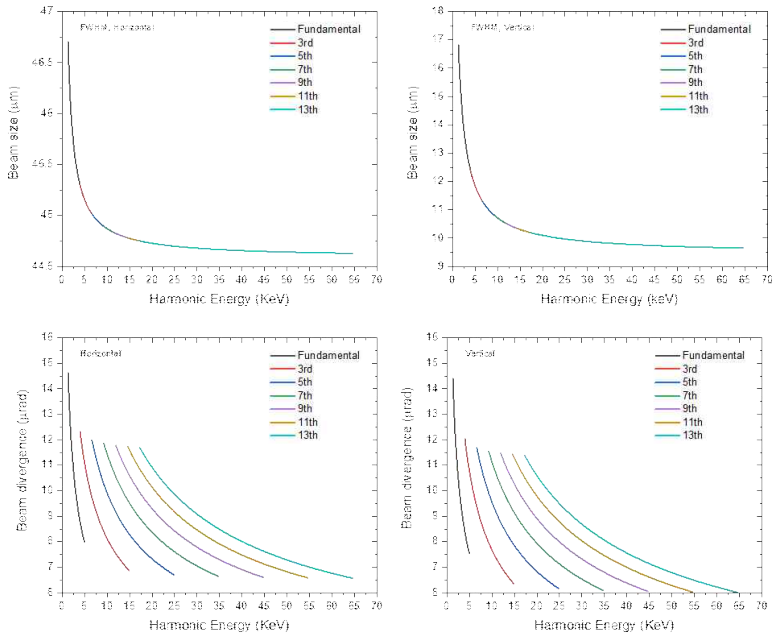
소재 구조 분석 빔라인의 삽입 장치인 언듈레이터는 가용 에너지 영역인 5~40 keV를 홀수차 harmonic을 이용하여 연속적인 에너지 스펙트럼을 제공하여야 한다. 본 빔라인의 언듈레이터는 주기 24 mm 진공 내 언듈레이터(In-Vacuum Undulator, IVU)인 IVU24를 선택한다 (<표 2.2.2.3>). 언듈레이터의 성능은 SPECTRA 소프트웨어를 평가하였다. IVU24는 5~18 mm 자석 간격 범위에서 <그림 2.2.2.7>과 같이 해당 에너지 영역을 연속적인 홀수차 harmonic을 이용하여 제공할 수 있다. <그림 2.2.2.8>은 IVU24의 조화수 에너지에 따른 광원의 크기 변화와 발산각 변화를 나타내었다.

<표 2.2.2.3> 삽입 장치 IVU24의 광원 사양
(최대 쏠림 parameter, K = 2.747@최소 gap = 5 mm)

빔라인	소재 구조 분석
주기 (mm)	24
광원 크기 (H × V, σ, μm × μm)	19.8 × 7.1
발산각 (H × V, σ, μrad × μrad)	12.9 × 12.6
총 전력 (kW)	17.9
전력밀도 (W/mrad^2)	165



<그림 2.2.2.7> IVU24 에너지에 따른 홀수차 harmonic의 total flux;
자석간격 5 ~ 18 mm; 쏠림 파라미터(K) 범위 2.74 ~ 0.39



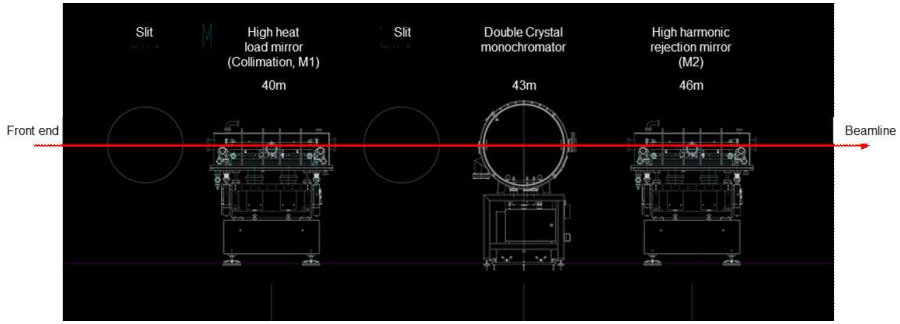
<그림 2.2.2.8> 조화수 에너지에 따른 수평 및 수직 방향의 빔 크기와 빔 발산각

마. 프론트엔드

프론트엔드는 Parasitic mask, Beam stopper, Safety magnet, Fixed mask, Photon shutter, Movable mask, Safety shutter, Screen monitor 등으로 구성된다. 프론트엔드에 구성되는 각 장치는 4장 빔라인 파트를 참고한다.

사. 광학허치

광학허치는 시준 거울과 단색화장치 및 고조파 제거 거울로 구성된다. 각 장치의 위치는 40 m에 시준 거울, 43 m에 단색화장치, 46 m에 고조파 제거 거울이 위치한다. <그림 2.2.2.9>는 광학허치의 개략도를 나타내었다. 광학장치들은 빔의 단면적, 열부하, 냉각방식 등 고려사항들을 고려하여 배치 및 설계될 예정이다. <표 2.2.2.4>는 광학장치의 상세 사양을 나타내었다.



<그림 2.2.2.9> 광학허치 내 거울 장치와 단색화장치 구성 및 도면

<표 2.2.2.4> 광학허치 내 거울 장치 및 단색화장치 사양

	M1	DCM	M2
광원으로부터 거리 (m)	40	43	46
Incident angle	3 mrad	Si (111) 4~25° Si (311) 5~12°	3 mrad
Shape	Cylinder	Plane	Flat
Radius	239.999	-	-
Direction	Horizontal	Vertical	Horizontal
Substrate	Si	Si	Si
Coating material	1 Strips 5 nm Rh on 50 nm Pt	-	3 Strips Si-bare, Rh (50 nm), Pt (50 nm)
Beam size @20 keV (13th harm.) (H × V, mm × mm, FWHM)	1017 × 991	1066 × 1017	1017 × 1142
Footprint @20 keV (13th harm.) (H × V, mm × mm, FWHM)	323 × 1	10.3 × 1.07	380 × 1.02
Substrate size (mm × mm)	800 × 50	-	800 × 50
Focus length (mm)	∞	-	-
Roughness, σ (nm)	< 0.5	< 1	< 0.5
Slope error (tangential/sagittal) (μrad, RMS)	< 0.1	< 1	< 0.1
Max total heat load (W)	< 100	< 120	< 1
Max surface heat load (W/mm²)	< 1	< 40	< 1

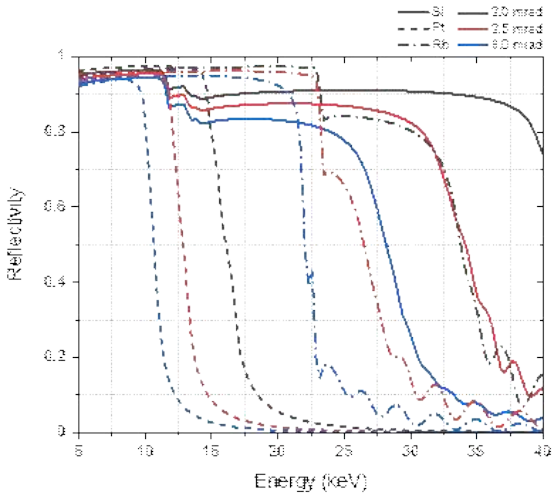
(1) 시준 거울

시준 거울은 Flat 형 거울이며 광원으로부터 34 m에 위치하며, 백색광이 처음으로 입사되는 광학장치이다. 이 거울은 백색광으로부터 입사되는 많은 열부하를 흡수하여 단색화장치로 입사하는 빔의 열부하를 줄이는 역할을 한다.

거울의 기판으로 이용되는 Si는 열팽창으로 인한 빔 산란을 고려하여 표면에서 1 W/mm^2 이하의 열부하가 발생하도록 설계하여 열팽창으로 인한 빔 산란을 최소화하도록 한다. Si 기판의 표면 열부하는 OASYS 환경의 SRW/ShadowOui 프로그램을 이용한 시뮬레이션으로 계산하였다. 입사되는 빔 크기는 거울장치 전단에 위치한 슬릿의 aperture 크기를 1 × 1 mm^{2}로 조정하여 고려하였다. 광원으로부터 거울 장치로 입사되는 열은 1 × 1 mm^{2}의 슬릿을 통과하면 265 W의 열량이 거울 장치에 부하 되는 것으로 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 시준 거울에 흡수되는 열량은 최대 99 W이며, 거울 표면에 가해지는 열은 0.26 W/mm^{2}으로 1 W/mm^2 이하의 열부하가 가해지는 것을 확인하였다. 이를 통해 시준 거울에서 안정적인 빔 전달이 가능함을 알 수 있다.

시준 거울에 흡수되는 열에 의한 Si 기판의 열팽창 정도를 파악하기 위해 ANSYS를 이용하여 기판의 열팽창 정도를 분석하였다. 30 m 위치에서 2 mrad의 입사각으로 거울 장치에 빔을 입사하여 거울 장치에 0.18 W/mm^{2}의 열 흡수되는 경우, Si 기판은 거울 장치의 중앙위치에서 두께 방향으로 약 200 nm 팽창하게 된다. 이때 거울 장치의 roughness, slope error 등 기계적 오차와 열팽창에 의한 빔 산란을 고려하면 빔 발산은 약 1 μrad 이하일 것으로 예상된다. 이는 20 keV에서 광원이 가지는 수직 방향의 발산인 10 μrad과 비교하면 1/10 수준이다.

코팅 물질은 빔 운영의 편의성을 위해 M1에서는 하나의 스트립을 이용하여 입사각에 따라 선택적으로 고에너지를 제거한다. 소재 구조 분석 빔라인은 5~40 keV 에너지를 제공하는 빔라인이므로 가용 에너지 영역에서 0.8 이상의 반사율로 에너지를 제공하기 위해 Pt 코팅 위에 Rh을 코팅하여 하나의 스트립의 반사면을 제공할 예정이다. <그림 2.2.2.10>은 2.0 mrad, 2.5 mrad, 3.0 mrad 입사각에서 Si bare와 Rh 및 Pt 코팅의 반사율을 나타낸 그래프이다. 소재 구조 분석 빔라인의 고분해능 분말 회절 기법은 주된 에너지를 20 keV를 사용할 예정이므로, 거울 장치의 입사각은 3 mrad을 사용하면 주 에너지에서의 반사율은 0.8~0.9 정도로 나타난다.



<그림 2.2.2.10> 입사각에 따른 Si bare와 Rh 및 Pt 코팅 물질에서의 반사율

시준 거울은 단색화장치로 입사되는 빔을 수직 방향으로 시준하는 역할을 한다. (수식 2.2.2.1)과 (수식 2.2.2.3)을 통해 빔 발산을 줄임으로써 우수한 에너지 분해능과 각 분해능을 얻을 수 있다. 이를 위해 거울 장치에 곡률을 주어 수직 방향으로 빔이 시준되도록 제작한다. 거울 장치 곡률의 반경(R)은 (수식 2.2.2.4)를 이용하여 계산하였다.

$$R = \frac{2L_1L_2}{(L_1+L_2)\sin\alpha} \quad \text{(수식 2.2.2.4)}$$

$$R = \frac{2L_1}{\sin\alpha} \quad \text{(수식 2.2.2.5)}$$

L_1은 광원에서 거울까지 거리, L_2는 거울에서 집속 위치까지 거리, α는 입사각이다. 거울 장치에서 빔을 시준하는 경우 $L_2 = \infty$가 된다. 이를 (수식 2.2.2.4)에 적용하면 (수식 2.2.2.5)가 된다. 본 빔라인에서는 고분해능 분말 회절 측정 시 3 mrad을 주 입사각으로 20 keV의 주 에너지 빔을 제공할 예정이므로 (수식 2.2.2.5)를 이용하여 광원으로부터 40 m에 위치한 시준 거울의 곡률은 Sagittal 방향으로 R = 239.999 mm로 계산된다.

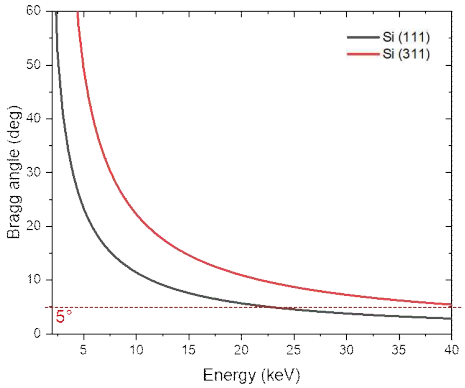
거울 기판의 크기는 고에너지를 제공하기 위한 입사각 2 mrad을 기준으로 빔 크기를 계산하면 약 550 mm가 필요하며, 유효면적에 여유를 두어 800 mm로 설계한다.

(2) 단색화장치

단색화장치는 광원으로부터 43 m에 위치한다. 본 빔라인은 5~40 keV의 에너지 영역을 제공하기 위해 두 종류의 회절면 Si (111)과 Si (311)을 사용한다. 두 회절면은 수평 방향의 이동장치를 이용하여 선택적으로 사용한다. 빔 정렬을 최소화하고 안정적인 빔라인 운용을 위해 수직 방향의 off-set을 25 mm의 조건에서 Fixed exit 조건으로 빔이 입사되도록 설계한다.

<그림 2.2.2.11>은 에너지에 따른 두 결정 회절면의 브래그 각을 나타내었다. 첫 번째 결정의 크기는 에너지가 높을수록 결정의 브래그 각은 낮아져 크기가 큰 결정이 요구된다. 제공하는 가장 낮은 에너지인 Si (111)의 25 keV와 Si (311)의 40 keV에서의 브래그 각 조건에서 빔 크기는 300 μm로 가정하여 계산하였다. 첫 번째 결정의 최소 크기는 Si (111)에서 20.3 mm와 Si (311)에서 10.6 mm 이상의 크기가 필요하며, 실제 결정의 크기는 유효면적에 여유를 두어 50 mm로 결정하였다. 동일한 브래그 각 조건에서 두 번째 결정의 크기는 150 mm로 설계한다.

단색화장치 첫 번째 결정은 시준 거울로부터 백색광이 입사되어 단색화 시키므로 시준 거울에서 반사되어 들어오는 에너지 중 브래그 조건에 만족하는 에너지를 제외한 에너지는 흡수한다. 단색화장치로 입사되는 열량은 시준 거울의 입사각과 코팅 물질에 따라 상이하다. 따라서 첫 번째 결정의 열량을 예측하기 위해 최대 열부하가 가해지는 조건에서 OASYS 시뮬레이션을 통해 계산하였다. 첫 번째 결정에 흡수되는 최대 열량은 120 W이며, 표면에 가해지는 최대 열량은 23.92 W/mm^{2}으로 계산되었다. 현재 포항 가속기 연구소에서 사용하는 단색화장치 냉각방식을 이용하였을 때 안정적인 구동을 위한 기준 열량은 40 W/mm^2 이하로 시뮬레이션을 통해 확인한 열량은 안정적인 값임을 알 수 있다. 40 W/mm^{2}의 기준은 결정의 바닥면을 액체질소로 냉각하는 방식에서의 값이며, 결정의 옆면을 냉각하는 방식이 개발 및 적용되면 보다 효율적인 냉각이 가능할 것으로 기대된다.



<그림 2.2.2.11> 5 ~ 40 keV 에너지 영역에서 에너지에 따른
두 회절면 Si (111)과 Si (311)의 브래그 각 변화

(3) 고조파 제거 거울

고조파 제거 거울은 Flat 형태의 거울이며 광원으로부터 46 m에 위치한다. 단색화장치로부터 입사되는 빔의 고조파를 제거하는 역할을 한다. 고조파 제거 거울은 시준 거울과 동일한 입사각 3 mrad을 사용하여 광원으로부터 실험허치의 시료까지 전달되는 빔의 경로를 일정하게 유지한다. 거울의 코팅 물질은 세 개의 스트립으로 Si bare와 Rh 및 Pt를 적용한다.

<그림 2.2.2.10>을 통해 세 개의 스트립 코팅은 0.8~0.9 수준의 반사율을 5~40 keV 에너지 영역에서 보여주는 것을 확인하였다. 단색화장치로부터 입사되는 빔은 에너지와 실리콘 결정면에 따라 고조파가 함께 실험허치로 입사되므로 단색화 빔을 제공하기 위해서는 고조파 제거가 필요하다. 거울 장치들의 입사각을 3 mrad로 사용하는 경우, 5 keV 에너지를 단색화하기 위해 단색화장치의 결정은 Si (111)을 사용하고 거울 장치들의 코팅면을 Si bare로 사용하면 단색화장치로부터 15 keV 에너지의 고조파가 생성되며, 이는 거울 장치에서 약 0.03 이하의 반사율을 보여주어 고조파를 효율적으로 제거할 수 있음을 알 수 있다 (<그림 2.2.2.10>). 이용자의 요구에 따라 고에너지를 필요로 하는 경우 거울 장치들의 입사각을 조정하여 빔라인 실험을 지원하여야 한다. 이때 거울 장치들의 입사각 조정은 실험허치 내 시료 위치에서 빔 높이와 경로 변화가 야기되어 광학장치 또는 실험장치들의 재정렬이 요구되므로

조정에 각별한 주의를 요한다.

거울 장치들의 주 입사각이 3 mrad인 이유는 HRPD 기법의 주 에너지인 20 keV 에너지를 0.8~0.9의 반사율로 제공할 수 있으며, XAFS 기법에서 고에너지 영역보다 20 keV 이하의 에너지 영역에 대한 이용자 수요가 높을 것으로 예측되며, 낮은 에너지의 고조파를 효율적으로 제거하는 입사각이라 판단하였기 때문이다.

고조파 제거 거울 크기는 입사되는 빔 단면적 크기와 입사각 및 장치의 위치를 고려하여 계산하였다. 2 mrad의 입사각으로 5 keV 에너지를 46 m에 위치한 거울 장치에 입사하면 거울의 크기는 약 550 mm가 요구된다. 따라서 실제 거울의 크기는 빔 크기 유효면적에 여유를 두어 800 mm로 설계한다.

고조파 제거 거울에 부하 되는 열량은 단색화장치로부터 단색 빔이 입사되므로 최대 1.59 W로 비교적 낮다. 이때 거울 표면의 열 부하량 역시 0.002 W/mm^{2}로 낮은 값을 가지는 것으로 OASYS 환경의 SRW/ShadowOui 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

아. 실험허치

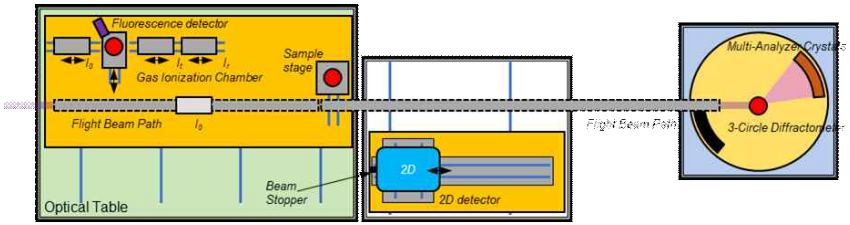
(1) 실험허치 Layout 및 실험장치 구성

소재 구조 분석 빔라인은 하나의 언듈레이터를 이용하여 HRPD와 In-situ XRD 및 XAFS 측정기법을 제공하는 빔라인이다. 따라서 각 기법에 대해 상이한 위치에 시료 스테이지가 구성되어야 한다. <그림 2.2.2.12>는 소재 구조 분석 빔라인 실험허치의 개략도를 나타내었다. 실험기법의 배치 순서는 실험에 활용되는 빔 크기, 실험 구성 장치의 무게, 설치 편의성, 이동 용이성 등을 고려하여 배치하였으며, 69 m에 XAFS, 71 m에 In-situ XRD, 75 m에 HRPD 기법 순으로 위치한다.

XAFS 기법을 위한 실험장치는 시료 스테이지와 3대의 가스 이온화 챔버 및 에너지 분산형 형광 검출기가 위치하며, 다양한 시료 환경을 모사하기 위한 장치들은 광학 테이블에 추가 배치할 수 있도록 한다.

In-situ XRD 기법을 위한 실험장치는 I_0를 측정하기 위한 가스 이온화 챔버와 시료 스테이지 및 2D 검출기가 위치한다. 2D 검출기는 별도의 검출기 스테이지 위에 설치하며, 시료 스테이지는 XAFS 광학 테이블 위에 배치하여 다양한 실험 환경을 모사하기 위한 장치들을 구성하는 공간을 확보한다.

HRPD 기법을 위한 실험장치는 시료 스테이지와 Multi-Analyzer Crystal 검출 시스템 및 Scintillation Detector로 구성하고, 이를 3축 회절기에 housing 하여 설치한다.



<그림 2.2.2.12> 소재 구조 분석 빔라인 실험허치 개략도

(2) 가스 이온화 챔버

가스 이온화 챔버는 XAFS 측정 시 흡수되는 광량에 대한 정보를 제공하는 장치이다. 가스 이온화 챔버에서는 X-선이 챔버를 통과할 때 챔버 내에 채워진 비활성 기체가 이온화되어 발생하는 전류량을 측정한다. 실험허치 내 XAFS를 위한 세 개의 가스 이온화 챔버가 구성되며 초기 X-선 광량 (I_0), 시료에서 흡수된 광량 (I_t), 비교군 시료에서 흡수된 광량 (I_r)에 관한 정보를 측정한다. 얻어진 정보는 Beer-Lambert 법칙을 적용하여 시료와 비교군의 흡광 계수 분석에 활용된다.

가스 이온화 챔버는 <그림 2.2.2.12>와 같이 시료 스테이지, 측정 시료, 비교군 시료와 함께 배치된다. 각 가스 이온화 챔버는 Manipulator 위에 설치하며, 빔 방향으로의 자유로운 이동으로 시료 환경 모사의 다양성과 시료 Mounting이 용이하도록 설계한다.

(3) 에너지 분산형 형광 검출기

에너지 분산형 형광 검출기는 원소로부터 발생하는 다양한 형광 신호를 선택적으로 분석할 수 있어 다성분 시료의 분석에도 용이하다. 또한, 시료 내 극히 적은 양의 원소를 분석하거나 투과법 측정이 어려운 경우에 용이하게 사용된다. 형광 검출기는 Silicon 기반의 검출기 또는 Germanium 기반의 검출기가 있으며, Silicon 기반의 검출기의 경우 별도의 냉각장치 없이 사용할 수 있는 편의성으로 널리 이용되는

검출기이다. 하지만, Silicon Drift Detector에서의 Silicon은 15 keV 이상의 X-선을 흡수하지 못한다. 소재 구조 분석 빔라인은 5~40 keV의 넓은 에너지 범위에서 XAFS를 제공할 예정이므로 15 keV 이상의 형광 분석 제공이 가능한 Germanium 기반의 검출기 도입을 검토하고 있다. Germanium 기반의 에너지 분산형 형광 검출기는 액체질소를 통한 냉각이 필요하여 추가적인 냉각장치가 요구된다.

(4) 가스 자동화 교환 장치

가스 이온화 챔버 내에 채워지는 비활성 기체는 측정 에너지마다 X-선 흡수 정도가 달라지기 때문에 비활성 기체의 종류와 혼합 비율을 달리하여야 한다. 본 빔라인은 5~40 keV의 넓은 에너지를 제공하기 위해 챔버 내 가스를 용이하게 혼합하고 교환하고자 가스 자동화 교환 장치를 도입한다. 가스 자동 교환은 PC를 통해 제어되며 이를 위해 실험허치 내 진공펌프와 가스 밸브 간 연결이 추가로 요구된다.

(5) 2D 검출기

2D 검출기는 일반적으로 시료를 투과법으로 측정하여 Debye-Scherrer geometry로 나타나는 X-선 회절 데이터를 2차원 면적과 빠른 읽기 속도로 검출하기 위한 목적으로 사용된다. 이를 활용하면 실시간 측정이나 동역학적 연구에 대한 실험이 가능하다. 2D 검출기를 통해 얻어지는 회절 데이터의 각 분해능은 시료와 검출기 간의 거리(Sample to detector distance, SDD)와 검출기의 픽셀 크기에 따라 각 분해능이 결정된다. 높은 각 분해능을 구현하기 위해서는 시료와 검출기 사이의 간격이 멀어지고 검출기의 pixel이 작아질수록 높은 각 분해능 구현이 가능하다. 이는 (수식 2.2.2.6)으로 나타낼 수 있다. 따라서 검출기의 면적이 크고, 픽셀 크기가 작은 검출기가 유리하다. 이를 만족하는 검출기로는 Detrics社의 EIGER 검출기가 대표적이다. 2D 검출기의 스테이지 크기를 설계하기 위해 EIGER X 9M을 기준으로 구현 가능한 고유 각 분해능을 <표 2.2.2.5>에 나타내었다. EIGER X 9M 검출기는 픽셀 크기가 0.075 mm이며, 픽셀 배열의 개수는 수직 방향으로 3,262개, 수평 방향으로 3,108개로 총 10,166,590개이다.

SDD가 멀어질수록 고유 각 분해능은 작아지지만, 2D 검출기의 물리적 크기에 제한이 있어 검출이 가능한 회절 데이터의 2Θ 범위도 작아지게 된다. 2D 검출기의 고유 각 분해능에 따른 시료의 각 분해능은 투과법으로 측정하는 경우 시편의 두께에 의존하며, 이는 (수식 2.2.2.7)과 같이 나타낼 수 있다. (수식 2.2.2.7)에 의해 시료의 두께가 얇을수록 분해능은 향상되며 그 결과는 <표 2.2.2.6>에 나타내었다. 시편의 두께와 SDD에 따라 상이한 측정 각 분해능이 얻어지지만, 약 0.3~0.02 수준의 측정 각

분해능이 얻어짐을 알 수 있다. 시편의 두께는 회절 실험에 적용되는 시료 또는 분말의 크기와 빔 크기, 시료 준비의 용이성 등이 고려 되어야 하며 이를 무조건 얇게 만드는 것은 현실적인 어려움이 있다. 따라서 실험은 시료의 두께, 검출기의 2Θ 측정 범위, 실험 준비의 다양성 등을 복합적으로 고려하여 적합한 조건에서 수행하여야 한다. 따라서 시료와 2D 검출기 간 간격은 최소 200 mm, 최대 1,500 mm까지 조절할 수 있도록 하며, 이를 위해 검출기 스테이지 위에 별도의 빔 방향 (Y축) Manipulator가 요구된다. 또한 2D 검출기는 Debye-Scherrer geometry의 회절 데이터에 대해 선택적인 2Θ 위치에서 검출을 위해 수평 방향(X축)과 수직 방향(Z축)의 이동을 위한 Manipulator도 필요하다.

2D 검출기를 이용하여 회절 실험하기 위해서는 검출기의 정밀한 정렬이 요구된다. 이는 Pitch와 Yaw 축 회전을 통해 가능하다. 따라서 2D 검출기는 5축 방향으로(X, Y, Z, Pitch, Yaw축) 이동할 수 있도록 검출기 스테이지 위에 별도의 광학 테이블 또는 스테이지에 설치되어야 한다.

$$\Delta 2\theta = \arctan\left(\frac{p}{L}\right) \quad \text{(수식 2.2.2.6)}$$

p : pixel size of detector

L : distance between sample and detector

$$\frac{\Delta\theta}{2} = \arctan\left(\frac{d+p}{2L}\right) \quad \text{(수식 2.2.2.7)}$$

<표 2.2.2.5> 시료와 검출기 간 거리(SDD)에 따른 2D 검출기 고유 각 분해능 변화

SDD (mm)	Intrinsic resolution (°)	Covered 2θ (°)
200	0.0215	35.044
500	0.0086	14.017
750	0.0057	9.345
1000	0.0043	7.009
1500	0.0029	4.672

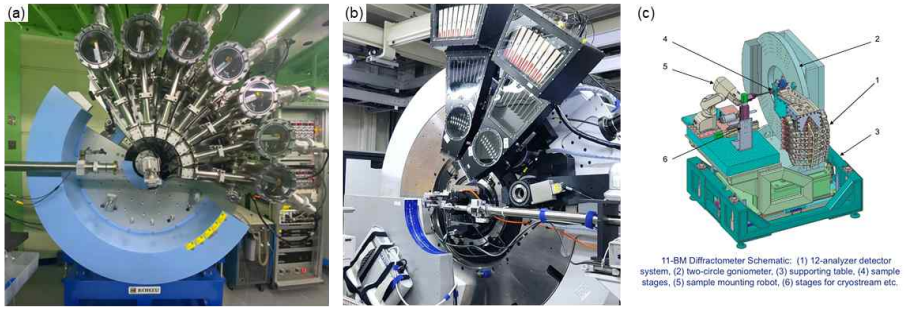
<표 2.2.2.6> 시료와 검출기간 거리(SDD)에 따른 2D 검출기 고유 각 분해능 변화

Sample size, d (mm)	SDD (mm)	Intrinsic resolution (°)	Sample size, d (mm)	SDD (mm)	Intrinsic resolution (°)
1	200	0.308	0.5	200	0.165
	300	0.205		300	0.110
	400	0.154		400	0.082
	1500	0.041		1500	0.022

(6) 3축 회절기

회절기는 시료에 X-선을 조사하여 Bragg 조건에 만족하는 회절 데이터를 각도에 따라 검출하기 위한 장비로 고정밀도의 각도 제어와 각 축의 독립적인 제어가 요구되는 장비이다. X-선 분말회절 실험은 보통 2축 (Θ, 2Θ) 회절기를 이용한다. 본 빔라인에서 Θ와 2Θ에 대한 Goniometer 시스템과 시료의 spinning(또는 독립적인 두 번째 2Θ Goniometer)이 가능한 3축 회절기를 도입하고자 한다. 특히, 본 빔라인의 주된 측정기법인 HRPD의 핵심 장치인 MAC 검출 시스템(Multi-Analyzer Crystals, Soller Slits, Scintillator Detector) housing 되어 설치 및 정렬되도록 설계 시 고려하여야 한다. 3축 회절기는 APS-11BM, ESRF-ID22, SLS-MS, TPS-19A 등 해외 가속기 시설의 분말 회절 빔라인을 참고하여 회절기 제작에 대해 설계 중이다.

<그림 2.2.2.13>은 국내외 가속기 시설의 분말 회절 빔라인인 PLS-II 9B와, TPS-19A 및 APS-11BM의 Multi-Analyzer Crystal 검출시스템이 설치된 회절기 예시를 나타내었다.



<그림 2.2.2.13> 해외 가속기 시설 분말 회절 빔라인 (a) PLS-II 9B, (b) TPS-19A, (c) APS-11BM의 Multi-Analyzer Crystal 검출시스템이 설치된 회절기

(7) Multi-Analyzer Crystals 검출기

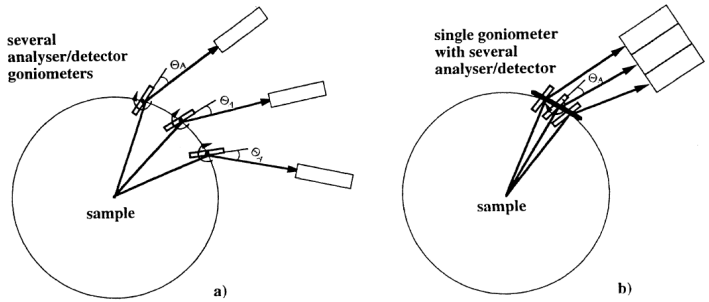
Analyzer Crystal은 시료로부터 회절 되어 오는 회절빔을 특정 검출기 각도에서 Bragg 조건을 만족하는 회절빔만을 검출기에 도달하도록 하는 역할을 한다. 결정이 가지는 Darwin width는 (수식 2.2.2.3)을 통해 Analyzer Crystal의 결정과 측정 에너지에 따라 결정되므로 실험에 적용되는 결정의 Angular acceptance를 계산할 수 있다 (<그림 2.2.2.3>). 소재 구조 분석 빔라인에서는 Analyzer Crystal의 결정으로 Ge (111)을 설치할 예정이며 주 에너지인 20 keV에서 <그림 2.2.2.4>에 나타낸 것과 같은 각 분해능이 얻어진다. 하지만 하나의 Analyzer crystal을 이용하게 되면 측정하고자 하는 2Θ 범위의 Angle scan에 대한 측정시간이 요구된다.

분말회절 실험은 Bragg 법칙에 따라 측정 에너지에 따라 측정하는 2Θ 범위가 달라진다. PLS-II 9B에서는 8 keV 에너지를 이용하여 10°~130°의 2Θ 범위로 분말 회절 데이터 측정을 수행하고 있으며, 본 빔라인에서 주 에너지로 사용하고자 하는 20 keV에서는 Bragg 법칙에 따라 2Θ scan 범위가 줄어들게 된다. <표 2.2.2.7>은 에너지에 따라 달라지는 2Θ 측정 범위를 나타내었다. 주 에너지인 20 keV에서 8 keV에서 측정하는 회절 데이터와 동일한 회절 데이터를 얻기 위해서는 각 4°~42.5°와 3.2°~33.8°의 측정이 필요하다. 줄어드는 2Θ 측정 범위는 측정시간 단축과 연관되며, 이는 Multi-Analyzer Crystal을 설치하여 여러 검출기로 회절 데이터를 얻어 효과적으로 측정시간을 단축할 수 있다. 이러한 다중의 결정을 이용하는 것을 Multi-Analyzer Crystals 부르며, 이에 관한 설계는 J. L. Hodeau et. al.의 설계를 참고한다. Multi-Analyzer Crystal은 <그림 2.2.2.14>와 같이 다중 축과 단일 축을 활용하는 검출기 시스템이 있다. <그림 2.2.2.13> (a)의 PLS-II 9B 빔라인이 다중 축을

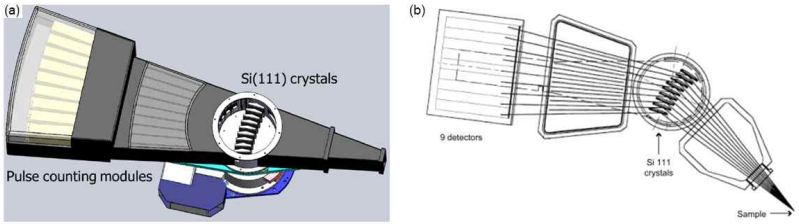
이용하여 결정들의 회전축을 조정하는 예이며, TPS-19A와 APS-11BM 빔라인들이 다중 결정을 단일 축으로 회전시켜 정렬하는 방식의 예이다. 본 빔라인의 경우 주 에너지가 높아짐에 따라 2Θ 측정 범위가 줄어들었고, 측정시간을 효과적으로 줄이기 위해 2°~3° 간격으로 9~12개가 설치된 Multi-Analyzer Crystal module을 2개 이상 설치하여 2Θ scan의 범위를 줄이고 측정시간도 단축하고자 한다. 이러한 MAC 검출시스템은 해외 가속기 시설인 APS-11BM와 ESRF-ID22 및 TPS-19A 빔라인에서 현재 활용되고 있으며, <그림 2.2.2.15>는 회절기 2Θ circle 위에 정렬된 Multi-Analyzer Crystals 배치된 개략도를 나타내었다.

<표 2.2.2.7> 에너지 변화에 따른 2Θ 측정 범위

Energy (keV)	$2\Theta_{min}$ (°)	$2\Theta_{max}$ (°)	2Θ range (°)
8	10.00	130.00	120.00
12	6.66	74.34	67.68
15	5.33	57.81	52.48
20	4.00	42.51	38.51
25	3.20	33.72	30.52
30	2.66	27.97	25.31
40	2.00	20.89	18.89



<그림 2.2.2.14> Multi-Analyzer Crystal 검출기 시스템 개략도
(a) multi axes, (b) single axis



<그림 2.2.2.15> Multi-Analyzer Crystal 구성에 대한 예시
(a) TPS-19A 빔라인, (b) ESRF-ID22

분말 시료에 대한 측정시간은 20 keV 에너지에서 2° 간격으로 12개의 Multi-Analyzer Crystals module을 2개 설치한 경우를 예로 계산하였다. 실험 조건은 2°의 2Θ 스캔 범위에서 0.002° step과 노출시간 1초를 고려하면 1시간 이내에 하나의 분말 시료를 측정할 수 있을 것으로 예상된다. <표 2.2.2.8>은 본 빔라인과 PLS-II의 분말 회절 빔라인에서의 측정시간 비교 결과이며, 1/4 이상 측정시간을 단축할 수 있음을 알 수 있다.

<표 2.2.2.8> 소재 구조 분석 빔라인과 PLS-II 분말 회절 빔라인에서 하나의 시료에 대한 측정시간 비교

HRPD beamline	Number of analyzer crystal	Energy (keV)	Step / Expose time	2Θ covered	Scan time
PLS-II 9B BL	7 (interval 20°)	8	0.002° / 1 sec	0~140° (20° scan)	4h
4GSR MS BL	24 (interval 2°)	20	0.002° / 1 sec	4~48° (2° scan)	< 1h

(8) 시료 스테이지

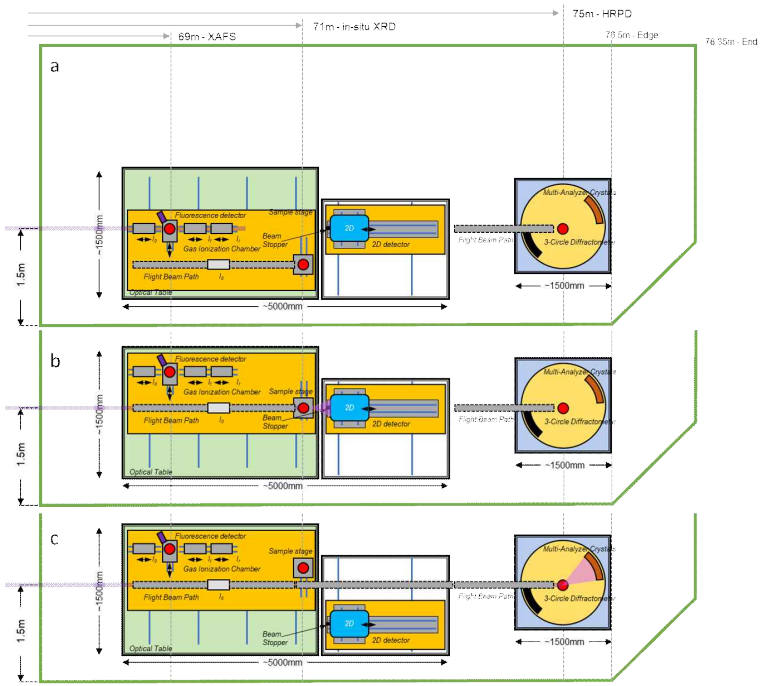
시료 스테이지는 XAFS 측정과 In-situ XRD 측정을 위한 2개의 스테이지가 요구된다. 광학 테이블 위에 설치되며, 6축(XYZ, pitch, roll, yaw)에 대한 위치 조정이 가능한 Hexapod와 시료 spinning이 가능한 X, Y, Z축 motion 스테이지, 총 두 개의 시료 스테이지를 도입하고자 한다. 두 개의 스테이지는 광학 테이블 위에 두 측정기법의 스테이지 모두에서 사용할 수 있도록 설계한다.

(9) 시료 홀더

시료 홀더는 분말 뿐만 아닌 기판 등 다양한 시료 형태를 고려하고, 다양한 시료 분위기에서 사용할 수 있도록 여러 형태의 시료 홀더를 제작하여 비치하도록 한다. 또한, 다중 시료 홀더를 비치하여 측정 완료 후 다음 시료를 자동화하여 측정할 수 있도록 다중 시료에 대한 자동화 시료 측정 시스템을 도입하여 빔라인 이용자의 편의성과 산업 친화적 측정 시스템을 갖추고자 한다.

(10) 실험장치 정렬 및 운영

<그림 2.2.2.12>에 나타낸 실험허치 개략도를 보면, 본 빔라인의 측정기법은 상이한 시료 위치에서 각 기법이 제공되어 측정하고자 하는 기법 외에 다른 기법들은 bypass 되거나 실험에 영향을 주지 않는 위치로 정렬되어야 한다. 정렬 시 공기 산란과 빔 안정성을 위해 Beam flight pass를 이용한다. <그림 2.2.2.16>은 측정기법별 실험장치 정렬 개략도를 나타내었다. XAFS 측정은 실험허치 내 전단부에 위치하므로 실험을 위해서는 가스 이온화 챔버와 시료 스테이지의 정렬만이 요구된다 (<그림 2.2.2.16> (a)). In-situ XRD 측정 시 XAFS 기법은 광학 테이블을 수평 방향으로 이동하여 Bypass 되어야 하며 동시에 설치된 Beam flight pass가 빔 경로 위치에 위치하도록 Manipulator를 이용하여 정렬하도록 한다 (<그림 2.2.2.16> (b)). 실험허치 내 마지막에 위치하는 HRPD 측정 시 다른 두 측정기법은 Bypass 되며 2D 검출기 위치에 추가적인 Beam flight pass를 설치하여 3축 회절기까지 빔을 안정적으로 전달하도록 한다 (<그림 2.2.2.16> (c)). 각 측정기법에 대한 모든 장치를 <그림 2.2.2.16>과 같이 배치한 후 실제 측정을 위해서는 빔 정렬이 필수적으로 요구된다. 특히, 광학장치 조정에 따른 에너지 변화와 입사각 변화 등 빔 높이 또는 경로 변화에 따라 MAC 검출시스템에 대한 재정렬은 필수적으로 요구되며, 실험측정 기법을 교차로 운영하게 되는 경우 이에 대한 많은 소요 시간이 필요할 것으로 예상된다. 따라서 빔타임 실험 지원 일정은 각 기법에 대해 독립적으로 운영함으로써 빔 정렬에 대한 소요 시간을 최소화하고자 한다.



<그림 2.2.2.16> 각 측정기법에 따른 실험장치 정렬 개략도: (a) XAFS 측정, (b) In-situ XRD 측정, (c) HRPD 측정

(11) 데이터량 예측

측정기법 중 2D 검출기를 사용하는 In-situ XRD 측정이 HDF5 형태의 Image file로 측정 데이터를 저장하므로 측정기법 중 가장 큰 용량이 예상된다. In-situ XRD 측정에서 대표적으로 사용되는 EIGER X 9M 검출기를 기준으로 데이터 용량을 예측하였다. EIGER X 9M 검출기는 3,108 × 3,262의 픽셀 배열로 총 10,138,296개의 픽셀들로 이루어져 있다. 1 프레임을 32 Bit image depth의 기준으로 계산하면 전체 해상도를 측정하는 경우 픽셀당 4 byte의 용량이 예상된다. 전체 픽셀에 대한 용량은 1 frame 당 약 40 MB로 계산되며, 검출기가 측정할 수 있는 프레임 수는 1초당 1,000 frame이다. 검출기가 측정할 수 있는 최대 용량 크기를 고려하면 생성되는 데이터 최대 용량은 초당 40 GB의 데이터 용량이 생성되는 것으로 계산되며, 이는 초당

측정하는 프레임 수에 따라 조정할 수 있으며 이때 측정을 위한 적절한 시간분해능이 고려되어야 한다.

자. 빔라인 건설 일정

<표 2.2.2.9> 빔라인 건설 일정

	2023년				2024년				2025년				2026년				2027년			
도면 작업					■	■	■	■	■	■										
전산 해석					■	■	■	■	■	■										
발주							■	■	■	■	■	■	■	■	■					
소프트웨어 준비											■	■	■	■	■	■	■			
입고 및 검수												■	■	■	■	■	■	■		
설치													■	■	■	■	■	■		
커미셔닝																	■	■	■	■

참고문헌

[1] 심민규, 한국연구재단 보고서, 다목적 방사광가속기 구축사업 예비타당성조사 추진을 위한 전략수립 연구, (2021)

[2] C. J. Gilmore et. al., International Tables for Crystallography Volume H_ Powder diffraction, H-Wiley (2019)

[3] Y.-C. Chuang, et. al., Technical design report, TPS, (2017)

[4] C. P. Grey and J. M. Tarascon, Nat. Mater. 16, 45 (2017)

[5] J. Yang et al., Chem. Soc. Rev. 45, 5717 (2016)

[6] Q. Gu et al., Adv. Energy Mater. 7, 1602831 (2017)

[7] S. Bak et al., NPG Asia Mater. 10, 563 (2018)

[8] https://www.chess.cornell.edu

[9] T. M. Sabine, J. Appl. Cryst. 20, 173-178, (1987)

[10] T. M. Sabine, J. Appl. Cryst. 20, 23-27, (1987)

[11] F. Gozzo et. al., J. Appl. Cryst. 39, 347-357, (2006)

[12] L. Rebuffi et. al., J. Synchrotron Rad. 23 (2016)

[13] T. Tanaka, Journal of Synchrotron Radiation 28(4), 1267-1272 (2021)

[14] APS-U, Technical Design Report, Chapter 4 Experimental Facilities, APSU-2.01-RPT-003 (2019)

[15] F. Gozzo et al., Z. Kristallogr. 225, 616 (2010)

[16] ESRF-ID22 beamline, https://www.esrf.fr/id22/technical-description

[17] APS-11BM beamline, https://11bm.xray.aps.anl.gov

[18] J. L. Hodeau et. al., Freund, SPIE Conference on Crystal and Multilayer Optics, San Diego 1998, SPIE Vol. 3448, 353-361 (1998).

2.2.3 연엑스선 나노프로브 빔라인 (Soft X-ray Nano probe)

가. 소개

(1) 개요

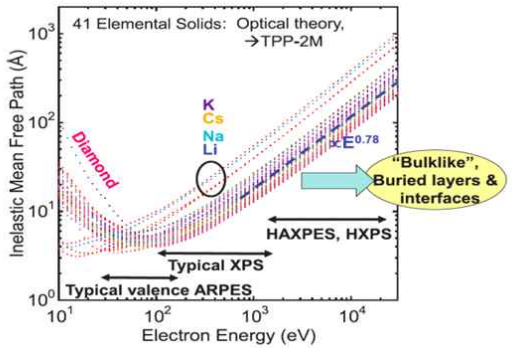
산업체 우선 지원 빔라인 중 하나인 Soft X-ray NanoProbe 빔라인은 전통적인 Soft X-ray 영역(수 eV~2,000 eV)을 넘어 최근 각광받고 있는 tender X-ray 영역(2,000 eV~5,000 eV)을 포함하는 광원을 제공할 수 있는 빔라인으로 구축될 예정이다. 이 빔라인은 국내외 기초과학뿐만 아니라 산업체의 기술개발 연구에 광범위하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 이 빔라인을 활용한 실험기법으로는 광전자분광학(Photoemission Spectroscopy, PES)과 X-선 흡수분광학(X-ray Absorption Spectroscopy, XAS)이 적용될 예정이다. 이러한 기법은 이미 화학적 및 전자적 특성 연구 분야에서 뛰어난 성과를 내고 있다. 그러나, 고집적 반도체 소자, 친환경 촉매, 이차 전지 등과 같은 다양한 소재 및 재료 연구의 중요성이 높아짐에 따라 nano 크기의 고공간 분해능 및 sub-surface (interface 및 bulk) 분석 가능한 깊은 probing-depth를 갖추는 것에 대한 수요가 높아지고 있다.

새로이 건설될 4GSR의 강력한 방사 광원은 3세대 빔라인에 비해 약 100배 밝은 세기, 작은 빔크기, 그리고 높은 결맞음성 등 다양한 장점을 가지고 있어, 기존의 한계를 극복하고 수요를 충족시킬 뛰어난 대안이 될 것으로 기대된다. 따라서, 본 빔라인은 광원을 영역별 두 개로 분리하여 Branch 1의 Soft X-ray 고공간분해 nanoscopy 이미징에 집중한 SPEM 실험장치와 Branch 2의 tender X-ray를 활용한 depth-probing XPS/XAS 실험장치가 구축될 예정이다. 이를 통해 더 많은 응용 분야에서 경쟁력 있는 빔라인 실험장치로 자리매김할 수 있기를 기대한다.

(2) 연구의 중요성 및 필요성

광전자분광학은 A. Einstein과 K. Siegbahn에 뿌리를 두고 있으며, 시료의 화학적 전자적 구조를 측정하는 독보적인 실험기법이다. K. Siegbahn에 의해 측정된 최초의 실험은 Mo Ka(Ka_1=17,479, Ka_2=17,374 eV)를 이용한 Cu 1s의 실험이었으며, 높은 분해능의 전자분석법을 개발한 공로를 인정받아, 1981년 노벨물리학상의 영예를 안았다. 방사광의 출현은 광전자분광학 실험의 기폭제가 되었고, 최근까지는 2~10 keV의 High energy를 이용한 광전자분광학 실험보다, 표면의 민감도, 광속(photon

flux)과 photon ionization cross section이 등에서 장점이 있는 연 X-선(30~2,000 eV)을 이용한 광전자분광학 실험을 이용하여 표면의 화학적/전자적 구조를 밝히는 실험들을 주로 진행해 왔고, 많은 성과를 이뤄왔다.



<그림 2.2.3.1> Universal curve

연 X-선을 이용할 경우, 표면에서 탈출한 광전자의 운동에너지가 ~수 eV~2,000 eV로, <그림 2.2.3.1>의 universal curve에서 보는 바와 같이, 탈출 깊이가 ~1 nm로 짧기 때문에, 표면의 정보를 정교하게 얻을 수 있다. 최근에는 <표 2.2.3.1>과 같이, 해외의 방사광 facility에서 2~10 keV의 경 X-선 영역의 빛 에너지를 활용 가능한 고에너지 광전자분광학 (HAXPES) 빔라인들이 속속 구축되고 있고, 이미 확립된 연 X-선 광전자분광학의 기반에, <그림 2.2.3.1>의 universal curve에서와 같이 탐색 깊이를 ~10 nm까지 증가한 기법으로 촉매 및 다양한 응용 물질 연구에 활용되고 있다.

또한, 최근에 각광받는 반도체 및 에너지 소자의 경우, 다층의 구조를 갖추고 있으며, 이들 소자의 특성이 표면 및 계면, 그리고 ~10 nm 깊이의 벌크의 화학적 전자적, 구조적 특성에 의해 결정되기 때문에, 표면 및 계면의 연구가 매우 중요하다. 또한, 이들 소자의 실제 동작 환경에서의 실시간으로 특성 변화에 관한 연구의 필요성이 대두되었다. 동시에 과학기술의 발달을 기반으로 강력한 광원인 방사광의 출현, 진공기술의 발전, 그리고 검출기 등의 개발이 활발하게 진행되었으며, Hard X-ray 영역의 photon flux 또한 크게 증가 (~10^{13} photon/sec) 하였고, 검출 깊이 또한 ~30 nm에 이르기 때문에, 이용한 광전자분광학 실험이 각광받게 되었다. 따라서, <표 2.2.3.1>과

같이, 전 세계적으로 방사광가속기에서는 0.2~10 keV의 광대역의 photon beam을 활용하는 HAXPES 빔라인의 도입 및 실험장치를 이용하여 연구를 수행하고 있는 단계이다.

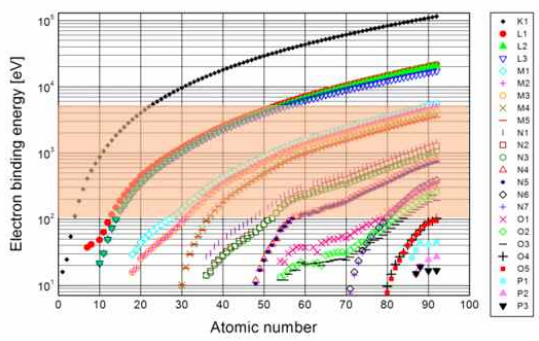
4GSR의 경우, MBA system을 도입하기 때문에, 기존의 3세대 광원에 비해 100배의 photon brightness의 구현이 가능하고, 빔 size 역시 nm focusing이 가능하기 때문에, nm 규모의 공간 분해능을 가진 3D 이미징과 몇 분에서 나노초까지의 시간 스케일을 가진 자발적 나노 스케일 프로세스의 측정이 가능하다. Soft X-ray NanoProbe 빔라인은 0.1~5 keV의 빛 에너지를 cover 하기 위해 2개의 광원을 tandem으로 설치하여 각각 Soft X-ray 영역과 tender X-ray 영역을 cover 하도록 하고, 2개의 branch 빔라인으로 구성할 예정이다.

<표 2.2.3.1> Soft X-ray NanoProbe 빔라인과 유사한 해외 빔라인의 사례

Beamline	Source	Energy range	Beam size	End-station
ALS, USA, BL9.3	Bending Magnet	2,300 ~ 6,000 eV (DCM)	~ 300 μm^2	HAXPES, APXPS, Tender-XAS
		200 ~ 900 eV (PGM)	~ 1.0 mm^2	APXPS, XAS
BESSY-II, Germany, BL13.2	U48	80 ~ 2,200 eV	100 × 80 μm^2	NAP-HE-XPS, XAS
	U17	700 ~ 1,600 eV (PGM) 2,200 ~ 10,000 eV (DCM)	180 × 50 μm^2 150 × 20 μm^2	HAXPES, APXPS, Tender-XAS, RIXS
SLS, Switzerland, X07DB	Bending Magnet	270 ~ 1500 eV	~ 50 nm^2	APXPS, Nano-XAS(STXM)
PAL, Korea, BL 8A	Undulator 6.8	100 ~ 2,000 eV	50 × 50 μm^2 150 × 200 nm^2	APXPS, SPEM
ALBA, Spain, BL24	Undulator	100 ~ 2,000 eV	20 × 100 μm^2 3.2 × 36 μm^2	NAPP(APXPS), PEEM
Soleil, France, TEMPO	HU80, HU44	40 ~ 1,500 eV	-	NAP-XAS, XMCD
Max IV, Sweden, HIPPIE	EPU53	260 ~ 2,200 eV	25 × 60 μm^2	APXPS, APXAS
SSRF, China, BL02B	Bending Magnet	40 ~ 2,000 eV	~ 7.5 μm^2	APXPS
Diamond, England, B07	U56	230 ~ 800 eV	40 × 20 μm^2	ARPES, NEXAFS
	U27	2.1 ~ 18 keV	40 × 20 μm^2	HAXPES
NSLSII, USA, BL71D	EPU60 EPU48	100 ~ 2,200 eV (PGM) 1,500 ~ 7,500 eV (DCM)	40 × 40 μm^2	HAXPES, XAS
4GSR, Korea	**EPU78 IVU24**	**100 ~ 3,000 eV (PGM) 2,000 ~ 5,000 eV (DCM)**	**> 5 μm^2**	**NanoXPS/XAS**

또한, 반도체 디바이스 및 태양전지 배터리 등의 특성 연구를 위해 실제 동작하는 환경에서 다이나믹한 특성을 이해하는 것에 대한 중요성이 점점 더 강조되고 있다. 또한 이들 소자의 특성이 표면 및 계면에서의 물리적 화학적 특성 변화와 밀접하게 연관되어 있으며, HAXPES 빔라인을 도입할 경우, 광전자분광학은 시료의 실제 환경에서 측정이 매우 유용할 것이다.

현재 Soft X-ray NanoProbe 빔라인에서 구현하고자 하는 0.1~5 keV는 연 X-선에서 tender 영역의 빛 에너지를 수용하기 때문에, <그림 2.2.3.1>의 탐색 깊이를 10 nm까지 확장할 수 있다. 특히, 이 영역의 빛 에너지는 <그림 2.2.3.2>에서 보는 바와 같이 에너지 및 기후변화에 대응하기 위한 다양한 촉매 연구뿐 아니라 반도체, 생명과학에서 중요한 핵심 원소들인 Si, P, S, Y, Zr, Nb, Mo 등의 K, L, M-edge의 흡수단 및 core-electron의 결합 에너지에 접근할 수 있어, 다양한 소재의 특성 분석에 중요하게 활용할 수 있다.

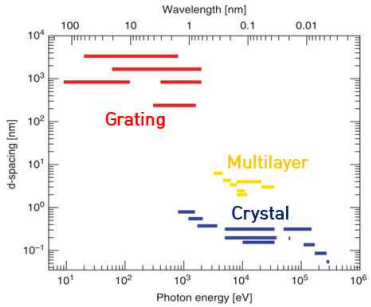


<그림 2.2.3.2> Relation between electron binding energies, atomic number Z and electronic transition

(3) 빔라인의 활용

Soft X-ray NanoProbe 빔라인에서 구현하고자 하는 빛 에너지 영역은 0.1~5 keV이기 때문에, 이 빔라인은 연 X-선과 경 X-선 빔라인 두 개의 빔라인으로 인식하는 것이 바람직하다. <그림 2.2.3.3>에서 보는 바와 같이, 단색화장치 또한, cover 하는 빛 에너지 영역에 따라, 두 종류의 단색화장치를 도입해야 하며, 0.1~3 keV를 cover 하는 Grating과 2~5 keV를 cover 하는 Double Crystal Monochromator (DCM) 혹은

Double Multilayer Monochromator (DMM)을 활용하여 빔라인을 구축해야 한다. 삽입장치 역시, 두 종류의 광원, 연 X-선을 위한 EPU78과 Tender X-선을 위한 IVU24를 tandem으로 설치하여, 사용하고자 하는 연 X-선 및 Tender 영역에서 10^{13}~10^{15} photon flux를 구현할 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서, 2개의 독립적인 branch 빔라인으로 빔라인을 설계하고, Branch1인 Soft-NanoXPS/XAS는 사용가능한 에너지를 0.1~3 keV, Branch2는 사용가능한 에너지를 2~5 keV로 하는 Tender-NanoXPS/XAS로 Branch1과 병행하여 구축할 예정이다.



<그림 2.2.3.3> 빛 에너지에 따른 단색화장치

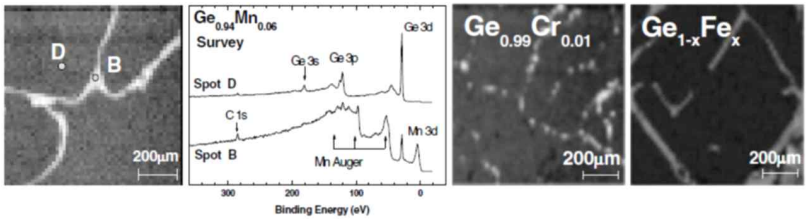
○ Branch 1, Soft-NanoXPS/XAS (Scanning PhotoElectron Microscopy) 활용

지난 수십 년 동안 나노 과학 및 나노 기술의 발전은 우주 항공, 통신, 디스플레이 및 이차 전지 산업 등 광범위한 산업 분야에 걸친 다양한 산업 기술을 비약적으로 발전시켜 왔다. 여기에는 나노 구조를 관찰하고 탐사할 수 있는 다양한 현미경 분석장치의 발달이 크게 기여하고 있다고 생각한다. 그 중, 대표적 분석기법인 SEM (Scanning Electron Microscopy), TEM (Transmission Electron Microscopy)과 같은 전자 현미경 기술은 매우 높은 공간해상도를 제공하고 있지만, 에너지분산을 통한 원소 특성 (Element characterization) 및 물성 분석에 기초한 스펙트럼 정보 제공 능력에 있어서 X선을 이용한 광전자분광학(X-ray Photoelectron Spectroscopy: XPS)에 비해 상대적으로 한계를 가지고 있는 것이 현실이다. 반면 XPS 분석기법은 채워진 전자 준위 밀도(occupied electron density of state)를 측정함으로써 물질을 구성하는 원소의 종류는 물론 전자구조(electronic Structure)와 화학적 상태 (chemical state) 및 최외각 전자 (valence electron) 검출을 통해서 산화가 등에 대한 정보를 제공해 줄 수

있다는 점에서 매우 중요한 분석기법으로 이용되고 있다. 따라서 에너지 분해 분석기법에 유리한 광전자분광법과 공간 분해 분석기법에 유리한 이미징 기법을 접목하려는 요구는 자연스럽게 발생하게 되었고, 이에 필수적으로 수반되어야 하는 광학장치 및 정밀 기계 가공 기술의 발달로 광전자분광 현미경학이 탄생하고 발전하게 되었다.

SPEM 분석기법은 개발 이후 나노 물질 표면 위 1 μm 이내 화학적 비균질성 연구 및 공간적으로 분해된 전자구조 변화 연구 등 매우 다양한 연구 분야에서 전 세계적으로 매우 활발히 활용되고 있다. 특히 최근 graphene을 비롯한 flake-type 저차원 물질에 관한 연구 분야가 급속도로 팽창하면서 본 실험기법의 활용도는 더욱 높아지고 있다. 나아가 최근 유사 대기압 및 전압인가 소자 구동과 같은 operando 환경에서의 측정기법을 접목한 연구기법으로 진화해 가고 있다. 아래 소개하는 연구 결과들은 SPEM 실험장치를 활용하여 도출해 낸 몇 가지 연구 사례들이다.

- Dilute Magnetic Semiconductor 물질의 화학적 비균질성 및 국소적 전자구조 규명

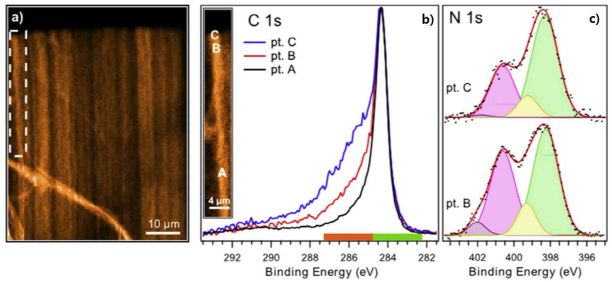


<그림 2.2.3.4> Left: The SPEM image and the survey spectra of $Ge_{0.94}Mn_{0.06}$, obtained at a bright spot (B) and a dark spot (D) Right: SPEM images of $Ge_{0.99}Cr_{0.01}$ and $Ge_{1-x}Fe_x$.

본 연구는 SPEM 시스템을 활용한 대표적 연구 사례로서 Mn-doped Ge 결정의 화학적 비균질성 및 그 전자구조를 분석하여 dilute magnetic 성질의 직접적 원인을 규명한 결과이다. <그림 2.2.3.4>와 같이 수백 μm 크기의 빔 크기를 사용하는 일반적 XPS 실험기법에서는 볼 수 없는 비균질한 구조를 관측할 수 있었고, B와 D 각각의 위치에서 얻은 스펙트럼을 통해 서로 다른 성분으로 분리된 구조를 유지하고 있음을 확인하였다. 또한 Ge 결정에 Cr 및 Fe이 도핑된 물질계도 유사한 현상이 일어나고 있음을 보여준다.

- 질소로 기능화시켜 CNT의 전기적 성질 제어연구

본 연구는 플라즈마 기반 방법으로 수직 정렬 성장된 CNT에 질소 원자를 접목함으로써 Fermi level 전자밀도의 변화를 유도하여 전기적 성질을 제어할 수 있음을 보여주는 연구 결과이다. <그림 2.2.3.5>는 수직 성장된 CNT 한 가닥의 측면을 SPEM으로 mapping 하여 C 1s 및 N 1s 밀도의 공간분포를 보여줌과 동시에 위치별 국소영역에 대한 스펙트럼을 보여줌으로써 화학적 성분 변화 추이를 보여준다. <그림 2.2.3.5> (b)의 C 1s 스펙트럼에서 보면 binding energy 약 286.5 eV에서의 shoulder가 CNT의 팁 근처 4 μm 이내에서 증가함을 보여준다. 이는 C-N 화학결합이 강하게 형성되고 있음을 의미한다. 나아가 <그림 2.2.3.5> (c)의 N 1s에서는 질소의 결합구조가 pyridinic, pyrrolic 및 graphitic 형태로 다양하게 구성될 수 있음을 설명하였다. 나아가 질소 접합으로 인한 CNT의 전기적 성질 변화는 그 각각의 구조와 성분비의 차이에서 발생할 수 있음을 규명한 연구 결과이다.

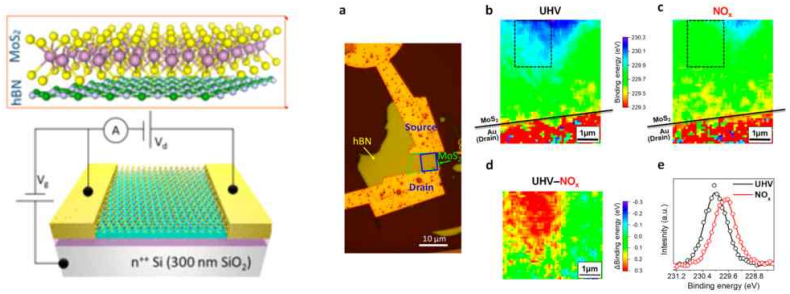


<그림 2.2.3.5> (a) C 1s image of CNTs after 10 min of nitrogen plasma treatment. (b) C 1s core level spectra recorded at different points along the CNTs bundles in the inset (dotted frame in a), intensity normalized to the maximum. (c) N 1s core level spectra recorded near the tips at a distance of 1 (pt. C) and 3 μm (pt. B).

- Operando SPEM을 활용한 NOx gas sensor로서의 Monolayer MoS_2 동작 원리 연구

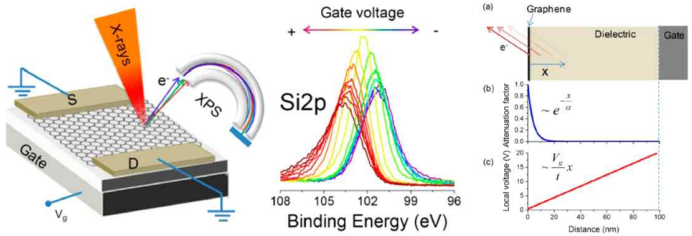
<그림 2.2.3.6>은 NOx 가스 환경에 특정 bias를 인가한 조건에서 monolayer MoS_2 트랜지스터의 에너지 bandgap을 조정하여 gas sensor로의 응용을 연구한 실험 결과이다. 이때 SPEM 시스템을 활용하여 NOx에 노출되었을 때 MoS2의 도핑 수준과 전하 전달의 영향을 직접 관찰한 연구 결과로 설명하고 있다. <그림 2.2.3.6> (b-d)는 Mo 3d 5/2 peak에 해당하는 binding energy의 공간분포를 보여주며, 이는 가스

노출과 동시에 전압인가 operando 실험으로 진행되었다. 본 연구 결과로 NOx 가스에 노출되었을 때 트랜지스터의 fermi level 위치가 down-shift 할 수 있음을 발견하였고, gas sensor로써의 근원적 작동 원리로 이해할 수 있음과 동시에 그 적용 가능성을 보여주었다.



<그림 2.2.3.6> Device schematic of a monolayer MoS2/hBN transistor. (a) Optical microscopy image of a single-layer MoS2/hBN device. The blue square indicates the area investigated by SPEM. Operando SPEM maps from the Mo 3d5/2/S 2s energy region of the same MoS2/hBN device acquired in UHV (b) and in NOx (c), with an applied bias Vd = 1 V. (d) Difference between the Mo 3d5/2 peak position in UHV and NOx. (e) Extracted Mo 3d5/2 spectra averaged over the area indicated by the dark dotted box in parts b and c.

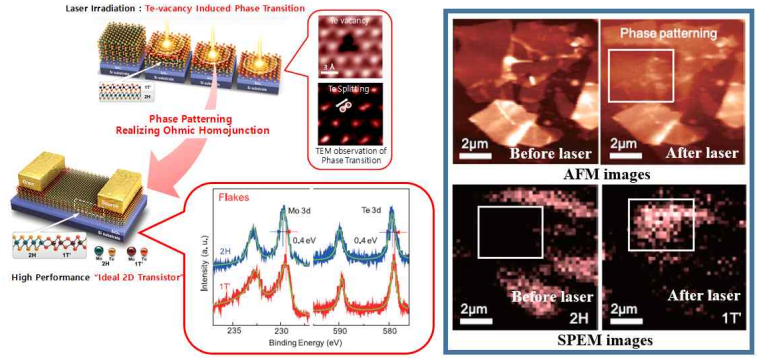
- Graphene transistor의 gate-tunable 광전효과 연구



<그림 2.2.3.7> Experimental setup used to measure the gate-tunable XPS spectra and Si 2p at gate bias between −60 to 70 V. (a) Cross-sectional view of the back-gated graphene transistor. (b) Exponential attenuation of the intensity of the photoelectrons throughout the depth of the gate dielectric. (c) Variation of the local voltage as a function of position due to the electric field of the gate electrode biased at 20 V.

본 연구에서는 operando SPEM 분석법이 back-gating system에 layered material이 transistor로 작동하는 원리를 설명할 수 있는 새로운 분석기법으로 활용될 수 있음을 보여주고 있다. <그림 2.2.3.7>은 유전체를 통한 gate-voltage는 graphene을 전기적으로 도핑하고 이로부터 C 1s 광전자의 binding energy를 다양한 방식으로 이동시키는 반면, graphene 아래의 gate 유전체에서는 Si 2p peak의 binding energy를 변화시킬 수 있음을 보여준다. 결과적으로 그 깊이를 통한 국소 전위의 점진적인 변화를 일으킬 수 있음을 보여주고 있다.

- Phase patterning을 통한 ohmic homojunction 구현



<그림 2.2.3.8> Schematic representation of the laser-irradiation process. Photoemission spectra of Mo 3d and Te 3d in patterned (1 T') and nonpatterned (2H) areas. Comparison before and after lase irradiation with AFM and SPEM.

2차원 원자 결정을 가진 MoTe2는 반도체 성질의 2H phase와 금속성질의 1 T 또는 1 T′ phase로 존재할 수 있는데, 본 연구에서는 laser를 이용하여 부분적으로 위상변화를 유도하고 metal-semiconductor ohmic 접합을 구현하였음을 SPEM 분석을 통하여 보여주었다. <그림 2.2.3.8>은 laser 자극에 의해 국소영역의 위상변화가 2H에서 1 T′으로 전환될 수 있음을 Mo 3d 및 Te 3d core-level 스펙트럼 분석을 통하여 보여주었으며, 이는 2차원 동일 layer 안에서의 이상적인 이종접합을 구현하였음을 의미한다.

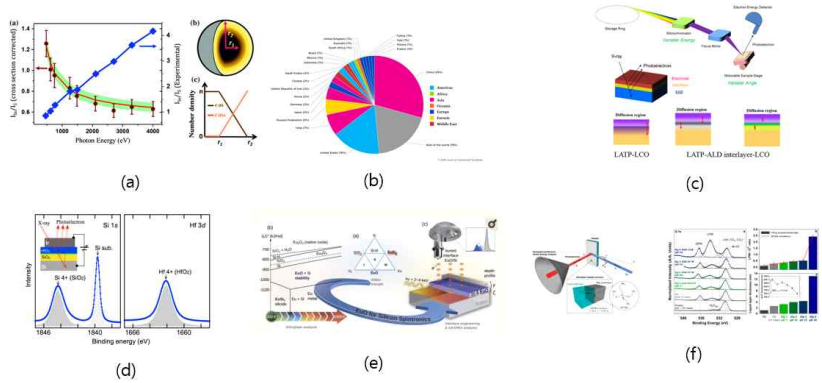
○ Branch 2, Tender-NanoXPS/XAS

경 X-선 기반 PES는 기존 연 X-선 기반의 광전자분광법보다 탐색 깊이가 깊어, 계면 및 벌크(Bulk)의 전자구조 연구 및 깊이에 따른 의존성을 측정할 수 있기 때문에 현재의 고성능 소자의 성능에 영향을 미치는 관련 물질 등의 문제를 탐색하고 해결할 수 있어, 전 세계적으로 빔라인들이 개발되고 있다. 더욱이, 시료의 특성을 측정하기 위해 사전의 표면처리가 필요 없는 벌크 구조를 갖는 복합 상관 물질, 다층 기능성 물질의 묻힌 인터페이스 (Buried interface) 또는 성장한 샘플의 비파괴적 측정에 이상적으로 활용할 수 있다.

좀 더 구체적인 산업 응용의 예들은 <그림 2.2.3.9>에서 보여주는 바와 같이, 상변화 메모리, 투명 비정질 산화막 트랜지스터, 희석 자성 반도체, 강상 관계 자성재료, 고성능의 메모리, 나노 클러스터, Li 이온 배터리 전극의 성능저하 등 매우 다양하다. 또한 Si-MOS 게이트 구조, 혹은 전기화학셀에서의 고체/고체 혹은 고체/액체 계면에서의 동작환경에서의 실시간 촉매반응 시에 일어나는 변화 역시 중요한 예이다.

2~10 keV의 빛 에너지를 이용한 HAXPES는 높은 빛 에너지인 경 X-선(Hard X-ray, 2~10 keV)을 도입하여 이미 확립된 광전자분광학의 기반에, 탐색 깊이를 ~10 nm까지 증가한 기법으로 촉매 및 다양한 응용 물질 연구에 독보적인 위치를 차지하고 있다. 따라서, 그동안 표면 및 계면의 표면과학에 제한적으로 수행해 오던 연구를 복잡한 구조를 갖는 재료 시스템의 표면 및 매립된 인터페이스 및 bulk 특성에 관한 연구로 확장시켰으며, 응용 분야는 다층 이종 구조, 촉매, 솔라셀, 배터리 등으로 기하급수적으로 증가할 것으로 기대된다.

최근에 각광받고있는 반도체 및 에너지 소자의 경우, 다층의 구조를 갖고 있으며, 이들 소자의 특성이 표면 및 계면, 그리고 ~10 nm 깊이의 벌크의 화학적 전자적, 구조적 특성에 의해 결정되며, 이들 소자의 실제 동작 환경에서의 실시간으로 특성 변화에 관한 연구의 필요성이 대두되었다. 또한, HAXPES는 고성능의 메모리 소자, 나노 클러스터, Li-이온 배터리, 전지화학셀의 전극 연구 등 실제 기능성 재료의 분석이 가능하게 되어 점점 더 대중적이고 강력한 기구가 되고 있다.



<그림 2.2.3.9> 경 X-선 기반 PES의 산업 응용의 예

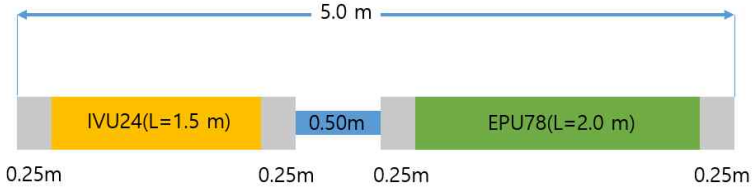
<그림 2.2.3.9>에서 (a)는 나노결정에서 빛 에너지에 따른 Se와 S의 광전자 세기 변화, 이종 나노결정의 내부구조를 결정함을 나타낸다. (b)에서 우리나라는 CO_2 배출 국가 중 7위를 차지하고 있다. 기후변화의 주범으로 여겨지는 CO_2, 그러나 온실가스를 전혀 배출하지 않을 수는 없기 때문에, 그리고 2050년 이후 순 배출량을 제로로 낮추기 위해서는 이미 배출돼 공기 중에 떠다니는 온실가스를 다시 흡수·제거하는 기술이 필요하다. (c)는 고체 배터리 전극의 확산 연구를, (d)는 Advanced Semiconductors, HfO_2/SiO_2 MOS Stack 구조의 IDM (Interface Dipole Modulation) 연구를 나타낸다. (e)는 HAXPES을 이용하여, 산화물 반도체 인터페이스의 정교한 화학적 깊이 프로파일링을 통해, 어떻게 체계적으로 단층 이하 영역에서 Eu-실리사이드와 산화 실리콘의 형성을 극소화했는지, 그리고 실리콘에 접합하고 있는 강력한 스핀 필터를 만들기 위해 어떻게 화학적으로 깨끗한 이종 상층 성장한 강자성 EuO/Si (001) 궁극적인 계면을 만들었는지를 보여준다. (f)는 고체/액체 계면의 특성 분석을 위해 최적의 실험 조건에 대한 일반적인 정보 및 이 기술에 의해 제공할 수 있는 독특한 분석을 설명하였다. 또한, 수 nm 두께의 물층에 감춰진 기능화된 TiO_2로부터 측정된 광전자 세기를 시뮬레이션하여 기능화된 TiO_2 표면의 화학적인 성분과 Band-bending의 변화를 연구하였다.

나. Beamline specification

이 빔라인에서는 <그림 2.2.3.10>과 같이, EPU78 (L=2.0 m)과 IVU24 (L=1.5 m), 두 광원이 tandem으로 위치하고 있고, 2개의 Branch 빔라인으로 구성되어, PES 및 X-ray adsorption (XAS) 실험장치 기반으로 초고진공 및 상압 (Ambient pressure) 환경에서 다양한 실험기법을 확장/수용할 수 있도록 실험장치의 설계 및 구성을 염두에 두고 있다. Soft X-ray Nanoprobe 빔라인은 산업체 및 과학계의 요구에 맞춰, 다양한 시료 및 in-situ 바이어스, 고체/고체 그리고 액체/고체 등의 계면을 포함한 다양한 환경에서 실험 수행이 가능하도록 설계될 예정이며, 필요에 따라 유연하게 대응할 수 있도록 실험장치들의 지속적인 개발을 병행할 예정이다.

Soft X-ray Nanoprobe 빔라인은 한 straight section에 타원편광 언듈레이터 (Elliptically Polarized Undulator, EPU)와 In-Vacuum Undulator를 직렬로 연결하여 0.1~5 keV의 빛 에너지를 사용 가능한 빔라인으로 설계하여, EPU78은 연 X-선 영역 (0.1~3 keV)의 빛 에너지를, 그리고, IVU24는 Tender 에너지 영역 (2~5 keV)의 빛 에너지를 사용할 수 있게 설계할 예정이다.

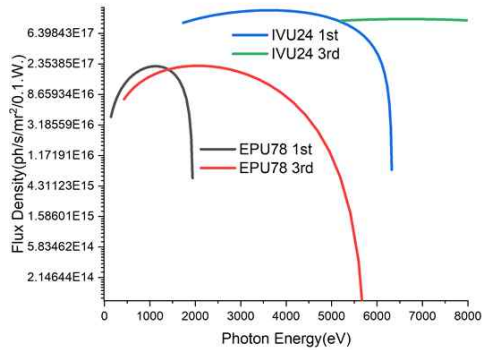
여기에서 EPU78을 광원으로 하는 빔라인을 Branch1, Soft X-ray NanoXPS/XAS (SPEM) 그리고, IVU24를 광원으로 하는 빔라인을 Branch2, Tender X-ray NanoXPS /XAS으로 명명하고, 건설할 예정이다.



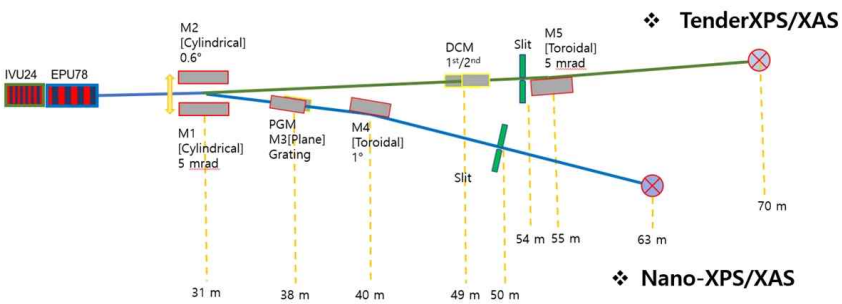
<그림 2.2.3.10> Undulator Plan for Soft X-ray NanoProbe BL

<표 2.2.3.2> EPU78 and IVU24, Undulator Specification

구 분	EPU78	IVU24
No. of magnet periods(N)	25	60
Period length [mm]	78	24
B_0 (@ 15 mm gap EPU78, @ 5 mm gap for IVU24)	0.954 T (V), 0.776 T (H), 0.602 T (Circular)	1.22 T
K Value at 15 mm gap (@ 15 mm gap EPU78, @ 5 mm gap for IVU24)	6.95 (V), 5.65 (H), 4.39 (Circular)	2.733
Gap distance	15 ~ 100 mm	5 ~ 18 mm
Source size (FWHM)	H 31 μm × V 36 μm	H 19 μm × V 5.7 μm
Beam divergence	H 50.9 μrad × V 50.8 μrad	H 18.19 μrad × V 18.0 μrad
E 1st	77.45 eV (V), 96.31 eV (H), 114.73 eV (Circular)	1336.4 eV
Energy range	90 ~ 3,200 eV	2,000 ~ 5,000 eV
Brilliance [photons.s –1 mrad -1. mm -2 (0.1%B.W)]	1.18 × 10^{19} at 15 mm gap	1.11925 × 10^{21} at 5 mm gap
Total Power (kW)	17.48 at 15 mm gap	8.678 at 5 mm gap



<그림 2.2.3.11> Photon Flux density from EPU78 (L=2.0 m) and IVU24 (L=1.5 m)



<그림 2.2.3.12> Beamline layout

○ Branch 1, Soft-NanoXPS/XAS Optical system

(1) M2 Mirror system (Cylindrical Collimation Mirror)

Collimating mirror M2는 cylindrical mirror로써 monochromator의 grating에 수직 방향 (y-축) 평행광으로 전달하도록 설계되었으며, 광원으로부터 31.0 m에 위치하고 있다. 이때 평행한 빔은 넓은 에너지 영역을 cover하고 고정된 exit slit 위치에서 최상의 빔사이즈 정의와 에너지 분해능을 안정적으로 구현하기 위한 grating을 설계하는데 유리한 조건을 제시한다.

입사각은 0.6°의 Au coating 재료를 사용할 예정이다. 입사 에너지에 따른 critical angle 및 반사율에 관한 <그림 2.2.3.14>, <그림 2.2.3.15>을 볼 때, 고에너지로 갈수록 critical angle이 급격히 감소함을 알 수 있다. 본 빔라인의 최대치인 2,000 eV에서 약 2.2°를 가짐으로써 선택된 0.6°는 가용 가능한 각도라 할 수 있다. 이때 반사율은 1,450 eV 기준으로 약 0.77의 높은 값을 가짐으로써 beam flux를 극대화할 수 있는 이상적 각도라 할 수 있다.

상기 입사각을 고려할 때 수직 방향(sagittal)의 곡률단반경은 82.57 cm(± 1%)의 값을 가지며 M3 거울까지 수직 방향 평행광으로 집속시킨다.

거울의 coating 재료는 Au이다. 곡률반경은 toroidal mirror에 대한 공식은 (수식 2.2.3.1), (수식 2.2.3.2)를 통해 구하였다.

$$\frac{1}{r}+\frac{1}{r'_t}=\frac{2}{\rho_t Cos\theta}\equiv\frac{1}{f_t} \quad \text{(수식 2.2.3.1)}$$

$$-\frac{1}{r}+\frac{1}{r'_s}=\frac{2Cos\theta}{\rho_s}\equiv\frac{1}{f_s} \quad \text{(수식 2.3.3.2)}$$

여기서 r'$_t$, r'$_s$ 는 각각 거울에서 무한거리, exit slit까지의 거리이며, ρ_t, ρ_s는 각각 tangential 방향, sagittal 방향에서의 곡률반경이다. 여기서 cylindrical 거울로서 ρ_t는 무한거리이며, 이 경우 spherical aberration들은 광원이 집속되는 크기에 비해 무시될 수 있다. 허용되는 slope error는 tangential 방향으로는 5 μrad, sagittal 방향으로는 15 μrad인데, 높은 에너지로 갈수록 작아진다. 이때 허용되는 slope error를 구하기 위해 exit slit 혹은 시료에서의 영상 크기의 1/2 sigma에 해당하는 값을 기준으로 정하였다. Slope error가 이렇게 정의되면 slit 및 시료에서의 영상의 전체크기는 1.12 sigma의 값을 갖게 된다.

광이 입사하는 거울 표면에서의 미세구조의 높이는 diffraction으로 영상이 퍼지는 것을 방지하기 위해 다음의 (수식 2.2.3.3)으로 제한된다.

$$h\ r.m.s < \lambda/(28\theta i) = 6.34\times10^{-10}m\,(@\,\lambda\min = \frac{12400}{2000}\times10^{10}m) \quad \text{(수식 2.2.3.3)}$$

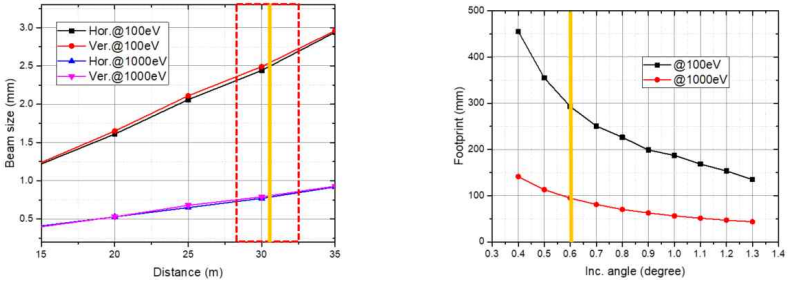
이 조건은 표면의 거칠기가 6 × 10^{-10} m r.m.s. 이내로 다듬어져야 함을 의미한다.

M2 mirror의 구조물은 가능한 100 μm의 정밀도로 정렬한다. 거울에 의한 광원은 entrance slit을 통과하는데, slit에서의 광의 footprint는 4 mm 이내의 너비(x-축)를 가지며 13 μm 이내의 간격(y-축)을 갖는다. 수직 방향으로의 위치이동은 ± 10 mm의 범위를 움직일 수 있게 한다. 미세조정은 광원의 크기에 대해 10% r.m.s. 이내의 정밀도를 요구하며, 이는 8 μm가 된다. 수평 방향(x-축)으로의 위치보정은 정밀한 보정이 요구되지는 않으며 (~100 μm) 외부에서 조절할 수 있게 한다. 광축 방향(z-축)으로의 위치보정 또한 정밀한 보정이 요구되지는 않으며 (~500 μm) 외부에서 조절할 수 있게 한다.

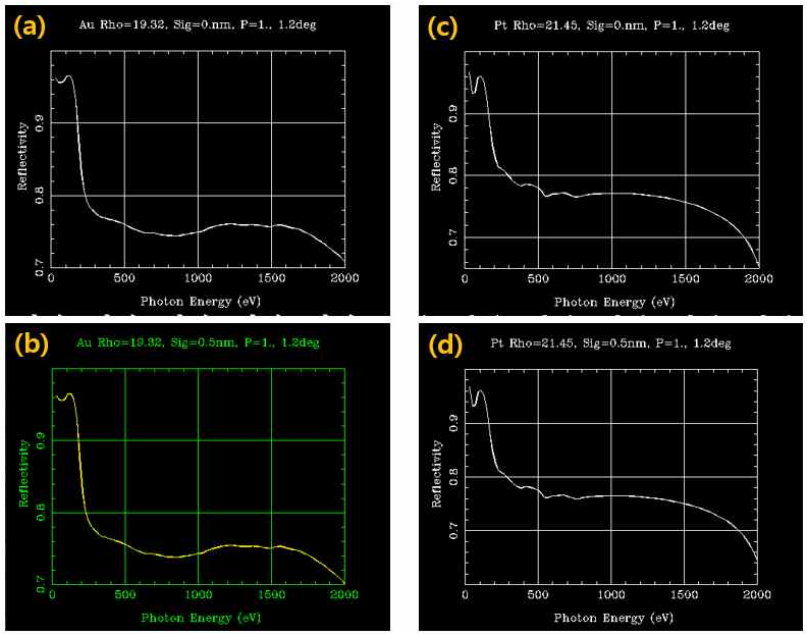
거울의 각도 조절은 적어도 1/5의 slope error 이내로 정하는 것이 요구된다. Pitch의 정밀도는 slope error가 5.9 μrad인 것을 고려할 때, 1.2 μrad의 정밀도를 가져야 한다. 이는 z-축으로 거울의 중심에서 10 cm 떨어진 곳에 회전에 필요한 stepping motor, inchworm, 혹은 PZT (piezoelectric transducer)를 설치할 경우 정밀도가 0.12 μm가 됨을 의미한다.

Yaw의 정밀도는 15 μrad 1/5인 3.0 μrad에 해당하는데, 이는 거울의 중심에서 회전에 필요한 회전판의 길이가 10 cm일 경우 0.3 μm가 된다. Roll의 정밀도는 크게

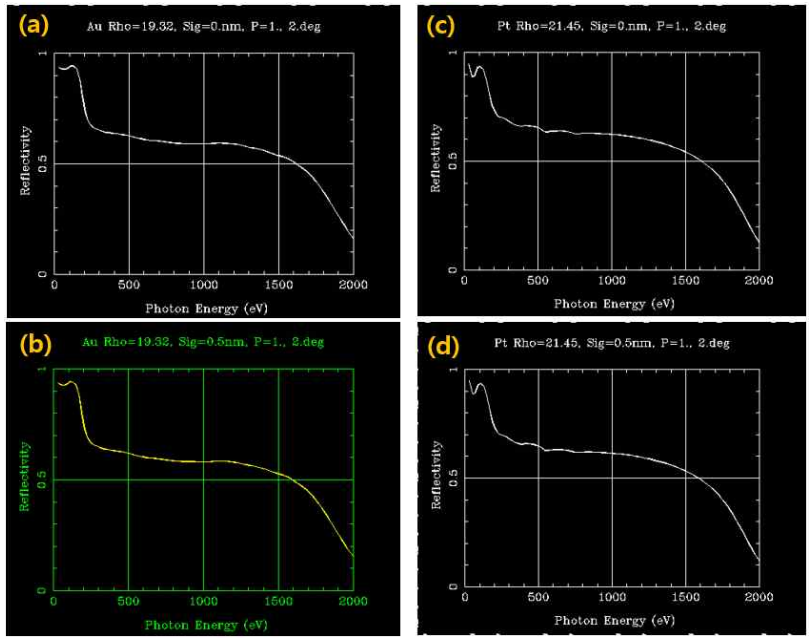
중요하지 않으나 pitch와 yaw에 영향을 주므로 가능한 5 μrad 이내로 조절되도록 한다.



<그림 2.2.3.13> M2 mirror의 입사각에 따른 footprint beam size



<그림 2.2.3.14> 0.6° 입사각 기준 mirror coating 재료 및 surface RMS에 따른 반사율 비교. (a) Au, RMS=0 nm, (b) Au, RMS=0.5 nm, (c) Pt, RMS=0 nm, (d) Pt, RMS=0.5 nm



<그림 2.2.3.15> 0.6° 입사각 기준 mirror coating 재료 및 surface RMS에 따른 반사율 비교. (a) Au, RMS=0 nm, (b) Au, RMS=0.5 nm, (c) Pt, RMS=0 nm, (d) Pt, RMS=0.5 nm

Source point로부터 31 m 기준으로 수평 방향 빔사이즈는 약 915 μm(FWHM@400 eV 기준)로서 입사각을 고려한 M1 mirror에서의 footprint 빔사이즈는 약 87.49 mm를 가진다. 따라서 acceptance angle 0.5°를 허용하는 600 mm mirror를 사용할 때 약 349 mm(4 sigma)의 footprint 크기를 충분히 포함할 수 있다.

<표 2.2.3.3> Specification on M2 collimating mirror

(a) Name of mirror	Cylindrical collimating mirror
(b) Physical dimension	Keep clear aperture*
(c) Substrate material	Glidcop**
(d) Clear aperture (mm × mm)	600 × 50
(e) Coating	Au (60 nm)
(f) Binder material	Cr
(g) Geometry with radii	Infinite; tangential radius of curvature. 82.57 cm; sagittal radius of curvature
(h) Tolerance of radii	± 5% in tangential radius of curvature. ± 1% in sagittal radius of curvature.
(i) Longitudinal slope error	1 μrad in tangential direction.
(j) Sagittal slope error	10 μrad
(k) Microroughness	5 Angstrom
(l) Cooling**	yes
(m) Bending	no
(n) Power on mirror surface/footprint***	190 W/ 34.9 cm × 3.9 mm (for 4σ)

*; depends on the seller but keep clear aperture.

**; Glidcop is preferred but can be done with other material if it satisfies other specifications and is not affected by the heat absorption.

***; no binder is required. We experienced that the coating material is removed while cleaning. If the binder is necessary Cr or Ni is preferred.

****; internal cooling channel is needed.

*****; finite element calculations of the deformation of the optical surface will be performed by the seller to verity the thermal and structural design.

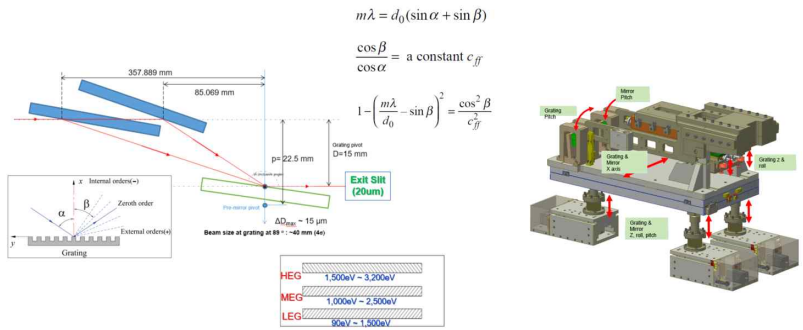
○ Monochromator System

단색광 장치는 variable included angle plane grating mirror type으로 설계되었다. 이는 grating 앞에 pre-mirror가 있어, pre-mirror를 수평면으로 이동함과 동시에 각도를 변화시켜주어 grating에 원하는 각도로 photon beam이 입사하도록 하는 원리로 구동한다. 따라서 pre-mirror의 조그마한 각도의 변화에 에너지 분해능과 calibration에 큰 영향을 미치므로 수직 방향으로 적어도 0.5 μm 정도의 정밀도를 가져야 한다.

(2) M3 Pre-mirror (Plane Mirror)

Pre-mirror는 수평면에서 이동하며 동시에 각도를 변화시켜주어 grating에 원하는 각도로 광이 입사하도록 하여 준다. Pre-mirror는 plane mirror로 Au를 코팅하며, 냉각수로 냉각한다.

Pre-mirror는 조그마한 각도의 변화에 있어서 에너지 분해능과 calibration에 영향을 미치므로 매우 중요한 역할을 한다. 1 central cone에 해당하는 광원의 크기가 광축에 대해 22 μm 정도가 되므로 수직 방향으로 적어도 1.0 μm 정도의 정밀도를 가져야 한다. Longitudinal 방향으로는 2 μm의 정밀도를 갖도록 한다. 각도의 정밀도는 yaw인 경우는 큰 제한이 안 되며, pitch인 경우 0.15 μrad 이내의 정밀도를 가져야 한다. 이는 grating에서의 slope error가 0.5 μrad 이하가 되도록 설계하는 데 기인하는 조건이다. Roll인 경우는 exit slit에서의 영상의 모양에 관계되며 throughput에 영향을 준다. 100 μrad의 정밀도가 필요할 것으로 예상한다.

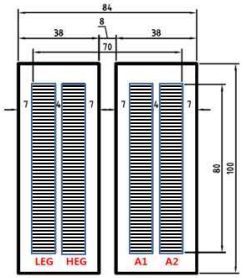


<그림 2.2.3.16> Monochromator 내부 개략도

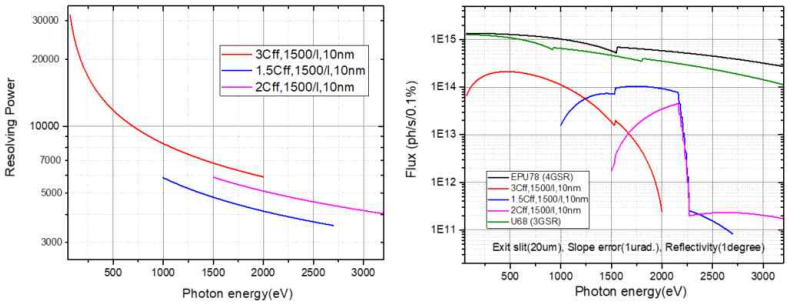
(3) Grating

Grating은 M2으로부터 7 m의 거리에 설치되어 있다. Grating 2개를 사용하여 200~2,000 eV의 에너지를 cover 하기 위해서 각 grating에 2개의 서로 다른 groove depth를 만들어 사용한다. 에너지 분해능을 원하는 값으로 유지하기 위해서 groove density는 <표 2.2.3.7>과 같이 350/mm~600/mm를 선택적으로 사용한다. Groove depth의 변화는 dispersion에는 무관하며, diffraction efficiency에 관계한다. 사용되는 groove depth 또한 선택적으로 사용한다.

Grating은 2개의 평편한 기저판 위에 LEG/HEG와 A1/A2 각각 2개씩의 groove 패턴을 가진 기판을 이용하여 그 표면은 금으로 코팅하여 반사율을 증가시킨다. 따라서 Transverse 방향으로 총 4개의 groove depth를 가지고 있으며 각각의 clear aperture는 200 mm × 40 mm를 갖게 된다. 실제 각 groove의 수평 방향으로의 width는 다음과 같다.



	density (/mm)	Groove depth (nm)	range	IA
LEG: G2	400	16	250-900	175
HEG: G4	600	9	700-2000	176
A1	350	22	100-400	172
A2	500	8	1200-3000	177.2



<그림 2.2.3.17> Grating의 groove depth, width 그리고 photon energy

<표 2.2.3.4> M3: Pre-mirror

Type	Plane
Function	Reflection
Tangential radius (meter)	Infinite
Bending resolution	NA
Position	Upward
Sagittal radius	Infinite
Incidence angel	Reference to the required energy
Substrate material	Single crystal silicon (thickness=75 mm)
Clear aperture (mm)	500 (length) , 80 (width)
Thickness (mm)	75
Surface roughness	< 5 Å RMS
Tangential slop error	< 1 μrad RMS
Sagittal slop error	< 10 μrad RMS
Coating material	Au
Coating thickness (Å)	Au (600 Å)
Power on Mirror	Reference to the Consideration for Power

<표 2.2.3.5> Grating G1, G2

	Grating pattern Ⅰ(G1)	**Grating pattern Ⅱ(G2)**
Effective area	158 mm * 20 mm	158 mm * 20 mm
Groove density	1250 lines/mm± 5%	500 lines/mm± 5%
Groove uniformity	Smaller than 10^4	Smaller than 10^4
Groove profile	Lamella	Lamella
Depth	6 nm ± 0.8 nm	14 nm ± 1.5 nm
Land width(top) to Groove period ratio	40%±5% (groove bottom width ~500 nm, groove top width~333 nm)	30%±10% (groove bottom width ~1400 nm, groove top (land)~600 nm)
Coating	Au 50 nm±5 nm	Au 50 nm±5 nm

<표 2.2.3.6> Specifications on pre-mirror and grating mirror

(a) Name of mirror	P-mirror (M3)	Grating+
(b) Physical dimension	Keep clear aperture*	Keep clear aperture*
(c) Substrate material	Glidcop	Si**
(d) Clear aperture (mm × mm)	500 × 80	200 × 40
(e) Coating	Au	Au
(f) Binder material	Cr***	Cr
(g) Geometry with radii	Plane	Plane
(h) Tolerance of radii	N.A.	N.A.
(i) Longitudinal slope error	1 μrad	1 μrad
(j) Sagittal slope error	5 μrad	5 μrad
(k) Microroughness	5 Angstrom	5 Angstrom
(l) Cooling**	Yes	No
(m) Bending	No	No
(n) Power on mirror surface/footprint***	48 W/ 3.5 cm × 4.5 mm	24 W/ 5.8 cm × 4.5 mm

*; depends on the seller but keep clear aperture.

**; Si is preferred but can be done with other material if it satisfies other specifications and is not affected by the heat absorption.

***; We prefer Cr as a binding material. Ni maybe used or no binding material maybe used.

****; internal cooling channel is needed.

*****; finite element calculations of the deformation of the optical surface will be performed by the seller to verity the thermal and structural design.

+; the grating will have 7 different groove depths as specified in the text.

<표 2.2.3.7> Specification on Grating mechanism

Rotation or axis	Stability	Motor resolution	Encoder resolution	Precision	Range	Remark
Pitch scan axis	≤ 1.0 μrad / 20 minits	≤ 0.02 μrad	≤ 0.03 μrad	≤ 0.24 μrad	0.5 ~ 5.0 deg.	-
Pitch alignment axis	≤ 2.0 μrad / 20 minits	≤ 0.48 μrad	≤ 0.24 μrad	≤ 2.42 μrad	≥ ±1.5 deg.	-
Roll alignment axis	≤ 4.0 μrad / 20 minits	≤ 0.48 μrad	≤ 0.24 μrad	≤ 2.42 μrad	≥ ±1.5 deg.	-
y alignment axis	≤ 2.0 μm / 30 minits	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 μm	≤ 1.0 μm	≥ ±9.0 mm	-
fine scan PZT axis	-	≤ 0.3 nm	≤ 0.6 nm	≤ 5.0 nm	≥ 30.0 μm	-
x transverse position	≤ 2.0 μm / 30 minits	≤ 0.01 μm	≤ 0.05 μm	≤ 1.0 μm	≥ ±35.0 mm	mirror and grating are applied common
Zeroth order blocking motions	-	≤ 0.1 μm	≤ 1.0 μm	≤ 3.0 μm	≥ ±7.0 mm	-
Additional specification	1. While varying the pitch angle, the grating pitch axis must either remain stationary or it must vary monotonically and reproducibly, vertically and longitudinally. The variation in the position can be no longer than 5 μm/μrad, and while at that angle the position must not vary by more than the required stability. 2. When in use, the grating must be positioned so that the grating pitch rotation axis lies on the plane of the grating optical surface to within 10 μm. 3. When in use, the grating must be positioned so that the grooves are parallel to the grating pitch axis to within 500 μrad.					

<표 2.2.3.8> Specification on Premirror (M3) mechanism

Rotation or axis	Stability	Motor resolution	Encoder resolution	Precision	Range	Remark
Pitch scan axis	≤ 1.0 μrad / 20 minits	≤ 0.02 μrad	≤ 0.03 μrad	≤ 0.24 μrad	0.5 ~ 5.0 deg.	-
Pitch alignment axis	≤ 2.0 μrad / 20 minits	≤ 0.48 μrad	≤ 0.24 μrad	≤ 2.42 μrad	≥ ±1.5 deg.	-
Roll alignment axis	≤ 4.0 μrad / 20 minits	≤ 0.48 μrad	≤ 0.24 μrad	≤ 2.42 μrad	≥ ±1.5 deg.	-
y alignment axis	≤ 2.0 μm / 30 minits	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 μm	≤ 1.0 μm	≥ ±9.0 mm	-
Fine scan PZT axis	-	≤ 0.3 nm	≤ 0.6 nm	≤ 5.0 nm	≥ 30.0 μm	-
x transverse position	≤ 2.0 μm / 30 minits	≤ 0.01 μm	≤ 0.05 μm	≤ 1.0 μm	≥ ±35.0 mm	mirror and grating are applied common
Additional specification	Roll and yaw angles must not vary from the nominal values by more than the stability limit for all longitudinal positions of the premirror.					

(4) M4 Focusing mirror (Toroidal Mirror)

M4 mirror는 단색광 장치로부터 나온 빔을 exit slit으로 모아주는 장치로서 source point로부터 각각 40 m에 위치한다.

Grating에서 분산되는 광은 퍼져나가기 때문에, 퍼져나가는 광을 집속시켜 주어야 하는 거울이 뒤따르게 된다. Grating에서 분산되어 나오는 광의 각 퍼짐이 큰 관계로 focusing mirror에서의 footprint는 큰 값을 갖는다. 또한 허광원으로부터 focusing mirror까지의 거리에 대한 focusing mirror로부터 exit slit까지의 거리 비율이 큰 관계로 focusing mirror에 의한 exit slit에서의 aberration(coma)이 매우 크게 되어, 에너지 분해능 및 throughput에 큰 영향을 끼치게 된다.

본 거울은 toroidal mirror로써 광원을 exit slit에 수직/수평 방향(y-축)으로 집속하여 전달하기 위해 사용된다. 수직 방향의 곡률단반경은 44 cm, 31.38 cm (± 1%), 수평 방향의 곡률반경은 320 cm, 400 cm (± 6%)로써 M3-1 & M3-2 거울 각각에 해당한다.

입사각은 반사율을 고려하여 거울에 입사하는 광의 입사각은 M3-1은 2°, M3-2는 1.5°를 선택하였다. 거울의 coating 재료는 Au이다.

곡률반경은 toroidal mirror에 대한 (수식 2.2.3.4)를 통해 구하였다.

$$\frac{1}{r}+\frac{1}{r'_t}=\frac{2}{\rho_t Cos\theta}\equiv\frac{1}{f_t},\quad \frac{1}{r}+\frac{1}{r'_s}=\frac{2Cos\theta}{\rho_s}\equiv\frac{1}{f_s} \quad \text{(수식 2.2.3.4)}$$

여기서 r'_t, r'_s 는 각각 거울에서 무한거리, entrance slit까지의 거리이며, ρt, ρs는 각각 tangential 방향, sagittal 방향에서의 곡률반경이다. 이 경우 spherical aberration들은 광원이 집속되는 크기에 비해 무시될 수 있다. 허용되는 slope error는 tangential 방향으로는 5.9 μrad, sagittal 방향으로는 15 μrad인데, 높은 에너지로 갈수록 작아진다. 이때 허용되는 slope error를 구하기 위해 entrance slit 혹은 시료에서의 영상 크기의 1/2 sigma에 해당하는 값을 기준으로 정하였다. Slope error가 이렇게 정의되면 slit 및 시료에서의 영상의 전체크기는 1.12 sigma의 값을 갖게 된다.

미세정렬은 vertical 방향으로는 1/10 sigma 값인 1 μm 이내의 정밀도를 가져야 한다. Longitudinal 방향으로는 비교적 critical 한 것은 아니며, 5 μm 이내의 정밀도를 가지면 된다. Transverse 방향으로는 20 μm 이내의 값을 갖도록 한다. Roll 및 yaw는 비교적 문제가 되지 않으나, pitch는 매우 중요하다. Pitch의 정밀도는 0.25 μrad 이내의 정밀도를 가져야 한다.

<표 2.2.3.9> M4 TFM specification

Type	Toroidal
Function	Vertical & Horizontal focusing
Tangential radius	303.73 m
Bending resolution	NA
Position	Upward
Sagittal radius	370 mm ± 0.1%
Incidence angel	2.0 degree in / 2.0 degree out
Substrate material	Single crystal silicon (thickness=60 mm)
Clear aperture (mm)	300 (length) ´ 50 (width)
Thickness (mm)	60
Surface roughness	< 5 Å RMS
Tangential slop error	< 1 μrad RMS
Sagittal slop error	< 100 μrad RMS
Coating material	Au
Coating thickness (Å)	Au (600 Å)
Power on Mirror	Reference to the Consideration for Power

○ Exit slit

<표 2.2.3.10> Specifications on Exit slit

Axis	Stability	Installation Accuracy	Operational Positioning range and resolution
Roll	75 μrad	75 μrad (to horizontal)	± 7500 μrad 20 μrad resolution
Pitch	75 μrad	5 mrad (to horizontal)	± 15 μrad 1 mrad resolution
Yaw	75 μrad	5 mrad (to monochromator center line)	± 15 μrad 1 mrad resolution
Vertical (y-axis)	1 μm	100 μm	Corse: ± 25 mm, 10 μm res. Fine: ± 200 μm, 1 μm res.
Transverse	20 μm	200 μm (to monochromator center line)	± 25 mm 50 μm resolution
Longitudinal	10 μm	200 μm	± 75 mm μm resolution

Exit slit은 M4 mirror로부터 10 m 거리에 위치한다. 이때 그 상대적인 위치는 monochromator의 성능에 있어 다른 성분과 마찬가지로 중요하다. 열부하는 큰 문제점은 되지 않으나 주위의 온도변화 및 진동에 대해 1 μm 이내의 안정성을 가져야 한다.

Exit slit의 면 및 slit 날개 방향의 광축에 대한 각도 변화는 실제 throughput에 영향을 미치며 에너지 분해능에 영향을 끼친다. 보다 중요한 것은 vertical 방향으로의 정밀 조절이다. 안정성은 1 μm 이내가 되어야 원하는 에너지 분해능을 얻을 수 있다. Transverse 방향으로는 큰 문제가 안 되며, longitudinal 방향으로의 정밀도는 초점깊이 λ/(N.A.)2를 고려하면 10 μm 정도면 된다.

○ Branch 2, Tender X-ray NanoXPS/XAS

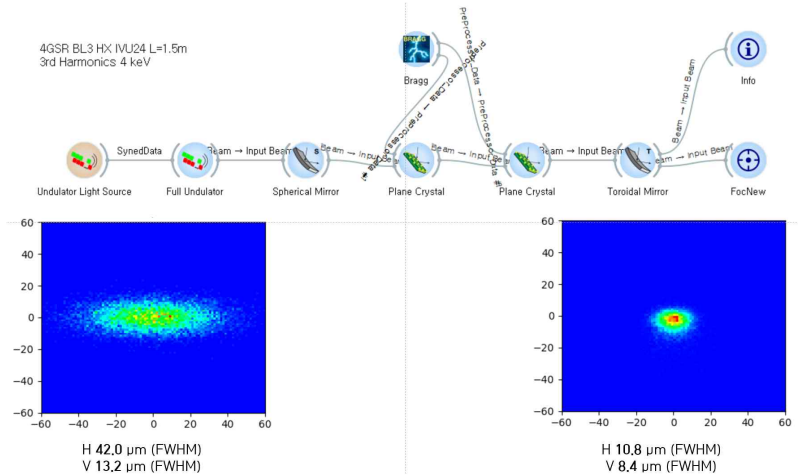
<그림 2.2.3.18>의 Ray-tracing에서 보는 바와 같이, 이 Branch 2 빔라인의 구성은 매우 단순하다. 주요 광학장치로는 Vertical Collimating Mirror (VCM), Double Crystal Monochromator (DCM) 혹은 Multilayer Coated Blazed Plane Grating Monochromator (ML-PGM), Toroidal Focusing Mirror (TFM) 그리고, Slit으로 구성되어 있다.

VCM은 X-선 반사율을 높이기 위해 탄소 (C) coating을 활용하고, layer의 두께는 50 nm이다. 이 VCM은 광원으로부터의 30 m 거리에 위치하며, vertical divergence를 collimating 한다.

Si (111) crystal을 이용한 DCM 혹은 ML-PGM을 이용하여 2~5 keV의 빛 에너지를 cover하고, 최종적으로 TFM을 이용하여 시료의 위치에 빔을 집속한다. 이때 시료 위치에서의 빔 크기는 11 × 8 μm^2이다. TFM의 표면도 VCM과 같이 C로 coating 되어 있다. 또한, 12.5 μm 두께의 Beryllium (Be) window를 설치하여, 빔라인의 진공과 실험장치의 진공을 분리할 예정이다.

<표 2.2.3.11> Branch2 Tender X-ray NanoXPS/XAS 빔라인 Goal

Photon Source	IVU24
Available Photon Energy	2 ~ 5 keV
Monochromator	DCM or ML-PGM
Photon Flux	~ 10^{13} photon/sec
Photon Resolution	At 4 keV (Resolving Power > 10,000) LN2 cooled DCM
Beam size @ sample position	11 × 8.4 μm^2



<그림 2.2.3.18> Ray-Tracing using OASYS

<표 2.2.3.12> 광학장치 요약

	Source	M1(VCM) C 50 nm	DCM(Si (111)) or ML-PGM	M5(TFM) C 50 nm	Sample Position
Distance (m)	0	30	49	55	70
Incident Angle (°)	-	0.3 (5 mrad)	23.3356~82.0087° (5 ~ 2 keV)	0.3 (5 mrad)	-
Shape	-	Cylindrical	Plane	Toroidal	-
Substrate	-	Si	Si	Si	-
Beam Size (mm × mm)	-	H 0.88 × V 1.03 (FWHM)	H 1.57 × V 1.03 (FWHM)	H 1.68 × V 1.06 (FWHM)	H 0.0108 × V 0.0084 (FWHM)
Foot Print (mm × mm)	-	W 1.0 × L 199 (FWHM)	-	W 1.7 × L 207 (FWHM)	-
Mirror size (mm × mm)	-	W 50 × L 400	-	W 50 × L 400	-
Focus distance (mm)	-	∞	-	15,000	-
Radius of Curvature (tangential/sagittal) (mm)	-	∞ / 300	∞ / ∞	6,000,000 / 411	-
Roughness σ (nm)	-	0.3 rms	0. rms	0.3 rms	-
Slope error (tangential/sagittal) (μrad)	-	0.5 rms / 5 rms	1 rms / 10 rms	0.5 rms / 5 rms	-

○ M1, VCM (Vertical Collimating Mirror)

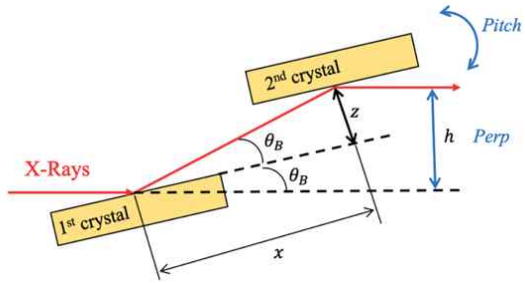
VCM은 DCM으로 입사되는 빔의 수직 발산각을 조절함으로써 에너지 분해능을 높이는 역할을 한다. 또한 DCM의 열부하를 줄여주는 역할을 하며, 경우에 따라서는 저장링 LCW를 이용한 수냉각을 고려해야 한다. 표면 coating 물질은 5 keV까지의 에너지 영역을 고려하여 높은 반사율을 얻을 수 있는 C를 적용하고, 입사각은 5 mrad으로 한다. Soft X-ray 빔라인과 Tender X-ray 빔라인의 거리를 확보하기 위해 VCM은 horizontal deflection으로 하며, vertical collimating을 하기 위해 VCM의 sagittal 방향의 곡률을 지니는 cylindrical mirror로 한다.

빔을 수직 방향으로 collimating 하기 위한 mirror의 곡률반경 (R)은 (수식 2.2.3.5)를 적용하여 계산하였다.

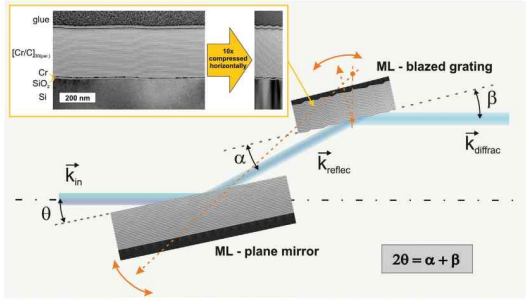
$$R_t = \frac{2}{(1/p+1/q)\sin\theta_i}, R_s = \frac{2\sin\theta_i}{1/p+1/q} = R_t\sin^2\theta_i \quad \text{(수식 2.2.3.5)}$$

R_t는 tangential 방향의 곡률반경, R_s는 sagittal 방향의 곡률반경, p는 광원에서 mirror까지의 거리, q는 mirror에서 focusing point까지의 거리이며, Θ_i는 입사각이다. Collimating의 경우 q = ∞가 되며, 설계 조건에서 계산된 R_s는 300 mm이다.

○ Monochromator, DCM 혹은 ML-PGM



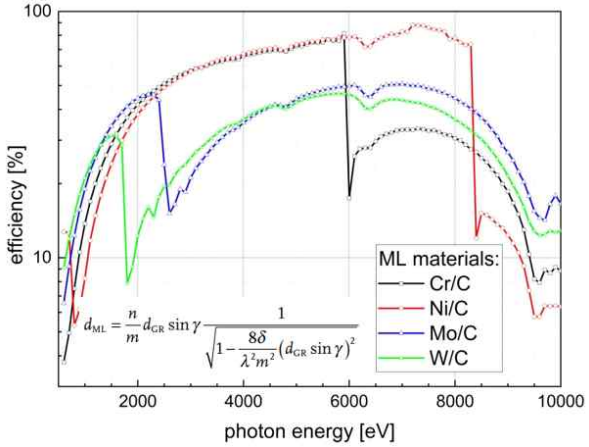
<그림 2.2.3.19> DCM의 개략도. Crystal = Si (111). Θ_B = 23.3356° ~ 82.0087°, z = 25 mm, h = 20 mm



<그림 2.2.3.20> Schematic drawing of multilayer coated blazed plane grating (ML-PGM) and mirror to improve the photon flux in the tender X-ray photon energy regime.

DCM은 액체질소를 이용하여 열부하를 흡수할 수 있도록 설계한다. 이때 사용되는 결정은 Si (111)이다. 시료 위치에서의 빔 크기는 15 μm 이하를 목표로 하고 있고, Photon flux는 10^{13} photon/sec를 예상할 수 있다.

High Flux의 Tender X-선을 얻기 위한 방법중 하나인 ML-PGM (multilayer coated blazed plane grating)은 최근 BESSY-II의 U41-PGM1 빔라인에 설치되어 Tender 영역에서의 Photon Flux를 100배 이상 증가시킨 것으로 보고되고 있다. <그림 2.2.3.20>에서 보는 바와 같이 PGM set-up에서, Blazed shape grating에 [Cr/C] 다층박막을 증착시킨 mirror와 grating을 도입하였다. 여기서 Multilayer이 주기 dML은 과 wavelength λ, Grating dGR, Blazed angle γ은 아래의 관계식을 갖는다. <그림 2.2.3.21>은 Bilayer material combination에 따른 빛 에너지 efficiency 변화를 계산한 결과, [Cr/C] combination이 효과적으로 보인다. 여기서 m과 n은 각각 Grating과 Multilayer의 diffraction order이다. 여기서 m과 n은 각각 Grating과 Multilayer의 diffraction order이다.

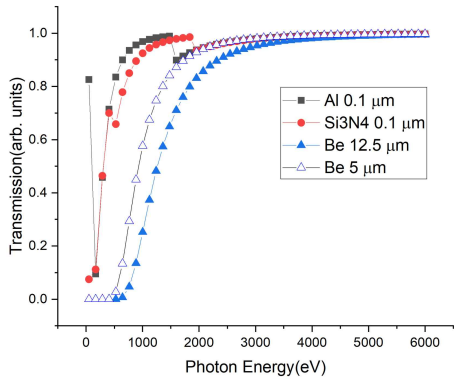


<그림 2.2.3.21> ML blazed plane grating in the photon energy range up to 10 keV. The simulations were performed for a 2,000 lines/mm grating with a blaze angle of 0.59° and an anti-blaze of 1.57°. The ML parameters were chosen to 30 ML periods with a dspacing of 5.7 nm and a ɣ-ratio of 0.4. The simulated values for Cr/C and Ni/C bilayers show a drop in efficiency at approx. 6 keV and 8.3 keV caused by the corresponding K-absorption edges of Cr and Ni, respectively. In contrast Mo/C and W/C show an efficiency loss below 3 keV photon energy caused by the Mo-L- and W-M-absorption edges.

○M5 Toroidal Focusing Mirror (TFM)

TFM은 DCM으로부터 반사된 빔을 수직/수평 방향으로 시료 위치에 집속하는 역할을 한다. Vertical deflecting으로 상향 반사로 하며, 입사각 및 표면 coating 물질은 VCM과 동일한 5 mrad와 C로 한다. TFM의 곡률반경은 수직 방향은 collimating 된 빔(평행 빔)을 받아 15 m의 focal distance를 가지는 것으로 계산하고, 수평 방향은 광원으로부터 55 m, 15 m의 focal distance, 즉 3.6:1의 집속으로 각각 계산하여 구한다. 이를 적용 시 Rt는 6 km, Rs는 411 mm이고, Ray-tracing 결과, 시료 위치(70 m)에서 집속되는 빔의 형상은 <그림 2.2.3.22>와 같으며, 크기는 11 × 8 μm^2이다.

* 빔라인 Filter



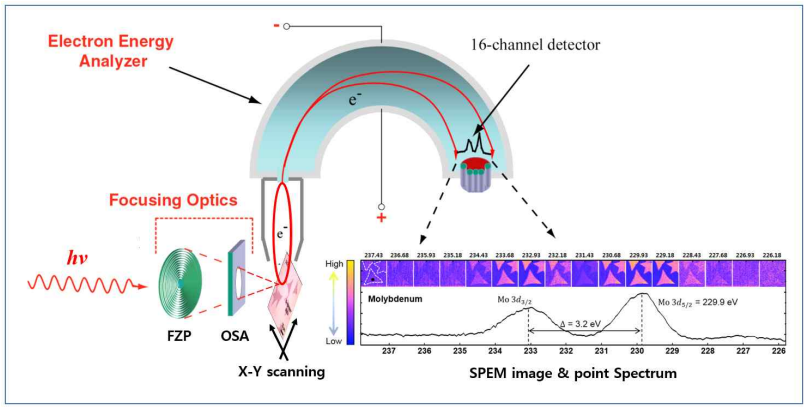
<그림 2.2.3.22> Al, Si3N4, Be filter의 Transmission

다. Exp. system

(1) SPEM의 원리

SPEM은 이름에서 알 수 있듯이 일반적 표면분석 기법인 XPS 광전자분광학을 이용하여 현미경 이미지를 획득하는 기법이다. 따라서 약 3 nm 이내 probing depth를 가지는 표면 민감도 속에 측정 시료의 화학적 조성에 대한 공간분포 및 국소 영역 전자구조 분석에 중요한 정보를 제공해 주게 된다. <그림 2.2.3.23>은 SiO2 기판 위 성장시킨 MoS2 이차원 물질에 대하여 SPEM 이미지 획득 과정을 도식화한 그림이다. 최초 단색화장치를 통해 입사된 광자빔은 FZP (Fresnel Zone Plate)와 OSA(Order

Sorting Aperture)를 거쳐 약 100 nm 이하까지 집속된 후 시료에 수직으로 입사하게 된다. 여기서 특정 원소에 대한 공간분포 이미지는 전자에너지분석기를 통하여 광여기 전자의 운동에너지를 검출함과 동시에 X-Y scanning stage를 구동하여 얻을 수 있게 된다. 현재 8A1 SPEM 실험장치는 16 channel MCP(Micro Channel Plate)가 포함된 PHI3057 모델 전자분석기를 사용하고 있다. 각 channel은 분석기의 pass energy 조건에 따라 0.1 eV~1.5 eV의 band width에 들어오는 광전자를 수집함으로써 그 세기를 X-Y 2차원 공간분포로 mapping 할 수 있도록 한다. 또한 얻어진 mapping 이미지에서 특정 영역에 대한 point spectrum을 얻음으로써 에너지 고분해능 분광 정보를 얻을 수 있다. 이는 특정 원소에 대한 단순한 양적 공간분포 정보를 제공함은 물론 산화-환원으로 유도되는 core-level 전자의 chemical shift를 반영한 화학적 조성분포를 제공할 수 있다. 따라서 일반적 XPS (ESCA)의 장점을 온전히 활용할 수 있다는 장점이 있다.



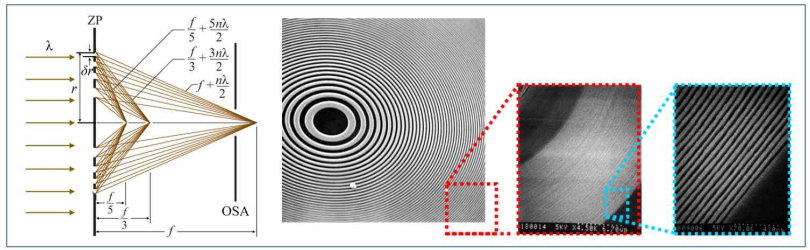
<그림 2.2.3.23> SPEM 실험장치의 이미지 획득 과정 모식도

(2) 집속 렌즈 (FZP)의 이해 및 공간분해능

서론에서 언급한 바와 같이 SPEM 분석기법은 빔 집속을 위한 광학기술을 분리해서 생각할 수 없는 불가분의 관계에 있다. 그러나, 모든 기술이 항상 우리에게 이점만 제공하지 않듯이 빔 집속 기술 또한 실제 응용에 있어서 빔 세기 감쇠 문제 및 장치구성상 구조적 문제 등과 같은 몇 가지 제한 조건들 존재한다.

Soft X-ray의 빔 집속은 가시광선의 경우와 달리 굴절 또는 반사를 활용한 광학장치로 초점을 맞추기 어렵다. 따라서 UV 및 X-ray 범위에 적용될 수 있는 회절

기반 광학장치를 활용하게 되는데, FZP(Fresnel Zone Plate)는 높은 공간해상도 및 에너지 조정 유용성을 제공할 수 있는 효율적 광학장치 중 하나이다. 따라서, 현재까지 전 세계의 모든 SPEM 시스템은 FZP를 초점 광학렌즈로 사용하고 있다. <그림 2.2.3.24>에서 보는 바와 같이 FZP는 원형 회절격자로서 투명 링과 불투명 링을 번갈아 사용하는 링으로 구성된다. 원의 중심으로부터 외곽으로 갈수록 격자선 밀도가 증가하는 구조를 가지고 있으며, 일반적으로 직경이 증가함에 따라 그 격자 폭이 감소하도록 되어있다. 투명 영역은 순차적으로 이웃한 투명 영역을 통과하는 빛의 경로 차가 정확히 하나의 파장이 되도록 배열되어 있어 한 초점에서 보강간섭을 일으키도록 설계되어 있다.



<그림 2.2.3.24> FZP를 통한 X-ray 집속 과정 모식도 및 FZP의 확대사진

FZP의 중심에서 최외각 투명링까지의 거리를 r이라 하고, 최외각 투명링의 간격을 δr이라고 할 때 초점거리(focal length)와 공간분해능(spatial resolution)은 각각 (수식 2.2.3.6), (수식 2.2.3.7)과 같이 표현된다.

$$f = \frac{2r \cdot \delta r}{\lambda} \quad \text{(수식 2.2.3.6)}$$

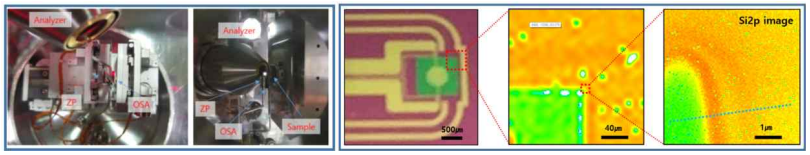
$$\Delta l \approx 1.22 \cdot \delta r \quad \text{(수식 2.2.3.7)}$$

여기서 중요한 것은 (수식 2.2.3.6)에서 알 수 있듯이 초점거리는 사용하고자 하는 단색광 파장과 반비례 관계를 가지고 있다. 다시 말해, 에너지와 파장의 역수 관계를 고려할 때 단색광의 에너지와 초점거리는 비례관계를 가지고 있다. 반면 공간분해능의 경우, 최외각 투명링의 간격과 1.22배만큼의 비례관계를 가지고 있다. 따라서, FZP 제작은 실험장치의 목적에 맞는 사양의 설계가 필수적이며 제작 기술 또한 수반돼야 한다. 1980년 이래 회절계 광학렌즈 제작 기술은 많은 발전이 있었으며 현재 여러 분야에서 고사양의 FZP를 주문 제작되어 사용하고 있다. 대표적 제작업체로는 미국의 CXRO, 캐나다의 APPLIED NANOTOOLS, 스위스의 XR Nanotech 등을 소개할 수

있으나, 애석하게도 국내 업체는 없는 것으로 알고 있다.

OSA는 FZP를 지나온 0차와 1차의 회절 광원을 제외한 3차 및 5차 빔을 차단하는데 사용된다. 따라서, 초점거리와 OSA 직경과의 상관관계가 존재하고 이는 마찬가지로 사용하는 단색광의 에너지에 의존한다. 따라서, OSA의 제어를 통해 얻어지는 이미지의 선명도를 조절할 수 있게 된다. 일반 카메라의 조리개 역할을 한다고 생각하면 이해가 쉬울 수 있다. OSA의 위치는 일반적으로 샘플에서 FZP 초점거리의 약 4분의 1 정도 밖에 떨어져 있지 않으며, 크기가 작은 ZP의 경우 0.5 mm 이하일 수도 있다. 현재 8A1 SPEM 장치에서는 반경 200 μm, 최외각 투명링 간격 40 nm의 FZP와 직경 50 μm 및 130 μm를 선택할 수 있는 OSA를 사용하고 있다. 따라서, 400 eV~900 eV의 광자에너지 영역에서 초점거리는 4 mm~9 mm가 되며, FZP가 구현할 수 있는 최대의 공간분해능은 약 50 nm임을 유추할 수 있다. 그러나 불행히도 여기서 이론적으로 얻어진 분해능이 SPEM 전체 시스템에서 최종적으로 구현되는 공간분해능을 의미하지는 않는다.

SPEM 시스템의 최적 성능을 구현하기 위해서는 짧은 초점거리 내에서 ZP와 OSA의 정확한 위치는 제어할 수 있는 기술과 샘플 scanning stage의 정밀한 위치 제어 기술이 필수적이라 할 수 있다. 현재 8A1 SPEM 장치는 FZP, OSA 및 샘플 scanning stage 각각에 X-Y-Z (3축), X-Y-Z (3축), X-Y (2축)의 독립적인 piezo 모터 구동장치를 사용하고 있으며, 나노미터 정밀도로 이동할 수 있다. 또한 각 축에는 정확한 위치를 기록하기 위하여 선형 인코더가 내장되어 있다. 이는 Nano-NEXAFS (Near Edge X-ray Adsorption Fine Structure) 측정할 때 필요한 단색광 에너지 scanning mode에 필수적인 기능으로 측정 시료와 ZP & OSA의 상대거리를 실시간으로 정렬하는 데 사용된다. 따라서 ZP와 OSA의 위치정보 수집과 자동 제어 능력은 필수적이라 할 수 있다.



<그림 2.2.3.24> 8A1 SPEM 측정장치 사진 및 patterned-Au 시료의 Si 2p 이미지

○ 밝고 질 좋은 광원의 필요성 / 빔라인의 중요성

SPEM 실험장치에 있어 FZP는 현미경 기법 적용에 최적화된 광학장치임에도

불구하고, 단색화 빔을 부분적으로 통과시켜야 하는 원형회절렌즈의 근본적인 한계에서 오는 낮은 회절 효율의 문제점은 여전히 남아있다. 실제로 FZP를 통과에 따른 효율은 10%~20% 밖에 되질 않는다. 따라서 보다 밝은 광원의 필요성이 부각되었고, soft X-ray를 구현하기에 유리한 방사광을 활용한 빔라인 실험장치로 급속한 개발이 이뤄지게 되었다. 이후 미국의 ALS, 대만의 NSRRC, 이탈리아의 ELETTRA, 독일 BESSY II, 일본 SPRING-8, 한국 PAL 등에 이를 활용한 빔라인이 경쟁적으로 건설되었다. 이 빔라인들은 삽입 장치, 즉 Wiggler 또는 Undulator에 의해 생성되는 밝은 빛을 제공받는다는 공통점을 가지고 있다.

빔라인 끝단의 Exit slit은 단색화장치에서 분산된 양질의 빔 크기를 재설정함과 동시에 가상의 광원으로 재정의하고, 에너지 분해 성능을 최적화하는 데 중요한 역할을 한다. 8A1 빔라인의 경우 exit slit에서 20 μm × 50 μm의 광원크기로 정의하고 약 300:1의 거리 배율을 고려할 때 70 nm × 140 nm의 빔크기를 얻을 수 있다. 그런데 여기서 분광현미경을 위한 최적화된 빔라인 설계는 단색광의 세기를 크게 잃지 않으며 exit slit에서의 광원크기를 얼마나 작게 만들 수 있는가이다. 따라서, 최종적으로 구현 가능한 공간분해능은 위에서 언급한 빔라인 광학장치, FZP 빔 집속장치의 성능과 함께 실험장치 전반의 기계 정밀도 및 진동 에러 등이 종합적으로 반영된 결과로 도출된다.

(3) Branch2 Tender X-ray NanoXPS/XAS 실험장치

Branch2 Tender X-ray NanoXPS/XAS 빔라인 실험장치는 초고진공부터 상압까지의 실험 환경까지 cover 하는 system을 구축할 예정이다. 일반적인 PES는 진공 환경에서 실험을 수행해야 해서, 실제 반응 환경과는 차이가 있는 이상적인 환경에서의 특성 분석이라는 장벽을 무시할 수 없었다. 따라서 상압 (Ambient Aressure, AP) 하에서 X-선을 이용한 AP-HAXPES 빔라인의 도입은 다양한 기능성 소재의 표면 및 계면의 연구뿐만 아니라, 실제 동작 환경에서 액체(기체)/고체의 계면을 탐구할 수 있기 때문에, 기초 연구뿐만 아니라 촉매, 배터리, 적층구조의 반도체 소자연구 등 산업적 응용 연구에 꼭 필요한 빔라인으로 기대된다. <표 2.2.3.13>은 해외 방사광의 Tender 및 HAXPES 빔라인 설치 현황이며, 실험 환경 역시 상압 환경을 도입하고 있다.

<표 2.2.3.13> Tender 및 HAXPES 빔라인 설치 현황

Facility	Beamline	Source	Energy Range (keV)	AP or UHV
ALS,Berkeley, CA, USA	9.3.1	BM*	2.0 ~ 6.0	AP
NSLS II	SST-2	Undulator	2.0 ~ 7.5	-
BESSY-II, Berlin, Germany	HIKE	BM*	2.0 ~ 6.0	-
Diamond, UK	i09, SISA	Undulator	0.1 - 2.1; 2.1 - 20	-
MAX-IV, Lund, Sweden	HIPPIE	EPU	0.263 ~ 2.8	-
Soleil, France	GALAXIES	in vac. U20	2.3 ~ 12	-
ESRF	EH2	Undulator	2~15	-
Spring-8, Hyogo, Japan	36XU	In-vacuum type tapered Undulator	4.5 ~ 35	AP
-	BL15XU	Undulator	8.5 ~ 12	-
-	BL47XU	-	6 ~ 10	-
Prtra III, Hamburg	P22	Undulator	2.5 ~ 15	AP
Villigen, Switzerland	Phoenix	APPLE II Undulator	1.5 ~ 8.0	-

BM* : Bending Magnet

(4) 실험장치 사양

다양한 소재 및 소자의 동작 환경에서의 화학적 반응 연구는 재료과학에서 매우 중요한 분야이다. 이 빔라인은 산업체의 요구조건이 고려된 산업체 우선 지원 빔라인이기 때문에, 초고진공에서 상압 환경까지 아우르는 실험장치이지만, 이용자들의 실험 접근성이 수월해야 하고, 실험장치 역시 간결하게 구축하며, 측정의 자동화에도 신경을 쓸 예정이다.

또한, 기초 원천 연구 측면에서는 고체, 기체, 그리고 액체 사이의 계면에서 촉매 화학적 변화를 이해하기 위해 매우 가치 있는 실험장치이기 때문에, 동작 환경에서 고압 혹은 고체/액체 계면에서 일어나는 촉매반응의 측정이 가능하도록 구축 예정이며, 이 빔라인을 위한 실험장치의 사양은 <표 2.2.3.13>에 요약되어 있다. 다만, 독립적인 실험 챔버 구축이 필요한 dip-and-pull과 같은 측정은 초기에는 고려하지 않을 계획이다.

또한 상압 (AP) 환경에서 XAS 실험의 다양한 측정 방법 즉 Total Electron Yield (TEY), Auger Electron Yield (AEY), 그리고 Fluorescence Yield (FY) 모드의 측정이 가능하게 하기 위해 측정 장치 및 프로그램을 개발할 예정이다.

<표 2.2.3.14> Tender X-ray NanoPES/XAS end-station specification

Electron analyzer	- Kinetic energy (5 keV 이상)
Photon energy	- 2 ~ 5 keV
Pressure	- UHV ~ 50 mbar
Temperature control	- Liquid Nitrogen (150 K) - IR laser Heater (up to 1500 K)
Gases	- Gas handling system N_2, O_2, CO_2, CO, Ar, Ne.....
Equipment	- High Precision 5-axis Sample manipulator with IR laser heater. LN2 cooling, Temp. sensor, 4-electrical feedthrough - Residual gas analyzer (RGA)
Vacuum system	- Exp. chamber - Load-lock system - Pump, Gauge, Etc.
DAQ system	- Computer - Electrometer - Application Program
Applicable Research Area	- Physics at surface and interface - Gas-phase heterogeneous catalysis - Electrochemistry (Battery, Fuel cell, Corrosion, - - Electrocatalysis) - Photovoltaic - Environmental science - Biological systems ...

현재 활용가능한 전자분석기는 <그림 2.2.3.25>에서 볼 수 있는 Scienta-Omicron의 Hipp2와 SPECS의 Phoibos 150 HV NAP가 가능하다. 1 bar 이상의 상압환경에서 실험 가능하도록 진공 챔버 및 전기화학셀이 구축되어야 하며, 시료 위치를 ~0.5 μm의 정밀도로 조절 가능한 시료 위치 조절 장치가 설치될 예정이고, 시료에 적절한 bias 전압을 인가하고, 시료 온도를 측정할 수 있는 전기적 연결 또한 가능해야 한다. 시료 온도는 질소를 이용하여 냉각하고, 레이저 혹은 직/간접 가열을 통해 온도를 제어 가능해야 한다.

Gas 환경을 형성하기 위해 Gas expose system이 필요하고, 반응과정에서 생성된 gas를 측정하기 위해 잔류기체분석기(Residual Gas Analyzer)가 설치되어야 한다. <그림 2.2.3.25>는 PLS-II에서 현재 운영 중인 Soft X-ray 영역의 APXPS 실험장치의 사진이다.

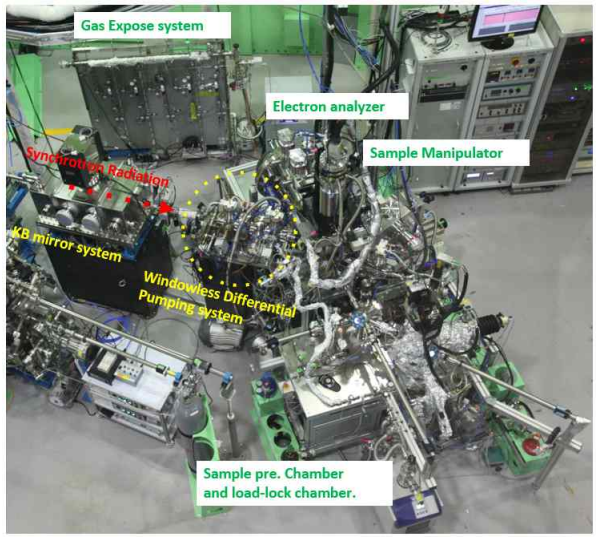


(a)



(b)

<그림 2.2.3.25> AP-HAXPES 전자분석기, (a) Hipp-2, (b) Poibos 150 HV NAP



<그림 2.2.3.26> 8A2 APXPS 빔라인 (PLS-II)



<그림 2.2.3.27> (좌) 실험챔버 내부의 모습, (우) IR 레이저를 이용한 시료의 가열 모습

<그림 2.2.3.27>은 8A2 AP-XPS BL 실험장치의 실험챔버 내의 시료 위치 및 IR 레이저를 이용해서 1,200 K으로 시료의 온도를 가열했을 때의 사진이다.

참고문헌

[1] C. Nordling, E. Sokolowski, K. Siegbahn, “Precision Method for Obtaining Absolute Valures of Atomic Binding Energies”, Phys. Rev. 105, 1676 (1957).

[2] C. S. Fadley, S. Nemsak, “Some Future Perspectrives in Soft- and hard-X-ray photoemission”, J. Elect. Spectroscopy and Related Phenomena. 195, 409 (2014).

[3] http://henke.lbl.gov/optical_constants/pert_form.html

[4] Philip Willmott, “An Introductio to Synchron Radiation: Techniques and Applications [2nd ed.]”, Willey (2019)

[5] J. S. Kang et al, “Spatial Chemical Inhomogeneity and Local Electronic Structure of Mn-doped Ge Ferromagnetic Semiconductor”, Phys. Rev. Lett. 94, 147202 (2005).

[6] M. Scardamaglia et al, “Tuning Electronic Properties of Carbon nanotubes by Nitrogen Grafting: Chemistry and Chemical Stability”, Carbon 83, 118 (2015).

[7] J. T. Ingvild et al, “Direct Observation of Charge Transfer between NOx and Monolayer MoS2 by Operando Scanning Photoelectron Microscopy”, ACS Appl. Nano Mater. 4, 3319 (2021).

[8] M. Copuroglu, et al, “Gate-Tunable Photoemission from Graphene Transistors”, Nano Lett. 14, 2837 (2014).

[9] S. Cho, et al, “Phase Patterning for Ohmic Homojunction Contact in MoTe2”, Science 349, 625 (2015).

[10] S. Mukhergee, A. Hazaika, P. Santra, A. L. Abdelhady, “Detemination of Internal Structures of Heterogeneous Nanocrystals Using Variable-Energy Photoemission Spectroscopy”, J. Phys. Chem, C 1184, 15534 (2014).

[11] https://www.ucsusa.org/resources/each-countrys-share-co2-emissions

[12] X. Liu, D. Qu, Y. Yuan, J. Sun, W. J. Yoo, “Self-Terminated Surface Monolayer Oxidation Induced Robust Degenerate Doping in MoTe2 for Low Contact Resistance”, ACS Appl. Mater. Interfaces 12, 26586 (2020).

[13] N. Miyata, J. Nara, T. Yamasaki, K. Sumita, R, Sano, H. Nohira, “Interface Dipole Modulation in HfO2/SiO2 MOS Stack Structures”, 2018 IEEE International Electron Devices Meeting, IEDM18-169 (2018).

[14] C. Caspers, A. Gloskovskii, M. Gorgoi, C. Besson, M. Luysberg, K. Z. Rushchanskii, M. Lezaic, C. S. Fadley, W. Druve, M. Muller, “Interface Engineering to Create a Strong Spin Filter Contact to Silicon”, Scientific Reports 6, 22912 (2016).

[15] M. Favaro, F. F. Abdi, E. J. Crumlin, Z. Liu, R. C. Krol, D. E. Starr, “Interface Science Using Ambient Pressure Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy”, Surfaces 2, 78 (2019).

[16] S. werner, P. Guttmann, F. Siewert, A. Sokolov, M. Mast, Q. Huang, Y. Feng, T. Li, F. Senf, R. Follath, Z. Liao, K. Kutukova, J. X. Feng, Z.-S. Wang, E. Zschench, G. Schneider, “Spectromicroscopy of Nanoscale Materials in the Tender X-ray Regime Enabled by a High Efficient Multilayer-Based Grating Monochromator”, Small Methods 7, 2201382 (2023).

2.2.4 나노스케일 각도분해광전자 (Nano-ARPES) 빔라인

가. 개요

(1) 개요

ARPES 분광기법은 물질에 X-선이 입사하면서 방출되는 광전자(Photoelectron)의 운동에너지, 방출 각도를 분석하여 물질 내부의 전자가 가지는 에너지와 운동량의 분산관계(energy-momentum dispersion)를 측정하는 기법이다. 이 에너지와 운동량의 분산관계는 물질의 전자에너지띠 구조를 나타낸다. ARPES 분석 대상은 단결정(single crystal)과 같이 결정 방향이 잘 정의된 시료이다. 본 빔라인은 이러한 ARPES 분석기법의 측정 범위를 nm 크기의 시료 영역에 대하여 분석을 시행하기 위한 빔라인으로 이와 같은 측정을 가능하게 하기 위하여 입사하는 X-선을 100 nm 급의 크기로 집속하기 위한 집속 광학계(focusing optics)를 필요로 한다.

(2) 연구의 중요성

각도분해 광전자 분광기법(ARPES)은 물질 내부의 전자의 밴드 구조를 정확하게 분석할 수 있는 유일한 수단이다. 현재 국내에는 집속할 수 있는 광자빔의 크기가 10 μm 수준이기 때문에 공간해상도의 한계가 있고, 시료의 성분이 균일하지 않은 물질들이나 반도체 소자와 같이 전위를 가해야 하는 경우에는 측정 수준이 100 nm 급 이하의 광자빔을 필요로 하고 있다. 이러한 시료의 전자구조를 시료의 구조와 표면의 구조 차이에 따른 전자구조의 차이를 구분하여 측정하기 위해서 나노 크기의 광자빔을 생성시킬 수 있는 빔라인의 건설이 매우 중요하다. 이와 함께 산업 현장에서 반도체의 공정이 수 nm 범위로 작아지고 있고 첨단 나노신소재들의 나노크기에서 발현되는 독특한 전자구조를 정확하게 측정할 수 있는 장비가 국내에는 전무한 실정이다. 4세대 저장링에서 방출하는 X-선의 경우는 3세대 방사광가속기에 비하여 전자빔의 emittance가 작기 때문에 광원의 크기가 작고 광원의 emittance가 줄어 광자빔을 집속하는 데 월등히 유리하다. 이 때문에 얻을 수 있는 장점은 첫 번째가 단색광을 파장한계 공간해상도(wavelength limited spatial resolution)까지 집속 시킬 수 있다. 두 번째 장점은 작은 갭과 강한 자기장을 가지는 삽입 장치를 이용할 수 있어서 방출되는 X-선의 광속(photon flux)의 향상이 가능하다. 이 광속의 증가와 공간해상도의 향상으로 100 nm 급 이하의 공간 분해능을 가진 ARPES 실험이 가능하다. 또한, 식각 기술의 발달과 광학계 제조 기술의 발달로 Fresnel zone-plate

(FZP), capillary mirror와 Wolter mirror 등을 활용하여 나노 크기의 광자빔 구현이 이전보다 쉬워졌다.

(3) 해외 빔라인

현재 가동중인 나노 크기의 광자빔을 생성하여 물질의 전자구조를 연구하고 있는 해외 빔라인의 목록은 아래의 <표 2.2.4.1>과 같다.

<표 2.2.4.1> 전 세계의 대표적인 nano-ARPES 실험이 가능한 빔라인 목록

Organization	Beamline	Energy range	Focusing optics & Analyzer	Spatial Resolution
SOLEIL (France)	ANTARES	12 ~ 11000 (95 ~ 1000)	Zone-plate	30 × 30 nm^2
ALS (U.S.A.)	MAESTRO (7.0.2.2)	20 ~ 1000	Zone-plate Capillary mirror	120 × 120 nm^2 200 × 200 nm^2
	MAESTRO (7.0.2.3)	20 ~ 1000	PEEM	35 nm
Diamond (U.K.)	I05	18 ~ 240 (60 ~ 150)	Zone-plate	70 × 70 nm^2
Elletra (Italy)	1.2 L NanoESCA	5 ~ 1000	PEEM	150 nm
NSLS-II (USA)	20-ID-2	40 ~ 600	Zone-plate	100 nm
4GSR	Nano-ARPES	100 ~ 2000	Zone-plate Capillary mirror	100 × 100 nm^2 200 × 200 nm^2

나. 각도 분해 광전자 분광학

(1) 각도 분해 광전자 분광법

각도 분해 광전자 방출 분광법(ARPES)은 거시적 물리적 현상과 깊은 관련이 있는 미세한 전자 상태를 직접 측정할 수 있는 분광학적 방법으로 응집 물질 물리학 연구 분야와 신물질의 탐구 영역의 주요 실험 수단 중 하나이다. ARPES 기술과 장치의 발달은 현대 응집물질 물리학의 발전에 기여하고 있다. ARPES 기술 초기에는 고온 초전도체의 미세한 전자구조를 포착하려는 목적을 가지고 광전자의 에너지와 운동량의 측정 분해능을 개선하기 위해 상당히 많은 노력을 해왔고 이 결과 고해상도 ARPES 측정기법을 확립했으며, 표면 토폴로지 물질, d-파 초전도체의 갭, 일반 초전도체의

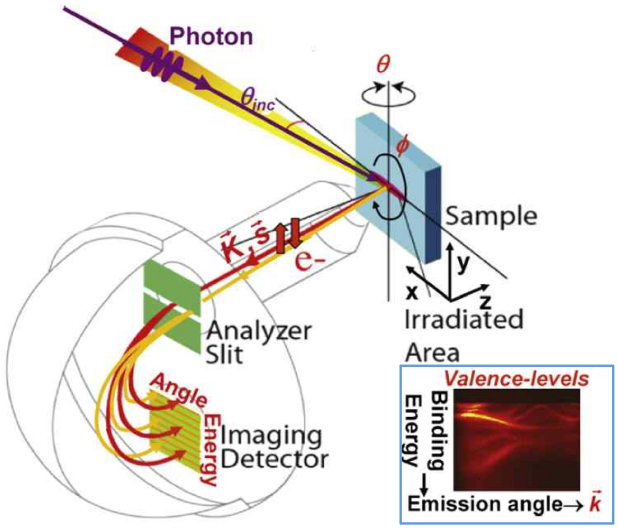
슈도갭과 같은 높은 Tc 구리산염 물리학을 이해하기 위한 다양한 주요 실험 수단으로 활용되고 있다. 높은 에너지 및 운동량 분해능은 ARPES의 고유한 기능을 확장하여 강상관계 전자 시스템의 물리적 특성을 지배하는 상호 작용 효과나 전자 자체 에너지(self energy)의 연구를 활성화하고 있다.

현재는 다양한 유형의 ARPES 기술이 개발되었으며 새로운 기능 중 하나인 스핀 분극 전자 상태를 조사하여 자기 특성을 연구하는 스핀 분해능 (spin-resolved ARPES), 시간분해능을 결합하여 많은 뛰어난 연구 결과를 생산하고 있다. 마이크로 또는 나노 스폿 빔(공간 분해 ARPES)을 활용하여 국소 전자 상태(local electronic state) 차이를 구분할 수 있다. 발전된 ARPES 기술은 강상관 전자 시스템뿐만 아니라 다양한 재료, 특히 오늘날 토폴로지 양자 재료에 성공적으로 적용되어 전자 및 스핀 구조 측면에서 물리적 특성과 거동을 이해하는데 기여하고 있다. 특히 방사광을 이용한 ARPES 실험은 광자빔의 에너지를 넓은 범위에서 이용할 수 있고 광자빔의 편광방향을 필요에 따라 변경하여 측정할 수 있는 장점이 있고 광원의 크기를 μm나 nm 크기로 줄일 수 있어 뛰어난 공간분해능을 가지고 있다는 장점이 있다. 광자빔의 에너지를 변화시킬 수 있다는 점은 측정할 수 있는 물질의 브릴리안 존의 범위를 넓힐 수 있고 물질 내부의 전자 밴드 구조를 3차원적으로 측정하여 분석할 수 있게 하여 물질의 전자구조 분석의 차원을 한 단계 진전시킬 수 있었다.

X-선이나 자외선이 입사할 때 방출되는 광전자의 각도를 정밀하게 측정할 수 있는 전자에너지 분석기(electron energy analyzer)의 발달로 인해 ARPES 실험의 용이성이 향상되고 광자빔 에너지를 바꿀 수 있는 고해상도 방사광 광원과 결합하여 물질에 대한 이해를 더 넓히고 있다. 광전자 분광법은 물질에 입사는 고에너지 광자빔의 에너지($\hbar\omega$)와 물질의 일함수(ϕ)를 사용하여 방출되는 광전자의 결합에너지(E_b)를 분석함으로 전자구조를 분석한다. 이와 함께 광전자의 시료 표면에서 방출되는 각도를 분석하면 물질 내부의 전자의 분산 구조(electronic dispersion structure)를 직접적으로 측정할 수 있다. 광전자분광법의 분석에서는 아래의 조건을 만족하여야 한다.

$$\text{Energy conservation}: E_{kin} = \hbar\omega - \phi - |E_b| \quad \text{(수식 2.2.4.1)}$$

$$\text{Momentum Entropy}: p_{\parallel} = \hbar k_{\parallel} = \sqrt{2mE_{kin}} \cdot \sin\theta \quad \text{(수식 2.2.4.2)}$$

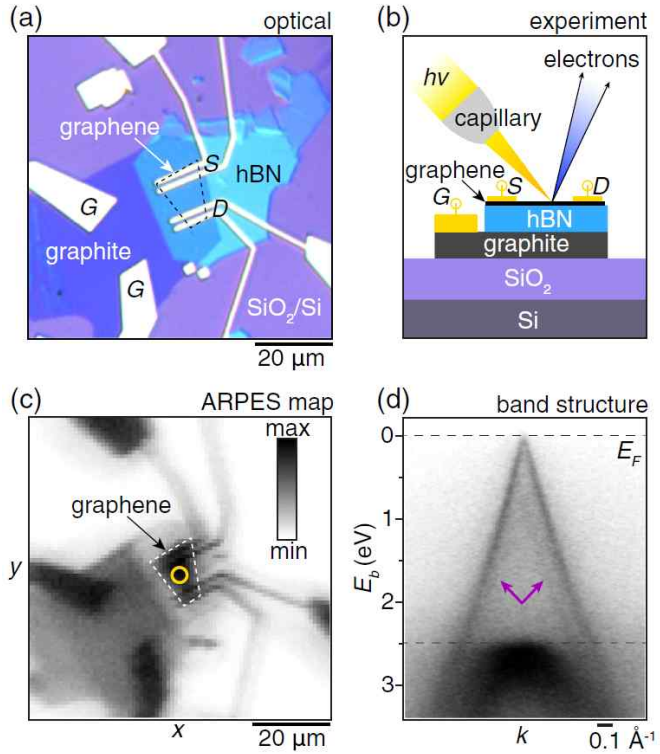


<그림 2.2.4.1> 각도분해 광전자분광법의 기본 원리

(2) 나노 광자빔을 활용한 연구 사례

○ Momentum-resolved view of highly tunable many-body effects in a graphene/hBN field-effect device.

<그림 2.2.4.2>의 (a)에서 광학현미경으로 관찰한 소자를 (b)와 같은 형태로 FET 소자를 작동시키는 상태에서 게이트 된 2D 재료 기반 장치에서 ARPES 측정을 현장 전기장 도핑과 병행하는 것이 가장 중요하다. 이 실험은 micro-beam을 이용한 ARPES 실험이었지만 현재 nm-급 소자들에 대한 기술이 발전하고 있고 nm 크기의 광자빔을 이용하여야만 이러한 장치의 본질적인 불균일성을 피할 수 있다.



<그림 2.2.4.2> micro 크기 광자빔을 이용하여 작동중인 소자의 전자적 도핑된 시료의 ARPES 실험결과. nm-급 미세공정의 소자들을 연구하기 위해서는 nm-급 광자빔을 만들 수 있는 nano-ARPES 빔라인이 필수적인 도구이다.

다. 나노크기 각도분해 광전자 분광 빔라인 사양

나노크기 각도분해 광전자 분광 빔라인의 사양은 <표 2.2.4.2>와 같다. 빔라인의 광원으로는 광자빔의 편광방향을 조절할 수 있는 타원편광 삽입 장치(Elliptically polarizing undulator)를 사용하며 삽입 장치에서 발생하는 광자빔 에너지의 범위는 100~2,000 eV를 이용할 수 있도록 설계한다. 광자빔의 해상도는 200 eV 이하의 광자빔에서 해상력 20,000 이상을 목표로 설계한다. 빔라인의 실험장치는 나노미터 크기의 광자빔을 사용하는 nano-ARPES 실험장치와 마이크로미터 크기의 광자빔을

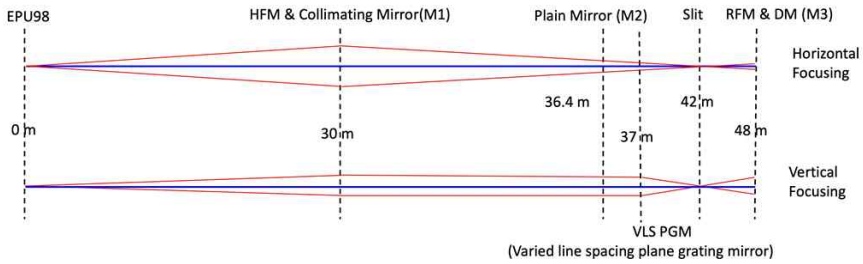
이용하고 광전자의 스핀 방향을 분석할 수 있는 전자스핀 검출기를 가지고 있는 micro-ARPES 실험장치의 2기의 주요 실험장치를 설계하여 적용하기로 한다. nano-AREPS 실험장치가 이용하는 에너지의 영역은 100~200 eV의 영역에 최적화하여 광학계를 설계하고 micro-ARPES 실험장치의 경우는 ARPES 실험은 100~200 eV 영역에 중점을 두고 설계하고 그 이상의 영역에 대해서는 XPS 실험을 가능하도록 빔라인의 광학계를 설계한다. nano-ARPES 실험장치의 나노 크기 광자빔으로 집속하기 위한 광학계는 Fresnel zone-plate와 capillary mirror를 모두 사용하여 빔크기의 선택이 가능하게 한다.

<표 2.2.4.2> 4GSR 나노스케일 광전자분광 빔라인의 주요 사양

Light source		Elliptically Polarizing Undulator: 98 mm period (EPU98)
Photon energy range		50 ~ 2,000 eV
Resolving power		> 20,000 (below 200 eV)
Beam size	**nano-beam**	Zone-plate: < 100 × 100 nm^2 Capillary mirror: < 200 × 200 nm^2
	micro-beam	K-B mirrors: < 5 × 5 μm^2
End-stations	**nano-ARPES**	- nano-focusing optics: Zone plate and Capillary mirror - Hemisphere electron analyzer - Photon energy range: 50~200 eV - Energy Resolution: < 10 MeV @ 100 eV - Photon flux: ~ 10^{11} phs with ZP @ 100 eV
	μ-ARPES	- micro-focusing optics: K-B Mirrors or Capillary Mirror - Hemisphere electron analyzer with spin detectors - Photon energy range: 50~2,000 eV - Energy Resolution: < 5 MeV @ 100 eV - Photon flux: > 10^{12} phs @ 100 eV

라. 빔라인 장치 구성

(1) 빔라인 레이아웃



<그림 2.2.4.3> 4GSR 나노스케일 각도분해 광전자 분광 빔라인의 주요 광학장치 배치도

빔라인의 기본 광학계의 구성은 <그림 2.2.4.3>과 같이 나타낼 수 있다. 광원은 자석의 주기가 9.8 cm인 타원편광 삽입 장치(Elliptically Polarizing Undulator 98)를 사용하며 기본적인 빔라인 광자빔의 집속을 위해 toroid 형태의 M1 거울을 사용하며 단색화장치로 평면거울(Plane mirror)인 M2와 회절 거울 격자(Diffraction grating)를 사용하여 광지빔의 에너지를 선택하며 M3 거울을 이용하여 nano-ARPES 실험장치와 micro-ARPES 실험장치로 전달되는 광자빔의 방향을 선택하여 전달하도록 구성하고 있다. 최종적으로 각 실험장치와 결합하거나 내장된 나노-광자빔 집속장치나 마이크로-광자빔 집속장치로 빔을 전달하여 실험에 필요한 나노미터 크기의 빔과 마이크로미터 크기의 광자빔을 생성하게 된다.

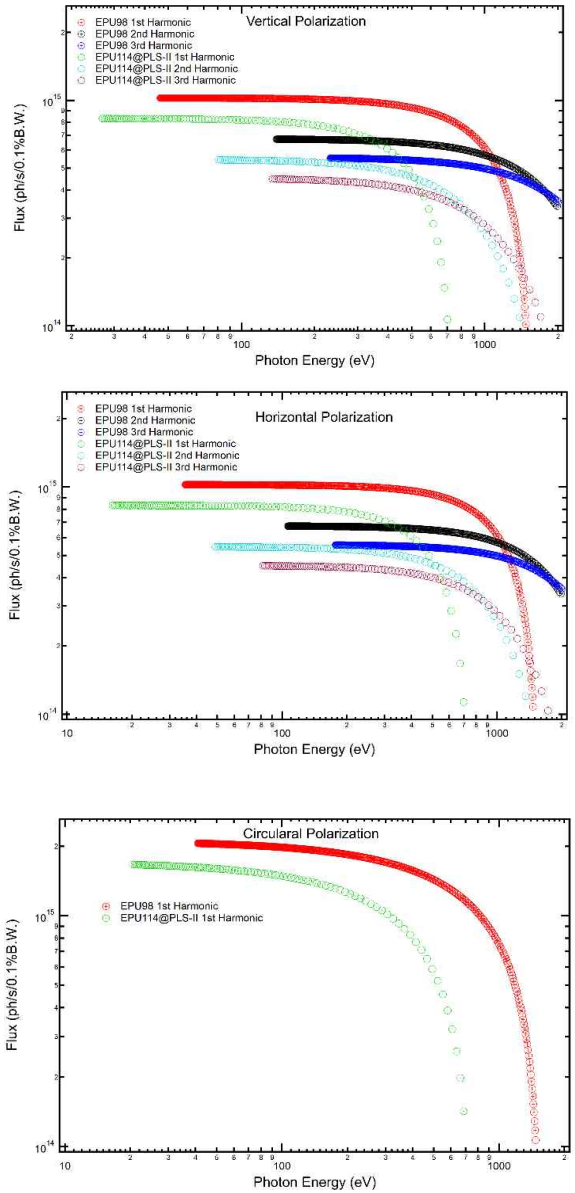
(2) 광원: 타원편광 삽입 장치 EPU98 (Elliptically Polarizing Undulator 98)

이 빔라인의 광원은 광자빔의 편광방향을 조절하기 위하여 타원편광 삽입 장치(Elliptically polarizing undulator:EPU)를 이용한다. 4 GeV의 전자빔 에너지 조건에서 모든 편광방향을 50 eV 이하의 광자빔을 발생시킬 수 있는 조건으로 자석의 주기를 98 mm로 결정하였다. 주요 사양은 <표 2.2.4.3>에 나타내었다. 수평 방향 선형편광의 경우는 최소 에너지가 35.5 eV이고 수직 방향 선형편광 조건의 최소 광자빔 에너지는 46.40 eV, 원형 편광의 조건에서는 최소 에너지가 40.97 eV인 광자빔을 발생시킬 수 있다.

<표 2.2.4.3> 나노스케일 각도분해 광전자 분광 빔라인의 타원편광 삽입 장치 사양

Undulator	EPU98
Period Length	98 mm
Number of periods	37
Device length	~ 3.6 m
Vertical Max. field (B_{Z0})	1.0096 T @ 15 mm gap
Horizontal Max. field (B_{X0})	0.8799 T @ 15 mm gap
Circular mode field ($B_{Z0,X0}$)	0.6633 T @ 15 mm gap
Minimum Photon Energy	35.5 eV (Horizontal polarization) 46.40 eV (Vertical polarization) 40.97 eV (Circular polarization)
Undulator Gap distance	15 ~ 100 mm
Phase operation	0 ~ π
Max. gap	260 mm

<그림 2.2.4.4>에서는 광자빔의 선속을 1st 조화파, 3rd 조화파, 5th 조화파의 상황에서 주로 ARPES 실험에 사용하는 100~200 eV 이하 영역에서 광자빔 선속이 첫 번째 광학장치인 M1의 위치인, 광원에서 30 m의 위치에서, 10^{15} ph/s/0.1%B.W.을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다. 원형 편광 상황을 제외한 선형편광 상태에서는 500~2,000 eV의 영역에서 10^{14} ph/s/0.1%B.W.을 M1 위치에서 달성할 수 있다는 것을 보여주고 있다.



<그림 2.2.4.4> 삽입 장치 EPU98의 광자빔 편광방향별 광자빔 선속 계산 결과

(3) 광학장치

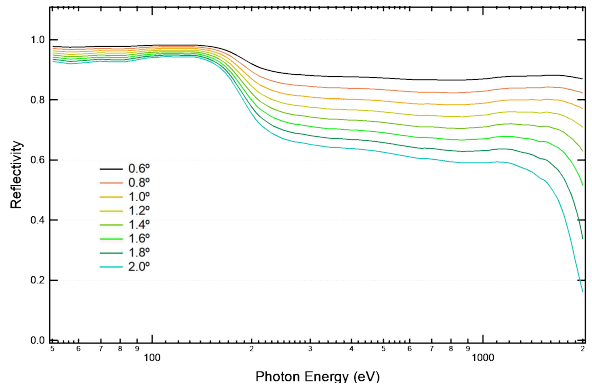
<표 2.2.4.4> 나노스케일 각도분해 광전자분광학 빔라인의 주요 광학장치 사양

Optics	M1	M2	Grating	M3
Type	Toroidal	Plane	Plane	Toroidal
Tangential radius	1,367 m	Inf.	Inf	171.9 m
Sagital radius	1,260 mm	Inf.	Inf.	209 mm
Position	30 m	36.4 m	37 m	48 m
Incidence angle	89.2°	82°/ Var.	Var. /86.6°	88°
Clear Aperture	300 × 50 mm^2	450 × 50 mm^2	250 × 60 mm^2 250 × 60 mm^2	280 × 50 mm^2
Thickness	60 mm	70 mm	40 mm	50 mm
Surface Roughness	< 5 Å RMS	< 5 Å RMS	-	< 5 Å RMS
Tangential slope error	< 1 μrad RMS	< 1 μrad RMS	-	< 1 μrad RMS
Sagital Slope error	< 10 μrad RMS	< 10 μrad RMS	-	< 10 μrad RMS
Coting material	Au	Au	Au	Au
Coating Thinckness	600 Å	600 Å	400 Å	600 Å
Cooling channel	○	○	Bracket	×

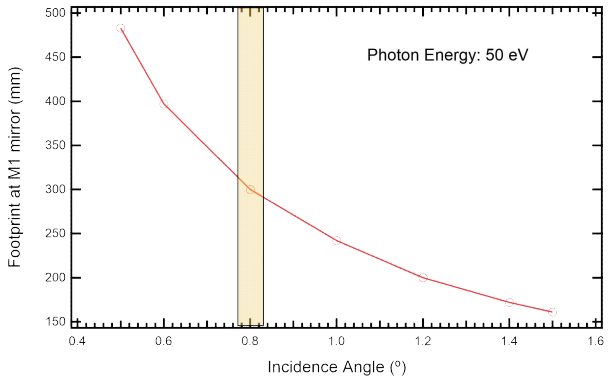
○ M1 mirror

빔라인의 첫 번째 거울은 toroid 형태의 거울이다. 이 거울의 역할은 다음과 같다. 첫 번째 역할은 빔라인에 공급하는 에너지 영역 외의 photon을 흡수하여 다른 광학 부품들의 열적 부담을 최소화한다. 이를 위해서는 거울의 입사각을 결정하여야 한다. <그림 2.2.4.5>는 Au로 두껍게 코팅한 거울의 각도와 광자빔 에너지에 따른 반사율을 계산하여 거울의 각도를 나타내었다. 광전자분광 실험은 효율적인 실험과 높은 광자빔 해상도를 위한 전제 조건 중 하나가 광자빔의 선속(flux)를 최대한 시료(sample)에 전달하는 것이다. 이를 위해 빔라인의 광자빔 에너지의 상한선인 2,000 eV까지 높은

반사율을 유지할 필요가 있고 거울면에서 광자빔의 footprint의 길이가 기계적인 구조물의 크기를 고려하여 선택한 각도는 0.8°이다. 이 거울의 광학적인 기능은 수평 방향의 집광과 수직 방향으로 평행광을 형성하도록 하여 반사형 회절격자(diffraction grating)에 평행광을 입사하도록 한다. M1 거울의 수평 방향의 초점은 Exit slit에 위치하도록 설정한다. 거울의 재질은 열전도율이 높은 Glidcop을 이용하여 EPU98에서 발생하는 최소 에너지의 광자빔이 가지는 14 kW의 부하를 감당할 수 있도록 거울 내부에 냉각용 냉매의 통로(cooling channel)를 내장하도록 설계한다.



<그림 2.2.4.5> 광자빔 입사각에 따른 금(Au)으로 코팅된 거울장치의 반사율 분포



<그림 2.2.4.6> 광원으로부터 30 m에 위치한 M1에서의 광자빔의 각도에 따른 footprint 크기

○ M2 Mirror (Pre-mirror)

M2 Mirror는 평면거울로 2번째 광학장치이고 회절격자에 입사되는 빔의 입사각을 변경하여 방출되는 유지하기 위해 수평 이동과 동시에 각도의 변화를 주어 회절격자에 입사하는 입사각을 바꾸어 주고 회절격자에서 방출되는 단색광의 방향을 일정하게 유지하는 역할을 수행한다. M2는 수직 집속 상태와 에너지 분해능에 직접적인 영향을 끼치는 광학장치이다. 또한 열부하를 감당하기 위하여 길이 방향으로 흐르는 냉매 채널에 물을 흘려 냉각한다.

○ 회절격자 (VLS PGM) 단색화장치

빔라인의 monochromator는 평면거울 하나와 4개의 Grating으로 구성한다. 회절격자는 격자의 간격에 변화를 주어 단색화된 광자빔의 수직 방향의 집광효과가 발생하는 VLS PGM (Varied line spacing plane grating mirror) 형태를 사용한다. VLS-PGM의 초점 위치는 Exit slit의 위치가 되도록 결정한다. 회절격자는 4개의 서로 다른 groove density를 사용하여 Monochromator의 각 회절격자의 에너지 범위의 겹치는 구간을 넓게 설정한 이유는 광자빔 에너지를 변화시키면서 페르미 면(Fermi surface)의 전자구조를 연구하는 과정에서 광자빔의 위치 변화가 발생할 수 있는 광학장치의 교체로 인한 광자빔의 경로 변화를 최소화하여 실험 결과의 신뢰도를 향상하는 것을 목적으로 한다. 회절격자는 1개의 기판에 2개씩 groove 패턴을 가지도록 제작하여 monochromator 용 진공 챔버의 크기 축소와 기계적인 부하의 감소를 달성할 수 있다. 또한 열부하가 우려되는 마지막 광학 요소인 회절격자는 기판의 사이와 기판의 측면에 부착된 냉각 브래킷으로 냉각하는 구조로 제작된다. 이들의 기울기 오류(slop error)는 0.25 μrad 미만으로 유지되어야 하고 열부하는 작지만, 냉각은 정밀하게 수행되어야 하고 냉각수가 흐를 때 발생하는 난류로 인한 진동을 최소화하도록 설계 단계의 최적화가 필요하다.

<표 2.2.4.5> 단색화장치(Monochromator)에 장착될
회절격자의 주요 사양과 이용가능한 광자빔 에너지 영역

List	Ruling density (Lines/mm)	Groove depth (nm)	Energy range (eV)
G1	900	35	35 ~ 150
G2	1200	22	70 ~ 250
G2	900	16	220 ~ 1,000
G4	2400	12	320 ~ 2,000

○ M3 Mirror: Deflection mirror

M3 거울은 nano-ARPES 실험장치와 micro-ARPES 실험장치로 가는 광자빔을 선택할 수 있는 광학장치로 수평 방향 포커싱 미러 M3는 최종적으로 출사 슬릿 (Exit slit) 위치에 수평 방향의 빔을 집속시켜 광자빔의 해상도와 플럭스를 결정하게 된다.

○ 출사 슬릿 (Exit slit)

출사 슬릿은 수직 방향의 단색화장치를 통과하여 집속된 단색광의 에너지 해상도를 결정할 수 있는 중요한 장비로 단색화장치를 통과한 광자빔으로 열부하는 자연 냉각 수준으로 충분히 해소할 수 있는 수준이다. 하지만 광자빔 해상도의 안정성과 광자빔의 크기, 선속의 안정성을 위해 슬릿 날의 가공 정밀도는 수평 방향으로 1 μm 이하로 설정하여야 한다. 또한 100 nm 이하로 집속된 빔의 안정성을 위해서는 기계적인 진동의 진폭을 1 μm 이하를 유지하여야 한다. 출사 슬릿은 수직 방향 슬릿 1조와 수평 방향 슬릿 1조로 구성한다. 광자빔 에너지의 해상도는 수직 방향 슬릿의 크기를 조정하여 결정하는 구조이다.

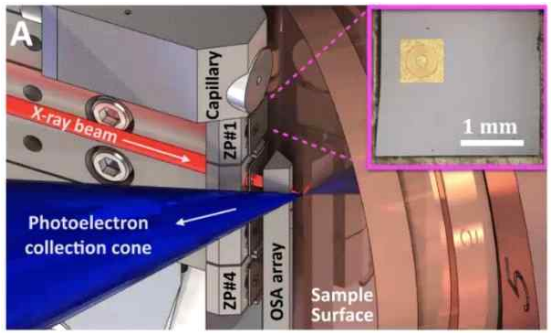
마. 빔라인 실험장치 구성

(1) 나노미터 집속 광학계와 마이크로미터 집속 광학계

나노미터 크기의 광자빔이나 마이크로미터 크기의 광자빔을 만들기 위한 대표적인 광학장치는 Fresnel zone-plate와 K-B mirrors (Kirk-Baez mirrors), 그리고 Capillary mirror 세 가지가 있다. 나노 크기 광전자분광 빔라인에 설치할 두 가지 실험장치인 nano-ARPES 실험장치에는 Fresnel zone-plate와 capillary mirror를 같이 설치하여 나노크기의 광자빔으로 집속하는 목적으로 사용하고 micro-ARPES 실험장치에는 K-B mirror를 사용하는 구조로 설계에 반영할 예정이다.

○ Nano-focusing optics

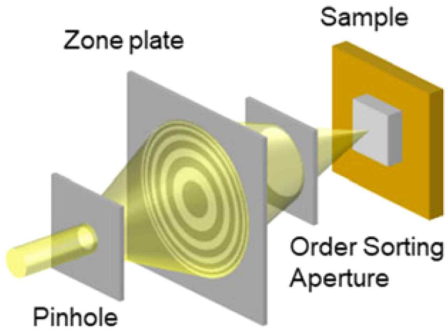
Nano-ARPES 실험장치에는 <그림 2.2.4.7>과 같이 광자빔의 에너지 대역에 따라 구분하여 다수의 zone-plate를 장착하여 사용하고 1개의 capillary mirror를 이용하도록 설계가 진행된다.



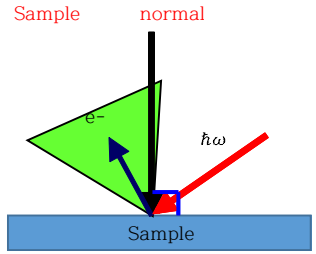
<그림 2.2.4.7> MAESTRO 빔라인(ALS, USA)의
nano-ARPES 실험장치의 Sample Stage

(1) Fresnel Zone-plate (FZP)

존 플레이트(zone plate)는 빛이나 파동 특성을 나타내는 다른 물체의 초점을 맞추는데 사용되는 장치이다. 일반적인 광학장치인 렌즈나 곡면 거울과 달리 존 플레이트는 굴절이나 반사 대신 회절을 이용하며 프랑스 물리학자 Augustin-Jean Fresnel의 분석에 기초하였고 그를 기리기 위해 때때로 프레넬 존 플레이트(Fresnel zone plate)라고 불린다. 존 플레이트의 포커싱 능력은 불투명 디스크의 회절로 인해 발생하는 Arago 스팟 현상의 확장이다. 존 플레이트는 불투명과 투명 사이를 번갈아 가며 프레넬 존으로 알려진 동심원 구조물로 제작되며 존 플레이트에 도달한 광자빔은 불투명한 존 주변에서 회절 된다. 회절을 이용하기 때문에 필요한 order를 제외한 다른 order의 광자빔을 차단할 필요가 있어 입사부에 pin-hole과 방출부에 OSA (Order sorting Aperture)가 필요하다. FZP를 사용할 경우 FZP를 조절하는 장치의 구조물이 시료 표면에서 방출되는 광전자의 수직 방향을 방해하지 않도록 크기로 제작 설치하여야 한다. FZP를 이용하여 집속하는 경우 시료(Sample)에서의 100 × 100 nm^2 이하의 크기를 가지도록 설계한다. FZP의 개수는 실험에 사용하는 광자빔의 에너지 대역별로 FZP의 구조와 초점거리가 달라지기 때문에 FZP와 OSA의 시료와의 거리를 조절할 수 있는 Stage를 설치하여 광자빔의 집속 위치에 시료를 위치하도록 한다.



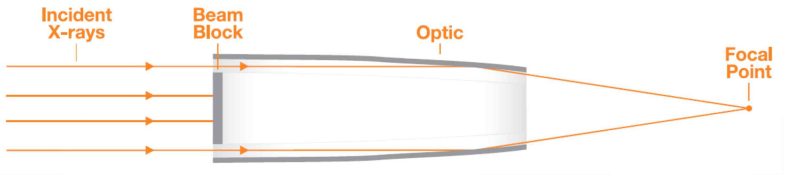
<그림 2.2.4.8> Fresnel Zone-Plate 집속 광학계



<그림 2.2.4.9> Sample Geometry

(2) Capillary Mirror focusing optics

Nano-ARPES 실험장치에 도입할 capillary mirror는 single bounce type의 capillary mirror는 중앙부에 빔 차단 블록을 설치하여 capillary로 들어오는 광자빔이 capillary를 통과하여 시료에 직접 도달하지 않도록 제작되어야 하며 capillary 내부에서 반사되어 모아진 광자빔만 시료에 도달하도록 설계한다. Capillary mirror의 최종적인 집속 광자빔의 크기는 200 nm 이하가 되도록 설정한다. 거울 내부의 반사면은 다른 거울과 동일하게 금(Au)으로 코팅하여 사용하는 광자빔의 에너지 영역에서 반사율의 저하가 최소가 되도록 한다.



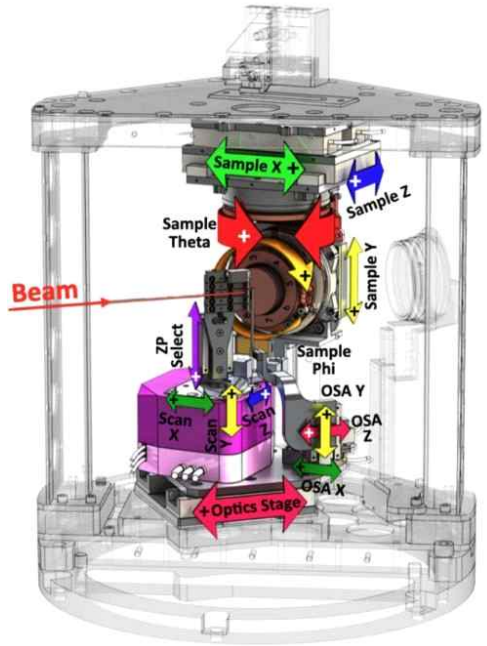
<그림 2.2.4.10> Single bounce capillary mirror 집속 광학계

○ Nano-focusing optics and sample manipulator

Nano-ARPES 실험장치의 UHV 챔버 내부에 설치하여 최종적인 nm-크기의 광자빔을 만들기 위한 집속광학계를 조절하고 시료의 위치 조정과 냉각장치와 연결을 제공하는 역할을 수행한다. ARPES 분광 실험을 위한 실험장치 내부의 부품은 모두 비자성 물질로 제작해서 자기장의 영향으로 광전자의 방출 각도가 왜곡되는 현상을 방지하여야 하고 nm-급 해상도를 가진 구동장치를 사용하여 제작하여야 한다. 시료가 부착된 샘플 홀더가 부착되는 샘플 위치 조절 장치(manipulator)의 재료는 비자성과 함께 초저온에서 작동이 가능한 재질로 제작하여야 한다. 필요한 구동장치의 축의 리스트는 <표 2.2.4.6>에 정리하였다. 총 13개의 nm-정밀도를 가진 구동장치가 필요하다.

<표 2.2.4.6> 나노집속 광학장치와 시료
조절 장치에 필요한 nm-급 해상도의 이송 구동장치 목록

구분		이동 방향	개수
Optics	집속광학계 정렬 및 이동	X, Y, Z	3축
	OSA (ZP 용) 정렬 및 이동	X, Y, Z	3축
	Base of optics stage 이동	Translation	1축
	ZPs and Capillary 선택	Z	1축
시료	시료 선형 이동	X, Y, Z	3축
	시료 회전 이동	θ, φ	2축



<그림 2.2.4.11> 나노집속 광학장치와 시료 조절 장치의 개념도

○ Nano-ARPES 전자-에너지 분광장치 (Electron energy analyzer)

Nano-ARPES 실험장치에 장착하여 사용할 전자-에너지 분광장치는 100 nm 급으로 집속된 광자빔으로 인해 발생한 광전자의 에너지를 분석하는 장치이다. nm-급의 광자빔에서 발생한 광전자의 에너지 해상도 성능이 우수하고 광전자를 받아들이는 각도 범위를 고려하여 반구형 전자-에너지 분광장치(Hemi-sphere electron analyzer)를 채택하기로 한다. 필요한 반구형 전자-에너지 분광장치의 사양은 <표 2.2.4.7>에 요약하였다. 빔라인의 광자빔 에너지 최대 해상도인 10 MeV 이하를 달성한 상태에서 측정 해상도가 10 MeV를 달성할 수 있도록 전자분광장치의 해상도는 최대 1 MeV 이하를 가지도록 설정하였으며 각도분해광전자분광 실험을 위한 시료에서 방출되는 전자의 각도를 측정할 수 있는 범위는 ±15° 이상을 달성할 수 있어야 한다. 그리고 집속된 광자빔의 크기와 선속을 최적화한 상태에서 전자-에너지 분광장치 초점의 위치를 3차원 공간적으로 조절할 수 있는 기능(Electrostatic 3D Focus Adjustment)이

있어야 각도분해광전자 분광 측정의 효율성과 실험의 수월성을 달성할 수 있다. 또한 전자분광기의 전자-렌즈의 제어전압을 조절하여 2차원적인 전자의 각도분해실험이 가능하도록 하는 전자의 각도 편향기능(Deflection mode)의 사용이 가능해야 하며 이 기능의 조절 가능한 각도의 범위는 전자의 측정 가능 각도와 동일한 ±15° 이상이 되어야 한다.

<표 2.2.4.7> Nano-ARPES 실험장치의 전자-에너지분광분석기의 사양

항목	사양
Type	Hemi-sphere analyzer
Detector	Multi-channel (snapshot acquisition) Particle counting
Energy resolution	≦ 1.0 MeV FWHM
Electron energy range	0.5 eV ~ 1000 eV
Deflection& Angular modes	≧ ±15°
Deflection mode energy range	0.5 eV ~ 200 eV
Mounting flange	≧ DN200CF (10″O.D.)
Electrostatic 3D Focus Adjustment	Yes
X, Y adjustment range	≧ ±1 mm

○ Nano-ARPES 시료 냉각장치

nm-크기의 광자빔을 이용하는 경우 광자빔의 위치와 시료의 위치의 정확도가 실험 결과를 크게 좌우하게 되기 때문에 시료의 냉각을 위한 장치도 진동을 발생시키거나 진동을 전달할 수 있는 구조를 피하는 형태로 저온 액체 가스 냉매의 기화열을 이용하여 시료를 냉각하는 개방형 순환구조를 가진 냉각장치를 이용하고 시료와 냉각장치의 콜드 핑거의 연결은 OFHC (oxygen-free high thermal conductivity copper)의 직조물(Braid)을 이용하여 시료를 냉각하는 구조로 설계를 진행할 예정이다. 직접 연결방식보다 냉각효율은 떨어지지만 액체 헬륨의 기화 과정에서 발생할 수 있는 진동의 전달을 줄일 수 있어 nano-ARPES 실험장치의 원래 목적인 100 nm 이하의 공간해상도를 가진 각도 분해 광전자 분광 실험의 목적을 달성할 수 있도록 한다.

냉각장치에 공급하는 냉매 중 액체 헬륨은 사용 후 기화된 헬륨을 회수하여 다시 액화하는 헬륨 회수 시스템을 구축하여 사용 효율을 향상시켜야 한다.

○ 진공 시스템과 시료 이송 장치

ARPES 실험은 표면의 탐색 깊이(probing depth)가 nano-ARPES 실험장치에서 사용하는 나노미터급 해상도를 가지는 실험을 위해서 실험장치에는 기계적인 진동이 발생하는 회전식 펌프를 배제하고 실험이 진행되는 과정에서는 스퍼터 이온펌프와 NEG (Non-evaporable getter pump) 또는 TSP (Titanium Sublimation pump)와 같은 정적인 진공펌프를 이용하여 초고진공 환경을 유지하도록 한다. 실험에 사용하는 시료는 산소가 차단된 글로브 박스에서 시료를 장착하고 UHV 환경의 시료 이동 및 저장을 위한 챔버로 시료를 준비한 후에는 시료는 nano-ARPES 실험장치와 micro-ARPES 실험장치, 시료 전처리 장치 사이를 이동하는 동안 대기에 노출되지 않고 UHV 환경을 유지한 상태로 시료를 이동할 수 있는 초고진공 시료 이송 시스템 설계 예정이다.

○ 진동방지 지지구조물

실험장치 내부의 나노 광자빔의 집속장치와 시료의 위치 조절 장치는 주변으로부터 전달될 수 있는 진동 차단을 위한 구조가 필요하다. 이를 위해서는 실험장치 아래쪽에 화강암으로 제작된 대형 정반을 설치하고 이 정반 위에 나노 광자빔 집속장치와 시료의 위치 조절을 위한 위치조정장치를 설치하여 진동을 절감할 수 있는 기본 구조를 구성하도록 한다.

(2) 마이크로 스케일 각도 분해 광전자 분광학 실험장치

○ Micro-beam 집속 광학장치

Micro-ARPES 실험장치에 사용할 수 μm 크기의 광자빔을 집속하기 위한 집속광학장치로는 수직 집속거울과 수평 집속거울을 1조로 사용하는 K-B Mirror를 이용하기로 한다. 출사슬릿(Exit slit)으로부터 K-B Mirror의 위치는 수직 집속 거울의 중심까지 거리를 10 m로 설정하고 수직 집속 거울로부터 1 m 거리에 있는 시료의 위치에 집속 할 수 있도록 설계할 예정이다.

○ 전자 에너지 분광기와 3차원 스핀 검출기

Micro-ARPES 실험장치에 장착하여 사용할 전자-에너지 분광 장치는 수 μm급으로 집속된 광자빔으로 인해 발생한 광전자의 에너지를 분석하는 장치이다. 광전자 에너지 해상도 성능이 우수하고 광전자를 받아들이는 각도 범위를 고려하여 반구형 전자-에너지 분광장치(Hemi-sphere electron analyzer)를 채택하기로 한다. 필요한 반구형

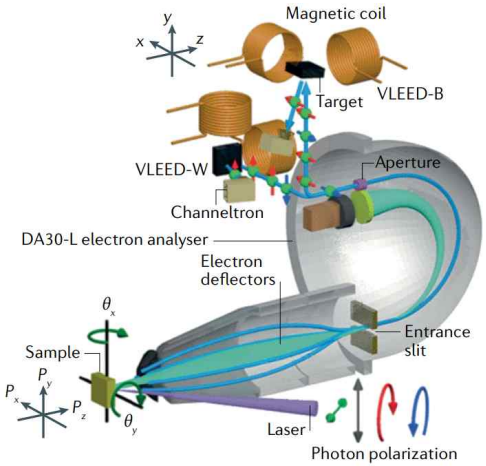
전자-에너지 분광장치의 사양은 <표 2.2.4.8>에 요약하였다. 빔라인의 광자빔 에너지 최대 해상도인 5 MeV 이하를 달성한 상태에서 측정 해상도가 5 MeV 정도를 달성할 수 있도록 전자분광장치의 해상도는 최소 1 MeV 이하를 가지도록 설정하였으며 각도분해광전자분광 실험을 위한 시료에서 방출되는 전자의 각도를 측정할 수 있는 범위는 ±15° 이상을 달성할 수 있어야 한다. 그리고 집속된 광자빔의 크기와 선속을 최적화한 상태에서 전자-에너지 분광장치 초점의 위치를 3차원 공간적으로 조절할 수 있는 기능(Electrostatic 3D Focus Adjustment)이 있어야 각도분해광전자 분광 측정의 효율성과 실험의 수월성을 달성할 수 있다. 또한 전자분광기의 전자-렌즈의 제어전압을 조절하여 2차원적인 전자의 각도분해실험이 가능하도록 하는 전자의 각도 편향기능(Deflection mode)의 사용이 가능해야 하며 이 기능의 조절 가능한 각도의 범위는 전자의 측정 가능 각도와 동일한 ±15° 이상이 되어야 한다. 또한 micro-ARPES 실험장치에는 2차원 스핀 검출기를 장착하여 스핀-각도분해 광전자 분광실험(SARPES: Spin and Angle resolved Photoemission Spectroscopy)이 가능하도록 구성한다. 2차원 스핀 검출기의 사양은 <표 2.2.4.9>에 나타내었다. 2차원 스핀 검출기는 2개의 스핀 벡터인 시료의 표면 방향 (in-plane) 스핀 벡터와 표면에 수직 방향의(out-of-plane) 스핀 벡터를 검출하는 기능을 가지고 있는 VLEED (very low energy electron diffraction) 형태의 스핀 검출기를 이용하기로 한다. 이 2차원 스핀 검출기를 2개를 조합하여 사용하면 3차원 스핀 벡터를 모두 분석할 수 있게 된다. 스핀 검출기는 반구형 전자-에너지분석기의 전자 검출기 부착 부분에 전자의 편향을 위한 장치를 사용하여 서로 수직 방향으로 설치된 2개의 스핀 분석기로 선택적으로 보내 줄 수 있다. 2차원 스핀 검출기에는 자성산화 박막을 제조할 수 있는 철-증발장치(Fe evaporator)와 산소를 공급하여 산화막을 형성하기 위한 산소 공급용 미세-누설 밸브(fine-leak valve)와 증착용 기판의 열처리를 위한 가열장치, 생성된 자성 박막을 자화시키기 위한 코어가 없는 전자석 2쌍을 포함하고 있다. 전자석의 경우는 자화 방향을 자성 박막의 평면의 X, Y축의 2개의 방향으로 자화가 가능하도록 각 전자석의 쌍은 자성박막의 표면 방향에서 서로 수직으로 설치되어 있다.

<표 2.2.4.8> Nano-ARPES 실험장치의 전자-에너지분광분석기의 사양

항목	사양
Type	Hemi-sphere analyzer
Detector	Multi-channel (snapshot acquisition) Particle counting
Energy resolution	≦ 1.0 MeV FWHM
Electron energy range	0.5 eV ~ 1,000 eV
Deflection & Angular modes	≧ ±15°
Deflection mode energy range	0.5 eV ~ 200 eV
Mounting flange	≧ DN200CF (10″O.D.)
Electrostatic 3D Focus Adjustment	Yes
X, Y adjustment range	≧ ±1 mm

<표 2.2.4.9> 2차원 스핀 검출기의 개별 사양. 3차원 스핀 검출기는 서로 수직 방향인 2차원 스핀 검출기 2개를 서로 수직 방향을 가지도록 조합하여 사용한다.

항목	사양
Spin detector Type	Very low electron energy diffraction type
Sherman function	S ≧ 25%
VLEED scattering energy	6.3 eV



<그림 2.2.4.12> 3차원 스핀 검출기의 개념. 2개의 2차원 스핀검출기를 조합하여 3차원 스핀 정보를 분석할 수 있다.

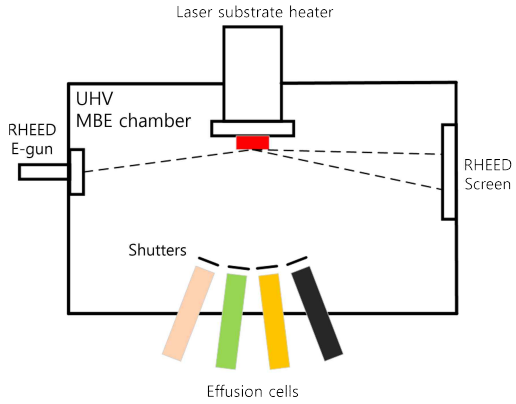
○ Micro-ARPES 진공 시스템

ARPES 실험은 표면의 탐색 깊이 (probing depth)가 micro-ARPES 실험장 치에서 사용하는 공간분해능을 중시하는 실험을 위해 실험장치에는 기계적인 진동이 발생하는 회전식 펌프를 최소화하고 배제하고 실험이 진행되는 과정에서는 스퍼터 이온펌프와 NEG (Non-evaporable getter pump) 또는 TSP (Titanium Sublimation pump)와 같은 정적인 진공펌프를 이용하여 초고진공 환경을 유지하도록 한다.

(3) 시료 전처리 장비

○ MBE in-situ 박막 성장 장비

MBE는 "Molecular Beam Epitaxy"의 약자로, 분자 빔을 이용하여 이러한 박막을 성장시키는 고급 성장 기술 중 하나이다. MBE는 레이저 다이오드, 광통신 소자, 양자점 등의 고성능 전자 소자 및 소재를 제조하는 데에 널리 사용되며, 나노 기술 및 양자 기술 분야에서의 연구 및 개발에 핵심적인 기술로 인정받고 있다. 이 기법을 이용하여 MBE 박막 성장법으로 박막의 두께뿐 아니라 각 층의 구조를 인위적으로 조절하여 ARPES 실험에 필수적인 단결정 시료의 합성이 어려운 시료를 박막 형태로 직접 제작함으로 ARPES 실험의 영역을 확장할 수 있다. MBE 박막 성장 장비의 구성은 <그림 2.2.4.13>과 같이 이루어진다. Effusion Cell은 박막을 형성하는 물질을 가스 상태로 변환시키는 역할을 한다. 이를 통해 기체 상태의 이성분이 분자 빔으로 만들어진다. Effusion Cell 방출구에 셔터를 설치하여 분자 빔의 방출 속도를 조절하여 박막의 성분비와 두께를 조절한다. 기판 (Substrate) 가열 장치 박막이 성장될 표면인 기판의 열처리, 증착과정의 기판 온도 조절, 증착 후 열처리에 사용할 기판 가열 장치로써, 원하는 물질의 결정구조를 만들기 위해 사용한다. 기판 가열 장치로는 적외선 레이저 기판을 장착한 샘플 홀더에 직접 조사하여 가열하는 레이저 가열 장치를 사용할 예정이며 그 사양은 <표 2.2.4.10>과 같이 구성할 예정이다.



<그림 2.2.4.13> MBE 박막 성장 장치의 기본 구성

<표 2.2.4.10> 레이저 기판 가열 장치 사양

항목	사양
레이저 타입	Diode Type
레이저 파장	960 ~1016 nm
기판 가열 온도	≧ 1000 ℃
기판 크기	10 × 10 mm^2
산소 사용 범위	760 Torr 까지
기판 회전 각도	360°, 연속회전 가능
온도 안정성	±1 ℃
호환성	RHEED 사용 가능한 배치
기판 온도 측정기법	Pyrometer
급속 가열/냉각 속도	100 ℃/s

박막의 성장과정에서 두께의 변화와 구조의 변화를 관찰하기 위해 RHEED (Reflection High-Energy Electron Diffraction)를 사용한다. RHEED 패턴의 비디오 이미지를 통해 측정되며, 주로 성장 된 박막의 결정구조, 결정질, 박막 표면의 평행성 등을 평가하는 데 사용된다. MBE 성장장치에서 RHEED를 이용하여 표면 평행성 실시간 관찰, 박막의 결정성 평가, 박막 성장 속도 및 층의 두께 제어, 자기 조립 박막의 성장 관찰을 진행할 수 있어 MBE 박막 성장 장치의 핵심 장치이다. MBE 박막

성장은 초고진공 환경에서 수행되어야 하기 때문에 진공장치 또한 초고진공을 달성할 수 있도록 구성하여야 한다.

참고문헌

[1] C. S. Fadley, J. of Elec. Spectro. and Relat. Phenom. 178–179, 2(2010).

[2] R. Muzzio et. al., Phys. Rev. B 101 201409(R)(2020).

[3] https://sites.google.com/a/lbl.gov/maestro/maestro-home.

[4] B. Lv,. et. al., N. Rev. Phys. 1. 509(2019).

2.2.5 결맞음 엑스선 회절 빔라인 (Coherent X-ray Diffraction)

가. 소개

결맞음 엑스선 회절 빔라인은 4GSR 광원의 결맞음 특성을 가장 적극적으로 활용하는 빔라인 중 하나이다. 4GSR은 3세대 방사광가속기 대비 수평 방향 emittance가 극도로 작아 광원의 결맞음성이 비약적으로 향상됨은 물론, 광원을 집속하는데 있어서 보다 작은 집속 빔과 높은 flux를 얻는 데 유리하다. 결맞음 엑스선 회절 빔라인에서는 결맞음성이 우수한 광원을 고도로 집속하여 결맞음 엑스선 회절 이미징 (Coherent x-ray Diffraction Imaging, CDI) 및 마이크로빔 회절 연구를 중점적으로 지원하는 것을 목표로 한다. 이 외에 회절기를 이용하는 실시간 (in-situ) 엑스선 회절 연구를 부가적으로 지원하고자 한다.

국내 3세대 방사광가속기인 PLS-II에서는 결맞음 엑스선 회절 빔라인과 유사한 성격의 '결맞음 엑스선 산란 빔라인'을 운영 중이다. 이 빔라인 역시 결맞음 엑스선 회절 이미징 연구에 특화되어 있으며, 부가적으로 마이크로빔 회절 연구를 지원하고 있다. 현재 국내에서는 결맞는 엑스선 회절 이미징의 세부 기법 중 Bragg CDI가 이차전지, 촉매, 반도체 소재 연구에 활발하게 이용되고 있다. 하지만 3세대 방사광가속기 광원의 flux 및 emittance 문제로 이미지 분해능이 30 nm 급에 머물고 있다. 이에 따라 100 nm 보다 작은 시료의 이미징이 불가능한 실정이다. 한편, 마이크로빔 회절 기법의 경우 반도체/기능성 세라믹 소재의 동역학적 거동을 규명하는데 폭넓게 활용되고 있다. 이러한 연구는 빔 세기나 결맞음성 보다는, 집속빔의 크기에 영향을 받는다. '결맞은 엑스선 산란 빔라인 (9C)'의 경우 emittance 문제로 수평 방향 집속빔 크기를 10 μm 이하로 줄이는 것은 불가능하며, 이는 관찰 가능한 최소 도메인 크기를 제한하는 요소로 작용한다.

결맞음 엑스선 회절 빔라인의 핵심 목표는 결맞음성이 우수한 4GSR 광원을 고도로 집속하여 결맞음 엑스선 회절 이미징 기법의 분해능을 10 nm 이하로 개선하는 것이다. 아울러 광원을 1 마이크론 수준으로 집속하여 회절 기법으로 관찰 가능한 최소 도메인 크기를 1 마이크론 수준으로 개선하는 것 역시 중요한 목표 중 하나이다. 본 빔라인에서는 이를 통해 기존의 기술적 한계를 극복하고, 나아가 결맞는 엑스선 회절 이미징 및 마이크로빔 회절 기법으로 하여금 차세대 에너지, 반도체, 바이오 소재 분야 난제 연구에 활용도를 높이고자 한다.

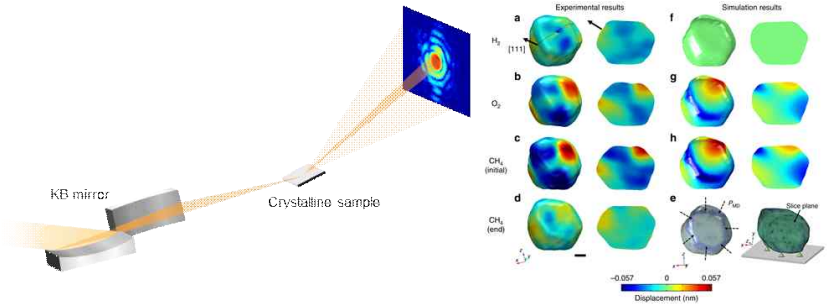
나. 빔라인 개요

결맞음 엑스선 회절 빔라인은 Bragg CDI와 같은 결맞는 엑스선 회절 이미징 기법과 실시간 (in-situ) 마이크로빔 회절 기법에 특화되어 있다. 빔라인에서 활용 가능한 에너지 범위는 텐더 에너지를 포함하는 3~30 keV로, 빔라인을 차별화할 수 있는 요소로 지목된다. 언듈레이터(IVU24)에서 발생한 광원은 DCM-Flat 미러 조합의 광학장치를 거치며 단색화되고, 최종적으로 KB 미러를 이용하여 단색 광원을 집속한다.

본 빔라인의 End-station은 6-축 회절기가 설치되며, Bragg CDI 및 마이크로빔 회절 연구를 중점적으로 지원한다. 이 외에 회절기를 이용하는 실시간 (in-situ) 엑스선 회절 연구를 부가적으로 지원한다. 여기에서는 KB 미러를 이용하여 광원을 1.5 마이크론 수준으로 집속하며, 시료로부터 발생하는 회절 패턴은 Eiger 9M 또는 그에 준하는 대면적 2차원 검출기 회절기에 설치하여 기록한다.

다. 빔라인 실험기법

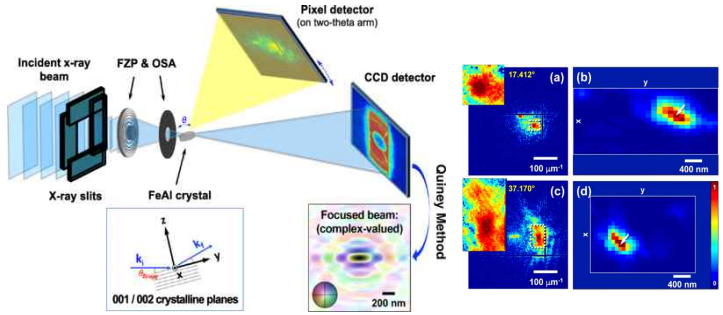
(1) Bragg CDI



<그림 2.2.5.1> 브래그 결맞음 엑스선 회절 이미징 셋업 개략도 및 Pt 나노결정의 3차원 변형 필드 이미지

Bragg CDI는 bragg 회절을 이용하여 나노스케일에서 결정 재료의 구조를 연구하는 실험기법이다. 결맞은 엑스선 회절 이미징은 말 그대로 결맞음 엑스선을 활용하여 실시간으로 시료 내부의 변형 필드와 시료의 3차원 이미지(전자밀도 분포)를 분석할 수 있는 기법이다. 따라서 본 기법을 통해 결정질 시료의 구조, 변형 필드 및 결함의 공간적 분포에 관한 연구를 할 수 있으며, 동적인 과정의 이미징 및 실시간 구조변화를 탐구할 수 있다. 예를 들어, <그림 2.2.5.1>에 나타낸 결과와 같이 촉매 소재 중 하나인 Pt 나노결정의 실시간 메탄 산화 반응 시 발생하는 격자 변형을 추적하여 물질의 활성 사이트를 분석할 수 있다.

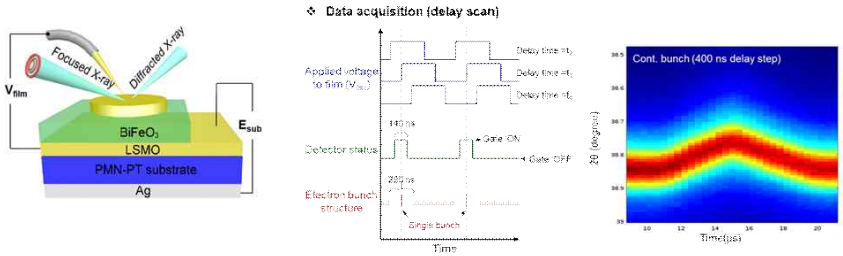
(2) Ptychography in Bragg condition



<그림 2.2.5.2> 브래그 타이코그래피 셋업 개략도 및 회절 패턴 (Fe-Al 결정)

브래그 타이코그래피는 타이코그래피에 브래그 회절 개념을 결합한 실험기법이다. Bragg CDI와 동일하게 결정 샘플의 고해상도 구조 정보를 얻을 수 있으며, 측정된 회절 패턴은 시료의 전자 밀도분포와 변형 필드에 대한 정보를 포함한다. 따라서 결정격자 내의 국소 변형 영역과 결함에 대해 분석할 수 있다. 다만, Bragg CDI와 다르게 빔 크기보다 큰 시료를 분석할 수 있다는 장점이 있어 시료의 크기에 대한 제약이 없다. 이에 대한 예는 <그림 2.2.5.2>에 나타낸 것처럼 금속 간 합금 (Fe-Al) 내 존재하는 무질서한 상전이나 원자배열에 대한 분석을 통해 금속 합금의 특성을 파악하고 상태도를 결정짓는 중요한 역할을 할 수 있다. 따라서, 이 기법은 나노스케일에서 결정질 재료를 연구하기 위한 강력한 이미징 기법으로 활용되며, 재료과학, 응집 물리 등 다양한 분야에서 새로운 가능성을 보여준다.

(3) Microbeam X-ray diffraction



<그림 2.2.5.3> 강유전체 박막의 마이크로빔 엑스선 회절 셋업, 데이터 측정 과정 및 회절 패턴 데이터

최근 높은 빔 세기를 가진 나노 및 마이크론 이하의 경-엑스선의 사용이 가능해짐에 따라 마이크로빔 엑스선 회절을 이용하여 재료과학 및 관련 응집물질 과학의 중요한 문제를 해결할 수 있게 된다. 그 중 마이크로빔 엑스선 회절은 집속된 마이크로스케일의 빔을 이용하여 나노 입자의 구조적 변화나 동적인 프로세스를 연구하는 데 주로 사용된다. 이를 이용한 대표적인 연구는 시공간 분해 엑스선 회절이다. 이 기법은 격자상수 및 결정구조의 변화를 실시간으로 추적할 수 있다. 이때 시간분해능은 저장링의 전자빔 펄스폭 정도로 짧게 할 수 있다는 장점이 있어 나노초보다 빠른 물리적 현상을 밝혀낼 수 있다.

예를 들어 <그림 2.2.5.3>은 강유전체 박막에 수십 마이크론 크기의 전극을 올려 그 안에서 일어나는 구조적 변화를 관찰하는 연구이다. 이때 전극의 크기가 작아짐에 따라 RC time을 줄여 더 빠른 시간 내 동역학적 거동을 측정할 수 있다. 따라서 전극의 크기가 줄어듦에 따라 빔의 크기도 마이크로에서 나노스케일로 제공되어야 한다. 이처럼 sub-마이크론 수준의 빔을 제공함으로써 나노스케일 재료의 역학적 특성을 이해할 수 있는 기회를 제공한다.

라. 해외 유사 빔라인

<표 2.2.5.1>은 4GSR 결맞음 엑스선 회절 빔라인과 유사한 실험기법을 지원하고 있는 해외 빔라인을 비교한 표이다. 10 keV 에너지에서 각 빔라인의 결맞음 세기를 비교하면 본 빔라인이 두 번째로 높은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 가장 넓은 에너지 영역을 커버하는 빔라인이다.

<표 2.2.5.1> 4GSR 결맞음 엑스선 회절 빔라인과 유사한 해외 빔라인 비교

	APS-U	ESRF-EBS	PETRA-III	PLS-II	4GSR
Beamline	34-ID (ATOMIC)	ID01 (Microdiffractionimaging)	P10 (Coherence application beamline)	BL9C (Coherent X-ray Scattering)	BL05 (Coherent X-ray Diffraction)
Energy (GeV)	6	6	6	3	4
Current (mA)	200	200	100	400	400
Photon source	Revolver Period 21/25 mm Length 2.1 m	Revolver Period 27/35 mm Length 1.2 m	U32 Length 5.0 m	IVU20 Length 1.4 m	IVU24 Length 3.0 m
Energy range	5.5 ~ 25 keV	6 ~ 24 keV	5 ~ 20 keV	5 ~ 15 keV	3 ~ 30 keV
Flux @ 10 keV (photons/s/0.1% B.W)	8.7×10^{14}	3×10^{14}	5×10^{14}	5.7×10^{13}	9.4×10^{14}
Coherent flux @10 keV (photons/s/0.1% B.W)	5.5×10^{13}	4.12×10^{12}	1.4×10^{11}	1.7×10^{9}	1.1×10^{13}
Beam size	0.05 ~ 2 μm (Zoom-KB)	35×35 nm^2 (minimum) 6×1 mm^2 (maximum)	1 ~ 3 μm (CRL) 300×300 nm^2 (KB) 10×10 nm^2 (Waveguide)	14×3 μm^2 (KB)	1.06×0.45 μm^2 (KB)
Technique	Bragg CDI, micro/nanodiffraction	CDI, XRD, GISAXS	CDI, XPCS, Holography	CDI, Microbeam X-ray diffraction	CDI, XRD
Detector	Timepix, CCD, Vortex EX 60,	APD, Rontec, Amptek, Maxipix, CCD, Eiger2M	Pilatus 300k, Eiger4M, Eiger500k, PI-LCX	Timepix, Eiger2 X 1M, SDD	Eiger2 X 1M, Eiger2 X 9M, Lambda 250k, SDD

마. 빔라인 설계 목표

<표 2.2.5.2> 결맞음 엑스선 회절 빔라인 목표 사양

광원	In-vacuum 언듈레이터, IVU22
에너지 범위	3 ~ 30 keV
에너지 분해능	$\Delta E/E < 2 \times 10^{-4}$
빔 사이즈	1.5 μm
빔 세기	$< 10^{13}$ ph/s

(1) Photon energy range

본 빔라인의 가용 에너지 범위는 3~5 keV인 텐더에너지 영역과 그 이상의 에너지인 5~30 keV까지이다.

텐더 에너지 영역은 K, Ca 및 Ti의 K-edge와 무거운 원소들(Ru, Pd, Cd, In, Ag, Pt 등)의 전자 상태나 리간드 정보를 제공할 수 있는 L이나 M-edge의 에너지를 포함하기 때문에 원소의 contrast 이미징이 가능하다. 이는 촉매 소재의 실시간 거동이나 도핑 원소의 공간적 분포 변화를 통한 거동 추적 등에 활용된다.

본 빔라인의 주요 사용 에너지 범위는 5~20 keV이다. 이때 낮은 에너지 영역은 낮은 에너지에서 결맞음 길이가 길고 높은 세기의 빔이 제공되기 때문에 주로 CDI 실험이 수행된다. 또한 주 사용 에너지 영역인 5~20 keV는 transition metal의 흡수단 에너지를 포함하여 배터리나 촉매 물질의 화학적 특성에 대한 분석도 가능하다.

주 사용 에너지 영역 이상의 에너지인 20~30 keV에서는 주로 in-situ XRD가 수행될 예정이다. 투과율이 높은 고에너지를 활용하여 실제 상용화되고 있는 배터리 소재나 금속 합금에 대한 구조적 변화를 실시간으로 분석할 수 있다.

(2) Beam size

3세대 광원과 비교하여 수평 방향으로 100배 작아진 emittance에 의해 언듈레이터에서 나오는 빔은 주 사용 에너지인 8 keV에서 수평 방향 41.46 μm, 수직 방향 10.59 μm이다. 이때, 발산각은 수평 방향 9.26 μrad, 수직 방향 8.86 μrad으로 서로 유사한 값을 갖는다. 작아진 소스 사이즈와 길어진 빔라인에 의해 높은 세기를 갖는 나노 사이즈 빔을 집속할 수 있다.

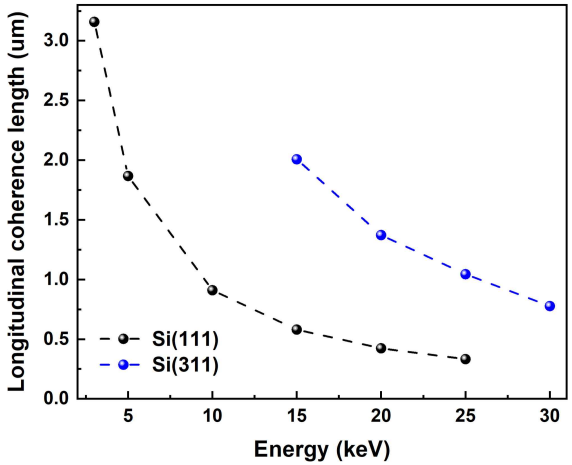
본 빔라인에서 목표로 하는 빔 크기는 sub-마이크론에서 수 마이크론이다. Sub-마이크론의 빔은 수십 나노에서 수백 나노 정도 시료의 Bragg CDI 측정에 활용된다. 마이크론 크기의 빔은 Bragg CDI, Bragg 타이코그래피, 엑스선 회절 기법에 사용된다. Bragg CDI는 주로 에너지나 촉매 분야 연구에 많이 활용되기 때문에 주요 시료의 크기가 수백 나노 수준으로 수 마이크론 크기의 빔으로 충분하다. 만약 시료의 크기가 빔의 크기보다 클 경우, Bragg 타이코그래피 기법을 활용함으로써 시료 크기에 대한 제약성을 해소할 수 있다. 마이크론 빔은 마이크론 크기의 나노와이어나, 박막, 그리고 파우더 시료의 미소 영역 내 구조적 특성을 분석할 수 있는 엑스선 회절 기법에도 적합하다.

(3) 결맞음성

본 빔라인의 가장 큰 특징은 결맞는 빔이다. 빔의 결맞음성을 고려하여 빔라인의 광학장치는 최소화하며, 각각의 광학장치는 최대한 결맞음성을 유지할 수 있도록 구매 시점에 최고 성능의 장치를 구매 및 제작한다.

엑스선의 결맞음성은 크게 두 가지 요소에 의해 결정된다. 첫 번째는 에너지 분해능과 파장이 관련된 시간 결맞음 길이, 두 번째는 소스의 크기(Σ)와 소스에서부터 거리(D), 그리고 파장(λ)과 관련된 공간 결맞음 길이이다. <그림 2.2.5.4>는 에너지에 따른 공간 결맞음 길이를 나타내며, 이때 DCM의 결정에 따라 같은 에너지임에도 에너지 분해능의 차이에 의해 결맞음 길이가 달라진다. 시간 결맞음 길이는 (수식 2.2.5.1)을 통해 계산한다.

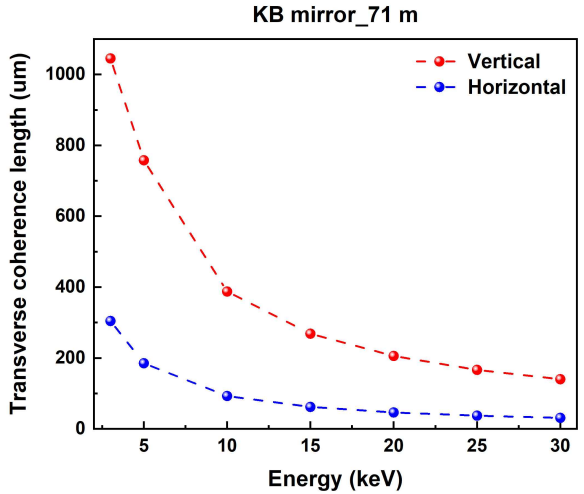
$$L_l = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad \text{(수식 2.2.5.1)}$$



<그림 2.2.5.4> DCM crystal에 따른 Energy-longitudinal coherence length profile

<그림 2.2.5.5>는 71 m에 위치한 KB 미러에서의 에너지에 따른 공간 결맞음 길이를 나타낸다. 결맞음 길이는 (수식 2.2.5.2)를 통해 계산한다. 전반적으로 공간 결맞음 길이는 소스의 크기나 소스에서부터 거리보다 파장의 영향이 크다. 8 keV 기준으로 70.3 m에 위치한 결맞음성을 조절하는 슬릿에서의 결맞음 길이는 수직 방향 464 μm이고 수평 방향은 113 μm이다.

$$L_t = \frac{\lambda D}{2\sqrt{2\pi}\,\Sigma} \quad \text{(수식 2.2.5.2)}$$



<그림 2.2.5.5> 71 m에 위치한 KB 미러에서의 에너지에 따른 transverse coherence length

<표 2.2.5.3> 주 에너지에서 공간 결맞음 길이

	에너지 (keV)	값 (H x V) (μm x μm)
결맞음 길이	8	114 × 465
	15	61 × 265

Coherent fraction은 샘플 위치에서 빔 세기와 결맞음 세기에 따라 결정된다. 즉, 빔의 결맞음 비율을 나타낸다. <표 2.2.5.3>은 주 사용 에너지인 6 keV와 15 keV에서 공간 결맞음 길이를, <표 2.2.5.4>는 광원의 coherent fraction을 나타낸다.

<표 2.2.5.4> 주 에너지에서 Coherent fraction (SPECTRA)

	에너지 (keV)	Total Flux (ph/s/0.1%B.W.)	Coherent Flux (ph/s/0.1%B.W.)	값 (H × V)
Coherent fraction	8 (3^{rd} harmonic)	1.40×10^{15}	2.91×10^{13}	0.07 × 0.30
	15 (7^{th} harmonic)	6.78×10^{14}	3.76×10^{12}	0.035 × 0.16

(4) 빔 안정성

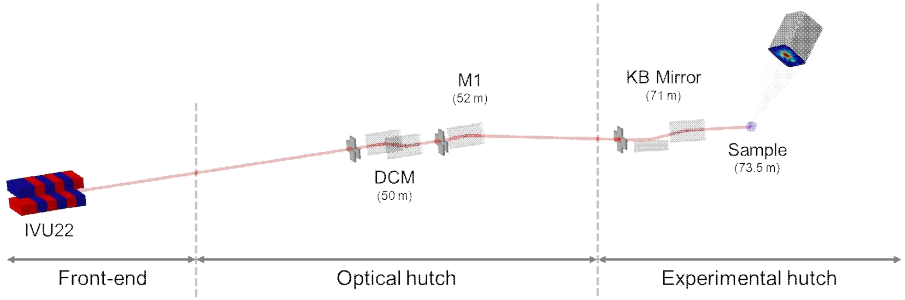
Sub-마이크론 수준의 빔을 제공하기 위해서는 빔의 안정성을 고려하여 빔라인의 광학장치를 설계한다. 각각의 광학장치에 입사되는 빔의 위치를 일정하게 유지할 수 있도록 feedback 시스템을 도입한다.

첫 번째 feedback 시스템은 UHV-QBPM과 DCM의 두 번째 결정의 pitch를 coupling 시켜 사용하고, 두 번째는 HV-QBPM과 KB 거울을 coupling 하여 사용한다. 첫 번째 경우는 KB 거울에 입사되는 수직 방향의 빔을 일정하게 하고, 두 번째 경우는 KB 거울에 의해 집속된 빔 즉, 샘플 위치에서 빔이 일정하게 유지할 수 있도록 한다. KB 거울은 수직과 수평 방향의 거울의 pitch를 둘 다 이용할 수 있기 때문에 모든 방향에서 일정한 위치로 빔을 집속할 수 있다.

이에 대한 자세한 사항은 아. 광학허치, 자. 실험허치 항목에서 나타낸다.

마. 빔라인 구성

(1) 빔라인 배치도



<그림 2.2.5.6> 결맞음 엑스선 회절 빔라인 배치도

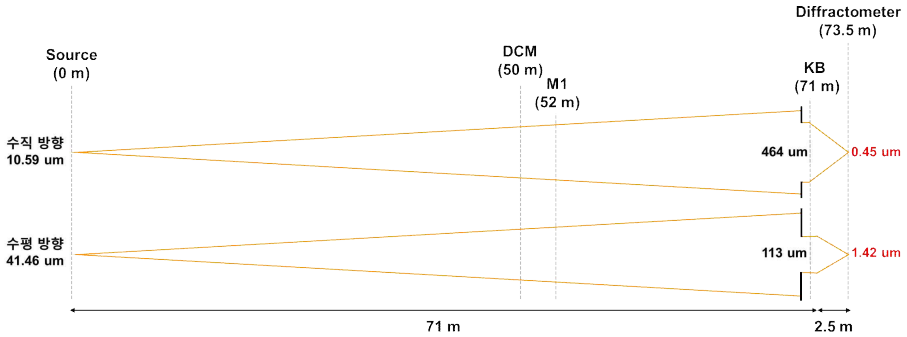
(2) 빔라인 구성표

<표 2.2.5.5> 결맞은 엑스선 회절 빔라인 구성 목록

거리 (m)	항 목	사 양	용 도
0	Undulator	IVU24	-
15.7	Parasitic mask	0.6 mrad opening	Parasitic photon beam 제거
16.0	Beam stopper		
17.0	PBPM1	4-blade type	광자빔 위치 진단
17.5	Safety magnet		사고 시 빔 덤프용 magnet
19.0	Fixed mask	0.46 mrad opening	3.5 kW 흡수
20.8	Photon shutter	GlidCop absorber 사용	사고 시 downstream의 광학장치 보호, 빔 차폐 역할
21.8	Fast Close Shutter		
22.0	PBPM2	4-blade type	Orbit 조정 및 빔 위치를 위한 진단장치
22.5	Movable mask	4-way slit, UHV, 수냉	Central cone만 잘라서 사용
23.8	Safety shutter		
28	White beam filter	Graphite 두께: 0.5 mm, 1 mm, 2 mm Diamond 두께: 0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm	빔라인 정렬 시 low energy 성분 제거하여 광학장치 파손 예방
33	White beam Slits	4-way slit, UHV, 수냉	DCM 입사빔 conditioning
	Fluorescent screen monitor	Fluorescent metal screen, current signal output	빔 profile 진단
50	DCM	Si (111)/Si (311) pair, fixed exit design	광원 단색화
	Slits	4-way slit, UHV	High harmonics rejection 거울 입사빔 conditioning
	Fluorescent screen monitor	Fluorescent metal screen, current signal output	빔 profile 진단
52	High harmonics rejection mirror	Flat mirror 2-stripe coating (Pt, Rh)	High harmonics 감쇄
	Slits	4-way slit, UHV	단색빔 conditioning
	Fluorescent screen monitor	Fluorescent metal screen, current signal output	빔 profile 진단
70	Beam position monitor	UHV QBPM, Ti foil 두께: 500 nm, 1,000 nm	빔 위치 진단, I_0 모니터, 빔 위치 안정화를 위한 feed-back 시스템 구축
	Photon shutter		실험허치 입사빔 차단
70.3	Slits	4-way slit, UHV	KBM 입사빔 conditioning (Super polished slits)
71	KB mirror	2-stripe coating (Pt, Rh), 수직/수평 집속 pair	Sub-micron 빔 집속
	Be window	Double-side polished, 127-um-thick	UHV 구간 종료
	Slits	4-way slit, HV	Parasitic scattering 제거
	Beam position monitor	HV QBPM, Ti foil 두께: 500 nm, 1,000 nm	빔 위치 진단, I_0 모니터, 빔 위치 안정화를 위한 feed-back 시스템 구축
	Attenuator	8-channel (Al, Mn 두께별 + block)	메인빔 얼라인을 위한 빔 세기 감쇄
73.5	Kappa diffractometer	LM-guide or Air-bearing base plate	CDI, 마이크로빔 회절 실험 시 샘플/검출기 위치 제어

(3) 빔라인 광 경로

빔라인 시뮬레이션은 Oasys 환경에서 ShadowOui 프로그램을 사용하여 수행한다.



<그림 2.2.5.7> 결맞음 엑스선 회절 빔라인 광 경로@ 8 keV_OASYS

<그림 2.2.5.7>은 실험허치에 위치한 6-circle 회절기 중심인 샘플 위치까지의 광 경로를 나타낸다. 8 keV의 에너지에서 시뮬레이션한 결과로 IVU22에서 방출되는 소스의 크기는 수직 방향으로 10.59 μm, 수평 방향으로 41.46 μm이다 (Central cone). 소스에서부터 실험허치 내 집속광학장치인 KB 거울까지의 거리는 71 m이며, 이때 회절기 중심까지의 거리인 초점거리는 2.5 m이다. 시뮬레이션을 통해 집속된 빔은 KB 거울 앞에서 결맞음 길이인 수직 방향 464 μm, 수평 방향 113 μm만큼 define 한 결과이다. 이에 따라 집속되는 빔의 크기는 수직 방향 0.45 μm, 수평 방향 1.42 μm으로 완전 결맞음 빔의 크기이며, CDI 실험에 주로 사용될 빔 크기이다.

바. 광원

(1) 언듈레이터 (In-vacuum Undulator)

<표 2.2.5.6> IVU22 사양

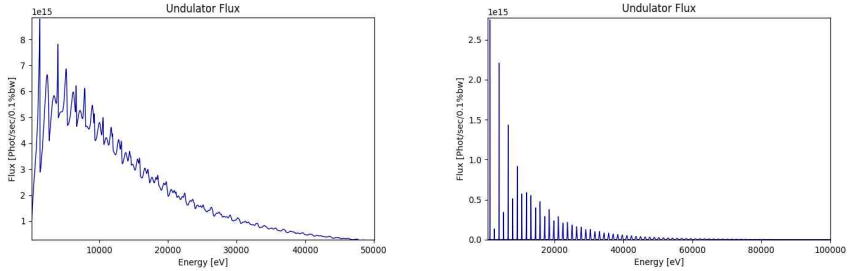
빔 라 인	주 기 (mm)	길 이 (m)	총 전력 (kW)	전력 밀도 (W/mm^2)
결맞음 엑스선 회절	22	3.0	14.97	164

(*언듈레이터 최대 K = 2.3007, 최소 gap = 5 mm)

본 빔라인의 광원은 in-vacuum 언듈레이터로, 길이는 3 m, 극의 주기는 22 mm인 IVU22를 사용한다. IVU22 광원의 소스 크기는 수평 방향이 수직 방향의 약 4배이지만, 발산각은 4GSR의 특성에 의해 수평 방향과 수직 방향이 거의 유사하다. 소스의 빔 세기는 주 사용 에너지인 8 keV에서 1.40 × 10^{15} photons/s/0.1%B.W.이며, 본 빔라인의 전체 사용 에너지 범위(3~30 keV)에서 전반적으로 ~10^{14} photons/s/0.1%B.W.이다.

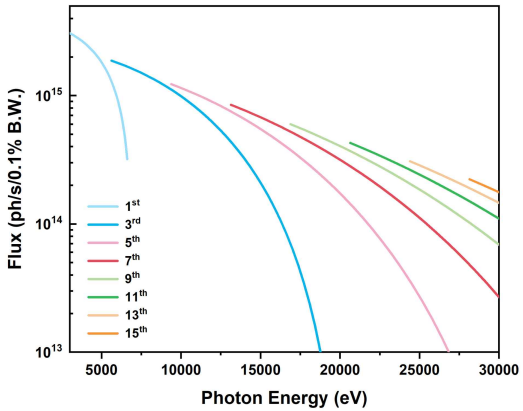
<표 2.2.5.7> IVU22 광원 특성 (FWHM) @ 8 keV

Source size (H × V) (μm × μm)	41.46 × 10.59
Divergency (H × V) (μm × μm)	9.26 × 8.86
Beam flux (photons/s/0.1%B.W.)	1.40 × 10^{15}



<그림 2.2.5.8> IVU22 스펙트럼 / 프론트엔드 movable mask 1 × 1 mm^2 @ 22.8 m 스펙트럼_OASYS

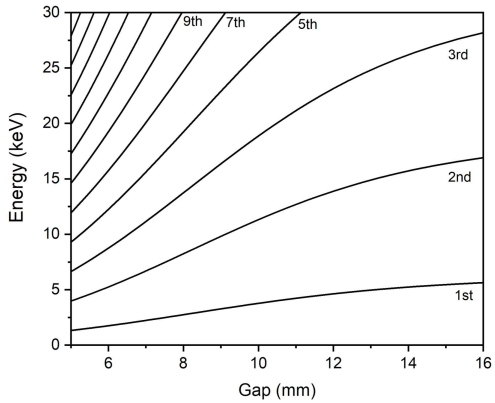
IVU22의 5~18 mm 갭에서 나올 수 있는 에너지에 따른 전체적인 harmonic과 flux를 <그림 2.2.5.9>에 나타낸다. 이때 실제 특정 에너지에서 사용하는 harmonic은 그 에너지에 해당하는 harmonic 중 가장 높은 flux를 갖는 harmonic을 선택한다. 따라서 그에 맞는 언듈레이터 갭을 찾아 사용한다. IVU22에서 주 사용 에너지에 따라 flux가 가장 높을 때의 harmonic, 언듈레이터 갭, K-value, flux와 coherent flux를 비교하여 <표 2.2.5.8>에 나타낸다.



<그림 2.2.5.9> IVU22 에너지에 따른 flux 및 harmonics (Gap 5 ~ 18 mm)_SPECTRA

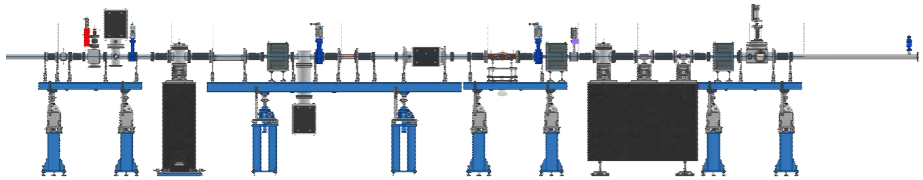
<표 2.2.5.8> IVU22 주요 에너지에 따른 harmonic, gap, K value, flux, Coherent flux_SPECTRA

Energy (keV)	Harmonic	Gap (mm)	K	Flux (ph/s/0.1%B.W.)	Coherent flux (ph/s/0.1%B.W.)
3	1	6.87	1.61	3.066×10^{15}	3.0578×10^{14}
6	3	5.22	2.22	1.803×10^{15}	4.878×10^{13}
10	5	5.22	2.22	1.148×10^{14}	1.260×10^{13}
15	7	5.47	2.11	6.782×10^{14}	3.760×10^{12}
20	9	5.61	2.05	4.045×10^{14}	1.350×10^{12}
30	15	5.22	2.22	1.766×10^{14}	2.465×10^{11}



<그림 2.2.5.10> IVU22 Gap에 따른 에너지 스펙트럼_SPECTRA

사. 프론트엔드



<그림 2.2.5.11> 프론트엔드 도면

4 GeV, 400 mA의 운전조건에서 최대 14.97 kW의 전력을 견디는 movable mask와 photon shutter를 설계한다. 프론트엔드의 광학장치는 모두 아래와 같은 조건으로 설계한다. (4GSR 빔라인 프론트엔드 참고)

1. Heat load로 인한 구조적 응력이 항복강도를 넘어서지 않도록 한다.
2. Heat load로 인한 온도상승에 있어 해당 소재에 대한 softening temperature를 넘어서지 않도록 한다.
3. LCW 벽면 온도가 물의 비등 온도인 100 ℃를 넘어서지 않도록 한다.

(1) Parasitic mask

Parasitic mask는 본 빔라인의 첫 번째 장치로 0.6 mrad의 빔이 통과되도록 설계하며, 2 kW의 열을 흡수하도록 설계한다.

(2) Fixed mask

Fixed mask는 0.46 mrad으로 빔이 통과되도록 설계하여 3.5 kW의 열을 흡수할 수 있게 설계한다.

(3) PBPM (빔물리진단팀)

4개의 다이아몬드 블레이드를 통해 PBPM에 입사되는 빔의 위치를 진단할 수 있다. 본 빔라인의 PBPM은 2개가 위치하며 2개의 PBPM을 통해 저장링의 orbit을 조정하게된다.

(4) Safety magnet

Safety magnet은 안정성을 위해 필수적으로 설치되어야 하는 장치이다. 이 장치는 저장링의 빔 운전 사고 시 빔의 경로를 변경하여 빔을 덤프시키는 역할을 한다. 평소 운전 시에는 작동하지 않으며, magnet의 aperture 크기는 빔을 간섭하지 않는 크기인 31.258 × 31.258 mm로 설계하고 magnet의 gap은 35.258 mm로 한다. Magnet의 위치는 2개의 PBPM 사이로 설치하여 공간적인 효율성을 높이도록 한다.

(5) Photon shutter

Photon shutter는 빔 운전 사고 및 machine study/maintenance 작업 시 광자 빔을 차단함으로써 downstream에 위치한 광학장치를 보호하는 장치이다. 따라서, shutter가 닫히면 언듈레이터에서 나오는 모든 광자 빔의 열을 견딜 수 있게 설계해야 한다. Shutter에 맞는 광자 빔의 분포를 해석하고 이때 glancing angle을 결정한다. 수냉을 통해 shutter를 냉각하고, 유량을 3 L/min이나 5 L/min으로 고려한다.

(6) Movable mask

Movable mask는 언듈레이터에서 나오는 Gaussian 빔의 central cone을 제외한 부분을 제거한다. 특정 언듈레이터 갭에서 나올 수 있는 even harmonics의 빔을 제거함으로써 mask 뒤에 위치한 광학장치들의 열부하를 낮출 수 있다.

아. 광학허치

단색화장치 앞단에 위치한 광학장치들은 모두 열해석을 고려하여 설계한다. 단색화장치는 브래그 각도를 고려하여 최대 40 W/mm^{2}까지 견딜 수 있도록 결정의 크기와 쿨링 방식을 고려한다. 현재 열 해석은 진행 중이며, 결과에 따라 결정의 크기와 DCM, M1의 위치는 변경할 예정이다.

<표 2.2.5.9> 광학허치 내 거울 및 DCM 사양

	DCM	M1
광원으로부터 거리 (m)	50	52
Incident Angle	-	2.5 mrad
Shape	Plane	Flat
Radius (m)	-	-
Surface Normal direction	Horizontal	Horizontal
Substrate	Si (111) / Si (311)	Si
Coating Materials (Thickness, nm)	-	Rh (50), Pt (50)
Beam size (H × V) @ 8 keV (μm × μm)	1003 × 985	1043 × 1024
Footprint (H x V) @ 8 keV (mm × mm)	4.06 × 0.99	400 × 1.025
Substrate size (L × W) (mm × mm)	1st : 50 2nd : 150	800 × 50
Roughness (nm, RMS)	< 0.3	< 0.2
Slope error (μrad, RMS)	< 1	< 0.1
Max total heat load (W)	106.13	-
Max surface heat load (W/mm^2)	47.14 (45° angle)	-

* DCM과 M1 결정의 roughness와 slope error는 현재 JTEC의 최대 사양으로 표기

(1) White beam filter

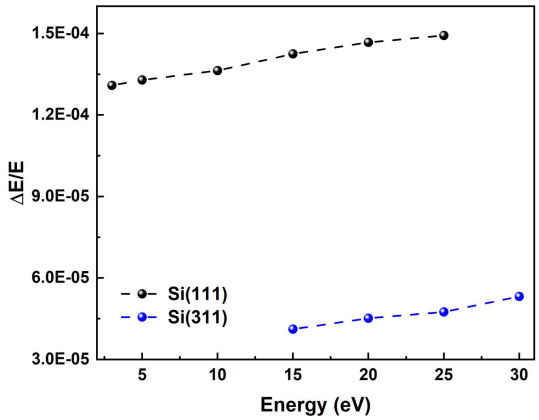
White beam 필터는 메인 빔을 align 할 때 낮은 에너지의 빔을 흡수하여 열부하를 낮추는 용도로 사용한다. Graphite 두께는 0.5, 1, 2 mm이며, CVD diamond는 0.1, 0.2, 0.5 mm이다. 본 빔라인은 빔의 결맞음성을 고려하여 실제 실험 중에는 필터를 사용하지 않는다.

(2) 단색화장치 (DCM) / Cryocooler

본 빔라인의 단색화장치는 longitudinal coherence length를 고려하여 에너지 분해능이 높은 Si (111)과 Si (311)을 이용해 설계한다. Si (111) 결정의 에너지 분해능은 1.30 × 10^{-4} ~ 1.47 × 10^{-4}이며, Si (311)은 5.32 × 10^{-5} ~ 4.12 × 10^{-5}의 값을 갖는다. 이에 대한 에너지 분해능에 대한 추세는 <그림 2.2.5.12>에 나타낸다. 에너지 분해능은 (수식 2.2.5.3)을 통해 계산된 값이다. 단색화장치를 이용한 에너지 범위는 Si (111)의 경우 3~20 keV, Si (311)은 18~30 keV이다.

$$\Delta E = E\sqrt{\Omega_i^2 + \omega_i^2}\cot\theta_B \quad \text{(수식 2.2.5.3)}$$

Ω= Divergence (FWHM), ω = Darwin width, θ_B = Bragg angle



<그림 2.2.5.12> DCM crystal에 따른 Energy-Energy resolution

Manipulator는 Si (111)과 Si (311)을 이동할 수 있도록 하며, 브래그 각도를 결정하는 모션인 pitch는 5°~45°까지 움직일 수 있도록 제작한다. 결정의 offset은 25 mm로, fixed exit를 위해 두 번째 결정의 길이를 150 mm로 결정한다. 또한 PTL 구간에 위치한 UHV-QBPM을 통한 feedback 시스템은 두 번째 결정의 피에조 roll과 pitch 모션을 통해 적용된다. 이에 따라 실험허치의 첫 번째 광학장치인 KB 거울에 입사되는 빔을 일정하게 유지한다.

단색화장치의 결정은 액체질소로 냉각하여 결정의 변형을 최소화하며, 변형의 기준은 각 에너지에서의 Darwin width보다 작아야 한다. 이때 냉각방식은 side cooling을 도입하며, LN2 cooling을 위한 cryocooler는 성능을 테스트한 후 설치한다.

<표 2.2.5.10> 단색화장치 사양 (Axilon DCM 참고)

에너지 범위	3 ~ 30 keV	
결정 종류	Si (111), Si (311)	
브래그 각도	Si (111)	41.234°~ 5.674° @ 3 keV ~ 20 keV
	Si (311)	12.142°~ 7.250° @ 18 keV ~ 30 keV
각도 분해능	< 0.25 μrad	
모터 속도	~ 0.5°/sec	
Offset	25 mm	
진공도	< 10^{-8} mbar	
모션 축	Bragg, gap, roll, pitch, piezo roll and pitch for feedback	

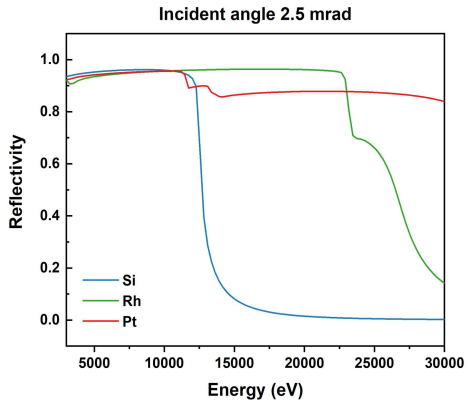
<표 2.2.5.11> Axilon Cryocooler 사양

냉각 전력	0 ~ 3,000 W
액체질소 유량	0 ~ 20 L/min (0 ~ 90 Hz)
냉각 루프 압력	2 ~ 10 bar
압력 안정성	< 1 mbar (rms) / < 5 mbar (P-V)
냉각 루프 온도	77 ~ 100 K

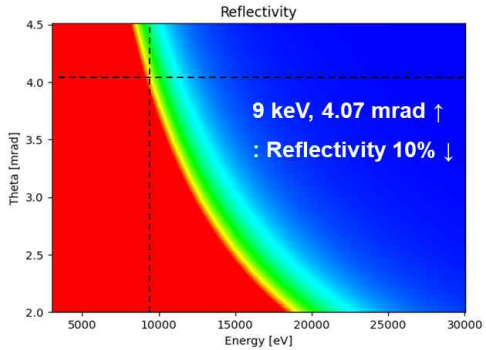
(3) 고조화 제거 거울 (High harmonics rejection mirror)

단색화장치 뒤에 위치한 고조화 제거 거울은 단색화장치를 거쳐 나오는 빔의 고주파 에너지를 억제하는 역할을 한다. 단색화장치의 결정으로 사용되는 실리콘은 FCC (Diamond structure)로 diffraction selection rule에 의해 h, k, l이 모두 odd이거나 모두 even이고 h+k+l이 4의 배수이면, 그때 해당하는 에너지의 n배 에너지가 같이 회절된다. 사실 이처럼 n 배에 해당하는 에너지는 high heat load 거울에서 먼저 어느 정도 흡수되어 제거된다. 하지만 높은 에너지는 투과율이 높아 약간만 반사되어 나와도 회절 데이터에 영향을 준다. 따라서 bare Si과 Rh, Pt로 코팅된 거울을

사용하고 입사각은 2.5 mrad로 설계하여 <그림 2.2.5.13>과 같은 특성을 갖는 거울을 제작한다. 각 코팅 물질에 따른 가용 에너지 범위는 Si의 경우 5~12 keV이고 (반사율 90% 이상), Rh은 11~23 keV (반사율 90% 이상) 그리고 Pt는 15~30 keV (반사율 80% 이상)이다. 2.5 mrad의 입사각은 기본적으로 본 빔라인의 목표 에너지인 30 keV까지 사용할 수 있도록 계산된 각도이며, 텐더 에너지를 사용할 때는 입사각을 최대 4.07 mrad까지 변경해야 텐더 에너지에 해당하는 고조화 에너지의 반사율을 10% 미만으로 줄일 수 있다. Bare Si 거울을 사용할 때 에너지에 따른 입사각-반사율 결과는 <그림 2.2.5.14>에 나타낸다.



<그림 2.2.5.13> 2.5 mrad 입사각일 때 코팅 물질에 따른 반사율



<그림 2.2.5.14> 에너지에 따른 입사각-반사율 그래프

(4) 초고진공 사분면 빔 위치 모니터 (UHV-QBPM)

초고진공 사분면 빔 위치 모니터는 PTL 구간 마지막에 위치한 진단장치로 실험허치로 입사되는 빔을 진단한다. 즉, 실험허치의 첫 번째 광학장치인 KB 거울로 입사되는 빔을 일정하게 유지시켜준다.

사분면 빔 위치 모니터는 단색빔에서 사용되며, PTL 구간에 설치될 예정으로 초고진공 환경에서 사용할 수 있는 장치를 설치한다. 본 진단장치는 섬광 포일에서 나오는 형광을 사분면에 위치한 4개의 포토다이오드를 기반으로 하며, 다양한 포일을 사용하여 2 마이크론 미만의 빔 위치 정확도를 제공한다. 이때 포일은 사용 에너지 영역에 따라 아래 <표 2.2.5.13>에 표시된 종류를 사용한다. 또한 포일의 두께는 엑스선의 투과율과 신호의 세기를 고려하여 500, 1000 nm로 두 개를 활용한다.

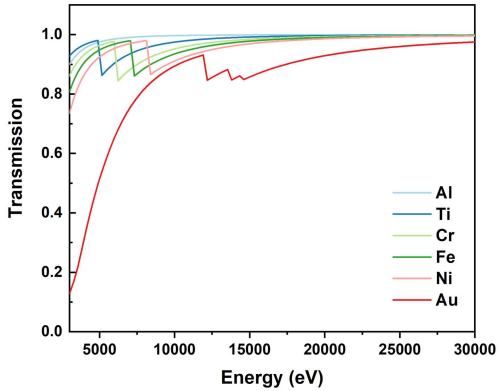
현재 FMB OXFORD 社의 UHV-QBPM을 구매 예정이다.

<표 2.2.5.12> FMB OXFORD 社 UHV QBPM 사양

	UHV QBPM
Beam aperture	Diameter 10 mm
Vacuum	< 1 × 10^{-9} torr
Foil	Ti
Thickness	0.5, 1 μm
Range	+ 20 mm, -17.5 mm
Resolution	5 μm

<표 2.2.5.13> 에너지에 따른 foil 재료

Foil material	Energy (keV)
Al	1.49
Ti	4.51
Cr	5.41
Fe	6.40
Ni	7.48
Au	68.79



<그림 2.2.5.15> QBPM 호일 종류에 따른 투과율 (두께:500 nm)

자. 실험허치

실험허치는 Bragg CDI와 회절 실험을 수행할 수 있는 6-축 회절기가 위치해 있으며, 이때 집속광학장치인 KB 거울은 회절기 중심인 샘플 위치까지 집속 거리가 2.5 m로 설계된다. 집속 거리가 2.5 m로 긴 이유는 회절기에서 다양한 샘플 환경을 조성하기 위함이다. 회절기 센터로부터 실험허치의 끝단까지는 4.5 m로 회절기의 arm의 길이가 3 m임을 고려하여 설계한다. 3 m의 회절기 arm의 길이 설정은 Bragg CDI 실험 시 6 keV 기준으로 Eiger 검출기(75 μm)를 사용하였을 때, oversampling ratio를 최소 2로 설정하였을 때 계산된 결과로 이때 시료의 크기는 계산상 최대 4 μm까지 위상 복원이 가능하다. 자. 실험허치 항목에서는 실험허치에 위치한 KB 거울, 6축 회절기와 검출기에 대한 설계 사양을 포함한다.

(1) KB 거울

실험허치에 위치한 KB 거울은 회절기 중앙에 집속이 되고, 이때의 집속 거리는 2.5 m로 설정하여 거울을 제작한다. KB 거울은 에너지에 따라 초점거리가 일정하며, 이때 계산된 semi-major axis는 36,750 mm으로 VFM과 HFM이 동일하며, semi-minor axis의 경우, VFM은 35.7718 mm, HFM은 33.3072 mm이다.

빔의 결맞음성을 고려해 거울의 slope error는 0.1 μrad 이하, roughness는 0.2 nm 이하로 제작해야 한다. 위의 모든 거울 장치는 구매 시점 최고 사양을 제작할 수 있는

업체를 통해 설계 제작한다. 현재 미러는 JTEC을 통해 제작할 예정이며, manipulator는 국산화장치를 고려 중이다.

<표 2.2.5.14> 실험허치 내 KB 거울 사양

	KB (VFM)	KB (HFM)
광원으로부터 거리 (m)	70.6	71
Incident Angle	2.5 mrad	2.5 mrad
Shape	Elliptical cylinder	Elliptical cylinder
Semi-major axis (mm)	36,750	36,750
Semi-minor axis (mm)	35.7718	33.3072
Surface Normal direction	Vertical	Horizontal
Substrate	Si	Si
Coating Materials (Thickness, nm)	Rh (50), Pt (50)	Rh (50), Pt (50)
Beam size(H × V) @ 8 keV (μm × μm)	110 × 450	95 × 448
Footprint(H × V) @ 8 keV (mm × mm)	0.45 × 41.35	181 × 0.09
Substrate size(L × W) (mm × mm)	300	300
Focus distance (m)	2.5	2.0
Roughness (nm)	< 0.2	< 0.2
Slope error (μrad, RMS)	< 0.1	< 0.1

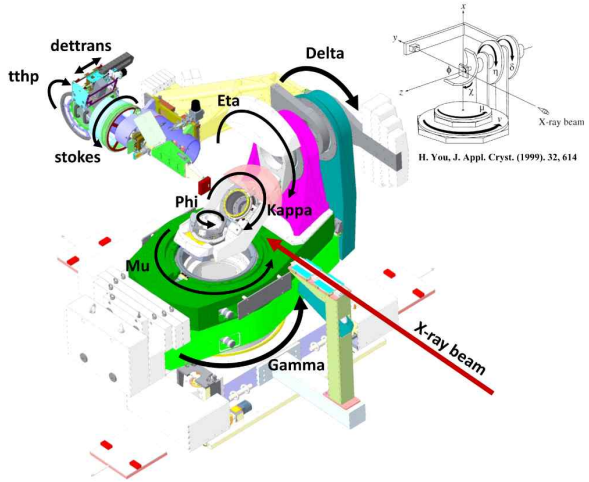
JTEC 社의 현재 최고 사양의 거울은 slope error가 0.05 μrad 이하이며, roughness는 0.1 nm 이하

(2) 6-circle 회절기

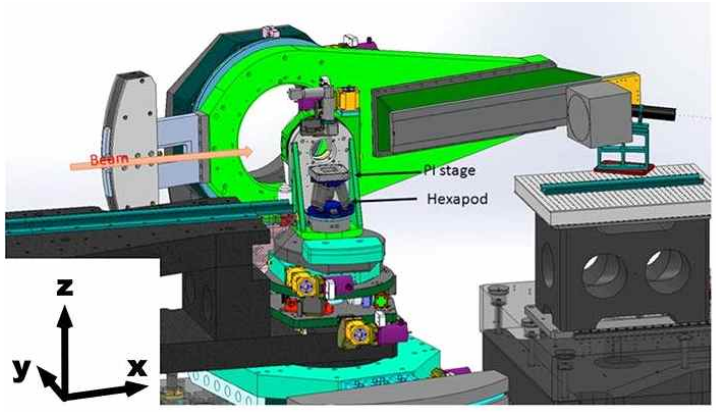
기존 6-circle 회절기(xHuber 社)의 eulerian cradle을 제거하고 Kappa 모델을 조합하여 맞춤형 회절기를 설치한다. 6-circle 회절기를 사용함으로써 회절 패턴을 out-of-plane뿐만 아니라 in-plane 방향으로도 측정할 수 있으며, Kappa 회절기를 조합해 고온, 진공, 전기장 등 다양한 샘플 환경을 조성할 수 있도록 한다. 이때 최대 하중은 20 kg까지 견딜 수 있도록 설계한다. 또한 회절기의 모든 모터에는 encoder를 장착하고 회절기의 arm 부분은 sample to detector distance를 조절하기 쉽도록

자동화한다. 회절기 arm의 길이는 3 m로 설계한다.

현재 회절기에 장착할 detector로 Eiger2 X 9M을 고려 중이다. 대면적의 2D 검출기를 고려하는 이유는 높아진 결맞음성과 빔 세기에 의해 더 높은 공간분해능을 측정할 수 있는 대면적의 검출기가 필요하기 때문이다. 이에 따라 회절기 비용이 상당 부분 추가될 수 있다.



<그림 2.2.5.16> 6-circle diffractometer Kappa type (Diamond_I16)



<그림 2.2.5.17> Diffractometer detector arm 참고 (ESRF_ID01)

<표 2.2.5.15> 6-circle Kappa 회절기 사양

	Limits	Description
delta	-20 ~ 200	detector arm, vertical
chi	-5 ~ 95	composite angle perpendicular to beam
eta	-190 ~ 190	sample rotation, vertical
gamma	-20 ~ 200	detector arm, horizontal
phi	-180 ~ 180	sample rotation, kphi is real motor
mu	-20 ~ 200	sample rotation, horizontal

(3) 검출기

<표 2.2.5.16> 2D 검출기 사양

	Lambda 250k	Eiger2 X 1M	Eiger2 X 9M
Type	2D detector	2D detector	2D detector
Count rate (photons/s/mm^2)	~ 2 × 10^5	~ 10^7	~ 10^7
Frame rate	Up to 24 kHz	4500 Hz (8 bit) / 2250 Hz (16 bit)	490 Hz (8 bit) / 245 Hz (16 bit)
Pixel size (W x H) (μm^2)	55 × 55	75 × 75	75 × 75
Array size (W x H) (pixels)	512 × 512	1028 × 1062	3108 × 3262
Active area (W x H) (mm^2)	28 × 28	77.1 × 79.65	233.1 × 244.7
Technique	Time-resolved X-ray Diffraction	Bragg CDI, Bragg ptychography, X-ray Diffraction	Bragg CDI, Bragg ptychography, X-ray Diffraction

3가지 유형의 2D 검출기를 활용할 계획이다. 먼저 Xspectrum 社의 Lambda 250k 검출기는 3개의 검출기 중 24 kHz로 가장 높은 frame rate를 갖기 때문에 시분해 엑스선 회절 기법에 가장 적합하다.

Eiger2 X 1M은 ~10^7 ph/s/mm^{2}의 높은 count rate를 가지며, Lambda 검출기에 비해 약 4배의 array size를 갖는다. 이 검출기는 회절기 arm에 부착하여 사용할 예정이며, Bragg CDI와 브래그 타이코그래피 그리고 in-situ XRD 실험에 활용할 예정이다.

Eiger2 X 9M 역시 높은 count rate를 가지며, 3개의 검출기 중 가장 넓은 면적을 갖는 검출기이다. 이 검출기의 경우 높아진 coherent flux에 의해 넓은 q-range까지

diffraction pattern이 측정될 것으로 예상하여, 대면적의 검출기로 활용할 예정이다. 또한 in-situ XRD 실험 시 대면적의 검출기를 통해 넓은 영역의 2-theta 데이터를 획득할 수 있다.

<표 2.2.5.17> SDD 검출기 사양

	Multi-channel SDD (RaySpec 社)
Number of elements	7
Total active area	280 mm^2 × 0.45 mm (depth)
Resolution	133 eV @ 5.9 keV
Maximum output rate	4 Mcps
Technique	Bragg ptychography

Multi-channel SDD는 주로 브래그 타이코그래피 실험을 수행할 때 원소의 공간적 분포를 분석하기 위해 사용한다. 또한 작아진 빔 크기에 의해 빔을 정렬하고 빔의 profile을 측정할 때 사용한다.

(4) 항온/항습 시설

빔의 안정성은 실험데이터 품질에 직접적인 영향을 미치기 때문에 실험허치 내 항온/항습 및 진동에 대한 문제는 중요한 요소이다. 고주파와 저주파 그리고 열 드리프트를 고려하여 최적의 성능을 달성하기 위해 실험허치 내 시설을 설계한다.

다른 빔라인들과 달리 실험허치 내에 집속광학장치인 KB 거울이 위치하기 때문에 미러 표면이나 미러 챔버, 챔버를 지지하고 있는 거더에서의 열 드리프트나 진동으로 시료에서 집속 빔의 위치가 변할 수 있다. 따라서 열적 안정성은 0.05 K 이내로 유지할 수 있도록 설계한다. (Long term (1~2 day): ±0.5 K, short term (1~2 hr): ±0.1 K)

현재 고려하고 있는 방안은 실험허치 내 KB 거울의 챔버가 위치한 공간에 공기 유입에 의한 온도 및 진동의 변화를 최소화하기 위하여 시료의 위치인 회절기와 분리하는 방안을 고려하고 있다. 또한 실험허치 출입 시 외부 공기의 유입을 차단하고 실험허치 내 온도와 습도를 일정하게 유지하기 위해 실험허치 입구 부분에 air curtain 공간을 독립적으로 배치하여 이중으로 실험허치로 출입할 수 있도록 허치 입구를 설계한다.

차. 데이터

(1) 데이터 관리

본 빔라인의 전체적인 데이터 관리는 검출기에서 측정되는 데이터 용량과 평균적인 데이터 측정시간을 고려하여 예측한 값이다.

Eiger2 X 1M : 4.2 MB/file (HDF5) / Readout rate : 8 bit (4,500 Hz), 16 bit (2,250 Hz)

Eiger2 X 9M : 약 40 MB/file (HDF5) / Readout rate : 8 bit (490 Hz), 16 bit (245 Hz)

Lambda 250k : 256 KB/file (TIF) / Readout rate : 1 bit (24,000 Hz), 6 bit (4,000 Hz), 12 bit (2,000 Hz), 24 bit (1,000 Hz)

결과적으로 데이터 용량이 제일 큰 Eiger2 X 9M을 기준으로 최대 readout rate를 계산하면 대략 18.9 GB/s일 것으로 예상된다.

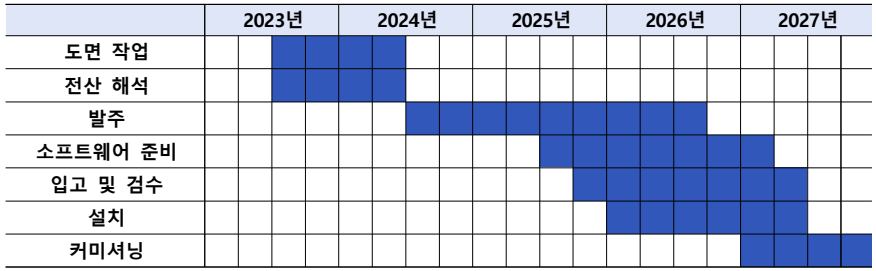
(2) 데이터 처리

APS-U에서 제공하는 Python 기반의 phase reconstruction 코드를 본 빔라인의 geometry에 맞게 보완하여 GUI 기반으로 제작 후 유저에게 제공한다.

카. 빔라인 건설 및 정렬

(1) 빔라인 건설 일정

<표 2.2.5.16> 빔라인 건설 일정



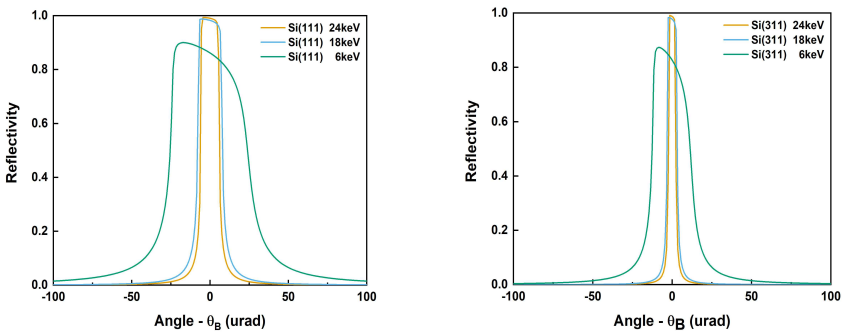
빔라인 정렬은 upstream부터 downstream으로 차례로 수행한다.

(2) Front-end

Movable mask에서 빔의 크기가 대략 300 μm(FWHM)이기 때문에 슬릿을 빔의 크기보다 작은 200 μm으로 열어 ±1 mm를 스캔한다. 이때 QBPM에서 측정되는 I_0의 profile은 단색빔의 Gaussian 형태로 나오며, 측정된 profile의 FWHM을 확인 후 FWHM의 2배에 해당하는 크기인 0.6 × 0.6 mm^2로 슬릿을 열어 central cone의 빔만 나오도록 정렬한다.

(3) Optical hutch

광학허치에 위치한 모든 슬릿과 광학장치는 UHV-QBPM에 측정된 I_0값을 이용하여 정렬한다. 첫 번째 광학장치인 DCM에 입사되는 빔은 DCM 앞단에 위치한 white beam slit을 통해 define 한다. 슬릿은 movable mask와 동일한 방식으로 정렬한다.



<그림 2.2.5.18> DCM detuning을 위한 Darwin width curve (6 keV 기준)

DCM의 첫 번째 결정은 특정 파장에 해당하는 bragg angle에 위치하게 된다. 이때 첫 번째 결정에 입사되는 빔의 각도에 따라 brage angle이 약간 차이가 날 수 있다. 따라서 이를 보정하기 위해 end-station에 reference foil을 두고 energy scan을 함으로써 측정된 profile을 피팅하여 reference foil의 absorption edge의 에너지를 비교해 variable을 보정해준다.

DCM의 두 번째 결정은 DCM에 들어온 빔의 경로를 일정하게 유지하는 역할을 하며, 추가적으로 detuning을 통해 첫 번째 결정에서 나올 수 있는 high harmonics를 제거한다. Detuning은 높은 에너지로 갈수록 darwin width가 작아지는데, 이를

이용하여 high energy를 제거한다. 방법은 DCM downstream에 위치한 QBPM에서 측정되는 total intensity (I_0)를 이용해 두 번째 결정의 pitch를 조절하여 처음 최댓값의 위치를 찾은 후 최댓값의 80%의 intensity를 갖는 위치까지 pitch를 조절한다. 이때 낮은 에너지를 사용하면 darwin width의 차이가 크게 나지 않기 때문에 detuning을 최대 I_0의 50%까지 한다.

(4) Experimental hutch

실험허치에는 크게 KB 거울과 회절기가 위치한다. KB 거울에 입사되는 빔은 거울 앞에 위치한 super polished slit을 통해 define을 한다. 이때 슬릿은 CDI 실험의 경우 거울 앞단에서의 결맞음 길이만큼 열어주고, 그 외의 높은 빔 세기를 요구하는 실험은 거울의 aperture 크기인 750 μm에서 거울의 edge 부분에 빔이 맞고 산란되는 것을 고려해 600 μm을 열어 사용한다. 슬릿은 광학허치에 위치한 슬릿과 동일하게 정렬하며 KB 거울 뒤에 위치한 HV-QBPM을 통해 profile을 측정한다.

KB 거울은 upstream에 위치한 수직 방향 거울을 z 방향으로 스캔하고 그다음 수평 방향 거울을 x 방향으로 스캔하여 각 거울의 중앙에 빔이 맞도록 한다. (거울을 스캔할 때 거울의 aperture를 벗어날 때부터 I_0값이 점점 떨어지고 aperture의 중앙에 위치할 때 최대 I_0값을 갖기 때문에 Gaussian이나 flat-top 형태의 profile을 가진다.) KB 거울의 pitch는 시료 위치에서 knife-edge 스캔을 통해 빔의 크기를 확인하며, 각 실험에서 요구하는 빔 크기에 맞게 미세 조정한다. (defocusing beam 사용)

회절기는 빔의 중앙에 회절기의 중앙이 맞도록 정렬한다. 방법은 수직 방향으로 knife-edge 스캔하여 나온 profile을 미분하면 Gaussian의 profile을 얻을 수 있고, 이를 Pseudo-Voigt function을 이용해 피팅하여 나온 빔의 위치를 기록한다. 그리고 회절기의 theta 모션을 180° 회전시켜 knife-edge가 뒤집어진 상태에서 스캔하여 나온 profile을 통해 똑같은 방법으로 피팅해 빔의 위치를 기록한다. 두 결과를 비교하여 차이에 대한 변위만큼 회절기의 높이를 조절하고 theta를 다시 원래 위치로 회전시켜 한 번 더 결과를 비교하여 빔의 위치가 같은지 확인한다. 이와 동일하게 수평 방향도 정렬을 하는데, 수평 방향은 mu 모션을 회전하여 정렬한다.

참고문헌

[1] Light Science & Applications (2022) Vol. 11 Issue 1 Pages 73

[2] Journal of synchrotron Radiation (2014) Vol. 21 Issue Pt 1 Pages 264-7

[3] Nature Communications (2023) Vol. 14 Issue 1 Pages 3615

[4] Advanced Energy Materials (2023) Vol. 13 Issue 36

[5] Nature Communications (2018) Vol. 9 Issue 1 Pages 3422

[6] Physical Review Letters (2018) Vol. 121 Issue 25 Pages 256101

[7] Scientific Reports (2016) Vol. 6 Pages 38724

[8] Protein & Peptide Letters, (2016), 23, 300-308

[9] NPG Asia Materials (2018) Vol. 10 Issue 7 Pages 563-580

[10] ACS Applied Energy Materials (2021) Vol. 4 Issue 10 Pages 11590-11598

[11] Nano Lett., 2014, 14 (9), 5123–5127

[12] ACS Nano (2021), Vol. 15 Issue 4 Pages 6129-6146

[13] Journal of Applied Crystallography (2012), Vol. 45 Issue Pt 4 Pages 778-784

[14] Applied Materials Today (2021), Vol. 25

[15] Advanced Electronic Materials (2023), Vol. 9 Issue 4

[16] Undulators, Wigglers and Their Applications, H. Onuki and P. Elleaume (Taylor and Francis, London, 2003)

[17] Ultra-Precision Mechanics for Fourth Generation Sources, Ralph Dohrmann, (2021)

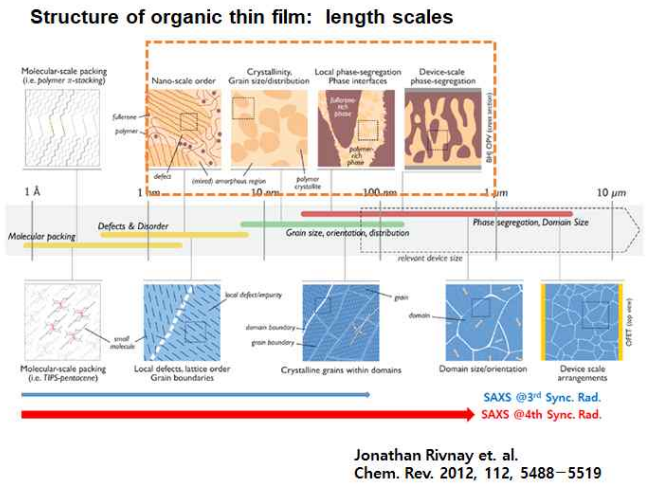
2.2.6 결맞음 소각 X선 산란 빔라인 (Coherence Small Angle X-ray Scattering Beamline)

가. 개요

(1) 적용 사이언스 추세

반도체, 유기 태양전지, OLED, 디스플레이, 환경 오염 센서 등의 주재료가 되는 유/무기 박막, 양자점, 나노 패터닝 물질은 <그림 2.2.6.1>에서 보는 바와 같이 수 Å에서 μm 단위에 이르는 구조를 가지며, 이 구조를 이해하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 이 구조 또는 형태가 소자들의 성능과 깊은 관계가 있기 때문이다. 특히 제작 공정상의 문제점을 개선하기 위해, 온도 변이 또는 용매 기체 분위기에서 이러한 물질의 시간 또는 온도에 따른 구조 변이를 탐색하고자 하는 실험 환경은 매우 중요하다. 즉 새로운 촉매 또는 용매를 이용한, 제어가능한 In Situ 환경하에서 분자 단위로 성장하는 표면 유기층의 구조 또는 형태의 연구는 매우 중요하다.

고분자 태양전지, 고분자를 이용한 OLED, CNT (Carbon Nano Tube), 수소 저장 매체 또는 수소 전지 연구 분야에서 효율 또는 구조적 안전성에 대한 연구가 증가하고 있는 실정이다. 이러한 재료들은 효율 또는 안전성이 나노 구조와 많은 관련성을 갖고 있어 소각 산란 실험이 동반되고 있다. 또한 나노 단위 구조는 때로 인식하지 못하는 변형, 결함을 가진 평형상태, 장주기 상태에서의 미세 변형 등을 가지기 때문에 이러한 현상 관찰은 마이크로 빔을 이용한 SAXS 실험이 반드시 수반된다. 고분자를 포함한 나노 재료의 열, 압력에 따른 실시간 거동에 관한 연구가 시급하게 요구되고 있는 분야 중 하나이다.



<그림 2.2.6.1> 길이 수준에 따른 유기 박막의 구조와 형태

(2) 결맞음 SAXS 중요성

결맞음 소각 산란 빔라인에서 구현하고자 하는 실험기법은 결맞음 X선 빔을 이용한 마이크로 소각 산란 기법(μSAXS, Small Angle X-ray Scattering)과 X선 광자 상관 분광법(XPCS, X-ray Photon Correlation Spectroscopy)이다. 이 기법들은 수 Å에서 μm 단위에 이르는 다양한 구조를 가지는 유기 물질의 구조 또는 실시간 변이를 연구하는데 매우 적합한 방법이다. 4GSR의 언듈레이터 광원에서 나오는 고휘도의 광특성, 즉 매우 작은 emittance와 고강도의 flux로 인해 InSitu time-resolved 실험(1~2 msec 수준의 시간분해능)이 가능해지며, 결맞음 빔을 이용하여 고분자, 유기분자들의 Relaxation 거동을 관찰하는 동역학 연구를 가능하게 하는 XPCS 실험을 가능하게 할 것이다.

나. 빔라인 사이언스

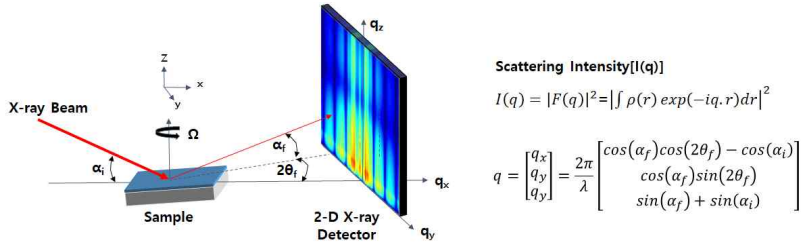
(1) μSAXS

○ μSAXS 실험기법에 대한 설명

마이크로 스침각 소각 산란 기법(μGISAXS, Small Angle X-ray Scattering)은 <그림 2.2.6.2>와 같이 입사하는 빔을 마이크로 수준으로 작게 만들어 시료에 입사하며, 박막 표면 또는 내부로 입사하여 산란한 X-ray를 2차원 검출기(2-D X-ray 검출기)로

측정하여 그 결과를 분석, 분자 결합 구조, 결정 크기, 그리고 분자들의 방향성을 측정하는 기법이다. 이 기법은 물질 표면의 원자 또는 분자 수준의 구조를 측정하는 주요 기법이다.

<그림 2.2.6.2>의 α_f와 $2\theta_f$를 측정한 후 2차원 검출기 내의 각 위치를 q 값으로 변환하여 물질의 구조를 분석하는 기법이다.



<그림 2.2.6.2> μGISAXS 실험장치 구성

○ 응용분야

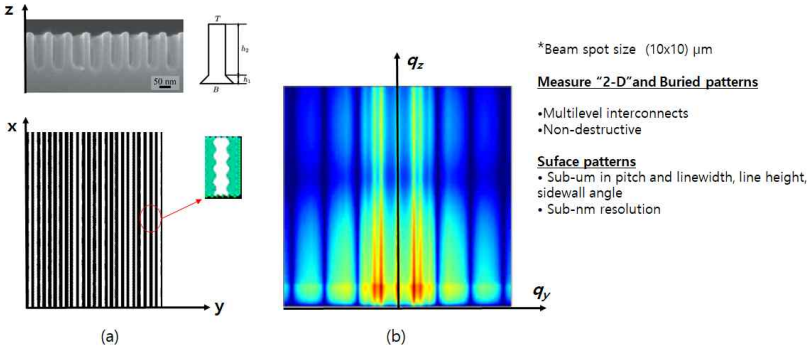
4GSR의 COSAXS 빔라인은 고분자 과학, 하이브리드 나노복합체 나노기술, 미세유체학 또는 박막 물리학과 같은 다양한 연구 분야에서 새로운 (GI)SAXS 및 (GI)WAXS 연구를 가능하게 하려고 한다.

4세대 방사 광원을 이용한 스침 소각산란 실험에서는 잘 시준된 빔을 활용하여 나노패터닝 시료 또는 나노입자 결합구조 측정 실험에 도입하려 한다. 또한 더 나아가 실험 조건(고온, 저온, 자기장, 전기장, 가스분위기, 습도)을 다양하게 구축하고, 표면 결정 성장과 방향성 또는 구조 전이 과정을 실시간으로 관찰할 수 있게 하려 한다. 이와 관련한 분야는 다음과 같다.

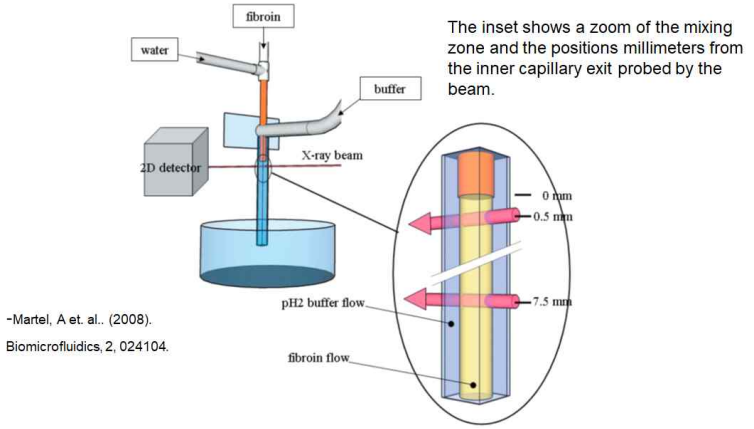
1. 나노 패터닝 물질 구조 측정 : sub μm 수준까지의 라인 폭과 높이 그리고 월 기울기를 nm 수준 분해능으로 측정 (<그림 2.2.6.3> 참조)
2. Microfluidics device를 이용한 연구 (<그림 2.2.6.4> 참조)
3. 스캐닝을 통한 유기 박막의 상분리에 따른 지엽적인 구조 변화
4. 분자 수준에서 새로운 촉매, 용매 환경하에서 물질 표면 유기층의 성장과 방향성을 μm 수준까지 실시간으로 탐구. 그 예로 나노입자 조립 공정, 결정 성장 그리고 박막 표면에서 입자의 수송과 같은 동적 프로세스의 시간 분해 연구

○ μSAXS 실험기법 구축을 요구조건

이 기법의 성공적인 구축을 위해서는 ~μm 수준의 빔사이즈를 가지고 잘 시준된 (collimation) 고강도의 빔이 요구되며, 그에 따른 광학 시스템을 구축할 것이다.



<그림 2.2.6.3> (a) 나노패터닝 물질과 (b) GISAXS 패턴



<그림 2.2.6.4> Microfluidic device를 활용한 μSAXS 실험 예

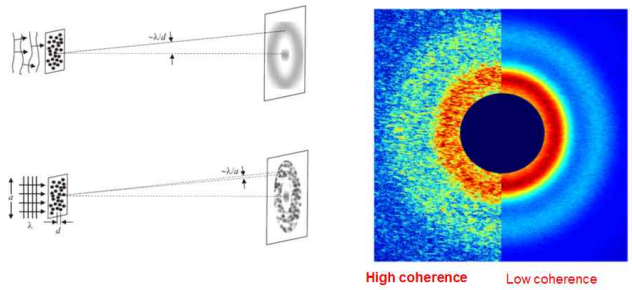
(2) XPCS

○ XPCS 실험기법에 대한 설명

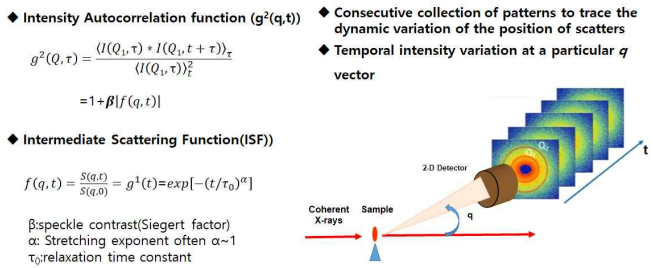
4GSR에서 결맞음 소각산란 빔라인은 결맞음 빔을 이용한 다른 실험기법을 포함하여, nm 수준 물질의 동역학을 연구하는 실험기법인 XPCS (X-ray Photon Correlation Spectroscopy)를 구축하고자 한다.

<그림 2.2.6.5>에서 보는 바와 같이 XPCS는 결맞음 X-선 빔이 무질서한 구조를 갖는 시료로부터 산란되어질 때 나타나는 speckle 패턴을 측정하는 것이고, <그림 2.2.6.6>에서처럼 XPCS는 speckle 유동의 시간 상관 함수를 측정하는 것을 기반으로 한다. 보통 시간 상관함수는 평형 동역학 (Equilibrium dynamics) 즉, 단일 speckle 상관함수(Single-speckle intensity-intensity autocorrelation function, g2(q,t))를 측정하고 Relaxation time을 구하는 것에 의해 이루어질 수 있다. 그리고 <그림 2.2.6.7>은 그 예이다.

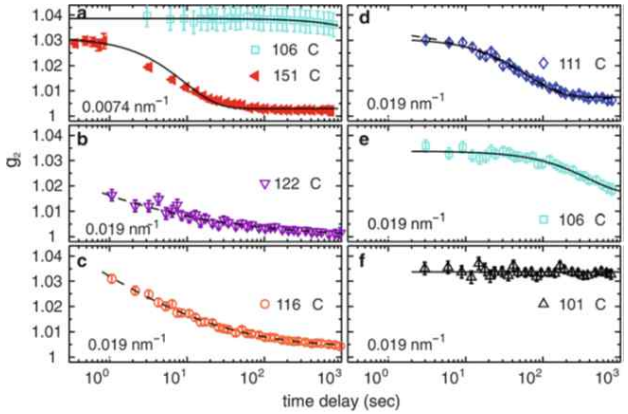
또한 2차원 검출기와 복수 speckle 기법이 결합 되면 two-time correlation functions g(2)(q, t1, t2)을 측정할 수 있게 되고 이는 non-stationary 또는 non-equilibrium dynamics를 측정할 수 있게 된다. 더 나아가 Higher order correlation functions g(n)(q, t)는 동적 특성 중 heterogeneities를 연구할 수 있게 된다.



<그림 2.2.6.5> 결맞음 빔과 speckle 패턴



<그림 2.2.6.6> XPCS setup과 이차 상관함수



<그림 2.2.6.7> Temporal autocorrelation functions obtained from a polystyrene film at various temperatures for (a) Q= 7.4 × 10^{-3} nm^{-1} and (b)-(f) Q=1.9 × 10^{-3} nm^{-1} (Jiang et al. 2008)

○ 응용 연구

XPCS 실험기법은 유리 전이에 가깝거나 상전이가 발생하는 시스템의 평형상태 또는 노화 (aging) 역학에 특히 중점을 두고 응축 물질 역학 연구에 XPCS를 적용하는 방법이다. 예를 들어 콜로이드-고분자 혼합물의 상분리 역학, 공기와 물의 경계면에서 잡혀있는 Au 나노입자의 운동, 점토(clay)와 유리의 동역학 등이다.

이들이 성공적으로 적용되는 CoSAXS 빔라인을 설계하려면 다음 두 가지가 매우 중요하다. 첫 번째로 시료 취급 기술의 개발이다. 액상에서의 단백질 응집과 같은 생물학적 시스템의 동역학 연구가 그 예이고, microfluidic device는 이를 가능하게 했다.

두 번째로 유리 동역학 (Glassy dynamics) 연구의 공간적 또는 시간적 이질성 연구를 가능하게 하는 결맞음 빔의 확보에 대한 것이다. 이는 고휘도 광원과 결맞음 빔의 수송과 대한 것이다. 작은 빔크기를 사용하여 더 작은 결맞음 빔 볼륨을 얻어야 하고, 신호 대 잡음비(SNR)는 휘도의 제곱승에 비례하므로 고휘도빔은 더 큰 SNR을 얻을 수 있다.

4GSR CoSAXS 빔라인에서의 Dynamics는 μsec~msec 수준의 동역학을 가능하게 하려 하며, 이 영역에서 이루어질 사이언스로 예를 들어 보면 다음과 같다.

- 유리 재질, 구동과 평형 이탈 시스템
- 콜로이드, 폴리머 및 나노 구조 복합 유체
- 용액 및 생체막의 단백질과 같은 생물학적 시스템
- 유체 표면 및 인터페이스에서의 역학
- 분자 역학 및 금속 및 배향 유리; 단단한 표면에서의 동역학
- 생물학적 과정의 동역학에 대한 μ-빔 SAXS 연구: 단백질 및 RNA 폴딩, 단백질 결정화 및 용매 조건 탐색 (냉동, 수화)

(대표적인 응용 분야)

상기한 응용 연구 중 대표적인 것이 유기 물질에 대한 유리 동역학의 적용이다. 상호작용이 매우 큰 콜로이드 서스펜션(현탁액)과 물질 시스템 즉 비평형 상태로 정지하고 유리 또는 겔을 형성하는 물질 시스템의 기본 메커니즘을 이해하는 것은 응집 물질 물리학의 근본적인 문제이다. 물질 시스템이 유리 전이 온도에 접근함에 따라 물질 시스템의 구조적 속성, 동역학은 명확한 이유 없이 속도가 느려지기 시작한다. 이러한 유리 또는 겔의 전이를 이해하는 것은 연성 물질 물리학에서 근본적인 관심을 끄는 문제이다. 상대적으로 느린 동적 이완 모드(Slow relaxation mode)는 분자 길이 척도에서 발생하며, 유리 시스템(Glassy System)은 XPCS에 매우 적합하다. 그리고 3세대 광원(ESRF ID10, APS 8ID)에서의 결과들은 그것을 보여주고 있다.

다. 목표사양

CoSAXS 빔라인에서는 고휘도의 빔 즉 고강도의 플럭스와 낮은 emittance를 가지는 결맞음 빔을 얻기 위해 언듈레이터 광원을 배치하였으며, 광원에서 인출되는 강력한 빔을 바탕으로 분광기 및 집속거울 그리고 빔시준장치를 배치하였다. 우선적으로 XPCS와 μSAXS 실험에 필요한 단색빔을 얻기 위해 분광기와 고차수 제거용 거울을 배치하였고, XPCS와 uSAXS 실험에 요구되는 빔사이즈를 확보하기 위해 집속장치 그리고 충분히 소각 분해능을 확보할 수 있도록 빔시준 장치를 배치하였다. 이러한 장치들에 의해 달성하려는 빔라인 주요 목표사양을 <표 2.2.6.1>에 보였다.

<표 2.2.6.1> 4GSR CoSAXS 빔라인 목표사양

구 분		내 용
Light Source	Undulator (IVU20)	3 m, 20 mm, 148, max. power : 9.6 kW
		Brilliance : ~5 × 10^{21} phs/s/mm^2/mrad^2/0.1%BW @ 8.1 keV
		Coherence fraction: 0.05 × 0.22
Photon energy (keV)	5~40 keV	9.6 ~ 17.7 keV for XPCS
Energy resolution (ΔE/E)	~1 × 10^{-4} Si (111)	-
	~3 × 10^{-5} Si (311)	
Beam size	~20 μm @ 2D detector	~ 2 μm @ sample for XPCS
Beam flux	10^{13} phs/s @ sample	10^{11} coherent phs/s @ sample for XPCS
Techniques	μ(GI)SAXS/WAXS	q-range : 0.25 ~ 1.3 × 10^{-3}Å^{-1} @ E=9.6 keV, SDD : 0.25, 3, 5~8 m
		Time scale for In-Situ Experiment : < 1 msec
	XPCS	SDD : 5~8 m, horizontal detector movement 2θ=0~30°
		Time scale : sub msec ~ hundreds of second
		Coherence length @ sample : ~0.02 mm × 0.09 mm

(1) μSAXS를 위한 빔라인 장치구성

μSAXS 분야에서는 최근 미세 유체 (Microfluidics) 분야가 대두되고 있다. 그리고 그 분야에서는 시료가 소형화되고 있고, 그에 따른 실험장치들이 요구된다. 실질적으로 X-선 빔 크기는 흐름 채널 (flow channel) 내부를 스캔할 수 있도록 하여야 한다. 이는 일반적으로 약 10~100 μm 정도이다.

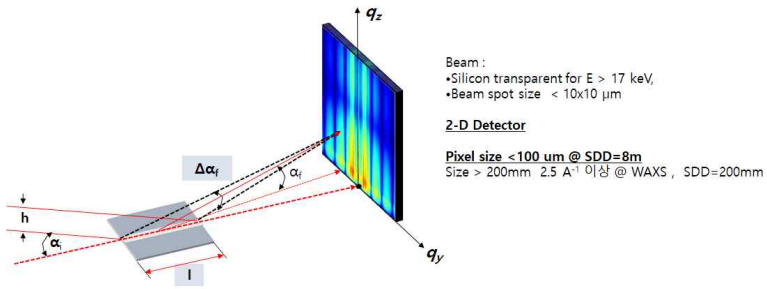
나노 패터닝 시료의 경우에 <그림 2.2.6.8>에서 보는 바와 같이 수직 방향의 작은 각분해능을 갖는 SAXS 실험이 요구되며, 이는 작은 빔 크기뿐만 아니라 작은 빔 발산을 갖게 하는 것도 중요하다. 특히 나노복합체 연구 분야에서 나노미터와 마이크로미터 규모 모두에서 물질의 구조와 형태를 특성화할 수 있게 하여야 한다.

주어진 샘플에서 검출기까지의 거리와 주어진 X선 에너지에 대해, SAXS 성능은 X-선 빔 크기와 발산각과 빔스톱 크기 그리고 검출기 픽셀 크기에 의해 주어지는 기하학적 조건에 의해 결정되는 최대 분해 가능 길이와 각분해능으로 표현된다.

빔 발산각이 작을수록, 최대 분해 가능 길이 스케일(Maximum Resolvable Length Scale)이 커진다.

CoSAXS 빔라인에서 실험장치의 기하학적 구조에 따라 최대 분해 가능 길이는 빔스토퍼 크기에 따라 결정된다. 예를 들어, 9.6 keV의 광자에너지와 8.0 m의 샘플-검출기 거리에서 SAXS 최대 분해 가능 길이는 현재 약 470 nm이다. 그러나 스침각 입사모드에서 각 분해능은 <그림 2.2.6.8>에서 보는 바와 같이 빔사이즈 가장 큰 요소이며 약 10 μm 수준을 요구한다.

샘플 위치에 빔의 초점을 맞추면 샘플 위치에서 실제 공간해상도가 높아져 국소 구조를 조사할 수 있다. 또한 X-선 빔에 대한 샘플 스캐닝과 μGISAXS를 결합할 수 있는 가능성은 특히 비균질 표본의 경우에 특히 중요하다. 스침 입사 시 표본의 빔 풋프린트(마이크로초점 빔)를 줄이는 것은 빔의 발산각을 줄이는 것에 비해 더 중요할 수 있다.



<그림 2.2.6.8> μGISAXS 실험장치에서 빔 사이즈에 따른 각분해능

(2) XPCS를 위한 빔라인 장치구성

XPCS 실험기법의 핵심은 결맞음 X-선 빔(Coherence X-ray Beam)의 확보이며, 주요 요소는 광원의 휘도(Brightness)이다. 이것은 결맞음 X선의 플럭스와 측정한

상관함수의 SNR(Signal to noise ratio)을 결정한다. 그리고 이 기법은 SAXS/WAXS 광학장치 구성하에서 XPCS 광학장치 구성을 갖추려고 한다.

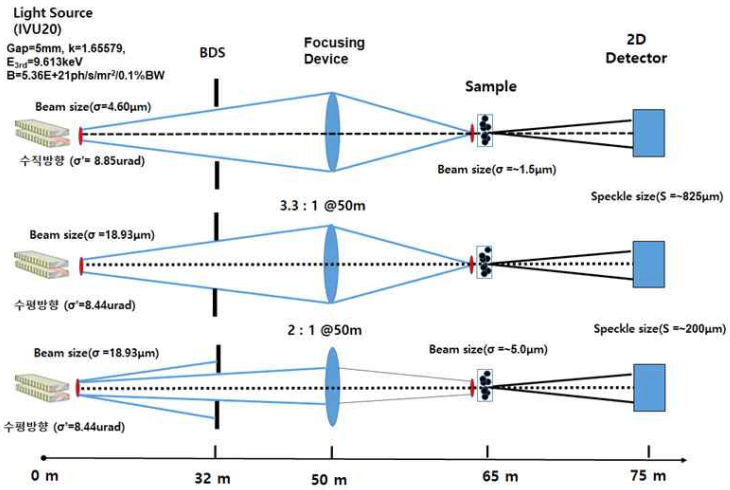
광자빔의 결맞음 X-선 빔에는 공간 결맞음 (Spatial coherence) 또는 시간 결맞음 (Temporal Coherence)의 두 가지 구성 요소가 있다. 특히 공간 결맞음 확보에 있어서 중요한 것은 speckle 패턴의 사이즈를 확보하는 것이다.

○ 공간 결맞음에 대한 요구조건

언듈레이터 방사광원은 멀리 떨어진 위치에서는 Gaussian 강도 분포를 갖게 되며, 시료 위치에서 결맞음 길이는 가로(x)와 세로(z) 방향의 간섭 길이는 ξx, $\xi z = \lambda L/2\pi\sigma_{x,z}$이다. 여기서 L은 광원으로부터 시료 위치까지 거리이며, $\sigma_{x,z}$는 수평 수직 방향 광원의 크기이다. CoSAXS 빔라인의 광원은 $\sigma_{x,z}$가(19 μm, 4.6 μm)이며, 집속장치의 위치는 대략 50 m 위치에 배치하였고, BD 슬릿 위치인 32 m 위치에서의 결맞음 길이는 각각 0.02 mm와 0.08 mm이다.

그러나 시료 위치에서 시료의 크기와 검출기 분해능과 SDD(Sample to Detector Distance)를 고려했을 때, 빔은 양방향으로 더 작은 크기로 집속되어야 한다. 각 speckle을 분석할 수 있는 최대 빔사이즈는 검출기 분해능과 SDD(Sample to Detector Distance)에 의해 결정된다. 즉 시료 위치에서 최대 빔사이즈 (D)는 $D=\lambda \cdot SDD/S$ 여기서 S는 speckle 사이즈이다. 검출기 분해능과 SDD는 공간적, 기술적 한계가 있으며, 검출기 Pixel 사이즈는 75 μm이며, SDD는 8 m로 설계하였다. CoSAXS 빔라인에서 speckle 패턴을 분석 가능하게 하려면 speckle 사이즈가 1 pixel 이상이 되게 하여야 하고, 빔사이즈 (1 sigma)는 11.0 μm 이하가 되어야 한다. 즉 SAXS 배치에서 XPCS를 수행하기 위해서 빔라인 광학장치는 시료 위치에서 빔사이즈 (1σ)가 11.0 μm 이하가 되게끔 하여야 한다.

빔집속은 다양한 방법이 있으며, CoSAXS 빔라인에서의 빔집속은 집속장치를 통해 이루어지며, 집속장치를 광원으로부터 50 m 위치에 배치하였다. <그림 2.2.6.9>는 그때의 배치도에 대해 시료 위치에서 결맞음 빔사이즈를 보였고, 요구되는 빔사이즈 이하가 됨을 보여준다. 집속장치를 이용한 2 : 1 빔 집속 시스템은 빔사이즈 (2σ)가 시료 위치에서 BD slit을 32 m에 위치 시켜, 수직 방향으로 20 μm, 수평 방향으로 80 μm로 잘랐을 때 검출기 위치에서 5.0 μm × 1.5 μm가 됨을 보였다. BD Slit에 의해 빔사이즈와 빔강도를 실험 조건에 따라 조정할 수 있게 하여야 한다. 그리고 측정 가능한 최대 speckle 사이즈는 ~825 μm × 200 μm 크기이다.



<그림 2.2.6.9> SAXS layout에서 XPCS를 위한 광학적 layout
a) 수직 방향 3.3:1, 시료 위치 빔집속,
b) 수평 방향 3.3:1,시료 위치 빔집속,
c) 수평 방향 2:1, Detector 위치에 빔집속

○ 시간 결맞음에 대한 요구조건

추가로 공간 결맞음 외에도 XPCS에서는 시간 결맞음도 필요하다. 빔의 시간 결맞음 길이는 단색성 $\Lambda = \lambda (E / \Delta E)$로 지정되며, 여기서 E는 광자에너지이고 ΔE는 에너지 스펙트럼의 반치폭(FWHM)이다. XPCS 실험에서는 시료 내에서 광 경로 길이 차이 (Optical Path Length, δ)가 시간 결맞음 길이 (Λ)보다 작은 것을 요구한다. 광 경로차 (OPL)는 두 가지에 의해 결정되는데 그 하나는 시료 두께와 시료에 조사되는 빔사이즈로 인해 생긴다. 일반적으로 Si (111) 또는 Si (311) 결정을 이용한 분광기는 0.1 nm 파장을 가진 빔에 대해 시간 결맞음 길이가 1~2 μm를 가지며, 유기 박막 실험에 있어서 시료 두께가 0.2 μm 이하임을 감안하면 크게 문제시되지 않는다. CoSAXS 빔라인에서 X-선 분광기에서는 실리콘 단결정 Si (311)과 Si (111)을 사용하고 8~30 keV에 이르는 에너지 영역에서 $\triangle E/E = 2 \times 10^{-4}$의 에너지 분해능을 얻게 하였다.

○ 결맞음 빔 확보

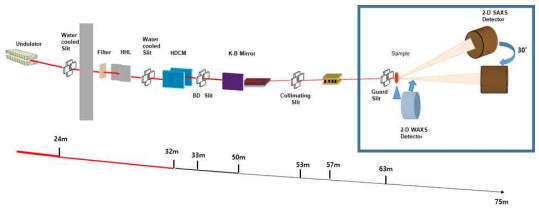
결맞음 빔확보를 위해 XPCS를 위한 광학장치의 설계는 다음 3가지 요건을 갖도록 할 것이다.

1. 결맞음빔의 보존을 위해 광학적 장치, 윈도우, 미러 등과 같은 장치의 수를 최소화
2. 결맞음 빔의 플럭스를 최대화
3. 장치의 열, 진동, 그리고 역학적 안정성을 최대화

라. 빔라인 장치 구성

<그림 2.2.6.10>은 결맞음 소각산란 빔라인 배치도를 나타냈다. 언듈레이터를 X-선원으로 하며 광학장치인 분광기(monochromator)와 집속거울(focusing mirror)이 있으며, 슬릿 장치들로 구성된 빔시준 시스템이 있다. 그리고 빔시준 시스템은 5-슬릿 시스템을 이용하며, X-선 빔 가공용 슬릿 장치, 시준용 슬릿 장치 그리고 가드 슬릿 장치로 구성한다.

본 빔라인은 X-선 빔 근처인 극소각 영역에서 실험을 하기 때문에, 방사광원으로부터 발생한 X-선 빔을 가공용 슬릿으로 정확하게 가공하고, 정밀하게 적합한 빔 크기로 조정한 다음 광학장치인 분광기와 집속 거울에 입사한다. 이 광학장치를 통해 빔 에너지 선정과 고차 빔을 제거한 후 시준 슬릿에 의해 X-선 빔을 시준한 후, 여러 장치로부터 발생한 기생 X-선 산란을 가드 슬릿에 의해 최종적으로 막는다. 그리하여 잘 시준 된 X-선 빔을 시료에 조사하여 측정한다. <표 2.2.6.2>에 주요 장치 목록을 보였다.



<그림 2.2.6.10> CoSAXS 빔라인 배치도: 에너지 분광 장치 : HHL HDCM, 빔 집속장치: KB Mirror, CRL, 실험장치 : sample stage, flight path, 2D-검출기.

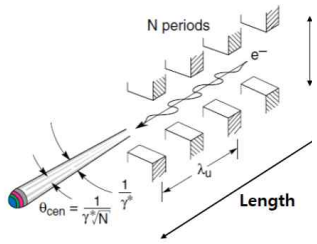
<표 2.2.6.2> CoSAXS 빔라인 주요 장치 목록

Distance (m)	Component	Description/Comments
24	Slits	HHL White beam slits, W edge blade, Water cooled, Hor. & Ver
26	Filter	CVD, carbon
28	Mirror	HHL (Low pass filter), White Beam mirror, Reflecting, flat, Watercooled
27	Screen & bpm	Screen & Beam profile monitor
29	Mirror	Collimating, White Beam mirror, Reflecting, flat, Watercooled
30	Slits	HHL White beam slits, W edge blade, Water cooled, Hor. & Ver
31	Screen & bpm	Screen & Beam profile monitor
32	DCM	HDCM
33	Beam Defining slit	-
34	Screen & bpm	Screen & Beam profile monitor
49.5	Mirror V-KB	Mirror, Kirkpatrick-Baez bendable, Vertical
50.5	Mirror H-KB	Mirror, Kirkpatrick-Baez , Horizontal
53	Collimating slit	-
54	Screen & bpm	Screen & Beam profile monitor
57	CRL	-
59	Screen & bpm	Screen & Beam profile monitor
63	Guard slit	-
63	Sample	-
63-75	Flight path	Adjustable flight path, Vacuum
75	Beam stop	Beam stop, Pb

(1) 광원

본 빔라인의 광원은 언듈레이터를 사용하였으며, 결맞음 소각산란 빔라인의 언듈레이터는 전장길이는 3 m인 IVU20이고, <그림 2.2.6.11>에 IVU20의 주요 parameter를 나타내었다.

구분	내용
No. of magnet periods (N)	148
Period length (λu, mm)	20
B_0 (T)	0.88665
Maximum K Value	1.65579
Gap distance (mm)	5 ~ 16
Flux (ph/s/0.1%B.W) 3rd harmonics	**~4.0 × 10^{15}**
Coherent fraction 3rd harmonics	**0.05(H) × 0.22(V)**
Coherent flux (photons.s^{-1}0.1%B.W)	**4.48 × 10^{12}**
Max. totoal power (kW)	**12.5**

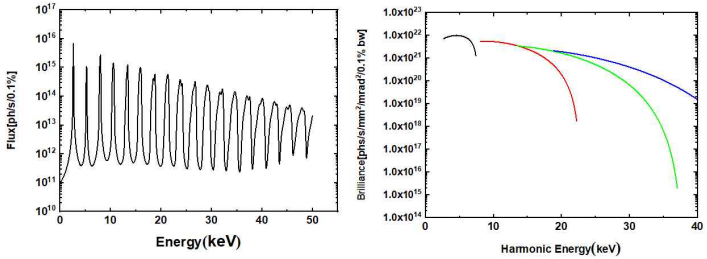


<그림 2.2.6.11> IVU20의 주요 parameter

○ 빔 플럭스와 스펙트럼 특성

언듈레이터의 특성상 주어진 갭의 간격에서, 즉 주어진 휨 상수 K값에서 빔의 에너지는 조화수(harmonics)로 나타난다. 본 광원의 최소 Gap 길이는 5 mm이고, 그때의 최대 K값은 1.9069이다. 그리고 <그림 2.2.6.12> (a)에는 Gap 길이 5 mm일 때, 언듈레이터 광원으로부터 인출되는 빔의 에너지에 따른 플럭스를 보여준다. 1번째 조화수의 에너지 2.6959 keV이고 XPCS, μSAXS 실험에서 주로 사용하는 조화수는 3번째일 것이고, 그때의 빔 에너지는 8.0876 keV이고, flux는 2.39 × 10^{15} phs/0.1%BW 이다.

<그림 2.2.6.12> (b)에는 gap 길이를 5 mm(K = 1.9069)에서 16 mm(K = 0.2219)까지 변화시킴에 따라 언듈레이터에서 인출되는 조화빔의 휘도를 나타냈으며, 3번째 조화수에서는 8.08 keV에서 22.00 keV까지 변화한다. Flux는 ~10^{15}에서 ~10^{11}으로 감소한다.



<그림 2.2.6.12> (a) Gap=5 mm, K=1.9069일 때 언듈레이터에서 인출되는 조화 빔과 빔의 에너지와 플럭스, (b) K값의 변화에 따른 언듈레이터에서 인출되는 조화 에너지와 휘도

○ 빔 크기와 빔 퍼짐 특성

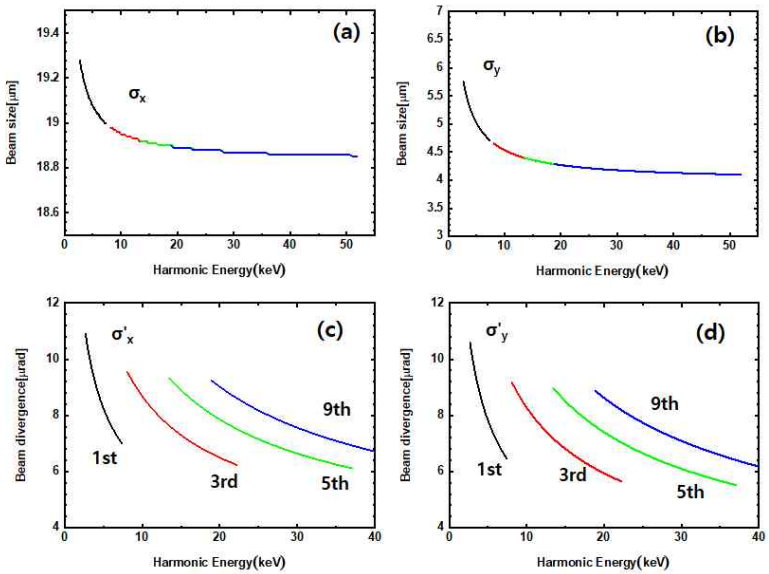
광원에서의 빔의 크기도 앞서 살펴본 빔 퍼짐 특성과 비슷하게 구할 수 있다. 즉 한 개의 전자에서 나오는 빔의 크기는

$$\sigma_{photon} = \frac{\lambda_\mu}{4\pi\gamma}\sqrt{\frac{N(1+\frac{K^2}{2})}{n}} \quad \text{(수식 2.2.6.1)}$$

이고, 전자 다발의 크기를 고려하면 다음과 같다.

$$\sigma_{eff} = \sqrt{\sigma_{electron}^2 + \sigma_{photon}^2} \quad \text{(수식 2.2.6.2)}$$

이를 이용하여 K값에 따른 광원의 크기를 그려보면 <그림 2.2.6.13> (a), (b)와 같다. 따라서 조화수 3번째에서 모든 에너지에서 대략 빔사이즈는 (σ_x, σ_y) = (~19 μm, ~4.5 μm)이다.



<그림 2.2.6.13> K값의 변화에 따른 언듈레이터에서 인출되는
조화빔의 사이즈와 발산각 (K = 1.9069 - 0.2219, Gap = 5 mm ~ 16 mm)

언듈레이터의 특성 중 하나인 작은 빔 사이즈와 빔 퍼짐각은 큰 밝기의 방사광을 얻게 한다. 한 개의 전자에서 발생되는 빔의 퍼짐각은 (수식 2.2.6.3)으로부터 얻을 수 있다.

$$\sigma'_{photon} = \frac{1}{\gamma}\sqrt{\frac{(1+\frac{K^2}{2})}{2nN}} \quad \text{(수식 2.2.6.3)}$$

(수식 2.2.6.3)으로부터 K값에 따라서 빔 퍼짐각이 커짐을 알 수 있으며, gap 길이가 커질수록 (즉, 고에너지일수록) 작은 각으로 방출됨을 알 수 있다. 실제 방출되는 방사광은 전자 다발에 의해 발생하기 때문에 다음과 같이 전자빔의 퍼짐각을 고려하여 방출된다.

$$\sigma'_{eff} = \sqrt{\sigma'^2_{electron} + \sigma'^2_{photon}} \quad \text{(수식 2.2.6.4)}$$

Gap 길이를 마찬가지로 5 mm에서 16 mm까지 변화시킬 때, K값에 따른 방사광의 퍼짐각을 그려보면 <그림 2.2.6.13> (c), (d)와 같다. 따라서 조화수 3번째에서 모든 에너지에서 발산각은 대략 ($\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$) = (~8.0 μrad, ~8.0 μrad) 정도의 퍼짐각으로 방출됨을 알 수 있다.

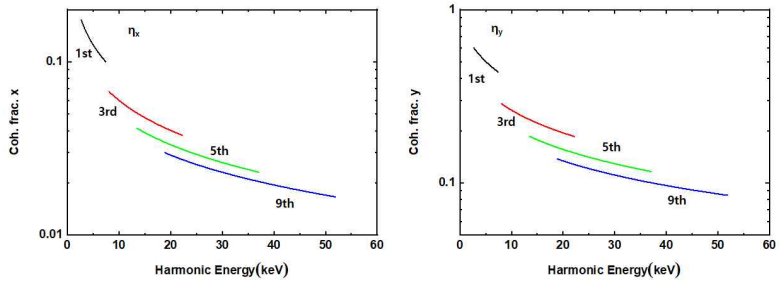
○ 결맞음 빔 특성

언듈레이터에서 인출되는 빔은 언듈레이터로 먼 거리에 있을 때 Gaussian(Gaussian) 형태의 발산각과 공간분포를 갖게 되고 그 중 결맞음 빔은 $2r_0 \cdot \Theta = 2\sigma \cdot \sigma' = \lambda/2\pi$'라는 조건을 만족하는 축 방향 주변의 일부분 빔이다. 그러므로 결맞음 빔의 분율(η)은 공간상의 입체각의 비율이므로 $\eta = (\lambda/2\pi)/(2\sigma \cdot \sigma')$이다. 그리고 결맞음 flux는 (수식 2.2.6.5)와 같이 표현할 수 있다.

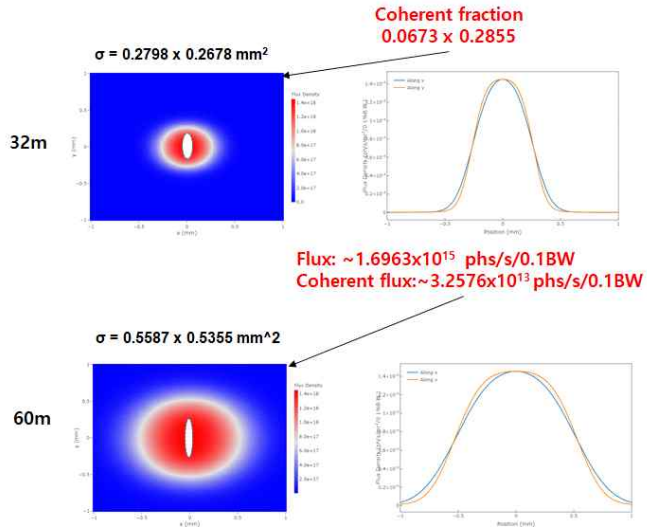
$$P_{coh\frac{\Delta\lambda}{\lambda}} = \eta \cdot \frac{(\frac{\lambda}{2\pi})^2}{(d_x \cdot \sigma'_x)(d_y \cdot \sigma'_y)} \cdot N\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot P_{cen} \quad \text{(수식 2.2.6.5)}$$

<그림 2.2.6.14>는 결맞음 빔의 분율과 flux를 보였다. <그림 2.2.6.15>에는 광원으로 30 m와 60 m 위치에서 빔사이즈와 결맞음 빔의 크기를 보였다.

결맞음 빔의 길이(1σ)는 $\zeta x,y = \lambda L/(2\pi/\pi\sigma x,y)$를 사용하여 계산하였다. 빔모양을 정의하는 슬릿(Beam defining slit)은 광원으로부터 32 m에 배치하였으며, 이 슬릿의 개구 사이즈는 FWHM을 고려하여 결정할 것이다. SNR과 빔강도를 고려하여야 하기 때문이다.



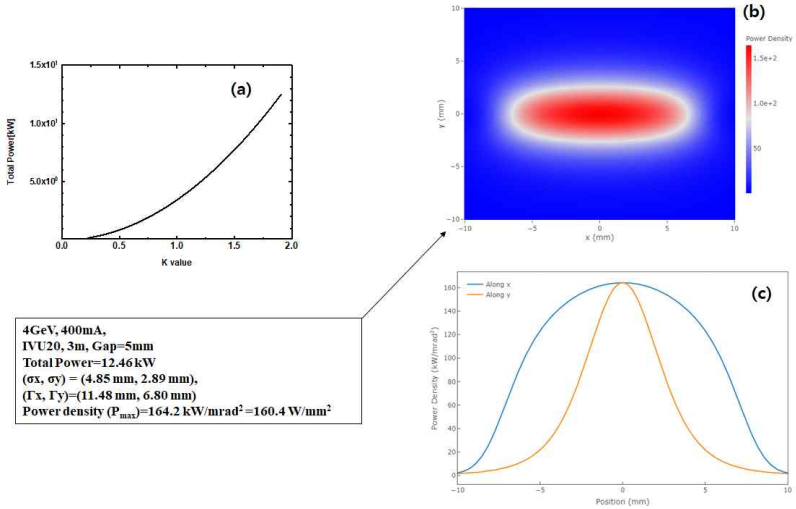
<그림 2.2.6.14> K값에 따른 결맞음 빔의 수평 수직 방향의 분율



<그림 2.2.6.15> 광원으로 30 m와 60 m 위치에서 빔사이즈와 결맞음 빔의 크기

○ 빔 파워 특성

<그림 2.2.6.16> (a)는 언듈레이터에서 방출되는 빔의 전체 파워(total power)를 K값에 따라 표시한 그림이다. Gap 길이가 5 mm일 때, 12.46 kW 방출되고 있으며, <그림 2.2.6.16> (b), (c)는 광원으로 32 m 위치에서 빔 파워의 공간분포를 보여주고 있으며, 빨간선은 수직 방향의 분포를, 검은선은 수평 방향의 분포를 나타낸다. 수평, 수직 방향 모두 0.6 mrad 이내로 파워가 분포함을 알 수 있다.



<그림 2.2.6.16> (a) K값의 변화에 따른 언듈레이터에서
인출되는 전체파워. (K=1.9069 ~ 0.2219, Gap=5 mm ~ 16 mm),
(b), (c) 광원으로부터 32 m 위치에서 빔파워의 공간분포)

(2) 빔인출 장치와 분광기

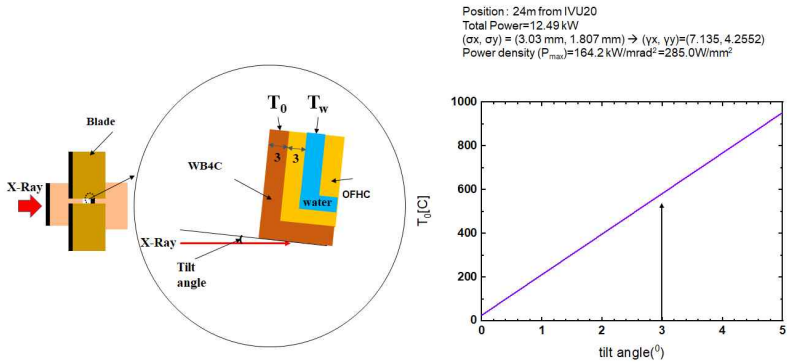
CoSAXS 빔라인의 광학 설계에서 고려되는 주요 사항은 결맞음 빔의 보존이다. 윈도우를 최소화하고 광학장치의 면을 최대한 연마(Polish)하여야 한다. 그리고 열적 변형을 최소화하여야 한다. 주요 목표는 1.0 μrad 또는 그보다 더 낮은 기울기 오류(slope error)를 가지도록 하는 것이다. 모든 중요 장치의 기계적 설계는 전반적인 안정성에 특별히 주의를 기울여야 한다. 빔라인 배치도의 주요 장치는 Front_End 내에서 시작하여 배치하였다.

DCM 내부로 빔을 인출하기 위한 시스템은 White Beam Slit과 High Heat Load Mirror 그리고 White beam slit 2 그리고 분광기(DCM)로 구성하였다. (<그림 2.2.6.10> 참조)

○ White beam slit 1

White Beam slit 1은 불필요한 빔을 제거하고, 광원의 On-axis를 중심으로 DCM 내부로 입사시킬 빔을 만들어 내는 역할을 한다. 빔사이즈 1 mm × 1 mm 크기의 빔을 만드는 역할을 한다. 보통 White beam slit 1은 수냉식 GlidCop 본체 또는

OFHC 본체로 만들고 모서리 부분에 텅스텐(WB4C)을 이용하여 Knife edge 형태로 제작하며, 빔을 가공할 수 있도록 만든다. 그리고 이들은 스테핑 모터가 장착된 XY stage 위에 설치한다. 그리고 블레이드는 단위 면적당 흡수되는 열량을 감소시키기 tilt angle을 갖게끔 제작한다. <그림 2.2.6.17>에 슬릿의 대략 구조와 Tilt angle에 따른 열 흡수량과 온도를 보였다. 이 슬릿은 광원으로 24 m 위치에 설치할 예정이며, 이 위치에서의 빔사이즈(FWHM)는 (7.135 mm, 4.255 mm)이고 Power density 285 W/mm^{2}이다. <그림 2.2.6.17>에서 보듯이 tilt angle을 3° 이하로 하여야 한다. White Beam slit의 기본 사양을 <표 2.2.6.3>에 보였다.



<그림 2.2.6.17> White Beam slit blade 개략도

<표 2.2.6.3> White Beam Slit 1의 제작에 대한 요구사양

Item	사양
Beam aperture Material	WB4C
Range	± 10 mm
Resolution	< 1 μm
Repeatability	< 1 μm
Translation (Drive)	Stepper motor (Encoded)
Cooling	Water
Tilt angle	< 3°

○ High heat load beam mirror

HHL mirror (High heat load mirror)는 분광기로 입사하는 빔에 의한 열부하를 줄이고, DCM에서 발생하는 고차수(High order harmonics)에 해당한 에너지를 가진 X-선 빔을 제거하는 역할을 한다. 이는 두 개의 평판형 (flat) 거울로 이루어지며, 첫 번째 거울은 전반사 거울이며, 두 번째 거울은 첫 번째 거울로부터 반사되어서 입사한 빔을 시준(Collimating mirror)하는 역할을 한다. 거울 표면에 두 개의 물질(Rh 스트립 또는 Pt 스트립)은 100 nm 두께의 스트립 형태로 코팅된다. 수직 이동을 통해 거울 표면의 다중 스트립 (Rh 스트립 또는 Pt 스트립) 중에서 선택할 수 있다.

입사각을 줄이면 더 작은 편향각을 제공하여 collimating 거울 간 더 많은 공간을 차지하게 되고 미러 반사율이 증가하게 된다. 입사각을 2.0 mrad에서 3.0 mrad으로 조정 가능하게, Rh 코팅 스트라이프를 사용하였을 때, 차단 에너지(Cut off 에너지)를 20 keV로 하려고 한다. 그 이상의 에너지는 Pt 스트라이프를 사용할 것이다.

<표 2.2.6.4>에 거울 사양을 보였고, 거울 크기는 입사빔의 크기를 1.0 mm로 하였을 때 거울 크기를 결정한 것이다. 거울 구조는 수평 반사 구조로 할 것이다. 거울은 두 개의 스트라이프를 가질 것이고, 각각에서 빔의 풋 프린트는 ~500 mm이다.

표면의 연마와 전반적인 평탄도는 이 요소의 결맞음 유지에 있어서 가장 중요하다. XPCS 샘플에서 나오는 speckle 패턴에 영향을 주지 않는 기울기 오차(Slope error)는 ~3 μrad 보다 작아야 한다는 사실을 감안할 때, 0.5 μrad 보다 훨씬 낮은 기울기 오차(slope error)가 필요할 것으로 판단된다. 열에 의한 변형을 포함해서 같은 범위 내에서 유지되어야 한다. 이는 빔이 입사되었을 때 표면온도가 1 ℃ 이상 증가하지 않음을 의미한다.

<표 2.2.6.4> HHL Mirror 주요 사양

Optical element	M1(Hor)_1st	M2(Hor)
Shape	Flat	Flat
Incidence beam size (mm)	1.0	1.0
Source distance (mm)	29	30
Incident angle (mrad)	2.0 ~ 3.0	2.0 ~ 3.0
Max. Slope error (μrad)	0.5	0.5
Foot print (L × W) (mm)	500 × 1	500 × 1
Rh, Pt Stripe Coating thickness (nm)	100, 100	100, 100
Substrate	Si	Si

Harmonic rejection (Rh, Pt: 8.0 ~ 30.0 keV),
High heat load and reflecting, flat mirror : R > 100 km

○ White beam slit 2

수냉식 슬릿의 두 번째는 시준을 허용하고 다운스트림 구성요소의 power 부하를 추가로 줄이고 White Beam slit 1로부터 발생하는 기생 산란을 차단하기 위함이다. Power density가 국부적으로 높을 수 있기 때문에, 이것은 White beam slit 1과 동일한 설계를 할 것이다.

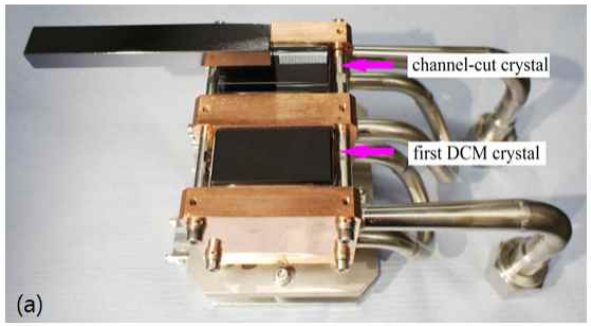
○ 분광기(DCM)

DCM (Double Crystal Monochromator)은 (1) 에너지 분광 (monochromatic 빔을 백색빔으로부터 분리), (2) 매우 높은 단색성을 갖게 하며, (3) 언듈레이터로부터 오는 고열을 차단하여 monochromator 다운스트림 구간에 설치된 중요 장치를 보호하는 역할을 한다.

CoSAXS 빔라인에서 DCM은 광원으로부터 32.0 m에 위치시키고, DCM에 입사하는 빔사이즈를 1 mm × 1 mm로 하였다. DCM의 분광 에너지 영역을 Channel-Cut DCM에 대해서는 8~20 keV 그리고 fixed exit mode 용 DCM은 8~30 keV로 하였다.

그리고 DCM 구성은 <그림 2.2.6.18> (a)에서 예시한 구성을 사용할 예정이다. 또한, <표 2.2.6.5>에 기본 사양을 표시하였다. 결정은 Si (111)을 사용할 것이다. 열적 안정성과 기계적 안정성을 고려하지 않으면 시간 결맞음 길이(Temporal Coherence length)는 파장 0.1 nm 일 때 ~1 μm이며, 이는 XPCS, GISAXS 모드로 실험할 경우 충분한 길이이다.

일반적으로 DCM의 성능은 열변형(thermal deformation)과 극저온 냉각에 따른 또는 모터 구동 시 발생하는 진동을 억제하는 정도(Angular stability, PETRAIII, 100 nrad 보다 작음)에 따라 좌우된다. 작은 각도 안정성을 달성하기 위해 두 결정 사이의 수직 오프셋을 작게 유지되어야 하고, 기계 설계는 안정 성능 기반으로 설계할 것이다.



<그림 2.2.6.18> DCM 구성 사양 (a) DCM 구성 예시

<표 2.2.6.5> DCM 기본 사양

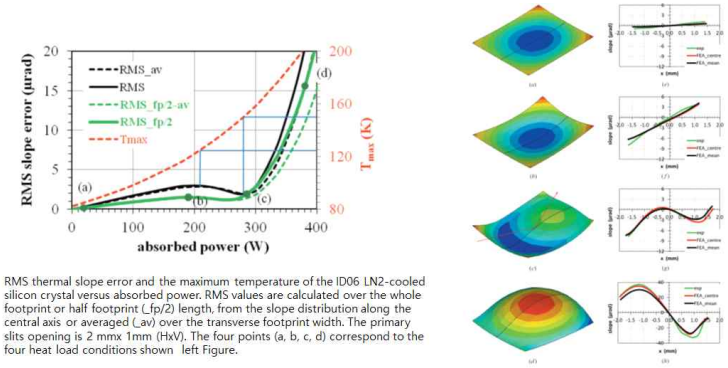
구분	내용	
Photon energy (keV)	8 ~ 30	8 ~ 37
Energy resolution	**$\Delta E/E < 1 \times 10^{-4}$**	**$\Delta E/E < 1 \times 10^{-4}$**
Crystal	**Si (111)**	**Si (111)**
Cooling	LN2 cooled / Side cooling	LN2 cooled / Side cooling
Operation	Fixed exit operation, closed loop (encoder) feedback	Channel Cut
First crystal size (mm)	50	50
Second crystal size (mm)	150	150
Slope Error (열변형 포함)	< 1 μrad	< 1 μrad
Vibration	-	-

DCM 운전은 SAXS 실험의 경우 Fixed exit 모드로 운전할 것이며, XPCS 실험의 경우 Channel-Cut DCM을 사용할 것이다. 이때 빔을 중심에 입사되도록 광축 정렬을 하여야 한다. 그러면 빔의 수직/수평축 중심선은 광원의 On-axis와 일치하게 되고 이 광축 정렬선이 첫 번째 Crystal의 중심선이 되므로 이 지점을 DCM의 수평 회전축에 정확하게 일치시켜 구동시키게 된다. 즉 빔을 Half cutting 한 후 회전각만큼 돌려야 한다. Vertical Offset은 25 mm로 한다.

○ DCM의 1st 결정의 열부하

Si (111) 결정판 두 개로 구성된 DCM에 입사하는 X선 빔으로 인해 Si (111) 결정은 표면에서 열팽창이 일어나고, 그로 인해 Si (111) 결정판은 열변형(thermal deformation)이 일어나게 된다. 이 열변형이 일어난 결정판을 통과한 결맞음 빔(Coherent Beam)은 손상을 입게 된다. 그래서 Coherent 빔을 사용하는 빔라인에서는 High heat load 문제는 매우 중요한 문제이다. 그리고 첫 번째 결정에 대한 열 변형은 두 가지 에러를 만든다. 에너지 분해능의 브로드닝(Broadening)과 기울기 오류(Slope errors)이다. 그리고 slope 에러는 결맞음을 보존하기 위해 집속 거울들만큼 낮게 유지되어야 한다. 이러한 이유로 DCM은 액체질소로 극저온 냉각하여야 한다.

CoSAXS 빔라인은 DCM 위치에서 언듈레이터 광원으로 인한 열부하(Total power: 160 W/mm^2)로 매우 크다. <그림 2.2.6.16>에 열부하 분포를 보였다. 그러나 <그림 2.2.6.18>에서 보듯이 Copper block에 장착한 Crystal과 LN2-cooled/Side cooling 방식을 취하고 있는 것을 보여주고 있다. 그리고 <그림 2.2.6.19>는 관련 논문에서 추출한 데이터이다. 입사하는 X-선 빔에 의한 흡수 파워가 약 300 W 미만일 때 열변형에 따른 slope error가 약 1 μrad임을 보여주고 있다.



RMS thermal slope error and the maximum temperature of the ID06 LN2-cooled silicon crystal versus absorbed power. RMS values are calculated over the whole footprint or half footprint (_fp/2) length, from the slope distribution along the central axis or averaged (_av) over the transverse footprint width. The primary slits opening is 2 mmx 1mm (HxV). The four points (a, b, c, d) correspond to the four heat load conditions shown left Figure.

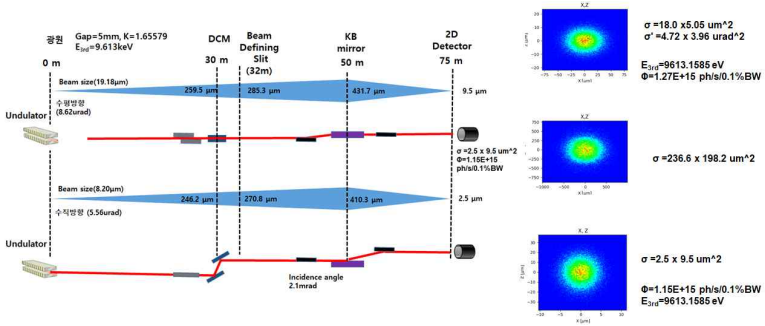
<그림 2.2.6.19> LN2-cooled/Side cooling 방식을 사용한 DCM의 기울기 오차 (slope error) (Jin Zhang et. Al. 2013)

○ Channel Cut DCM

주어진 오프셋을 일정하게 유지하고 넓은 에너지 영역을 확보하기 위해, Fixed exit 형태의 monochromator에서는 두 번째 결정을 수직 수평으로 크게 움직일 수 있어야 한다. 그리고 열변형을 방지하기 위해, 액체질소에 의한 두 개의 결정판 각각에 대한 극저온 냉각은 필수적이다. 또한 필연적으로 극저온 냉각은 두 결정판의 각각에서 각 진동을 유도하며, 이는 monochromatic 빔의 빔 사이즈를 증가시키게 된다. 그러나 이를 해결하기 위한 방법 중 하나는 한 몸체로 이루어진 채널 컷 형태의 결정판을 사용하는 것이다. 그러나 채널 컷 형태의 monochromator는 두 가지 단점을 가진다. 그 하나는 에너지에 따라 exit offset (첫 번째 결정판과 두 번째 결정판 간의 높이)이 달라진다는 것이고, 둘째는 두 번째 결정판의 한정된 크기로 인해 최대 에너지가 결정된다. 그러나 채널 컷 형태로 설계된 monochromator는 fixed exit 형태의 monochromator에 비해 매우 높은 각 안정성을 갖는다. 빔 파면의 균질성 즉 wave front의 보존은 XPCS 실험에서는 매우 중요한 특성으로 CoSAXS 빔라인의 XPCS 실험에 도입할 것이다.

(3) 빔 집속장치(Focusing mirror)와 결맞음 보존

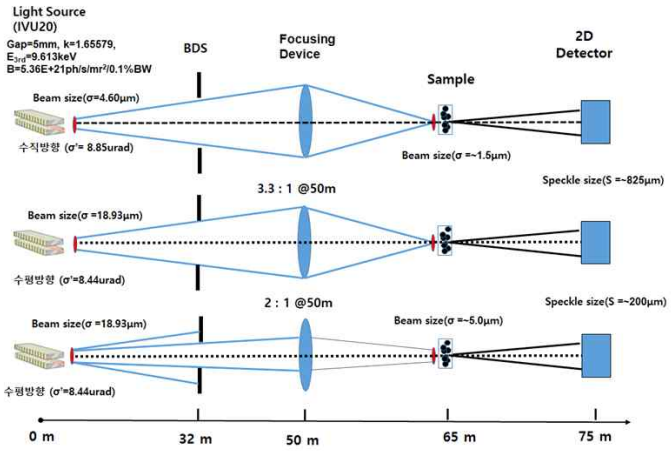
CoSAXS 빔라인에서 μSAXS 실험은 빔 발산각을 최소화시키기 위해 빔집속 위치를 검출기 위치 (방사광원으로부터 75 m 위치)에 둔다. 방사광원으로부터 50 m 위치에 빔 집속장치를 배치하고 Raytracing 결과는 <그림 2.2.6.20>에 보였다.



<그림 2.2.6.20> KB Mirror 배치와 μSAXS layout에서 Ray tracing 결과

XPCS 실험 시 최대 speckle 사이즈를 ~800 μm를 만들고자 한다. 그러기 위해서는 시료 위치에서 결맞음 빔 사이즈는 2 μm를 만들어야 한다. 그러기 위해서

방사광원으로부터 50 m 위치에 빔 집속장치를 배치하고, 빔집속 위치를 광원으로부터 65 m로 하였을 때 <그림 2.2.6.21>에서 보듯이 수직 방향 빔사이즈는 1.5 μm로 하여 달성할 수 있다. 그러나 수평 방향 빔 사이즈는 5 μm가 된다. BDS (Beam defining slit)에 의해 빔 사이즈를 반 이상 잘라서 쓰게 된다.



<그림 2.2.6.21> SAXS layout에서 XPCS를위한 광학적 layout
a) 수직 방향 3.3:1, 시료 위치 빔집속
b) 수평 방향 3.3:1, 시료 위치 빔집속
c) 수평 방향 2:1, Detector 위치에 빔집속

집속장치를 KB 집속 거울을 사용할 경우의 집속 거울의 주요 사양을 <표 2.2.6.6>에 보였다. 단색광이 3 mrad 이하로 입사되면 거울 면에서 전반사되므로 열부하는 무시할 수 있어 냉각장치가 필요하지 않다. 광원으로부터 65.0 m 지점인 시료 위치에 집속되도록 하였다. 집속거울의 코팅은 사용 에너지 영역(5~30 keV)에서는 로듐(Rhodium)으로 하였다.

<표 2.2.6.6> KB Mirror 주요 사양

Item		Mirror1	Mirror2
Type		Ellipsoid	Ellipsoid
Function	Focusing	Vertical	Horizontal
	Position	Upward	Rightward to beam direction
Optical surface	Footprint (mm^2)	500 mm × 1.5 mm	500 mm × 1.5 mm
	Sagittal Radius Rs (mm)	69.8	66.79
	Tangential Radius ms (km)	15.9155	15.228
	Surface roughness	< 3 Å RMS	< 3 Å RMS
	Tangential slop error	< 1 μrad RMS	< 1 μrad RMS
	Sagittal slop error	< 1 μrad RMS	< 1 μrad RMS
	Bending resolution	0.05%	0.05%
Coating material & thickness		Rh, > 100 nm	Rh, > 100 nm
Substrate (Binder)		Single crystal silicon	Single crystal silicon

○ 집속장치로 CRL을 사용할 경우

CoSAXS 빔라인에서는 1D와 2D를 결합한 CRL을 추가적으로 검토하고 있다. 그에 따라 추가적으로 생기는 장단점은 다음과 같다.

- 장점

1. 열팽창에 따른 열적 그리고 열역학적인 불안정성을 KB mirror에 비해 안정적이다. 그에 따른 slope error도 무시할 만큼 적다.
2. KB mirror처럼 결맞은 빔의 방향을 바꾸는 것에 따른 wavefront의 왜곡이 매우 적다.
3. 광원의 빔사이즈가 수직과 수평이 비대칭적이고, 수직 빔사이즈가 수평 방향 빔사이즈의 1/4 정도이다. 그래서 1D & 2D CRL을 결합하여 이를 조정할 수 있다.

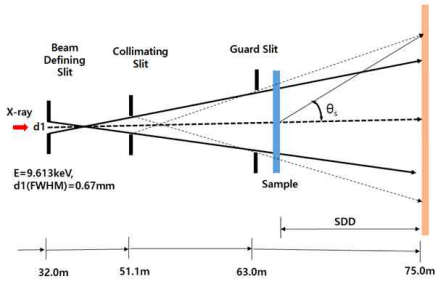
- 단점

1. CRL은 흡수에 의한 플럭스 감쇄(약 1/10)와 렌즈의 측면 roughness 그리고 강한 색수차를 가지는 단점이 있다.

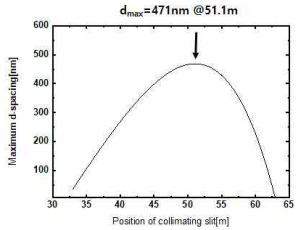
(4) 빔 시준 장치 (Beam Collimation System)

소각 산란 빔라인은 X-선 빔 근처인 극소각 영역에서 실험을 하기 때문에, 언듈레이터로부터 발생한 X-선 빔을 가공용 슬릿(Beam Defining Slit)으로 정확하게 가공하고, 정밀하게 적합한 빔 크기로 조정한 다음 광학장치인 monochromator와 집속거울에 입사한다. 이 광학장치를 통해 빔 에너지 선정과 고차 빔을 제거한 후 시준 슬릿(Collimating Slit)에 의해 X-선 빔을 시준한 후, 가공용 슬릿에 의해 빔을 가공할 때 발생한 기생 X-선 산란을 가드 슬릿(Guard Slit)에 의해 최종적으로 막는다. 그리고 잘 시준 된 X-선 빔을 시료에 조사하여 측정한다. 이러한 이유로 빔시준 시스템을 구성하는 슬릿 장치는 소각 산란 빔라인에서 필수 장치이다.

본 장치는 슬릿 블레이드, 블레이드 수송 시스템 그리고 진공 챔버로 구성된다. 슬릿 블레이드(Slit Blade)는 X-선 빔을 상하좌우 방향으로 자르기 위하여 4개의 슬릿 블레이드로 구성하며, 각 슬릿 블레이드는 정확하게 X-선 빔을 가공할 수 있도록 텅스텐을 사용하여 Knife edge 형태로 제작하고, 슬릿 블레이드 수송 시스템은 X-선 빔 폭을 조정하기 위해 슬릿 블레이드를 상하좌우 방향에서 각각 독립적으로 수송하는 장치로, 스텝 모터(Step Motor)를 사용한다. 실제 슬릿의 최대 수송 거리를 수직축으로 10 mm 이상, 수평축으로 10 mm 이상이 되게 한다. <그림 2.2.6.22>는 CoSAXS 빔라인에 설치할 개략도를 보였다. 이에 의해 달성할 수 있는 빔 가공용 슬릿에 의해 빔사이즈를 0.67 mm × 0.67 mm로 하였을 때 최대 소각 분해능(Maximum d-spacing)은 471 nm이다. 그리고 이들 슬릿 제작 사양은 <표 2.2.6.7>에 보였다.



SDD [m]	θs [deg.]	q_{min} [Å^{-1}]	d_{max} [Å]
0.2	0.635	5.3×10^{-02}	117
3	0.042	3.6×10^{-03}	1747
5	0.025	2.1×10^{-03}	2945
6	0.021	1.8×10^{-03}	3534
7	0.018	1.5×10^{-03}	4123
8	0.016	1.3×10^{-03}	4712



<그림 2.2.6.22> 빔시준 시스템 구성과 시준 슬릿 장치의 위치에 따라 계산한 최소 각과 실험 가능한 최대 특성 길이 (Maximum d-spacing), (X선 에너지 10 keV, Beam Defining Slit에서 빔크기 0.67 mm × 0.67 mm일 때 계산)

<표 2.2.6.7> 슬릿 제작 사양

Item	사양
Beam aperture Material	WB4C
Range	± 5 mm 이상
Resolution	< 0.2 μm
Repeatability	< 0.1 μm
Translation (Drive)	Piezo motor
Recess angle	< 2°

○ X-선 빔 가공용 슬릿 (Beam Defining Slit)

X-선 빔 가공용 슬릿은 X-선 빔을 정확하게 가공하고, 정밀하게 적합한 빔 크기로 조정하는 장치로 방사광원으로부터 33.0 m 위치에 설치한다.

○ 빔 시준 슬릿 (Collimating Slit)

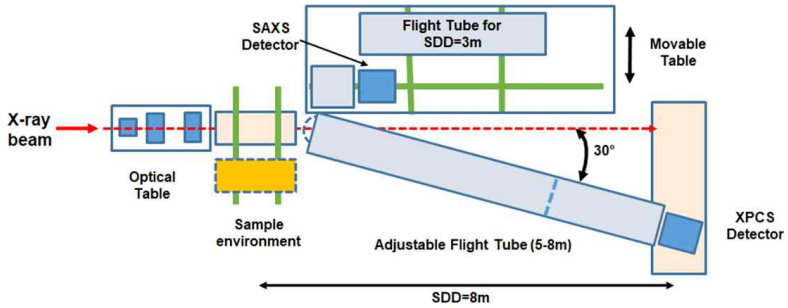
이 슬릿은 방사광원으로부터 51.1 m 떨어져 설치하였으며 DCM과 집속 거울을 통과한 X-선 빔을 시준하고, 1차적으로 Parasitic Instrumental Background를 감쇄시키는 역할을 한다.

○ 가드 슬릿 (Guard Slit)

이 슬릿의 설치 위치는 시료 전단 부에 설치하며 시료와 검출기 간 거리가 8 m 일 때 방사광원으로부터 63.0 m 떨어진 위치에 설치한다. 가드 슬릿은 빔시준 슬릿과 Guard Slit으로 빔 폭을 조절하면서 발생한 Parasitic Instrumental Background를 감쇄시키는 역할을 한다.

(5) 실험장치 (Experimental Hutch)

실험허치 내 실험장치의 기본 구성은 <그림 2.2.6.23>에 표시하였으며, 기본 구성은 optical table, 시료함, 진공 flight tube 그리고 Detector Stage로 구성된다. Optical Table은 빔모니터링 시스템과 Guard slit 등을 설치할 스테이지이다.



<그림 2.2.6.23> 실험허치 안 실험장치 배치도

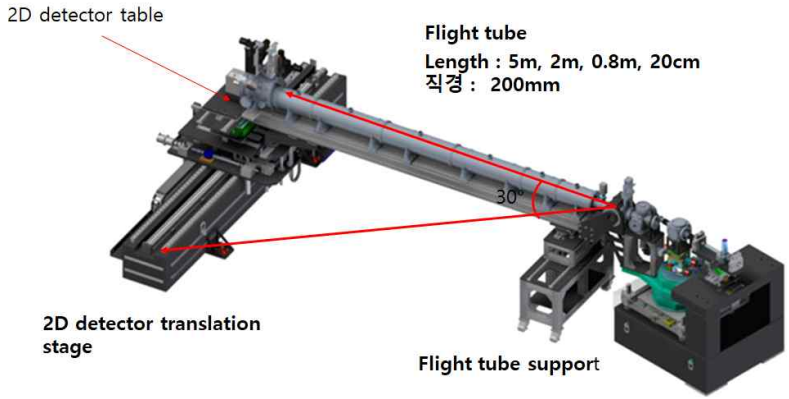
SAXS와 WAXS 실험을 위한 최적화된 setup을 제공하고 동시에 XPCS 실험도 가능하게 만들 것이다. 이 조합은 예를 들어 연질 응축 물질 시스템 (Soft condensed material, 즉 유기 박막 또는 열방성 겔) 연구에 특히 중요하다. 이러한 장치는 구조와 동역학 사이의 관계를 특징으로 하며, 더 큰 규모의 동역학은 미세구조에 의해 결정된다.

XPCS 실험 특성상 XPCS 주요장치는 시료함(Sample Chamber)과 진공 flight tube 그리고 검출기 스테이지로 구성된다. XPCS 실험용 시료함은 XPCS 실험 특성상 온도 및 진동에 안정적이어야 한다. 진공 flight tube는 setup에 따라 그 길이가 달라지지만, 일반적으로 0.25 m~8.0 m이다. 그리고 다음과 같은 특성이 요구된다.

1. setup을 바꾸었을 때 수평 수직으로 바뀌지 않아야 한다.
2. 실험 종류에 따라 setup을 바꾸어야 한다.
3. Setup에 따라 flight tube의 길이를 조정할 수 있어야 한다.
4. 교체하는 데 걸리는 시간은 최대한 짧아야 한다.

검출기 스테이지는 setup에 따라 수평, 수직 방향의 조정 가능하여야 한다. 4GSR COSAXS 빔라인에서는 시료 위치를 중심으로 0~5°로 고려하고 있다. XPCS 실험장치 구현에 있어서 중요한 점은 각 setup 교체 시 각 장치의 안정성과 재현성이 매우 중요하다.

실험허치 내에 설치한 flight tube, Sample stage 그리고 검출기 스테이지는 <그림 2.2.6.24>에 그 예시를 보였다. 그리고 <표 2.2.6.8>에 사용할 검출기의 기본 요구 사양을 보였으며, 현재는 스위스 Detrics 사의 Eiger 4M이 적당할 것으로 판단하고 있다. 추가적으로 XPCS 실험에 적당한 검출기를 기술하였다.



<그림 2.2.6.24> XPCS 실험장치 예시

<표 2.2.6.8> Eiger 4M 검출기 기본 사양

	Eiger2 X 4M (Dectris, SAXS)	Eiger2 X 4M (Dectris, XPCS)
Dimension	155.1 × 162.15 mm^2	155.1 × 162.15 mm^2
Pixel size	75 × 75 μm^2	75 × 75 μm^2
Dynamic range	~ 10^7 photons/pixel/s	~ 10^7 photons/pixel/s
Readout rate	Up to 1,120 Hz	Up to 1,120 Hz

1. Andor iKon – L

- Pixel size: 13.5 × 13.5 μm^2
- Detector size: 2,048 × 2,048 $pixels^2$
- Readout frequency: 5 MHz

2. Eiger X 4M

- Pixel size: 75 × 75 μm^2
- Detector size: 2,070 × 2,167 $pixels^2$
- Readout frequency: 750 Hz

3. LAMDA

- pixel size: 55 × 55 μm^2
- detector size: 84.5 × 28.2 mm^2 (1,536 × 28.2 $pixel^2$)
- Framing rate: ~2 kHz

(6) Data Storage / Handling

XPCS는 고속의 2D 검출기의 출현으로 빠르게 대량의 데이터를 생성하게 되었다. ESRF 또는 APS의 일반적인 XPCS 실험은 단일 실험 중에 50 GB 이상의 데이터를 쉽게 생성하고 있다고 한다. 100 GB/s의 데이터 액세스 속도와 데이터 스토리지 디스크에 대한 전용 광케이블 연결이 최소 요구사항이다. 정기적으로 자동 백업이 수행되는 수십 TB의 데이터 스토리지 기능도 필요하다. 온라인 데이터 처리도 매우 중요하며, 모든 사용자가 한 번에 최대 10 TB 이상의 데이터를 수집한다. 데이터를 처리하기 위한 전문 소프트웨어 개발도 필요하다.

많은 경우에 이용자는 반 처리된 데이터(계산된 상관함수 포함)를 가지고 떠나는 것을 선호하게 될 것이다. 이러한 이유로 CoSAXS 빔라인은 실험 중에 쉽게 사용할 수 있는 고성능의 사용자 친화적인 소프트웨어를 제공해야 한다. 결과 및 분석은 실제로 최적의 실험 전략을 결정하기 위해 대부분의 상황에서 필요하다.

한 가지 구체적인 예는 최근 ESRF, PETRA III에서 개발된 XPCS 데이터 분석을 위한 환경이 있으며, 이 소프트웨어는 Python으로 작성되었으며 평형 상관함수, 비정지 시스템의 시간 종속 (2회) 상관함수 또는 동적 이질성이 있는 시스템의 고차 상관함수를 계산하는 데 사용할 수 있는 사용자 친화적인 그래픽 인터페이스를 제공하고 있다. 이러한 소프트웨어는 다른 모듈 (예: SAXS 분석, 데이터 피팅 등을 위해) 전체 기기, 데이터 수집, 온라인 모니터링, 실험 제어용 소프트웨어 등도 있다.

마. 빔라인 성능 (Performance)

(1) 빔플럭스와 빔사이즈 계산

빔라인 ray tracing은 각 optical components에서의 X-선 형상과 크기, 발산각도, 에너지 분포, 에너지 분해능 등에 대한 정보를 얻는다. 이러한 결과를 바탕으로 발생가능한 문제들을 예측하고 최적의 optical components 선택과 빔라인에서의 배치를 위한 것이다. 여기에서의 ray tracing은 OASYS simulation code를 사용하였고, 언듈레이터 광원으로부터 인출되는 방사광의 9.612 keV에서 계산하였으며 50 m에서 2.1 mrad(0.11 deg.)의 입사각을 가지고 집속거울을 통과 하였을 때 시료위치(75 m)에서 집속된 빔의 모양은 <그림 2.2.6.21>과 같다. 집속된 빔의 크기(FWHM)는 9.5 μm(H)와 2.5 μm(V)이 된다.

그러나 실제 집속된 빔 크기는 DCM crystal 면의 slope error와 집속거울면의 slope error를 고려하여야 한다. 그러나 여러 광학계의 형상을 정확히 측정하는 것은 불가능하여, simulation에 적용하는 것이 의미가 없다. 다만 집속거울의 slope error rms 값을 통해 집속된 빔의 크기를 (수식 2.2.6.6)으로부터 유추할 수 있다.

$$\Delta y_{slope} = 2\sqrt{8\ln 2}\,\delta\theta_M q_M \quad \text{(수식 2.2.6.6)}$$

여기서 $\delta\theta$는 slope error rms 값이고, q는 거울부터 초점까지 거리이다. 보통 집속거울의 빔 진행 방향의 slope error는 1 μrad rms 값 정도를 갖으므로, 형상 error에 의해 유발되는 빔 크기의 퍼짐은 Δy~4 × 1 μrad × 25 m = 100 μm이다.

(2) 최소각 계산

<그림 2.2.6.22>는 시준 slit 위치에 따라 빔라인에서 도달할 수 있는 최소각과 특성 길이를 계산한 결과를 보였다. 그리고 그 결과로 볼 때, X-선 빔사이즈를 0.67 mm이고 시료와 검출기 사이 거리를 8 m로 하면 최대 도달할 수 있는 최소각은 0.016°이며 이 값은 X-선 에너지를 9.613 keV로 하였을 때 471 nm의 도메인 사이즈를 측정할 수 있게 된다.

참고문헌

[1] Jonathan Rivnary et. al. Chem Rev. 2012, 112, 5488.

[2] A. Madsen, A. Fluerasu, B. Ruta, "Structural Dynamics of Materials probed by X-ray Photon Correlation Spectroscopy", Springer, 2014, pp. 1620

[3] Zafeiropoulos et.al. Macromol. Rapid Commun. (2005), 26, 1547 – 1551, DOI: 10.1002/marc.200500428

[4] Ji-Hoon et.al. Energy Environ. Sci,(2015) 8, 2352

[5] Otten, A., Köster, S., Struth, B., Snigirev, A. & Pfohl, T. (2005). J. Synchrotron Rad. 12, 745 – 750

[6] Barrett, R., Faucon, M., Lopez, J., Cristobal, G., Destremaut, F., Dodge, A., Guillot, P., Laval, P., Masselon, C. & Salmon, J. B. (2006). Lab Chip, 6, 494 – 499

[7] Rondeau, E. & Cooper-White, J. J. (2008). Langmuir, 24, 6937 – 6945.

-Martel, A., Burghammer, M., Davies, R., DiCola, E., Panine, P., Salmon, J.-B. & Riekel, C. (2008). Biomicrofluidics, 2, 024104.

[8]. Müller-Buschbaum, P., Bauer, E., Maurer, E., Roth, S. V., Gehrke, R., Burghammer, M. & Riekel, C. (2007). J. Appl. Cryst. 40, s341 – s345.

[9]. Yang, L., Wang, S., Fukuto, M., Checco, A., Niu, Z. & Wang, Q. (2009). Soft Matter, 5, 4951 – 4961.

[10]. Renaud, G., Lazzari, R., Revenant, C., Barbier, A., Nobelt, M., Ulrich, O., Leroy, F., Jupille, J., Borensztein, Y., Henri, C. R., Deville, J.-P., Scheurer, F., Mane-Mane, J. & Fruchart, O. (2003). Science, 300, 1935.

[11]. Bauer, E., Maurer, E., Mehaddene, T., Roth, S. V. & Müller-Buschbaum, P. (2006). Macromolecules, 39, 5087 – 5094.

[12]. Friso van der Veen, Franz Pfeiffer, "Coherent x-ray scattering" , J. Phys.: Condens. Matter 16 (2004) 5003-5030.

[13]. Oleg G. Shpyrko, " X-ray photon correlation spectroscopy" J. Synchrotron Rad. (2014). 21, 1057 – 1064 doi:10.1107/S1600577514018232

[14]. A. Madsen, A. Fluerasu, B. Ruta, "Structural Dynamics of Materials probed by X-ray Photon Correlation Spectroscopy", Springer, 2014, pp. 1620

[15]. Z. Jiang, M.K. Mukhopadhyay, S. Song, S. Narayanan, L.B. Lurio, H. Kim, S.K. Sinha, Entanglement effects in capillary waves on liquid polymer films. Phys. Rev. Lett. 101, 246104-1 – 246104-4 (2008)

[16]. Andrei Fluerasu, Abdellatif Moussaıd, Peter Fauls, Henri Gleyzolle and Anders Madsen(2008), "X-ray photon correlation spectroscopy under flow", J. Synchrotron Rad. (2008). 15, 378 – 384

[17]. A. Madsen, A. Fluerasu, B. Ruta, "Structural Dynamics of Materials probed by X-ray Photon Correlation Spectroscopy", Springer, 2014, pp. 1620

[18]. Riekel, C. (2000). Rep. Prog. Phys. 63, 233

[19]. Müller-Buschbaum, P. (2003). Anal. Bioanal. Chem. 376, 3 – 10

[20]. Müller-Buschbaum, P., Bauer, E., Maurer, E., Roth, S. V., Gehrke, R., Burghammer, M. & Riekel, C. (2007). J. Appl. Cryst. 40, s341 – s345.

[21]. Li, R., Cornaby, S., Kamperman, M. & Smilgies, D.-M. (2011). J. Synchrotron Rad. 18, 697 – 701.

[22]. A V Zozulya et al 2014 J. Phys.: Conf. Ser. 499 012003

[23] Lonny E. BERMAN, Stephen M. DURBIN and Boris W. BATI'ERMAN , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A241 (19851 295

[24]. Lin Zhang et. al. J. Synchrotron Rad. (2013). 20, 567 – 580

[25]. Aleksandr I. Chumakov et. al. J. Synchrotron Rad. (2014). 21, 315 – 324

[26]. Hossein Khosroabadi et. al.J. Synchrotron Rad. (2022). 29, 377 – 385

2.2.7 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인 (Real-time X-ray Absorption Fine)

가. 소개

실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인은 '엑스선 흡수 분광학'을 기반으로 수 밀리초 영역의 매우 짧은 측정시간을 갖는 '고속 엑스선 흡수 분광학'과 물질의 점유 전자 상태(occupied state)에 관한 정보를 연구할 수 있는 'X-선 방출분광학'을 융합한 빔라인이다. 고속 엑스선 흡수분광법은 이차 전지, 촉매반응, 결정상 전이 등 다양한 반응 메커니즘에 관한 연구를 가능케 할 것이며, 수 밀리초의 짧은 반응 시간에 따른 구조 변화를 추적함으로써 구조 변화에 대한 동역학(dynamics)을 이해하는 데에도 쓰일 것이다. X-선 방출분광학은 페르미 준위 아래에 위치한 점유 전자구조를 연구하는 분광법으로, 물질의 가전자대(valence band)를 비롯하여 결합 궤도 함수에 대한 상태 밀도 함수를 연구할 수 있다. X-선 방출분광학을 전도대(conduction band)에 대한 정보를 얻을 수 있는 엑스선 흡수 분광학과 결합하면 물질의 가전자대와 전도대의 전자 상태(electronic structure)를 모두 관찰할 수 있다. 본 빔라인이 제공할 (고속) 엑스선 흡수 분광학과 X-선 방출분광학은 이차 전지와 촉매를 비롯한 다양한 차세대 소재 개발에 새로운 지평을 여는 필수적인 실험기법이 될 것이다.

나. 빔라인 개요

실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인(Real-Time X-ray Absorption Fine Structure)의 이용자 측 주요 활용 목적은 아래와 같다.

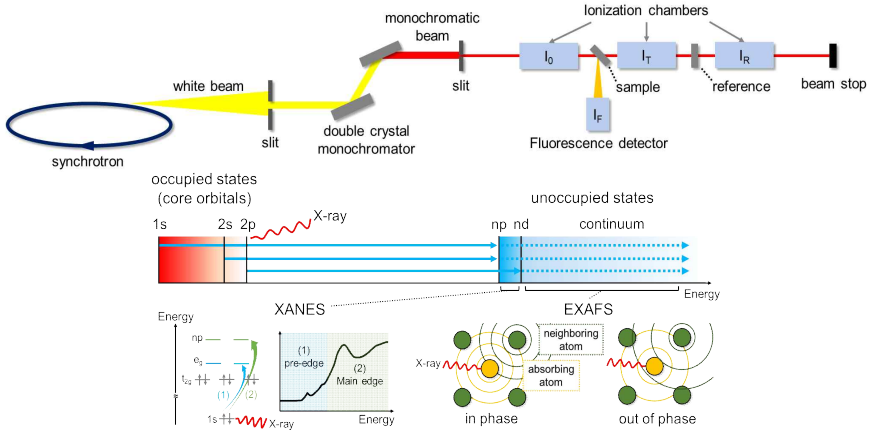
1) 엑스선 흡수 분광 (X-ray Absorption Fine Structure, 이하 XAFS)

2) 고속 엑스선 흡수 분광 (Quick X-ray Absorption Fine Structure, 이하 QXAFS)

3) 경 X-선 방출 분광 (X-ray Emission Spectroscopy, 이하 XES)

다. 빔라인 실험기법

(1) X-ray Absorption Fine Structure (XAFS)



<그림 2.2.7.1> 엑스선 흡수 분광학 분석 모식도

XAFS는 시료를 투과하기 전·후의 X-선의 광량 정보를 얻은 후 Beer-Lambert 법칙에 적용하여 X-선에 대한 시료의 흡광계수를 얻고 이를 분석하는 실험기법이다. (<그림 2.2.7.1> 참고) 빔 에너지 변화에 따라 나타나는 흡광계수의 변화를 통해 X-선을 흡수한 원자 주변의 전자 상태, 배위, 결합 길이 등 국부 구조에 관한 정보를 얻을 수 있다. (수식 2.2.7.1)은 Beer-Lambert식을 나타낸다.

$$\ln\left(\frac{I_o}{I}\right) = \mu d \quad \text{(수식 2.2.7.1)}$$

원소 종류에 따라 흡수단(absorption edge)의 에너지가 상이하기 때문에 XAFS를 활용하면 원소 선택적인 분석이 가능하다. 시료가 다양한 원소를 함유하고 있어도 시료 내 특정 원소에 대한 개별적인 국부 구조 정보를 얻을 수 있다. 또한, XAFS는 특정 원소 주변의 국부 구조(수 Å 이내)를 관찰할 수 있어 시료의 결정성 유무 및 형태에 제한이 없는 분석기법이다. 이와 같은 XAFS의 넓은 범용성은 이차 전지, 촉매, 반도체 소재, 태양전지 등 각종 첨단 소재 개발에 필수적인 요소이다.

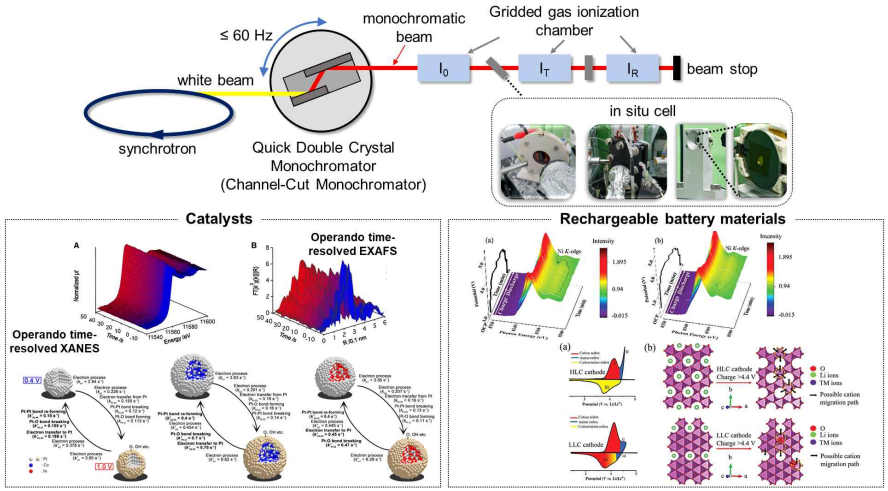
XAFS는 흡수단으로부터 수십 eV 이내의 에너지 영역의 X-선 흡수단 근방구조(X-ray Absorption Near Edge Structure, 이하 XANES)와 XANES 영역 이후 약 1,200

eV까지의 넓은 에너지 영역에서 나타나는 X-선 흡수 미세구조(Extended X-ray Absorption Fine Structure, 이하 EXAFS)로 구성된다. XANES 스펙트럼은 시료에 X-선을 입사시켜 내각 준위(core level)의 전자를 최외각 준위(outermost level)로 여기(excitation) 시키는 과정에서 얻어지는 데이터이다. 따라서, XANES는 최외각 준위의 상태에 크게 영향을 받는다. 최외각 준위에 영향을 미치는 요소로는 공유결합성(covalency), 배위 (coordination), 스핀 상태 (spin state) 등이 있으며, XANES 스펙트럼을 분석하여 이 정보들을 얻을 수 있다.

EXAFS는 X-선의 흡수 과정으로 인해 발생한 광전자가 주변 원자에 부딪혀 역산란(backscattering) 되는 과정에서 발생하는 현상이다. X-선을 흡수한 원자에서 발생한 광전자의 파동 함수와 역산란된 광전자의 파동 함수가 서로 결맞음성(in-phase)을 가지면 보강간섭을 이루며, Fermi's Golden Rule에 따라 X-선 흡광계수가 증가한다. 반면, 이 광전자의 파동 함수들이 상쇄 간섭을 이룰 때(out of phase)에는 흡광계수가 감소하게 된다. 이러한 특징으로 인해 EXAFS 구간에서는 보강간섭과 상쇄 간섭이 반복되는 일종의 패턴이 얻어진다. EXAFS 구간에서 얻어진 X-선 흡수 데이터를 푸리에 변환하면 흡수 원소 주변의 국부 구조에 관한 정보를 얻을 수 있다. 수 피코초에 불과한 광전자의 짧은 수명(lifetime)으로 인해 수 Å 이내의 결합상태가 주로 관찰되는 것이 EXAFS의 특징이다. 얻어지는 국부 구조로는 배위수 (coordination number), 결합 길이 (bond length), 무질서도(Debye-Waller factor)가 있다.

XAFS는 원소 선택적인 분석이 가능할 뿐만 아니라 시료의 결정성 유무 및 형태와 관계없이 적용할 수 있는 분석기법이다. 게다가, 경 X-선을 사용한다는 특징이 있어 상온·상압 및 각종 in situ 조건에서도 측정이 가능하다. 이러한 특징으로 인해, XAFS는 이차 전지, 태양전지, 촉매 등 각종 에너지 소재를 대표로 하는 신소재 개발 분야에서 널리 활용되고 있다.

(2) Quick X-ray Absorption Fine Structure (QXAFS)



<그림 2.2.7.2> 고속 엑스선 흡수 분광학 모식도 및 활용 예시

앞서 언급하였듯이, XAFS는 경 X-선을 사용하므로 상온·상압에서 측정이 가능할 뿐만 아니라 다양한 in situ/operando 분석을 접목하기에도 유리하다. 온도, 전압, 압력 등 특정 조건을 도입한 in situ XAFS 기법을 활용하면 다양한 반응 조건에 따라 나타나는 소재의 전자 상태와 결합상태의 변화를 추적 관찰할 수 있다. 또한, XAFS는 원소 선택적 분석법이므로 이차 전지 소재의 충·방전 과정, 촉매반응 등 다양한 화학 반응을 유도하는 '활성점'의 역할을 규명하는 데에도 널리 쓰이고 있다.

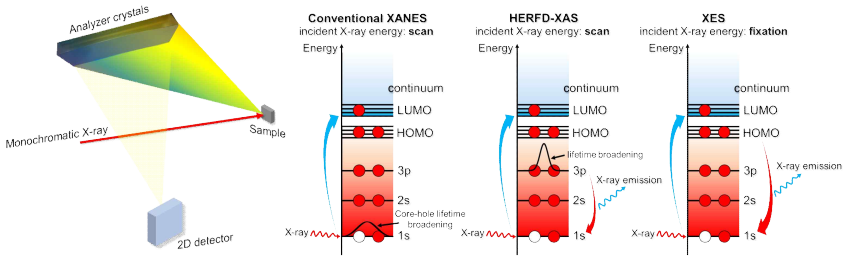
XAFS 분석의 일반적인 측정시간은 한 스펙트럼 당 수 분에서 십 수분이 소요된다. 따라서, in situ XAFS 실험 시에는 이 측정시간 동안 발생하는 평균적인 구조 변화에 대한 정보를 얻게 된다. 이 경우, 각 XAFS 스펙트럼 사이에 정보 공백이 생기며, in situ XAFS 분석기법을 활용한 반응 메커니즘 연구에 있어 큰 걸림돌이 되고 있다.

고속 XAFS 측정기법인 Quick XAFS(이하 QXAFS)는 수 밀리초에서 수 초의 짧은 측정시간을 제공할 수 있는 실험기법이다. QXAFS를 활용하면 실시간으로 XAFS 측정이 가능하여 정보 공백 없이 반응 메커니즘 연구가 가능하다. 최근에는 Quick XAFS를 가능케 하는 Quick DCM (channel-cut DCM)의 에너지 변조 기술이 괄목할 만하게 발전하여 최소 10 ms 동안 한 개의 XAFS 데이터를 측정하는 것이 가능해졌다.

현재까지의 QXAFS 연구는 주로 전기 촉매 분야에서 활용되고 있다. 반응 초기에

나타나는 촉매의 구조적 변화에 따라 반응 경로와 생성물이 크게 달라질 수 있다는 점을 통해, QXAFS를 활용한 반응 메커니즘 연구의 중요성을 파악할 수 있다. 또한, QXAFS를 수소연료전지 연구에 활용하여 연료전지 내 전기 촉매의 반응 메커니즘 연구하여 백금을 대체할 수 있는 촉매 개발 연구가 활발히 수행되고 있다. 최근에는 리튬 이온 전지용 양극재의 고속 충전 과정을 QXAFS로 연구하여 반응 시간에 따른 산화 과정을 밝혀냄으로써 고속 충전에 유리한 양극재의 구조를 제안한 연구 결과도 발표되었다. 이처럼, QXAFS는 다양한 화학 반응에 따른 물질의 구조변화를 추적할 수 있기 때문에 더욱 우수한 성능을 갖는 첨단 소재를 개발하는 데 활용될 것이다.

(3) X-ray Emission Spectroscopy (XES) & High Energy Resolution Fluorescence Detected X-ray Absorption Spectroscopy (HERFD-XAS)



<그림 2.2.7.3> 고분해능 형광 검출-엑스선 흡수 분광학 및 엑스선 방출분광학 모식도

XES는 시료의 X-선 흡수로 인해 여기된 전자가 내각 준위로 완화 (relaxation) 될 때 방출하는 X-선을 분석하는 기법이다 (<그림 2.2.7.3> 참고). 앞서 설명한 바와 같이, XAFS는 주로 물질의 최외각 준위 혹은 전도대로 전자를 여기시키는 과정에서 얻어진다. 특정 원소의 내각 준위에 있는 전자의 이온화 에너지보다 높은 에너지를 갖는 X-선이 시료에 조사되면 광전자가 방출된다. 이 광전자는 주변 원자와 산란을 일으키는데, 이로 인해 XAFS 데이터에는 주변 원자와의 결합상태 및 배위에 관한 정보가 내재되어 있다. 광전자의 산란 과정은 X-선을 흡수한 원소 주변의 구조 정보를 얻는 데 쓰이지만, 전자 상태에 관한 정보는 쉽게 왜곡되기도 한다. 같은 산화수의 금속 이온이라도 배위에 따라 흡수단의 위치가 달라지는 것이 이 현상의 대표적인 예이다. 반면, XES는 특정 에너지의 형광 신호를 검출하여 광전자의 산란으로 인해 얻어지는 구조 정보를 최소화할 수 있으므로 물질의 전자 상태를 왜곡 없이 연구할 수 있다.

두 원소 간 결합은 궤도함수의 겹침 과정(orbital overlap)을 통해 발생한다. 이 겹침

과정으로 결합 궤도함수(bonding orbital)와 반결합 궤도함수(antibonding orbital)가 형성된다. XES는 물질의 결합 궤도함수를 관찰하는 분석법으로, 원소 간 결합 상태를 직접 관찰하고 연구할 수 있다. 예를 들어, 일산화탄소 산화 반응 시 일산화탄소가 활성 원소에 어떻게 결합하고 있는지 XES를 통해 관찰하는 것으로 촉매에 따른 활성도 차이를 연구할 수 있다. XES로부터 얻을 수 있는 정보는 산화수, 결합 원소, 결합 원소의 구조변화, 가전자대 구조가 대표적이다. 게다가, XAFS와 XES를 융합하면 물질의 전도대와 가전자대를 모두 관찰할 수 있다. 최근 들어, XES를 촉매, 양극재 등 다양한 에너지 소재 연구에 접목하고 있어 XES의 응용성이 점차 확대되고 있다.

(4) 4세대 방사광원과 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인의 분석기법

4세대 방사광원은 4GSR (4^{th} Generation Storage Ring) 혹은 DLSR (Diffraction Limited Storage Ring)으로 일컬으며, 국내에서는 주로 4GSR로 불리고 있다. 4GSR은 저장링 내 전자빔의 경로를 꺾는 장치로 'MBA (Multiple Bend Achromat)'라는 개념의 격자 구조를 사용한다. 이로 인해 4GSR의 전자빔은 수십 pm·rad 수준으로 낮은 emittance (ϵ)를 가진다. 이는 기존 3세대 방사광원의 emittance인 수십 nm·rad 대비 대폭 감소한 값이다. 참고로, 4GSR과 포항방사광가속기(Pohang Light Source-II, PLS-II)의 emittance는 각각 62 pm·rad과 58 nm·rad이다. 결과적으로, 4GSR에서는 전자빔의 낮은 emittance로 인해 높은 밝기(brightness)의 빔이 얻어지게 된다.

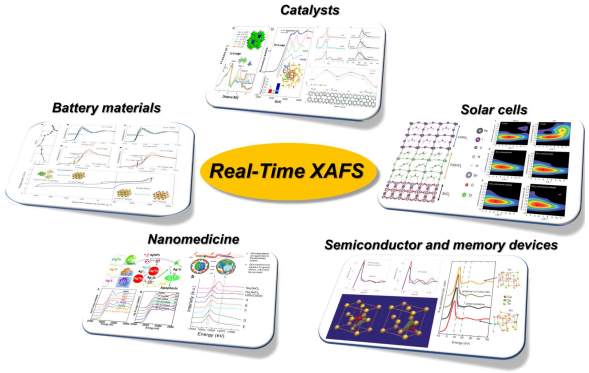
<표 2.2.7.1> Korea-4GSR과 PLS-II의 저장링 특성 요약

	Korea-4GSR	Pohang Light Source-II
Beam energy (GeV)	4	3
Beam current (mA)	400	250 (Max. 400)
Lattice structure	Multiple-Bend Acromat	Double-Bend Acromat
Emittance	62 pm·rad	5,800 pm·rad

4GSR에서 인출되는 빔의 높은 밝기 특성은 높은 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, 이하 SNR)를 갖는 데이터를 얻을 수 있게 할 수 있을 뿐만 아니라, 측정시간도 크게 단축시킬 수 있다. 이를 통해, 매우 낮은 농도로 함유된 원소에 대한 XAFS 분석은 물론, 상온/상압 조건에서 불안정한 준안정상(meta stable phase)에 관한 연구도 수행할 수 있다. 방대한 양의 데이터를 측정하고 분석하는 high-throughput 기법도 도입이 가능할 것이다. QXAFS와 XES는 'photon-hungry' 실험기법으로서, 본 빔라인의 단위 면적 당 높은 광량을 통해 우수한 신호 대 잡음비를 갖는 QXAFS 및 XES 데이터가 얻어질 것으로 예상된다.

(5) 빔라인의 활용 분야

<그림 2.2.7.4>와 <표 2.2.7.2>에 본 빔라인 구축 시 활용 분야와 대표적인 활용 사례를 정리하였다.



<그림 2.2.7.4> 빔라인 활용 분야

<표 2.2.7.2> 실시간 X-선 흡수 분광학 빔라인 활용 분야 및 활용사례

활용분야	활용사례
반도체	- 반도체 소자 내 구성 물질에 대한 전자 상태 및 결합 특성 규명 - Ge-Sb-Te 기반 메모리 소자의 구동 메커니즘 연구
에너지 소재	- 페로브스카이트 기반 태양전지 소재의 화학적 결합 상태 및 효율 최적화 연구 - 타보라이트 구조 기반 양극재에 대한 충방전 메커니즘 연구 - NMC 양극재의 충방전 상태에 따른 구조 변화 실시간 분석
바이오	- 디스플레이용 양자점 소재의 생체 내 독성 연구 - 나노 의약품의 생체 내 구동 원리 파악
촉매	- 반응 셀(reaction cell)을 이용한 금속 촉매에 대한 분광학적 연구 - 단원자 전기 촉매의 구조 분석 연구 - 귀금속 기반 열촉매의 작동 메커니즘 연구
환경, 지질	- 토양 내 독성 물질인 As에 대한 산화수 및 독성 연구

(6) 유사 해외 빔라인

<표 2.2.7.3>에 본 실시간 엑스선 흡수 빔라인과 유사한 실험기법을 지원하는 빔라인을 정리하였다.

본 빔라인의 샘플 위치에서 예상되는 광량은 10^{13} ph s^{-1} 이상에 달해 PETRA III의 P64 빔라인, MAX IV의 Balder 빔라인, APS의 20-ID 빔라인과 유사하나, 빔 크기가 대략 20 × 10 μm^2 수준으로 가장 작아 단위 면적 당 광량은 가장 높다. 결과적으로, 본 빔라인에서 제공할 QXAFS와 XES는 해외 빔라인과 비교하여 신호 대 잡음비가 우수할 것으로 예상된다.

<표 2.2.7.3> 실시간 X-선 흡수 분광학 빔라인과 유사한 실험기법을 지원하는 해외 빔라인 예시

	PETRA III (Germany)	Diamond Light Source (United Kingdom)	MAX IV (Sweden)	Advanced Photon Source (USA)	4GSR (Korea)
Ring Energy/current (GeV)/(mA)	6/100	3/300	3/500	7/100	4/400
Beamline	P64 Advanced XAFS	I20-scanning	Balder	20-ID	Real-Time XAFS
Photon Source	In-vac. Undulator	Wiggler	In-vac. Wiggler	Undulator	In-vac. Undulator
Energy Range (keV)	4 ~ 44 Si (111), (311)	Si (111): 4.5 ~ 20 Si (311): 7 ~ 34	4 ~ 40 Si (111), (311)	Si (111): 4.3 ~ 27 Si (311): 7 ~ 52	4 ~ 40 Si (111), (311)
Energy Resolution (ΔE/E)	Si (111): 1 × 10^{-4} Si (311): 3 × 10^{-5}	Si (111): 1.3 × 10^{-4} Si (311): 2.8 × 10^{-5}	Si (111): 2 × 10^{-4} Si (311): 1 × 10^{-4}	Si (111): 1.4 × 10^{-4} Si (311): 3 × 10^{-5}	Si (111): 2 × 10^{-4} Si (311): 3 × 10^{-5}
Flux on Sample (ph/s)	10^{13} (tuned) 10^{12} (tapered)	> 10^{12}	10^{13} (Si (111)) 10^{12} (Si (311))	2 × 10^{13}	>10^{13} (tuned) >10^{12} (tapered)
Beam size on Sample (H × V)	150 × 50 μm^2	400 × 300 μm^2	50 × 50 μm^2 (focused)	25 × 25 μm^2 (focused)	20 × 10 μm^2 (focused)
XES Spectrometer type	von Hamos, Johann	Johann	Johansson	von Hamos	von Hamos
Energy Resolution of spectrometer (eV)	0.15 ~ 1 (von Hamos)	-	0.15 ~ 0.3 (Si (444))	0.5	0.5
Additional Options	QXAFS, RXES	-	QXAFS, XRD, XRF	RXES,micro XAFS	RXES, QXAFS

라. 빔라인 설계 목표 및 특징

(1) 빔라인 설계 목표

빔라인의 상세 건설 목표를 <표 2.2.7.4>에 정리하였다.

<표 2.2.7.4> 실시간 X-선 흡수 분광학 빔라인 목표 사양

광원	In-vacuum Undulator (IVU24, 3 m)	
에너지 범위	4 ~ 40 keV	
측정시간 (~ 1000 eV)	Quick XAFS	~ 50 ms
	Normal XAFS	~ 3 min (on-the-fly scan) ~ 20 min (step scan)
에너지 분해능 (ΔE/E)	~ 1.4 × 10^{-4} Si (111) / ~ 3 × 10^{-5} Si (311)	
빔 사이즈 (@ 10 keV)	18 (H) × 8 (V) μm^2 (집속 빔, @ 75 m) 1020 (H) × 810 (V) μm^2 (비집속 빔, @ 60 m)	
샘플 위치에서의 빔 세기 (ph/s)	Tuned Undulator	~ 9 × 10^{13} (@ 5 keV) ~ 4 × 10^{12} (@ 40 keV)
	Tapereded Undulator	~ 2 × 10^{12} (@ 7 keV) ~ 3 × 10^{11} (@ 25 keV)
주요 장치	- 열부하 제거 거울장치 (High Heat Load Mirror) - Continuous scan 이중결정 단색화장치 (C-DCM) - 60 Hz 고속 측정 이중결정 단색화장치 (Quick DCM) - 에너지 분산형 형광 검출기 - 고속 감응 가스 이온화 챔버 - 2D 위치 감응 검출기	
실험 장치	- 대용량 (High-throughput) 샘플 홀더 및 샘플 자동 교환 시스템 - von Hamos 분광계	
	In situ 실험용 장치	- 전기화학 및 배터리 셀 - 저온 (-196 ℃) 및 고온 (~1200 ℃) 셀 - 열촉매용 고온가스 셀 - 질량 분석기

본 빔라인의 특징을 정리하면 아래와 같다.

○ 4~40 keV의 넓은 에너지 범위

4 keV부터 40 keV에 달하는 넓은 에너지 범위를 갖는 빔을 통해 주기율표에 존재하는 대부분의 원소에 대한 XAFS 분석을 수행할 수 있을 것이다. K edge로는 원자번호가 21번인 스칸듐(Sc, 4.49 keV)을 시작으로 57번의 원자번호를 갖는 란타넘(La, 38.9 keV)까지 측정할 수 있으며, L_3 edge로는 원자번호 52번 텔루륨(Te, 4.34 keV)보다 원자번호가 높은 모든 원소의 측정이 가능하다. 이처럼, 본 빔라인이 제공할 넓은 에너지 영역의 빔을 통해 XAFS 분석에 측정 원소에 제약이 없을 것으로 예상된다.

○ 분석 기술 다양화; XAFS, QXAFS, XES

일반적인 XAFS 기법 외에도 QXAFS, XES, HERFD-XAS의 다양한 분석기법을 이용자에게 제공하여 연구 목적에 맞는 실험기법을 선택할 수 있도록 한다. 일반 XAFS는 물질의 정상 상태(steady state)에 관한 연구를 수행할 때 이용한다. 4~40 keV의 에너지 영역에서 예상되는 광량이 샘플 위치를 기준으로 10^{13} ph s^{-1} 이상이므로 저농도 시료에 대해서도 효과적인 XAFS 측정을 할 수 있을 것이다. 일반 XAFS 측정 시료(고농도)의 경우, on-the-fly scan을 통해 3분 이내의 비교적 짧은 측정시간으로도 우수한 신호 대 잡음비를 갖는 데이터가 얻어질 것으로 예상되므로 단위 시간당 다수의 시료를 측정하는 high-throughput 시스템의 도입 가능할 것이다.

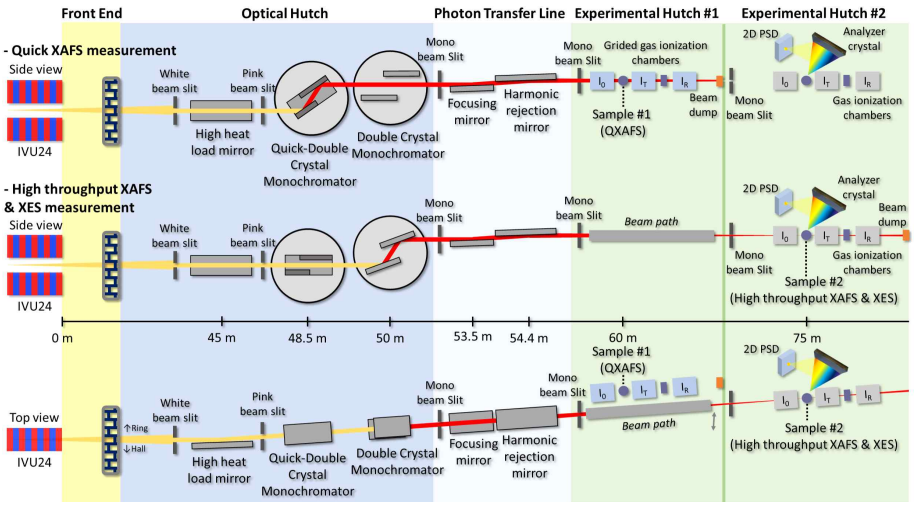
QXAFS는 in situ 분석기법과 결합하여 다양한 화학 반응에서 발생하는 전자 상태 및 국부 구조에 관한 연구를 수행할 때 활용하며, 이차 전지, 촉매, 태양 전지 등 에너지 소재 분야에 주로 사용될 것으로 예상된다. XANES 영역에서의 Quick XAFS는 최소 250 ms 이하의 빠른 scan 속도로 측정하여 반응 시 발생하는 산화수 변화를 추적하는 데 활용한다. EXAFS 영역은 푸리에 변환(Fourier transform, FT)을 고려해야 하므로 높은 신호 대 잡음비를 갖는 데이터가 얻어질 수 있도록 50 밀리초당 1개의 EXAFS 데이터 획득을 목표로 한다.

XES는 XAFS의 상보적 분석기법이다. XES는 결합 궤도 함수, 가전자대와 같이 점유 전자 상태에 관한 측정이 가능하므로, 중심 금속의 결합 리간드, 스핀 상태에 관한 연구를 수행할 수 있다. 예상되는 결합 리간드의 원자번호가 유사하면 EXAFS를 활용한 국부 구조분석은 상당한 시간이 소요될 뿐만 아니라, 정확한 구조분석을 이루는 데에도 한계가 있다. 이 경우 XES를 활용하면 중심 금속에 결합하고 있는 원소를 구별하는 것이 가능하므로 비교적 정확한 구조분석이 가능하다. XES는 경 X-선의 형광 신호를 검출하기 때문에 시료 내부(bulk)의 가전자대를 분석할 수도 있다. 게다가, XES는 HERFD-XAS (High Energy Resolution Fluorescence Detected X-ray Absorption Spectroscopy), ED-XAS (Energy Dispersive X-ray Absorption Spectroscopy)와 유사한 장치 구성을 갖고있어 실험기법의 확장성이 높다.

이처럼, 본 빔라인은 다양한 실험기법을 제공함으로써 다양한 차세대 소재를 연구할 수 있는 플랫폼으로서 기능할 것으로 예상된다.

마. 빔라인 구성

(1) 빔라인 배치도



<그림 2.2.7.5> 빔라인 배치도

<그림 2.2.7.5>는 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인의 빔라인 배치도이다.

본 빔라인의 첫 번째 광학장치는 열부하 제거 거울 장치 (High Heat Load Mirror, M1)이며, 고에너지 X-선 빔을 흡수하여 QDCM과 DCM에 가해질 열부하를 최소화한다. 또한, 빔 시준을 통해 QDCM 및 DCM에서 단색화되는 빔의 에너지 분해능을 높이고 실리콘 결정의 Darwin width에 의한 광량 손실을 줄이는 역할을 한다.

고속 이중결정 단색화장치(Quick double crystal monochromator, QDCM)는 광원으로부터 48.5 m 떨어진 곳에 위치한다. 고속 에너지 변조가 필요한 QXAFS 측정 시 사용한다.

이중결정 단색화장치(Double crystal monochromator, DCM)는 광원으로부터 50 m 떨어진 곳에 위치한다. 빔 에너지를 단색화하는 것이 주 기능이다. 일반 XAFS 및 XES 측정 시 사용한다.

집속 거울(M2)은 빔을 수직(위)으로 반사시키며 광원으로부터 53.5 m 떨어진 곳에 위치한다. 집속 거울의 곡률은 샘플 위치 (sample position) #2에 대하여 2.5:1의 집속 비율을 가질 수 있도록 하고, 빔 집속 방향은 수평 방향이다. Si과 Rh 5 nm/Pt 50 nm 두 개의 sagittal 실린더형 거울로 구성되어 있어 사용하고자 하는 에너지에 따라 거울면을 바꿔가며 사용한다.

고차항 제거 거울(M3)은 광원으로부터 54.35 m 떨어진 곳에 위치한다. 빔 평행화 및 고차항 제거가 주 역할이며, 빔을 수직(아래)로 반사시킨다. M3는 Flat 거울면을 갖지만, Bender를 통해 빔을 수직 방향으로 집속할 수 있도록 한다. 거울면은 Si, Rh 5 nm/Pt 50 nm, Pt 50 nm 거울면으로 구성되어 있으며, M2와 마찬가지로 사용하고자하는 에너지에 따라 바꿔가며 사용한다. 고차항을 효과적으로 제거하기 위해서는 M2과 M3의 입사각을 조절해야한다. 이때, M3가 M2로부터 반사된 빔을 평행화하여 입사각 변경에 따른 빔 위치 변화를 최소화한다.

샘플 위치는 #1과 #2, 두 곳이 있으며, 광원으로부터 60 m와 75 m 떨어진 곳에 각각 위치한다. 샘플 위치 #1에 빔 패스를 두어 샘플 위치 #2에서 실험을 할 때 빔을 전송할 수 있도록 한다. 샘플 위치 #1은 QXAFS 전용 실험을 수행할 공간으로, 세 개의 고속 감응 이온화 챔버와 PIPS 형광 검출기가 함께 위치한다. 샘플 위치 #2에서는 일반 XAFS (혹은 High-Throughput XAFS) 및 XES 측정을 수행하며, 에너지 분산형 형광 검출기를 포함하여 XES 신호를 얻을 수 있는 분석기 결정과 2D PSD (position sensitive detector)가 함께 위치한다.

(2) 빔라인 구성표

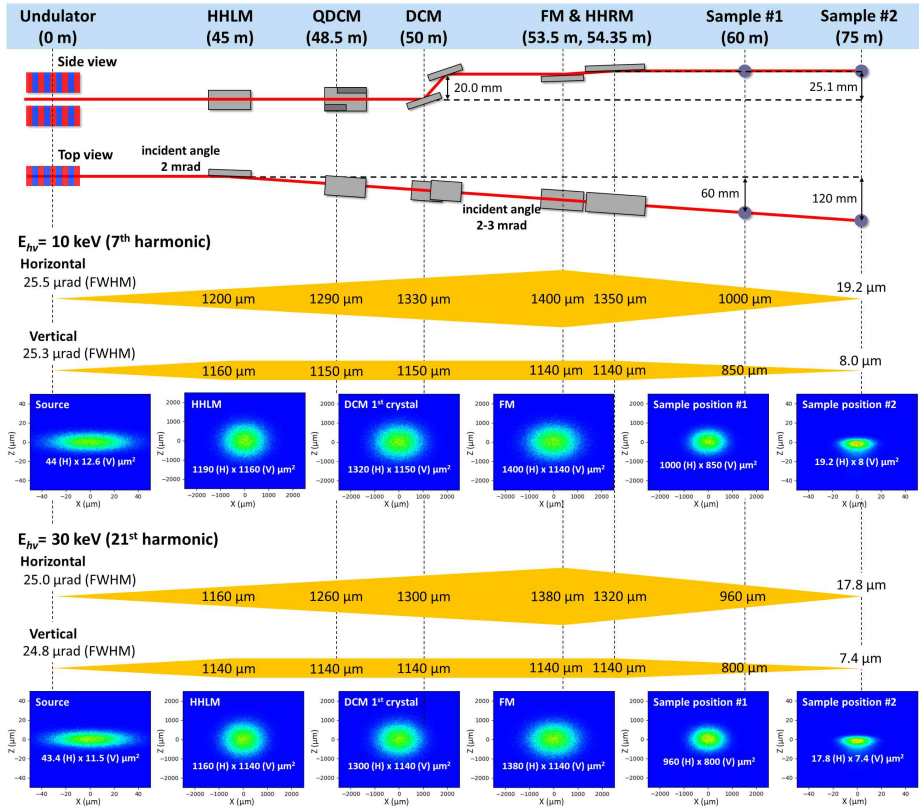
광학허치 내 주요 장치는 <표 2.2.7.5>에 요약되어 있다.

<표 2.2.7.5> 광학허치 내 주요 장치

Component	Distance	Specification	Usage
PBPM-3	41 m	Pickup type	White Beam 위치 진단
Movable Mask	42 m	Water Cooled	White Beam 정렬
Attenuator	43.7 m	Water Cooled, CVD Diamond, B_4C, Si	저에너지 X-ray photon에 의한 열부하 제거
White Beam Slit	44 m	Water Cooled, Max. opening size: 1.2 × 1.2 mm^2	열부하 제거 / Movable mask 오작동에 의한 사고 방지, 빔 위치 확인용 electron current readout 기능 탑재
M1 (High Heat Load Mirror)	45 m	In-Ga eutectic cooled 1×cylindrical mirror (Rh 5nm/Pt 50nm)	고에너지 X-ray photon에 의한 열부하 제거, 빔 시준 (collimation)
Pink Beam Slit	47 m	Water Cooled	Pink Beam 정렬, 산란빔 제거, 빔 위치 확인용 electron current readout 기능 탑재
Pink Beam Screen	47.4 m	Water Cooled, YAG+CCD	HHLM 정렬 및 Pink Beam 진단
QDCM	48.5 m	Si(111)&(311) LN2 Cooled	빔 단색화 및 고속 에너지 변경
DCM	50 m	Si(111)&(311) LN2 Cooled	빔 단색화
Pink Beam Stop	50.8 m	Water Cooled, YAG+CCD	Pink Beam 차단 및 진단, DCM Align 시 사용
Mono Beam Slit	52.4 m	4 way-slit	빔 정렬, 산란빔 제거
Diamond screen monitor	52.6 m	CVD diamond. Thickness: 50 μm	빔 진단, DCM 2nd crystal feedback
M2 (Focusing mirror)	53.5 m	2×cylindrical mirror (Si, Rh 5 nm/Pt 50nm)	수평 빔 집속 (sagittal cylinder mirror) 고차 조화항 제거
M3 (Harmonic rejection mirror)	54.35 m	Flat mirror 3×Strip (Si, Rh 5nm/ Pt 50 nm, Pt 50 nm)	수직 빔 집속 (bender, tangential cylinder) 고차 조화항 제거 빔 패스 유지
Mono Beam Slit	55.5 m	4 way-slit	빔 정렬, 산란빔 제거
Mono Beam Screen	55.8 m	YAG+CCD	Mono Beam 차단 및 진단, Mirror Align 시 사용
Diamond screen monitor	58 m	CVD diamond. Thickness: 50 μm	빔 진단, M2 feedback (long-term)
Hutch Shutter	58.6 m		Mono Beam 차단
Hutch Slit	59.2 m	4 way-slit	빔 정렬
Sample Position #1 (Quick XAFS)	60 m	Grided Gas Ionzation Chamber, PIPS, In Situ Cell	Quick XAFS 실험 Stage
Mono Beam Screen	66 m	YAG+CCD	Mono Beam 차단 및 진단
Hutch Slit	72 m	4 way-slit	빔 정렬
Nanobeam position monitor	74.5 m	Kapton, Thickness: 75 μm Positional resolution: <100 nm	빔 진단
Sample Position #2 (XAFS+XES)	75 m	Gas Ionization Chamber, Analyzer Crystals (JJ-X ray), Energy Dispersive Flouorescence Detector, 2D PSD	XES & High-throutput XAFS 실험 Stage

(3) 빔라인 광 경로

빔라인 시뮬레이션은 OASYS 환경에서 ShadowOui 프로그램을 사용하여 수행하였다.



<그림 2.2.7.6> OASYS 프로그램 내 ShadowOui를 활용한 광 경로 예측 결과

<표 2.2.7.6> 광 경로 예측 요약

Energy (harmonic)	K	Source size, (H×V, FWHM)	Source flux (ph/s/0.1% B.W.)	Beam size at sample #1 (@60 m) (H×V, FWHM)	Beam size at sample #2 (@75 m) (H×V, FWHM)	Flux at sample (ph/s)
5 keV (3^{rd})	2.366	44 × 14 μm^2	1.7 × 10^{15}	930 × 790 μm^2	19.4 × 8.8 μm^2	9.0 × 10^{13}
10 keV (7^{th})	2.620	44 × 13 μm^2	9.8 × 10^{14}	1000 × 850 μm^2	19.2 × 7.4 μm^2	6.8 × 10^{13}
20 keV (15^{th})	2.738	43 × 12 μm^2	4.1 × 10^{14}	1000 × 830 μm^2	17.8 × 7.2 μm^2	2.9 × 10^{13}
30 keV (21^{st})	2.620	42 × 11 μm^2	1.7 × 10^{14}	960 × 800 μm^2	17.8 × 7.4 μm^2	9.7 × 10^{12}
40 keV (29^{th})	2.680	44 × 11 μm^2	7.9 × 10^{13}	980 × 810 μm^2	17.8 × 7.2 μm^2	3.9 × 10^{12}

<그림 2.2.7.6>은 빔 에너지가 10 keV 혹은 30 keV 일 때의 광경로 예측 결과이다. 빔 에너지가 10 keV인 경우 광원의 크기는 42(수평) × 10(수직) μm^2이다. 10 keV의 빔을 기준으로, M2의 집속 거울 (Focusing mirror, M2)와 고차항 제거 거울 (Harmonic rejection mirror, M3)을 통해 샘플 위치 #1과 #2에서 각각 1000(수평) × 850(수직) μm^2, 19.2(수평) × 8(수직) μm^2 크기로 집속된다. 샘플 위치에서의 광량은 5 keV와 40 keV 각각 9.0 × 10^{13} ph s^{-1}와 3.9 × 10^{13} ph s^{-1}로 예상되므로, 본 빔라인에서 제공할 전 에너지 영역 대역에서 10^{13} ph s^{-1} 이상의 높은 광량을 확보할 수 있을 것이다.

바. 광원

(1) 언듈레이터 (In-vacuum Undulator)

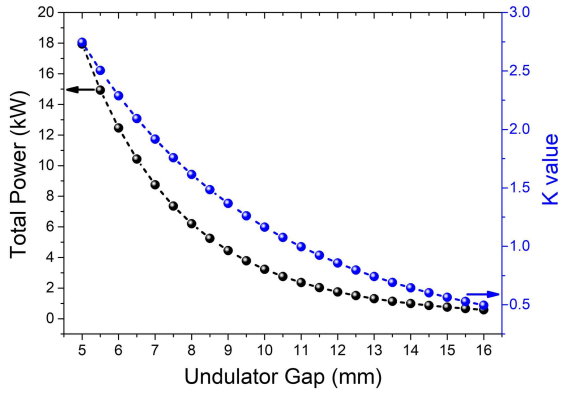
차세대·고성능 소재 개발에 있어 분석 시료의 크기는 점점 작아지고 있으며, 농도는 낮아지고 구조적 복잡성은 증가하는 경향성을 보인다. 시료에 대한 더욱 상세하고 정확한 정보를 얻기 위해 단위 면적 당 높은 광량을 갖는 방사광을 활용한 양질의 고해상도 데이터 수집에 대한 요구가 점차 증가하고 있는 추세이다.

이에 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인에서는 언듈레이터 광원을 사용하여 작고 강력한 빔을 이용자들에게 제공하고자 한다. 본 빔라인에서 사용하고자 하는 언듈레이터의 세부 사양은 <표 2.2.7.7>에 요약되어 있으며, 빔 크기와 빔 퍼짐각은 OASYS 프로그램 내 Shadow를 사용하여 계산된 값이다.

<표 2.2.7.7> 언듈레이터의 세부 사양

빔 라 인	실시간 엑스선 흡수 분광학
광원	언듈레이터 (IVU24)
주기	24 mm
자석 개수	125
길이	3,000 mm
언듈레이터 갭	5 ~ 16 mm
최대 유효 자기장	1.2253 T (@ 5 mm gap)
최대 Deflection coefficient	2.747 (@ 5 mm gap)
빔 크기 (FWHM)	42 (수평) × 11 (수직) μm^2 (@ 10 keV)
빔 퍼짐각 (FWHM)	25.5 (수평) × 25.3 (수직) μrad^2 (@ 10 keV)
최대 출력	17.9 kW
출력 밀도	165 kW $mrad^{-2}$

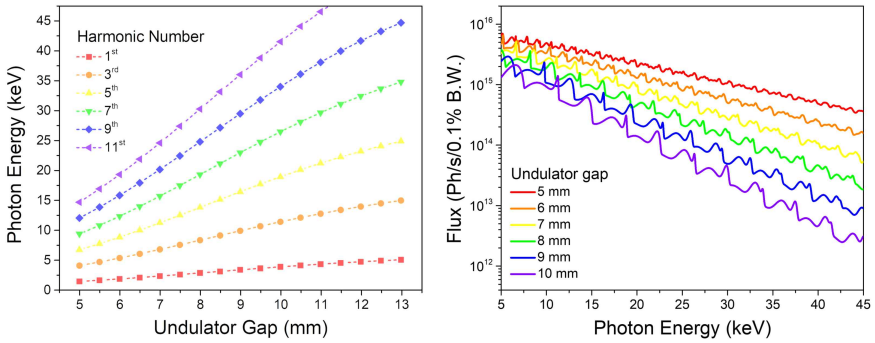
(2) 빔 출력 (power) 특성



<그림 2.2.7.8> 언듈레이터 간격에 따른 K값과 최대 출력의 변화

<그림 2.2.7.8>은 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인에 설치할 IVU24의 언듈레이터 간격(undulator gap)에 따른 출력(power)과 K값(deflection coefficient)의 변화를 나타낸 그래프이다. 언듈레이터 간격이 5 mm일 때 최대 K값은 2.747, 최대 출력은 17.9 kW이다. 간격을 증가시키면 K값과 출력이 모두 감소한다. 최대 가용 언듈레이터 간격은 16 mm로, 이때의 출력은 0.56 kW, K값은 0.496이다. 언듈레이터 간격이 넓어질수록 언듈레이터에서 인출되는 빔의 출력은 지수 함수적으로 감소한다.

(3) 빔 스펙트럼 특성



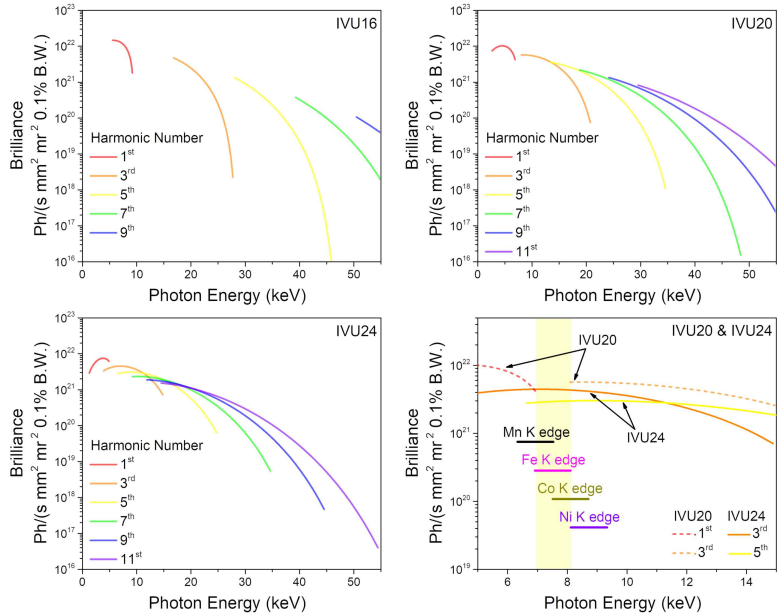
<그림 2.2.7.9> 언듈레이터 간격 변화에 따른 조화항의 에너지 및 광량 (flux)

<그림 2.2.7.9>는 언듈레이터의 간격 변화에 따른 빔의 조화항 에너지와 광량을 나타낸 그래프이다. 각 조화항의 에너지가 언듈레이터 간격을 넓힐수록 높아지는 것을 통해, 언듈레이터 간격을 변화시킴으로써 원하는 에너지를 갖는 빔을 인출할 수 있다는 것을 알 수 있다. 각 조화항의 언듈레이터 간격에 따른 빔 에너지 변화 추이를 살펴보면, 서로 다른 조화항임에도 같은 에너지를 갖는 빔을 인출하는 것이 가능하다. 예를 들어, 10 keV의 빔을 인출하기 위한 방법으로 언듈레이터 간격을 5.2 mm로 조절하여 7차 조화항을 사용하거나, 언듈레이터 간격을 6.7 mm로 맞추고 5차 조화항을 사용하는 방법이 있다. <그림 2.2.7.9>의 우측 그래프에서 볼 수 있듯이, 언듈레이터 간격이 좁을수록 높은 광량(flux)의 빔이 얻어질 수 있다. 따라서, 특정 에너지의 빔을 인출할 때는 좁은 간격을 통해 인출되는 빔의 고차 조화항을 사용하는 것이 높은 광량을 확보하는 데 유리하다.

본 빔라인의 광원은 자석 배열 주기가 24 mm, 총 길이가 3 m인 In-vac. 언듈레이터(IVU24)이다. 광원 선택에 있어 가장 중요하게 고려한 점은 각 홀수차 조화항 사이에 에너지 불연속성이 없어야 한다는 것이다. 본 빔라인의 주요 실험기법인 X-선 흡수 분광학의 실험 특성상, XAFS 분석을 수행할 원소의 흡수단 에너지에 맞게 빔 에너지를 자유롭게 조정해야 하기 때문이다.

<그림 2.2.7.10>에 언듈레이터의 자석 배열 주기 (λu) 에 따른 빔의 밝기(Brilliance) 그래프를 첨부하였다. IVU16, IVU20, IVU24는 λu가 각각 16 mm, 20 mm, 24 mm인 IVU를 의미한다. 세 IVU의 길이는 모두 3 m이며, 언듈레이터의 간격 범위는 5

mm에서 16 mm로 가정하였다. IVU16의 밝기 그래프를 보면 각 조화항 간 에너지 불연속성이 매우 뚜렷하므로 IVU16은 본 빔라인에서 사용하기에 적합하지 않음을 알 수 있다. IVU20과 IVU24의 밝기 그래프에서는 조화항에 따른 뚜렷한 에너지 불연속성이 관찰되지는 않는다. 하지만, 7 keV 부근에서 확대된 빔의 밝기 그래프를 보면 (우측 하단 그래프) 7~8 keV 영역에서 IVU20의 조화항 에너지의 불연속성이 관찰되는데, 이 에너지 영역에는 XAFS 분석 시 가장 흔히 측정하는 Mn K edge, Fe K edge, Co K edge, Ni K edge 위치하고 있으므로 IVU20도 본 빔라인에서 광원으로 사용하기에는 부적합하다. 반면, IVU24에서는 전 에너지 영역에서 불연속적인 조화항 구간이 전혀 관찰되지 않는다. 이러한 이유로, 본 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인은 광원으로 IVU24를 사용하고자 한다.



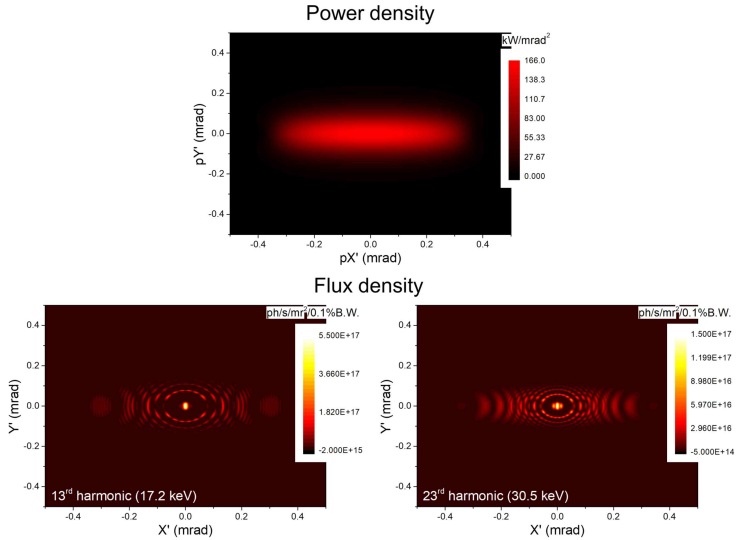
<그림 2.2.7.10> 언듈레이터의 자석 배열 주기에 따른 조화항의 에너지 연속성

(4) Power density & Flux density

IVU24에서 인출되는 빔의 최대 출력은 5 mm의 언듈레이터 간격을 기준으로 17.9 kW이다 (<그림 2.2.7.8> 참고). 참고로, 국내의 3세대 방사광가속기인 포항방사광가속기

(PLS-II)의 IVU20에서 인출되는 최대 빔 출력은 약 3 kW이다. 높은 출력의 빔은 광학장치에 비가역적인 심각한 손상을 유발할 수 있기 때문에 사용하고자 하는 빔만 광학장치로 전송하여 열부하를 최소화해야 한다.

<그림 2.2.7.11>은 5 mm 간격의 IVU24로부터 인출된 빔의 출력 밀도(power density)와 13번째 및 23번째 조화항의 광량 밀도(flux density)를 예상한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 출력 밀도 및 광량 밀도의 발산각이 크게 다르므로 광원인 IVU24와 광학허치 사이에 각종 mask (혹은 slit)을 적절히 배치하면 조화빔의 광량에 큰 손실 없이도 광학장치에 가해질 열부하를 크게 줄일 수 있다.



<그림 2.2.7.11> 5 mm 간격의 IVU24가 인출하는 빔의
power density 및 flux density (SPECTRA 프로그램을 통해 계산됨)

(5) Beam divergence

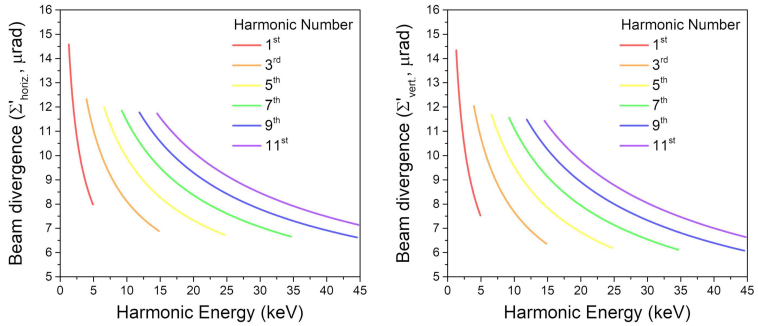
언듈레이터의 특성 중 하나인 작은 빔 발산각은 높은 밝기의 빔을 얻게 한다. 한 개의 전자에서 발생되는 빔의 발산각(divergence)은 (수식 2.2.7.2)로 얻을 수 있다.

$$\sigma'_{photon} = \frac{1}{\gamma}\sqrt{\frac{(1+K^2/2)}{2nN}} \quad \text{(수식 2.2.7.2)}$$

위 식으로부터, K값이 증가할수록 빔 발산각은 커지고, 차수(n)가 높은 조화항일수록 빔 발산각은 작아진다는 것을 알 수 있다. 높은 K값은 언듈레이터 간격이 좁을 때 얻어지므로, 언듈레이터 간격이 좁을수록 빔은 큰 발산각을 갖게 된다. 실제로 언듈레이터에서 방출되는 방사광은 전자 다발에 의해 발생하기 때문에 아래와 같이 전자빔의 발산각을 고려해야한다.

$$\sigma'_{eff} = \sqrt{\sigma'^2_{eletron} + \sigma'^2_{photon}} \quad \text{(수식 2.2.7.3)}$$

위의 전자 다발로부터 발생한 빔의 발산각 공식을 이용하여 K값에 따른 빔 발산각 변화를 <그림 2.2.7.12>에 나타내었으며, 계산에는 SPECTRA 프로그램을 사용하였다. 빔은 전체 에너지와 조화항에서 수평/수직 방향으로 약 10±5 μrad의 발산각으로 방출됨을 알 수 있다.



<그림 2.2.7.12> K값 변화에 따른 조화항 빔의 발산각 변화

(6) Beam size

광원에서의 빔의 크기도 앞서 살펴본 빔 퍼짐 특성과 유사한 방법으로 계산할 수 있다. 한 개의 전자에서 발생하는 빔의 크기는 (수식 2.2.7.4)와 같다.

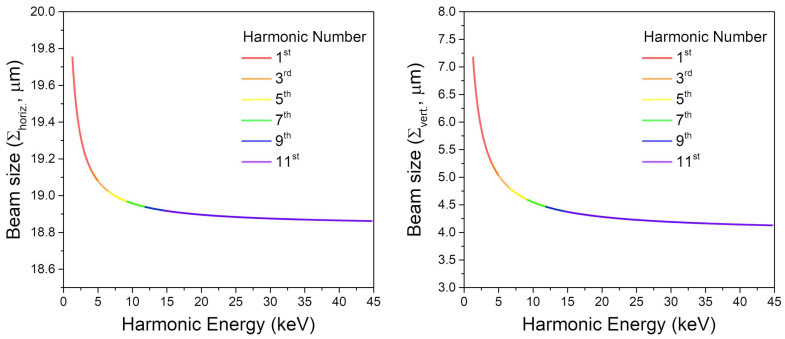
$$\sigma_{photon} \simeq \frac{\lambda_u}{4\pi r}\sqrt{\frac{N(1+K^2/2)}{n}} \quad \text{(수식 2.2.7.4)}$$

빔 크기는 K값이 증가할수록 커지는 반면, 차수(n)가 높을수록 작은 것을 작아지는 것을 알 수 있다.

실제 방출되는 방사광은 전자 다발에 의해 발생하기 때문에 아래와 같이 전자빔의 발산각을 고려하여 방출된다. 전자 다발로부터 발생한 빔의 크기는 (수식 2.2.7.5)와 같이 표현한다.

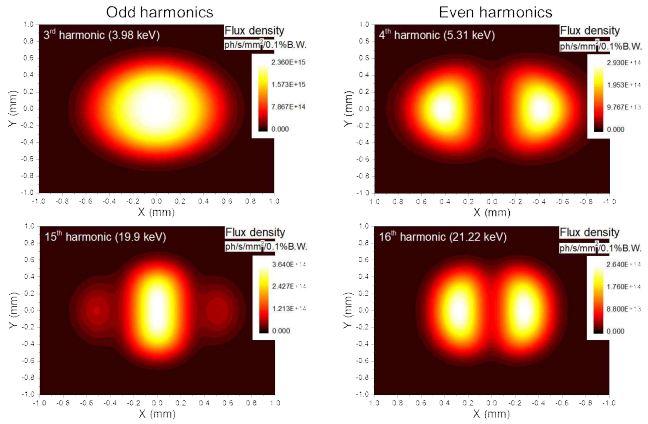
$$\sigma_{eff} = \sqrt{\sigma_{eletron}^2 + \sigma_{photon}^2} \quad \text{(수식 2.2.7.5)}$$

(수식 2.2.7.5)를 이용하여 K값에 따른 빔의 크기 변화를 SPECTRA 프로그램을 사용하여 계산하였다 (<그림 2.2.7.13> 참고).



<그림 2.2.7.13> K값에 따른 빔의 크기 변화

빔 크기는 모든 에너지 및 조화항에서 대략 수평 방향으로 약 19 μm, 수직 방향으로 약 4.5 μm 정도 임을 알 수 있다. XAFS 측정에 사용하는 3차 조화항부터는 빔 크기가 거의 변하지 않는다.



<그림 2.2.7.14> 홀수차 및 짝수차 조화항 빔 광량의 공간분포

<그림 2.2.7.14>는 광원으로부터 30 m 떨어진 곳에서 예상되는 홀수 차 및 짝수 차 조화항 빔의 공간적인 광량 분포를 나타내며, SPECTRA 프로그램을 사용하여 계산하였다. 짝수 차 조화항은 실험 시 쓰이지 않고 광학장치에 열부하를 가하기 때문에 광학장치에 빔이 도달하기 전에 슬릿을 통해 제거되어야 한다. 조화항의 차수가 3과 4로 비교적 낮을 경우, 수평 방향으로 약 ±0.2 mm 크기의 슬릿을 배치하면 짝수 차 빔을 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 예상된다.

빔의 발산각과 빔 크기는 높은 차수의 조화항을 사용할수록 (빔 에너지가 높을수록) 작아진다. 다시 말해, 조화항의 차수가 높을 때는 짝수 차 조화빔을 선택적으로 제거하기가 어렵다. 예를 들어, 16번째 짝수 차 조화빔을 제거하기 위해서는 슬릿의 간격이 ±0.1 mm이 되도록 조절해야 한다. 이 경우, 짝수 차 조화빔과 함께 홀수 차 조화빔의 광량도 크게 감소할 것이기 때문에, 실험에 필요한 높은 광량을 확보하기에 불리하다.

앞서 설명하였듯이, 높은 에너지의 빔을 사용할 때는 슬릿 간격을 조절하여 짝수 차 조화항을 제거하는 데 한계가 있다. 이러한 경우, 광학장치 앞에 낮은 에너지의 빔을 흡수하는 필터(혹은 attenuator)를 설치하여 광학장치에 가해질 열부하를 낮추는 방법이 더욱 효과적일 것이다. (<그림 2.2.7.28> 참고)

(7) Scan mode에 따른 undulator 조건

<표 2.2.7.8> 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인에서의 측정 조건

Operating mode	Measurement Time
Step scan	~ 20 min
On-the-fly scan	~ 3 min
Quick XAFS scan	~ 50 ms

실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인에서는 활용에 따라 위의 세 가지 측정 조건을 사용하고자 한다. Step scan과 on-the-fly scan 조건은 고농도의 일반적인 시료에 대한 XAFS 및 XES 측정 시 제공한다. 샘플 위치에서 10^{13} ph s^{-1}의 높은 광량이 예상되므로 3분의 비교적 짧은 측정시간을 갖는 on-the-fly scan 조건을 XAFS 측정의 기본 조건으로 설정한다. 빠른 XAFS 데이터 획득이 필요한 각종 in situ (operando) 실험 시에는 Quick XAFS scan 조건을 제공하여 최소 50 밀리초 당 한 개의 XAFS 데이터가 얻어질 수 있도록 한다.

○ Undulator gap scan mode

언듈레이터 gap 스캔 모드(이하 'gap 스캔')는 DCM이 브래그 각도를 변화시켜 빔 에너지를 변조하는 동안 언듈레이터 간격을 동시에 조절하여 높은 광량의 빔을 얻어내는 방식이다. Gap 스캔을 통해, 1 keV에 달하는 넓은 XAFS 측정 범위 전체에서 10^{14}~10^{15} ph s^{-1}(0.1% B.W.)$^{-1}$에 달하는 고광량의 빔을 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

Gap 스캔 모드를 사용할 경우, 고농도 시료에 대한 XAFS 측정 시 측정시간을 크게 줄일 수 있으므로 on-the-fly 스캔 모드를 적용하여 high-throughput 분석기법의 도입이 가능하다. 분석하고자 하는 원소의 함량이 시료 내에 1 wt% 이하로 매우 낮을 때도 gap 스캔 모드를 통해 높은 신호 대 잡음비를 갖는 XAFS 데이터의 획득이 가능할 것이다.

XES는 photon-in-photon-out 분광법으로서, 높은 광량의 빔이 요구되는 'photon hungry' 분석기법이다. 빔 에너지의 변조가 필요한 Resonant XES (RXES) 측정 시에 갭 스캔 모드를 적용하면 높은 신호 대 잡음비를 갖는 RXES 데이터를 얻을 수 있다.

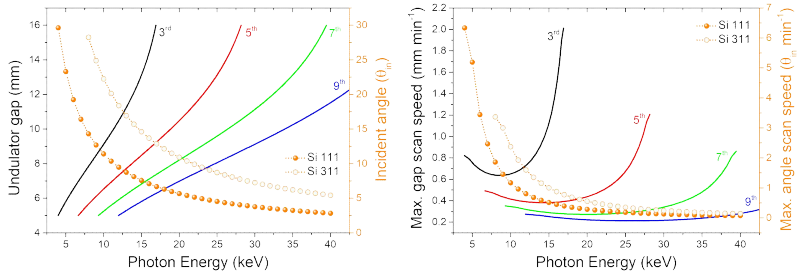
언듈레이터 간격을 조절하면 (수식 2.2.7.6)에 따라 각 조화항의 빔 에너지를 변화시킬 수 있다.

$$E_{und} = \frac{9.5E_e^2}{(1+K^2/2)\lambda_u} \quad \text{(수식 2.2.7.6)}$$

반면, DCM은 (수식 2.2.7.7)에 의해 빔 에너지를 변조한다.

$$E_{mono} = \frac{ch}{2dsin\theta} \quad \text{(수식 2.2.7.7)}$$

언듈레이터 gap과 DCM의 브래그 각도에 따른 빔 에너지 변화를 <그림 2.2.7.15>에 나타내었다.



<그림 2.2.7.15> 언듈레이터 gap 및 DCM 각도에 따른 빔 에너지 변화

Gap 스캔 모드의 목표 측정시간은 step scan 20분, on-the-fly 스캔 3분이다. <그림 2.2.7.15> 우측에 3분의 측정시간 동안 필요한 최대 gap 스캔 속도와 DCM의 브래그 각도 변환 속도를 첨부하였다.

언듈레이터와 DCM에서 빔 에너지를 나타내는 식이 각기 다르므로, 언듈레이터 간격과 DCM의 브래그 각도를 동시에 조절하며 빔 에너지를 일치화하는 작업에는 개발 시간이 필요할 것으로 예상된다. Python 혹은 C 기반의 자동 제어 프로그램을 적용하여 언듈레이터와 DCM 간 에너지 불일치 정도를 최소화하고자 한다. 언듈레이터로부터 인출된 빔의 에너지 대역폭을 고려하여 현재 목표로 하는 갭 스캔의 에너지 정확도(ΔE/E)는 10^{-3}이다.

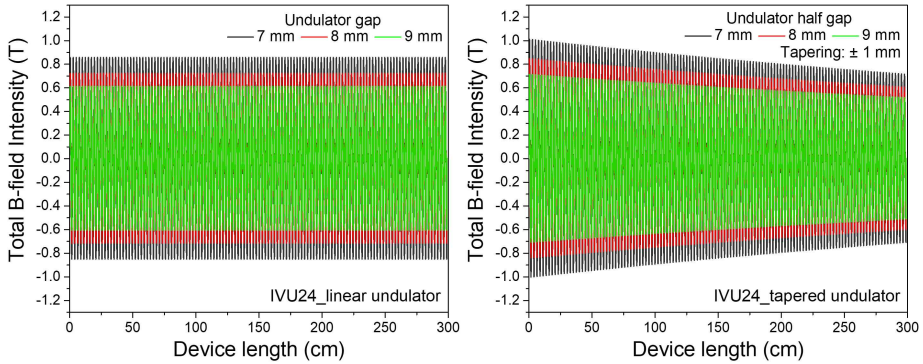
○ Undulator Tapering Mode (for QXAFS)

언듈레이터 간격에 기울기를 주어 전자가 입사되는 부분과 출사되는 부분의 자석 간격을 다르게 조정한 형태의 언듈레이터를 tapered-undulator라고 한다. 또한, 언듈레이터 간격에 기울기를 주는 행위는 undulator tapering이라고 한다. 언듈레이터

간격이 클 때는 자석 간 거리가 멀어져 자장이 약화되어 이를 통과하는 전자들로부터는 단파장의 빔이 발생한다. 반면, 언듈레이터의 간격이 좁아지면 자장이 강해지며, 장파장의 저에너지 빔 발생하게 된다. 결국, tapered-undulator에서 인출되는 빔은 특정 에너지에서의 광량이 다소 낮아짐과 동시에 에너지 대역폭이 넓어진다. 이때, 언듈레이터 간격의 기울기를 크게 할수록 광량은 더욱 감소하며 대역폭은 더욱 넓어진다.

QXAFS의 측정시간은 한 스펙트럼 당 1초 이하로, step 스캔이나 on-the-fly 스캔 모드에 비해 상당히 짧다. 따라서, 갭 스캔 방식으로 빔 에너지를 바꾸는 데에는 장치의 기구적인 한계가 있으므로, QXAFS 측정 시에는 갭 스캔을 방식으로 빔 에너지를 변화시킬 수 없다. 따라서, 언듈레이터를 tapering 하여 넓은 대역폭을 갖는 빔을 확보한 후, QDCM을 통해 원하는 속도만큼 빔 에너지를 빠르게 변화시켜 가며 QXAFS 실험을 진행한다.

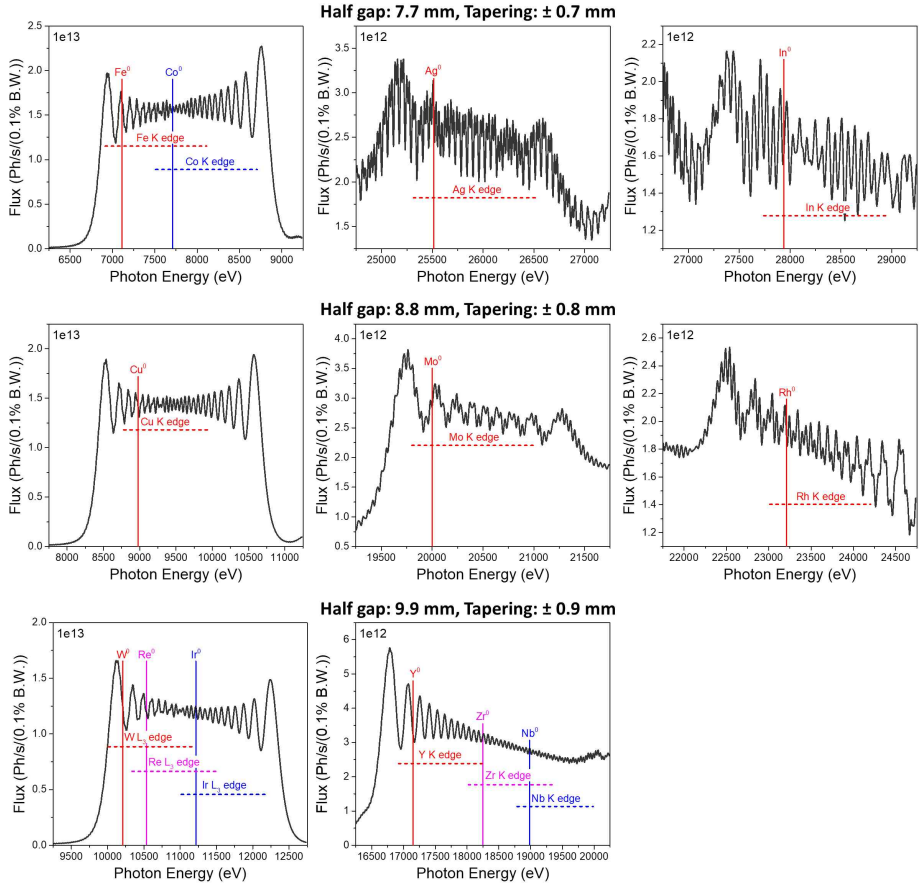
<그림 2.2.7.16>은 언듈레이터의 갭을 7 mm에서 9 mm로 하고 언듈레이터 양 끝단을 ±1 mm로 tapering 하였을 때 나타나는 수직 방향 자장의 분포를 나타낸다.



<그림 2.2.7.16> 언듈레이터 tapering (20%)에 의한 자장 세기 변화

OASYS 프로그램 내 XOPPY의 YAUP 코드를 활용하여 tapered undulator로부터 인출된 빔의 광량을 계산하였다 (<그림 2.2.7.17> 참고). <표 2.2.7.9>에 Fe K edge, Co K edge, Cu K edge 등 여러 흡수단을 측정하기 위한 언듈레이터 간격 및 Tapering 조건 광량을 정리하였다. 예를 들어, 언듈레이터의 갭을 7.7 mm로 하고 양 끝을 ±1 mm로 tapering하는 것으로 Fe K edge, Co K edge, Ag K edge, In K edge에 해당하는 흡수단의 EXAFS 영역에 해당하는 에너지 범위까지 넓은 에너지 대역폭을

갖는 빔을 언듈레이터로부터 인출할 수 있다. 이처럼, 측정할 원소에 알맞게 언듈레이터를 적절히 tapering 하는 것을 통해 40 keV 이내에 위치한 대다수 흡수단에 대한 QXAFS 측정을 수행할 수 있을 것이다. EXAFS 영역까지의 에너지 대역폭을 확보하고자 할 경우, 에너지 영역에 따라 샘플 위치 #1 (@60 m)에서 약 10^{13} ph s^{-1} $(0.1\%B.W.)^{-1}$의 광량이 예상된다.

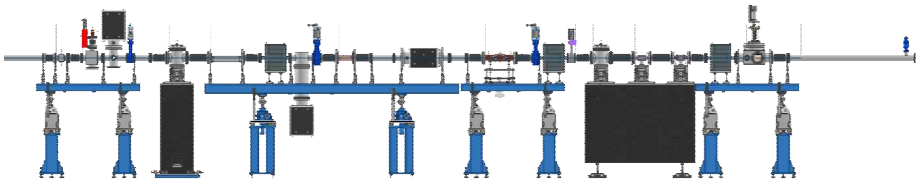


<그림 2.2.7.17> Tapering 조건별 빔의 flux 변화 (샘플 위치 #1 기준)

<표 2.2.7.9> 흡수단 별 Taper 조건 및 광량

흡수단 (absorption edge)	흡수단 에너지	Half Gap / Tapering	Flux (ph/s/0.1%B.W.)
Fe K edge	7,112 eV	7.7 mm / ±1.4 mm	1.5 × 10^{13}
Co K edge	7,709 eV		1.5 × 10^{13}
Ag K edge	25,514 eV		2.8 × 10^{12}
In K edge	27,940 eV		1.9 × 10^{12}
Cu K edge	8,979 eV	8.8 mm /±1.6 mm	1.5 × 10^{13}
Mo K edge	20,000 eV		3.0 × 10^{12}
Rh K edge	23,220 eV		2.1 × 10^{12}
W L_3 edge	10,207 eV	9.9 mm / ±1.8 mm	1.2 × 10^{13}
Re L_3 edge	10,535 eV		
Ir L_3 edge	11,215 eV		
Y K edge	17,038 eV		3.2 × 10^{12}
Zr K edge	17,998 eV		
Nb K edge	18,986 eV		

사. 프론트엔드



<그림 2.2.7.18> 프론트엔드의 장치 구성도

실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인의 프론트엔드는 Korea-4GSR의 IVU24 전용 프론트엔드와 구성과 배치를 같게 한다 (<그림 2.2.7.18>). 프론트엔드의 주요 역할은 IVU24로부터 인출된 빔의 power를 적절히 감쇠시켜 빔라인의 안정적인 운용이 가능하게 하는 것이다. 또한, safety magnet, photon shutter, safety shutter 등을 배치하여 발생할 수 있는 사고를 미리 방지한다.

광학허치 내 각종 광학계의 손상을 방지하기 위해 아래의 <표 2.2.7.10>과 같이 IVU24에서 인출되는 최대 빔 출력의 95% 이상을 프론트엔드에서 제거하고자 한다.

<표 2.2.7.10> IVU24의 출력

Source	Total power	Power density	Max. partial power after FE
IVU24	17.9 kW	165 kW $mrad^{-2}$	400 W

아. 광학허치

(1) 광학계 상세사양

<표 2.2.7.11> 광학허치 내 광학장치 상세사양

	M1	QDCM	DCM	M2	M3
광원으로부터 거리 (m)	45	48.5	50	53.5	54.35
Incident Angle	2 mrad	4.5~30° (Si 111) 5.0~15° (Si 311)	4.5~30° (Si 111) 5.0~15° (Si 311)	2 ~ 3 mrad	2 ~ 3 mrad
Shape	Cylindrical	Flat	Flat	Cylindrical	Flat
Tangential Radius (km)	7 ~ 40 km (bender)	-	-	∞	12 ~ 25 km (bender)
Sagittal Radius (mm)	180	-	-	61.4 (2 mrad): [Rh 5 nm/ Pt 50 nm] 92.0 (3 mrad): [Si]	∞
Surface Normal direction	Horizontal	Vertical			
Substrate	Si	Si(111) / Si(311)	Si(111) / Si(311)	Si	Si
Coating Materials (Thickness, nm)	[Rh 5 nm/ Pt 50 nm]	-	-	[Si] [Rh 5 nm /Pt 50 nm]	[Si] [Rh 5 nm /Pt 50 nm], [Pt 50 nm]
Beam size (H×V) @ 10 keV (μm×μm)	1200 × 1160	1290 × 1190	1330 × 1190	1410 × 1170	1360 × 1120
Footprint (L × H) (mm×mm)	600 × 1.2	18 × 1.2	18 × 1.2	600 × 1.2	600 × 1.2
Substrate size (L×W×H) (mm×mm×mm)	800 × 50 × 55	55 × 40 × 50 (1st crystal)	60 × 25 × 50 (1st crystal)	600 × 60 × 50	800 × 50 × 50
Focus distance (m)	∞	-	-	21.5 m	∞
Roughness, σ (r.m.s.)	< 0.3 nm	< 1 μm	< 1 μm	< 0.3 nm	< 0.3 nm
Slope error (Tangential / sagittal) (μrad, r.m.s.)	<1.5/<5.0	<1	<1	<1.5/<5.0	<0.25/<1.0
Max total heat load (W)	16.3	56.1	52.8	-	-
Max surface heat load (W mm^{-2})	0.0326 (@4 keV)	28.1 (@4 keV)	26.4 (@4 keV)	-	-

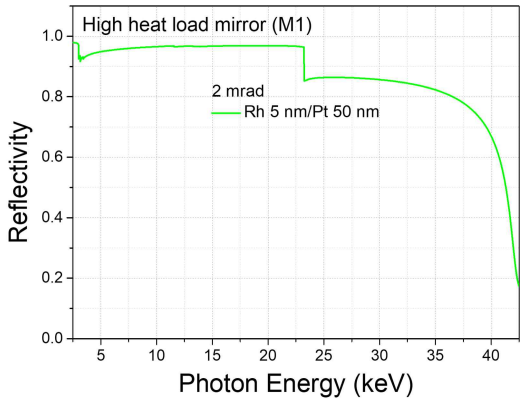
본 빔라인에서 사용할 광학장치에 대한 상세사양이 <표 2.2.7.11>에 정리되어있다.

(2) High Heat Load Mirror (M1)

시준 거울의 역할을 요약하면 아래와 같다.

- 빔 시준 (beam collimation)

- 열부하 (high heat load) 제거를 통한 광학계 보호



<그림 2.2.7.19> M1 거울면의 반사도

M1은 광학 허치 내에 위치한 첫 광학장치이다. 본 빔라인에 도입하고자 하는 M1은 Rh 5 nm/Pt 50 nm으로 코팅하여, 본 빔라인에서 제공할 4~40 keV의 전체 에너지 범위에서 사용하고자 한다. 빔 입사각은 2 mrad이며, 빔 정렬 과정의 최소화 및 유지 보수의 용이성을 위해 입사각과 거울면을 바꾸지 않고 사용한다. <그림 2.2.7.19>에 M1 거울면의 반사도 그래프를 나타내었으며, 본 빔라인에서 제공할 전 에너지 범위에서 뚜렷한 반사도 감소가 없는 것을 볼 수 있다.

M1은 수직 방향으로 빔을 시준할 수 있는 수평 반사 sagittal cylinder 거울로 선정하여 단색화장치에 빔이 입사되기 전에 빔 발산각을 감소시킴으로써 단색화 빔의 에너지 분해능을 높일 수 있도록 한다.

(3) Quick DCM (QDCM)

QDCM은 M1 3.5 m 뒤, 광원으로부터 48.5 m 떨어진 거리에 위치한다. QDCM의 주요 역할은 고속 에너지 단색화이다. QDCM에는 Si (111)과 Si (311), 이 두 종류의 결정을 두어 사용할 빔의 에너지에 따라 교대하여 사용한다. QDCM는 빠른 에너지

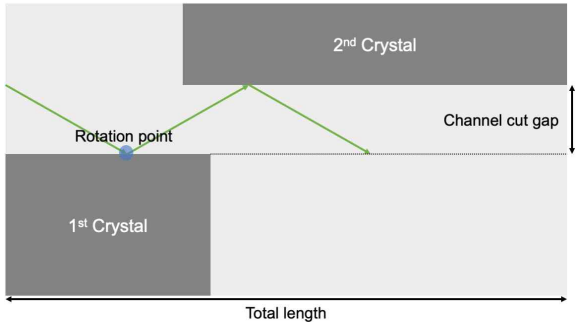
변조가 요구되는 QXAFS 실험 시 주로 활용한다. 사용하고자 하는 QDCM의 사양을 아래의 <표 2.2.7.12>에 정리하였다.

<표 2.2.7.12> QDCM 사양

Operation condition	Values
Crystal Cut	Si (111) & (311)
Energy Range	Si (111): 4.5 ~ 34 keV Si (311): 7.0 ~ 50 keV
Energy Stability	±0.1 eV (@9 keV) / 2 hours
Bragg Angle Range	Si (111): 4.25° to 24° Si (311): 4.30° to 33°
Max. Surface Power Density on 1st Crystal Surface	10 W mm^{-2}
Vertical Beam Offset in Y direction	Si (111): 18 ~ 20 mm Si (311): 16 ~ 19 mm
Channel Cut Gap	Si (111): 10.0 mm Si (311): 9.5 mm
Energy Scan Speed	0.1 ~ 60 Hz

QDCM은 최대 60 Hz의 빠른 에너지 변조 속도를 갖는다. 60 Hz의 스캔 속도는 forward scan direction 및 reverse scan direction에서 모두 XAFS 데이터를 측정할 시 초당 120개의 데이터를 측정할 수 있다는 것을 의미한다. 일반적인 DCM을 사용할 때는 3분당 1개의 데이터를 얻을 목표로 두고 있는 것을 고려하면 (on-the fly scan 기준), QDCM이 갖는 최대 60 Hz의 에너지 변조 속도는 매우 빠른 것임을 알 수 있다. 따라서, QDCM을 활용하면 1초 이내에 XAFS 측정이 가능하여 실시간 구조 변화가 예상되는 반응에 관한 구조분석 연구를 수행할 수 있다.

QDCM은 첫 번째와 두 번째 Si 결정이 한 몸체에 붙어있는 Channel-cut 결정을 사용하고, 이를 빠르게 oscillation 시키는 방법으로 에너지를 수 밀리초의 매우 빠른 시간 내에 변조시킨다 (<그림 2.2.7.19> 참고).



<그림 2.2.7.19> QDCM 전용 Channel-cut 결정의 구조

일반적인 DCM은 Exit 빔의 위치를 고정하기 위해 아래 식에 의해 DCM 내 두 번째 결정의 수직 위치를 브래그 각도에 따라 변화시켜 가며 사용한다.

$$h = h_0(1+\ln(\cos\theta_B)) \quad \text{(수식 2.2.7.8)}$$

반면, QDCM은 Channel-cut 결정을 사용하므로 두 번째 결정의 높이를 조절할 수 없고, 결국 Exit 빔의 위치가 입사각(혹은 빔 에너지)에 따라 바뀌게 된다. 이때, Exit 빔 위치의 변화폭을 최소화하기 위해 Channel cut 결정은 갭이 10 mm 이하인 것으로 사용해야 한다.

<표 2.2.7.13> 입사각에 따른 수직 방향 빔 offset의 변화

Bragg Angle (degree)	Energy (keV)		Vertical Offset (mm)	Beam Offset variation (μm) / degree
	Si (111)	Si (311)		
4.20° ~ 6.50°	26.995 ~ 17.465	50.492 ~ 33.442	19.946 ~ 19.871	32.6
7.00° ~ 10.00°	16.223 ~ 11.385	31.064 ~ 21.801	19.851 ~ 19.698	51.0
11.00° ~ 14.00°	10.361 ~ 8.172	19.841 ~ 15.649	19.633 ~ 19.406	75.7
15.00° ~ 20.00°	7.639 ~ 5.781	14.627 ~ 11.069	19.319 ~ 18.794	105.0
22.00° ~ 24.00°	5.278 ~ 4.861	10.106 ~ 9.308	18.544 ~ 18.271	136.5

입사각 변화에 따라 18 mm~19 mm 범위에서 수직 방향의 빔 offset이 변하는 것을 <표 2.2.7.13>에서 확인할 수 있다. 각도 당 빔 offset 변화 폭은 최대 136.5 μm이며, 스캔 동작 범위인 ±2.1°를 고려하면 최대 300 μm의 빔 offset이 예상된다. 이러한 빔 offset 변화로 인해 발생할 수 있는 빔의 위치 변화는 QDCM 뒤에 집속 거울을 바로 배치하여 최소화할 것이다. 또한, QXAFS 실험용 샘플 위치 #1를 QDCM으로부터 12.5 m 떨어진 곳에 따로 배치하여 1 × 1 mm^2 크기의 비집속된 빔을 사용함으로서 QDCM의 각도 변화에 따른 빔 위치 변화가 뚜렷하게 관찰되지 않도록 하였다.

<표 2.2.7.14> QDCM 작동 방식

Motorized movement	Movement	Range	Motor Speed (frequency)
Bragg angle Step mode (θ_S)	Goniometer step motor	4° ~ 25°	1° s^{-1} (~ 0.2 keV s^{-1} @ 5 keV) (~ 1 keV s^{-1} @ 10 keV)
Bragg angle Fast scan mode (θ_F)	Torque motor on the the goniometer	± 2.1°	0.1 ~ 60 Hz

QDCM은 'goniometer step motor'와 'torque motor on the goniometer' 두 종류의 모터를 사용하여, 스캔 방식을 'step mode'와 'fast scan mode' 중 선택하여 사용하고자 한다 (<표 2.2.7.14> 참고). Step mode로는 수 초 이내에서 발생하는 반응을 관찰할 때, fast scan mode는 수십 밀리초의 더욱 짧은 반응 시간 동안 발생하는 과정을 관찰할 때 각각 활용한다. 화학 반응의 종류에 따라 반응 속도가 크게 다르므로, 분석하고자 하는 반응계에 알맞게 두 가지 스캔 방식을 교체하며 사용하는 것이 필요할 것이기 때문이다.

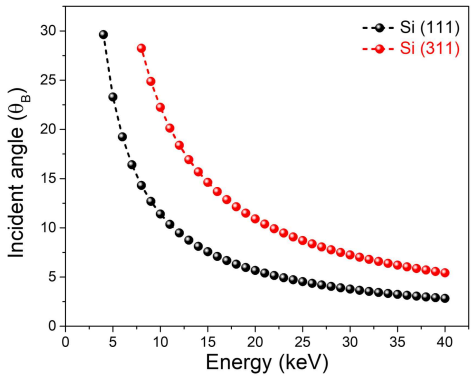
QDCM의 최대 측정 속도는 1개의 스펙트럼 당 10 ms로 예상된다. 최대 측정 속도 기준으로 1시간당 360,000개의 데이터가 얻어질 것이므로, 원활한 Quick XAFS 데이터 분석을 위해서는 다량의 XAFS 데이터를 다루고 해석할 수 있는 소프트웨어의 개발이 반드시 선행되어야 한다. 따라서, QDCM의 초기 작동 조건은 XANES 영역 기준으로 50 ms, EXAFS 영역 기준으로 250 ms로 설정하고, 이에 맞는 QXAFS 분석 소프트웨어를 함께 제공한다.

QDCM은 'undulator tapering mode'에서만 사용한다. 빔의 에너지 대역폭을 1 keV 이상으로 충분히 넓히기 위해서는 언듈레이터 간격을 7 mm 이상으로 설정함과 동시에 양 끝 간격을 ±1 mm만큼 tapering 해야 한다. 앞서 '빔 출력 (power) 특성' 장에서 설명하였듯이 빔의 출력은 간격이 증가함에 따라 지수 함수적으로 감소하므로, QDCM에 가해질 열부하는 크게 감소할 것으로 예상된다. 열부하가 우려될 시에는 언듈레이터의 간격을 더욱 넓힌 뒤 더 충분히 tapering 하는 방식으로 열부하 문제를 해소할 수 있을 것이다. 또한, M1 이전에 위치한 감쇠기를 통해 빔 광량을 줄여 QDCM에 가해질 열부하를 감소시킬 수 있다.

(4) Double Crystal Monochromator (DCM)

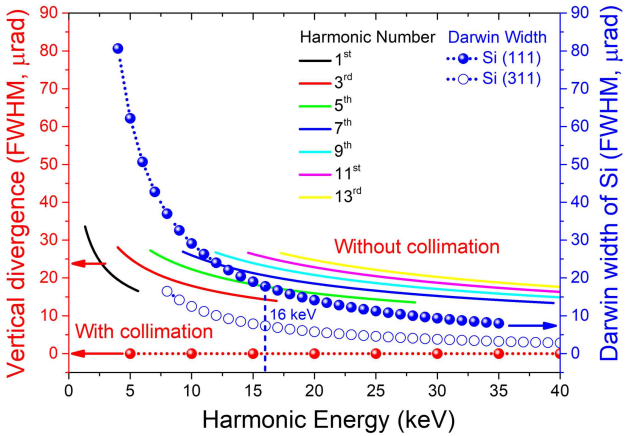
○ 입사각과 빔 에너지

DCM의 주요 역할은 에너지 단색화이며, DCM에 Si (111)과 Si (311), 두 종류의 결정을 두어 사용할 빔의 에너지에 따라 교체하여 사용한다. 빔 에너지에 따른 Si (111), Si (311) 단결정의 입사각(브래그 각)이 <그림 2.2.7.20>에 정리되어있다.



<그림 2.2.7.20> 입사각에 따른 빔 에너지 변화

○ 빔 발산각과 회절빔의 광량

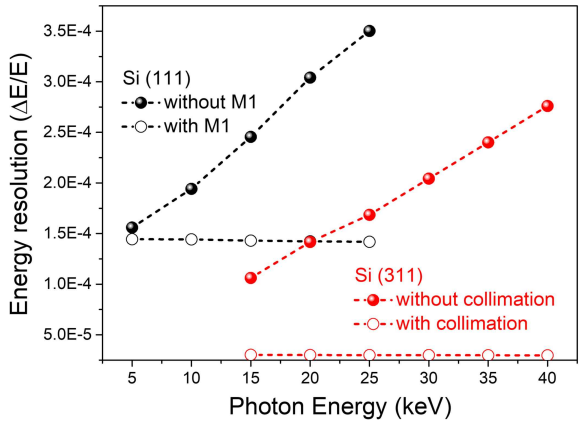


<그림 2.2.7.21> 빔 에너지에 따른 수직 발산각과 Si 결정의 Darwin width

빔의 발산각은 회절 과정에서 발생하는 광량 손실과 관련이 있다. 빔의 수직 발산각이 DCM 내 Si 결정이 갖는 Darwin width보다 작으면 회절 과정에서 발생하는 광량의 손실을 무시할 수 있다. 본 빔라인의 IVU24에서 인출된 빔의 발산각과 Si 결정의 Darwin width 간 관계가 <그림 2.2.7.21>에 정리되어있다. 빔 에너지가 16 keV 이하일 때는 빔의 수직 발산각이 Si (111) 결정의 Darwin width보다 작기 때문에 빔 광량에 손실 없이 이상적으로 빔을 단색화할 수 있을 것으로 예상된다. 빔에너지가 16 keV 이상이면 빔의 수직 발산각이 Si (111) 결정의 Darwin width보다 크다. 이러한 경우에는 Darwin width 이내의 수직 발산각을 갖는 빔만 Si 결정면으로부터 반사되므로 광량 손실이 발생한다. 마찬가지로, Si (311) 결정으로 빔을 단색화하면 5~40 keV의 전 에너지 범위에서 광량 손실이 크게 발생하게 된다.

앞서 설명한 것처럼, M1은 시준 거울로 기능하여 빔의 수직 발산각을 0에 가깝도록 크게 감소시킬 수 있다. M1에 의해 빔이 이상적으로 시준되는 경우에는 전 에너지 영역에서, 빔의 수직 발산각이 Si (111) 및 Si (311)의 Darwin width보다 작으므로 광량 손실 없는 빔 단색화가 가능해진다. 따라서, 샘플 위치에서 충분한 광량을 확보하기 위해서는 M1에 의한 빔 시준이 반드시 필요하다.

○ DCM의 에너지 분해능



<그림 2.2.7.22> DCM의 에너지 분해능

DCM의 에너지 분해능 (ΔE/E)은 (수식 2.2.7.9)를 따른다.

$$\Delta E/E = \cot\theta_B[\omega_D^2+\phi^2]^{1/2} \quad \text{(수식 2.2.7.9)}$$

이 식에서, θ_B는 첫 번째 DCM 결정의 브래그 각도 (혹은 빔 입사각), ω_D는 Si 결정의 Darwin width, ϕ는 빔 발산각을 의미한다. 아래의 <표 2.2.7.15>에 에너지에 따른 빔 입사각, Darwin width, 빔 발산각과 이 값들을 활용하여 계산한 에너지 분해능이 정리되어있다. 에너지 분해능 계산 시 빔 발산각은 에너지 분해능에 영향을 미치는 수직 방향으로만 고려하였으며, SPECTRA 프로그램을 활용해 계산되었다.

<그림 2.2.7.22>과 <표 2.2.7.15>에 Si (111)과 Si (311) 결정을 통해 단색화된 빔의 에너지 분해능이 요약되어있다. Si (111) 결정으로 빔이 단색화되는 것을 가정하였을 때, 빔을 시준하지 않을 경우 얻어질 수 있는 에너지 분해능 ($\Delta E/E$)은 1.5×10^{-4}에서 3.5×10^{-4}로 얻어진다. 반면, 빔을 시준할 경우에는 에너지 분해능을 5~25 keV의 에너지 범위에서 1.4×10^{-4}로 줄일 수 있다.

<표 2.2.7.15> 에너지에 따른 입사각, Darwin width, 빔 퍼짐각, 에너지 분해능 요약표

Si (111)					
Energy (keV)	Incident angle (degrees)	Darwin width (FWHM, μrad)	Vertical divergence (FWHM, μrad)	ΔE/E (10^{-4}) (w.o. collimation)	ΔE/E (10^{-4}) (with collimation)
5	23.296	62.19	25.36	1.56	1.4
10	11.405	29.11	26.22	1.94	
15	7.575	19.02	26.54	2.46	
20	5.674	14.14	26.70	3.04	
25	4.537	11.26	25.40	3.50	

Si (311)					
Energy (keV)	Incident angle (degrees)	Darwin width (FWHM, μrad)	Vertical divergence (FWHM, μrad)	ΔE/E (10^{-4}) (w.o. collimation)	ΔE/E (10^{-4}) (with collimation)
15	14.620	7.88	26.54	1.06	0.3
20	10.912	5.78	26.70	1.41	
25	8.710	4.58	25.40	1.68	
30	7.25	3.8	25.71	2.04	
35	6.21	3.24	25.93	2.40	
40	5.43	2.82	26.09	2.76	

DCM을 통해 단색화된 빔의 에너지 분해능이 XAFS 분석에 충분한지 파악하기 위해 특정 에너지에서 예상되는 에너지 분해능을 여러 원소의 'Natural band width'와 비교하여 정리하였다 (<표 2.2.7.16> 참고). 20 keV에 흡수단이 위치하는 Mo K edge는 4.52 eV의 Natural bandwidth를 갖는다. 시준되지 않은 20 keV의 빔이 Si (111) 결정을 통해 단색화될 경우, 단색빔의 에너지 분해능은 약 6 eV이 될 것으로 예상된다. 이 경우, 단색빔의 에너지 분해능이 Mo K edge의 Natural bandwidth보다 크므로 XANES 데이터에 왜곡이 발생할 수 있다. 반면, 20 keV의 빔을 시준하면 에너지 분해능을 2.8 eV까지 낮출 수 있으며, 이를 통해 왜곡 없는 XANES 데이터를

얻는 것이 가능할 것으로 예상된다. 따라서, 빔 시준을 통해 에너지 분해능이 우수한 단색빔을 얻는 것은 XAFS 측정 및 분석에 필수적이다.

<표 2.2.7.16> 에너지 분해능과 Natural band width 비교표

Si (111)			Edge energy (keV)	ΔE/E (w.o. collimation)	ΔE/E (with collimation)	Natural Bandwidth (FWHM, eV)
Energy (keV)	ΔE/E (10^{-4}) (w.o. collimation)	ΔE/E (10^{-4}) (with collimation)				
5	1.56	1.4	Ti K (4.966)	0.77	0.70	0.94
10	1.94		Zn K (9.659)	1.87	1.35	1.67
15	2.46		Rb K (15.200)	3.74	2.13	2.99
20	3.04		Mo K (20.000)	6.08	2.80	4.52
25	3.50		Pd K (24.350)	8.52	3.41	6.24

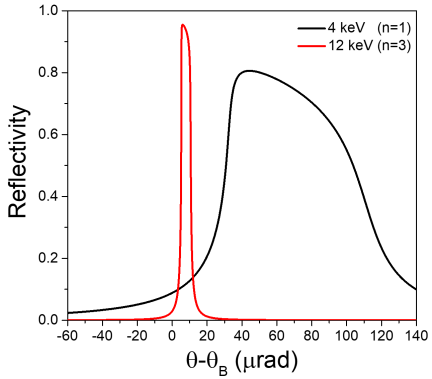
Si (311)			Edge energy (keV)	ΔE/E (w.o. collimation)	ΔE/E (with collimation)	Natural Band Width (FWHM, eV)
Energy (keV)	ΔE/E (10^{-4}) (w.o. collimation)	ΔE/E (10^{-4}) (with collimation)				
15	1.06	0.3	Rb K (15.200)	1.61	0.46	2.99
20	1.41		Mo K (20.000)	2.82	0.60	4.52
25	1.68		Pd K (24.350)	4.09	0.73	6.24
30	2.04		Sb K (30.491)	6.22	0.91	9.16
35	2.40		Cs K (35.985)	8.64	1.08	12.3
40	2.76		Ce K (40.443)	11.2	1.21	15.1

○ Detuning

4 keV의 빔을 사용한다고 가정할 때 브래그식에 의한 회절각은 (수식 2.2.7.10)을 따른다.

$$\theta_B = \sin^{-1}(n\lambda/2d) = \sin^{-1}(\lambda_{4keV}/2d_{Si111}) = \sin^{-1}(\lambda_{12keV}/2d_{Si333}) = 29.63^{o} \quad \text{(수식 2.2.7.10)}$$

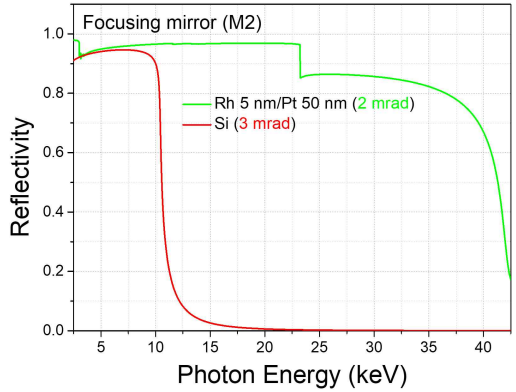
이 계산 결과처럼, 4 keV와 12 keV는 회절각이 같다. <그림 2.2.7.23>을 보면, Si (111)의 Darwin width는 빔 에너지가 12 keV일 때가 4 keV일 때보다 좁게 형성되는 것을 알 수 있다. 또한, 이 두 Darwin width의 중심 위치는 70 μrad 정도 차이를 보인다. 이와 같은 빔 에너지에 대한 Darwin width의 특징을 활용하여, DCM 두 번째 결정의 피치(pitch)를 조정하는 '비평행화' 과정 혹은 '디튜닝(detuning)'으로 원하는 에너지의 빔을 고차항 빔으로부터 분리하여 DCM 이후에 위치하는 광학장치로 전송하고자 한다.



<그림 2.2.7.23> Darwin width curve

(4) 집속거울 (Focusing mirror, M2)

집속거울(M2)은 DCM 3.5 m 뒤, 광원으로부터 53.5 m 떨어진 거리에 위치한다. M1의 주요 역할은 수평방향 빔 집속 및 고차항 빔 제거이며, 빔 반사면은 위쪽(수직)을 향해 있다.



<그림 2.2.7.24> M2 거울면의 반사도

<그림 2.2.7.24>는 M2의 거울면과 입사각에 따른 반사도를 나타낸 그래프이다. M2는 sagittal cylinder 형태의 거울면을 갖고 있어 수평 방향의 빔을 집속할 수 있으며, Si, Rh 5 nm/Pt 50 nm의 두 개의 sagittal cylinder 거울면을 두어 사용할 빔 에너지에 따라 선택하여 사용하고자 한다 (<표 2.2.7.17> 참고). M1과 마찬가지로 4~40 keV의 전

에너지 영역에서 Rh 5 nm/Pt 50 nm 거울면을 통해 빔을 집속/전송할 수도 있다.

<표 2.2.7.17> 에너지 영역별 사용하고자 하는 mirror strip-M2

Photon Energy (keV)	Coating	Incident angle	Mirror shape
4 ~ 10	Si	3 mrad	Sagittal Cylinder
4 ~ 40	Rh 5 nm/ Pt 50 nm	2 mrad	

빔 에너지가 10 keV 이하일 때는 입사각을 3 mrad으로 조정하고 Si sagittal mirror로 빔을 집속/전송한다. 반면, 10 keV 이상의 빔을 사용할 때는 입사각을 2 mrad으로 조정한 후 Rh 5 nm/Pt 50 nm 거울면을 갖는 sagittal mirror로 빔을 집속/전송한다. 에너지 변경을 자주 할 경우에는 전 에너지 영역에서 Rh 5 nm/Pt 50 nm 거울면을 고정적으로 사용하고 DCM의 2nd crystal을 디튜닝하여 고차항을 제거하여 빔라인 운영에 편의성을 높인다.

본 빔라인에서 제공할 실험기법인 XES는 단위 면적 당 높은 광량을 갖는 빔이 필요하므로, XES stage에는 작은 빔 크기를 갖는 집속빔이 필요하다. 또한, 빔 크기는 XES 분광계의 에너지 분해능과 연관이 있다. XES 분광계의 에너지 분해능은 (수식 2.2.7.11)을 따른다.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_B^2 + \Delta E_{Dar}^2 + \Delta E_{Det}^2 + \Delta E_{band}^2} \quad \text{(수식 2.2.7.11)}$$

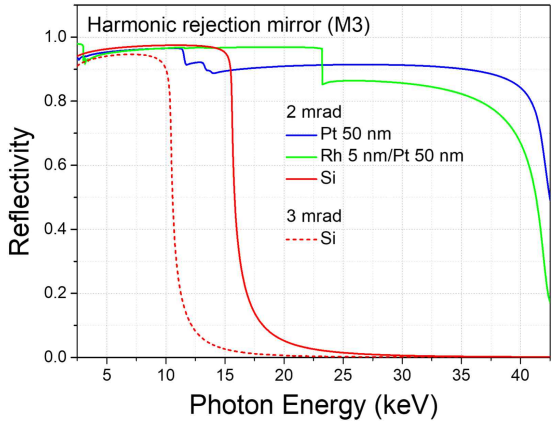
여기서, ΔE_B: 샘플 위치에서의 빔 크기, ΔE_{Dar}: Si 결정의 Darwin width에 의한 에너지 분해능, ΔE_{Det}: 검출기의 공간 분해능 (Pixel 크기), ΔE_{band}: 단색화장치의 에너지 대역폭이다. 이처럼, XES 신호의 세기와 에너지 분해능을 높이기 위해서는 크기가 작고 높은 광량을 갖는 집속 빔이 필요하다.

(5) 고차항 제거 거울 (Harmonic Rejection Mirror, M3)

고차항 제거 거울(M3)은 M2 0.85 m 뒤, 광원으로부터 54.35 m 떨어진 거리에 위치하며, 빔 반사 방향은 아래(수직)이다. 또한, M3의 주요 역할은 고차항 빔 제거 및 빔 전송이다.

<그림 2.2.7.25>는 M2의 거울면과 입사각에 따른 반사도를 나타낸 그래프이다. M3는 bending이 가능한 flat 형태의 거울면을 갖고 있어 수직 방향의 빔을 집속할 수 있으며, Si, Rh 5 nm/Pt 50 nm, Pt 50 nm의 세 개의 flat 거울면을 두어 사용할 빔 에너지에 따라 선택하여 사용하고자 한다 (<표 2.2.7.18> 참고). M1, M2와 마찬가지로 4~40 keV의 전 에너지 영역에서 Rh 5 nm/Pt 50 nm 거울면을 통해 빔을

집속/전송하고 DCM 2nd crystal의 디튜닝을 통해 고차항을 제거할 수 있도록 한다. 25 keV 이상의 빔을 주로 사용할 때는 Pt 거울면을 통해 빔을 전송할 수 있도록 하여 광량 손실을 줄인다. 10 keV 이하의 빔을 주로 사용할 경우, M2 및 M3 모두 Si 거울면을 사용하고 빔 입사각을 3 mrad으로 조정하여 고차항을 효과적으로 제거할 수 있도록 한다.



<그림 2.2.7.25> M3 거울면의 반사도

<표 2.2.7.18> 에너지 영역별 사용하고자 하는 mirror strip-M3

Photon Energy (keV)	Coating	Incident angle	Mirror shape
4 ~ 10	Si	3 mrad	Flat (Tangential cylinder using bender)
4 ~ 15	Si	2 mrad	
4 ~ 40	Rh 5 nm /Pt 50 nm	2 mrad	
25 ~ 40	Pt 50 nm	2 mrad	

○ 고차항 제거

브래그식 ($n\lambda = 2d\sin\theta$)을 만족하는 고차항 빔 (n = 1,2,3,...)은 DCM의 Si 결정에 의해 여과되지 않고 사용하고자 하는 에너지를 갖는 빔과 함께 M1과 M2를 거쳐 실험허치까지 전송될 수 있다. 본 빔라인에서는 DCM 이후에 위치한 M1과 M2가 이러한 고차항을 제거하는 역할을 한다.

XAFS의 기본적인 원리는 아래의 Beer-Lambert 법칙을 따른다.

$$\ln\left(\frac{I_o}{I}\right) = \mu d \quad \text{(수식 2.2.7.12)}$$

XAFS는 빔 에너지의 변화에 따라 발생하는 물질의 흡광 계수(μ)를 관찰하여 물질 내 전자구조 및 국부 구조를 연구하는 분광법이다. 완전하게 단색화되지 않은 빔이 시료에 입사될 경우, 다른 에너지를 갖는 빔에 의해 위의 Beer-Lambert 법칙은 아래와 같이 변질된다.

$$\ln\left(\frac{I_o + I_{o,ext}}{I + I_{ext}}\right) = (\mu + \mu_{ext})d \quad \text{(수식 2.2.7.13)}$$

이 경우 XAFS 데이터는 왜곡된다. 즉, XAFS 측정에는 완전하게 단색화된 빔이 필요하다. M1과 M2는 고차항 흡수하여 왜곡 없는 XAFS 데이터를 획득할 수 있게 해야한다.

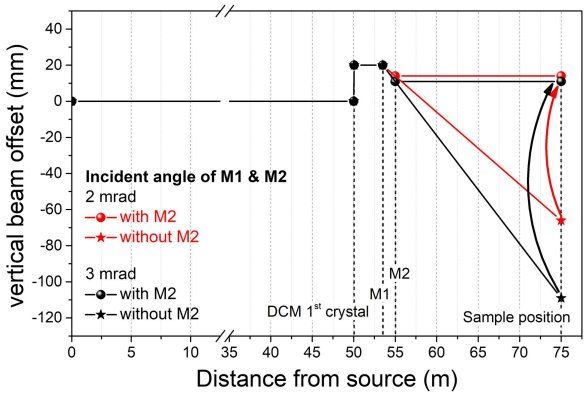
5 keV의 빔을 Si 거울면을 통해 전송한다고 가정하였을 때, 고차항은 M1과 M2를 거치면서 아래의 비율로 제거된다 (<그림 2.2.7.25> 참고).

$$I_{15keV}/I_{5keV} = [(0.026)^2/(0.94)^2] = 7\times10^{-5} \quad \text{(수식 2.2.7.14)}$$

4 keV의 빔을 사용할 경우, 고차항인 12 keV는 1.2×10^{-2}로 제거될 수 있다. 이보다 높은 비율로 고차항을 제거하기 위해서는 M1과 M2의 입사각을 3.5 mrad으로 높이면 되지만, 4 keV 이하의 빔 에너지에 대한 수요가 많지 않으므로 입사각은 2 mrad에서 3 mrad을 표준값으로 한다. 대신, DCM의 2nd crystal을 디튜닝하여 고차항을 제거할 수 있도록 한다.

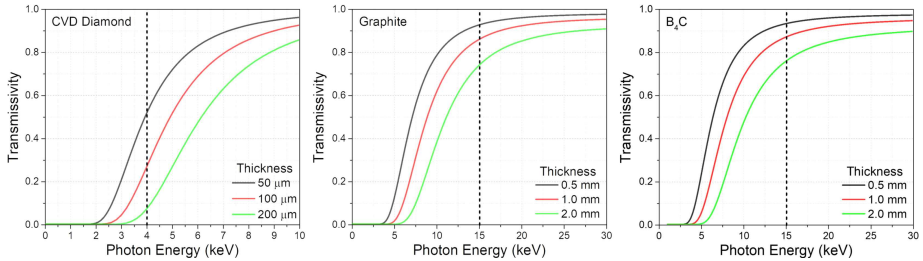
○ 빔 평행화 기능

M3의 입사각은 M2과 같도록 2 mrad에서 3 mrad으로 조절할 수 있도록 하여 M2를 통과한 빔이 지면과 평행하게 전송될 수 있도록 한다. <그림 2.2.7.27>에서 M3 유무에 따른 수직 방향의 빔 위치 변화를 확인할 수 있다. M2과 M3의 입사각을 2 mrad에서 3 mrad으로 조절하면 빔의 수직 방향 위치가 약 5 mm 만큼 이동한다. 반면, M3를 배치하지 않는다면 M1의 입사각을 바꿀 때 약 40 mm 이동하여 위치 변화폭이 크다. 이처럼, M3는 입사각에 의한 빔 위치 변화를 최소화할 수 있다.



<그림 2.2.7.27> M2 유무에 따른 수직 방향 빔 위치 변화

○ Attenuator: CVD Diamond & graphite (or B_4C)

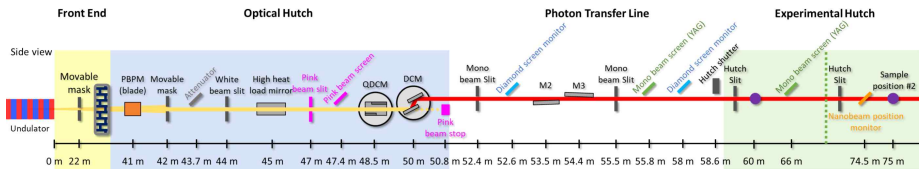


<그림 2.2.7.28> CVD Diamond filter와 graphite filter의 두께별 투과도

Attenuator는 15 keV 이하의 낮은 에너지를 갖는 빔을 흡수하여 광학계를 보호하기 위해 사용한다. 빔 경로상 DCM 이전에 배치하여 빔에 의한 열부하를 줄여 DCM 결정의 손상을 줄이는 것이 주요 역할이다. 본 빔라인은 4~40 keV 범위의 빔을 제공할 것이다. <그림 2.2.7.28>에 나타낸 것처럼, Diamond 및 Graphite (혹은 B4C)가 두께별로 장착되어 있는 attenuator를 통해 빔 에너지에 따른 투과율을 고려하여 교체하며 사용한다. 또한, Attenuator 상시 사용할 것이므로 수냉 시스템을 적용하여 열부하를 해소할 수 있어야 한다.

○ 빔 정렬용 진단장치

본 빔라인의 빔 정렬을 위한 진단장치를 <그림 2.2.7.29>에 나타내었다.

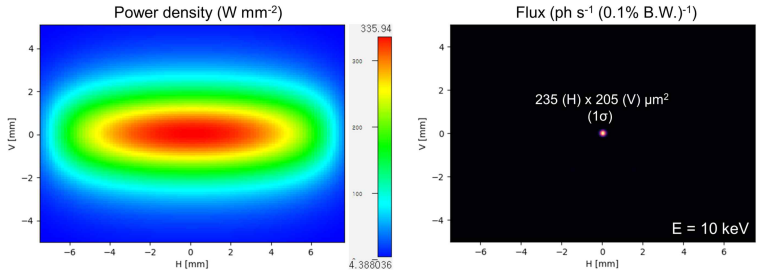


<그림 2.2.7.29> 빔 정렬을 위한 진단장치 모식도

Front-end 내 위치한 movable mask는 언듈레이터에서 인출되는 빔의 central cone만 통과시키는 역할을 한다. <그림 2.2.7.30>에서 확인할 수 있듯이, movable mask 위치에서 white 빔의 출력 밀도 분포와 10 keV의 에너지를 갖는 빔의 광량 분포에는 큰 차이가 있다. 따라서, 광학장치의 열부하를 최소화하기 위해 movable mask의 최대 opening을 1 × 1 mm^2로 제한하더라도, 빔의 central cone은 손실 없이 광학장치로 전송될 수 있다. 1 × 1 mm^2의 movable mask를 통과하는 최대 출력 밀도는 340 W mm^{-2}으로, 광학장치의 위치는 이 출력 밀도를 고려하여 선정하였다.

White beam slit은 1 × 1 mm^2의 출구 크기를 갖는 슬릿으로, movable mask의 오작동 시 발생할 수 있는 사고를 방지할 수 있도록 최대 1.5 kW의 빔에도 안정하도록 설계한다. 10 keV의 빔 에너지 기준으로 42 m 위치에서 예상되는 빔의 크기는 약 1(H) × 1(V) mm^2 (10 keV, FWHM)이므로, 1 × 1 mm^2의 출구 크기는 central cone을 통과시키기에 적절하다.

광원으로부터 43.7 m 떨어진 거리에 위치한 Attenuator는 15 keV 이하의 빔으로 인해 QDCM과 DCM에 가해지는 열부하를 낮추는 역할을 한다. 사용하고자 하는 CVD diamond filter의 두께가 50 μm일 때, movable mask를 통과한 340 W의 빔 출력을 310 W로 낮출 수 있다. 15 keV 이상의 고에너지의 빔을 사용할 때는 0.5 mm에서 2 mm 두께의 graphite (혹은 B_4C)를 attenuator로 사용하여 DCM에 가해지는 열부하를 감쇠시킨다.



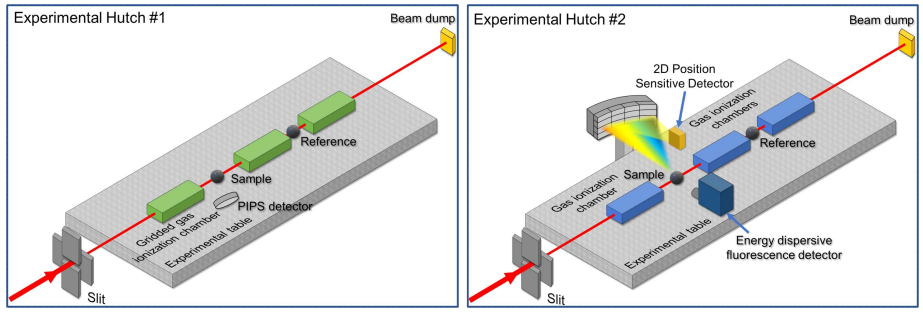
<그림 2.2.7.30> Front-end 내 movable mask 위치(22 m)에서의
출력 밀도와 광량의 공간분포 (OASYS 프로그램의 Shadow로 계산됨)

각 광학장치 이후에는 빔의 모양을 확인할 수 있는 screen을 설치하여, 빔이 각 광학장치를 통과한 직후 빔 모양에 변형이 있는지 확인한다. 수직 방향으로 빔 경로를 변화시키는 DCM과 M2&M3 이후에는 100 nm 이하의 빔 위치 변화를 감지할 수 있는 Diamond screen monitor를 배치하여 M2와 M3에서의 입사각 변화에 따른 빔 위치 변화를 확인한다. Diamond screen monitor에 feedback 시스템을 연동하여 실험 중에 빔 위치 변화가 감지되면 광학장치의 pitch 혹은 roll 축이 조절되어 빔 위치에 변화가 없도록 한다.

<표 2.2.7.5>와 <그림 2.2.7.29>에 포함된 빔라인 내 모든 진단장치는 같은 역할을 할 수 있는 다른 장치로 교체할 수 있도록 하여 빔라인의 실시 설계 및 장치 구매에 있어 유연성을 확보한다.

자. 실험허치 (실험장치)

(1) 실험허치 Layout



<그림 2.2.7.31> 실험허치 개략도

<그림 2.2.7.31>은 본 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인의 개략도이다. QXAFS는 sample stage #1에서 측정하며, XES 측정 시에는 sample stage #2를 이용한다. Sample stage #1에는 고속 감응 가스 이온화 챔버 3대, PIPS 형광 검출기가 위치하며, 이 장치들은 각종 in situ 실험이 수월하도록 광학 테이블 위에 배치하고자 한다. 광학 테이블 위에는 여러 in situ 실험 전용 셀, potentiostat, laptop 등을 추가로 배치할 수 있다. Sample stage #1에서 사용할 고속 감응 가스 이온화 챔버는 'Gridded Gas Ionization Chamber (GGIC)'로, 감응 속도가 일반 가스 이온화 챔버보다 100배 이상 빨라 QXAFS 측정에 적합한 것으로 알려져 있다.

Sample stage #2에는 XES 실험을 수행하기 위한 주요 장치인 von Hamos spectrometer, 2D position sensitive detector (PSD), 에너지 분산형 형광 검출기가 위치한다. High-throughput XAFS 측정도 할 수 있도록 일반 가스 이온화 챔버도 함께 배치하고자 한다. Sample stage #1과 마찬가지로, Sample stage #2도 광학 테이블 기반으로 구성하여 다양한 in situ 실험 전용 장치를 배치할 수 있도록 한다. XES 신호 검출용 2D PSD는 von Hamos circle을 만족하는 범위에서 시료 위쪽에 배치하고 로봇 암을 사용해 이동·고정한다.

실험허치 내부에는 가스 공급기(gas supplier)를 설치하여 지속적인 가스의 공급이 필요한 다양한 in situ 실험 시에 사용할 수 있도록 한다. 수소 (H_2), 산소 (O_2), 질소 (N_2), 이산화탄소 (CO_2) 등의 공급 가능한 가스를 고려 중이며, 빔라인 건설 시의 가스

관련 안전 법령에 따라 각종 안전장치와 배기 시스템을 도입하여 안전한 가스 사용 환경을 조성하고자 한다.

(2) QXAFS Instrument

○ Gridded gas ionization chamber

XAFS 측정은 가스 이온화 챔버에 채워진 비활성 기체(He, N_2, Ar)가 X-선에 의해 이온화될 때 발생하는 전류를 읽는 과정으로 이뤄진다. XAFS 측정에는 총 3개의 가스 이온화 챔버가 사용되며, 각각은 초기 X-선 광량 (I_0), 시료에서 흡수된 광량 (I_T), 비교군 시료에서 흡수된 광량(I_R)에 관한 정보를 얻기 위해 사용한다. 각 가스 이온화 챔버로부터 광량에 관한 정보를 얻으면, Beer-Lambert 법칙 ($\ln(I_0/I_T) = \mu_T d$)을 적용하여 샘플(혹은 비교군 샘플)이 갖는 흡광계수(μ)를 얻는다. 이때, 빔 에너지 변화에 따라 나타나는 흡광계수를 관찰하여 물질 내 전자구조와 국부 구조를 연구하는 것이 XAFS의 측정 원리이다.

XAFS 측정에 사용되는 각종 검출기의 응답 시간은 (수식 2.2.7.15)를 통해 계산된 데이터 포인트 간 측정시간 (δt) 보다 짧아야 한다.

$$\delta t < \frac{(\delta E/E)_{Si(hkl)} E_{Edge}}{2\pi f_{osc} \Delta E} \quad \text{(수식 2.2.7.15)}$$

$(\delta E/E)_{Si(hkl)}$: Si 결정의 에너지 분해능, E_{Edge} : 흡수단 에너지, f_{osc} : $Oscillation$ 진동수, ΔE: 측정 에너지 범위

앞서 언급하였듯이, 본 빔라인에서는 광학허치에 QDCM을 배치하여 1초당 1개의 EXAFS 데이터를 얻을 수 있는 에너지 스캔 속도로 QXAFS 분석법을 제공하고자 한다. 일반적인 Parallel plate 형태의 가스 이온화 챔버는 비활성 기체 이온의 이동 속도가 느려 응답 시간이 최소 수 밀리초가 소요된다. 따라서, QXAFS 실험과 같이 빠른 응답 속도가 필요한 경우에는 적합하지 않다.

Gridded gas ionization chamber (GGIC)는 기체 이온의 움직임을 제한하는 그리드를 사용하여, 빠른 전자의 이동에 의한 전류만 선택적으로 얻을 수 있는 가스 이온화 챔버이다. 이 챔버는 응답 시간이 약 5 μs로 매우 빠르기 때문에 QXAFS에 적합하다. 따라서 본 빔 라인에서는 GGIC를 가스 이온화 챔버로 사용하여 원활한 QXAFS 실험을 가능케 하고자 한다.

○ Passivated Implanted Planar Silicon (PIPS) detector

시료의 형태가 기판 혹은 암석과 같이 두께가 수 mm에 달할 때, 샘플을 투과한 빔의 광량을 분석하는 '투과 (transmission)' 방식의 XAFS 데이터 획득은 불가하다. 이러한 경우, 형광 검출기를 사용하여 시료에서 발생하는 전체 '형광 (fluorescence)' 신호를 얻는 것으로 XAFS 데이터의 획득/분석이 가능하다. PIPS 검출기는 XAFS 분석에서 가장 보편적으로 사용되는 형광 검출기이며, solid angle을 만족시키는 시료 근처 위치에 설치한다. 또한, In situ QXAFS 실험 중 투과 방식의 데이터 획득이 실험적으로 제한될 때는 PIPS 검출기를 활용하여 QXAFS 데이터를 획득할 수 있도록 한다.

○ Energy dispersive fluorescence detector

에너지 분산형 형광 검출기(energy dispersive fluorescence detector)는 샘플 내 분석 원소가 미량 존재하거나, 다성분 샘플을 분석할 때 주로 사용한다. 또한, 분석 원소로부터 발생한 형광 신호를 선택적으로 얻을 수 있다는 장점이 있어, 다른 원소로부터 기인한 형광 신호의 간섭을 최소화할 수 있다.

Silicon drift detector (SDD)는 열전 방식의 냉각 시스템이 내장되어 있어 별도의 냉각장치 없이도 사용할 수 있다. 사용 편의성을 특징으로 하여, SDD는 가장 보편적으로 쓰이는 에너지 분산형 형광 검출기이다.

SDD 내에서 검출기 역할을 하는 Si은 15 keV 이상의 X-선을 잘 흡수하지 못하고 투과시키는 특징이 있다. Si의 이러한 특징으로 인해, SDD는 높은 에너지의 형광 분석 시 분석 효율이 낮다. 본 빔라인에서는 40 keV까지의 빔을 제공할 것이므로 15 keV 이상의 형광을 분석하고자 하는 경우가 빈번할 것으로 예상된다. 따라서, 높은 에너지의 형광 (> 15 keV)을 분석하고자 하는 이용자 수요가 많을 시, 저마늄 (Germanium) 기반의 에너지 분산형 형광 검출기를 추가로 도입하여 형광 신호의 분석 효율을 높이고자 한다. SDD와 달리, Ge 검출기에는 액체질소를 통한 냉각장치가 요구된다.

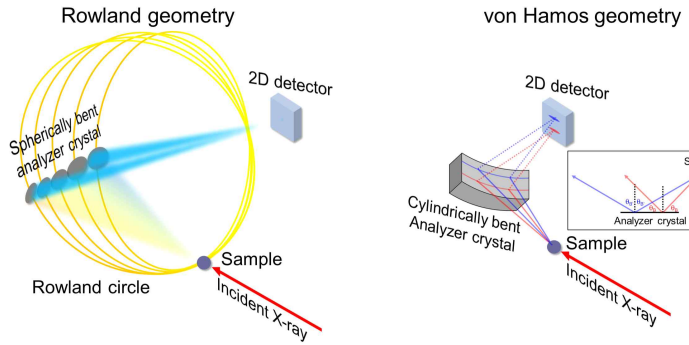
○ 가스 자동 교환 장치

XAFS 측정은 측정 원소에 따라 다양한 에너지 대역에서 이뤄진다. 가스 이온화 챔버에 채워진 He, N_2, Ar의 비활성 기체는 에너지 대역마다 X-선을 흡수하는 정도가 각기 다르기 때문에 에너지 대역에 따라 비활성 기체의 종류와 혼합 비율을 조정할

필요가 있다. 따라서, 챔버 내 가스를 빠르고 손쉽게 교환하고자 가스 자동 교환 시스템(솔레노이드 밸브 기반)을 도입하고자 한다. 이 장치는 일련의 진공펌프와 가스 밸브 간 연결로 구성되며, 빔라인에 설치될 PC를 통해 제어될 것이다.

(3) XES Instrument

○ Analyzer crystal



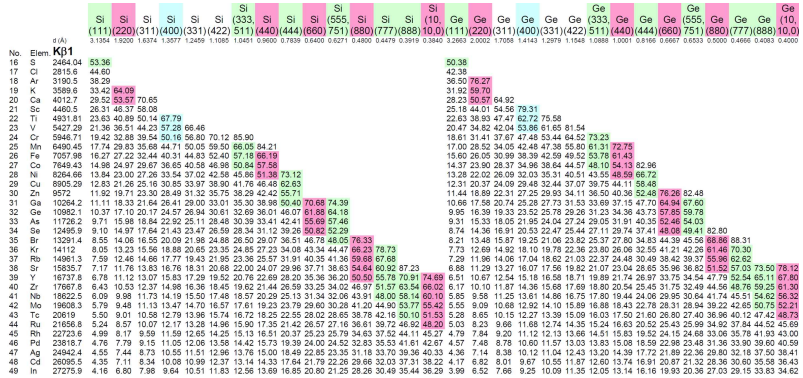
<그림 2.2.7.32> XES 측정을 위한 Rowland geometry와 von Hamos geometry

경 X-ray 분광계(spectrometer)는 분석기 결정에 의해 브래그 법칙을 만족시키는 형광 신호만 검출한다. 이 과정에서 경 X-ray 분광계(spectrometer)는 1 eV 이하의 에너지 분해능을 가지는 반면, 에너지 분산형 형광 검출기는 갖는 약 100 eV의 에너지 분해능을 갖는다. 즉, 분석기 결정에 의한 형광 신호 검출은 에너지 분해능이 매우 높다.

XES를 측정하기 위해서는 분석기 결정 (analyzer crystal) 도입이 필요하다 (<그림 2.2.7.32> 참고). 'Cylindrically bent' 분석기 결정을 사용하는 von Hamos 배열은 결정 배열이 수월하다는 장점이 있다. 또한, von Hamos 배열은 XES 측정 시 분석기 결정의 배열을 고정해 두기 때문에 측정 과정이 상대적으로 간편하다. PETRA III의 P64 빔라인, APS의 20-ID 빔라인이 von Hamos 배열을 도입하였다.

Rowland 배열은 'Spherically bent' 분석기 결정을 사용한다. 이때, 에너지 스캔 방식으로 분석기 결정의 각도를 조절해가며 XES 데이터를 얻는다. 이 때문에, Rowland 배열은 측정 시 결정을 배열하는 과정이 상대적으로 더 복잡하다. Rowland 배열의 장점은 에너지 분해능이 높고 신호 대 잡음비가 우수하다는 것이다. Rowland 배열은 MAX IV의 Balder 빔라인, PETRA III의 P64 빔라인에 설치되어 운용 중이다.

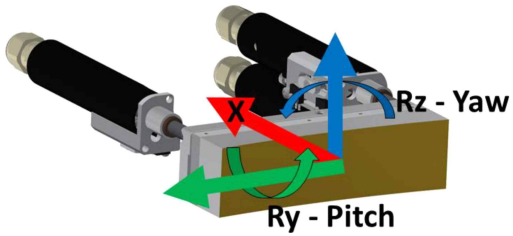
본 빔라인에서는 XES 실험을 위해 운용에 유리한 von Hamos 분광계를 도입할 것이다. 분광계에 8개 이상의 분석기 결정을 장착할 수 있는 마운트를 제작하여 신호 대 잡음비를 높이고자 한다. 또한, 다양한 결정면의 Si과 Ge 단결정을 갖춰두어 관찰하고자 하는 형광 X-선의 에너지 영역에 따라 분광계의 분석기 결정을 교체하며 사용한다.



<그림 2.2.7.33> 형광 에너지와 결정면에 따른 Si, Ge 결정의 브래그 각
[K. Klementiev, Segmented Crystal Analyzer with image Acquisition in 2D (SCANIA-2D), Conceptual Design Report, 2014]

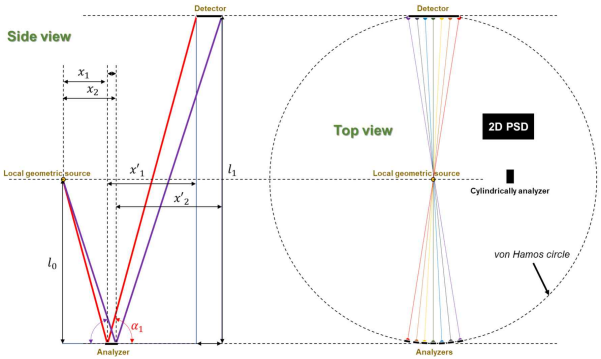
<그림 2.2.7.33>에서 확인할 수 있듯이, 측정이 빈번한 3d 전이 금속을 포함하여 최대한 많은 원소에 대한 XES 분석이 가능하도록 다양한 분석기 결정을 확보하고자 한다. 또한, 우수한 신호 대 잡음비를 갖는 XES 데이터를 얻기 위해 각 분석기 결정은 최소 4개 이상 준비한다. 한 von Hamos 분광계에 다른 두 종류의 분석기 결정을 장착하면 한 번의 측정에 두 종류의 형광 line을 관찰할 수 있는 multi-color XES의 도입도 가능하다.

Von Hamos 분광계에 분석기 결정이 장착되는 부분은 pitch, yaw, roll을 조정할 수 있는 3축으로 구성하여 분석기 결정을 원활하게 배열할 수 있도록 한다 (<그림 2.2.7.34>).



<그림 2.2.7.34> Von Hamos 분광계 내 분석기 결정의 구동축 (JJ-X ray社의 분석기 결정)

<그림 2.2.7.35>는 본 빔라인에 설치할 von Hamos 분광계에 대한 대략적인 배치도이다. 각종 in situ 실험용 반응 용기를 설치할 수 있도록 시료 위치에 최소 10 × 10 × 10 cm^3의 공간을 확보하고자 한다.



<그림 2.2.7.35> von Hamos 분광계 배치도

○ 2D PSD

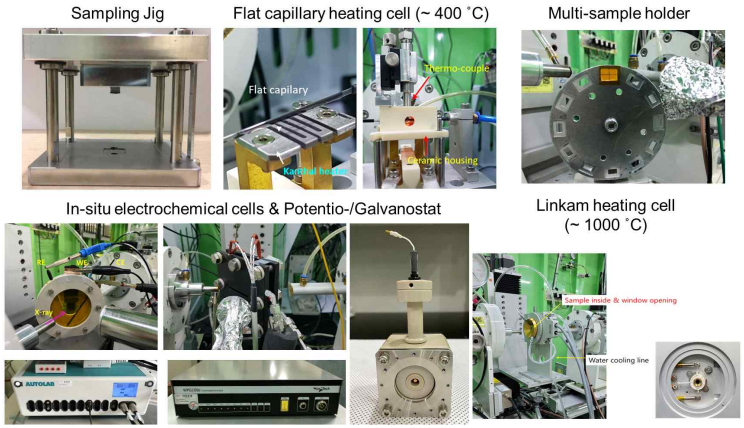
앞서 아. 광학허치 항목에서 언급한 것처럼, von Hamos 분광계의 에너지 분해능은 아래와 같은 식을 따른다.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_B^2 + \Delta E_{Dar}^2 + \Delta E_{Det}^2 + \Delta E_{band}^2} \quad \text{(수식 2.2.7.16)}$$

여기서, ΔE_B: 샘플 위치에서의 빔 크기, ΔE_{Dar}: Si 결정의 Darwin width에 의한 에너지 분해능, ΔE_{Det}: 2D PSD의 공간 분해능 (Pixel 크기), ΔE_{band}: 단색화장치의 에너지 대역폭을 나타낸다.

(수식 2.2.7.16)에서 알 수 있듯이, 2D PSD의 공간 분해능은 분광계의 에너지 분해능에 영향을 미친다. 그러므로, 2D PSD는 pixel 크기가 50 μm 이하인, 공간 분해능이 높은 것으로 설치하고자 한다. 현재로서는 50 μm의 pixel 크기를 만족하는 2D PSD는 XSpectrum社의 LAMBDA 750K 모델이 대표적이다. 추후에는 샘플 위치 주변에 2대의 2D PSD를 배치하여 브래그 각을 만족하는 여러 형광 신호를 동시에 검출하는 데 사용한다.

(4) Specimen preparation & measurement



<그림 2.2.7.36> 본 빔라인에서 제공할 각종 장치 (참고사진)

○ Sampling jig

XAFS 빔라인을 사용하는 다수의 이용자는 분말 시료를 분석한다. Sampling jig를 구비하여 분말 시료로 XAFS 분석 시편을 제작하는 이용자에게 편의성을 제공하고자 한다.

○ Multi-sample holder

실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인에서는 측정시간이 3분으로 짧은 on-the-fly 스캔도 갭 스캔 모드로 운영할 예정이므로 신호 대 잡음비가 높은 데이터도 짧은 시간 내에 얻을 수 있으므로 high-throughput 분석의 도입이 가능하다. 이를 위해, 최대 20개의 샘플을 수용할 수 있는 샘플 홀더를 빔라인에 비치하여 이용자가 직접 사용할 수 있도록 한다. 또한, 기판 등 다양한 샘플의 형태를 고려하여 여러 모양의 샘플 홀더를 추가로 제작하여 갖춰둔다.

○ Hexapod sample stage

6-축 (XYZ, pitch, roll, yaw) 샘플 스테이지를 도입하여 시편의 위치를 세밀하게 조정할 수 있도록 한다. 이를 통해 이용자가 직접 제작한 샘플 홀더를 사용하거나, 각종 in situ 실험을 할 때, 박막 샘플 측정 시 입사각을 조정할 때와 같이 다양한 실험환경에 맞게 샘플의 위치를 수정할 수 있게 한다.

○ In situ XAFS technique

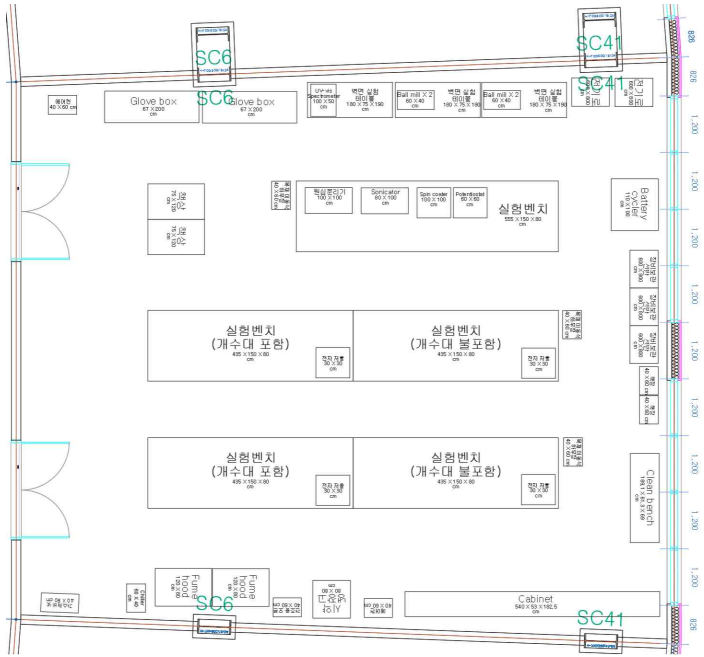
아래의 다양한 셀을 이용자에게 제공하여 전기화학적 및 열역학적으로 발생하는 물질의 구조 변화와 상전이에 관한 연구를 수행할 수 있도록 한다. 또한, 실험허치 내에 광학 테이블을 배치하여 in situ Raman 분광법, in situ IR 분광법 등 다른 분광 실험과 in situ XAFS를 동시에 측정할 수 있는 기반을 마련하고자 한다. 이를 통해, In situ XAFS 실험으로는 주로 물질의 구조 변화를 관찰하고, in situ Raman과 in situ IR로는 XAFS에서 관찰되지 않는 반응 중간체를 모니터링할 수 있을 것으로 예상한다.

- 본 빔라인에서 제공할 다양한 in situ 셀 예시

1. In situ electrochemical cell & Potentio-/Galvanostat
2. Electrode holder for in situ battery test
3. Flat capillary heating cell (~400 ℃)
4. Linkam heating & cooling cell (-196 ℃ ~1,200 ℃)
5. Catalysis reaction cell (~ 5 bar, ~1000 ℃)

차. 부대 시설

(1) 빔라인 실험 준비실

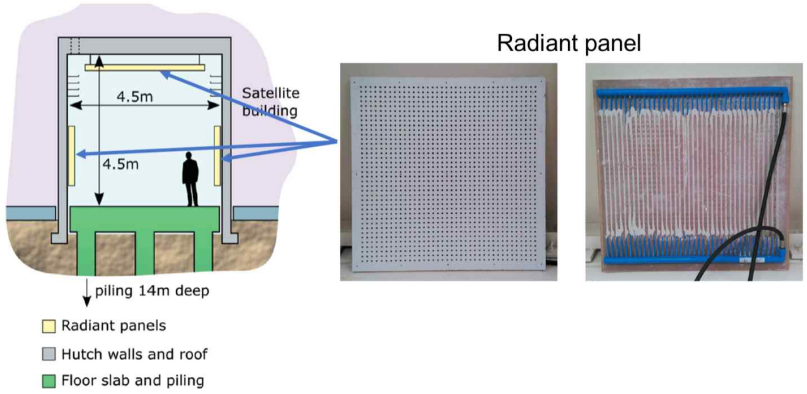


<그림 2.2.7.37> 빔라인 실험 준비실 배치도

본 빔라인 전용 빔라인 실험 준비실을 마련하고자 한다 (<그림 2.2.7.37> 참고). 이 실험실에서는 XAFS 실험에 필요한 시편 제작, 시료 전처리, 시료 합성, 특성 평가 등 다양한 연구 활동을 수행할 수 있도록 기반 시설과 장비를 미리 구비하여 이용자에게 제공하고자 한다. 예를 들어, 글로브 박스 시스템을 설치하여 대기(atmosphere)에 민감한 시료를 다룰 수 있도록 하거나, battery cycler를 이용하여 배터리 소재의 충·방전 조건에 따른 XAFS 연구를 수행할 수 있도록 하는 것이다. 또한, 실험실 내에 Fume hood와 전기로를 설치하여 필요에 따라 시료를 합성할 수 있는 여건도 마련해 둔다. 물품 및 장비 보관용 캐비닛도 충분히 설치하여 각종 in situ 셀 등 다양한 빔라인 실험 장치를 보관할 수 있는 공간도 확보한다.

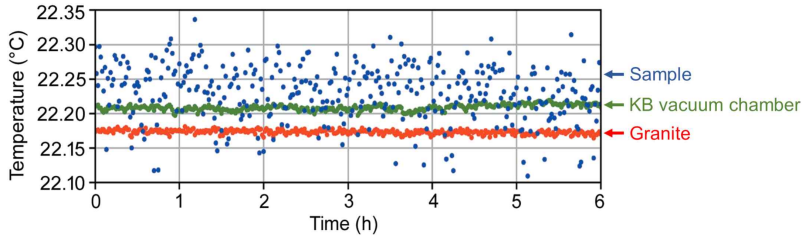
(2) 항온 시스템

빔의 장기간 안정성은 광학허치 및 실험허치의 항온 시스템에 크게 의존한다. 허치 내 장치들은 지지대로 사용하는 석정반(granite)을 포함하여 다양한 합금 구조물로 이뤄져 있으며, 이 재료들은 고유의 열팽창 계수를 가지므로 허치 내 기온 변화에 따라 부피가 달라진다. 이 현상으로 인해 허치 내 온도변화는 빔 안정성을 해치는 주요 원인으로 꼽힌다. 따라서, 허치 내 항온 시설의 도입은 빔 안정성 확보에 있어 필수 사항이라고 할 수 있다.



<그림 2.2.7.38> Diamond Light Source-Nanoprobe 빔라인의 광학/실험허치에 관한 모식도와 허치 내 설치한 복사 패널 (radiant panel) 사진

Diamond Light Source (DLS)의 Nanoprobe 빔라인은 허치 벽면에 17 ℃의 물이 흐르는 복사 패널을 설치하여 허치 내부의 기온을 21±0.017 ℃로 유지하여 각종 장치들의 부피 변화를 최소화하는 방법으로 빔 안정성을 확보하고 있다 (<그림 2.2.7.38> 참고). 본 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인에서도 허치 내부 기온 변화에 의해 빔 불안정성이 유발되면 위와 같은 복사 패널의 설치를 적극적으로 고려할 것이다. 내부 기온 편차의 허용범위는 ±0.1 ℃이다.



<그림 2.2.7.39> MAX IV-NanoMAX 빔라인의 층류 공조에 의한 온도 유지 그래프

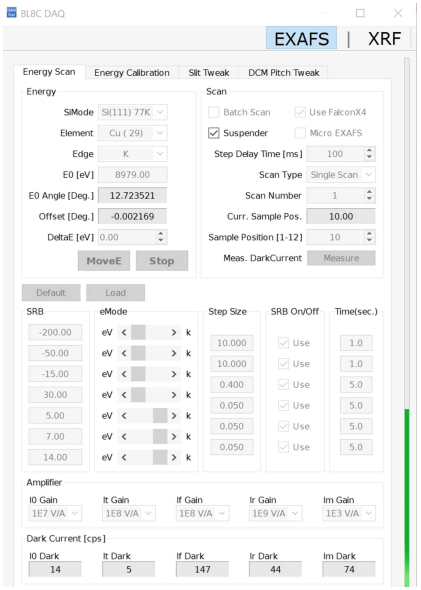
층류 공조(laminar flow air conditioning)를 통해서도 내부 기온을 ±0.1 ℃ 이내의 범위로 유지할 수 있다 (<그림 2.2.7.39> 참고). 또한, 실험허치 문에 에어커튼을 설치하여 시료 교체 시 불필요한 외부 공기의 유입을 억제하는 방법도 허치 내부 기온 유지에 효과적일 것이다. 이처럼, 항온 시스템은 복사 패널을 도입하는 방법 이외에도 여러 방법이 있으므로 설치의 편의성, 유지보수 측면을 모두 고려하여 설치해야 할 것이다.

카. 전산 체계

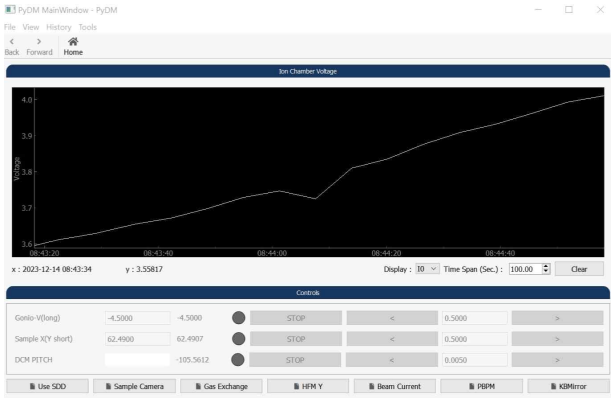
(1) DAQ 및 장치 조작 시스템

본 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인에서는 포항방사광가속기(Pohang Light Source-II, PLS-II)에서 운영하는 방식과 유사하게 Bluesky와 EPICS를 이용하여 데이터 수집(DAQ)과 장치 제어를 할 것이다.

<그림 2.2.7.40>은 본 빔라인에서 사용하고자 하는 DAQ 프로그램에 대한 사진이다. 이 프로그램에서 측정할 원소를 선택하면 DCM의 브래그 각도가 조정되면서 원하는 에너지를 갖는 빔을 사용할 수 있다. 또한, 측정 에너지 영역, 측정시간, 측정 횟수 등의 측정 조건을 이용자가 직접 조절할 수 있도록 하여 시료 조건에 따라 다양한 DAQ 환경을 제공하고 있다. 본 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인의 DAQ 시스템은 PLS-II에서 사용 중인 것과 유사한 형태로 마련하고자 한다.



<그림 2.2.7.40> DAQ 프로그램



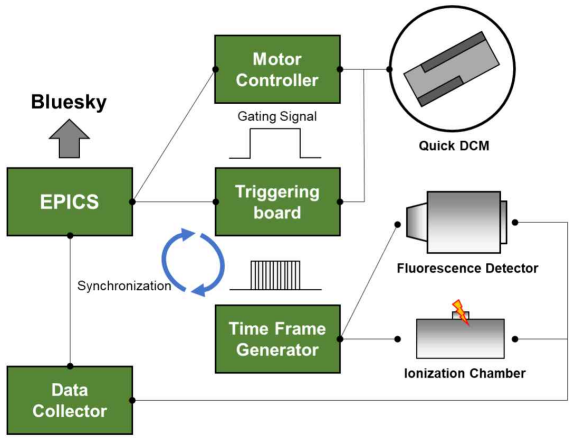
<그림 2.2.7.41> PLS-II 빔라인의 통합형 장치 조작 프로그램

빔라인 장치 조작의 주요 컨트롤 시스템은 EPICS이며, 이용자 친화적인 GUI로 구성하여 사용에 불편함이 없도록 한다. 이러한 GUI 인터페이스는 사용자에게 빔라인 사용에 대한 직관성을 부여할 뿐만 아니라, 장치 관리에 대한 편의성도 제공할 것이다.

<그림 2.2.7.41>은 통합형 장치 조작 프로그램에 대한 사진이다. DAQ 시스템과 마찬가지로, 장치 조작 프로그램도 PLS-II 8C 빔라인의 것을 참고하여 제작한다. 이 프로그램에서는 각 이온화 챔버의 전압 신호를 확인할 수 있으며, 샘플 스테이지, 카메라 시스템, DCM의 2nd 결정의 각도, SDD 측정 조건 등 XAFS 측정에 필요한 다양한 조건을 직접 설정할 수 있는 환경이 한 프로그램 내에 구축되어 있는 것을 볼 수 있다. 본 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인에서 제공할 QXAFS와 XES 측정에 필요한 장치 조작 시스템도 이 프로그램에 추가하여 사용하고자 한다.

(2) QXAFS DAQ

본 빔라인에서 제공할 QXAFS 분석기법의 DAQ를 위해서는 DCM encoder로부터 얻어진 게이트 신호와, 동기화된 측정 장비들의 신호를 직접 수집하는 과정이 필요하다 (<그림 2.2.7.42> 참고). 이 시스템은 원하는 속도로 각도 모션만을 처리하는 방식으로 절대 각도 위치를 계산한다. 따라서, 사용되는 triggering 시스템에 전체 게이팅 신호를 제공하는 DCM 동작 제어시스템과는 부분적으로 독립적이다. 즉, 이 시스템의 설계는 빠르게 동작하는 DCM의 각도 정보를 하드웨어로 직접 읽어 들이는 것을 기반으로 한다. 이 시스템을 사용하면 브래그 각도에 대한 높은 정밀도를 확보할 수 있다. 게다가, 소프트웨어 기반의 QXAFS 데이터 처리와 달리 pre-processing 데이터를 요구하지 않으므로, 일반 XAFS 데이터처럼 이용자가 원하는 만큼 데이터 포인트 수를 설정하여 데이터를 수집할 수도 있다.



<그림 2.2.7.42> 하드웨어 기반 게이팅 신호 DAQ의 모식도

○ 데이터 취급/저장/관리

본 빔라인에서 필요한 최대 예상 data readout rate를 정리하면 QXAFS는 120 MB s^{-1}, XES는 420 MB s^{-1}이다.

QXAFS의 데이터양 계산 시, 한 개의 XAFS 데이터가 갖는 용량은 DCM readout, I_0, I_t, I_R, PIPS, 다채널 에너지 분산형 형광 검출기 모두를 고려하여 1 MB로 가정하였다. 이때의 측정 에너지 간격은 0.1 eV이다.

QDCM을 활용한 QXAFS의 최대 데이터 획득 속도는 120 Hz이므로, 120 MB의 데이터가 매초 마다 발생할 수 있다.

XES 측정 시에는 2D PSD를 활용하여 데이터를 획득한다. 구매를 고려 중인 2D PSD는 Eiger2 X 1M 모델이다. Eiger2 X 1M에서는 한 개의 데이터 (HDF5) 당 4.2 MB의 데이터 크기를 가지며, 최대 readout rate가 8 bit 기준 (4,500 Hz), 16 bit 기준 (2,250 Hz)이다. XES 측정에는 최소 수 분의 시간이 소요될 것이므로 실제로 필요한 readout rate는 최대 100 Hz로 가정하였다. 이 경우 매초 마다 420 MB의 데이터가 발생한다. 따라서, XES 측정에 필요한 최대 readout rate는 420 MB s^{-1}이다.

타. 커미셔닝

(1) 커미셔닝 목표

본 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인은 주요 실험기법인 XAFS, QXAFS, XES 실험을 제공하는 것을 최종 목표로 하여 커미셔닝을 준비한다.

각 실험기법의 커미셔닝 방법 및 목표는 아래에 기술되어 있다.

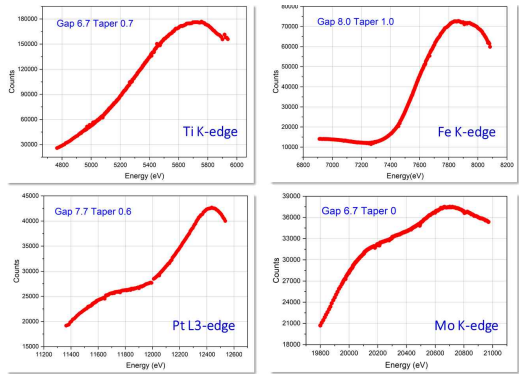
○ XAFS

특정 금속 포일에 대한 XAFS 측정을 수행한다. 반복적인 측정을 통해, 얻어지는 XAFS 데이터가 높은 재현성을 보이는지 확인한다. 반복 측정에 대해 얻어지는 XAFS 데이터의 재현성이 높을 경우, 5시간 이상의 시간이 경과한 후 다시 XAFS 측정을 반복 수행하여 측정 안정성을 확인한다. 이 측정 결과의 재현성이 좋지 않을 시, DCM 열부하, 광학장치 및 실험 장치의 열적 drift, 빔 안정성을 개선한다. 이 조건을 만족하면 흡수한 에너지가 다른, 다양한 금속 포일에 동일한 시험 과정을 거친다. 이 시험 조건을 모두 만족한 경우 아래의 절차로 진행한다.

본 빔라인에서는 XAFS 측정 시 'Gap scan mode'와 'Undulator tapering mode', 두 가지의 측정 모드를 제공할 것이다. Gap scan mode의 초기 목표는 1,200 eV의 측정 범위를 갖는 EXAFS 스펙트럼 1개를 20분 동안 얻는 것이다. 이때의 언듈레이터와 DCM 간 에너지 동기화의 에너지 정확도 ($\Delta E/E$)는 10^{-3}이다. 반복적인 측정과 장기간 시험을 통해 Gap scan mode에 대한 안정성이 확인되면, 3분의 측정시간을 목표로 하여 장치 및 소프트웨어를 지속적으로 개선한다.

Undulator tapering mode의 초기 목표는 EXAFS 측정에 충분한 에너지 대역폭을 갖는 빔을 제공하는 것이다. <그림 2.2.7.43>은 PLS-II IVU20의 Undulator tapering 조건을 나타내는 사진으로, 이와 유사한 형태로 각 측정 원소에 따라 충분한 에너지 대역폭을 가질 수 있는 언듈레이터 간격과 taper 정도를 찾는다. XOPPY 프로그램의 YAUP 코드를 활용하면 측정 에너지 따른 적절한 언듈레이터 간격과 taper 정도를 예측할 수 있다.

Element	Energy	Gap	Taper
Mn_K	6539	7.3	1.3
Pr_L1	6835	7.1	1.2
Fe_K	7112	8.6	1.2
Gd_L3	7243	8	1.2
Co_K	7709	6.9	0.8
Dy_L3	7790	6.4	0.8
Eu_L1	8052	6.5	1
Ni_K	8333	7.3	0.9
Er_L3	8358	7	1
Yb_L3	8943	6.4	0.5
Cu_K	8979	7.6	0.6
Er_L2	9264	6.1	0.8
Hf_L3	9561	7.7	1.2
Zn_K	9659	6.6	0.5
Ta_L3	9881	6.8	0.6
W_L3	10206	6.7	0.7
Ga_K	10367	6.9	0.6
Re_L3	10535	7	0.6
Os_L3	10871	7.3	0.3
Ge_K	11103	7.5	0.3
W_L2	11207	7.4	0.6
Ir_L3	11215	7.5	0.5
Pt_L3	11564	7.75	0.6
As_K	11866	7.8	0.2
Au_L3	11919	8	0.4



<그림 2.2.7.43> PLS-II IVU20의 undulator tapering 조건

○ QXAFS

'Undulator Tapering mode' 하에서 특정 금속 포일에 대한 QXAFS 측정을 수행한다. QXAFS는 1초 이하의 측정 속도를 최종 목표로 할 것이므로, 측정에 대한 안정성 확보가 커미셔닝 시 가장 중요한 요소이다. 따라서, QDCM의 에너지 스캔 속도를 0.1 Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 10 Hz로 다양하게 조절하여 QXAFS 데이터를 획득하는 것이 필요하다. 이후, QXAFS 데이터를 'Gap scan' 방식으로 얻은 XAFS 데이터와 비교하여 XANES 및 EXAFS 영역에서의 데이터 일치도를 확인한다. 이 시험 과정에서 QXAFS 데이터가 일반 XAFS 데이터와 유사하고 왜곡이 없으면, 다양한 금속 산화물 및 나노

입자에 대해 동일한 시험 과정을 거친다. 수 차례 반복 시험을 통해 안정성이 확보되면 이용자에게 제공한다.

QXAFS는 일반 XAFS와 비교하여 데이터양이 매우 방대할 것이므로, 1,000개 이상의 QXAFS 데이터를 정렬 (align), 정규화 (normalization), 푸리에 변환을 할 수 있는 소프트웨어를 함께 제공한다.

○ XES

본 빔라인에서 제공할 XES의 초기 목표는, 시료와 Detector 간 총거리를 1 m 이내로 제한하여 약 1.0 eV의 해상도를 갖는 분광계를 설계하고, 이를 토대로 XES 분석기법을 제공하는 것이다. 경 X-선 영역의 형광은 연 X-선 영역의 형광에 비해 core-hole 수명(lifetime)이 상대적으로 짧아 스펙트럼에서 나타나는 변화에 대한 민감도가 상대적으로 작다. 예를 들어, Cu K_{α} 및 K_{β}의 core-hole 수명에 의한 broadening 효과는 약 2.1 eV (FWHM)이다. 따라서, 시료와 2D PSD의 거리를 증가시켜 2D PSD의 픽셀 당 해상도를 0.3 eV 이하로 줄여도 얻어지는 XES 신호의 해상도에는 큰 영향이 없다. 따라서, 형광의 전송 거리(traveling path)를 가능한 한 짧게 하여 형광의 손실을 최소화하는 것이 경 X-선 XES 분광계 설계의 주안점이다. XES의 커미셔닝 목표는 3d 전이금속 계열의 K_{α} 및 K_{β}를 측정할 수 있는 다양한 단결정이 포함되어 있으며, 1시간 이내로 alignment가 가능한 분광계를 통해 XES를 제공하는 것이다.

(2) 빔라인 건설 일정

<표 2.2.7.18>은 본 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인의 전체 건설 일정이다. 2024년에 있을 빔라인 '도면 작업'과 '전산 해석'을 시작으로, '발주', '소프트웨어 준비', '입고 및 검수', '설치', '커미셔닝 준비'의 일련의 과정이 예정되어 있다. 건설 일정 중, 소프트웨어 준비에 대한 일정이 가장 길다. QXAFS 및 XES 전용 프로그램을 개발하는 과정이 이 기간에 포함되어 있다.

<표 2.2.7.18> 빔라인 건설 일정

	2023년				2024년				2025년				2026년				2027년			
도면 작업					■	■	■	■	■	■										
전산 해석					■	■	■	■	■	■										
발주							■	■	■	■	■	■								
소프트웨어 준비									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
입고 및 검수											■	■	■	■						
설치													■	■	■	■				
커미셔닝															■	■	■	■	■	■

참고문헌

[1] Chem. Rev. 2021, 121, 882-961

[2] J. Synchrotron Rad. 2016, 23, 260-266

[3] Nat. Catal. 2022, 5, 259-267

[4] J. Am. Chem. Soc. 2023, 145, 4065-4080

[5] Chem. Rec. 2019, 19, 1444-1456

[6] Adv. Funct. Mater. 2022, 32 2112394

[7] Anal. Chem. 2009, 81, 6516

[8] Chem. Soc. Rev. 2010, 39, 4754-4766

[9] Phys. Rev. B 1997, 56, 4553

[10] Electrochemica Acta 2010, 56, 145

[11] Inorg. Chem. 2013, 52, 12915-12922

[12] X-Ray Spectrometry 2018, 28, 1-5

[13] Adv. Mater. 2023, 35, 2205346

[14] Adv. Funct. Mater. 2022, 32, 2202372

[15] J. Korean Phys. Soc. 2021, 78, 467-475

[16] J. Synchrotron Rad. 2014, 21, 996-1005

[17] Nat. Nanotech. 2016, 11, 67-74

[18] Nat. Mater. 2004, 3, 703-708

[19] Phys. Rev. B 2012, 86, 045212

[20] Nature 2021, 598, 444-450

[21] Nat. Energy 2023, 8, 30-39

[22] NPG Asia Materials 2018, 10, 563-580

[23] Nano Lett. 2011, 11, 3174-3183

[24] ACS Nano 2015, 9, 6532-6547

[25] Chem. Rev. 2021, 121, 882-961

[26] Nat. Nanotech. 2022, 17, 174-181

[27] Chem 2023, 9, 1-18

[28] J. Harzard. Mater. 2019, 378, 120745

[29] Rev. Sci. Instrum. 2020, 91, 013101

[30] J. Phys.: Conf. Ser. 2013, 425, 092010

[31] J. Synchrotron Rad. 2020. 27, 912 – 922

[32] J. Synchrotron Rad. 2021. 28, 1935 – 1947

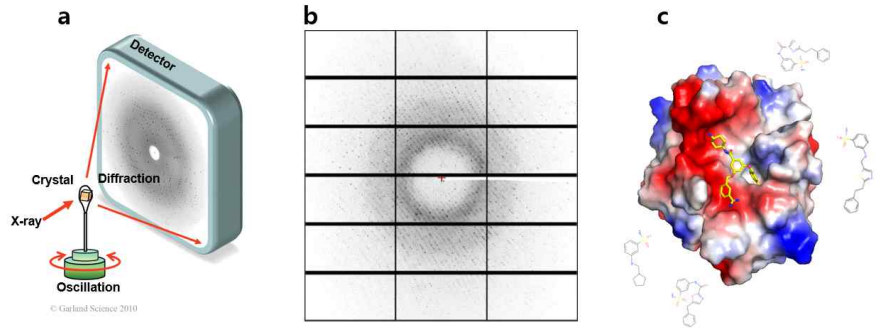
[33] J. Phys. Chem. Ref. Data 1979, 8, 329-338

2.2.8 생체분자 나노결정학 (Bio Nano Crystallography)

가. 소개

(1) 빔라인의 중요성

본 빔라인은 생체고분자결정학(macromolecular crystallography)에 특화된 방사광 X-선 시설이다. 생체고분자결정학이란 결정화된 생체고분자에 X-선을 조사해 회절 패턴을 측정하고, 이를 분석해 생체고분자의 삼차원 구조를 원자 분해능으로 규명하는 기법이다 (<그림 2.2.8.1> 참고). 생체고분자결정학에 해당하는 생체고분자는 단백질, DNA, RNA, 또는 이들 분자들의 복합체 및 단분자와 결합체 등이며 현재까지 연구된 200,000여개 생체고분자의 원자분해능 구조 중 85%가 생체고분자결정학을 통해 규명되었다.



<그림 2.2.8.1> 생체고분자결정학 (macromolecular crystallography)

<그림 2.2.8.1>에서 (a)는 생체고분자결정학 장치 구성을 보여주며 생체고분자 단결정을 회전시키면서 각 방향에서의 단색광 X-선 회절을 획득한다. (b)는 CCD 검출기를 사용해 촬영한 생체고분자 단결정의 단색광 X-선 회절, (c)는 X-선 회절을 분석해 규명한 생체고분자의 원자분해능 삼차원 구조 예를 보여준다.

이러한 고해상도 삼차원 구조를 통해 생체분자들이 어떻게 상호작용하는지, 그것이 생명현상에서 어떤 기능을 하는지, 건강 및 질병에 어떻게 기여하는지 등을 이해할 수 있다. 이는 생화학, 분자생물학, 유전학, 약학 등의 발전에 지대한 공헌을 해 오고 있으며, 최근에는 신약 개발 연구에 적극적으로 활용되고 있다.

프랑스 ESRF-EBS의 ID29, 미국 NSLS-II의 FMX, 영국 Diamond의 VMXm, 스웨덴 MAX IV의 microMAX 빔라인들의 경우 신약개발과 단백질 미세 단결정의 구조를 얻기 위한 빔라인 성능 및 장비 업그레이드에 많은 예산을 투여하고 있으며 이를 통해 현재까지 알려지지 않았던 생체고분자의 구조 규명 및 신약 개발의 시간을 단축하고 있다.

해외의 방사광을 활용한 신약개발을 촉진하기 위해 다양한 시도가 진행되고 있기 때문에 국내에서도 강력한 빔을 제공하면서 자동화된 결정 회절 데이터 수집의 효율을 극대화한 MX 빔라인의 구축과 함께 국내 바이오 제약사들의 활용을 극대화하기 위한 약물 혹은 결정 탐색 실험실의 운영이 함께 요구된다. 3세대 방사광 광원 대비 높은 결맞음 선속과 작은 광원을 제공하는 4세대 방사광가속기의 구축은 한국의 신약개발 플랫폼을 세계 선진 수준으로 끌어올릴 수 있으리라 기대되고 있다.

(2) 빔라인 활용

본 빔라인은 방사광 X-선을 광원으로 사용하는 생체고분자결정학 장치로 활용된다. 빔라인의 특징은 PLS-II 대비 10~20 keV에서 10배 이상이며 (3.0 m undulator) 이는 미세 단결정의 구조정보를 얻는데 활용할 수 있으며 고속스캔과 자동화 설비를 이용해 하루 수백개의 결정을 처리할 수 있다.

○ 생체고분자 미세 단결정 구조 규명

생명현상에서 중요한 역할을 하는 막단백질 (membrane protein) 또는 거대 복합 단백질의 경우 결정화를 위한 많은 양의 단백질 시료를 얻기 어려운 경우가 많으며 어렵게 단백질 결정을 얻었다 해도 결정의 크기가 마이크로 또는 나노미터 사이즈의 미세 결정일 경우 이를 크게 키우는 일은 많은 시간과 자원을 필요로 한다. 그러므로 마이크로 또는 나노미터 크기의 결정으로부터 구조정보를 직접 얻을 수 있는 것은 시간과 자원을 아낄 수 있는 큰 장점이 있다. 본 빔라인에서는 밝고 집속 된 X-선 빔을 제공하여 nanocrystallography 기법을 이용할 수 있으며 이를 통해 중요도가 높은 생체고분자들의 구조를 신속하게 규명하는데 활용될 수 있다.

○ 신약 개발을 위한 약물 후보 물질 선별

질병과 관련된 생체고분자의 활성을 조절하기 위해 저분자 약물을 개발하는 것은 신약 개발의 중요한 과정이며 이를 위해 수백 종류의 약물 후보 물질과 생체고분자의 결합을 확인해야 한다. 본 빔라인에서는 고속 스캔 및 빠른 X-선 회절 스캔 속도에

맞추어 시료 교체, 데이터 전송/저장 및 구조분석이 가능하도록 자동 시료 교체 로봇 시스템과 충분한 대역폭(bandwidth)의 데이터 처리 파이프라인을 제공한다. 이를 통해 수백 개의 저분자 물질과 생체고분자의 결합을 원자 해상도 구조로 신속하게 확인할 수 있으며 더욱 효과적인 신약을 설계할 수 있는 길잡이 역할을 하도록 활용할 수 있다.

나. 빔라인 설계 목표 및 특징

빠른 X선 회절 스캔 및 집속한 X선 회절 스캔을 통한 생체고분자결정학을 수행하기 위해 <표 2.2.8.1>의 설계 목표를 설정했다. 방사광원으로서 in-vacuum undulator를 사용해 밝고 직진성이 우수한 X선을 생산하고, 수평단색화장치인 horizontal DCM을 통한 단색화와 집속 거울을 이용해 안정성이 높은 반치폭 수평 0.98 μm, 수직 0.37 μm 빔을 시료에 조사한다. 이는 CRL을 통한 수직 방향 defocusing을 통해 1.2 μm로 샘플에 조사된다. 또한 CRL을 통한 추가적인 defocusing으로 빔의 크기를 반치폭 수평 13 μm, 수직 13 μm까지 증가시킬 수 있다. 시료는 로봇을 사용해 자동으로 교체하고, 정밀 회절기를 사용해 집속된 X선 위치에 가져다 놓는다. X선 회절은 광 개수 (photon counting) 방식의 검출기를 사용해 측정한다. 광 개수 검출기는 감도가 높고 30 Hz 이상의 고속 촬영을 지원한다. 개개의 결정 시료에 대해 진행사항을 추적하고 실시간 X선 회절 데이터 처리 및 분석을 수행해 보고하는 전산 체계를 갖춘다. 그리고 향후 high photon flux 및 높은 시간 해상도가 요구되는 time-resolved X-ray crystallography 실험을 위해 double multilayer monochromator (DMM)을 넣을 수 있는 공간을 확보한

<표 2.2.8.1> 생체분자 나노결정학 빔라인 설계 목표

구분	내용
광원	In-vacuum undulator
광자에너지 범위	5 ~ 20 keV (최적화 8 ~ 25 keV)
광자에너지 해상도	$\triangle E/E < 2 \times 10^{-4}$
시료위치에서 빔 크기	1 (H) × 1 (V) ~ 5 × 5 μm^2 in FWHM
시료 취급	시료 교체 로봇 극저온 질소 분사기 정밀 회절기 결정 위치 파악용 광학현미경 X-선 형광 측정기
빔 밝기	10^{12} ~ 10^{14} 광자/초
X-선회절 검출 방식	광 개수 (photon counting)
X-선회절 측정 영역	0.6 ~ 4 Å 까지
X-선회절 측정/전송 속도	30 Hz
X-선회절 스캔 소요 시간	10초 ~ 1분
전산 자원	제어 및 데이터 획득 시료 관리 및 진행 사항 추적 원격 감시 X-선 회절 데이터 분석

본 빔라인은 고정된 시료 위치에 최소 1 μm^2 크기의 빔을 조사한다. 집속 X-선 빔의 안정성을 도모하기 위해 광학 설계를 단순화함에 따라 수평, 수직 방향으로 각각 한 번씩만 집속한다. 집속계로는 고정 초점거리의 타원곡면거울(elliptical mirror)을 사용하며 시료에 가깝게 위치한다.

최근 새롭게 구축되는 빔라인들을 살펴보면 시료 위치에서 PLS-II 대비 최소 10배에서 최대 100배 이상의 photon flux를 제공하며 빔 사이즈는 최소 1 마이크론 이하로 설계되고 있는 추세이다 (<표 2.2.8.2>).

대부분 건설 중이거나 커미셔닝 중이며 현재 이용자에게 오픈된 빔라인은 캐나다의 CLS의 CMCF-ID 빔라인과 미국의 NSLS-II의 FMX 빔라인, ESRF의 ID29 빔라인이다. CMCF-ID 빔라인의 경우 53.6 × 8.6 μm^2의 비교적 큰 빔 사이즈를 제공하며 이를 pinhole (또는 aperture)를 이용해 5 × 5 μm^2 사이즈로 축소하여 작은 빔을 제공하고 있으며 DCMM이라는 combined DCM, DMM 장비를 이용해 photon flux를 10^{12}~10^{14}으로 제공한다.

FMX 빔라인의 경우 CRL defocus 방식을 통해 빔 사이즈를 신속하게 1~10 μm^2

조절가능 하도록 광학계를 구성하였다. 또한 MX 분야의 최신 beamline science 기법들을 구현하고 있으며 훌륭한 성과의 논문들이 매년 20~30편씩 배출되고 있다. ESRF의 ID29 빔라인의 경우 0.5 × 0.5 μm^2의 작은 빔 사이즈와 5 × 10^{15} 이상의 높은 photon flux를 제공하는 것이 특징이다. 이곳은 serial crystallography 이용자의 수가 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 그러므로 우리가 목표하는 beamline science를 구축하기 위해서는 이러한 수준의 광학계가 구성되어야 한다.

BioNX 빔라인 또한 이러한 트렌드의 최첨단 광학계로 설계되며 국내에서 1 마이크론 집속은 국내 최초이다. 1 마이크론 빔을 이용하면 제한된 양의 단백질로 만든 미세결정의 회절 데이터를 수집하는 것이 가능하며 뿐만 아니라 기존에 데이터를 얻기 어려웠던 다중결정(multi crystal)의 회절데이터를 수집하는 것이 가능하다. 이를 통해 이용자는 적은 양의 시료로 단백질의 X-ray 결정구조를 규명하는 것이 더욱 수월해질 수 있다. 향후 MX 분야가 더 적은 시료로 더욱 신속하게 구조를 규명할 수 있는 기법들의 개발로 이어질 것을 고려해 본 빔라인의 광학계는 미래지향적이다. 본 빔라인의 광학계는 참조 논문 열람이 가능한 NSLS-II의 FMX 빔라인의 광학계를 참조하였으며 심플하지만 powerful한 광학계 구성으로 서비스 및 유지보수가 편리하고 생산적인 연구시설로 만들고자 한다.

<표 2.2.8.2> 해외 MX빔라인 구축 현황

	4GSR BioNX	ANSTO MX3	CLS CMCF-ID	Diamond VMXm	ESRF ID29	MAX-IV microMAX	NSLS-II FMX
Beam size (μm², V × H) (minimum)	1 × 1	2 × 2	5 × 5	0.3 × 0.5	0.5 × 0.5	1 × 1.5	1 × 1.5
Beam size (μm², V × H) (maximum)	13 × 13	8 × 2	53.6 × 8.6	10 × 13	6 × 5	5 × 5	10 × 10
Photon flux @sample (ph/s)	10^{13}~10^{14} (DCM) >10^{15} (DMM)(1)	6 × 10^{13}	8.2 x 10^{12} @12 keV 1.2 x 10^{14} @9.7 keV	> 10^{13}	>5 × 10^{15} @10keV	10^{13} (DCM) 10^{14}~10^{15} (DMM)	3.5 × 10^{12}
Energy range (keV)	8~25	10~15	5~20 (DCM) 7.2~10.4 (DMM)	7~28	10~25 and 35	5~25 (DCM) 10~13 (DMM)	5~30
Undulator	IVU20 (3 m)	IVU17.2 (3 m)	IVU (3.8 m)	IVU21	IVU21	IVU18 (3 m)	IVU21 (1.5 m)
Monochromator (Energy resolution)	hDCM hDMM(1)	hDMM (0.9%, 0.5%, 0.3%)	DCMM (DCM:1.5 × 10^{-4}, DMM:1 × 10^{-2})	hDCM	-(2)	hDCM (2 × 10^{-4}) DMM (0.4%, 1%)	hDCM (3 × 10^{-4})
CRL defocus	O	O	x	x	-(2)	O	O
Diffrac-tometer	MD3-UP	MD3-UP	MD2-S	-(2)	MD3-UP SSX	MD3-UP	Nelson Air SP150
Detector	EIGER2 XE 16M	Eiger2 XE 16M	EIGER X 9M	EIGER2 X CdTe 9M (high energy) Pilatus3 6M (medium X-ray energy)	Jungfrau 4M	EIGER2 X CdTe 9M	EIGER X 16M
Operation status	Under designing	Under construction	Operation	Commissioning	Operation	Commissioning	Operation

각주: 1) 고려 중인 장치, 2) '-' 표기는 공개되어있는 정보가 없음을 뜻함

집속한 X선을 시료위치에 안정적으로 조사하기 위해 광학장치의 열부하 관리와 진동 대책이 중요하다. 광학장치의 열부하가 높으면 표면이 부풀어서 제 성능이 나오지 않고, 심지어 영구 손상될 수 있다. 열부하 관리의 기본은 광학장치의 냉각능력을 기준으로 광학장치를 배치하는 것이다. 빔의 진동은 집속한 빔 크기의 10% 미만으로 유지되어야 한다. 본 빔라인의 집속한 빔 크기가 수직 방향으로 1 μm이므로 <표 2.2.8.1>, 0.1 μm 미만의 진동대책이 요구된다. 지반 진동, 기구적 진동 뿐만 아니라, 주위 온도 변화가 0.1 ℃ 미만으로 유지될 수 있어야 한다.

다. 빔라인 배치도와 광 경로

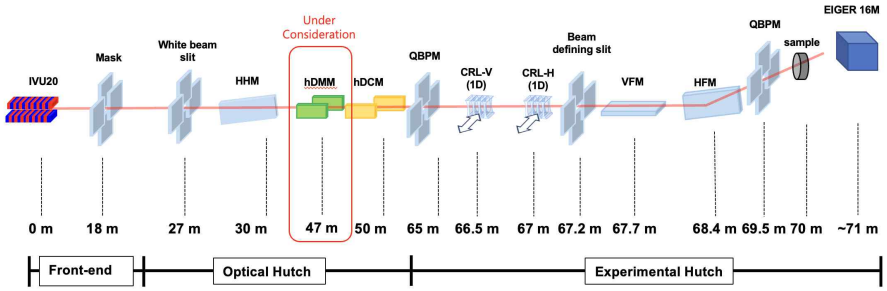
(1) 빔라인 배치도

○ 빔라인 내 장치의 위치 및 용도

<표 2.2.8.3> 빔라인 제공 사양 요약 빔라인내 장치 위치 및 용도 요약

위치	거리 (m)	항목	사양	용도
Optical Hutch 26 ~ 52 m	27	White beam slit	4-way slit, UHV	White beam conditioning
	30	High heat-load mirror	Flat mirror 2-stripe coating (Pt, Rh)	Heat 감쇄
	36	Attenuator	CVD Diamond	열부하 감쇄
	45	White beam slit	4-way slit, UHV	빔 크기 재단
	46	White beam screen monitor	Retractable; CCTV Diamond BPM	백색광 모니터
	47	horizontal DMM(1)	Ru/B4C	광원 단색화 및 high flux
	50	horizontal DCM	Si (111) 단결정	광원 단색화
	51	White beam screen monitor	Diamond BPM	백색광 모니터
	52	Monobeam screen monitor	CCTV; cooled	단색화 빔 확인
End-station 65 ~ 75 m	65	QBPM	Ultra High Vacuum QBPM (UHV QBPM)	빔 위치 모니터
	66	Monobeam Slits	4-way slit, UHV	빔 크기 재단
	66.2	Monobeam screen monitor	CCTV; cooled	단색화 빔 확인
	66.5	CRL-vertical	1D, Be coating	Beam defocusing
	67	CRL-horizontal	1D, Be coating	Beam defocusing
	67.2	Monobeam Slits	4-way slit, UHV	빔 크기 재단
	67.5	Monobeam Sceen monitor	CCTV; cooled	단색화 빔 확인
	67.7	VFM	Si/ Rh (50) /Pt (50)	수직 빔 집속
	68.4	HFM	Si /Rh (50) /Pt (50)	수평 빔 집속
	68.6	Monobeam screen monitor	CCTV; cooled	단색화 빔 확인
	69.3	QBPM	High Vacuum QBPM (HV QBPM)	빔 위치 모니터
	70	sample stage	Arinax MD3	정밀 회절기
	~71	Detector	Eiger2 XE 16M	회절 패턴 검출

각주: 1) 고려 중인 장치



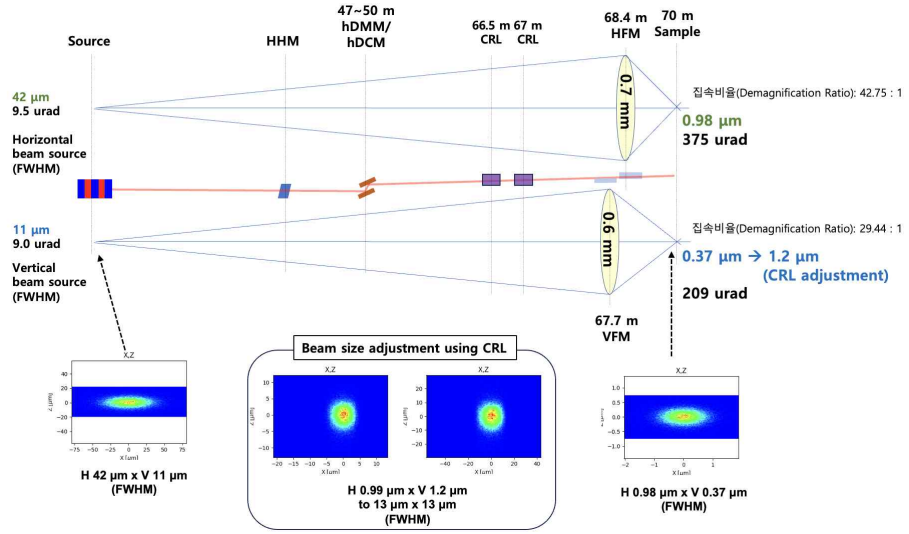
<그림 2.2.8.2> 4GSR 8번 생체분자나노결정학 빔라인의 광학 배치도

(2) 빔라인 배치 고려 사항

○ 빔 집속 방법

<그림 2.2.8.2>에 광학 배치도를 보였다. 광원으로는 in-vacuum undulator 20 (IVU20)를 사용한다. 프론트엔드(front-end)는 표준 모델을 사용한다. 이 프론트엔드는 IVU20 빔의 central cone 빔만 인출한다. 이는 슬릿에서 1 mm × 1 mm 사이즈의 빔으로 재단되어 High heat load mirror를 거쳐 열부하가 감쇄된다. 그 후 수평단색화장치에서 두 개의 Si (111) crystal을 거쳐 에너지 해상도 2×10^{-4}의 단색화 빔을 방출한다. 이는 하단에 있는 QBPM 장치를 통해 위치를 모니터링하며 수평단색화장치와 피드백을 통해 정교하게 빔 위치를 교정한다. 이후 CRL이 모두 제거된 상태에서 집속거울을 통해 수평으로 42.75배, 수직으로 29.44배 집속되어 최소 빔사이즈로 집속된다. 이는 IVU20의 광원 사이즈인 반치폭으로 수평 42 μm, 수직 11 μm을 시료 위치에서 수평 0.98 μm, 수직 0.37 μm로 만든다. CRL을 통한 defocus 방식을 통해 빔사이즈는 최종 수평 0.99 μm, 수직 1.2 μm로 증가시킬 수 있으며 최대 13 × 13 μm^2까지 증가시킬 수 있다 (<그림 2.2.8.3>). 집속 거울(HFM 및 VHM)에서의 빔 크기는 대략 가로 700 μm, 세로 600 μm이다. 작은 사이즈의 빔의 안정성을 도모하기 위해 VFM, HFM은 시료 위치에 가깝게 위치한다.

단색화장치의 경우 추후 high photon flux가 요구되는 실험을 위해 DMM을 넣을 수 있는 자리를 마련해두었으며 DCM과 함께 교차해서 사용 시 이용자의 편의성을 떨어트리지 않는 선에서 집속 방법에 대한 메커니즘 방안이 필요하다.



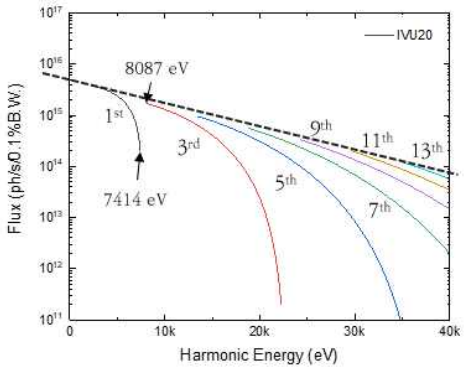
<그림 2.2.8.3> 4GSR 8번 생체분자나노결정학 빔라인의 광경로.
광원, 집속 거울, 시료에서의 빔세기분포를 보였다 (OASYS 전산 모사 결과).

라. 광원

본 빔라인의 광원은 IVU20이다. 이 undulator는 주기 20 mm, 길이 3 m의 In-vacuum undulator이다. Gap 조절 범위는 5 mm에서 13 mm이다. 최대 출력은 12.71 kW에 달한다. IVU20의 세부 사양은 <표 2.2.8.4>에 나타내었다.

<표 2.2.8.4> IVU20 세부 사양

Undulator	IVU20
Period length (λμ)	20 mm
Period number (N)	150
Undulator length (L)	~ 3000 mm
Gap range	5 mm ~ 13 mm
Max. B_0 @ 5 mm gap	> 1.02 T
Max. K-value @ 5 mm gap	> 1.9067
Max Power	12.71 kW
Power Density	166.6 kW $mrad^{-2}$
Central Cone Source Size in FWHM	42 μm (horizontal) × 11 μm (vertical)
Central Cone Beam divergence in FWHM	20 μrad (isotropic)



<그림 2.2.8.4> IVU20의 harmonic energy에 따른 flux 그래프

Central cone의 광원 크기는 반치폭으로 수평 42 μm, 수직 11 μm이다. 광원의 빔퍼짐은 반치폭 기준 수평, 수직 모두 20 μrad이다. IVU20은 gap scan을 통해 본 빔라인의 광자에너지 최종 최적화 범위인 8~25 keV 사이의 X선을 생산하는데 문제가 없다. (참고: <그림 2.2.8.4>의 harmonic energy에 따른 flux 그래프에 따르면 7.4 keV와 8.1 keV 사이의 X선을 생산할 수 없다.)

마. 프론트엔드

본 빔라인의 프론트엔드는 표준 모델을 사용한다. 이 프론트엔드는 IVU20 빔의 central cone 빔 퍼짐의 2.4 sigma, 즉 23 μrad만 내보낸다. (자세한 내용은 프론트엔드 표준 모델에 대한 자료를 참고)

바. 광학허치

(1) 광학허치 내 장치 세부 사양

○ 슬릿 (White beam slit)

프론트엔드에서 내보내는 57 μrad (6 sigma)의 빔 출력은 최대 500 W이다. 이

빔퍼짐각은 central cone 빔퍼짐 38 μrad (4 sigma)의 1.5배에 해당하기 때문에, central cone의 99.7%의 출력이 들어 있다. 이 빔이 단색화장치에 조사되었을 때 그 열부하가 냉각능력을 초과한다 (즉, 80 W/mm^{2}이며, 이는 >40 W/mm^2 조건을 초과함). 빔퍼짐각을 제한하고자 하면 본 슬릿을 사용한다. 여기서 충분한 열부하 감쇄가 되지 않으므로 다음에 위치한 열부하감소거울을 통해 추가적인 열부하가 감쇄된다. 반대로, 저전류 운전에서 빔정렬을 하는 경우 본 슬릿을 열어 빔 위치를 찾는데 활용한다.

○ 열부하감소거울 (HHM)

앞서 슬릿을 통과한 빔이 곧바로 단색화장치에 조사되면 위험하다. 슬릿에서 35 μrad의 빔만 통과시켜도 단색화장치에 대한 열부하가 한계치 수준이다 (즉, ~40 W/mm^2).

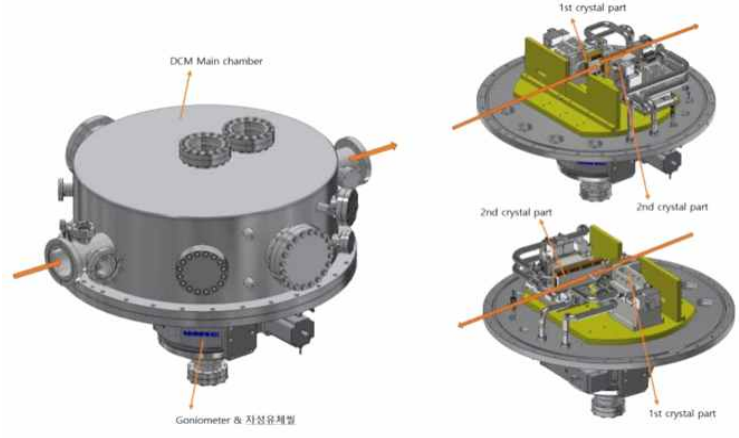
단색화장치를 보호하기 위해 슬릿과 단색화장치 사이에 열부하감소 거울을 위치시킨다. 광원의 자연 시준 (collimation) 외에 추가적인 시준은 불필요해 평면 거울을 사용한다.

○ 수평 단색화장치 (hDCM)

단색화장치로는 Si (111)의 이중결정단색화장치(double crystal monochromator)를 사용하며 수평 단색화장치는 집속한 X선 빔의 안정성을 도모하고자 수평 방향으로 빔을 반사시킨다. <표 2.2.8.5>에는 수평단색화장치의 사양을 나타내었으며 <그림 2.2.8.5>에는 수평단색화장치의 도면을 나타내었다.

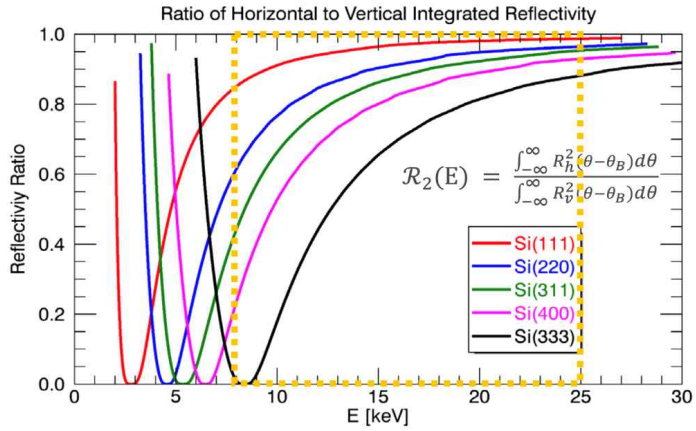
<표 2.2.8.5> 수평단색화장치 (hDCM) 사양

구 분	내 용
Photon energy	5 ~ 20 keV, 8 ~ 25 keV (최적화)
Energy resolution	$\triangle E/E < 2 \times 10^{-4}$
Crystal	Si (111)
Cooling	Liquid-nitrogen (LN2)
Operation	Fixed exit operation, closed loop (encoder) feedback
Sensors and Interferometers	The crystal gap and stage vibrations
1st Crystal	50 mm
2nd Crystal	150 mm



<그림 2.2.8.5> 수평단색화장치 (hDCM). 집속한 X-선 빔을 안정하게 유지하기 위해 수평 방향으로 빔을 반사시킨다.

수평 방향으로 빔을 반사시키면 X-선 빔의 편광방향과 일치해 5~6 keV에서 상당한 흡수가 발생한다 (<그림 2.2.8.6> 참고). 그래서, 본 빔라인이 활용되는 광자에너지 영역이 6.5~20 keV로 제한된다. 이에 대해 한국방사광이용자협회에서는 6.5~20 keV 영역대가 생체고분자결정 실험을 위해 충분하다는 검토 의견을 보내왔다. 하지만, IVU20은 7.4~8.1 keV 에너지의 X-선을 생산할 수 없어 추후 최적화를 거쳐 8~25 keV 영역대를 사용하며 주로 20 keV 에너지를 이용할 예정이다.



<그림 2.2.8.6> 수평 방향으로 반사시킬 때 수평 편광 X-선의 반사 특성. Si (111)을 단색화결정으로 사용하면 6 keV 이하에서 광량을 많이 잃어버린다. 본 빔라인의 주요 사용 광자에너지는 8 ~ 25 keV이다 (주황색 점선 박스).

○ 수평 단색화장치 (hDMM); 고려 중인 장치

High flux 및 높은 시간 해상도의 빔이 요구되는 상황에서 DMM (double multilayer monochromator)의 이용이 선호된다. 이는 DCM의 photon flux보다 약 10배 이상의 flux 향상을 기대할 수 있으며 본 빔라인에서 약 >10^{15}의 photon flux를 제공할 수 있을 것이라 예상된다. 본 장치의 사양과 모습은 <표 2.2.8.6> 및 <그림 2.2.8.7>에 나타내었다. <표 2.2.8.2>의 해외 빔라인들의 사례를 보면 현재 건설 중인 호주 ANSTO의 MX3 빔라인, 캐나다 CLS의 CMCF-ID 빔라인, 스웨덴 MAX-IV의 microMAX 빔라인에서 DMM을 사용 중이며 DCM과 교차로 사용할 수 있도록 구축된 곳은 CMCF-ID와 microMAX 빔라인이다. 본 장치를 이용하면 DCM 대비 10배 이상의 photon flux를 확보할 수 있으며 높은 시간 해상도가 필요한 time-resolved X-ray crystallography 실험이 가능하다. 하지만 본 장치를 이용하면 에너지 해상도가 DCM 대비 100배 정도 감소됨에 따라 SAD, MAD 실험이 제한되며 MR (molecular replacement)을 통한 구조 규명만이 가능하다는 단점이 있으며 또한 사용 가능한 에너지 범위도 10 keV대로 떨어진다. 향후 time-resolved X-ray crystallography 기법의 발전에 대비하여 본 장치를 추가할 수 있도록 공간을 마련해 놓았으며 DCM과 교차 사용에 대한 효율적인 메커니즘 방안 마련이 필요하다.

<표 2.2.8.6> 수평 단색화장치 (hDMM) 사양

구 분	내 용
Photon energy	5 ~ 20 keV, 8 ~ 25 keV (최적화)
Energy resolution	△E/E ~0.7%
Crystal	Ru/B4C
Cooling	Water or Liquid-nitrogen (LN2)
D-spacing	1.5 nm
Acceptance angle	~0.14 mrad @ 20 keV
Layer	300



<그림 2.2.8.7> 수평 단색화장치 (DMM)

사. 실험 허치

(1) 실험 허치 내 집속계 장치 세부 사양

빔의 안정성을 도모하기 위해 집속 거울의 위치가 샘플 가까이 위치함에 따라 동일한 온도를 유지하기 위해 집속계 장치들이 실험 허치 내에 위치한다.

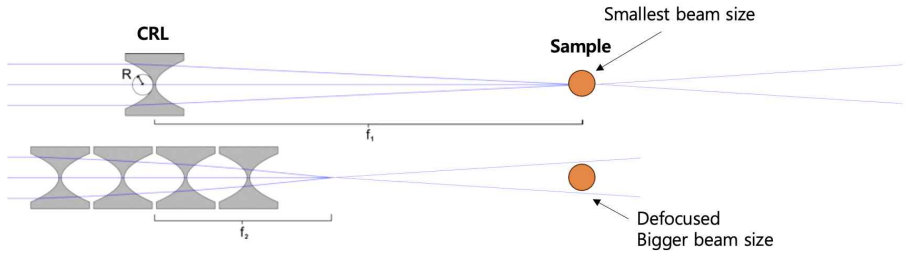
○ Quadrant Beam Position Monitor (QBPM)

hDCM에서 수평 방향으로 빔을 반사시키므로 수평 방향으로 빔 이동(drift)이 예상된다. 가령, 광자에너지 변경을 했을 때 단색화결정의 열 안정화가 진행되는 동안 반사 각도가 살짝 달라지는 경우 등이다.

hDCM에서 나온 빔 위치를 감시하기 위해 quadrant beam position monitor (QBPM)를 사용한다. 측정하는 감도를 높이기 위해 hDCM에서 가능한 멀리 떨어뜨린다. 수평방향의 빔 위치 이동이 감지되면 hDCM의 두 번째 결정의 피치각도(pitch)를 조정해 원래 빔위치를 유지한다. 수직방향으로의 빔 위치 이동은 hDCM이 기울었거나 QBPM이 기운 것이 아니면 원칙적으로 일어날 수 없다.

○ CRL (Compound refractive lens)

CRL은 여러 장의 개별 렌즈들의 배열로 이루어져 있으며 각 렌즈는 양면 오목 렌즈와 같은 역할을 한다. 이에 의해 빔의 굴절률을 조절하여 초점거리를 조정 가능하게 만든다. 여러 장의 CRL이 들어가면 초점거리가 짧아지며 특정 위치에 고정된 샘플에 조사되는 빔의 크기가 커진다. <그림 2.2.8.8>은 CRL을 이용한 초점거리 조절을 나타낸다. 이를 defocusing이라 하며 이러한 특성을 이용해 샘플 위치에서 빔의 크기를 조정 할 수 있다. 현재 목표 빔사이즈는 1 μm × 1 μm ~ 13 μm × 13 μm로 CRL을 이용해 이러한 작은 사이즈의 빔을 안정적으로 신속하게 조절 가능하다. 수평과 수직 방향을 각각 조절 가능한 1D CRL을 이용해 각 방향을 독립적으로 조절한다. 이를 통해 초기 42 μm × 11 μm의 넓적한 빔을 최종 0.98 μm × 1.2 μm의 원형에 가까운 모양으로 조정할 수 있다 (<그림 2.2.8.3> 참고).



<그림 2.2.8.8> CRL을 이용한 초점 거리 조절. (위) 한 장의 CRL의 초점거리.
(아래) 여러 장의 CRL에 의해 짧아진 초점거리

○ 수평, 수직 집속거울 (HFM, VFM)

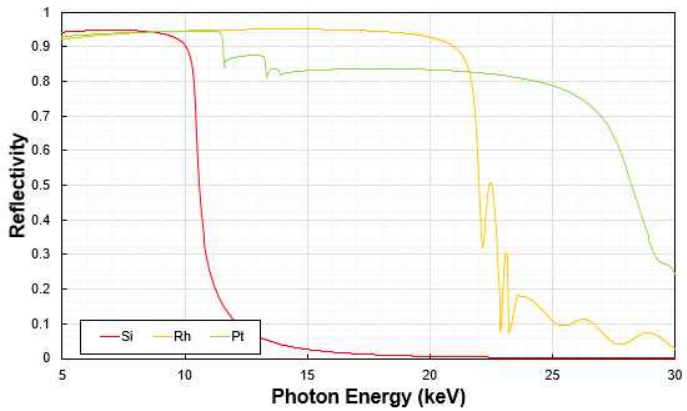
수평 방향과 수직 방향의 집속을 각각 담당하는 두 거울 (HFM, VFM)을 넣는다. 고정 초점거리의 타원 곡면 거울(elliptical mirror)이다. <표 2.2.8.7>에 수평, 수직 집속 거울 사양을 나타내었다. 시료 위치에서 반치폭 최소 1 μm (수평) × 1 μm (수직)에서

최대 13 μm × 13 μm의 집속 빔을 안정적으로 제공하기 위해서는 거울의 위치가 시료에 가깝게 놓인다. 거울 위치에서의 빔 크기는 반치폭으로 700 μm (수평) × 600 μm (수직)이다 (<그림 2.2.8.3> 참고).

고조화 제거(harmonic rejection) 목적으로도 활용하기 위해 입사각은 3 mrad으로 하고, 세 줄(strip)로 각각 silicone, rhodium, platinum의 표면을 만든다. 각 표면의 반사율을 <그림 2.2.8.9>에 보였다. hDCM에서 정하는 단색광 광자에너지에 맞춰 거울면을 이동시킨다.

<표 2.2.8.7> 수평, 수직 집속 거울 사양

Optical element	HFM	VFM
Shape	Elliptical	Elliptical
Surface size (L × W) (mm)	600 × 50	600 × 50
Substrate	Si	Si
Coating (thickness) (nm)	Si /Rh (50) /Pt (50)	Si/ Rh (50) /Pt (50)
Incident angle (mrad)	3	3
Source distance (mm)	68400	67700
Focus distance (mm)	1600	2300
Roughness σ (nm)	< 0.2	< 0.2
Slope error (tangential / sagittal) (μrad)	0.1 / 1	0.1 / 1



<그림 2.2.8.9> 집속거울의 표면에 따른 반사율. Si: silicone; Rh: rhodium 50 nm; Pt: platinum 50 nm

○ Quadrant Beam Position Monitor (QBPM)

집속 X선 빔의 위치를 감시하기 위해 시료 앞에 quadrant beam position monitor (QBPM)를 둔다. HFM과 VFM으로부터 집속된 빔 위치 이동을 예민하게 감지할 수 있다. 수평 방향의 빔 위치 이동은 HFM의 피치각도(pitch)를 조정하고, 수직 방향의 빔 위치 이동은 VFM의 피치 각도를 조정해 원래 빔위치를 유지한다.

(2) 정밀 회절기

미세 단결정을 취급할 수 있도록 정밀 회절기를 도입한다 (<그림 2.2.8.9> 참고). 결정 시료를 회전시킬 때 집속 X-선 빔을 벗어나지 않도록 높은 회전정밀도(sphere of confusion)가 요구된다. 10 μm 미만의 미세 단결정을 찾는 raster scan과 바늘형 결정에 대한 helical scan을 지원하는 구동축도 필요하다 (<그림 2.2.8.11> 참고).

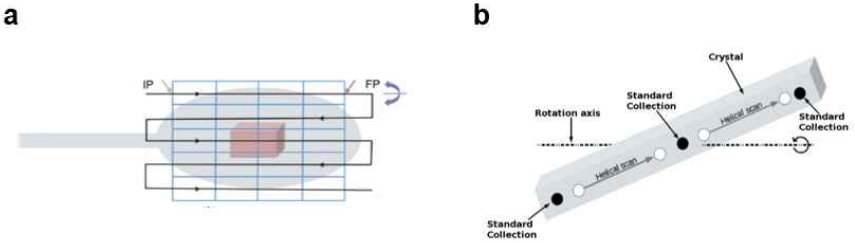
X-선 회절 실험에서 빔의 위치에 정확하게 시료를 위치시키고, 3차원 이워드 회절공간(Ewald's sphere)의 회절점을 모두 측정하기 위해서 시료의 회전은 매우 필수적 구동 요소이다. 시료는 공간좌표에서 XYZ 축으로 모두 이동이 가능해야 하며, 이후 회전축은 빔과 시료가 정확하게 정렬된 축에서 벗어나지 않으면서 360도 회전할 수 있어야 한다. 집속 된 빔의 최소 크기가 1 μm이며, 동일 크기의 결정 시료의 회전 동안에 빔의 중심에서 벗어남으로써 발생할 수 있는 회절 세기의 오차를 3% 이내로 제한하기 위해서 요구되는 SOC (Sphere of confusion)은 대략 100 nm 이하가 되어야 하며, 마이크론 크기의 시료를 빔의 위치에 정확하게 정렬하기 위해서는 고해상도의 현미경이 빔이 진행되는 축과 동일한 방향에서 결정 시료를 관찰할 수 있어야 한다. 시료의 정렬과 이동을 위한 장치들은 모두 수백 나노미터 이상의 정밀도로 구동될 수 있어야 하며 반복 및 높은 재현성을 가져야 한다. 회절기는 시료 교환 로봇과 연동되어 작동되어야 하며, 디텍터에 회전각도 및 위치에 따른 하드웨어 트리거 시그널을 보낼 수 있어야 한다.

단백질 결정은 소분자에 비해서 매우 큰 단위격자를 가지며, 이는 회절 이론에 따라서 실제 단백질 결정을 구성하는 단위격자가 클수록 디텍터에서 측정되는 역격자인 회절점 사이의 간격은 좁아지게 된다. 이 경우 결정의 회전축과 단위격자의 긴축이 수직으로 놓일 경우 회절점은 겹치게 측정되어 데이터 분석이 불가능하다. 이를 해결하기 위해서는 결정의 회전축과 긴 축을 평형하게 정렬하면 회절점의 겹침을 최소화할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 결정의 위치를 정렬할 수 있는 다축 회절기(multi-axis goniometer: kappa/phi)가 요구된다 (<표 2.2.8.8> 참고).



Orientation	
Ω axis	Vertical
Ω Scan axis	
Sphere of confusion (with SmartMagnet Nozzle)	100 nm radius, @ 100 deg/s *)
Sphere of confusion (with MiniKappa Nozzle)	100 nm radius, @ 100 deg/s *)
Max. Rotation speed	720 deg/s
Design angular resolution	0.1 mdeg (full step)
Static accuracy	Below ± 0.3 mdeg
Dynamic accuracy	Below ± 0.7 mdeg @10 deg/s
Sample alignment (AY,AZ): Raster / Grid scans axes	
Design resolution	5 nm
Range	AY: 108 mm AZ: 6 mm
Static accuracy (on load)	Below ± 100 nm
Dynamic accuracy (on load)	Below ± 1µm @ 15 mm/s on AY Below ± 1µm @ 1 mm/s on AZ
Grid U-turn delay	< 300 ms @ 15 mm/s on AY
Centering table (CX,CY): Centering, Helical Scan axes	
Design resolution	5 nm
Range	CX, CY: 5 mm
Static accuracy (on load)	Below ± 100 nm
Dynamic accuracy (on load)	Below ± 1µm @ 0.8 mm/s on CX,CY
Beam aperture	
Diameter range	5 selectable diameters, Min: 5 µm
Resolution	16 nm
Repeatability	Below ± 1µm

<그림 2.2.8.10> 생체고분자결정학용 정밀 회절기. 우측 사양표에서 X축은 X-선 진행 방향, Y축은 수평 방향, Z축은 수직 방향이다. 시료회전축은 수직 방향(Z)이다. Helical scan용 구동은 시료 회전축을 X축 방향(CX)과 Y축 방향(CY)으로 이동한다. Raster scan용 구동은 시료 회전축은 가만히 두고 시료만 Y축(AY)과 Z축(AZ) 방향으로 이동한다.



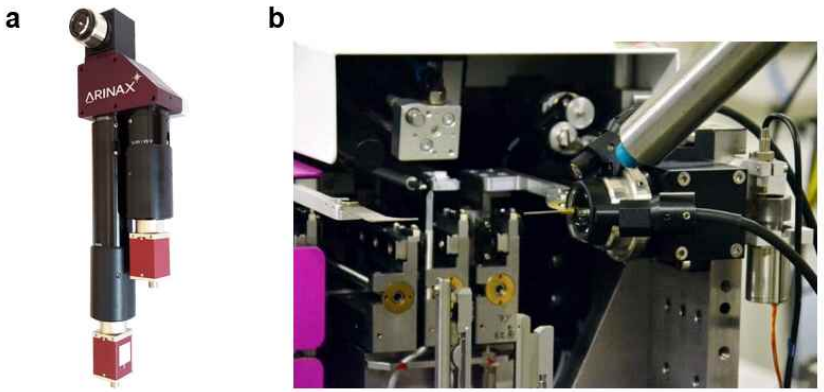
<그림 2.2.8.11> 미세 단결정 스캔 방법. (a) Raster scan;
(b) 바늘 형상의 단결정에 대한 helical scan

<표 2.2.8.8> 회절기의 주요 요구사양

시료정렬	
구동 해상도	5 nm
구동 범위	Y 축: 110 mm/ Z 축: 6 mm/ X 축: 6 mm
정확도	± 100 nm
회전축 (omega)	
SOC (반경)	100 nm 이하
회전 속도	100°/s 이상
각 해상도	0.1 mdeg 이하
회전 정확도	± 1 mdeg 이하
Kappa 범위	0° ~ 90°
Kappa 각 해상도	0.1 mdeg 이하
Phi 각 해상도	0.1 mdeg 이하

(3) 결정 위치 파악용 광학현미경

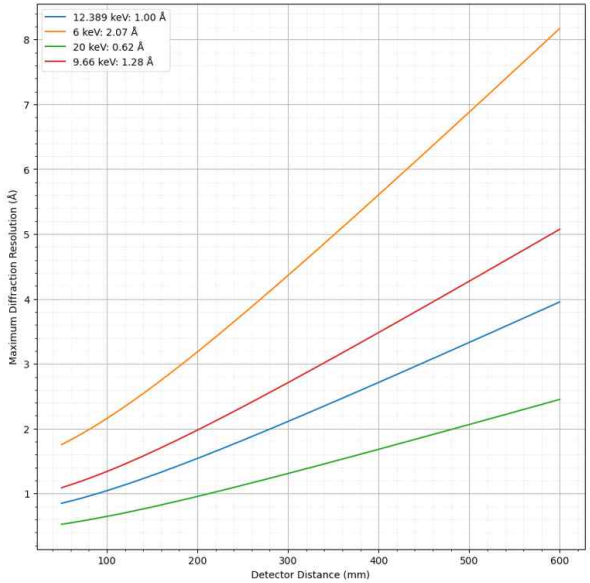
정밀 회절기에 거치한 결정의 위치를 파악하기 위한 광학현미경이다. 배율 조정이 용이한 zoom 현미경을 도입한다 (<그림 2.2.8.12> 참고). 요구되는 시야 크기는 저배율에서 2~3 mm, 고배율에서 0.2~0.3 mm 정도이다.



<그림 2.2.8.12> 결정 위치 파악용 광학현미경.
(a) 잠망경 형태의 zoom 현미경; (b) 생체고분자결정학 시료 거치 환경.

(4) X-선 회절 검출기

X-선 회절은 광 개수 (photon counting) 방식의 검출기를 사용해 측정한다. 광 개수 검출기는 감도가 높고 30 Hz 이상의 고속 촬영을 지원한다. 미세결정은 X-선 회절이 약하므로, 검출 범위가 32 bit 이상인 것이 바람직하다. 막단백질, 단백질 복합체 등 단위격자(unit cell)가 큰 결정의 X-선 회절을 측정하기 위해 검출기의 측정 면적은 300 mm 이상으로 한다. 그러면, 회절점들(diffraction spots)을 구별하기 위해 검출기를 뒤로 빼더라도 구조 규명을 위한 고해상도 (3 Å 대) X-선 회절을 모을 수 있다. <그림 2.2.8.13>은 결정 시료로부터 X-선 회절 검출기 거리에 따른 측정 해상도를 나타낸다.



<그림 2.2.8.13> 결정 시료로부터 X-선 회절 검출기 거리에 따른 측정 해상도. 검출기의 측정 면적은 300 mm로 가정함

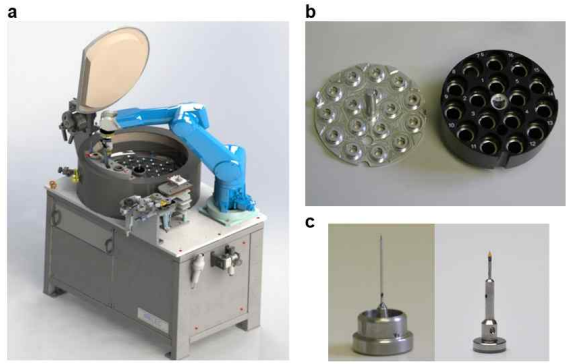
EIGER2 XE 16M 회절 검출기 이용해 앞선 조건들을 충족시킬 수 있으며 이는 560 Hz의 높은 프레임 속도와 311 × 328 mm^2의 넓은 검출면을 제공한다. <표 2.2.8.9>는 X-선 회절 검출기의 사양을 나타낸다.

<표 2.2.8.9> X-선 회절 검출기 사양

	EIGER2 XE 16M
Type	2D detector
Active area (W × H) (mm^2)	327.8 × 311.2
Pixel array (W × H) (pixels)	4,148 × 4,362
Pixel size (W × H) (μm^2)	75 × 75
Count rate (photons/s/mm^2)	~1.7 × 10^9
Frame rate	700 Hz (8 bit) / 560 Hz (16 bit)

(5) 시료 교체 로봇

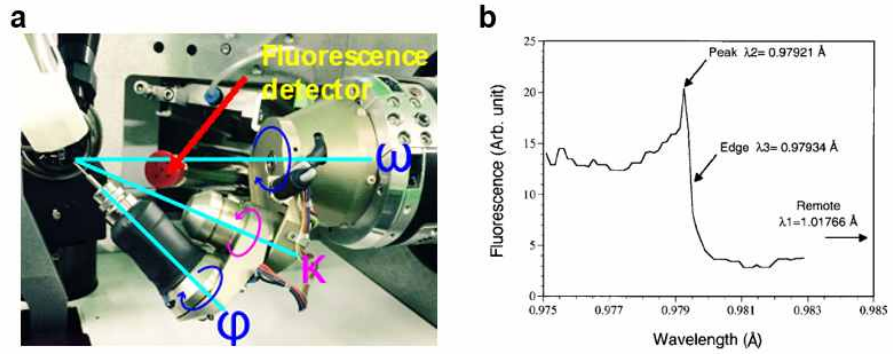
시료 교체 로봇은 측정이 끝난 결정 시료를 액체질소 bath tube로 옮기고, 새 결정 시료를 꺼내 정밀회절기로 옮겨 거치해 X-선 회절을 측정하게 하는 작업을 자동으로 반복한다 (<그림 2.2.8.14> 참고). 로봇 사용을 위해 시료 보관 방식과 결정을 거치하는 핀을 표준화해야 한다. 이를 위해서는 일반적으로 SPINE 또는 miniSPINE 타입의 핀이 많이 이용된다. 그뿐만 아니라 에러 없이 연속적으로 결정의 교환 및 데이터 수집을 위해 정밀회절기와의 호환이 매우 중요하며 이와 동일한 제작사에서 만들어진 로봇 시스템이 선호된다.



<그림 2.2.8.14> 시료 교체 로봇. (a) 로봇 팔과 결정시료 보관용 액체질소 bath tube; (b) 시료 보관함 (Uni-puck); (c) 결정 거치 핀 (각각 SPINE과 miniSPINE).

(6) X-선 형광 측정기

결정 시료의 단위격자 내 중량 원자(heavy atom)를 확인하고 그 흡수 스펙트럼을 측정하기 위해 X-선 형광 측정기를 사용한다. <그림 2.2.8.15>에 보인 것과 같이 X-선 형광 측정기를 결정 시료에 근접시키고 광자에너지를 스캔해 multiple-wavelength anomalous diffraction 측정을 위한 remote, peak, edge의 광자에너지 값을 알아낸다.

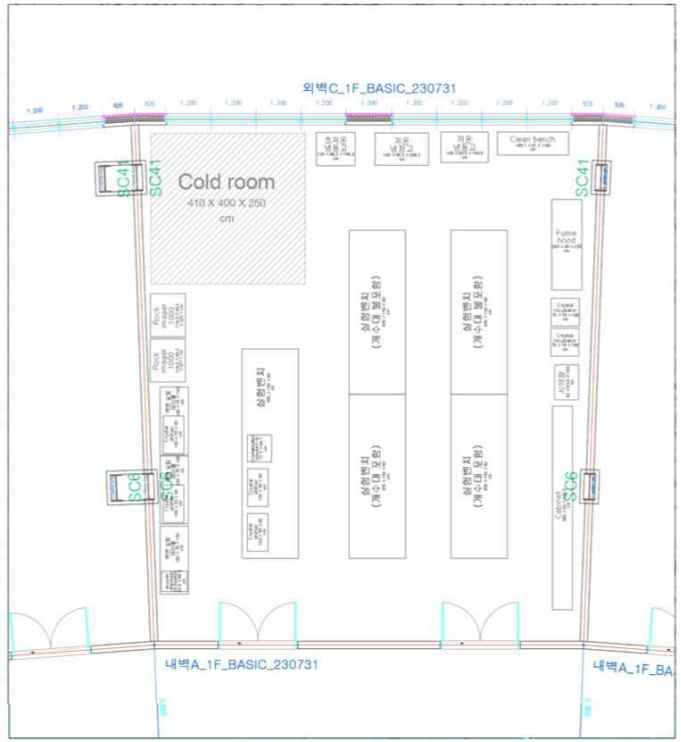


<그림 2.2.8.15> 결정시료의 X-선 형광 측정

<그림 2.2.8.15>에서 (a)는 결정시료에 X-선 형광 측정기를 근접시킨 장치 구성, (b) 황 (sulfur) 원자를 셀레늄(selenium)으로 치환한 단백질의 X-선 흡수 분광 스펙트럼을 나타낸다. Remote, peak, edge의 광자에너지에서 각각 X-선 회절 스캔을 수행하는 multiple-wavelength anomalous diffraction 측정을 통해 X-선 회절 위상 정보까지 결정할 수 있다.

아. 부대 시설

(1) 생체고분자 결정 준비실 (빔라인 실험 준비실 1-2)



<그림 2.2.8.16> 빔라인 실험 준비실 1-2 도면

생체분자나노결정학 빔라인에서 1일에 분석할 수 있는 단백질의 결정 개수가 600개 이상으로 증대되며, 최적화를 통해서 1,000개까지 가능할 수 있을 것으로 예측된다. 따라서 빔라인의 시료 처리량에 맞추어 단백질 결정 시료를 준비할 수 있는 시설을 구축하는 것은 빔라인의 활용 효율을 높이기 위해 필요하다. 단백질 결정학에서 회절능이 우수한 단백질 결정을 확보하는 것은 여전히 병목으로 존재한다. 단백질 결정은 온도변화와 시간의 흐름과 환경변화 조건에 매우 예민하게 반응해서 쉽게 결정성이 손상될 수 있기 때문에, 현장에서 결정화가 수행되고 회절 실험을 수행할 수 있도록 실험 환경을 구축하고자 한다. <그림 2.2.8.16>의 도면은 생체분자나노결정학

빔라인에서 요구되는 실험들이 가능한 실험실의 배치도이다. 해당 준비실에는 단백질의 결정화 조건 탐색을 위한 결정화 로봇과 수천 종의 결정화 조건에 대한 자동 이미징을 통해서 결정이 생성된 조건을 탐색할 수 있는 자동 결정 이미징 장치를 운영하고자 한다 (<그림 2.2.8.17>, <그림 2.2.8.18> 참고). 결정화 이미징 장치는 상온에서 작동하는 장치와 저온에서 작동하는 장치가 별도로 요구된다. 이러한 결정화 실험을 수행하기 위해서는 일반적인 결정화 실험실에서 요구하는 현미경, 인큐베이터, 실험 테이블 등의 환경을 갖춘다.



<그림 2.2.8.17> 상용화된 결정화 로봇. Formulatrix 사의 NT-8 (좌), sptlabtech 사의 mosquito (우) 제품

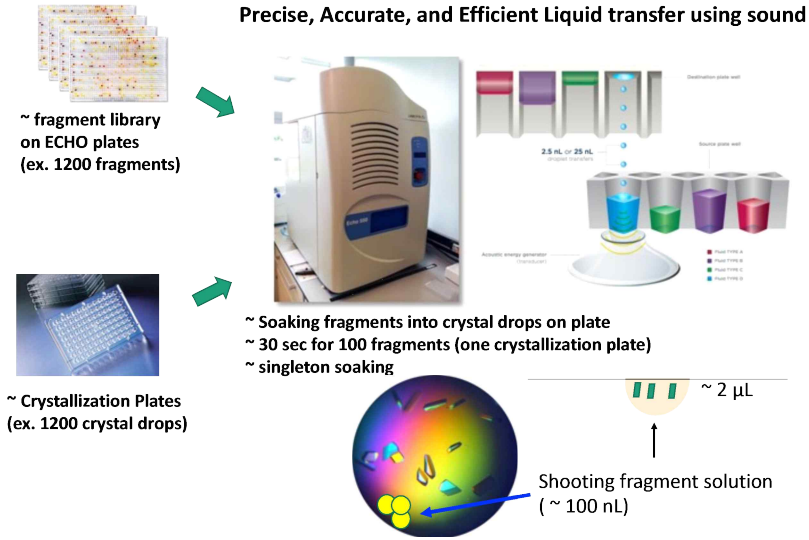


<그림 2.2.8.18> 단백질 결정 자동 이미징 장치

단백질 결정화 로봇은 연구자가 파이펫을 이용해서 직접 수행하는 결정화 실험에 비해서 높은 재현성을 보이고 있으며, 결정화 조건 탐색에 소요되는 단백질의 양을 최대 1/3까지 줄일 수 있는 큰 장점이 있다. 단백질 결정 자동 이미징 장치는 결정화 로봇이 수행한 천 여종의 결정화 조건에서의 결정 생성 여부를 고해상도 현미경을 이용해서 자동으로 이미징하고 인공지능을 이용한 이미지 분석을 통해서 결정의 생성 여부를 사용자에게 알려줄 수 있는 장치이다. 최소 상온 성장 결정과 저온 성장 결정을 위한 장치가 별도로 운영되어야 한다.

(2) 결정 기반 프래그먼트 탐색을 위한 부대 시설

MX 빔라인에서 수집하고 분석할 수 있는 결정의 수가 획기적으로 증대함에 따라서 이를 이용할 수 있는 가장 적합한 분야는 결정학에 기반한 약물 탐색 분야이다. 영국 DLS의 XChem과 스위스 SLS의 MX 그룹에서 프래그먼트 탐색을 위한 시료 준비실을 별도로 운영하고 있다. 단백질 결정을 현장에서 제작할 수 있으므로 결정시료에 개별 프래그먼트 분주를 위한 실험장치와 단백질 결정의 수집을 위한 장치 운영이 요구된다. 포항가속기연구소를 포함한 대부분의 실험실에서는 초음파를 이용해서 프래그먼트를 분주해주는 장치를 기본적으로 사용하고 있으므로 해당 기술의 적용이 적당할 것으로 예상된다. <그림 2.2.8.19>는 초음파 미세 용액 분주기를 이용해서 화합물 라이브러리에서부터 결정화 플레이트의 결정화 드롭에 프래그먼트를 분주하는 실험의 흐름도를 보여준다. 다량의 결정 수집을 위해서 현재까지 개발된 완전히 자동화된 장치는 없으며, 대부분 연구 인력의 매뉴얼 실험에 반복적인 동작은 모터구동장치(X/Y/Z 축 움직임)의 도움을 받는다. 해당 반 자동 장치를 이용하면 시간당 100개의 결정 수집이 가능하며, 향후 해당 장치의 throughput을 높이기 위한 기술개발이 요구된다. <그림 2.2.8.16>의 실험 준비실에는 프래그먼트 탐색 실험이 가능한 장치들의 배치를 함께 고려하였으며 PLS-II 5C 빔라인의 실험 준비실 구성과 유사하게 설계될 예정이다.

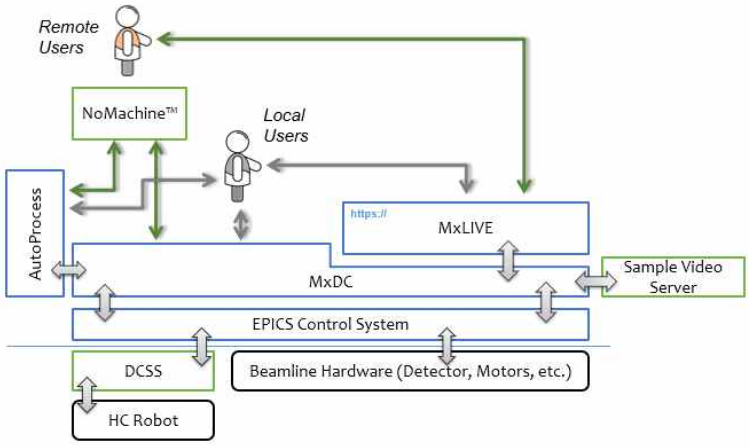


<그림 2.2.8.19> 초음파 미량 분주 장치를 이용한 프래그먼트 분주 실험

자. 전산 체계

(1) 전체 구조

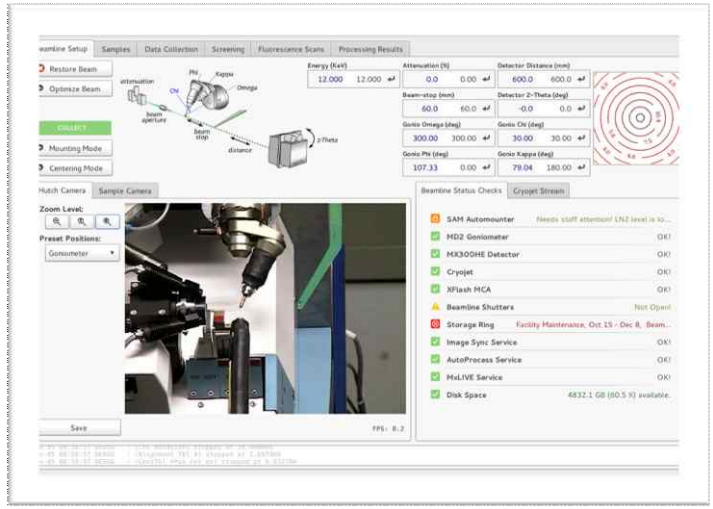
주요 컨트롤 시스템은 EPICS이며 이는 MxDC 소프트웨어와의 접속을 통해 이용자 친화적인 GUI를 제공한다. MxDC를 이용해 데이터 수집, 관리가 용이하며 MxLive를 이용해 원격으로 샘플 송달과 정보 관리 및 데이터 관리가 가능하다. 빔라인 이용자는 로컬 또는 원격으로 빔라인 전산 체계에 접근할 수 있다. 원격 이용자는 NoMachine을 통해 MxDC에 원격으로 접속할 수 있다. 이는 PLS-II의 5C 빔라인에서 이미 사용 중인 전산 체계로 이와 동일하게 설계될 예정이다. <그림 2.2.8.20>은 4GSR 생체분자 나노결정학 빔라인의 전산 체계의 전체 구조를 보여준다.



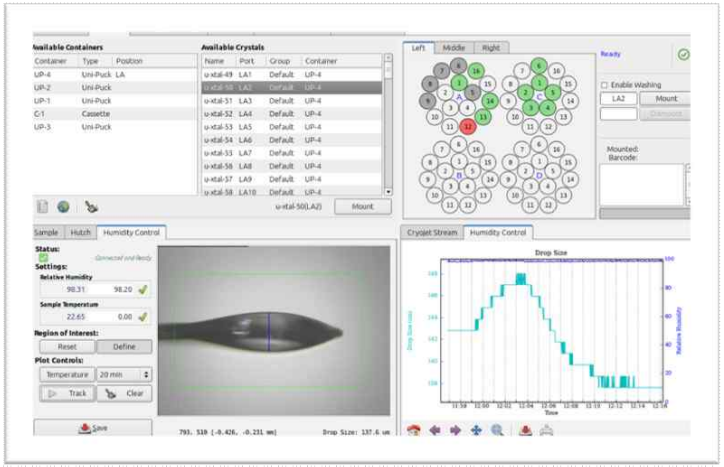
<그림 2.2.8.20> 4GSR 생체분자나노결정학 빔라인의 전산 체계의 전체 구조

(2) 빔라인 제어 및 DAQ

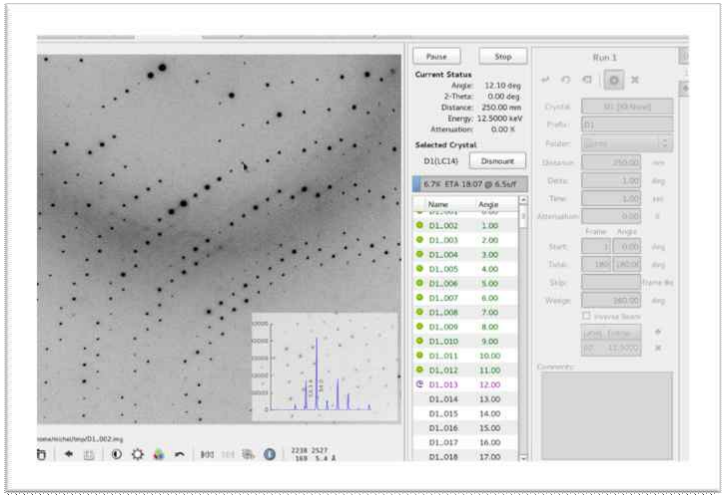
MxDC를 통해 빔라인 제어 (에너지 변경, Attenuation 설정, 회절 검출기 거리 조정, 정밀 회절기 조절 등) 및 샘플 리스트 관리, 데이터 수집이 가능하다.



<그림 2.2.8.21> MxDC를 이용한 빔라인 제어 화면



<그림 2.2.8.22> MxDC를 이용한 결정 샘플 리스트 관리 및 결정 습도, 온도 조절 화면



<그림 2.2.8.23> MxDC를 이용한 데이터 수집 화면

(3) 데이터 취급/저장/관리

○ 데이터량 예측

- 데이터량 조건

아래는 데이터량 예측에 활용된 실험 예상 조건이다.

· Sample: 단일 단백질 결정

· 360° 회전 데이터 수집

· Detector: EIGER2 XE 16M 32 bit

- 데이터 저장량

<표 2.2.8.8> 단일 단백질 결정을 이용해 1세트의 데이터를 모을 때 저장량

Data Acquired rate	30 Hz
1 File	55.6 MB
Data rate for 1s	1.67 GB
Data size for 1 set	20 GB

만일 결정 기반 프래그먼트 탐색 실험을 할 경우 프래그먼트의 개수를 1세트의 데이터 크기에 배를 하면 된다. 예를 들면 1,000개의 프래그먼트에 대한 데이터를 수집할 경우 총 예상 데이터 크기는 20 TB이다.

(4) 데이터 처리/분석 소프트웨어

빔라인을 통해 얻어진 결정 회절 데이터는 HKL3000 또는 XDS 소프트웨어를 통해 처리되며 결정구조를 분석한다. 여기서 얻어진 Structure solution은 phenix 소프트웨어를 통해 전자밀도를 얻고 COOT 소프트웨어를 이용해 분자 구조 모델링을 진행한다. HKL3000 또는 XDS 소프트웨어는 자동화가 가능하여 대량의 데이터를 신속하게 처리할 수 있다.

차. 커미셔닝

(1) 커미셔닝 목표

생체분자나노결정학 빔라인의 최종 커미셔닝 목표는 집속 된 micron 사이즈의 X-선 빔을 안정적으로 제공하여 nano 또는 micron 사이즈의 생체고분자 결정을 통해

원자해상도의 삼차원 구조를 얻는 것과 프래그먼트의 고속 대량 스크리닝 실험의 원활한 진행을 목표로 한다. 이를 위해 커미셔닝은 총 3단계로 진행한다. 첫 번째 단계에서는 <그림 2.2.8.2>에 설계된 광학계에 따라 모든 장치들을 설치하고 모든 모듈이 정상 작동하는지 확인한다. 그뿐만 아니라 방사선 안전사고 예방을 위해 Interlock과 safety shutter 트리거 등의 정상 작동을 면밀히 확인한다. 두 번째 단계에서는 실험허치에 전달되는 빔의 특성을 정량화한다. 빔의 사이즈가 작은 만큼 진동 및 온도변화에 따른 빔의 위치 변화를 모니터링 한다. 또한 CRL을 이용해 빔사이즈를 조정하면서 이에 따른 photon flux 차이를 정량화한다. 마지막으로 실험허치 내 장치들의 정상 작동 여부 및 테스트 시료를 이용해 목표한 실험들이 원활하게 진행될 수 있는지 확인한다.

- 테스트 시료: lysozyme 단백질을 이용해 nano 또는 micro 사이즈의 결정을 제작
- 생체분자나노결정학 빔라인을 이용해 회절패턴을 안정적으로 얻을 수 있는지 확인
- Nanocrystallography를 위한 정밀회절기 부속 장치들이 안정적으로 작동하는지 확인
- 빔라인 제어 및 DAQ 전산 체계가 원활히 작동하는지 확인
- 수집된 회절 데이터를 이용해 데이터 처리 및 분석 소프트웨어들의 정상 작동을 확인
- 대량의 시료를 준비하여 자동 시료 교체 로봇을 이용해 정밀 회절기와의 호환성 및 원활한 작동 확인

(2) 빔라인 건설 일정

<표 2.2.8.9> 빔라인 건설 일정

	2023년				2024년				2025년				2026년				2027년			
도면 작업					■	■	■	■	■	■										
전산 해석					■	■	■	■	■	■										
발주							■	■	■	■	■	■	■	■						
소프트웨어 준비							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
입고 및 검수											■	■	■	■	■	■				
설치													■	■	■	■				
커미셔닝																	■	■	■	■

카. 요약 및 전망

생체분자나노결정학 빔라인은 PLS-II MX 빔라인들 대비 100~1,000배의 밝은 X-선과 집속된 작은 광원을 이용해 photon flux가 높은 micron 사이즈의 빔을 제공한다. 이는 기존에 회절 패턴을 얻기 어려웠던 작은 사이즈의 결정에 대해 nanocrystallography를 가능하게 하는 장점이 있다. 이를 통해 국내에서 시도하기 어려웠던 challenging 한 단백질 결정에 대해 성과를 얻을 수 있는 길을 열 수 있게 된다. 또한, 프래그먼트 화합물의 고속 대량 스크리닝 시스템을 구축하여 국내 신약 개발 시장에 높은 기여를 할 것이라 예상된다. 이를 위한 자동화 시설 및 원격 이용 시스템을 구축해 이용자들이 손쉽게 접근하여 사용할 수 있는 환경을 제공한다. 새로운 MX 빔라인에 대한 수요는 높을 것이라 예상하며 산업체와 학계에 대한 지원체계를 잘 마련하여 이러한 수요를 효율적으로 대응할 필요가 있을 것이라 예상된다.

참고문헌

[1] Stephen K. Burley, et al., Protein Data Bank: A Comprehensive Review of 3D Structure Holdings and Worldwide Utilization by Researchers, Educators, and Students. Biomolecules 12, 1425 (2022).

[2] D. de Sanctis. The ID29 upgrade project: a new serial crystallography beamline for time-resolved studies at ESRF-EBS. Acta Cryst. A77, a113 (2021).

[3] Dieter K. Schneider, et al., FMX – the Frontier Microfocusing Macromolecular Crystallography Beamline at the National Synchrotron Light Source II, J. Synchrotron Rad. 28, 650–665 (2021).

[4] Marco Mazzorana, et al., A comprehensive approach to X-ray crystallography for drug discovery at a synchrotron facility – The example of Diamond Light Source, 37, 83-92 (2020).

[5] Millions invested in new beamline at MAX IV, https:// www.lth.se/ article/millions-invested-in-new-beamline-at-max-iv/, Lunds University news article.

[6] Martin Caffrey, Membrane protein crystallization, Journal of Structural Biology, 142, 1, 108-132 (2003).

[7] Alice Douangamath, et al., Achieving Efficient Fragment Screening at XChem Facility at Diamond Light Source, JoVe, (2021).

[8] Jakub W. Kaminski, et al., Fast fragment- and compound-screening pipeline at the Swiss Light Source, Structural Biology, 78 (3), 328-336, (2022).

[9] Jae-Hee Jeong, et al., Upgrade of BL-5C as a highly automated macromolecular crystallography beamline at Pohang Light Source II, J. Synchrotron Rad. 28, 602–608 (2021).

[10] Tim Graber, X-ray Optics Considerations for the APS Upgrade, APS Upgrade Forum. November 8, (2018)

2.2.9 고에너지 현미경 빔라인 (High Energy Microscopy)

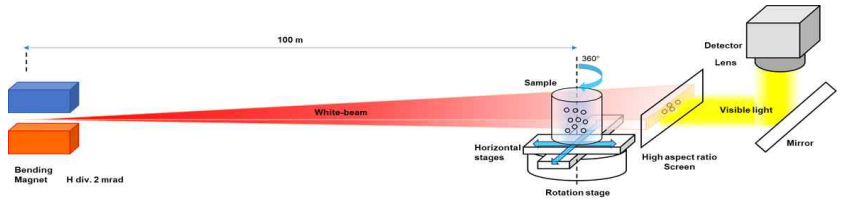
가. 소개

고에너지 현미경 빔라인은 mm 단위에서 서브 마이크로 수준에 이르기까지 투영 영상을 제공하는 빔라인으로 거시적인 수준에서 시료의 내부 정보를 제공한다. 과학적인 관점에서 자연현상 및 기술적 이해는 원자 수준부터 거대한 규모까지 물질 구조 및 이동 과정 그리고 기본적 상호 작용에 대한 이해가 필요하다. 현재 물질 구조 및 상호 작용에 관한 연구는 미시적 또는 거시적인 수준에서 물질 특성이나 거동을 단편적으로 연구되고 있다. 고에너지 현미경 빔라인은 마이크로 수준에서 재료의 자세한 3D 이미지를 생성함으로써 물질의 전체 과정을 이해할 수 있는 시료 정보를 제공할 것이다.

4GSR 광원을 이용하는 고에너지 현미경 빔라인은 기존의 3세대 광원과 비교하여 emittance 감소와 spectral brightness의 증가로 인하여 가장 큰 이익을 얻을 것이다. Emittance 감소 및 brightness의 증가는 생체 내 또는 in-situ 환경에서 시료에 대한 높은 해상도와 민감도를 가지는 이미지를 제공하고 연구자와 엔지니어가 마이크론 수준에서 새로운 재료의 복잡한 변화를 관찰하여 발견된 문제에 대한 해결책을 찾는데 도움이 될 것이다.

(1) 빔라인의 중요성

고에너지 현미경 빔라인은 X-선 투영 영상을 기본으로 제공한다. X-선 투영 영상은 가장 널리 활용되는 X-선 기법으로 Non-destructive, see-through imaging이 가능하여 의료 (진단), 산업 (검사), 보안 (수출·입) 전반에 필수적인 검사기법으로 사용되고 있다.

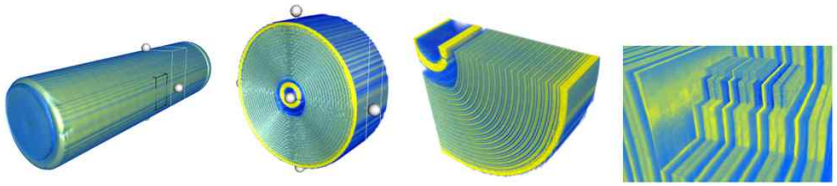


<그림 2.2.9.1> 고에너지 현미경 빔라인 투영 영상 모식도

내부구조의 3차원 검사를 가능하게 하는 Computed tomography (CT)는 의료 분야에서 생체를 절개하지 않고 내부 정보를 직관적이고 정확하게 제공한다. CT를

이용한 정확한 질병 위치 파악은 의사의 정확한 치료계획 수립을 가능하게 하고 치료 결과 확인 및 추적이 용이하게 한다. X-선 의료영상은 의료 인력 양성 교육 자료로 활용할 수 있고 및 IBM Watson과 같은 AI 학습 자료로 활용되고 있다.

산업 분야에서는 철강, 건설, 이동 수단 등 비파괴 품질관리 분야에 핵심 역할을 수행하고 있다. <그림 2.2.9.2>는 배터리 X-선 투영 영상으로 배터리 내부의 구조를 단계별로 제공하고 이차 전지의 노화 과정을 측정할 수 있다. 일반적인 리튬이온 전지는 전극에 있는 작은 리튬 금속 덩어리가 중요한 역할을 한다. 고해상도 X-선으로 전지 내부를 스캔하면 작동 중인 전지 부품이 어떻게 변화하는지 시각화할 수 있다. 예를 들어, 전지 작동 중에 금속 리튬이 전극에 쌓여 바늘 모양으로 덴드라이트(dendrites)를 형성하는 과정을 볼 수 있다. 덴드라이트가 두 전극으로 통하는 경우, 이는 단락으로 이어져 폭발적 반응과 위험한 전지 화재를 일으킬 수 있다. 이러한 변화를 모니터링하고 분석함으로써 더 안전하고 효율적인 전지 디자인을 개발할 수 있다.



<그림 2.2.9.2> 배터리 X-선 투영 영상

에너지 생산, 저장 및 사용을 위한 시스템은 특정 기능을 갖춘 새로운 소재의 개발이 필요하다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 정교한 소재 디자인이 필요하며 동시에 적절한 진단 도구가 있어야 가능하다. 진단 도구는 소재 및 분자 상의 메커니즘을 조사하는 것이며, 구조를 정확하게 결정하고, 관련 길이 및 시간 척도에서 구조적 변화의 분석이 필요하다.

고에너지 X-선은 많은 과학 분야에서 중요한 측정 도구로, 주로 높은 침투 깊이 때문에 많이 사용된다. 이는 특히 특수한 샘플 환경 안에서의 in-situ 및 operando 연구에 매우 적합하다. 4GSR은 4 GeV의 고에너지 저장링에서 50 keV 이상의 고에너지 영역에서도 높은 밝기와 높은 플럭스를 제공하고, 방출량의 감소는 스펙트럼 밝기가 증가하여 짧은 측정시간을 제공한다.

(2) 빔라인의 활용

고에너지 현미경 빔라인은 다목적 방사광가속기 사업 취지에 맞추어 산업체 수요와 학술적 이용을 고려하여 활용한다. 현재의 commercial 한 고해상도 X-선 투영 영상 장치를 benchmark 하여 동일 또는 130 keV 이상 수준의 투과력과 수평 방향 200 mm의 대면적 영상을 획득하고, 방사광의 높은 광량을 이용하여 촬영 속도를 기존의 commercial 한 장치보다 100배 이상 개선하여 in-situ/operando imaging을 제공한다.

산업적으로는 국가 중점 육성 사업인 이차 전지, 연료전지 등 에너지 제품에 대한 operando testing을 제공하고 기계 장치의 내부 동작 mechanism에 대한 비파괴 영상 검사, 화장품의 피부 작용성에 관한 정량화 연구, 보철물의 생체 내 적응 연구를 수행한다.

학술적으로는 생체조직의 고해상도 삼차원 내부구조에 관한 해부학적 연구를 지원하고 실시간 관찰을 통한 유체 유동 현상과 같은 기초과학 연구를 수행한다. 기초과학 연구 수행을 위하여 대용량 삼차원 영상 데이터 처리를 위한 전산 기법 개발 및 고품질 결맞음 X-선을 사용해 X-선 광학계 특성 평가연구를 수행하고 10 μm 수준의 작은 광원을 바탕으로 굴절각도 분해능을 100배 향상하여 위상 대비 영상, 대면적 영상, 고해상도 영상을 제공한다.

고에너지 X-선 범위에서 밝기 증가는 X-선 현미경의 활용 가능성을 획기적으로 확장할 것이다. 고에너지 X-선 범위에서의 높은 밝기는 짧은 시간에 토모그래피를 가능하게 한다. 이 기술의 장점은 생물학적 물질에 고에너지 X-선(60~70 keV)을 조사할 때, 시료에 투사되는 양이 최소화되어 시료의 방사선 damage를 최소화할 수 있으며, 시료가 살아있는 생물이라면 생체 내부 변화를 동시에 관찰할 수 있음을 의미한다. 현재 및 미래 연구의 핵심은 산업적으로 관련 있는 조건에서 기능성 재료를 in-situ 및 operando로 관찰하는 것이다. X-선은 화학적 환경, 고온 및 고압, 극한 전자기장과 같은 통제된 환경에서 관찰을 가능하게 한다.

나. 빔라인 설계 목표 및 특징

(1) 빔라인 설계 목표

Light source	Bend Magnet
Photon energy	5 ~ 100 keV
Critical photon energy	21 keV
Source size (H x V)	11 × 9.9 μm
Beam size (H x V) @ sample	200 × 28 mm
Spatial resolution	0.3 ~ 0.5 μm

(2) 빔라인 특징

고에너지 현미경 빔라인은 설계 목표를 만족시키면서 빔 특성을 최대한 활용할 수 있도록 설계되었다. 실험구역에서 폭 200 mm 이상의 큰 빔을 제공하기 때문에 대형 시료의 수요가 많을 것이고, 활용 가능한 고에너지 영역이 증가함에 따라 배터리와 같은 금속 시료의 측정 비율도 증가할 것으로 예측된다. 또한, 동시에 다양한 환경변화(충·방전, 온도, 압력)에 의한 물질의 특성을 평가할 수 있도록 설계되었다.

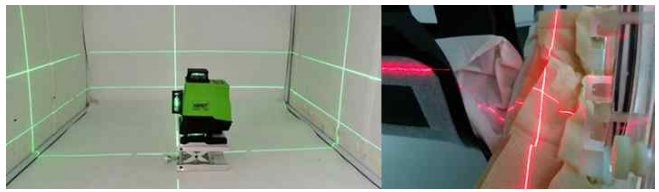
고에너지 현미경 빔라인은 Commercial 한 고해상도 X-선 투영 영상 장치 수준의 투과력 및 대면적 영상획득이 가능하다. 100 keV 이상 X-선 사용을 위해서는 백색광 사용해야 하고 광원의 critical energy가 높아야 한다. 대면적 영상획득을 위해서는 광원을 휨 자석 및 wiggler를 사용해야 하고 빔라인의 길이가 아주 긴 long beamline 이어야 한다. 휨 자석에서 만들어진 작은 광원은 long beamline에서 높은 결맞음 광원을 제공하는데 차세대 위상대비 영상의 가능성을 제시한다. 또한 대면적의 고해상도 영상 획득은 영상 생산성을 높게 하여 검사 시간을 단축하고 연구개발 시간을 단축할 수 있다.

휨 자석에서 발생되는 광원의 크기는 폭 11 μm, 높이 9.9 μm의 크기로 5~100 keV 범위에서 다색광을 생산하고, 샘플 위치에서 폭 200 mm, 높이 28 mm 크기의 빔을 제공한다. 200 mm 이상의 beam size는 크기가 큰 시료 측정을 가능하게 하고 동시에 Operando/in-situ 실험을 제공할 수 있다. 이 요건을 충족하면서 시료를 측정하기 위해서는 실험구역의 충분한 공간 및 고중량 스테이지가 필요하다. 샘플 스테이지는 지름 500 mm의 top plate를 가지는 고중량 air-bearing stage를 메인 샘플 스테이지로 활용하고 높이 방향으로 1 m 이상의 이동이 가능하도록 설계하였다.

휨 자석에서 발생된 넓은 백색광원은 높은 종횡대비 영상을 제공하고 동시에 5.0 μm pixel 수준의 높은 해상도 영상획득이 가능하다. 이러한 특징은 기존의 획득하던 10배 이상의 데이터를 한 번에 생산하여 제공함을 의미하며 big data 생성에 따라 빅데이터 파이프라인 개발 요구된다. Big data 생성 및 저장을 위하여 초고속 IT hardware 및 software가 요구된다.

0.5 micron 해상도 영상을 제공하기 위하여 고해상도 X-선 현미경을 설치 운영한다. 높은 분해능 영상을 위하여 DMM을 이용한 단색광을 활용하고 석정반 및 현미경 높이를 낮게 유지해 진동 최소화한다.

광학 및 실험허치는 외부 환경에 영향을 최소화하도록 설계하여 빔 안전성 극대화 및 측정 노이즈 최소화, 그리고 샘플 스테이션 (sample station) 및 검출시스템 안정화를 도모한다. X-선 현미경 빔라인은 매우 다양한 측정환경에 유연하게 대처해야 한다. 백색광 및 단색광 변경 시 시간과 노력 최소화해 생산적인 연구 활동에 종사할 수 있도록 단순하고 합리적인 장치 설계, 최대한 간결한 기기 구성이 필요하다. 현미경은 대면적 & 저해상도; 좁은면적/고해상도로 두 종류로 구성하고 샘플 스테이지 또한, heavy load; light load & precision rotation으로 두 종류의 Air-bearing stage로 구성한다. X-선 경로 추적 장치를 개발하여 시료의 정확하고 빠른 정렬을 수행한다.



<그림 2.2.9.3> Line laser를 이용한 정렬 예시

100 keV 이상의 고에너지 방사선은 높은 투과율을 가진다. 방사선 안전을 고려하여 높은 수준의 방사선 기준을 고려하고 빔라인을 운영한다. 방사선에 취약한 전기 전자 beamline component의 고장에 대비하여 설계를 수행한다. 100 m 이상의 길이를 가지는 빔라인에서 유일하게 광 경로를 변경하는 component인 DMM의 안전성을 확보를 위하여 실시간으로 측정 및 보정을 할 수 있는 빔 모니터링 시스템을 적용하고 DMM 단색광 사용 시 빔 위치보정 (feedback) 할 수 있도록 한다.

고에너지 현미경 빔라인은 광원으로부터 빔 stop까지 길이가 121 m로 저장링 건물에 포함될 수 없어 적합한 지반 공사 및 돌출된 실험 홀 건물이 필요하다. 롱빔라인이

위치하는 건물은 저장링 건축 단계에서 별도의 건물로 고려되어 설계되었고 출입 및 저장링동 이동에 대한 동선이 고려 되었다.

다. 빔라인 건설 일정

(1) 빔라인 건축 도면

- Raytracing 직후 빔라인 길이 및 필요 공간 확정: 2023년 8월
- 해외 long beamline 건설 사례 조사: 2023년 8월
- 저장링 건축 설계에 반영: 2023년 8월

(2) 도면 작업 및 전산 해석

- Components에 대한 layout: 2023년 8월
- Long beamline 건설에 따른 건축 관련 해외사례/국내 규정 조사: 2023년 8월
- 주요 components (slit, DMM, beam shutter, beam stop) 열 해석 및 상세 설계: 2023년 12월

(3) 방안팀 검토

- Layout 및 component가 나오는 대로 방안팀에 제출: 2024년 6월
- Long beamline 건설에 따른 건축 설계 방안팀 검토: 2023년 12월
- 고에너지 X-선 사용에 따른 허치 규격 방안팀 검토: 2023년 7월 중 의뢰 → 2023년 12월

(4) 발주

- 방안팀 검토 완료되는 대로 발주: beam shutter, beam stop, 허치 차폐 (2024년 중반 예정) → 2025년까지 모두 입고 및 전수 테스트 완료 → 2026년 조립
- Be window 대면적 발주: (lead time 2년 예상) 2024년 초 예정 → 2026년 입고 후 조립
- DMM manipulator 발주: 2024년 중반 설계 완료 및 발주 → 2025년 중반 입고 → 동작 테스트; 제어 소프트웨어 개발 → 2026년에 DMM 거울 mount → 2026년 하반기 빔라인 설치 → 진동 테스트

- DMM 거울 발주: (lead time 1.5년 예상) 2024년 초 발주 → 2025년 하반기 입고 → 검수를 위한 테스트 → 2026년 초에 DMM에 mount → 테스트
- 광학허치 및 실험허치: 발주 2025년 → 입고 및 설치: 2026년 상반기
- Heavy load/precision light load air-bearing stage들: 2024년 중반 설계 완료 및 발주 → 입고 2년 예상, 2026년 입고 → 설치 및 테스팅, 프로그래밍
- 대면적 현미경, 고해상도 현미경: 설계 2024년 하반기 완료 → 발주 2025년 → 입고 2026년 → 테스팅, 제어 프로그래밍

(5) 소프트웨어 준비

- Components 선정 및 발주 후 simulator에 물려 커미셔닝을 대비하여 소프트웨어 개발에 착수한다. 커미셔닝 기간이 충분하지 않기 때문에 설치와 동시에 테스트가 가능하도록 사전에 준비한다.
- 빔라인 제어 simulator 개발: 2025년 (소프트웨어 팀과 일정 의논 요망)
- Components 선정 및 발주 후 simulator에 물려 사용성 테스트: 2026년

(6) 입고 및 검수 (테스트)

- 입고 전 검수 단계에서 component들을 평가하여 요구되는 성능을 확인하고 입고한 제품들을 안전하게 보관한다.
- Slit, beam shutter, beam stop 등 component들에 대해 검수 방법 및 기간
- 사용 재료 확인, 진공에서 동작 테스트, 진공으로 보관, 보관 위치 선정
- DMM에 대한 검수 방법 및 기간
- DMM 거울에 대한 검수 방법 및 기간
- Heavy load/precision light load air-bearing stage들에 대한 검수 방법 및 기간
- 대면적 현미경, 고해상도 현미경에 대한 검수 방법 및 기간

(7) 설치

- 각 장치를 설치하면서 설계된 성능이 구현되었는지, 진동 및 온도에 의한 영향 등을 평가한다. (2026년 말까지 완료)

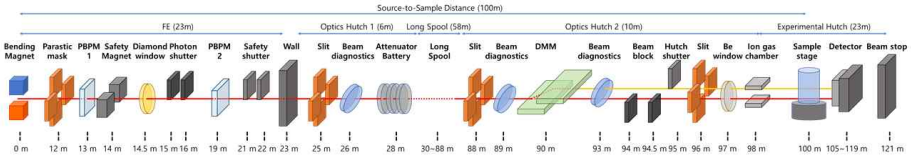
(8) 커미셔닝

- 개별 장치에서 빔이 설계 사양대로 제공되고 있는지 진단장치를 이용하여 확인하고, 최종적으로 시료 위치에서 표준 시료를 이용하여 측정이 올바로 되는지 평가한다.
- 빔라인 커미셔닝 위한 소프트웨어 개발 (BPM 신호 처리, beam intensity 측정, coherency 측정): beam diagnostics 장치 선정 후 소프트웨어 개발 착수 (2025년 예상)
- 2026년 빔라인 조립 후 소프트웨어에 대한 테스트 완료
- 2027년 2분기 커미셔닝 시작 → 4분기 커미셔닝 완료

라. 빔라인 배치도 (layout)와 광 경로 (ray-tracing)

○ 빔라인 배치도

고에너지 현미경 빔라인의 빔라인 배치도는 <그림 2.2.9.4>에 나타내었다. 광원은 휨 자석(bending magnet)을 사용한다. 휨 자석은 작은 광원 크기: 11 μm × 9.9 μm를 가지고 수평 방향으로 2 mrad opening 하여 사용한다. 광원으로부터 100 m 떨어진 샘플 위치에서의 빔 크기는 수평 방향 200 mm, 수직 방향 28 mm이고 빔라인 총 길이는 121 m이다. 빔라인은 프론트엔드 (23 m), 광학허치1 (6 m), 롱-스풀구간 (58 m), 광학허치2 (10 m), 실험허치 (23 m)로 구성되고 빔라인에 사용되는 component 들은 <표 2.2.9.3>에 나타내었다. 상세한 빔라인 구성은 다음 장에서 다룬다.



<그림 2.2.9.4> 고에너지 현미경 빔라인 배치도

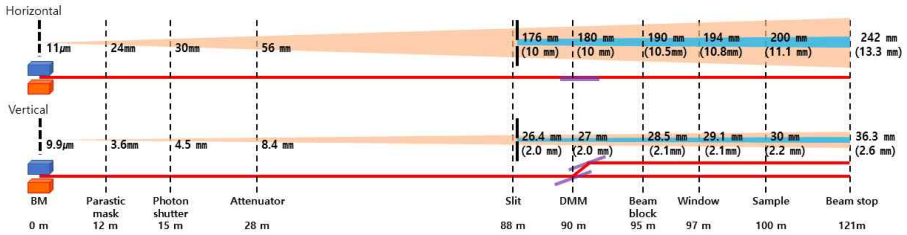
<표 2.2.9.3> 고에너지 현미경 빔라인 component

위치	거리 (m)	항목	용도
FE 11 ~ 23 m (0 ~ 23 m)	0	Bending magnet	광원 (2 T)
	12	Parastic Mask	Parasitic beam 제거
	12.5	Beam stopper	메인 빔 차단
	13	PBPM1	빔 profile 진단
	14	Safety Magnet	Electron 차단
	14.5	Diamond window	진공 차단
	15	Photon Shutter 1	메인 빔 & 진공 차단
	16	Photon Shutter 2	메인 빔 & 진공 차단
	19	PBPM2	빔 profile 진단
	21	Safety Shutter 1	메인 빔 진단 & 진공 사고 대응
	22	Safety Shutter 2	메인 빔 진단 & 진공 사고 대응
Wall (23 ~ 24.15 m)	23	Wall	FE Parasitic 빔 차단
Optical Hutch 1 24.15 ~ 30 m	25	Slit	Beam size defining and heat absorption
	26	On-line Diagnostics	빔 profile 진단
	28	Filter Array	빔 필터링
Long spool 30 ~ 88 m	30	Long spool	빔 전송
Optical Hutch 2 88 ~ 98 m	88	Slit	DMM Beam size defining
	89	On-line Diagnostics	빔 profile 진단
	90	DMM	빔 단색화 Ru/C (5~20 keV) 빔 단색화 W/B4C (20~40 keV)
	93	On-line Diagnostics	빔 profile 진단
	94	White Beam Block 1	단색빔 모드에서 화이트빔 제거
	94.5	White Beam Block 2	단색빔 모드에서 화이트빔 제거
	95	Hutch Shutter	실험 장치 연동
	96	Exit slit	Final Beam size defining
	97	Exit window	UHV 진공 분리 (크기 > 200 mm)
	98	Ion gas chamber	단색화 빔 진단
Exp. Hutch 98 ~ 121 m	100	Heavy Load Air-Bearing Stage	고중량 샘플 스테이지
	102	Light Load Air-Bearing Stage	고정밀 샘플 스테이지
	105	Detector station	검출기 이동 테이션
	105	High magnification X-ray microscope	고배율 현미경
	105	Medium magnification X-ray microscope	중간 배율 현미경
	105	Low magnification lX-ray microscope	저배율, 대면적 현미경
	104~119	A rail system	검출기 (석정반) 이동 시스템
	121	Beam Stop	빔 덤프를 위한 장치

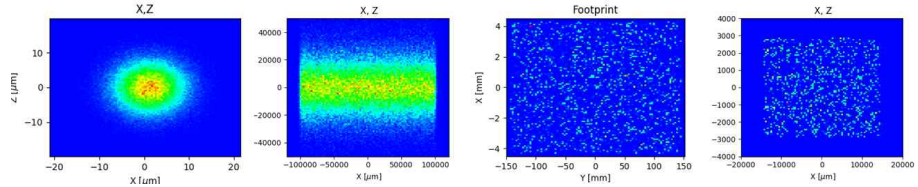
에너지 현미경 빔라인은 40 keV 이상의 백색광 모드와 5~40 keV 사이의 단색광 모드를 이용하여 빔라인 에너지 영역을 구분한다. 빔라인에 사용되는 component들의 위치별 빔 크기는 OASYS를 이용하여 <그림 2.2.9.5>와 같이 계산되었다. 빔라인 component들은 백생광 모드로 계산된 크기보다 크게 마진을 두어 설계되어야 한다.

고에너지 현미경 빔라인의 샘플 위치에서 빔사이즈는 백색광의 경우 폭 200 mm 높이 최대 28 mm 단색광의 경우 폭 27 mm 높이 5 mm이고 <그림 2.2.9.6>에 나타내었다. 백색광 모드 운용은 Filter array에서 low energy를 cut-off 한 40 keV 이상의 넓은 (폭 200 mm, 높이 10 mm in FWHM) 빔 크기의 백색광 X-선을 제공한다. 빔제어는 FE에 위치한 shutter로 빔을 on/off 한다. 단색광 모드는 고해상도, 고감도 X-선 영상획득을 위하여 5~40 keV 사이의 단색광 X-선을 제공한다. 단색광 X-선은 FE에 위치한 slit으로 빔을 폭 방향으로 자른 후 DMM을 이용하여 생산한다. 단색광 모드 사용 시, FE에 위치한 shutter는 항상 열어 두고서 optical hutch의 shutter를 사용해 빔 on/off 하여 DMM의 열 안정성을 유지한다.

DMM은 horizontal reflection이 아니라, 일반적인 vertical reflection을 사용한다. 수평 방향의 DMM은 stripe pattern이 수평으로 나와서 ring artifact 영향을 덜 받고, 수평 방향 빔 크기도 크게 사용할 수 있다. 하지만 DMM이 굉장히 안정해야 하기 때문에 이를 위한 메커니즘 고안이 필요하다. DMM으로부터 샘플까지의 거리가 멀기 때문에 stripe가 blur 될 가능성이 있다. 이것을 가정하고 향후에 구조적 안전성이 높은 horizontal reflection으로 DMM을 개조하는 것을 고려할 수 있다.



<그림 2.2.9.5> 백색광 및 단색광 모드 광학계의 배치 및 광 경로 예측 결과



<그림 2.2.9.6> 백색광 및 단색광 모드 빔 사이즈 예측 결과

마. 광원

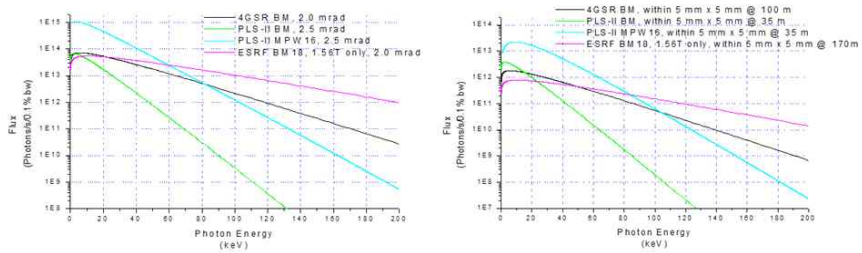
광원은 생성되는 빛의 크기가 작은 휨 자석을 사용한다. 휨 자석을 이용하여 생성되는 광원의 Critical energy in keV는 0.656*(electron energy in GeV)^2*(magnetic field strength in T)로 계산되는데, 이미 normal conducting magnet의 최고 magnetic field strength인 2 T를 사용하기 때문에 max critical energy인 21 keV이다. 휨 자석은 Wiggler 보다는 flux가 낮겠으나, 본 빔라인은 commercial X-선 투영 영상 장치와 benchmark하고 있기 때문에, 휨 자석으로도 본 빔라인의 목적은 달성이 가능하다. 또한, 휨 자석의 사용은 추후에 super-conducting bend magnet으로 성능향상이 가능하다.

휨 자석은 폭이 넓은 빔을 생산할 수 있어 대형 샘플의 영상화가 가능하다. 휨 자석의 clearance는 수평 방향 ±1.5 mrad, 수직 방향 ±0.3 mrad 이고 여기서 수평 방향으로 2 mrad을 인출하고자 한다. 이 경우 광원의 크기는 수평 11 μm, 수평 10 μm의 semi-isotropic source를 만들 수 있다. 이렇게 되면 수평 및 수직 방향으로 동일한 수준의 coherence를 기대할 수 있으며, 이로 인해 phase contrast effect 또한 isotropic하다는 이점이 있다. 휨 자석의 total power는 1.36 kW이나, 수평 2 mrad으로 인출하는 방사광의 power는 433 W 수준이다.

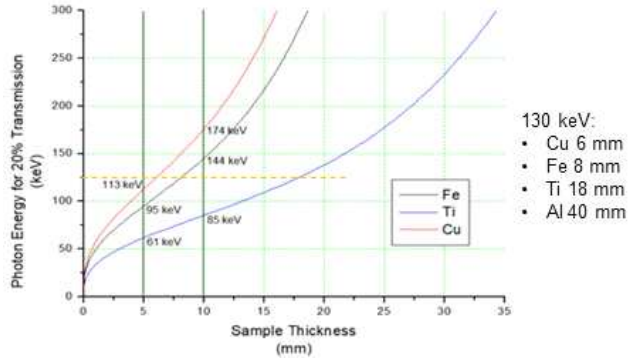
<표 2.2.9.4> 고에너지 현미경 빔라인 광원 특성

Ring Energy	4 GeV
Ring Current	400 mA
Natural Emittance	62 pm·rad
Coupling	0.1
Source Type	Bend Magnet (BM)
Magnetic Field	2 T
Magnetic Radius	6.67 m
Total power	1.36 kW
Critical Energy	21 keV
Electron source size (σ_x,σ_y)	4.6 μm, 4.4 μm
Electron source divergence (σ'_x,σ'_y)	12 μrad , 1.3 μrad
Photon source size in FWHM (Horizontal, Vertical)	11 μm, 9.9 μm
Photon source divergence in FWHM (Horizontal, Vertical)	2 mrad (433 W) 0.3 mrad @ 10 keV

PLS-II에는 MPW16을 광원으로하는 6C 빔라인과 휨 자석을 광원으로 하는 9D 빔라인이 X-선 투영 영상에 활용되고 있다. 아래에 그림에 광원의 flux 및 시료위치(100 m)에서의 flux를 비교하여 <그림 2.2.9.7>에 나타내었다. 9D 빔라인에서 60 keV를 사용할 수 있는데, 샘플 위치에서 동일한 flux를 4GSR 빔라인에서는 130 keV에서 얻을 수 있다. 130 keV 에너지 영역의 X-선은 Cu 6 mm, Fe 8 mm, Ti 18 mm, Al 40 mm에 대해 20% 투과가 가능하여 X-선 투영 영상을 잘 획득할 수 있으며 <그림 2.2.9.8>에 나타내었다. 60 keV 이상 백색광 사용에서 9D 빔라인 대비 20배 이상 밝고 단색광을 사용하는 영상(10~40 keV)의 밝기는 6C 빔라인의 1/10 수준이다.

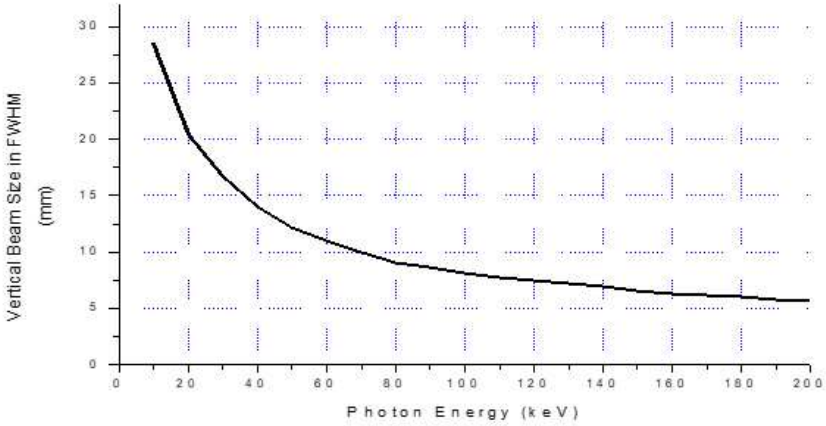


<그림 2.2.9.7> 4GSR, PLS-II, ESRF-EBS 광량 특성



<그림 2.2.9.8> 130 keV 에너지 영역에서의 4GSR 광원 투과 특성

광원으로부터 100 m인, 시료 위치에서의 빔 크기를 <그림 2.2.9.9>에 나타내었다. 수평 방향으로는 200 mm이다. 수직 방향으로는 빔 크기가 광자에너지가 높아짐에 따라 줄어드는데, 20 keV에서 20 mm (FWHM), 70 keV에서 10 mm, 140 keV에서 7 mm이고 그 이상 광자에너지에서는 asymptotic 하게 5 mm이다.



<그림 2.2.9.9> 광자에너지에 따른 고에너지 현미경 빔라인 시료 위치에서의 빔 크기

바. 프론트엔드

프론트엔드는 광원으로부터 radiation shielding wall까지의 구간으로, radiation을 많이 견뎌야 하는 component들을 위치시키기에 적합하고 본 빔라인의 경우 길이가 23 m이며 구성요소는 아래 <표 2.2.9.5>에 나타내었다.

<표 2.2.9.5> 프론트엔드 component

거리 (m)	항목	용도
0	Bending magnet	광원 (2 T)
12	Parasitic Mask	Parasitic beam 제거
12.5	Beam stopper	메인 빔 차단
13	PBPM1	빔 profile 진단
14	Safety Magnet	Electron 차단
14.5	Diamond window	진공 차단
15	Photon Shutter 1	메인 빔 & 진공 차단
16	Photon Shutter 2	메인 빔 & 진공 차단
19	PBPM2	빔 profile 진단
21	Safety Shutter 1	메인 빔 진단 & 진공 사고 대응
22	Safety Shutter 2	메인 빔 진단 & 진공 사고 대응

Upstream쪽(광원쪽)은 storage ring에 인접해 있어서 component들을 위치할 공간이 충분치 않다. 가장 첫 번째 component는 fixed mask로 광원으로부터 12 m 위치하고 수평 방향 2 mrad만 인출한다.

Photon beam position monitor (PBPM)는 각각 쌍으로 설치하며 실시간 빔 위치 monitoring 하기 위해 사용된다. PBPM의 원리는 빔의 네 구석 지점에서 광전류를 읽어서 그 비율을 계산해 빔 위치의 변동을 검출한다. PBPM 두 개를 최대한 멀리 떨어뜨려 각각 위치하고 이 두 PBPM에서 읽은 위치값들의 변동을 monitoring 해서 실시간 빔의 방향 변화도 검출할 수 있고, Fixed mask에서 인출한 빔에 대해 빔을 모니터링한다. Upstream의 PBPM은 photon shutter 앞단에 있으므로, 빔이 나오는 한 항상 작동하고 Downstream의 PBPM은 photon shutter downstream에 있으므로, photon shutter를 열었을 때만 작동한다.

Shutter들은 PBPM pair 사이 공간에 위치한다. Photon shutter는 pair로 구성한다. 동일한 photon shutter를 두 개 연달아 위치하여 평소에는 하나만 쓰고, 나머지는 spare이다. 사용하던 photon shutter가 고장이 나면, spare를 사용해 여닫는다. 이러한 fail-safe mechanism이 필요한 이유는, 본 빔라인은 white-beam을 사용하기 때문에 photon shutter를 빈번하게 여닫는데, photon shutter는 lifetime이 있다. 고장 발생 시 FE 접근이 안 되기 때문에 빔라인 운영을 고려하여 spare를 둔다. Safety shutter도 pair로 구성한다. 앞서와 마찬가지로 동일한 safety shutter를 두 개 연달아 위치하고, 하나는 spare로 사용한다.

Vacuum window는 그 upstream과 downstream의 진공을 구분해 downstream의 진공 사고가 upstream으로 전파되지 못하게 막는 역할을 한다. Slit 뒤에 vacuum window를 둘 경우, upstream의 component는 fixed mask, PBPM, shutter밖에 없는데, 이들 component들은 PLS-II에서 vacuum safe 하게 잘 운용해 오고 있으며 진공 사고가 날 확률이 거의 없다. 따라서, 빔라인의 아래단에 위치한 모든 component들의 진공 사고를 cover 할 수 있는 위치이다. 또한, photon shutter 뒷단이기 때문에, 빔을 사용하지 않는 경우에 불필요한 radiation 노출도 막을 수 있다. Vacuum window는 Polished pf6/If1 beryllium window를 사용해 beam coherence를 보존하고자 한다. Polished CVD-diamond window는 surface roughness가 더 좋다고는 하나, 크게 만드는데 제약이 있다 (이 위치에서 beam 크기가 > 40 mm in FWHM).

Off-line diagnostics는 빔을 일부 또는 전부 가려서, 진단 중에는 이용자 실험이 제한을 받는 진단장치이다. Off-line beam diagnostics는 빔이 FE를 빠져나가기 전의 빔을 진단하고, PBPM의 calibration, FE의 기계적 component인 shutter류와 primary slit의 동작을 테스트, 형광 스크린에서 빔 위치 및 형태 진단, Scanning wire monitor의 beam profile 측정에 활용된다.

사. 광학허치

프론트엔드와 달리 광학허치는 storage ring 운전 중에도 출입이 가능하다. 단, 프론트엔드의 photon shutter와 safety shutter가 닫혀있어야 한다. 점검 및 유지보수가 빈번한 component 및 field-test가 필요한 component를 위치시키는데 광학허치가 적격이다.

광학허치에 사용되는 component를 아래 <표 2.2.9.6>에 나타내었다.

<표 2.2.9.6> 광학허치 component

거리(m)	항목	용도
25	Slit	Beam size defining and heat absorption
26	On-line Diagnostics	빔 profile 진단
28	Filter Array	빔 필터링
30	DMM	빔 단색화
88	Slit	DMM Beam size defining
89	On-line Diagnostics	빔 profile 진단
90	DMM	빔 단색화 Ru/C (5~20 keV) 빔 단색화 W/B4C (20~40 keV)
93	On-line Diagnostics	빔 profile 진단
94	White Beam Block 1	단색빔 모드에서 화이트빔 제거
94.5	White Beam Block 2	단색빔 모드에서 화이트빔 제거
95	Hutch Shutter	실험 장치 연동
96	Exit slit	Final Beam size defining
97	Exit window	UHV 진공 분리 (크기 > 200 mm)
98	Ion gas chamber	단색화 빔 진단

Four-blade slit(primary slit)은 Beam size를 조절하기 위해 사용한다. Slit은 열부하를 줄이기 위해 빔 방향에 대해 경사지게 만들 수도 있으나, 본 빔라인은 scattering이 더 적은 빔에 수직 방향의 blade를 선호한다. 각각의 blade가 433 W beam을 막을 수 있도록 설계할 수 있으면 빔라인 운용이 매우 편리할 것이다. 그렇지 않으면, 하나의 blade가 움직일 수 있는 travel range가 빔 센터를 포함하지 않도록 신경을 써야 한다. 하나의 blade가 빔을 완전히 막을 수 있으려면 수평 방향 blade는 50 mm가량을 이동할 수 있어야 한다. (수평 방향 빔 크기 + safety margin) 수직 방향 blade는 그보다는 이동 거리가 짧다. 수평 방향 blade와 동일한 제품으로 제작해서 90° 돌려서 사용한다.

Filter array는 이 빔라인의 주 광학장치로 Filter(X-선 흡수물질)들을 actuator 팔 끝에 달아서 빔 위치에 가져다 놓거나 뺀다. 이 과정을 통하여 백색광 spectrum을 조정할 수 있는데, 주로 낮은 에너지 광자들을 cut-off 한다. 주요 filter 물질로는 고사양의 molybdenum, copper, fused silica가 효과적인데, mirror polishing을 해서 사용한다. 백색광 X-선 조사에 따른 열손상을 막기 위한 cooling 설계가 필수적이며 각 filter의 두께, 크기, cooling scheme을 설계할 때 thermal analysis를 반드시 거쳐야 한다. 설치 후, 첫 사용 시에 대량의 out-gassing이 예상되므로, 이에 대비한 commissioning 계획이 필요하다. 또한, 실제 빔라인 운용 시 주기적으로 filter를 점검해서 손상 여부를 확인이 필요하며, 챔버 내부의 filter를 쉽게 점검 및 필요시 교체가 가능하도록 장치를 설계해야 한다.

88 m에 위치한 두 번째 광학허치는 실험을 수행하기 전 빔을 최종 조절하는 공간으로 Slit, DMM, On-line Diagnostics, exit slit, Shutter, exit window로 구성된다. Diagnostics는 샘플 스테이지(100 m)까지 빔을 정렬하기 위한 장치로 특히 단색광 모드에서 빔 경로를 안정적으로 유지하기 위해 사용된다. exit Four-blade slit은 100 m 전송 과정 중 산란 된 빔을 최종 정의하기 위해 사용한다. exit window는 진공 파이프로 이어지는 빔라인과 실험구역(상압)을 구분하기 위하여 사용된다. sample stage (100 m)에서의 빔 크기는 폭 200 mm, 높이 28 mm로 크기 때문에 exit window의 크기는 빔 크기를 충분히 포함하도록 설계되어야 하고 진공 압력 차이 또한 고려되어야 한다.

Double Multilayer Monochromator (DMM)은 5~40 keV 영역에서 빔 단색화를 위하여 사용한다. 40 keV 이상은 백색광을 사용한다. 40 keV 이상은 단색화를 위해

거울 길이가 길어져 설계가 어렵고, 챔버도 커지므로 설치 비용도 상승과 설치 운용도 어렵다. Multilayer는 bandwidth가 bare silicon에 비해 100배이므로, 높은 flux를 얻을 수 있고, high photon energy rejection이 된다. 따라서, 본 빔라인 광원처럼 넓은 spectrum 및 고에너지 X-선이 생산되는 광원에서 사용하기에 DMM이 적합하다. DMM을 이용한 5~40 keV 영역대의 X-선 투영 영상은 매우 활발하게 사용된다. 단색광을 사용하면 high NA optics를 사용하는 현미경 대물렌즈의 손상을 줄일 수 있고, 고해상도 X-선 영상획득을 위해서는 DMM을 사용한다. DMM은 Water cooling에 의해 냉각되며 진동에 주의한 설계가 요구된다. 이에 따라 radiation에 의해 hose가 경화 및 leak 되는 일이 없도록 설계되어야 한다. DMM은 빔라인 길이가 길기 때문에 DMM이 조금 움직여도 샘플 위치에서 많이 움직이기 때문에 극강의 안정성이 요구된다. DMM 설계에는 석정반을 사용하고 광학허치의 온도를 일정하게 유지해야 한다. DMM 방향은 빔 안정성 때문에 수평 방향으로 reflection하는 monochromator를 고려했으나 빔 크기의 제약, 수직 방향 ring artifact이 예상되어 수직 방향 reflection으로 채택하였다. 수직 방향 reflection 하는 디자인을 채택하면 안정성에 신경써서 아래와 같은 사항을 고려하여 디자인하고 테스트를 꼼꼼하게 진행해야 한다. DMM은 빔 효율을 높이기 위하여 두 개의 영역으로 나누었고 10~40 keV에서 최적화하여 설계하여 아래 <표 2.2.9.7>과 같이 구성하였다.

DMM 위치에서 10.0 × 2.0 mm보다 큰 beam이 입사하면 mirror보다 큰 beam이 입사하므로 안전 대책이 필요하다. DMM mode 모드 변환 시 movable mask에서 beam size가 정확히 정의되어야 한다. DMM은 2 stripes으로 구성하여 20 keV 이하는 Ru/C, 20~40 keV 범위는 W/B4C를 이용하여 운용한다. 빔의 단색화 과정은 DMM의 입사각을 변경이 필수로 동반되고 100 m 이상의 빔 경로 정렬이 필요하다. 이 과정은 빔라인 관리자의 많은 시간과 노력을 동반하기 때문에 빔라인 운용 측면을 고려하여 DMM 빔 입사 각도는 변경하지 않고 DMM 종류를 변경하여 두 가지 에너지를 사용할 수 있도록 한다. (예: Incident Angle : 0.4439°일 때, 10 keV & 20 keV, 0.5919°일 때, 15 keV & 30 keV, 0.6831°일 때, 20 keV & 40 keV)

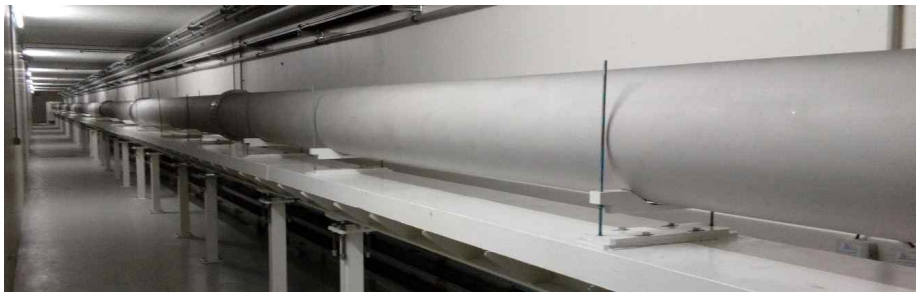
<표 2.2.9.7> DMM 광학장치 특성

	DMM (Ru/C)	DMM (W/B4C)
광원으로부터 거리 (m)	30	30
Incident Angle (degree)	1.7762° ~ 0.8880°	0.4439° ~ 0.8880°
Shape	Plane	Plane
Radius (m)	-	-
Surface Normal direction	Horizontal Hall	Horizontal Hall
Substrate	Si	Si
Coating Material (Thickness)	$[Ru/C]^{100}$ Ru, 4 nm	$[W/B_4C]^{200}$ W, 2 nm
Beam size @ DMM (30 m) (H × V, mm × mm, FWHM)	10.0 mm × 2.0 mm @ 20 keV	10.0 mm × 2.0 mm @ 40 keV
Footprint (H × V, mm × mm, FWHM)	9.9 mm × 252.2 mm @ 20 keV	9.9 mm × 252.2 mm @ 40 keV
Substrate size (H × V, mm × mm)	30.0 mm × 300.0 mm	30.0 mm × 300.0 mm
Beam size @ sample position (H × V, mm × mm, FWHM)	11.1 mm × 2.2 mm @ 20 keV	11.1 mm × 2.2 mm @ 40 keV
Focus distance (mm)	Inf	Inf
Roughness σ (nm)	< 1 Å rms	< 1 Å rms
Slope error (μrad, RMS)	< 1.5 μrad rms	< 1.5 μrad rms

DMM의 mirror 이송 조건은 다음과 같다. 첫 번째, white beam을 bypass 할 수 있도록 첫 번째 mirror와 두 번째 mirror를 수직 방향으로 이송할 수 있어야 한다. 두 번째, Bragg angle이 작으므로, 두 번째 mirror를 longitudinal 방향으로 이송할 수 있어야 한다. 세 번째, 첫 번째 mirror와 두 번째 mirror 각각에 대해 pitch와 roll 각각 제어할 수 있어야 한다. 네 번째, 상기의 multi-axes control을 만족하면서 안정성이 요구된다. Mirror의 길이가 길어지면 결정 홀더에 thermal contact 및 중력에 의한 변형도 고려해야 하고 특히, 공중에 매달리는 두 번째 결정에서 중요하다.

아. 롱-스풀 (long spool)

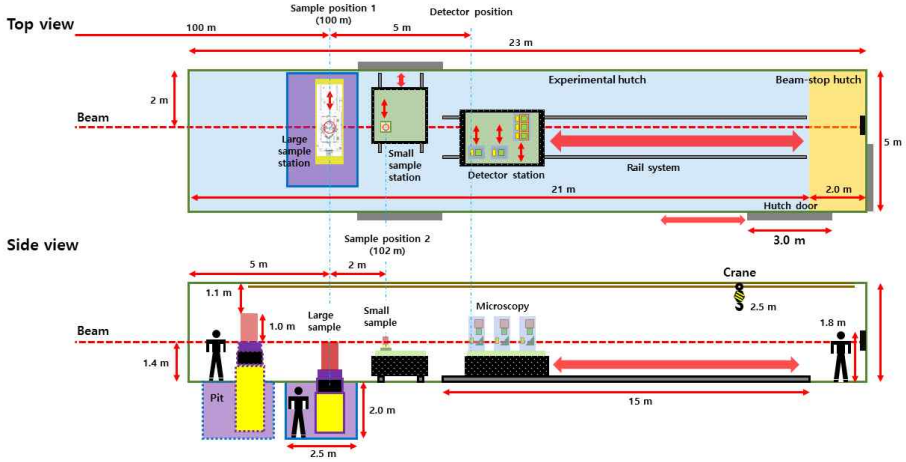
롱-스풀은 광원을 광학허치로부터 실험허치까지 안전하게 전송하기 위해 사용된다. X-선을 손실 없이 전송하기 위하여 롱-스풀 구간은 UHV 진공도가 요구되며 광원으로 휨 자석을 사용하기 때문에 빔 크기가 경로에 따라 증가하는 것을 고려해야 한다. 고에너지 현미경 빔라인은 투과력이 높은 100 keV 이상의 고에너지를 사용하기 때문에 방사선 안전을 고려하여 아래 <그림 2.2.9.10>과 같이 건설하고자 한다.



<그림 2.2.9.10> 롱-스풀 구간 예 (ESRF-EBS BM18 빔라인 롱-스풀 구간)

자. 실험허치

고에너지 현미경 빔라인의 실험허치는 아래 <그림 2.2.9.11>과 같이 디자인하였다. 실험허치는 최종적으로 실험이 수행되는 공간으로 각종 실험기구들이 유기적으로 동작할 수 있어야 하고 출입이 빈번히 일어나는 장소인 만큼 방사선 안전관리가 중요하다. 고에너지 현미경 빔라인의 실험허치는 광학허치 역할을 하는 프리-실험허치, 실험 수행을 위한 실험허치, 빔 제거를 위한 빔-스탑 허치로 구분되고 구성요소는 <표 2.2.9.8>에 나타내었다.



<그림 2.2.9.11> 고에너지 현미경 빔라인 실험허치 구성안

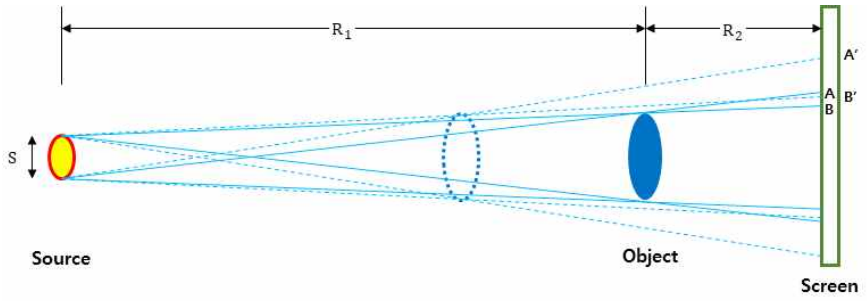
<표 2.2.9.8> 실험허치 component

위치	거리 (m)	항목	용도
Exp. Hutch 95 ~ 121 m	100	Heavy Load Air-Bearing Stage	고중량 샘플 스테이지
	102	Light Load Air-Bearing Stage	고정밀 샘플 스테이지
	105	Detector station	검출기 이동 테이션
	105	High magnification X-ray microscope	고배율 현미경
	105	Medium magnification X-ray microscope	중간 배율 현미경
	105	Low magnification lX-ray microscope	저배율 , 대면적 현미경
	104~119	A rail system	검출기 (석정반) 이동 시스템
	121	Beam Stop	빔 덤프를 위한 장치

고에너지 현미경 빔라인의 샘플 스테이션 디자인은 최초 기술검토위원회와 파라미터 관리위원회를 통한 주요 사양을 만족한 설계가 필요하다. 제시된 주요 사양은 다음과 같다. 광원은 Center bend를 이용하여 5~100 keV 에너지 범위의 X-선을 생성한다. 시료위치 (100 m)에서 Field of view: (H×V) 200 mm × 28 mm의 빔을 획득한다. 100 m 위치에서 공간 분해능 0.3~0.5 μm를 구현한다. 고에너지 현미경 빔라인의 주요 사양은 기존의 작고 얇은 시료에서 크고 두꺼운 시료의 측정을 의미한다. 샘플 스테이션은 설치되면 확장이 어려우므로 산업 현장의 연구 개발품 및 시제품 측정

그리고 현장에서 사용되는 인장기 같은 시험 장비를 이용한 검사에 대한 수요를 예측하고 설계되어야 한다.

투과 영상획득을 위하여 검출기 위치를 결정할 때, 흡수 대비(absorption contrast)와 위상 대비(phase contrast)를 고려하여야 한다. <그림 2.2.9.12>을 참고하면 시료를 투과한 광원은 시료의 가장자리 영역에서 penumbral blurring (source-size blurring)으로 인하여 스크린에 맺힌 상의 가장자리가 부드러워지는 효과를 나타낸다. 이 효과는 시료 경계에서의 흡수 대비 차이를 모호하게 하고 시료와 검출기의 거리 R_2가 증가함에 따라 강하게 나타난다. 블러링 효과를 줄이기 위하여 R_2 거리를 감소시키거나 소스 크기 S를 줄이는 방법이 있다. 블러링 효과는 FWHM의 가우스 점확산함수 (point spread function, PSF) smearing를 통하여 다음과 같이 계산된다. 블러링 효과는 $B = SR_1/R_2$ 이고 여기서 S는 광원의 크기, R_1은 광원과 시료 사이의 거리, R_2는 시료와 검출기 (screen) 사이 거리이다.



<그림 2.2.9.12> 광원 크기 및 검출기 위치 변화에 의한 블러링 효과

X-선은 물체를 잘 투과하기 때문에 시료 내부에서 굴절에 의한 광 경로 변화를 고려해야 한다. 시료를 투과한 X-선은 광 경로 변화에 의해 경계가 뚜렷해지는 phase contrast 효과도 동시에 관찰된다. 이 효과는 R_2가 증가함에 따라 강하게 나타나지만, 기존의 의료용 X-선 광원과 같이 광원의 크기가 큰 경우 위상차를 관찰할 수 없다. 굴절에 의해 변경되는 일반적인 X-선의 굴절 각도(refraction angle)는 $\theta = 10^{-5} \sim 10^{-4}$rad이고, 굴절된 X-선은 $d \approx R_2\theta$ 만큼 이동한다. 이 굴절 효과는 R_2가 충분히 커야하는데 앞서 언급한 source-size blurring으로 인하여 효과가 사라진다. 하지만 소스 크기가 20 μm 이하로 작아진다면 위상차 효과를 충분히 얻을 수 있다.

고에너지 현미경 빔라인의 설계값(S: 10 μm, R1: 100 μm)과 시료와 검출기 거리 5 m 일 때, 추정값을 계산하면 블러링 효과는 B는 0.5 μm이고 굴절에 의한 경로 변화 d는 50 μm이다. 굴절에 의한 경로 변화가 블러링 효과보다 100배 정도의 큰 값을 갖기 때문에 위상차를 관찰할 수 있을 것으로 예측된다.

고에너지 현미경 빔라인은 X-선 투영 영상을 획득하고, 이를 재구성하여 단층 영상을 획득하는 빔라인이므로 샘플 스테이지는 CT 영상획득을 위한 획득을 위하여 샘플 스테이션이 구축되어야 한다. CT 영상은 샘플을 회전하며 획득한 투영 영상을 이용하기 때문에 1개의 rotation stage, 시료의 회전축 정렬을 위한 2개의 swivel stage와 1개의 linear stage가 필요하다. 그리고 시료의 위치 이동을 위한 2개의 swivel stage와 3개의 linear stage가 필요하다. 이 스테이지들은 영상의 해상도를 보장하기 위하여 빔라인 설계 공간 분해능보다 낮은 정밀도를 가져야 한다. 이와 동시에 큰 시료 측정에 용이하도록 충분한 이송 거리를 가져야 하고 및 각 stage는 시료 및 적층되는 stage의 무게를 감당해야 한다.

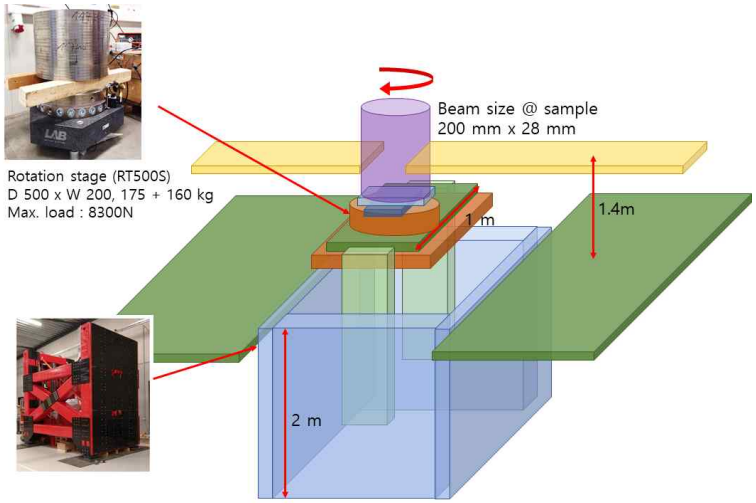
고에너지 현미경 빔라인의 샘플 스테이션은 100 kg 이상의 시료를 1.0 m 이상 수직 방향으로 이송 가능한 고중량 샘플 스테이션과 10 kg 이하의 작은 시료에 대하여 고정밀로 이동 가능한 저중량 고정밀 샘플 스테이션으로 구성한다. 고중량 샘플 스테이션은 폭 200 mm 빔을 활용할 수 있도록 큰 시료 측정에 활용하고, 저중량 고정밀 스테이션은 고분해능의 영상획득에 활용한다.

고에너지 CT 영상 측정을 위한 고중량 샘플 스테이션 각 스테이지의 사양은 다음과 같다. 고에너지 CT 영상은 0.3~5 μm의 voxel image를 제공하고 두께 2 mm 정도의 섬광 결정과 NA값이 낮은 줌렌즈 사용이 전제되어 image의 voxel 크기보다 3배 정도 낮은 해상도의 영상이 획득될 것으로 예측된다. 여기서 획득하고자 하는 최소 voxel 크기는 0.3~0.5 μm이고 예측되는 해상도는 1 μm 정도이므로, 각 스테이지들의 정밀도는 ±1 μm면 충분하다. Rotation stage 상단에 위치한 horizontal stage의 이송 거리(travel range)는 빔크기의 1.5 배인 300 mm이고, 모션 정밀도는 ±1 μm이다. Swivel stage의 정밀도는 5 μm (pixel size) / 200 mm (beam size) = 25 μrad (=0.0014°)으로 구현 가능한 사양을 넘어서므로 제외한다. 고중량물의 정밀제어가 가능한 Hexapod도 있지만, 장점과 단점, 비용을 고려하여 선택한다. Rotation stage 하단에 위치한 horizontal stage의 이송 거리는 샘플 크기를 고려하여 500~1,000 mm이고 모션 정밀도는 ±1 μm이다. Vertical stage는 1 m 이상의 이송 거리로 가능한

크게 설계하고 정밀도는 10 μm으로 {10 μm (요구 정밀도) / 1,000 mm (travel range of horizontal stage) = 10 μrad} vertical stage의 복수의 모션을 제어하여 정밀한 swivel stage 기능을 하도록 한다.

CT 영상획득을 위한 rotation stage의 사양은 다음과 같다. CT 영상획득을 위한 투영영상 수는 검출기의 픽셀 수와 연관되며 비손실 CT 장수는 51,200 × 1.7 = 87,040장이다. rotation stage가 180° 회전하는 동안 87,040장의 투영 영상이 필요하므로 180° / 87.040 = 0.002068° = 7.44 arcsec이다. Rotation stage의 요구되는 angular accuracy는 7.44 arcsec 이하이다. 여기서 20%만 촬영한다고 하면 20,000장의 투영 영상이 필요하다. 필요한 최소 각도를 계산하면 180° / 20,000 = 0.009° = 32.4 arcsec 이다. 20%만 촬영하는 경우, rotation stage의 angular accuracy는 32.4 arcsec 이하이다.

고에너지 현미경 빔라인의 샘플 스테이션은 빔라인 설계 목표와 상기 기술된 조건을 만족할 수 있도록 <그림 2.2.9.13>과 같이 설계하고자 한다. 고중량 샘플 스테이션의 높이를 결정하는 vertical stage는 ESRF BM18과 동일하게 외각 철골 구조에 내부에서 거더를 통하여 이동하도록 한다. vertical stage의 사양은 1,000 kg 이상의 고중량물을 10 μm 이하의 정확도로 1.0 m 이상 이동할 수 있어야 하고 고중량 물을 안전하게 설치 및 운용 가능하도록 바닥 면과 일치되도록 한다.



<그림 2.2.9.13> 고에너지 현미경 빔라인 고중량 샘플 스테이션 구성안

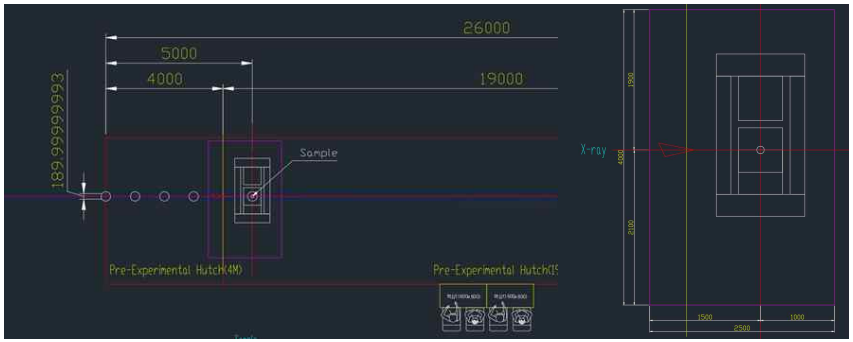
저중량 고정밀 샘플 스테이션은 가벼운 시료의 정밀 측정을 위하여 디자인하고 상용 제품으로 사용 가능한 각 stage의 세부 사양은 <표 2.2.9.9>로 나타내었다.

<표 2.2.9.9> 고에너지 현미경 빔라인 저중량 고정밀 샘플 스테이션 세부 사양

Device	Dimension (L x W x H)	Weight	Stroke (X, Y, Z, θX, θY, θZ)	Repeatability (X, Y, Z, θX, θY, θZ)	Load Capacity
Swivel Stage (SA10A-R2S01; KOHZU)	221 × 221 × 85	4 kg	±4°, ±4°	±0.001°, ±0.001°	8 kg
Linear stage (SYA0775-R02; KOHZU)	235 × 235 × 60	2.2 kg	±37.5 mm, ±37.5 mm	±0.3 μm, ±0.3 μm	19 kg
Rotation Stage (RT150S; lab motion system)	174 × 160 × 60	4 kg	max. speed : 200 rpm	angular accuracy : ± 6.9 arcsec	axial load : 434 N radial load : 226 N (50 mm)
Swivel Stage (SA16A-RS01; KOHZU)	321 × 321 × 110	11.7 kg	±10°, ±10°	±0.001°, ±0.001°	14 kg
Vertical Stage (ZA16A-32F01; KOHZU)	247 × 180 × 200	14.5 kg	±25 mm	±0.3 μm	50 kg
Linear stage (LS270 ; PI)	1500 × 300 × 150	50 kg	±500 mm	±0.2 μm	150 kg

<표 2.2.9.9>에 기술된 장치 사양에 의하면 반복 재현성 최대 ±0.3 μm이다. 대면적 저배율 현미경의 5 μm 이미지 조건은 충분히 만족하는 사양이며, 0.5 μm 이하의 고배율 현미경 조건도 linear 및 swivel stage가 정지하여 안정된 상태에서 rotation stage만 움직임을 고려할 때 0.5 μm 이하의 이미지도 획득 가능할 것이다.

고에너지 현미경 빔라인은 시료 위치에서 지하 2.0 m 굴착이 필요하다. 이는 사람 크기의 큰 시료를 깊이 방향으로 스캔할 경우 또는, 인장기와 같은 in-situ 사용환경을 고려했을 때, 대략 2.0 m의 공간이 필요하기 때문이다. 시료의 위치는 광원에서 100 m이며 굴착이 필요한 크기는 폭 4 m × 길이 2.5 m × 깊이 2.0 m이고 세부 사항은 <그림 2.2.9.14>에 나타내었다.



<그림 2.2.9.14> 고에너지현미경 빔라인 실험허치 내부 배치도

실험허치 출입은 방사선 안전 및 Interlock 구성을 참조한다. 샘플 스테이지 운용 개념은 정형화되지 않은 시료 측정이 요구되는 빔라인인 만큼 다양한 시료의 측정이 가능하도록 운용하고 이용자 시료 준비 방법이 제시돼야 한다. 이용자 시료는 재료 종류별 측정 가능한 시료 두께가 정의되어야 하고 일반 시료, 생체 시료, 액상 시료로 구분해야한다. 원활한 측정환경 (in-situ/operando) 제공과 샘플 스테이지 오염 및 손상 감소를 위하여 표준화된 샘플 홀더 개발이 필요하다.

샘플 스테이지 시료 설치 운용은 다음과 같다. 실험허치 내부 출입 및 샘플 로딩은 매니저 감독하에 시행한다. 샘플 스테이지의 시료 설치는 표준화된 샘플 홀더 사용 시 이용자가 설치 가능하도록 하고 자유 형태 시료 설치 매니저 감독 설치가 필요하다. 중량물 설치과정에 고정밀 기구인 샘플 스테이지의 damage 관리에 철저해야 한다. 이용자는 샘플 스테이션만 접근하도록 하고 검출 스테이션에서 분리되도록 요구된다.

측정 서포트 스테이션은 In-situ / operando 기구 설치와 다양한 환경변화에 시분해 실험을 지원하기 위한 일종의 이동식 테이블로 측정 보조 스테이션으로 사용된다. 보조 스테이션은 지게차 선반의 형태로 충방전기, 슬립링, 측정기구 등을 설치 가능해야 하고, 샘플 스테이션 안정성 유지, 실험기구 설치 시 샘플 스테이지 충격 방지, radiation damage 고려한다.

검출 스테이션은 투영영상 획득을 위한 검출시스템 (X-선 현미경), 검출시스템 설치를 위한 석정반, 석정반 이동을 위한 레일 시스템으로 구성되며 고중량물의 석정반과 차폐 구조물을 고려하여 설계한다.

검출시스템은 높은 종횡비를 갖은 빔라인의 특성을 활용하기 위하여 높은 종횡비를 갖는 검출기가 필요하다. 상용화된 대면적 검출기의 경우, 검출 가능한 픽셀 하나의 크기가 50 μm 및 100 μm이다. 방사광 시설 이용자 및 연구 목적에 대응하기 위해서는 10 μm 이하의 분해능이 요구된다. 빔특성을 최대한 활용하면서 요구 성능을 충족하기 위하여 저배율 대면적 현미경과 고배율 현미경 시스템이 필요하다. 저배율 대면적 현미경은 수평 방향 200 mm의 빔 크기를 한 번에 측정하면서 10 μm 이하의 CT 영상을 제공할 수 있도록 하고, 고해상도 현미경은 0.3~0.5 μm까지 X-선 영상을 제공할 수 있도록 한다.

X-선 현미경 검출기 사양은 아래 <표 2.2.9.10>과 같으며 검증된 상용 제품을 활용하여 장치 유지 및 관리가 용이하도록 한다.

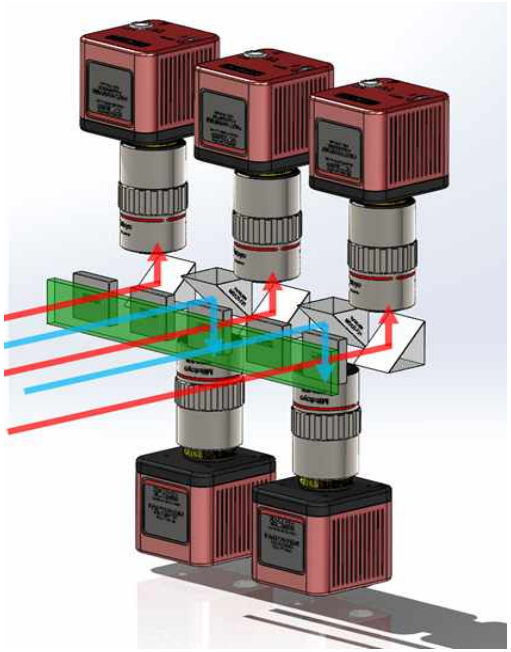
<표 2.2.9.10> 고에너지 현미경 빔라인 검출기 사양

구분	검출기
검출기 픽셀 크기	2.5 μm × 2.5 μm
검출기 픽셀 개수	5120 × 5210
검출기 검출 영역	12.8 mm × 12.8 mm

저배율 대면적 현미경의 사양은 아래 <표 2.2.9.11>로 나타내었으며 1:1 화면 비율을 갖는 검출기를 array로 구성하여 <그림 2.2.9.15>와 같이 설계한다.

<표 2.2.9.11> 고에너지 현미경 대면적 저해상도 현미경 세부 사양

구분	저배율 현미경
FOV (수평 x 수직)	200 mm × 25 mm
해상도	5 μm
대물렌즈 배율	0.5 ×
검출기 1개의 검출 영역	25.6 mm × 25.6 mm
검출기 배치	1 × 5 배열



<그림 2.2.9.15> 저배율 대면적 현미경 시스템 예시

고해상도 현미경 사양은 아래 <표 2.2.9.12>로 나타내었으며 1:1 화면 비율을 갖는 검출기를 단일로 <그림 2.2.9.16>과 같이 구성한다.

<표 2.2.9.12> 고에너지 현미경 빔라인 고배율 현미경 세부 사양

구분	고배율 현미경
해상도	0.5 μm
대물렌즈 배율	5 ×
검출기 검출 영역	2.6 mm × 2.6 mm
해상도	0.25 μm
대물렌즈 배율	10 ×
검출기 검출 영역	1.3 mm × 1.3 mm



<그림 2.2.9.16> 고배율 현미경 시스템 예시 (PLS-II 6C beamline)

석정반(girder)은 광학 장비 추가 및 이동 설치가 가능하도록 브레드보드 형태로 제작하고 볼트 위치 및 크기는 기존 광학 시스템과의 호환성을 고려하여 50 × 50 mm 또는 100 × 100 mm로 하며, 편평도 및 강도를 유지할 수 있도록 한다. 필요에 따라 석정반 위에 알루미늄 브레드보드 설치 후 광학기구 설치한다. 광학 테이블은 고중량 기구 설치 시 변형 및 복구가 불가하기 때문에 고려하지 않는다.

검출 스테이션 이동을 위한 레일 시스템은 검출 스테이션의 전체 중량을 고려하여 석정반에 LM 가이드를 조합하여 설계한다. 레일 시스템의 정렬은 광 경로 일치되도록 설치되고, 15 m 이상의 이동 거리 안에서 오차범위를 최소화며 광 경로 추적시스템과 연계하여 검출시스템과 위치별 자동 보정되도록 한다.



<그림 2.2.9.17> 레일 시스템 예시 (PLS-II 9C beamline)

빔-스탑 허치는 휨 자석으로부터 발생된 X-선을 안전하게 제거할 수 있어야 한다. 고에너지 현미경 빔라인의 빔-스탑 허치에 최종 도달하는 빔 크기는 240 mm 이상이고 100 keV 이상의 투과력이 높은 빔이 사용하므로 방사선 안전에 유의하여 충분한 크기의 beam-stopper가 설계되어야 한다.

차. 전산체계

(1) 데이터 생산

ESRF-EBS의 BM18 및 BM05 빔라인은 휨 자석을 활용한 대표적인 이미징 빔라인으로 2,048 × 2,048 pixels (4.2 MPixel)을 가지는 sCMOS를 검출기로 사용한다. PCO edge 4.2 CLHS은 초당 100 프레임까지 측정이 가능하며 1장당 획득하는 데이터의 크기는 8 MB / 장이고 초당 생산되는 데이터의 양은 0.8 GB / sec이다. Australian Synchrotron의 Imaging and Medical Beamline (IMBL)과 PLS-II의 6C 빔라인은 2,560 × 2,160 pixels (5.5 MPixel)을 가지는 sCMOS를 검출기로 사용한다. 검출기로 사용되는 PCO edge 5.5 CLHS은 초당 100 프레임까지 측정할 수 있으며 1장당 획득하는 데이터의 크게는 10 MB / 장이고 초당 생성되는 데이터의 양은 1.0 GB / sec이다.

고에너지 현미경 빔라인은 대면적 측정을 위하여 5대의 검출기를 어레이(array)로 배열하여 사용하고자 한다. 검출기는 PCO edge 26 CLHS로 5,120 × 5,120 pixels (26 MPixel)과 초당 150 프레임의 데이터를 생산할 수 있다. 프레임별 예측되는 데이터의 크기는 52 MB / 장이다. CT 측정을 고려해야 하므로 비손실 CT 장수는 51,200 × 1.7 = 87,040장으로 계산되고 20%만 촬영한다고 하더라도 20,000장의 데이터가 필요하다. 비손실 CT의 20% 데이터를 계산하면 52 MB × 20,000 = 1,000 GB/CT = 1 TB/CT (=25 s/CT)이고, 5대의 검출기에서 생산되는 데이터의 양은 : 7.8 GB/sec × 5 array detector = 40 GB/s이다. 하루 동안 생산되는 데이터의 양을 계산하면 4분에 1개의 CT data를 생성할 때, 1시간에 15 CT 즉, 15 TByte가 생성되고, 자동화 프로그램을 이용하여 하루에 20시간을 쉬지 않고 측정할 때, 15 TByte × 20 = 300 TByte 저장공간이 필요하다.

(2) 데이터 저장

1대의 검출기에서 생성되는 데이터의 양은 7.8 GB/sec이므로 데이터 손실 없이 저장공간에 저장하려면 전체 생산되는 데이터를 일시적으로 보관할 수 있는 RAM disk나 초 단위로 7.8 GB를 저장할 수 있는 저장공간이 필요하다. 상용 제품을 조사한 결과 순차 쓰기 및 읽기가 10,000MB/s인 SSD (Seagate 파이어쿠다 540 M.2 NVMe (2 TB))가 있는 것으로 확인되었다. 이 방법은 일시적인 저장 방식으로 검출기에서 생산되는 data의 실시간 server 전송 및 이미지 후처리 과정에 대하여 파이프라인 개발이 필요하다.

참고문헌

[1] Nature Methods (2021) Vol. 18, Pages 1532 - 1541

[2] Appl. Sci. (2021) Vol. 11 Issue 9 Pages 4120

[3] Multiresolution Phase-Contrast Tomography at BM18. 12th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2023, 27 February - 2 March 2023 in Fürth, Germany (iCT 2023) Vol. 28 Issue 3

[4] Scientific Data (2022) Vol. 9 Issue 264

[5] Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. (2022) Vol. 1034 Pages 166779

[6] Journal of Cereal Science (2006) Vol. 43 Issue 3 Pages 393-397

[7] ISIJ International (2011) Vol. 51 Issue 3 Pages 402 - 408

[8] The British Journal of Radiology (2023) Vol. 93 Issue 1150

[9] Current Cardiology Reports (2014) Vol. 16 Issue 441

[10] J. Am. Chem. Soc. (2019) Vol. 141 Issue 21 Pages 8441-8449

[11] Combustion and Flame (2022) Vol. 241 Pages 112054

[12] Chem. Soc. Rev. (2010) Vol. 39 Pages 4656-4672

[13] Synchrotron Radiation News (2020) Vol. 33 Issue 6 Pages 5-10

[14] Advanced Photon Source Upgrade Project Final Design Report (2019)

[15] SPring-8-II Conceptual Design Report (2014)

[16] J. Phys.: Conf. Ser. (2022) Vol. 2380 Pages 012106

[17] J. Phys.: Conf. Ser. (2013) Vol. 425 Pages 042010

[18] J. Synchrotron Rad. (2016) Vol. 23 Pages 1357-1367

[19] Nature Methods (2021) Vol. 18 Pages 1532–1541

[20] Proc.SPIE (2006) Vol. 6318 Pages 63180

[21] BM18, the new ESRF-EBS beamline for hierarchical phase-contrast tomography. In Proc. MEDSI'20, JACOW Publishing, Chicago, IL, USA (2021), Pages 24-29

[22] Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation. Springer, Cham. Pages 1053–1093

[23] J. Appl. Phys. (2009) Vol. 105 Pages 102005

2.2.10 나노 프로브 빔라인 (Nano-Probe)

가. 소개

(1) 개요

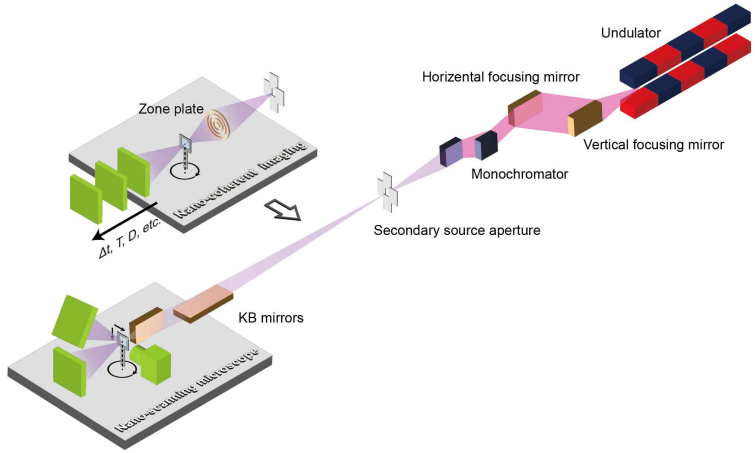
4세대 방사광 광원은 기존 3세대 방사광 광원에 비해 낮은 emittance와 광원크기가 작아지고 이로 인해, 경 X-선 영역에서 결맞는 X-선 선속이 100배 이상 증가하게 된다. 결맞음 광원을 활용하면 X-선 빔 특성화, 정량적 이미징 및 분석, 나노미터 크기의 집속빔 생성 그리고 결맞는 회절 이미징 기법을 활용한 고해상도 이미징이 가능하며 에너지 소재나 반도체, 기능성 입자와 같은 다양한 물질의 구조 특성을 조사하고 자성, 상변이 등 다양한 물리현상을 탐구할 기회를 제공할 수 있다.

나노프로브 빔라인은 첫째, 50 nm 이하 회절 한계의 빔 크기 달성, 둘째, 이를 활용한 복잡한 모양과 다양한 크기의 시료에 대한 multi-modal 이미징 및 분석이 가능한 기법 수행, 셋째 높은 결맞음 선속을 최대로 활용할 수 있는 kHz 이상의 데이터 획득 속도, 넷째, 결함 형성 및 성장, 국소적인 변화를 동적으로 관측할 수 있는 높은 시간분해능을 달성한다. 이를 달성하기 위해 활용하는 나노미터 크기의 집광빔(나노빔)과 결맞음성 기반 이미징 및 분석기법들은 4세대 방사광 광원의 높은 결맞음 선속과 작은 광원을 최대로 활용하고 있다. 또한, PLS-II에 비해 높은 4 GeV 에너지의 광원에 의한 경 X-선 에너지 영역에서의 광도 증가는 나노미터 공간해상도 이미징 및 나노 분광학을 수월하게 하고 주기율표 대부분 원소에 대한 K 및 L 흡수단에 대한 액세스를 가능하게 한다.

나노프로브 빔라인은 구조 이미징을 위한 타이코그래피와 X-선 형광을 활용해 국소 위치의 화학조성과 상태 파악할 수 있도록 하고 광각회절 측정을 통해 구조의 응력 및 변형률을 동시에 측정할 수 있는 multi-modal 이미징 기법과 다양한 크기의 복잡한 구조에 대해 macro-to nanoscale zoom 이미지를 제공하는 것을 목적으로 한다.

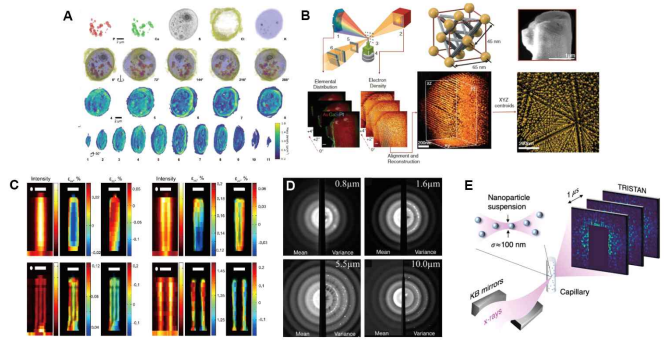
나노 프로브 빔라인은 빔라인 내 특성화된 두 개의 엔드 스테이션을 설치한다. 첫 번째는 Nano-Scanning Microscopy를 위한 엔드 스테이션으로 50 nm 크기 집속빔을 스캐닝 프로브로 활용해 multi-modal image 획득을 목표한다. 이때, 엔드 스테이션은 다양한 환경 (온도, 가스 등) 실험이 가능하도록, 작은 시료 챔버가 삽입가능한 50 mm 이상의 Working distance를 확보한다. 두 번째 엔드 스테이션은 Nano-Coherent Imaging 실험을 지원하는 엔드 스테이션으로 100 nm 크기 미만으로 집속된 빔을

사용한 결맞음 이미징 기법을 활용한 기능성 3차원 이미지 (Large FOV, In-situ, Polarized beam 등) 제공을 목표로 한다. <그림 2.2.10.1>은 빔라인 개요도를 보여주며 실험 엔드 스테이션에는 결맞는 회절 이미징 실험과 In-situ 실험(온도, 가스 환경, 동역학 조사 등)을 위한 장치와 나노 집속빔을 활용한 스캐닝 장치와 multi-modal 이미징을 위한 검출 장치가 마련되어 있다.



<그림 2.2.10.1> 빔라인 개요도

(2) 나노프로브 빔라인 활용 과학 예시



<그림 2.2.10.2> 나노프로브 과학. (A) 얼음으로 수분이 고정된 녹조류의 3D X-선 형광 및 타이코그래피 동시 3차원 이미징. (B) 나노입자 격자 및 다중 재료 프레임워크의 3차원 시각화. (C) 나노 포커스 X-선 빔을 이용한 나노와이어 발광 다이오드의 고속 변형 매핑. (D) Fluctuation microscopy. (E) 나노 포커스 X-선 광자 상관 분광학

지난 40년간 전 세계적으로 많은 과학자들은 수천억 규모의 방사광 시설을 활용하여 점점 더 작은 경 X-선 나노빔을 제작하고 활용하기 위해 경쟁해 오고 있으며 이러한 경쟁의 배경에는 과학자들이 탐구하고자 하는 목표가 크게 3가지가 있다. 첫 번째는 물질과의 기본 상호 작용을 활용해 물질 특성을 평가하고 효과적인 탐사 수단을 제공하는 현미경 제작이다. 나노 빔은 시료가 어떤 원소 구성으로 지역적으로 분포하고 있는지, 지역적인 결정구조와 구조 결함이 어떠한지를 확인하고 나노 X-선 형광 현미경은 시료에 대해 원소 구성분포를 측정하는 가장 대표적인 방법 중 하나이며, 이를 활용하여 John Miao 그룹과 Oleg Gang 그룹은 결맞음 회절 이미징 기법(타이코그래피)과 현광 현미경을 결합해 수십 나노 해상도의 전자밀도분포와 원소구성분포를 동시에 획득하는 데 성공하였다 (<그림 2.2.10.2> A, B). 이 연구의 강점은 타이코그래피와 현광 현미경 기법의 시너지효과이다. 타이코그래피로 획득된 정확한 빔 위치와 프로파일은 형광 현미경 이미지의 해상도를 Deconvolution을 통해 향상시킬 수 있고 fly-scan으로도 < 30 nm의 공간해상도를 달성할 수 있다. 두 번째는 국소 영역의 결정구조를 확인하는 현미경으로 활용할 수 있다. X-선 산란은 빔이 노출되는 영역 전체의 구조를 앙상블로 제공하기 때문에 지역적인 결정구조를 확인하기 위해서는 필요한 영역만 국소적으로 빔을 노출시켜 산란 정보를 분석해야 한다. 그 예로 Anders Mikkelsen 그룹은 PETRA P06 나노프로브 빔라인에서 제공하는 나노 집속빔을 활용하여 나노와이어 발광 다이오드의 고속 결정구조 변형을 확인하였다 (<그림 2.2.10.2> C). 마지막으로 결맞는 나노빔을 사용하여 나노미터 스케일의 변동성에 대한 감도를 향상시킬 수 있다. 예를 들어, Fivos Perakis 그룹은 나노 집속빔을 활용한 Photon correlation spectroscopy를 활용해 나노입자들에서 얻은 X-선 산란에서 얻은 구조 정보와 상관 (Correlation) 분석에서 얻은 동적 변화를 마이크로초 해상도로 관측하는 데 성공하였다. 이때, 나노 빔 크기를 88 nm~2.5 μm까지 변화시켜가며 소각산란의 라인 모양과 확산계수에 미치는 나노 집속빔의 영향을 양적으로 분석하였다 (<그림 2.2.10.2> D, E).

(3) 과학적 초점

나노프로브 빔라인의 과학적 초점은 반도체, 광촉매, 전지 시스템 및 나노 크기의 광물 시료와 같은 기능성 물질 연구의 복합적 이미징 및 분석이다. 이 연구를 실제 환경 조건 혹은 원하는 환경에 대해서 수행하기 위해 시료의 환경 조절이 가능한 챔버를 제공해 다양한 길이 스케일에서 3차원으로 연구하기 위해 설계되었다. 화학적

조성이나 목표하는 불순물의 위치, 구조를 파악하기 위해 형광 현미경 기법과 결맞음 이미징 기법을 활용하고 화학 상태를 결정하기 위해 국소적으로 X-선 형광 분광학을 사용한다. 그리고 타이코그래피(스캐닝 결맞음 이미징 기법)를 활용한 구조적 이미징이나 In-situ Coherent imaging 기법을 활용해 ms 시간 스케일의 동역학 연구를 수행한다. 결론적으로 나노프로브 빔라인은 복잡하고 다양한 크기의 물질 특성에 대해 높은 이해를 제공하기 위해 다양한 시료 환경 조건에서 결함이나 불순물과 같은 물질의 물성을 파악하고 이에 대한 다이나믹스를 볼 수 있다.

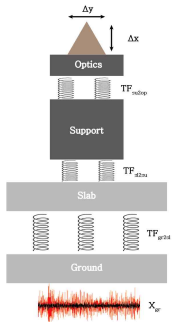
나. 빔라인 설계 목표 및 특징

(1) 빔라인 목표 성능

<표 2.2.10.1> 나노프로브 빔라인 제공 사양

	Nano-Coherent Imaging	Nano-Scanning Microscopy	비고
X선 에너지	5-25 keV		IVU24
에너지 해상도	$\Delta\lambda/\lambda$ ~ 1.5 × 10^{-4}		Si (111)
빔사이즈	< 100 nm	< 50 nm	-
집광 장치	Zone-plate	KB mirror	-
Coherent Photon flux (Photons/s)	~ 10^{8} ~ 10^{11}	~ 10^{9} ~ 10^{12}	BDA 크기 광학장치 효율 고려
실험기법	In-situ Coherent imaging Holo-tomography	Ptychography Nano-XANES Nano-XRF Nano-XDM	-

(2) 광학허치 및 실험허치 내 장치 진동 허용치

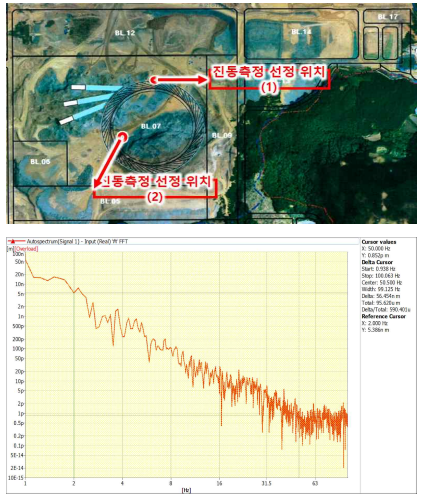


<그림 2.2.10.3> 지반 진동의 전달 개요. 빔진행방향은 z방향

나노프로브는 4GSR 빔라인 중 나노집속빔을 제공할 예정이며, 이에 따라 Mirror, Monochromator를 포함한 X-선 광학장치들은 지반에서 오는 진동을 효과적으로 억제하기 위한 장치 지지대 디자인을 포함하고 있다. 이를 위해 진동에 대한 설계 기준을 설정하였다. 먼저 고려해야 하는 진동수에 대해서 고려해 보자면, 2.8 Hz 이하의 진동은 롱빔라인 전체 길이보다 긴 파장을 가지기 때문에 필터링 효과를 기대할 수 있다. 그래서 50 nm 집속빔을 만드는 조건을 고려했을 때, 실험 홀 내에서 > 2.8 Hz, 진동 진폭은 통상적으로 적용되는 빔크기의 10% 법칙을 적용시켜 5 nm로 설정하였다. 지반에서 오는 진동과 X-선 광학장치의 진동간의 관계는 아래와 같다 (빔 방향은 z 방향임).

$$\Delta x,y = TFop2xb \times TFsu2op \times TFsl2su \times TFgr2sl \times Xgr < 0.1\sigma_{x,y} \quad \text{(수식 2.2.10.1)}$$

여기서 TF는 전파함수(Transfer function)로 최종적으로 광학장치가 흔들리는 진폭을 계산하기 위한 계수이다.



<그림 2.2.10.4> 지반 진동 조사 위치(상) 및 진폭(하)

4GSR 건설 지역은 단단하고 무거운 지반으로 인해 모든 진동수에 걸쳐 상당히 안정화된 진동 진폭을 보여주고 있다 (<그림 2.2.10.4>). 특히, 측정된 진동은 50 Hz 이후에는 더 이상 진동의 폭이 줄어들지 않고 있으므로 장치 거더의 고유진동수를 모두 50 Hz 이상으로 설계했다.

(3) 실험허치 내 온도 변화 허용치

빔 높이가 바닥에서 1.4 m이므로 대략적인 장치 지지대의 높이를 대략 1 m라고 가정하면 1 K (Kelvin) 변할 때 철, 알루미늄으로 제작된 일반적인 지지대의 길이 변화는 열팽창계수를 통해 계산하면 대략 40 μm이며 화강암의 경우 16 μm이 변한다. 이에 앞서 적용한 10% 법칙을 적용하면 필요한 허치 내 온도변화 허용치는 대략 0.0025 K이다. 여기서 온도가 변화에 따라 지지대 혹은 장치의 크기가 즉시 변하지 않고 열이동이 끝나는 데 시간 T = ρCpV / hA이 필요하다. 여기서 ρ는 질량 밀도, Cp 열용량, V는 부피, A는 표면넓이, h는 film coefficient이다. 일반적인 화강암 지지대 디자인이나 알루미늄 지지대 디자인에서 열팽창이 안정되는 데 걸리는 시간이 일반적으로 5~6시간이 소요되며 공기 유동은 1~2시간 정도 걸린다. 이에 온도변화 허용치는 단위 시간 안에 열 이동 허용치 안으로 지지대가 움직일 수 있도록 0.015 K/1h로 설정한다. 본 허용치를 실제로 실현한 빔라인으로 DLS 나노프로브 빔라인, APS 나노프로브 빔라인이 있으며 현재 설계 중인 APS-U In-Situ 나노프로브 빔라인에서도 유사한 허용치로 활용해 설계하였다. 여기서 주목해야 할 점은 온도변화 허용치를 달성하기 위해 DLS 나노프로브과 APS-U In-situ 나노프로브 빔라인의 전략이 다르다는 점이다. DLS 나노프로브 빔라인은 LCW를 허치 전체로 공급해 온도를 유지하는 반면 APS-U 나노프로브 빔라인은 LCW 펌프에서 발생하는 진동을 고려해 HVAC(Heating, Ventilating, and Air Conditioning)를 활용한다. 현재, 4GSR-나노프로브 빔라인은 APS-U 나노프로브 빔라인과 동일하게 HVAC를 활용해 허용치를 달성할 계획이다. 또한, 빔 위치를 추적 및 Feed-back 하기 위한 장치의 지지대는 열 이동을 최대한 줄여 정확한 Feed-back을 제공할 수 있도록 Invar와 Zerodur 을 활용한다.

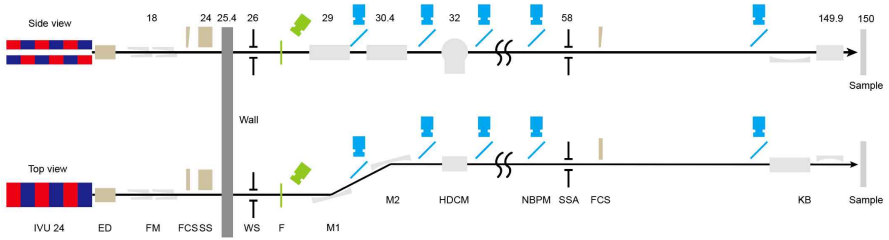
다. 빔라인 배치도(layout)와 광 경로(ray-tracing)

(1) 빔라인 배치도

○ 빔라인 내 장치의 위치 및 용도

<표 2.2.10.2> 빔라인 제공 사양 요약 빔라인 내 장치 위치 및 용도 요약

위치	거리 (m)	항목	사양	용도
Optical Hutch 1 26.0 ~ 60.0 m	26	White beam attenuator and Beam monitor	Diamond window	빔 Attenuate와 profile 진단
	26.5	Diamond window	Diamond 0.2 mm (두께)	Low energy x-ray photon 제거
	27	White beam slit	최대 4000 W 200 μm × 200 μm aperture size	Parasitic beam 제거 및 Beam defining
	29	M1	Pt 40 nm	1:1 Magnification
	30.4	M2	Si, Pt 40 nm	
	32	DCM	Si (111) 단결정	광원 단색화
	35	Screen and pop-in camera	Screen: Boron doped Diamond thin film	빔 profile 진단 및 빔 align 빔 위치와 세기 측정
Optical Hutch 2 57.0 ~ 60.0 m	57.7	Nano-beam position monitor	FMB Oxford, UK	빔 위치와 profile 측정 빔 위치 Feed back
	58	Slits	4-way slit, UHV	Secondary beam source Beam defining aperture
NCI endstation 128 ~ 140 m	128	Screen and pop-in camera	Screen: Boron doped Diamond thin film	빔 위치와 profile 진단
	129.8	Slits	4-way slit, UHV	입사빔 크기 결정
	130	Screen and pop-in camera	Screen: Boron doped Diamond thin film	빔 위치와 profile 진단
	131.5	Zone plate	< 100 nm	In-situ 실험 세팅이 가능한 > 100 mm working distance
	132	Sample stage	Customized sample stage	유저 요구에 따라 필요한 환경을 제공하는 시료 장치 삽입 가능
	137	Detector	1. Scintillator + Camera 2. EIGER 2X 4M/0.5M	-
NSM endstation 140 ~ 150 m	140	Screen and pop-in camera	Screen: Boron doped Diamond thin film	빔 위치와 profile 진단
	144.4	Slit	Scatterless GaAs blades	Guard slit
	144.9	KB mirror	< 50 nm	Nanobeam 제작 50 mm 이상의 Working distance
	145	Sample scan motor stage	Step resolution < 1 nm	XRD, 형광 이미징, 결맞는 회절 이미징 실험 모두 가능한 세팅
	146	Detector	소각 회절:EIGER 2X 0.5 M 광각 회절: Merlin	oversampling > 3 @ 5 ~ 25 keV



<그림 2.2.10.5> 4GSR 10번 나노프로브 빔라인 레이아웃. ED: Electron deflector, FM: Fixed Mask, FCS: Fast Close Shutter, SS: Safety shutter, WS: White beam slit, F: Diamond Filter, M1,2: Focusing Mirror 1,2, DCM: Double Crystal Mirror, NBPM: Nano-beam position monitor, SSA: Secondary Source Aperture, KB: Kirkpatrick – Baez mirror.

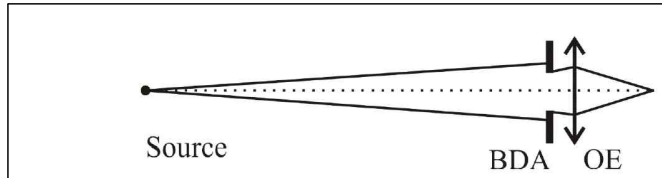
(2) 빔라인 배치 고려사항

○ 빔 집속 방법

빔 포커싱 방법은 결맞음성 조절, 초점 조절 기능, 진동 효과들이 고려된다. <그림 2.2.10.6>은 주로 활용되는 빔 집속 방법을 보여주고 있으며 결맞음성 조절과 초점 조절 기능 진동 효과에 따라 장단점을 서술하였다. 더 자세한 논의는 참고문헌 [18]에서 다루고 있다. 가장 빔 안정성이 높은 집광 방법은 이차 광원을 활용한 빔 집속 방법이지만, 빔라인 길이와 Secondary Source Aperture(SSA)의 위치에 따라 FM(Focusing Mirror)의 초점거리를 조절하면 SSA의 위치에서 집속된 광원의 확대율이 변하는 특징이 있다. 만약 빔라인 길이를 짧게하기 위해 SSA를 Focusing mirror에 가까이 위치시킬 경우 높은 확대율로 SSA가 수백 나노미터로 작아져 빔크기의 조작이 어려워진다. 이에, 4GSR의 작은 광원 크기를 고려해 FM의 확대율을 대략 1:1로 설정해 SSA 광원의 최소 크기가 5 μm 이상이 될 수 있도록 설계하였다.

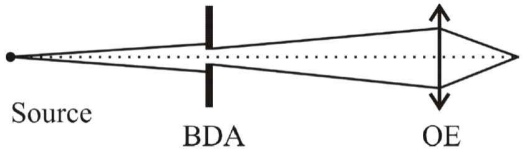
○ 빔라인 광 경로 및 기대 성능

집속빔 크기는 빔 집속장치의 개구수와 광원의 크기에 대한 확대율에 의해 결정되며 목표하는 성능인 ~50 nm (@10 keV, WD: 50 mm)를 달성하기 위해 필요한 미러 길이는 100 × 300 mm이며 grazing angle은 3 mrad이다. <그림 2.2.10.7>은 나노프로브 빔라인에서 지원할 에너지 영역 내에서 예상되는 집속빔 크기를 나타내었다.



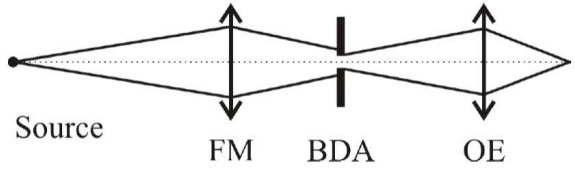
Direct focusing approach

특징	고려점
결맞음성을 BDA 크기를 통해 조절함.	1. 진동에 취약한 구조 2. 단색광 장치 및 광원 진동이 그대로 반영됨



Secondary source approach

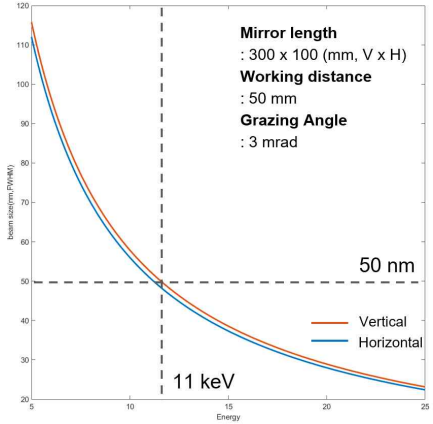
특징	고려점
1. BDA를 활용해 Secondary source 제작됨. 2. BDA 조절을 통해 집속빔 사이즈와 결맞음성을 조절할 수 있음. 3. 집속빔이 단생광 장치와 광원의 진동과 분리할 수 있음.	1. OE에서 결맞음 길이를 고려할 때, BDA가 광원과 최대한 가까울 필요가 있음. 2. 일반적으로, 프론트엔드 내 장치 길이를 고려했을 때 일반적으로 가장 가까울 수 있는 거리는 대략 25 - 30 m 임.



Secondary focusing source approach

특징	고려점
1. 앞서 소개한 Secondary source method와 유사 2. 하지만 집속장치를 활용해 2차 광원을 제작하는 차이점이 있음. 3. 이는 해상도와 Flux의 trade-off를 가능하게 함.	1. FM의 Magnification이 높으면 BDA가 나노미터크기로 작아져야 해서 어려운 점이 있음. 2. 만약 거리가 충분히 확보된다면 FM의 magnification을 1:1로 하는 것이 이상적.

<그림 2.2.10.6> 빔 포커싱 방법 요약. FM: focusing mirror, BDA: Beam defining aperture, OE: Optical element.

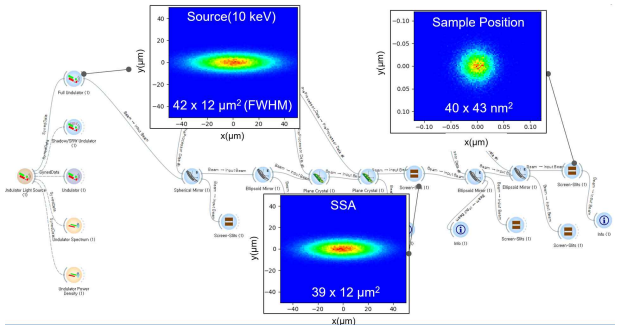


<그림 2.2.10.7> 에너지에 따른 focal size plot. 여기서 BDA Opening 사이즈는 Full-coherent 빔을 위한 크기이다.

위 계산은 SSA를 엑스선 에너지에 따른 결맞음 길이만큼 열었을 때 결정되는 집속빔의 크기이며, KB mirror의 길이는 입사각과 mirror acceptance angle, 그리고 거리가 고려되었다.

(3) 광 경로 전산 모사 결과

아래 <그림 2.2.10.8>은 빔라인 내 장치 배치도에서 기술된 내용을 OASYS를 활용해 광 경로를 전산 모사한 결과이다. 전산모사에서 X-선 에너지는 많은 수요가 예상되는 10 keV로 설정하였다. <그림 2.2.10.8>에서 볼 수 있듯이, SSA에서 광원 크기와 비슷한 크기 후 KB 미러를 통해 40 × 43 nm^2의 빔이 제작되는 걸 볼 수 있다.



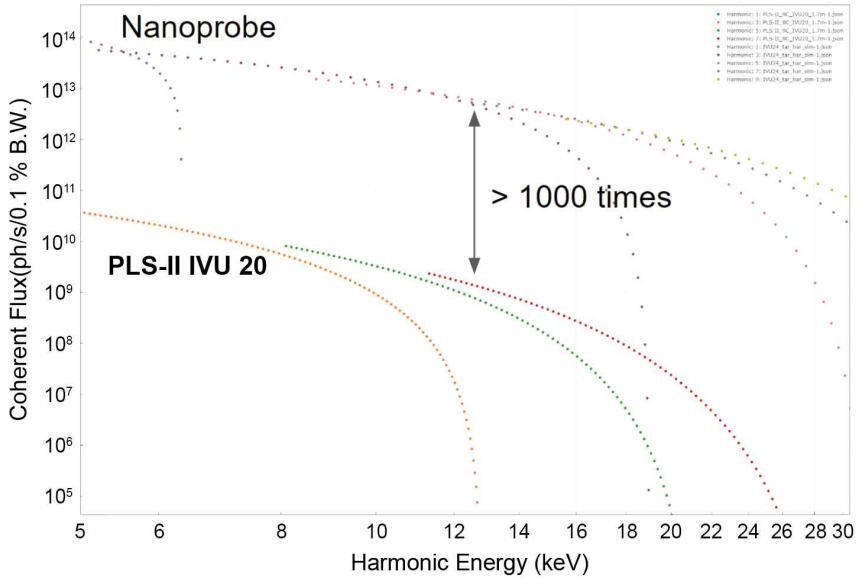
<그림 2.2.10.8> OAYSYS 전산 모사 결과. 각 장치의 위치는 <표 2.2.10.4>와 동일하다.

마. 광원

광원으로는 IVU24(주기: 24 mm) 활용하여 연속적인 Harmonic 에너지를 제공한다. 광원의 크기와 발산각은 <표 2.2.10.3>에 나타냈다. 다목적 방사광가속기의 특징은 광원의 낮은 emittance로 인해 결맞음 선속이 높다는 점이며, 이를 비교했을 때 결맞음 선속은 기존 PLS-II IVU20 (주기: 20 mm) 광원에 대비해 대략 10^3배 이상 크다 (<그림 2.2.10.9>). 광원의 길이는 IVU24의 경우 3 m, PLS-II IVU20의 경우 1.4 m이다.

<표 2.2.10.3> IVU24의 Harmonics에 따른 광원 크기 및 발산

Source	Energy (keV)	Source size (μm, RMS)		Beam div. (μrad, RMS)		Flux (× 10^{13} Ph/s/0.1% BW)
		H	V	H	V	
IVU24	5~25	1.91~1.87	5.01~4.22	7.67~10.62	7.21~10.03	8.6~0.02



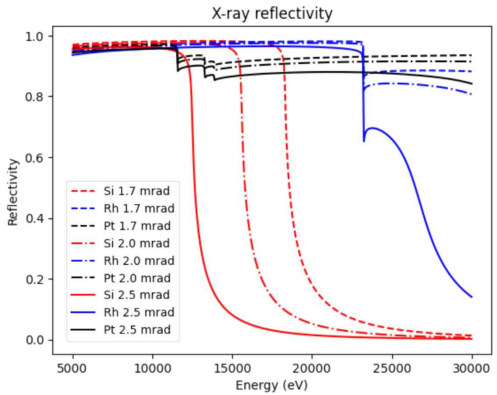
<그림 2.2.10.9> 4GSR 나노프로브 빔라인 IVU24 광원과 PLS-II IVU20 광원과 결맞음 선속 비교, SPECTRA를 활용해 계산.

바. 광학허치

(1) 광학허치 내 장치 세부 사양

○ Focusing mirror

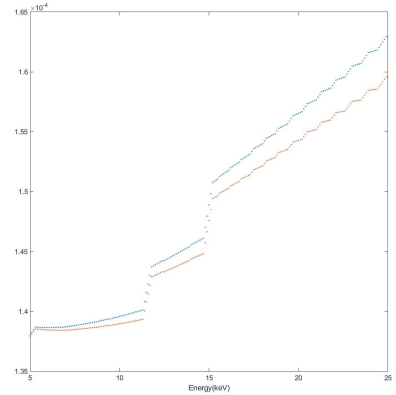
M1은 수직 방향 집속 미러, M2는 수평 방향 집속 미러이며 미러 모양은 Spherical cylinder와 elliptical cylinder mirror 활용하고 두 미러 모두 진동을 고려해 수평 방향으로 방향을 바꾸도록 설치한다. Flux 실험을 대비해 커버할 빔 크기를 4σ로 설정해 미러의 길이는 600 mm로 설계한다. 5~25 keV의 넓은 에너지 영역을 커버하기 위해 Grazing angle 2.5 mrad로 설정한다. 5~11 keV는 Si, 10~25 keV는 Pt로 커버할 수 있도록 two stripe mirror로 제작하고 이를 활용해 고차 에너지 X-선을 차단한다 (<그림 2.2.10.10> 참고).



<그림 2.2.10.10> 물질에 따른 X-ray reflectivity

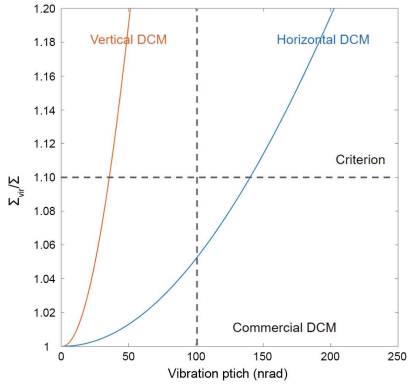
○ Double crystal monochromator (DCM)

Flux와 결맞음성을 고려해 필요 포톤 에너지별로 제공하는 하모닉 차수가 다르며 이에 따라 발산각도 차이가 있다. <그림 2.2.10.11>은 각 에너지별 하모닉에 따른 발산각을 고려해 계산한 에너지 해상도이다. DCM의 에너지 분해능 계산은 참고문헌[20]을 따른다. 5 keV는 1^{st} harmonic, 5 keV ~ 11.5 keV는 3^{rd} harmonic, 11.5 keV ~ 15.5 keV 5^{th} harmonics, 15 keV ~ 25 keV는 7^{th} hamonic을 고려했으며 각 하모닉스의 발산각을 고려해 Si (111)이 제공하는 에너지 해상도는 대략 1.5×10^{-4}이며 이는 포톤 에너지에 따라 0.5 eV ~ 2 eV 정도의 에너지 해상도를 제공할 수 있다.



<그림 2.2.10.11> Si (111)에서 계산된 에너지에 따른 에너지 해상도

한편, DCM은 수평 방향으로 빔 경로를 바꾸도록 설정하였는데 이는 DCM의 진동 정도에 의해 커지는 가상 광원의 크기를 10% 미만으로 억제하기 위함이다. <그림 2.2.10.12>는 나노프로브 빔라인에서 발생하는 광원크기에 대해 DCM의 진동 정도에 따라 커지는 가상 광원의 크기를 나타낸 그래프이다. 수직 방향의 광원이 수평 방향의 광원보다 4배 이상 작고 이는 다르게 말하면 가상광원이 커지는 것이 수직 방향의 진동에 대해 더 예민하다는 것을 의미한다. 일반적으로 상용화된 DCM이 100 nrad인 점을 고려하면 가상 광원의 크기가 커지는 것을 억제하기 위해서는 수평 방향으로 방향을 바꾸는 DCM이 효과적이다. 이에 나노프로브 빔라인에서는 HDCM을 활용한다.

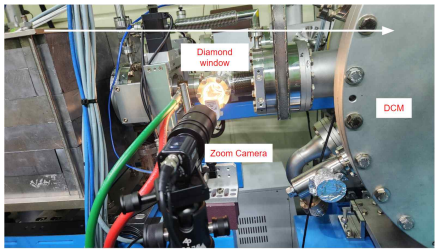


<그림 2.2.10.12> DCM 진동 정도에 따라 커지는 가상광원 크기 그래프

○ Secondary source aperture

Secondary source는 나노 프로브 빔 제작에 있어 핵심 장치 중 하나로 Undulator에서 발생한 광원이 시료면까지 전달되는 과정에서 통과하는 광학장치들의 진동이나 노이즈를 제거한 가상 광원을 생성한다. 이는 실험의 빔라인의 전자빔 궤도 변화 및 광학장치 진동에 대한 민감도를 낮추고 빔 공간 필터 역할을 수행(upstream에서 발생한 노이즈 제거)한다. 또한, 플럭스와 결맞음성을 실험 특성에 따라 조절할 수 있다 (<그림 2.2.10.6>). 가상 광원의 크기는 M1, M2 미러의 배율에 따라 결정되며 대략 1:1로 설정해 Undulator에서 생성된 광원의 결맞음 길이만큼 크기를 조정한다. Secondary source aperture는 수 μm 크기의 작은 슬릿 크기를 구현할 수 있는 four-jaw slit을 활용한다 (최소 갭 크기 대략 2 μm).

○ Diamond window and zoom camera (White-beam position and profile monitoring)



<그림 2.2.10.13> PLS-II 7C 빔라인 설치 사진. 왼쪽에서 오른쪽이 빔진행 방향이다.

White 빔의 모니터링 및 진단장치는 Low energy cut을 위한 diamond window에서 확인한다. 또한, 추가적으로 Boron을 도핑한 30 μm 두께 Diamond window를 활용해 위치를 실시간으로 확인하고 빔 피드백을 수행한다. 제시된 <그림 2.2.10.13>은 나노프로브 빔라인에서 활용할 계획인 white 빔 모니터링 시스템이며 현재 PLS-II 7C 빔라인 광학허치 내 설치되어 있다.

○ 광학허치 내 광학장치 사양

<표 2.2.10.4>는 광학장치 사양을 나타내며 Rs: Sagittal radius, Rm: Meridional radius. Ra: Half major axis, Rb: Half of minor axis이다.

<표 2.2.10.4> 광학허치 내 광학장치 사양

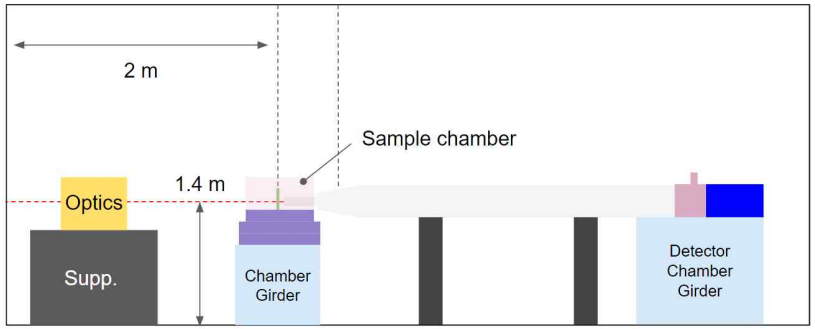
	M1	M2	DCM
광원으로부터 거리 (m)	29	30.4	32
Incident Angle	2.5 mrad	2.5 mrad	3 ~ 45 degree
Shape	Fixed Spherical cylinder	Bendable Spherical cylinder	Plane
Radius (mm)	*Rs : 72.5 Rm : Inf	11.6 km	Inf
Direction	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Substrate	Si	Si	Si
Coating Material	Pt (40 nm)	Si, Pt (40 nm)	-
Beam size @ 10 keV (H × V, mm × mm, FWHM)	0.311 × 0.285	0.271 × 0.327	0.254 × 0.307
Footprint @ 10 keV (H × V, mm × mm, FWHM)	113.8 × 0.312	131.6 × 0.270	1.553 × 0.254
Mirror size (H × V, mm × mm)	400 × 30	400 × 30	-
Focal length (mm)	29,000	27,600	Inf
Roughness σ (nm)	< 0.3	< 0.3	< 1
Slope error (tangential/sagittal) (μrad, RMS)	< 0.2	< 0.2	< 1
Max total heat load (W)	36.4	20.6	102
Max surface head load (W/mm^2)	0.093	0.016	< 40

(2) 광학허치 배치

광학허치는 DCM과 SSA간의 거리가 대략 30 m인 점을 고려해 DCM까지 하나의 허치로 하우징하고 이후 SSA 주변 3 m 길이로 두 번째 광학허치를 설치한다.

사. 실험허치

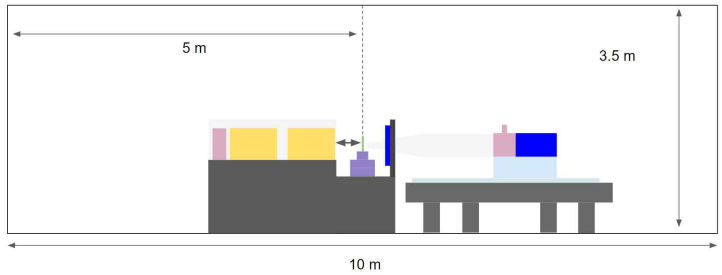
(1) ID10-NCI 엔드 스테이션 실험장치 구성



<그림 2.2.10.14> NCI 실험허치 내 장치 위치.
초록색 막대는 시료를 나타내며 허치 벽면에서 시료까지 2 m이다.

허치는 저진동과 높은 안정성을 가진 공조를 달성하기 위해 콘크리트로 제작하고 전체 허치 길이를 10 m로 구성한다. 허치 내 빔 패스는 최대 7 m, 빔 패스를 분리해 거리를 조절할 수 있도록 제작한다. 필요시, 검출기 위치는 검출기 챔버 거더와 함께 움직일 수 있는 레일을 제작해 이동시킨다. 허치 벽면에서 시료까지 거리는 2 m이며 이는 광학장치와 편광장치를 삽입할 수 있는 공간이다. 빨간색 선은 엑스선 빔을 나타내며 높이는 1.4 m이다. 실험용 챔버 혹은 모터 스테이지는 각 실험 조건에 맞게 제작된 챔버 전체를 움직여 시료에 위치시킬 수 있도록 모터 스테이지를 제작한다. 필요한 시료 환경(가스, 온도, 전류, 전압, 레이저 노출 등)을 제공하기 위해 제작된 소형 시료 챔버들을 챔버 모터에 설치해 실험할 수 있도록 100 × 100 mm^2의 크기를 가진다. 검출기 챔버에는 선속을 측정할 수 있는 포토다이오드 삽입 장치와 측정장치에 다이렉트 빔이 노출되는 것을 막기 위한 빔 스탑 장치가 포함되어있다.

(2) ID10-NSM 엔드 스테이션 실험장치 구성

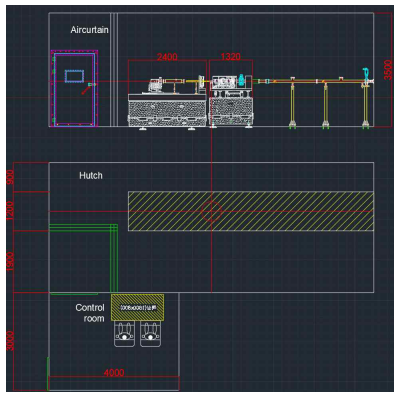


<그림 2.2.10.15> NSM 실험허치 내 장치 위치.
초록색 막대는 시료를 나타내며 허치 벽면에서 시료까지 5 m이다.

NSM 허치와 동일하게 콘크리트 블록에 전체 허치 길이는 10 m로 구성하며 빔패스는 최대 2 m로 제작한다. 전체 빔 패스는 분리해 거리를 조절할 수 있도록 제작한다. 내부 엔드 스테이션은 크게 집속장치, 시료 스캔 장치, 신호 측정 장치, 장치 서포터로 구성되어있다. 여기서 핵심은 Working distance가 50 mm 설정되어 있기에 실제 들어갈 수 있도록 시료 챔버 크기가 75 mm 정도의 작은 크기로 제작한다.

집속장치의 구성은 헬륨, 혹은 진공 환경을 구성할 수 있는 미러 챔버에 KB 미러를 위치시키고 KB 미러에 입사하는 빔 노이즈를 제거할 수 있는 슬릿을 위치시킨다. 현재 설계된 집속장치의 상세 설계 사양은 <표 2.2.10.5>와 같다.

(3) 실험허치 구조



<그림 2.2.10.16> 실험허치 레이아웃. 해치로 표시된 구간은 실험 공간. 단위: mm.

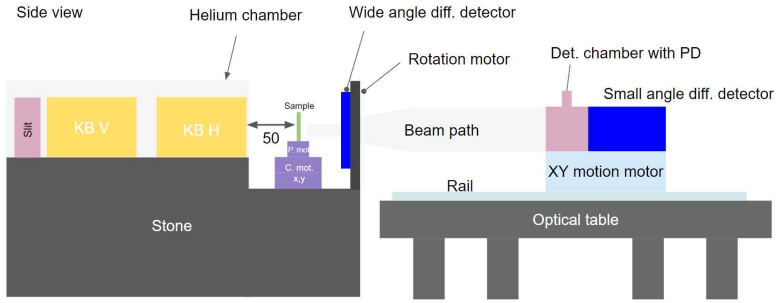
나노프로브 빔라인 실험허치의 대략적인 레이아웃은 <그림 2.2.10.16>과 같다. 실험허치와 공간을 공유하고 외부 공기의 유입을 막기 위해 허치 내 도어를 하나 더 설치해 2중 도어로 제작한다. X-선은 그림의 오른쪽에서 왼쪽으로 진행한다.

<표 2.2.10.5> 실험허치 내 KB 미러 빔 집속장치 설계 사양

	Vertical	Horizontal
Mirror material	Pt 40 nm Coating; Si substrate	Pt 40 nm Coating; Si substrate
Shape	Elliptical cylinder	Elliptical cylinder
Major axis	46,000 mm	46,000 mm
Minor axis	16.740 mm	10.1635 mm
Incidence angle	3 mrad	3 mrad
Substrate size (L × W × H)	300 × 30 × 50 mm	100 × 30 × 50 mm
Figure error	< 1.0 nm PV	< 1.0 nm PV
Micro roughness	< 0.15 nm RMS	< 0.15 nm RMS

시료 스캔 장치는 < 50 nm으로 제작되는 빔으로 스캔할 수 있도록 나노미터 크기의 정밀도를 가지도록 제작하고, 이를 위해 레이저 변위계를 활용해 시료의 위치를 나노미터 스케일로 파악하고 보정한다. 하지만 타이코그래피를 함께 활용하는 실험의 경우 레이저 변위계를 활용해 위치만 파악하고 이미지 재구축 과정에서 얻어진 빔 위치와 정보를 활용해 이미지 해상도를 보정한다.

측정 장치는 회절각에 따라 구성이 다르다. 광각회절 측정을 위한 장치는 단일결정의 브래그 회절 패턴을 측정하기 위한 구성이며 회절 패턴의 크기가 크지 않기 때문에 0.5 m 크기의 소형 2D 디텍터를 Φ 방향으로 스캔해 회절 패턴을 찾고 이후에 측정한다. 한편, 소각 회절 패턴을 측정하기 위한 신호 측정 장치는 광학 테이블 위 레일을 통해 시료와 2D 검출기 사이 거리를 조절한다. 검출기 챔버에는 선속을 측정할 수 있는 포토다이오드 삽입 장치와 측정 장치에 다이렉트 빔이 노출되는 것을 막기 위한 빔 스탑 장치가 포함되어있다. 빔과 수직 방향의 시료 위치에는 형광 검출기를 설치한다.



<그림 2.2.10.17> NSM 실험허치 내 엔드 스테이션 디자인

(3) 빔 진단 및 검출 장치 사양

○ 빔 감쇄장치

빔 감쇄장치는 빔 진단 및 검출 장치에서 많은 포톤이 검출기에 도달해 장치에 damage를 주는 것을 막기 위한 장치이며 광학허치, 실험허치에 각각 1개씩 설치될 예정이다. 장치는 Si 단결정을 활용해 빔의 파장 단면을 유지시켜 감쇄장치를 통과한 상태에서도 문제없이 빔 스크린 장치를 활용해 빔의 프로파일을 확인 및 분석할 수 있게 설계한다. 활용 예정인 빔 감쇄장치의 최대 두께는 대략 1 mm 두께로 설정했을 때 이를 활용해 빔라인에서 제공하는 5~25 keV에서 전 영역에서 10^{-6} 이상 감쇄시키며 일부 고에너지 영역인 20~25 keV에서는 10^{-5} 이하로 빔의 포톤 개수를 감쇄시킬 수 있도록 한다.

○ 2D Detector

- EIGER 2X

Eiger detector는 타이코그래피 실험용 검출기로 활용될 예정이며 일반적인 디텍터보다 32 bit의 높은 dynamic range를 가지고 있는 것이 특징이다. 타이코그래피의 경우 실험에서 defocus 된 메인 빔과 회절 신호를 동시에 받게 되므로 디텍터의 높은 dynamic range가 필수적이다. 또한, 높은 결맞음 선속으로 빠른 데이터 획득 속도가 필요한 데, > 1,000 Hz의 데이터 획득 속도를 지원할 수 있는 고성능 검출기이다.

- Merlin

Merlin detector는 냉각방식이 공냉이라 필요한 별도의 냉각수 라인이 없어 구성이

간단하다. 이는 고각 실험에서도 장치 구성을 용이하게 하며, 24 bit의 높은 dynamics를 지원해 XRD 측정에 충분한 성능을 제공해 줄 수 있다.

○ Fluorescence detector

나노빔을 활용한 고해상도 형광 이미징을 위해 형광 검출기를 활용할 예정이며 배터리를 포함한 복합 소재 실험을 위해 7 채널 형광 검출기를 활용한다.

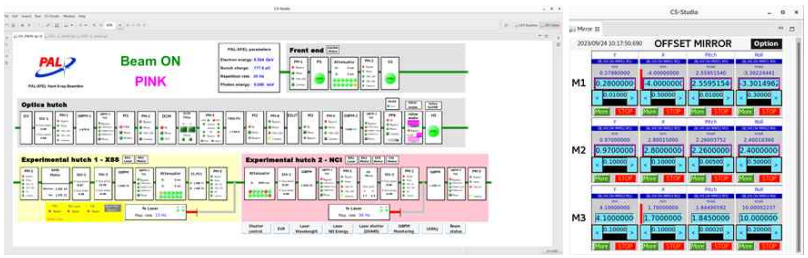
○ 빔패스

- Nano-Scanning Microscope

나노빔을 활용한 실험은 작은 빔사이즈에 의해 1 m의 거리에도 오버샘플링 레이트가 > 10 (빔사이즈 50 nm, 25 keV 기준)으로 확보된다. 결맞는 회절 이미징 (타이코그래피 포함) 기준, 10 nm 미만 해상도가 목표이며 이에 필요한 산란각은 대략 50 mrad (@ 5 keV)이며 이는 1 m 거리를 산정했을 때 대략 50 mm 내경의 빔 패스가 필요하다. 이에, ISO-80 규격으로 빔 패스를 제작하고 엑스선 포톤 에너지가 낮아 짧은 거리에서도 충분히 오버샘플링이 확보되는 경우를 대비해 1 m보다 더 짧은 50 cm, 30 cm의 빔 패스를 추가로 구비한다.

아. 전산체계

(1) 장치 조작 및 데이터 획득



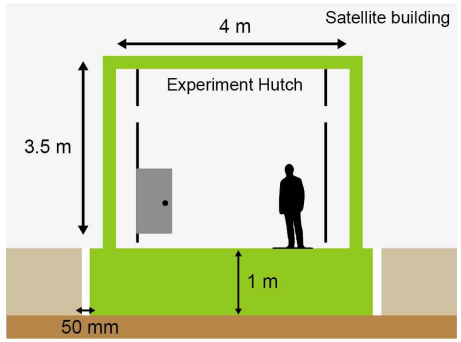
<그림 2.2.10.18> (좌) PAL-XFEL의 장치 컨트롤 인터페이스 화면 (우) 장치 조작 화면

빔라인의 장치 조작 및 데이터 획득은 유저 친화적인 GUI 인터페이스로 구성한다 (<그림 2.2.10.18>). 이는 간단한 조작법으로 장치 조작의 실수를 줄이고 유저에게 장치 조작을 쉽게 이해시킬 수 있으며 장치 관리와 안전에도 직결되는 중요한 요소이다. 또한, 이러한 시스템은 유저들이 필요에 따라 모든 장치 구성을 손쉽게 조작해 적은 수의 인원에도 효율적으로 실험을 수행할 수 있도록 한다.

장치 컨트롤 인터페이스는 CS Studio로 작성하고 누구나 빔라인 장치의 구성과 배치를 한눈에 확인할 수 있도록 <그림 2.2.10.18>의 좌와 같이 구성한다. 그림은 나노프로브 빔라인에서 장치 조작에 대한 모델인 PAL-XFEL NCI-CXI 빔라인의 장치 컨트롤 인터페이스 화면이다. 여기에서 각 장치의 컨트롤은 작동하고 싶은 장치를 클릭해 새로운 장치의 컨트롤 창이 팝업이 되면 버튼을 클릭해 장치를 조작할 수 있다 (<그림 2.2.10.18>의 (우)).

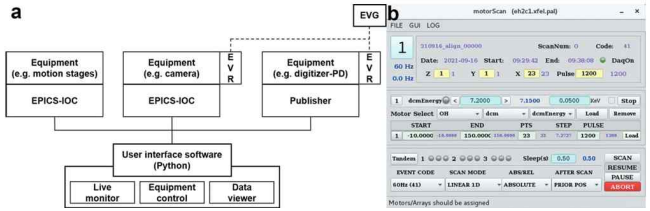
(2) 빔라인 제어 및 DAQ

나노프로브 빔라인에서 빔라인 제어 장소는 이용자들이 걷거나 의자를 끄는 등의 행동에서 발생한 진동이 실험에 영향을 줄 수 있다는 것을 고려하여야 한다. 이에, 나노프로브 빔라인을 제어하는 이용자가 시설에서 일정 거리를 두어야 하며 이를 고려해 빔라인 제어장치는 실험허치에서 슬래브(Slab)가 구분된 장소에서 원격으로 실험장치를 제어할 수 있도록 실험허치와 이격된 컨트롤 룸을 제공한다 (<그림 2.2.10.19>).



<그림 2.2.10.19> 실험허치와 실험 공간 사이 슬래브 구분 도식

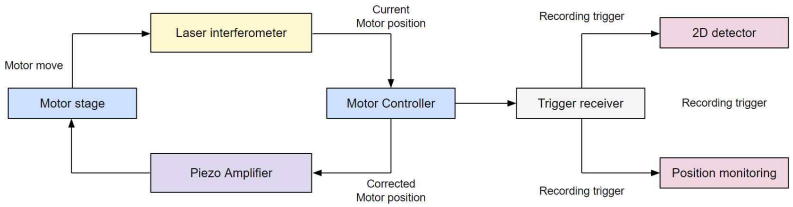
빔라인 제어는 EPICS를 활용하고 모터 스테이지 모션은 Python을 활용해 자체 제작한다. <그림 2.2.10.20>은 PAL-XFEL NCI-CXI 빔라인에서 활용하는 DAQ와 자체 제작 모터 제어 소프트웨어이다. PAL-XFEL의 경우, 60 Hz의 X-선 빔을 보기 위해 각 X-선의 펄스가 각기 다른 타임스탬프로 명명되고 모든 측정 작업이 트리거 신호에 동기화되고 있다 (<그림 2.2.10.20> (a)).



<그림 2.2.10.20> PAL-XFEL의 제어 소프트웨어 예시

나노프로브 빔라인의 경우, 구조는 PAL-XFEL의 제어 시스템과 동일하게 하되, 방사광 펄스의 반복률이 수백 kHz인 것을 고려하여 Event Generator (EVG)를 활용한 트리거의 중앙통제는 차후 프론티어 실험을 위해 트리거 라인만 타이밍 모드에서 받을 수 있도록 준비하고 구축 단계에서는 데이터 측정 시 트리거 통신은 X-선 셔터, 검출기, 변위 측정 센서, 그리고 모터만 동기화시킨다.

모터 스캔 모드는 레스터 스캔, 플라이 스캔을 지원하고 플라이 스캔의 경우 이동 중 모터의 위치와 신호를 기억할 수 있도록 아래와 같은 시스템을 구성한다.



<그림 2.2.10.21> Fly scan 중 데이터 저장 프로세스

플라이 스캔 중 검출기 신호 및 모터 위치 저장의 트리거는 모터 컨트롤러를 활용한다. 이는 레이저 간섭계로 측정된 모터의 위치가 열 이동이나 시스템의 진동 때문에 목표한 위치와 얼마나 차이 나는 지를 모니터링하고 이에 대한 보정 후 검출기로 신호를 측정하기 위함이다.

(3) 데이터 취급/저장/관리

○ 데이터량 예측

- 데이터량 조건

아래는 데이터량 예측에 활용된 실험 예상 조건이다.

· Sample: Resolution target (Tungsten thickness 1 μm 기준)

· 현재 PLS-II coherent photon flux

- 2 × 10^8 photons/s (9C 빔라인 기준, 6 keV)

· 4GSR의 경우, 결맞음 선속을 PLS-II 대비 대략 1,000 배 정도로 가정

- 2 × 10^{11} photons/s (광원 파트 참고)

· Detector

- EIGER 1M 32 bit

- Merlin 256 × 512 24 bit- Maximum frame rate: 1 kHz

· 4GSR-Nanoprobe 1 set 기준

- Overlap ratio: 75% - 1 μm FOV를 제공하기 위한 10^4 scan points (50 nm 빔사이즈)

- 10 μm FOV를 제공하기 위한 10^6 scan points (50 nm 빔사이즈)

- 데이터량 저장량

<표 2.2.10.6>은 4GSR-Nanoprobe beamline에서 EIGER를 활용한 타이코그래피 실험에 활용하는 데이터량을 표시하였다.

<표 2.2.10.6> A 파트에서 기술된 조건에서 이미지 재구축을 위해 활용하는 데이터량 (EIGER)

Data Acquired rate (Maximum resolution)	1,000 Hz
1 File	4.2 MB
Data rate for 1s	4.2 GB
Data size for 1 set	42 GB (1 μm); 4.2 TB (10 μm)

1 μm FOV의 2차원 이미지를 42 GB, 10 μm의 경우 4.2 TB의 데이터가 예상된다. 3차원 이미지의 경우, 대략 60개의 서로 다른 각도에서 촬영된 이미지를 활용한다고 가정하면 총 2.5 TB를 활용한다. 일반적으로 이미지 재구축에 활용하는 데이터 로드를 줄이기 위해 재구축된 이미지에 영향이 없을 정도로 회절 패턴 내 픽셀 데이터 병합을 수행하며, 이는 계산량을 대략 4배에서 16배까지 줄일 수 있다.

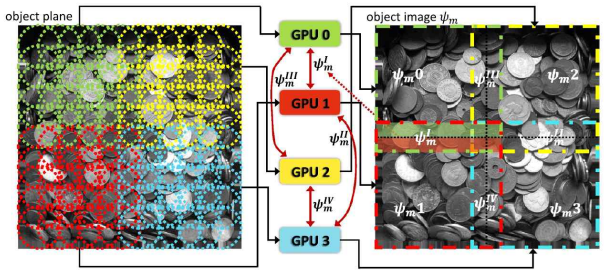
한편, 나노프로브 빔라인에서 고각의 XRD 데이터는 Merlin 검출기를 활용하며 Merline 검출기의 데이터량은 아래 <표 2.2.10.7>과 같다.

<표 2.2.10.7> A 파트에서 기술된 조건에서 이미지 재구축을 위해 활용하는 데이터량 (Merlin)

Data Acquired rate	1000 Hz
1 File	65 KB
Data rate for 1s	65 MB
Data size for 1 set	1 μm 650 MB; 10 μm 65 GB

모든 데이터 저장 양식은 광범위한 데이터 양식을 하나의 파일로 저장할 수 있는 H5 File 저장 양식을 활용하여 데이터 접근성과 범용성을 넓힌다.

(4) 데이터 처리/분석 소프트웨어



<그림 2.2.10.22> 타이코그래피 실험에서 획득한 데이터 처리 및 이미지 재구축 과정

나노프로브의 스캐닝 현미경 방법 중 하나인 타이코그래피는 고해상도의 이미지를 획득할 수 있는 현미경 방법이지만 빠르고 많은 데이터 처리가 필요하다. 여기서 데이터 로드를 분배하기 위해 각 데이터 세트를 나누고 각 세트당 하나의 GPU를 할당하고 이미지를 재구축한다. 각 GPU에서 재구축된 이미지들은 겹치는 영역을 활용해 최종 이미지를 획득하는 과정을 거친다. 이미지 재구축 및 이미지 처리 프로그램은 Python과 Matlab을 활용해 프로그램을 자체 제작해 활용한다.

자. 커미셔닝

(1) 빔라인 커미셔닝 개요와 목표

나노프로브 빔라인의 최종 커미셔닝 목표는 Multi-modal 실험에 활용할 수 있는 안정된 나노빔 제작에 있으며 이를 위해 나노프로브 빔라인의 커미셔닝은 총 3단계로 진행한다. 먼저, 첫 번째 단계에서는 모든 미러 장치와 카메라 장치를 설계한 위치에 설치하고 컨트롤러를 연결 후 빔라인 내 모든 모듈이 정상 작동하는지 확인한다. 특히, 설치한 안전장치의 정상 구동(인터락 등)과 Safety shutter 트리거 및 작동 시간을 확인해 방사선 사고를 예방할 수 있는지 확인하고, FCS (Fast close shutter)의 정상 구동과 Safety shutter가 내려오는 시간을 고려해 진공 사고를 예방할 수 있는지 확인한다. 또한, e-beam deflector Magnetic field를 측정해 만약 빔라인에 전자빔이 삽입될 시 Safety shutter에 막힐 수 있을지 확인한다. 두 번째로 실험허치까지 전달되는 X-선 빔의 선속과 결맞음성을 정량화한다. 빔 선속과 결맞음성을 최종 확인하는 데 활용할 실험은 이중 슬릿 실험을 활용한다. 마지막으로 나노 K-B 미러 최적화이다. 대략적인 미러 정렬은 Knife edge 스캔을 활용하고 정밀한 미러 정렬 및 제작된 빔의 크기와 프로파일 확인은 타이코그래피를 활용한다.

(2) 커미셔닝 세부 항목 및 일정

건축 완공까지는 빔라인 운영을 위한 소프트웨어 및 제어프로그램을 제작 및 개발한다. 이후 건물이 완성되면 장비를 설치하고 정렬하면서 방사선 안전장치의 기능을 점검한다. 최종적인 장비 설치와 정렬이 완료되면 커미셔닝 실험을 통해 빔라인의 최종 성능을 평가한다.

<표 2.2.10.8> 빔라인 커미셔닝 항목 및 일정 요약

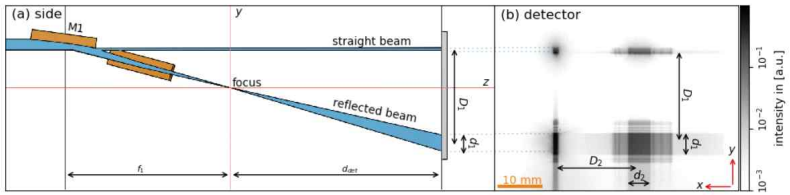
	2023년				2024년				2025년				2026년				2027년			
이미지 재구축 알고리듬 개발					■	■	■													
모터 장치 위치 보정 프로그램 개발							■	■	■	■										
빔라인 제어 프로그램 준비											■	■								
장비 설치 및 정렬													■	■	■	■	■			
방사선 안전장치 기능 점검													■	■	■	■	■			
빔 결맞음 선속 확인 실험																		■	■	■

(3) 커미셔닝을 위한 소프트웨어 개발

빔라인 커미셔닝을 위해 개발되어야 하는 프로그램은 크게 빔라인 제어, 이미지 재구축을 포함한 데이터 분석 도구, 정밀한 측정을 위한 모터 장치의 위치보정으로 나눌 수 있다. 빔라인 제어는 전산 체계 파트에서 서술한 내용대로 개발한다. 현재, PAL-XFEL에서 활용하고 있는 빔라인 제어프로그램을 일부 활용 및 도입하여 개발기간을 최대한 단축시킬 계획이다. 이미지 재구축 프로그램은 현재 PLS-II 9C 빔라인에 구축되어있는 이미지 재구축 프로그램을 기반으로 성능향상 및 multi-GPU를 활용할 수 있도록 프로그램을 개선한다. 마지막으로 소개된 모터 장치 이동 위치보정 프로그램은 현재 국내에서 개발된 내용이 없어 해외 개발 내용(참고문헌 [27, 33])을 참고해 개발해야 하기에 추가적인 개발기간을 할애하여 개발 후 활용할 수 있도록 한다.

(4) 장치 설치 및 정렬

X-선 장치 설치와 정렬 계획은 각 허치 별로 단계적으로 진행한다. 먼저, IVU에서 발생하는 빔의 중앙 영역을 광학허치에 전달하기 위해 Fixed mask, Movable mask 순으로 정렬하며 장치별로 방사선을 새는 곳이 없는지 확인하고 보완이 필요하다면 보완 작업 완료 후 다음 정렬을 수행한다. 이러한 정렬 순서는 방사선 안전을 가장 우선순위로 두기 때문이다. Movable mask의 gap 크기를 확인하고 limiter switch의 위치와 동작 상태를 점검한다. 빔을 실험허치까지 정확하게 이동하는지 확인하기 위해 앞서 이전 파트에서 설명한 빔 위치 및 진단장치를 활용하고 예측한 빔 밝기와 특성을 대략적으로 평가한다. 특히, 진동에 의한 빔 안정성에 대한 정량 평가가 중요하다. 마지막으로 최종적으로 실험허치에 전달된 빔은 <그림 2.2.10.27>과 같은 과정을 통해 최적화 후 빔의 크기와 포톤 선속을 최종 평가한다.



<그림 2.2.10.27> 2D 검출기를 활용한 coarse align 개요

참고문헌

[1] Nature Photonics12.1 (2018): 9-17.

[2] Physical review letters101.15 (2008): 158101.

[3] Nature physics6.2 (2010): 122-125.

[4] Science348.6234 (2015): 530-535.

[5] IScience11 (2019): 356-365.

[6] Nature Electronics2.10 (2019): 464-470.

[7] Lee, Sung Yun, et al. "Nanoscale Three-Dimensional Network Structure of a Mesoporous Particle Unveiled via Adaptive Multidistance Coherent X-ray Tomography."ACS nano(2023).

[8] ACS nano15.3 (2021): 4066-4076.

[9] Nature547.7663 (2017): 328-331.

[10] Nature communications4.1 (2013): 1680.

[11] Science, 376 (2022)

[12] X-Ray Nanoimaging: Instruments and Methods II. Vol. 9592. SPIE, 2015.

[13] Science advances 4.11 (2018): eaau4548

[14] Michelson, Aaron, et al.; Science 376.6589 (2022): 203-207.

[15] ACS nano 9.7 (2015): 6978-6984.

[16] Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States). Advanced Photon Source (APS), 2007.

[17] Physical Review Research 4.3 (2022): L032012.

[18] Advances in Computational Methods for X-Ray Optics IV. Vol. 10388. SPIE, 2017.

[19] Shi, Xianbo. "Beam coherence control and diffraction limited focusing for APS-U beamlines－layout design and optics requirements." (2016).

[20] Physics Reports 152.1 (1987): 1-71.

[21] Advances in X-Ray/EUV Optics and Components X. Vol. 9588. SPIE, 2015.

[22] Sub-20-nrad Stability of an LN2-Cooled Vertical-Offset Double-Crystal Monochromator

[23] Journal of Synchrotron Radiation29.1 (2022): 194-201.

[24] Optical Engineering54.5 (2015): 054101-054101.

[25] Optics express21.11 (2013): 13592-13606.

[26] Journal of Synchrotron Radiation29.1 (2022): 194-201

[27] Review of Scientific Instruments 90.8 (2019).

[28] Scientific Reports12.1 (2022): 5334.

[29] Optics express28.4 (2020): 5069-5076.

[30] Sci. Rep.5:3300(2019).

[31] Opt. Exp.27:19573(2019).

[32] Optics Express30.23 (2022): 42308-42322.

[33] Optical Engineering 54.5 (2015): 054101-054101.

[34] Journal of Synchrotron Radiation27.4 (2020): 912-922.

[35] Diamond Light Source Proceedings1.MEDSI-6 (2010): e46.

[36] "Mechanical Design Progress of the In Situ Nanoprobe Instrument for APS-U." MEDSI2010, Chicago, IL, USA(2021).

[37] Advances in X-Ray/EUV Optics and Components X. Vol. 9588. SPIE, 2015.

2.2.11 데이터센터

가. 소개

4GSR은 초기 10기의 빔라인을 기준으로 연간 약 1.8 PB가 생성될 것으로 예측한다. 현재 약 40기의 빔라인을 보유하고 있는 PLS-II가 약 1.4 PB인 것을 비교하면 4GSR 빔라인 1기가 생산해 내는 데이터양이 이전 세대보다 비약적으로 증가한다는 사실을 알 수 있다. 이러한 차이는 4GSR의 밝은 광원과 함께 새롭게 도입될 장치 및 실험기법들이 이전 세대의 가속기에 비해 짧은 시간에 동안 많은 양의 데이터를 생성해 내기 때문에 발생한다. 해외 각국의 4세대 방사광가속기 업그레이드 계획서에 따르면 지금으로부터 25년 후에는 최소 10 PB에서 최대 100 PB까지 증가할 것으로 예측한다.

데이터양의 급격한 증가와 빠르게 생성되는 데이터는 단순히 하드웨어적인 저장공간을 크게 확보하는 것으로 해결되지 않는다. 유럽 CERN의 WLCG 데이터센터의 경우 연간 80 PB의 데이터가 발생되는데, 112명의 인적자원 및 연간 524억의 예산이 투입될 정도로 섬세한 관리가 필요하다. 또한 이전 세대보다 향상된 데이터 출력 속도만큼 빠른 속도로 데이터를 처리하여 이용자에게 시각적인 정보를 제공할 수 있어야 하며, 안정적인 데이터 제공을 위한 시스템이 마련되어야 한다. 이러한 문제를 인식한 해외 대형시설 연구소들은 약 10년 전부터 대비책을 마련하고 있다.

국내 4GSR 또한 향후 지속해서 늘어날 빔라인의 숫자들을 고려한다면 해외 가속기들에 연간 데이터 생산량에 쉽게 도달할 것이며, 해외에서 우려하고 있는 사항들이 우리에게도 현실이 될 가능성이 크다. 4GSR 데이터센터 설립은 앞서 언급된 문제점을 해결할 것이며, 더 나아가 4차산업혁명의 핵심기술인 인공지능, 빅데이터 등 디지털 기술로 촉발되는 초연결 기반의 지능화 혁명을 이끌 데이터 경쟁의 원천을 만들어 갈 것이다.

나. 데이터센터 개요

4GSR 캠퍼스에 도입될 데이터센터의 주요 목적은 아래와 같다.

1. 대규모 데이터를 안정적으로 저장할 수 있는 하드웨어 및 소프트웨어 구축

2. 대규모 데이터를 체계적으로 정리하는 시스템 구축

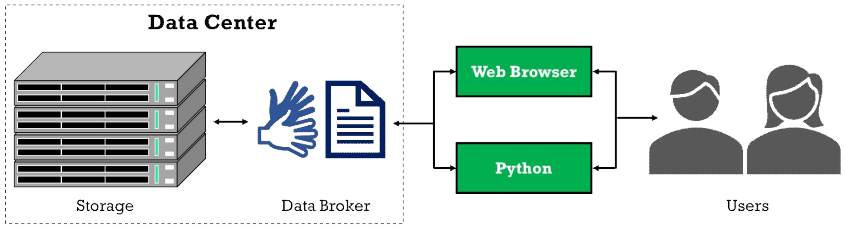
3. 방사광가속기 사용자에게 온라인으로 데이터를 빠르고 안전하게 제공

다. 스토리지 시설

초기 4GSR이 운영되는 시점에서의 총 30 PB 데이터를 저장할 수 있도록 하드웨어가 구축된다. 정전과 같은 전원공급에 문제가 발생했을 시, damage를 최소화하기 위해 스토리지와 네트워크에 UPS (uninterrupted power supply)를 설치하여 안정적으로 서버를 다운시킬 수 있도록 설계된다. 또한 소프트웨어와 하드웨어 방화벽을 이중으로 설치하여 내부 및 외부로부터의 데이터 접근에 대한 보안을 강화한다.

라. 데이터 제공 서비스

4GSR에서 실험을 수행하는 그룹 단위에 실험실 혹은 연구자는 고유의 UHD (user home directory)를 보유하게 되며, 모든 4GSR 머신을 포함한 클라우드에서의 접근할 수 있도록 NFS (network file system)를 적용한다. UHD에 저장된 파일에 대한 읽기, 쓰기 권한을 부여받게 되며, 4GSR 외부로부터의 접근은 데이터 브로커를 통해 접근할 수 있다. 데이터 브로커로부터 제공되는 파일은 웹 브라우저를 통해 데이터 전송기능을 사용할 수 있으며, 빠른 전송 속도를 원하는 이용자에게는 Python 환경에서 대량의 chunk를 한 번에 병렬 내려받을 수 있도록 구현할 계획이다. 또한 10기의 빔라인 GUI에서도 데이터센터에 접근할 수 있도록 디자인된다. (<그림 2.2.11.1> 참조)



<그림 2.2.11.1> 데이터센터 모식도

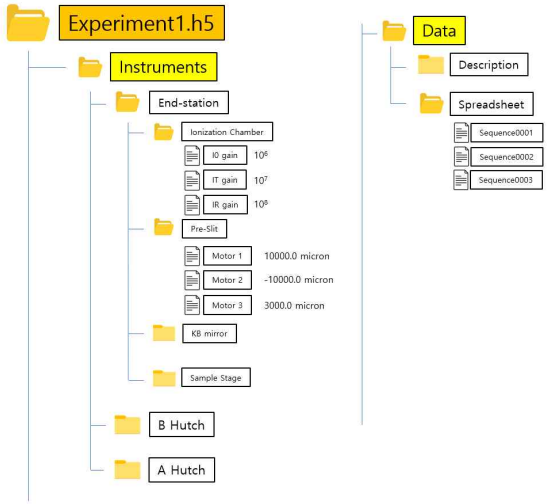
(1) 기대효과

PLS-II의 저장방식은 각 빔라인의 로컬 스토리지에 데이터를 보관하는 방식을 사용하였다. 이용자가 데이터를 찾기 위해서는 로컬 스토리지에 메모리 스틱을 통해 운반하거나, 구글 드라이브, One Drive, 혹은 Box folder와 같은 클라우드 서비스를 이용해야만 했다. 이 경우, 로컬 스토리지나 클라우드에 용량이 한계에 다다르면 이전에 데이터를 영구 제거하는 경우가 발생해 데이터를 영구적으로 보존하지 못했다. 또한 각 빔라인별로 로컬 스토리지가 배치되어 있어 데이터를 찾아야 하는 이용자 관점에서 매번 해당 로컬 스토리지에 접근해야 하는 불편함을 느끼게 하였다. 4GSR 대용량의 스토리지 도입과 NFS 적용은 archiving을 지원하여 데이터를 영구 손실하는 경우를 예방하고, 여러 빔라인에서 실험한 자료를 하나에 UHD에 저장해 통합적으로 관리할 수 있다.

데이터센터의 전문화된 데이터 전송기능은 이용자들에게 단순한 데이터 제공 기능을 넘어서, 빅데이터 과학에서 매우 중요한 임무를 맡게 된다. 빠른 속도로 쏟아지는 데이터를 높은 정밀도로 실시간으로 처리하고 분석하여 이용자가 확인할 수 있는 시스템을 구축하기 위해서는 머신러닝 기법을 사용해야 한다. 빔라인 데이터 특성상 다양한 변수가 데이터에 섞여 들어가는 경우가 많아서 일반적인 알고리즘으로는 정교하게 처리된 데이터를 기대하기 어렵기 때문이다. 머신러닝의 높은 정확성을 확보하기 위해서는 104개에서 많게는 108개에 이르는 높은 품질의 훈련 데이터가 필요하다. 4GSR의 데이터센터는 강력한 검색 엔진을 제공하여 대량의 데이터를 신속하게 제공하여 머신러닝 기반의 고도화된 DAQ 시스템을 구축할 수 있도록 도움을 줄 것이다.

마. 데이터 계층화

방사광가속기는 저장링부터, Front-End, 광학허치, 실험허치에 이르기까지 다양한 장치들의 파라미터 정보가 있다. 필수 입력 정보들을 제외한 나머지 파라미터들은 이용자 및 빔라인 매니저가 특별한 관심을 두고 기록하지 않는다면 대부분을 잃어버린다. 이를 방지하기 위해 4GSR에 조작에 관련된 모든 정보와 수집된 데이터를 측정된 데이터와 함께 계층화하여 <그림 2.2.11.2>와 같이 저장한다. 사용될 파일의 포맷은 HDF5이며 운영체제와 무관하게 사용할 수 있다는 장점을 갖고 있다.



<그림 2.2.11.2> HDF5 포맷을 이용한 데이터 계층화 예시

(1) 기대효과

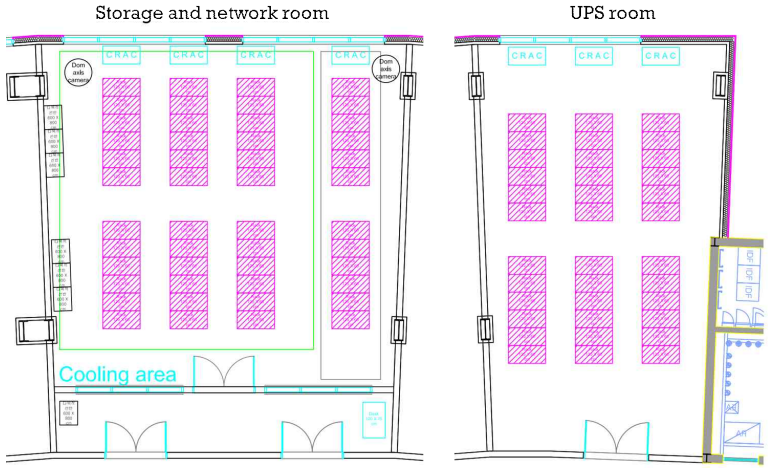
대부분의 대형 과학 시설은 제어 파라미터에 따른 결과를 예측하기 힘들거나, 제어할 수 있는 파라미터들이 너무 많아 사람의 직감만으로 조정하기 어려운 경우가 많다. 이러한 추세를 반영하듯 최근 대형 과학 시설에서는 머신러닝 기반의 오토파일럿에 관심을 두고 있다. 오토파일럿을 구현하기 위해서는 앞서 언급한 머신러닝 예측 모델을 훈련 시켜야 하는데, 예측 모델을 만들기 위해서 104회 이상을 실제로 운행한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 대부분 실험에서 얻은 정보를 통해 버츄얼 머신을 구현하여 대량의 훈련 모델을 생성한 후 예측 모델을 훈련하는 경우가 많다. 실제로 K-STAR의 TOKAMAK을 운행하기 위한 버추얼 머신을 구현시키기 위해, 사용한 데이터는 약 104개인데 이는 약 5년간의 세월에 걸쳐 수집된 데이터이다. 4GSR에 도입되는 계층화된 데이터는 각 실험에 대한 상세한 기록이 담겨 있으므로, Phase 1 이후에 기록은 계속 쌓아 둘 수 있어 버추얼 머신을 구현할 수 있는 자료를 공급해 줄 수 있다.

계층화된 데이터는 앞서 언급한 데이터 제공 서비스 구현에도 큰 도움을 준다. HDF5로 저장된 파일에서 이용자가 필요한 정보만을 검색하여 대상을 추출할 수 있기 때문에 앞서 설명한 데이터 브로커를 통해 원하는 데이터를 받을 수 있으며, 범주화된

각각의 데이터는 상세하게 검색할 수 있는 강력한 엔진을 개발할 때도 큰 도움을 줄 것이라 예상된다.

바. 항온/항습 시설

스토리지와 네트워크의 기계적 안정성을 확보하기 위해 데이터센터 내 항온/항습 기능은 매우 중요한 요소이다. 기계에서 발생하는 열을 제어하고 습기를 차단하여 하드웨어의 고장을 최소화하고, 항온 기능과 저장소에서의 작업환경을 분리하기 위해 <그림 2.2.11.3>의 Storage and network room과 같이 출입문으로부터 약 3~4 m의 공간을 두어 이중 구조로 설계한다.



<그림 2.2.11.3> 데이터센터 스토리지, 네트워크, 그리고 UPS 장치를 배치한 방의 CAD 도면

참고문헌

[1] Tekin Bicer et al., 2017 IEEE 13th International Conference on e-Science (e-Science), Auckland, 59 (2017).

[2] Chunpeng Wang, et al., Small, 1802291 (2018).

[3] Seo, J. et al., Nuclear Fusion 61, 106010 (2021).

[4] Seo, J. et al., Nuclear Fusion 62, 086049 (2022).

[5] T. Morris, On-the-fly optimization of synchrotron bealines using machine learning, Brookhaven National Laboratory, BNL-223993-2023-COPA (2022).

[6] B, Basy and M. Rakitin, Combining diagnostics, modeling, and control systems for automated alignment of the TES beamline, Brookhaven National Laboratory, BNL-224016-2023-JAMM (2022).

[7] M. Rakitin et al., J. Phys.: Conf. Ser. 2380 012100 (2022).

3장. 방사광가속기

3.1 가속장치 설계 (Accelerator Design)

3.1.1 개요 (Overview)

가. 4GSR

4GSR (4세대 원형 방사광가속기)의 특징은 3GSR (3세대 방사광가속기)에서 한 cell에 운영한 2개의 이극 자석(DBA)이나 3개의 이극 자석(TBA)의 수를 5~9개까지 더 많이 늘림으로써 저장링의 emittance를 3GSR보다 10~100배 가량 줄이는 것이다. 이 개념은 이미 1993년에 발표되어 SLS (스위스) 설계 때 시도되었던 개념으로 2,000년을 지나며 3세대 방사광가속기가 성공적으로 운영되면서 그 기술이 무르익었고 MAX-IV (스웨덴)에서 선도하여 compact 진공 챔버 기술과 small aperture magnet 기술을 처음으로 저장링에 적용함으로 본격적인 4GSR 시대의 도래를 알렸다.

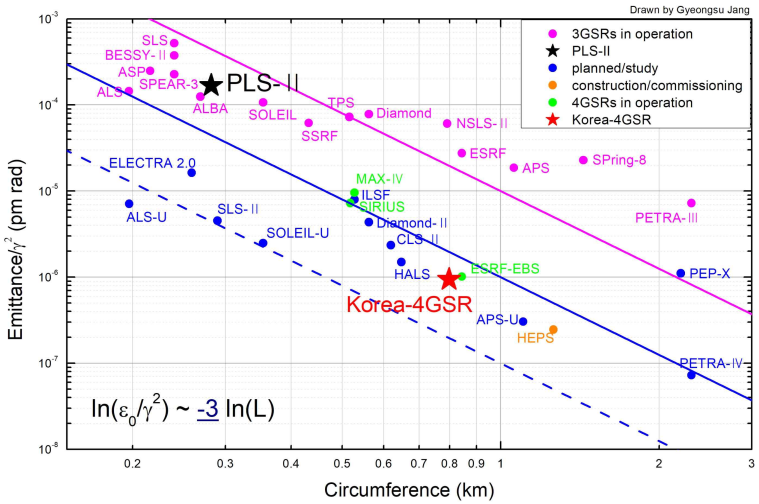
첫 번째 4GSR로써 MAX-IV가 성공적으로 운전을 시작한 후 그 뒤를 이어 SIRIUS (브라질)가 최근 시운전에서 전자빔이 저장링에 저장되었고 계속해서 그 성능 검증을 하고 있다. 그리고 성능향상 사업인 ESRF-EBS는 빠른 시일 내 시운전을 마무리하였고 그 성능을 검증하여 20년 8월부터 이용자 서비스를 시작하였다. 다른 4GSR 건설 프로젝트로 APS-U (미국), ALS-U (미국) 등이 기존 3세대 방사광가속기를 4GSR로 업그레이드 추진하고 있으며 HEPS (중국) 등도 새로운 4GSR 건설을 진행하고 있다. 그 외에도 많은 기존 방사광가속기가 4GSR로 업그레이드를 계획하고, 새로운 4GSR 프로젝트를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

<그림 3.1.1.1>에서는 3세대 방사광가속기와 4GSR의 저장링 둘레에 따르는 성능분포를 보여준다. 저장링의 emittance는 (수식 3.1.1.1)에서와 같이 전자빔의 에너지 제곱에 비례하고 저장링 둘레 (저장링 이극 자석의 개수) 세제곱에 반비례하여 주어진다.

$$\epsilon \sim F(lattice)\frac{E^2}{C^3} \quad \text{(수식 3.1.1.1)}$$

당연히 <그림 3.1.1.1>에서 보듯이 저장링 성능은 (emittance) 저장링 둘레가 클수록 좋아진다. 하지만 MAX-IV가 처음으로 시도한 더 많은 수의 이극 자석을 설치하는 multi-bend lattice의 성공적인 운전으로 저장링 emittance를 기존 3세대 방사광가속기보다 10배 이상 줄였다. 그 뒤를 이어 ESRF-EBS (프랑스 ESRF의 업그레이드 머신)에서 이극 자석 내에 종 방향으로 자기장의 변화를 도입하였고 (longitudinal gradient dipole), 여기에 더해서 APS-U는 reverse bend 개념을 추가해 emittance를 기존 3세대 방사광가속기보다 50배 이상 줄였다. SLS-2에서도 이러한 개념을 고려하여 emittance를 50배 이상 줄였다.

국내에서도 포항가속기연구소에서 선행연구를 통하여 장치의 많은 도전적 측면이 있기는 하지만 최소 emittance 실현을 빔물리 측면에서 검토하였는데 <그림 3.1.1.1>에서 검정색 점선 라인에 해당하는 성능을 확보하였다. 하지만 이 설계에는 많은 장치 측면에서 도전적인 모험이 따를 수 있어서 좀 더 안정적 장치 실현을 위해 파란색의 성능을 보이는 선에서 결정하였다. 저장링의 둘레가 281 m인 PLS-II와 비교하면 새로운 한국의 4GSR는 그 둘레가 800 m로 커졌기 때문에 100배 이상의 향상된 성능을 기대할 수 있게 되었다.



<그림 3.1.1.1> 3세대 방사광가속기와 4GSR의 저장링 둘레에 따른 성능분포

나. 주요 변수 선정

초기 저장링 설계에서 주요 변수 선정이 매우 중요한데, 빔 에너지 등 주요 변수들은 여러 요소들이 복잡하게 엮여 있어 단편적으로 그 목표값을 설정하기가 쉽지 않다. 그러므로, 여러 측면을 최대한 모두 고려하고 주변 환경(PLS-II와의 역할 분담)과 예상되는 예산 등을 고려하여 합리적인 선택을 하여야 한다.

(1) 전자빔 에너지의 선택

우선 전자빔과 관계되는 빔물리 인자들을 요약해 보면 다음과 같다. (E : 전자빔 에너지, B : 이극 자석 자기장 세기, n : 언듈레이터 higher harmonics, λ_u : 언듈레이터 주기)

- Emittance : $\sim E^2$
- 요구되는 RF power : $\sim E^4$
- 자기장 field gradient : $\sim E$
- Instability, IBS and Touschek lifetime : 에너지가 높으면 유리
- 이극 자석에서의 광자빔 발생 에너지 [keV] : $\sim BE^2$
- 언듈레이터에서의 광자빔 발생 에너지 [keV] : $\sim nE^2/\lambda_u$

주어진 저장링 둘레에서는 에너지가 작으면 더 낮은 emittance를 확보할 수 있고, 요구되는 RF power도 훨씬 낮으며 자기장 세기도 선형적으로 낮아 운영비 측면에서는 유리하다. 하지만 빔 instability, intra-beam scattering (IBS) 그리고 Touschek lifetime 측면에서는 에너지가 높으면 유리하다. 위의 인자를 고려하면 어느 정도 방향을 설정할 수 있는데, APS-U의 경우는 energy를 7 GeV에서 6 GeV로 줄임으로써 emittance와 빔전류 측면에서의 개선 효과로 휘도를 오히려 36% 증가시켰다. 일반적으로 전자빔의 에너지는 광자빔의 사용 에너지 영역이 중요하게 고려되어야 하는데 높은 광자빔 에너지를 위해 전자빔의 에너지를 높이는 것이 유리하다. 하지만 최근까지의 3세대 방사광가속기의 경험으로 super-bend를 사용하여 (이극 자석의 길이를 줄이고 자기장을 높여 높은 광자빔 에너지 발생) 이극 자석에서도 전자빔의 에너지 3 GeV에서 20~30 keV의 광자빔이 발생하고 있으며 언듈레이터에서도 언듈레이터 주기를 줄이고 더 높은 하모닉스를 사용하여 30 keV까지 높은 휘도의

광자빔이 발생하고 있다. 800 m의 저장링 둘레를 고려하여 계산하면 30 keV 까지는 4 GeV의 저장링 에너지가 6 GeV 저장링 에너지보다 휘도가 더 높다. 물론 높은 자장의 wiggler를 사용하면 4 GeV에서도 100 keV까지 광자빔을 활용할 수 있다. 저장링 크기에 제한이 없다면, 큰 둘레에 높은 전자빔 에너지 (예를 들면 6 GeV) 설비가 더 높은 성능을 낼 수도 있지만, 이 경우는 구축 및 운영을 위해 더 많은 예산이 요구된다.

(2) 전자빔 전류의 선택

빔전류는 높으면 높을수록 광자빔의 측면(flux와 brilliance)에서는 유리하다. 하지만 높아진 광자빔 power를 저장링의 챔버와 빔라인의 optics에서 안정적으로 다룰 수 있어야 한다. 또한, RF power도 충분히 사용할 수 있어야 한다. 전 세계 3세대 저장링 3 GeV의 설비들에서 500 mA 운전을 확보하였기 때문에 4 GeV, 400 mA의 빔전류는 크게 도전적이지 않다. 그래서 multi-bunch 모드로는 400 mA가 빔전류의 목표이며, 이 경우는 NRF system의 10~12개 모듈이면 가능하고 3개의 직선구간(straight section)을 필요로 한다. 시분해 실험을 위해서는 hybrid 모드를 고려하는데 구체적으로는 393 mA + 7 mA (single bunch)를 고려한다. 이때 single bunch의 시간 갭은 300 ns 이상이 되도록 하여 충분히 시간 분해 실험이 가능하도록 지원하고자 한다.

(3) RF 운전 주파수의 선택

4GSR에서 emittance가 작아져 충분한 빔 lifetime을 확보하여야 하는데 이를 위해 낮은 저장링 RF의 주파수를 사용하여 bunch 길이를 증가시키고 있다. 하지만, 이 경우는 많은 bunch 수를 채울 수 없어서 한 bunch에 채우는 전하량이 그만큼 커져야 하고, 이를 고려하여 더 효과적인 주파수를 선택해야 한다. 여기에 더해서 harmonic cavity로 bunch 길이를 어느 정도 선까지는 늘릴 수 있는 점도 고려하여 저장링 RF 주파수를 선택한다. 일반적으로 저장링 RF 주파수는 500 MHz를 많이 선택하기 때문에 관련 파워 소스나 장비들을 쉽게 확보할 수 있다. 그리고 4GSR의 주요 장비를 PLS-II와 공유한다면 훨씬 더 안정적인 장치 운영을 할 수 있기 때문에, 이미 충분히 경험이 쌓였고 안정적으로 운영하고 있는 500 MHz 저장링 RF 시스템을 고려한다. 여기에 더해서 1.5 GHz bunch lengthening cavity를 고려하여 필요시 bunch 길이를 15~20 mm까지 늘여 원하는 빔 lifetime을 확보할 계획이다. 여기에 맞춰 부스터는 같은 주파수 500 MHz RF 시스템을 사용하며 injector linac은 multi-bunch injection이 가능하도록 정수배인 3 GHz를 선택한다.

(4) 입사기의 선택 (선형가속기 vs 부스터)

저장링에 전자빔을 입사하기 위해서는 에너지를 증가시켜야 하는데 이를 위한 옵션으로는 선형가속기와 부스터가 있다. MAX-IV, SLiT-J, SPS-II의 경우는 full energy linac을 인젝터로 사용하면서 FEL 빔으로도 사용하려 하고 있고, SPring-8-II의 경우는 기존 SACLA의 linac 장치를 활용하여 full energy 인젝터를 계획하고 있다. 그 외에는 모두 부스터를 사용하여 건설비용, 운영비용은 줄이고 입사빔의 emittance는 더 낮게 사용하고 (특히 수직 방향의 빔사이즈는 부스터가 훨씬 작다.) 입사빔의 에너지 안정도를 확보하고 있다. 4GSR은 이러한 장점을 취하고 이미 PAL-XFEL이 독립적으로 잘 운영되고 있기 때문에 부스터 옵션을 선택하였다. 여기에 더해 향후 저장링이 더 낮은 emittance로 업그레이드 시, 부스터도 이에 맞게 업그레이드하면 여전히 좋은 입사기로 활용할 수 있다. (아주 낮은 emittance로 업그레이드 시 on-axis injection이 필요할 수도 있는데 이 경우 부스터는 accumulator ring 역할도 할 수 있다. HEPS 참고)

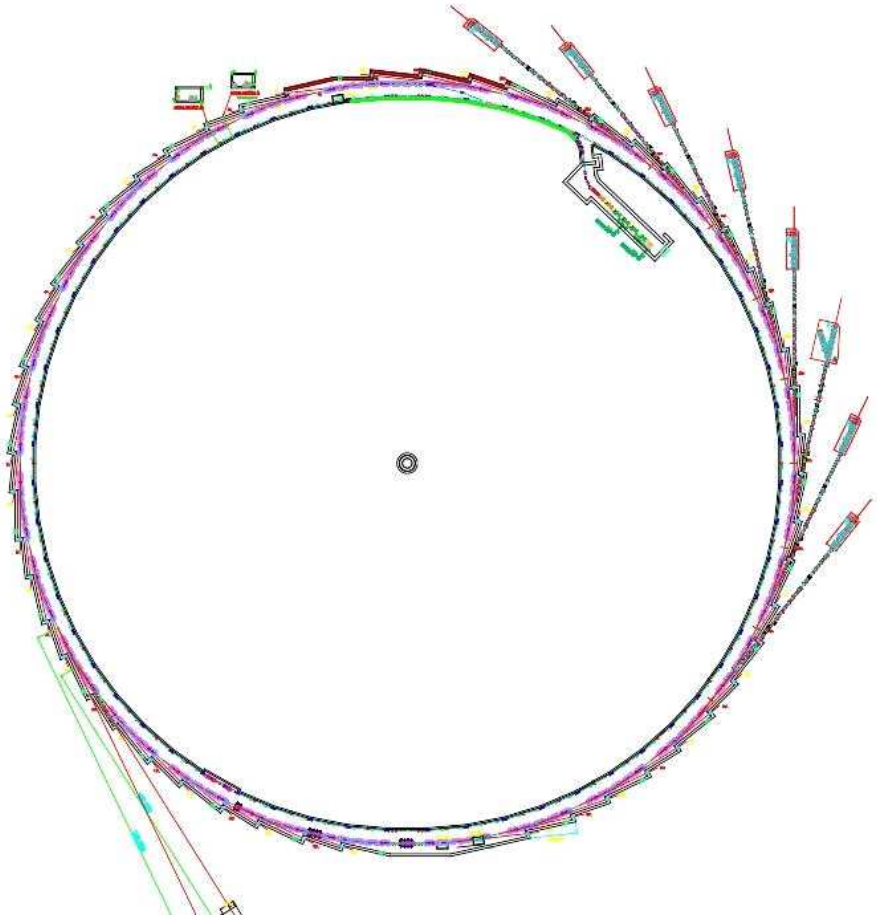
다. 4GSR 방향

4GSR은 10~30 keV 광자빔에 세계 최고의 경쟁력을 갖고, 100 keV까지도 광자빔을 발생하여 방사광 이용자가 최고의 양질 광자 빔을 제공받을 수 있도록 한다. 이를 궁극적인 목표로 하고 약속된 일정에 이용자가 목표로 한 빔을 활용할 수 있도록 검증된 기술을 활용하여 장치를 개발하는 것이 주된 방향이다. 이를 위해 빔물리 측면에서는 깊이 있는 연구로 비선형 효과를 충분히 관리 조정하여 빔의 안정한 영역을 충분히 확보하고, 장치 측면에서는 off-axis injection 등 충분히 검증된 기술을 추구한다. 방향을 간단히 요약하면 “10~30 keV 광자빔 영역에서 세계 최고의 경쟁력을 갖추는 방사광가속기를 깊이 있는 빔 물리 연구 그리고 검증된 기술로 예정된 일정에 이용자에게 빔을 제공하는 것이다.”

라. 4GSR 변수

앞에서 요약한 내용을 토대로 기본 목표로 하는 변수와 전체 윤곽을 정리하였다. <그림 3.1.1.2>는 4GSR의 전체 윤곽을 보여준다. 200 MeV 인젝터 선형가속기, 4 GeV 부스터, 그리고 4 GeV 800 m 저장링으로 구성되어 있으며 부스터와 저장링은 같은 터널에 설치된다. 빔라인은 총 52기 설치가 가능하며 필요시 canted ID로 총 60기까지

빔라인 설치가 가능하다. 28개의 cell 중 하나는 injection 영역, 3개는 RF 설치 영역으로 총 4개의 직선구간을 제외하면, 24개의 직선구간을 삽입 장치 설치에 사용할 수 있다. 주요 변수들은 <표 3.1.1.1>에 소개되었다. Emittance는 60 pm를 실현하였고 round 빔 모드에서는 40 pm까지 emittance를 줄일 수 있다. 빔 전류는 400 mA 운전을 목표로 한다. 입사기법은 이미 충분히 검증된 고전적인 4개의 kicker 시스템을 사용한다. 하지만 추후 업그레이드를 대비하여 R&D로 nonlinear injection kicker도 병행하여 고려한다.



<그림 3.1.1.2> 4GSR. 200 MeV 인젝터 Linac. 4 GeV 부스터 및 800 m 저장링으로 구성

<표 3.1.1.1> 4GSR 주요변수 (General Parameter)

Parameters	Values
Energy / GeV	4
Number of cells	28
Straight sections: no & length / m (ID straight sections, high-beta straight sections)	26 / 6.06, 2 / 5.40
Ring circumference / m	799.297
Natural emittance / pm rad	62
Regular hor/ver @ coupling	58 / 6 @ 10%
IBS (400 mA) hor/ver @ coupling	80 / 8 @ 10%
Diffraction limited source for	l > 1.7 / 0.365 nm
Energy spread / %	0.126
Bunch length mm	3.6 (without HC) / 14.4 (with HC)

<표 3.1.1.2> 고주파 주요변수 (RF parameter) 등

Parameters	Values
RF frequency / MHz	499.593
# cavities / total voltage	10 / 3.5 MV
# buckets: total / gap	1332 / 308
Harmonic RF system	3rd, active, NC
Average current / mA	400
Lifetime / h (ideal lattice)	7.30 (flat) / 29.22 (round)
Top up operation	Yes
Injection scheme	4 kicker bump
Beam pipe (in achrom.) / mm^2	D: 24(H)*18(V) @ ID straight section
Max. bending magnet field / T	2
Max. quadrupole grad. T/m	55
Max. sextupole strength T/m^2	1737
Max. octupole strength T/m^3	120,083

3.1.2 저장링 설계 (Storage Ring Design)

가. 4세대 원형 방사광가속기 주요 이슈

현재 nm order의 beam emittance를 갖는 3GSR의 경우, 한 cell에 2개의 휨 자석을 갖는 double-bend achromat (DBA) 또는 3개의 휨 자석들을 갖는 triple-bend achromat (TBA) 구조를 갖는다. 반면, 수십 pm의 낮은 emittance를 갖는 4GSR의 경우, emittance를 낮추기 위해 다수의 이극 자석들을 배치한 multi-bend achromat (MBA) 구조를 갖는다. 4GSR의 경우 많은 이극 자석들을 배치함으로 인해 빔의 선형 동역학이 불안정해지는데, 이를 완화하기 위해 강한 세기를 갖는 사극 자석들을 여러 개 배치하게 된다.

개별 사극 자석의 세기는 normalized strength $K_1 = \frac{1}{B\rho}\frac{\partial B_y}{\partial x}$로 주어진다. B_ρ는 beam의 rigidity이고 $\frac{\partial B_y}{\partial x}$는 curvilinear 좌표계에서 수평 방향에 대한 수직 자장의 gradient이다. 사극 자석을 지나는 빔의 에너지가 $\delta = dp/p$만큼의 deviation이 있을 때, 사극 자석의 유효 세기는 $K = \frac{K_1}{1+\delta}$가 된다. 육극 자석 요소에 의해 조정되지 않은, 사극 자석 요소에 의한 chromaticity인 natural chromaticity는 저장링에서 다음 (수식 3.1.2.1)과 같은 값을 갖는다.

$$\xi_0 \approx -\frac{1}{4\pi}\oint K_\beta\, ds \quad \text{(수식 3.1.2.1)}$$

최적의 lifetime을 달성하고 microwave instability에 의한 빔 불안정성을 피하는 등의 이유로 chromaticity는 chromatic sextupole에 조정되어야 하고, positive momentum compaction factor를 갖는 저장링의 경우 그 값은 0 혹은 0보다 약간 큰 값을 갖는다.

강한 사극 자석의 사용은 natural chromaticity를 크게 만들고, chromaticity를 조정하기 위해 강한 육극 자석이 사용되어야 한다.

Chromaticity correction 이후의 동일한 길이 l_s를 갖는 chromatic sextupole들의 세기와 dispersion의 관계는 아래 (수식 3.1.2.2), (수식 3.1.2.3)으로 주어진다. 이때 수식은 목표 chromaticity가 0이라는 가정에서 계산한 결과이다.

$$m_1 = -\frac{1}{\eta_{x1}}\frac{4\pi}{l_s}\frac{\xi_{x0}\beta_{y2}+\xi_{y0}\beta_{x2}}{\beta_{x1}\beta_{y2}-\beta_{x2}\beta_{y1}} \quad \text{(수식 3.1.2.2)}$$

$$m_2 = +\frac{1}{\eta_{x2}}\frac{4\pi}{l_s}\frac{\xi_{x0}\beta_{y1}+\xi_{y0}\beta_{x1}}{\beta_{x1}\beta_{y2}-\beta_{x2}\beta_{y1}} \quad \text{(수식 3.1.2.3)}$$

여기서 m_1, m_2는 두 chromatic sextupole을 표시하며, η_x는 dispersion이고, ξ_{x0}, ξ_{y0}는 각각 수평, 수직 natural chromaticity이며 β_x, β_y는 각각 수평, 수직 beta 함수이다. (수식 3.1.2.2), (수식 3.1.2.3)에서 알 수 있듯이 chromaticity correction 이후의 chromatic sextupole의 세기는 natural chromaticity에 비례하고 육극 자석 위치에서의 dispersion에 반비례한다.

Single particle dynamics 측면에서 MBA 구조의 특성은 하나의 cell이 여러 개의 unit cell로 구성되어 있다는 것이다. Unit cell 내의 beta 함수값은 theoretical minimum emittance (TME)을 만족하는 값에 가깝게 설정되어 있어 MBA 구조를 활용하면 한정된 geometry에서 최소한의 emittance를 갖는 lattice를 디자인할 수 있다. MBA 구조의 unit cell은 최소 1개의 이극 자석, 사극 자석, 육극 자석을 포함한다. 저장링의 비선형성을 나타내는 nonlinear driving term 들은 동일한 unit cell을 이동하며 하나의 cell이 끝나는 지점에서 high-order achromat 특성을 통해 상쇄된다. Unit cell은 작은 값의 dispersion을 갖고, 따라서 강한 chromatic sextupole이 필요하다. 강한 chromatic sextupole로 인해 야기되는 무시할 수 없는 크기의 nonlinear driving term들을 상쇄하기 위해 일반적으로 zero-dispersion 위치에서 geometric sextupole도 사용된다.

Hybrid MBA (HMBA) 구조는 MBA 구조를 바탕으로 변형된 구조로써 cell 당 2개의 dispersion bump를 만들고 dispersion bump에 chromatic sextupole magnet을 위치시켜서 chromatic sextupole magnet의 세기를 낮춘다. Geometric sextupole magnet은 일반적으로 사용되지 않는다. Dispersion bump의 존재로 인해 emittance는 MBA 구조에 비해 커지지만 약한 세기의 육극 자석이 사용되므로 MBA 구조에 비해 약한 비선형적 성질을 갖고, 이는 저장링이 보다 큰 dynamic aperture를 갖게 한다. 주요한 nonlinear driving term 들은 cell 내에서 두 dispersion bump 사이의 $-\mathrm{I}$ transformation 조건으로부터 상쇄된다.

일반적으로 MBA 구조는 HMBA 구조에 비해 넓은 momentum aperture를 갖고 HMBA 구조는 MBA 구조에 비해 넓은 dynamic aperture를 갖는다. Momentum

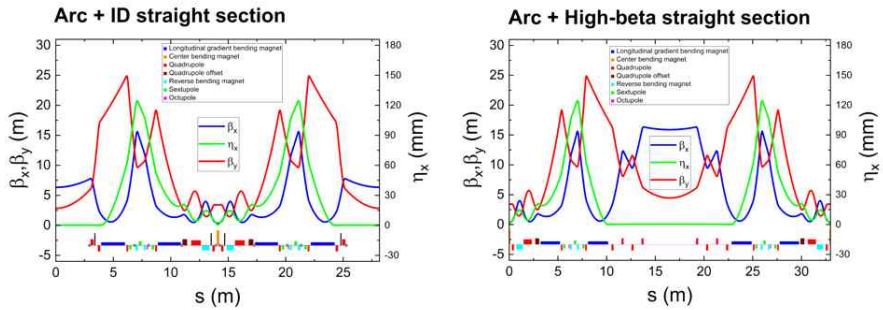
aperture는 Touschek lifetime 계산에 필요한 input인데, Touschek lifetime은 momentum aperture 넓이의 세제곱에 비례하고 저장링 에너지의 세제곱에 비례한다. 최적화 작업을 통해 momentum aperture를 MBA 구조와 비슷한 수준으로 키운다면 중-고에너지 영역(4~6 GeV)의 4GSR은 HMBA 구조에서 MBA 대비 넓은 dynamic aperture와 운전에 적합한 수준의 충분히 긴 Touschek lifetime을 가질 수 있다.

4GSR 저장링 lattice 구조의 결정에 있어 MBA 구조와 HMBA 구조에 대하여 linear optics 설계, vacuum chamber 반경 및 collective effects, nonlinear dynamics optimization, dynamic aperture, Touschek lifetime 등에 있어 비교 작업이 CDR 단계 이전부터 수행되어왔고, HMBA 구조가 800 m 둘레, 4 GeV 저장링 에너지에서 가장 적합한 디자인임을 확인하였다.

나. Linear optics

4GSR은 28개의 cell로 구성되고 2-fold geometric symmetry를 갖는다. 28개의 arc 영역은 모두 identical하고, 인접한 arc와 arc 사이를 연결하는 straight section은 ID straight section, high-beta straight section 두 종류로 구성된다. 총 28개의 straight section 중 26개는 insertion device (ID) straight section이고, 2개는 high-beta straight section이다. 2개의 high-beta straight section 중 하나는 off-axis injection에 이용되고, injection septum (thick septum, thin septum)과 kicker magnet이 위치된다.

<그림 3.1.2.1>은 4GSR 저장링 lattice 자석 배치와 Twiss functions을 보여준다. 분산(Dispersion, 녹색 선)을 보면, 첫 번째 휨 자석을 만나기 전까지 dispersion free 상태로 있다가 휨 자석을 만난 후 빔의 dispersion이 급격히 증가한다. Dispersion이 급격히 증가한 영역을 dispersion bump라고 부르는데, <그림 3.1.2.1>을 보면 dispersion bump에 육극 자석들이 배치되어 있음을 알 수 있다.



<그림 3.1.2.1> 4GSR 저장링 lattice 자석배치와 Twiss functions.
Arc + ID straight section (좌), arc + high-beta straight section (우)

<그림 3.1.2.1>에서 첫 번째 bending을 지난 후 dipole field의 부호가 minus인 두 개의 휨 자석을 지나면서 dispersion이 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. Bending field가 minus인 자석은 기존 normal bending과는 반대의 방향으로 빔을 휘게 만드는데, 이 자석들은 anti-bend라 불린다. 빔이 휨 자석에서 반대 방향으로 휘면 dispersion이 감소한다. 이렇게 dispersion을 감소시키는 것이 anti-bend를 배치하는 이유이다. 그리고 anti-bend에 plus 부호의 quadrupole-gradient를 가지는 사극 자석 성분도 존재하며 이 사극 자석 성분 또한 dispersion을 더욱 감소시키는 역할을 한다. 그리고 휨 자석에서 dipole field와 quadrupole-gradient의 부호가 서로 다르면, damping partition number가 증가하여 emittance가 감소한다. <그림 3.1.2.1>에서 quadrupole-gradient 성분이 존재하는 모든 휨 자석들에서 dipole field 성분과 quadrupole 성분의 부호가 서로 다름을 알 수 있다. 이 quadrupole 성분들로 emittance를 감소시키면서 동시에 quadrupole 성분의 세기를 조정하여 선형 빔 동역학을 통제한다. 저장링에서의 빔 emittance는 (수식 3.1.2.4)와 같이 주어지는데,

$$\epsilon_x = C_q \gamma^2 \frac{\int (\gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta'_x + \beta_x \eta_x'^2)/|\rho|^2 ds}{J_x \int 1/\rho^2 ds} \qquad \text{(수식 3.1.2.4)}$$

여기서, J_x는 damping partition number이고 η_x, η'_x는 수평 dispersion, dispersion derivative이며, $\alpha_x = -\frac{\beta_x}{2}$, $\gamma_x = -\frac{1+\alpha_x^2}{\beta_x}$이고, ρ는 bending radius이며, C_q는 상수인데

아래 (수식 3.1.2.5)와 같이 주어진다.

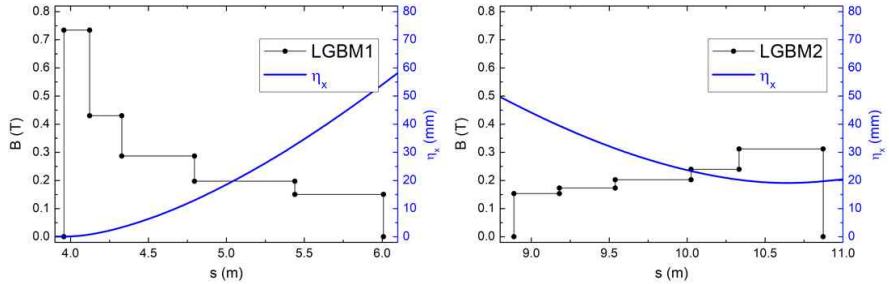
$$C_q = \frac{55}{32\sqrt{3}} \frac{\hbar}{mc} \qquad \text{(수식 3.1.2.5)}$$

여기서, $\hbar$는 Planck constant, m은 빔을 구성하는 입자(즉 전자)의 질량, c는 빛의 속력이다.

(수식 3.1.2.4)로부터 damping partition number가 커지면 emittance가 작아지며 휨 자석에서 dispersion이 작으면 emittance가 작아진다는 것을 유추할 수 있다. Dispersion bump를 만든 후 두 개의 anti-bend를 이용하여 dispersion을 급격히 낮춘 이유가 바로 여기에 있다. 전자빔이 dispersion이 작아진 상태에서 세 번째 dipole을 지나며 이후에 또다시 anti-bend를 지난 후에 dispersion이 더욱 감소한 상태로 arc 영역 중앙에 위치한 휨 자석(bending dipole)을 지나간다. 중앙에 위치한 휨 자석은 약 2-Tesla의 field 세기를 갖는 center bend이다. Center bend의 강한 dipole field로 인해 전자빔이 방사하는 방사광이 좋은 품질을 가진다. Center bend를 배치함으로써 이 위치에서 출발하는 빔라인을 구성할 수 있다. 또한 Center bend의 강한 dipole field로 인해 전자빔이 super bend를 지날 때 dispersion의 작은 증가에도 빔의 emittance가 크게 증가한다. 그래서 center bend를 지날 때 dispersion이 최소화되도록 앞단에 anti-bend를 배치한 것이다. Dispersion bump를 만들기 위해서, 첫 번째와 두 번째 dipole에서는 불가피하게 dispersion이 비교적 크다. 이 두 개의 dipole로 인한 emittance 증가를 줄이기 위해 이 두 개의 bending 자석을 longitudinal position에 따라 field strength를 다르게 하는 longitudinal gradient bend (LGB) 자석으로 배치한다. (수식 3.1.2.4)의 emittance는 아래와 같이 대략적으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_x = C_q \gamma^2 \frac{\int (\gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta'_x + \beta_x \eta_x'^2)/|\rho|^3 ds}{J_x \int 1/\rho^2 ds} \approx \int \eta_x^2 \times B ds \qquad \text{(수식 3.1.2.6)}$$

여기서, B는 dipole field strength이다. (수식 3.1.2.6)으로부터 동일한 평균 dipole field와 동일한 평균 길이를 갖는 dipole에서, dispersion과 자기장이 비슷한 분포를 가지면 emittance가 줄어들 것임을 예상할 수 있다. 그러므로 dispersion이 증가할 때 dipole field를 감소시키고 dispersion이 감소할 때는 dipole field를 증가시키도록 field 분포를 만든다. <그림 3.1.2.2>는 각각 첫 번째와 두 번째 longitudinal gradient dipole에서의 dispersion과 bending field 분포를 보여준다.



<그림 3.1.2.2> 첫 번째 longitudinal gradient dipole에서의 dispersion과 B field 분포 (좌), 두 번째 longitudinal gradient dipole에서의 dispersion과 B field 분포 (우)

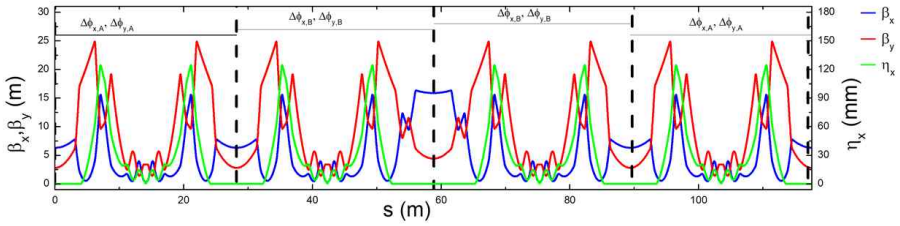
Arc 내 두 개의 dispersion bump 사이의 phase advance는 수평 방향 ~3π, 수직 방향 ~π이고 linear matrix에서 $-I$ transformation 조건을 만족한다. 이러한 linear optics condition에서 첫 번째 dispersion bump의 chromatic sextupole magnets로 인해 excite 되는 resonance driving term의 세기가 두 번째 dispersion bump에서 유효하게 상쇄될 수 있다.

4GSR의 high-beta straight section은 off-axis injection이 이루어지기 위한 충분히 큰 dynamic aperture를 확보하기 위해 설계되었다. 저장링의 수평 또는 수직 방향 phase space에서 single particle이 loss 되지 않는 최대 넓이인 acceptance가 A_x이고, 저장링 임의의 longitudinal 위치에서 beta 함수가 β일 때, 그 위치에서 dynamic aperture x는 A_x, β와 $x = \sqrt{\beta A_x}$ 의 관계를 갖는다. 저장링의 acceptance는 저장링 longitudinal 위치에 관계없이 일정한 값이므로 dynamic aperture는 beta 함수의 square root에 비례하는 값을 가진다.

Injection이 이루어지는 위치에서 dynamics aperture를 키우기 위해서는 acceptance와 injection 위치에서의 beta 함수를 키워야 한다. Acceptance는 nonlinear dynamics 최적화를 통해 키울 수 있지만 수렴되는 특정 값 이상으로 키우기는 어려우므로 injection 위치에서 beta 함수를 키워서 off-axis injection에 필요한 dynamics aperture를 확보할 수 있다.

저장링의 symmetry를 쪼개는 것은 저장링의 nonlinear dynamics 성질에 부정적인 영향을 준다. 저장링 28개 straight section의 길이를 모두 동일하게 유지한 채, 입사 구간 특정 straight section의 beta 함수를 키우는 경우 linear optics의 periodic

symmetry가 깨지고 acceptance를 감소하는 결과를 낳기 때문에 결과적으로 dynamics aperture를 비약적으로 증가시키기는 어렵다.



<그림 3.1.2.3> High-beta straight section과 ID straight section의 phase advance

$\Delta\phi_{x,A} = \Delta\phi_{x,B}$, $\Delta\phi_{y,A} = \Delta\phi_{y,B}$

Geometric한 symmetry가 깨지더라도 전자빔 입장에서 보는 phase advance를 동일하게 유지시키면 저장링의 nonlinear dynamics 성질을 유지할 수 있다. 즉, 특정 위치에서 beta 함수를 키우면서도 저장링의 acceptance를 유지하여 dynamics aperture를 비약적으로 증가시킬 수 있다. 저장링 beam dynamics의 beta 함수와 phase advance는 다음 (수식 3.1.2.7)과 같은 관계를 갖는데,

$$\psi = \int \frac{1}{\beta} ds \qquad \text{(수식 3.1.2.7)}$$

Beta 함수와 phase advance 사이에 역수의 관계가 있기 때문에 high-beta straight section의 길이를 더 길게 만들어 ID straight section과 동일한 phase advance를 갖도록 linear optics를 matching 할 수 있다.

<그림 3.1.2.3>에서 나타나는 바와 같이 high-beta straight를 포함하는 cell과 포함하지 않는 cell은 동일한 phase advance를 가지게 되어 on-momentum에서 28의 symmetry가 유지된다. High-beta straight section이 acceptance에 미치는 영향은 최소화되고, high-beta straight section 중심에서 beta 함수는 ID straight section 중심 대비 약 2.5배 커짐으로써 약 1.6배 큰 dynamic aperture를 갖는다.

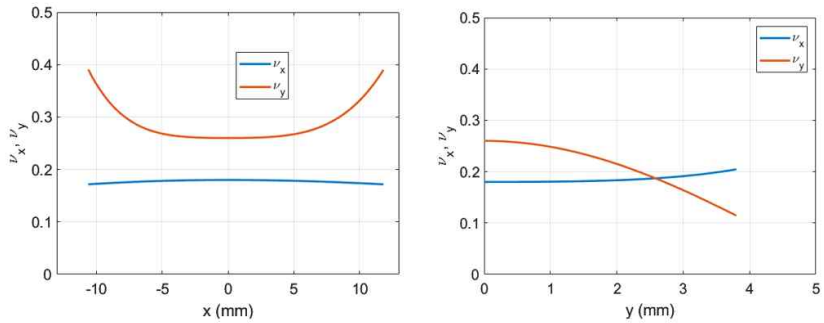
4GSR 저장링 main parameter는 <표 3.1.2.1>과 같다.

<표 3.1.2.1> 저장링 main parameter

Parameter	Value (w/o IDs)	Value (w/ 9 IDs)
Natural emittance	61.57 pm	52.55 pm
Circumference	799.297 m	
Beam energy	4 GeV	
Working point ν_x, ν_y	68.179 / 23.260	
Natural chromaticity ξ_x, ξ_y	-112.1 / -85.3	
Chromaticity ξ_x, ξ_y (corrected)	5.8, 3.5	
Horizontal damping partition J_x	1.84	1.64
Momentum compaction α	7.8×10^{-5}	
Energy loss per turn U_0	1.098 MeV	1.449 MeV
Energy spread	0.126%	0.104%
Main RF voltage	3.080 MV	3.500 MV
Main RF frequency	499.593 MHz	499.593 MHz
Main RF synchronous phase (w/o harmonic cavity, w/ harmonic cavity)	159.13 deg, 156.36 deg	155.55 deg, 152.24 deg
Harmonic number	1332	
Damping times (H / V / L)	10.55 ms / 19.43 ms / 16.79 ms	8.98 ms / 14.72 ms / 10.81 ms
Harmonic cavity voltage	0.950 MV	1.048 MV
Harmonic cavity frequency	1498.78041 MHz	1498.78041 MHz
Harmonic cavity phase	351.70 deg	350.49 deg
Bunch length (w/o harmonic cavity, w/ harmonic cavity)	3.6 mm, 14.4 mm	2.8 mm, 11.4 mm
Beta function at center of ID straight β_x, β_y	6.33 m / 2.84 m	
Beta function at center of high-beta straight β_x, β_y	15.90 m / 4.45 m	

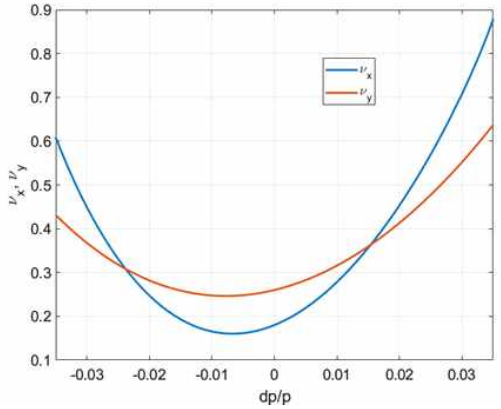
다. Non-linear beam dynamics

Chromaticity correction 이후에 chromatic sextupole에 의한 non-linear effects가 발생하는데, 이로 인해 발생할 수 있는 두 가지 side effects는 작은 면적의 on momentum dynamics aperture (DA)로 인한 off-axis injection의 어려움과 작은 beam lifetime으로 인한 빔의 빠른 손실이다. 이 두 효과를 억제하여 안정적인 가속기 운영을 위해 non-linear beam dynamics를 최적화해야 한다.



<그림 3.1.2.4> Amplitude dependent tune shift. x-offset에 대한 결과 (좌), y-offset에 대한 결과 (우)

Non-linear beam dynamics 최적화는 arc 영역 dispersion bump 간 수평, 수직 phase advance와 육극 자석 세기, 팔극 자석 세기를 조정하는 과정을 iteration 하여 수행되었다. 최적화를 통해 dynamics aperture와 momentum aperture 넓이에 직접적 영향을 주는 amplitude dependent tune shift와 momentum dependent tune shift의 크기를 줄였다. <그림 3.1.2.4>는 high-beta straight 중심에서 amplitude dependent tune shift를 나타내고, <그림 3.1.2.5>는 momentum dependent tune shift를 보여준다. x 또는 y amplitude 변화에 대해 수평, 수직 tune은 integer tune 또는 half integer tune을 지나지 않고, resonance islands 등 강한 resonance를 암시하는 영역도 보이지 않는다.

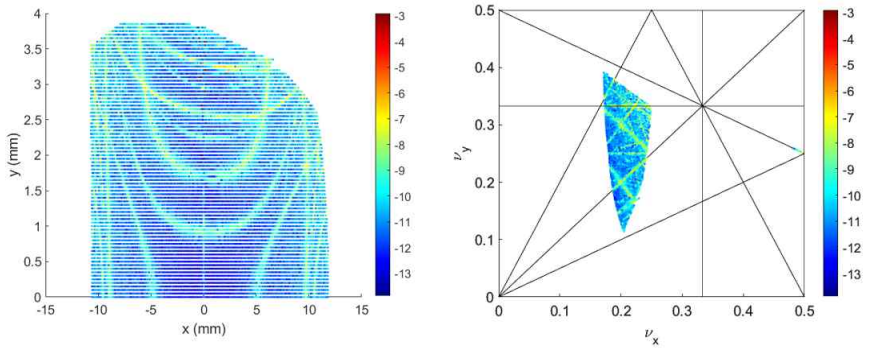


<그림 3.1.2.5> Momentum dependent tune shift

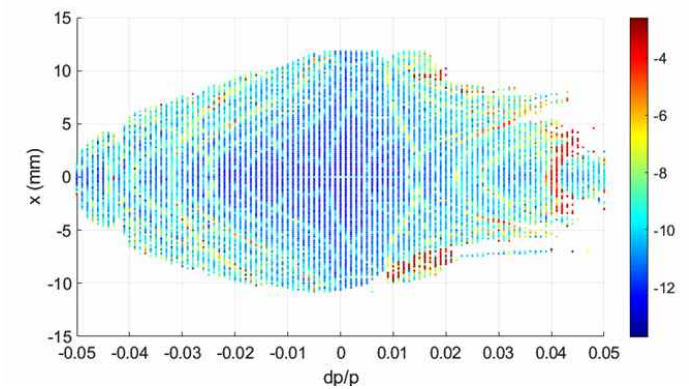
Frequency map analysis를 통해 x-y space, tune space, x-dp/p space에서 single particle이 stable 한 영역과 high-order resonance에 의한 불안정성을 조사한 결과는 <그림 3.1.2.6>과 같다. RF cavity에 의한 효과와 radiation damping에 의한 효과가 없는 조건에서의 결과이다. <그림 3.1.2.6>의 왼쪽 그림은 4D tracking에서의 dynamic aperture에 대응된다. <그림 3.1.2.6>의 color code는 diffusion rate 값에 대응된다. Diffusion rate는 (수식 3.1.2.8)과 같이 정의되는 값이다. $\Delta\nu$는 첫 번째 512 turn의 turn-by-turn 좌표정보로부터 계산된 tune과 두 번째 512 turn에서 계산된 tune의 차이다 (N = 1024 일 때). 그 값이 작을수록 해당 위치에서 빔의 움직임이 안정적임을 의미하고 두껍고 선명한 대비를 보이는 resonance line이 보이는 경우 그 위치에서 빔의 손실이 일어날 수 있음에 주의해야 한다.

$$d_r = \log_{10}\left(\frac{\sqrt{\Delta\nu_x^2 + \Delta\nu_y^2}}{N}\right) \qquad \text{(수식 3.1.2.8)}$$

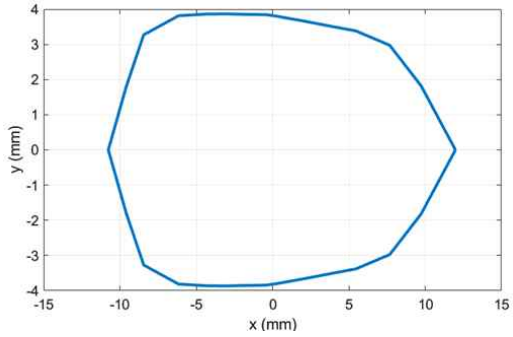
Frequency map analysis 결과 nominal tune 대비 diffusion rate의 분포는 안정적으로 보이며 치명적인 resonance line이 될 수 있는 half integer resonance line을 지나지 않고, 3차 resonance line도 그 세기가 크지 않음을 알 수 있다. Energy offset (dp/p)와 x 방향 offset을 바꾸며 얻은 frequency map analysis 결과는 <그림 3.1.2.7>과 같다. x 방향 dynamic aperture는 dp/p의 변화에 대해 급격히 줄어들지 않으며, 가장자리 high diffusion rate를 갖는 영역은 안정적인 dynamic aperture와 Touschek lifetime을 얻는 데 치명적인 영향을 주지는 않는 것으로 보인다.



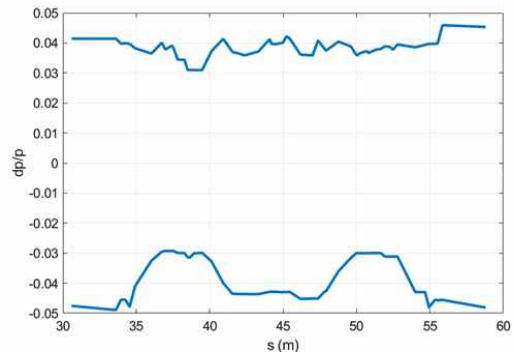
<그림 3.1.2.6> x-y offset에 대한 frequency map analysis 결과. x-y space에서 diffusion rate 분포 (좌)와 tune space에서 diffusion rate 분포 (우)



<그림 3.1.2.7> x-dp/p offset에 대한 frequency map analysis 결과



<그림 3.1.2.8> High-beta straight section 중심에서 ideal lattice의 dynamic aperture. 6D tracking 결과
Magnet, vacuum chamber의 physical aperture 포함



<그림 3.1.2.9> Local momentum aperture. 6D tracking 결과
Magnet, vacuum chamber의 physical aperture 포함

<그림 3.1.2.8>과 <그림 3.1.2.9>는 각각 error가 없는 ideal lattice의 dynamic aperture와 momentum aperture 결과이다. Tracking turn 수는 2,048이고 6D tracking에서 RF cavity에 의한 효과, synchrotron radiation에 의한 damping 효과가 포함되었다.

Magnet의 alignment error, strength error 등 사실적인 error 요소가 포함되었을 때 dynamic aperture와 momentum aperture에 대한 영향은 3.1.3 자. Commissioning simulations 항목에 서술되어 있다.

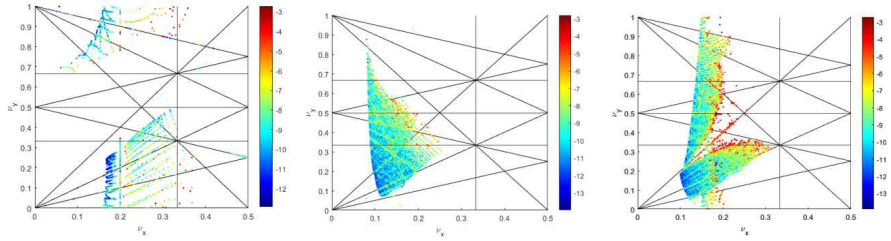
라. Tune 설정

저장링의 정수 부분 tune은 고차 resonance를 피할 수 있는 값으로 설정되었다. 저장링의 주기성과 특정 resonance driving term으로 인해 integer resonance, half-integer resonance 이외에 고차 resonance 효과가 나타날 수 있다. HMBA 구조에서 dispersion bump 사이의 $-I$ transformation은 resonance driving term들의 세기를 상쇄시키는 데 효과적이지만 고차 resonance driving term의 경우 그 세기가 무시할 수 없는 수준으로 남아있을 수 있다.

Frequency map analysis 방법을 통해 4GSR 저장링이 (68, 23)이 아닌 다른 정수 tune을 가질 때 특정 resonance 효과가 커지는지 여부를 확인하였다 (<그림 3.1.2.10>). 정수 tune이 수평 방향 1 만큼 낮은 경우, 수평 방향 fractional tune 0.2에서 resonance line이 나타난다. 이 line은 5차 resonance이고 5^{th} order resonance driving term이 큰 크기를 가지고 5바퀴마다 $5\nu_x = 28N$ (on-momentum particle에 대해 ring의 period는 28이므로 resonance line을 나타내는 식에서 우변 정수는 28N 값을 가진다), 즉, 67.20 × 5 = 336 = 28 × 12에 해당하는 resonance line이 excitation 되기 때문으로 이해된다. 정수 tune이 수직 방향 1만큼 큰 경우, 3차 resonance 중 하나인 $2\nu_x - \nu_y = 28N$ line에서 강한 resonance가 나타난다. 이는 구체적으로 68.10 × 2 - 24.20 = 112 = 28 × 4로 표현된다.

Photon beam의 brightness 측면에서 높은 tune 혹은 ID straight section에서의 낮은 beta 함숫값이 유리한데, 정수 tune이 수평 방향 1 이상 커지는 경우 ID straight section에서 beta 함수가 큰 폭으로 감소한다. H7BA 구조에서 이는 second order chromaticity의 급격한 증가로 이어짐을 확인하였고, 이는 곧 Touschek lifetime이 짧아지는 결과로 이어지므로 수평 방향 정수 tune이 1 이상 커지는 경우(수평 방향 정수 tune 69)는 working point 후보에서 제외되었다.

위에서 서술된 frequency map analysis 결과와 H7BA의 optics 특성을 고려하여 저장링의 정수 tune working point는 (68, 23)으로 설정되었다.



<그림 3.1.2.10> 정수 tune 값에 따른 x-y offset의 frequency map analysis 결과
정수 tune (67, 23) (좌), 정수 tune (68, 23) (중), 정수 tune (68, 24) (우)

참고문헌

[1] SLS 2.0 Storage Ring Technical Design Report.

[2] EBS Storage Ring Technical Report.

[3] Diamond-II Technical Design Report.

[4] Jang, Gyeongsu, et al., "Low emittance lattice design for Korea-4GSR, Nuclear Inst. And Methods in Physics Research, A 1034 (2022).

[5] Wiedemann, H. (1993). Particle Accelerator Physics I. Berlin: Springer.

[6] Beam-based Correction and Optimization for Accelerators, Xiaobiao Huang, CRC Press, 2022.

[7] A. Terebilo, in Proceedings of the 19th Particle Accelerator Conference, Chicago, IL, 2001 (IEEE, Piscataway, NJ, 2001), pp. 3203-3205.

3.1.3 빔 동역학 (Beam Dynamics Topics)

가. RF voltage optimization

RF voltage가 커지면 RF MA가 증가하여 Touschek lifetime 증가에 도움이 된다. 동시에 RF voltage가 증가하면 synchronous phase에서의 voltage의 기울기가 증가하고 이로 인해 beam의 bunch length가 감소하여 lifetime을 감소시킨다. 그러므로 Touschek lifetime을 최대화하는 최적의 RF voltage를 구하기 위해 Touschek beam lifetime vs. RF voltage scan을 실행하였다. 빔의 lifetime은 bunch의 전하량과 빔이 flat beam인지 round beam인지에 따라 크게 영향을 받는다. 현재 4GSR의 beam current 최대치 목표는 400 mA인데 multi-bunch operation mode에서는 하나의 bunch 당 전하가 1 nC 정도이다. Bunch 당 1 nC의 전하가 있을 때, 즉 multi-bunch operation mode일 때의 RF voltage scan 결과는 <그림 3.1.3.1>에서 주어진다. Flat beam과 round beam 모두의 경우에 2.6 MV까지 증가함에 따라 lifetime이 길어진다. 그리고 3.0 MV까지 lifetime이 약간씩 작아지기도 하고 커지기도 한다. 그리고 3.0 MV 이후에는 다시 lifetime이 줄어들게 된다. Lattice momentum acceptance는 <그림 3.1.3.2>와 같이 나타난다. 이때 lattice positive acceptance (LPA)는 약 4% 정도이고 lattice negative acceptance (LNA)는 약 5% 정도이다. RF voltage가 2.6 MV가 되면 RF acceptance가 약 4% 정도가 돼서 LPA와 비슷한 정도가 된다. 따라서 2.6 MV까지는 MA가 커지는 효과가 지배적이어서 lifetime이 증가한다. 그러나 RF voltage가 2.6 MV를 넘게 되면 positive 방향으로는 MA가 커지는 효과가 없고 negative 방향으로만 MA가 커지는 효과를 본다. 그와 동시에 bunch length는 줄어듦으로 lifetime이 커지는 효과와 작아지는 효과를 동시에 보게 된다. RF voltage가 3.0 MV를 넘게 되면 그때부터는 RF acceptance가 LNA의 값을 넘게 되므로 MA가 커지는 효과는 없어진다. 대신 bunch length가 줄어들기 (<그림 3.1.3.3>) 때문에 lifetime이 줄어들게 된다. 이때 최적의 RF 값은 2.6 MV에서 3.0 MV 사이를 가지게 된다. 그중에서 RF acceptance가 가장 클 때를 기준으로 하여 최적의 RF voltage를 3.0 MV로 정하였다. 다만, <그림 3.1.3.1>과 <그림 3.1.3.2>의 결과는 Insertion device (ID)가 저장링에 전혀 배치되지 않았을 때의 결과다. 저장링의 straight section에 배치하는 insertion device (ID)는 빔이 ID를 지날 때의 방사광 특성에 큰 영향을 주므로, ID model은 유저들의 요구사항도 고려해야 하므로 향후 결정할 수밖에 없다.

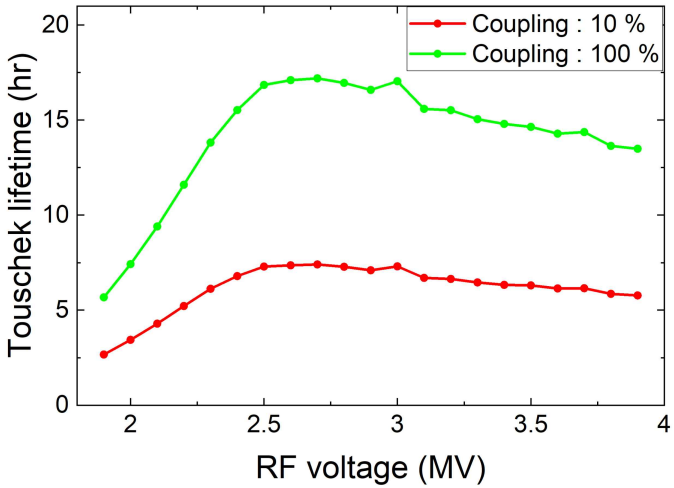
그러므로, 먼저 ID가 없을 때의 RF optimization을 수행하여 <그림 3.1.3.1>의 결과를 얻었다. ID가 배치되면 ID에 의해 추가로 전자빔의 energy loss가 발생한다. 현재는 초기 9개의 ID beamline이 계획되었고 이 ID beamline에 의한 추가적인 energy loss는 약 352 keV이다. ID에 의해 빔의 energy loss가 증가하여 RF voltage와 synchronous phase가 이에 맞춰 변경되는데, 빔 lifetime을 최적화하려면 <그림 3.1.3.2>에 표시되어 있는 RF MA와 같은 값을 유지하면 된다. 이때의 RF MA는 4.8%임을 <그림 3.1.3.2>로부터 알 수 있다. RF MA가 4.8%이면서 RF cavity가 빔에 주는 에너지가 추가적인 energy loss 352 keV를 모두 복원하기 위해서는 RF voltage는 3.5 MV 값을 가져야 한다. RF voltage는 (수식 3.1.3.1)과 (수식 3.1.3.2)를 이용하면 쉽게 계산할 수 있다.

$$\psi_s = \pi - \sin^{-1}\left(\frac{U_0 + U_{ID} + U_{wall}}{V_0}\right) \quad \text{(수식 3.1.3.1)}$$

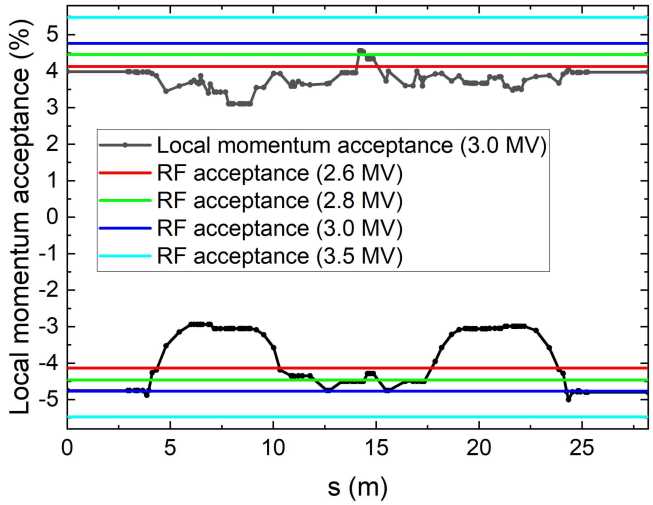
여기서 ψ_s는 RF의 synchronous phase이고 U_0 는 bending에 의한 energy loss, U_{ID}는 ID에 의한 energy loss, U_{wall}은 resistive wall에 의한 energy loss이다. RF의 synchronous phase는 RF의 voltage와 energy loss에 의하여 결정된다. 이때 bending에 의한 energy loss U_0에 나머지 ID와 resistive wall에 의한 energy loss ($U_{ID}+U_{wall}$)를 모두 고려하여 ψ_s에 대하여 풀게 되면 V_0에 관한 식이 된다. 이 식을 다시 (수식 3.1.3.2)에 대입하고 V_0 에 대하여 풀게 되면 RF acceptance에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$\delta_B = \sqrt{-\frac{2eV_0}{\pi E_0 h\alpha}\left[\cos(\psi_s) + \left(\psi_s - \frac{\pi}{2}\right)\sin(\psi_s)\right]} \quad \text{(수식 3.1.3.2)}$$

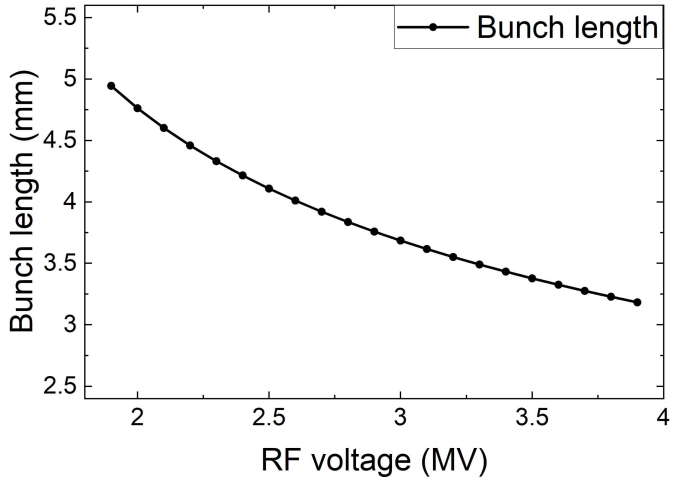
이때 e는 전자 전하량이고, E_0는 전자의 에너지, h는 harmonic number, α는 momentum compaction factor, δ_B 는 RF acceptance이다.



<그림 3.1.3.1> Multi-bunch mode에서의 Touschek beam life time vs RF voltage scan 결과



<그림 3.1.3.2> 3.0 MV RF voltage일 때의 MA와 voltage에 따른 RF acceptance



<그림 3.1.3.3> RF voltage에 따른 bunch length

참고문헌

[1] M. Sands, The physics of electron-positron storage rings, SLAC-121, 1970.

나. ID effects

방사광가속기에서는 전자를 저장링에 저장한 후에 전자가 가속될 때 전자기파를 발생시키는 특성을 이용하여 광원으로 활용한다. 특히 3세대 이후부터는 실험에 더 유용한 빛을 만들기 위해 삽입 장치를 추가하였다. 이렇게 삽입 장치를 추가하게 되면 저장링의 parameter들도 달라지게 된다. 따라서 4GSR의 경우에도 삽입 장치에 의해 저장링의 parameter가 어떻게 달라지는지 확인하였다.

○ ID specifications

삽입 장치에 의한 저장링 parameter의 변화를 조사하기 위해서는 먼저 삽입 장치의 specification이 어떻게 되는지 알아야 한다. 현재 4GSR은 초기에 9개의 삽입 장치 빔라인과 하나의 휨 빔 라인을 계획하고 있고 구체적인 내용은 <표 3.1.3.1>에 나와 있다. 9개의 삽입 장치 빔라인에는 undulator가 들어가게 되고 종류에 따라 In-vacuum undulator와 elliptical polarized undulator 두 종류가 들어가게 된다. 두 종류의

undulator 중에서도 원하는 실험과 목적에 따라 각각 다른 길이, 다른 자기장 세기, 다른 주기의 undulator가 들어가게 된다. 9개의 undulator 중에서 가장 세기가 강한 자기장은 약 1.23 T로 이렇게 강한 세기를 만들려면 minimum gap이 5 mm가 되어야 하고 이 작은 gap이 수직 beam stay clear도 결정하게 되고 입사 시 입사 효율에도 매우 중요한 요인이 된다.

<표 3.1.3.1> 4GSR의 초기 빔라인 계획

Beam port	Light source	Length [m]	Peak Field [T]	Period [mm]	Minimum gap [mm]
ID22	In-vacuum undulator	3.0000	1.0211	20.00	5.00
ID25	In-vacuum undulator	3.0000	1.2253	20.00	5.00
ID27	Eilliptical polarized EPU78	3.9780	0.9540	78.00	15.00
	Circular polarized EPU78		0.6020		
	Max horizontal polarized EPU78		0.7760		
ID26	Eilliptical polarized EPU98	3.6260	1.0096	98.00	15.00
	Circular polarized EPU98		0.6633		
	Max horizontal polarized EPU98		0.8799		
ID20	In-vacuum undulator	3.0000	1.2253	24.00	5.00
ID21	In-vacuum undulator	3.0000	1.0211	20.00	5.00
ID24	In-vacuum undulator	3.0000	1.0211	24.00	5.00
ID23	In-vacuum undulator	3.0000	1.2253	20.00	5.00
BM10	Center bend	Already considered			
ID10	In-vacuum undulator	3.0000	1.2253	20.00	5.00

○ Ring parameters with synchrotron radiation integrals

저장링의 parameter들은 synchrotron radiation integrals로 정의되는 값들로 표현할 수 있다. Synchrotron radiation integrals는 (수식 3.1.3.3)으로 정의된다.

$$
\begin{aligned}
I_1 &= \oint ds \left\{ \frac{\eta}{\rho} \right\}, \\
I_2 &= \oint ds \left\{ \frac{1}{\rho^2} \right\}, \\
I_3 &= \oint ds \left\{ \frac{\eta}{|\rho|^3} \right\}, \\
I_4 &= \oint ds \left\{ \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{1}{\rho^2} + 2k_1 \right) \right\}, \\
I_5 &= \oint ds \left\{ \frac{\gamma\eta^2 + 2\alpha\eta\eta' + \beta\eta'^2}{|\rho|^3} \right\}
\end{aligned}
\qquad \text{(수식 3.1.3.3)}
$$

이때 η는 dispersion, α, β, γ는 twiss function을 ρ는 reference particle의 곡률 반지름이 된다. k_1는 normalized quadrupole strength로 정의된다.

$$
k_1 = \left(\frac{1}{B\rho} \right) \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} \right) \qquad \text{(수식 3.1.3.4)}
$$

(수식 3.1.3.4)를 이용하여 저장링 parameter들을 표현하면 (수식 3.1.3.5)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$
\begin{aligned}
\epsilon_x &= C_q \gamma^2 \frac{I_5}{I_2 - I_4}, \\
\sigma_\delta^2 &= C_q \gamma^2 \frac{I_3}{2I_2 + I_4}, \\
U_0 &= \frac{C_\gamma}{2\pi} E^4 I_2, \\
\tau_x &= \frac{4\pi T_0}{C_\gamma E^3 (I_2 - I_4)}, \\
\tau_y &= \frac{4\pi T_0}{C_\gamma E^3 I_2}, \\
\tau_\delta &= \frac{4\pi T_0}{C_\gamma E^3 (2I_2 + I_4)}, \\
\alpha_c &= \frac{I_1}{C}
\end{aligned}
\qquad \text{(수식 3.1.3.5)}
$$

저장링 parameter들의 변화는 synchrotron radiation integrals의 변화를 통해서 알 수 있다.

○ Ring parameters change from IDs

ID에 의한 저장링 parameter의 변화를 알기 위해서는 ID에 의한 synchrotron radiation integrals의 영향을 알면 된다. ID에서 추가로 발생하는 synchrotron radiation integrals는 undulator의 자기장이 단순한 sine 함수 모양이라고 가정했을 때 (수식 3.1.3.6)과 같이 계산할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
I_{1,ID} &= -\frac{\lambda_w^2 B_w^2 L_w}{8\pi^2 \times (B\rho)^2}, \\
I_{2,ID} &= \frac{B_w^2 L_w}{2 \times (B\rho)^2}, \\
I_{3,ID} &= \frac{4 B_w^3 L_w}{3\pi \times (B\rho)^3}, \\
I_{4,ID} &= -\frac{3\lambda_w^2 B_w^4 L_w}{32\pi^2 \times (B\rho)^4}, \\
I_{5,ID} &= -\frac{<\beta_x> \lambda_w^2 B_w^5 L_w}{15\pi^3 \times (B\rho)^5}
\end{aligned}
\qquad \text{(수식 3.1.3.6)}
$$

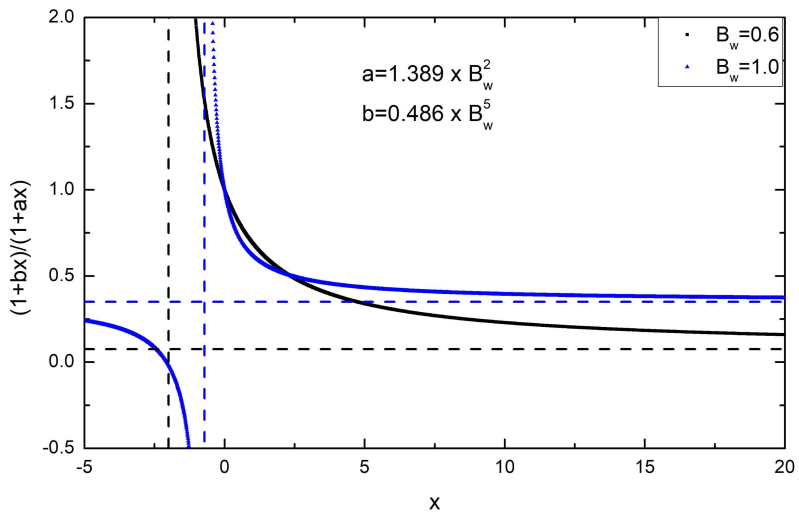
여기서 λ_w는 wiggler의 격자 간격이고 B_w는 wiggler의 최대 자기장 세기, L_w는 wiggler의 길이, $B\rho$는 magnetic rigidity, $<\beta_x>$는 wiggler가 놓인 위치의 β_x 함수의 평균값이 된다. Undulator에 의한 ring parameter의 변화는 (수식 3.1.3.5)와 (수식 3.1.3.6)을 이용하면 쉽게 얻을 수 있다. 먼저 ring에 undulator를 더했을 때 생기는 emittance, ϵ_{all}과 wiggler가 없을 때의 emittance, ϵ_{ring}의 비율은 (수식 3.1.3.7)과 같다.

$$
\frac{\epsilon_{all}}{\epsilon_{ring}} = \frac{C_q \gamma^2 \dfrac{I_{5,all}}{I_{2,all} - I_{4,all}}}{C_q \gamma^2 \dfrac{I_{5,ring}}{I_{2,ring} - I_{4,ring}}} = \frac{\dfrac{I_{5,ring} + I_{5,ID}}{I_{2,ring} + I_{2,ID} - I_{4,ring} - I_{4,ID}}}{\dfrac{I_{5,ring}}{I_{2,ring} - I_{4,ring}}} = \frac{1 + \dfrac{I_{5,ID}}{I_{5,ring}}}{1 + \dfrac{I_{2,ID} - I_{4,ID}}{I_{2,ring} - I_{4,ring}}} \qquad \text{(수식 3.1.3.7)}
$$

(수식 3.1.3.7)에서 에 비해서 의 크기는 일반적으로 더 작은 값을 갖는다. 따라서 (수식 3.1.3.7)에서 을 생략하면 (수식 3.1.3.8) 의 형태가 된다.

$$
\frac{\epsilon_{all}}{\epsilon_{ring}} = \frac{1 + bL_w}{1 + aL_w} \quad where \quad a = \frac{B_w^2}{2(I_{2,ring} - I_{4,ring})(B\rho)^2} \quad \text{and} \quad b = \frac{<\beta_x> \lambda_w^2 B_w^5}{15\pi^3 I_{5,ring} \times (B\rho)^5} \qquad \text{(수식 3.1.3.8)}
$$

위와 같은 함수는 a와 b의 비에 의해서 형태가 결정된다. $\frac{b}{a}=1$ 일 때, $\frac{\epsilon_{all}}{\epsilon_{ring}}$은 L_w와 관계없이 항상 1이 된다. $\frac{b}{a}<1$ 일 때, $\frac{\epsilon_{all}}{\epsilon_{ring}}$은 항상 1보다 작고 $\frac{b}{a}>1$ 일 때, $\frac{\epsilon_{all}}{\epsilon_{ring}}$은 항상 1보다 크게 된다. Undulator를 통해서 emittance를 줄이려면 $\frac{b}{a}<1$ 이어야 하고 이때 $\frac{b}{a}$은 점근선으로 undulator의 길이가 무한히 길 때의 emittance 감소 비율이 된다. 따라서 $\frac{b}{a}$가 작아야 emittance를 감소시키는 것이 유리하다. 하지만 $\frac{b}{a}$가 작아도 undulator의 길이는 현실적으로 무한히 길 수 없기 때문에 $\frac{b}{a}$가 작은 것이 항상 emittance 감소에 유리한 것은 아니다.



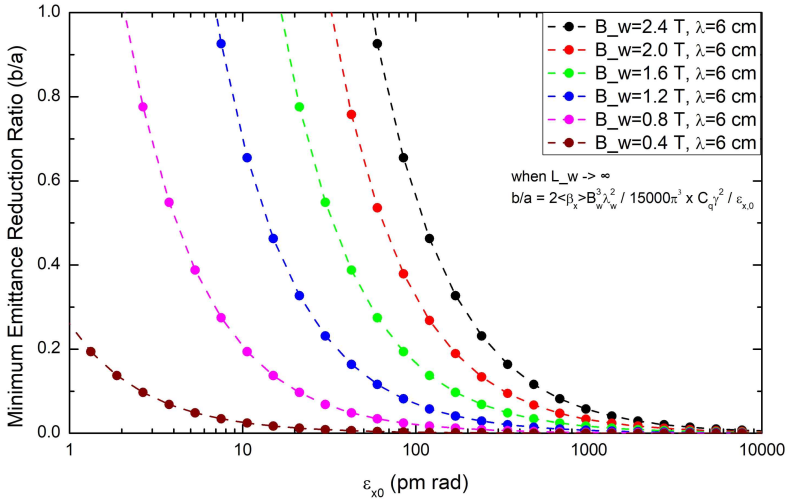
<그림 3.1.3.4> 임의의 a와 b 값을 이용하여 1+bx/1+ax의 그래프의 모양을 나타냄

<그림 3.1.3.4>를 보면 a와 b의 값이 각각 $1.389\times B_w^2$, $0.486\times B_w^5$으로 B_w의 값에 따라 0.6일 때 검은색, 1.0일 때 파란색으로 $1+bx/1+ax$의 값을 x에 따라 그렸다. b/a의 값이 파란색일 때 더 커서 y축과 직교하는 점근선이 더 큰 값을 갖는다. 그러나 x가 2보다 작은 경우는 파란색의 y값이 오히려 더 작은 값을 갖는다. 이 말은

undulator의 길이가 충분히 길지 않으면 $\frac{b}{a}$값이 더 크더라도 emittance 감소는 더 효과적으로 할 수 있다는 뜻이다. <그림 3.1.3.4>에서 점근선인 $\frac{b}{a}$를 살펴보면 emittance에 관한 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{b}{a}=\frac{2<\beta_x>\lambda_w^2 B_w^3}{15\pi^3\times(B\rho)^3}\frac{(I_{2,ring}-I_{4,ring})}{I_{5,ring}}=\frac{2<\beta_x>\lambda_w^2 B_w^3}{15\pi^3\times(B\rho)^3}\frac{C_q\gamma^2}{\epsilon_{x0}} \quad \text{(수식 3.1.3.9)}$$

길이가 무한한 undulator에 의해서 얻을 수 있는 최대한의 emittance 감소는 undulator의 λ_w와 B_w에 의하여 결정되는데 <그림 3.1.3.5>는 현실적인 undulator의 조건에서의 결과를 보여준다.



<그림 3.1.3.5> 저장링의 emittance에 따른 최대 emittance 감소 한계를 보여준다. Emittance 감소 한계는 무한한 길이의 damping wiggler에 의해서 초기 emittance에 대한 감소된 emittance의 비를 의미한다. Damping wiggler의 간격은 6 cm이고 damping wiggler의 최대 자기장 세기에 따라 다른 색깔로 표시하였다.

Undulator의 격자 간격은 6 cm로 가정하였고 자기장의 최대 세기는 2.4 T에서 0.4 T까지 바꿔가며 조사하였다. 그 결과 자기장의 세기가 작으면 작을수록 emittance 감소에 효과적인 것을 관찰할 수 있었다. 이는 직관과 반대되는 것처럼 느껴지지만 그렇지 않다. 위 그래프는 undulator의 길이가 무한한 상황을 가정했기 때문에 작은

세기의 자기장이 더 효과적으로 emittance를 감소시킬 수 있는 것이다. 또 emittance가 10 nm일 때는 어떤 자기장의 세기와도 관계없이 emittance를 효과적으로 줄일 수 있지만 100 pm 이하가 되면 자기장의 세기에 큰 영향을 받는다. 특히 2.4 T의 경우에는 최대 emittance 감소 한계가 30% 정도가 된다. 이 가정도 undulator의 길이가 무한하다는 가정이 있을 때고 undulator의 길이가 유한하면 emittance 감소 효과는 그것보다 더 적게 된다. 따라서 유한한 길이를 고려하면 undulator를 이용하여 emittance를 줄이는 것은 100 pm 이하의 작은 emittance 저장링에서 효과적인 방법이 되지 못한다.

이와 비슷한 방식으로 energy spread도 undulator에 의해서 어떤 영향을 받는지 조사해 볼 수 있다. Undulator가 추가되면서 생기는 energy spread의 비는 emittance의 경우와 같은 함수 형태가 된다.

$$\frac{\sigma_{\delta,all}^2}{\sigma_{\delta,ring}^2}=\frac{1+dL_w}{1+cL_w} \quad where \quad c=\frac{B_w^2}{(2I_{2,ring}+I_{4,ring})(B\rho)^2} \quad \text{and} \quad d=\frac{4B_w^3}{3\pi I_{3,ring}\times(B\rho)^3} \quad \text{(수식 3.1.3.10)}$$

즉 d/c의 비에 의해서 energy spread가 커질지 같을지 작을지 결정되고 변화의 정도는 undulator의 길이에 따라 결정된다. 주목할 점은 $\frac{d}{c}$는 undulator의 λ_w에 관계가 없다는 점이다. Damping time은 유리함수의 모양을 갖는다.

$$\frac{\tau_{all}}{\tau_{ring}}=\frac{1}{1+eL_w} \quad where \quad e_x=\frac{B_w^2}{(2I_{2,ring}-I_{4,ring})(B\rho)^2} \;,\; e_y=\frac{B_w^2}{2I_{2,ring}\times(B\rho)^2} \;,\; e_\delta=\frac{B_w^2}{(2I_{2,ring}+I_{4,ring})(B\rho)^2}$$

(수식 3.1.3.11)

Momentum compaction factor는 단순한 1차 함수 모양을 갖는다.

$$\frac{\alpha_{c,all}}{\alpha_{c,ring}}=1-fL_w \quad where \quad f=\frac{\lambda_w^2 B_w^2}{8\pi^2\alpha_{c,ring}C\times(B\rho)^2} \quad \text{(수식 3.1.3.12)}$$

○ Applying ID Effect Study on 4GSR

앞에서 이론적으로 emittance가 작은 저장링의 경우 undulator를 활용하여 emittance를 줄이기가 어려운 것을 확인하였다. 그렇다면 실제로 4GSR에서도 같은 결론이 나오는지 연구하였다. 먼저 4GSR의 synchrotron radiation integrals는 <표 3.1.3.2>와 같다.

<표 3.1.3.2> 4GSR의 synchrotron radiation integrals

Synchrotron radiation integrals	Values
I_1	6.2147 × 10^{-2} m
I_2	3.0454 × 10^{-1} m^{-1}
I_3	2.3972 × 10^{-2} m^{-2}
I_4	-2.5666 × 10^{-1} m^{-1}
I_5	1.4715 × 10^{-6} m^{-1}

그리고 <표 3.1.3.1>과 같은 구성의 9개의 undulator가 들어갔을 때의 synchrotron radiation integrals는 <표 3.1.3.3>과 같다.

<표 3.1.3.3> 4GSR 초기 9개 빔라인의 synchrotron radiation integrals

Synchrotron radiation integrals	Values
$I_{1,ID}$	-4.9676 × 10^{-6} m
$I_{2,ID}$	9.07505 × 10^{-2} m^{-1}
$I_{3,ID}$	1.7629 × 10^{-2} m^{-2}
$I_{4,ID}$	-5.8126 × 10^{-8} m^{-1}
$I_{5,ID}$	7.1136 × 10^{-9} m^{-1}

<표 3.1.3.3>의 결과를 활용하여 저장링 parameter들의 변화를 계산하면 <표 3.1.3.4>와 같다.

<표 3.1.3.4> ID에 따른 저장링 parameter 변화

Ring parameters	Without IDs	With 9 IDs	With 24 IDs
Energy loss per turn [keV]	1098	1449	2035
Emittance [pm]	61.57	52.55	42.28
Energy spread [%]	0.1264	0.1038	0.0886
Horizontal damping time [ms]	10.54	8.98	7.21
Vertical damping time [ms]	19.43	14.72	10.48
Longitudinal damping time [ms]	16.79	10.81	6.78

9개의 삽입 장치에 의한 저장링 parameter의 변화뿐만 아니라 나중에 삽입 장치가 저장링 전체에 전부 설치됐을 경우도 계산하였다. <표 3.1.3.3>에 보면 9개의 ID에 의한 synchrotron radiation integrals 값이 나오는데 ID 개수로 scaling 하여 ID 24개일 때의 synchrotron radiation integrals 값을 계산할 수 있다. ID 개수를 24개로 정한 이유는 4GSR에서 사용할 수 있는 최대 straight section의 개수가 24개이기 때문이다. 4GSR은 2개의 high-beta straight section과 26개의 ID straight section이 있다. 2개의 high-beta straight section은 각각 입사 장치와 RF cavity로 채워진다. 그리고 남은 26개의 straight section 중에서 최소 2개는 RF cavity를 넣어야 하기 때문에 최대 24개의 ID를 설치할 수 있다. 경우에 따라 straight section을 활용해야 하면 24개보다 적어질 수도 있지만 현재는 상상할 수 있는 최대의 ID를 설치했을 때의 변화를 계산한다. <표 3.1.3.4>를 보면 ID에 의해서 energy loss per turn이 증가하기 때문에 이에 따라 RF voltage와 power도 세져야 한다. 3.1.3 가. RF voltage optimization 항목에서 설명한 바와 같이 RF acceptance가 동일하도록 ID 설치에 따른 RF voltage 보정을 하면 <표 3.1.3.5>와 같다.

<표 3.1.3.5> 4GSR의 초기 빔라인 계획

	Without IDs	With 9 IDs	With 24 IDs
RF voltage [MV]	3.00	3.52	4.24
RF acceptance [%]	4.762	4.760	4.760

이때 저장링 전체에서 resistive wall effect에 의한 energy loss per turn은 60 keV로 가정하였다. 번외로 필요한 RF power도 운전 빔 전류에 따라 계산하였고 그 결과를 <표 3.1.3.6>에 표시하였다.

<표 3.1.3.6> ID에 따른 필요한 RF power

Current [mA]	Required RF power [kW]		
	Without IDs	With 9 IDs	With 24 IDs
100.0	115.763	150.963	209.563
200.0	231.525	301.925	419.125
300.0	347.288	452.888	628.688
400.0	**463.050**	**603.850**	**838.250**
500.0	578.813	754.813	1047.813

<표 3.1.3.6>을 참조할 때 목표 빔 운전 전류가 400 mA일 때 필요한 RF power는 초기 9개 빔라인을 설치할 때 604 kW이고 나중에 ID를 24개를 저장링 전체에 다 채웠을 때 838 kW이다.

참고문헌

[1] Wiedemann, H. (1993). Particle Accelerator Physics I. Berlin: Springer.

[2] Helm, R. H., Lee, M. J., Mortorn, P. L. & Sands, M. (1973). IEEE Trans. Nucl. Sci. 20, 900-901.

[3] Wiedemann, H. (1998). Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 266, 24-31

[4] Walker, R. P. (1995). CAS-CERN Accelerator School: 5th Advanced Acclerator Physics Course, 20 September-1 October 1993, Rhodes, Greece, pp. 807-835.

[5] Jang, Gyeongsu, et al. "Investigation of the damping wiggler effect and application on the PAL fourth-generation storage ring." Journal of Synchrotron Radiation 27.6 (2020): 1510-1517.

다. Coupling study

이상적인 lattice에서는 수평 방향의 운동과 수직 방향의 운동은 서로 독립적이다. 그러나 사극 자석의 회전 오차나 육극 자석의 정렬 오차가 생기면 두 운동은 서로 연결된다. 또는 일부러 skew 사극 자석을 넣어서 일부러 수평 수직 운동을 연관 짓기도 한다. 이렇게 두 움직임이 연관되었을 때 수평 방향의 emittance와 수직 방향의 emittance 비율을 coupling으로 정의하며 (수식 3.1.3.13)을 통해서 구할 수 있다.

$$\kappa = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad \text{(수식 3.1.3.13)}$$

여기서, κ는 coupling, ϵ_x는 수평 emittance, ϵ_y는 수직 emittance이다. 저장링 내에서 coupling이 결정되었을 때의 평형 emittance는 (수식 3.1.3.14)를 통해서 구할 수 있다.

$$\frac{d\epsilon_x}{dt} + \frac{d\epsilon_y}{dt} = -\frac{2}{\tau_x}\epsilon_x - \frac{2}{\tau_y}\epsilon_y + \frac{2}{j_x\tau_x}C_q\gamma^2\frac{I_5}{I_2} \quad \text{(수식 3.1.3.14)}$$

여기서 τ_x, τ_y는 수평 damping time, 수직 damping time이고 j_x는 수평 방향 damping partition number이다. 위 식에서 수직 방향의 excitation term $\frac{d\epsilon_y}{dt}$의 크기는 매우 작아서 무시하고 damping time과 damping partition number의 관계를 이용하면 저장링에서의 평형 emittance를 (수식 3.1.3.15)와 (수식 3.1.3.16)과 같이 얻을 수 있다.

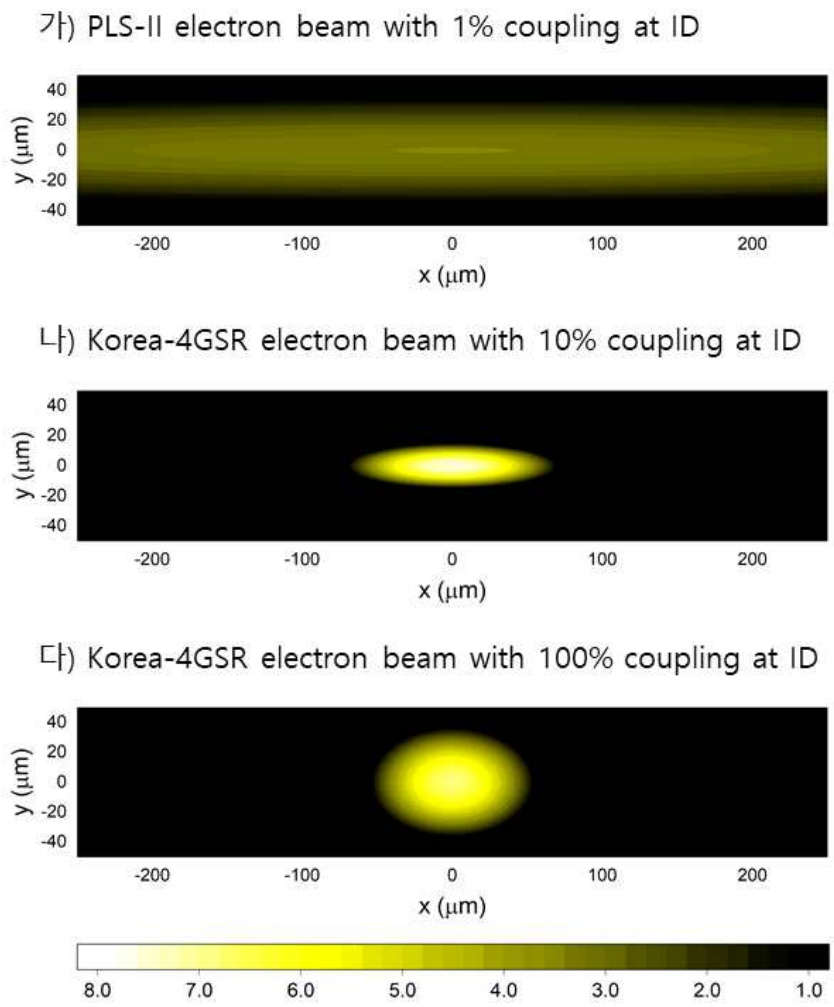
$$\epsilon_x = \epsilon_{x0}\left(\frac{j_x}{j_x + \kappa j_y}\right) \quad \text{(수식 3.1.3.15)}$$

$$\epsilon_x = \epsilon_{x0}\left(\frac{\kappa j_x}{j_x + \kappa j_y}\right) \quad \text{(수식 3.1.3.16)}$$

여기서 ϵ_{x0}는 자연 emittance로 (수식 3.1.2.4)에 의하여 얻어지고 j_y는 수직 방향 damping partition number이다.

보통, 3GSR 저장링에서의 방사광의 품질은 brilliance로 평가한다. Brilliance는 수평, 수직 emittance의 곱에 비례한다. 일반적으로 수직 emittance는 수평 emittance 이하의 값을 가지며, 작은 값을 갖는 수직 emittance를 더 줄이고 높은 값을 갖는 수평 emittance를 더욱 높임으로써, 수평, 수직 emittace의 곱을 올려서 brilliance를 높일 수 있다. 이론적으로 수직 방향 퍼짐(dispersion)은 링의 모든 위치에서 zero이므로 수직 emittance는 zero일 것으로 예상할 수 있다. 하지만 빔이 방사광을 방출할 때 대략 $1/\gamma$의 각도로 방사하므로, 이로 인해 상당히 작은 수준의 수직 emittance는 늘 존재한다. 하지만 수직 emittance를 발생시키는 가장 큰 요인은 이극 자석의 tilt error, 사극 자석의 수직 방향 alignment error와 tilting error, 육극 자석의 수직 방향 alignment error 등의 완전히 제거할 수 없는 저장링 내에서의 다양한 error들이다. 이렇게 수직 방향 emittance를 발생시키는 error를 coupling error라고 부른다. 3세대 방사광가속기에서는 skew quadrupole을 배치하여 이 coupling error들을 제거하여 방사광의 brilliance를 최대화한다. 하지만, 100 pm 이하의 수평 emittance를 갖는 4세대 원형 방사광가속기 저장링의 경우 전자빔이 방사하는 포톤빔(방사광)이 넓은 포톤 에너지 범위에서 diffraction-limit의 특성을 가지므로 방사광의 품질이 brilliance보다는 빔과 방사광의 위상공간에서의 matching이 더 중요해진다. 이 매칭을 위해서는 수직 emittance가 작은 flat beam보다는 수평, 수직 emittance가 같은 값을 갖는 round beam을 운영하는 게 더 좋다. Round beam을 만들면 수직 emittance가 증가한 만큼 수평 emittance가 감소하여 뒷부분 라. Intra beam scattering 항목에서

설명할 Intra Beam Scattering (IBS)에 의한 emittance 증가를 억제하는 효과도 있다. 다만 round beam을 만들기 위해서는 수평, 수직 tune의 fractional part가 비슷한 값을 가지게 하여 coupling resonance 상태를 만들어야 한다. Coupling resonance에 놓여 있을 때 빔을 수평 방향으로 oscillation 시키면, 수평 방향의 진폭은 줄어들면서 수직 방향의 진폭이 증가하면서 진동하는 현상이 발생한다. 그래서 coupling beam을 off-axis injection 하면 빔이 충분히 damping 하여 안정화되기 전에 수직 방향에서 큰 진폭으로 진동하게 된다.



<그림 3.1.3.6> PLS-II와 4GSR beam simulation 결과

Insertion device가 배치되는, 그래서 좁은 수직 방향 폭을 갖는, 위치에서 빔이 손실될 위험이 매우 커진다. 그래서 round beam의 경우에는 off-axis injection을 쓰기가 곤란한 단점이 있다. Tune 조정을 통한 flat beam과 round beam의 simulation의 결과를 3세대 방사광가속기 저장링인 PLS-II의 경우와 비교하였고 그 결과를 <그림 3.1.3.6>에서 표시하였다. <그림 3.1.3.6>에서 전자의 밀도를 로그

스케일로 하여 색깔로 나타내었다. 밀도가 높을수록 흰색이고 밀도가 작아지면 노란색을 거쳐 점점 검은색으로 표시하였다. 밀도가 8보다 큰 경우는 모두 흰색으로 1보다 작은 경우는 모두 검은색으로 표시하였다. 4GSR은 emittance가 작아서 flat beam의 경우에 빔 사이즈가 매우 작음을 알 수 있고, coupling의 빔의 경우 수평, 수직 emittance가 동일하여 원형에 가까운 형태를 가짐을 알 수 있다. 4GSR에서는 flat beam인 경우에도 IBS 효과를 고려해 수평 대비 수직 emittance의 비율을 3GSR의 100배 정도인 10% 정도로 한다. 이 비율은 skew quadrupole로 조정할 수 있다.

참고문헌

[1] Oh, Bonghoon, et al. "Characteristics of Photon Beam and Preservation of Coherence in Fourth-Generation Light Sources." Applied Sciences 11.24 (2021): 11896.

[2] Ko, Jinjoo, et al. "Characteristics of the Synchrotron Radiation of Fourth-Generation Storage Rings." Journal of the Korean Physical Society 77 (2020): 363-367.

[3] Lee, J., et al. "Concurrent operation of round beam and flat beam in a low-emittance storage ring." Nuclear Engineering and Technology (2023).

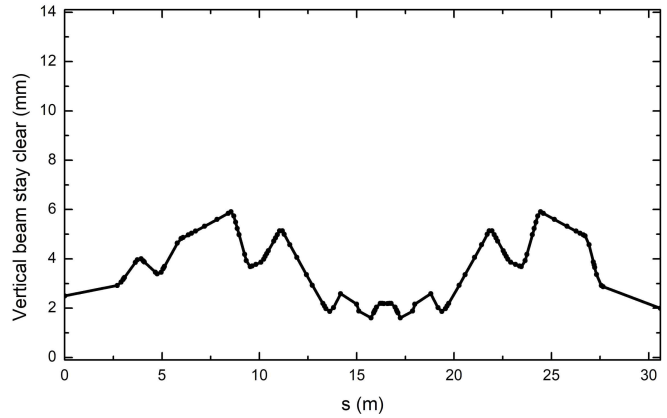
라. Beam stay clear

Vacuum 챔버의 수직 폭을 결정하기 위해서 beam stay clear를 계산하였다. 수직 폭이 가장 낮은 위치는 삽입 장치(ID)가 있는 위치이며 이때 챔버의 폭은 삽입 장치의 폭을 고려하여 2.5 mm로 정하였다. 빔 사이즈가 $\sqrt{\beta}$에 비례하므로 ID에서 수직 방향으로 손실되지 않는 beam이 다른 위치에서도 수직 방향으로 손실되지 않으려면 챔버의 수직 폭이 아래의 값보다 커야 한다.

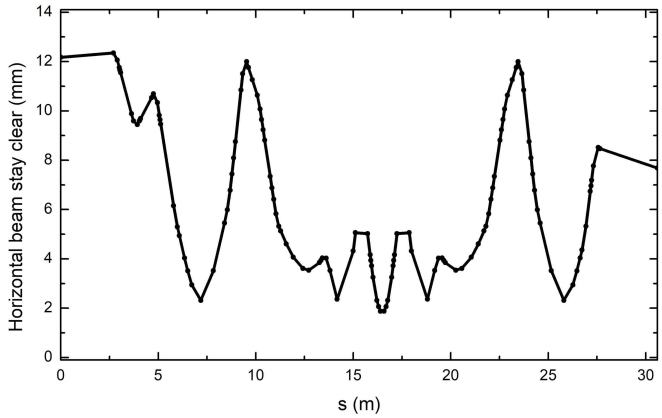
$$BSC_y(s) = \sqrt{\frac{\beta_y(s)}{\beta_y^*}}\, BSC_y^* \quad \text{(수식 3.1.3.17)}$$

여기서, BSC_y^*는 ID에서 수직 방향 챔버의 폭이고, β_y^*는 ID에서의 수직 beta 함수이며, $\beta(s)$는 각 위치에서 beta 함수이다. $BSC_y(s)$ 허용할 수 있는 최저 폭이 되며

이를 beam stay clear(BSC)라 한다. ID에서의 BSC가 2.5 mm이고 수직 beta 함수가 4.45 m이다. 이 data를 바탕으로 구한 BSC는 <그림 3.1.3.7>에서 표시되어 있다. 수직 방향의 BSC는 ID에서 값이 가장 작은 것이 명확한데 수평의 경우에는 각 자석에서의 aperture를 모두 고려하여 가장 작은 값을 얻어야 한다. 이렇게 얻은 수평 방향의 BSC는 <그림 3.1.3.8>이다. DQ31 reverse bending magnet에서 가장 작은 BSC를 가지게 되고 이때의 aperture는 12 mm, 수평 beta 값은 15.44 m이다.



<그림 3.1.3.7> Vertical beam stay clear



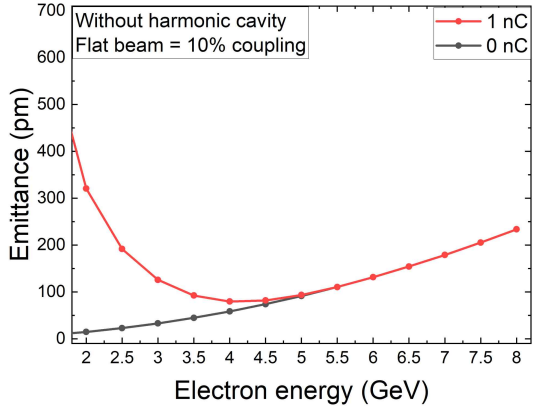
<그림 3.1.3.8> Horizontal beam stay clear

참고문헌

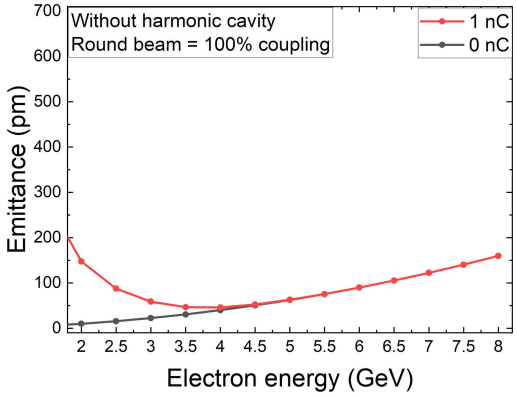
[1] Sullivan, M., et al. The beam-stay-clear definition of the PEP-II B Factory. No. SLAC-PUB-7207; LBNL-39054; CONF-960621-. Stanford Linear Accelerator Center, CA (United States), 1996.

마. Intra beam scattering

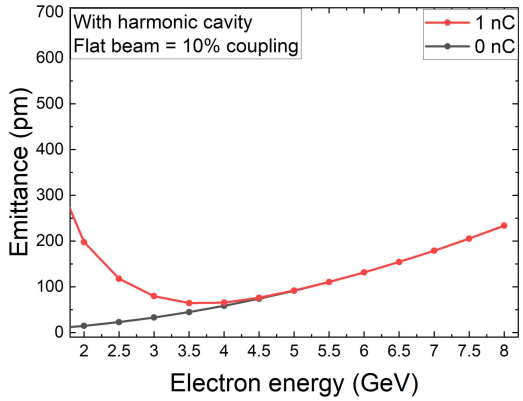
빔 내에서 입자들이 random 하게 충돌하면서 emittance가 증가하는데, 이를 Intra Beam Scattering (IBS)이라고 한다. IBS 효과는 nm order의 큰 emittance를 갖는 3세대 방사광가속기 저장링에서는 실제 emittance 증가에 별 영향을 주진 않지만 수백에서 수십 pm의 작은 emittance를 갖는 4세대 원형 방사광가속기 저장링에서는 효과를 크게 발휘한다. IBS는 bunch 길이, bunch의 전하, 빔 energy 등에 주로 영향을 받는다. Bunch 길이가 길어지면 IBS 효과가 줄어들 뿐 아니라 lifetime을 늘리는 데 긍정적 역할을 하므로 향후 3rd harmonic cavity를 배치하여 bunch length를 4배 늘릴 예정이다. IBS를 고려하여 beam energy에 따른 beam emittance를 구하였다. Coupling 10%인 flat beam의 경우 <그림 3.1.3.9>에, coupling 100%인 round beam의 경우 <그림 3.1.3.10>에 표시하였다. IBS를 고려한 beam emittance는 flat beam과 round beam 모두 beam energy가 4.0 GeV일 때 가장 작다. Multi-bunch operation mode인 1 nC의 bunch 전하일 때, flat beam의 emittance 각각 58.40 pm에서 79.57 pm으로 36.2% 증가하며 round beam의 emittance는 39.91 pm에서 45.79 pm으로 14.7% 증가한다. Harmonic cavity를 사용 할 경우에는 bunch length가 길어짐에 따라 IBS에 의한 emittance 증가 효과도 줄어들게 된다. Flat beam의 경우 IBS에 의해서 65.32 pm으로 11.8% 증가하고 round beam의 경우는 41.56 pm으로 4.1% 증가한다.



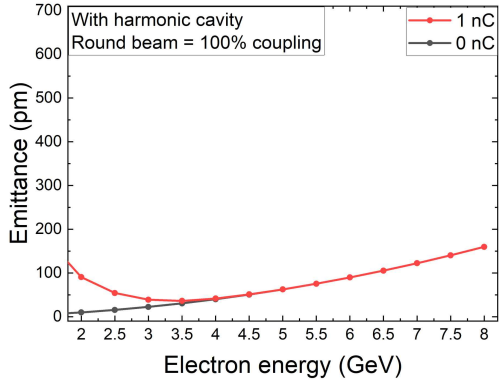
<그림 3.1.3.9> Energy에 따른 flat beam의 IBS에 의한 emittance 변화



<그림 3.1.3.10> Energy에 따른 round beam의 IBS에 의한 emittance 변화



<그림 3.1.3.11> Harmonic cavity가 있을 때 energy에 따른 flat beam의 IBS에 의한 emittance 변화



<그림 3.1.3.12> Harmonic cavity가 있을 때 energy에 따른 round beam의 IBS에 의한 emittance 변화

4GSR에서는 lifetime을 늘리기 위해서 harmonic cavity를 사용할 계획이다. Harmonic cavity를 사용하게 되면 전자빔의 길이가 늘어나고 전자빔의 길이가 늘어나게 되면 전하밀도가 낮아져 Intra beam scattering 효과도 작아지게 된다. <그림 3.1.3.11>과 <그림 3.1.3.12>를 보면 harmonic cavity를 사용하면 사용하지 않을 때보다 IBS에 의한 emittance 증가 효과가 작은 것을 확인할 수 있다.

참고문헌

[1] Bjorken, J. D. & Mtingwa, S. K. (1983). Part. Accel. 13, 115-143.

바. Beam lifetime

저장링에 저장된 전자는 무한히 저장되지 않고 일정한 lifetime을 갖게 된다. 그중에서도 가장 중요한 4가지 요인은 quantum lifetime, elastic scattering lifetime, Bremsstrahlung lifetime, Touschek lifetime이다. 각각의 경우 4GSR에 대해서도 계산을 해봤다.

○ Quantum lifetime

저장링 내에서 전자가 가속을 받으면 방사광을 방출하게 된다. 이때 방출되는 방사광은 양자화되어 있다. 전자의 양자화된 에너지 변화는 저장된 전자의 운동 진폭을 변동시킨다. 이때 변동된 진폭이 acceptance 한계를 넘어가게 되면 전자를 잃어버리게 된다. 위와 같은 메커니즘으로 결정되는 빔 lifetime을 quantum lifetime이라고 부른다. Quantum lifetime은 (수식 3.1.3.18)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\tau_{q_{\epsilon,x}} = \frac{\tau_{\epsilon,x} e^{\xi_{\epsilon,x}}}{2\xi_{\epsilon,x}}, \quad \frac{1}{\tau_q} = \frac{1}{\tau_{q_\epsilon}} + \frac{1}{\tau_{q_x}} \quad \text{(수식 3.1.3.18)}$$

여기서, τ_{q_ϵ}는 longitudinal quantum lifetime, τ_{q_x}는 transverse quantum lifetime, τ_q는 quantum lifetime, τ_ϵ는 longitudinal damping time, τ_x는 transverse damping time, ξ_ϵ는 $\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta E_{RF}}{\sigma_\epsilon}\right)^2$, ξ_x는 $\frac{1}{2}(N_\nu)^2$ 이다. 이때 ΔE_{RF}는 RF acceptance, σ_ϵ는 rms energy spread, N_ν는 dynamic aperture와 beam size의 비율이다. 4GSR의 경우 τ_x는 10.5 ms, τ_y는 19.4 ms, τ_ϵ는 16.8 ms, $\frac{\sigma_\epsilon}{E_0}$는 0.126%이다. RF acceptance는 항상 1.3% 이상이기 때문에 $\frac{\Delta E_{RF}}{\sigma_\epsilon}$는 항상 10보다 크다. 저장링 내에서 빔 사이즈는 항상 100 μm보다 훨씬 작고 dynamic aperture는 수평, 수직 방향 모두 항상 1 mm보다 크다. 따라서 N_ν도 항상 10보다 크다. (수식 3.1.3.18)을 이용하여 계산하면 항상 lifetime이 10^{14} h보다 크게 나온다. 즉 quantum lifetime은 거의 무한한 시간을 갖게 된다.

○ Elastic scattering lifetime

저장링에 저장된 전자는 저장링 내에서 운동하다가 남아있는 전자와 부딪히게 된다. 충돌에 의해 전자는 각 운동량의 변화가 생기고 이에 따라 betatron 진동을 하게 된다. 이때 betatron 진동이 진공 챔버를 넘어서게 되면 전자를 잃어버리게 된다. 이와 같은 메커니즘에 의해서 결정되는 lifetime을 elastic scattering lifetime이라고 부르게 된다. 또는 gas scattering lifetime으로 부르게 된다. Elastic scattering lifetime은 (수식 3.1.3.19)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\sigma_g = \frac{4\pi Z(Z+1)r_e^2}{\gamma^2}\frac{\beta_m}{h_m^2}, \; n_g = n\frac{P}{RT}N_A, \; \frac{1}{\tau_g} = cn_g\sigma_g \quad \text{(수식 3.1.3.19)}$$

여기서, σ_g는 differential scattering cross-section between electron and nucleus, r_e는 classical electron radius, γ는 Lorentz factor, β_m는 beta value at the minimum half aperture, h_m는 minimum half aperture, $\langle\beta\rangle$는 average beta value, n_g는 number of atoms per residual gas molecule, Z는 the atomic number of residual gas, n는 number of atoms per residual gas molecule, P는 vacuum pressure, R은 universal gas constant, T는 temperature, N_A는 Avogadro constant, τ_g는 elastic scattering lifetime, c는 빛의 속도이다. 4GSR의 경우로 계산하게 되면 압력이 10^{-9} mbar 일 때 <표 3.1.3.7>의 결과가 나온다.

<표 3.1.3.7> 4GSR의 진공 압력이
10^{-9} mbar 일 때, elastic scattering lifetime

Gas	Lifetime [h]
H_2	1025.4
CO	36.0
CO_2	22.1
N_2	36.6

저장링 내에서의 압력이 평균적으로 10^{-9} mbar 이하임을 생각하면 elastic scattering lifetime은 운영하기에 충분한 시간이라고 평가된다.

○ Bremsstrahlung lifetime

저장링에 저장된 전자는 저장링 내에서 운동하다가 남아있는 전자와 충돌하게 되면 앞부분에서 설명한 대로 전자는 각운동량의 변화가 생긴다. 그러나 각운동량의 변화만 생기는 것이 아니라 에너지의 변화도 생기게 된다. 이때 변화된 에너지가 energy acceptance를 넘어서게 되면 전자를 잃어버리게 된다. 이와 같은 메커니즘에 의해서 결정되는 lifetime을 Bremsstrahlung lifetime 또는 inelastic gas scattering lifetime으로 부르게 된다. Bremsstrahlung lifetime은 (수식 3.1.3.20)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\sigma_b = \frac{4r_e^2}{137}Z(Z+\eta)\left(\frac{4}{3}\ln\frac{E_0}{\Delta E_{RF}} - \frac{5}{6}\right)\ln\frac{183}{Z^{1/3}}, \; n_g = n\frac{P}{RT}N_A, \; \frac{1}{\tau_b} = cn_g\sigma_b \quad \text{(수식 3.1.3.20)}$$

여기서, σ_b는 differential scattering cross-section for Bremsstrahlung, r_e는 classical electron radius, η는 $\frac{\ln(530/z^{2/3})}{\ln(183/z^{1/3})+1/8}$, $\frac{\Delta E_{RF}}{E_0}$는 RF acceptance, n_g는 number density of atoms of residual gas, Z는 the atomic number of residual gas, n는 number of atoms per residual gas molecule, P는 vacuum pressure, R은 universal gas constant, T는 temperature, N_A는 Avogadro constant, τ_b는 Bremsstrahlung lifetime, c는 빛의 속도이다. 4GSR의 경우로 계산하게 되면 압력이 10^{-9} mbar 일 때 <표 3.1.3.8>의 결과가 나온다.

<표 3.1.3.8> 4GSR의 진공 압력이
10^{-9} mbar 일 때, Bremsstrahlung lifetime

Gas	Lifetime [h]
H_2	2273.3
CO	98.6
CO_2	60.6
N_2	100.1

저장링 내에서의 압력이 평균적으로 10^{-9} mbar 이하임을 생각하면 Bremsstrahlung lifetime은 운영하기에 충분한 시간이라고 평가된다.

○ Touschek lifetime

Touschek lifetime은 Bremsstrahlung lifetime과 비슷하게 전자의 에너지가 energy

acceptance를 넘어갈 때 전자를 잃어버리는 메커니즘에 의해서 결정되는 lifetime이다. Bremsstrahlung lifetime과의 차이점은 에너지 변화를 만드는 원인이 충돌이 남아있는 gas와 전자의 충돌이라는 것이 아니라 전자 간의 충돌에 의한 것이라는 점에서 차이가 있다. 4GSR의 Touschek lifetime은 3.1.3 가. RF voltage optimization 항목에서 elegant simulation을 통해서 얻었다. 최적의 RF voltage일 때 7.3 h의 Touschek lifetime을 얻었고 전체 lifetime을 결정하는 데 가장 중요한 요인이 된다. 따라서 우리는 Touschek lifetime을 늘리기 위해서 round beam으로 운전하는 방법과 harmonic cavity를 이용하는 방법에 대해 조사하였고 그 결과가 <표 3.1.3.9>이다.

<표 3.1.3.9> 4GSR의 Touschek lifetime

Flat beam : coupling 10%			Round beam : coupling 100%		
Without HC	Without IBS	With IBS	Without HC	Without IBS	With IBS
Emittance (H/V)	58.40/5.84 pm	79.57/7.96 pm	Emittance (H/V)	39.91/39.91 pm	45.79/45.79 pm
Touschek lifetime	7.30 h	8.52 h	Touschek lifetime	**17.04 h**	**17.38 h**
With HC	Without IBS	With IBS	With HC	Without IBS	With IBS
Emittance (H/V)	58.40/5.84 pm	65.32/6.53 pm	Emittance (H/V)	39.91/39.91 pm	41.56/41.56 pm
Touschek lifetime	29.22 h	34.09 h	Touschek lifetime	68.18 h	66.39 h

위의 <표 3.1.3.9>를 보면 두 가지 방법을 동시에 사용하지 않고 한 가지 방법만 선택해서 사용하더라도 17 h 이상의 lifetime을 얻을 수 있었다.

참고문헌

[1] M. Sands, The Physics of Electron Storage Rings, SLAC-121, Nov. 1970.

[2] Borland, Michael, et al. "Simulation of Gas-Scattering Lifetime using Position-and Species-Dependent Pressure and Aperture Profiles." Proceedings of the 2015 International Particle Accelerator Conference. 2015.

[3] A. Piwinski, CERN Accelerator School General Acc. Phys., CERN 85-19.

[4] H. W. Koch and J. W. Motz, Rev. of Modern Phys., Vol.31, No.4, Oct. 1959.

사. Error and tolerance

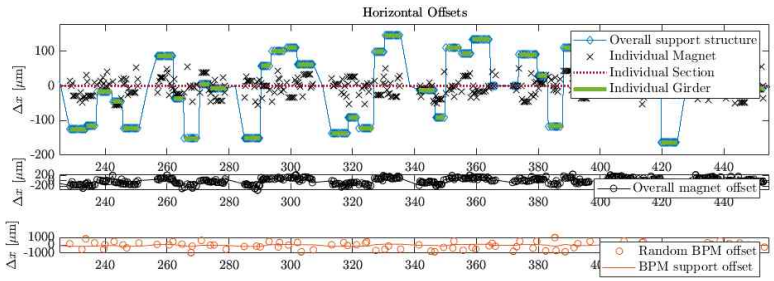
Magnet의 misalignment error와 rotation error를 <표 3.1.3.10>과 같이 설정하였다. BPM error는 <표 3.1.3.11>과 같이 주어진다. 각 error는 gaussian distribution 분포를 가지고, RMS 값(1-sigma value)에 대해 2-sigma cutoff만큼의 분포를 갖는다.

<표 3.1.3.10> 4GSR 저장링 magnet error의 설정값 (RMS 값, 2-sigma cutoff 사용)

Magnet	Misalignment (μm) (X/Y/Z)	Rotation (μrad) (Roll/Pitch/Yaw)	Strength error (%)
LGBM	30 / 30 / 250	400 / 100 / 100	0.05
Combined-function magnet	30 / 30 / 250	400 / 100 / 100	0.05
Quadrupole	30 / 30 / 250	400 / 700 / 700	0.05
Center bend	30 / 30 / 250	400 / 100 / 100	0.05
Sextupole	30 / 30 / 250	400 / 700 / 700	0.05
Octupole	30 / 30 / 250	400 / 700 / 700	0.05
Girder	100 / 100 / 100	400 / - / -	-

<표 3.1.3.11> 4GSR 저장링 BPM error 설정값 (RMS 값, 2-sigma cutoff 사용)

Offset (μm) (X/Y)	Noise (Closed orbit) (μm) (X/Y)	Noise (Turn-by-turn) (μm) (X/Y)	Roll (μrad)	Calibration error (%) (X/Y)
500 / 500	1 / 1	100 / 100	100	5 / 5



<그림 3.1.3.13> 임의의 error seed에서 longitudinal position에 따른 horizontal offset 분포

<표 3.1.3.10>의 magnet misalignment 값은 girder를 기준으로 하는 값이다. <그림 3.1.3.13>에서 보여주는 바와 같이 특정 magnet의 overall magnet offset 값은 magnet이 놓인 girder의 misalignment와 magnet의 girder에 대한 misalignment의 합으로 주어진다.

<표 3.1.3.10>, <표 3.1.3.11>의 error tolerance를 이용한 commissioning simulation 과정에 관한 서술과 lattice performance 평가는 3.1.3. 자 Commissioning simulation 항목에서 이어진다.

아. Amplification factor

저장링을 실제로 건설하게 되면 이상적인 저장링 lattice와 달라지게 된다. 오차를 만드는 데는 다양한 요인들이 작용하여 저장링의 많은 특성이 이상적인 lattice와 달라지는데 이를 수정하기 위해서 corrector magnet을 추가하거나 각각의 자석의 세기를 새롭게 최적화하게 된다. 이 단계에서 가장 먼저 하는 것이 corrector magnet을 이용하여 closed orbit을 찾는 것이다. 이를 위해서 먼저 corrector를 어디에 위치시킬지 결정하여야 한다. 이를 조사하기 위해서 4GSR의 amplification factor를 조사하였다. Amplification factor는 (수식 3.1.3.21)과 같이 정의된다.

$$x^2_{\mathrm{COD}} = \beta(\mathrm{z})\mathrm{A}^2_{\Delta\mathrm{x}}\sigma^2_{\Delta\mathrm{x}} + \beta(\mathrm{z})\mathrm{A}^2_{\Delta\mathrm{B/B}}\sigma^2_{\Delta\mathrm{B/B}} + \beta(\mathrm{z})\mathrm{A}^2_{\Delta\theta}\sigma^2_{\Delta\theta} \quad \text{(수식 3.1.3.21)}$$

여기서, x_{COD}는 closed orbit distortion, $\beta(z)$는 측정하는 곳의 beta function 값, $\sigma^2_{\Delta x}$은 RMS misalignment error, $\sigma^2_{\Delta B/B}$는 RMS field strength error, $\sigma^2_{\Delta\theta}$는 RMS kick angle이고 $A^2_{\Delta x}$, $A^2_{\Delta B/B}$, $A^2_{\Delta\theta}$는 각각 (수식 3.1.3.22)와 같이 정의된다.

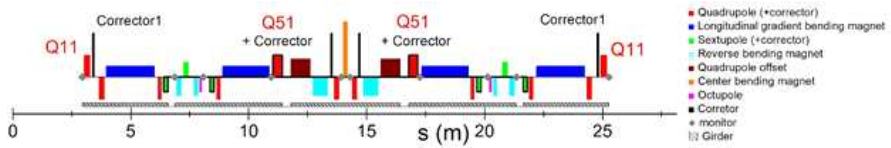
$$A^2_{\Delta x} = \frac{N\beta_i}{8\sin^2\pi\nu}(k_i \cdot L_i)^2,\quad A^2_{\Delta B/B} = \frac{N\beta_i}{8\sin^2\pi\nu}\theta_i^2,\quad A^2_{\Delta\theta} = \frac{N\beta_i}{8\sin^2\pi\nu} \quad \text{(수식 3.1.3.22)}$$

여기서, N는 자석의 개수, β_i는 자석이 위치한 곳의 beta function 값, ν는 tune, k_i는 자석의 사극 자석 성분, L_i는 자석의 길이, θ_i는 자석의 휨 각도이다. $A^2_{\Delta x}$는 사극 자석의 정렬 오차에 의한 closed orbit의 영향을 나타내고 $A^2_{\Delta B/B}$는 이극 자석의 세기 오차에 의한 closed orbit의 영향을 나타낸다. 오차에 의해서 가장 큰 영향을 주는 자석을 찾기 위해서 amplification factor를 계산하여 <표 3.1.3.12>와 같이 나타내었다.

<표 3.1.3.12> Amplification factor $A^2_{\Delta x}$와 $A^2_{\Delta B/B}$ 값

Amplification factor type	Magnet name	A_x	A_y	$A=\sqrt{A_x^2+A_y^2}$
Quadrupole $A_{\Delta x}$ with $\sigma^2_{\Delta x}=100\,\mu m$	QH1	0.12	0.05	0.13
	QH2	0.15	0.12	0.20
	QH3	0.27	0.17	0.32
	QH4	0.06	0.10	0.11
	Q11	**1.09**	**0.76**	**1.33**
	Q12	0.42	0.81	0.91
	Q31	0.56	1.00	1.14
	Q32	0.49	0.88	1.01
	Q51	**0.93**	**0.80**	**1.22**
	Q52	0.34	0.52	0.62
Dipole $A_{\Delta B/B}$ with $\sigma^2_{\Delta B/B}=0.1\%$	LGBM1	0.16	0.68	0.70
	LGBM2	0.20	0.35	0.40
	DQ51	0.20	0.25	0.32
	CENT	0.06	0.13	0.14

여기서, amplification factor를 비교하기 위해서 정렬 오차는 100 μm일 때, 세기 오차는 0.1%를 기준으로 계산하였다. 이 기준은 error tolerance를 기반으로 정해진 숫자이다. <표 3.1.3.12>을 살펴보면 오차에 의해서 가장 강력한 orbit distortion을 만드는 자석은 Q11과 Q51이다. 이를 수정하기 위해서 <그림 3.1.3.14>와 같이 Q11 근처에 독립적인 corrector를 배치했고 Q51 magnet은 corrector를 내장하도록 설계했다.



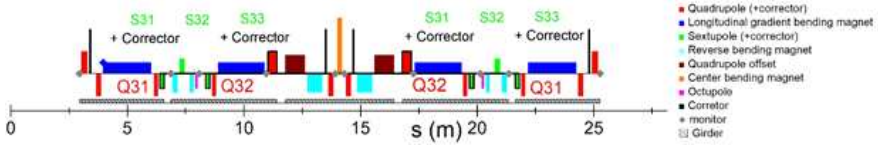
<그림 3.1.3.14> 4GSR의 자석 배치 모식도. Q11과 Q51 자석을 강조해서 표시했다.

독립적인 corrector가 위치하면 좋지만, Q51 주변에는 corrector를 위치시킬 만한 공간이 없어서 내장시키는 방향으로 결정하였다. 그리고 나서는 corrector를 배치했을 때 얼마나 효과적으로 closed orbit이 변화하는지를 확인하기 위해서 $A^2_{\Delta\theta}$를 계산하였다. 배치할 수 있는 corrector는 사극 자석이나 육극 자석에 내장하는 방법과 독립적인 corrector를 배치하는 것이고 이에 따라 사극 자석, 육극 자석의 독립적인 corrector에 따른 amplification factor를 조사하였다. 그 결과는 <표 3.1.3.13>이다.

여기서, amplification factor를 비교하기 위해서 kick의 세기는 500 μrad 일 때로 하였다. 가장 효과적인 자석은 Q31, Q32 사극 자석과 육극 자석이다. 그중에서도 육극 자석이 조금 더 효과적이어서 육극 자석에 corrector를 내장하기로 결정하였다. 그런데 3개의 육극 자석은 모두 betatron oscillation 상에서 거의 같은 phase에 있기 때문에 3개를 모두 사용하는 것은 오히려 비효율적일 수 있다. 따라서 자석의 모양이 같은 S31과 S33에 corrector를 내장하기로 하였다. 왜냐하면 이 두 육극 자석의 길이가 같고 S32만 길이가 다르기 때문에 corrector가 내장된 자석을 디자인할 때 같은 길이를 선택하는 것이 더 편하기 때문이다. 그 결과 <그림 3.1.3.15>와 같이 배치되었다.

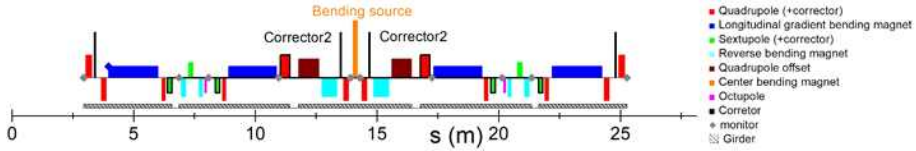
<표 3.1.3.13> Amplification factor $A_{\Delta\theta}^2$ 값

Amplification factor type	Magnet name	A_x	A_y	$A=\sqrt{A_x^2+A_y^2}$
Embedded corrector $A_{\Delta\theta}$ with $\sigma_{\Delta\theta}^2=500\,\mu rad$	QH1	27.54	11.46	29.83
	QH2	20.03	16.35	25.85
	QH3	22.34	13.73	26.22
	QH4	12.29	19.39	22.95
	Q11	64.88	45.15	79.04
	Q12	37.18	70.92	80.07
	Q31	**50.39**	**89.75**	**102.93**
	Q32	**44.04**	**79.20**	**90.62**
	Q51	33.02	28.58	43.67
	Q52	21.88	33.16	39.73
	S31	**64.50**	**79.82**	**102.62**
	S32	**91.70**	**57.17**	**108.06**
	S33	**54.82**	**74.02**	**92.11**
Independent corrector $A_{\Delta\theta}$ with $\sigma_{\Delta\theta}^2=500\,\mu rad$	Corrector1	54.11	55.38	77.43
	Corrector2	33.81	27.69	43.71



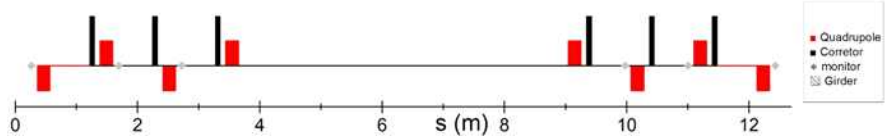
<그림 3.1.3.15> 4GSR의 자석 배치 모식도. S31과 S33 자석을 강조해서 표시했다.

또한 <그림 3.1.3.16>과 같이 4GSR은 center bending magnet을 bending beamline으로 활용하도록 설계하였는데 이때 안정적인 빔을 제공하기 위해서는 center bending magnet 근처에 corrector가 필요하다. 따라서 center bending magnet 근처로 independent corrector magnet, corrector 2를 추가하였다.



<그림 3.1.3.16> 4GSR의 자석 배치 모식도. Bending source와 corrector 2 자석을 강조해서 표시했다.

이때 independent corrector를 사용한 것은 이 corrector를 static corrector뿐 아니라 fast corrector로도 활용하여 fast orbit feedback을 통해서 빔라인에 빔을 최대한 안정적으로 공급하기 위해서이다. 이 외에도 high-beta straight section에 injection을 할 때 추가로 corrector가 필요할 것으로 예상하여 <그림 3.1.3.17>과 같이 6개의 corrector를 추가하였다.



<그림 3.1.3.17> 4GSR의 high-beta straight section 자석 배치 모식도

BPM은 corrector와 한 쌍으로 배치하였고 가능하다면 같은 쌍의 corrector와 가까운 곳에 위치 시켰다. 따라서 4GSR의 BPM과 corrector의 개수는 서로 같다. 한 cell 안에는 10개씩 배치되었고 전체 저장링에는 총 288개의 BPM과 corrector가 배치되었다.

참고문헌

[1] Miles, John F. Concerning the strength of closed orbit correction dipoles in the arcs of LHC V4. 2. No. LHC-Project-Note-43. CERN- LHC-Project-Note-43, 1996.

자. Commissioning simulations

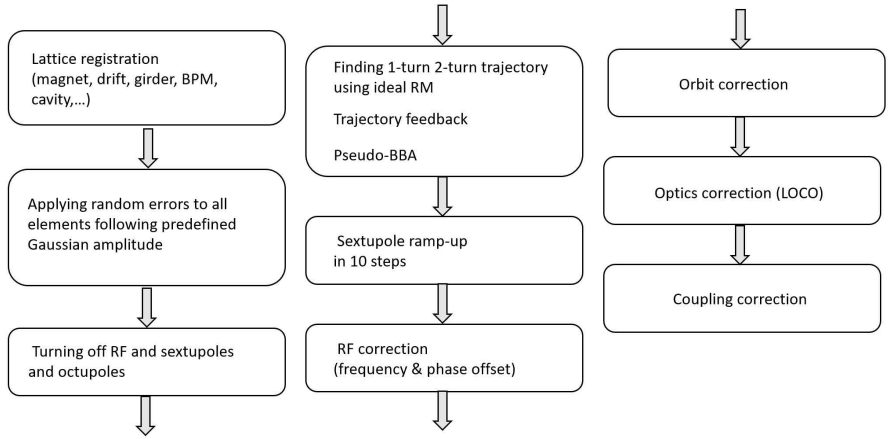
저장링 빔 동력학에 대한 이해와 경험의 축적과 전산모사 툴의 발전은 4GSR 저장링의 commissioning simulation을 가능하게 하였다. 4GSR은 3GSR에 비해 quadrupole, sextupole field의 세기가 강하고 error source에 의해 orbit, beta 함수 등이 민감하게 변화하므로 원하는 저장링의 성능을 안정적으로 얻기 위해서는 commissioning 단계별로 더욱 체계적인 lattice correction 전략이 필요하다. Commissioning simulation의 목표와 simulation을 통해 얻을 수 있는 이점을 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. Magnet misalignment error, field error, tilt error 등의 error tolerance 범위의 적합도를 빔물리 측면에서 평가할 수 있다.

2. 효과적인 correction을 가능하게 하는 Corrector, BPM의 위치를 찾을 수 있다.

3. Lattice ensemble을 만들고 ensemble을 이용하여 dynamic aperture, Touschek lifetime 등 저장링의 성능을 통계적인 범위로 예측할 수 있다.

4. Commissioning 과정에 필요한 script 파일을 준비하고, commissioning 과정에서 겪을 수 있는 시행착오를 미리 학습하여 신속한 commissioning을 대비할 수 있다.



<그림 3.1.3.18> Correction chain of commissioning simulations.

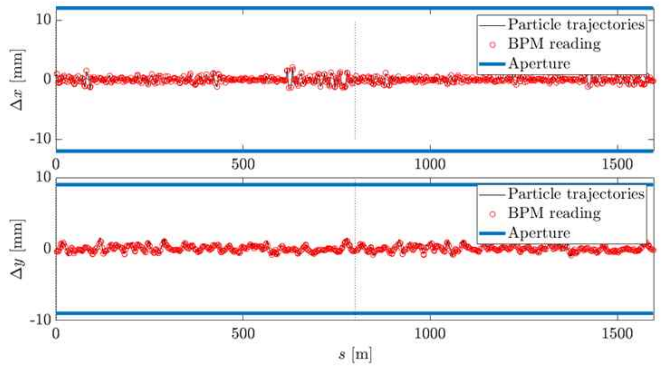
4GSR의 Commissioning simulation을 위해 Toolkit for Simulated Commissioning (SC) 툴을 사용하였다. 이 툴은 Accelerator Toolbox (AT)와 MATLAB Middle Layer (MML)을 기반으로 하여 LBNL의 T.Hellert 등에 의해 개발된 툴로써, 현재 구축이 진행 중인 대부분의 4GSR 시설의 commissioning simulation에 활용되고 있는 툴이다. Trajectory correction, RF correction, orbit correction, Linear optics from closed orbits (LOCO) 등 correction에 필요한 함수와 script를 제공하고 있고, 이는 실제 commissioning 과정에서도 활용 가능할 것으로 기대된다.

SC를 통한 Commissioning simulation 과정을 모식도로 표현하면 <그림 3.1.3.18>과 같다. AT 환경에서 magnet, drift, girder, BPM 등의 lattice 정보를 입력하고 <표 3.1.3.10>, <표 3.1.3.11>에서 주어진 것과 같은 error tolerance 범위를 element 별로 지정한다 (Lattice registration). 다음으로 error tolerance 범위에서 Gaussian distribution의 random error를 지정한다 (Applying random errors). Correction 과정은 main RF cavity와 sextupole, octupole를 끄는 것부터 시작한다 (Turning off RF and sextupoles). Sextupole magnet을 끔으로써 강한 세기를 갖는 sextupole magnet과 sextupole magnet의 misalignment error로부터 유발되는 강력한 orbit 뒤틀림 효과를 피할 수 있고, 안정적으로 1-turn, 2-turn trajectory를 찾을 수 있다. 이어서, 입사된 빔이 1-turn, 2-turn 후 저장링 내에서 살아남을 수 있는 trajectory를 찾는다 (Finding 1-turn, 2-turn trajectory). 이 과정에서 Ideal lattice로부터 계산된 orbit response

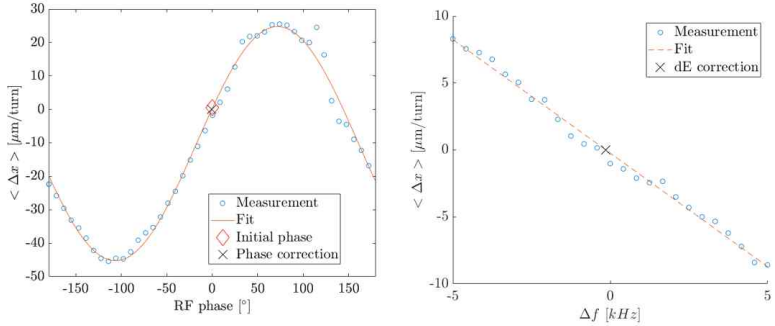
matrix (ORM)과 ORM의 inverse matrix가 사용된다. 이후 Beam-based alignment를 수행하여 BPM과 각 BPM에 인접한 quadrupole magnet 사이의 offset이 약 RMS 50 μm가 되게끔 한다.

다음으로 육극 자석과 팔극 자석의 세기를 매 step 별로 design value 기준 1/10세기만큼 올리며 총 10 step 동안 점차적으로 증가시킨다. 각 step 별로 ideal lattice의 ORM을 이용하여 trajectory feedback을 수행하고, RF correction 과정을 여러 차례 반복하여 ramp-up 된 sextupole magnet, octupole magnet으로 인해 변화된 trajectory를 조정하고 RF cavity의 synchronous 조건을 맞춘다. ramp-up이 진행되면서 sextupole misalignment가 만드는 quadrupole field에 의해 tune이 변할 수 있고, tune이 integer resonance 혹은 half-integer resonance에 맞닿게 되어 안정적인 trajectory를 찾지 못할 수 있다. 이 경우 ORM의 inverse matrix를 이용하여 trajectory feedback을 수행하거나 HMBA cell의 matching quadrupole의 세기를 조정하여 tune을 조정한다. Closed orbit이 존재하지 않고 tune을 계산할 수 없는 경우 beam transmission이 증가하는 방향을 bad resonance에서 멀어지는 방향으로 가정하고 tune 조정을 반복하여 안정된 trajectory 혹은 orbit을 찾을 수 있다.

다음으로 RF cavity를 켜고 Beam-based RF correction을 수행한다. Phase correction, frequency correction을 여러 차례 iteration 하여 빔이 longitudinal phase space의 synchronous phase에 위치하도록 한다. Phase correction은 phase를 ±180° 범위에서 scan 하며 모든 turn-by-turn BPM 값의 turn 당 평균값이 0이 되는 phase가 synchronous phase가 되는 조건임을 가정한다. 최초 약 10 turn의 BPM 값을 이용하여 synchrotron motion에 의한 효과를 무시한다. Frequency correction 과정은 frequency 값을 수 kHz 범위에서 scan 하며 마찬가지로 모든 turn-by-turn BPM 값의 turn 당 평균값이 0이 되는 frequency가 synchronous frequency가 되는 조건임을 가정한다. 최초 약 12 turn의 turn-by-turn BPM 값을 이용하여 안정적으로 synchronous frequency를 찾을 수 있음을 확인하였다.



<그림 3.1.3.19> Example of trajectory correction



<그림 3.1.3.20> Example of RF correction: RF phase correction and RF frequency correction

Sextupole ramp-up이 완료되고 closed orbit을 찾게 되면 periodic 한 beta 함수값과 tune, chromaticity, emittance 등 저장링의 주요 parameter를 얻을 수 있다. Sextupole ramp-up 후 closed orbit은 찾을 수 있지만 이 단계에서 closed orbit은 design orbit으로부터 크게 벗어나 있어서 원하는 저장링 parameter를 달성하기 위해 orbit correction 과정을 통해 rms orbit을 최소화시키는 과정이 필요하다. Orbit correction 과정에서는 sextupole ramp-up 후 얻은 closed orbit으로부터 corrector 변화에 따른 BPM reading 변화를 측정하여 orbit response matrix (ORM)를 얻은 후 ORM의 inverse response matrix와 SVD 방법을 이용하여 rms BPM reading을 최소화시킨다.

Orbit correction 과정은 Tikhonov regularization parameter를 큰 값에서 작은 값으로 점차 감소시키며 Tikhonov regularization parameter 값에 대한 loop 속에서 iteration 된다. Iteration은 rms orbit 더 이상 개선되지 않을 때까지 반복된다. Loop 속에서 orbit correction에 사용되는 corrector의 세기가 mechanical limit에 가까워질 경우 다음 iteration에서는 해당 corrector는 사용되지 않는다. ORM에서 해당 corrector에 대응하는 matrix column도 inverse matrix 계산에 사용되지 않게 된다. Orbit correction 과정에서 rms orbit의 수렴 속도가 느릴 경우 ORM을 다시 측정하여 낮은 rms orbit일 때 orbit correction의 효율을 높일 수 있다.

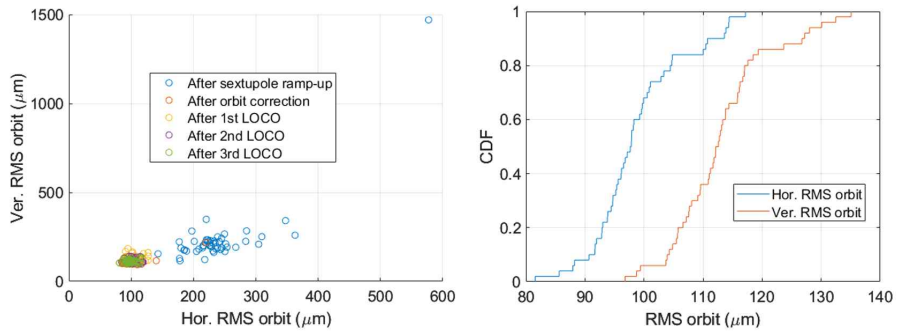
다음 과정으로 Linear Optics from Closed Orbits (LOCO)를 수행하여 tune, emittance, beta-beat 등 주요 linear optics parameter를 ideal lattice의 값과 가깝게 조정한다. LOCO는 3회 반복 수행되었다.

1st LOCO에서는 모든 pure quadrupole (combined-function magnet이 아닌 quadrupole)을 사용하고 2nd LOCO, 3rd LOCO에서는 모든 pure quadrupole과 모든 skew magnet을 사용하여 beta-beat와 coupling을 조정한다.

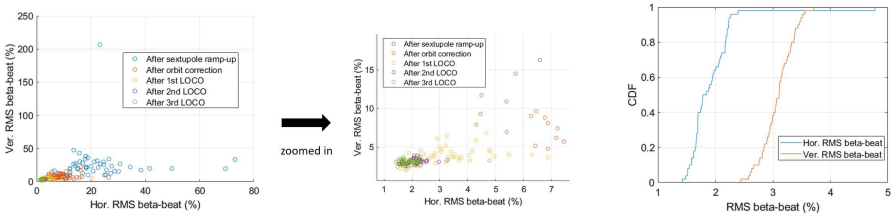
최종적으로 coupling correction 과정에서 skew magnet의 세기를 바꾸어 coupling ratio를 10%로 조정한다. 이 과정에서 beta-beat의 변화는 미미하여서 LOCO를 다시 수행하지 않아도 된다. LOCO 수행 이후 orbit correction을 수행하여 LOCO로 인해 흔들린 orbit을 정돈한다.

<표 3.1.3.10>에서 주어진 error 값을 갖는 50개의 lattice ensemble을 생성하였다. Correction chain의 step 별 rms orbit, beta-beat, dispersion-beat, Tune, Chromaticity, Emittance, Dynamic aperture, Touschek lifetime의 분포와 개선 정도는 <그림 3.1.3.21>~<그림 3.1.3.26>과 같다.

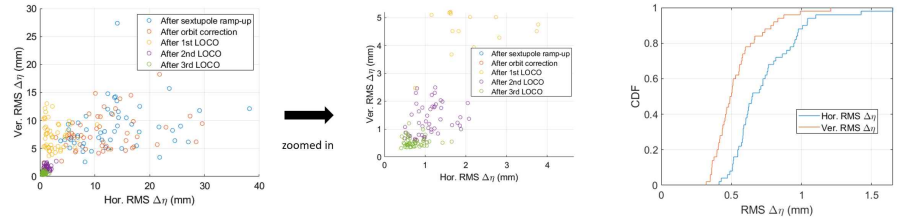
Sextupole ramp-up 후 RMS orbit은 수평, 수직 약 200~400 μm이고, 모든 correction chain이 완료된 후 RMS orbit은 약 100 μm로 감소한다. Rms orbit은 orbit correction 과정에서 주된 개선이 이루어진다 (<그림 3.1.3.21>).



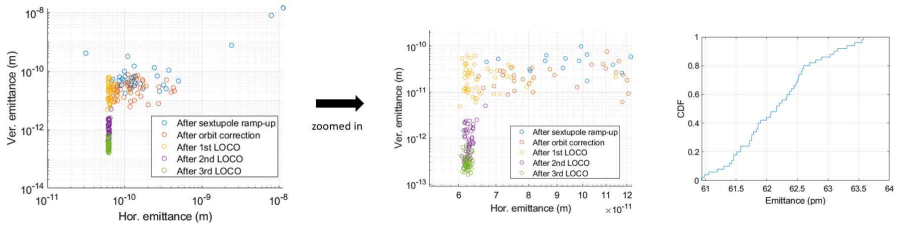
<그림 3.1.3.21> Correction chain의 step에 따른 RMS orbit의 분포 (좌)와 correction 후 RMS orbit의 누적 확률 분포 (우)



<그림 3.1.3.22> Correction chain의 step에 따른 beta-beat의 분포 (좌)와 correction 후 beta-beat의 누적 확률 분포 (우)



<그림 3.1.3.23> Correction chain의 step에 따른 dispersion-beat의 분포 (좌)와 correction 후 dispersion-beat의 누적 확률 분포 (우)

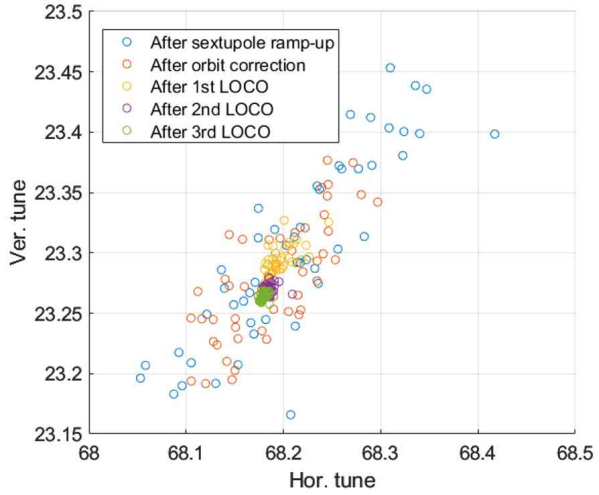


<그림 3.1.3.24> Correction chain의 step에 따른 emittance 의 분포 (좌)와 correction 후 horizontal emittance의 누적 확률 분포 (우). Design emittance = 62 pm

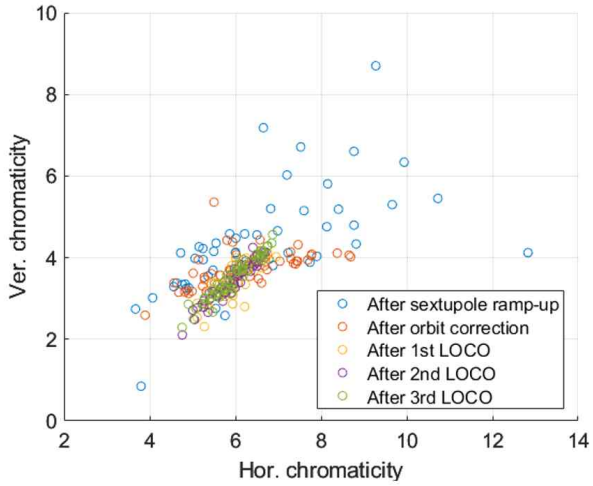
Beta-beat는 sextupole ramp-up 후 최대 200%에 이르는 넓은 분포를 보인다. orbit correction 후 10% 이하로 개선되고, correction 후 최종적으로 수평 방향 약 2%, 수직 방향 3%로 개선된다 (<그림 3.1.3.22>).

Dispersion-beat도 beta-beat의 개선과 유사한 분포를 보인다. Correction 후 best 0.3 mm, worst 1.5 mm 범위에서 분포하는 결과를 보인다 (<그림 3.1.3.23>).

Emittance의 경우 Correction step에 따라 그 값이 큰 폭으로 변화한다. Sextupole ramp-up 후 worst case 10 nm에 이르던 horizontal emittance는 orbit correction 후 worst case 약 100 pm로 의미 있는 개선을 보인다. 3rd LOCO 이후 design emittance 대비 worst case 약 2.5% 큰 값을 가진다. Vertical emittance 의 경우 1st LOCO 이후 약 10 pm, 2nd LOCO 이후 1 pm 이하의 값을 가진다 (<그림 3.1.3.24>).



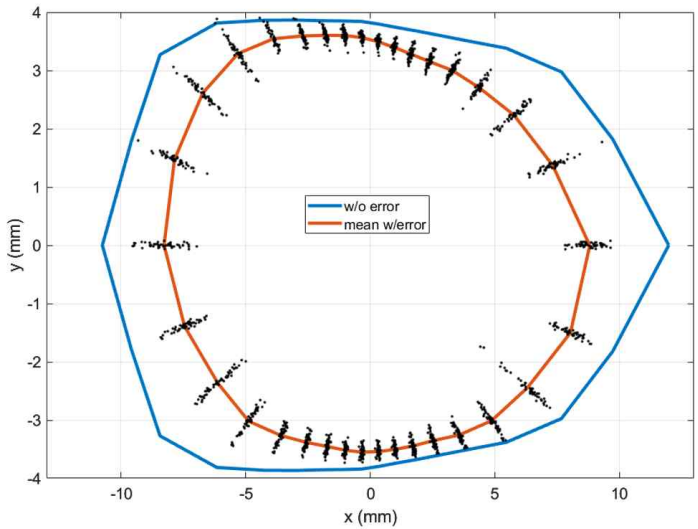
<그림 3.1.3.25> Correction chain의 step에 따른 Tune의 분포. Design tune = (68.18, 23.26).



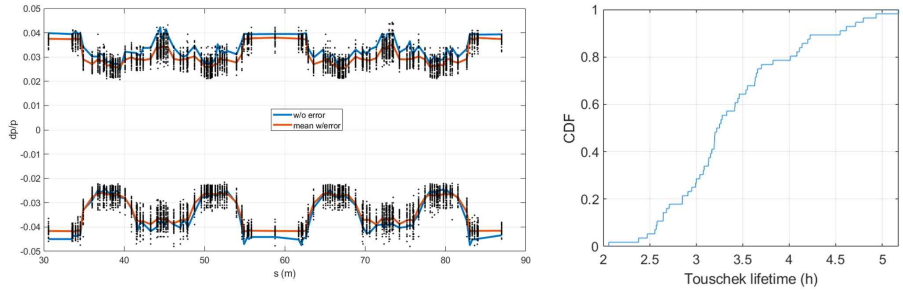
<그림 3.1.3.26> Correction chain의 step에 따른 chromaticity의 분포. Design chromaticity = (5.8, 3.5).

Tune의 경우 sextupole ramp-up 후 수평 방향 0.05~0.42, 수직 방향 0.15~0.46의 넓은 분포를 보인다. Orbit correction 후 tune 분포는 개선되는 결과를 보인다. Quadrupole 세기 변화 없이 orbit correction만으로 tune이 개선되는 결과는 closed orbit이 육극 자석, 팔극 자석 등 high-order magnet의 중심에서 크게 벗어나는 경우 저장링 parameter에 미치는 영향과 민감도를 간접적으로 보여준다고 할 수 있다 (<그림 3.1.3.25>). Correction이 완료되고 tune은 design tune 값으로 수렴한다.

Chromaticity 역시 orbit correction 후 상당한 개선을 보이고, correction chain 진행에 따라 design chromaticity 주변으로 수렴되는 결과를 보인다. Correction 후 tune의 분포와 비교할 때 그 분포의 폭은 더 큰 결과를 보이나, LOCO 과정에서 육극 자석의 세기는 variable로 사용하지 않았으므로 이해할 수 있는 결과이다 (<그림 3.1.3.26>). 이후 필요에 따라 육극 자석의 세기를 조정하여 design chromaticity에 더욱 가까운 값으로 조정할 수 있다.



<그림 3.1.3.27> Correction 후 dynamics aperture 분포



<그림 3.1.3.28> Correction 후 momentum aperture 분포 (좌)와 Touschek lifetime의 누적확률분포 (우).

Correction 후 50개 random error seeds에 대해 high-beta straight section 중심에서 dynamics aperture 계산 결과는 <그림 3.1.3.27>과 같다. 모든 drift space, magnet에 수평 방향 12 mm, 수직 방향 9 mm physical aperture를 지정한 후 2048 turn만큼 tracking 하였다. 50개 random error seeds 평균 dynamics aperture는 y = 0인 위치에서 -8.28 mm이고 표준편차는 0.62 mm, 최솟값은 -6.96 mm, 최댓값은 -9.53 mm이다. 이 결과는 correction 후 lattice는 off-axis injection이 이루어지기에 충분한 크기의 dynamics aperture를 가질 수 있음을 보여준다.

Correction 후 50개 random error seeds에 대해 momentum aperture와 Touschek lifetime을 계산한 결과는 <그림 3.1.3.28>과 같다. Touschek lifetime은 single bunch가 charge 1 nC, RMS bunch length 3.66 mm의 값을 가지는 조건에서 계산되었다. Harmonic cavity에 의한 bunch 길이늘임효과는 고려되지 않았다. 10% coupling 조건에서 Touschek lifetime은 ideal lattice에 대해 7.30 시간의 값을 가진다. Correction 후 lattice ensemble에서 Touschek lifetime은 평균 5.18 시간, 표준편차 0.64의 분포를 보인다. Touschek lifetime은 momentum aperture 넓이의 세제곱에 비례하므로 error로 인해 줄어든 momentum aperture에 민감하게 변화하고, lattice ensemble이 갖는 Touschek lifetime 값은 넓게 분포한다.

참고문헌

[1] A. Terebilo, in Proceedings of the 19th Particle Accelerator Conference, Chicago, IL, 2001 (IEEE, Piscataway, NJ, 2001), pp. 3203-3205.

[2] T. Hellert et al., "Lattice correction and commissioning simulation of the Advanced Light Source upgrade storage ring", Phys. Rev. Accel. Beams 25/110701, 2022.

[3] G. Penn et al., "Comparisons Between AT and Elegant Tracking", in Proc. of 12th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'21): Campinas, Brazil, 2021.

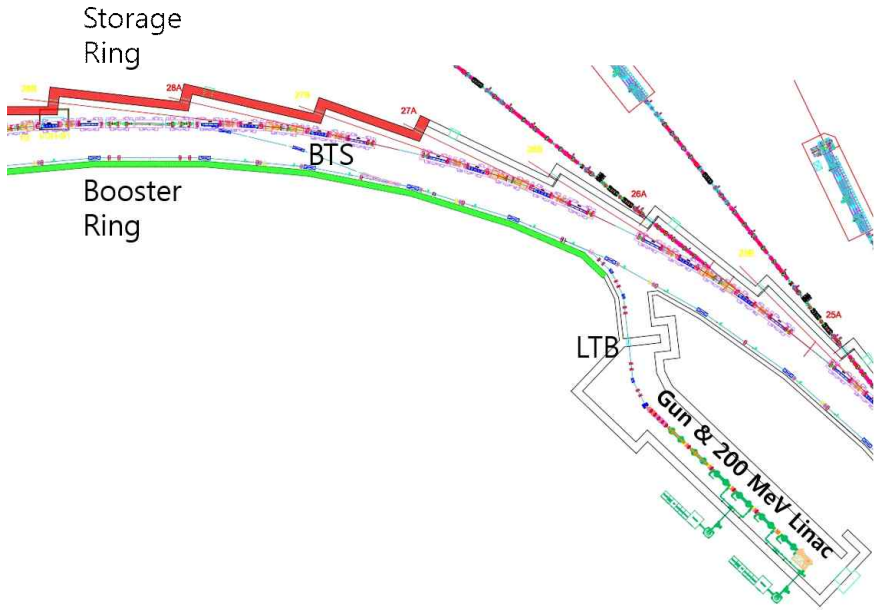
[4] T. Hellert et al., "Toolkit for simulated commissioning of storage-ring light sources and application to the advanced light source upgrade accumulator", Phys. Rev. Accel. Beams 22/100702, 2019.

[5] V. Sajaev, "Commissioning simulations for the Argonne Advanced Photon Source upgrade lattice", Phys. Rev. Accel. Beams 22/040102, 2019.

3.1.4 입사 장치 (Injector)

가. 개요

저장링에 입사되는 전자빔 번치를 생성하는 장치를 통칭 입사 장치(injector)라고 한다. 4GSR의 입사 장치는 크게 선형가속기(linac)와 부스터(booster)로 나눌 수 있다. 선형가속기는 전자총으로 전자뭉치를 생성하여 200 MeV 에너지까지 가속한다. 부스터는 선형가속기로부터 200 MeV 전자뭉치를 전달받아 이를 4 GeV까지 가속한다. 부스터는 저장링과 동심원을 그리며 저장링과 터널을 공유한다. 선형가속기는 저장링 터널 안쪽에 위치하게 된다. 선형가속기와 부스터를 이어주는 빔 전송구간을 LTB (linac to booster)라고 명명하며, 부스터에서 저장링을 잇는 구간을 BTS (booster to storage ring)라고 명명한다.



<그림 3.1.4.1> 입사 장치 구성도

나. 200 MeV 선형가속기

(1) 사양 및 배치 (specification and layout)

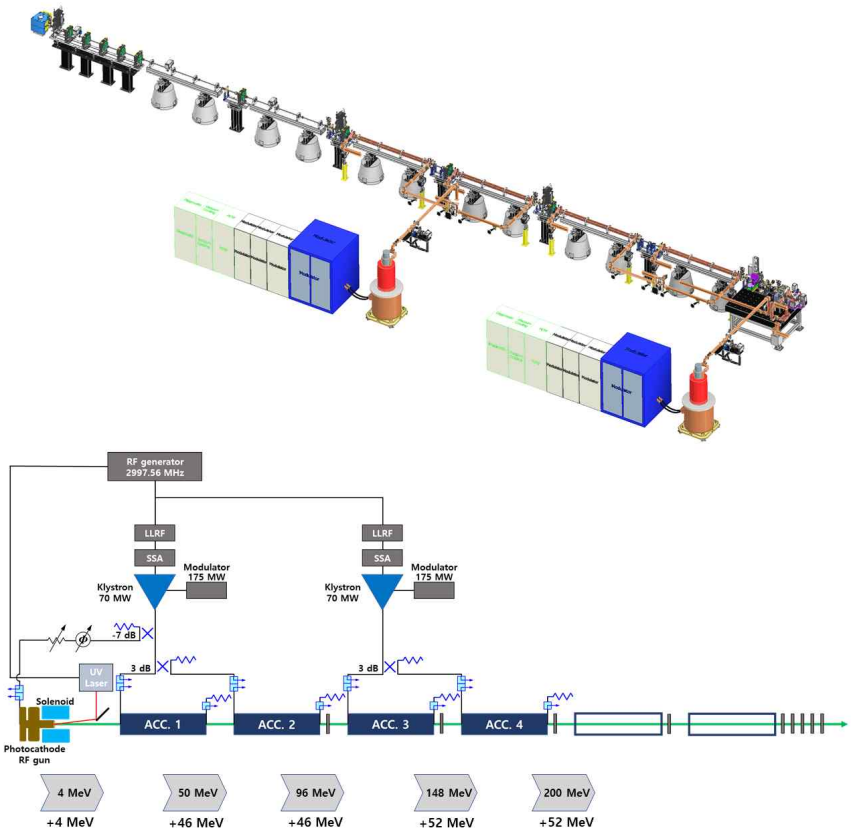
선형가속기는 200 MeV의 에너지를 갖는 전자빔을 생성하며, 열음극 전자총 대신, RF 광음극 전자총을 사용함에 따라, 특징적으로 낮은 에미턴스(low emittance)와 낮은 에너지 분포(low energy spread)를 갖는다. 관련된 주요 파라미터들은 <표 3.1.4.1>에 표기하였다. 반복률이 2 Hz인 Single bunch 모드 및 multi-bunch 모드의 두 가지 운전모드를 지원하며, 모드 변환 시간은 안정화를 포함해 5분 이내이다.

<표 3.1.4.1> 선형가속기 parameter

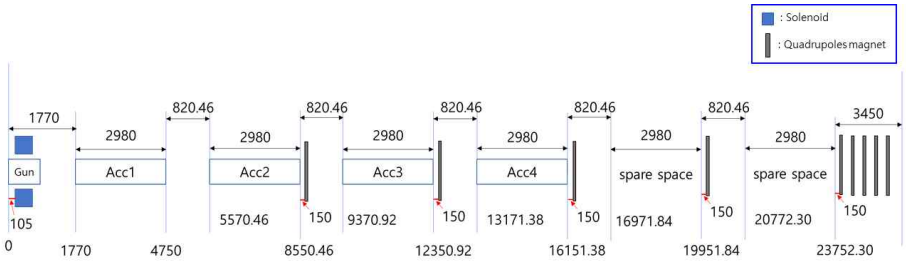
구 분	Single-bunch mode	Multi-bunch mode
Energy	200 MeV	200 MeV
Frequency	2997.56 ± 0.1 MHz	2997.56 ± 0.1 MHz
Emittance (at 200 MeV)	≦ 10 nm	≦ 10 nm
Relative energy spread (rms)	≦ 0.5%	≦ 0.5%
Pulse to Pulse energy jitter (rms)	≦ 0.2%	≦ 0.2%
Bunch charge (charge stability)	0.01 to 1 nC (2%)	1 to 3 nC (5%)
Pulse duration	6~8 ps FWHM	≈128 ns (64 bunches)
Repetition rate	2 Hz	2 Hz

선형가속기 구성도와 배치도는 <그림 3.1.4.2>와 <그림 3.1.4.3> 각각 표기하였다. RF 광음극 전자총에서 UV 레이저에 의해 생성된 전자번치는 4 MeV로 가속되고, PAL-XFEL과 동일한 방식으로 가속관을 이용하여 200 MeV까지 가속된다. 건 에너지를 XFEL의 6 MeV 대비 작게 하여 Dark current를 줄이고 운영의 안정성을 높이고자 하였다. 전자총과 첫 번째 가속관 사이에는 초기 가속된 전자를 집속하기 위해 솔레노이드 전자석이 설치되며, 가속관은 총 4개로 구성된다. 향후 에너지 증강 업그레이드 가능성을 위해 2개의 가속관을 추가설치 가능하도록 공간확보를 하였다. 전자빔의 집속 및 LTB로의 매칭을 위해 두 번째 가속관 뒤로 9개의 quadrupole magnet을 설치한다. 전자총과 1번, 2번 가속관에 공급되는 에너지는 첫 번째 클라이스트론-모듈레이터 시스템으로부터 제공되며, 3번, 4번 가속관에 공급되는 에너지는 두 번째 클라이스트론-모듈레이터 시스템으로부터 제공된다. 안정적인 에너지 공급을 위해 70 MW 이상급(≈55 MW 사용)의 클라이스트론-모듈레이터 시스템이 필요하며, 각각 전용의 LLRF-SSA 시스템에 의해 독립적으로 피드백 조정된다. 건에

공급되는 고출력 RF는 도파관 방식의 기계적 구동 방식의 phase shifter와 attenuator에 의해 조정하고, 운전 중에는 고정하여 사용한다.



<그림 3.1.4.2> 선형가속기 구성도



<그림 3.1.4.3> 선형가속기 배치도

(2) 고주파 시스템 (RF system)

클라이스트론 모듈레이터 갤러리의 온도 및 습도는 각각 25 ± 1 ℃, 45 ± 10% 수준으로 공조시스템에 의해 조절된다. 선형가속기 터널은 3종 환기 방식이 적용되며, 별도의 공조시스템 없이 가속관 및 도파관의 복사열에 온도가 유지된다. 가속관과 전자총의 LCW (Low Conductive water) 공급 온도는 각각 27~33 ℃, 30~60 ℃이다. 이와 같은 LCW 공급 온도를 설정한 이유는 운전 시 요구되는 주파수 변경에 대응하기 위함이다. 30 ℃에 2997.56 MHz 공진주파수를 갖도록 제작한 가속관은 ±3 ℃ 온도변경에 의해 ±150 kHz의 주파수 조절이 가능하다. 전자총의 경우 제작의 오차를 고려하여 보다 넓은 온도 튜닝범위를 지정하였다.

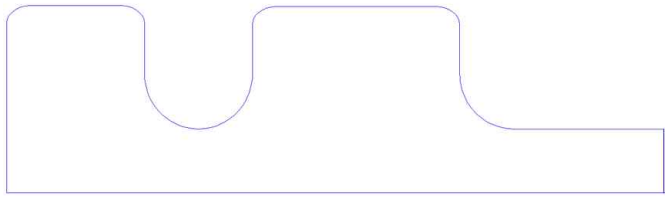
○ 전자총 시스템

개념설계 당시 PLS-II (3세대 원형 방사광가속기) 구축 경험에 기초하여 열음극전자총을 검토하였으나 성능, 제작, 운영에 있어서의 우위를 갖는 광음극 전자총으로 설계 사양을 변경하였다. 광음극 전자총은 Cu-cathode를 채택하였고 주파수는 2997.56 MHz이며, PAL-XFEL에서 개발된 광음극 전자총을 참고하여 설계하였다. 전자총 시스템 설계 parameter는 아래 <표 3.1.4.2>와 같으며 single-bunch mode와 multi-bunch mode로 운영된다.

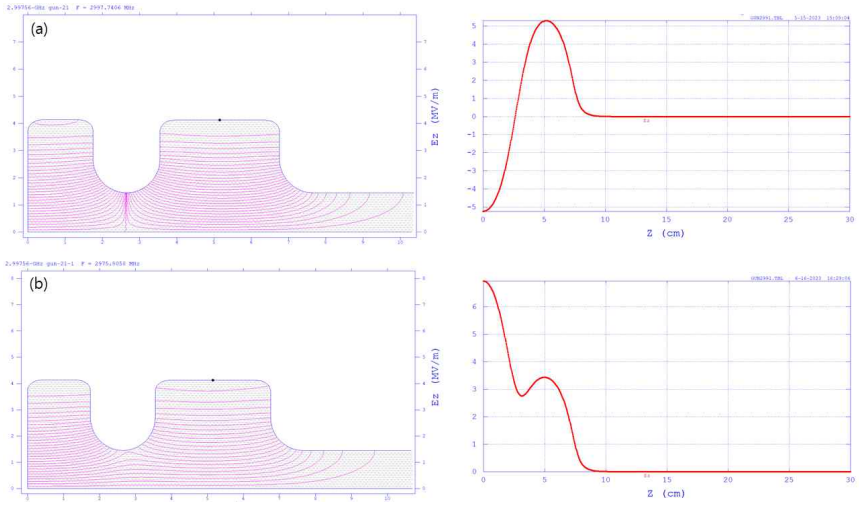
<표 3.1.4.2> 전자총 시스템 설계 parameter

	Single bunch mode	Multi-bunch mode
Beam energy	4 MeV	4 MeV
Charge	0.01~1 nC	1~3 nC
Pulse length	≤ 20 ps	≈128 ns (64 bunches)
Repetition rate	2 Hz	2 Hz

설계는 미국 Los Alamos National laboratory (LANL)에서 제작된 SUPERFISH 프로그램을 이용하였다. RF 건 cavity는 full-cell과 half-cell로 구성되며 실린더 대칭성을 갖기 때문에 <그림 3.1.4.4>와 같이 설계하였다. Full-cell의 길이는 $\frac{\lambda}{2}$값을 가지며 half-cell은 full-cell의 약0.5배의 길이를 갖는다. Field balance를 맞추기 위해 half-cell의 길이를 조정하였고 최종적으로 ~1.52 cell의 광음극 전자총을 설계하였다. π-mode와 0-mode의 주파수는 약 20 MHz의 차이를 보이며, 설계된 RF cavity의 π-mode와 0-mode의 전기력선과 전자기장의 세기를 SUPERFISH로 계산하여 <그림 3.1.4.5>로 나타내었다.



<그림 3.1.4.3> SUPERFISH 프로그램으로 설계된 RF 건 cavity



<그림 3.1.4.4> SUPERFISH로 계산한 RF cavity π-mode (a)와 RF cavity 0-mode (b)의 전기력선과 전자기장의 세기

○ 가속관

국산화 기술개발을 통해 다목적 방사광가속기용 가속관을 개발하였다. XFEL 가속관에서 주파수를 변경하고, 커플러를 재설계하여, 커플러에서의 빔 요동을 감소시켰다. Flange를 제외한 가속관의 구조 소재는 무산소 고전도 구리이며 84 normal cells + 2 coupler cavities로 구성되어있다. 가속관은 30 ℃에서 레퍼런스 주파수인 2997.56 MHz로 튜닝된다. XFEL과 동일한 $2\pi/3$ 모드 고정 기울기(constant gradient) 진행파(traveling wave) 방식이다.

(3) 빔 역학 시뮬레이션

전자총에서 생성된 전자빔에 따라 마지막 가속관 이후 가속된 전자빔이 요구조건에 만족하는 운전조건을 알아보기 위한 빔 역학 시뮬레이션을 수행하였다. 빔 역학 시뮬레이션은 ASTRA 프로그램을 이용하였다. 전자빔에 에너지를 가속하는 전자총 가속관 및 Traveling Wave 가속관의 gradient와 input phase, 전자빔을 집속하는 솔레노이드와 사극 자석의 세기 등에 대하여 parameter sweep을 수행하였다. 결과적으로 수평/수직 방향의 emittance와 빔 크기, 종 방향의 bunch length와 energy spread 등의 변화를 고려하여 운전 사양의 최적화를 수행하였다. 이때 사용된 input filed는 Poisson/Superfish code를 이용하여 각 가속관의 전기장 데이터와 솔레노이드의 자기장 데이터를 계산하였으며, 사극 자석의 경우 ASTRA 내부 계산 방식을 이용하였다. 저에너지 구간에서의 전자빔 내부 입자 간의 상호 작용에 의한 공간전하효과를 고려하기 위해 10,000개 이상의 macro particle을 이용하여 계산하였다. 전자빔의 운동방정식은 미분방정식을 사용하였고, 효과적인 계산을 위해서 가변적인 Runge-Kutta step을 이용하였다. 추가로 parameter sweep을 통한 운전 사양 최적화 시 놓칠 수 있는 local minima/maxima를 고려하기 위해 다중목적 유전 알고리즘(Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)을 이용하였다.

○ 다중목적 유전 알고리즘(Multi-Objective Genetic Algorithm)을 이용한 운전 사양 최적화

선형가속기의 설계는 핵심 장치의 운전 사양을 최적화하는 것이다. 목표하는 빔 parameter를 얻기 위해 다양한 조건들을 고려해야 하며, 여러 개의 목적 함수들이 동시에 요구조건을 만족해야 한다. 빔 역학 시뮬레이션의 최적화를 위해서 유전학적 알고리즘을 활용한 다중목적 유전학 알고리즘(Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)을 사용하였다. 선형가속기를 구성하는 가속관들의 input phase와 전자석의 세기 등을 변수로 하였고, 선형가속기 끝단에서의 rms energy spread와 transverse normalized rms emittance 등의 최소화를 진행하였다. 이때, Beam size와 divergence, average energy, 그리고 bunch length 등은 제약 함수로 하여 요구조건에 만족하는 최적화를 진행하였다. <표 3.1.4.3>은 운전 사양을 최적화하기 위해 사용한 최적화 함수 및 구조 매개 변수를 보여준다.

<표 3.1.4.3> 선형가속기 최적화 함수 및 구조 매개 변수

최적화 함수	변수	비고
목적 함수 (Objective Functions)	rms Energy Spread	최소화
	Horizontal Normalized rms Emittance	최소화
	Vertical Normalized rms Emittance	최소화
제약 함수 (Constraint Functions)	Horizontal rms Beam Size	< 0.3 mm
	Vertical rms Beam Size	< 0.3 mm
	Horizontal rms Divergence	< 0.2663 mrad
	Vertical rms Divergence	< 0.2663 mrad
	Bunch length	< 1.0 mm
	Transmission rate	> 99.99%
	Average energy	> 200 MeV
매개 변수 (Variables)	RF gun Input Phase	-20~20 degree
	Acc1&2 Input Phase	-20~20 degree
	Acc3&4 Input Phase	-20~20 degree
	Solenoid Strength	0.15~0.21 T
	Focusing Quad Strength	1~3 T/m
	Defocusing Quad Strength	-4~-1 T/m

MOGA를 이용하기 위해서 Python 기반의 pymoo 라이브러리를 활용하였으며, Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) 유전 알고리즘을 사용하였다.

빔 역학 시뮬레이션에서 사용한 초기 빔 parameter들은 아래 <표 3.1.4.4>에 나타내었다. 이와 같은 조건은 전하량의 차이를 제외하고 단일 번치 모드와 다중 번치 모드에 동일하게 적용되었다.

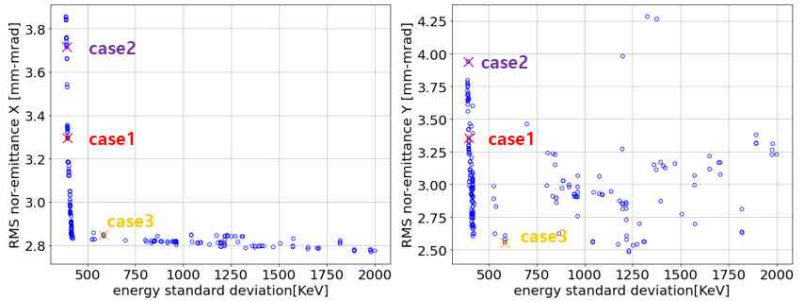
<표 3.1.4.4> 초기 빔 parameters

	Initial Beam Parameters
Longitudinal Distribution	Gaussian
Transverse Distribution	Cut-Gaussian
Bunch Length (FWHM)	6 ps
Beam Diameters	2 mm

가속관의 경우 주어진 field gradient에 대하여 가속관에서 가속되는 전자빔의 에너지가 최대가 되며, energy spread가 최소가 되는 input phase의 조건을 찾았다. 가속관 1번과 2번, 3번과 4번의 input phase는 각각 같은 고주파 전원을 사용하기 때문에 동기화하였다. 솔레노이드는 공간전하효과의 영향으로 커지는 빔의 emittance 및 크기를 줄이기 위한 최적의 세기를 찾았다. 가속관 2번과 3번 사이, 3번과 4번 사이에 있는 2개의 사극 자석은 마지막 가속관 이후 전자빔의 emittance와 수평, 수직 방향 전자빔의 크기를 고려하여 세기를 선택하였다. 필요시 전자빔의 emittance와 크기는 선형가속기에서 부스터 링으로 전송되는 구간에서 추가로 조정이 가능하게 하였다.

○ 단일 번치 운전 시뮬레이션 (single-bunch operation simulation)

단일 번치 운전 시 번치의 전하량은 최댓값인 1 nC으로 고려하여 전자빔에 대한 운전 사양 최적화를 진행하였다. <그림 3.1.4.5>는 300 generation 동안 objective space에서 최적화된 해의 분포를 보여준다. Energy spread에 대한 horizontal normalized rms emittance의 최적화 해의 분포를 보면 뚜렷한 Pareto front가 형성된 것을 볼 수 있다. Energy spread에 대한 vertical normalized rms emittance의 최적화 해의 분포에서 emittance 방향으로 산개된 해가 있는 것은 수직 방향의 집속을 위한 사극 자석이 선형가속기의 마지막에 있어서 수직 방향으로의 집속이 적게 되었기 때문이다. 사극 자석의 집속 순서를 바꾸어 줄 때 위의 objective space에서의 해 분포가 서로 바뀜을 확인하였다.



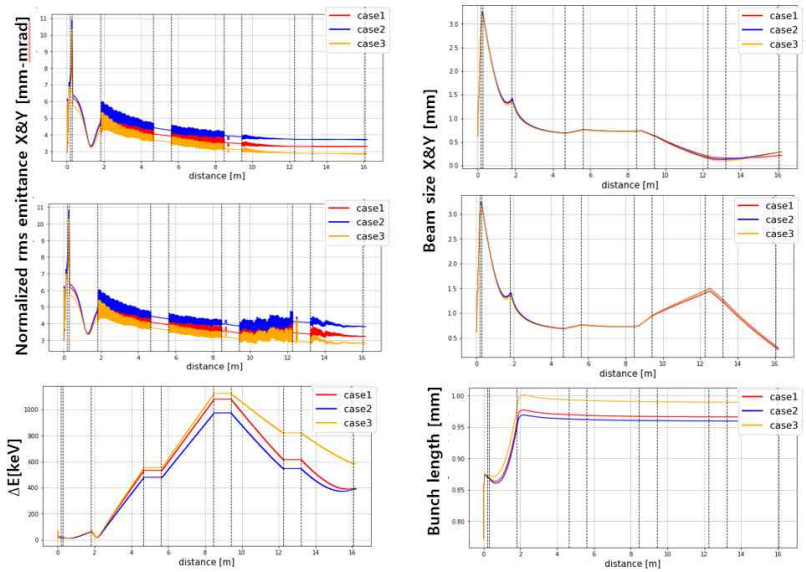
<그림 3.1.4.5> Optimized solution in objective space (generation : 300)

MOGA를 이용하여 얻은 비 우위 해(non-dominated solution)들의 분포에서 빔 역학적 결과를 비교해 보기 위해 3가지 경우를 살펴보았다. 목적 함수 중 Energy Spread의 비중을 기준으로 <표 3.1.4.5>와 같이 3가지 비중이 다른 경우를 고려하였다.

<표 3.1.4.5> Objective의 중요도에 따른 Case 선택

Mode	Longitudinal	Transverse	
	Energy Spread	Emittance X	Emittance Y
Case 1	0.5	0.25	0.25
Case 2	0.8	0.1	0.1
Case 3	0.3	0.35	0.35

<그림 3.1.4.6>은 위 3가지 경우에 따른 선형가속기에서의 빔 역학 시뮬레이션 결과를 보여준다. 3가지 경우 모두 최적화된 운영 변수에 대하여 선형가속기에서의 transverse normalized rms emittance는 모두 안정적으로 변화하여 감쇠하는 것을 볼 수 있다. Energy spread의 경우 첫 번째와 두 번째 가속관에서 증가하나 다시 세 번째와 네 번째 가속관에서 감소하여 최소화하는 방향으로 RF input phase가 최적화된 것을 볼 수 있으며, 마찬가지로 설계 요구조건을 만족한다.



<그림 3.1.4.6> 최적화된 case에 따른 선형가속기에서의 빔 역학 시뮬레이션 결과

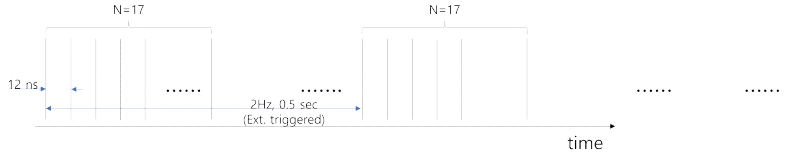
<표 3.1.4.6>은 3가지 경우에 대하여 선형가속기의 빔 역학 시뮬레이션에 따른 빔 변수 결과를 보여준다. 선형가속기의 끝단에서 모두 <표 3.1.4.1>의 요구조건인 energy spread는 < 1 MeV (0.5%), transverse geometric emittance는 < 10 nm, 그리고 bunch length < 1mm를 만족하는 것을 볼 수 있다.

<표 3.1.4.6> Beam tracking simulation 결과

	Case 1	Case 2	Case 3	Unit
Energy Spread	381.50	372.17	584.24	keV
Geometric Emittance X	8.44	9.52	7.37	mm-mrad
Geometric Emittance Y	8.18	9.71	7.21	mm-mrad
Beam Size X	0.21760	0.29162	0.28593	mm
Beam Size Y	0.26149	0.29447	0.28566	mm
Bunch Length	0.96584	0.95932	0.98924	mm
Average Energy	200.16	200.61	200.92	MeV

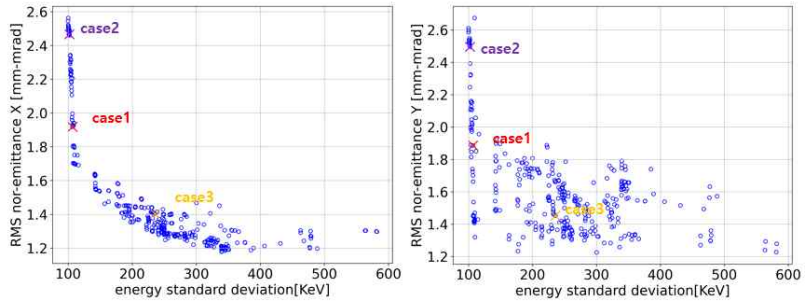
○ 다중 번치 운전 시뮬레이션 (Multi-bunch operation simulation)

다중 번치 운전은 64 번치를 기본으로 하지만 시뮬레이션은 보다 넓은 범위에서 수행하였다. Bunch train 당 17개와 102개의 번치로 구성되는 두 가지의 시나리오에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. <그림 3.1.4.7>에서는 17개의 번치로 구성된 다중 번치 시나리오를 보여준다. 다중 번치 운전의 경우 bunch train에 포함되는 번치의 개수에 따라 번치 당 전하량 및 번치 간의 간격(bunch spacing)이 정해지게 된다. 이에 따라 다중 번치 가속을 위한 선형가속기 각 장치의 운전 사양 등을 최적화하는 시뮬레이션을 수행하였다.



<그림 3.1.4.7> 17개 번치로 구성된 다중 번치 시나리오

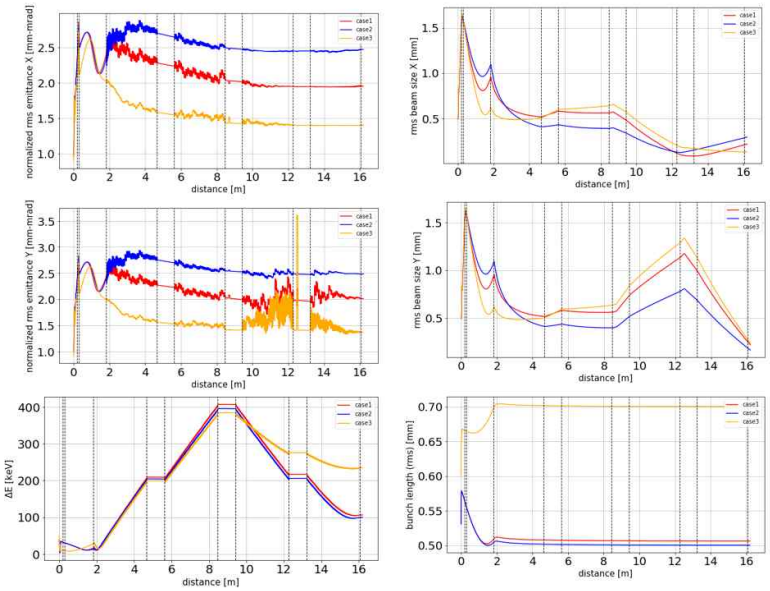
17개의 번치로 구성된 다중 번치 모드일 때 전하량의 최댓값인 3 nC으로 고려하여서 한 번치 당 176 pC을 갖은 경우에 대한 운전 사양 최적화를 진행하였다.



<그림 3.1.4.8> 전하량 176 pC일 때 MOGA를 이용한 최적화 결과

<그림 3.1.4.8>과 같이 MOGA를 이용해서 최적화된 선형가속기의 다양한 운전 사양 중에서 단일 번치 모드와 같이 <표 3.1.4.5>의 3가지 case를 선택해서 beam tracking simulation을 진행했다. <그림 3.1.4.9>와 <표 3.1.4.7>은 빔 역학 시뮬레이션에 따른 빔 변수 결과를 보여주고 목적 함수 비중에 따라서 값의 차이가 있는 것을 확인할 수

있다. 선형가속기의 끝단에서 모두 <표 3.1.4.1>의 요구조건인 energy spread는 < 1 MeV (0.5%), transverse geometric emittance는 < 10 nm, 그리고 bunch length < 1 mm를 만족하는 것을 볼 수 있다.

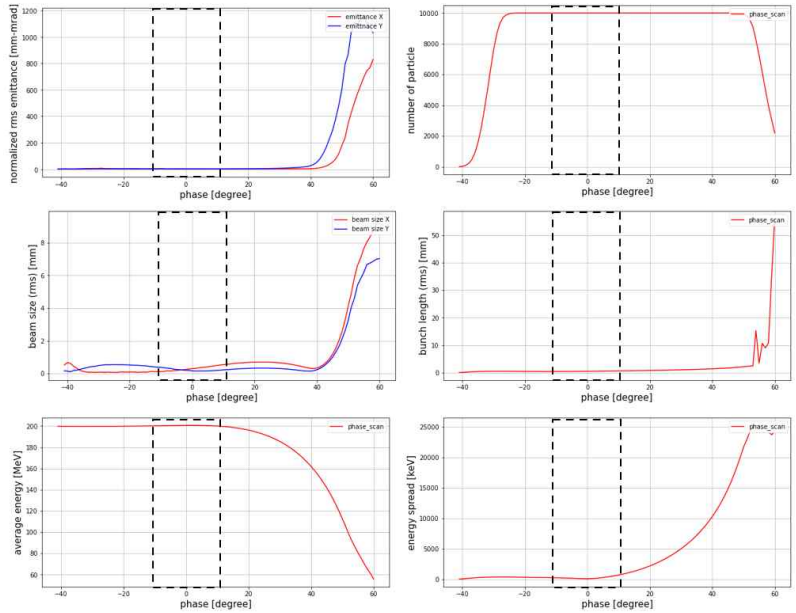


<그림 3.1.4.9> 최적화된 case에 따른 선형가속기에서의 빔 역학 시뮬레이션 결과

<표 3.1.4.7> 전하량 176 pC의 번치에 대한 beam tracking simulation 결과

	Case 1	Case 2	Case 3	Unit
Energy Spread	106.40	99.888	234.61	keV
Emittance X	1.9534	2.4723	1.4045	mm-mrad
Emittance Y	2.0136	2.4842	1.3651	mm-mrad
Beam Size X	0.21993	0.29628	0.13241	mm
Beam Size Y	0.21842	0.16310	0.23787	mm
Bunch Length	0.50637	0.50047	0.70054	mm
Average Energy	200.65	200.68	201.77	MeV

176 pC 전하량 Case 1을 기준으로 번치 간의 간격에 따른 각 번치가 가속관에 입사될 때의 input phase의 가용 범위를 알아보았다. 가속관의 input phase에 대한 parameter sweep 시뮬레이션의 결과로 전자빔의 가속 에너지와 빔 손실을 <그림 3.1.4.10>에 나타내었다. 빔 손실에 대하여 가용 되는 가속관의 input phase는 최대 energy를 얻을 수 있는 input phase를 기준으로 -50 degree에서 +30 degree까지이다. 그러나, 선형가속기에서 평균 200 MeV의 전자빔 에너지를 얻기 위해서는 가용되는 input energy는 ±10 degree 내외로 좁아짐을 확인하였다. 이와 같은 범위 내에서 전자빔의 emittance, bunch spread, 그리고 energy spread는 설계 요구조건에 부합되며, 다중 번치 운전 시 전자빔을 만들기 위한 전자총 장치의 레이저 빔의 timing에 대한 constraint를 결정할 수 있다.



<그림 3.1.4.10> 가속관의 input phase에 따른 전자빔의 손실과 특성 변화

다중 번치 운전 모드에서 bunch train에 102개의 번치가 있는 경우 번치 당 전하량은 약 30 pC이다. 다중 번치 운전 모드 운영의 용이성을 고려하여 176 pC 전하량 Case 1과 같은 가속관 input phase와 quadrupole strength를 사용하고

solenoid의 세기만 parameter sweep을 이용하여 최적화하였다. 두 다중 번치 모드의 최적화된 운전 사양은 <표 3.1.4.8>과 같다.

<표 3.1.4.8> 두 다중 번치 모드의 최적화된 운전 사양

	변수	전하량		단위
운전 사양	전하량	176	30	pC
	Gun Cavity Phase	-19.9185	-19.9185	degree
	가속관 1 & 2 Phase	-16.6376	-16.6376	degree
	가속관 3 & 4 Phase	1.6094	1.6094	degree
	솔레노이드 세기	0.187256	0.175	T
	사극자석 1 세기	1.558093	1.558093	T/m
	사극자석 2 세기	-2.95162	-2.95162	T/m

○ Error and Tolerance

단일 및 다중 번치 시뮬레이션 결과를 통해 최적화된 선형가속기 운전 사양 별 각 장치의 가용 범위를 결정하기 위해 ASTRA에서 제공되는 random error 함수를 이용하여 error study 시뮬레이션을 수행하였다. 선형가속기 장치별 error study에 사용되는 변수 범위는 아래 <표 3.1.4.9>와 같다. 표에서 error 값을 1 sigma로 하는 Gaussian 분포에 대하여 2 sigma의 cutoff를 적용하였다. 각 운전 모드에 대하여 100개의 random 시뮬레이션을 수행하여 장치들의 운전 사양 가용 범위와 전자빔의 특성을 알아보았다.

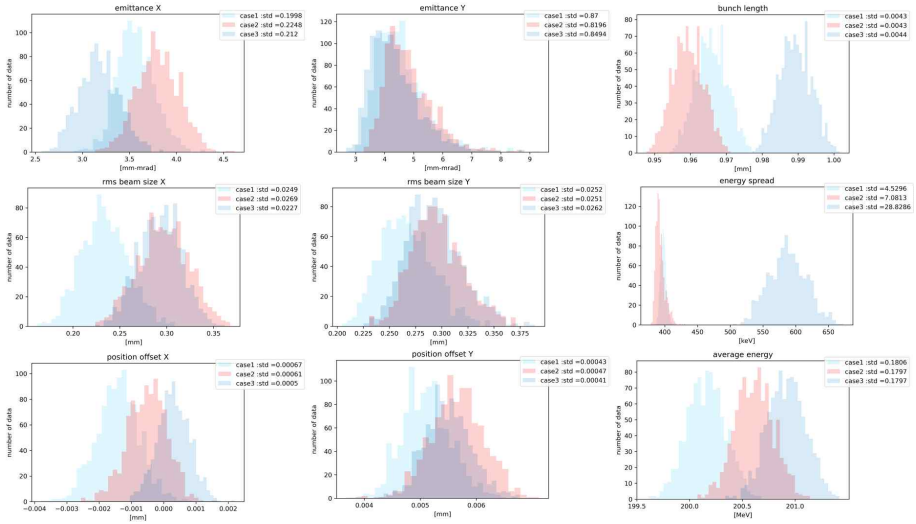
<표 3.1.4.9> 선형가속기 Error Study를 위한 변수 범위

Categories	Parameters	Error Values	Units
RF Gun	Gradient	0.2	%
	Input Phase	0.2	Degree
Accelerating Cavity	Gradient	0.2	%
	Input Phase	0.2	degree
Solenoid	Strength	0.1	%
Quadrupole	Strength	0.1	%

<표 3.1.4.10>과 <그림 3.1.4.11>은 단일 번치 모드의 전하량 1 nC 번치에 대한 error study 결과로 emittance X&Y, beam size X&Y, position offset X&Y, average energy, energy spread, bunch length의 표준편차 값과 분포를 보여준다. 임의로 주어진 error에 대하여 대부분의 beam parameter가 변화하는 정도는 모든 case에서 비슷하다. 하지만 energy spread는 case마다 가장 크게는 7배 이상 차이가 나고 요구되는 0.5% 이하의 값을 가지는 case 1이 가장 안정적인 운전 사양임을 알 수 있다.

<표 3.1.4.10 > 전하량 1 nC 번치의 error study 결과

	Case 1	Case 2	Case 3	Unit
Energy Spread	4.7003	7.2553	29.5605	keV
Emittance X	0.2091	0.2251	0.2105	mm-mrad
Emittance Y	0.8356	0.8033	0.8602	mm-mrad
Beam Size X	0.0253	0.0268	0.0227	mm
Beam Size Y	0.0247	0.0248	0.0261	mm
Position Offset X	0.00067	0.00062	0.00049	mm
Position Offset Y	0.00043	0.00046	0.0004	mm
Bunch Length	0.0044	0.0043	0.0045	mm
Average Energy	0.1762	0.1749	0.1756	MeV

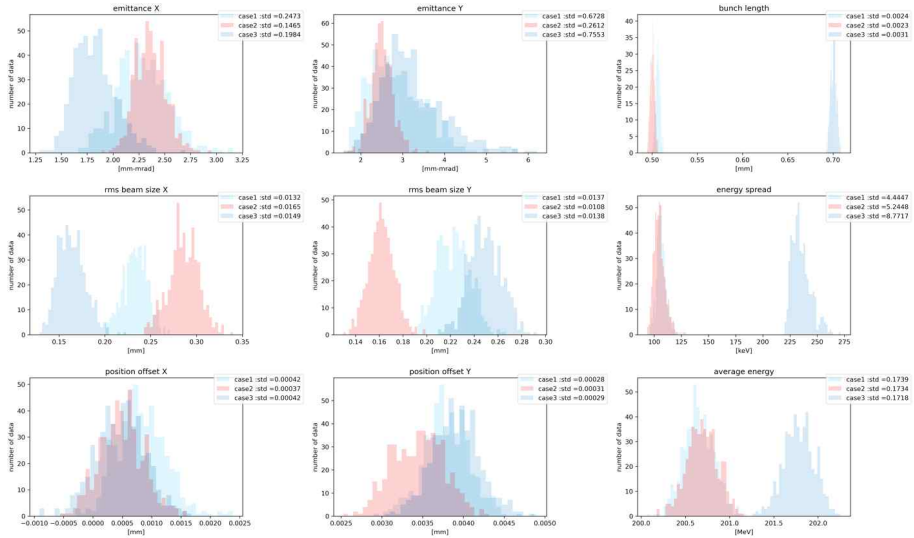


<그림 3.1.4.11> 전하량 1 nC 번치의 error study 결과

<표 3.1.4.10>과 <그림 3.1.4.12>는 17개 다중 번치 모드의 전하량 176 pC 번치에 대한 error study 결과로 emittance X&Y, beam size X&Y, position offset X&Y, average energy, energy spread, bunch length의 표준편차 값과 분포를 보여준다. 임의로 주어진 error에 대하여 대부분의 beam parameter가 변화하는 정도는 모든 case에서 비슷하다. 하지만 energy spread는 case마다 크게 차이가 나기 때문에 가장 작은 값을 가지는 case 1이 가장 안정적인 운전 사양임을 알 수 있다.

<표 3.1.4.10> 전하량 176 pC 번치의 error study 결과

	Case 1	Case 2	Case 3	Unit
Energy Spread	4.4447	5.2448	8.7717	keV
Emittance X	0.2473	0.1465	0.1984	mm-mrad
Emittance Y	0.6728	0.2612	0.7553	mm-mrad
Beam Size X	0.0132	0.0165	0.0149	mm
Beam Size Y	0.0137	0.0108	0.0138	mm
Position Offset X	0.00042	0.00037	0.00042	mm
Position Offset Y	0.00028	0.00037	0.00042	mm
Bunch Length	0.0024	0.0023	0.0031	mm
Average Energy	0.1739	0.1734	0.1718	MeV



<그림 3.1.4.12> 전하량 176 pC 번치의 error study 결과

최적화된 3가지 운전 사양 중에서 error study의 결과를 반영하여 가장 안정적인 운행이 가능한 경우를 선택할 수 있었다. 단일 번치 모드와 다중 번치 모드에 대하여 선형가속기의 운전 사양과 끝단에서의 beam parameter를 <표 3.1.4.11>에 나타내었다.

<표 3.1.4.11> Error study 결과를 반영한 전하량에 따른 운전 사양과 전자빔 특성

	변수	전하량			단위
		다중 번치 모드		단일 번치 모드	
운전 사양	전하량	0.176	0.030	1	nC
	Gun Cavity Phase	-19.9185	-19.9185	-15.8157	degree
	가속관 1 & 2 Phase	-16.6376	-16.6376	-19.0112	degree
	가속관 3 & 4 Phase	1.6094	1.6094	4.93055	degree
	솔레노이드 세기	0.187256	0.175	0.196828	T
	사극자석 1 세기	1.558093	1.558093	1.399805	T/m
	사극자석 2 세기	-2.95162	-2.95162	-2.87498	T/m
Beam Parameters	수평 Emittance	1.9534	1.1334	3.2990	mm-mrad
	수직 Emittance	2.0136	1.3254	3.2145	mm-mrad
	수평 빔 크기 (rms)	0.21993	0.28780	0.21760	mm
	수직 빔 크기 (rms)	0.21842	0.19896	0.26149	mm
	Bunch Length	0.50637	0.34488	0.96584	mm
	전자빔 평균 에너지	200.67	200.63	200.16	MeV

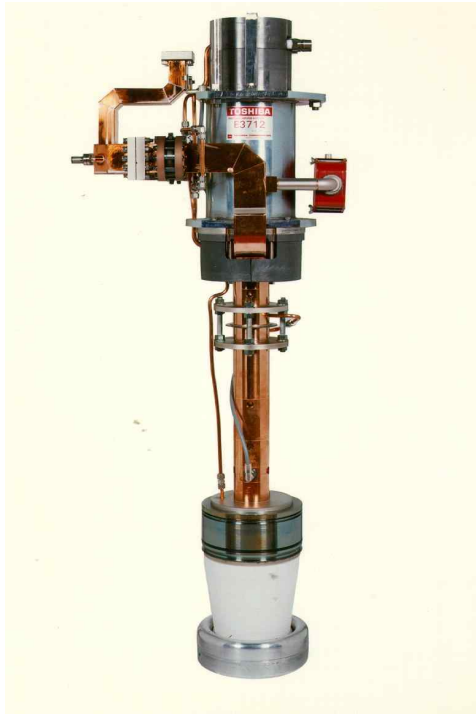
(4) 펄스 전원장치 (Modulator and Klystron)

○ Klystron

클라이스트론은 모듈레이터에서 공급하는 펄스 파워를 이용하여 RF를 증폭하는 대출력 고주파 증폭 장치이다. 4GSR에서는 Canon 사에서 제작한 S-band E37366 모델 2대를 사용할 예정이다. 사용 주파수는 2,997.6 MHz이고 약 500 W, 3 μs를 인가하여 최대 70 MW의 출력을 가속관에 공급하여 전자를 가속하는 에너지원으로 사용한다.

Canon E37366 클라이스트론은 입력 cavity와 출력 cavity를 포함한 6개의 cavity와 1.9 μp를 갖는 전자총으로 구성되어 있다. RF window는 2개를 사용하고 최대 RF 출력의 1/2을 감당하게 되어 있으며 클라이스트론 내부와 외부를 진공으로 차단한다. 2개의 클라이스트론 RF 출력은 Power Combiner로 RF를 더하여 도파관을 통해서 전자 가속관에 전달된다. 클라이스트론 cavity 외부에 설치된 전자석은 빔을 집속하는

데 사용되며 최대 magnetic field의 세기는 약 1.2 kG이다. 클라이스트론의 전자총은 지름이 8.9 cm 캐소드와 최대 전류 밀도가 약 8 A/cm^{2}이다. 음극과 양극 전기력의 세기는 약 200 kV/cm이며 펄스트랜스퍼머를 사용하여 펄스를 공급받고, 클라이스트론 몸체는 절연유 탱크에 놓이게 된다. 전자빔에 의하여 발생하는 X-ray를 차단하기 위하여 클라이스트론 콜렉터 주위에 납으로 차폐하였으며 전자총 주위에도 납으로 차폐하였다. 클라이스트론 출력 플랜지는 PAL type flange와 gasket을 적용하였다.

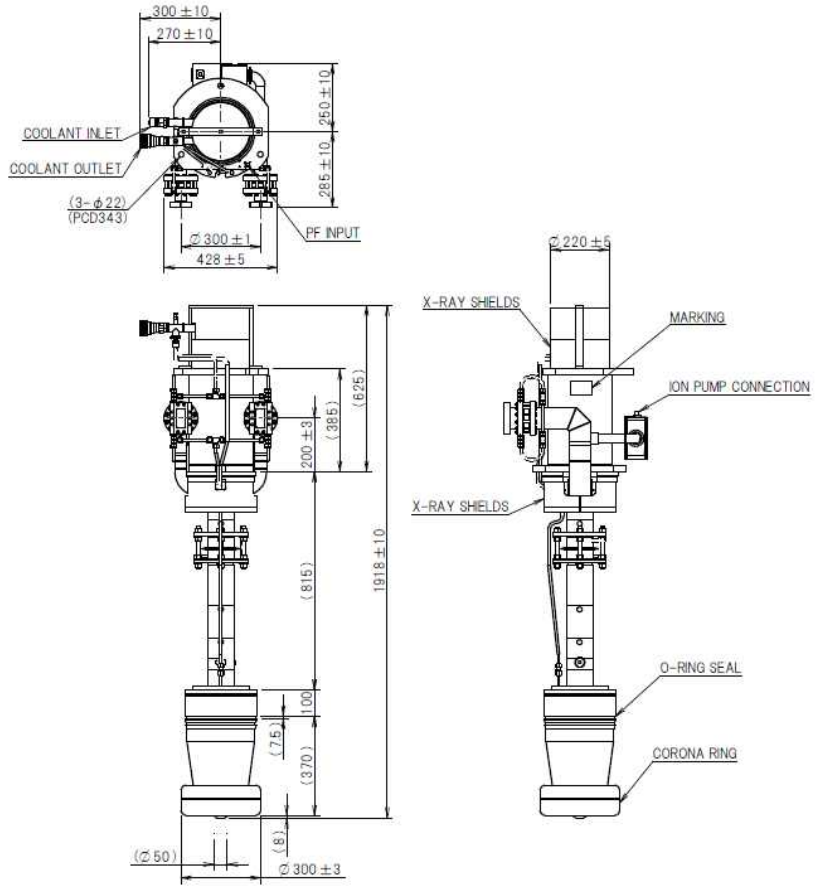


<그림 3.1.4.13> 70 MW 이상급 E37366 클라이스트론 사진

<표 3.1.4.12> Specifications of a S-band klystron (E37366)

Description	Canon E37366	Unit
Frequency	2997.6	MHz
RF Pulse width	3.0	μs
Beam voltage	387	kV
Beam current	452	A
Beam Voltage Pulse width	6.0	μs
Repetition rate (max)	60	Hz
η-perveance	1.9	-
RF output power	≥ 70	MW
Average RF output power	5.0	kW
Drive power	500	W Max.
Gain	53	dB (max)
Efficiency	40	%
Focusing	VT-68915 Electron magnet	-
Filament voltage	90 ~ 110	Vac
Filament current	4.5 ~ 5.5	Aac
Water flow, min/klystron	55	l/min
Water flow, min/magnet	10	l/min
Cooling water inlet temperature, max	40	℃
Cooling water inlet pressure, max	10	kgf/cm^2

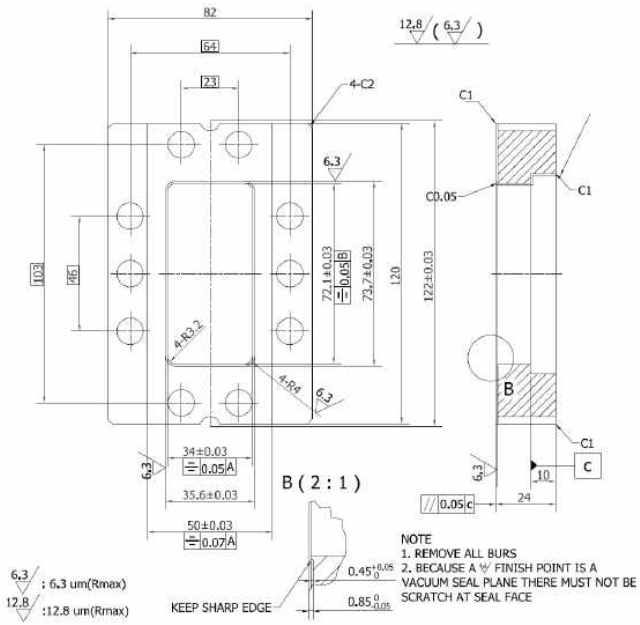
Unit: mm



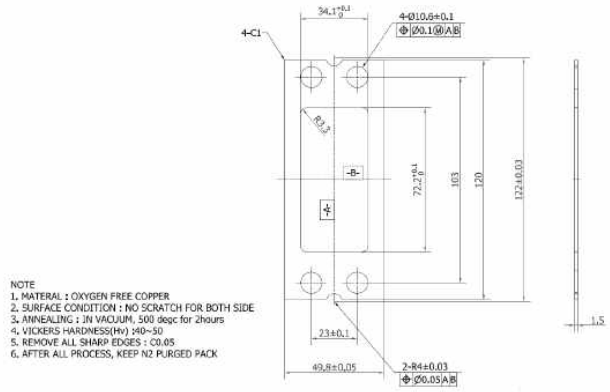
Outline Drawing E37366 (Tentative)

<그림 3.1.4.14> E-37366 klystron drawing

Unit: mm



PAL Type Flange

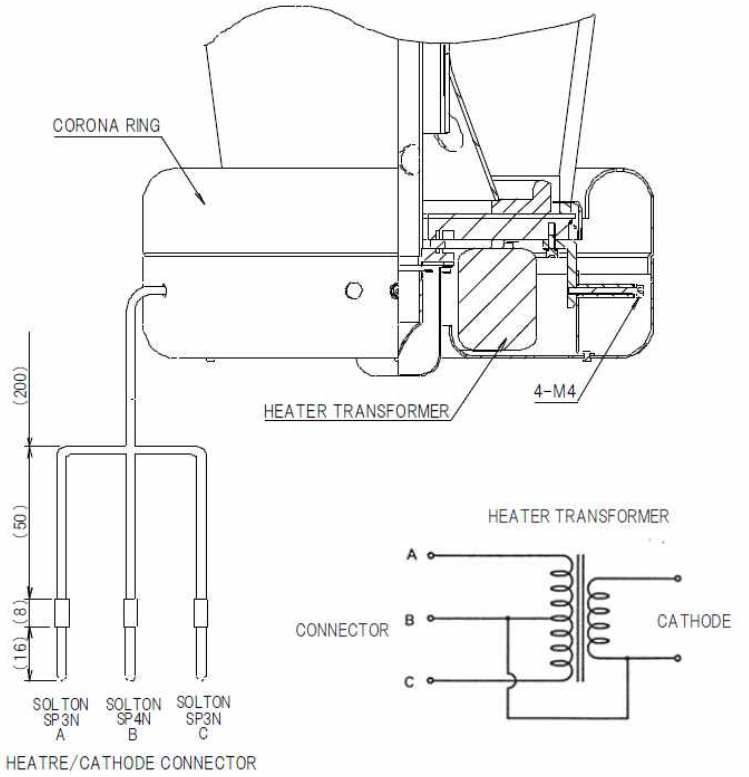


PAL Type Gasket (Excluded)

DIMENSIONAL DRAWING: PAL Type Flange

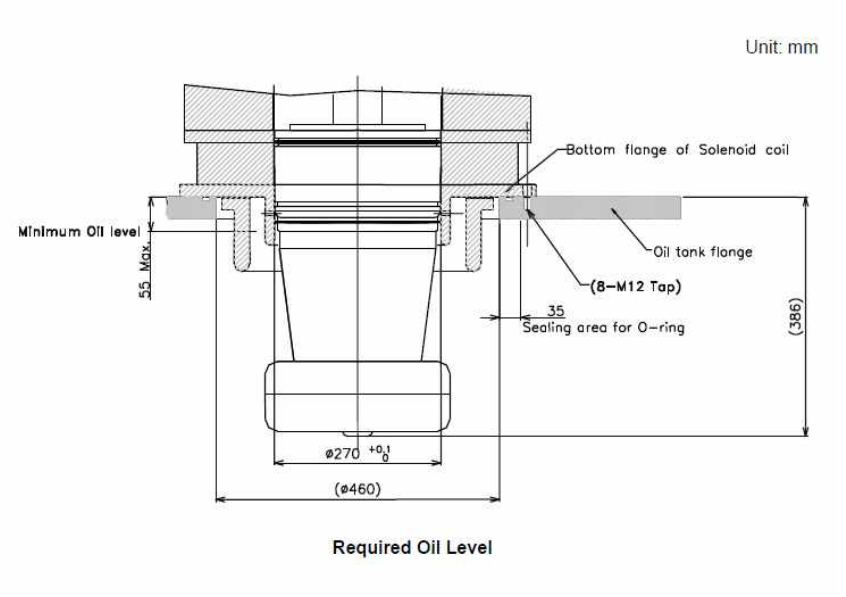
<그림 3.1.4.15> E-37366 klystron output flange and gasket drawing

Unit: mm



Heater/Cathode Connector

<그림 3.1.4.16> E-37366 klystron Heater/Cathode connector drawing



<그림 3.1.4.17> E-37366 klystron Required Oil Level drawing

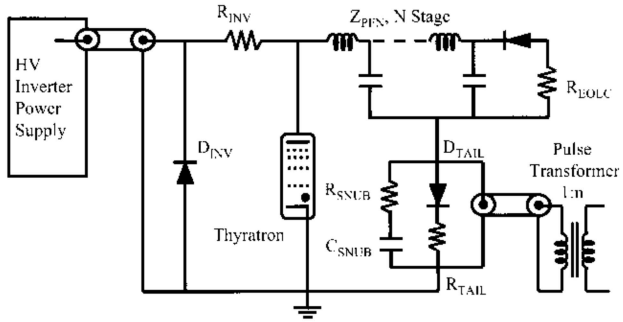
○ Modulator

4GSR의 선형가속기에서는 200 MeV의 에너지를 얻기 위하여 마이크로웨이브소스는 Inverter type의 고전압 전원장치를 사용한 70 MW 이상급 클라이스트론과 175 MW 모듈레이터 2 sets를 사용하여 전자를 가속할 예정이다. 개별 모듈레이터의 사양은 출력 175 MW, 빔전압 387 kV, 빔전류 452 A, 펄스폭 6.2 μs, 반복 횟수 60 Hz이고 부하로는 S-band E37366 70 MW 이상급 Klystron을 사용할 예정이다. 4GSR에서 요구되는 에너지 변동률은 ± 0.2% 이하이며 모듈레이터의 PFN 전압 안정도(Stability)는 RMS 100 ppm 이하이다. 인버터 type의 고정밀 고전압 전원공급장치와 DSP 제어기 방식 도입을 통해 이와 같은 요구조건을 만족하고 모듈레이터의 고전압 안정도를 얻을 수 있다. 고전압 인버터 전원공급기는 60 kJ/s이며 충전 시간은 약 15 ms이다. 모듈레이터 사양은 <표 3.1.4.13>과 같다.

<표 3.1.4.13> 모듈레이터 사양

Description	Value	Unit
Peak Power	175	MW max
Inverter CC HVPS Average Power	90	kJ/sec
Repetition Rate	10	Hz max
Voltage Stability (rms)	> 0.01	%
Pulse Peak Output Voltage	387	kV
Pulse Peak Output Current	452	A
ESW	6.0	μs
Flattop Width	3.0	μs
Flattop Flatness	0.2	%
Charging Time	15	ms
Pulse Transformer Turn ratio	17	-
Primary Impedance	3.0	ohm
PFN Total Capacitance	1.0	μF
PFN Total Inductance	7.7	μH

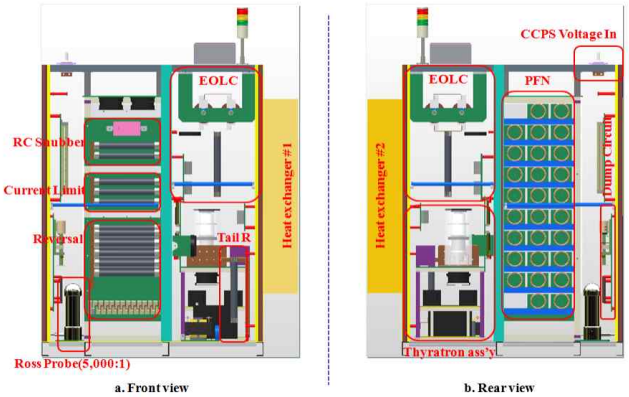
<그림 3.1.4.18>은 펄스를 만들어 주는 모듈레이터의 회로도이며 고전압 인버터 전원공급기로부터 공급받은 에너지를 PFN 커패시터에 직접 충전시켜서 싸이라트론 스위치를 통하여 부하에 에너지를 전달한다.



<그림 3.1.4.18> 고전압 인버터 전원공급기를 사용한 모듈레이터 회로

선형가속기의 Multi-bunch 운전을 위하여 요구되는 모듈레이터 펄스 Flattop Flatness의 사양은 ± 0.2%이며 PFN 구성을 구성하는 PFN 커패시터와 PFN 인덕터의 용량 및 수량을 조정해서 펄스 Flattop Flatness를 ± 0.2% 이내로 설계하였다.

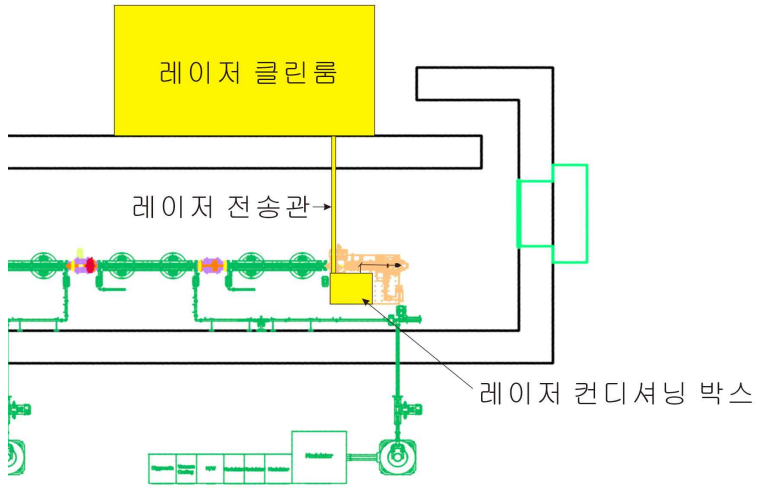
4GSR 선형가속기의 모듈레이터는 10 Hz 운전조건으로 싸이라트론 스위칭 및 인버터 고전압 전원장치로부터 충전할 때 제한 저항 또는 보호회로 등에 많은 열이 발생하며, 이러한 조건들에 대하여 열부하에 대한 대책을 고려하여 설계하였다. 또한 고전압이 인가되기 때문에 내부의 공간 배치 및 펄스의 대전류에 의한 노이즈 방지에 대한 대책 등을 강구하여 설계하였다. 모듈레이터에서 발생하는 열원은 충전 시 보호용 저항 소모 전력값이 약 4~5 kW 정도며 기타 저항소자는 약 1~2 kW 이내로 설계할 예정이다.



<그림 3.1.4.19> 모듈레이터 내부의 설계

(5) 레이저 시스템 (Laser system)

입사기레이저의 안정적인 운영을 위해 항온항습 (온도안정도 0.5 ℃, 습도안정도 5%) 클린룸을 건설하고, 모듈레이터에 의한 EMI 노이즈 유입을 줄이기 위해 레이저룸은 XFEL과 동일하게 갤러리 반대편에 위치한다. 레이저 전송 튜브를 통해 레이저를 전송하고 건 테이블에서 사이즈 조절 등 컨디셔닝을 하고 건에 입사한다. 레이저 사양은 Cu cathode를 기준으로 작성되었다. 기본 반복률은 2 Hz이지만 피드백 속도를 고려하여 10 Hz 반복률에서 운전이 가능하게 한다.

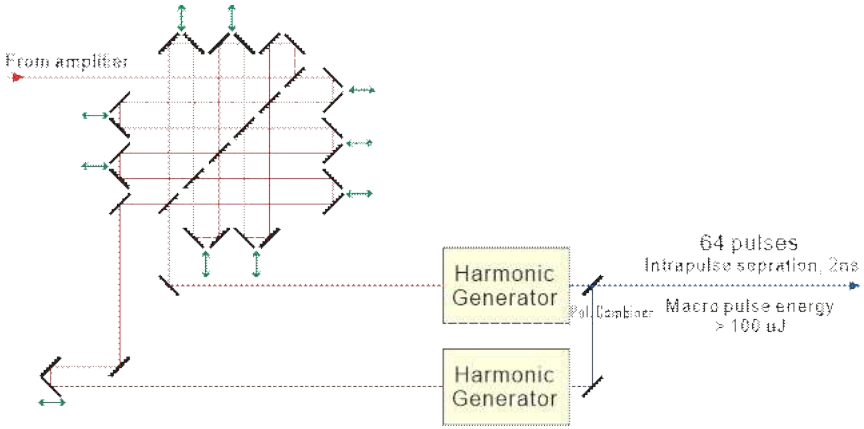


<그림 3.1.4.20> 레이저 클린룸

<표 3.1.4.14> 레이저 시스템의 주요 사양

Parameter	Single bunch mode	Multi-bunch mode
UV pulse length	6~8 ps FWHM	6~8 ps FWHM
UV pulse energy	> 100 μJ	> 100 μJ (64 pulses)
UV pulse energy stability	< 2%	< 5%
Timing sync. stability	< 200 fs rms	< 200 fs rms
Repetition rate	2 Hz, 10 Hz	2 Hz, 10 Hz

멀티 번치 모드에서 필요한 64 펄스(≈ 2 ns 간격)를 제공하기 위해 split and delay를 통해 64 펄스를 만든다. 각각의 펄스 파워와 간격은 수동 감쇠기 및 매칭을 포함한 기계적인 지연시간 장치를 통해 일정하게 조정된다. Split and delay 장치에서 32 펄스의 두 출력단이 UV 변환 후 polarizing combiner로 합쳐서 에너지손실을 최소화할 예정이다. 특히 시간 간격은 동기된 499.593 MHz 레이저 오실레이터를 이용하여 100 fs 수준에서 미세튜닝 및 실시간 모니터링을 한다.



<그림 3.1.4.21> 64 Laser multi bunch pattern generation

(6) 타이밍 제어 (timing control)

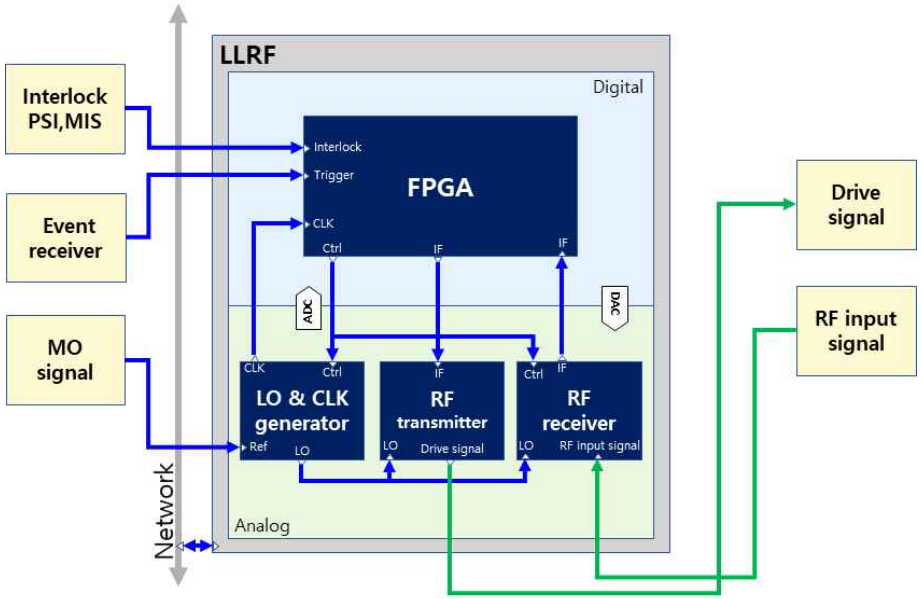
○ 시간 동기

선형가속기의 주파수는 저장링과 시간 동기를 위해 저장링 주파수 499.593 MHz의 정수배인 2997.56 MHz를 채택하였다. 완벽한 시간 동기를 위해 3단계에 걸쳐 시간 동기 시스템을 구축할 예정이다. 1단계에서는 시간 동기 없이 선형가속기 커미셔닝과 운전을 진행한다. 2단계는 일본의 SACLA Linac과 SPring-8 Storage Ring과 같은 방법으로 간접적인 시간 동기 상태로 운전한다. 최종적으로 하나의 reference oscillator를 공유하여 선형가속기와 저장링 사이의 완전한 시간 동기 상태로 가속기 운전을 진행한다. shot-by-shot 입사 타이밍은, 이벤트 트리거 및 RF phase shifter를 통해 제어한다. XFEL에서 개발되어 사용 중인 ~20 fs 안정도와 ~5 fs 분해능의 DDS phase shifter를 적용할 예정이다.

○ LLRF (Low Level Radio Frequency)

LLRF 제어시스템은 하전 입자 빔을 가속하는 동안 RF 시스템의 구성 요소 상태를 모니터링하고 제어하는 장치로써, 다음과 같은 주요 기능을 수행한다. RF 시스템 내부 상태를 지속적으로 모니터링하며, 이를 통해 시스템의 동작 상태를 파악하고 필요한 조치를 취할 수 있다. 또한 인명, 장치 보호를 위해 고전압 모듈레이터 시스템, PSI, MIS, LCW 시스템과 interlock 신호 송수신 처리가 가능하며, 예상 밖의 상황이

발생하면 RF 시스템을 자동으로 정지시키는 등의 보호 기능을 제공한다. LLRF 시스템은 이와 같은 기능들을 통해 RF 필드와 하전 입자 빔의 동기화를 유지하고 외란으로부터의 영향을 최소화하여 최적의 가속을 가능케 한다. LLRF의 시스템 개요도는 <그림 3.1.4.22>에 나타내며, 주요 사양을 <표 3.1.4.15>에 정리하였다.



<그림 3.1.4.22> LLRF의 시스템 개요도

<표 3.1.4.15> LLRF 시스템의 주요 사양

Parameter	Value
Operating frequency	2997.56 MHz ± 2 MHz
Number of channels (fast)	8
Channel-to-channel isolation	> 60 dB
Spurious-free dynamic range	> 60 dB
Amplitude dynamic range	≥ 25 dB
Power resolution	< 0.01%
Power stability	< 0.05% (upper 10 dB range)
Phase resolution	< 0.01°
Phase stability	< 0.05° (upper 10 dB range)
Output channel No.	1
Repetition rate	up to 10 Hz

다. 부스터 빔물리

부스터는 선형가속기로부터 200 MeV 전자빔을 전달받아 4 GeV까지 가속한 후 저장링으로 전달하는 역할을 한다. 부스터는 크게 저장링과 터널을 공유하는 방식과, 별도의 터널을 만드는 방식으로 나뉜다. 아래 <표 3.1.4.16>에서와 같이 각각 장점을 가지는데 우리는 종합적으로 저장링과 터널을 공유하는 방식을 택했다. 가장 큰 이유는 저장링과 터널을 공유하는 경우 둘레가 커져서 빔 emittance를 쉽게 낮출 수 있기 때문이고 이는 향후 저장링을 추가적으로 업그레이드할 시에 입사 조건이 까다로워질 경우를 대비할 수 있기 때문이다.

<표 3.1.4.16> 부스터 터널 방식 장점 비교

터널 공유 장점	터널 분리 장점
Cost	Commissioning & install
Emittance	Low noise
Magnet & Power supply capacity	-
Space	-
터널 공유 방식이 상대적 유리함	

4 GeV 부스터의 parameter는 <표 3.1.4.17>과 같다. 반복률은 2 Hz로 하고 입사 에너지는 200 MeV, extraction 에너지는 4 GeV로 하여 ramping 폭을 20배로 놓았다. 전자빔 에너지를 200 MeV에서 4 GeV로 올리는 ramping-up 시간은 250 ms로 한다. Ramping down, 입사, extraction, hysteresis loop에 걸리는 시간을 250 ms로 한다. <그림 3.1.4.23>은 2 Hz로 동작하는 부스터 ramping cycle이다. 부스터 입사는 입사 kicker 1개를 이용하여 on-axis injection 방법을 사용한다. 부스터 extraction은 마찬가지로 extraction kicker 1개를 이용하고 kicker magnet 및 power supply는 저장링 입사 kicker의 magnet과 power supply와 같은 스펙으로 한다. 부스터 둘레는 772.893 m로 이것은 저장링 전자빔과 부스터 전자빔 사이의 거리가 4.1 m가 되도록 하는 둘레이다.

최대 beam current는 1 mA로 하여 injection 속도가 최대 2 mA/s가 되게 하였다. 이때 저장링을 0 mA에서 400 mA까지 채우는 데 걸리는 시간은 200초이다. Betatron tune은 resonance를 적절히 피해 위치하였고 필요시 round beam을 만들 수 있도록 수평 수직값이 가까이 위치하도록 설정하였다. RF 주파수는 저장링 RF 주파수와 1 kHz 이내의 차이가 되도록 하여 실제 운영 시 동일한 RF 주파수로 운전이 가능하도록 하였다. 결정된 RF 주파수는 499.593975 MHz이고 이때 harmonic number는 1288이다.

Natural emittance는 8 nm로 현재 PLS-II 수준이고 이는 저장링 입사에 충분한 수준이다. Damping time은 10 ms 전후로 2 Hz 운전을 하기 충분한 수준이다. One turn radiation loss는 1.67 MeV로 3기의 normal conducting RF cavity를 설치하여 3 MV의 gap voltage로 운영하고 1기 고장 시에도 2기의 RF cavity를 이용하여 2 MV 이상의 gap voltage를 확보하여 ramping 및 저장링 입사가 어느 정도 가능하도록 설계하였다.

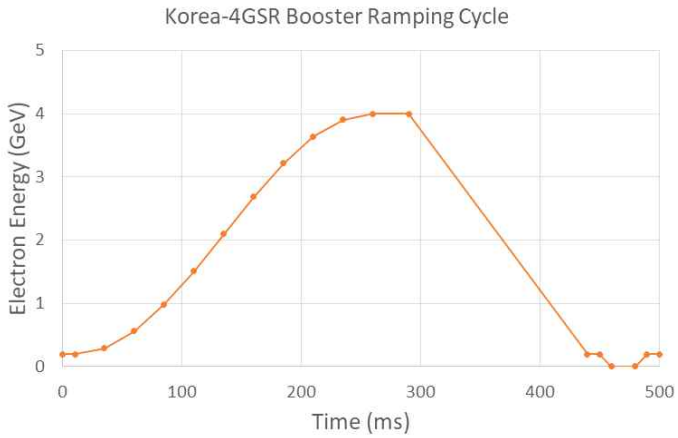
부스터 lattice는 FODO cell 형태를 가지는데 휨 자석을 combined function 자석으로 하여 수평으로 defocusing 사극 자석 역할도 하게 한다. 부스터 전체가 60개의 FODO cell로 구성되고 두 개의 FODO cell마다 sextupole pair를 배치하여 두 개의 FODO cell이 한 개의 periodic cell이 되어 부스터 전체가 30개의 periodic cell로 구성된다. 레이스트랙 형태로 변경된 저장링과의 거리를 일정하게 맞추기 위하여 부스터의 FODO cell의 길이 및 이극 자석 각도를 조절하였다. 그 결과 56개의 FODO cell의 길이는 25.7231 m, 4개의 FODO cell의 길이는 26.3231 m가 되었고 총 60개의 이극 자석 중 56개는 6.07°, 4개는 5.02°만큼의 회전각을 가지게 되었다. 이극 자석 <그림

3.1.4.25>에 6.07°의 이극 자석이 위치하는 곳의 one cell lattice function을 그려놓았다. 이때 straight section의 길이는 최대 5.52 m가 된다. 총 60개의 straight section 중에서 입사, extraction, 진단, human access, instruments access 영역이 각각 할당된다.

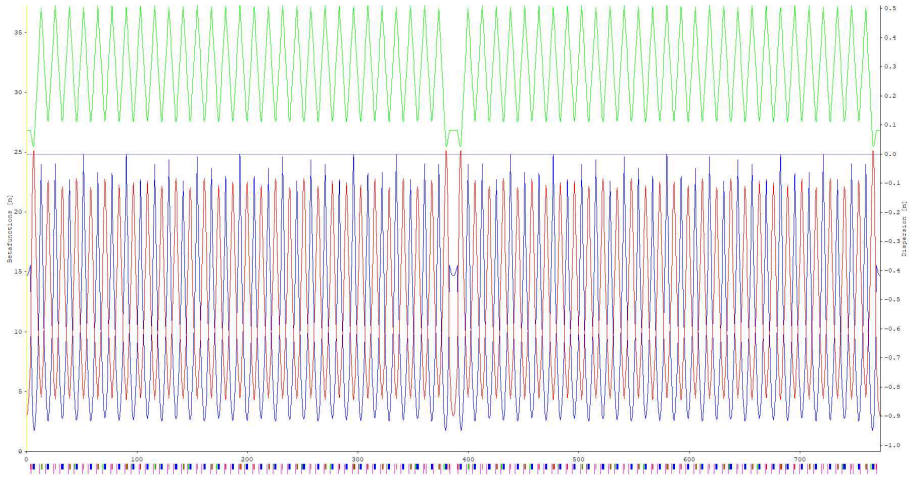
총 30쌍의 sextupole pair를 이용하여 chromaticity correction을 하여 <그림 3.1.4.26>과 같이 충분한 dynamic aperture를 얻었다. 선형가속기에서 오는 빔이 off-energy 일 경우를 고려하여 <그림 3.1.4.26>, <그림 3.1.4.27>에서처럼 off-energy dynamic aperture도 확인하였다. 확인 결과 에러를 포함하지 않은 상태에서 ±1% 이상의 off-energy에서 충분한 dynamic aperture를 확보하였다.

<표 3.1.4.17> 부스터 parameter

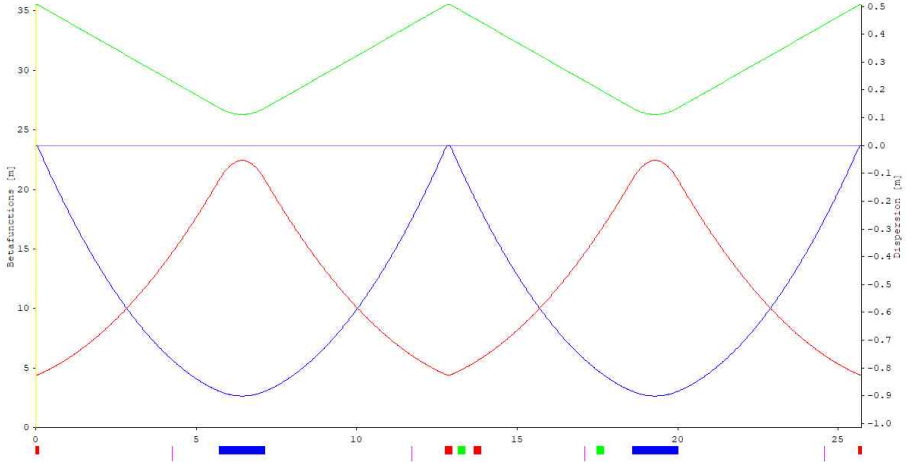
773 m Booster		Values	Unit
Design Parameters	Circumference	772.893	m
	Beam Energy (Inj. - Ext.)	0.2 ~ 4	GeV
	Cell number	60	-
	Natural Emittance at 4 GeV	7892	pm rad
	Natural Emittance at 200 MeV	20	pm rad
	Momentum Compaction	0.000933	-
Tune and Chromaticity	Horizontal Tune	19.226	-
	Vertical Tune	13.165	-
	Natural Horizontal Chromaticity	-27.1	-
	Natural Vertical Chromaticity	-18.2	-
	Horizontal Chromaticity	2	(Target)
	Vertical Chromaticity	2	(Target)
Radiation related quantities at 4 GeV	Energy Loss per Turn	1671.3	keV
	Energy Spread	0.106	%
	Horizontal Damping Time	8.5	ms
	Vertical Damping Time	12.3	ms
	Longitudinal Damping Time	8.0	ms
	Synchrotron Frequency	4235	Hz
	Synchrotron Tune	0.0109	
	Bunch Length	11.1	mm
Radiation related quantities at 200 MeV	Energy Loss per Turn	0	keV
	Energy Spread	0.0053	%
	Horizontal Damping Time	67937	ms
	Vertical Damping Time	98724	ms
	Longitudinal Damping Time	63824	ms
	Synchrotron Frequency	20682	Hz
	Synchrotron Tune	0.0169	-
	Bunch Length	0.3587	mm



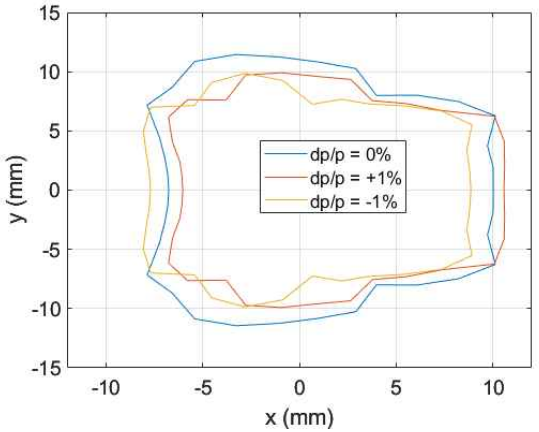
<그림 3.1.4.23> Booster Ramping Cycle 구성도



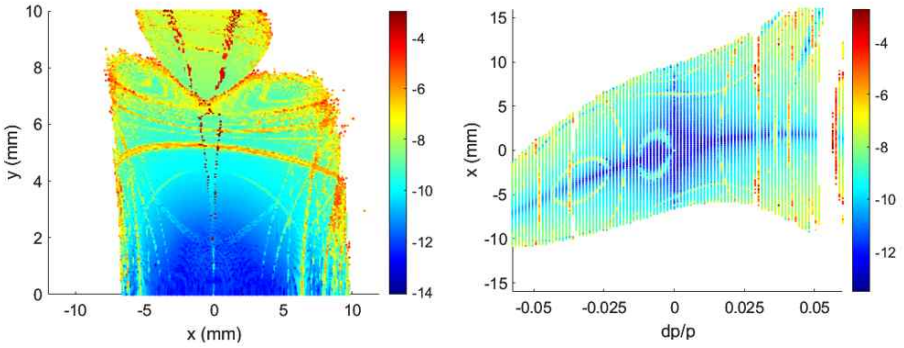
<그림 3.1.4.24> 부스터 lattice



<그림 3.1.4.25> 부스터 1 cell lattice. 이극 자석은 파란색, 사극 자석은 빨간색, 육극 자석은 초록색으로 표시됨

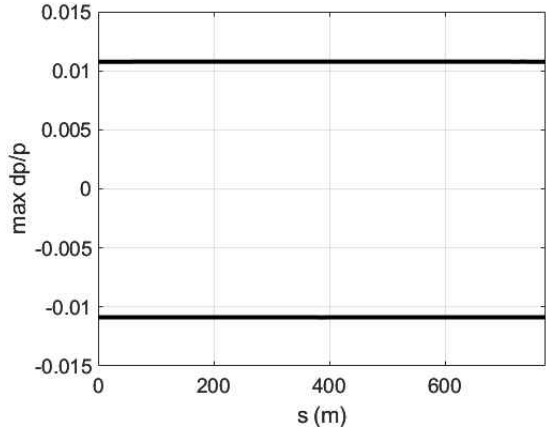


<그림 3.1.4.26> 부스터 on and off energy (± 1%) dynamic aperture

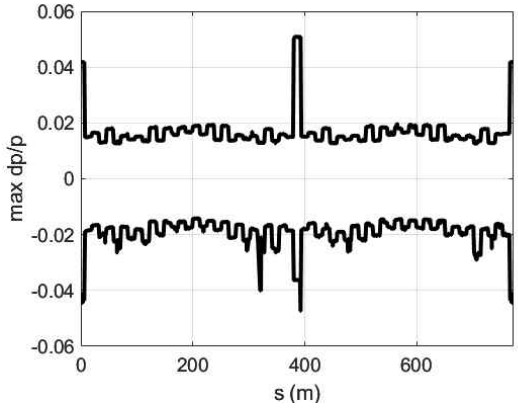


<그림 3.1.4.27> 부스터 입사위치에서 frequency map analysis 결과 (x-y offset, x-dp/p offset)

<그림 3.1.4.28>과 <그림 3.1.4.29>는 각각 전자빔 에너지가 4 GeV, 200 MeV일 때 부스터에서의 local momentum acceptance를 보여준다. 4 GeV일 때의 gap voltage는 3 MV, 200 MeV일 때의 gap voltage는 0.25 MV이다. 부스터링의 RF gap voltage의 ramping curve는 <그림 3.1.4.23>의 에너지 ramping curve와 동일한 모양으로 시작 값과 끝값만 다르게 설정되고 hysteresis loop를 생략한다.



<그림 3.1.4.28> 부스터 4 GeV에서의 Local momentum acceptance

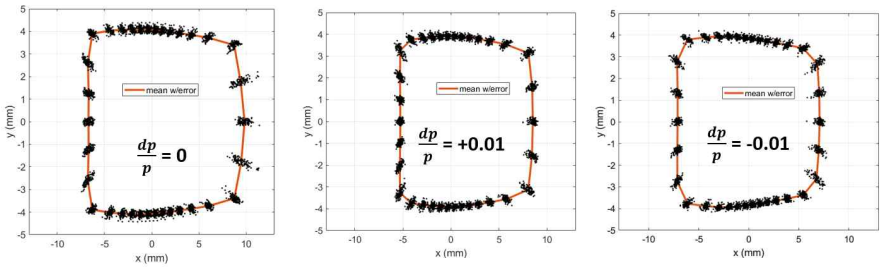


<그림 3.1.4.29> 부스터 200 MeV에서의 Local momentum acceptance

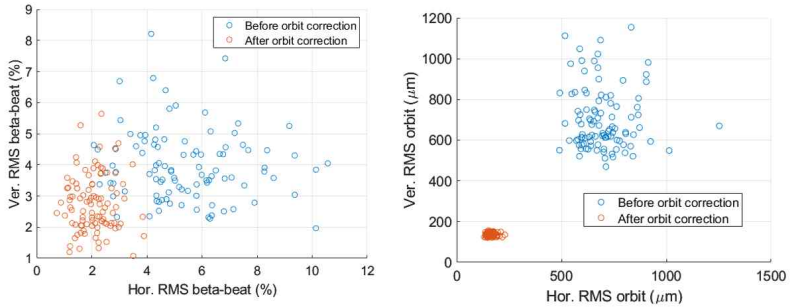
부스터 자석의 magnet error tolerance는 <표 3.1.4.18>과 같다. Error tolerance를 바탕으로 100개 random error seeds에 대해 commissioning simulation을 수행하여 dynamic aperture를 비교하였다 (<그림 3.1.4.30>). Error가 포함되지 않은 dynamic aperture와 비교하면 y = - 4 mm 근처의 resonance line에서 dynamic aperture가 줄어든 결과를 보인다. 부스터 commissioning simulation은 저장링 commissioning simulation보다 간단하다. 부스터 sextupole 세기가 강하지 않아서 closed orbit을 찾는데 sextupole ramp-up 과정이 불필요하였다. 또한 orbit correction 후 beta-beat가 충분히 작아 LOCO가 수행되지 않았다. Orbit correction 후 rms beta-beat 는 수평 약 2% 수직 약 3%이고, rms orbit 은 약 150 μm이다 (<그림 3.1.4.31>).

<표 3.1.4.18> 4GSR 부스터 magnet error의 설정값 (RMS 값, 2-sigma cutoff 사용)

Magnet	Misalignment (μm) (X/Y/Z)	Rotation (μrad) (Roll/Pitch/Yaw)	Strength error (%)
Dipole	150 / 150 / 250	400 / 100 / 100	0.10
Quadrupole	150 / 150 / 250	400 / 700 / 700	0.10
Sextupole	150 / 150 / 400	400 / 700 / 700	0.10



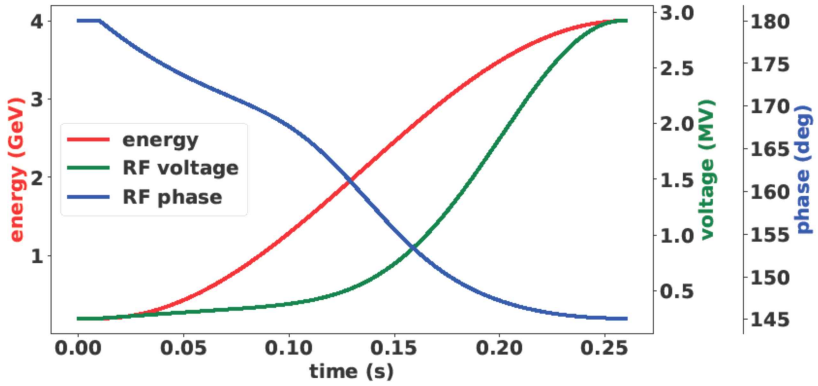
<그림 3.1.4.30> Error를 포함한 부스터 100개 error seed에 대해 correction 완료 후 dynamic aperture (on-energy, +1% energy offset, -1% energy offset)



<그림 3.1.4.31> Error를 포함한 부스터 100개 error seed에 대해 correction 전후 rms beta-beat와 rms orbit 비교

라. 부스터 ramping study

부스터의 ramping 과정에서의 emittance는 방사선 감쇠(radiation damping) 효과와 양자여기(quantum excitation)에 의해서 결정되는 전자 저장링과는 달리 가속에 의해 발생하는 adiabatic damping 효과에 의해 주로 결정된다. Adiabatic damping 효과는 일반적으로 전자빔이 가속되는 정도에 의해서 결정되므로 가속 공동 내의 전압과 위상에 의해 결정된다. 4GSR 부스터에서 에너지 변화는 사인파 형태로 정해져 있으며 초기전압과 최종단에서의 전압이 결정되면 ramping 구간에서의 프로파일을 결정할 수 있다. 설계안에서는 가속 공동 내 초기전압을 초기 전자빔의 에너지인 200 MeV에서 synchronous 주파수가 너무 커지지 않도록 0.25 MV으로 결정되었으며, 인출단에서의 전압은 부스터링의 안정적 운전을 위하여 전자빔이 1바퀴 일주하며 잃는 radiation loss에 1.8배 정도인 3.0 MV보다 조금 낮게 설정하였다. ramping 시 초기 linac에서 부스터로 전자빔의 입사 시와 인출 시 안정성을 확보하기 위하여 전압과 에너지 모두 변화하지 않는 flat-top 영역이 각각 10 ms와 30 ms 길이로 존재한다. 이러한 ramping 프로파일은 <그림 3.1.4.32>와 같다.



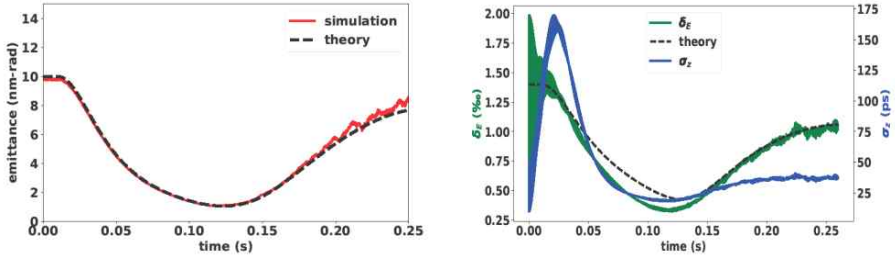
<그림 3.1.4.32> 사인파 형태의 에너지 ramping 프로파일에서 초기전압이 0.25 MV이고 인출단에서 전압을 3.0 MV일 경우 전압 및 위상변화

방사선 감쇠 및 양자 여기, adiabatic damping을 고려하였을 때 가로 방향 emittance (horizontal emittance, ϵ_x) 및 상대적 에너지 퍼짐도 (relative energy spread, δ_E)는 (수식 3.1.4.1), (수식 3.1.4.2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\epsilon_x(t)}{dt} = -\frac{\epsilon_x(t)}{E}\left(\frac{\partial E(t)}{\partial t} + J_x P_\gamma(t)\right) + C_q\left(\frac{P_\gamma(t)E(t)}{m_0^2 c^4}\right)\frac{I_5}{I_2}, \quad \text{(수식 3.1.4.1)}$$

$$\frac{d\delta_E^2(t)}{dt} = -\frac{\delta_E^2(t)}{E}\left(\frac{\partial E(t)}{\partial t} + J_z P_\gamma(t)\right) + C_q\left(\frac{P_\gamma(t)E(t)}{m_0^2 c^4}\right)\frac{I_3}{I_2} \quad \text{(수식 3.1.4.2)}$$

위 식에서 $\delta_E = \sigma_E / E$이고, σ_E는 에너지 퍼짐도, $C_q = 3.84 \times 10^{-13} m$이며, P_γ는 방사광 손실 파워(radiation loss power), J_x와 J_z는 각각 가로 방향 및 길이 방향의 damping partition을 나타내고, I_2, I_3, I_5는 저장링에서 radiation integral이다. 위 식의 첫 번째 항은 adiabatic 감쇠에 의한 효과를 나타내며 두 번째 항은 방사선 감쇠에 의한 효과를 담고 있다. 그리고 마지막 항은 양자 여기에 의한 emittance 및 상대적 에너지 퍼짐도 증가를 보여준다. 식에서 adiabatic 감쇠에 의한 효과는 에너지가 작고 에너지 변화가 클수록 커지므로 ramping 초기에 강하게 발생할 것으로 예상된다. 이 식을 통해서 각 파라미터의 변화를 예측할 수 있지만 전자빔은 6차원 상에서 운동하고 각 차원 사이의 커플링이 발생할 수 있으므로 부스터에서 ramping에 의한 효과를 정확하게 평가하기 위해서 10,000개의 macro particle을 기반으로 하는 tracking 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션에서 사용된 초기 빔 parameter는 $\epsilon_x = 10\,nm-rad, \delta_E = 0.2\,‰$이며 이는 선형가속기 시뮬레이션에 얻어진 값에 가깝게 가정하였다.

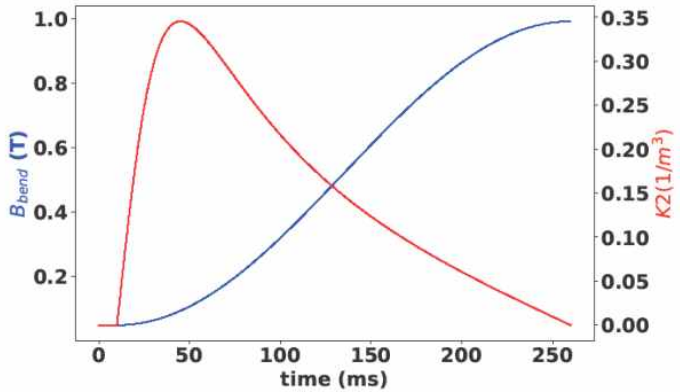


<그림 3.1.4.33> 사인형 에너지 ramping 프로파일 적용 시 부스터에서 emittance 및 상대적 에너지 퍼짐도, 번치 길이 변화

부스터에서 에너지 ramping이 될 때 전자빔의 에너지 변화가 발생하고 이는 전자빔의 reference 궤도를 유지하기 위해 이극 전자석의 세기 변화를 수반한다. 이극 전자석 내부에 설치된 챔버에서는 이러한 자속밀도 변화를 상쇄하기 위하여 반대 방향으로 eddy 전류를 발생시킨다. 이러한 eddy 전류 성분이 만드는 자기장은 거리의 제곱에 비례하는 형태로 나타나는데 이는 육극 전자석 성분으로 나타낼 수 있다. 자기장 변화에 의해 챔버에서 발생하는 육극 자석 성분 (K_2)은 (수식 3.1.4.3)으로 나타낼 수 있다.

$$K_2 = 2\mu_0 \sigma F \frac{t_k}{h}\frac{1}{\rho B(t)}\frac{\partial B(t)}{\partial t},\ F = 2\int_0^1 \left[x^2 + \left(\frac{g}{w}\right)^2 (1-x^2)\right]^{1/2} dx \quad \text{(수식 3.1.4.3)}$$

(수식 3.1.4.3)에서 μ_0는 진공에서 자화율 (permeability), σ는 챔버 물질의 전기전도도 (conductivity), t_k는 챔버의 두께, h는 이극 전자석의 두 극사이 간격, ρ는 이극 전자석의 곡률 반경, w와 g는 챔버의 가로 방향 및 세로 방향 반경을 나타낸다. F는 챔버의 형태를 나타내는 함수로 타원 형태로 근사한 경우이며, 챔버의 형태가 원형에 가까우면 2로 수렴하며 가로 반경이 커질 때 1이 된다. 4GSR의 챔버 재료는 SUS 316L로 전기전도도가 1.35 MS/s 정도이며 형태는 가로와 세로가 동일한 원형 파이프이다. 이 특성과 위의 ramping 프로파일을 고려하여 육극 전자석 성분을 계산해 보면 <그림 3.1.4.34>와 같다.

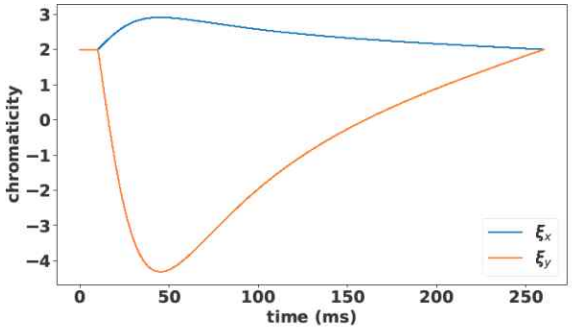


<그림 3.1.4.34> 사인형 에너지 ramping 프로파일에서 이극 전자석의 자기장 변화 및 챔버에 의해서 발생하는 육극 자석 성분

계산된 육극 전자석 성분은 기존의 육극 전자석 세기에 비해서 작은 값이지만 이극 전자석의 길이가 육극 전자석에 비하여 기므로 적분을 수행하면 무시할 수 없는 변화를 일으킬 수 있다. 이를 평가하기 위해서는 위 계산에서 얻어진 육극 자석 성분이 발생시키는 색수차(chromaticity) 변화를 평가할 필요가 있다. 이는 아래의 (수식 3.1.4.4)로 계산할 수 있다.

$$\xi_x = \frac{1}{4\pi}\oint ds\,(\beta_x(s)\,D_x(s)k_2(s)L_{k2}),\ \xi_y = \frac{1}{4\pi}\oint ds\,(\beta_y(s)\,D_x(s)\,(-k_2(s)L_{k2})) \quad \text{(수식 3.1.4.4)}$$

β_x와 β_y는 육극 자석 성분이 있는 곳에서 가로 방향 및 세로 방향 베타트론함수 (betatron functions), D_x는 분산함수 (dispersion function), L_{k2}는 육극 자석 성분의 길이를 나타낸다. 일반적으로 이극 전자석이 설치된 곳에서 가로 방향 베타트론함수는 최소화가 되므로 가로 방향의 효과는 미미할 것으로 예상된다. 하지만, FODO 형태의 부스터링 설계에서는 세로 방향의 베타트론함수는 피할 수 없이 커지므로 세로 방향의 색수차는 크게 발생할 수 있다. 위의 식을 기반으로 색수차 계산을 수행하였다. 이때 초기 색수차는 높은 전류 운전에서 발생하는 head-tail 불안정성 및 microwave 불안정성을 완화하기 위해 두 개의 육극 자석을 통해 가로세로 방향 모두 +2로 보정되었다고 가정하였다.



<그림 3.1.4.35> 이극전자석 내 챔버에 발생하는 eddy 전류에 의한 색수차 변화

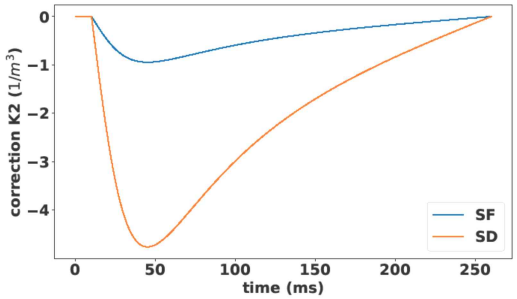
<그림 3.1.4.35>에서 확인할 수 있듯이, 가로 방향의 경우에는 초깃값인 +2에서 약 50% 수준의 증가 추세를 보이지만 세로 방향의 경우에는 육극 자석 성분이 작았음에도 불구하고 이극 전자석이 길이가 길고 자석 내에서 세로 방향 베타트론 함수가 커서 색수차가 -6 정도 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이는 부스터링의 각 cell

마다 설치된 두 개의 육극 전자석 세기에 변화를 주어 보정할 수 있다. 부스터링 설계에는 각 cell 마다 2개의 육극 전자석을 가지고 있으며 전자석의 세기를 최소화할 수 있도록 가로 방향 및 세로 방향의 베타트론함수가 각각 최대가 되는 위치 주변부에 설치되어 있으므로 보정에 필요한 육극 전자석의 세기 변화는 크지 않을 것으로 예상된다.

저장링 내 두 개의 family 육극 전자석 세기 ($K_{2,SD}$, $K_{2,SF}$)에 의해서 보정되는 색수차 값은 아래의 matrix (수식 3.1.4.5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix}\xi_x\\ \xi_y\end{pmatrix} = \frac{1}{4\pi}\begin{pmatrix}\sum_i \beta_{xi}D_{xi}L_i & -\sum_i \beta_{yi}D_{xi}L_k\\ -\sum_k \beta_{xk}D_{xk}L_k & \sum_k \beta_{yk}D_{xk}L_k\end{pmatrix}\begin{pmatrix}K_{2,SF}\\ K_{2,SD}\end{pmatrix} = M\begin{pmatrix}K_{2,SF}\\ K_{2,SD}\end{pmatrix} \quad \text{(수식 3.1.4.5)}$$

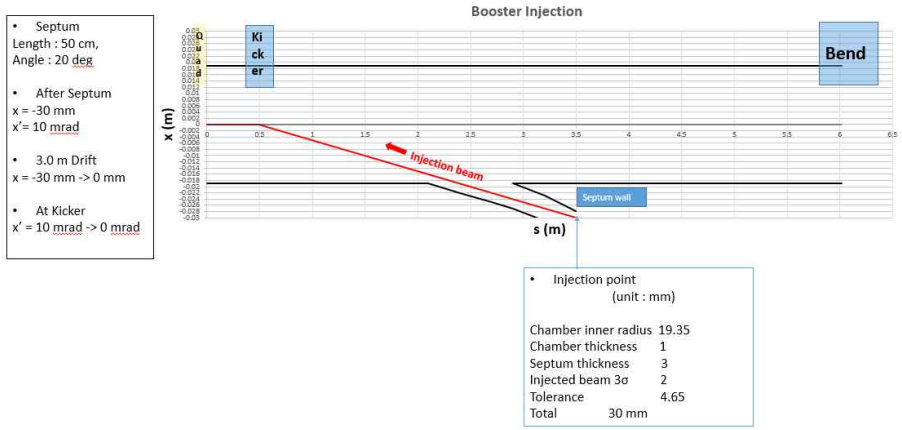
위 식에서 β_{xi}와 β_{yi}는 i번째 SF 육극 전자석에서의 가로 방향 및 세로 방향 베타트론 함수를 나타내며, β_{xk}와 β_{yk} k번째 SD 육극 전자석에서의 가로 방향 및 세로 방향 베타트론 함수, D_{xi}와 D_{xk}는 i와 k번째 육극 전자석에서의 분산함수이다. 위의 식에서 M matrix의 역행렬을 계산하여 원하는 색수차 값에 내적 하면 보정에 필요한 육극 전자석의 세기를 계산할 수 있다. 이 방법을 적용하여 부스터링에서 eddy 전류에 의해 발생하는 색수차 보정을 위해 ramping 과정에서 추가되는 두 family의 육극 전자석 세기는 <그림 3.1.4.36>과 같다.



<그림 3.1.4.36> Eddy 전류에 의해서 발생하는 색수차를 보정하기 위해 필요한 육극 전자석의 세기

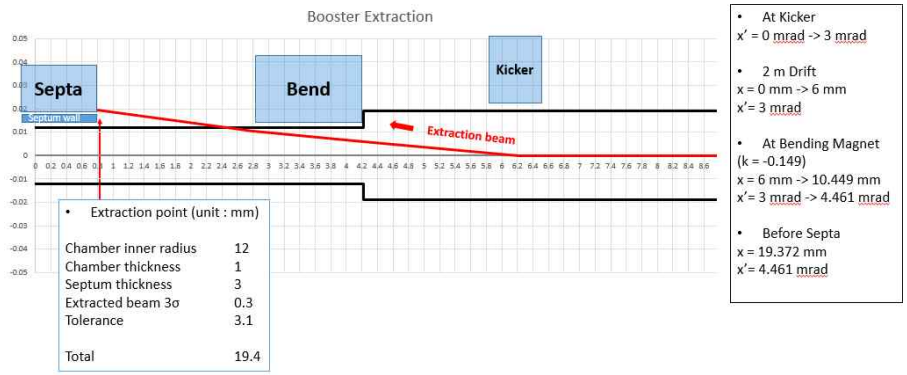
마. 부스터 입사와 출사

선형가속기에서 가속된 전자빔이 LTB를 지나서 부스터에 입사가 되는데 이때 사용되는 입사 방식은 on-axis 입사로, Septum 자석 끝에서 각도를 가진 채로 나오는 전자빔이 드리프트 구간을 지나 Kicker 위치에서 on-axis에 위치하게 되고 1개의 Kicker를 사용하여 전자빔을 on-axis, on-angle로 만들어 전자빔을 부스터에 입사하게 된다. 아래 <그림 3.1.4.37>은 부스터 입사 레이아웃을 보여준다. Septum 자석이 LTB 끝에 위치하여 전자빔을 20° 꺾는데, 부스터 챔버와는 10 mrad의 각을 남겨두고 -30 mm에 위치하게 되는데 이는 진공 챔버의 반경, 두께, septum wall의 두께, 입사빔 사이즈의 3배 그리고 tolerance를 합친 값이다. Septum을 나온 전자빔이 3 m의 드리프트 구간을 지나 Kicker 위치에서 on-axis가 되고 10 mrad의 kick을 받아 입사가 완료된다. 이때 입사빔이 부스터를 한 바퀴 돌기 전에 kicker의 자기장이 0이 되어야 하므로 Kicker의 pulse length 필요조건은 falling time이 2.6 μs 이내가 되어야 하고 200 ns의 멀티 번치가 동일한 세기의 kick을 받아야 하기 때문에 200 ns 동안의 field flatness가 요구된다.



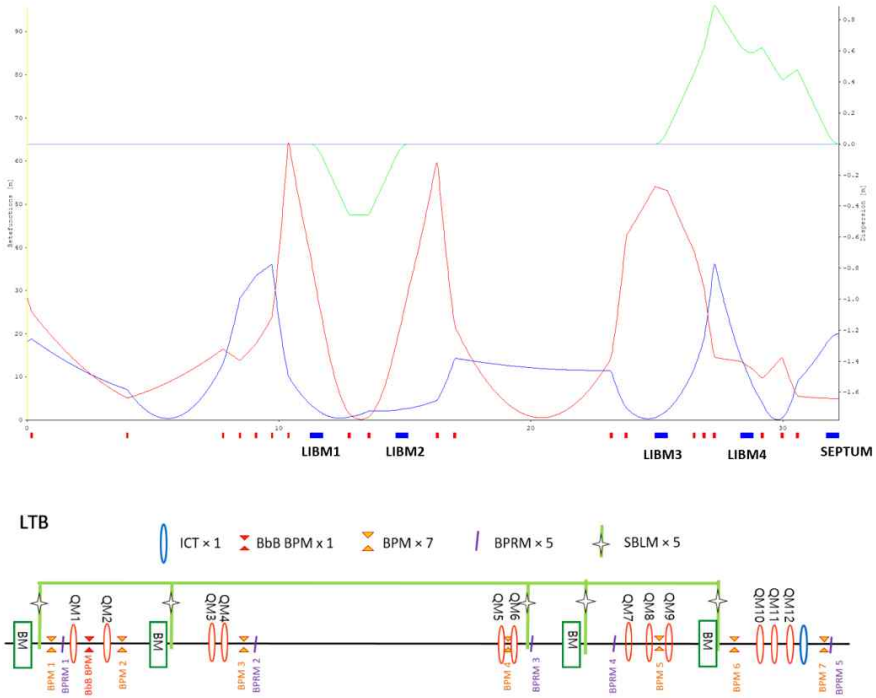
<그림 3.1.4.37> 부스터 입사 레이아웃

부스터에 입사된 200 MeV 전자빔은 <그림 3.1.4.38>처럼 4 GeV로 에너지가 증가되고 저장링에 입사하기 위해 먼저 부스터에서 출사가 이루어진다. 부스터 출사는 부스터 입사와 마찬가지로 1개의 Kicker를 이용하여 이루어지는데, 에너지가 20배가 된 만큼 더 강한 세기의 자기장이 필요해진다. 부스터 출사 Kicker는 저장링 입사 Kicker와 같은 자석 및 같은 전원장치를 사용한다. 이때 Kicker에 필요한 전류를 줄이기 위해 부스터 이극 자석의 defocusing quadrupole 성분을 이용한다. 먼저 Kicker에서 3 mrad의 kick을 주고 2 m 드리프트 공간을 지나 부스터 이극 자석에 들어가면, 6 mm의 offset을 가진 채로 defocusing quadrupole에 들어간 효과를 보기 때문에 이극 자석 또한 전자빔을 바깥쪽으로 kick을 해준다. 그 결과 이극 자석을 나올 때 전자빔은 10.4 mm의 offset과 4.5 mrad의 각을 가지게 된다. 이렇게 커진 각도를 활용하여 2 m의 드리프트 공간을 지나 septum에 진입하게 된다. Septum 시작점에서 설정된 출사 위치는 진공 챔버 반경, 진공 챔버 두께, septum wall 두께, 전자빔 사이즈의 3배, 그리고 tolerance를 포함하여 19.4 mm로 설정되었다.



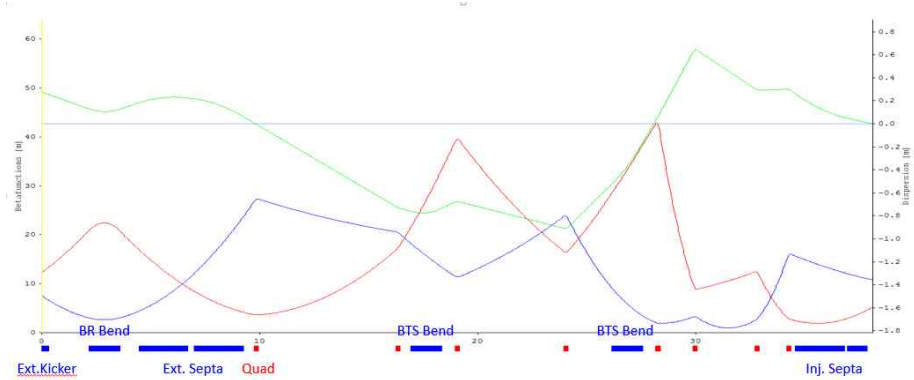
<그림 3.1.4.38> 부스터 출사 레이아웃

바. Linac to Booster (LTB) 빔전송선, Booster to Storage Ring (BTS) 빔전송선



<그림 3.1.4.39> LTB lattice와 Twiss function, 진단장치 배치도.

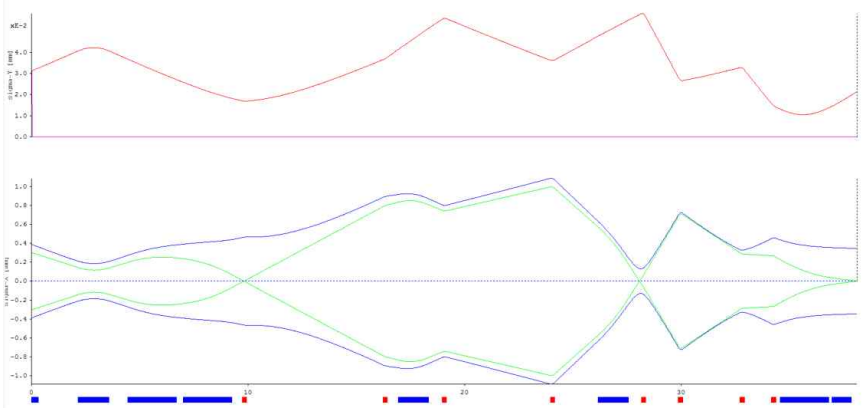
<그림 3.1.4.39>는 Linac to booster (LTB) 빔 전송선의 Lattice와 위치별 Beta Function, Dispersion을 나타낸다. LTB는 LTB bend 4개와 12개의 사극 자석으로 구성된다. BRPM 5개와 SBLM 5개가 설치되고, 이를 활용하여 beta function을 측정 및 분석하여 LTB로 입사된 Twiss parameter를 검증한다. LTB는 LIBM1 이후 증가한 dispersion이 LIBM2 이후 0이 되고, LIBM3 이후 증가한 dispersion이 septum 이후 0이 되게 매칭되었다. 이중 첫 번째 dispersion bump에서 BPRM을 이용하여 Beam pulse의 에너지 분포를 측정하고 Bunch 분해 가능한 BPM을 설치하여 Multi-bunch 입사 모드 시 Bunch 별 중심 에너지를 측정한다. LTB 끝에서의 beta 함수는 부스터 입사 포인트에서 부스터의 beta 함수와 유사한 값을 가진다.



<그림 3.1.4.40> BTS Lattice와 Twiss function. 초록색 실선은 dispersion, 파란색 실선은 수평 beta 함수, 빨간색 실선은 수직 beta 함수이다.

Booster to storage ring (BTS) 빔전송선은 2개의 이극 자석과 8개의 사극 자석으로 구성된다. BTS 빔전송선은 BTS 끝, 즉 저장링 입사 위치에서의 twiss function을 저장링 빔이 해당 위치에서 가지는 twiss function에 가깝도록 설계되었다. <그림 3.1.4.41>에서는 BTS 빔전송선에서의 빔 envelop을 보여주고 있다. 이를 통해 계산된 BTS에서의 beam stay clear는 수평 4 mm, 수직 1.2 mm가 되고 thin septum exit에서는 수평 2 mm 수직 1.1 mm가 된다. 이를 토대로 입사 위치에서 orbit bump 높이, thin septum 두께, 저장빔과 입사빔간의 offset이 각각 7 mm, 1 mm, 5 mm로 설정되었다.

Emittance exchange를 위해서는 dispersion-free 구간이 있어야 하지만 공간의 제약으로 설계하지 못하였다. 따라서 booster 전자빔의 emittance exchange를 위해서는 booster에서 순간적인 tune 변화를 이용한 방식이 이용되어야 한다. 또한 non-linear injection의 경우 BTS 끝에서의 twiss function이 변경될 필요가 있다.



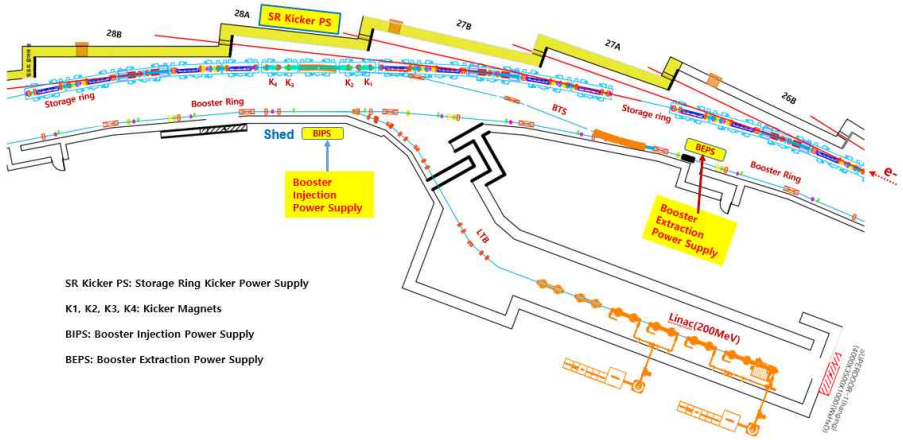
<그림 3.1.4.41> BTS Lattice와 Beam envelope function. 초록색 실선은 dispersion에 의한 envelop, 파란색 실선은 수평 envelop, 빨간색 실선은 수직 envelop이다.

사. Kicker 전자석 펄스 전원장치

(1) 부스터 kicker 사양 및 배치 (specification and layout of the booster kicker)

차세대 방사광가속기인 4세대 다목적 방사광가속기(4GSR)의 방사광원은 크게 선형가속기 입사기, 부스터링, 저장링으로 구성한다. Kicker 전자석 펄스 전원장치는 부스터링(Booster Ring)과 저장링(Storage Ring)으로 구성된다. 부스터링 입사 및 출사(injection & extraction) kicker 전자석 펄스 전원장치와 저장링 입사 kicker 전자석 펄스 전원장치의 위치 구성도는 아래 <그림 3.1.4.42>와 같으며, 전자총에서 발생 된 전자빔은 선형가속기(Linac)에서 200 MeV의 에너지로 가속된 후 빔전송선(LTB)을 통해 부스터링 입사기로 injection 된다. 입사된 전자에너지는 Ramping을 거쳐 최종 target 에너지인 4 GeV까지 승압시킨다. 전자빔의 출사는 extraction kicker에서 담당하게 되며, 출사 된 전자빔은 저장링 kicker에 의해 저장링에 입사된다.

부스터링 kicker 전자석 펄스 전원장치의 위치는 <그림 3.1.4.42> kicker 전원장치 위치 구성도에서 보여주듯이 쉐드에 설치할 예정이며, 쉐드에서 부스터 터널 내부에 설치된 magnet까지의 연결은 별도의 트랜치를 이용하여 연결 케이블의 길이를 짧게 함으로써 인덕턴스 영향을 최소화하도록 하였다.



<그림 3.1.4.42> Kicker 전원장치 위치 구성도

○ 부스터링 입사 (Injection) 시스템

선형가속기 입사기에서 200 MeV로 가속된 전자빔은 injection septum을 통해 저장링 내부로 들어와서 injection kicker에 의해 궤도가 부스터링 전자빔 중심축 위치에 평행하도록 조절된다. 부스터링 입사 kicker 전자석 펄스 전원장치의 설계 파라미터는 아래 <표 3.1.4.19>와 같다. 4GSR 저장링의 필요조건을 충족시키기 위해, 200 MeV 선형가속기는 두 가지 운전조건을 고려하고 있다. 첫째, 초당 2회 출력되는 single-bunch 상태에서는 전하량이 약 1 nC인 전자를 생성한다. 둘째, multi-bunch 입사를 위해 수백 pC의 전하량을 갖는 약 100개의 전자 뭉치가 출력될 수 있도록 한다. 두 가지 조건 모두를 충족하기 위해 부스터링의 입사 전원장치의 출력 펄스 모양을 flat-top type으로 만들어야 multi-bunch 입사시킬 수 있다. 부스터링의 입사 kicker 전자석 펄스 전원장치의 출력 펄스 모양에서 flat-top width는 0.4 μs를 유지 할 수 있어야 하며, 펄스 상승(rise time) 구간은 무시해도 되지만, 펄스 하강(fall time) 구간은 최대 1.5 μs 이내 들 수 있도록 설계한다.

<표 3.1.4.19> 부스터링 입사 kicker 전원장치 parameter

Parameters	Injection
Pulse shape	Flat-top type
Switch type	IGBT
Pulse current [kA]	less than 0.5 (expectation)
DC voltage [kV]	less than 1 (expectation)
Flat-top width [μs]	0.4
Flat-top accuracy [%]	± 1.0
Rise time [μs]	Irrelevant
Fall time [μs]	1~1.5
Stability [%]	± 0.5
Repetition rate [Hz]	60

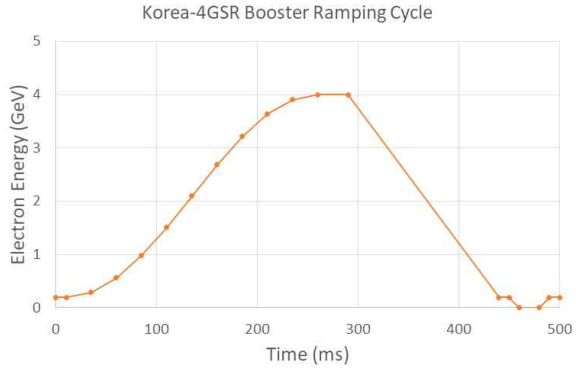
○ 부스터링 출사 (Extraction) 시스템

부스터링에서 4 GeV로 가속된 후, injection septum 앞에 놓인 extraction kicker가 저장된 전자빔을 궤도에서 이탈시킨다. 부스터링 출사 전원장치 설계 parameter는 아래 <표 3.1.4.20>과 같다. 부스터링 입사 전원장치처럼 두 가지 조건(single & multi-bunch 입사) 모두를 충족하기 위해 부스터링의 출사 kicker 전자석 펄스 전원장치의 출력 펄스 모양 또한 flat-top type으로 만들어야 multi-bunch 입사시킬 수 있다. 부스터링의 출사 전원장치의 출력 펄스 모양에서 flat-top width는 0.4 μs를 유지할 수 있어야 하며, 펄스 상승(rise time) 구간은 최대 1.5 μs 이내 들 수 있도록 설계해야 하며, 펄스 하강(fall time) 구간은 무시해도 된다.

<표 3.1.4.20> 부스터링 출사 kicker 전원장치 parameter

Parameters	Extraction
Pulse shape	Flat-top type
Switch type	IGBT or GTO
Pulse current [kA]	2~3 (expectation)
DC voltage [kV]	3 (expectation)
Flat-top width [μs]	0.4
Flat-top accuracy [%]	± 1.0
Rise time [μs]	1~1.5
Fall time [μs]	Irrelevant
Stability [%]	± 0.5
Repetition rate [Hz]	2

부스터링의 ramping cycle은 <그림 3.1.4.43>과 같으며, 선형가속기에서 약 200 MeV의 에너지를 갖는 전자빔이 빔전송선(LTB)을 통해 부스터링 입사기로 injection 하기 전에 머무는 시간을 약 10 ms 갖는다. 부스터링에서 ramping 시간은 대략 250 ms 정도 소요되며, 4 GeV/2 mA의 전자빔이 얻어진다. 최대 에너지에서 약 30 ms의 시간이 소요되며, 이후 전자빔을 출사하여 바로 저장링 입사 kicker로 보내어 입사하게 된다.



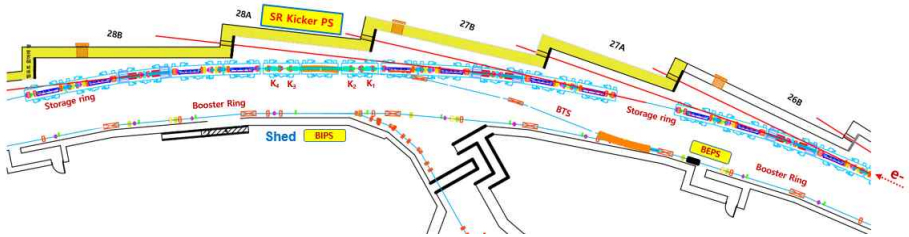
<그림 3.1.4.43> Booster Ramping Cycle 구성도

(2) 저장링 kicker 사양 및 배치 (specification and layout of the storage kicker)

부스터링에서 출사된 전자빔이 저장링에 입사되기 위해서는 수평 경로로 굴절시켜야 한다. 전자빔의 최종 위치는 저장링의 빔 저장궤도와 같은 높이에 일치해야 한다. 최종단에서 전자빔을 굴절시키는 역할은 입사전자석이 하게 된다. 이렇게 굴절된 전자빔이 저장링의 전자빔 운동 범위 내에 들어가도록 하는 것이 kicker 전자석이다. 입사된 빔과 이미 저장된 빔은 초기에는 입사전자석의 얇은 벽(septum)으로 분리되어 있다. 저장링 안에서 전자빔의 정상궤도를 굴절시키기 위해 4대의 kicker 전자석이 사용되는데, 이들 kicker 전자석은 전자빔의 정상궤도를 입사전자석의 얇은 벽 쪽으로 근접시켜서 입사되는 전자빔과 저장링의 전자빔을 함께 저장링의 전자빔 운동 범위 내에 들어가게 한다. 입사되는 전자빔은 저장링을 2회 회전한 후에 거의 같은 수평 위치로 돌아오게 된다. 따라서, kicker 전자석 모듈레이터의 전류는 전자빔이 저장링을 2회 회전한 후 또는 입사되는 시점으로부터 2.66 μs 후에는 없어져야 전자빔의 공진 영향과 입사전자석의 벽에 부딪혀서 입는 손실을 피할 수 있다. Kicker 전자석이 동작하지 않을 때는 빔전송선을 통하여 전송된 빔은 저장링의 전자빔 운동 범위에 포함되지 않는다.

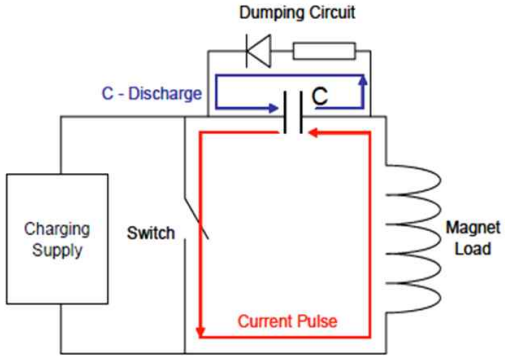
○ 저장링 (SR) kicker 시스템

저장링 kicker 장치는 <그림 3.1.4.44>에서 저장링 magnet과 kicker 전원장치 위치 구성도에서 보여주듯이 마그넷 4개(K1, K2, K3, K4)로 구성되어 있으며, 저장링 magnet 각각에 전류를 공급하기 위해 저장링 kicker 전원장치(SR Kickers) 또한 4대로 구성된다. 그러나 kicker 전원장치의 캐비넷은 2대로 구성하여 비용을 절감하고자 한다. 전체 시스템은 크게 세 가지로 분류하고자 한다. 첫째, 제어 부분으로 부스터링 전원장치를 포함한 통합관리제어를 저장링 kicker 시스템을 설치한 실험홀(experimental hall) 건물에서 한다. 통합 관리제어는 Injection Control Interface 등을 모니터링하는 OPI와 전원장치의 Status, Interlock 등을 제어하는 PLC 장치들을 포함한다. 둘째, kicker 마그넷에 half-sine 형태의 펄스 전류를 공급하는 kicker 전자석 펄스 전원장치로 가장 중요한 부분은 kicker magnet에 공급하는 half-sine 전류의 difference를 ± 0.2% 이내 공급할 수 있어야 field difference를 최소화시켜 orbit fluctuation을 줄일 수 있다. 4GSR 저장링 입사 전원장치는 이러한 문제점들을 줄이기 위해 이미 회로 설계에 반영하였다. 셋째, kicker magnet으로 아직 설계 및 제작 전으로 정확한 parameter는 나오지 않았지만, 포항의 PLS-II kicker magnet 컨셉(four bump magnet type)으로 결정될 예정이다. kicker 전원장치 위치 구성도에서 보여주듯이 실험 홀에 설치할 예정이며, 실험 홀에서 저장링 터널 내부에 설치된 마그넷까지의 연결은 별도의 트랜치를 이용하여 연결 케이블(RG8U)의 길이를 짧게 함으로써 인덕턴스 영향을 최소화하도록 한다.



<그림 3.1.4.44> 저장링 magnet과 kicker 전원장치 위치 구성도

<그림 3.1.4.44>는 kicker 전원장치의 구성도를 간략히 나타낸 것이다. <그림 3.1.4.44>에서 보듯이 kicker 전원장치는 크게 Charging Supply, Charging/Discharging, Machine Control, Magnet Load로 구성되어 있다. Kicker 전원장치에 공급해 주는 주 전원은 3상 4선식 380 V이며, 3상 208 V 전원이 필요하여 208 V 3상 강압용 트랜스 50 KVA를 사용하며, CCPS 턴-온 시 발생하는 고조파 특성을 개선하기 위한 인덕터(600 μH/50 A)를 사용한다. 3상 380 V는 3상 (R, S, T) 중에서 한 상과 중성선 (N) 상과 연결하여 220 V 단상을 각종 전원장치에 사용한다. CCPS의 용량은 20 kV/0.5 A = 10 kW이며, 1대의 CCPS로 K1, K2와 K3, K4 마그넷에 공급하는 kicker 전원장치에 공급한다. 3상 208 V 전원은 CCPS 입력 전원으로 사용하며, 3상 208 V는 3상 (R, S, T) 중에서 한 상과 중성선 (N) 상과 연결하여 120 V 단상을 싸이라트론 전원장치에 사용한다. 3상 208 V 입력받은 Charging Supply는 Charging/Discharging Assembly에 필요한 고전압을 공급하게 된다. Charging/Discharging Assembly는 이 전압을 커패시터에 충전한 후 싸이라트론 고전력 스위치를 사용하여 부하인 전자석에 공급한다. 스위치의 트리거링 신호를 결정하는 것은 중앙제어실의 timing 신호에 따라 이루어진다. Machine Control은 저장링 제어실의 지령에 따라 시스템의 모든 상황을 제어하며, 현재의 운전 상태를 저장링 제어실에 알려준다. 또한 시스템을 Local에서 제어할 수 있도록 하여 시스템의 정기 점검이나 이상이 생겼을 때 제어할 수 있도록 한다.



<그림 3.1.4.45> Schematic Diagram of SR kicker PS

<그림 3.1.4.45> Schematic Diagram에서 보여주듯이, 4GSR kicker 전자석을 구동하는 kicker 펄스전원장치는 기본적으로 직렬 공진회로이다. 출력 전류의 펄스 형태는 시스템의 인덕턴스 L_t와 커패시턴스 C_t 그리고 저항 R에 의해 결정된다. 충전 전압이 V_o일 때 전류 i(t)의 정규식 (수식 3.1.4.6)과 같다.

$$i(t) = \frac{V_o}{wL_t} e^{-(\frac{R}{2L_t})t} \sin(wt) \quad \text{(수식 3.1.4.6)}$$

출력 전류의 형태가 반 사인파이므로, 시스템의 저항 성분이 낮다고 가정하면 펄스의 폭은 (수식 3.1.4.7)과 같다.

$$\text{Pulse width} \fallingdotseq \pi\sqrt{L_t C_t} \quad \text{(수식 3.1.4.7)}$$

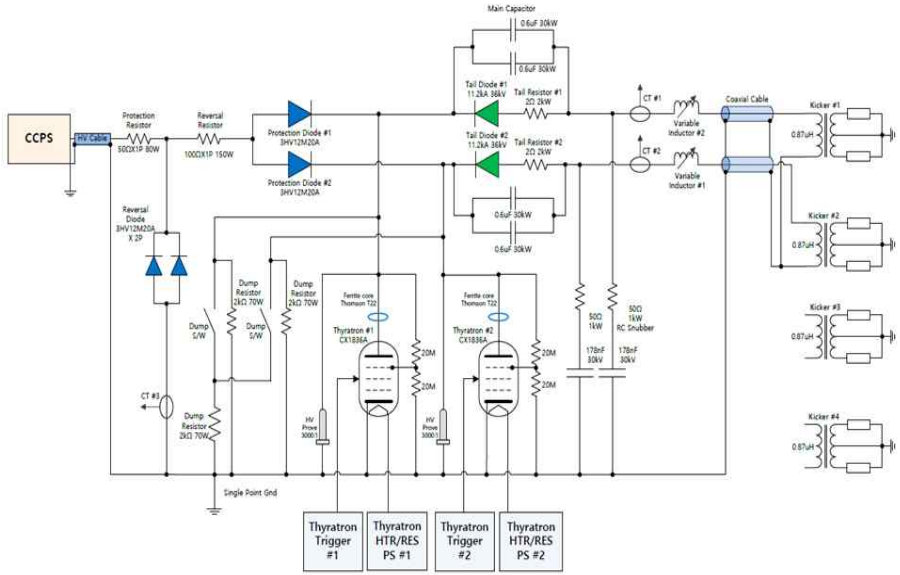
한 펄스가 갖는 에너지는 (수식 3.1.4.8)과 같이 계산된다.

$$E_O = \frac{1}{2} C_t V_o^{\,2} \quad \text{(수식 3.1.4.8)}$$

Kicker 전자석을 구동하기 위한 kicker 펄스전원의 사양은 <표 3.1.4.21>과 같다.

<표 3.1.4.21> SR kicker 전원장치 사양

Parameters	Specification
Pulse Current	5 kA
Pulse-width	5.2 μs
DC voltage	13 kV
Flat-top width	200 ns
Repetition Rate	2 Hz
Energy per Pulse	undecided
Magnet Inductance [μH]	undecided
Power Supply System Inductance [μH]	undecided
Energy in magnet [J]	undecided
Pulse Current Difference	± 0.2%
Maximum Operable Beam Energy	4 GeV



<그림 3.1.4.46> Circuit Diagram of SR kicker PS

<그림 3.1.4.46>은 kicker 펄스전원장치 회로에 대한 구성도를 보여준다. Kicker의 충전 구조는 충전 저항(protection resistor), 충전 정류기(protection diode), 주 커패시터(main capacitor)로 구성되어 있다. Kicker의 방전 구조의 주요 부분은 싸이라트론(Th_1, Th_2), 역 에너지 분산구조(tail diode와 tail resistor)와 과도현상

억제구조(RC snubber)로 구성되어 있다. 한번 충전된 후, 두 대의 싸이라트론을 동시에 도통하여 주 커패시터의 에너지를 빠르게 부하로 방전한다. 역 에너지 분산구조는 주 커패시터와 병렬로 연결되어 순방향으로 충전되는 에너지는 유지하며 주 커패시터에 역으로 충전되는 전압을 방전시킨다. 역전압의 빠른 방전은 다음 펄스 이전에 주 커패시터를 일정한 초기조건으로 만들며 또한 충전되는 동안에 생기는 고전압 직류 전원장치의 첨두 전류를 감소시키는 데 필요하다.

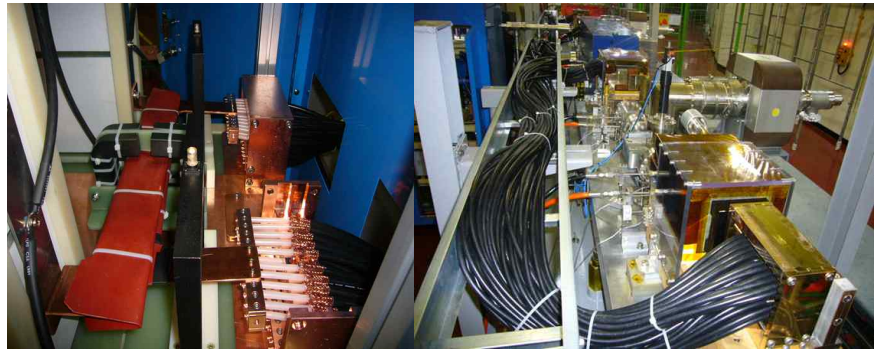
직렬로 연결된 RC 회로(RC snubber)는 전자석 부하와 병렬로 연결되어 방전이 끝난 후에 부하 전류의 연속성을 유지하게 한다. 부하 전류를 유지함으로써 싸이라트론과 커패시터에 급격한 역전압이 인가되는 것을 최소화할 수 있다. 싸이라트론은 역으로 도통하지 않으므로 전체 역전압은 싸이라트론에 의해 통제된다. 하지만, 회로 구성상 최대로 생성될 수 있는 역전압(10 kV 이상)은 싸이라트론이 견딜 수 없으며, 커패시터의 수명에도 큰 영향을 주게 된다. 따라서 싸이라트론과 커패시터의 역전압을 감소시키는 것은 이런 종류의 공진회로에서는 매우 중요하다. 앞서 언급한 바와 같이 역전압의 감소는 역 에너지 분산구조와 과도현상 억제구조로 구현되었다.

Kicker 모듈레이터를 보조하는 장치로서는 싸이라트론 전원장치와 싸이라트론 트리거 증폭기, 측정 감지장치와 기구제어 장치 등이 있다. 싸이라트론 트리거 증폭기는 주 타이밍 모듈에서 발생하는 펄스 신호를 광섬유를 통해 광신호 펄스로 받는다. 이 신호를 받아 싸이라트론 트리거 증폭기는 싸이라트론을 트리거한다. 4GSR kicker 시스템은 충전 전압과 부하 전류, 자장과 그리드 트리거펄스를 측정할 수 있어야 한다. 자장감지기는 전자석의 상 방향과 하 방향 자장의 형태를 측정한다. 기구제어장치는 PLC를 이용하여 시스템을 관리한다. 기구제어장치는 모든 전원장치의 필요한 전압과 전류, 보호장치와 저장링 제어실과의 통신 상태를 표시한다. Kicker 전원장치와 kicker 전자석의 상부에 설치된 펄스 트랜스포머의 연결은 RG-223 케이블을 병렬로 연결하여 인덕턴스를 줄일 계획이다. 부하(bump magnet)의 임피던스가 적기 때문에 전원장치와 부하 사이의 연결 과정에서 임피던스값도 무시할 수 없는 큰 값이므로, 임피던스를 줄이기 위하여 출력 선을 병렬로 구성하여야 하는데 <표 3.1.4.22>의 식에 의해 계산된다.

<표 3.1.4.22> RG8U 동축 케이블 인덕턴스 계산표

RG8U Coaxial Cable Characteristics	
Cable Impedance	50 ± 2 Ω
Cable Capacitance	101 pF/m
Cable Inductance	253 nH/m, Z = sqrt(L/C) ; **L= Z^2 × C**
Cable Inductance with 20 in parallel	with 20 in parallel = 0.125 μH

<표 3.1.4.22>에 의해 계산한 RG8U 동축 케이블의 인덕턴스값을 아래 <그림 3.1.4.47>에 적용한 PLS-II kicker 전원장치에 적용한 결과 길이 10 m에 20가닥 병렬로 연결하면, 약 0.125 μH로 계산되어 kicker 전원장치 전체 인덕턴스에 미치는 영향은 매우 미미하였다. 이러한 결과를 토대로 4GSR kicker 전원장치의 경우 동축 케이블의 인덕턴스를 줄여야 할 때 PLS-II의 컨셉을 사용할 예정이다.



<그림 3.1.4.47> 20 coaxial cable strands in parallel connection

3.1.5 저장링 입사 장치 (Beam Injector)

본 장에서는 저장링 빔 입사에 관한 내용을 소개한다. 4GSR의 비선형 효과가 커서 빔의 안정적 영역이 줄어들어 (dynamic aperture) 가능한 입사빔과 저장빔의 거리를 가까이하는 것이 주요한 이슈이다. 본 장에서는 디자인된 입사빔이 빔 손실 없이 저장링에 입사됨을 보여주고 이를 위한 입사시스템의 조건 등을 소개한다.

가. 입사빔 특성

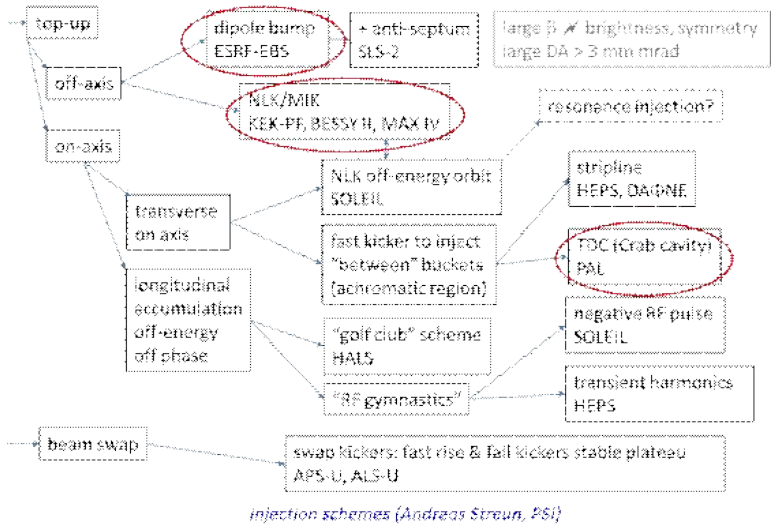
4GSR의 부스터가 저장링과 같은 터널에 설치되어 그만큼 부스터 둘레가 커서 작은 emittance의 입사빔을 부스터에서 만들 수 있다. 부스터 설계에 따라 입사빔의 emittance를 더 줄일 수 있으나 쉬운 설치 및 운영을 위한 간단한 부스터 격자구조를 고려하여 <표 3.1.5.1>과 같은 빔을 발생한다. 수평 emittance가 8 nm로 충분히 작은 값이며 필요에 따라 부스터 격자구조를 달리하면 더 줄일 수 있다. 부스터의 이점으로 수직 emittance가 아주 작은데 이는 저장링 둘레로 작은 aperture를 사용하는 삽입장치 운전을 쉽게 해준다. 참고로, PLS-II의 경우는 6 mm full gap 진공 챔버 내 삽입장치를 사용하는데 수직 방향의 입사빔의 emittance가 10 nm로 Top-up 초기 많은 빔 loss가 발생하였는데 4GSR에서는 5 mm full gap 진공 챔버 내 삽입 장치와 0.1 nm의 수직 입사빔 emittance를 고려하고 이는 Top-up 운전을 더욱 쉽게 실현할 수 있게 한다.

<표 3.1.5.1> 입사빔 parameters

Parameters	Values	Unit
수평 emittance (H emittance)	7.9	nm
수직 emittance (V emittance)	0.1	nm
에너지 분산 (rms energy spread)	0.1	%
번치 길이 (rms bunch length)	11	mm

나. 입사시스템 및 레이아웃

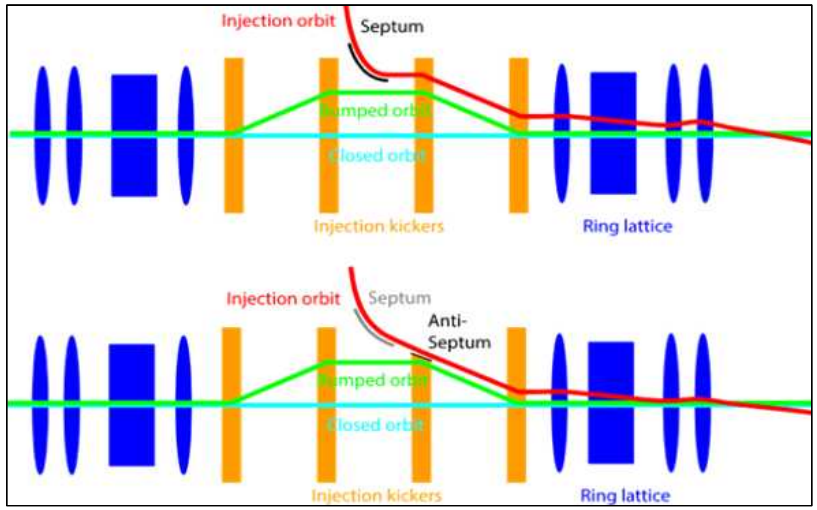
4세대 원형 방사광가속기가 도래하면서 <그림 3.1.5.1>과 같이 많은 입사기법이 소개되어 전 세계적으로 활발히 연구 중이다. 이 중에는 1세대부터 꾸준히 사용되어 온 그 성능이 충분히 검증된 4개의 Kicker를 사용하는 4 bump 입사기법도 있으며 포항가속기연구소가 제안한 crab cavity를 사용하는 입사기법도 있다. 여러 가지의 입사기법 중에 개념설계의 방향에 맞춰 충분히 검증된 4개의 Kicker를 사용하는 4 bump 입사기법을 4GSR의 주 입사기법으로 선택하였다. 이 기법은 충분히 넓은 빔의 안정한 영역을 (dynamic aperture) 필요로 하며 4GSR의 특성상 3GSR에 비해 비교적 작은 안정한 영역 문제를 극복하기 위해 저장빔과 입사빔의 분리 거리를 가능한 줄이는 것이 4GSR 4 bump 입사기법의 특징이다.



<그림 3.1.5.1> 전 세계 원형 방사광가속기에서의 입사기법

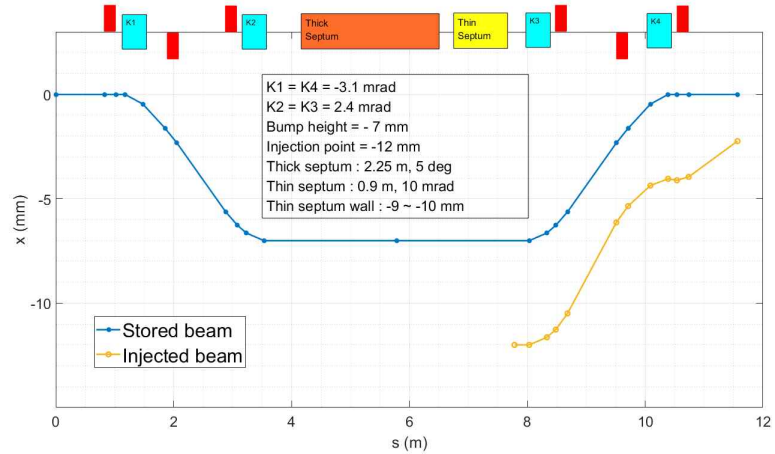
4 kicker bump 입사기법에서도 다시 기존방식과 anti-septum을 사용하는 방식으로 나눌 수 있는데, 기존방식에서 좀 더 저장빔과 입사빔의 분리 간격을 줄이기 위해 anti-septum 기법이 개발되었다. 이로써, 3 mm라는 분리 간격까지도 Diamond-II 에서처럼 고려되고 있다. <그림 3.1.5.2>에서는 기존 4 kicker bump 기법(위)과 anti-septum을 사용하는 기법(아래)이 소개되었는데 anti-septum 기법은 septum

magnet이 저장빔에는 영향 없이 입사빔을 휘게 하는 것과는 달리 입사빔에는 영향을 주지 않고 저장빔만을 휘게 하는데 이렇게 하여 입사빔이 4번째 kicker magnet에서 저장빔과 입사빔의 간격을 3 mm까지 줄이는 기법이다. 이 경우는 anti-septum magnet의 성능을 충분히 확보하기 위한 연구 개발이 필요하다. 개념설계에서는 기본 4 kicker bump 기법을 고려한다.



<그림 3.1.5.2> 4 kicker bump 기법. (위) 기본기법, (아래) anti-septum 기법 (C.Gough, PSI)

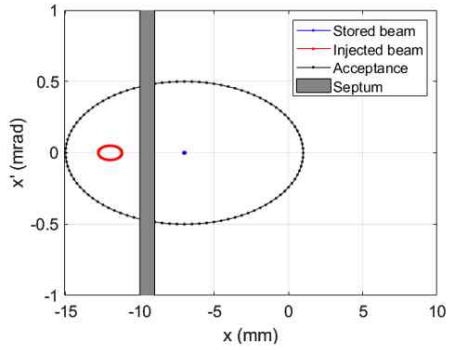
<그림 3.1.5.3>은 4GSR 개념설계의 입사 구간의 layout이다. 6개의 사극 자석이 중간에 배치된 11.6 m의 직선구간에 4개의 kicker magnet이 설치되어 있고 thick septum과 thin septum magnet을 통과한 입사빔은 저장빔과 평행하게 5 mm의 간격을 가지고 kicker 3번을 통한다. Kicker 3번 입구에서의 수평 방향의 위치는 센터로부터 -12 mm 오프셋을 가진다. Kicker 3번과 4번을 통해서 저장빔의 위치가 수평으로 0 mm일 때 입사빔은 5 mm 오프셋으로 저장빔 주위로 오실레이션 모션을 한다. Kicker에서의 kick은 3.1, 2.4 mrad으로 PLS-II의 9 mrad에 비해 비교적 작은 값이다. 이는 입사 과정 중 저장빔의 요동을 최소화하는 데 도움이 된다.



<그림 3.1.5.3> 4GSR 저장링 입사 레이아웃

Kicker 펄스의 모양은 일반적인 경우로서 half 사인 함수 모형으로 펄스의 시간은 5 μs이다. 전자빔이 저장링을 한 바퀴 도는 데 걸리는 시간이 2.67 μs이므로, Kicker pulse의 세기가 가장 클 때 입사가 되는 입사빔은 저장링을 한 바퀴 돈 후 다음 턴에서 받는 kicker의 자기장의 세기가 0이 된다. 즉, 한턴 kick을 받는 시스템이다. 5 μs의 펄스는 안정적으로 운영할 수 있는 범위이며 On-axis injection의 경우 Kicker 펄스의 시간은 10~50 ns을 고려함으로 비교하면 훨씬 용이한 운전조건임을 알 수 있다. Septum magnet의 경우는 In-vacuum thin septum 1기와 out-vacuum thick septum 1기를 운용한다. 이때 저장빔과 입사빔 구간의 septum magnet 벽두께는 thick septum의 경우 3 mm, thin septum의 경우 1 mm이다.

<그림 3.1.5.4>는 저장된 빔이 -7 mm bump orbit을 지날 때 입사빔과 저장된 빔의 수평 위상공간에서의 위치를 개념적으로 보여준다. <그림 3.1.5.3>에서 보여주는 바와 같이 입사빔은 -12 mm 오프셋에서 입사되고 저장된 빔은 범프로 인해 -7 mm의 오프셋을 가진다. 수평 방향 8 mm의 acceptance를 가정하였고 이는 3.1.3 자 commissioning simulations 항목에서 시뮬레이션 결과를 고려할 때 합리적으로 예측할 수 있는 값이다.

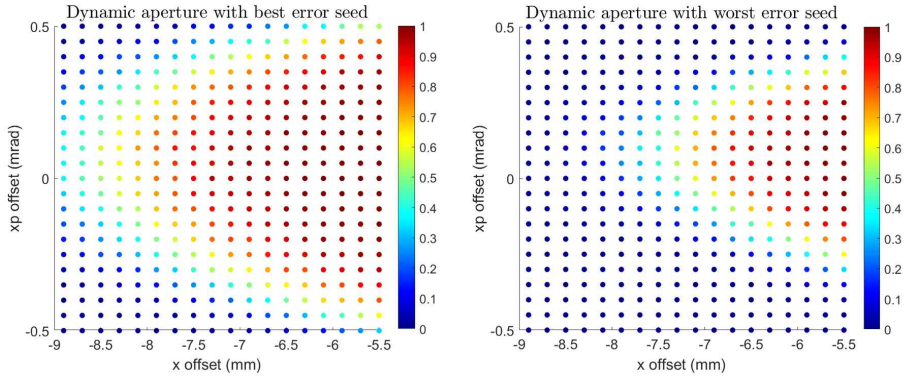


<그림 3.1.5.4> 입사빔과 저장된 빔의 수평위상공간에서 위치 개념도

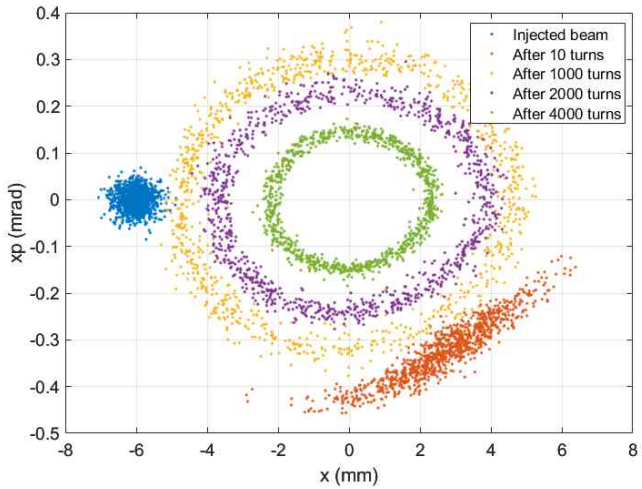
다. 입사빔 전산모사 (Injection Simulation)

Accelerator Toolbox (AT)를 사용하여 입사된 빔의 x offset, xp offset에 따른 입사효율 (injection efficiency) 변화를 scan 하여 안정적인 입사가 이루어지는 영역을 x-xp 위상공간에서 확인하였다.

3.1.3 자 commissioning simulations 항목에서 사용된 50개 lattice ensemble 중 가장 큰 dynamic aperture를 가지는 seed와 가장 작은 dynamic aperture를 가지는 seed에 대해 3-sigma cut의 Gaussian distribution을 갖는 multiparticle을 생성하고 2,000 turn의 turn만큼 tracking을 수행하여 입사 효율을 계산하였다. Injection point에서 입사되는 빔은 booster 4 GeV 에너지에서의 emittance, bunch length, energy spread를 갖는 조건을 가정하였고, beta 함수는 injection point에서 저장링의 beta 함수와 match 되어 있는 조건에서 tracking simulation을 수행하였다 (<그림 3.1.5.5>). Tracking은 RF cavity와 radiation damping에 의한 효과를 포함한다.



<그림 3.1.5.5> Commissioning simulation에서 얻은 50개 error seed 중 최대 dynamic aperture (좌)와 최소 dynamic aperture (우)에 대한 injected beam 중심의 x-xp offset에 따른 injection efficiency scan 결과. Color-code는 injection efficiency에 해당되고 1인 경우 100% injection efficiency를 가짐.



<그림 3.1.5.6> 최대 dynamic aperture를 갖는 error seed에 대한 injected beam의 footprint. x offset = -6 mm, xp offset = 0 mrad.

결과는 최소 dynamic aperture를 갖는 error seed에 대해서도 stored beam과 injected beam의 x offset이 -6 mm 위치에서 100%에 가까운 입사 효율을 가질 수 있음을 보여준다. 최대 dynamic aperture를 갖는 error seed의 경우 약 -7mm x offset까지 100%에 가까운 입사 효율을 갖는다.

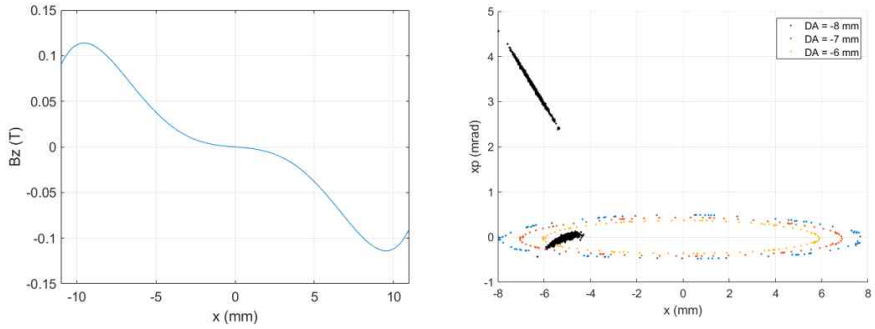
<그림 3.1.5.6>은 최대 dynamic aperture를 갖는 error seed에서 x offset = -6mm, xp offset = 0인 조건에서 x-xp 위상공간에서 turn에 따른 multiparticle 분포를 보여준다.

라. 대체 입사기법

빔 손실에 관해서는 4 kicker bump 입사기법이 충분히 안정적으로 상용될 수 있다. 95%의 이상의 빔 입사율을 확보함에 있어서 별다른 문제는 없다. 하지만, Top-up 입사 중 입사시스템의 노이즈에 의한 저장빔의 요동을 억제하는 데는 여전히 개선되어야 할 문제다. 3세대 방사광가속기에서 Top-up 입사 중 저장빔의 요동은 수평으로 100 μm, 수직으로 10 μm 정도이다. 4 kicker bump 입사기법으로 억제할 수 있는 정도이지만 대체 입사기법 연구도 동시에 병행되어야 한다.

Non-linear kicker 기법은 BESSY-II에서 제안하여 시험 되었고 MAX-IV에서 처음으로 하나의 non-linear kicker를 입사에 적용하여 성공적으로 운영한 후, SIRIUS도 이 입사기법을 메인으로 설치하고 운영하고 있다. 최근 SOLEIL도 non-linear kicker 기법을 사용한 운전을 시작하였다. 이 기법은 <그림 3.1.5.7>에 보이는 것과 같이 이상적으로는 저장빔에는 kicker 필드가 없으며 입사빔에 kick을 주게 피크 필드를 설계함으로 입사빔에만 킥을 가해지게 하는 기법이다. 입사율만 확보되면 저장빔에는 필드가 없어 입사 요동이 매우 적다. 따라서 빔라인 유저 입장에서 입사 중인 상황과 입사하지 않는 상황의 photon beam의 움직임에 대해 차이를 느낄 수 없는 transparent 한 injection을 구현할 수 있다.

하나의 high-beta straight section에 injection septum, non-linear kicker를 배치하는 것이 machine의 tuning과 입사 프로세스를 간단하게 하는 데 유리하다. 지금까지 non-linear kicker를 설치, 운영한 저장링들은 3 GeV 또는 3 GeV 이하의 에너지를 가지고 있는데, 4GSR은 4 GeV의 에너지를 가지므로 beam rigidity가 더 크고, 입사빔의 offset도 차이가 있으므로 4GSR의 입사 layout에 보다 최적화된 non-linear kicker의 field 분포, 길이 등에 관한 연구가 필요하다.

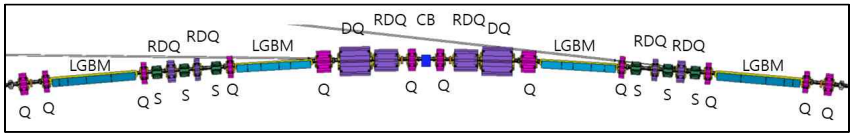


<그림 3.1.5.7> Non-linear kicker의 x 방향 field 분포 (좌)와 non-linear kicker 킥으로 인해 injected beam이 acceptance에 capture 되는 상황에서의 x-xp 위상공간 (우). (예시).

3.1.6 전자석 시스템

가. 전자석 시스템 개요 및 요구조건

4GSR은 총 28개의 주기적인 섹터로 이루어져 있으며, <그림 3.1.6.1>과 같이 각 섹터는 1개의 center bending (CB) 자석, 4개의 longitudinal gradient Bending (LGBM) 자석, 2개의 transverse gradient (DQ51), 6개의 reverse bending 복합 사극 전자석 (RDQ), 12개의 사극 전자석 (quadrupole), 6개의 육극 전자석 (S), 2개의 팔극 전자석, 4개의 fast corrector 등 합계 37개의 주요 전자석이 배치된다. CDR 때와의 차이는 사극 및 육극 전자석들의 세기가 최적화되고 팔극 전자석들이 추가된 것이다. 이 외에도 Injection 효율을 높이기 위해서 lattice에 race track 구간이 추가되는 것으로 설계가 변경되어 추가로 설치되어야 하는 12개의 사극 전자석과 몇 개의 H/V 전자석들이 있다.



<그림 3.1.6.1> 1개 섹터의 전자석 배치도

이 중 이극 휨 자석은 4개의 종류가 사용된다. Longitudinal-gradient 이극 자석 (LGBM1, LGBM2), transverse gradient 이극 자석, reverse bend 이극 자석, 그리고 각 섹터의 중심에 2 T 급의 center bend가 있다. LGBM는 빔 방향으로 자장 세기가 계단식으로 변하게 되어 있으며, LGBM1은 0.7343 T에서 0.1504 T까지 변화하며, LGBM2는 0.3121 T에서 0.1536 T까지 변화한다. 각 섹터 당 2개씩 설치되지만 LGBM1, LGBM2 각 2개는 자기장의 profile이 중앙 이극 자석(CB)을 중심으로 대칭인 자장 형상을 가지게 되고 서로 호환되지 않은 다른 전자석으로 분류하여야 한다. 따라서 혼란을 방지하기 위해서 LGBM은 LGBM1U, LGBM1D, LGBM2U, LGBM2D 등의 4 type이 있는 것으로 간주한다. LGBM은 전원장치가 개별 연결되는 형식으로 결정되었다. 그 이유는 직렬연결에 비해 비용의 차이가 없고, 개별 전원장치의 용량이 크지 않아서 유지보수가 용이하고 예비품 확보에 이점이 있는 점이 반영되었다.

Quad bend, quad reverse bend, quadrupole 등은 모두 같은 사극 전자석의 형상을 가진다. Quad bend는 일반 quadrupole에서 빔 위치를 offset 시켜 전자빔을 bending 시킨다. Quad bend의 길이는 네 종류이고, aperture는 세 종류이다. DQ51의 경우 RC = 30.0 mm, DQ32의 경우 RC = 20 mm이고, 나머지는 RC = 15.0 mm이다. Quad의 세기는 DQ51의 경우 26.4 T/m, DQ32의 경우 26.1 T/m이고, DQ31은 58.1 T/m, DQ52는 52.0 T/m이다. Quad bend의 경우 quadrupole의 세기가 변화하면 dipole의 세기가 같이 변하게 된다. 따라서 quad의 세기가 변하더라도 dipole의 strength를 유지하기 위한 trim 코일이 따로 필요하다. 어떤 magnet들은 길이도 같고 개구부분(aperture)도 같아서 같은 유형으로 생각할 수 있지만, photon slot 때문에 모두 다른 형태를 띠고 있어서 위치에 따라서 Yoke의 형상이 다를 수 있다.

사극 전자석은 각 섹터별로 12개가 설치된다. 길이로는 145 mm, 200 mm, 250 mm, 384 mm의 네 종류가 있고, 개구 부분의 반경은 모두 15.0 mm이다. 자장구배(경사자기장; gradient magnetic field)의 최대 세기는 Q32의 56.2 T/m이고 이것은 CDR 때보다 약간 낮아진 값이다. Pole tip field로는 0.85 T 정도로 낮은 편이라서 비용이 많이 드는 Vanadium Permendur 같은 소재를 사용하지 않고 low carbon steel core를 사용해서도 충분히 달성할 수 있는 수준이다. Quad bend, quadrupole 모든 solid core를 사용해서 제작하며 모두 개별 powering 될 예정이다. 기존 corrector 숫자를 보완하기 위하여 Q51D, Q51U의 경우 H/V corrector 코일을 설치할 예정이다. 예정 세기는 0.4 mrad kick 정도이지만 corrector field를 excitation 할 경우 다극 성분이 나빠지는 것은 감수하여야 한다. Quad bend와 마찬가지로 photon slot에 따라서 Core의 형상은 차이가 있지만, 같은 type 사극 전자석에서는 코일은 길이가 같으면 모두 예비품으로 호환할 수 있고 전기적 parameter는 동일하다.

육극 전자석은 각 섹터별로 6개가 사용되며, aperture radius는 20.0 mm, 길이는 CDR에서는 250 mm로 모두 동일하였으나, lattice의 최적화가 진행됨에 따라 추가적인 lattice 공간이 필요하므로 길이를 180 mm, 200 mm 두 종류로 최적화하였다. 최대 자속밀도 2차 미분은 Lattice 규정치의 약 120%를 기준으로 하였을 때 약 2,084 T/m^2으로 기존 low carbon steel core로 쉽게 달성할 수 있는 수준이다. 사극 전자석과 마찬가지로 위치에 따른 photon exit slot의 차이가 있으나 core 길이가 같은 육극 전자석끼리는 전기적, 자기적 parameter는 동일하다. 모든 육극 전자석은 PLS-II 육극 전자석과 같이 H-corr/V-corr/Skew Quad 등의 기능을 포함하는 다기능

전자석이다. Trim 기능과 주 육극 전자석의 상호 간섭을 최소화하기 위하여 자기적 (magnetic) 효율을 98% 이상을 유지하는 것이 필요하다. 타 전자석과 마찬가지로 solid core 사용을 가정하고 설계한다. 육극 전자석은 2 cell periodic으로 14개씩의 같은 유형이 묶여서 1개의 전원장치로 운영될 예정이었으나 최대한의 운영상의 flexibility를 확보하기 위하여 모두 개별 powering 하기로 결정되었다. Core가 solid core이기 때문에 corrector는 낮은 주파수로 운영하는 slow corrector로 운영되어야 한다.

Air coil corrector를 제외한 모든 magnet은 저전도 냉각수로 냉각된다. 기본 냉각수 공급온도 25 ℃이고 공급과 회수 (supply/return) 냉각수 사이의 압력 차이는 6.0 bar (약 90 psi)를 가정한다. 냉각수 튜브에 가해지는 압력을 낮추기 위하여 return 쪽의 최대 압력도 9.0 bar 이하로 제한된다. 모든 magnet의 온도상승은 20 K (-253.15 ℃) 이하가 되도록 설계된다.

4GSR main ring 외에도 Injector linac, LTB (linac to booster), booster, BTR (booster to ring), Injection 용 특수 magnet들이 추가로 필요하다. Injector linac의 경우 linac에 포함되어 있는 경우가 많으며, booster magnet들은 기술적으로 어려움이 없고 상업적으로 쉽게 조달할 수 있다. BTS용 magnet의 제작도 기술적 어려움이 없어 보인다.

4GSR 전체적으로는 이극, 사극, 육극, 팔극 등의 주요 전자석이 932개 필요하고, corrector 112+개를 포함하면 전체적으로는 1044+여 개의 전자석이 사용된다. 여기서 +로 표시된 것은 racetrack 구간에 몇 개의 H/V corrector가 추가될 예정이기 때문이다. 전자석별로 주 전원 외에도 trim winding이 필요한 경우가 있다. 모두 개별 전원으로 운영되기 때문에 주전원을 보조하는 trim winding이 필요한 경우는 없고, DQ의 경우 dipole field를 보조하기 위한 trim winding이 필요하며, Q51의 경우 H/V corrector 용으로 보조전원이 사용되며, sextupole의 경우 주전원 외에도 H/V/SQ용 전원이 필요하다. 물론 corrector의 경우 H/V 두 개의 전원이 필요하다. 아래 <표 3.1.6.1>에는 Storage Ring 각 섹터에 사용되는 전체 magnet의 요구조건을 요약하였다.

<표 3.1.6.1> Storage Ring 전체 전자석의 요구조건 요약

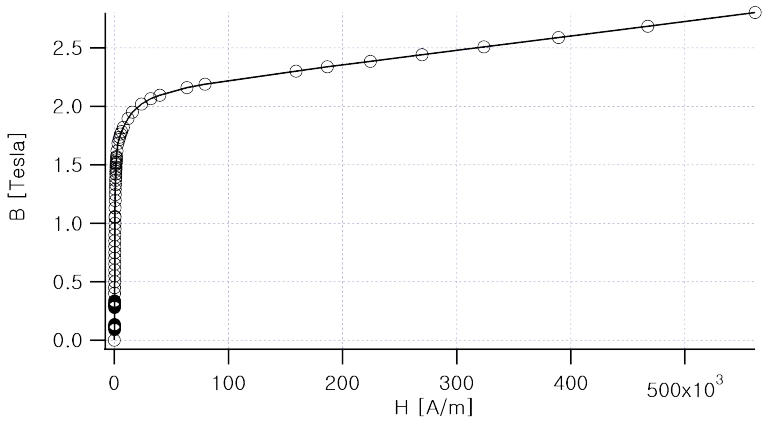
Magnet Name	Hgap or Rc [mm]	GFR [mm]	필요 수량	Strength [B, B'. B"]	Effective Length [m]	Trim	전체 PS	Remark
CB	7.0	±13.0	28	1.9942	0.186	-	28 × A	-
LGBM1U	13.4	±13.0	28	0.7343~	2.0505	V	28 × A, 28 × B	V trim은 2nd integral tuning 용
LGBM2U	12.2	±13.0	28	0.3051~	1.9847	V	28 × A, 28 × B	
LGBM2D	12.2	±13.0	28	0.3051~	1.9847	V	28 × A, 28 × B	
LGBM1D	13.4	±13.0	28	0.7343~	2.0505	V	28 × A, 28 × B	
DQ31U	15.0	7.0	28	58.1	0.200	V	28 × A, 28 × B	V trim은 B' 변화 시 B 유지용
DQ32U	20.0	10.0	28	26.1	0.145	V	28 × A, 28 × B	
DQ51U	30.0	15.0	28	-26.4	0.820	V	28 × A, 28 × B	
DQ52U	15.0	7.0	28	52.0	0.626	V	28 × A, 28 × B	
DQ52D	15.0	7.0	28	52.0	0.626	V	28 × A, 28 × B	
DQ51D	30.0	15.0	28	-26.4	0.820	V	28 × A, 28 × B	
DQ32D	20.0	10.0	28	26.1	0.145	V	28 × A, 28 × B	
DQ31D	15.0	7.0	28	58.1	0.200	V	28 × A, 28 × B	
QH1U	15.0	10.0	2	16.3	0.200	-	2 × A	-
QH2U	15.0	10.0	2	28.0	0.200	-	2 × A	-
QH3U	15.0	10.0	2	44.5	0.200	-	2 × A	-
QH4U	15.0	10.0	2	18.0	0.200	-	2 × A	-
Q11U	15.0	10.0	26	49.4	0.250	-	26 × A	-
Q12U	15.0	10.0	26	-41.7	0.200	-	26 × A	-
Q31U	15.0	10.0	28	-56.2	0.145	-	28 × A	-
Q32U	15.0	10.0	28	-56.2	0.145	-	28 × A	-
Q51U	15.0	10.0	28	53.6	0.384	H/V	28 × A, 56 × B	H/V corr
Q52U	15.0	10.0	28	-57.4	0.200	-	28 × A	-
Q52D	15.0	10.0	28	-57.4	0.200	-	28 × A	-
Q51D	15.0	10.0	28	53.6	0.384	H/V	28 × A, 56 × B	H/V corr
Q32D	15.0	10.0	28	-56.2	0.145	-	28 × A	-
Q31D	15.0	10.0	28	-56.2	0.145	-	28 × A	-
Q12D	15.0	10.0	26	-41.7	0.200	-	26 × A	-
Q11D	15.0	10.0	26	49.4	0.250	-	26 × A	-
QH4D	15.0	10.0	2	18.0	0.200	-	2 × A	-
QH3D	15.0	10.0	2	44.5	0.200	-	2 × A	-
QH2D	15.0	10.0	2	28.0	0.200	-	2 × A	-
QH1D	15.0	10.0	2	16.3	0.200	-	2 × A	-
S31U	16.0	10.0	28	1802	0.180	H/V/SQ	28 × A, 84 × B	-
S32U	16.0	10.0	28	2084	0.200	H/V/SQ	28 × A, 84 × B	-
S33U	16.0	10.0	28	1420	0.180	H/V/SQ	28 × A, 84 × B	-
S33D	16.0	10.0	28	1420	0.180	H/V/SQ	28 × A, 84 × B	-
S32D	16.0	10.0	28	2084	0.200	H/V/SQ	28 × A, 84 × B	-
S31D	16.0	10.0	28	1802	0.180	H/V/SQ	28 × A, 84 × B	-
O31U	15.0	10.0	28	2.4×10^5	0.080	-	28 × B	-
O31D	15.0	10.0	28	2.4×10^5	0.080	-	28 × B	-
C1U	12.5	10.0	28	0.6 mrad	0.121	H/V	2 × 28 × B	0.35 mm
C2U	12.5	10.0	28	0.6 mrad	0.121	H/V	2 × 28 × B	0.35 mm
C2D	12.5	10.0	28	0.6 mrad	0.121	H/V	2 × 28 × B	0.35 mm
C1D	12.5	10.0	28	0.6 mrad	0.121	H/V	2 × 28 × B	0.35 mm

Strength의 단위는 이극 전자석의 경우 T, Quad의 경우 T/m, 육극 전자석의 경우 T/m^2. Octupole의 경우는 T/m^3 임. 이극의 Uniformity 요구조건은 $DB/B < 10^{-3}$, 다극 성분 요구조건도 10^{-3}. DQ Series는 Quad bending과 reverse bending 용이고 field strength의 사용범위는 규정치의 95~105%. Quadrupole의 경우에는 사용범위가 규정치의 75~110% 사이. 육극의 경우 사용범위는 50~120% 사이임. Corrector 외에는 모두 Solid형 core 사용. 전원장치의 경우 A type은 표에 나와 있는 전원장치용이며, B는 trim용으로 10 A, 30 W급, C type 전원장치는 2 A, 30 W급을 나타냄. 전자석 aperture, 길이가 같더라도 photon slot이 다르기 때문에 다른 type으로 표기함. LGBM의 경우 CDR에서는 직렬연결이었으나 모두 독립전원으로 변경됨

나. Center Bend (CB) Magnet

4GSR 전자 저장링(Storage Ring: SR)은 주기적인 cell의 경우 cell 당 45개의 전자석을 필요로 한다. 45개의 전자석들은 길이 방향으로 자장의 형상이 변화하는 이극 전자석인 4개의 LGBM (Longitudinal Gradient Bending Magnet)과 6개의 사극과 이극이 혼합된 reverse quad bend, 2개의 quad bend, 12개의 사극 전자석, 6개의 육극 전자석, 2개의 팔극 전자석, 4개의 보정전자석, 그리고 1개의 고자장 Center Bend가 사용된다. SR 전체로는 총 28개의 전자석이 필요하다. CB의 요구조건은 1.9942 T의 중심자장, 실효 자속길이 0.186 m, $|X| < 13.0$ mm에서 $\Delta B/B < 10.0 \times 10^{-4}$의 Uniformity 등이다. 전력공급 장치는 최대한의 flexibility를 위해서 개별 전원장치로 결정되었고, CB 위치에서의 Beam Stay clear와 진공 챔버 설계를 고려하여 최소 자극 간극은 half gap 기준으로 7.0 mm로 규정되었다. 또 전자석의 길이 방향 양쪽 면은 서로 평행한 parallel face로 설계된다.

자속밀도의 요구조건이 2 T로 매우 높아 소재의 한계인 순철의 포화자속밀도인 2.1 T에 근접하고 있다. 따라서 이 같은 조건을 만족하기 위하여 자극 간극은 beam stay clearance를 만족하는 최소한인 full magnetic gap 7.0 mm 기준으로 결정하였다. 4GSR에 사용되는 자석들은 대부분 자기 물성값의 한계까지 사용된다. 따라서, 분석을 위해서는 BH 테이블이 높은 자속밀도까지 자료가 있어야 한다. 그러나, 자료가 풍부하지 않고 낮은 자속밀도(약 2 Tesla)까지 밖에 없는 경우가 많다. 여기에서는 저탄소강의 경우 높은 자장까지 자료가 있는 poisson code의 BH 테이블을 기준으로 사용하였다. 요구 자속밀도가 높아서 최종 자장은 소재의 오차에 따라서 달라질 수 있으므로 제작에 있어서 BH 특성의 세밀한 관리가 요구된다. 계산에 사용된 소재의 BH 특성을 그림 <그림 3.1.6.2>에 나타내었으며 추후 수치적인 비교를 위하여 <표 3.1.6.2>에 수치로 나열해 놓았다.

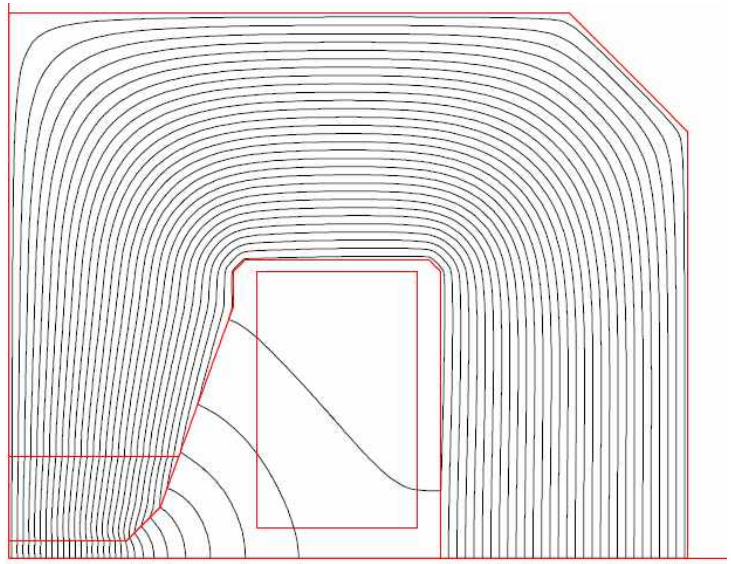


<그림 3.1.6.2> 계산에 사용된 low carbon steel의 BH 곡선

<표 3.1.6.2> 계산에 사용된 BH Table (추후 측정치와 비교를 위해서 수치로 표기)

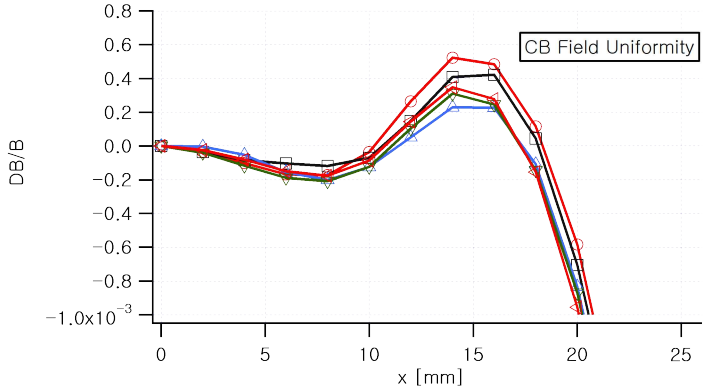
H [A/m]	B [Tesla]	H [A/m]	B [Tesla]	H [A/m]	B [Tesla]
0	0.0000	344.9	0.5500	1909.7	1.5594
125.1	0.0900	364.9	0.6000	1989.4	1.5705
131.7	0.0950	385.8	0.6500	2387.5	1.6180
138.1	0.1000	408.0	0.7000	3183.1	1.6840
144.4	0.1050	431.7	0.7500	3978.9	1.7150
150.6	0.1100	457.2	0.8000	4775.2	1.7360
156.6	0.1150	485.0	0.8500	5570.7	1.7620
162.4	0.1200	515.5	0.9000	6365.5	1.7830
168.1	0.1250	549.2	0.9500	7957.7	1.8200
173.5	0.1300	586.7	1.0000	11939.8	1.8950
178.7	0.1350	628.8	1.0500	15915.5	1.9500
240.8	0.2800	636.6	1.0578	23885.1	2.0200
242.2	0.2850	716.2	1.1319	31846.4	2.0650
243.7	0.2900	795.8	1.1940	39788.7	2.0950
245.3	0.2950	875.4	1.2451	63662.0	2.1600
246.9	0.3000	954.9	1.2912	79577.5	2.1900
248.6	0.3050	1034.5	1.3313	159154.9	2.3000
250.3	0.3100	1114.1	1.3654	186622.8	2.3386
252.1	0.3150	1193.7	1.3935	224264.2	2.3850
254.0	0.3200	1273.2	1.4216	269482.3	2.4408
255.8	0.3250	1352.9	1.4447	323798.1	2.5079
257.8	0.3300	1432.4	1.4618	389021.6	2.5885
259.7	0.3350	1511.9	1.4789	467345.4	2.6854
288.1	0.4000	1591.5	1.5020	561398.0	2.8019
306.8	0.4500	1671.2	1.5131	-	-
325.7	0.5000	1750.6	1.5252	-	-

높은 자속밀도를 달성하기 위하여 자기의 포화를 최소화하여야 하므로 pole을 x 방향으로 tapering하고, 빔 방향인 z 방향으로 chamfering을 통하여 pole root의 자기포화를 최소화하였다. 자극 표면에 사다리꼴 shim을 설치하여 자속밀도의 균일도를 최적화하였다.

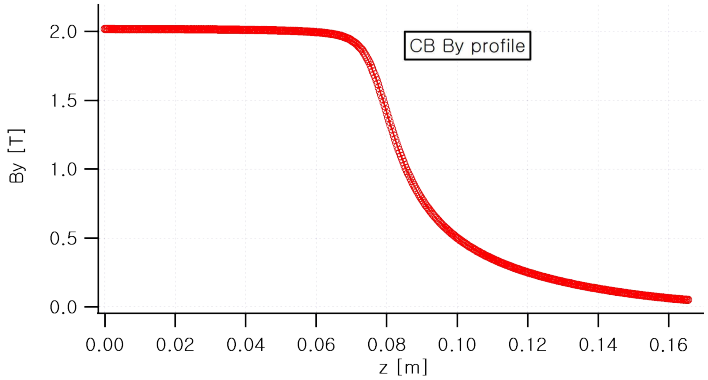


<그림 3.1.6.3> 2차원 최적화된 pole과 yoke 형상 및 flux 분포

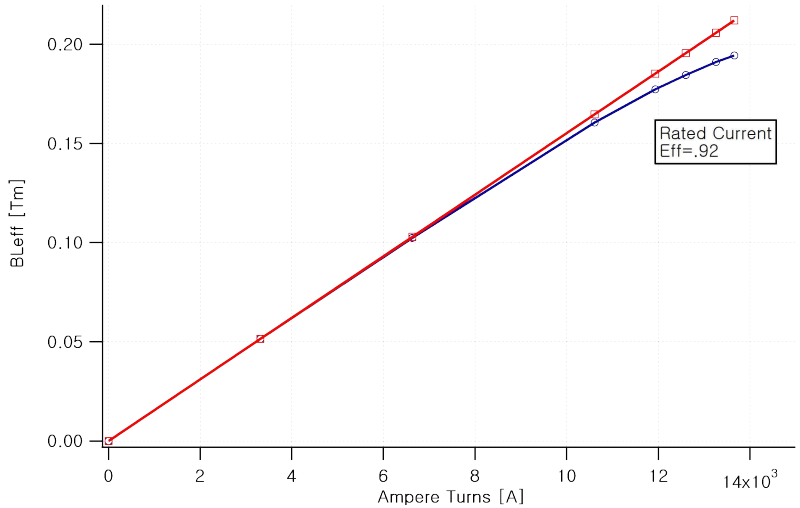
<그림 3.1.6.3>에 2차원에서 최적화된 Core의 geometry와 flux 형상을 나타내었다. 3차원 분석에서는 자기포화를 최소화하기 위하여 빔 수직 방향으로 60°의 모따기(Chamfering)를 적용하였다. 최종적으로는 자장적분치의 Uniformity 요구조건을 만족하여야 하므로 <그림 3.1.6.4>에 여러 가지 shim size에 대하여 자장 적분치의 균일도를 표시하였다. 또 <그림 3.1.6.5>에는 CB Magnet의 길이 방향의 By 분포를 나타내었으며 2.0 T 최대자속밀도, 실효 자장 길이 186 mm를 만족한다.



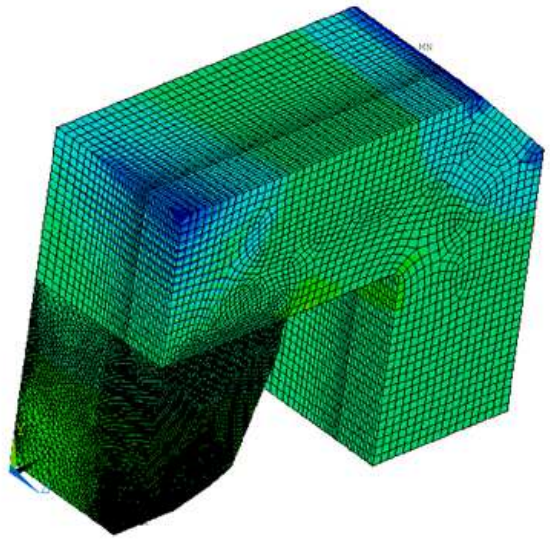
<그림 3.1.6.4> 여러 Shim size에 의한 Field 적분치의 Uniformity



<그림 3.1.6.5> CB Magnet의 길이 방향의 By 분포



<그림 3.1.6.6> 전류변화에 따른 CB 길이 방향 적분치의 excitation 곡선, Rated current에서 ideal 한 경우와 비교한 자기 효율은 약 92%이다.



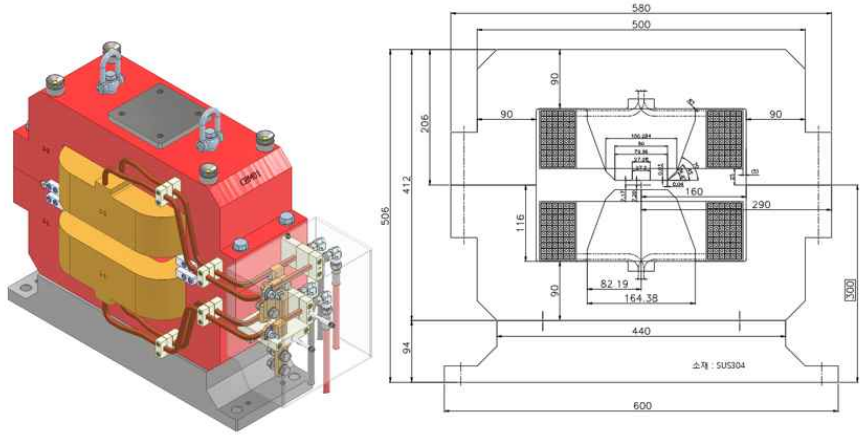
<그림 3.1.6.7> 그림 3차원 FEM 모델

자기 투자율이 무한대인 이상적인 경우와 실제 소재를 사용하였을 때의 Excitation curve를 <그림 3.1.6.6>에 나타내었다. 사용전류 Rated current에서 예상되는 magnetic efficiency는 약 0.92로 계산되었는데 이것은 낮은 전류 때의 field integral을 사용전류 때까지 extrapolation 하여서 계산한 것이다. <그림 3.1.6.7>에는 3차원 FEM 모델 등을 나타내었다. 대칭성을 사용하여 전체의 1/8만 모델링을 하였다.

위의 결과를 종합하여 CB의 parameter를 <표 3.1.6.3>에 나타내었고, 최종 3D 설계 후의 CB magnet과 중심에서의 2D 단면을 <그림 3.1.6.8>에 표시하였다.

<표 3.1.6.3> Center Bend magnet의 주요 parameters

Parameters	Center Bend Magnet
Magnet shape	H-type / Solid
Bending angle at 4.0 GeV [deg]	1.5928
Pole gap at center [mm]	14.4
Nominal Magnetic field @I=228A [T]	1.9942
Nominal Field integral @I=228A [Tm]	0.3709
Effective magnetic length [mm]	186.0
Ampere Turns [kA]	13.178
Magnetic Efficiency	0867
Nominal Current [A]	227.2
Resistance per magnet [Ω]	0.0313
Voltage drop @I=228A [V]	7.11
Rated Power@I=228A [kW]	1.62
Inductance [mH]	23
Coil size × Cooling hole [mm]	SQ8.0 × Φ4.0
Coil Number of turns/pole	58
Cooling system	Water
LCW pressure drop [kgf/cm^2]	6.0
Total water flow rate [liters/min]	2.59
Cooling circuit number/magnet	2
Temperature rise @I=226A [K]	8.9
Mass (core/coil) [kg]	~450
Application (Position)	4GSR SR



<그림 3.1.6.8> 최종 3D 설계 후의 CB magnet (우), 2D 단면 (좌)

다. Longitudinal Gradient Bending Magnet (LGBM)

4GSR 각 섹터에는 CB 양쪽으로 각 2개씩의 longitudinal gradient bending magnet이 사용된다. CB를 중심으로 longitudinal field profile이 mirror symmetric이기 때문에 같은 profile을 갖더라도 한 개는 자장이 증가하는 순서, 한 개는 자장이 감소하는 순서로 제작되어야 한다. 따라서 각 타입을 모두 별도로 다루는 것이 혼란을 없앨 수 있을 것으로 보인다. LGBM1은 자속밀도가 0.1504 T에서 0.7343 T까지 5단계로 빔 방향으로 변화한다. 각 섹터당 1개는 빔 방향으로 자속밀도가 증가하는 방향이고 하나는 자속밀도가 감소하는 방향이다 (0.7343 T → 0.1504 T). LGBM2도 같은 방식으로 자속밀도가 0.3121 T에서 0.1535 T까지 5단계로 감소하고 CB를 기준으로 나머지 한 개는 대칭된다. LGBM도 CB와 같이 photon beam 추출, 진공 설계의 용이, 자장 측정의 용이 등의 이유로 C-type으로 설계되었다. LGBM2의 경우 중심 Full gap이 24 mm 이상 Good field radius는 ± 13 mm에서 $\Delta B/B < 10.0 \times 10^{-4}$의 요구조건을 만족하여야 한다.

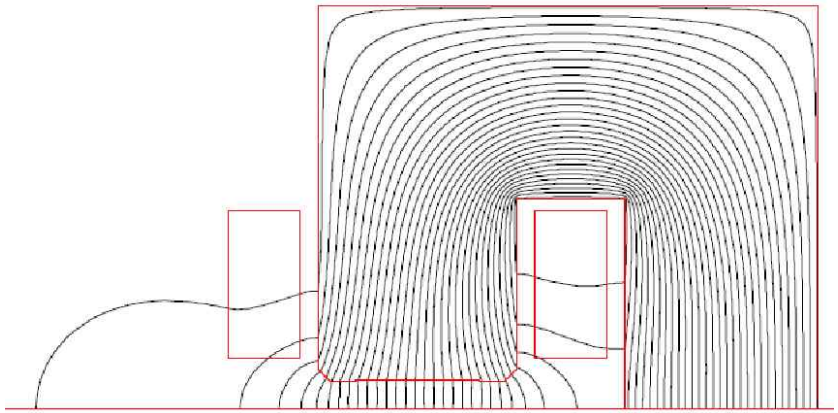
(1) Longitudinal Gradient Bending Magnet2 (LGBM2)

Beam Dynamics에서 제시한 field profile을 재현하기 위하여 ESRF-EBS처럼 영구자석을 사용하는 방안, APS-U처럼 전류로 excitation 하는 방안이 검토되었다. ESRF 스타일의 영구자석을 사용하는 방법은 크기가 작고, field profile을 이상적인 형상에 근접하게 만들 수 있으며, 에너지 비용이 적다는 장점이 있으나, 제작비용이 많이 들며, 장기적으로 운영 시 터널 내의 방사선에 의한 Radiation damage에 의한 성능 열화에 대한 우려가 있다. 현실적으로 PLS-II에 SmCo 계열과 NdFeB 계열의 영구자석을 사용하는 In Vacuum Undulator가 10여개 사용되고 있는데 수년 사용 후에는 Radiation damage에 의한 성능 열화가 보고되어 deinstall/tuning/installation 과정을 반복하고 있다. 이 같은 현상은 미국 Argonne National Lab의 APS undulator에서도 보고 되고 있다. 한편 순수전류를 사용한 excitation은 운영에너지 비용이 들고, 코일 권선을 위한 section 사이의 공간에 제약이 있고, 모든 권선을 직렬로 연결할 경우, 각 자석의 가능한 암페어 횟수(ampere turn)가 도체의 turn 수의 정수배가 된다. 따라서 정량화되어 있으므로 BD에서 요구하는 정확한 profile을 재현하기 어려운 문제가 있다. APS-U에서의 검토 결과 정확한 Field profile은 전자빔의 emittance에 크게 영향을 주지 않은 것으로 결론이 났고, 따라서 전자석에서는 입구와 출구 사이의 정확한 bending angle, 그리고 양쪽 각도에서의 접선이 만나는 Apex만 같도록 유지하면 된다. 여기서 Bending angle의 관리는 전자석의 1차 적분, Apex 관리는 전자가 전자석을 통과한 후의 2차 적분(전자빔 변위)의 관리가 된다. 따라서 우리도 최대한 Beam dynamics에서 제시한 profile을 추종하지만, 꼭 일치하지는 않고 1차 적분(휨각), 2차 적분(Apex)은 BD에서 제시한 값을 유지하는 설계를 한다. 이 2가지 목적을 달성하기 위하여 각 section의 field 세기와 section의 길이가 BD에서 제시한 값과 조금씩 차이가 날 수 있다. 한편 최종 magnetic profile에 대해서는 Beam Dynamics group에서 검토가 있었으며 전자빔의 performance에 영향이 없다고 확인되었다. 또 에너지 비용과 관련하여서도 1년 운영 비용이 약 52M 원 (1 kWh = 100원) 정도로 추산되어 우려만큼 크지 않을 것으로 판단된다. 최종적으로 LGBM의 excitation은 APS-U를 benchmark 하여 각 section 별 코일로 여자되는 staggered coil을 사용하고, 각 magnet이 1개의 독립적인 MPS로 개별 여자되는 것으로 하였다. 이에 따라 1차 적분(휨각)은 main coil로 조정되며 2차 적분(Apex point)을 조절하기 위하여 trim coil이 설치된다. LGBM은 CB 기준으로 mirror symmetric 하게 설치되기 때문에 각 section magnet 양단에 trim coil을

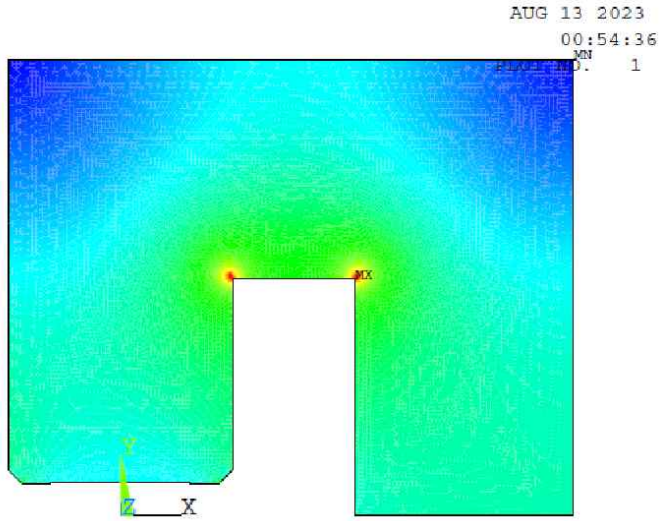
설치한다.

<그림 3.1.6.9>와 <그림 3.1.6.10>에는 최적화한 요크, 폴 상황에서 2차원에서의 자속밀도의 분포와, |B| 분포를 보여준다. <그림 3.1.6.11>에는 중심 평면에서의 자장 균일도를 계산한 것을 나타내었다. 같은 단면을 낮은 자속밀도 section, 높은 자속밀도 section에서 같이 사용하기 때문에 낮은 자속밀도, 높은 자속밀도, 중간 자속밀도 세 가지 경우에 대해서 균일도를 계산하였다. 나머지 경우는 세 가지 경우 사이에 있을 것으로 판단하며 세 가지 경우에 균질도 요구조건을 만족하면 충분하다고 판단한다. 요구조건은 |x| < 13 mm, |dB/B| < 0.1%가 요구조건이고 모든 경우에 요구조건을 만족함을 알 수 있다. 도체는 LGBM1의 경우 7.5 × 7.5 mm의 4.0 mm 냉각 공을 사용한 도체를 사용하였으며 압력강하 6 bar (90 psi)일 때의 온도상승은 8.3 ℃로 예상되었다. LGBM2의 경우 8.0 × 8.0 mm 도체에 5.0 mm 냉각공인 도체를 사용하고 냉각수 온도상승은 6.5 K로 추산되었다. <표 3.1.6.4>에 LGBM1과 LGBM2의 주요 parameter를 정리하였다. LGBM2의 경우 도체가 single layer이고 LGBM1의 경우 double layer를 사용하여 turn 수를 늘렸다. 이것은 전자석이 독립적으로 powering 되고 전류를 400 A 아래로 유지하여 기존의 modular power supply 구조를 사용하기 위함이다.

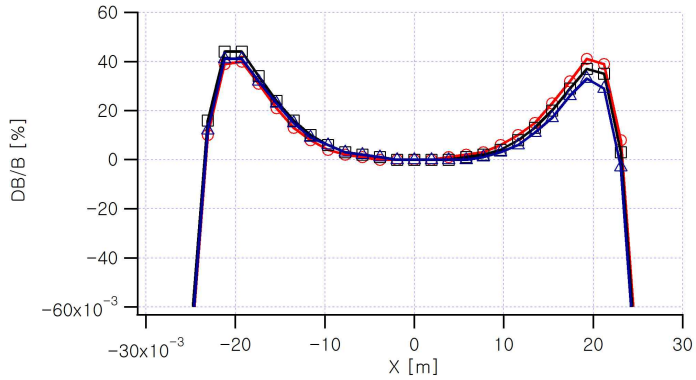
BD에서 주어진 자장 profile을 분석하면 orbit과 magnet 양단을 직선으로 연결한 선과의 거리 sagitta가 8~10 mm 정도 되는데 각 segment 전자석은 parallel face를 가지고 서로 각도를 가지도록 설계된다. 그래서 각 segment 전자석은 rectangular 한 모양이지만 전체 전자석은 curved 형태를 띠게 되고 sagitta를 good field region에 포함시킬 필요는 없는 것으로 합의되었다.



<그림 3.1.6.9> LGBM2의 2D flux 분포 형상



<그림 3.1.6.10> 중심 평면에서의 |B| 분포

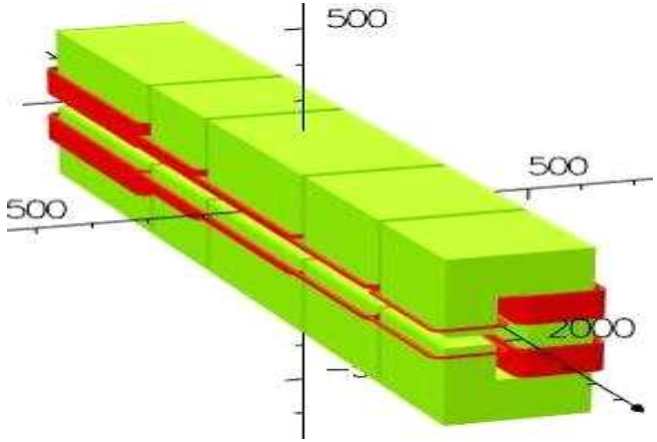


<그림 3.1.6.11> LGBM2의 field uniformity

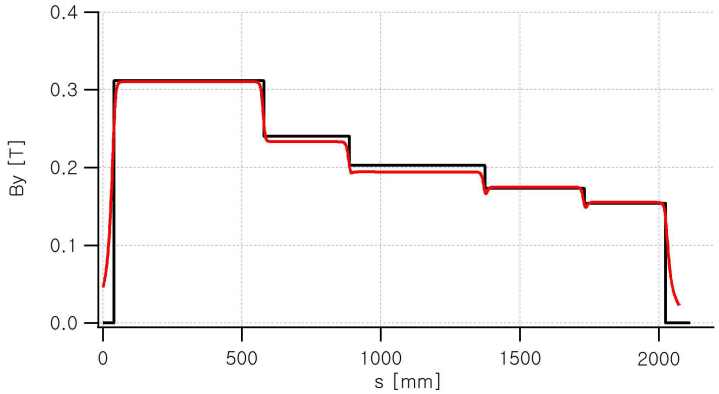
<표 3.1.6.4> LGBM1, LGBM2 전자석의 주요 parameters

Parameters	LGBM1	LGBM2	Remark
Magnet Type	LGBM1U/LGBM1D	LGBM2U/LGBM2D	-
필요 수량	28/28	28/28	-
B의 범위	0.7343 T~0.1504 T	0.3121 T~0.1535 T	-
Uniformity	< 1.0E-3	< 1.0E-3	< ±13.0 mm
최소자극간극	26.0 mm	24.4 mm	-
Magnetic Length	2.0505 m	1.9847 m	-
Trim winding	Yes	Yes	2차 적분치 제어
Max Amper Turns	8.45	3.17	kA (per pole)
Conductor	7.5 × 7.5 × 4.0ϕ	8.0 × 8.0 × 5.0ϕ	단위 mm
Num. Turns	8, 2, 4, 8, 18	7, 1, 1, 2, 3	낮은 field → 높은 field
I_{max}	211.2	226.1	A, 개별 powering
J_s	4.932	5.198	A/mm^2
V	12.7	8.83	V (per magnet)
Power	2.70	2.00	kW (per magnet)
Pressure drop	6.0	6.0	bar
냉각회로의 수	4	2	per magnet
Flow rate	3.09	2.42	liter/min
ΔT	8.3	6.5	K (for Δp=6.0 bar)

3차원 분석에서는 각 section 사이에 코일을 위한 공간이 있으며 이에 의한 field dip이 발생할 수 있다. 그 dip의 impact가 거의 없어서 특별히 수정할 조치는 취하지 않았다. 3D 모델이 <그림 3.1.6.12>에 나타나 있고, 그에 따른 빔 방향 field profile이 <그림 3.1.6.13>에 BD에서 제시한 ideal 한 field profile과 함께 나타나 있다. 붉은색이 계산 결과이고 검은색이 ideal 한 field profile이다.

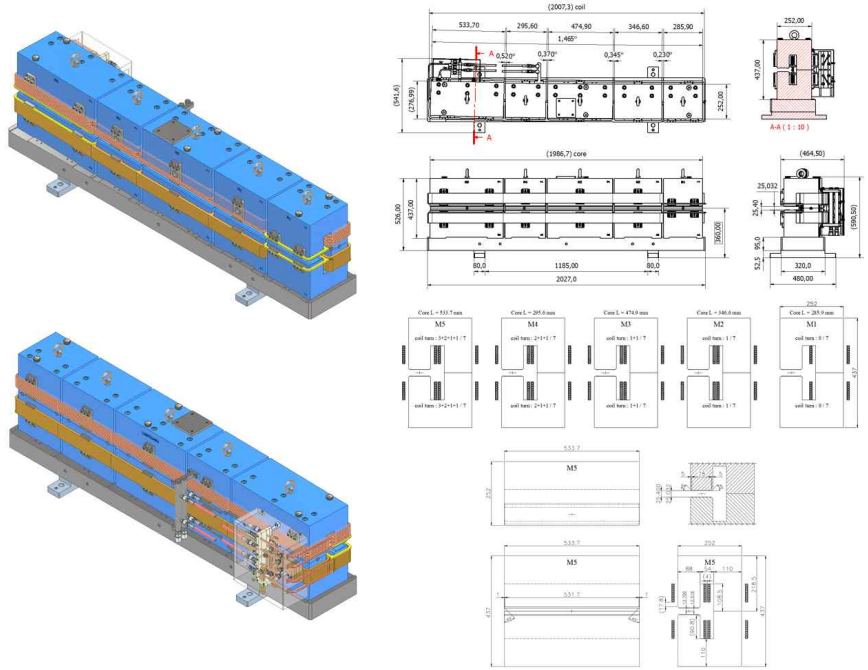


<그림 3.1.6.12> LGBM2의 3D 모델.
부분적인 Back-leg winding을 볼 수 있다.



<그림 3.1.6.13> 3차원 계산에 따른 Field profile

이 같은 결과를 종합하여 작성한 3D 도면과 핵심 2D 단면이 <그림 3.1.6.14>에 나타나 있다.



<그림 3.1.6.14> LGBM2의 3D 도면과 핵심 2D 단면도면

라. Quad bend DQ31, DQ32, DQ51, DQ52

Quad bend는 전자빔을 사극 전자석의 중심이 아닌 offset 시켜서 사용함으로써, 전자빔의 bending과 사극 전자석의 focusing 기능을 동시에 달성한다. 4GSR에서는 emittance의 최적화를 위해서 이극 전자석과는 반대 방향으로 전자빔을 꺾는 reverse bend도 존재한다. 4GSR에서는 각 섹터 당 2개의 normal bend 사극 전자석이 사용되며 6개의 reverse bend 사극 전자석 등 4종류가 사용된다. 이 4종의 DQ에 대한 BD 요구조건이 <표 3.1.6.5>에 요약되어 있다.

<표 3.1.6.5> Quad Bend (NB, RB) 들의 주요 요구조건

Magnet ID	DQ31	DQ32	DQ51	DQ52	Remark
Bend type	RB	RB	NB	RB	NB: Normal RB: Reverse
B [Tesla]	-0.160111	-0.137107	0.565074	-0.166079	-
B′ [T/m]	55.371633	24.866186	-25.181377	49.564843	-
DX [mm]	2.891566	5.513803	22.440146	3.350735	B/B′
Leff [mm]	200.0	145.0	820.0	626.0	-
Rc [mm]	15.0	20.0	30.0	15.0	-

Normal Bend (NB) 이극의 경우에는 요구되는 B = 0.565 T, B′ = 22.44 T/m로 필요한 offset은 x_c = B/B′ = 22.44 mm로 주어진다. 여기에다가 약 ±7.0 mm의 Good Field Radius (GFR)를 고려하면 x = 29.44 mm까지 사용하여야 하고, 이 점을 고려하여 aperture radius는 30.0 mm로 결정하였다. DQ32 Reverse Bend (RB)의 경우에도 진공 챔버와의 간섭 문제 때문에 특별히 aperture radius를 20 mm로 결정하였다. 나머지 RB 사극 전자석의 경우 요구되는 x_c = -2.89 mm (DQ31), -5.51 mm (DQ32), -3.35 mm(DQ52)로 작고 B′이 크기 때문에, aperture radius는 15.0 mm(DQ31, DQ52)를 사용한다. 다극 성분의 요구조건은 r = 10 mm에서 주성분의 10^{-3} 이하로 제한된다. 모든 Quad bend는 최대한의 flexibility를 위해서 독립적인 전원장치에 연결되어 사용된다. 장기적인 운영 에너지 소요량을 최소화하기 위하여 전류 밀도를 3.37~3.54 A/mm^{2}으로 낮게 설계하였으며, Δp = 6.0 bar 기준 냉각수 온도상승은 최대 12.0 K (DQ51)을 넘지 않도록 설계하였다.

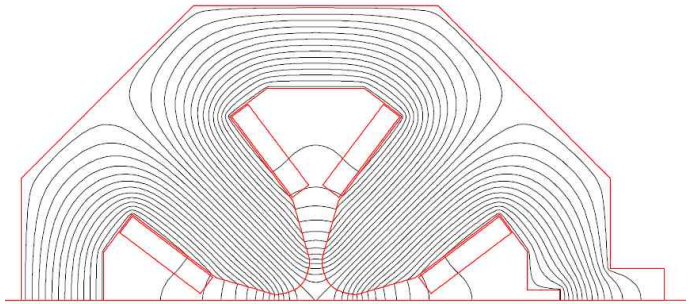
Quad bend의 경우 APS-U의 경우와 같이 기존 사극 전자석과 같은 layout을 사용한다. Quad bend의 경우 차이점은 x축을 offset 시켜 bending과 focusing을 같이 사용한다는 것이고, quadrupole의 strength가 변경될 때 dipole strength가 같이 변화하기 때문에 dipole strength를 유지하기 위하여 vertical 자장 생성을 위한 trim coil이 존재한다는 정도의 차이이다. 필요한 dipole strength를 정하기 위해서 quadrupole strength의 사용 범위를 제한하게 되는데, 여기에서는 규정치의 95~105% 범위를 사용한다고 가정한다. 이 범위에서 quad 세기를 변화시킬 때 dipole의 세기를 유지할 정도로만 trim coil은 설계된다. 또 다른 quadrupole이나 sextupole과 마찬가지로 photon 추출을 위한 slot이 존재한다. 같은 DQ31이라도 ID section 뒤에 배치되는 것과 CB 뒤에 배치되는 것은 photon slot의 위치, 크기가 다르다. 4GSR quad bend의 경우는 quad와 마찬가지로 필요 field strength를 기존의 low carbon steel만을 사용하여 달성할 수 있다. 이렇게 함으로써 제작의 단순화 및 예산 절감을 달성할 수 있다. DQ31, DQ32의 경우 bending에 의한 sagitta가 각각 60 μm, 27 μm로 작아서 magnet 형상을 직선 core를 사용한다. DQ51, DQ52의 경우 sagitta가 각각 3.562 mm, 0.610 mm로 커서 pole의 형상이 orbit를 추종하는 curved 형상을 가지는 것으로 결정되었다.

<표 3.1.6.6>에 normal bend DQ51과 reverse bend (DQ31, DQ32, DQ52)의 주요 parameter들을 나타냈다.

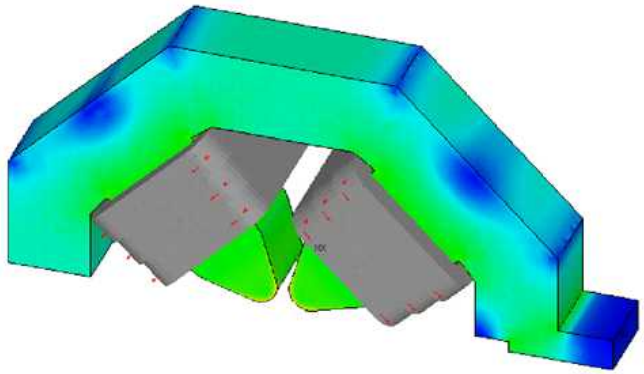
<표 3.1.6.6> DQ31, DQ32, DQ51, DQ52 Magnet 주요 parameters

Magnet Type	DQ31	DQ32	DQ51	DQ52
Magnet shape	Solid, RB	Solid, RB	Solid, NB	Solid, RB
필요수량	56	56	56	56
Feature	Parallel Face Straight	Parallel Face Straight	Parallel Face Curved Pole Straight Yoke	Parallel Face Curved Pole Straight Yoke
Aperture Radius [mm]	15.0	20.0	30.0	15.0
Good Field Radius @ offset [mm]	5.0	5.0	7.0	5.0
Multipoles	< 1.0E-3	< 1.0E-3	< 1.0E-3	< 1.0E-3
Beam Offset [mm]	2.89	5.51	22.44	3.35
Max. field gradient [T/m] 105% nominal	58.14	26.11	26.44	52.04
Nominal B [T]	-0.160111	-0.137107	0.565074	-0.166079
Effective magnetic length [mm]	200.0	145.0	820.0	626.0
Sagitta [mm]	0.060	0.027	3.562	0.610
Core length [mm]	189.3	138.0	809.5	620.8
Number of turns per pole	46	36	42	44
Main Coil size [mm]	SQ6.5 × Φ3.5	SQ6.5 × Φ3.5	SQ9.0 × Φ5.0	SQ6.5 × Φ4.0
Ampere-turn/pole [A]	5479	4312	9761	4957
Current [A]	119.1	119.8	232.4	112.6
Current density [A/mm^2]	3.75	3.77	3.84	3.91
Voltage/magnet [V]	8.1	5.26	22.5	19.0
Resistance [mΩ]	68.0	43.9	97.0	168.8
Power [kW]	0.97	0.63	5.23	2.141
Inductance [mH]	18.0			
Cooling system	Water	Water	Water	Water
Cooling circuit/magnet	2	2	4	4
LCW pressure drop [kgf/cm^2]	6.0	6.0	6.0	6.0
Total water flow rate [liter/min]	1.67	2.06	7.16	4.40
Temperature rise [K]	8.3	4.4	10.5	7.0
Trim Coil size [mm]	2.0 × 1.0	2.0 × 1.0	-	-
Trim Number of turns per pole	32	32	-	-
Trim Current [A]	3.42	3.02	-	-
Trim Voltage [V]	2.574	1.873	-	-
Trim Resistance [Ω]	0.752	0.620	-	-
Trim Power	8.8	5.65	-	-

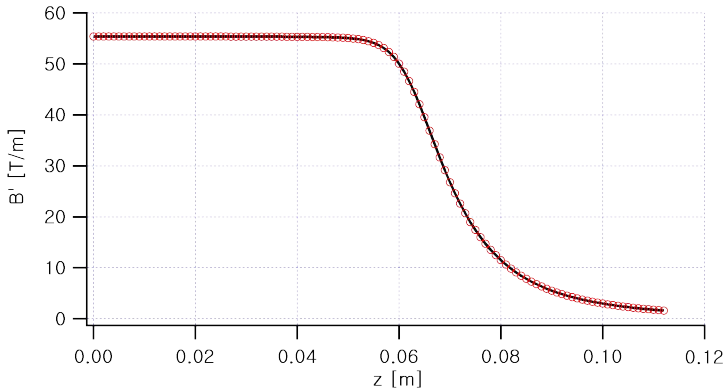
<그림 3.1.6.15>에는 최적화된 pole과 yoke 형상의 2D 경우에 DQ32에 대해서 flux 분포를 나타내었다. <그림 3.1.6.16>에는 DQ32의 3D FEM 분석 결과를 나타내었다. End chamfering은 edge 효과에 의한 다극 성분 error를 최소화하기 위하여 결정되었고 최종적인 2D 단면과 3D edge chamfering을 반영한 구조를 바탕으로 3D 최적화 설계를 수행하였다. <그림 3.1.6.17>에는 DQ32의 3D 분석 결과와 빔 방향으로의 B'의 profile을 계산한 결과를 나타내었다. 이와 같은 자료를 바탕으로 3D 기계설계를 수행하였으며 그에 따른 2D 제작 도면들이 도출되어 그 부분적인 자료가 <그림 3.1.6.18>에 나타나 있다.



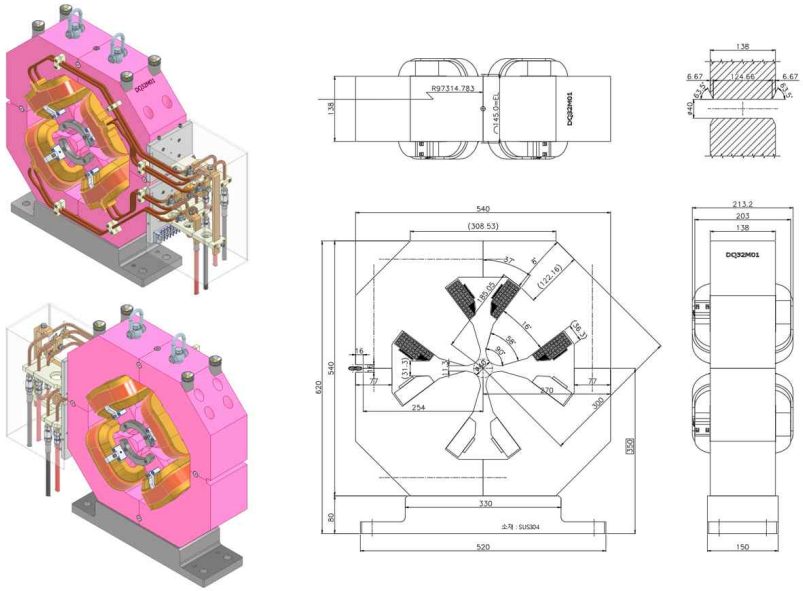
<그림 3.1.6.15> 최적화된 2D DQ32의 flux 분포



<그림 3.1.6.16> DQ32의 3D FEM 분석 결과



<그림 3.1.6.17> DQ32의 longitudinal B' profile (3D 계산 결과)

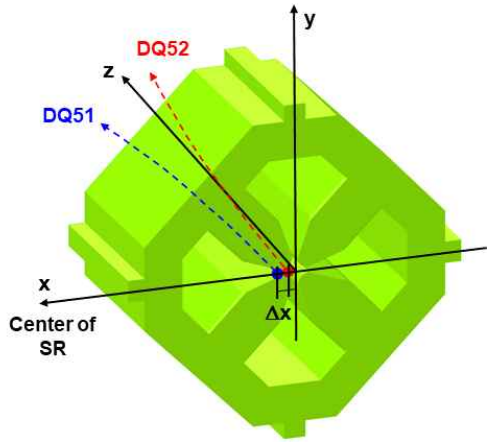


<그림 3.1.6.18> DQ32의 3D CAD 도면 및 핵심 2D 도면

DQ51과 DQ52 전자석은 각각 cell 당 2개씩, 각각 총 56개씩 저장링에서 사용된다. Quad bend 전자석의 자기장 세기를 다르게 사용될 수 있으므로, 각 전자석마다 독립적인 전원장치를 사용한다.

Quad bend 전자석은 사극 전자석과 이극 전자석 역할을 동시에 하는 전자석이다. 저장링 공간을 효율적으로 사용하고, 에너지 절약 효과도 있다. 일반적인 사극 전자석 경우는 전자빔이 전자석 중심을 통과해서 이극 자기장 영향을 받지 않는다. 반면에 Quad bend 전자석의 경우에는 전자빔을 전자석 중심이 아닌 횡 방향으로 Offset (Δx) 된 지점을 통과시켜서 사극 자기장과 더불어 이극 자기장 영향을 받도록 설계한다. Quad bend 전자석 pole은 전자빔 궤도와 같이 휘어진 모양을 한다. DQ51과 DQ52의 사극 자기장의 부호는 반대이고, 이극 자기장의 부호도 반대이다.

<그림 3.1.6.19>는 DQ51, DQ52 전자빔의 궤도를 나타내었다. 전자빔이 휘는 방향과 Curved pole 방향이 같으며 파란색으로 표시된 DQ51 전자빔 궤도와 붉은색으로 표시된 DQ52의 전자빔 궤도는 서로 반대 방향이다.



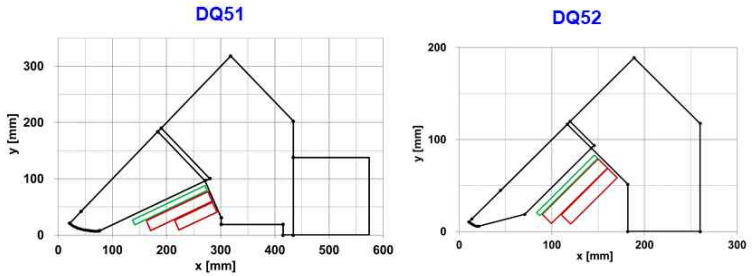
<그림 3.1.6.19> Quad bend 전자석 (DQ51, DQ52) 궤도

<표 3.1.6.7> Quad bend 전자석 (DQ51, DQ52) 요구조건

Parameters	DQ51	DQ52
Aperture radius [mm]	30.0	15.0
Good field radius (x = Δx) [mm]	15.0	7.0
Field gradient B′ (@Δx) [T/m]	-25.1814	49.5651
Dipole field (@Δx) [T]	0.5651	-0.1661
Magnetic effective length [m]	0.820	0.626
Bending angle [deg]	1.9898	0.4464
Offset Δx [mm]	22.440	3.351
Sagitta of poles [mm]	3.560	0.610
Multipole components (based on quadrupole component)	< 1.0×10^{-3}	
B′ change range [%]	95~105	
Core shape	Curved pole, straight return yoke, parallel planes	

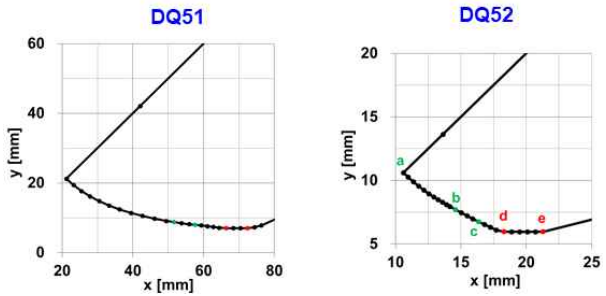
DQ51과 DQ52에 대한 빔물리 요구조건은 <표 3.1.6.7>에 나타냈다. DQ51과 DQ52의 Aperture radius부터 다르므로 대부분 parameter가 서로 다르다. 사극 자기장을 기준으로 상대적인 다극 성분 조건은 1.0×10^{-3} 이하로 같고, 저장링에서 사용되므로 사극 자기장 세기를 일정하게 유지하면서 사극 자기장 변화 범위는 95~105%로 동일한 조건이다.

전산모사(FEM) 코드는 OPERA 2D/3D/TOSCA를 사용했고, 코어 물질은 일반적으로 구하기 쉬운 Iron (DT4)의 BH table을 이용했다. 먼저 OPERA 2D에서 빔물리 요구조건을 만족하도록 코어의 단면을 정하고, OPERA 3D에서 pole chamfer를 정했다.



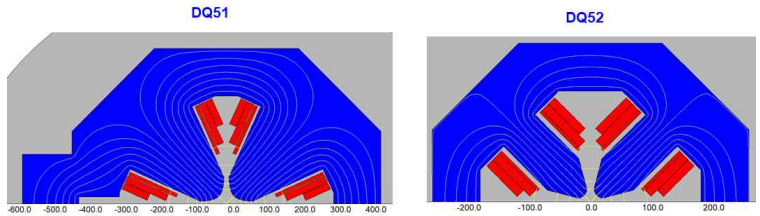
<그림 3.1.6.20> DQ51과 DQ52 코어와 코일 1/8 단면

<그림 3.1.6.20>에서 DQ51과 DQ52의 2D 모델 단면을 나타내고 있다. 붉은색 선은 Main 코일이며 검은색 선은 코어를 나타내는데 pole 부분과 Return yoke 부분으로 나누어져 있다. 2D 계산에서는 무관하지만, 3D 모델은 빔 진행 방향으로 빔 궤도와 함께 pole 선을 이루지만, Return yoke는 곡선 없이 직선 모양으로 설계해서 제작과 관리가 용이하게 했다. DQ51 경우 Photon slot이 있어서 Field leakage를 줄이기 위해 Return yoke가 확장되어 있다. Leakage field가 적을수록 불필요한 다극 성분이 줄어든다.



<그림 3.1.6.21> DQ51과 DQ52의 Pole tip 1/2 모양

전자빔 위치가 전자석의 중심이 아닌 횡 방향으로 Offset Δx 지점이라서, Pole tip 모양은 쌍곡선을 기본으로 하지만, 자기장 다극 성분을 줄이기 위해, pole 형상을 이루는 곡선의 각도를 미세하게 변화시켰다. <그림 3.1.6.21>의 오른쪽 그림에서 ab 구간은 쌍곡선이고, bc 구간과 cd 구간은 각도와 segment 길이를 변화시켜서 다극 성분을 줄이도록 했다. de 구간은 x 축과 평행인 직선으로 전자석 제작 확인과 설치에 도움이 되도록 했다. (Pole tip은 쌍곡선에 가깝지만, 자기장 다극 성분을 줄이기 위해 Pole tip을 구성하는 작은 선분의 각도와 길이에 미세한 변화가 있다.)



<그림 3.1.6.22> DQ51과 DQ52에서 OPERA 2D 모델에서 계산된 Magnetic flux lines

OPERA 2D 코드에서 Pole tip 모양과 코어 크기 변화에 따른 자기장 변화를 분석해서 빔물리 요구조건을 만족시키는 전자석 단면을 결정한다. <그림 3.1.6.22>는 DQ51과 DQ52 모델로 OPERA 2D에서 계산된 Magnetic flux line을 나타내고 있다. 전자빔이 지나가는 위치는 DQ51 경우 Offset Δx = 22.44 mm, DQ52 경우는 3.35 mm이다. 자기장 다극 성분은 Δx를 원점으로 Good field radius r0 (DQ51은 15.0 mm, DQ52는 7.0 mm) 상에서 자기장 Radial component를 계산하고 이 자기장 분포를 Fourier transform 시켜서 다극 성분(Bn)을 계산한다. 자기장 Radial component는 다음 (수식 3.1.6.1)과 같은 값을 갖는다.

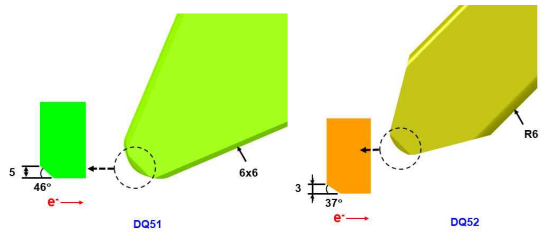
$$Radial\ Component: Br(r0,\theta) = \Sigma(Bn \times \sin(n\theta)) \quad \text{(수식 3.1.6.1)}$$

(수식 3.1.6.1)로 OPERA 2D에서 다극 성분을 계산한 결과를 <표 3.1.6.8>에 나타냈다.

<표 3.1.6.8> QPERA 2D에서 계산한 DQ51과 DQ52의 다극 성분

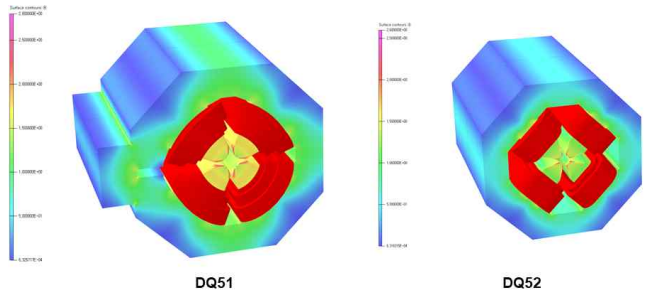
2D (Bn/B4)	DQ51	DQ52
B6/B4	2.51×10^{-5}	1.88×10^{-5}
B8/B4	-1.09×10^{-5}	1.35×10^{-5}
B10/B4	-9.91×10^{-5}	1.37×10^{-5}
B12/B4	-6.69×10^{-5}	-8.47×10^{-5}
B14/B4	-4.57×10^{-5}	-1.33×10^{-5}
B16/B4	-4.89×10^{-5}	-9.83×10^{-5}
B18/B4	-5.41×10^{-5}	-9.59×10^{-5}
B20/B4	-1.70×10^{-5}	-2.67×10^{-5}

2D에서 정한 코어 단면을 바탕으로, pole은 전자빔 궤도에 따라 휘어지고, Return yoke는 휨 없이 직선으로 만들었다. OPERA 3D에서 전자빔 궤도에 따라 계산한 자기장 다극 성분을 줄이기 위해, pole 기둥과 pole 끝에 Chamfer 크기와 각도를 변화시키며 자기장을 분석해서 Chamfer를 결정했다. DQ51과 DQ52 pole의 Chamfer 모양을 <그림 3.1.6.23>에 나타냈다.



<그림 3.1.6.23> DQ51과 DQ52의 Pole chamfer 모양

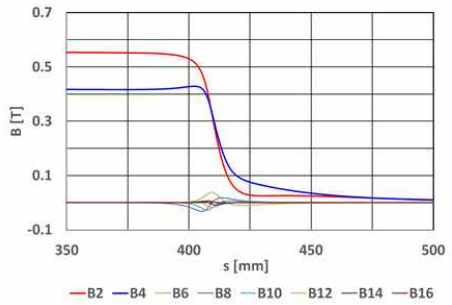
<그림 3.1.6.24>는 Pole chamfer를 한 상태로 DQ51과 DQ52 전자석 표면에서 자기장 분포이다. <표 3.1.6.9>는 사극 자기장을 기준으로 상대적인 자기장 다극 성분을 수치로 나타냈다. <그림 3.1.6.25>에서는 전자빔 위치(s 축)에 따른 다극 성분 분포를 나타낸다. 사극 자기장과 사극 자기장 이외에 다극 성분은 전자석 경계면 부분에서만 나타나고 있다.



<그림 3.1.6.24> OPERA 3D/TOSCA에서 계산한 DQ51과 DQ52 자기장 분포

<표 3.1.6.9> QPERA 3D에서 전자빔 궤도에 따라 계산한 DQ51과 DQ52의 다극 성분

3D (Bn/B4)	DQ51	DQ52
B6/B4	-6.94×10^{-5}	-5.13×10^{-5}
B8/B4	-1.04×10^{-3}	1.19×10^{-4}
B10/B4	-1.03×10^{-3}	1.28×10^{-4}
B12/B4	-4.94×10^{-4}	-2.46×10^{-5}
B14/B4	-2.45×10^{-5}	-1.34×10^{-4}
B16/B4	8.16×10^{-5}	-1.28×10^{-4}
B18/B4	2.37×10^{-5}	-8.16×10^{-5}
B20/B4	5.12×10^{-5}	-3.99×10^{-5}

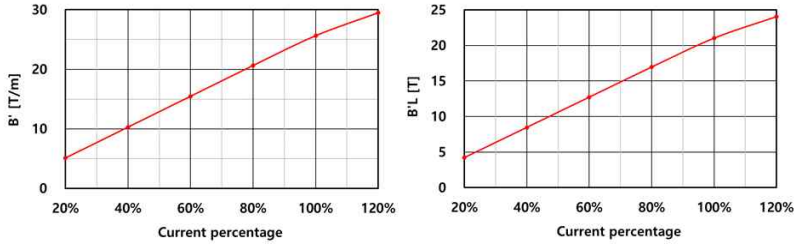


<그림 3.1.6.25> DQ51 경우에 전자빔 진행방향에 따른 다극 성분 분포

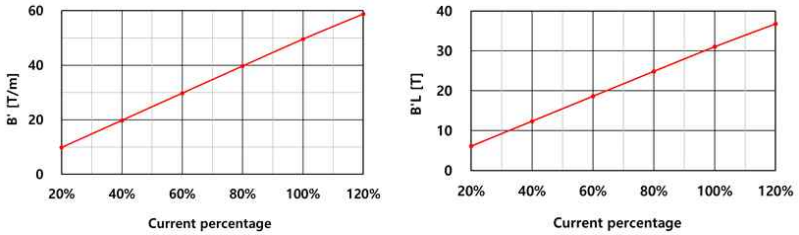
설계 결과를 나타내는 주요 parameter를 <표 3.1.6.10>에 나타냈다. 전류변화에 따른 자기장 변화를 <그림 3.1.6.26>과 <그림 3.1.6.27>에서 나타냈다. 전류 100%를 넘어서는 미세하게 자기장 포화 현상을 볼 수 있다. 자기장 수치와 예상되는 코일의 온도상승을 <표 3.1.6.11>과 <표 3.1.6.12>에 나타냈다.

<표 3.1.6.10> DQ51과 DQ52 전자석의 주요 parameters

Parameters	DQ51	DQ52
Aperture radius [mm]	30.0	15.0
Core length [mm]	803.0	615.5
Current [A]	225.00	102.39
Current density [A/mm^2]	3.72	3.22
Magnetic efficiency	0.95	0.98
Resistance [Ω]	0.13	0.17
Voltage [V]	28.70	17.31
Power [W]	6457	1772
Temperature rise [K]	15	9
Coil size [mm^2]	9.0 × 9.0(φ5.0)	6.5 × 6.5(φ3.5)
Coil turns per pole	42	44
Mass [kg]	4937	1058
Trim coil size [mm^2]	2.2 × 4.0	2.2 × 4.0



<그림 3.1.6.26> DQ51 전자석, 전류변화에 따른 사극 자기장 (좌),
사극 자기장 적분값 변화 (우)



<그림 3.1.6.27> DQ52 전자석, 전류변화에 따른 사극 자기장 (좌),
사극 자기장 적분값 변화 (우)

<표 3.1.6.11> DQ51 전자석, 전류변화에 따른 자기장과 코일 온도 변화

Current percentage	Current [A]	B′ [T/m]	∫B′ds [T]	Temperature rise [K]
20%	45.00	4.123	3.381	0.6
40%	90.00	8.296	6.802	2.4
60%	135.00	12.465	10.222	5.4
80%	180.00	16.625	13.632	9.6
100%	225.00	20.649	16.932	15.0
120%	270.00	23.748	19.473	21.6

<표 3.1.6.12> DQ52 전자석, 전류변화에 따른 자기장과 코일 온도 변화

Current percentage	Current [A]	B′ [T/m]	∫B′ds [T]	Temperature rise [K]
20%	20.48	9.80	6.14	0.4
40%	40.96	19.77	12.39	1.4
60%	61.43	29.75	18.64	3.2
80%	81.91	39.70	24.87	5.7
100%	102.39	49.58	31.04	8.9
120%	122.87	58.80	36.77	12.7

Quad bend 전자석은 사극 자기장을 일정하게 유지하면서 사극 자기장을 95~105% 범위에서 변화시킬 가능성이 있다. Main current를 변화시키면 사극 자기장과 이극 자기장이 동시에 변하므로 이극 자기장을 일정하게 유지하기 위해 Trim coil을 사용한다. Trim coil에 전류를 인가하면 이극 자기장뿐만 아니라 사극 자기장도 영향을 미치므로, Main current와 Trim current가 사극 자기장과 이극 자기장에 미치는 상수를 계산하면, 원하는 자기장에 필요한 예상되는 전류를 계산할 수 있다. 예상되는 Main current와 Trim current를 <표 3.1.6.13>과 <표 3.1.6.14>에 나타냈다.

<표 3.1.6.13> DQ51 전자석, 이극 자기장을 유지하면서
사극 자기장이 95%와 105%로 변할 때 Main 전류와 Trim 전류

	100% Dipole field	
	95% Quad. field	105% Quad. field
Main current [A]	218.17	240.30
Trim current [A]	8.58	-1.26
Quad field integral [T]	19.616	21.681
Dipole field integral [Tm]	0.463	0.463

<표 3.1.6.14> DQ52 전자석, 이극 자기장을 유지하면서
사극 자기장이 95%와 105%로 변할 때 Main 전류와 Trim 전류

	100% Dipole field	
	95% Quad. field	105% Quad. field
Main current [A]	95.65	107.97
Trim current [A]	1.55	-1.12
Quad field integral [T]	29.476	32.579
Dipole field integral [Tm]	0.104	0.104

마. Quadrupole magnet (사극 전자석)

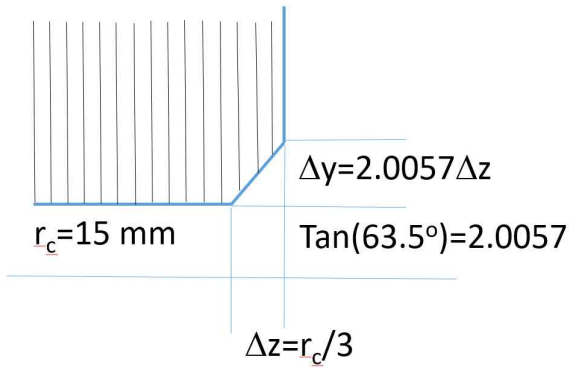
사극 전자석은 전자빔을 집속(focusing)하는데 사용되며, 4GSR의 경우 작은 aperture radius에서 높은 자장구배(B′)를 달성하여야 한다. BD에서 계산된 dynamic aperture와 진공 챔버 설계를 바탕으로 사극 전자석의 aperture radius는 15.0 mm로 결정되었다. 그리고 필요한 자속밀도 구배의 세기는 규정치의 75%에서 110% 사이로 최댓값은 약 60 T/m로 결정되었다. Effective length는 145 mm (Q31/Q32), 200 mm (QH/Q12/Q52), 250 mm (Q11), 384 mm (Q51), 네 종류이지만 quad bend나 reverse bend와 마찬가지로 photon 추출을 위한 photon slot이 달라서 코일의 형상은 같아도 코어의 형상은 모두 photon slot에서 차이가 있을 수 있다. 다극 성분의 요구조건은 r = 10 mm 기준으로 주성분의 10^{-3} 이하로 요구된다. 사극 전자석들은 quad bend의 경우와 마찬가지로 Pole tip field가 0.90 T 정도로 높지 않아서 Core 소재로는 low carbon steel을 사용하는 것으로 결정하였다. 이렇게 함으로써 제작의 단순화 및 예산 절감을 달성할 수 있다. 하나 특이 사항으로는 BD 요구사항으로 Q51에 대해서는 H/V 방향으로 0.4 mrad 정도의 kick이 가능하도록 corrector 코일을 설치하였다.

모든 사극 전자석은 최대한의 flexibility를 위해서 독립적인 전원장치에 연결되어 사용된다. 장기적인 운영 에너지 소요량을 최소화하기 위하여 전류 밀도를 3.79 A/mm^{2}으로 낮게 설계하였으며, Δp = 6.0 bar 기준 냉각수 온도상승은 최대 8.1 K (QH/Q12/Q52)을 넘지 않도록 설계하였다. 같은 Q11이라도 Upstream이나 Down stream 위치에 설치되는 위치에 따라서 photon slot의 위치, 크기가 다르다. <표 3.1.6.15>에 사극 전자석의 parameter를 나열하였다.

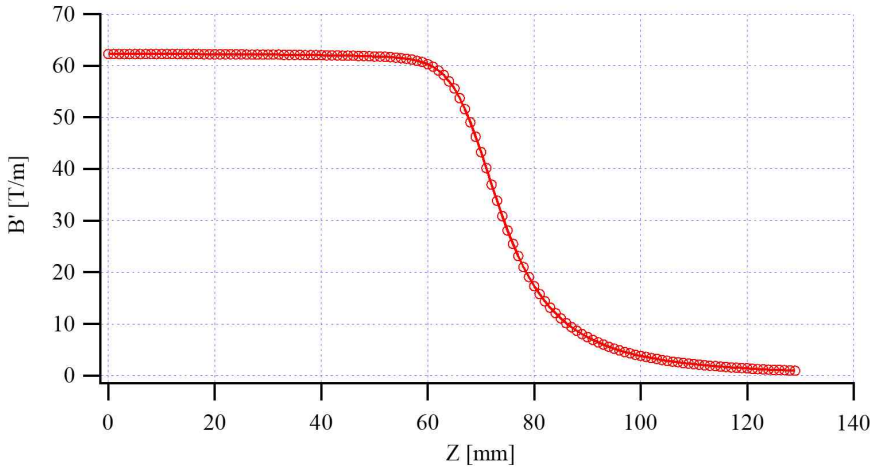
<표 3.1.6.15> Q31, QH, Q12, Q52, Q11, Q52 Magnet 주요 parameters

Parameters	Q31/Q32	QH/Q12/Q52	Q11	Q51
Magnet shape	H-type, Solid	H-type, Solid	H-type, Solid	H-type, Solid
Required Number	112	124	52	56
Aperture Radius [mm]	15.0	15.0	15.0	15.0
Good field radius [mm]	10.0	10.0	10.0	10.0
Max. field gradient [T/m]	56.2	57.4	49.4	53.6
Effective magnetic length [mm]	145.0	200.0	250.0	384.0
Core length [mm]	134.4	189.3	239.3	374.0
Number of turns per pole	44	46	44	44
Main Coil size [mm]	SQ6.5 × Φ3.5	SQ6.5 × Φ3.5	SQ6.5 × Φ3.5	SQ6.5 × Φ3.5
Ampere-turns/pole [kA]	5.30	5.41	4.65	5.05
Current [A]	120.4	117.6	105.8	114.8
Current density [A/mm^2]	3.79	3.70	3.33	3.61
Voltage/magnet [V]	6.46	8.00	7.98	11.83
Resistance [mΩ]	53.7	68.0	75.4	103.1
Power [kW]	0.778	0.941	0.844	1.358
Inductance [mH]	26.0	37.0	40.0	62.0
Cooling system	Water	Water	Water	Water
Cooling circuit number	2	2	2	4
LCW pressure drop [kgf/cm^2]	6	6	6	6
Total water flow rate [liter/min]	1.85	1.67	1.56	3.69
Temperature rise [K]	6.0	8.1	7.8	5.3
Trim strength for H/V corrector [mrad]	-	-	-	0.400
Trim conductor size [mm^2]	-	-	-	2.0 × 1.0
Trim Number of turns per pole	-	-	-	46
Trim Current [A]	-	-	-	3.43
Trim Voltage [V]	-	-	-	5.88
Trim Resistance [Ω]	-	-	-	1.71
Trim Power [W]	-	-	-	20.1

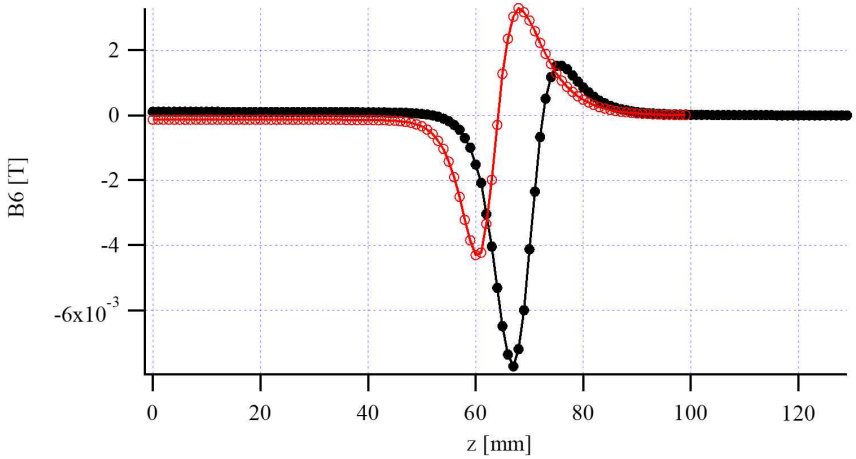
Quadrupole은 기본적으로 Quad bend와 형상이 같으므로 flux 분포는 Quad bend의 flux 분포와 유사하다. 사극 전자석 end 부분을 최적화하기 위해서 여러 end chamfering에 대해서 3D 분석을 수행하고 그에 따른 다극 성분(특히 B6@r = 10 mm)의 길이 방향 분포를 조사하였다. 최종적인 end chamfering의 구조는 <그림 3.1.6.28>에 나타나 있으며, Core의 포화도가 낮으므로 다른 길이의 사극에 대해서도 같은 chamfering을 적용할 수 있다. 최종 3D 분석에 따라 <그림 3.1.6.29>에 길이 방향의 B'의 분포를 Q31에 대해서 나타내었고, End chamfering의 효과를 <그림 3.1.6.30>에 나타내었다. 빨간색 원으로 이루어진 곡선이 최적화된 결과로 적분치가 0에 근접하게 하여 end에 의한 B6 기여를 chamfering으로 보상하며 검은색 원으로 이루어진 곡선은 edge 최적화 전 B6 분포이다. Chamfering 전에는 end 부분의 B6 기여도가 큰 반면 end chamfering 후에는 end의 B6 기여도가 서로 상쇄함을 알 수 있다. 이와 같은 설계자료를 바탕으로 3차원 도면을 작성하였으며 3D CAD 도면과 2D 핵심 도면들이 <그림 3.1.6.31>에 나타나 있다.



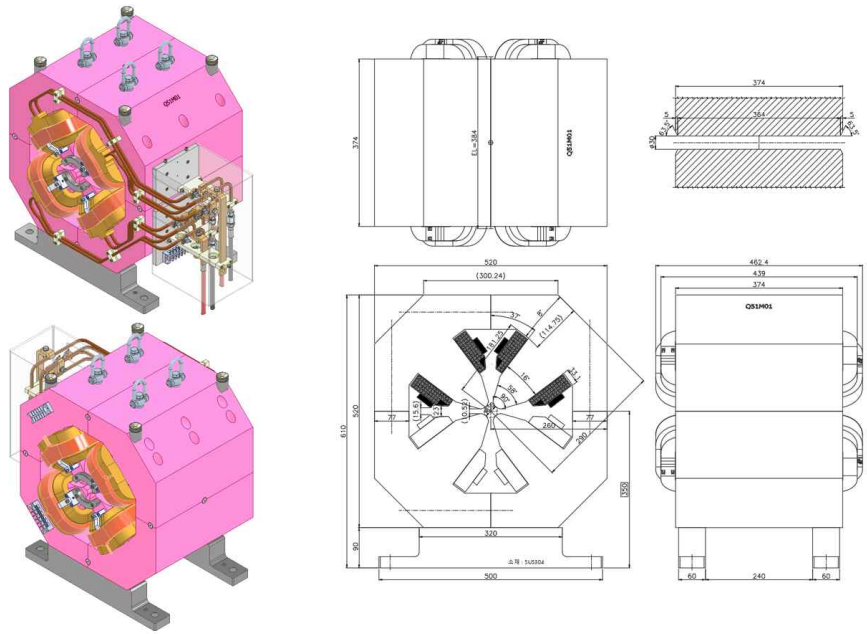
<그림 3.1.6.28> 사극 전자석의 최적 End Chamfering



<그림 3.1.6.29> Q31, Q32에서의 B'의 longitudinal profile (3D 계산 결과)



<그림 3.1.6.30> Q31에서 end chamfering에 의한 B6 최적화



<그림 3.1.6.31> Q51 사극 전자석의 3D 도면과 핵심 2D 단면도면

바. Sextupole magnet (육극 전자석)

육극 전자석의 경우 섹터 당 6개, 총 168개가 사용되며 aperture radius는 예전의 16 mm에서 20 mm로 변경되었다. 변경된 이유는 photon extraction 공간이 필요하며, pole to pole 거리가 ± 6.5 mm 이상이 필요하여 진공 챔버 설계에 반영하여야 하기 때문이다. Lattice에 팔극 전자석이 추가되어서 lattice 공간이 추가로 필요하게 되어 예전에는 모두 250 mm magnetic length이었는데, 새 lattice에서는 최적화를 통해서 길이 180 mm, 200 mm 두 종류의 육극 전자석으로 변경되었다. 다극 성분은 r = 10.0 mm 기준으로 주성분에 비해서 1.0E-3 이하여야 하며 이것은 Aperture가 16 mm에서 20 mm로 변경되는 효과로 좀 더 쉽게 달성할 수 있을 것으로 판단된다. Sextupole의 사용범위는 nominal value의 50%에서 120% 사이로 정해져 있고 규정치의 120% 값

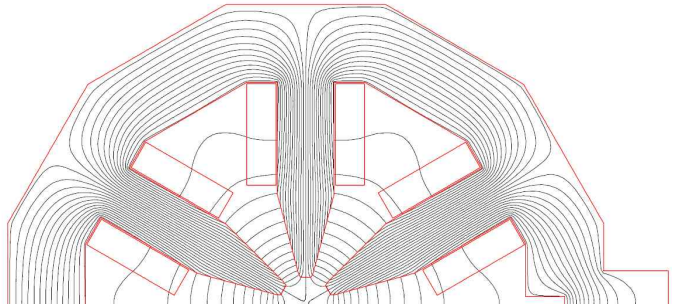
기준으로 설계되어 있다. 자속밀도의 최대 이중미분 값(B")은 2,084 T/m^2이고 이것은 lattice nominal 값의 120%이다.

모든 육극 전자석이 전기적, 자기적 사양은 같더라도 사극 전자석과 마찬가지로 photon 추출 slot 때문에 기계적으로 다른 형상을 가질 수 있다. B" = 2,084 T/m^2은 Pole tip field 기준으로 B_{tip} = 0.5 B" Rc^2 = 0.417 T 수준으로 충분히 low carbon steel을 소재로 하여 달성할 수 있다. 육극 전자석의 경우 다기능으로 H-corrector (H), V-corrector (V), Skew Quadrupole (SQ) 역할을 하게 되어 있다. Magnet core의 자기포화 현상 때문에 H/V/SQ의 세기가 육극 전자석의 여자 (excitation) 세기에 따라서 달라지는 간섭현상이 보고되고 있어 (APS-U report), 그런 간섭현상을 최소화하기 위하여 육극의 magnetic efficiency를 96% 이상 항상 유지하여야 한다. 육극 excitation의 세기가 자기포화 이전이기 때문에 96% 이상의 효율을 유지하는 데 어려움이 없을 것으로 판단된다.

또 하나 잠재적 문제는 진공 챔버의 photon slot 문제 때문에 pole을 충분히 키우는 것이 한계가 있고, 따라서 모든 다극 성분을 10^{-3} 이하로 유지하는 것이 지금으로는 쉽지 않다. BD에서 다극 성분(특히 n = 9)이 Tolerance를 좀 초과하더라도 APS-U와 같이 실제 운전에 문제가 없다고 확인할 필요가 있다. 또 하나의 한계는 육극의 core는 solid steel을 가정하기 때문에 H/V corrector의 반응속도가 빠르지 않을 것으로 예상된다. 따라서, 이런 한계 아래에서 SOFB corrector로써 사용하여야 하고, 시제품 제작 후에 정확한 corrector의 속도 특성을 파악하는 것이 필요하다. CDR 단계에서는 육극 전자석을 2 cell 단위 주기적 배열 (periodic)하고 12개의 전원장치로 각 14개의 육극 자석을 직렬로 연결하여 사용할 예정이었으나 Beam Dynamics에서 최대한의 flexibility를 확보하기 위하여 개별 powering을 요구하여 모든 육극 전자석은 개별 전원장치로 운전될 예정이다.

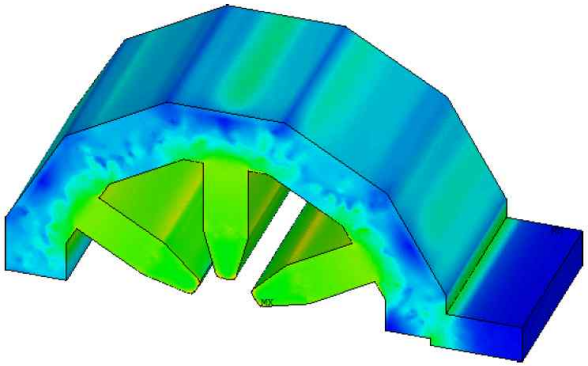
따라서, 총 전원장치의 숫자는 168개의 육극 주전원, 최대 3 × 6 × 28 = 504개의 보조전원이 예상된다. SQ의 경우 모든 육극에 필요하지 않을 수 있으므로 정확한 simulation을 통해 필요 숫자를 조정할 수 있다. 모든 육극에 대해서 개별 전원을 사용하게 되면 non-linearity를 제어하기 용이하다는 장점이 있다. 장기적인 운영 에너지 소요량을 최소화하기 위하여 전류 밀도를 3.70 A/mm^2으로 낮게 설계하였으며, Δp = 6.0 bar 기준 냉각수 온도상승은 최대 3.0 K를 넘지 않도록 설계하였다. 육극 전자석의 2D 단면적은 이상적인 profile을 사용한 것이 아니라 flat 한 자극면을

사용하였다. 이미 진공 챔버 요구존인 Pole to Pole ±6.5 mm를 만족하기 위해서 pole 폭이 아주 좁고 이상적인 profile에서 tangential shimming을 하게 되는데 그 최대한의 shimming이 flat 한 pole로 수렴하기 때문이다. <그림 3.1.6.32>에는 육극 단면에 대해서 2D FEM 결과에 따른 flux 분포를 나타내었다.

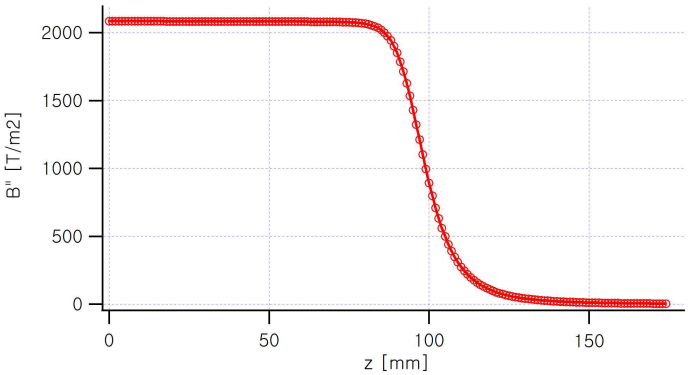


<그림 3.1.6.32> S32 Sextupole 의 2D flux 분포

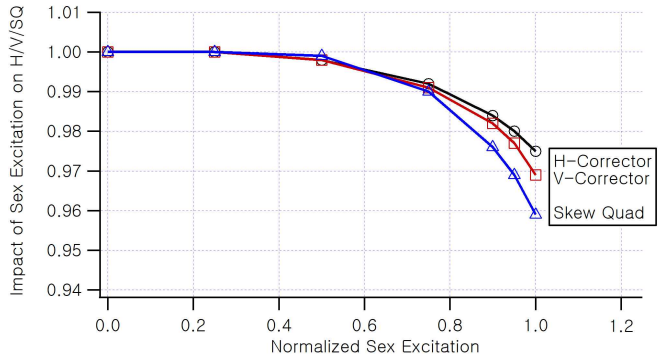
<그림 3.1.6.33>과 <그림 3.1.6.34>에는 S32의 3차원 분석 결과와 빔 방향으로의 B''의 profile을 계산한 결과를 나타내었고 그 결과로 필요한 core length가 결정되었다. 또 육극 전자석의 excitation이 변화함에 따라서 H/V/SQ 보조 전자석들의 효과가 어떻게 변화하는지 파악하기 위하여 Sextupole의 excitation이 변화할 때 trim magnet (H/V/SQ)의 세기 변화를 계산하여서 <그림 3.1.6.35>에 나타내었다.



<그림 3.1.6.33> S32 Sextupole의 3D 분석결과

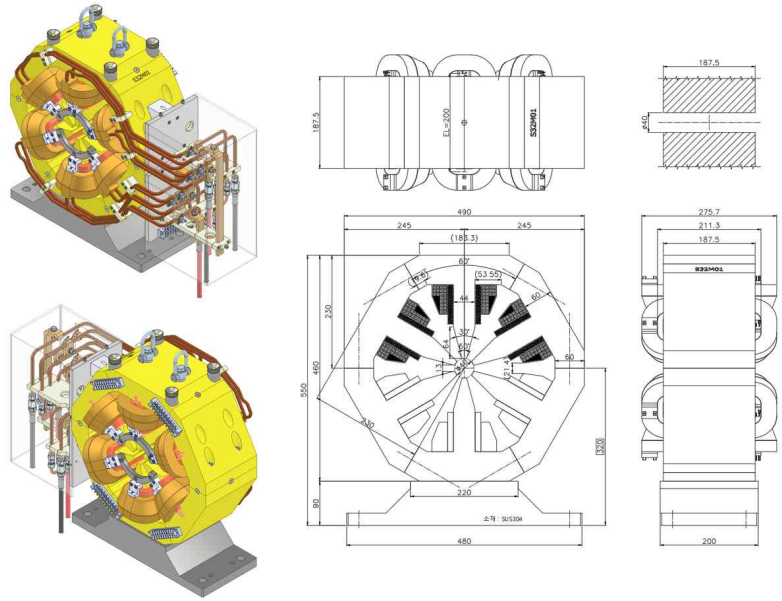


<그림 3.1.6.34> S32 Sextupole의 longitudinal B“ profile (3D 계산 결과)



<그림 3.1.6.35> Sextupole Excitation에 따른 보조 H/V/SQ의 감소효과

최대 sextupole excitation 상황에서도 zero excitation일 때와 비교하여 95% 이상의 세기를 유지함을 알 수 있다. 이와 같은 자료를 바탕으로 3D 기계설계를 수행하였으며 3D 도면과 그 외 핵심 2D 도면을 <그림 3.1.6.36>에 나타내었다. 최종적으로 S31/S33, S32 전자석들의 최종 parameter들을 <표 3.1.6.16>에 정리하였다.



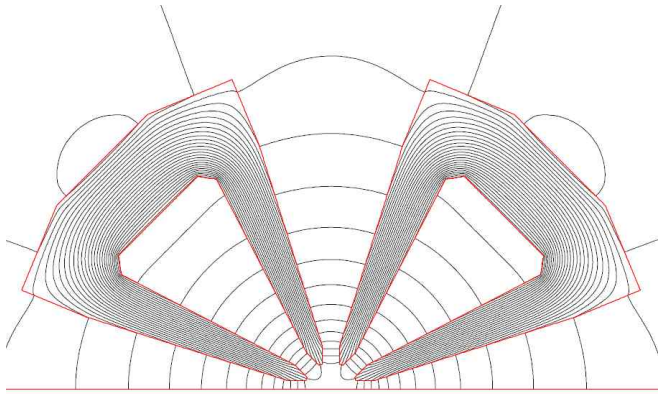
<그림 3.1.6.36> S32 육극 전자석의 3D CAD 도면과 핵심 2D 도면

<표 3.1.6.16> S31, S32, S33 육극 전자석의 주요 parameters

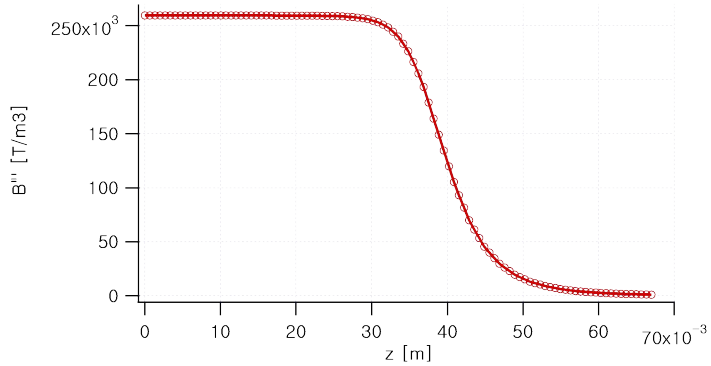
Magnet Type	S31/S33	S32	Remark
Magnet shape	Solid	Solid	Only for slow correction
필요 수량	56/56	56	-
Aperture Radius [mm]	20.0	20.0	Photon extraction, Vacuum chamber
Good Field Radius [mm]	10.0	10.0	-
Multipoles	< 10^{-3}	< 10^{-3}	Pole to Pole ±6.5 mm 때문에 초과 가능성
Max. B" gradient [T/m^2] 120% nominal	2084.0	2084.0	Nominal의 120%
Effective magnetic length [mm]	180.0	200.0	-
Core length [mm]	167.5	187.5	-
Number of turns per pole	20	20	-
Main Coil size [mm]	SQ6.5 × Φ3.5	SQ6.5 × Φ3.5	-
Ampere-turn/pole [A]	2352.3	2352.3	-
Current [A]	117.6	117.6	-
Current density [A/mm^2]	3.70	3.70	-
Voltage/magnet [V]	3.89	4.22	개별 powering으로 전압 낮음
Resistance [mΩ]	33.1	35.9	-
Power [kW]	0.46	0.50	-
Inductance [mH]	5.87	6.52	-
Cooling system	Water	Water	-
Cooling circuit/magnet	2	2	1개로 해도 과열 없으나 제작상 편의
LCW pressure drop [kgf/cm^2]	6.0	6.0	--
Total water flow rate [liter/min]	2.31	2.37	
Temperature rise [K]	2.8	3.0	매우 낮은 수준
Trim conductor size [mm]	2.0 × 2.1	2.0 × 2.1	-
Trim Strength H/V/SQ [mrad/mrad/T/m]	0.6/0.6/1.0	0.6/0.6/1.0	0.6 mrad for H/V, 1.0 T/m for SQ
Trim N/per pole H/V/SQ	150/150/150	150/150/150	H: 50+100+50 turns V: 100+0+100 turns SQ: 0+50+0 turns
Trim B Field H/V [T]	0.044	0.040	-
Trim Current H/V/SQ	8.0/7.2/7.1	8.0/7.2/7.1	-
Trim Voltage [V] H/V/SQ	6.7/5.9/1.5	7.2/6.4/1.6	-
Trim Resistance [Ω] H/V/SQ	0.83/0.83/0.21	0.91/0.91/0.23	-
Trim Inductance [mH] H/V/SQ	26/35/6.8	29/39/7.6	-
Trim Power [W] H/V/SQ	53/41/10	58/45/11	-

사. Octupole Magnet (팔극 전자석)

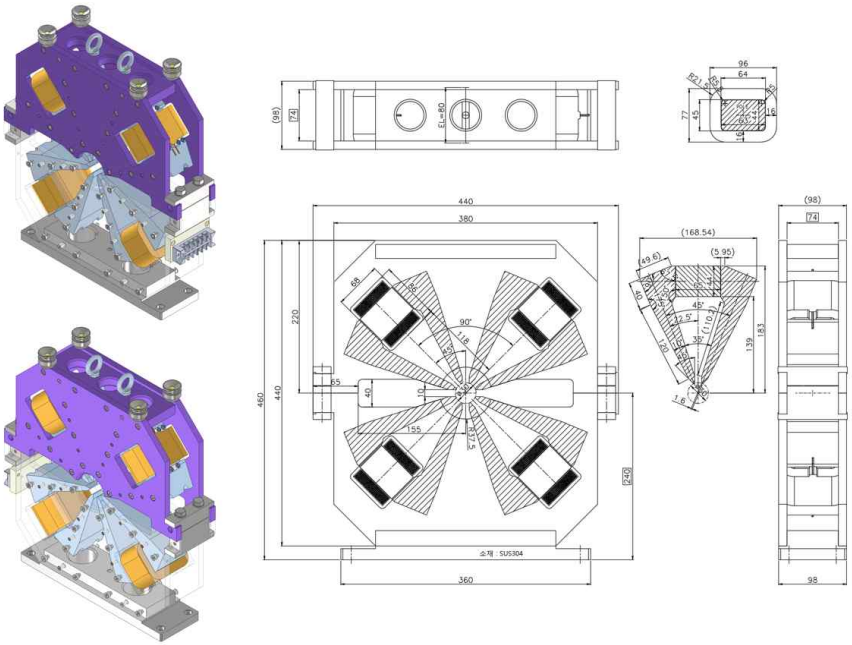
4GSR의 lattice가 최적화됨에 따라 팔극 전자석이 섹터별로 2개씩 추가되어서 전체로 56개의 팔극 전자석과 그에 상응하는 전원장치가 추가로 필요하게 되었다. 요구조건들은 Aperture radius는 사극과 같은 15.0 mm이고 magnetic length 80 mm, 최대 3차 미분값이 240,000 T/m^3 이상이다. Pole tip field 기준으로는 Btip = 1/6 B"' Rc^3 = 0.14 T로 높지는 않으나 higher order multipole로 갈수록 허용 pole tip field가 낮아지기 때문에 사극, 육극 정도의 자기 포화정도로 판단한다. 또 진공 챔버를 위해서 pole to pole 사이의 거리는 ± 5.0 mm 이상을 확보하여야 한다. 이런 상황에서는 코일을 pole에 권선하기에는 공간적으로 불가능하여 return leg 쪽으로 권선하였다. 전체적인 power가 낮아서 냉각수를 사용하여 냉각은 불필요해 보이고 2.0 mm × 1.0 mm의 각 동선을 사용하여 권선하는 것으로 설계하였다. C-형의 steel core를 4개 사용하여 제작하고 양쪽 평면에서 비자성체로 조립하는 것으로 하였다. 2차원 분석에서 flux 분포가 <그림 3.1.6.37>에 나타나 있다. 3D 분석 결과 빔 방향으로의 B"'의 분포가 계산되어 <그림 3.1.6.38>에 나타나 있다. <그림 3.1.6.37>의 2D 형상을 3D로 확장하여 3D 도면 및 제작도면을 작성하였으며 3D view와 2D 중심 단면이 <그림 3.1.6.39>에 나타나 있다. 최종 팔극 전자석의 parameter는 <표 3.1.6.17>에 요약되어 있다.



<그림 3.1.6.37> 팔극 전자석에서의 2차원
flux 분포 공간적 한계로 coil은 return yoke에 감겨있다.



<그림 3.1.6.38> 팔극 전자석의 B‴의 Longitudinal Profile.
최대 세기는 24 × 10^4 이상이고 실효 길이는 80 mm이다.



<그림 3.1.6.39> 팔극 전자석의 3D 도면 몇 2D 단면

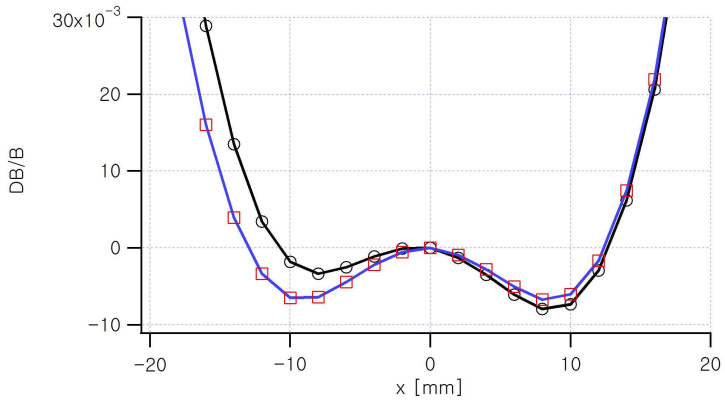
<표 3.1.6.17> H/V Corrector 전자석의 주요 parameters

Magnet Type	O31	Remark
필요수량	56	2*28 (cell)
Aperture Radius [mm]	15.0	-
Min Pole to Pole distance [mm]	5.0	Pole to Pole neck distance for Vacuum Chamber
Good Field Radius [mm]	10.0	-
Max B‴ [T/m^3]	240,000	About 2 times of the nominal value
Effective magnetic length [mm]	80.0	-
Core length [mm]	74.0	-
Number of turns per 2 poles	324	Back leg winding for 2 poles
Conductor size [mm^2]	2.0 × 1.0	-
Ampere-turn/2 poles [A]	1086	Ampere Turns in the back leg
Current [A]	3.35	-
Current density [A/mm^2]	1.68	-
Voltage/magnet [V]	12.1	-
Resistance [mΩ]	3.60	-
Power [W]	40.5	10 W/coil good for air cooling
Inductance [H]	0.58	-
Cooling system	Air Cooling	-

아. Corrector Magnet (보정전자석)

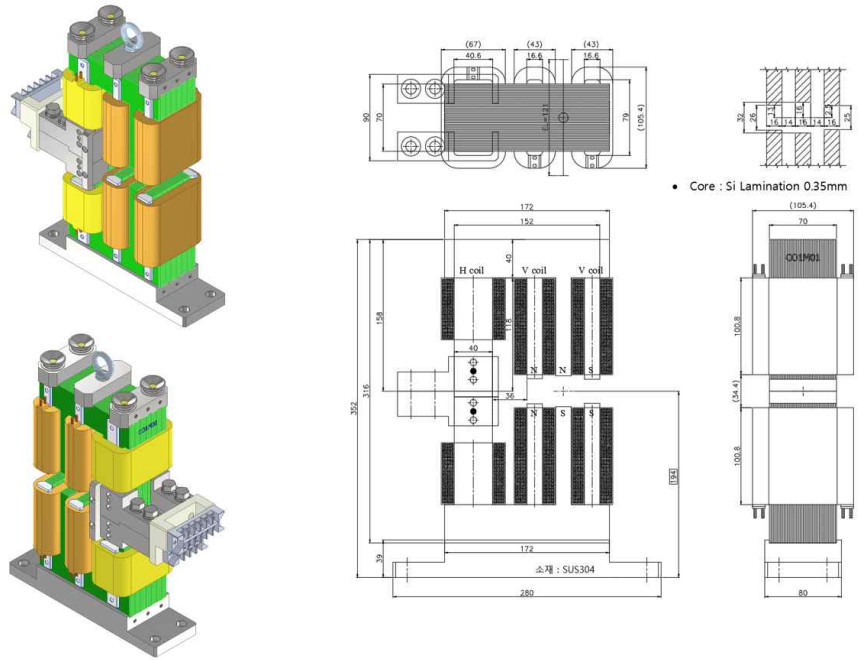
4GSR에는 이극, 사극, 육극 외에도 여러 다른 자석이 사용된다. 보정전자석의 경우 각 섹터 당 4개가 배치되어 있으며(전체 112개, 전원장치로는 224개), 또 high beta section에 약 4개의 추가적인 보정전자석이 예정되어 있다. 필요 kick strength는 error simulation을 바탕으로 0.6 mrad의 최대 kick을 가정하고 있다. Lattice 공간을 최소화하기 위하여 H/V corrector를 한 magnet에 같이 설치하였다. 형태는 ESRF-EBS의 corrector 형상을 benchmark 하였으며 H-corrector field는 Core의 back-leg에 감기게 되고, V-corrector를 위한 coil은 폴에 감기는 형태이다. 빠른 speed로 동작하는 fast corrector로 사용될 예정이기 때문에 0.35 mm의 lamination을 사용하여 제작한다. H-Field와 V-Field의 균질도를 최소화하기 위해서 pole을 3부분으로 나누어 서로 다른 자극 갭을 적용하였다. 중심 half gap은 16 mm이고 right half gap은 12.5 mm, left half gap은 13.0 mm를 적용하였다. 이런 상황에서 자장적분치의 균질도를 <그림 3.1.6.40>에 나타내었다. 요구조건이 |x| < 10.0 mm에서 |DB/B| < 10^{-2}이었는데 그 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. 그림의 두 곡선은

좌우의 half gap을 같이 하였을 때와 0.5 mm 차이를 두었을 때를 나타낸다. 0.5 mm 차이를 두었을 때 자장적분치의 균일도가 좌우 대칭에 근접하고 균질도가 개선됨을 알 수 있다. 참고로 진공 챔버와의 조립을 위해서 상하부가 독립적으로 제작되어 진공 챔버 조립 후에 상하부가 조립되어야 한다.



<그림 3.1.6.40> H-Corrector Field 적분치의 Uniformity
(좌우 비대칭을 보정하기 위하여 좌우 half gap을 0.5 mm 차이를 둔 두 자료임)

이와 같은 고려 사항을 바탕으로 3D 도면 및 제작도면을 작성하였으며 3D view와 2D 중심 단면이 <그림 3.1.6.41>에 나타나 있다. 2023년 8월 현재 시제품 제작 중으로 향후 자장 측정을 통해서 설계치와 비교할 수 있을 것으로 판단된다. 최종 H/C corrector의 parameter는 <표 3.1.6.18>에 요약되어 있다.



<그림 3.1.6.41> H/V 보정전자석의 3D CAD 도면과 핵심 2D 도면

<표 3.1.6.18> H/V Corrector 전자석의 주요 parameters

Magnet Type	H-Corrector	V-Corrector	Remark
Magnet shape	Lamination H/V combined	Lamination H/V combined	Lamination thickness 0.35 mm
필요수량	112 + 4	112 + 4	4*28 (cell) + 4 (high beta)
Half gap [mm]	13.0/16.0/12.5	13.0/16.0/12.5	left/center/right Optimized for uniformity
Good Field Region [mm]	< ±10.0	< ±10.0	-
Max kick at 4 GeV [mrad]	0.600	0.600	-
Required BL [Tm]	8.0E-3	8.0E-3	for 0.6 mrad kick
Effective magnetic length H/V [mm]	122.0	121.0	-
Core length [mm]	70.0	70.0	-
Number of turns per pole	65	105	H-corrector : Back-leg winding
Conductor size [mm^2]	8.55	8.55	Thick conductor to reduce
Ampere-turn/pole [A]	931.3	1862.6	-
Current [A]	14.33	17.74	-
Current density [A/mm^2]	1.68	2.07	-
Voltage/magnet [V]	1.14	3.90	Thick conductor 사용으로 V 낮음
Resistance [mΩ]	79.0	220	-
Power [W]	16.3	69.2	-
Inductance [mH]	16.0	23.0	시상 수 tau=L/R을 낮추기 위해서 낮게 설계
Cooling system	Air Cooling	Air Cooling	j < 2.0 A/mm^2 수준으로 공냉가능. 시제품 제작 후에 heat sink 적용 검토

자. Booster 용 주요 전자석

(1) 이극 전자석

Layout이 확정된 booster ring의 경우 2 Hz로 ramping/injection 되며 이극과 사극 성분이 같이 작용하는 복합 기능 이극 전자석 (transverse gradient dipole) 60개, quadrupole 사극 전자석 66개, 육극 전자석 60개, skew 사극 전자석 (skew quadrupole) 10개, H/V 개별 보정전자석 각 120개가 사용될 예정이다. 복합기능 이극 전자석 외에는 대부분 전자석이 strength가 약하고 길이가 짧으며 구조가 단순해서 저장링에 비해서 예상되는 기술적 어려움이 없다. 여기에서는 전체 booster 전자석의 대부분을 차지하고 난이도가 높은 복합 기능 이극 전자석을 집중적으로 검토한다.

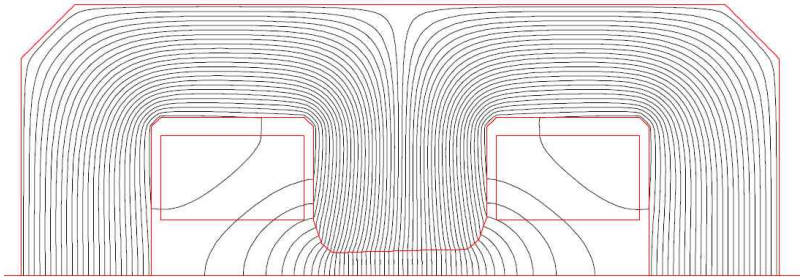
Booster 용 전자석의 특이 사항은 2 Hz로 운영될 예정이기 때문에 0.5 mm 이하 두께의 저탄소강 lamination으로 제작되어야 한다는 것과 전자석간의 excitation timing 문제를 최소화하기 위하여 series로 연결되는 부분이 많다는 것이다. Booster 복합기능 이극 전자석은 5.02°를 bending 하는 weak dipole이 4개, 6.07°를 bending 하는 strong dipole이 56대이다. 제작 편의성과 유지보수를 위해 같은 전자석으로 사용하고 weak dipole의 경우 사용전류를 낮게 한다. Strong dipole의 경우 B_0 = 0.9944 T, B' = 2.087 T/m, Leff = 1.4215 m, Half gap = 13.7 mm를 가지는 복합기능 이극 전자석이다. 약한 4개의 이극 전자석은 각각 2개씩 직렬로 연결되며, 56개의 강한 전자석은 4개의 병렬 회로로 모든 magnet이 직렬로 연결된다. 이것은 MPS의 부담을 낮추면서 개별 전원장치의 숫자를 작게 해서 시운전을 용이하게 하기 위함이다. 결론적으로 MPS의 숫자는 weak dipole 용 2개, 4개의 병렬연결용 등 총 6개가 필요하다. 4개의 병렬연결을 위해 각 전자석에는 입력 4개, 출력 4개 합계 8개의 단자가 있어야 해서 pole 상/하의 각 코일은 각 2개의 pancake로 구성되고 각자의 입출력 단자를 가져야 한다. MPS별 전류 차이가 나더라도 magnet 측면에서는 같도록 각 병렬연결 MPS는 각 magnet을 지날 때마다 모든 코일을 골고루 연결한다. 연결의 자세한 사항은 MPS 부분에서 기술된다. 4개의 병렬연결을 하면서 전체 MPS의 전압을 낮추기 위해서 coil turn 수를 24 turn으로 조정하였다. 단순한 resistive voltage drop, inductive voltage는 10%에서 90% 전류까지 0.25초에 선형적으로 ramping 할 경우 각 약 149 V, 458 V 정도로 예상된다. 참고로 각 magnet 별 peak power는 strong magnet의 경우 4.95 kW이지만 ramping cycle로 운전하기 때문에 duty가 0.32 정도이고 실효 power는 1.59 kW 정도이다.

이극 성분과 사극 성분이 같이 사용되는 복합 기능 사극 전자석의 최적화는 쉽지 않다. 복합 기능 이극 전자석의 형상을 최적화하기 위해서 다음과 같은 conformal mapping을 통해서 먼저 순수 이극 형상으로 변환 (x,y) → (u,v) 시킨다. 변환은 (수식 3.1.6.2)와 같이 주어진다.

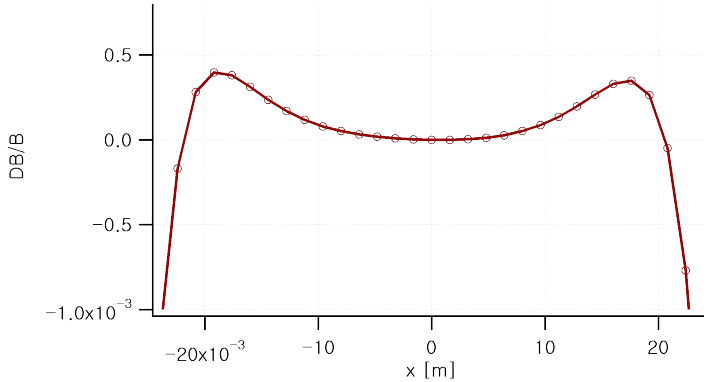
$$w = u + iv = \frac{Z^2}{H} = \frac{(X^2 - Y^2)}{H} + i\frac{2XY}{H},\ H = \sqrt{\frac{2B_0 h}{B'}},\ Y = y, X = x + \frac{B_0}{B'} \quad \text{(수식 3.1.6.2)}$$

u, v 평면은 순수한 이극 전자석 형상인데, 이 평면에서 pole의 표면에 trapezoid shim을 설치한 후, 그 좌표를 다시 실제 좌표인 X, Y로 역변환한 후에, 2D FEM 분석을 수행한다. 계산 결과를 분석하여 필요 B, B', uniformity의 요구조건을 검토한 후에 다시 (u,v) 평면에서 새로운 shim을 사용하여 요구조건을 만족할 때까지 계산을

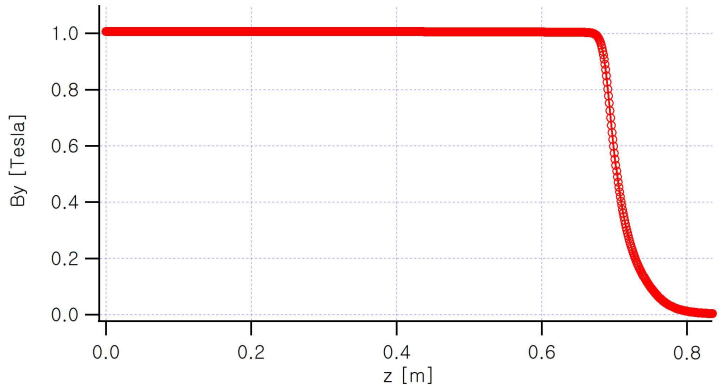
반복한다. Strong 복합 이극 전자석의 경우 sagitta가 18.8 mm, weak 복합 이극 전자석의 경우 15.6 mm이다. 여기에 Good field region이 ± 6.0 mm에서 DB/B < 4.0 × 10^{-4}가 요구조건이다. Sagitta를 x = 0 양단에 걸치게 하면 필요 Good field region은 |x| < 15.4 mm에서 DB/B < 5.0 × 10^{-4}가 요구조건이 된다. 최적화를 거친 이런 요구조건을 만족하는 2D Core 형상의 Flux 분포가 <그림 3.1.6.42>에 나타나 있다. 복합 자장에서 gradient 부분을 제거한 uniformity 결과가 <그림 3.1.6.43>에 나타나 있다. |x| < 15.4 mm에서 DB/B < 5.0 × 10^{-4} 요구조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. End chamfering을 포함하는 3D 계산 결과 |B|의 분포를 <그림 3.1.6.44>에 나타내었으며, 길이 방향으로 By의 분포를 <그림 3.1.6.45>에 나타내었다.



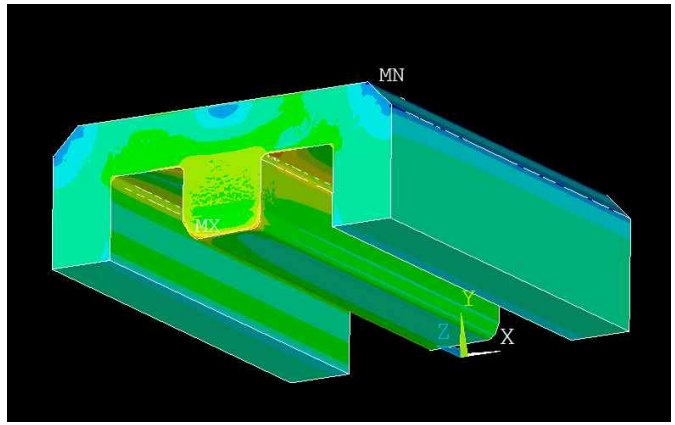
<그림 3.1.6.42> Booster Dipole의 최적화 2D pole과 yoke 형상 및 flux 분포



<그림 3.1.6.43> Booster Dipole의 Uniformity

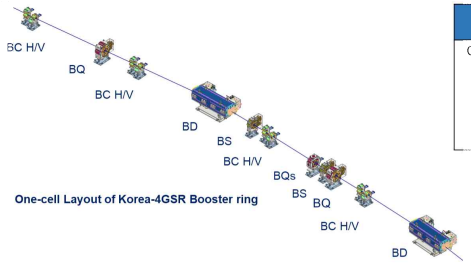


<그림 3.1.6.44> Strong BD magnet의 longitudinal field profile

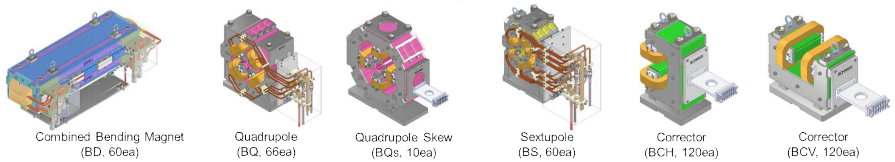


<그림 3.1.6.45> Strong BD의 3차원 분석 예, Pole과 Yoke에서의 |B| 분포

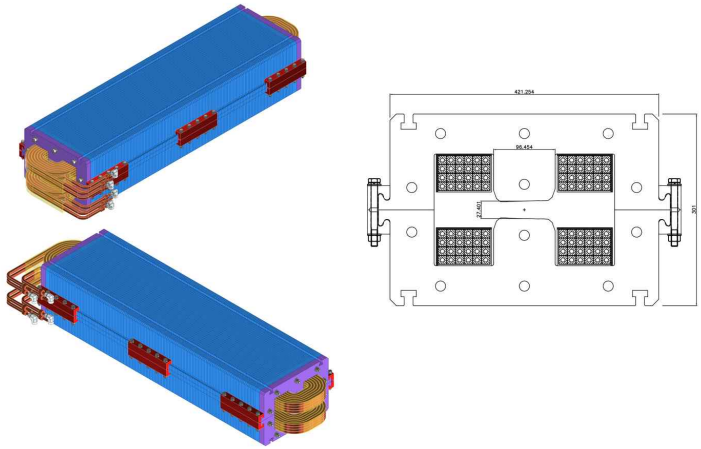
지금까지의 최적화 자료를 바탕으로 3D 기계설계를 수행하였으며 3D 도면과 그 외 핵심 2D 단면도면을 <그림 3.1.6.46>에 나타내었다. 최종적으로 Booster Strong, Weak 복합 기능 이극 전자석들의 최종 parameter를 <표 3.1.6.18>에 정리하였다.



Magnets	Required Number	Remark
Combined Dipole	60	56 (6.07deg)+4(5.02deg)
Quadrupole	76	Normal 60, Skew 10
Sextupoles	60	
Corr.	240	H120, V120
Sum	436	Total number of magnets



Magnet Type	Magnet Name	Total	Half Gap Or Radius [mm]	Good Field Rc[mm]	Mag Len. [m]	Core Lengh [mm]	Max Strength, B,B',B'',B'''	B' [T/m]	Uniformity [1E-4]	Lam. Or Solid	Trim Winding	I[A]	V[A]
Combined Bending Magnet	BD_Strong	56	13.7	±6 ,±5	1.42155	1396.6	0.994367	-2.08667	~5	Lam0.5	Yes	465.7	10.63
	BD Weak	4	13.7	±6 ±5	1.42155	1396.6	0.82236	-1.72571	~5	Lam0.5	Yes	385.1	8.79
Quadrupole	Q54	54	18.0	10.0	0.200	187.1		29.1	10,5	Lam0.5	None	147.0	5.45
	Q4A	4	18.0	10.0	0.200	187.1		29.1	10,5	Lam0.5	None	147.0	5.45
	Q4B	4	18.0	10.0	0.200	187.1		29.1	10,5	Lam0.5	None	147.0	5.45
	Q4C	4	18.0	10.0	0.200	187.1		29.1	10,5	Lam0.5	None	147.0	5.45
	Skew Q	10	18.0	10.0	0.150	137.1		1.6	10	Lam0.5	None	3.51	4.55
Sextupole (저점링 전자석 참고)	S Strong	30	18.0	10.0	0.150	140.0	428.6		100,50	Lam0.5	None	113.9	0.65
	S Weak	30	18.0	10.0	0.150	140.0	143.8		100,50	Lam0.5	None	38.2	0.04
Fast-Slow Corrector (저점링 전자석 참고)	C1U	120	18.0	10.0	0.191	120.0	0.085	0.085	100	Lam0.35	None	8.77	16.0
	C2U	120	18.0	10.0	0.191	120.0	0.085	0.085	100	Lam0.35	None	8.77	16.0



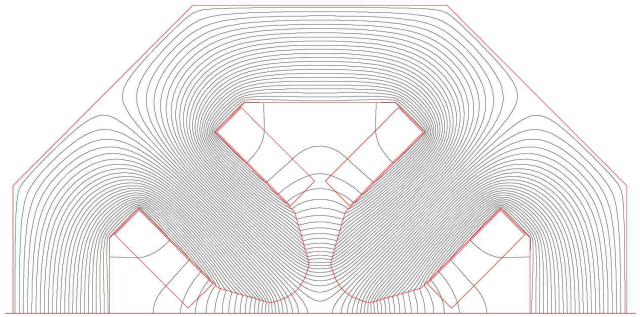
<그림 3.1.6.46> Booster 전자석 전체 사양 및 Booster Dipole의 3D 도면과 2D 단면도면

<표 3.1.6.18> Booster Dipole 전자석의 주요 parameters

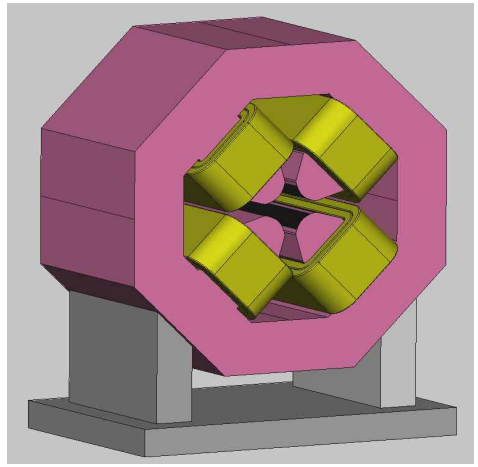
Magnet Type	BD weak	BD strong	Remark
Magnet shape	H-type, Laminate	H-type, Laminate	-
Shape along the beam	straight	straight	-
Number of Magnets	4	56	4 weak magnets in the high beta section
Lamination thickness [mm]	0.5	0.5	Ramping cycle 2 Hz
Pole gap [mm]	13.70	13.70	at the gap center
Magnetic filed [T]	0.8224	0.9944	복합 기능 이극 전자석
Max. field gradient [T/m]	1.726	2.087	-
bending angle [°]	5.02	6.07	-
Effective magnetic length [mm]	1421.55	1421.55	-
BL [Tm]	1.1690	1.4135	-
Sagitta [mm]	15.566	18.821	-
Uniformity	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	for |x| < 15.4 mm
Core length [mm]	1396.6	1396.6	-
Number of turns per pole	6 (H) × 4 (V)	6 (H) × 4 (V)	Turns adjusted to limit the MPS voltage
Main Coil size [mm]	SQ13.0 × Φ6.5	SQ13.0 × Φ6.5	-
Ampere-turn [kA]	9.243	11.176	per pole
Efficiency	0.97	0.97	-
Current [A]	385.1	465.7	-
Current density [A/mm^2]	2.85	3.45	-
Voltage [V]	8.79	10.63	-
Resistance [mΩ]	22.8	22.8	-
Power [kW]/magnet	3.39	4.85	-
Inductance [H]	0.0185	0.0185	-
Cooling system	Water	Water	-
Cooling circuit number	2	2	-
LCW pressure drop [kgf/cm^2]	6	6	-
Total water flow rate [liter/min]	6.77	6.77	-
Duty	0.32	0.32	Cyclic Excitation에 의해서 Full power에 대한 실효 power의 비율
Temperature rise [K]	2.3	3.4	실효 power가 최대 power에 비해 낮아서 온도상승 낮음
Number of Split	2.00	1.00	2 Weak BD are connected in series
Number of Parallel	1.00	4.00	56 strong BD connected in 4 parallel
Total Resistive Voltage Drop [V]	17.6	148.9	-
Inductive Voltage	54.0	457.4	Assuming 10% to 100% in 250 msec
Mass (core+coil) [kg]	~1344.46	~1344.46	-

(2) 사극 전자석

Booster에 사용되는 사극 전자석은 단축 12.5 mm, 장축 24.0 mm인 타원형 형태의 진공 챔버 외관을 만족시키기 위하여 bore radius 17.7 mm 기준으로 설계되었으며 전체적으로 66개의 자석이 필요하다. 복합 기능 이극 전자석과 마찬가지로 2 Hz로 동작하여야 하므로 0.5 mm 두께의 lamination을 적층하여 제작하여야 한다. 주어진 최대 자장구배(경사자기장; gradient magnetic field)는 29.0 T/m로 주어진다. Magnet의 실효 길이는 0.200 m를 달성하여야 하며 전체 필요 수량은 총 66개이다. 자속밀도의 세기가 낮으므로 제작의 편의성을 위해서 pole은 tapering 없이 설계하였다. 최종적인 2D flux 및 core 형상이 <그림 3.1.6.47>에 나타나 있으며 전자석 코어 부분과 코일 부분만 형상화한 schematic 한 3D 도면이 <그림 3.1.6.48>에 나타나 있다. <표 3.1.6.19>에는 booster 사극 전자석의 주요 parameter 들이 정리되어 있다. 전체 전자석은 직렬로 연결하여 전원장치 비용을 절감하고, magnet 간의 동기화를 쉽게 할 예정이다. 전체를 직렬로 연결하여 운전할 때 연결 도체, lead 부위를 제외하고 저항값은 약 2.22 Ω 정도이다. 기타 booster에 사용되는 육극 전자석을 포함하는 나머지 전자석들은 사양이 정해져 있지 않거나 특이한 요구사항이 없는 전자석들이라 설계, 제작에 어려움이 없을 것으로 예상된다.



<그림 3.1.6.47> Booster 사극 전자석의 2D magnetic flux 분포



<그림 3.1.6.48> Booster 사극 전자석의 schematic 3D 도면

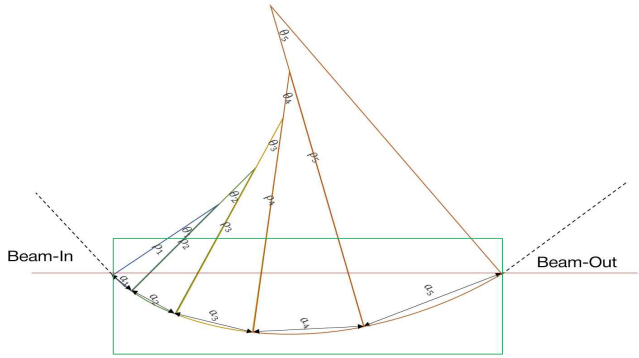
<표 3.1.6.19> Booster 사극 전자석의 주요 parameters

Parameters	값	Remark
Magnet Type	Booster Quadrupole	-
필요수량	66+10(skew)	-
Lamination [mm]	0.5	Ramping @2 Hz
B'max [T/m]	29.0	-
Bore Radius [mm]	17.7	-
Magnetic Length [m]	0.200	-
Magnetic Efficiency	0.98	-
Ampere Turns [kA]	3.68	per pole
Conductor	7 × 7 × 4ϕ	단위 mm
Num. Turns	26	2*8
Imax [A]	141.5	-
Js [A/mm^2]	3.98	-
V [V]	5/24	per magnet
Power [kW]	0.742	per magnet
Resistance [mΩ]	37.1	per magnet
Total Resistive Voltage Drop [V]	314	total 66 magnets
냉각회로의 수	1	per magnet
ΔT [K]	3.5	duty 0.321 감안
Coolant Velocity [m/sec]	1.30	-
Flow Rate [liter/min]	0.98	per magnet
Pressure Drop [kg/cm^2]	6.0	-
Inductance [mH]	11.2	per magnet

차. 이극 전자석 자장 분석

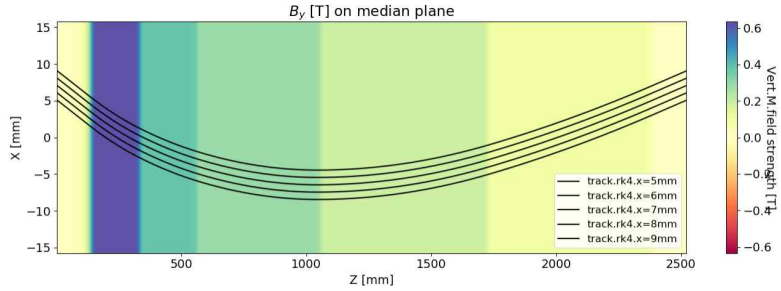
설계된 LGBM1의 3D 자기장 분포에 대하여 평가를 진행했다. 빔물리의 광학 설계는 hard edge model을 기반으로 fringe field effect, edge angle effect, multi-pole effect 등을 모두 thin lens approximation으로 계산한다. 이러한 모델은 잘 만들어진 자석에 대하여 충분히 정확한 결과를 내주지만, 실제 만들어진 자장이 빔 광학 모델과 차이가 있을 경우 저장링에서 디자인 결과와 다른 빔을 경험할 수 있다. LGBM은 D'' (d^2D/ds^2)를 구간별로 다르게 하여 D (dispersion)의 값을 최소화시키는 역할을 하는 특수한 bending magnet이다. 복잡한 구조로 인해 계산치와의 차이가 발생하기 쉽고, 이를 검증하는 것은 중요하다.

LGBM은 <그림 3.1.6.49>와 같은 단계별 휨 각을 가지며, 이 휨 각은 magnetic rigidity (=$B\rho$) 에 의해 결정된다. 4 GeV electron의 $B\rho$은 약 13.34 Tm이므로 빔 진행 경로의 B strength를 알면 radius of curvature를 알 수 있으므로 그림과 같은 도식화가 가능하다.



<그림 3.1.6.49> LGBM의 단계별 bending angle과 Beam-In, Beam-Out 모식도

입사 인출 각도가 서로 다르더라도, 항상 같은 위치에서 빔의 입출이 일어나도록 명시적 4차 Runge-Kutta 알고리즘을 이용하여 4 GeV electron을 트래킹 했다. 상수 Δt를 사용했으며, 100 fs였다. FEM code에서 계산된 3D B field를 1 mm × 1 mm × 1 mm 간격으로 export 하여 3D 선형 보간 후 사용하였다. <그림 3.1.6.50>은 트래킹 결과를 보여준다. 1 mm 간격으로 다섯 곳에서 트래킹을 수행했고, 모두 같은 x 위치에서 인출됨을 보여준다. 이때 다섯 트랙 모두 입사각은 -1.53°, 인출각은 0.84°로 모두 일정했다.



<그림 3.1.6.50> 입출 위치가 서로 같은 트랙들

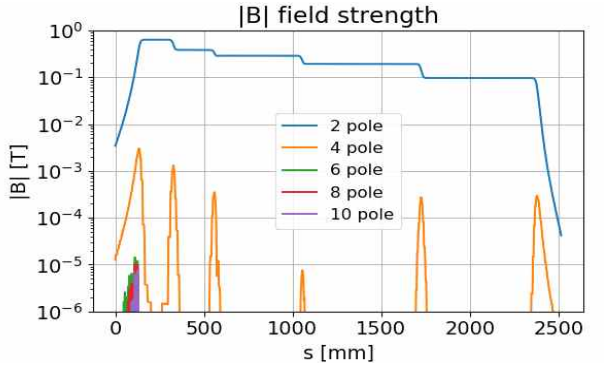
트래킹 과정 중 특정 단계에서 momentum direction의 transverse plane에 원을 그리며 field를 호출하고 다극 성분을 추출했다. 다극 성분은 편의에 의해 (skew 성분을 볼 필요가 없으므로) sine term을 제거하고 B_y만을 이용해 (수식 3.1.6.3)과 같이 계산했다.

$$B_n = \frac{1}{\pi}\sum_{i=1}^{M} B_y(r_0\theta)\ \cos(n\theta)\ 2\pi/M \quad \text{(수식 3.1.6.3)}$$

n=0 : dipole, n=1 : quadrupole, n=2 : sextupole ... , M=100

수식의 r,θ 는 항상 트래킹 중인 electron의 momentum direction의 transverse plane 위에 정의된다.

결과는 <그림 3.1.6.51>과 같다. 매 Longitudinal Step에 대해 Edge effect로 사극 집속 반집속 항들이 살아있음을 확인할 수 있다. Sextupole, octupole, decapole은 field interpolation 과정 중 발생한 noise로 판단되며 B_0에 비해 10^{-6}배 수준의 양이므로 실제 있다고 해도 무시할 수 있는 항이라 하겠다.

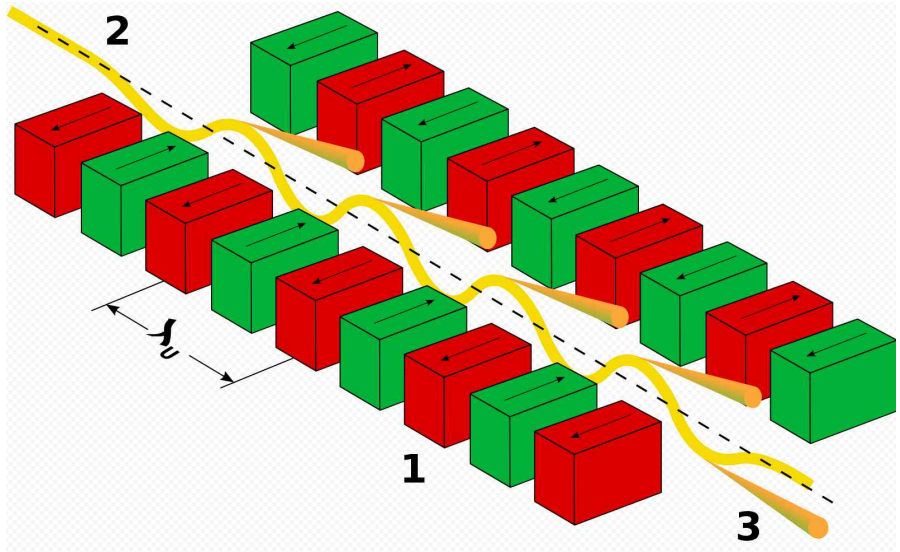


<그림 3.1.6.51> Multi-pole의 B strength

3.1.7 삽입 장치 및 광원

가. In Vacuum Undulator

4GSR의 1단계 10개의 Beamline 중 1개의 Center Bend를 광원으로 사용하고 2개는 Elliptically Polarizing Undulator (EPU)를 사용하여 원형 편광된 광원을 발생시켜 사용할 예정이며, 나머지 7개는 자기 구조물이 진공 속에 배치되는 In Vacuum Undulator를 사용할 예정이다. Undulator라는 구조물은 가속기 lattice의 성능을 결정하는 장비는 아니며 완전히 빛만을 발생하기 위한 장비로 <그림 3.1.7.1>에 개략도를 나타냈다. <그림 3.1.7.1>에서 1은 자석, 2는 전자빔, 3은 방사광이며 N극 S극의 자장이 번갈아 작용하여 전자가 sine 모양의 운동을 하도록 하는 장비이다. 전자는 이런 운동을 통하여 방사광을 발생시키며 특히 Undulator의 경우 발생한 빛이 주 기수의 제곱으로 휘도가 증가하게 된다. 이러한 특성으로 3세대 방사 광원 이후로 주요 방사 광원으로 사용되고 있다.



<그림 3.1.7.1> Undulator의 개략적인 구조

특히 이런 자기 구조물의 경우 짧은 자장 주기와 높은 실용 자속밀도를 달성하기 위하여 자기 구조물을 진공 챔버 내부에 넣는 기술이 일본 SPring에서 개발되어 전 세계 방사광가속기에서 광범하게 적용되었다. 우리도 phase 1에서의 7개의 광원에 대해서 이러한 In Vacuum Undulator (IVU)를 적용할 예정이다. 이미 유사한 장비가 개발되어 PLS-II에 적용되어 있으나 4GSR에 맞추어 설계를 upgrade 하여야 한다. 주요 Upgrade point는 아래와 같다.

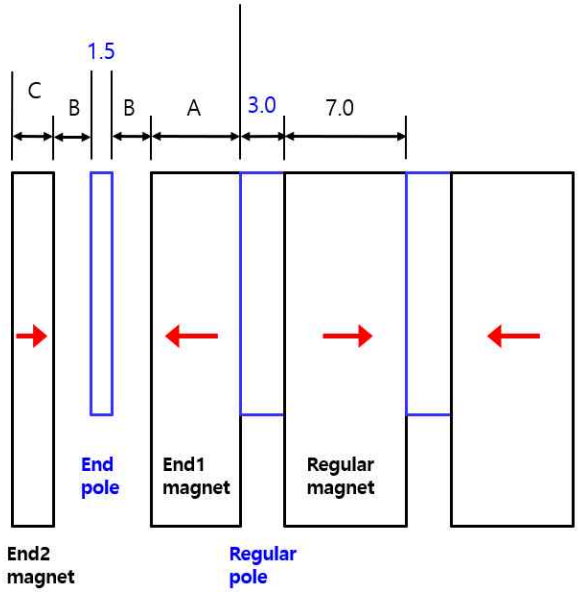
- PLS-II 직선구간(C 빔라인) 보다 긴 길이를 사용할 예정이라 Magnetic 길이 약 3.0 m로 설계

- 4GSR의 낮은 emittance와 beam stay clear를 반영한 5.0 mm의 최소 자극 간극을 사용할 예정이므로 그에 따른 높아진 자기력에 따른 새로운 구조설계

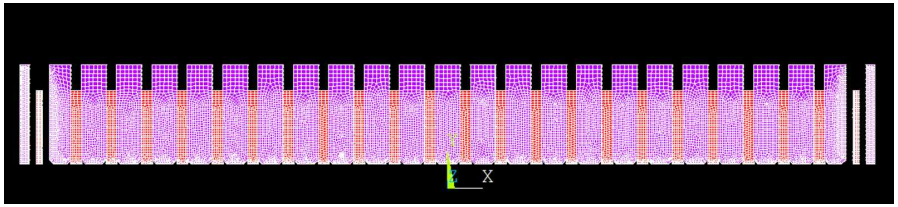
- 기존의 PLS-II에 사용되었던 IVU는 진공 챔버 조립 전에 최종 자장 측정 후, 진공 챔버를 조립한다. 그럴 경우 기계적인 조립의 정밀성에만 의존하고 최종 진공 챔버 조립 후의 자장 측정은 없었다. 이 같은 불확실성을 해소하기 위하여 진공 챔버 조립 후에도 자장 측정이 가능하도록 필요 Tooling을 진공 챔버 설계 시에 같이 고려할 필요가 있다.

- 20 mm 주기의 IVU 외에도 22 mm, 24 mm 주기의 undulator를 사용할 가능성에 대한 대비 등이 있다.

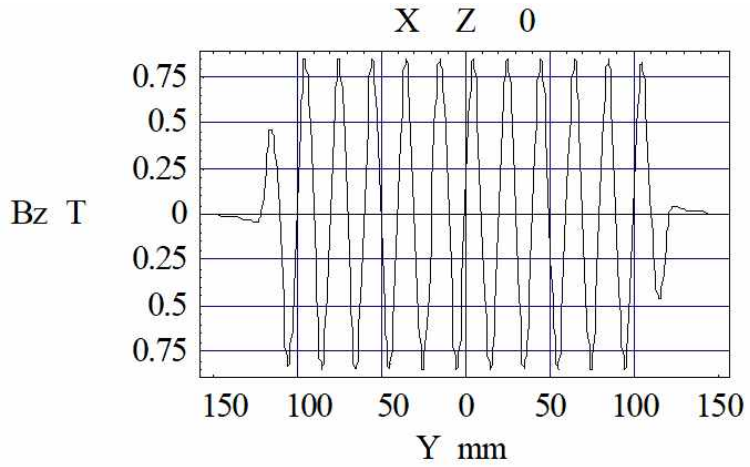
자석의 소재로는 자기구조물이 전자빔에 근접해서 위치하고, 장기간 사용된다는 점에서 전자빔 조사나 gamma ray radiation에 강하여야 한다. 이 같은 점을 가정하여 잔류 자속밀도는 Br = 1.13 T로 Nd 계열보다 약 10% 낮지만 내방사선성이 높은 Sm2Co17 계열의 희토류 영구자석을 사용한다. 이 Sm2Co17 영구자석의 경우 부식에 강하고, 자성을 잃어버리는 Curie 온도가 660 ℃로 높아서 진공 챔버를 Baking 할 때에도 따로 냉각이 필요 없을 정도로 안정성이 좋다. 단점으로는 Br이 약 10% 정도 낮으며, 가격이 Nd 계열의 희토류에 비해서 비싼 면이 있으며, Brittle 해서 취급에 주의해야 하는 점이 있다. 모든 영구자석은 Ultra High Vacuum (UHV) 환경에서 적용 가능하도록 coating 되어 있어야 한다. Pole material로는 2.3 T 급의 높은 포화 자속밀도를 가지는 Permendur와 포화 자속밀도 2.05 T~2.10 T 급의 일반 low carbon steel을 사용할 수 있다. 주기가 짧은 경우 peak field가 낮아서 Vanadium Permendur를 사용하였을 때 2~3% 정도의 peak field에 이득이 있으나, 가격이 비싸고 조달이 까다롭다. 우리 목적에는 low carbon steel로도 충분한 것으로 판단되어 pole material로는 low carbon steel을 사용할 예정이다. Pole과 영구자석의 최적 geometry를 결정하기 위해서 FEM 코드를 사용하여 undulator의 계산을 수행하였다. 컴퓨터 자원의 한계로 전체 geometry를 분석하지는 못하고 자속밀도가 충분히 주기적인 형상에 도달할 때까지의 주기 수를 포함하여 분석하였다. End 부분의 magnet geometry는 end pole과 end magnet의 두께, 그 사이의 거리를 조정하여 field가 최소의 transient로 주기적인 모습에 도달하도록 하였다. <그림 3.1.7.2>에 end magnet의 geometry를 나타내었고 <그림 3.1.7.3>에 3차원 FEM 모델을 나타내었다. 보라색은 영구자석, 붉은색은 ferromagnetic pole을 나타낸다. <그림 3.1.7.4>에는 FEM을 통해서 계산된 자속밀도의 z 방향 분포를 보여준다. 계산 결과는 자극 간극 gap = 6.0 mm 때의 결과이다.



<그림 3.1.7.2> IVU End magnet과 pole geometry의 최적화



<그림 3.1.7.3> IVU의 3D FEM 모델



<그림 3.1.7.4> IVU20의 By 자속밀도 profile at gap = 6.0 mm

또 이 외에도 빔라인에서는 22 mm, 24 mm 주기의 Undulator를 사용할 가능성도 있다. 전체 magnetic 길이는 약 3.0 m를 예상하며 RF-bellows와 진공 부품을 포함하는 전체 길이는 약 3.5-3.6 m에 이을 것으로 판단된다. <표 3.1.7.1>에는 주기 20 mm, 22 mm, 24 mm, 길이 3.0 m, 최저 자극 간극 5.0 mm, Sm2Co17 영구자석과 low carbon steel을 사용하였을 때의 undulator parameter들이 정리되어 있다.

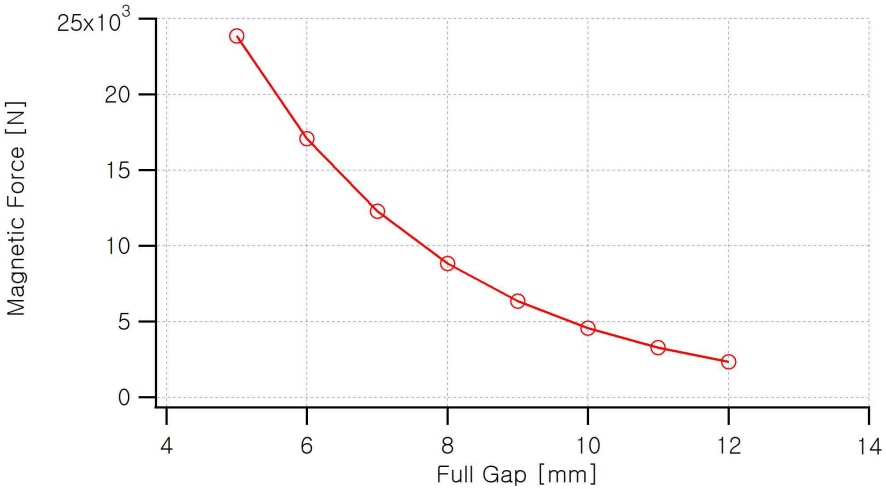
Undulator는 자극 간극이 변화함에 따라, 자기 구조물을 받치고 있는 진공 챔버 내부의 inner girder가 자기력, 중력, 진공에 따를 대기압력 등의 힘을 받게 된다. 이런 inner girder의 변형은 자기 구조물의 변형을 가져오고 undulator의 성능을 저하시키기 때문에 수 μm 이내로 제한되어야 한다. 이를 위해 Aluminium 소재인 inner girder의

강도, 치수 등을 최적화하고, inner girder와 outer girder를 연결하는 supporting rod의 설계를 최적화해야 하며 작은 자극 간극에서 자기력에 의한 힘을 보상하는 보상 스프링을 설계하여 배치한다. <그림 3.1.7.5>에는 자극 간극에 따른 magnetic force의 계산 결과를 표시하였다. 최소 자극 간극에서 약 5 ton의 힘이 작용하며 5.0 mm gap에서 한쪽의 magnetic structure에 작용하는 magnetic force는 약 23 kN이고 약 2.3 ton이다.

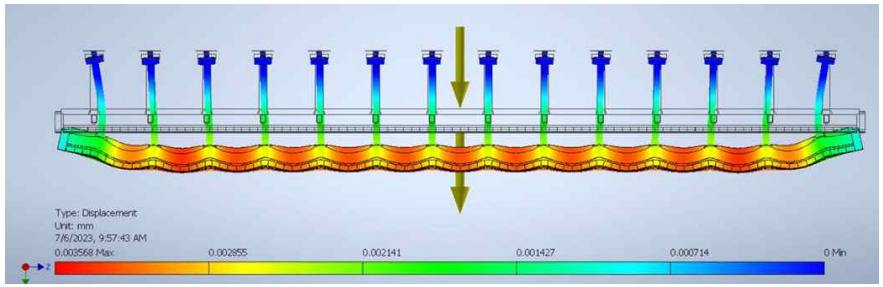
<그림 3.1.7.6>에 magnetic force와 각종 load 조건에서 계산한 magnetic structure의 변형계산 결과를 보여준다. Suspension rod 사이의 간격을 215 mm로 하였을 때 (전체 suspension rod 28개) 최대 변위 약 3.46 μm를 얻을 수 있다. <그림 3.1.7.7>에는 outer girder를 포함하는 전체 구조의 변형계산 결과를 나타내었다.

<표 3.1.7.1> 4GSR In Vacuum Undulator의 주요 parameters

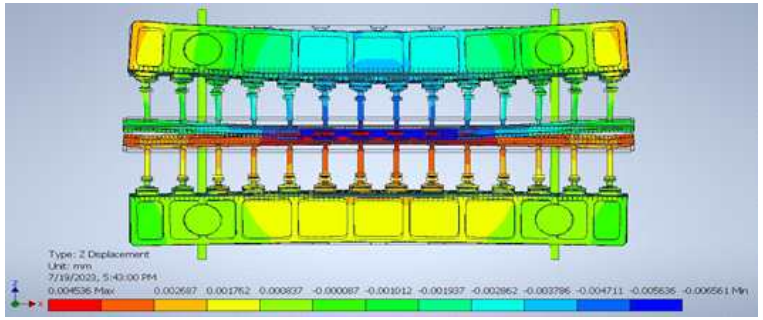
Parameters	Values			Remark
Period length [mm]	20	22	24	Three period depending on the beam line
Period number of full field	149	135	124	-
Total magnetic length [m]	~3.0	~3.0	~3.0	-
Magnet material	Sm2Co17	Sm2Co17	Sm2Co17	For better resistance to the radiation
Undulator type	Hybrid	Hybrid	Hybrid	-
Working gap range [mm]	5.00~16	5.00~16	5.00~16	Max gap is flexible.
Max Effective field [T]	1.021	1.127	1.225	-
Max K	1.907	2.316	2.747	-
Precision of gap change [μm]	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-
Total Power [kW]	12.71	15.49	18.30	@4 GeV, 400 mA
Peak PD [kW/mrad^2]	170.0	170.6	170	@4 GeV 400 mA
e-beam Energy Loss [keV]	31.8	38.7	45.8	-
e1 [keV]	2.70	1.88	1.33	fundamental energy
Vacuum pressure with beam [Torr]	< 3.0×10^{-9}	< 3.0×10^{-9}	< 3.0×10^{-9}	-
Impedance [mΩ]	≤ 80	≤ 80	≤ 80	-



<그림 3.1.7.5> 자극 간극에 따른 Magnetic force 계산결과



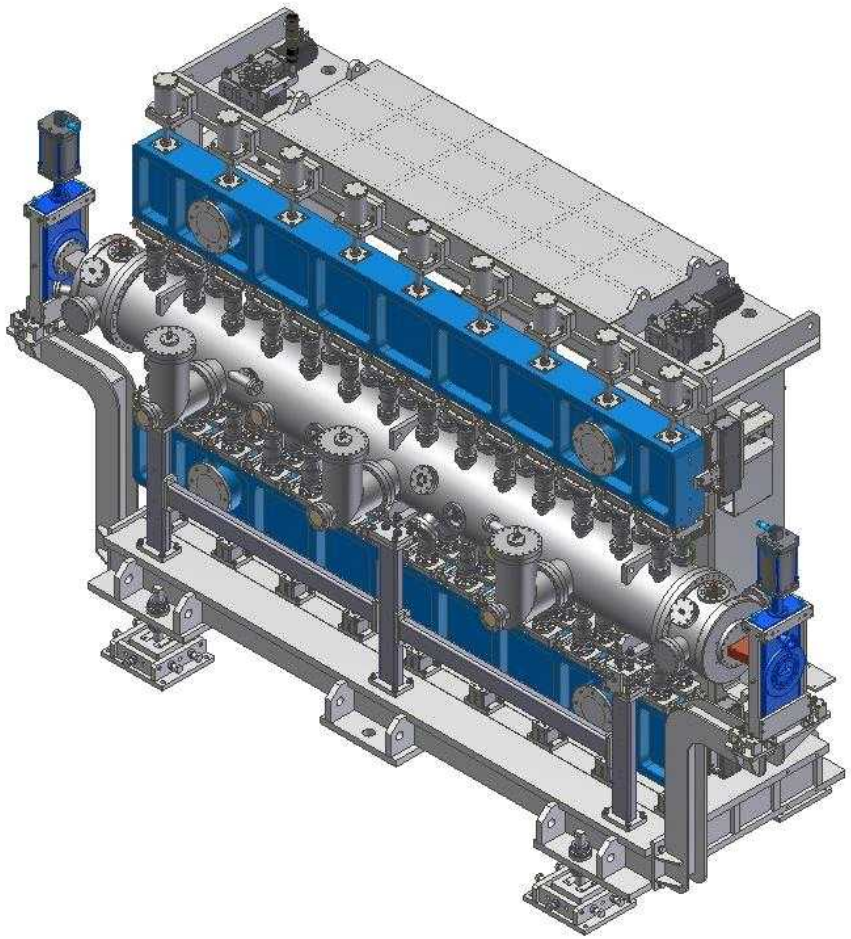
<그림 3.1.7.6> Magnetic structure의 변형계산 결과



<그림 3.1.7.7> 3.0 m 길이 기준 IVU inner girder, outer girder의 변형

추가적으로 IVU는 진공 챔버를 baking 할 때 magnet을 열로부터 보호하여야 하므로 냉각 채널을 설치하여 온도를 영구자석 운영 온도 아래로 유지하여야 하며, 챔버와 magnetic structure의 열팽창 차이에 의한 간섭을 피하고자 bellows는 그 차이를 감당할 정도로 여유 있는 내경을 가져야 한다. 또 magnetic structure가 열팽창 할 때 힘을 받아서 변형되지 않도록 길이 방향으로 slide 할 수 있도록 LM guide를 설치한다. Magnetic structure 표면 위에는 전기적 연속성을 보장하기 위하여 Ni 50 μm, Cu 50 μm 두께의 foil이 씌워져야 한다. Ni는 magnetic material로 magnetic structure에 접촉을 확보하고, Cu는 낮은 비저항을 가져 전자빔이 보는 image current에 의한 발열을 최소화하며 impedance를 줄여준다. Undulator 양단에는 gap이 변화하는 상황에서도 foil과 저장링 챔버의 전기적 연속성을 유지해 주기 위하여 flexible 한 RF finger가 설치된다.

이와 같은 기구적, 구조적, 자기적, engineering 계산을 바탕으로 3.0 m 급, 5 mm 최저 자극 간극, 주기 20~24 mm를 만족하는 IVU가 설계되었으며 최종 3D 도면이 <그림 3.1.7.8>에 표시되어 있다. 주요 핵심 부품들에 대한 제작용 2D 도면은 부록에 첨부되어 있다.

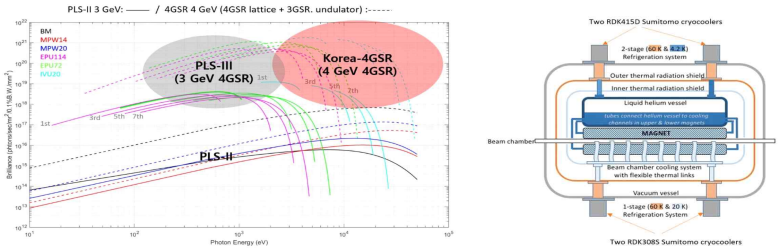


<그림 3.1.7.8> 최종 3D 설계 후의 IVU Isometric View

나. 고성능 삽입 장치 부품 : High Temperature Superconducting Wavelength Shifter

4GSR에 예정된 삽입 장치의 대부분은 10 keV 미만의 X-ray 영역에서 밝다. 대부분의 유기물 분석은 이 광원들로 가능하지만, 원자 분자 단위의 더 작은 구조의 분석이나 원자번호가 높은 금속 재료의 전자구조 분광 분석을 위해서는 보다 짧은 파장(높은 에너지)의 광원이 필요하다. 이러한 이유로 몇몇 기관에서 운영되고 있는

최대 자속밀도 5 T 급의 Wiggler 자석은 방사광가속기의 전자빔 운전 에너지 3~4 GeV 수준에서 100 keV 이상의 경엑스선을 발생시켜 앞서 언급한 실험들을 가능하게 한다.



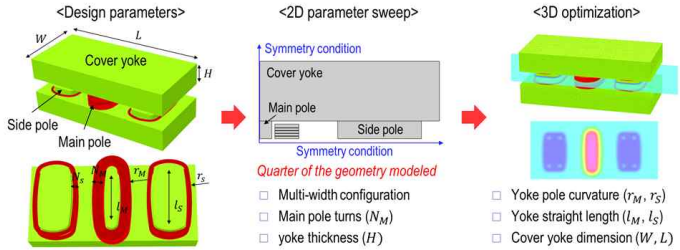
<그림 3.1.7.9> 국내 방사광 시설에서 인출 가능한 광원 에너지와 밝기 분포 (좌), 일반적인 저온초전도 삽입 장치의 냉각시스템 구조도 (우).

몇몇 외국 방사광 시설에 설치된 7 T 급의 저온 초전도 Wavelength shifter, 4 T 급의 Multi-pole wiggler 들은 모두 코일을 초전도 상태로 만들기 위해 <그림 3.1.7.9>와 같은 4 K 액체 헬륨을 이용한 냉각방식을 채택하고 있다. 이 같은 냉각방식은 장시간 및 고비용 Cool-down 및 Warm-up 문제, 퀜칭 사고 시 헬륨 냉각 시스템 파손, 많은 구축 비용 등 다양한 문제점들을 가지며, 이는 연평균 운전 시간의 감소로 직결된다.

고성능 삽입 장치 부품 국산화의 두 번째 세부 연구는 NI-HTS (무절연 고온초전도) 코일 셋을 사용하여 운전 온도를 4 K에서 20 K 이상으로 대폭 향상, 액체헬륨욕조 대신 전도냉각을 사용한 삽입 장치를 개발하여 앞서 언급한 문제에 대안을 제시한다.

(1) 전자석 설계

본 연구에서는 세계 최초로 고온초전도와 전도냉각을 이용한 삽입 장치를 개발했다. 이 조합은 5 T급 이상의 강한 자속밀도를 구현했음에도 불구하고 코일의 높은 전류 밀도와 단순한 냉각시스템으로 인해 부피가 기존 자석의 1/8 수준으로 작다. Wake impedance 발열을 줄이기 위해 Pole to pole gap은 12 mm로 제한했으며, 전류 인입 리드와 코일 자체의 안전한 운전을 위해 운전 전류를 200 A 이하로 제한했다. 설계된 자석 본체의 유한요소 설계를 <그림 3.1.7.10>에 나타냈다.



<그림 3.1.7.10> 5 T급 Wavelength Shifter의 2D 및 3D 유한요소 설계

(2) 냉각

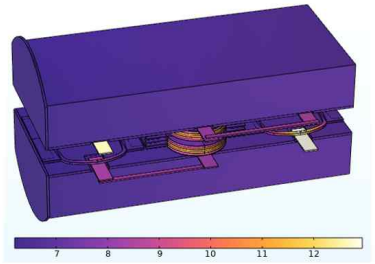
효율적 운전을 위해 PT815 한 개의 냉동기로 운전하기 위한 열 해석을 수행했으며 저장링 운전에 안전함을 확인했다. 총 발열은 2차 스테이지에서 10 Watt 미만, 1차 스테이지에서 65 W 미만으로, 각각 18 W, 75 W의 여유 냉각용량을 확인하였다. 이는 통전 시 발생 가능한 다양한 발열 (접촉 발열, 복사 열전도, 코일 자체의 저항성 발열, 빔에 의한 Wake Impedance 발열)을 모두 포함한 수치이다.

Governing Equation

Heat equation: $\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q = 0$

Fourier's law: $q = -k\nabla T$

Thermal contact: $-n_c \cdot q_c = -h(T_u - T_d)$

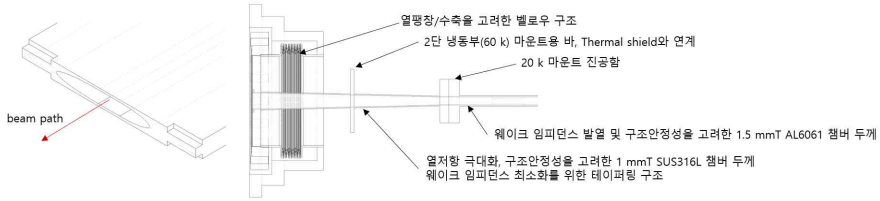


Heat source [W]		2nd stage	1st stage
Conduction	Magnet support	<1	<1
	Beamduct support	<0.1	<1
	Beamduct conduction	1.8	9.4
Radiation	Radiation	0.1	16.1
Resistance	Resistive joint	0.16	0
	NI leakage current	<1	0
	Current lead	0.3	33.6
Beam	Image current + Wake impedance	3.3	
	Synchrotron radiation	<1	<1
Total [W]		<10	<65.5
Cooling margin [W]		18	75

<그림 3.1.7.11> 발열 계산 수식, 열 분포도, 열 해석 결과표

(3) 극저온 진공함

빔에 의한 진공함 발열이 설계 마진보다 크면 저장링 광원으로 사용할 수 없다. 또한 실온에서 저온부로의 열저항이 작은 경우 대기로부터 열 침입으로 인해 퀜치 발생 위험이 크다. 따라서 열저항이 크도록 얇고, 구조적 변형이 최소화되는 1 mm 두께의 진공함의 구조를 고안하고 이종접합을 사용하여 내측 진공함은 발열이 적은 알루미늄, 외측 진공함은 열저항이 높은 스테인리스 스틸(SUS 316L)로 진공함을 구성하였다.



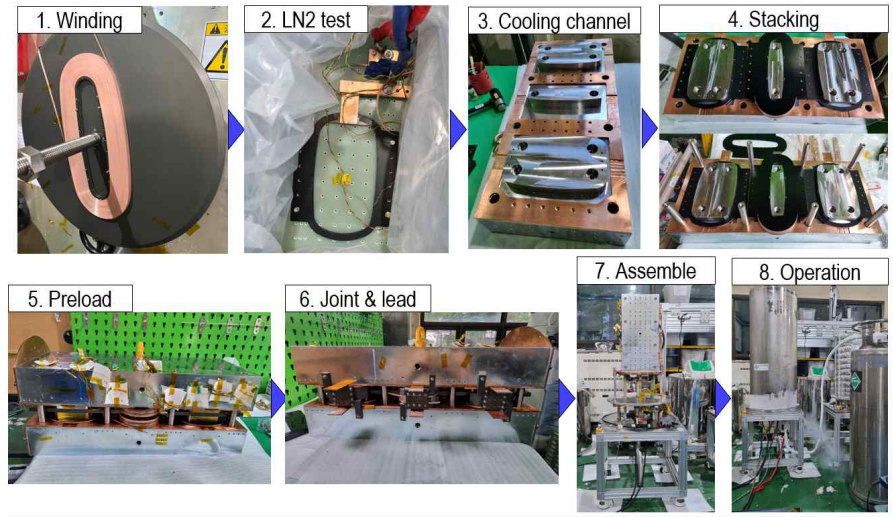
<그림 3.1.7.12> 진공함 구조

<표 3.1.7.2> Wake Impedance 발열 분석

전도도 [S/m]	Loss factor [V/pC]	번치당 발열량 [W]	전체 발열량 [W]
저온 (SUS + Al)	0.007027	0.01243	3.73

(4) 조립

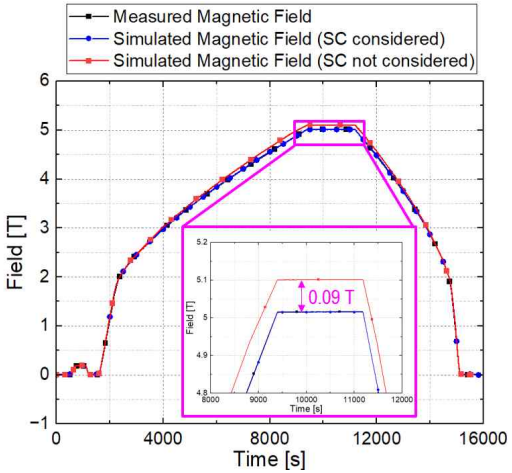
조립은 ① 코일셋의 권선, ② 개별 코일셋들의 질소 냉각 통전 실험, ③ 요크에 냉각 채널 결선, ④ 코일셋 적층, ⑤ 프리로드 체결, ⑥ 접합부와 전류 인입 리드 결합, ⑦ 조립, ⑧ 운전 시험의 순서로 진행하였다. 조립 후 별도의 냉각 시험도 진행했다.



<그림 3.1.7.13> Wavelength Shifter 조립과 실험과정

(5) 실험

연구 과제 종료 이전, 냉각 시험과 통전 시험을 성공적으로 완료했다. 목표한 5 T의 중심 자장 측정에 성공했으며 결과는 <그림 3.1.7.14>와 같다.

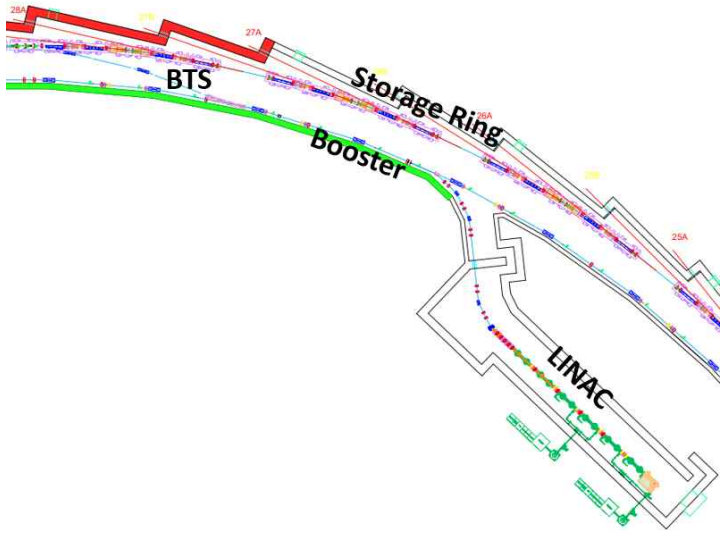


<그림 3.1.7.14> HTS Wavelength Shifter (고성능 삽입 장치: 무절연 고온초전도 삽입 장치) 냉각, 통전 실험 결과, 5 T 구현 성공

3.1.8 진공 시스템 (Vacuum System)

가. 개요 (Overview)

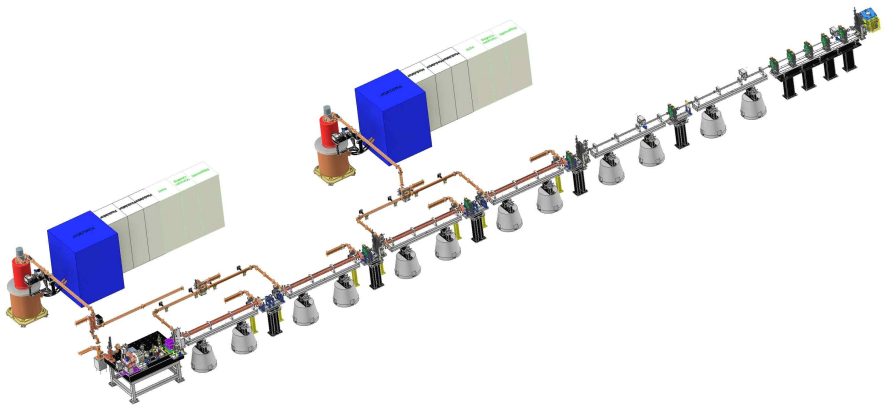
진공 시스템은 전자총에서 발생한 전자를 길이 약 26 m의 선형가속기에서 200 MeV로 가속하여 둘레 약 770 m의 부스터로 보내어 4 GeV로 에너지를 높인 후 저장링에 안정적으로 저장할 수 있도록 적합한 진공 환경을 제공해야 한다. 4 GeV 에너지 및 400 mA의 전류로 저장된 전자빔은 둘레 약 800 m의 저장링을 돌며 약 420 kW의 강한 방사광을 발생시키는데 이 중 극히 일부분만 빔라인으로 제공되고 대부분은 진공장치에서 냉각된다. 삽입 장치와 이극 자석에서 발생한 광자빔을 빔라인으로 전송하기 위해 저장링 진공장치에 적절한 출구가 제공되어야 한다. <그림 3.1.8.1>은 전자빔 가속장치의 개요도이다.



<그림 3.1.8.1> 선형가속기, 부스터, 빔전송선 및 저장링 개요도

나. 선형가속기 진공 시스템 (Linac Vacuum System)

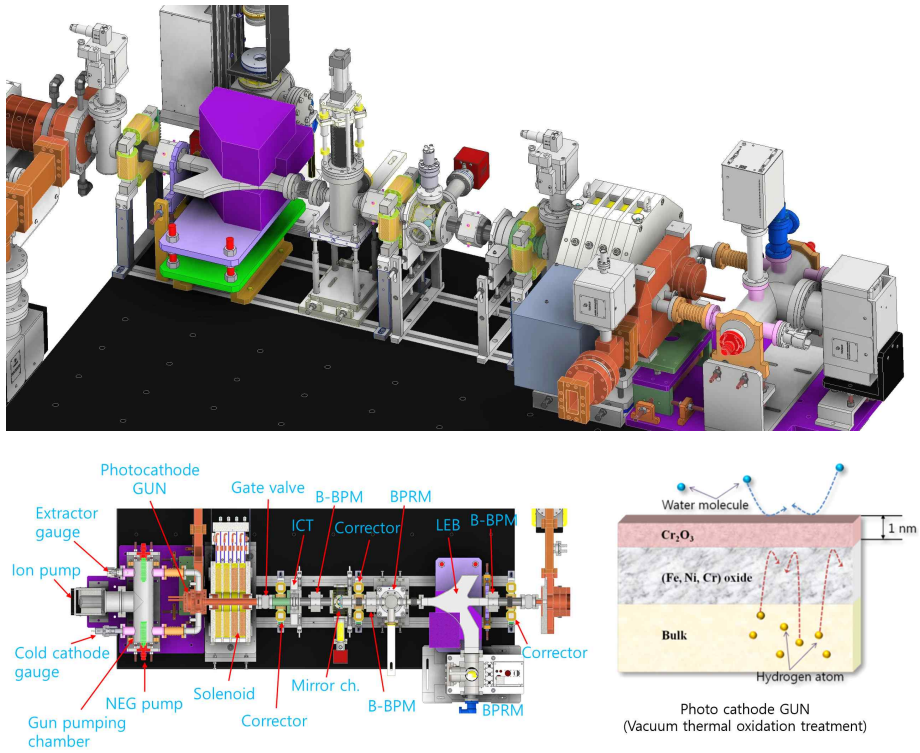
선형가속기 진공시스템은 전자총, 가속관, 그리고 진단장치로 구성된다. 전자빔 발생 장치인 광음극 전자총의 수명은 진공도에 매우 강하게 의존하기 때문에 전자총 주변의 진공도는 10^{-10} mbar 이상을 유지해야 한다. 가속관 및 도파관의 진공도는 RF break down과 electron scattering을 고려하여 10^{-8} mbar 이상이 요구된다. 선형가속기 진공시스템의 초고진공 혹은 극고진공을 달성하기 위해 장치 주요 위치에 이온펌프와 게터펌프를 설치하여 원하는 진공을 유지할 수 있게 하였고, 진공도 모니터링을 위해서 열음극형 극고진공 게이지와 냉음극형 초고진공 게이지를 사용하였다.



<그림 3.1.8.2> 선형가속구간의 장치 구성도

선형가속기 진공 시스템은 전자빔을 생성하는 광음극 전자총과 에너지를 200 MeV까지 가속 시키기 위한 4개의 가속관 그리고 고출력의 고주파를 전달하기 위한 도파관으로 구성되어 있다. 전자총 표면이 카본 화합물 등의 particle에 의해 오염되면 dark current가 발생하여 전자총 수명에 직접적인 영향을 끼치게 된다. 따라서 전자총의 진공 배기를 위해 설치되는 전자총 진공 용기의 진공도는 광음극의 수명을 최대한 보장하기 위해 10^{-10} mbar 이상을 유지하여야 한다. 이 요구사항을 만족시키기 위해 전자총 진공시스템은 60 L/s 배기성능을 가진 스퍼터 이온펌프와 400 L/s 배기성능의 비증발 게터의 조합으로 구성하였다. 또한 전자총 진공용기는 스테인리스 스틸 재질의 표면에 진공 열산화 처리를 통하여 밀도가 높은 크롬 산화물을 형성시켜

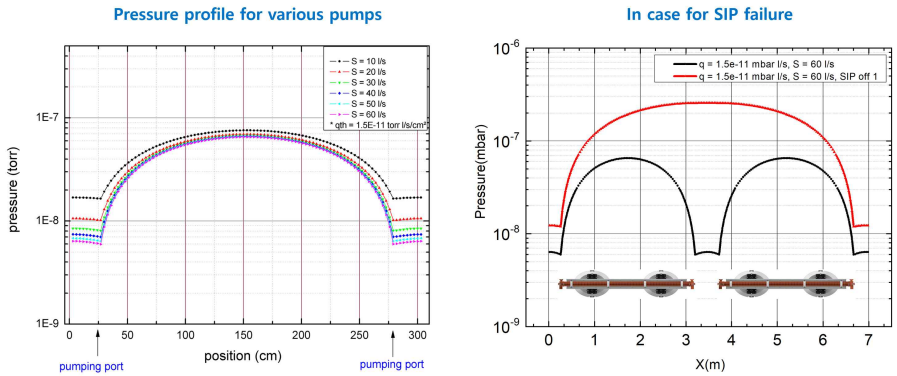
표면 기체 방출률을 충분히 억제시켜야 한다. 전자총 진공용기의 극고진공 (10^{-11} mbar 이상) 진공도를 계측하기 위해서는 X-ray effect와 ESD (Electron stimulated desorption)에 의한 효과를 낮추어 보다 정확하게 극고진공을 측정할 수 있는 Extractor 게이지를 사용하고 추가적으로 Interlock response time이 빠른 냉음극형 초고진공 게이지를 사용하여 진공 burst 발생 시 빠른 시간 안에 진공밸브가 작동하여 전자총 및 클라이스트론 등의 장치를 보호할 수 있게 하여야 한다.



<그림 3.1.8.3> 전자총과 가속관 사이 구간의 장치 구성도

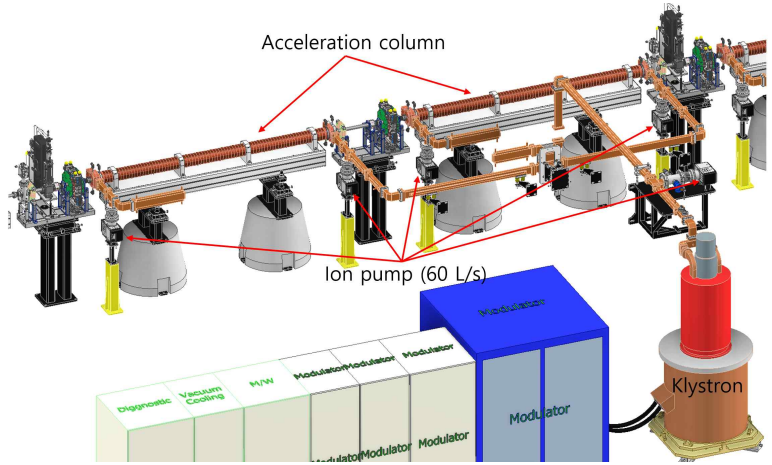
선형가속구간에는 2,980 mm 길이의 가속관이 4대 설치되고, 가속관 사이 구간에 위치하는 다양한 전자빔 진단장치 및 전자석으로 구성되어 있다. 클라이스트론으로부터 두 개의 가속관에 연결되어 고주파를 전달하는 통로 기능을

하는 도파관의 길이는 대략 20 m이다. 도파관은 열 방출율(q_{th})이 3 × 10^{-11} mbar L/s cm^2 이하인 무산소동으로 제작되며, 내부 크기는 WR284 기준인 34 × 72 mm로 충분한 컨덕턴스를 가지고 있으므로 초고진공(UHV)을 얻기에 충분하다. 반면 가속관은 도파관과 동일한 열 방출율이 낮은 무산소동으로 제작되긴 하지만 내부 지름이 22 mm로 좁고, 가속관 길이 또한 3 m로 길기 때문에 진공 배기를 위한 컨덕턴스가 낮다. 이러한 컨덕턴스가 제한적인 진공시스템의 진공 요구조건을 충족시키기 위해서는 분산 배기(distributed pumping) 방법을 채택하는 것이 유리하지만, 가속관 옆면에 진공펌프를 설치할 수는 없으므로 매 가속관의 양 끝단에 60 L/s 배기속도를 가진 이온펌프를 설치하여 최대한 균일하게 압력 분포를 유지할 수 있게 하였다.



<그림 3.1.8.4> 가속관 내부의 압력 분포

가속관 및 도파관 진공시스템은 RF break down과 electron scattering을 방지하기 위해 10^{-8} mbar 이상의 초고진공을 유지해야 한다. 실제로 RF break down 현상을 막기 위해서는 10^{-7} mbar 이상의 진공이 필요하고, electron scattering으로부터 장치를 보호하기 위해서는 10^{-5} mbar 이상을 반드시 유지해야 한다. 진공시스템 전체의 수명과 안전율을 고려한다면 장치 구축 후 초기 진공도는 적어도 5 × 10^{-8} mbar 이상을 유지해야 한다. RF 길들이기 후 진공시스템의 평균 진공도는 5 × 10^{-9} mbar 이상의 기저 진공도를 유지하고 전자빔이 인가된 빔 운전 중 진공도는 2 × 10^{-8} mbar 이상을 유지하는 것을 목표로 하고 있다.



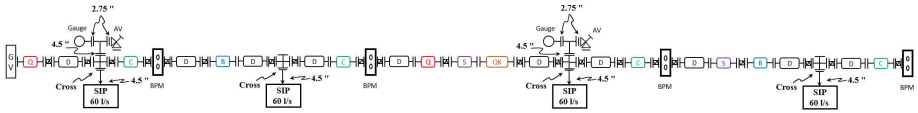
<그림 3.1.8.5> 선형가속기 가속 모듈의 진공시스템 구성도

다. 부스터 진공시스템 (Booster Vacuum System)

○ 개요 및 요구 진공도

부스터 진공 시스템은 선형가속기로부터 전달받은 0.2 GeV의 전자를 4 GeV로 가속하여 저장링으로 보내는 데 최적의 진공 환경을 적합한 크기에 맞게 제공해야 한다. 부스터는 최대 1.2 mA의 전자 뭉치를 250 msec의 전자석 ramp-up 시간에 가속시킨다.

부스터는 총 30개의 cell로 구성되어 있다. 이 중 4개의 cell은 5.02°의 휨 각도를 갖는 이극 자석 1개와 6.07° 휨 각도의 이극 자석 1개, 사극 자석 2개로 구성되어 있으며 저장링 “high-beta” 구간 근처에 위치한다. 또한, 6.07° 휨 각도의 이극 자석 2개와 사극 자석 3개, 육극 자석 2개로 이루어진 26 cell이 반복되는 구조로 배치된다. 진공 시스템의 효율적인 운영을 위해 한 cell 당 한 대의 진공 게이트밸브를 설치하여 30개의 진공 섹터로 구분한다.



<그림 3.1.8.6> 부스터 한 셀의 진공시스템 개요 (B: 이극 자석 챔버,
Q/QK: 사극 자석 챔버, S: 육극 자석 챔버, C: 교정 자석 챔버, D: 직선 구간 챔버)

진공 챔버의 내경은 "beam stay clear" 및 자석의 수직 간격을 고려하여 모두 원형 챔버로 제작된다. 이극 자석 챔버는 지름(내경) 24 mm, 사극 및 육극 자석 챔버는 지름 32 mm이며 자석이 없는 직선구간은 38.7 mm로 제작된다.

부스터는 전자를 가속하기 위해 전자석의 자기장 세기를 변화시키는데 이때 진공 챔버의 표면에 유도 전류가 형성되므로 이에 의한 전자빔의 영향을 고려해야 한다. 이러한 영향은 진공 챔버의 두께와 관련이 있다. 짧은 가속 주기 동안에는 기체 분자와의 산란으로 인한 전자빔 손실을 무시할 수 있으므로 약 10^{-8} mbar 수준의 진공도면 충분하다. 진공 챔버 표면으로부터의 열 탈착이 부스터의 주요 기체방출 원인으로 작용하며, 방사광에 의한 기체방출은 불과 수 %에 불과하다.

○ 진공 챔버의 맴돌이 전류 가열 효과

맴돌이 전류 (eddy current) 효과를 최소화하기 위해 이극 자석 진공 챔버의 재료는 높은 전기저항을 가져야 한다. SUS 316L은 전기저항이 상대적으로 높고 기계적 강도가 우수하며 자기 투자율이 낮다. 또한, 가공이 쉽고 진공 특성이 월등하므로 부스터 진공 챔버의 재료로 적합하다. 전자석에 의해 자기장 펄스가 발생하는 동안 맴돌이 전류가 그 자기장의 변화에 반대하여 진공 챔버에 형성되게 되고 전자빔에 영향을 미친다. 진공 챔버의 단면이 원형일 때, 맴돌이 전류는 (수식 3.1.8.1)과 같이 근사할 수 있다.

$$I_{eddy} = \frac{\dot{B} d R^2 \sin\phi}{\rho_r} \quad \text{(수식 3.1.8.1)}$$

d는 챔버 벽의 두께이고, R은 챔버 단면의 반지름이며 단위는 m이다. ρ_r은 316L 스테인리스강의 전기저항인 7.4 × 10^{-7} Ω-m이고, 진공 챔버의 단면이 원형일 때 ϕ은 90°이다. 자기장의 변화는 2 Hz로 0.2 GeV에서 4 GeV로 올리고 내릴 때 $\dot{B}$의 최고는

5.8 T/sec가 된다. Eddy current에 의해 진공 챔버에 발산되는 단위시간 당 에너지는 (수식 3.1.8.2)와 같다.

$$P_{eddy} = \frac{4\dot{B}^2 d\, LR^3}{\rho_r}\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\sin(2\phi)}{4}\right) \quad \text{(수식 3.1.8.2)}$$

부스터의 이극 자석 챔버의 경우 단면의 반지름은 12 mm이고 길이 L은 1.45 m이다. 이때 진공 챔버에 발생되는 맴돌이 전류는 약 0.79 A가 형성되며 이극 자석 1개당 평균 전력은 약 0.25 W이고, 챔버의 단위 면적 당으로는 10^{-3} W/cm^{2}이다. 따라서 이극 자석 챔버의 온도상승 및 이로 인한 기체 분자의 열 탈착량은 미미할 것으로 예상된다. 다극 자석 챔버의 경우 또한 단위 면적당 평균 전력이 10^{-3} W/cm^2 이하이므로 미미할 것으로 예상된다.

<표 3.1.8.1> 이극 자석 챔버의 eddy current 및 단위 시간당 발산되는 에너지

	$\dot{B}$ (T/s)	ρ_r (Ω-m)	d (m)	ϕ (rad)	R (m)	L (m)	I_{eddy} (A)	P_{eddy} (W)
이극 자석	5.8	7.4 × 10^{-7}	0.0007	1.57	0.012	1.45	0.79	0.25

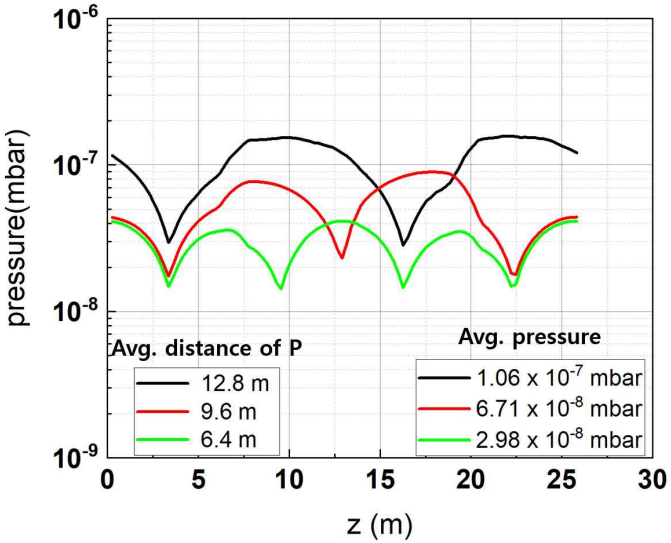
○ 광 유도 기체방출 (Photon Stimulated Desorption; PSD) 및 도달 진공도

부스터의 진공 챔버는 대부분 SUS 316L로 제작된다. 깨끗한 스테인리스강 표면에서의 열 유도 기체 방출량(thermal desorption)은 진공 배기 시작 후 몇 시간 이내에 단위 면적 당 1 × 10^{-10} mbar l/s cm^2 이하 또는 단위길이 당 1.2 × 10^{-7} mbar l/s m 이하로 감소하며 주요 기체 성분으로는 물, 수소, 일산화탄소 등이 있다. 두 번째 기체방출 요인은 광 유도 기체방출(PSD)이다. 전자빔이 이극 자석을 통과하면 강한 X-선을 방출하는데, 이 광자들이 챔버의 벽과 상호작용하여 광전자를 생성하고 연쇄 반응을 유발하여 기체 분자들을 표면에서 탈착시킨다. 부스터 전체의 광량 Γ는 다음과 같다.

$$\Gamma = 8.08 \times 10^{17} I E \quad \text{(수식 3.1.8.3)}$$

여기서 I는 전자빔의 전류로 단위는 mA이고 E는 전자빔의 에너지이며 단위는 GeV이다. 이 식에 의해 1.2 mA 전류에 대해 0.2 GeV에서 4 GeV까지 250 msec 동안 가속 중에 발생하는 총 광자 수는 약 2.0 × 10^{18} 개로 예상할 수 있다. 방출되는 기체 분자의 개수는 표면의 PSD율에 비례하여 변동되며, 같은 물질임에도 표면의 상태에 따라 다르다. 부스터에서 광자는 대부분 진공 챔버 내부의 중심 평면의 좁은 영역에 집중되므로, 시운전 중 짧은 시간 안에 1 × 10^{-4} 이하의 PSD율에 도달할 수 있다. 이를

기준으로 자석 챔버의 기체 방출률은 단위길이 당 약 5 × 10^{-9} mbar l/s m의 값을 예상할 수 있으며, 이는 열 유도 기체방출에 비해 약 4% 수준으로 미미하다.



<그림 3.1.8.7> 펌프 간격에 따른 진공도 분포 및 평균 진공도

따라서 부스터의 진공도 분석은 열 유도 기체방출만 고려하면 충분하다. SUS 316L의 전형적인 단위 면적당 기체 방출률 값인 1 × 10^{-10} mbar l/s cm^2 을 이용하여 부스터 1 cell에 대해 진공펌프 설치 간격에 따른 진공도 분포를 계산하면 <그림 3.1.8.7>과 같다. 계산 결과에 따르면 배기속도 60 l/s의 이온펌프를 6.5 m 이내의 간격으로 1 cell 기준 4대 설치하면 평균 진공도 3 × 10^{-8} mbar 이상에 도달할 수 있다. 또한, 터널 내 설치 작업 중 가열탈기체 작업을 수행한다면 더 좋은 진공도가 예상된다. 가속 중 전자빔의 손실은 전자와 원자핵 간 탄성 충돌 산란 및 제동복사(bremsstrahlung) 산란에 의해 일어난다. 그 양은 1 × 10^{-7} mbar의 진공도를 가정할 때 250 msec 동안 1 × 10^{-4} 이하로 미미할 것으로 예상된다.

<표 3.1.8.2> Molflow$^+$ 전사모사 변수 및 평균 압력 계산 결과

Molflow$^+$ 전산모사 변수				결과
기체방출률 (H_2)	펌프 배기속도 (l/s)	펌프 평균 거리 (m)	Cell 당 펌프 개수	평균 압력 (mbar)
1 × 10^{-10} mbar l/s cm^2	60	12.8	2	1.1 × 10^{-7}
		9.6	3	6.7 × 10^{-8}
		6.4	4	3.0 × 10^{-8}

○ 진공 챔버 설계, 열-구조 해석 및 제작 방법

부스터 진공 챔버의 소재는 SUS 316L로 이극 자석 챔버의 내경 24 mm의 두께 0.7 mm이고, 휨 각도 6.07° 및 5.02°의 곡선 챔버이며 길이는 약 1.5 m이다. 다극 자석 진공 챔버는 직선형 챔버이며 내경은 32 mm에 두께 0.7 mm이며, 길이는 최대 약 1.3 m이다. 자석이 없는 직선구간 챔버는 일반 2.75" 상용 도관을 사용한다. 이극 진공 챔버의 대기압에 대한 응력(stress) 및 변형량을 계산하기 위해 ANSYS 구조 해석을 실시하였다. <표 3.1.8.3>의 구조해석 결과 및 진공 특성, 재료의 공급과 제작성 등을 고려하여 부스터 진공 챔버는 두께 0.7 mm의 SUS 316L로 제작하도록 한다.

<표 3.1.8.3> 이극 자석 챔버의 소재별, 두께별 구조 해석 및 맴돌이 전류 계산 결과

재료	두께 (mm)	변형 (μm)	최대응력 (MPa)	I_{eddy} (A)
SUS 316L	0.3	-267	4.96	0.339
	0.7	**-120**	**2.45**	**0.790**
	1.0	-86	1.77	1.129
	1.2	-74	1.50	1.354
Inconel 625	0.3	-321	4.95	0.199
	0.7	-144	2.41	0.464
	1.0	-104	1.76	0.663
	1.2	-87	1.50	0.795

이극 자석 진공 챔버는 원형 파이프를 가압 성형하여 단면 모양을 만들고 롤러를 사용하여 필요한 곡률만큼 곡선으로 변형하여 제작한다. 곡선형 파이프 양 단은 원형 단면에 맞게 경사면 연결부와 접합 후 콘플랫(CF) 플랜지와 용접한다. 다극 자석 진공 챔버는 원형 파이프를 BPM 블록과 용접한 후 배기 포트 및 벨로우즈, 콘플랫 플랜지와 용접하여 제작한다.

○ 진공도 모니터링 및 제어

한 cell 당 4개의 60 l/s 이온펌프가 설치되므로 이온펌프 제어기로 측정하는 펌프 전류를 이용하여 부스터의 진공도를 대부분 모니터링 할 수 있다. 또한 냉음극 진공 게이지를 한 cell 당 2대 설치하여 초기 진공 작업 중 진공 모니터링에 사용하거나, interlock 시스템에 연결하여 진공 사고 발생 시 진공밸브를 차단하고 RF 시스템, 입사 장치 등 주요 장치의 비상 정지에 사용한다.

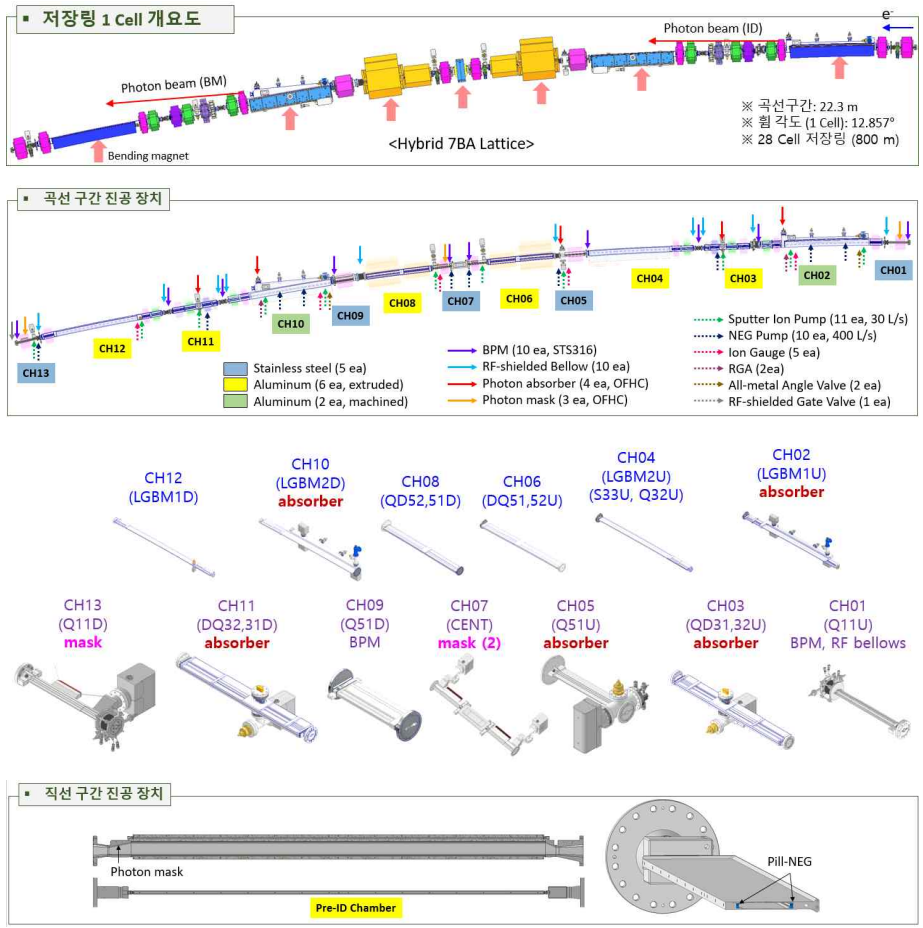
라. 저장링 진공 시스템 (Storage Ring Vacuum System)

○ 개요 및 요구 진공도

저장링의 전자빔 에너지는 4 GeV이고 복수의 전자빔 번치를 400 mA 전류까지 저장하며 이극 자석에 의해 방출되는 방사광의 단위 시간당 에너지는 400 kW에 달한다. 저장링 진공시스템은 전자빔 손실을 최소화하기 위해 작은 임피던스를 제공해야 하며 긴 빔 수명을 유지하기 위해 초고진공 상태로 유지되어야 한다. 저장링 진공시스템은 초고진공을 유지하기 위한 진공 챔버와 펌프, 게이지, 밸브 및 제어 장치로 구성된다. 4GSR의 저장링 진공시스템을 구축하기 위해 몇 가지 도전적인 기술적 과제가 해결되어야 한다. (1) 기존 저장링에 비해 많은 수의 자석이 촘촘하게 설치되어 진공장치를 위한 공간이 좁으므로 이에 대한 대비가 필요하다. (2) 좁은 자극 간격의 자석에 맞추기 위한 진공 챔버의 좁은 단면으로 인해 낮아지는 기체 컨덕턴스 문제를 해결해야 한다. (3) 반대 이극자석(Reverse Bending Magnet; RB)의 설치로 세밀한 방사광 경로 조사가 필요하다. RB로 인한 열부하를 적절히 흡수하고 다른 가속기 장치들을 보호하기 위한 설계가 필요하다. (4) 1.96 T의 강한 중앙 이극 자석(Center Bending Magnet; CB)에서 발생한 방사광에 의한 고밀도 열부하를 적절하게 흡수해야 한다.

저장링 진공 시스템은 약 22.3 m의 곡선 구간과 약 5.9 m의 직선 구간으로 구성된 28개의 cell로 이루어진다. 각 곡선 구간은 이극 자석, 사극 자석, 육극 자석, 팔극 자석, 교정 자석 및 빔 위치 측정기(Beam Position Monitor; BPM)를 포함한다. 또한 방사광을 빔라인으로 보내기 위한 빔 인출관도 곡선 구간에 설치된다. 직선구간 중 한 군데는 부스터링에서 저장링으로 빔을 입사하기 위한 입사 구간으로 사용되고, 3구간에는 10대 내외의 상전도 고주파 공동(Normal conducting Radio Frequency cavity; NRF cavity)이 설치된다. 따라서 28개의 직선구간 중 최대 24개에 삽입 장치를

설치하여 빔라인에 방사광을 제공할 수 있다. 곡선 구간의 양 끝에는 고주파 쉴드 형 게이트 밸브(RF shielded gate valve)를 설치하여 직선구간과 진공을 분리할 수 있다.



<그림 3.1.8.8> 저장링 한 cell의 개요도 및 진공 시스템 구성도

저장링의 평균 압력은 1 × 10^{-8} mbar 이하로 유지될 수 있도록 설계되어야 한다. 이 수준의 진공도에서 잔류 기체 성분은 수소가 대부분이며 일산화탄소가 일부 섞여있게 된다. 잔류 기체가 전자빔 수명에 미치는 영향은 전자-전자 간 탄성충돌산란 (σ_e), 전자-원자핵 간의 탄성충돌산란 (σ_N) 및 전자-원자핵 간의 비탄성충돌산란 (bremsstrahlung,

σ_B)의 세 가지 기작으로 인한다. 충돌 단면적 σ_e와 σ_N은 전자빔의 에너지가 증가할수록 서서히 감소하는 반면 σ_B는 GeV 수준에서는 전자빔 에너지에 의존하지 않는다. 세 종류의 충돌 단면적은 공통적으로 잔류 기체의 원자번호 Z에 비례한다. 빔-기체 산란에 의한 수명 τ_{B-G}는 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_{B-G} = 1/nc(\sigma_e + \sigma_N + \sigma_B) \quad \text{(수식 3.1.8.4)}$$

여기서 c는 전자의 속도 3 × 10^{10} cm/sec이고 n은 기체 밀도로서 압력 p [mbar]에 대해 2.4 × 10^{16} × p개/cm^3로 계산할 수 있다. 1 × 10^{-9} mbar의 수소 85%, 일산화탄소 10% 등의 혼합기체에 대한 빔-기체 산란 수명은 다음 표와 같다. 1 × 10^{-8} mbar 수준의 진공도에서 빔-기체 산란 빔 수명 τ_{B-G}는 12시간 정도로서 번치 내 전자 간 산란에 의한 수 시간 정도의 Touschek 빔 수명에 비해 충분히 길다. 그럼에도 불구하고 전자빔 간의 짧은 번치 간격으로 인해 이온화된 기체 입자가 구속되어 이온 불안정을 일으킬 수 있으므로 10^{-9} mbar 이상의 진공도를 유지하는 것이 바람직하다.

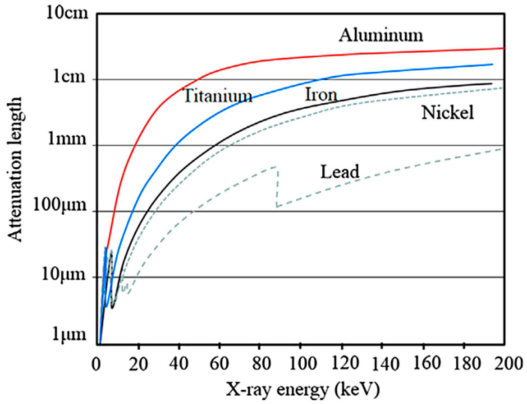
<표 3.1.8.4> 빔-기체 산란단면적 및 10^{-9} mbar의 수소 85%, 메탄 2%, 물 1%, 일산화탄소 10%, 이산화탄소 2% 혼합기체에 대한 빔-기체 산란 수명

▪ Total beam-gas lifetimes (nTorr h)	H_2	CH_4	H_2O	CO	CO_2	He
▷ W/O IVUN	751.67	69.20	77.30	30.66	18.93	
	85.0%	2.0%	1.0%	10.0%	2.0%	
	844.319	3460.06	7729.577	306.595	946.537	
170.44						
▷ With IVUN	555.98	50.18	55.80	21.87	13.49	386.06
	85.0%	2.0%	1.0%	10.0%	2.0%	0.0%
	654.092	2508.87	5580.106	218.686	674.7350	386056097
122.53						
▪ Bremsstrahlung lifetimes (nTorr h)	H_2	CH_4	H_2O	CO	CO_2	
▷ With or W/O IVUN	1455.45	144.42	164.18	68.47	42.39	
	85.0%	2.0%	1.0%	10.0%	2.0%	
	1712.296	7221.213	16417.58	684.744	2119.442	
368.24						
▪ Coulomb lifetimes (nTorr h)	H_2	CH_4	H_2O	CO	CO_2	
▷ W/O IVUN	1554.49	132.86	146.06	55.52	34.21	
	85.0%	2.0%	1.0%	10.0%	2.0%	
	1828.814	6643.129	14606.458	555.175	1710.394	
317.29						
▷ With IVUN	899.64	76.89	84.53	32.13	19.80	
	85.0%	2.0%	1.0%	10.0%	2.0%	
	1058.396	3844.602	8453.246	321.298	989.862	
183.63						

○ 진공 챔버 소재의 선택

알루미늄 합금은 복잡한 단면도 간단한 압출 방식으로 제작할 수 있어 전자빔 통로, 펌프 설치를 위한 ante-chamber, 냉각수 통로 및 방사광 인출 통로 등으로 구성된 일반적인 전자 저장링의 진공 챔버로 널리 사용되었다. 알루미늄 합금은 자기 투과율이 낮고 가공 및 용접이 쉬우며 열 및 전기전도도가 높은 장점을 갖고 있다. 반면 알루미늄 합금은 방사광에 의한 높은 열 밀도에 취약하므로 별도의 구리합금으로 된 광자막이(photon absorber)를 설치하여 방사광을 차단해야 한다.

한편, 고에너지 및 고전류 전자 저장링에서는 무산소동(OFC) 또는 특수 구리합금이 진공 챔버의 소재로 사용된다. 구리의 높은 열전도도와 강도뿐만 아니라 알루미늄에 비해 원자번호가 높아 고에너지의 X-선을 더 많이 차단하여 방사선에 의한 손상으로부터 주변장치를 보호하는 특성이 우수하다. 방사광을 진공 챔버의 벽면에서 흡수하는 분산형 광자막이 시스템을 적용한다면 X-선 감쇠 길이를 고려하여 알루미늄보다는 구리합금이 유리하다. <그림 3.1.8.9>는 금속 종류별 X-선 감쇠 길이를 광자에너지에 따라 나타낸 그래프이다.



<그림 3.1.8.9> 알루미늄, 구리, 납의 광자에너지에 대한 X-선 감쇠 길이 비교 그래프

무산소동은 접합을 위해 일반적인 TIG 용접이 아닌 브레이징(brazing) 또는 전자빔용접(EBW)이 필요하다. 두 방법 모두 진공 중에서 작업이 이루어지는데 진공 챔버의 길이가 길 경우 수용할 수 있는 장비가 제한적이라는 점은 설계단계에서 고려되어야 한다. 크롬-지르코늄-구리합금(CuCrZr)은 구리를 기반으로 하는 석출 경화 합금으로서 높은 전도도 및 강도를 가지며 TIG 용접이 적용 가능한 장점 때문에

CuCrZr 광자막이가 방사광가속기에 사용되기 시작하였다. Glidcop® 또한 가속기에서 고밀도의 열부하가 발생하는 부분에 특수 재료로 사용되고 있으나 브레이징에 의한 접합만 가능하고 소재 비용이 높다는 단점이 있었다. 이에 비해 CuCrZr 합금은 그 자체로 콘플랫 플랜지의 칼날부(knife-edge)를 형성할 수도 있고 TIG 용접을 통해 스테인리스강과의 이종접합도 가능하며 Glidcop®에 비해 소재 수급이 용이하다.

저장링에서 고밀도의 열부하 흡수가 필요한 부분은 CuCrZr 합금이 진공 소재로 사용되고, 복잡한 단면의 압출형 진공 챔버가 필수적인 부분은 알루미늄 합금이 사용될 것이다.

<표 3.1.8.5> 다양한 구리합금의 열전도도 및 기계적 강도 비교표

Copper Alloys	Others [%]	λ [W/m-K]	Tensile [MPa]	Yield [MPa]	Fatigue [MPa]
OFC Cu (C10100)	-	391	310	275	120
CuCrZr (C18100)	< 1.2, < 0.2	324	460	430	-
CuCrZr (C18150)	**< 1.5, < 0.2**	**323**	**413**	**345**	**210**
CuCr (C18200)	0.6~1.2	171	400	290	-
CuSn (C50500)	1.25	208	483	476	197
CuSn2 (C50700)	1.6-2.2	140	300~380	270	-
GlidCop (Al60)	0.15	322	448~496	365~473	-
Al6063 T6	-	> 180	> 190	> 160	70

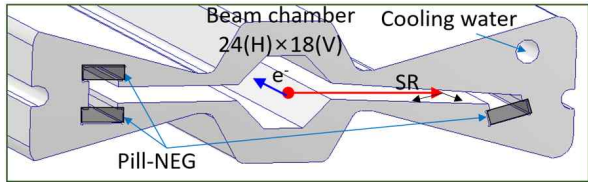
○ 진공 챔버 설계, 열-구조 해석 및 제작 방법

저장링에 설치되는 저장링 사이의 간격이 좁으므로 진공시스템에 필요한 장치를 설치할 공간이 한정되어 있다. 또한 H 형태의 전자석이 설치됨에 따라 수평 방향으로 진공장치를 설치할 공간이 마련되기 어렵다. 따라서 집중형(lumped) 광자막이(photon absorber)나 진공펌프 등을 설치하는 기존의 진공시스템과는 달리 진공 챔버 벽면을 활용하여 연속적으로 기능하는 분산형(distributed) 광자막이와 진공펌프의 도입이 필요하다.

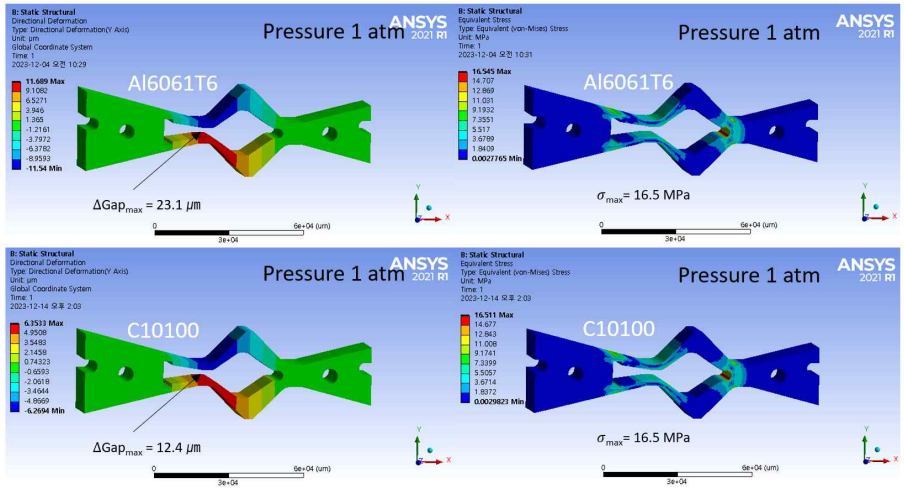
<그림 3.1.8.10>은 분산형 진공시스템의 다극 전자석 구간 저장링 진공 챔버의 단면을 나타낸다. 전자빔은 내부 지름 24 × 18 mm(수평 × 수직)의 팔각 형태의 중심을 지나며 방사광은 대부분 옆면에 난 4 mm 간격의 슬롯을 지나 경사면에 흡수되고 일부는 빔라인으로 연결되는 높이 4 mm의 통로(점선)를 통해 빠져나간다. 전자빔 통로의 양쪽에는 흡수된 열을 식히기 위한 냉각수 채널이 위치한다. 또한

양쪽에는 진공 챔버의 가열탈기체(bake-out) 작업에 필요한 시즈 히터를 삽입할 수 있도록 홈이 마련되어 있다.

방사광을 흡수하는 경사면 바로 아래에는 PSD에 의해 방출되는 기체를 흡수하는 비증발성 게터(Non Evaporable Getter; NEG) 펌프가 설치되는 슬롯이 위치한다. 가속기의 분산형 배기시스템에는 주로 스트립 형태의 NEG 펌프를 사용하였는데, 절연 기능이 있는 지지구조체의 설치를 위한 일정 크기의 공간이 필요하며 곡선으로 휠 수 없다는 제약이 있었다. 여기서는 알약 형태의 pill-type NEG를 도입하여 좁은 공간 및 휘어진 구조에도 설치 가능하다.



<그림 3.1.8.10> 저장링 진공 챔버의 대표 단면



<그림 3.1.8.11> OFC (C10100), Aluminum (Al6061-T6) 진공 챔버의 진공 배기 시 대기압에 의한 응력 및 변형량 비교를 위한 구조 해석 결과

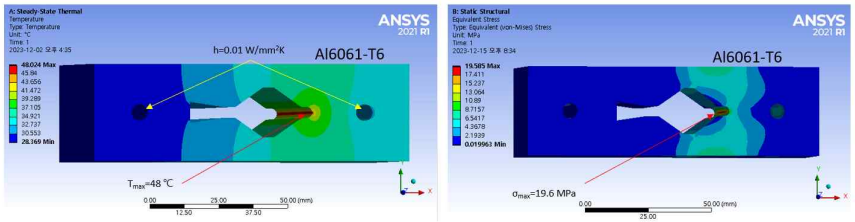
<그림 3.1.8.11>은 진공 배기하였을 때 외부에 가해지는 대기압에 의해 진공 챔버에

가해지는 응력과 변형을 무산소동(C10100) 및 알루미늄 합금(A6061-T6) 소재에 대해 구조 해석한 결과이다. 구조 해석은 ANSYS 프로그램으로 수행하였다. 그림에서 보듯이 대기압에 의한 응력은 16.5 MPa로 비슷하게 계산되었으며 <표 3.1.8.5>의 소재별 인장강도 및 항복강도 허용치 이내이다. 또한 전자빔 통로의 내경은 20 μm 이내로 변형되었으며 옆면의 4 mm 간격은 12.4~23.1 μm 줄어들었는데 진공 챔버의 기능에 문제없는 수준이다.

한편 방사광에 의한 진공 챔버의 온도상승 및 응력을 추정하기 위해 ANSYS 프로그램으로 열-구조 해석을 수행하였다. DQ51에서 방출되는 방사광의 단위 시간당 에너지는 다음 식과 같이 표현된다.

$$P(kW) = \frac{14.08 \times L(m) \times I(A) \times E(GeV)^4}{\rho(m)^2} \quad \text{(수식 3.1.8.5)}$$

여기서 L은 이극 자석 길이, I는 빔 전류, E는 빔 에너지, ρ는 이극 자석의 곡률 반경이다. DQ51의 자기장은 0.56 T, 휨 각도는 1.9°이므로 DQ51 한대 당 약 2 kW의 단위 시간당 에너지를 방출한다. <그림 3.1.8.12>에 표시한 바와 같이 진공 챔버의 경사면에 흡수되는 열 밀도는 13 W/mm^{2}이고 냉각 채널의 대류 계수(convection coefficient) h는 0.01 W/mmK^{2}로 설정할 때, 알루미늄 합금의 온도는 48 ℃까지 상승하였고 이로 인해 19.6 MPa의 응력이 발생한다.



	B	Bend angle	Total power	Source distance	Inc_angle (H)	Inc_angle (V)	Foot print V-height	Thermal load
DQ51U	0.565 T	1.989 °	2.1 kW	0.899 m	1.9 °	90 °	0.17 mm	13 W/mm²

Material	T_{max} (chamber)	T_{max} (Water channel)	σ_{max}
Al6061-T6	48 ℃	33.7 ℃	19.6 MPa

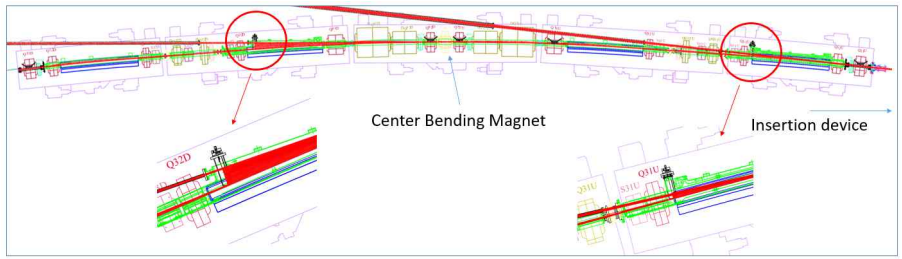
<그림 3.1.8.12> DQ51 상류에서 발생한 방사광에 의한 CH06의 온도상승 및 응력 해석 결과

알루미늄 합금 진공 챔버는 전자빔 통로와 냉각 채널 및 펌프 슬롯을 포함하는 단면으로 압출한 후 굽힘기계로 곡선 구간을 굽힌다. 기계 가공으로 외부를 다듬은 후 양 끝단에 용접으로 플랜지를 접합한다. 알루미늄 플랜지를 사용한다면 강도가 높은 A2019 합금을 사용하며 가스켓은 상대적으로 무른 A1050 계열의 순 알루미늄을 사용한다. 알루미늄과 스테인리스강을 마찰용접으로 접합하여 플랜지를 만들고 압출된 알루미늄 튜브와 TIG 용접으로 접합하는 방법도 있다.

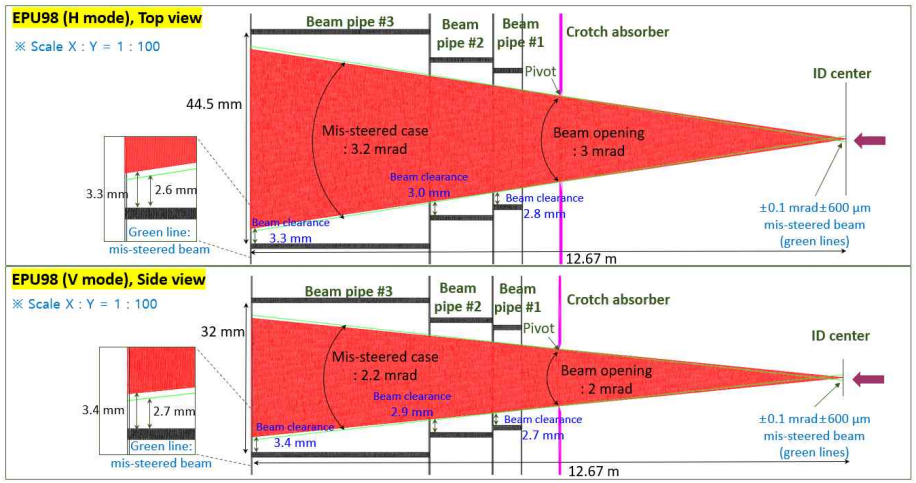
○ 빔라인 광자빔 인출 포트 및 광자막이 설계

다목적 방사광가속기에서 제공되는 광자빔은 삽입 장치와 이극 자석의 2종류 광원으로부터 발생한다. 진공시스템은 저장링에서 발생한 광자빔을 빔라인에 적절하게 제공함과 동시에 강력한 방사광으로부터 진공장치를 보호해야 한다. <그림 3.1.8.13>은 저장링의 photon fan을 나타낸다. 한 cell 당 2개의 광자빔 인출 포트가 있는데 그 앞에 각각 주 광자막이(crotch absorber)가 위치하여 일부 광자빔을 빔라인에 제공하고 나머지는 흡수하여 진공 챔버를 보호하는 역할을 한다. 그 외의 위치에서는 냉각 기능이 있는 진공 챔버의 벽면과 마스크 형태의 광자막이가 방사광을 소산시킨다. 주 광자막이의 광자빔 통과 각도(opening angle)는 삽입 장치의 경우 ± 1.5 mrad × ± 1 mrad (수평 × 수직)이고 중앙 이극 자석은 ± 1.5 mrad × ± 0.3 mrad (수평 × 수직)으로 설계되었다.

삽입 장치 중 광자빔의 크기 및 퍼짐각이 가장 큰 EPU98에서 발생한 광자빔을 수용하고 간섭을 피하기 위해 빔 인출 포트에서 빔라인으로 연결되는 진공 챔버의 설계가 이루어졌으며 개요도가 <그림 3.1.8.14>에 표시되었다. 장치 보호를 위한 전자빔 궤도 interlock 조건은 ± 0.1 mrad, ± 400 μm이며 삽입 장치 양단의 전자빔 궤도가 허용 최대치로 어긋나더라도 하류의 진공 챔버는 광자빔에 맞지 않도록 안전하게 설계되었음을 확인할 수 있다.

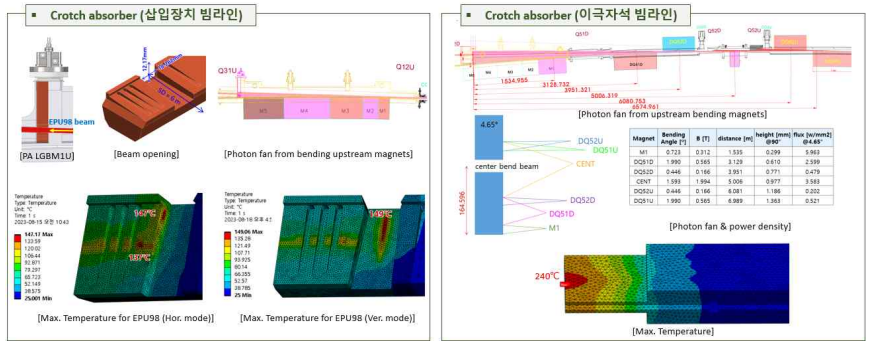


<그림 3.1.8.13> 저장링 한 cell photon fan



<그림 3.1.8.14> 삽입 장치 광자빔 인출 포트의 진공 챔버와 광자빔과의 간격

각 cell 당 2개씩 설치된 주 광자막이의 열해석 결과는 <그림 3.1.8.15>에 나타나 있다. 삽입 장치 광자빔에 의한 광자막이의 최대 온도는 EPU98을 기준으로 약 150 ℃로 계산되었고 중앙 이극 자석에 의한 최대 온도는 240 ℃이다. 삽입 장치용 광자막이의 재료로 무산소동으로 충분하다. 중앙 이극 자석용 광자막이는 CH10 (LGBM2D) 진공 챔버의 좁은 내경으로 인해 냉각 채널을 위험 부위와 충분히 가깝게 제작하기 어려우므로 열부하에 의한 최대 온도가 높다. 따라서 항복응력이 높은 크롬지르코늄합금동을 사용하여 해당 열부하를 충분하게 감당할 수 있도록 설계하였다.



<그림 3.1.8.15> 주 광자막이에 대한 열-구조 해석 결과

○ 기체방출, 진공배기 및 도달 진공도

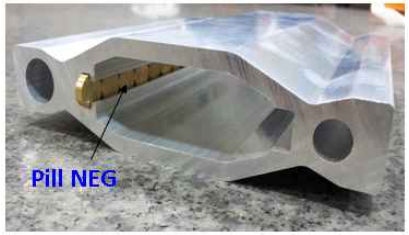
저장링의 도달 진공도(base pressure)는 진공 챔버 내부 표면으로부터의 열유도 기체방출량과 설치되는 진공펌프의 배기 용량에 의해 결정된다. 배기 시작 며칠 후 챔버의 기체방출률은 1×10^{-11} mbar-l/s/cm^2 정도이고 대부분 수소와 물로 구성된다. 이는 단위길이 당 2.5×10^{-8} mbar-l/s/m에 해당하며 가열탈기체 처리 후에는 더 낮아진다. 따라서 단위길이 (m) 당 수백 l/s 정도의 배기속도를 가지는 진공펌프를 설치하면 10^{-10} mbar 수준의 진공도를 얻을 수 있다.

빔 운전 중 저장링의 압력은 광유도 탈착(PSD)에 의해 결정된다. 전자빔이 이극 자석을 통과할 때 경로가 휘면서 엄청난 양의 광자를 방출하며, 이들 광자는 하류의 진공 챔버 벽에 부딪혀 광유도 전자를 발생시킨다. 이때 발생한 이차 전자는 다시 챔버 벽을 두드리며 기체방출을 유도한다. PSD율 η는 광자 한 개당 방출되는 기체분자의 개수를 의미하며, 광자의 에너지와 입사각에 약하게 의존하고 챔버 벽면의 표면상태에 강하게 의존한다. 초기 PSD율은 수 퍼센트 정도로 높지만, 운전이 계속되면서 광자 노출량이 많아지면 급격하게 줄어든다. 저장링에서 빔 운전 중 광량 Γ는 다음과 같이 나타낸다.

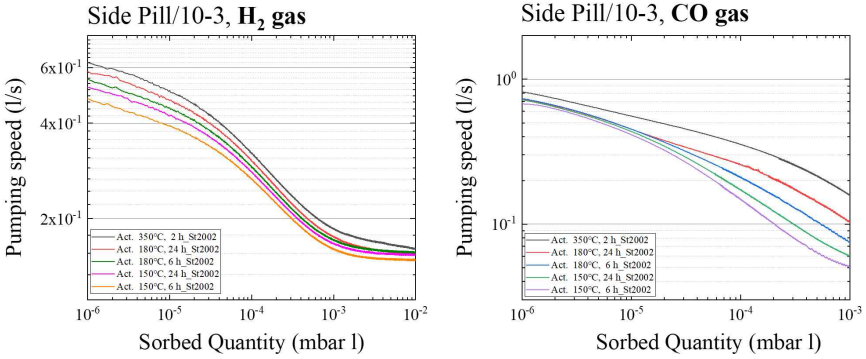
$$\Gamma = 8.08 \times 10^{17} I(mA) E(GeV) \quad \text{(수식 3.1.8.6)}$$

4 GeV, 400 mA일 때 저장링 전체에서 Γ는 1.3 × 10 + 21 photons/s이며 단위길이당 1.6 × 10 + 18 photons/s/m이다. η가 1×10^{-6}이라면 1.6 × 10 + 12 molecules/s/m 또는 6×10^{-8} mbar-l/s/m의 기체가 방출된다. 따라서 10^{-10} mbar 대의 진공도를 만들기 위해 100 l/s/m 이상의 진공펌프가 요구된다.

Zr-V-Fe 합금으로 이루어진 NEG 스트립의 배기속도는 1,000 l/s/m 이상으로 용량 측면에서는 분산형 진공펌프로 충분하나, 진공 챔버 내부의 좁은 공간으로 인해 설치에 제약이 있다. <그림 3.1.8.16>은 pill-type NEG를 설치한 압출형 챔버 사진이다. 사진과 같은 pill-type NEG는 PLS-II 저장링에 설치되어 수년간 운영되면서 분산형 진공 배기 성능이 검증되었고 입자 오염 문제도 발생하지 않았다. <그림 3.1.8.17>과 같이 pill-type NEG는 기존의 NEG 스트립에 비해 배기속도가 낮으나 배기 효율을 높일 수 있다면 좁은 공간에도 설치 가능한 장점으로 인해 저장링 분산형 진공시스템에 적합한 선택이 될 수 있다. 320 ℃, 24 h 활성화 조건에서 단위길이 당 배기속도는 50 l/s/m이므로 산술적으로 2열로 나열하면 100 l/s/m 용량을 얻을 수 있으나, 저장링에서 진공 챔버를 200 ℃ 이상 가열하기 어려우므로 저장링 운전 상황에서 100 l/s/m 용량을 가정하기는 어렵다.

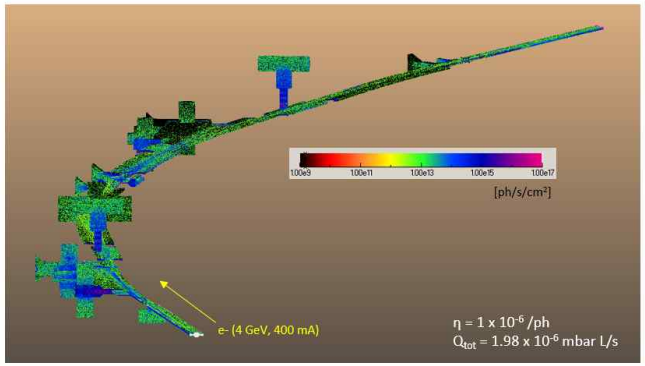


<그림 3.1.8.16> PLS-II에 설치되어 운영 중인 pill-type NEG 알루미늄 압출챔버 사진



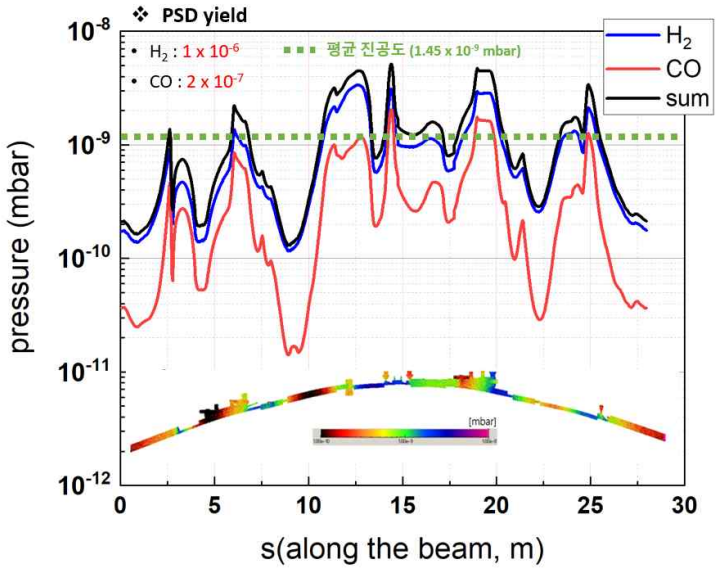
<그림 3.1.8.17> Pill-type NEG의 배기성능 측정 결과

"Synrad"와 "Molflow" 프로그램을 사용하여 PSD를 계산하고 이와 연동하여 저장링 운전 중 진공도 분포를 시뮬레이션하였다. <그림 3.1.8.18>은 저장링에서 발생하여 단위 시간당 진공 챔버에 입사하는 광자의 개수를 Synrad로 시뮬레이션한 결과이며, 저장링 한 cell에서 발생하는 광자의 개수는 4.58 × 10 + 19 ph/s/cell이다. 저장링의 운전이 계속되어 1,000 Ah 이상의 충분한 조사량이 축적되면 수소와 일산화탄소에 대한 광유도 탈착율은 각각 10^{-6}과 10^{-7} molecules/ph 수준으로 낮아진다.



<그림 3.1.8.18> 저장링 한 cell 구간에 대한 광자 분포 계산 결과 (Synrad)

Synrad에서 계산된 광자 개수 분포에 광유도 탈착율에 따라 수소는 $\eta = 1 \times 10^{-6}$ molecules/ph, 일산화탄소는 $\eta = 2 \times 10^{-7}$ molecules/ph를 적용하여 기체방출률을 계산한 후 요구 진공도에 맞게 진공펌프의 배기속도를 결정하였다. 수소에 대한 Pill-type NEG의 흡착률은 측정값(<그림 3.1.8.17>)을 참고하여 0.003으로 정하고 일부 구간에 이온펌프와 모듈형 NEG의 배기속도를 적용한다. 일산화탄소 기체 또한 펌프에 따른 적절한 배기속도를 입력한 후 진공도 분포 계산 프로그램인 Molflow 시뮬레이션을 실행하면 <그림 3.1.8.19>와 같이 전 구간에서의 진공도 분포를 얻을 수 있다. 결과에 의하면 수소 기체에 대한 평균 진공도는 1×10^{-9} mbar, 일산화탄소 기체에 대한 평균 진공도는 5.8×10^{-10} mbar이며 혼합기체에 대한 평균 진공도 1.45×10^{-9} mbar이다. 이와 같은 진공도 계산 결과는 저장링의 요구 진공도를 충분히 만족하고 있으며, 운전 초기에는 PSD 값이 100배 이상 높으므로 전자빔의 Bremsstrahlung 산란에 의한 방사선량 제한으로 운전 전류를 높이는 데 충분한 시간이 필요할 수 있다.



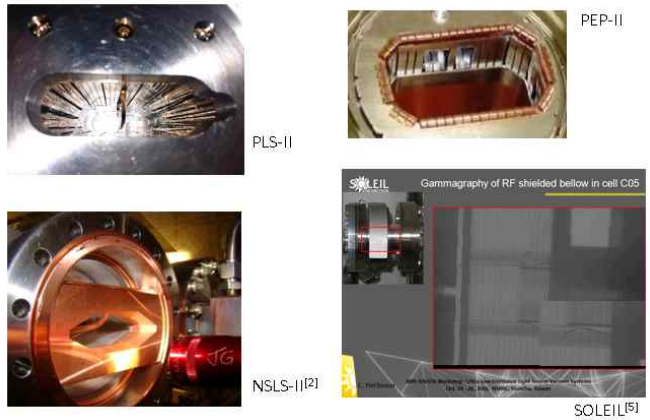
<그림 3.1.8.19> 저장링 한 cell 구간에 대한 진공도 분포

○ 진공 연결 부품 및 배기 포트

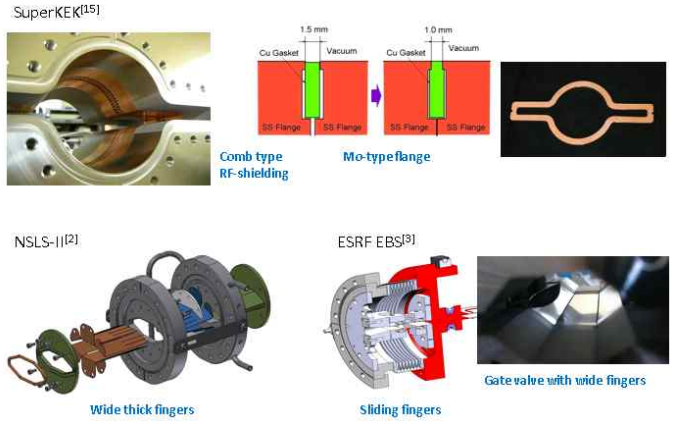
진공 연결용 벨로우즈는 고주파로 인한 고열을 방지하기 위해 특수한 설계가 필요하다. 전자빔 통로의 내벽은 최대한 매끄럽게 연결되어야 하고 그 단면이 급격하게 변해서는 안 되므로 그 경사각은 가능한 한 10:1 이상으로 유지되어야 한다. 따라서 벨로우즈나 플랜지 접합부와 같이 단면의 급격한 변화가 있는 부품에는 RF 접촉 핑거나 스프링을 장착해야 한다. 이때 플랜지 접합부의 단차 또는 RF 접촉 핑거의 두께는 0.5 mm를 넘으면 안 된다. 진공펌프의 배기 포트가 전자빔 통로에 있다면 구멍으로 고주파 (RF) 전자기파가 침투하여 과열되는 것을 방지하기 위해 슬롯 형태의 스크린을 만들어 주어야 한다. 이때 진공펌프로의 배기 컨덕턴스는 최대로 유지되어야 하므로 스크린의 면적과 구멍의 면적 사이에 적절한 절충이 필요하다.

<그림 3.1.8.20>은 RF 접촉 불량 또는 과도한 빔 전류에 의해 열 손상을 입은 벨로우즈의 예이다. 이러한 손상을 방지하기 위해서는 RF 접촉 핑거에서 발생한 열이 주변으로 쉽게 소산될 수 있도록 세심한 구조설계가 필요하다. 또한 운전 중 RF 접촉이 약해져 과열되지 않도록 진공 부품의 설계 및 조립 절차에 대한 체계적인

준비가 필요하다. <그림 3.1.8.21>은 기존의 RF 접촉 핑거의 약점을 보완하고 고전류 운전에도 견딜 수 있게 견고하게 개발된 벨로우즈 또는 플랜지 연결부의 사진이다. Super KEK에서 개발된 comb-type 벨로우즈는 매우 견고하나 기존의 핑거 형태에 비해 비용이 많이 들고 수평 방향의 변형 허용량이 매우 작다는 점은 고려해야 한다. 또한 최근에 개발된 MO-type 플랜지 연결부는 구리 가스켓을 빔 채널 내부 둘레 모양으로 정밀하게 가공하여 진공 기밀과 RF 접촉을 동시에 기능할 수 있도록 하였는데 매우 정밀한 가공과 정렬이 필요하다.



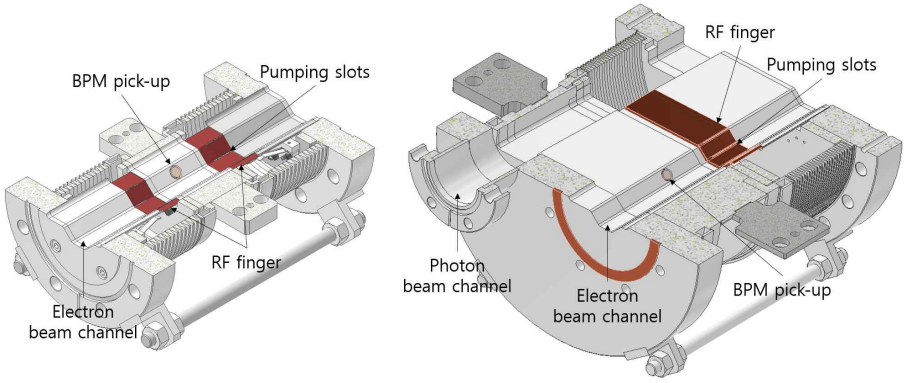
<그림 3.1.8.20> 접촉 불량 또는 과전류에 의한 벨로우즈의 RF 접촉 핑거 손상 사진



<그림 3.1.8.21> RF 접촉 핑거 손상 방지를 위한 새로운 종류의 벨로우즈

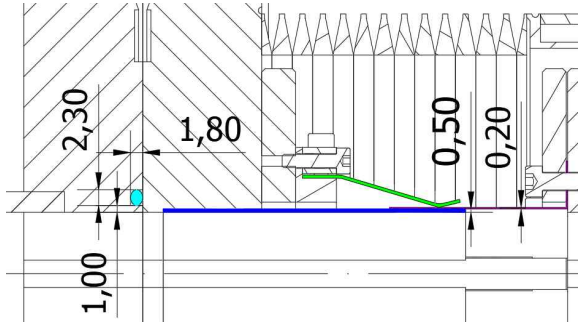
4GSR 용 벨로우즈는 기본적으로 PLS-II에 설치된 “wide thick fingers” 형태의 RF 스크린 방법을 사용한다. 곡선 구간에는 총 10개의 벨로우가 설치될 것이며, BPM 양단의 벨로우즈나 광자빔 인출 포트 근처의 벨로우즈는 <그림 3.1.8.22>와 같이 설계하였다. <그림 3.1.8.23>에서 보듯이 0.2 mm 두께의 BeCu RF 스크린 (자주색)이 0.5 mm 두께의 스테인리스강 진공 챔버 가이드(파란색)의 바깥쪽에서 미끄러지는 구조로 되어 있으며 인코넬 스프링(녹색)이 둘 사이의 접촉을 유지하기 위해 누르고 있다. 이 부위에서 전자빔 통로의 내경에 0.5 mm 단차가 발생하는데 이 값은 전자빔에 대한 저항 효과를 고려하여 결정되었다. 대부분의 벨로우즈의 수축 팽창 범위는 - 15 mm ~ + 5 mm로 설계되었으나 벨로우즈 설치 공간이 좁아 이 방식을 적용하기 곤란한 위치에는 SIRIUS 및 ESRF-EBS 등에서 사용하고 있는 오메가 방식의 벨로우를 적용하여 전체 길이 대비 수축 팽창 범위가 넓은 구조를 적용하도록 하였다.

한편 플랜지 조립부는 콘플랫 형식의 진공 기밀 구조를 가지는 동시에 고주파 가열을 방지하기 위해 RF 씰 스프링을 사용하여 전기적 접촉을 이루고 있다. 이 방식은 PLS-II 저장링에서 오랜 기간 사용되어 성능이 검증되었으며 <그림 3.1.8.23>에 RF 씰 스프링을 삽입하기 위한 구조의 치수가 표현되어 있다.



[BPM with RF-shielded bellows] [RF-shielded bellow for photon beam branch]

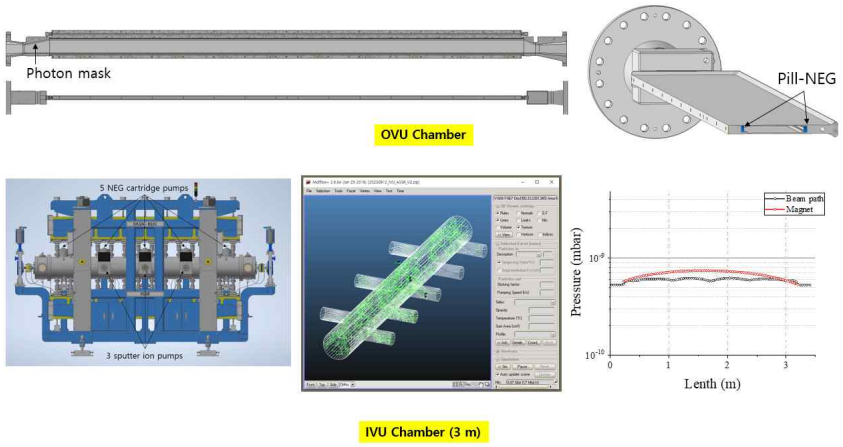
<그림 3.1.8.22> 평판 형태의 고주파 스크린을 적용한 벨로우즈



<그림 3.1.8.23> 플랜지 조립부 및 RF 벨로우 핑거 단면도 (단위: mm)

○ 직선구간 삽입 장치용 진공 시스템

삽입 장치는 자석이 진공 챔버의 밖에 놓이는 일반적인 삽입 장치와 자석이 진공 챔버의 안에 설치되는 in-vacuum undulator가 있다. 두 종류의 장치 모두 PLS-II에서 충분한 운영 경험을 축적하였으며, 4GSR용 삽입 장치 진공 시스템도 PLS-II의 경험을 바탕으로 설계되었다. <그림 3.1.8.24>와 같이 EPU를 포함하는 “out-vacuum undulator (OVU)”용 진공 챔버는 알루미늄 압출형 진공 챔버에 pill 게터를 삽입하여 진공도를 유지하고 방사광은 냉각되고 있는 챔버 벽면에서 흡수하는 방식을 채택하였다. 불활성 기체 배기를 위한 스퍼터 이온펌프는 챔버 양단의 배기 포트에 설치한다. “In-vacuum undulator (IVU)”의 경우 자석 조립체가 진공 챔버 내부에 들어가므로 넓은 표면적으로부터 발생하는 다량의 기체를 배기하기 위해 5대의 1,200 l/s NEG 카트리지 펌프와 3대의 60 l/s 이온펌프를 사용하여 진공도를 유지하도록 하였다. 진공도 계산 결과 평균 진공도는 약 6×10^{-10} mbar로서 진공도 요구조건을 만족한다. IVU 진공 챔버 양단에는 RF-shielded 게이트밸브를 장착하여 진공 유지보수 작업 시간을 단축할 수 있도록 하였다.



<그림 3.1.8.24> 직선구간 삽입 장치용 진공 챔버

○ 진공도 모니터링 및 제어

이온펌프가 설치되므로 이온펌프 제어기로 측정하는 펌프 전류를 이용하여 저장링의 진공도를 대부분 모니터링할 수 있다. 또한 열음극 진공 게이지 및 열전도 게이지를 추가로 설치하여 초기 진공 작업 중 진공 모니터링에 사용하거나, 인터락 시스템에 연결하여 진공 사고 발생 시 진공밸브를 닫거나 RF 시스템, 입사 장치 등 주요 장치의 비상 정지에 사용한다. 진공 시스템의 제어는 PLS-II에서 축적된 경험을 바탕으로 설계되었다.

참고문헌

[1] J.C. Herrera, 'Eddy Current Effect in the AGS Vacuum Chamber', AGSCD Technical Note No. 49, April 22, 1966.

[2] A. Chao and M. Tigner, A. Chao and M. Tigner, 'Handbook of Accelerator Physics and Engineering', World Scientific, 1st edition, 1998, p397.

[3] A. Chao and M. Tigner, 'Handbook of Accelerator Physics and Engineering', World Scientific, 1st edition, 1998, p183.

[4] D. Kramer, CERN Accelerator School, CERN 99-05, 307, 1999.

[5] K. A. Mohammad, et. al., IOP Conf.: Mater. Sci. Eng., 36, 012012 (2012)

[6] J. F. Grubb, Allegheny Ludlum Corp., The Minerals, Metals and Material Society, 629 (1997).

[7] C. Bernardini, et. al., Phys. Rev. Lett. 10, 407(1963)

[8] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, IEEE Proc. 1993 Particle Accel. Conf., 3860 (1994)

[9] S. Heikkinen, Doctoral Thesis, School of Sci. Technol., Aalto Univ., Finland, Nov 2014.

[10] GlidCop is a dispersion-strengthened copper alloy by SCM Metal Products, North Carolina, USA.

[11] Y. Suetsugu, et. al., J. Vac. Sci. Technol. A27, 1303 (2009).

[12] ANSYS is an engineering simulation and 3-D design software, that calculates the thermal and mechanical conditions, sold by ANSYS Corp.

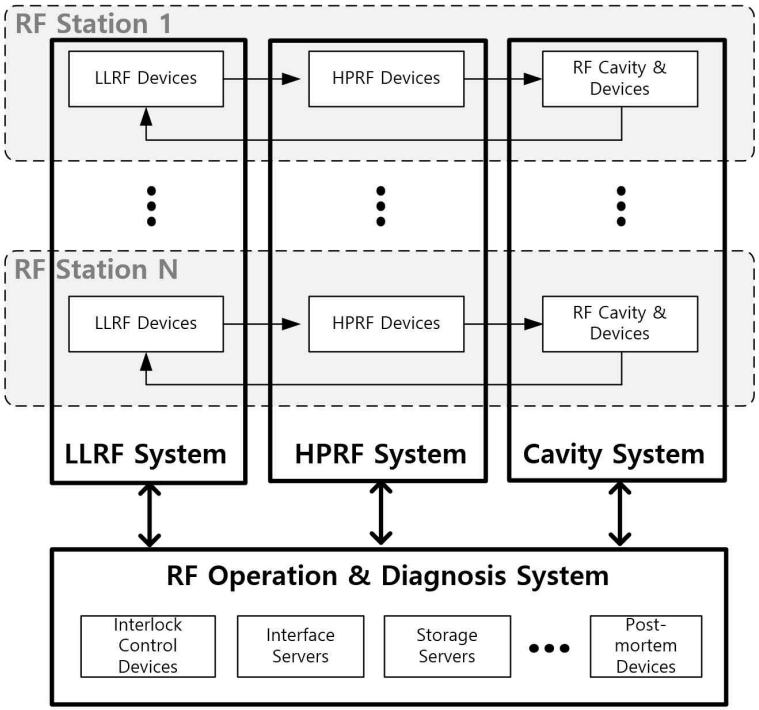
[13] SynRad+ is part of MolFlow+ code from CERN, which traces photons to calculate flux and power distribution on a surface caused by synchrotron radiation.

[14] MolFlow+ is a Monte-Carlo simulation code for ultrahigh vacuum systems with complex geometries and surface conditions, available at www.molflow.web.cern.ch

[15] Y. Suetsugu, et. al., Rev. Sci. Instrument, 78, 043302 (2007).

3.1.9 RF 시스템

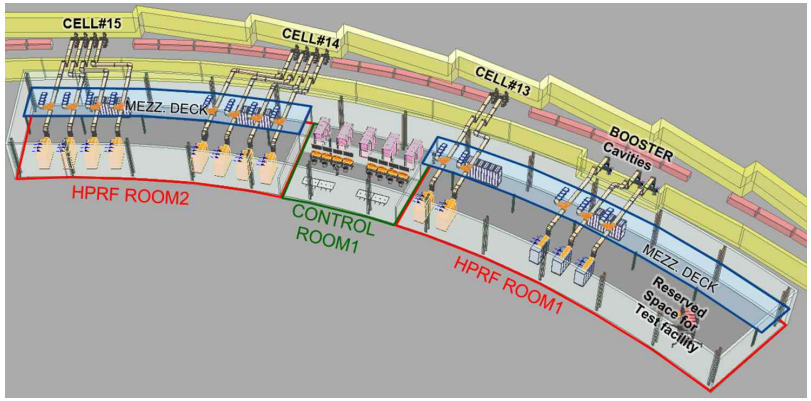
RF 시스템은 현대의 방사광원용 저장링의 구성 장치들 중에서 구축과 운영을 위한 비용 측면에서 가장 큰 비중을 차지하고 있고, 방사광의 특성과 용량 (capability), 이용률 (availability) 그리고 신뢰성(reliability)에 직접 영향을 주는 구성 장치이다. 이 3가지 요소가 현대의 방사광원의 기본 요구사항 (basic requirement)이다. 따라서 RF 시스템의 설계는 이들을 극대화하는 방향에서 소요예산과의 타협점을 찾는 작업이다.



<그림 3.1.9.1> RF 시스템의 구성도

RF 시스템은 RF cavity, RF 출력을 생산 공급하는 고출력 RF 시스템 (High Power RF system), 빔과 RF 시스템의 상호 작용을 제어하는 저출력 RF 시스템 (Low-Level RF system) 등의 Sub-system들로 구분되고 <그림 3.1.9.1>과 같이 각 Sub-system들의 Sub-device들로 RF Station이 구성된다.

다목적 방사광가속기의 저장링에는 <그림 3.1.9.2>와 같이 총 10기의 cavity가 저장링 13, 14, 15번 cell 직선구간에 배치되었다. 4개의 cavity가 high beta 구간인 15번 cell 직선구간에 설치되고 다른 4개는 14번 cell 구간에 배치되었다. 나머지 2기는 13번 직선구간 cell에 배치되고 남는 공간에는 짧은 삽입 장치가 설치될 수 있도록 하였다. 부스터 cavity를 비롯한 RF 장치들을 하나의 RF 빌딩에 배치하기 위해 3기의 부스터 cavity를 저장링 cavity와 인접한 곳에 배치하였다. 또한 RF 빌딩은 유틸리티와 전기실과 가까이 배치하여 냉각 배관과 케이블을 최소화하였다.



<그림 3.1.9.2> RF 빌딩의 Layout

RF 빌딩 내에는 2개의 고출력 장치 룸과 그 사이에 하나의 제어실을 두어 각 공간 사이의 연동이 용이하게 하였다. LLRF 캐비닛은 각 직선구간에 가장 가까운 로컬에 배치하여 Cavity의 픽업 라인이 가능한 짧도록 배치하였다. 제어실과 LLRF 캐비닛 하부에는 이중 바닥 구조(false floor)를 적용하여 모든 신호라인들은 지중으로 지나갈 수 있도록 하였다. RF 빌딩 내에 Circulator와 Dummy Load를 설치하기 위한 중층을 배치하였다. 또한 중층 아래의 공간에는 예비품을 보관하거나 LLRF 캐비닛을 설치하기 위한 용도로 활용할 수 있다. 중층 상부에는 Circulator와 Dummy Load를 유지보수하기 위한 모노레일 크레인을 배치하였다.

가. 저장링 RF 시스템

(1) 저장링 RF 시스템의 개요

○ 저장링 RF 시스템의 역할, 기능

저장링의 RF 시스템은 매우 복잡한 sub-system이 통합된 장치로 구성하고 있다. 방사광용 저장링에서 RF 시스템은 크게 두 가지의 기능을 가지고 있다. 방사광을 방출함으로 인해서 하전 입자 빔의 에너지 손실을 보충하는 것이고 또 다른 기능은 궤도 운동 중에 종 방향의 빔 운동(longitudinal motion)에 관여하여 하전입자빔의 주요 운전 변수를 결정하고 지속적으로 전자빔의 안정성을 유지하는 것이다.

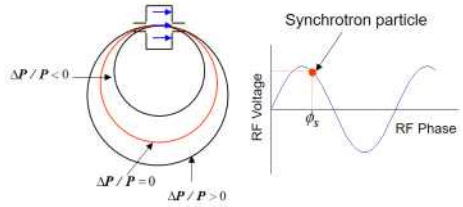
전자는 매 회전마다 bending magnet과 insertion device들을 통해서 약 1.8 MeV 에너지 손실이 발생하는데 RF 시스템의 구성장치인 RF cavity를 통과하면서 손실된 에너지를 전달받아 빔 에너지와 운동궤도를 유지하여 지속적으로 방사광 방출을 가능하게 한다. 저장링에서 전자기장에 의해 전자가 받는 Lorentz 힘은 아래 (수식 3.1.9.1)로 표현된다

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{(수식 3.1.9.1)}$$

q: 전하량, $\vec{E}$: 가속 전기장, $\vec{B}$: 자기장

전자 진행 방향(속도 방향)은 자기장에 수직이고 전기장과 수평 방향이다. 따라서 자기장은 전자 진행 방향에 관여하지 않고 궤도를 변경하는 데 영향을 미치고 전기장은 전자가 받는 힘을 더해 에너지를 증가시킬 수 있다. 이때 저장링에서 자기장은 자석이 만들고 전기장은 가속관으로 만들 수 있다.

<그림 3.1.9.3>에서 좌측 그림은 운동량이 큰 bunch($\triangle p > 0$, p: 운동량)는 이상적인 bunch($\triangle p \equiv 0$) 보다 더 큰 경로로 운동하고 운동량이 작은 bunch ($\triangle p < 0$)는 이상적인 bunch보다 더 짧은 경로로 운동하는 것을 알 수 있다. 즉 짧은 경로로 운동하는 bunch들은 먼저 RF Cavity에 도달하여 에너지를 더 많이 받고 (우측 그림에서 synchronous phase의 좌측) 긴 경로 운동하는 bunch들은 늦게 도달하여 에너지를 적게 (synchronous phase의 우측) 받아 bunch들이 설계 궤도로 passive 하게 교정됨을 알 수 있다. <표 3.1.9.1>은 저장링 빔 운전을 위해 요구되는 RF parameter들이다. <표 3.1.9.1>에 RF parameter는 다목적 방사광가속기에 설치될 수 있는 ID 개수를 최대(24개)로 하여 예측한 값이다. 이때 총 에너지 손실은 2094.8 keV이고 저장링에서 필요한 RF voltage는 3.5 MV이다.



<그림 3.1.9.3> Synchronous stability 개념도

<표 3.1.9.1> 저장링 빔운전을 위해 요구되는 RF parameters (24 ID)

Parameters	Values
Energy [GeV]	4.0
Current [mA]	400
Emittance [pm-rad]	62
Circumference [m]	799.297
Revolution frequency [MHz]	0.37507
Harmonic number	1332
Synchrotron frequency [kHz]	1.275
Total electron energy loss/turn [MeV]	2.095
Required RF power by beam [kW]	838
RF frequency [MHz]	499.593
Accelerating Voltage [MV]	3.5

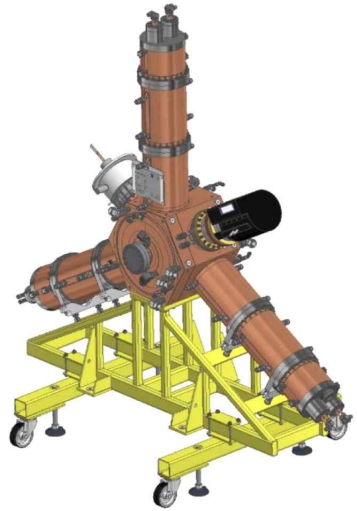
(2) RF 시스템의 요구사항 및 설계 주안점

저장링의 설계 절차상 RF 시스템은 방사광의 이용 목적에 맞는 Lattice 설계를 구현되게 하는 종속적인 장치이다. Lattice 설계 변수와 방사 광원의 정성적, 정량적 특성 등이 결정되면 그에 따른 에너지손실을 보충하여 전자빔이 지속적이고 안정적으로 운동을 유지할 수 있도록 RF 시스템 설계 기본변수를 선정한다. 또 Lattice 설계에 의해 궤도빔의 수동적 안정성을 보장할 수 있도록 RF 특성 변수를 유지할 수 있는 견고한 시스템 구축이 필요하다. Lattice 설계에서 도출된 방사광 방출에너지와 momentum acceptance에 의해 계산된 가속전압을 근거로 RF 시스템의 규모를 결정하고, 빔의 안정성을 유지할 수 있도록 RF 시스템 구성 장치들의 특성을 결정한다. RF cavity는 자체 고차원모드(HOM)의 발생을 최소화하고, 고출력 RF 장치의 노이즈와 RF 파형 왜곡 특성 등을 규정하며, 저출력 RF 장치는 RF 시스템의

구성 장치들과 빔의 상호 작용에 대한 되먹임제어 특성을 규정해야 한다. 또한, 저장링의 운전에서 통계적으로 각종 구성 장치 중에서 RF 시스템에 의하여 연간 총 beam dump 현상의 약 40~50% 정도 차지할 만큼 복잡하고 고장에 취약한 장치이기 때문에 고유의 기능을 충분히 하면서 장치의 견고하고 안정적 운전에 대한 고려는 설계에서 매우 중요한 부분이다.

나. 저장링 RF cavity

저장링에서 전자들은 dipole 전자석과 Insertion Device (ID) 등에 의해서 에너지를 손실하게 된다. 이렇게 손실된 에너지는 RF cavity를 이용하여 보충한다. 4세대 방사광가속기에서는 극저온 시설을 사용해야 하는 초전도 RF Cavity와 상온에서 운전하지만, 대형 냉각시설이 필요한 상전도 cavity를 비슷한 비율로 사용하고 있다. 현재 구축 중인 다목적 방사광가속기에서는 cavity 문제 발생 시 다시 복구되는 시간을 최소화하여 충분한 유저 빔타임을 확보하기 위해서 상전도 cavity를 선택하였다. 4세대 방사광가속기는 3세대 방사광가속기보다 emittance가 작아야 충분한 밝기를 얻을 수 있기 때문에 cavity의 High Order Mode (HOM)가 3세대 방사광가속기보다 빔 불안정성에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 HOM 영향을 줄이기 위해서 cavity에 HOM absorber 적용한 설계가 도입되었다.



<그림 3.1.9.4> EU-HOM damped Cavity

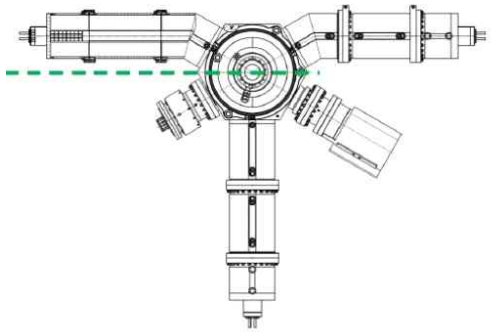
현재 운전 중인 3, 4세대 방사광가속기에서 설치된 상전도 cavity는 독일 BESSY 방사광가속기에서 설계하여 세계 여러 방사광가속기에서 운전 중인 EU-HOM damped cavity(<그림 3.1.9.1.4>)가 유일하다. EU-HOM damped Cavity 주요 parameter는 다음과 같다.

<표 3.1.9.2> EU-HOM Damped Cavity parameters

Parameters	Values
Flange to flange length [m]	0.5
Max. power coupler [kW]	120
Unloaded quality factor	> 29,000
Shunt impedance [MΩ]	3.40
Coupling factor	1 ~ 5

Cavity 하나당 약 0.5 m 설치 공간이 필요하고 루프 타입 커플러를 적용하여 coupling factor를 1~5까지 조정할 수 있다. 이 커플러는 최대 120 kW RF power를 전송할 수 있다.

현재 이 형태의 cavity는 ESRF-EBS, ALBA, BESSY-II, Diamond 등 방사광가속기에서 설치 후 운전하고 있고 APS-U, ALS-U, PETRA-IV는 설치를 위해 제작 중이거나 제작 완료 후 시험을 하고 있다. 이 중에서 ESRF-EBS, APS-U는 주파수가 352 MHz로 기존 BESSY에서 설계된 500 MHz를 기반으로 다시 설계 후 제작하였고 ALS-U의 경우 <그림 3.1.9.5>와 같이 설치 공간 제약으로 설치 방향을 변경하고 HOM absorber를 수정하였다.



<그림 3.1.9.5> ALS-U HOM damped Cavity [1]

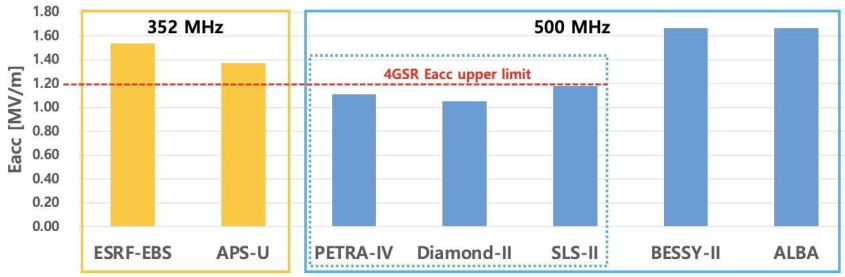
[1] (ALS-U Plans for the RF Systems, Ken Baptiste presentation)

<표 3.1.9.3> 다른 방사광가속기 EU-HOM Damped Cavity 운전조건

Light source	Frequency [MHz]	# of Cavity	Gap voltage [kV]	Beam current [mA]	Eacc	제조사	비고
ESRF-EBS	352	13	500	200	-	RI	-
			462				
APS-U	352	12	530	200	-	RI	-
PETRA-IV	500	24	333	200	1.11	-	-
Diamond-II	500	8	338	300	1.13	RI	-
BESSY-II	500	4	750 (Max.)	300	2.50 (Max.)	RI	-
			500	200	1.67		운전
ALBA	500	6	700 (Max.)	400	2.33 (Max.)	RI	-
			500	200	1.67		운전

<표 3.1.9.3>은 EU-HOM damped Cavity를 사용하거나 계획하는 방사광가속기들의 주파수, Cavity 수량, 가속전압 등을 나타낸 것이다.

주파수가 352 MHz인 ESRF-EBS, APS-U는 RF 가속전압이 500 kV 이상으로 설정하였지만, 최근에 계획하거나 건설 중인 500 MHz Cavity를 적용한 PETRA-IV, Diamond-II는 350 kV 이하로 설정하였다. 이 값을 가속전기장(Eacc)으로 환산하면 약 1.1 MV/m이다. 이때 Cavity 내부에서 가속길이는 30 cm이다. 비교적 초기에 제작된 BESSY-II와 ALBA는 최대 전압을 700 kV 이상으로 설계하였지만, 실제 운전에서는 안정적인 운전을 위해서 낮은 전압 500 kV 이하로 운전하고 있다. (PETRA-IV system design concept 참고) 500 kV 운전일 때 가속전기장은 1.67 MV/m이다. ALBA의 경우 2017년에 15번 arcing trip이 발생하였다고 보고 되었다. PETRA-IV에서는 이점을 참고하여 EU-HOM damped cavity의 안정적인 운전을 위해서 가속전압을 약 1.0 MV/m 가속 전기장에 대응하는 333 kV로 결정하였고 Diamond-II도 비슷한 가속전압을 선택하였다. (PETRA-IV Proposal of an RF System for PETRA IV_M.Eber_DESY_Tech_NOTE_2019_Germany 참고) 따라서, 다목적 방사광가속기에서도 형태가 같은 cavity를 사용하였기 때문에 최대 가속전압을 360 kV로 하고 그 이하 전압에서 운전하는 것으로 결정하였다. 이때 최대 전압에 대응하는 가속전기장은 1.20 MV/m이다. <그림 3.1.9.6>은 EU-HOM damped Cavity를 사용하거나 계획하는 방사광가속기의 가속전기장을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 파란색 점선 박스는 현재 건설 중이거나 계획 중인 방사광가속기이다. SLS-2의 경우 EU-HOM damped Cavity는 아니지만 다른 형태의 상전도 RF Cavity도 비슷한 수준의 가속전기장을 사용하고 있다. 빨간색 점선이 다목적 방사광가속기에서 가속전압 상한에 대응하는 가속전기장이다.



<그림 3.1.9.6> Accelerating RF electric field of EU-HOM damped Cavity

<표 3.1.9.1.4>는 다목적 방사광가속기의 주요 RF parameter이다.

<표 3.1.9.4> 다목적 방사광가속기 주요 RF parameters

Parameters	Values	
Frequency [MHz]	499.593	f_0
Beam energy [GeV]	4.0	E_0
Beam Current [mA]	400	I_b
Accelerating Voltage [MV]	3.5	V_{cav}
Harmonic number	1332	-
Revolution frequency [MHz]	0.37528	f_{rev}
Momentum compaction factor	7.775×10^{-5}	α
Synchrotron tune	3.411×10^{-3}	-
Longitudinal damping time [ms]	16.792	τ_s
Transverse damping time x/y [ms]	10.545/19.432	$\tau_{x,y}$
Total energy loss per turn [MeV]	2.095	E_{loss}
Beta function at cavity	15.21, 6.90	$\beta_{x,y}$

저장링에서 전자가 한 바퀴 회전할 때마다 자석에 의해 1.098 MeV, 최대 24개 ID가 설치된다고 가정했을 때 ID에 의해 0.937 MeV 그리고 진공 챔버 등에 의해 0.060 MeV가 손실된다. 따라서 한 바퀴를 돌 때 손실되는 총 에너지는 2.095 MeV이다. 손실 에너지를 보충하고 안정적인 빔 운영을 위해 3.5 MV RF voltage가 결정되었고 이러한 RF voltage는 EU-HOM damped cavity를 사용하여 생성한다.

<표 3.1.9.5> RF cavity 개수에 따른 RF power에 관련된 값

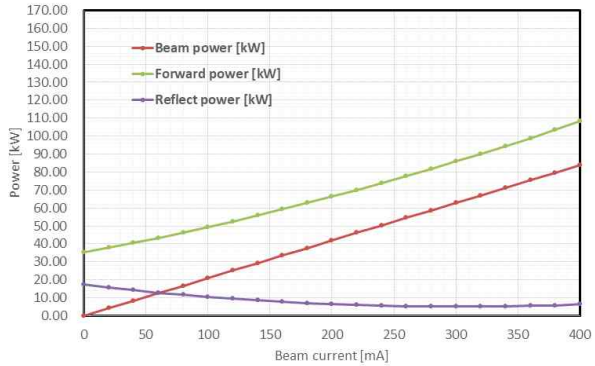
# of cavity	8	9	10	11	12
R over Q [Ω]	113.68	113.68	**113.68**	113.68	113.68
Unloaded Q	29909	29909	**29909**	29909	29909
Shunt impedance [MΩ]	3.40	3.40	**3.40**	3.40	3.40
Gap voltage [kV]	437.50	388.89	**350.00**	318.18	291.67
Eacc [V/m]	1.458	1.296	**1.167**	1.060	0.972
Coupling factor	3.83	4.06	**4.26**	4.43	4.58
Dissipated power [kW]	28.15	22.24	**18.01**	14.89	12.51
Loss power @ HOM absorber	5.00	5.00	**5.00**	5.00	5.00
Beam power @ 400 mA [kW]	93.90	83.47	**75.12**	68.29	62.60
Forward power [kW]	127.05	110.71	**98.13**	88.18	80.11

<표 3.1.9.5>는 cavity 개수에 따라 변경되는 RF power와 운전 변수들을 나타낸 것이다. 이 계산에 Shunt impedance는 아래와 같은 식을 적용하고, HOM absorber에 의한 손실되는 RF power는 보수적으로 5 kW 적용하였다.

$$R_{sh} = \frac{V^2}{2P_c} \ (shunt\ impedance) \quad \text{(수식 3.1.9.2)}$$

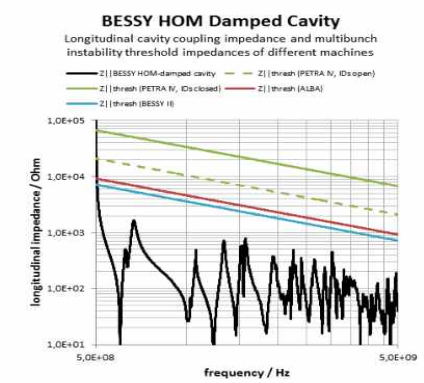
Cavity 개수를 많이 하는 것은 cavity에 인가되는 RF 전압을 낮게 하여 cavity 운전을 쉽게 할 수 있는 장점이 있지만 개수가 늘어난 만큼 설치 공간을 더 많이 차지하게 되어 빔라인 수를 줄일 수도 있다. 따라서 최대 RF 전압 360 kV 이하(Eacc 1.2 MV/m)를 만족하고 coupler 허용 전력 제한(120 kW)을 만족하는 최소 cavity 개수는 10개이다. 운전 중 cavity 고장을 가정하여 8개부터 PETRA-IV에서 선정한 안정적인 가속 전기장인 1 MV/m에 해당하는 12개까지 cavity 운전에 설정되는 값들을 <표 3.1.9.5>에 나타내었다 (PETRA-IV RF Proposal). 이때 계산에서 사용된 coupling factor도 같이 나타내었다. 10개 운전 중 1개가 고장이 나는 경우 coupler에 공급되는 RF power는 약 120 kW까지 상승하지만, coupler 허용 전력보다 낮은 값을

유지하여 운전할 수 있다. 하지만 2개가 고장 나는 경우 coupler 허용 전력을 넘어서서 운전할 수 없다.

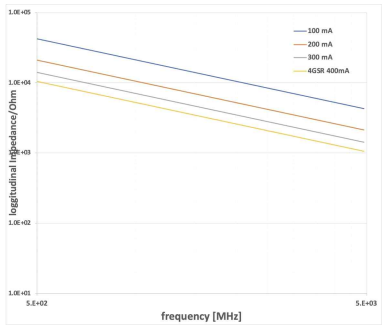


<그림 3.1.9.7> 10개 Cavity 사용 시 빔 전류에 따른 RF power

<그림 3.1.9.7>은 10개 cavity를 설치하였을 때 빔전류에 따른 forward, reflected power를 그래프로 나타낸 것이다. 10개 운전을 계획한다면 400 mA 운전 시 coupler에서 약 108 kW RF power가 필요하고 이 값을 만족하기 위해서 전송 손실과 운전 마진을 포함하여 이보다 더 큰 RF power Amplifier가 필요하다.

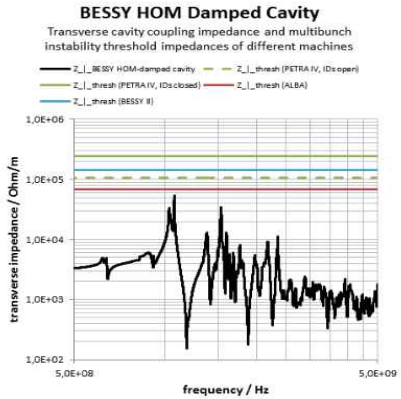


<그림 3.1.9.8> Coupled Bunch Instability (CBI) 문턱 impedance 비교

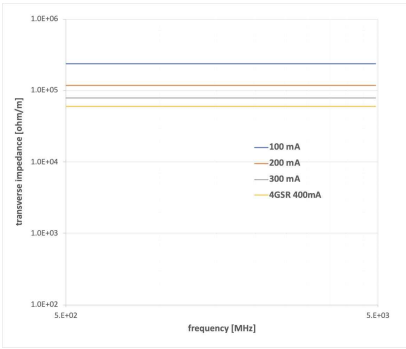


<그림 3.1.9.9> 10개 cavity를 사용했을 때, 빔전류에 따른 CBI 문턱 impedance

<그림 3.1.9.8>은 EU-HOM damped cavity의 빔 진행 방향 wake impedance와 다른 연구소들의 Coupled Bunch Instability (CBI) 문턱 임피던스를 주파수에 따라 나타낸 것이다. PETRA-IV, ALBA, BESSY의 문턱 임피던스는 그림에서 차례대로 녹색, 빨간색, 파란색이다. 검은색 선은 EU-HOM damped Cavity의 주파수에 따른 wake impedance를 나타낸다. EU-HOM damped Cavity의 wake impedance는 전 주파수 영역에서 CBI 문턱 impedance를 넘지 않는 것을 알 수 있다. 현재 다목적 방사광가속기의 parameter로 10개 cavity를 사용했을 때 주파수에 따른 CBI 문턱 임피던스를 계산하면 <그림 3.1.9.9>와 같다. 400 mA에서 계산값은 ALBA의 CBI 문턱 임피던스와 같은 경향을 보인다. 따라서 EU-HOM damped cavity를 사용하면 HOM에 의한 CBI 영향을 적게 받는다는 것을 알 수 있다.



<그림 3.1.9.10> EU-HOM Damped Cavity의 빔 수직 방향 wake impedance와 Coupled Bunch Instability (CBI) 문턱 impedance 비교

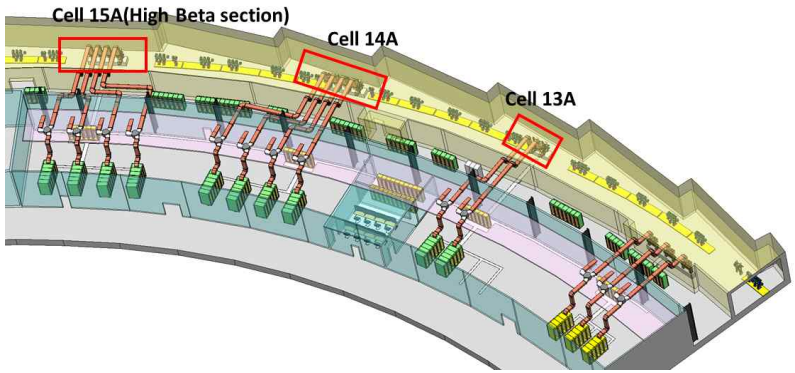


<그림 3.1.9.11> 10개 cavity를 사용했을 때, 빔전류에 따른 수직 방향 wake impedance

<그림 3.1.9.10>은 EU-HOM damped cavity의 빔 수직 방향 wake impedance와 다른 연구소들의 Coupled Bunch Instability (CBI) 문턱 impedance를 나타낸 것이다. 빔 방향의 경우와 같이 PETRA-IV, ALBA, BESSY의 주파수에 따른 CBI 문턱값은 차례로 녹색, 빨간색, 파란색이다. 또한 EU-HOM damped Cavity의 빔 수직 방향 wake impedance는 검은색 선이다. 5 GHz까지 문턱값은 넘지 않는 것을 알 수 있다. 현재 다목적 방사광가속기의 parameter로 10개 cavity를 사용했을 때 CBI 문턱 impedance를 계산하면 <그림 3.1.9.11>과 같다. 빔 수직 방향 CBI 또한 400 mA에서 계산값은 ALBA의 CBI 문턱 impedance와 같은 경향을 보인다. 약 1 GHz 영역에서 문턱값에 도달하는 것을 볼 수 있지만 다른 구간에서는 문턱값과 다소 차이가 나는 것을 알 수 있다. 따라서 EU-HOM damped cavity를 사용하면 HOM에 의한 수직

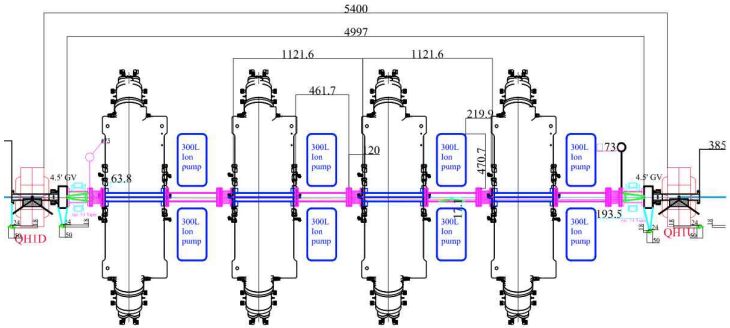
방향 CBI 영향도 적게 받는다는 것을 알 수 있다.

EU-HOM damped cavity는 저장링 직선구간 13A에 2개, 14A에 4개, High beta 구간 15A에 4개를 <그림 3.1.9.12>와 같이 배치할 것이다. 각 Cavity는 개별 RF station으로 구성하여 서로의 간섭을 최소화하였고 유지보수를 용이하게 하기 위해서 RF 빌딩에 모두 설치하는 것으로 계획하였다. 특히, 13A에는 두 개만 설치하고 비교적 짧은 ID를 설치할 수 있는 공간을 마련하였고 추후에 RF 전압이 더 필요한 경우 RF cavity 설치 공간으로도 사용할 수 있다.



<그림 3.1.9.12> 저장링 터널에서 Cavity 배치

각 cavity 앞에 ion pump를 배치하여 진공 레벨을 10^{-9} mbar 이하로 관리하고 cavity 사이에 포톤 마스크를 설치하여 방사광에 의한 손상을 줄이도록 하였다.

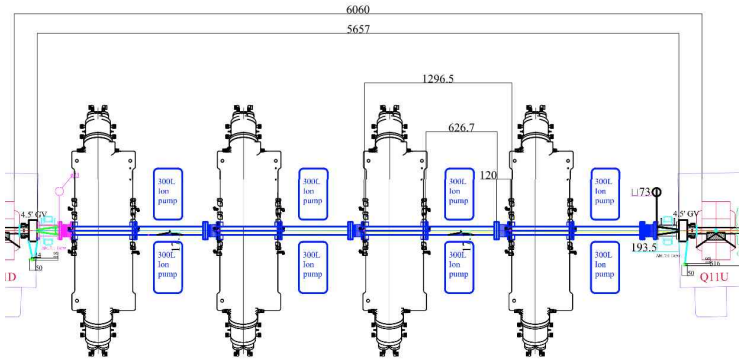


<그림 3.1.9.13> 15A High Beta section - Cavity layout

<표 3.1.9.6> 15A 구간의 Cavity 위치에 따른 위상 차이

Cavity	Cavity 중심 사이거리	첫 번째 cavity와 Δt	첫 번째 cavity와 Δφ
15A-c1	-	-	-
15A-c2	1121.6 mm	3.74 ns	313.43°
15A-c3	1121.6 mm	7.48 ns	266.85°
15A-c4	1121.6 mm	11.22 ns	220.28°

<그림 3.1.9.13>과 같이 High beta 구간 15A에 배치되는 Cavity 사이 간격은 1121.6 mm이다. 첫 번째 cavity 중심에서 다음 cavity 중심까지 bunch가 도달할 때까지 시간 차이는 3.74 ns이고 이를 phase로 환산하면 313.43°이다.



<그림 3.1.9.14> 14A, 13A Straight section - Cavity layout

<표 3.1.9.7> 14A, 13A 구간의 Cavity 위치에 따른 위상 차이

Cavity	Cavity 중심 사이거리	첫 번째 cavity와 Δt	첫 번째 cavity와 Δφ
14A-c1	-	-	-
14A-c2	1296.5 mm	4.33 ns	58.44°
14A-c3	1296.5 mm	8.65 ns	116.88°
14A-c4	1296.5 mm	12.97 ns	173.32°

<그림 3.1.9.14>와 같이 직선구간 14A, 13A에 배치되는 cavity 사이 간격은 1295.6 mm이고 이 값은 첫 번째 cavity 중심에서 다음 cavity 중심까지 bunch가 도달할 때까지 시간 차이는 4.33 ns이고 이를 phase로 환산하면 58.44°이다.

다. 저장링 고출력 RF 시스템

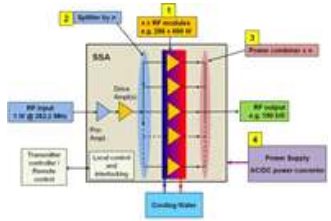
빔물리로부터 주어진 parameter들과 RF cavity 개수에 따른 High power RF 시스템의 용량을 <표 3.1.9.8>에 보였다. 운영 여유율과 RF cavity의 최대 허용 전력을 고려했을 때 최소 10기의 High power RF 시스템이 필요하다. 이 경우 각 RF Amplifier의 출력은 118 kW 이상이 되어야 한다. 하나의 RF cavity가 고장이 나더라도 빔운전이 가능하도록 고려할 경우 RF Amplifier의 정격 출력은 약 150 kW가 되어야 한다.

<표 3.1.9.8> 저장링 RF cavity 개수에 따른 High power RF power

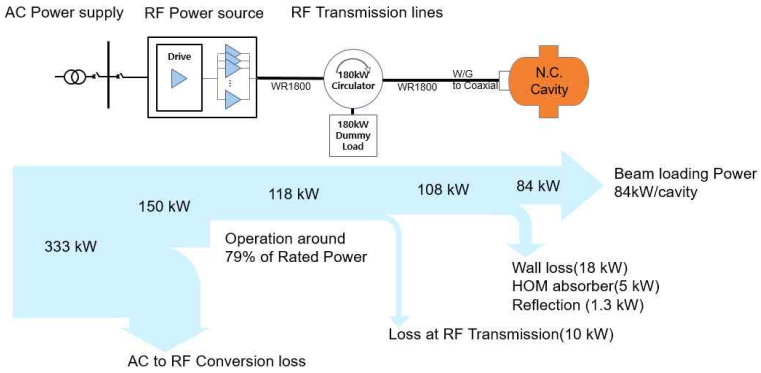
	Number of cavity	8	10	12
Cavity	Required power to coupler [kW/unit] (case of single cavity failure)	138.40 (161.50)	**108.15 (120.94)**	88.92 (97.01)
Transmission	Reflect power [kW/unit]	0.049	**1.33**	1.57
	Transmission line loss (Pt/unit)	10	**10**	10
SSPA	Output power of HPRF [kW/unit] (Case of single cavity failure)	148.40 (171.50)	**118.15 (130.94)**	98.92 (107.01)
	Rated power of SSPA [kW/unit]	190	**150**	130

저장링 High power RF Amplifier의 선정을 위해 150 kW, 500 MHz의 'Klystron'과 'Solid Stage Power Amplifier (SSPA)', 두 종류의 Amplifier를 비교 평가하였다. Klystron은 지난 수십 년 동안 해당 주파수와 출력 구간에서 우수한 성능을 보여왔지만, 최근 개발된 SSPA는 이보다 나은 성능을 보여주고 있다. 효율과 신뢰성은 높아지고 SNR은 더 낮아졌다. 게다가 <표 3.1.9.9>의 비교 자료에 보인 것처럼 SSPA는 Klystron과 달리 고전압이나 X-ray 방호 설비가 필요하지 않으며 고장이 발생하면 전체를 교체해야 하는 Klystron과 달리 SSPA는 RF 모듈과 같은 부품만 교체하면 되기 때문에 유지보수도 용이하다. 필요 설치 공간도 계속하여 감소하여 최근에는 Klystron보다 적은 공간에도 설치할 수 있다. 게다가 SSPA는 계속하여 가격이 내려가는 반면 Klystron은 매년 가격이 증가하고 있다. 이 모든 검토 사항을 종합해 보았을 때 SSPA가 저장링 High power RF Amplifier로써 기술적으로나 경제적으로 적합하다 판단된다.

<표 3.1.9.9> Klystron과 SSPA의 비교

Characteristics	Klystron	SSPA
		
HV Power supply	HV Protection required X-ray shielding required Phase noise by PWM Voltage ripple (abt. -50 dBc)	No need HV provisions No X-ray shielding Lesser phase noise (abt. -68 dBc)
Operational Efficiency	Abt. 40%	Abt. 50%
Modularity /Redundancy	Lower redundancy Klystron should be replaced where it's failed	Very High redundancy except Driver module fails Operable with several module fails
Durability and Obsolescence	Longer durability Could be Obsolescence in future	Each module has shorter lifetime but maintenance is easy

RF 장치에 고장이 발생하더라도 빔 운전이 가능하도록 각 RF 시스템을 10개의 독립된 스테이션으로 구성하였다. 즉, RF 장치에 단일 고장이 발생하였을 때 인접한 장치에는 영향이 없도록 하였다. 가속기 운영 중에 RF Cavity로부터 full reflection이 발생할 수 있어 High power Circulator와 Dummy load를 적용하였다. Transmission line은 손실이 낮고 안정성이 높은 WR1800 규격의 waveguide를 적용하였다. High power RF 시스템의 구성을 <그림 3.1.9.15>에 나타내었다. 또한 단계별 energy flow를 표기하여 필요한 전력 및 냉각용량도 알 수 있게 하였다.



<그림 3.1.9.15> High power RF 시스템의 구성과 energy flow

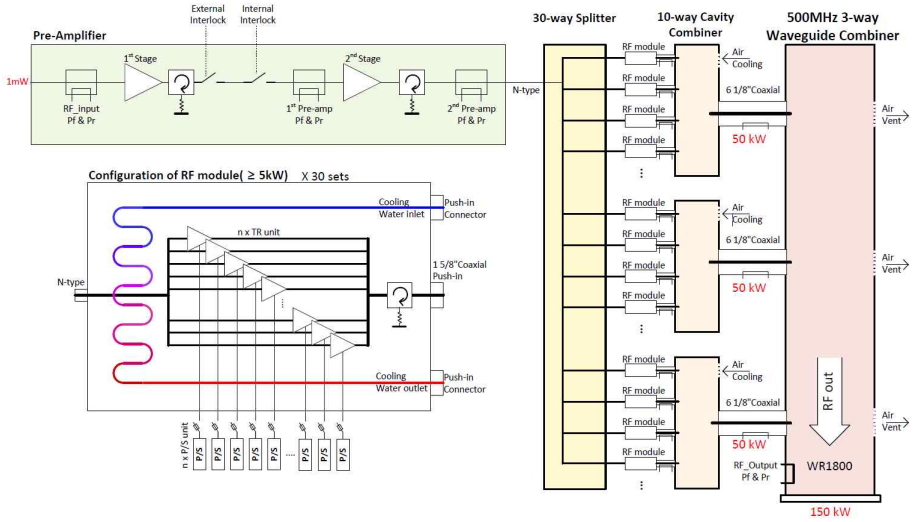
(1) Solid State Power Amplifier (SSPA)

SSPA를 구성하는 개별 부품과 구성 형태, 요구사항 등을 <그림 3.1.9.16>의 개념도에 나타내었다. 입력단부터 각 증폭 단에서 요구되는 RF power 및 monitoring 지점을 표기하여 개별 구성품의 사양을 명확히 하였다. 또한 입출력 단 및 각 연결부위의 커넥터와 사양을 표기하여 다른 시스템과의 interface를 확정하였다.

운전 기간 동안 연속하여 빔 서비스를 제공해야 하는 가속기의 운영 특수성을 고려하여 증폭 Transistor마다 독립적인 바이어스 전원을 구성하여 개별 부품의 고장이 발생한 경우에도 계속하여 운전할 수 있도록 하였다. 이는 빔 운전 안정성을 확보하고 종료 후 유지 보수 기간 동안 고장 부품을 교체하도록 하기 위함이다.

또한 가속기 운전 중에 발생할 수 있는 RF reflection으로부터 SSPA를 보호하기 위해 각 RF 모듈에 Circulator와 Dummy load를 적용하였다. 이 방식을 적용하였을 때 SSPA의 출력 VSWR은 약 1.5까지 확보할 수 있다.

RF 모듈은 쉽게 교체가 가능하도록 plug-in 타입의 냉각라인과 RF 커넥터를 적용하였다. 또한 내부고장에 따른 영향을 최소화하기 위해 transistor마다 독립적인 bias 전원을 적용하였다. 설치 공간 및 출력의 확장성을 고려하여 최종 단의 RF Combiner는 Waveguide Combiner를 적용하였다. <표 3.1.9.10>에 SSPA의 주요 사양을 정리하였다.



<그림 3.1.9.16> SSPA의 개념도

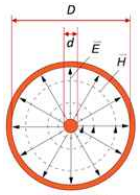
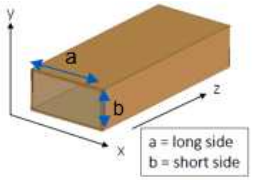
<표 3.1.9.10> 500 MHz cw, 150 kW SSPA의 주요 사양

Equipment	Parameters	Values
Solid State RF Amplifier	RF rating	500 MHz cw, BW ≥ ±1 MHz
	In / Out Power	0 dbm_max / > 150 kW
	Gain Flatness	0.5 dB within BW 0.5 dB within 50 kW ~ 110 kW
	Output Power Stability	0.5% Vp-p
	Phase Variation & Stability	3° / dB, 0.5° @ rated power
	Efficiency	> 50% @ P1 dB
	Input / output Z	50 Ω
	Harmonics / Spurious	< -36 dBc / < -70 dBc
	RF Ports	In : N-type / Out : WR1800
	Operability	Up to 5% of RF module failure

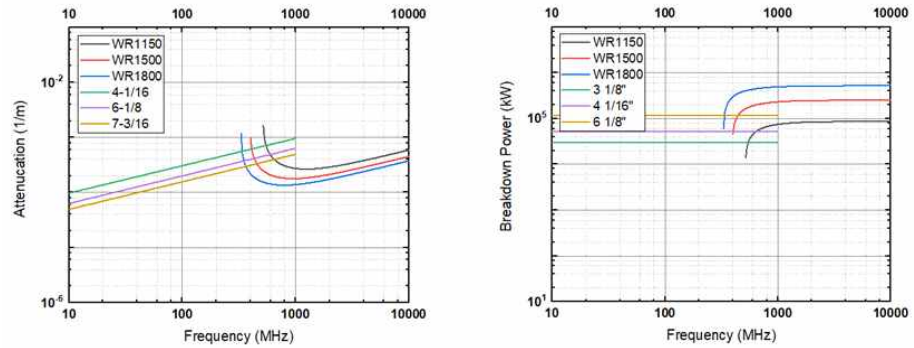
(2) High power RF Transmission

High power RF transmission line 선정을 위해 'Coaxial line'과 'Rectangular waveguide' 두 가지 옵션을 검토하였다. Coaxial line은 TEM mode로 동작하여 cut-off frequency가 없는 반면 Rectangular waveguide는 TE10 mode로 동작하며 long side 길이에 따른 cut-off frequency가 발생한다. 500 MHz의 RF 전송에 적합한 waveguide는 WR1500, WR1800, WR2100이다.

<표 3.1.9.11> Coaxial line과 Rectangular waveguide의 특성 비교

	Coaxial lines	Rectangular Waveguide
Structure	 TEM-mode	
Attenuation [1/m]	$\alpha = \underbrace{\frac{1}{2\cdot Z}\cdot\frac{1}{\pi}\cdot\left(\frac{1}{d}+\frac{1}{D}\right)\cdot\sqrt{\frac{\mu\omega}{2\sigma}}}_{\alpha_{resistive}} + \underbrace{\pi f\frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{c_0}\cdot tan\delta}_{\alpha_{dielectric}=1.048\,e\text{-}8\cdot f\cdot tan\delta}$ $\alpha_{resistive} = \frac{1}{2\,\zeta_0\,log\frac{D}{d}}\left(\frac{R_d}{d}+\frac{R_D}{D}\right)$, $\zeta_0 = 377ohm$ Wave impedance in free space, R_d & R_D : Surface resistance	$\alpha_{wg} = \frac{2Rs\left[1+\left(\frac{f_{cut}}{f}\right)^2\right]}{a\,\zeta_0\left[1-\left(\frac{f_{cut}}{f}\right)^2\right]^{0.5}}$ $\zeta_0 = 377ohm$ Wave impedance in free space, $R_s = 0.075$ for Al Al Surface resistance
Handling Power [kW]	$P_{peak} = \frac{E_d^2\,d^2}{\zeta_0}\pi log\frac{D}{d}$ $\zeta_0 = 377ohm$ Wave impedance in free space, $E_0 = 3\ MV/m$ Break down voltage of Dry air	$P_{wg} = \frac{E_d^2\,a^2}{\zeta_0}ab\sqrt{1-\left(\frac{f_{cut}}{f}\right)^2}$ $\zeta_0 = 377ohm$ Wave impedance in free space, $E_0 = 3\ MV/m$ Break down voltage of Dry air, $b = a/2$

<표 3.1.9.11>에서 볼 수 있듯이 Attenuation은 RF 신호가 전송되는 구조의 surface resistance와 거리에 관련 있는데, 특성 impedance 50 Ω을 만족하기 위한 구조적인 거리가 결정되면 결국은 surface resistance에 의해 결정되게 된다. 일반적으로 Coaxial line은 전송 효율을 높이기 위해 inner conductor를 copper로 적용하고 outer conductor에 aluminium을 적용한다. 반면 Rectangular waveguide는 경량화를 위해 전체적으로 aluminium으로 제작한다. 특성 impedance가 50 Ω일 때 Coaxial line과 Rectangular waveguide의 주파수에 따른 attenuation과 power handling 곡선을 <그림 3.1.9.17>에 보였다.



<그림 3.1.9.17> Coaxial line과 Rectangular waveguide의 attenuation과 power handling

아래 <표 3.1.9.12>에 요약한 것과 같이 500 MHz, 약 150 kW power handling을 고려하였을 때 WR1800 규격의 rectangular waveguide가 high power RF transmission line으로써 가장 좋은 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

<표 3.1.9.12> Coaxial line과 Rectangular waveguide의 특성 비교

Parameters	Coaxial line		Rectangular Waveguide	
	6 1/8"	9 3/16"	WR1500	WR1800
Frequency	-	-	492~749 MHz	410~625 MHz
Average Power handling	Abt. 80 kW	Abt. 170 kW	422~475 kW	658~928 kW
Attenuation [dB/m] @ 500 MHz	0.0067 dB/m (1.17 dB/40m)	0.0035 dB/m (0.60 dB/40m)	0.0027 dB/m (0.47 dB/40m)	0.0021 dB/m (0.35 dB/40m)
Transmission Loss [kW]	35.3 kW	19.3 kW	15.4 kW	11.8 kW
Installation cross-section	0.0725 m²	0.170 m²	0.0724 m²	0.1045 m²

SSPA의 RF 모듈 각각에 Circulator를 적용하였지만 가속기 운영 중에 발생할 수 있는 full reflection의 경우까지 고려하여 180 kW 급 3 port Circulator와 Dummy load를 적용하였다. SSPA 사양에서 요구하는 출력 VSWR 1.5를 확보하기 위한 Circulator와 Dummy load의 S-parameter를 <표 3.1.9.12>에 정리하였다. 이때 Standing wave의 모든 위상이 port 1 (SSPA의 출력 port)에 중첩되는 worst case를 가정하였으며 이 경우 Circulator의 isolation은 22 dB 이상, Dummy load의 return loss를 28 dB 이상으로 하여야 한다. 하지만 충분한 여유율을 고려하여 Circulator

isolation은 26 dB, Dummy load의 return loss는 30 dB를 사양 요구사항으로 적용하였다.

<표 3.1.9.13> Circulator isolation과 Dummy load return loss에 따른 Port 1에서 VSWR

Case	Circulator		Dummy	Return Loss @ Port 1	VSWR
	Insertion Loss	Isolation	Return Loss		
1	0.1 dB	28 dB	28 dB	18.59 dB	1.27
2		26 dB		17.19 dB	1.32
3		24 dB		15.71 dB	1.39
4		22 dB		14.14 dB	1.49
5		20 dB		12.49 dB	1.62

주변 온도의 변화에 따른 Circulator의 특성 변화를 보상하기 위해 Temperature Compensation Unit을 적용하고 Arc protection을 위해 Arc Sentry를 적용하였다. 3 port Circulator와 Dummy load의 주요 사양을 <표 3.1.9.14>에 정리하였다.

<표 3.1.9.14> 3 port Circulator와 Dummy load의 주요 사양

Equipment	Parameters	Values
3 Ports Circulator	RF ratings	500 MHz cw, BW ≥ ±1 MHz, ≥ 180 kW
	Acceptable Reflect Power	100 % at any phase
	Insertion loss @ fc	≤ 0.1 dB
	Isolation @ fc	≥ 26 dB
	RF Ports	3 ports, WR1800
	Controller	Temp. Compensation. and ARC protection
Dummy Load	RF Rating	500 MHz cw, BW ≥ ±1 MHz, ≥ 180 kW
	Connection	WR1800
	Return Loss @ fc	≤ -30 dB
	RF absorber	Ferrite with water cooled
	ARC protection	4 of View port Required

라. 저장링 저출력 RF 시스템

저장링 Low-Level RF 시스템(LLRF 시스템)은 하전입자빔과 RF 시스템의 상호작용을 제어하는 장치로써, 안정적인 빔운전을 위해 필수적인 장치이다. 저장링을 통해 입자빔이 궤도 운동하는 동안 입자빔은 관련 장치들로부터 발생하는 기계적인 진동, beam loading, 전원장치의 ripple, 신호 발생 장치에서 유입되는 잡음 등 다양한 외란(disturbance)으로 인해 영향을 받게 되는데, 이러한 외란에 의한 영향을 LLRF 시스템에서는 피드백제어를 통해 요구되는 성능 요구조건 이내로 경감시키는 역할을 수행한다. 저장링 LLRF 시스템은 진폭/위상 제어, 공진주파수 제어와 같은 기본적인 피드백제어 기능 이외에도 RF cavity를 포함한 RF 시스템의 상황을 모니터링하고, 장치 보호를 위한 interlock 신호를 처리하는 기능을 수행한다.

(1) RF 제어 안정도 요구조건

번치빔의 longitudinal stability는 우선적으로 LLRF 시스템에 의해 제어되며, 잔류하는 빔 불안정성의 경우, longitudinal feedback 시스템에 의해 추가적으로 감쇠된다. 가속 RF 전압의 위상 fluctuation 또는 jitter는 번치빔의 longitudinal oscillation을 발생시키게 되므로, 낮은 빔 emittance를 갖는 고전류/고에너지 저장링의 경우, RF cavity 내 가속전계의 위상 및 진폭에 대한 정밀한 제어가 중요한 이슈가 된다. 일반적으로 빔 jitter의 크기는 빔번치 길이의 10% 이내로 유지되어야 하며, RF cavity에서의 synchronous 위상 안정도는 다음 수식과 같이 정의된다.

$$\Delta\phi_b = (10\%)\frac{2\pi f_0 L_b}{c} = 0.244^\circ \quad \text{(수식 3.1.9.3)}$$

여기서, f_0은 RF cavity에서의 공진주파수(= 499.593469 MHz)를 나타내고, L_b은 번치길이(= 0.004079 m), c는 진공에서의 빛의 속도를 나타낸다. RF cavity로부터 입자빔으로 공급되는 RF power는 beam loss power (P_b)와 같고, beam stability를 일정하게 유지하기 위해서는 P_b와 빔전류(I_b)가 일정하여야 하므로, 위상 안정도 요구조건으로부터 RF 진폭 안정도 요구조건을 다음 수식을 미분하여 도출할 수 있다.

$$P_b = I_b V_c \cos\phi \quad \text{(수식 3.1.9.4)}$$

저장링 RF 시스템에서 요구되는 RF 안정도는 진폭의 경우, 0.271%, 위상의 경우, 0.244° 이내로 제어되어야 하므로 0.1%, 0.1°를 진폭, 위상에 대한 목표 안정도로 선정하였으며 <표 3.1.9.15>에 나타내었다.

<표 3.1.9.15> LLRF 시스템의 RF 안정도 요구조건

Parameters	Tolerance	Target
Amplitude stability	0.271%	0.1% (rms)
Phase stability	0.244°	0.1° (rms)
Parameter	**Tuning range**	**Resolution**
Resonance frequency	± 1 MHz	10 Hz

(2) LLRF 시스템 기능 요구사항

저장링 LLRF 시스템은 synchrotron radiation으로 인해 발생하는 beam energy loss를 보상하고, 요구되는 momentum acceptance를 달성하기 위한 가속전압 공급이 안정적으로 이루어질 수 있도록 다양한 기능을 수행한다. RF cavity 내부의 가속 전기장을 외란으로부터 RF tolerance 조건 이내로 유지하기 위하여 high power RF 시스템으로 인가되는 RF 신호의 진폭과 위상을 피드백제어하고, cavity의 온도변화로 야기되는 공진주파수 변화는 튜너를 통해 보정한다. 또한 RF 시스템의 구성장치들을 보호하기 위한 interlock 기능, RF 시스템 각각의 포인트로부터 입력되는 RF 신호의 진단을 위한 데이터 획득/저장/진단 기능을 포함한다. 저장링 LLRF 시스템에 요구되는 세부 기능은 다음과 같다.

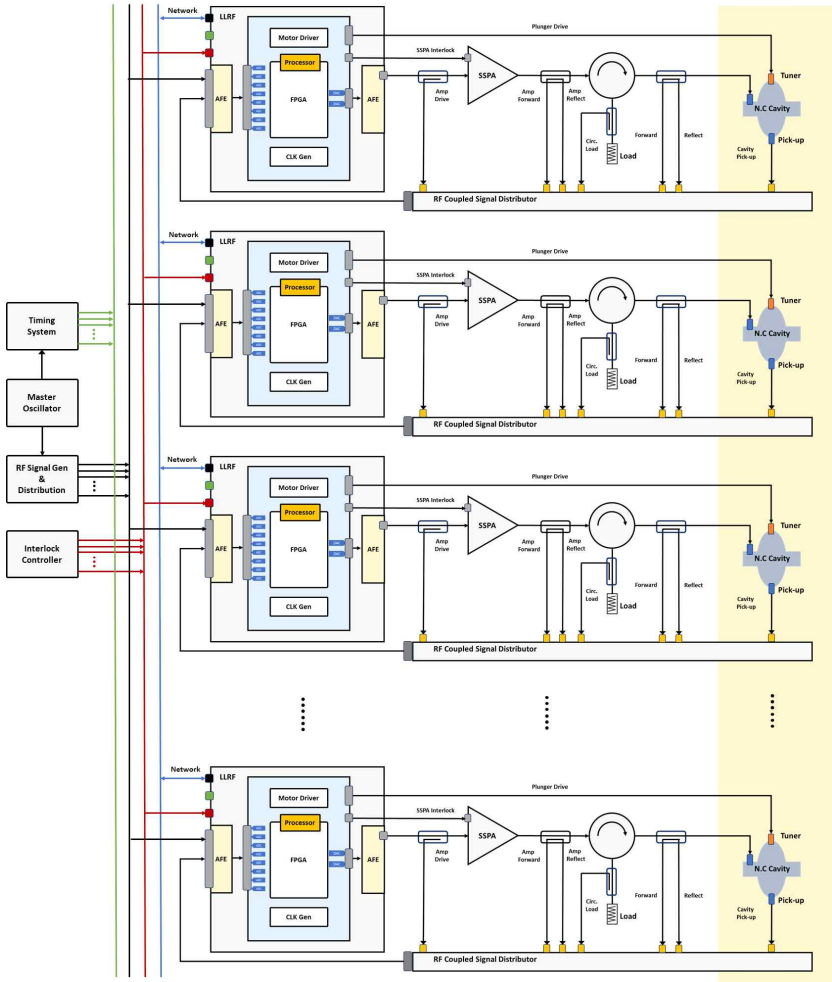
○ RF 신호 피드백제어 및 interlock 신호 처리

- Cavity 내 가속 전기장 안정화를 위한 SSPA drive 신호의 진폭/위상 피드백 제어
- RF 시스템 운전을 위한 open loop / close loop 모드 운전
- Cavity의 기계적인 구조 변화에 따른 공진주파수 자동보정
- 외부 공통 interlock (MIS/PSI) 및 cavity fault(진공, 온도 등)에 따른 SSPA drive 신호 shut-down

○ 데이터 획득/저장/진단

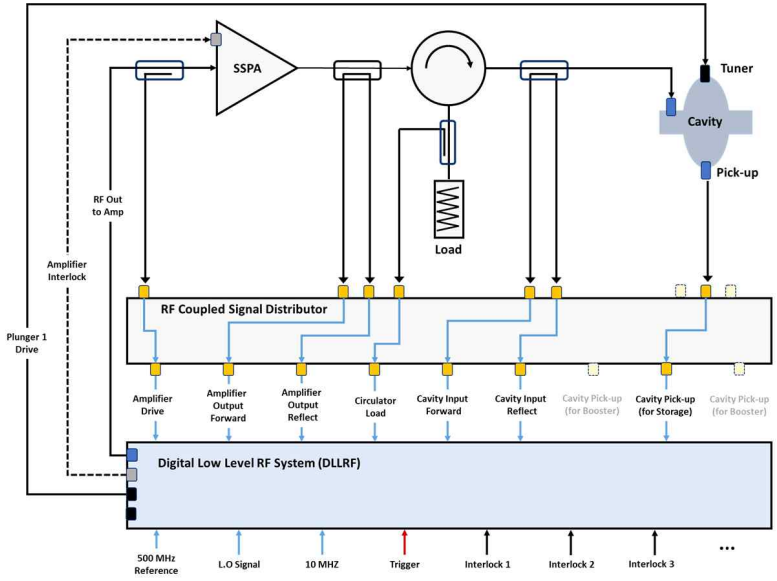
- Cavity field, cavity input forward/reflect, drive signal, 내부 진단 신호(loop error, filter coefficient, PI gain 등)에 대한 데이터 획득 및 저장, post-mortem 기능
- 튜너 모터의 기계적인 동작 모니터링 (tuner position, limit switch, direction 등)
- 하드웨어에 대한 house keeping 기능 (전원장치 전압, 보드 온도 등)

(3) LLRF 시스템의 구성 및 타 시스템과의 연계



<그림 3.1.9.18> 저장링 RF 시스템의 구성 및 LLRF 시스템과 타 시스템과의 연계

저장링 RF 시스템은 <그림 3.1.9.18>과 같이, 각각의 RF cavity가 독립적인 SSPA와 LLRF 시스템에 의해 운전될 예정이며 이는 장치의 제어 및 유지보수 측면에서 유리하다. LLRF 시스템의 경우, 입/출력되는 RF 신호를 주파수 변환하기 위한 analog front-end (AFE)와 디지털 신호처리를 위한 디지털 보드로 구성되며, 외부의 master oscillator와 RF 생성/분배 장치로부터 피드백제어를 위해 필요한 RF reference 신호, Local oscillator (LO) 신호 등을 입력받는다. 디지털 신호처리 시스템을 사용하여 정밀 제어를 구현할 경우, 입력 아날로그 신호의 주파수가 증가할수록 신호처리 과정상에 필요한 성능요구조건은 점점 까다로워지고 샘플링 jitter에 의해 발생하는 오차 또한 증가하기 때문에 RF 신호를 중간주파수(IF)로 변환하여 피드백 제어하는 방식을 선택하였다. IF의 주파수 선정을 위해서는 클락 jitter에 의한 민감도 (sensitivity), 디지털 신호처리 과정상에서 요구되는 지연시간 (latency), LO 신호의 안정성 (stability), IF 신호의 filtering 요건 등의 상호관계 및 시스템 구현 시 시장에서의 부품수급의 수월성 여부가 고려되어야 하며 이러한 사항들을 토대로 IF 신호를 50 MHz로 선정하였다. LLRF 시스템은 RF cavity와 SSPA, circulator 등의 high power RF 시스템의 각 포인트로부터 검출된 신호들을 coupled RF 신호분배장치를 통해 입력받으며, 장치/인명 보호를 위한 interlock 시스템과도 연동되어 운전 상황에 따른 exception handling을 수행한다. <그림 3.1.9.19>와 같이, RF 피드백제어를 위해 cavity field pick-up, cavity input forward/reflect 신호를 입력받아 신호처리를 수행하고, RF reference 신호를 통해 LLRF 시스템이 reference 신호에 동기되어 동작한다. 또한 RF 시스템 운전상황을 진단하고 장치 이상 시, RF shutdown을 위하여 SSPA 입/출력 신호, circulator reflect, load reflect 신호를 입력받는다. RF cavity의 공진주파수 제어를 위해서 tuner 모터 제어 신호가 LLRF 시스템에서 출력되며, SSPA와의 상호운용을 위하여 ready for RF 신호, fast RF shut off 신호, high power RF permit 신호 등을 공유한다.

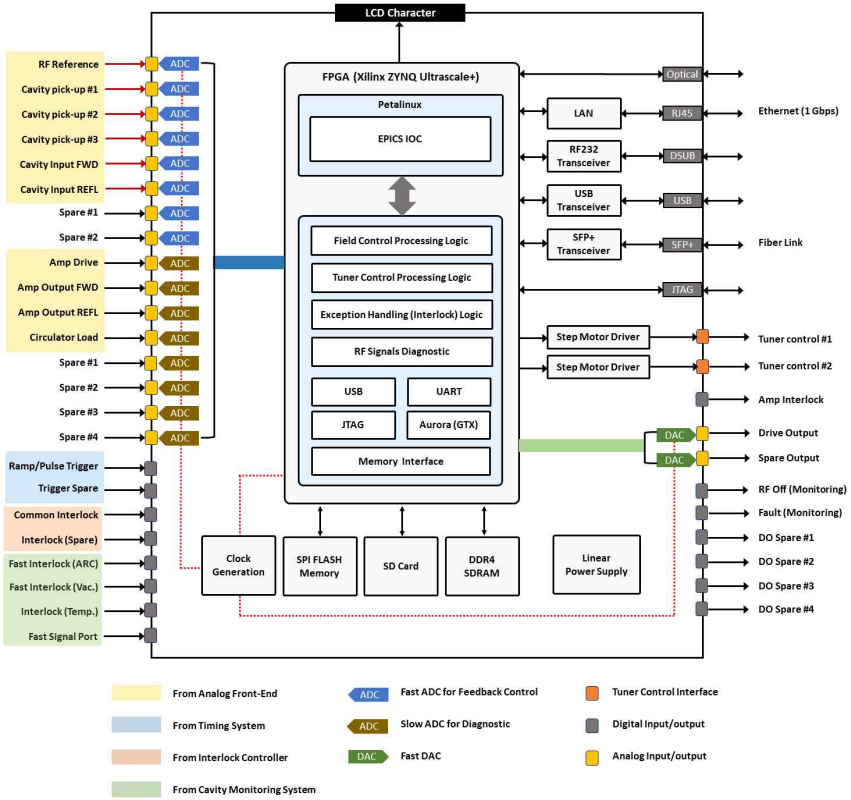


<그림 3.1.9.19> RF cavity 제어를 위한 RF 신호 layout

(4) LLRF 시스템 하드웨어 인터페이스 및 주요 사양

정의된 RF 안정도 요구조건 및 기능 요구사항, 타 시스템과의 상호운용성 등을 고려하여 LLRF 시스템의 하드웨어 인터페이스를 <그림 3.1.9.20>과 같이 구성하였다. SoC (System on Chip) 기술이 적용된 Xilinx Zynq 칩을 사용하여 별도의 SBC (single board computer) 또는 MCU (Micro Controller Unit) 포팅 없이 FPGA에 내장된 processor에 Petalinux OS 설치가 가능하다. 설치된 OS에서 EPICS IOC를 구현하여 피드백제어를 위한 제어 로직과 interface가 가능하도록 구성하였으며, RF 신호의 제어 및 진단을 위하여 100 MHz 이상이 샘플링 속도를 갖는 fast ADC와 DAC를 적용하였다. 디지털 보드 내부에는 ADC/DAC 및 FPGA의 구동을 위하여 클락 신호 생성용 PLL (Phase Lock Loop) 칩을 적용하였고, 자체적인 booting을 위한 flash memory, OS 포팅을 위한 SD card, data 저장을 위한 DDR memory를 내장하도록 구성하였다. 외부 시스템과의 통신을 위하여 ethernet 용 LAN, 시리얼통신 (RS-232 또는 RS-485), USB, SFP+ (Small Form-factor Pluggable) 인터페이스를 적용하였고 tuner 모터 제어를 위하여 motor driver를 내장시켰다. 디지털 보드에 전원을 공급하는

전원장치의 경우, linear 타입의 전원장치 또는 동등 성능(ripple 특성 1 mV 이하)의 SMPS가 적용되며 LLRF 시스템의 상태를 모니터링하기 위한 character LCD를 장착할 예정이다. 디지털보드의 하드웨어 구성과 주요 사양을 <표 3.1.9.17>과 <표 3.1.9.18>에 정리하였다.



<그림 3.1.9.20> 디지털 보드의 하드웨어 구성 및 인터페이스

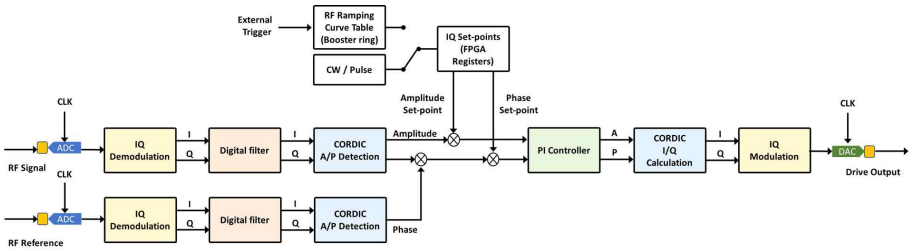
<표 3.1.9.17> LLRF 시스템의 하드웨어 구성

Item	Implementation Detail
Chassis	19-inch rack, Character LCD
	Linear power supply or Ultra low ripple & noise power supply
	Analog front end (for Up/Down conversion) / Digital board
	Step motor driver (2 EA)
	PLL chip
	Flash memory, SD card, DDR4
Interface	Ethernet port
	JTAG port
	USB port
	Serial port (RS-232 / RS-485)
	SFP+ port

<표 3.1.9.18> LLRF 시스템의 주요 사양

Classification	Parameters	Values
General specification	Operating frequency	500 MHz ± 1 MHz
	FPGA chip	Xilinx Zynq ultrascale+
	External trigger	2 inputs, rising/falling edge
RF Inputs	Number of channels	8 (fast) / 8 (slow)
	Channel-to-channel isolation	> 65 dB
	Full scale input level	10 dBm
	Spurious-free dynamic range	> 65 dB
	IF frequency	50 MHz
	LO frequency	450 MHz
	Fast ADC clock	40 MHz (250 MSPS max.)
	Amplitude dynamic range	≥ 25 dB
	Amplitude resolution	< 0.01%
	Amplitude stability	< 0.1% (upper 10 dB range)
	Phase resolution	< 0.01°
	Phase stability	< 0.1° (upper 10 dB range)
RF outputs	Output channel No.	2
	Full scale drive	10 dBm Max.
Feedback processing	Direct loop delay	< 1000 ns
	Control scheme	CW / Pulse / Ramping
Interlocks	Number of digital input	> 20
	Number of digital output	> 20

(5) RF 디지털 신호처리 및 Feedback 제어



<그림 3.1.9.21> Cavity field 제어를 위한 디지털 신호처리

○ RF 디지털신호처리

LLRF 시스템에서는 <그림 3.1.9.21>과 같이 디지털필터, CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer), PI (Proportional Integral) 제어기 등의 디지털 신호처리 알고리즘을 통해 RF 피드백제어가 수행되도록 하였으며, Pulse 모드와 Continuous wave (CW) 모드 선택이 가능하고, conditioning 과정을 위한 open loop 모드와 cavity field 제어를 위한 closed loop 모드 설정이 가능하게 하였다.

○ RF 신호 샘플링 및 IQ demodulation

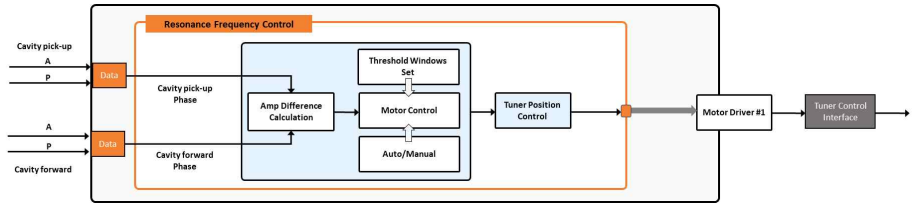
RF cavity 내부의 가속 전기장에 대한 신호 검출은 RF 신호의 IQ demodulation 방식을 기반으로 이루어지며, 가장 직관적인 IQ demodulation 방법은 IQ 샘플링 방식이다. IQ 샘플링 방식은 구현이 간단하고 latency 특성이 좋은 반면, 샘플링 과정상에서 발생하는 홀수 차 하모닉 성분들이 fundamental 주파수와 중첩되어 구분이 어려워지는 단점이 있다. 대안으로는 non-IQ 샘플링 방식이 있으며 이 방식의 경우, 샘플링 과정상에서 발생하는 하모닉 성분들을 fundamental 주파수와 구분하기 쉬우나, 추가적인 프로세싱 지연이 발생한다. 따라서 두 가지 샘플링 방식을 시제품 개발 단계에서 모두 테스트한 후 최적화 과정을 통해 최종적으로 샘플링 방식을 결정할 필요가 있다. IQ 샘플링 방식을 적용할 경우, 샘플링 주파수는 40 MHz를 고려하고 있고 non-IQ 샘플링 방식을 적용할 경우, 샘플링 주파수는 68.75 MHz, 137.5 MHz를 고려하고 있으며, ADC의 샘플링 주파수 적용 가능 범위 내에서 다양한 옵션에 대한 성능테스트를 진행할 예정이다.

○ Cavity field 제어

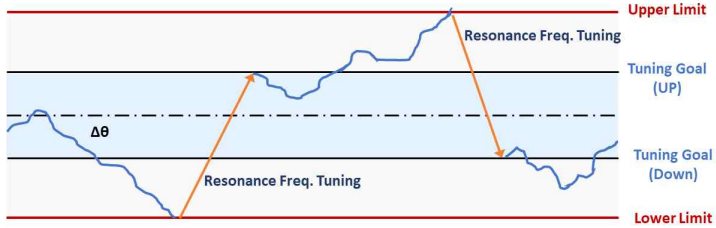
기본적으로 GDR (Generator Driven Resonator) 제어모드로 cavity field 제어가 수행되며, RF cavity로부터 pick-up 된 신호와 reference 신호가 IQ demodulation 과정과 digital filtering 과정을 통해 디지털 보드로 입력되면 IQ 신호를 설정값과 비교하여 오차를 계산하고 PI 제어를 통해 보정한다. 보정된 IQ 신호는 RF 반사파가 설정한 기준값을 넘지 않는 경우, 다시 IQ modulation 과정을 거쳐 DAC를 통해 출력된다.

○ Tuning loop 제어

RF cavity의 공진주파수 제어의 경우, <그림 3.1.9.22>와 <그림 3.1.9.23>과 같이, pick-up 신호와 forward 신호 간의 위상차를 계산하여 detune angle 값을 구하고, 계산된 detune angle 값이 설정된 threshold 값 이상으로 벗어나게 되면 사전에 설정된 목표값 이내로 detune angle 값이 추종하도록 모터를 구동시킴으로써 피드백제어 하는 방식을 적용하였다.

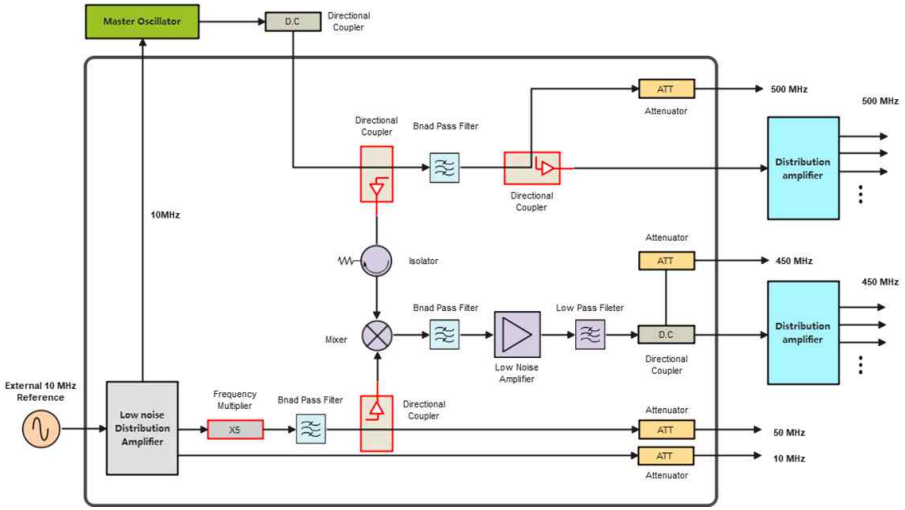


<그림 3.1.9.22> 공진주파수 제어를 위한 디지털 신호처리



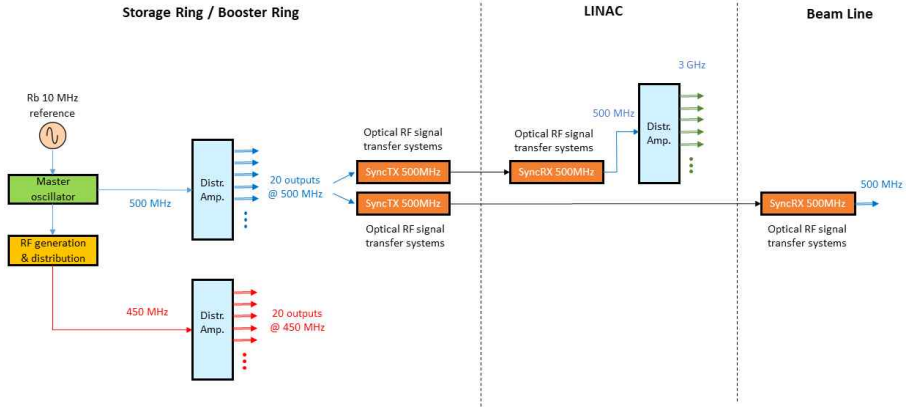
<그림 3.1.9.23> 공진주파수 제어 원리

(6) Master oscillator 및 RF reference 신호 분배



<그림 3.1.9.24> RF 생성 및 분배 시스템 구성

Master oscillator는 RF 신호의 기준신호를 생성하기 위한 소스원으로써 LINAC, 부스터링 RF 시스템, 저장링 RF 시스템, timing 시스템, 빔진단 시스템, laser 시스템 기반의 실험을 진행하는 빔라인 등에 분배된다. Master oscillator 출력은 RF 기준신호를 요구하는 시스템 간의 안정적인 동기화를 위하여 극도로 낮은 phase noise 특성을 가져야 하며 machine 둘레의 일별 또는 연간 변화로 인해 발생하는 주파수 변화에 대응하여 소프트웨어적으로 튜닝이 가능하여야 한다. 또한, 출력 RF 신호의 주파수 변화 시, 위상변화는 연속적이어야 한다. 이같이, 안정적인 phase noise 특성을 갖는 RF 기준신호를 생성하기 위하여 다양한 가속기 연구시설에서 사용되고 있고, 검증된 상용의 RF signal generator (RMS jitter : 수십 fs 이내)를 master oscillator로써 사용할 예정이다. 정밀한 신호 생성을 위하여 Master oscillator로 입력되는 외부 10 MHz reference 신호의 경우, 주파수 안정도 특성이 좋은 루비듐(Rubidium) oscillator를 사용하였다. Master oscillator에서 출력된 RF 기준신호를 기반으로 LLRF 시스템에 필요한 500 MHz 신호와 450 MHz LO 신호가 <그림 3.1.9.24>와 같이 RF 생성 및 분배시스템에 의해 생성/분배된다.



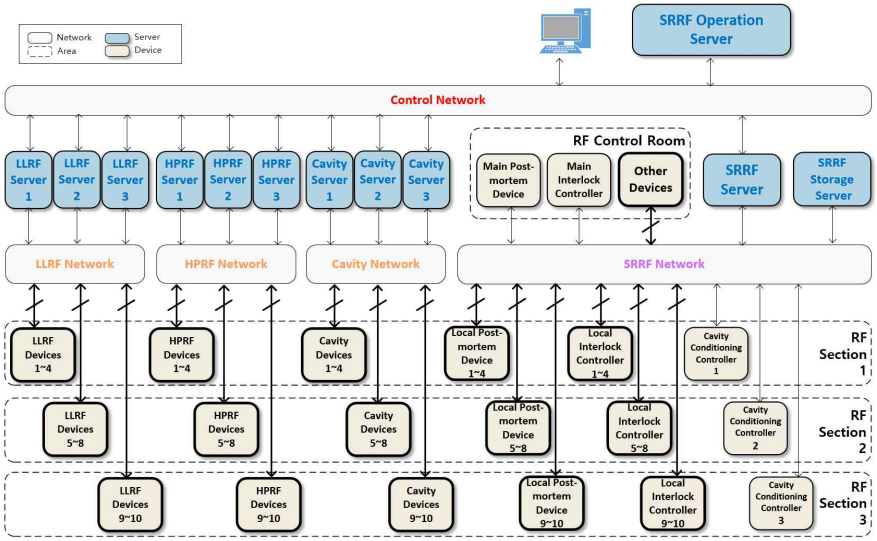
<그림 3.1.9.25> RF reference 신호 distribution

저장링 RF station, 부스터링 RF station, timing 시스템의 경우, master oscillator가 위치하는 장소와 가까운 장소에 설치되는 반면에 LINAC station의 경우, 수백 미터의 거리를 두고 위치하게 되므로 RF 기준신호 전달 시, 케이블에 의한 RF 손실, 외부 온도 변화 및 EMI (Electromagnetic Interference)에 따른 간섭이 발생할 수 있다. 이러한 외란 환경하에서 수백 fs 이내 jitter 특성을 유지하며 RF 기준신호를 전달하기 위해 LINAC station으로의 RF 기준신호 전달은 상용의 optical RF 신호 전달 장치를 사용하였다. laser 시스템 기반의 time-resolved 빔라인 실험을 위한 RF 기준신호 분배의 경우도 상용의 optical RF 신호 전달 장치를 적용할 계획이다. RF 기준신호의 분배 전체적인 구성은 <그림 3.1.9.25>와 같다.

마. 저장링 RF 운영 및 진단 시스템

(1) 저장링 RF 네트워크

다목적 방사광가속기 저장링 RF 시스템은 Sub-system들로 구분되며, 각각의 Sub-system은 Network traffic의 안정과 보안을 위해 <그림 3.1.9.26>과 같이 전용 Local Network를 가진다.

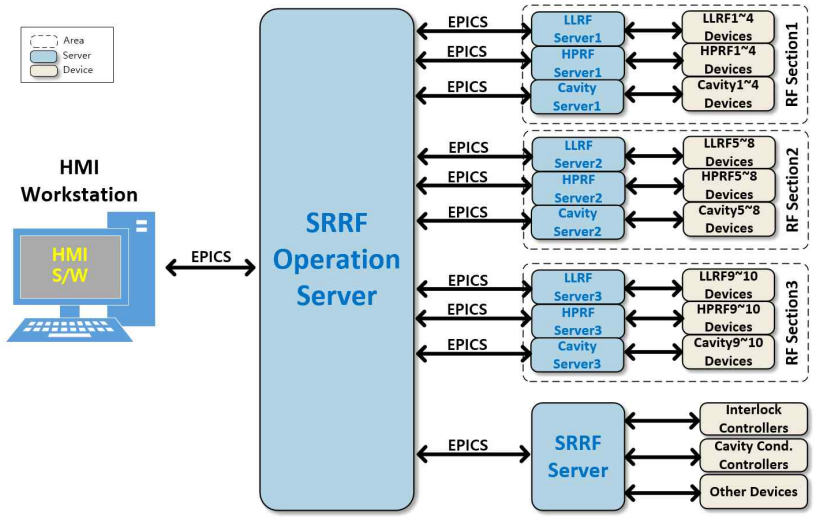


<그림 3.1.9.26> 저장링 RF 시스템의 네트워크 연결도

EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)가 다목적 방사광가속기 제어를 위한 통합 프로토콜로 선택되었고, 저장링 RF 시스템은 EPICS를 지원하기 위해, Interface Server들을 Local Network들과 Control Network 사이에 연결하여 EPICS IOC Server로 사용한다.

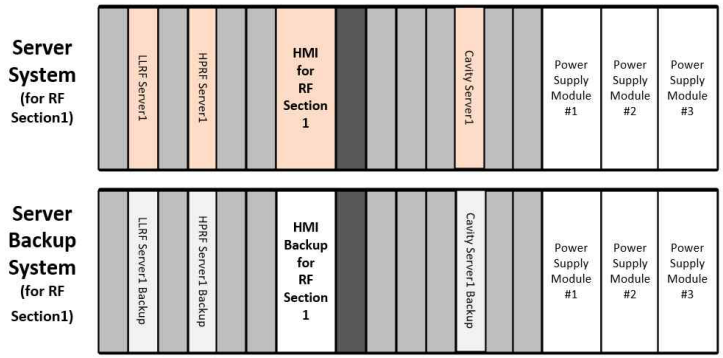
(2) 저장링 RF 서버 시스템

저장링 RF 시스템은 RF 장치들의 효율적인 배치와 Control Network의 Traffic Load 분산을 위해 <그림 3.1.9.27>처럼 다수의 Interface Server를 사용한다. Interface Server들은 복잡한 연산보다는 단순한 통신 지원을 목적으로 사용되기 때문에 높은 성능보다는 안정적인 동작을 목적으로 하는 하드웨어가 필요하다.



<그림 3.1.9.27> 저장링 RF 시스템의 제어도

cPCI (compact-Peripheral Component Interconnect) 플랫폼은 산업용으로 많이 사용되고 있는 Backplane 시스템이다. 저장링 RF 시스템에서는 Interface Server들을 cPCI 하드웨어로 구성한다. <그림 3.1.9.28>은 RF Section 1에서 사용되는 Server System의 구성을 보여준다. 1개의 Chassis에 4개의 Server들(LLRF Server1, HPRF Server1, HMI for RF Section 1 그리고 Cavity Server 1)을 장착하여 사용한다. 그리고 Server의 빠른 복구를 위해 Backup System이 항상 준비되어 있다.



<그림 3.1.9.28> 저장링 RF Section 1 용 서버 시스템의 구성

Server System 용 장비들의 요구사항은 아래와 같다.

○ Specification of cPCI Chassis

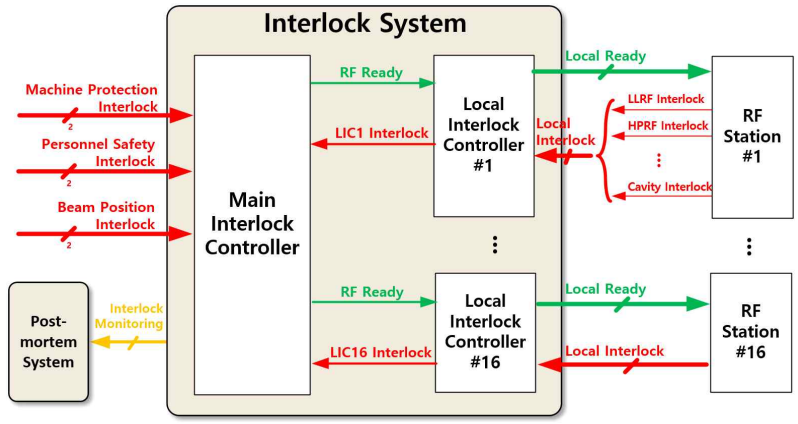
- 3U cPCI backplane with 12 peripheral slots
- 2 + 1 Hot-swappable 500 W + 250 W cPCI power supply(support three 250 W PSUs)
- Temperature, voltage, and fan monitoring LEDs
- Hot-swappable cooling fans & filters

○ Specification of cPCI Computer Module

- cPCI 3U 1 slot (4HP) Computer Module
- ≥ Quad-core Intel Atom x7-E3950 1.6 GHz Processor
- ≥ 4 GB DDR3 Memory
- ≥ 512 GB SSD M.2 SATA
- ≥ 2 Gigabit Ethernet, 1 USB, 1 DisplayPort

(3) 저장링 RF Interlock 시스템

연동제어 시스템(이하 Interlock 시스템)은 예상치 못한 운전 상황에서 시스템을 보호하기 위해 사용된다. Interlock 시스템은 <그림 3.1.9.29>와 같이 RF Station의 여러 장치들과 Interlock 신호와 Ready 신호를 이용하여 상호 연동한다.



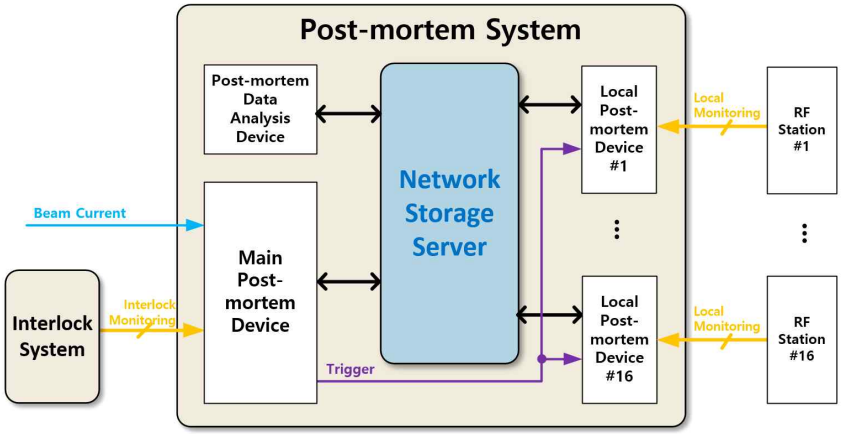
<그림 3.1.9.29> 저장링 RF용 인터락 시스템의 구성도

저장링 RF Interlock 시스템은 <그림 3.1.9.29>와 같이 외부 Interlock 신호처리 및 RF 시스템 전체 운전 종료를 결정하는 MIC (Main Interlock Controller)와 지역 Interlock 신호처리 및 지역 운전 종료를 결정하는 LIC (Local Interlock Controller)들로 나누어진다. LIC는 지역 Interlock 신호가 발생할 때, 해당 RF station을 종료시킴과 동시에 MIC로 Fault 상황을 알린다. MIC는 RF station들의 상태를 모니터링하며 전체 운전 종료 여부를 결정한다. 저장링 RF Interlock 시스템은 최대 16개의 RF station의 연동제어를 지원한다.

(4) 저장링 RF Post-mortem 시스템

Interlock 시스템과 RF station에서 제공되는 Monitoring 신호들은 빔 덤프 (Dump) 시에 사후검증 시스템(이하 Post-mortem 시스템)에서 레코딩된다. 안정적인 데이터 레코딩을 위해 <그림 3.1.9.29>와 같이 Network Storage Server에 데이터를 저장한다. 그리고 빔 전류 신호를 Trigger로 사용하여 빔 덤프 시에 자동으로 데이터가 저장된다.

저장링 RF Post-mortem 시스템은 총 16개 이하의 Local 장치와 1개의 Main 장치로 구성되고 추가적으로 Network Storage Server, 데이터 병합과 분석을 위한 Post-mortem Data Analysis Device가 포함된다.



<그림 3.1.9.30> 저장링 RF용 Post-mortem 시스템의 구성도

바. 3rd Harmonic RF cavity

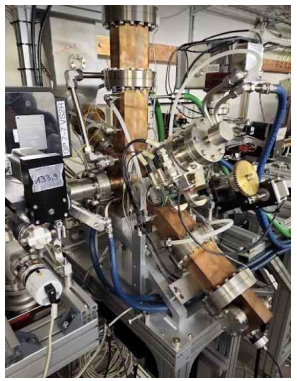
Touscheck scattering과 intra-beam scattering에 의한 lifetime과 emittance에 영향을 줄이기 위해서 Higher-Order Mode Harmonic Cavity (고차원 조화 Cavity)가 필요하다.

4세대 방사광가속기에서는 빔의 휘도를 높이기 위해서 emittance를 낮게 하는 것이 필수이다. 그렇지만 emittance를 낮게 하면 번치 내부 전자 밀도가 높아져서 Touscheck scattering과 intra-beam scattering에 의해 빔 수명이 줄어들고 emittance가 커지게 된다. 따라서 번치 내부의 전자밀도를 줄이기 위해서 메인 cavity와 다른 전압 세기와 위상으로 메인 RF 전압에 추가되면 번치 센터에서 전압 위상의 경사가 0이 되면서 번치는 길어지면서 전하밀도가 감소하게 될 것이다. 따라서 일부 3세대, 대부분의 4세대 방사광가속기에 위와 같은 역할을 하는 High-Order Mode Harmonic Cavity를 설치하였다.

방사광가속기에서 많이 사용하는 3rd Harmonic Cavity는 주로 세 가지 형태가 있다. 상전도 Cavity를 사용하고 빔에 의해 유도된 필드를 이용하는 Passive Cavity와 상전도 Cavity를 사용하고 외부에서 RF power를 커플러에 공급하여 필드를 만드는 Active

Cavity, 마지막으로 초전도 Cavity를 사용하고 빔에 의한 필드를 이용하는 Passive Cavity가 있다.

다목적 방사광가속기에서는 저장링 메인 Cavity가 상전도로 변경되어서 상전도 3rd Harmonic Cavity 중 ALBA에서 저장링 메인 Cavity와 같은 형태로 설계하고 국내 제조사에서 제작된 모델을 개선하여 적용하는 것을 고려 중이다. ALBA에서 설계하여 제작한 상전도 3rd Harmonic Cavity는 현재 BESSY-II 저장링에 설치하여 성능을 시험하고 있다. <그림 3.1.9.31>은 실제 BESSY-II에 설치된 사진이다.



<그림 3.1.9.31> 상전도 3rd Harmonic cavity

ALBA 3rd Harmonic Cavity의 주요 특성은 <표 3.1.9.19>와 같다.

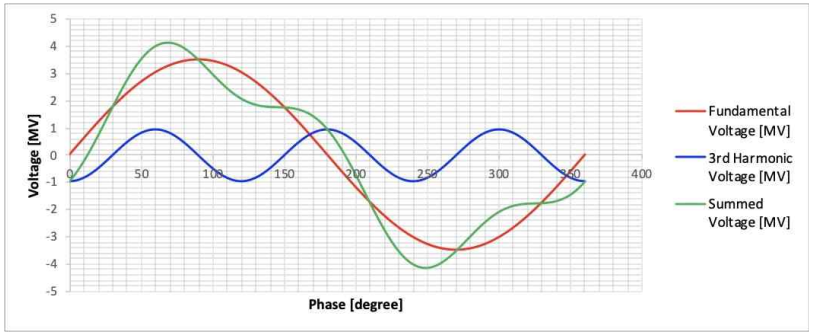
<표 3.1.9.19> 상전도 3rd Harmonic Cavity 주요 parameters

Parameters	Values
Frequency [GHz]	1.5
Max. power coupler [kW]	50
Unloaded quality factor	> 14,000
Shunt impedance [MΩ]	1.2
Coupling factor	1.0 ~ 3.0
Tuning range [MHz]	6.0
Max. Accelerating Voltage [MV]	0.185
SSPA	대당 20 kW

"PETRA-IV CDR"에서 언급한 고차원 조화 Cavity의 가속전압은 아래의 (수식 3.1.9.5)와 같이 주어진다.

$$V_{HHC} = V_{RF}\sqrt{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n^2-1} \times (\frac{U_0}{e_0 V_{RF}})^2} \quad \text{(수식 3.1.9.5)}$$

V_{RF}는 저장링에 필요한 가속전압이고, U_0는 회전당 손실되는 에너지, n은 n번째 고차원 모드를 나타낸다. 저장링의 V_{RF}는 3.5 MV, U_0는 1.877 MeV, n은 3으로 하여 얻은 V_{HHC}는 0.96 MV이다. 따라서 마진 15%를 고려하면 3rd Harmonic cavity를 위해 1.1 MV 가속전압이 필요하다. 현재 시험 중인 ALBA 3rd Harmonic Cavity의 가속전압(<표 3.1.9.19>의 0.185 MV)을 바탕으로 다목적 방사광가속기에서 안정적인 운영을 위해서는 총 6개 이상 3rd Harmonic Cavity가 필요하다. 그리고 <그림 3.1.9.31>은 저장링 메인 주파수 500 MHz와 3rd Harmonic Cavity 주파수 1.5 GHz를 적용하고 위상차이를 270°, V_{RF}는 3.5 MV, V_{HCC}는 0.96 MV로 나타낸 이상적인 가속전압을 나타낸 것이다.



<그림 3.1.9.31> 저장링 메인 주파수와 3rd Harmonic cavity 주파수

3.1.9-1 부스터링 RF 시스템

가. 부스터링 RF 시스템의 개요

다목적 방사광가속기는 PLS-II와 같이 선형가속기로 완전히 가속하여 저장링으로 보내는 방식과 달리 선형가속기에서 일차로 200 MeV까지 가속 후 부스터링에 입사하고 부스터링에서 4 GeV까지 가속하는 부스터 injection 방식으로 하였다. 부스터링에서 RF 시스템은 입사 전자들이 부스터링 회전당 잃어버리는 에너지를 보충시키고 에너지 램핑 과정 동안 충분한 에너지를 공급하는 역할을 한다. 부스터링 출력에너지 4 GeV에서 에너지손실은 1.671 MeV이고, 이 손실을 보충하고 0.2 GeV에서 4.0 GeV까지 가속하는 데 필요한 가속전압은 3.0 MV이다.

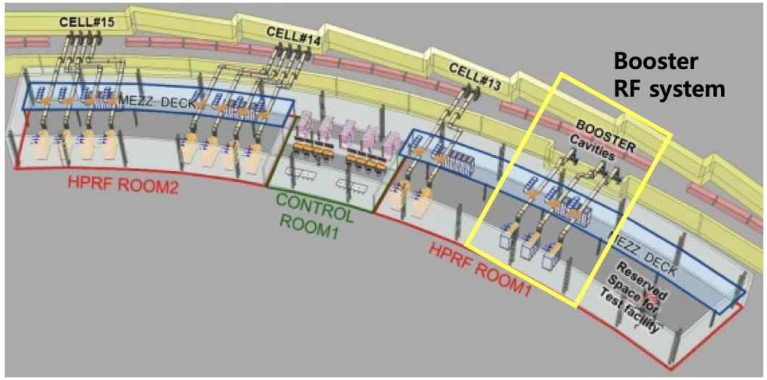
다목적 방사광가속기 부스터링의 RF 시스템과 관련된 주요 parameter는 <표 3.1.9-1.1>과 같다.

<표 3.1.9-1.1> 다목적 방사광가속기 부스터 관련 RF 주요 parameter

Parameters	Values	
Frequency [MHz]	499.593975	f_0
Beam energy [GeV]	0.2 ~ 4.0	E_0
Beam Current single/multi [mA]	1/3 mA	I_b
Accelerating Voltage @ 0.2 GeV [MV]	0.3	V_{inj}
Accelerating Voltage @ 4.0 GeV [MV]	3.0	V_{ext}
Circumference [m]	772.893	-
Harmonic number	1288	-
Revolution frequency [kHz]	387.9	f_{rev}
Repetition rate [Hz]	2	-
Synchrotron Frequency [kHz]	4.24	-
Energy loss per turn @ 4.0 GeV [MeV]	1.671	E_{loss}

부스터링은 저장링과 동심원을 그리며 저장링과 터널을 공유한다. 저장링보다 안쪽에 배치되고 부스터링 RF cavity는 저장링 메인 Cavity가 설치되는 직선구간 13A 옆에

위치한다. 다른 RF 장치들은 저장링 RF 시스템과 같이 RF 빌딩에 위치하고 있다. <그림 3.1.9-1.1>에서 노란색 박스 부분이 부스터 RF 시스템을 나타낸다.



<그림 3.1.9-1.1> 부스터링 RF 시스템 배치 -
저장링 메인 cavity와 RF 시스템과 가까이 배치. 노란색 박스 부분

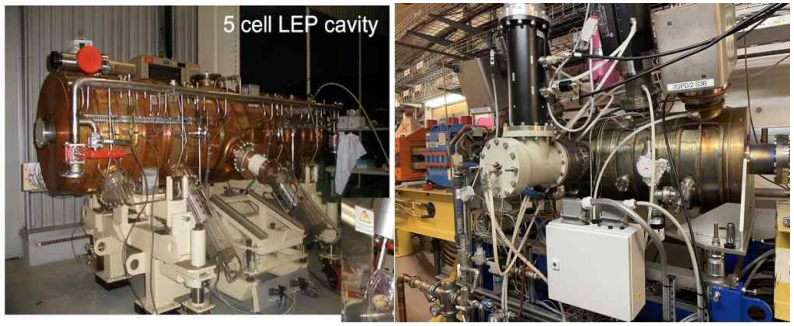
나. 부스터링 RF cavity

부스터 RF Cavity는 전자를 200 MeV에서 4 GeV까지 가속시키고 전자가 부스터링을 회전하면서 손실되는 에너지를 보충하기 위해서 가속전압을 생성시키는 역할을 한다. 다목적 방사광가속기 부스터링의 사양에 맞는 RF cavity를 선정하기 위해서 전 세계 방사광가속기 부스터링에서 사용하고 있는 cavity에 대해서 알아보았다. <표 3.1.9-1.2>는 운영되고 있거나 현재 건설계획 중인 전 세계 방사광가속기 부스터링의 주파수, 에너지, 둘레 길이, 회전당 에너지손실, cavity type 등을 나타낸 것이다.

<표 3.1.9-1.2> 전 세계 방사광가속기 부스터링 사양

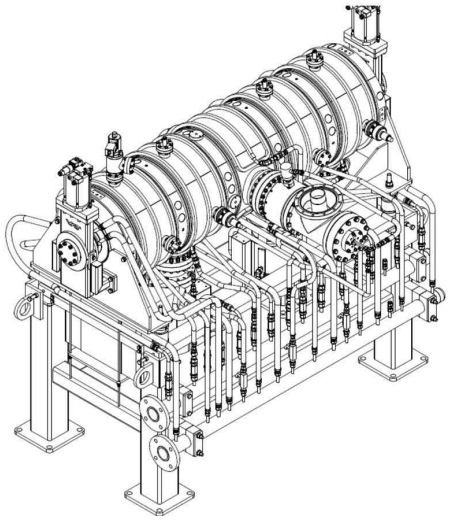
Light source	f_0 [MHz]	Energy [GeV]	Circum ference	Repetition rate [Hz]	Energy loss [keV]	Cavity type (#of cavity)	Total Gap Voltage (one Cavity)
ESRF-EBS	352	0.2 → 6.0	298	4	4500	5 cell LEP (4)	9.00 (2.25)
APS-U	352	0.45 → 6.0	368	2	-	5 cell LEP (4)	8.30 (2.07)
PETRA-IV	500	0.45 → 6.0	316.8	2, 5	4040	5 cell (9)	12.00 (1.33)
Diamond-II	500	0.1 → 3.5	163.8	5	947	PETRA 5 cell (2)	2.00 (1.00)
SLS-2	500	0.1 → 2.4	270	3	-	ELETTRA single cell (1)	0.50 (0.50)
HEPS	500	0.5 → 6.0	454	1	4000	PETRA 5 cell (6)	8.00 (1.33)
NSLS-II	500	0.2 → 3.0	158.4	1	686	PETRA 7 cell (1)	1.20 (1.20)
SIRIUS	500	0.15 → 3.0	496.8	2	721	PETRA 5 cell (1)	1.05 (1.05)
SSRF	500	0.15 → 3.5	180	2	1159	PETRA 5 cell (2)	1.74 (0.87)
TPS	500	0.15 → 3.0	496.8	3	586	PETRA 5 cell (1)	1.2
BESSY-II	500	0.05 → 1.9	96	10	-	PETRA 5 cell (1)	-
ALBA	500	0.1 → 3.0	249.6	3	627	PETRA 5 cell (1)	1.00

주파수가 352 MHz인 ESRF-EBS, APS-U는 LEP type 5 cell을 사용하고 500 MHz 대역을 사용하는 방사광가속기 대부분은 PETRA 5 cell Cavity를 사용하고 있다. 저장링 메인 Cavity와 같은 타입을 사용하기 위해서 단일 cell Cavity를 선택한 SLS-2를 제외하고 모두 multi cell Cavity를 사용한다. 일반적으로 단일 셀 Cavity보다는 다중 셀 Cavity가 설치 공간을 줄이고 비용감소에 효과적이기 때문에 대부분 다중 셀, 그중에서도 5 cell Cavity를 부스터링에 많이 사용한다.



<그림 3.1.9-1.2> ESRF-EBS에 설치된 LEP 5 cell cavity (왼쪽),
BESSY-II에 설치된 PETRA 5 cell cavity (오른쪽)

다목적 방사광가속기 부스터링에서도 공간적인 이점과 cavity 및 RF 장치 수량을 줄여 비용 측면에 효율성을 고려하고 이미 기존 다른 방사광가속기에서 성능이 검증된 <그림 3.1.9-1.3>과 같은 PETRA type 5 cell Cavity를 선정하였다.



<그림 3.1.9-1.3> PETRA type 5 cell cavity

PETRA type 5 cell cavity의 주요 특성은 <표 3.1.9-1.3>과 같다.

<표 3.1.9-1.3> PETRA type 5 cell cavity 주요 parameter

Parameters	Values
Flange to flange length [m]	1.65
Max. power coupler [kW]	120
unloaded quality factor	> 29,000
shunt impedance [MΩ]	15
coupling factor	1.0 ~ 3.0
Tuning range [MHz]	1.0
Accelerating Voltage @ 60 kW [MV]	1.3

다목적 방사광가속기 부스터링의 둘레 길이는 부스터링과 저장링이 같은 터널에 설치하기 때문에 저장링 둘레와 비슷한 772.893 m이다. 부스터링에서 4 GeV까지 가속해야 하므로 회전당 에너지 손실이 다른 방사광가속기보다 크다. 따라서 안정적인 전자가속과 에너지를 보충하기 위해서 RF cavity에 필요한 가속전압을 3.0 MV로 결정하였다. 부스터링 single bunch 모드에서 빔전류는 1 mA이고 출력에너지는 4 GeV이다. 이때 4 GeV까지 가속되었을 때 부스터링에서 에너지 손실을 보충하기 위해서 3.0 MV 가속전압이 필요하다. 5 cell Cavity 3대를 설치하기 때문에 cavity 당 1 MV 가속전압을 만들기 위해서는 coupler에서 약 35 kW RF power가 필요하다. 부스터링의 빔전류가 낮아 RF power는 대부분 cavity에서 열로 손실되고 극히 일부만 빔으로 전달되어 손실된 에너지를 보충하고 가속시킨다. 그리고 빔에 전달되는 RF power가 적기 때문에 계산에 의한 커플링 β는 1에 가까운 값을 가진다. 그렇지만 RF power 설정에 대한 error를 피하기 위해 부스터링 RF cavity의 커플링 β는 1.20으로 운영할 계획이다. <표 3.1.9-1.4>는 다목적 방사광가속기 부스터링에서 PETRA type 5 cell Cavity 3대 운전 시 가속전압, 커플링 β, 필요한 RF power를 정리한 것이다. 이때 적용한 RF cavity에서 손실파워(P_c)에 대한 계산은 (수식 3.1.9-1.1)로 수행하였고 R_{sh}는 15 MΩ이다.

$$P_c = \frac{V_c^2}{2R_{sh}}\,[W],\ R_{sh} = \frac{R}{Q} \bullet Q_0\,[M\Omega] \quad \text{(수식 3.1.9-1.1)}$$

<표 3.1.9-1.4> 다목적 방사광가속기 5 cell cavity operating Parameters

Parameter	Values
Total Accelerating Voltage @ 4 GeV	3.0 MV
Number of Cavity	3
Accelerating Voltage unit Cavity	1.0 MV
Coupling factor, β	1.20
RF power @ coupler unit cavity	34.41 kW
Dissipated power unit Cavity (P_c)	33.33 kW
Beam loading power unit Cavity	1.7 kW

운전 중 RF cavity 3대 중 1대가 고장일 경우 2대로 운영하는 것을 가정하여 필요한 RF power를 계산하였다. 이때 RF Cavity는 1.3 MV gap voltage로 운전하게 된다. 2대로 운전할 때 커플러에서 필요한 Power(P_c)는 56.33 kW이고 이때 전송 손실을 고려하여 약 64 kW RF power가 필요하다. <표 3.1.9-1.5>는 RF cavity 개수에 따른 필요한 power를 나타낸 것이다. 이때 전송에 의한 손실(P_{loss})은 전체 전력의 10%로 하였고 빔에 전달하는 Power(P_b)는 4 GeV에서 1.7 kW이다.

<표 3.1.9-1.5> RF cavity 개수에 따른 필요한 RF power

	P_c	P_b	P_{loss} (~ 10%)	P_t
2 cavities	56.33 kW	1.7 kW	5.8 kW	63.83 kW
3 cavities	33.33 kW	1.7 kW	3.5 kW	38.53 kW

부스터링의 cavity는 저장링 메인 cavity와 형태는 다르지만, 가능한 주요 부분을 공유하기 위해서 Input Coupler 및 튜너 구동 부분을 동일하게 제작하고 상호교환이 가능하게 하여 장애 발생 시 부품 수급 및 정비시간과 예비품 비용을 줄일 것이다.

다. 부스터링 고출력 RF 시스템

(1) 고출력 RF 증폭기 (High Power RF Amplifier)

가속기 분야에서 사용하는 전력증폭기는 크게 klystron을 사용하는 klystron 전력증폭기와 증폭소자로 LDMOS[1]라는 RF 트랜지스터의 반도체를 사용하는 반도체 전력증폭기(SSPA, Solid State Power Amplifier)가 있다.

다목적 방사광가속기 부스터링에서는 최대 80 kW 정도의 고출력 전력이 필요하므로 고압 전원 장치 및 진공상태가 필요한 klystron 증폭기보다는 50 VDC 이하의 저전압에서 동작하고 신뢰성과 운영 효율이 양호한 반도체 전력증폭기를 선택하는 것이 유리하다.

또한 최신의 솔리드스테이트 기반 전력증폭기(SSPA)는 현재 사용되고 있는 klystron 기반 증폭기에 비해 잡음 성능이 더 우수하며 장기적인 운영의 경우 klystron 증폭기 시스템에 비하여 효율이 높아 운전 전력료가 절감되는 효과가 있다.

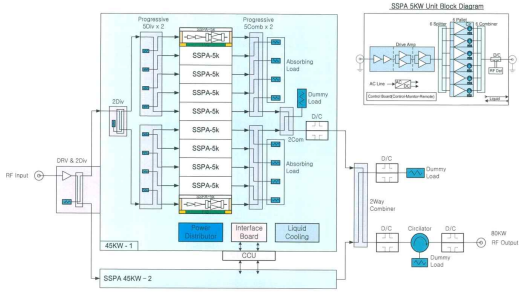
따라서 다목적 방사광가속기 부스터에서는 안정성, 신뢰성, 비용, 운영 및 유지보수 등을 고려하여 80 kW 급 고출력 시스템에서 SSPA를 선정하였다.

1) LDMOS(Lateral Double diffused MOS): 평면 이중 확산 금속 산화막 반도체 전계효과 트랜지스터 (MOSFET, Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

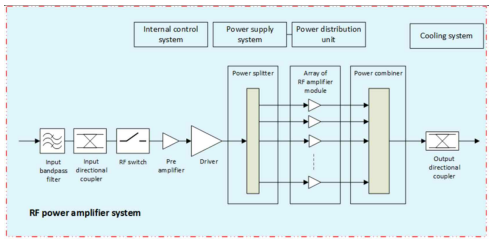
(2) 반도체 증폭기 (SSPA)

최신의 솔리드스테이트 기반 전력증폭기(SSPA)는 현재 사용되고 있는 klystron 기반 증폭기에 비해 잡음 성능이 더 우수하다. 또한 장기적인 운영의 경우 klystron 증폭기 시스템에 비하여 운전 효율이 높아 운전 전력료가 절감되는 효과가 있다.

부스터링 SSPA의 구성을 아래 <그림 3.1.9-1.4>와 <그림 3.1.9-1.5>에 자세히 나타내었다. 부스터링 SSPA는 기본적으로 저장링 SSPA와 동일한 사양을 적용할 수 있다. 다만 부스터링 SSPA는 연속파로 동작하는 저장링과 달리 zero에서 운전 출력까지 반복적으로 ramping 동작해야 한다. 고속의 pulse amplifier에서는 transistor bias 전류가 요구되는 pulse만큼 빠르게 증가하여야 하며 이를 보장하기 위해 bias 전원의 inductance 값이 충분히 낮아야 한다. 각 transistor의 출력이 약 750 W일 때 bias 전압은 50 V이고 DC to RF 효율이 약 50%가 됨을 감안하면 bias 전류값은 약 30 A(I = 750 W × 2 / 50 V)가 된다. 즉, ramping time 200 ms 동안 0~30 A를 증가시킬 수 있도록 DC bias 전원의 inductance 값 조정이 요구된다.



<그림 3.1.9-1.4> 80 kW 반도체 증폭기의 블록도 예시



<그림 3.1.9-1.5> 80 kW 반도체 증폭기의 블록도 예시

부스터링 용 80 kW SSPA의 구체적인 사양은 <표 3.1.9-1.6>과 같다.

<표 3.1.9-1.6> 부스터링 RF cavity 용 SSPA 사양

SSPA requirements	
Nominal output power (@P1 dB)	80 kW (CW)
Frequency	500 MHz ± 2 MHz (flatness < 0.5 dB)
Input Power	0 dBm (1 MW) for nominal output
Load VSWR	better than 1.22:1 (> 20 dB) w/ Load or Circulator
Output flange	WR1800
Operation mode	• CW • Ramp (1~80 kW/0.2 s) • Pulse (100 μs/10 Hz)
Amplification class	AB
Efficiency at nominal power	> 50% (DC to RF)
Cooling water temperature	25±1 ℃ (supplied by PAL)
Water cooling temperatures for Pallet amplifiers	< 35±1 ℃
Power stability	less than 0.5 dB (@1 hour @25±1 ℃)
Phase stability	less than 3° (@1 hour @25±1 ℃)
Harmonic & Spurious	< -30 dBc & <-60 dBc
Phase Noise (short-term stability)	< -90 dBc @1 kHz
Protection	• Over-reflected • Input • Output • Current • Temperature
Monitoring	• Input power • Output power • Current for each modules • Cooling temperature • Water pressure & flow
Control	Local & Remote w/ EPICS
HMI control panel	> 17" monitor
Rack size	Less than 2.0 m (W) × 1.8 m (D) × 2.2 m (H)
Including items: Remote control PC, FAT, SAT Including spares - SSA modules: 10% of 80 kW	

또한 SSPA는 저전도수(Low Conductivity Water)로 냉각된다. 5% 이내의 RF 증폭 모듈에 고장이 발생하더라도 Interlock에 의해 RF 스위치가 꺼지지 않는 경우 정상 작동을 계속할 수 있도록 충분한 신뢰성 및 중복성이 확보되어야 하며 고장난 모듈은 일반적으로 다음 유지보수 일에 교체할 수 있도록 한다.

(3) 고출력 RF 전송선로

SSPA에서 증폭된 80 kW 출력을 Cavity에 안정적으로 전송하기 위해서 WR1800 규격의 도파관을 선정하였다. 6-1/8" EIA Coaxial Line도 가능하나 설치 및 유지보수와 저장링 HPRF 시스템과의 호환성을 고려한 것이다.

Circulator는 SSPA 및 RF cavity 사이에 위치하여 과도한 reflection을 Dummy Load로 bypass 하여 증폭기의 손상을 방지하고, 임피던스를 매칭시켜 원활한 RF 전송 및 운전을 할 수 있게 한다.

정상 운전 중 Dummy load는 Circulator에 연결하여서 cavity로부터 reflection을 흡수하도록 운영하고, 정비 시에는 cavity 연결을 단락시켜 full reflection이 순환기를 거쳐 dummy load에 흡수되도록 하여 SSPA의 출력 측정을 용이하게 할 수 있다. 이러한 기능의 Dummy load는 Coaxial Water Load 및 WR1800 입력의 Ferrite Load가 있는데 Ferrite type이 Return loss 특성이 우수하고 RF 신호와 냉각수가 직접적으로 접촉하지 않아 안정적으로 운영을 할 수 있는 장점이 있어 부스터링 dummy load로 선정하였다.

다목적 방사광가속기에서 결정된 RF 시스템 전송 관련 부품 사양은 <표 3.1.9-1.7>과 같다.

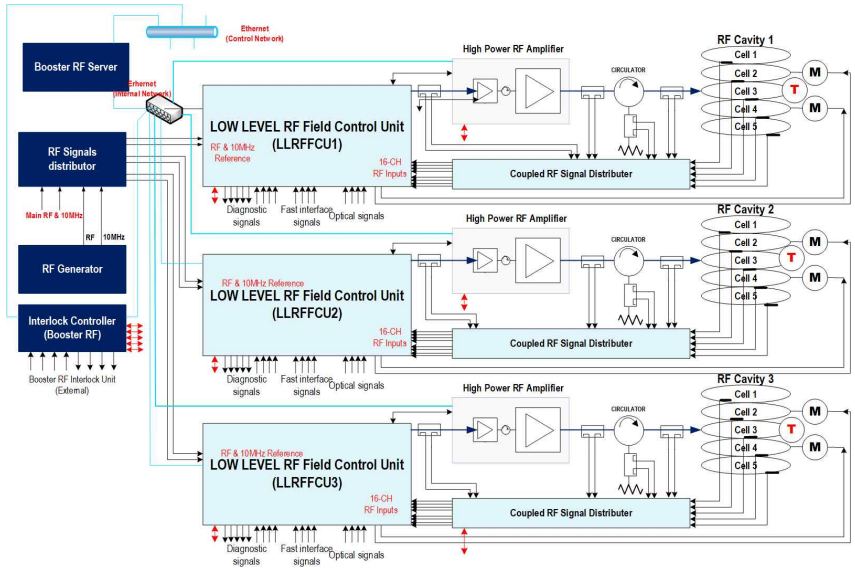
<표 3.1.9-1.7> 전송 관련 부품 사양

전송선로	Circulator	Dummy Load	Directional Coupler	Flexible waveguide
WR1800	WR1800 type	Ferrite type return loss : < -30 dB	60 dB	WR1800 수평 1 EA 수직 1 EA

라. 부스터링 Low-Level RF 시스템 (LLRF 시스템)

(1) 부스터링 LLRF 시스템 개요 및 기능

부스터링 LLRF 시스템은 Petra 5 cell cavity의 RF 특성 제어를 위해 4개의 제어 loop를 갖는다. 저장링 LLRF 시스템과 마찬가지로 cavity 내부의 가속전기장을 안정시키기 위하여 high power RF 시스템으로 인가되는 RF 신호의 진폭/위상을 제어하고 공진주파수를 보정하는 역할을 수행하며, 동시에 다중 셀 cavity를 사용함으로 인해 발생하는 cavity cell 간 field unbalance를 보정하기 위한 제어를 수행한다. 저장링 LLRF 시스템과 달리, RF 진폭/위상 제어를 위한 설정값은 빔에너지 변화에 상응하여 ramping curve를 갖는다. 또한 주요 RF 신호의 진단을 위한 데이터 획득/저장/진단 기능을 포함하며 RF 장치의 상태 감시를 통해 장치 및 인명 보호를 위한 interlock 기능을 수행한다.



<그림 3.1.9-1.6> 부스터 RF 장치의 구성

<그림 3.1.9-1.6>과 같이, LLRF 시스템은 RF 생성/분배 장치와 coupled RF 신호분배장치로부터 피드백제어를 위한 RF 신호들을 입력받고 interlock 제어장치와

외부 interlock (MIS/PSI) 정보를 공유함으로써 각각의 RF cavity와 high power RF 시스템을 개별 제어한다. 부스터링 LLRF 시스템의 RF 제어 목표 성능 사양은 <표 3.1.9-1.8>과 같다.

<표 3.1.9-1.8> 부스터링 LLRF 시스템의 RF 제어 목표 성능

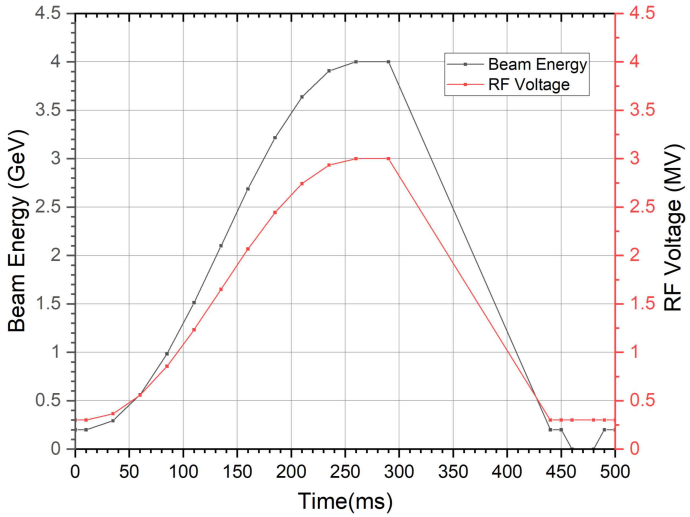
Parameters	Values
Nominal RF frequency (MHz)	499.593975 MHz
Repetition rate (ramping) (Hz)	2
RF resonance frequency range (MHz)	499 ~ 501 MHz
Amplitude stability (%) (@ cw operation)	< 1 (rms)
Amplitude stability (%) (@ ramping)	< ±2 (rms)
Phase stability (°) (@ cw operation)	< ±1 (rms)
Phase stability (°) (@ ramping)	< ±2 (rms)
Phase control range (°)	- 180° - + 180°
Field flatness (%)	< ± 2

(2) 부스터링 LLRF 시스템의 설계 및 제작

앞서 언급된 바와 같이, 부스터링 LLRF 시스템에서 요구되는 제어 기능은 저장링 LLRF 시스템에서 요구되는 기능 이외에 RF 전압 ramping 제어, field flatness 제어 기능이 추가로 요구되나, 하드웨어적으로나 소프트웨어적으로 많은 부분이 공유 가능하다. 따라서 시스템 개발의 수월성과 저장링 LLRF 시스템과의 호환성을 고려하여 부스터링용 LLRF 시스템의 경우, 저장링용 LLRF 시스템 하드웨어 구성 및 사양(<그림 3.1.9.19>, <표 3.1.9.17>, <표 3.1.9.18> 참고)을 바탕으로 기능을 확장하여 설계/제작할 계획이다. 다목적 방사광가속기용 LLRF 시스템은 기본적으로 기존 개발 사례들을 통해 이미 많은 가속기 시설에서 실제 운전에 적용되어 검증된 기술들(HW/알고리즘 등)을 바탕으로 설계/제작될 예정이며, FPGA, ADC/DAC, PLL 칩 등의 발전으로 인해 구현이 수월해진 GHz 대역의 고속 샘플링, 고속 데이터 수집, SoC 기술 기반의 통합형 디지털보드 개발 등에 대한 선행연구들 또한 병행할 예정이다.

(3) RF 가속전압 ramping 및 위상/진폭 제어

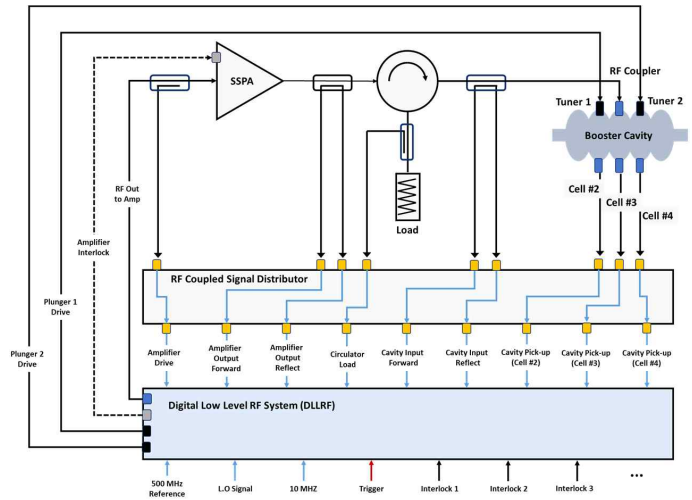
부스터링 RF Cavity는 LINAC에서 입사된 전자를 2 Hz의 반복률로 200 MeV에서 4 GeV까지 가속시키고 전자가 부스터링을 회전하면서 손실되는 에너지를 보충하는 역할을 수행하므로 cavity 내에 생성되는 가속전압은 일정한 값으로 유지되지 않고 <그림 3.1.9-1.7>과 같이 ramping profile을 갖는다. RF 전압은 빔에너지의 변화에 상응하여 0.3 MV에서 3.0 MV까지 상승/하강하는 과정을 반복하게 되며 이러한 과정은 외부의 timing 시스템으로부터 입력되는 trigger 신호를 기준신호로 하여 동작한다. RF ramping을 위해 사전에 정의된 RF set-point table은 상위 제어프로그램을 통해 LLRF 시스템의 FPGA 제어 로직에 적용할 계획이다. Ramp profile step의 경우, FPGA 내부 Random Access Memories (RAMs)의 용량을 벗어나지 않는 범위에서 가변적으로 적용할 수 있으므로 해외의 적용 사례를 참고하여 다목적 방사광가속기 부스터링 운전에 적합한 사양을 최종 선택할 예정이다. (SSRF : 50 set-point (repetition rate : 1 Hz) / NSLS-II : 512 set-point (repetition rate : 1 Hz) / TPS : 1024 set-point (repetition rate : 3 Hz)) RF 신호에 대한 진폭/위상 제어는 저장링 LLRF 시스템과 동일한 신호처리 과정을 통해 수행된다. RF cavity로부터 pick-up 된 신호 IQ 샘플링(또는 non-IQ 샘플링)과 digital filtering 과정을 통해 디지털 보드로 입력되면 설정값과 비교하여 계산된 오차를 PI 제어 과정을 통해 보정하는 방식을 적용하였다. (저장링 LLRF 시스템 디지털 신호처리 및 피드백제어 참고.)



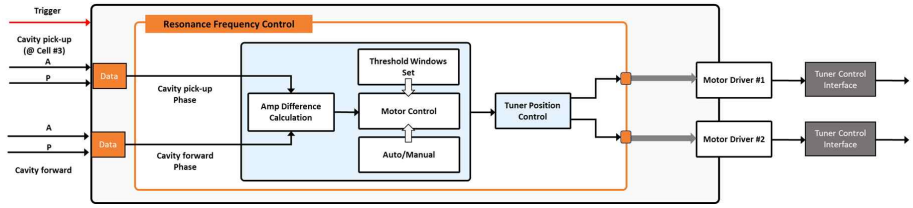
<그림 3.1.9-1.7> 빔 에너지 (검은색) ramping과 RF 가속전압 (붉은색) 변화

(3) 부스터링 LLRF 시스템의 Tuning loop 및 field flatness loop 제어

부스터링에 적용되는 PETRA type cavity는 저장링용 single cell cavity와 달리, 5 cell cavity로써 RF 공진주파수 제어를 위한 tuning loop 이외에 각각의 cavity cell 내부의 가속전기장 분포를 일정하게 유지하기 위한 field flatness 제어 기능이 추가로 필요하다. 이를 위해 <그림 3.1.9-1.8>에서 보는 바와 같이, PETRA type cavity에는 2개의 plunger가 부착되어 있으며, 공진주파수 및 진폭/위상 제어용 pick-up port(3번 cell에 위치)와 함께 field flatness 모니터링을 위한 pick-up 포트가 cavity의 2번 cell과 4번 cell에 추가적으로 설치되어 있다. Tuning loop 제어와 field flatness loop 제어는 2개의 plunger 위치 제어를 위한 tuner를 통해 수행되며, Tuning loop의 경우, <그림 3.1.9-1.9>와 같이, 3번 cell pick-up 신호와 forward 신호 간의 위상차를 계산하여 구해진 detune angle 값이 tuning threshold 값 이상으로 벗어나게 되면 2개의 tuner가 동일 방향으로 위치 조정되어 공진주파수가 사전에 정의된 목푯값 이내로 운전되는 방식을 적용하였다.

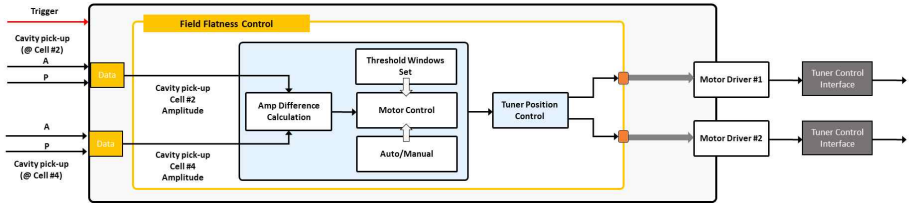


<그림 3.1.9-1.8> 부스터링 RF cavity 제어를 위한 RF 신호 layout

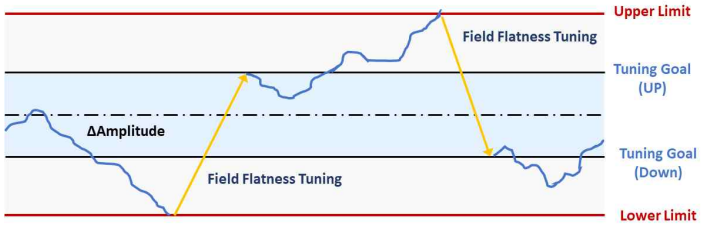


<그림 3.1.9-1.9> 공진주파수 제어를 위한 디지털 신호처리

<그림 3.1.9-1.10>은 field flatness 제어를 위한 디지털 신호처리 과정을 나타내며, 2번 cell과 4번 cell의 pick-up 신호를 통해 계산된 cell 내부 field 세기 차이($\triangle Amp_{flatness} = (Amp_{c2} - Amp_{c4}) / Amp_{c2}$)가 사전에 정의된 field flatness margin을 벗어나게 되면 2개의 tuner를 반대 방향으로 동작시켜 cavity cell 간의 field 세기를 사전에 정의된 목푯값 이내가 되도록 하였다.

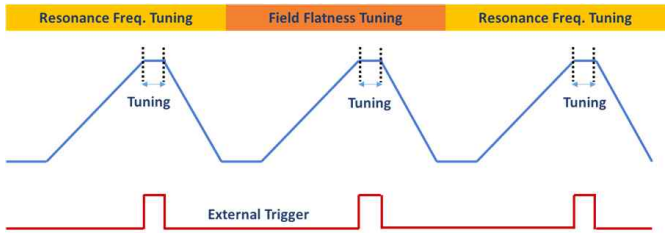


<그림 3.1.9-1.10> Field flatness 제어를 위한 디지털 신호처리



<그림 3.1.9-1.11> Field flatness 제어

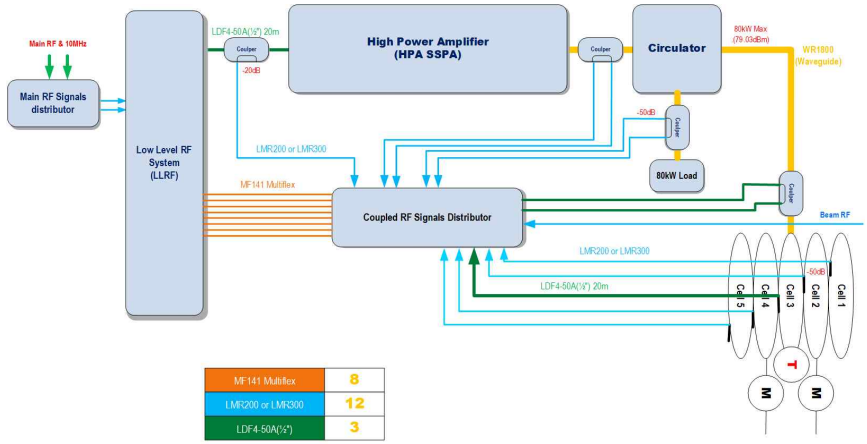
Tuning loop 및 field flatness loop 제어는 RF 가속전압이 top-up 모드일 경우에만 활성화되며 <그림 3.1.9-1.12>와 같이 tuning loop 제어와 field flatness 제어 loop가 external trigger에 동기되어 순차적으로 번갈아 가며 수행된다.



<그림 3.1.9-1.12> 부스터링 LLRF 시스템의 tuning loop / field flatness 제어 sequence

(4) RF 신호의 분배 및 전송

부스터링의 RF 가속 주파수는 약 500 MHz이며 RF 신호는 RF 신호 발생 장치로부터 입력되며 RF 주파수는 저장링 둘레의 변화에 따라 변화하며 부스터 RF 장치의 RF, 클락 등 주요 신호들은 입력되는 RF 주파수에 동기된다. 부스터링 RF 장치의 RF 신호 입출력구성은 <그림 3.1.9-1.12>와 같다. RF Cavity에 인가되는 RF 신호 최대 전력은 80 kW (79.03 dBm)로 예상하며 waveguide coupler (60 dB)에서 출력되는 RF 신호는 최대 0.08 W (19.03 dBm)이다.



<그림 3.1.9-1.12> 부스터링 RF 장치의 RF 신호 전송로

각 RF 단자에서 pick-up 된 RF 신호 전송은 환경에 따른 RF 위상변화를 줄일 수 있도록 설계하고 RF 신호 레벨을 조정하여 출력할 수 있도록 제작할 계획이다. Waveguide coupler를 통해 전송되는 RF 신호는 비교적 지름이 큰 저손실, 작은 위상변화를 가진 동 케이블을 사용할 계획이며 LDF4-50A 케이블의 경우 (20 m 기준) 1 dB 내외 삽입 손실과 상온에서 0.1 ℃ (20 ℃ to 60 ℃에서 600 ppm 변화로 최대 8.2 ℃의 변화 예상되고 10 ppm 이내에서 0.1 ℃) 이내 변화를 줄일 수 있도록 가열 테이프나 냉각수 등의 이용 방안들을 마련하였다.

3.1.10 전자석 전원장치

가. 개요

저장링(Strorage-Ring)의 모든 Magnet은 각개별 MPS (Magnet Power Supply)에 의해 전력이 공급되며, 부스터링(Booster-Ring)의 Magnet의 경우 소용량의 MPS를 제외한 직렬 연결 구성된다. Magnet에 전력을 개별 공급 시와 직렬 연결 공급 시의 장단점은 아래와 같다.

○ 개별 공급시

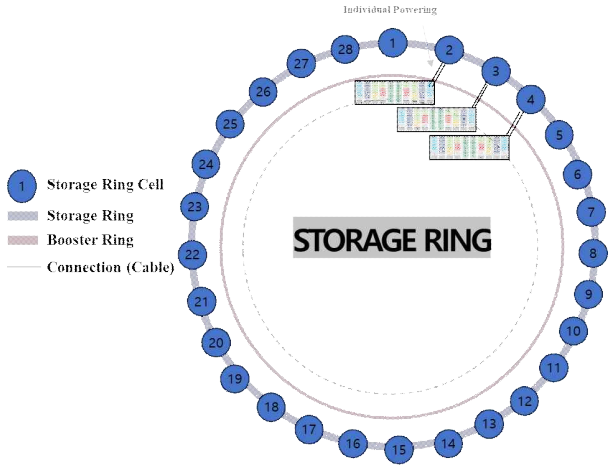
- 각 전자석의 B-filed 제어의 자유도가 높다.
- 각 전자석 전원장치와 연결된 전자석 저장 에너지가 낮음으로써, Crowbar Switch 등을 통해 긴급하게 Off가 가능하며, 안전에 장점을 가진다.
- 출력 전압이 상대적으로 낮아 높은 절연을 요구하지 않는다.
- 출력 케이블의 수는 증가하나, 출력 케이블의 다른 장비, 장치의 횡단 없이 최단거리 설치가 가능하여, 출력 케이블에 의한 EMI/EMC 문제 등이 적다.
- 공랭식 냉각방식 적용에 유리하여, 열원이 분산되는 효과가 있다.
- 전자석 전원장치의 출력 전압이 직렬 연결에 비해 낮아짐으로써, 전자석 전원장치의 모듈화 구성에 용이하다. 모듈화에 따른 많은 장점을 가진다.
- 각각 전자석 전원장치에 동일 전류 출력을 위해 높은 Accuracy가 요구된다.
- 동일 동작을 위해서는 Timing Sync가 요구된다.
- 전자석의 B-Filed가 Hysteresis에 의해 달라질수 있으며, 이에 대한 제어가 필요하다
- 예비품 보유에 용이하다.

○ 직렬 연결 공급시

- 직렬 연결된 전자석에 동일한 전류를 공급함에 따라 직렬 연결된 전자석의 동일한 B-field의 생성하기 유리하다.
- 출력 케이블의 길이는 증가하나, 유지보수 및 관리 하여야할 출력 케이블의 수는 적아진다.
- 수냉 냉각방식이 유리하며, 수냉 냉각방식으로 구성시 전원 장치 수가 적음으로써 Utility 비용이 적게 든다.
- 유지보수 및 진단 하여야할 전자석 전원장치의 수가 적다.
- MTTR (Mean Time To Repair) 가 상대적으로 길다.

나. 저장링(Storage-ring) 전자석 전원장치

저장링의 전자석 전원장치는 Magnet의 총 28개의 주기적인 섹터와 마찬가지로 28곳에 분산 배치되어 개별 Magnet의 전력을 공급하며, 그 구성의 개략도는 아래의 <그림 3.1.10.1>과 같이 구성된다.



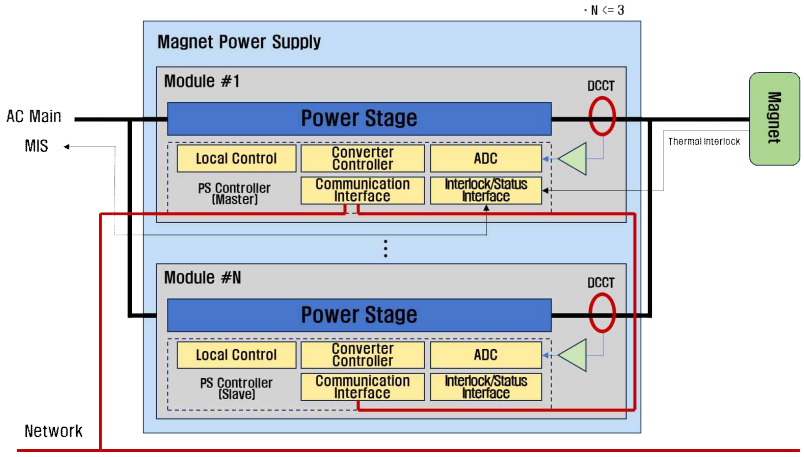
<그림 3.1.10.1> 저장링 전자석 전원장치 연결 구성

<표 3.1.10.1> 저장링 모듈러(Modular) 전자석 필요 사양 및 케이블

Magnet Type	Magnet Name	Magnet Qty		Resistor (Ohm)	Inductance (H)	Current (A)	Voltage (V)	Power (W)	Trim	Cable (AWG/ KCMIL)
		Qty/ Sec	Total							
Longitudinal Gradient Bending Magnet	LGBM1U	1	28	0.0390	0.0171	211.2	12.7	2693.2	-	350
	LGBM2U	1	28	0.0604	0.0069	226.1	8.8	1996.8	-	350
	LGBM2D	1	28	0.0604	0.0069	226.1	8.8	1996.8	-	350
	LGBM1D	1	28	0.0390	0.0171	211.2	12.7	2693.2	-	350
Center Bend	Central BM	1	28	0.0313	0.023	228.5	7.2	1633.8	-	350
Quad-Bend & Reverse Bend	DQ31U	1	28	0.068	0.037	119.1	8.1	964.7	T	4/0
	DQ32U	1	28	0.0488	0.0223	119.8	5.3	630.1	T	4/0
	DQ51U	1	28	0.128	0.167	225.0	28.7	6457.5	T	350
	DQ52U	1	28	0.169	0.098	102.4	17.3	1772.5	T	4/0
	DQ52D	1	28	0.169	0.098	102.4	17.3	1772.5	T	4/0
	DQ51D	1	28	0.128	0.167	225.0	28.7	6457.5	T	350
	DQ32D	1	28	0.0488	0.0223	119.8	5.3	630.1	T	4/0
	DQ31D	1	28	0.068	0.037	119.1	8.1	964.7	T	4/0
Quadrupole	QHU1	1	2	0.068	0.037	34.9	2.5	87.4	-	4/0
	QHU2	1	2	0.068	0.037	59.9	4.3	257.4	-	4/0
	QHU3	1	2	0.068	0.037	95.2	6.8	651.1	-	4/0
	QHU4	1	2	0.068	0.037	38.5	2.8	106.6	-	4/0
	Q11U	1	26	0.0754	0.04	105.8	8.8	930.0	-	4/0
	Q12U	1	26	0.068	0.037	89.3	6.4	572.7	-	4/0
	Q31U	1	28	0.0537	0.026	120.4	7.1	858.5	-	4/0
	Q32U	1	28	0.0537	0.026	120.4	7.1	858.5	-	4/0
	Q51U	1	28	0.1031	0.062	114.8	13.0	1497.0	H/V	4/0
	Q52U	1	28	0.068	0.037	122.9	8.8	1084.0	H/V	4/0
	Q52D	1	28	0.068	0.037	122.9	8.8	1084.0	-	4/0
	Q51D	1	28	0.1031	0.062	114.8	13.0	1497.0	-	4/0
	Q32D	1	28	0.0537	0.026	120.4	7.1	858.5	-	4/0
	Q31D	1	28	0.0537	0.026	120.4	7.1	858.5	-	4/0
	Q12D	1	26	0.068	0.037	89.3	6.4	572.7	-	4/0
	Q11D	1	26	0.0754	0.04	105.8	8.8	930.0	-	4/0
	QHD4	1	2	0.068	0.037	38.5	2.8	106.6	-	4/0
	QHD3	1	2	0.068	0.037	95.2	6.8	651.1	-	4/0
	QHD2	1	2	0.068	0.037	59.9	4.3	257.4	-	4/0
	QHD1	1	2	0.068	0.037	34.9	2.5	87.4	-	4/0
Sextupole	S31U	1	28	0.0331	0.00587	117.6	3.9	457.5	H/V/SQ	4/0
	S32U	1	28	0.0331	0.00587	117.6	4.2	496.3	H/V/SQ	4/0
	S33U	1	28	0.0359	0.00587	117.6	3.9	457.5	H/V/SQ	4/0
	S33D	1	28	0.0359	0.00587	117.6	3.9	457.5	H/V/SQ	4/0
	S32D	1	28	0.0331	0.00587	117.6	4.2	496.3	H/V/SQ	4/0
	S31D	1	28	0.0331	0.00587	117.6	3.9	457.5	H/V/SQ	4/0

<표 3.1.10.2> 저장링 양방향(Bipolar) 전자석 필요 사양 및 케이블

Magnet Type	Magnet Name	Magnet Qty		Resistor (Ohm)	Inductance (H)	Current (A)	Voltage (V)	Power (W)	Cable (AWG or KCMIL)
		Qty/ Sec	Total						
Octupole Magnet	Q31U	1	28	3.35	0.51	3.6	12.07	43.46	10
	Q31D	1	28	3.35	0.51	3.6	12.07	43.46	10
Quad-Bend& ReverseBend	Trim	8	224	-	-	-	-	-	10
Quadrupole	H-Corr(Q51)	2	56	1.712	0.062	3.432	5.875	20.159	10
	V-Corr(Q51)	2	56	1.712	0.062	3.432	5.875	20.159	10
Sextupole+ Slowcorrector	H-Corr	6	168	0.83	0.02634	8	6.7	53.4	10
	V-Corr	6	168	0.83	0.03506	7.1	5.9	41.6	10
	Skew Q	6	168	0.21	0.00686	7.1	1.5	10.4	10
Fast-Slow Corrento	H-Corrector	4	112	0.082	0.018	13.76	1.13	15.6	10
	V-cCorrector	4	112	0.215	0.022	17.3	3.72	64.4	10
	Skew Q	4	112	-	-	-	-	-	10
ID	Undulater H	9	18	-	-	-	-	-	10
	Undulater V	9	18	-	-	-	-	-	10
Active Shim	Active Shim	24	24	-	-	-	-	-	10



<그림 3.1.10.2> 저장링 대용량 전자석 전원장치 모듈러(Modular) 구성

<표 3.1.10.1>과 <표 3.1.10.2>는 각 대용량(Modular)과 소용량(Bipolar) 전자석 전원장치의 필요 사양과 케이블을 나타낸다. 대용량 저장링 전자석 전원장치는 전자석 전원 모듈의 최대 2 병렬 연결을 통해 전자석에 필요한 전류를 공급하는 모듈러(Modular) 구조로 설계되며, <그림 3.1.10.2>와 같이 입력 전원부터 분리, 각 개별

모듈이 단독 동작할 수 있는 높은 수준의 모듈화로 구성된다. 저장링 전자석 전원장치를 구성하는 모듈러 형태의 전자석 전원장치와 소용량 전자석 전원장치의 사양은 다음 <표 3.1.10.3>과 같으며, 인터페이스 사양은 <표 3.1.10.4>에 나타낸다.

<표 3.1.10.3> 저장링 전자석 전원장치 상세사양

Specifications	Modular MPS	Bipolar MPS
Output Current	140 A	±20 A
Output Voltage	40 V	±20 V
Maximum Average Power	5.6 kW	400 W
Maximum Peak Power	5.6 kW	400 W
Topology	Unipolar	Bipolar (4-Quadrant)
Control Mode	Constant Current (CC) & Constant Voltage (CV)	
Output Setting Resolution -CC/CV	> 19-bit	
Output Read back Resolution	24-bit	
Response time	> 1 kHz	> 10 kHz
Current Accuracy	< 100 ppmP-P	< 100 ppmP-P
Temperature Coefficient	< 30 ppm	< 40 ppm
Long Term Stability(8 hr)	< 20 ppm	< 30 ppm
Short Term Stability(30 min)	< 10 ppm	< 20 ppm
Reproducibility	< 30 ppm	< 40 ppm
Repeatability	< 30 ppm	< 40 ppm
Line Regulation	< ±40 ppmP-P	< ±50 ppmP-P
Load Regulation	< ±40 ppmP-P	< ±50 ppmP-P
Output Current Ripple	< 30 ppmP-P	< 40 ppmP-P
Cooling	Water/Air	Air (front-to-rear)
Maximum Efficiency	>90%	
Power Factor	>0.98 @full load	
PARALLELING Option	O (up to 3 modules)	X
Input Ratings	Three-phase 380 VAC/60 Hz (±10%)	Single-phase 220 VAC/60 Hz (±10%)
DC Link Voltage	TBD *	
Operating Ambient Temperature	0 ℃ ~40 ℃	
Size	< 19" × 3U	< 19" × 1U
Communication Interface	EthernetTCP-IP, SFP/SFP+	
Drivers	EPICS	
Local Control	Colordisplay with multi-function rotary switch	
Internal fault status	OutputOver-Current and Over-Voltage Over-Temperature DC-LinkUnder-Voltage Earth Leakage Current Regulation Fault	
Hardware Protection	Input Fuses Output Free-Wheeling Diodes (Crowbar)	
External ports	User-configurable "dry" contacts External input interface: 4 EA - Web Browser: Disable, High, Low 선택 가능 External output interface - 2set magnetic relay and 2set solid state relay - Normal Close 1, Normal open 1: 1set Trigger Input	
Extra Features	Waveform execution Remote Firmware Update Web server	

<표 3.1.10.4> 저장링 전자석 전원장치 인터페이스 사양

	항목	부 항목	내용	부 내용	비고
1	제어기	Digital Control	DSP	TMS320F28335 이상	-
			FPGA	ZynQ 7000 시리즈	-
2	Mode	-	Local/ Remote	-	-
3	Remote Interface	Ethernet	EPICS embedded	ZynQ 7000 이상	PV 별도 규정
		Web Browser	-		Oscilloscope 기능 MPS parameter 설정 가능 PV 수정 가능
4	Display	출력 전류	Digits	정수	2line 16문자 LCD 사용
		출력 전압	Digits		
		시스템 상태	LED	Run, Interlock 통신 Heart bit	장치 status 표시 (MPS 내부의 주요 진단 지점 상태 표시) Heart bit는 DSP가 1초 주기로 On/Off
		Mode	Local/Remote	-	LCD에 표시

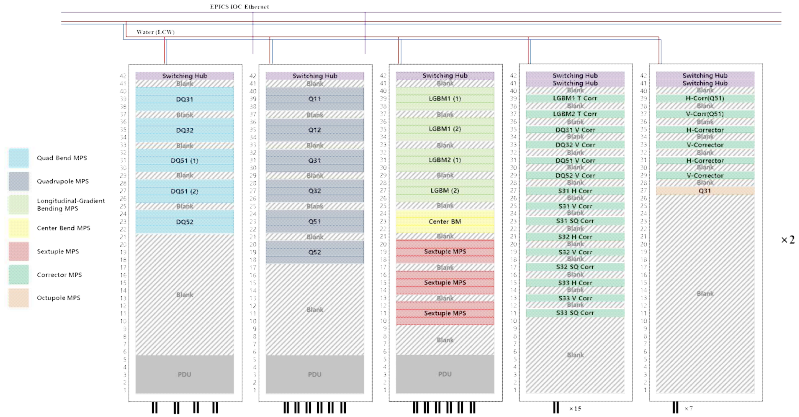
모듈러 구조의 전자석 전원장치 구성을 통해, Longitudinal Gradient Bending Magnet 2개의 모듈, Center Bend Magnet 1개의 모듈 Quad-Bend 및 Revers Bend Magnet 1개의 모듈 (DQ51 Magnet은 2개의 모듈), Quadrupole 1개의 모듈, Sextupole 1개의 모듈로 구성된 전자석 전원장치를 통해 전력을 공급한다. 즉, 섹터별 46개의 모듈이 적용된다. <표 3.1.10.5>와 <표 3.1.10.6>은 저장링 전자석 전원장치의 총 소요 모듈, 전원장치 소요 대수 및 출력여유분을 나타낸다.

<표 3.1.10.5> 저장링 모듈러(대용량) 전자석 전원장치 소요대수 및 출력여유분

Load Magnet	Magnet Qty		Module Qty	Total Module Qty	Magnet Current (A)	Magnet Voltage (V)	MPS Rated Current (A)	MPS Rated Volage (V)	Current Margin (%)	Voltage Margin (%)
	Qty/ Sec	Total								
LGBM1U	1	28	2	56	211.2	12.75	280	40	24.6	68.1
LGBM2U	1	28	2	56	226.1	8.83	280	40	19.2	77.9
LGBM2D	1	28	2	56	226.1	8.83	280	40	19.2	77.9
LGBM1D	1	28	2	56	211.2	12.75	280	40	24.6	68.1
Central BM	1	28	2	56	228.5	7.15	280	40	18.4	82.1
DQ31U	1	28	1	28	119.1	8.1	140	40	14.9	79.8
DQ32U	1	28	1	28	119.8	5.26	140	40	14.4	86.9
DQ51U	1	28	2	56	225	28.7	280	40	19.6	28.3
DQ52U	1	28	1	28	102.4	17.31	140	40	26.9	56.7
DQ52D	1	28	1	28	102.4	17.31	140	40	26.9	56.7
DQ51D	1	28	2	56	225	28.7	280	40	19.6	28.3
DQ32D	1	28	1	28	119.8	5.26	140	40	14.4	86.9
DQ31D	1	28	1	28	119.1	8.1	140	40	14.9	79.8
QHU1	1	2	1	2	34.90	2.50	140	40	75.1	93.7
QHU2	1	2	1	2	59.89	4.30	140	40	57.2	89.3
QHU3	1	2	1	2	95.25	6.84	140	40	32.0	82.9
QHU4	1	2	1	2	38.55	2.77	140	40	72.5	93.1
Q11U	1	26	1	26	105.80	8.79	140	40	24.4	78.0
Q12U	1	26	1	26	89.33	6.41	140	40	36.2	84.0
Q31U	1	28	1	28	120.40	7.13	140	40	14.0	82.2
Q32U	1	28	1	28	120.40	7.13	140	40	14.0	82.2
Q51U	1	28	1	28	114.80	13.04	140	40	18.0	67.4
Q52U	1	28	1	28	122.90	8.82	140	40	12.2	78.0
Q52D	1	28	1	28	122.90	8.82	140	40	12.2	78.0
Q51D	1	28	1	28	114.80	13.04	140	40	18.0	67.4
Q32D	1	28	1	28	120.40	7.13	140	40	14.0	82.2
Q31D	1	28	1	28	120.40	7.13	140	40	14.0	82.2
Q12D	1	26	1	26	89.33	6.41	140	40	36.2	84.0
Q11D	1	26	1	26	105.80	8.79	140	40	24.4	78.0
QHD4	1	2	1	2	38.55	2.77	140	40	72.5	93.1
QHD3	1	2	1	2	95.25	6.84	140	40	32.0	82.9
QHD2	1	2	1	2	59.89	4.30	140	40	57.2	89.3
QHD1	1	2	1	2	34.90	2.50	140	40	75.1	93.7
S31U	1	28	1	28	117.616632	3.89	140	40	16.0	90.3
S32U	1	28	1	28	117.616632	4.22	140	40	16.0	89.5
S33U	1	28	1	28	117.616632	3.89	140	40	16.0	90.3
S33D	1	28	1	28	117.616632	3.89	140	40	16.0	90.3
S32D	1	28	1	28	117.616632	4.22	140	40	16.0	89.5
S31D	1	28	1	28	117.616632	3.89	140	40	16.0	90.3
				1,072						

<표 3.1.10.6> 저장링 양방향(소용량) 전자석 전원장치 소요대수 및 출력여유분

Magnet Type	Magnet Qty		MPS Qty	Magnet Current (A)	Magnet Voltage (V)	MPS Rated Current (A)	MPS Rated Volage (V)	Current Margin (%)	Voltage Margin (%)
	Qty/ Sec	Total							
O31U	1	28	28	3.6	12.07	20	20	82.0	39.7
O31D	1	28	28	3.6	12.07	20	20	82.0	39.7
Quad-Bend& ReverseBend	8	224	224	-	-	20	20	-	-
H-Corr(Q51)	2	56	56	3.432	5.875	20	20	82.8	70.6
V-Corr(Q51)	2	56	56	3.432	5.875	20	20	82.8	70.6
H-Corr	6	168	168	8	6.7	20	20	60.0	66.5
V-Corr	6	168	168	7.1	5.9	20	20	64.5	70.5
Skew Q	6	168	168	7.1	1.5	20	20	64.5	92.5
H-Corrector	4	112	112	13.76	1.13	20	20	31.2	94.4
V-cCorrector	4	112	112	17.3	3.72	20	20	13.5	81.4
Skew Q	4	112	112	-	-	20	20	-	-
Undulater H	9	18	18	-	-	20	20	-	-
Undulater V	9	18	18	-	-	20	20	-	-
Active Shim	24	24	24	-	-	20	20	-	-

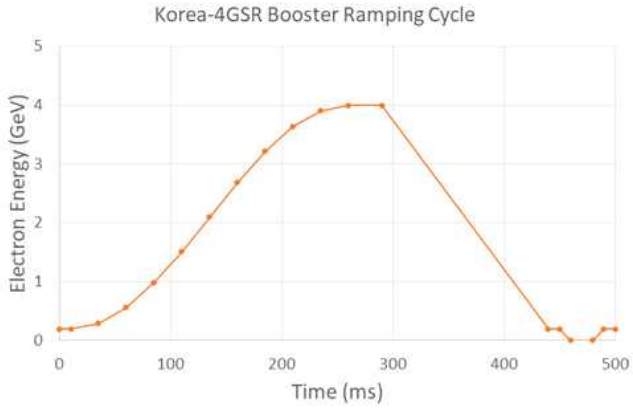


<그림 3.1.10.3> 저장링 전자석 전원장치 랙(Rack) 구성

<그림 3.1.10.3>은 저장링 전자석 전원장치 랙 (Rack) 구성을 나타내며, 섹터별 42U EIA 표준 랙 설치 사양으로 한다 (패널면의 가로폭이 19인치, 약 482.6 mm, 패널면의 높이는 1.75인치, 약 44.45 mm의 정배수). 섹터별 10개의 랙으로 구성되며, 총 섹터 28개 기준, 280개 랙이 분산 배치된다.

다. 부스터링 (Booster-ring) 전자석 전원장치

부스터링(Booster-ring)의 경우 <그림 3.1.10.4>와 같이 2 Hz Ramping 운전을 하며, 시운전을 용이하게 하기 위해 직렬 연결 구성하여 직렬 연결된 전자석에 동일한 전류를 공급함에 따라 동일한 전자석 B-field 생성하기 유리하도록 구성한다.



<그림 3.1.10.4> 부스터링 전자석 전원장치 Ramping 운전 Profile

<표 3.1.10.7> 부스터링 대용량 전자석 필요 사양 및 케이블

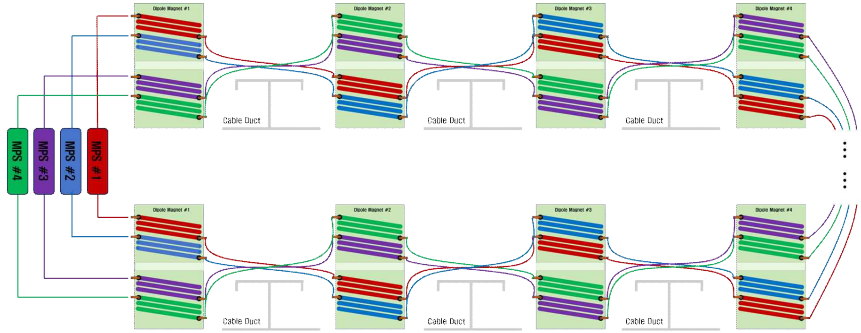
Magnet Type	Magnet Name	Magnet Qty Total	Resistor (Ohm)	Inductance (H)	Current (A)	DC Voltage (V)	DC Power (W)	Trim	Configuration	Cable (AWG/ KCMIL)
Dipole Bending	BD Strong	56	0.02283	0.0177	465.7	10.63	4951.05	-	56 Series/ 4 Parallel	1500
	BD Weak	4	0.02283	0.0177	385.1	8.79	3386.31	-	2-Series, 2-Series	1500
Quadrupole	Quad54	54	0.0371	0.0117	147	5.45	801.4	SQ	54-Series	4/0
	Quad4	12	0.0371	0.0117	147	5.45	801.4	SQ	2-Series, 2-Series	4/0
Sextupole	S Strong	30	0.0137	-	21.4	8.78	6.25	-	30-Series	2
	S Weak	30	0.006	0.0001517	64.1	11.6	24.79	-	30-Series	2

<표 3.1.10.8> 부스터링 소용량 전자석 필요 사양 및 케이블

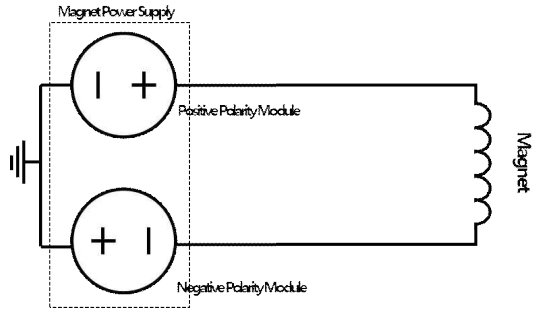
Magnet Type	Magnet Name	Magnet Qty Total	Resistor (Ohm)	Inductance (H)	Current (A)	Voltage (V)	Power (W)	Cable (AWG/ KCMIL)
Quadrupole	Skew Q	10	1.2977	0.0468	3.51	4.55	16	10
Fast-Slow Corrector	Corrector H	120	-	-	-	-	-	-
	Corrector V	120	-	-	-	-	-	-

<표 3.1.10.7>과 <표 3.1.10.8>은 각 대용량과 소용량의 부스터링 전자석 전원장치의 직류 운전 시 필요 사양 및 케이블을 나타낸다. 이극 전자석(Dipole Bending)의 경우 모두 56개의 전자석의 직렬 연결이 필요하며, 이를 모두 직렬 연결 후 2 Hz Ramping 운전을 하게 되면, 출력전압 3 kV 이상의 1 MW (peak)급의 전자석 전원장치를 필요로 하게 되며, Ramping 운전 시 출력 케이블의 EMI 및 Parasitic Inductance를 상쇄하기 위한 구성이 어려운 점, 고절연 특수 케이블 사용, 전자석의 3 kV 이상의 고전압 절연이 요구되는 점의 단점을 가지게 된다.

전자석 전원장치의 부담을 줄이고, 상기 단점을 극복하기 위해 이극 전자석의 연결은 <그림 3.1.10.5>와 같이 구성한다.



<그림 3.1.10.5> 부스터링 이극 전자석 연결 구성도



<그림 3.1.10.6> 부스터링 전자석 전원장치 내부모듈 구성

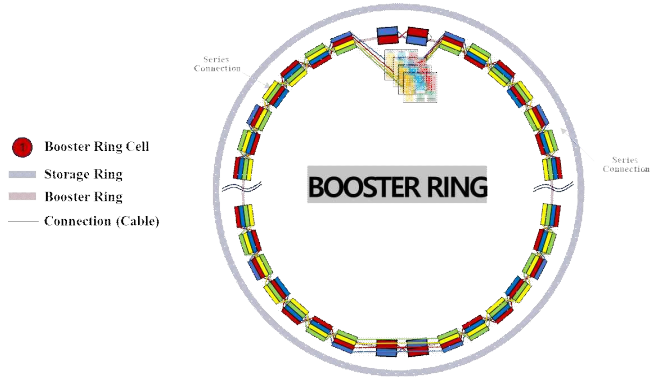
부스터링 이극 전자석의 상/하 권선 모두 2개의 개별 권선, 총 4개의 권선으로 구성하며, 각 이극 전자석의 한 개의 권선씩만 모두 직렬 연결하여 총 4대의 전자석 전원장치를 동시 운전함(병렬 운전)으로써 부스터링 이극 전자석에 전력을 공급한다. 또한 직렬 연결 시 상/하 권선을 교차 연결(1번 권선(상) → 3번 권선(하) → 2번 권선(상) → 4번 권선(하))하여 전자석 전원장치의 출력차이가 발생하더라도 전자석에 동일 B-field를 형성하여 시운전을 용이하도록 한다. 전자석 사이에 연결을 위한 케이블은 서로 전류의 방향이 반대로 되도록 구성하여 Parasitic Inductance 및 EMI를 저감 하도록 구성한다.

또한, <그림 3.1.10.6>의 그림과 같이 전자석 전원장치의 내부 구성을 2개의 내부 모듈로 직렬 연결하고 한 개의 모듈은 양전압(Positive Polarity), 다른 한 개의 모듈은 음전압(Negative Polarity)을 출력하며 모듈 중간에 접지를 연결한다. 이를 통해 출력 케이블 및 전자석은 접지부터 전자석 전원장치의 출력전압의 절반의 해당하는 절연내력을 가질 수 있도록 할 수 있으며, Ramping 운전 시 전자석으로부터 궤환되는 에너지를 받아주는 전자석 전원장치의 Capacitor Bank의 정격 전압을 낮출 수 있어 구성에 유리한 장점을 가지게 된다.

상기 설명하는 구성과 직렬 연결 후 2 Hz Ramping 운전 시 부스터링 대용량 전자석 전원장치의 사양은 다음 <표 3.1.10.9>와 같다.

<표 3.1.10.9> 부스터링 대용량 전자석과 전자석 전원장치 필요 사양

Magnet Type	Magnet Name	Magnet Qty Total	Total Resistor (Ohm)	Total Inductance (H)	Peak Current (A)	Peak Voltage (V)	Peak Power (W)	Average Power (kW)	Regenerative Energy @1cycle (J)	Configuration
Dipole Bending	BD Strong	56	0.3196	0.2478	465.7	785.55	365,829	24.9	23219	56 Series/ 4 Parallel
	BD Weak	4	0.0457	0.0354	385.1	92.80	35,737	2.433	2269	2-Series, 2-Series
Quadrupole	Quad54	54	2.2410	0.6329	147	779.00	114,513	15.34	4497	54-Series
	Quad4	12	0.1660	0.0469	147	57.70	8,482	1.70	500	2-Series, 2-Series
Sextupole	S Strong	30	0.0038	0.1500	113.9	102.77	11,706	-	-	30-Series
	S Weak	30	0.0038	0.1500	38.2	34.47	1,317	0.27	0.12	30-Series



<그림 3.1.10.7> 부스터링 전자석 전원장치 연결 구성

부스터링 소용량 전자석 전원장치는 저장링 전자석 전원장치와 동일하게 1개의 전자석을 1개의 전원장치가 전력을 공급하는 형태를 가진다.

<그림 3.1.10.7>은 부스터링 전자석 전원장치 연결구성을 나타낸다. 대용량의 부스터링 대용량 전자석 전원장치는 저장링 Shed의 한곳에 배치하여 유지보수 및 관리, 예비품 통합을 용이하게 하며, 부스터링 소용량 전원장치는 저장링 Shed에 분산 배치한다.

<표 3.1.10.10>은 부스터링 이극/사극 전자석 전원장치의 상세사양으로 예비품 관리 및 유지보수를 용이하기 위해 같은 전자석 전원장치를 적용하며, <표 3.1.10.11>은 부스터링 육극 전자석 전원장치의 상세사양으로 저장링 전자석 전원장치의 1개의 모듈을 4상한 운전이 가능하도록 변경하여 구성한다. 이외 부스터링 소용량 전자석 전원장치는 저장링 소용량 전자석 전원장치와 동일한 전자석 전원장치를 적용하여 구성한다.

<표 3.1.10.12>는 부스터링 대용량 전자석 전원장치의 총 소요 모듈, 전원장치 소요 대수 및 출력여유분을 나타낸다.

<표 3.1.10.10> 부스터링 이극/사극 전자석 전원장치 상세사양

Specifications	Booster-Ring MPS
Output Current	±600 A
Output Voltage	±1000 V (Each Module 500 V × 2)
Average Power	200 kW
Peak Power	600 kW
Topology	Bipolar (4-Quadrant)
Control Mode	Constant Current(CC) & Constant Voltage (CV)
Output Setting Resolution -CC/CV	> 19-bit
Output Read back Resolution	24-bit
Small Signal Bandwidth (-3 dB)	> 1 kHz
Current Accuracy	< 100 ppmP-P
Temperature Coefficient	< 30 ppm
Long Term Stability (8 hr)	< 20 ppm
Short Term Stability (30 min)	< 10 ppm
Reproducibility	< 30 ppm
Repeatability	< 30 ppm
Line Regulation	< ±40 ppmP-P
Load Regulation	< ±40 ppmP-P
Output Current Ripple	< 30 ppmP-P
Cooling	Water/Air
Maximum Efficiency	>90%
Power Factor	>0.9 @full load
Series Option	O (up to 2 modules)
Input Ratings	Three-phase 380 VAC/60 Hz (±10%)
DC Link Voltage Ripple	TBD *
OperatingAmbientTemperature	0 ℃ ~40 ℃
Communication Interface	EthernetTCP-IP, SFP/SFP+
Drivers	EPICS
Local Control	Colordisplay with multi-function rotary switch
Internal fault status	OutputOver-Current and Over-Voltage Over-Temperature DC-LinkUnder-Voltage Earth Leakage Current Regulation Fault
Hardware Protection	Input Fuses Output Free-Wheeling Diodes (Crowbar)
External ports	User-configurable "dry" contacts External input interface: 4 EA - Web Browser: Disable, High, Low 선택 가능 External output interface - 2set magnetic relay and 2set solid state relay - Normal Close 1, Normal open 1:1set Trigger Input
Extra Features	Waveform execution Remote Firmware Update Web server

<표 3.1.10.11> 부스터링 육극 전자석 전원장치 상세사양

Specifications	Booster-Ring MPS
Output Current	±200 A
Output Voltage	±200 V
Average Power	50 kW
Peak Power	400 kW
Topology	Bipolar (4-Quadrant)
Control Mode	Constant Current (CC) & Constant Voltage (CV)
Output Setting Resolution -CC/CV	> 19-bit
Output Read back Resolution	24-bit
Small Signal Bandwidth (-3 dB)	> 1kHz
Current Accuracy	< 100 ppmP-P
Temperature Coefficient	< 30 ppm
Long-Term Stability (8 hr)	< 20 ppm
Short-Term Stability (30 min)	< 10 ppm
Reproducibility	< 30 ppm
Repeatability	< 30 ppm
Line Regulation	< ±40 ppmP-P
Load Regulation	< ±40 ppmP-P
Output Current Ripple	< 30 ppmP-P
Cooling	Water/Air
Maximum Efficiency	>90%
Power Factor	>0.9 @full load
Series Option	O (up to 2 modules)
Input Ratings	Three-phase 380 VAC/60 Hz (±10%)
DC Link Voltage Ripple	TBD *
OperatingAmbientTemperature	0 ℃ ~40 ℃
Communication Interface	EthernetTCP-IP, SFP/SFP+
Drivers	EPICS
Local Control	Colordisplay with multi-function rotary switch
Internal fault status	OutputOver-Current and Over-Voltage Over-Temperature DC-LinkUnder-Voltage Earth Leakage Current Regulation Fault
Hardware Protection	Input Fuses Output Free-Wheeling Diodes (Crowbar)
External ports	User-configurable "dry" contacts External input interface: 4 EA - Web Browser: Disable, High, Low 선택 가능 External output interface - 2set magnetic relay and 2set solid state relay - Normal Close 1, Normal open 1:1set Trigger Input
Extra Features	Waveform execution Remote Firmware Update Web server

<표 3.1.10.12> 부스터링 전자석 전원장치 소요대수 및 출력여유분

Magnet Name	Magnet Qty	MPS Qty	Magnet Peak Current (A)	Magnet Peak Voltage (V)	MPS Rated Current (A)	MPS Rated Volage (V)	Current Margin (%)	Voltage Margin (%)
	Total							
BD Strong	56	4	465.7	785.55	600	1000	22.4	21.4
BD Weak	4	2	385.1	92.80	600	1000	35.8	90.7
Quad54	54	1	147	779.00	600	1000	75.5	22.1
Quad4	12	3	147	57.70	200	200	26.5	71.1
S Strong	30	1	113.9	102.77	200	200	68.0	48.6
S Weak	30	1	38.2	34.47	200	200	68.0	82.8
Skew Quadrupole	10	10	3.51	4.55	20	20	-	-
Corrector H	120	120	-	-	20	20	-	-
Corrector V	120	120	-	-	20	20	-	-

3.1.11 빔 진단 및 제어

가. 빔 진단장치

4세대 저장링 빔은 Multi-band의 특징으로 단면 빔 emittance 및 크기가 작다. 본 보고서에 설계된 emittance는 약 60 pm.rad으로 3세대 저장링 PLS-II의 설계 emittance 5,800 pm.rad와 비교하여 약 1/100 수준이다. 기존 3세대 저장링에 비해 매우 좁아진 진공함의 단면적과 다수의 상전도 가속관들은 wake impedance에 의한 발열과 멀티번치 빔 불안정성을 높이는 요인이 된다. 광음극전자총의 탑재와 멀티 번치 injection 방법은 인젝터 구간의 번치별 시분해 에너지 빔 진단 등이 요구되기도 한다.

따라서 제시된 몇몇 도전적 빔 진단 이슈들에 대응하기 위해 BPM, FOFB 등은 4세대 저장링의 사양에 맞게 추가 연구개발을 통해 구축되어야 한다. 그 밖의 진단장치는 기존 3세대 저장링(PLS-II)에서 사용한 방식을 그대로 사용하거나, 기존 장치들을 개선하는 수준에서 구성한다.

(1) 위치 및 기능별 정리

산업지원 다목적 방사광가속기에 설치될 대표적 진단장치들의 종류와 개수를 5개의 섹션별로 <표 3.1.11.1>과 같이 정리하였다.

<표 3.1.11.1> 진단장치 종류 및 개수

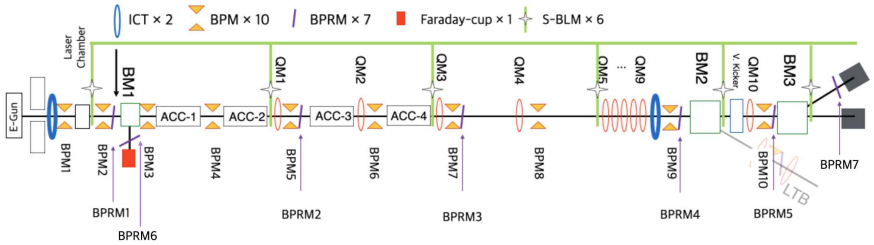
	분 류	측 정	섹션별 개수				
			LINAC	LTB	BR	BTS	SR
1	BPM (BTN, STRL*)	Beam Position	10	7+1	120	6	288
2	BPRM (YAG/OTR)	2D Profile, Emittance	7	5	-	3	-
3	X-ray Diagnostic Hutch	Beam Size, Emittance, Energy Spread	-	-	-	-	1
4	Visible light Diagnostic Hutch	Beam Size, Emittance, Bunch Length & Purity	-	-	1	-	3
5	Slow BLM	Beam Loss (slow)	1	1	4	1	14
6	Fast BLM	Beam Loss (fast)	-	-	5	-	30
7	ICT	Pulse Beam Current	2	1	-	2	-
8	DCCT	DC Beam Current	-	-	1	-	2
9	PBPM	Photon Beam Position	-	-	-	-	30
10	Tune Monitor	Tune	-	-	1	-	1
11	TFS/LFS	Multi-bunch Feedback	-	-	-	-	2
섹션별 총 진단장치 개수			20	15	132	12	371

<표 3.1.11.1>에서 각 섹션은 (1) LINAC, (2) LTB (Linac To Booster), (3) BR (Booster Ring), (4) BTS (Booster ring To Storage ring), (5) SR (Storage Ring)*을 나타내며 선형가속기 Button (BTN) Type 대신 Stripline (STRL) Type BPM을 사용할 수 있다.

(2) 위치 및 기능별 정리 – LINAC

<표 3.1.11.2> 선형가속기의 빔 Parameter 및 측정 방법

Beam Parameter	Instrument And Measurement
Position	BPM × 10, BPRM × 7
Profile	BPRM × 7
Pulse Charge	ICT × 2, FC (Absolute), BPM × 10 (relative)
Energy	Bending Magnet & BPRM × 2 (4 MeV, 200 MeV)
Multi-bunch Energy	Vertical kicker, Bending Magnet BPRM × 1
Emittance & Twiss	Quadrupole Magnet Scan & BPRM
Beam Loss	Slow BLM × 6 Channels



<그림 3.1.11.1> 선형가속기에서의 빔 진단 장치들의 구성과 위치

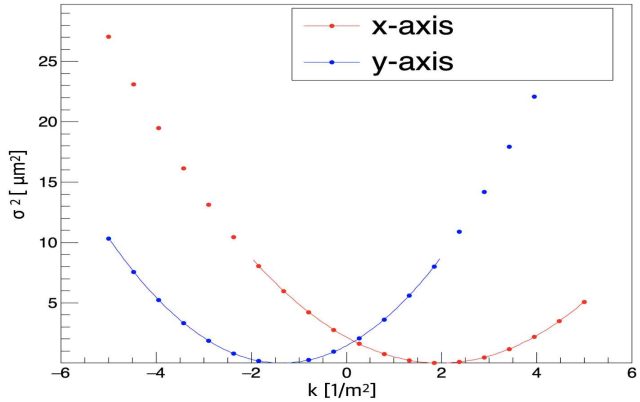
선형가속기의 진단장치들의 구성과 배치를 <그림 3.1.11.1>에 나타내었고 필요한 진단 빔 Parameter와 측정 방법을 <표 3.1.11.2>에 요약 기술하였다. 선형가속기에서는 총 7개의 측정 변수를 6가지 진단장치를 이용하여 측정하고 자세한 내용은 아래와 같다.

○ Beam Position은 총 10개의 Button type BPM과 7개의 BPRM을 사용하여 측정한다.

○ BPRM 1은 Egun에서 방출된 빔의 형상을 측정하고 BPRM 2와 3은 가속관 통과 후 프로파일을 측정한다.

○ BPRM 4/5와 QM3/QM9으로 Q-Scan하여 emittance 와 Twiss parameter를 측정한다. 첫 번째 구간은 QM3과 BPRM4를 이용하여 가속 직후 emittance 및 Twiss

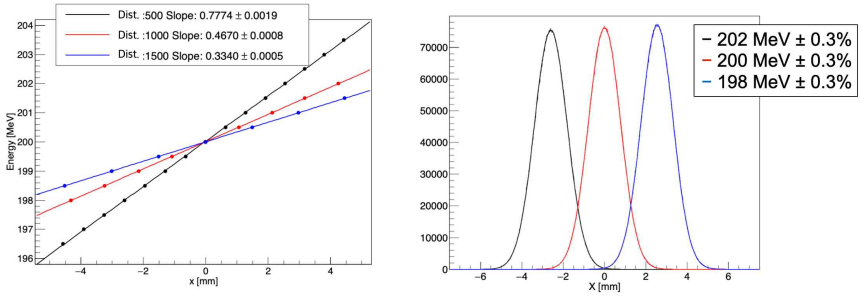
parameter를 측정한다. 이로부터 7개의 QM을 이용하여 LTB 전송을 위한 Twiss parameter Matching을 하고 Matching 된 Twiss parameter를 QM9와 BPRM5으로 검증한다.



<그림 3.1.11.2> 가속관 이후 Q-Scan 시뮬레이션 결과

<그림 3.1.11.2>는 첫 번째 구간인 가속 구간 이후 Q-Scan의 결과이다. 입력 Emittance와 Twiss Parameter는 선형가속기 가속 시뮬레이션의 결과를 사용하였고 선형가속기 QM은 최대 k값이 10이지만 약 ± 2에서 초점을 지나가므로 k값 Scan의 범위는 -5에서 5까지 하였다. <그림 3.1.11.2>의 X 축은 QM의 k값이고 Y 축은 빔 크기의 제곱을 나타내고 빔 크기-k값 관계를 이용하여 Emittance와 Twiss Parameter를 구하였다. 빔 크기를 측정할 BPRM Pixel 크기가 20 μm일 경우 Emittance 오차는 0.1%, α, β 변수는 5% 오차 내로 측정할 수 있다.

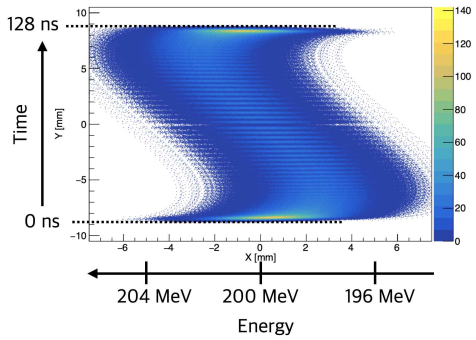
○ BPRM 6/7과 BM1/3을 이용하여 4 MeV / 200 MeV 에너지 Spectrum을 측정한다. BM1은 PAL-XFEL과 동일한 규격인 전자석, BM3는 LTB 수송을 위한 BM2와 같은 규격의 전자석을 사용하고 Bending Angle 역시 BM2와 같은 20°로 정하였다.



<그림 3.1.11.3> 200 MeV 진단라인에서 에너지 측정 시뮬레이션 결과

ELEGANT 시뮬레이션을 이용하여 BPRM7 위치 선정(Dist.) 그리고 에너지와 그 분포 측정의 분해능을 검토하였다. <그림 3.1.11.3>의 왼쪽은 Dist.가 500, 1000, 1500 mm일 때 BPRM의 x축과 에너지와의 관계를 나타내고 ± 2 MeV를 측정을 고려하여 Dist.를 500 mm로 정하였다. <그림 3.1.11.3>의 오른쪽은 빔 에너지가 202, 200, 198 MeV이고 그 에너지 분포가 0.3%인 빔으로 시뮬레이션을 한 스크린의 결과이고 에너지와 그 분포의 정확도와 분해능은 0.1% 미만이다.

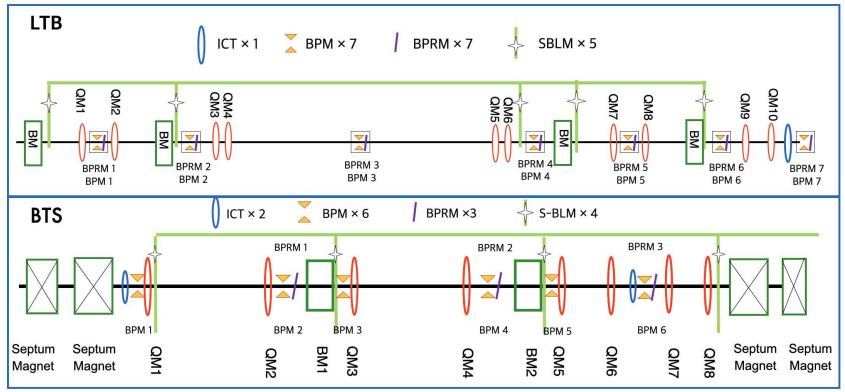
○ 선형가속기에서 Multi-bunch는 128 ns 동안 2 ns 간격으로 64개의 bunch를 방출한다. Bunch 별 에너지는 RF power와 방출 Timing의 함수이므로 bunch 각각의 에너지를 측정 가능하다면 선형가속기의 RF와 Timing feed back을 할 수 있다. 이러한 bunch 마다의 에너지 측정을 위하여 BM2와 BM3 사이에 4GSR의 TFS Kicker와 같은 규격의 TEM kicker를 수직 방향으로 kick을 하도록 설치하고 Pulse를 4 MHz RF를 이용하여 위/아래로 차면 BPRM 7의 Y축은 시간에 X축은 에너지에 해당하는 결과가 나온다.



<그림 3.1.11.4> Kicker를 이용한 Multi-Bunch 에너지 측정 시뮬레이션 결과

<그림 3.1.11.4>는 kicker를 이용한 시뮬레이션의 결과로 BPRM7에 빔 형상 이미지를 나타낸다. 테스트를 위해 ± 2 MeV인 Sine 경향의 빔을 임의로 생성하여 시뮬레이션하였다. <그림 3.1.11.4>의 Y축은 시간을 나타내고 x축의 역방향으로 에너지를 나타낸다. 이러한 BPRM 이미지로 64개의 빔 Bunch를 각각 분해하여 에너지를 측정할 수는 없지만, RF와 Timing은 연속적으로 변하므로 경향을 파악하여 RF 및 Timing Feed back을 할 수 있다.

(3) 위치 및 기능별 정리 - LTB & BTS (빔 전송라인)



<그림 3.1.11.5> LTB와 BTS에서의 진단장치 구성

LINAC to Booster Ring (LTB), Booster ring to Storage ring (BTS) 빔 수송라인에서는 네 종류의 진단장치를 사용하여 빔 전하, 빔 위치 및 형상, 그리고 빔 손실을 측정한다. 진단장치의 구성과 위치를 <그림 3.1.11.5>에 나타내었고 각 빔 Parameter 별 측정 방법을 아래에 기술하였다.

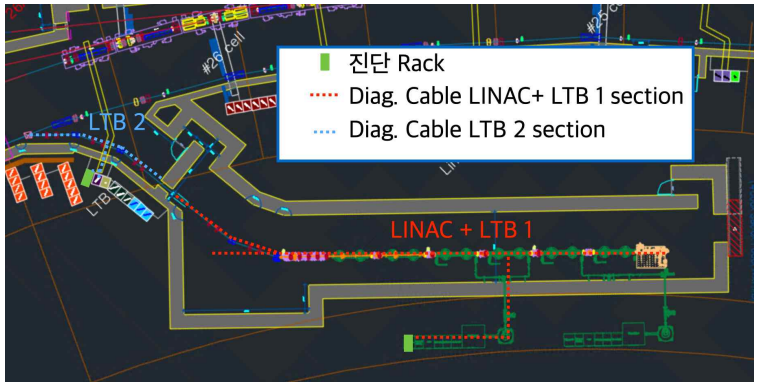
○ LTB는 종단, BTS는 양단 모두 ICT를 설치한다. LTB에서의 빔 전송률은 LTB 종단에서 BR로 출사 전하량을 측정하고 LINAC 종단의 전하량을 비교하여 LTB에서의 빔 전송률을 측정한다. BTS는 BR로부터 입사 시 SR로 출사 시 전하량을 측정하고 이 둘을 비교하여 빔 전송률을 측정한다.

○ LTB 총 7개의 BPM의 BPRM set을 이용, BTS는 6개의 BPM 3개의 BPRM으로 빔의 위치와 형상을 측정한다.

○ 빔 손실 모니터는 각 수송라인별로 하나씩 다채널 모듈을 사용하여 LTB에서는 다섯 곳, BTS에서는 네 곳에서 측정한다.

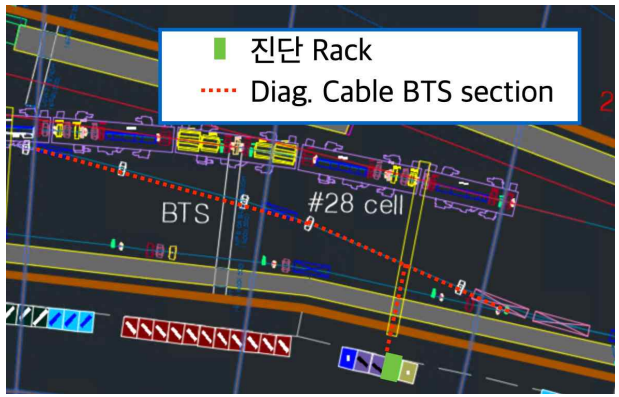
○ LTB는 double achromatic beam line으로 구성되어 beam dispersion이 최대가 되는 지점에 Bunch by Bunch (BbB) BPM을 설치하여 multi bunch의 번치 별 에너지를 측정한다. 20 μm 분해능의 BbB BPM으로 측정할 수 있는 에너지 분해능은 8.5 keV이다.

○ 선형가속기와 빔 수송라인의 연결구성



<그림 3.1.11.6> LINAC과 LTB의 진단장치 Cable 연결

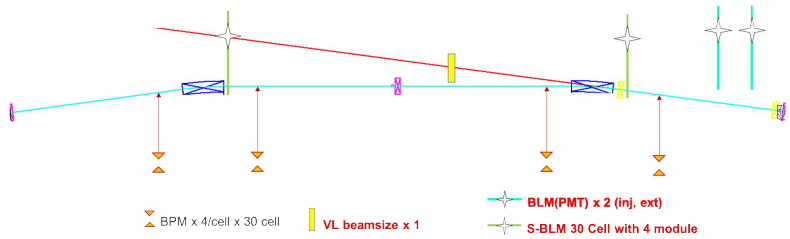
LINAC과 LTB의 케이블 연결을 <그림 3.1.11.6>에 나타내었다. LTB 중심에는 저장링 터널과 구분하기 위한 차폐벽이 있어 그 위로 케이블 트레이가 통과 하지 않으므로 LINAC과 LTB의 상류 부분의 진단장치는 LINAC 진단장치 Rack에서 LTB 나머지 절반은 LTB의 Rack에서 제어 및 신호 분석을 한다. LINAC + LTB1의 최장 케이블 길이는 트레이 높이를 고려하여 케이블 최장 45 m가 되고 장치별 케이블 연결에 대한 자세한 내용은 진단장치 종류별 정리에 기술하였다.



<그림 3.1.11.7> BTS의 진단장치 Cable 연결

<그림 3.1.11.7>은 BTS의 케이블 연결을 나타낸다. BTS는 control shed의 빔 진단 Rack을 이용하고 빔 진단 Rack으로부터 진단 장치들까지의 케이블 최장 길이는 30 m이다. 장치별 케이블 연결에 대한 자세한 내용은 진단장치 종류별 정리에 기술하였다.

(4) 위치 및 기능별 정리 - Booster Ring



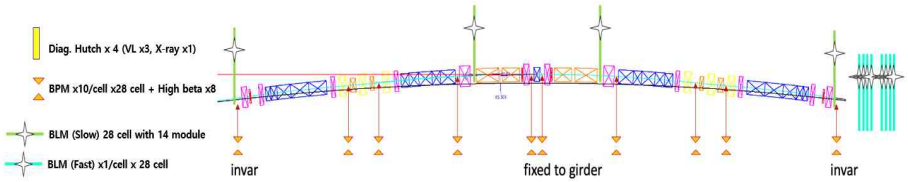
<그림 3.1.11.8> Booster Ring 진단장치의 구성과 위치

부스터링은 단위 셀 (cell) 당 4개의 Button BPM을 사용한다. 총 30개의 cell에 120개의 BPM이 필요하다. BPM은 모든 이극 자석의 앞뒤에 위치한다.

부스터링은 주 방사광링과 같은 터널에 위치하므로, 선량계형 빔 손실 모니터를 서로 공유한다. 따라서, 부스터의 빔 손실 모니터는 부스터 링의 입출사 구간의 2대를 포함해 총 5대의 선량계형 고속 빔 손실 모니터가 설치되며, 다채널 저속 빔 손실 모니터 4대를 사용해 전체 부스터링의 빔 손실을 측정하고자 한다. 입출사 구간이 아닌 곳에서는 광섬유 타입 다채널 빔 손실 모니터를 활용해 부스터링의 빔 손실을 저장링과 분리해서 측정하고자 한다.

빔 사이즈, 색수차 및 emittance의 진단은 부스터링 1곳에 설치된 Visible light Diagnostic Hutch에서 측정한다. 전류 계측을 위해 1기의 DCCT를 설치, 운용한다. 부스터링은 별도의 튠 측정을 위한 튠 모니터를 1기 설치해서 운용한다.

(5) 위치 및 기능별 정리 - Storage Ring



<그림 3.1.11.9> Storage Ring 진단장치의 구성과 위치

BPM의 예상 설치 위치는 cell 당 10곳이다. ID의 전후 2곳, 보정 자석 사이 4곳, Longitudinal Gradient 이극 자석 안쪽 2곳, Super-bend 전후 2곳이다. 디자인된 cell 개수는 총 28개이며, High-beta straight 섹션의 BPM 8개를 포함해 운전에 필요한 BPM의 총개수는 288개이다.

동시 두 곳에서 슬릿과 간섭계를 이용하여 빔 사이즈, 에너지 분산, emittance를 계측한다. Dispersion이 0에 가까운 RF 공동 직선구간에 별도의 장치를 설치하여 발생되는 photon으로 빔 사이즈 절대치를 측정하고, longitudinal gradient 이극 자석 구간에서 발생한 빔으로 상대적 크기 변화를 측정한다. 따라서 최소 4곳의 빔 진단 Hutch가 필요하다. 진단 Hutch에서는 가시광을 따로 빼내어 Streak Camera를 구동하고, Fill Pattern 모니터링을 수행한다. 4개의 빔 진단 Hutch 가운데 한 곳은 X-ray를 활용한 빔 진단 Hutch로 설치 운용된다.

선량계형 빔 손실 모니터는 저장링에 아크 섹션별 1기에 High-beta straight 섹션에 2기를 설치해 총 30기 배치한다. 추가로 다채널 저속 빔 손실 모니터는 총 14기가 저장링에 설치되어 전체 저장링의 빔 손실을 측정한다. 빔 전류 모니터링은 DCCT 2기를 빔 경로에 배치하여 상시 모니터링한다.

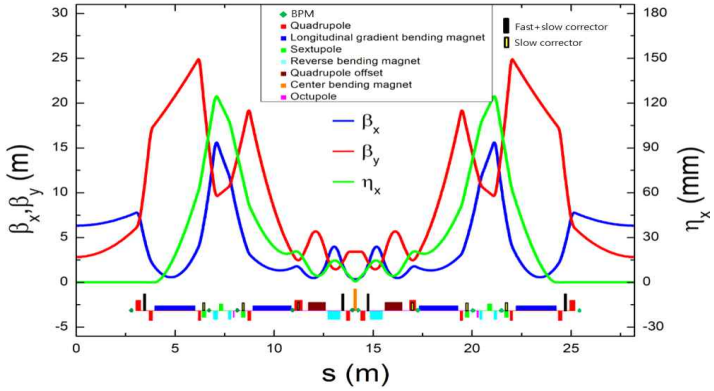
Bunch by bunch 피드백을 위한 TFS (Transverse Feedback System)와 LFS (Longitudinal Feedback System)은 저장링에 각 1기씩 총 2기가 설치 및 운용된다.

나. 빔 진단장치 종류별 정리

(1) Beam Position Monitor

4GSR 저장링에는 총 288개의 빔 위치 모니터(BPM)가 설치되어 있다. High beta straight 구간을 제외한 나머지 28개 cell에 각 10개의 BPM이 설치되어 있다.

<그림 3.1.11.10>은 4GSR 저장링 1 cell 기준 BPM 및 Corrector의 위치를 보여주고 있으며, <표 3.1.11.3>은 각각의 BPM 위치에서의 베타 함수를 보여주고 있다. 4GSR 저장링과 부스터링은 모두 버튼 타입의 픽업설계를 통해 빔 위치 모니터의 설계를 완성했다. 기존 3세대에 비해 저장링의 빔 크기와 진공함 크기가 모두 작아 특히 BPM에서의 wake impedance budget을 최소화하기 위한 최적화 설계를 수행했으며, BPM 픽업에서의 열부하를 줄이기 위해 유전율이 다른 두 개의 절연체를 사용해서 픽업 안테나의 설계를 수행했다.



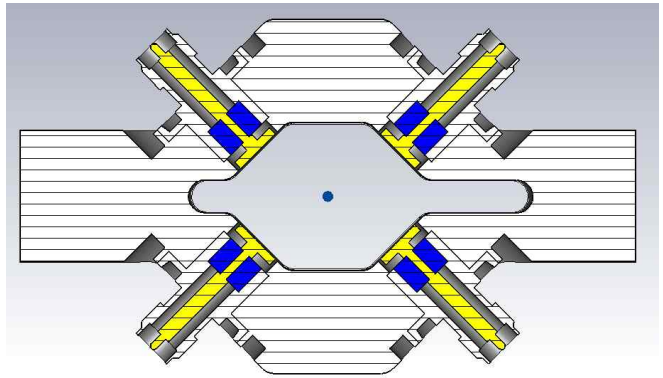
<그림 3.1.11.10> 4GSR 저장링 1 cell BPM 및 Corrector 배치도

<표 3.1.11.3> BPM 위치에서의 베타 함수

Element Name	Type	Location [m]	β_x [m]	η_x [mm]	β_y [m]
MONI1U02	Fast BPM	2.940000	7.698924	0.204329	5.883431
MONI2U02	Fast BPM	6.853048	12.614888	111.809349	12.440296
MONI3U02	Slow BPM	8.072548	8.324628	89.041717	13.331988
MONI4U02	Fast BPM	10.952965	1.661979	20.162768	3.103496
MONI5U02	Fast BPM	13.913640	0.455929	2.634210	3.420795
MONI5D02	Fast BPM	14.291640	0.455927	2.634210	3.420796
MONI4D02	Fast BPM	17.252315	1.661978	20.162768	3.103499
MONI3D02	Slow BPM	20.132732	8.324620	89.041717	13.331992
MONI2D02	Fast BPM	21.352232	12.614888	111.809349	12.440296
MONI1D02	Fast BPM	25.265280	7.698888	0.204329	5.883427

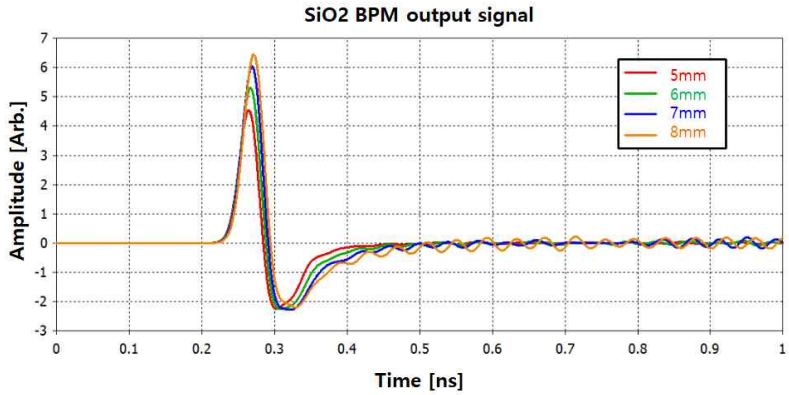
○ SiO2 BPM 설계

첫 번째 BPM 설계는 유전율 4의 SiO2 glass 절연체를 사용해 BPM pick-up을 설계했으며, 제작은 일본 교세라에서 시제품을 제작했다. 낮은 유전율을 갖는 절연체를 사용해서 wake impedance budget을 최소화하는 최적화 설계를 수행했다. SiO2 glass 절연체의 제작 방식인 고온에서의 열팽창계수 차이를 활용한 실링 방식으로 안테나를 제작하기 알루미나 세라믹 절연체를 활용한 안테나보다 정밀하게 제작하고 양산시 균일한 제작 공차를 얻을 수 있는 장점이 있다. <그림 3.1.11.11>은 SiO2 BPM의 단면도를 보여주고 있다. SiO2 glass 픽업 안테나는 유전율 4에 해당하는 SiO2 glass를 절연체로 설계했다. 브레이징 방식이 아닌 고온 실링 방식으로 안테나를 제작하기에 절연체와 비슷한 열팽창계수를 갖는 몰리브덴을 활용해서 안테나를 설계했다. 안테나의 하우징 부분은 역시 열팽창계수를 고려해서 KOVAR를 사용했다.

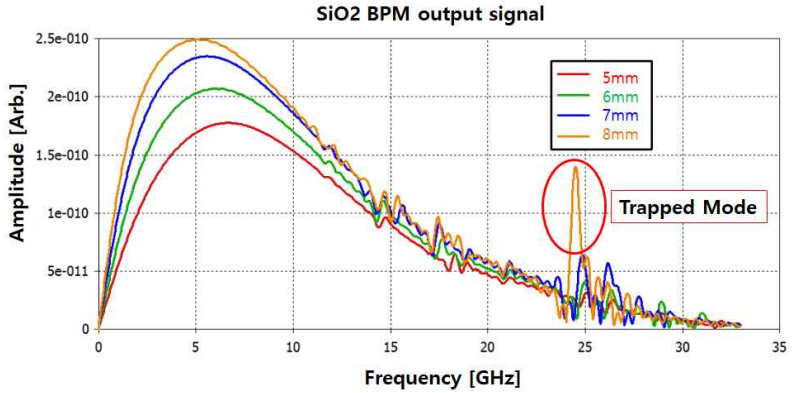


<그림 3.1.11.11> 4GSR SiO2 BPM 단면도

Button BPM을 설계하는 데 있어서 가장 중요한 변수는 버튼의 크기이다. 버튼의 크기가 작으면 wake impedance가 작아지지만, 출력 신호의 세기도 작아지므로 두 변수를 최적화해서 최적의 버튼 크기를 선정해야 한다. 4GSR Button BPM의 버튼 크기는 최적화 설계를 통해 6 mm로 결정되었다. <그림 3.1.11.12>와 <그림 3.1.11.13>은 버튼 크기 최적화 시뮬레이션의 결과를 보여주고 있다.



<그림 3.1.11.12> Button 크기에 따른 4GSR SiO2 BPM 출력 신호 파형



<그림 3.1.11.13> Button 크기에 따른 4GSR SiO2 BPM 출력 신호의 FFT

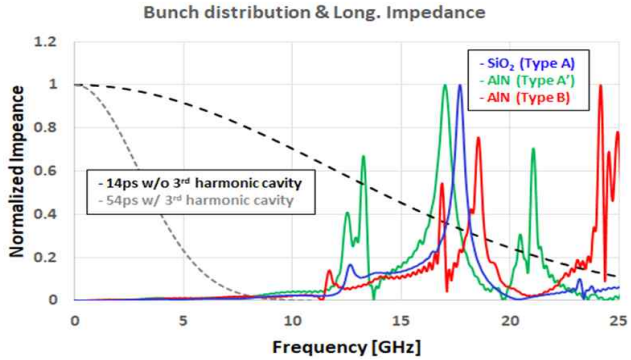
8 mm 버튼의 경우 25GHz 대역에서 Trapped mode가 발생되었으며, 4GSR 진공함과 BPM 안테나의 제작 가공 용이성을 위해 최종적으로는 6 mm를 선정하였다.

버튼 크기 이외에도 버튼의 높이, 형태, 절연체의 유전율, 절연체의 두께 및 높이, 버튼 갭 크기, 안테나 핀 두께에 따른 임피던스 매칭 등 여러 가지 변수들의 최적화 시뮬레이션이 수행되었으며 최종적으로 <그림 3.1.11.11>과 같이 SiO2 BPM이 설계되었다. 변수들 가운데 BPM 안테나 설계 시 가장 크게 고려된 부분은 절연체의 유전율이다. 절연체의 유전율이 낮을수록 wake impedance의 경우 고주파수 대역으로 이동하게 된다. 전체 BPM에서 발생하는 열 손실은 주파수 영역에서의 Wake impedance와 빔 번치 분포의 곱에 비례하기에 전체적으로 wake impedance를 고주파 대역으로 이동시키면 두 곱의 적분값이 작아져 전체 BPM에서 발생하는 열 손실을 줄일 수 있다. (수식 3.1.11.1)과 (수식 3.1.11.2)는 BPM에서 발생하는 열 손실을 계산하는 수식을 보여주고 있다.

$$k_{loss} = \int ds\, W_L(s)\lambda(s) \quad \text{(수식 3.1.11.1)}$$

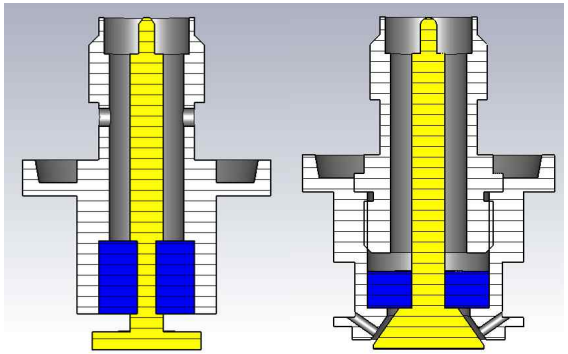
$$P_{loss}[W] = MQ[nC]^2 f_0[kHz]\, 10^{-3} k_{loss} \quad \text{(수식 3.1.11.2)}$$

여기서 k_{loss}는 열 손실 변수이며, M은 빔 번치의 개수, Q는 번치의 전하량, f_0는 저장링의 일주 회전 주파수이다.



<그림 3.1.11.14> 절연체 유전율 및 BPM 안테나 디자인에 따른 길이 방향 wake impedance

같은 BPM 설계 디자인에서 유전율이 높은 절연체를 사용하면 wake impedance의 주파수 대역은 유전율이 낮은 절연체보다 낮은 주파수 대역에서 생성된다. 하지만 높은 유전율을 갖는 절연체를 사용하더라도 BPM 안테나의 형태를 최적화하면 wake impedance 주파수 대역을 높은 주파수 대역으로 이동시킬 수 있다. 이러한 점에 착안해서 4GSR BPM은 알루미나 세라믹을 사용해서 최적화 설계를 한 SOLEIL과 SIRIUS의 BPM 안테나 설계를 참고해 두 번째 안테나 디자인을 설계했다. <그림 3.1.11.14>는 SiO2 BPM과 같은 디자인에서 유전율을 알루미나 계열의 절연체에 해당하는 유전율로 변경했을 때와 Bell shape 형태로 버튼 안테나를 최적화 설계했을 때보다 높은 주파수 대역에서 wake impedance가 발생하는 것을 보여주고 있다. 최종적으로 Type A Flat shape 디자인의 경우는 SiO2 유리 재질의 절연체를 사용해서 설계를 완성했으며, Type B의 Bell shape 디자인의 경우는 알루미나 계열의 절연체를 사용해서 설계를 완성했다. <그림 3.1.11.15>는 Type A의 SiO2 절연체를 사용한 BPM 안테나의 모습을 보여주고 있고, Type B의 알루미나 계열의 절연체를 사용한 BPM 안테나의 모습을 보여주고 있다.

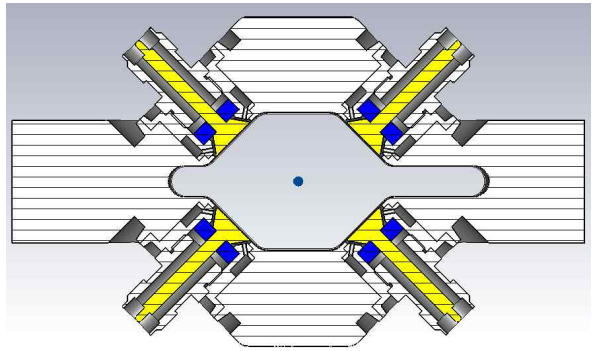


<그림 3.1.11.15> 최적화 설계를 통해 완성된 Type-A SiO2 BPM antenna (좌), Type-B 알루미나 BPM antenna (우)

○ Al2O3 alumina ceramic pick-up BPM design

두 번째 BPM 설계는 유전율 9~9.9를 갖는 전통적인 Al2O3 알루미나 세라믹 절연체를 사용해 BPM pick-up을 설계했으며, 시제품 제작은 포항가속기연구소에서 제작해 제작공정 기술이전을 통해 양산품의 국산화를 준비하고 있다. 알루미나 세라믹 디스크의 높은 유전율에 의한 wake impedance budget을 최소화할 수 있도록 Bell-shape 타입의 최적화 설계를 수행했다. 버튼 헤드를 종 모양으로 제작해야 하기에 기존의 픽업 안테나보다는 가공 용이성이 떨어지지만, SiO2 절연체 디자인과 비슷하거나 그 이상 wake impedance budget을 줄일 수 있고 열전도율이 높기에 열부하가 안테나에 발생 시 빠르게 주변부로 열을 발산할 수 있는 장점이 있다. 다만, 이러한 성능을 얻기 위해 세라믹의 두께를 2 mm로 얇게 가공하고 복잡한 구조의 안테나 제작공정 때문에 양산시 매우 정밀한 공차 관리가 필요하다. 시뮬레이션 상에서 검증이 어려운 조립 후의 안테나 강성은 시제품을 제작 후 여러 가지 강성 테스트를 통해 검증하고자 한다.

알루미나 계열의 절연체 가운데 후보로 선정된 재료는 유전율 9에 해당하는 AlN (Aluminium Nitride)과 전통적인 세라믹 재료인 Al2O3 (Alumina)이다. AlN의 경우는 Al2O3보다 낮은 유전율을 갖고 열전도율이 높아 먼저 고려해 설계 및 제작 가능성을 검토했지만, 국내외 경험이 풍부하고 제작할 수 있는 업체를 찾기가 어렵고 제작 단가 역시 SiO2보다 비싸서 최종적으로 다방면으로 검토한 결과 Al2O3를 사용하기로 결정되었다. <그림 3.1.11.16>은 최적화 설계 통해 완성된 Al2O3 Bell shape BPM의 단면도를 보여주고 있다.



<그림 3.1.11.16> 최적화 설계를 통해 완성된 Type-B 알루미나 BPM의 단면도

Al2O3 BPM의 안테나는 두 개의 하우징을 사용해 조립한다. 위쪽 SMA connector 연결 하우징은 SUS 316L로 가공되며, 세라믹과 브레이징을 수행할 아래쪽 하우징은 KOVAR로 가공되었다. <그림 3.1.11.16>의 파란색 부분 Al2O3 알루미나 세라믹이며, 안테나 핀은 티타늄으로 제작했다. <표 3.1.11.4>는 최적화 설계를 통해 결정된 저장링 BPM의 parameter들을 보여주고 있다.

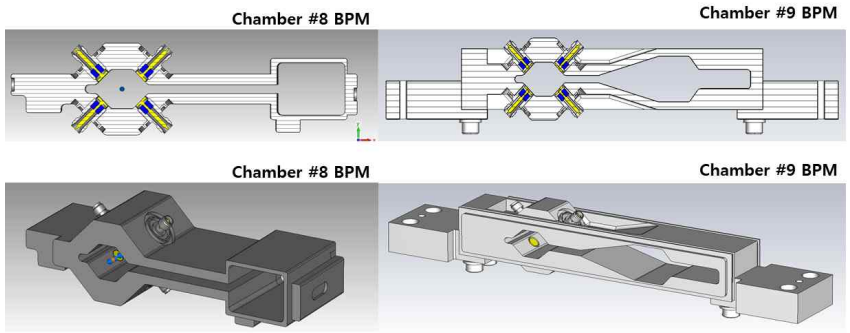
<표 3.1.11.4> 저장링 BPM parameter table

	SiO2 BPM (Type A)	Al2O3 BPM (Type B)
Button size	6 mm	6 mm
Button thickness	1 mm	2.2 mm
Button shape	Flat	Bell
Gap size	0.35 mm	0.35 mm
Insulator	SiO2 (ε_r = 4)	Al2O3 (ε_r = 9.9)
Insulator diameter	5.3 mm	6.6 mm
Insulator height	4 mm	2 mm
Inner pin diameter	1.8 mm (1 mm for Insulator)	1.8 mm
Impedance	50 Ω	50 Ω
Housing material	Kovar	Kovar/SUS316L
Pin material	Molybdenum	Titanium
Pin type	RP SMA male	RP SMA male
Insulator assemble method	HT sealing	Brazing

○ BPM Calibration factor

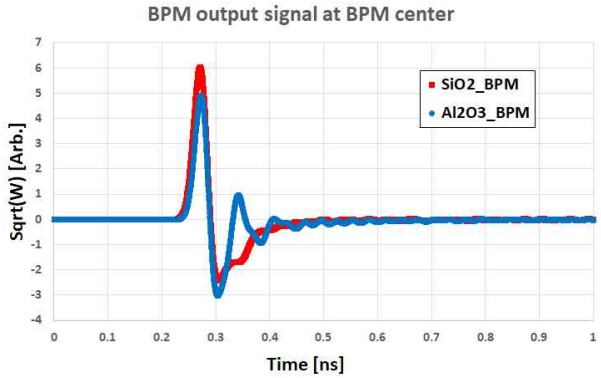
BPM의 calibration factor는 버튼의 크기와 진공함의 모양에 많이 의존한다. 4GSR의 경우 가장 대표적인 BPM 진공함의 단면적은 Bellows flange BPM으로 <그림

3.1.11.11>과 <그림 3.1.11.16>과 같은 형태이다. 이외에도 BPM 진공함은 위치에 따라 5가지 종류로 다르지만, 안테나가 설치되는 빔 파이프 단면적은 동일하기에 BPM calibration factor에 미치는 영향은 미미하다. <그림 3.1.11.17>은 BPM 진공함 8번, 9번의 단면적 예를 보여주고 있다.

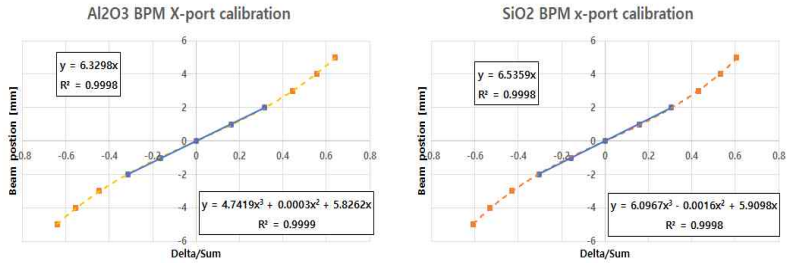


<그림 3.1.11.17> 4GSR BPM 진공함 8번, 9번 단면도

4GSR BPM의 calibration factor는 가장 기본 형태인 Bellows Flange 진공함을 이용해서 계산되었다. 진공함의 모양은 같지만 각각 BPM antenna의 출력 신호 크기 및 파형이 다르기에 약간의 Calibration factor 차이가 발생한다. <그림 3.1.11.18>은 번치 길이 3.66 mm일 경우 SiO2 BPM과 Al2O3 BPM의 출력 신호 파형을 보여주고 있다. SiO2 BPM의 경우가 더욱 신호 파형이 깨끗하고 출력 신호의 세기가 크다. 하지만, TDP (Time Domain signal Processing)의 경우 신호 절댓값을 적분해서 빔 위치를 계산하기 때문에 적분값의 변화량은 크게 차이를 보이지는 않는다.



<그림 3.1.11.18> 4GSR BPM output signals



<그림 3.1.11.19> Horizontal calibration factor of 4GSR SiO2 BPM & Al2O3 BPM

<그림 3.1.11.19>는 4GSR BPM의 Calibration factor simulation 결과를 보여주고 있다. BPM 4-port 출력 신호의 절댓값을 적분해 다음의 수식을 바탕으로 빔 위치를 계산한다.

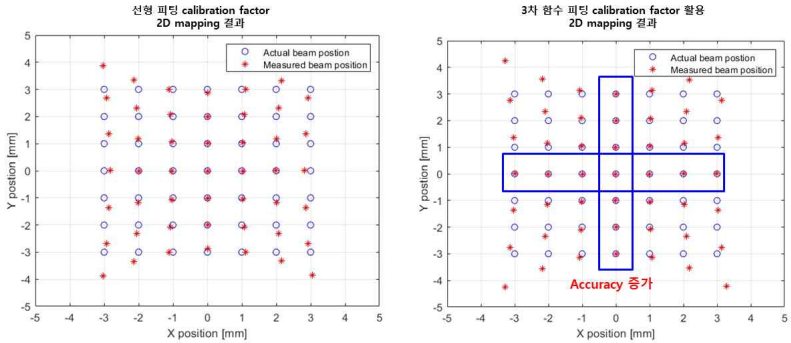
$$x_{pos} = k_{cal} \times \frac{(A-B+C-D)}{(A+B+C+D)} + offset = k_{cal} \times x_DoS + offset \quad \text{(수식 3.1.11.3)}$$

두 BPM의 수평 방향 Linear calibration factor는 SiO2 BPM 경우 6.54 mm, Al2O3 BPM 경우 6.33 mm로 비슷하다. 또한, 수직 방향의 경우에는 SiO2 BPM 경우 11.61 mm, AlO3 BPM 경우 11.2 mm이다. 4GSR BPM은 진공함의 모양이 수평 방향이 수직 방향보다 넓기에 수직 방향보다는 수평 방향으로 더 정밀하게 빔 위치를 측정할 수 있다. <표 3.1.11.5>는 두 BPM의 calibration factor simulation의 결과이다.

<표 3.1.11.5> 저장링 BPM calibration simulation results

	SiO2 BPM (Type A)	Al2O3 BPM (Type B)
Linear fit x-port	6.54 mm	6.33 mm
Linear fit y-port	11.61 mm	11.2 mm
Poly fit x-port	C1 = 6.0967, C2 = -0.0016, C3 = 5.9098, offset = 0	C1 = 4.7419, C2 = 0.0003, C3 = 5.8262, offset = 0
Poly fit y-port	C1 = 19.326, C2 = -0.0019, C3 = 10.998, offset = 0	C1 = 19.326, C2 = -0.0019, C3 = 10.998, offset = 0

시운전 시나리오 초기에는 빔 위치를 중심에 정렬하기 어렵기에 2D mapping data를 바탕으로 look up table을 작성해서 빔 위치를 중심으로 정렬하는 방법도 사용된다. 따라서 Linear cal. factor를 사용할 경우와 Poly fit cal. factor를 사용한 경우의 2D mapping look up table을 작성해 초기 시운전에 대비하고자 한다. <그림 3.1.11.20>은 Linear fit과 poly fit을 활용해 작성된 4GSR BPM의 2D mapping 결과이다. Linear fit cal factor를 사용하면 on-axis 기준 ± 2 mm 구간에서 빔 위치 정확성을 확보할 수 있다. 만약 poly fit을 사용한다면 ± 3 mm 구간에서 높은 정확성을 확보할 수 있다. 하지만, 반대로 off-axis의 정확성은 떨어지기에 시운전 초기에는 linear fit cal. factor와 look up table을 사용해서 Beam based alignment (BBA)를 수행하는 것이 좋다.

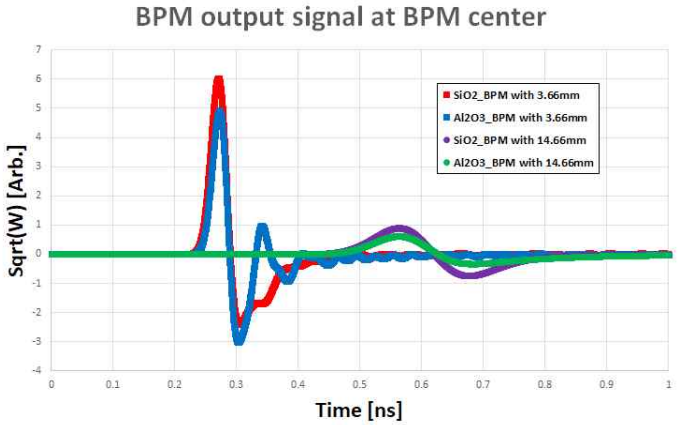


<그림 3.1.11.20> 2D mapping simulation results of 4GSR BPM

○ Thermal analysis of 4GSR BPM

3rd harmonic cavity가 없을 때의 4GSR 저장링 번치 길이는 3.66 mm이며, 3rd harmonic cavity가 있을 경우의 번치 길이는 14.66 mm이다. 초기 시운전 시에는 3rd harmonic cavity 없이 시운전을 시행할 수도 있기에 반드시 4GSR BPM은 3.66 mm 빔

번치 길이에도 운전에 문제가 없어야 한다. <그림 3.1.11.21>은 3rd harmonic cavity 유무에 따른 BPM의 출력 신호 세기 및 파형의 변화를 보여주고 있다.

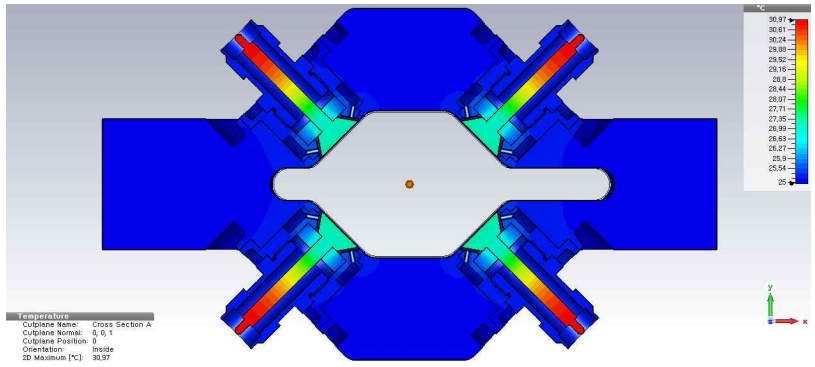


<그림 3.1.11.21> 4GSR BPM output signals with/without 3rd harmonic cavity

번치 길이가 짧을수록 BPM chamber 안에 발생하는 wake field의 영향이 강해지며, 이를 억제하기 위해서는 빠르고 정밀한 피드백 시스템이 필요하다. <표 3.1.11.6>은 3rd harmonic cavity가 운전되는 경우와 되지 않는 경우, 저장링 BPM에서 발생하는 Power dissipation과 최대 발열 온도를 정리하였다. 이때, 사용된 주변부 온도는 25 ℃이다. 전자빔이 BPM의 중심을 지날 때는 BPM에 높은 열이 발생하지 않지만, 3rd harmonic cavity 및 피드백 시스템 없이 빔 전류 250 mA 이상에서 장시간 빔 운전을 하게 되면 BPM에 발생하는 열 손실에 의해 버튼 절연체 및 안테나 핀의 변형이 발생할 수 있다. 예를 들어, 3rd harmonic cavity 없이 빔 전류 250 mA로 운전하는 경우, 만약 250 mA 빔이 버튼에 모두 충돌하면 안테나 핀의 온도는 240 ℃ 이상 상승하게 된다. 따라서, 3rd harmonic cavity가 가동하기 어려울 때는 빔 전류 250 mA 이하 빔 운전이 요구된다. <그림 3.1.11.22>는 Al2O3 BPM의 250 mA & 3rd harmonic cavity가 없을 경우의 열 손실 분포를 보여주고 있다.

<표 3.1.11.6> 저장링 BPM Power dissipation and Max temp. at centered beam

	SiO2 BPM (Type A)		Al2O3 BPM (Type B)	
	Total P_loss [W]	Max Temp. [℃]	Total P_loss [W]	Max Temp. [℃]
250 mA without 3rd harm. cavity	3.28	44.2	2.093	31.0
400 mA without 3rd harm. cavity	8.4	74.1	5.35	40.3
250 mA with 3rd harm. cavity	0.081	25.5	0.052	25.15
400 mA with 3rd harm. cavity	**0.21**	**26.7**	**0.13**	**25.38**



<그림 3.1.11.22> Thermal simulation results of 4GSR Al2O3 BPM without 3rd harmonic cavity for 250 mA beam operation condition

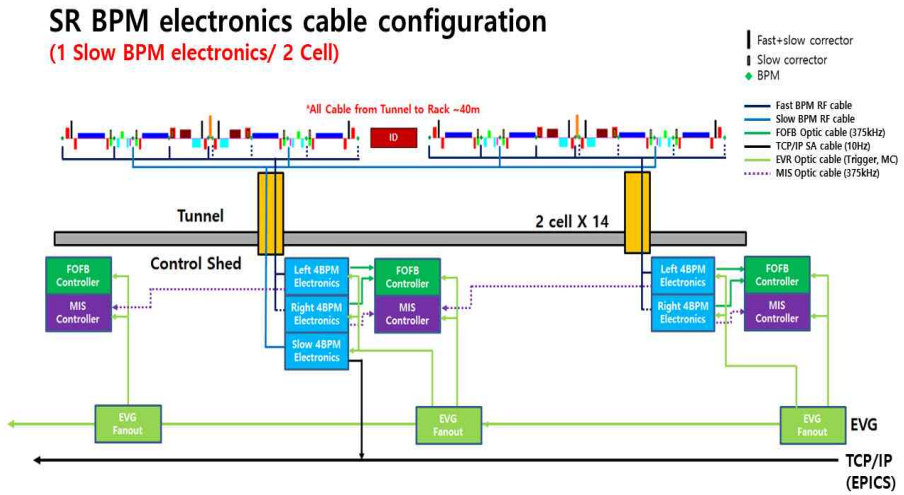
(2) 빔 위치 모니터 일렉트로닉스 (BPM electronics)

4GSR 저장링에는 앞서 언급한 바와 같이 총 288개의 빔 위치 모니터(BPM)가 설치되어있다. 한 대의 BPM 일렉트로닉스는 4대의 BPM을 연결해서 사용할 수 있기에 저장링은 총 72대의 BPM 일렉트로닉스가 필요하다. 좀 더 상세하게 보면 4GSR 저장링 1개의 cell은 10개의 BPM으로 구성되어 있다. 이 가운데 8개는 FOFB (Fast Orbit FeedBack)에 사용되며, 나머지 2개는 SOFB (Slow Orbit FeedBack)에 사용된다. 따라서 이러한 피드백 특성에 따라 일렉트로닉스와 BPM의 구성을 다음과 같이 결정했다. 4GSR BPM electronics 1대는 4개의 BPM의 데이터를 처리하며, FOFB controller에 연결될 8개의 BPM은 CB를 기준으로 4개씩 왼쪽, 오른쪽으로 묶어서 2대의 일렉트로닉스 보드에 연결한다 (<그림 3.1.11.23> 참조). 나머지 2개의 Slow

BPM은 1대의 BPM 일렉트로닉스에 연결해서 사용하는데 <그림 3.1.11.23>처럼 2 cell 당 하나의 BPM 일렉트로닉스를 설치해서 4개의 Slow BPM을 연결해서 사용한다. 따라서 총 5대의 BPM 일렉트로닉스가 2 cell 20개의 BPM의 데이터를 처리하도록 구성되어 있다. 대칭 cell이 아닌 High beta straight 구간은 총 4개의 BPM이 설치되어 있으므로 1대의 BPM 일렉트로닉스에 연결해서 빔 위치를 측정한다. 정리하면, 28개의 대칭 cell에는 70대의 BPM 일렉트로닉스가 설치되며 High beta straight 구간 두 곳에 2대의 BPM 일렉트로닉스가 설치된다.

<표 3.1.11.7> 4GSR BPM과 일렉트로닉스의 cell 당 개수 및 위치

Location	Number of BPM in 1 Cell	Number of BPM electronics in 1 Cell	BPM Type
Arc Cell	8	2	Fast BPM
Arc Cell	2	0.5	Slow BPM
High beta Straight	4	1	Fast BPM
Total (28*Arc Cell + 2*High-beta Section)	288	72	-



<그림 3.1.11.23> SR BPM electronics cable configuration per two symmetry cell

○ BPM cable configuration

BPM은 4개의 출력 포트를 가지고 있으므로 4개의 케이블이 한 세트를 이룬다. 터널 안 BPM에서 control shed에 있는 BPM 일렉트로닉스까지 다음 3가지 형태의 케이블이 사용된다.

1) BPM Cable: BPM과 직접 체결되는 케이블이다. BPM 픽업 안테나는 기계적 강성이 약하기 때문에 무겁고 뻣뻣한 케이블이 체결되는 경우 픽업 안테나에 과하게 가해지는 힘으로 인하여 부서지거나 혹은 크랙이 발생해 진공 누수가 발생할 수 있다. 따라서 전송 손실이 적으면서도 유연한 형태의 ~1 m 정도의 케이블이 픽업과 직접 연결되고 반대편은 어댑터를 통해 Diagnostics 케이블과 연결한다.

2) Diagnostics Cable: 터널과 Control shed 사이의 장거리 전송을 위한 케이블이다. 전송 손실이 작은 케이블을 사용해야 하며, 길이는 Fast BPM 기준 40 m, Slow BPM 기준 50 m로 예상된다.

3) Extension Cable: BPM 일렉트로닉스와 직접 연결되는 케이블이다. Diagnostics 케이블이 BPM Rack의 Extension 패널 어댑터에 체결되고, 패널의 반대편에서 Extension 케이블이 어댑터와 BPM 일렉트로닉스를 연결한다. Extension 케이블의 길이는 1~2 m 이내로 예상된다.

① Pickup Cable 및 Extension Cable 사양

- Connector : SMA (M) - SMA (M)
- Cable : [4GSR BPM 케이블 사양] 참조
- Length : 1~2 m
- Loss 차이 : 모든 케이블에 대해 ±0.1 dB @ 500 MHz
- 길이 차이 : 모든 케이블에 대해 1 mm 이하, 혹은 위상 매칭 0.7° @ 500 MHz 이하

② Diagnosis Cable 사양

- Connector : SMA type (M) - SMA type (M)
- Length : 40~50 m (현장 확인 필요)
- Loss 차이 : 4개 케이블 1세트에 대해 0.4 dB 이하 @ 500 MHz
- 길이 오차 : 4개 케이블 1세트에 대해 1 cm 이하

③ Pickup 패널 사양

- 형상: 1 × 4개의 어댑터 장착
- 어댑터 형태 : SMA (F) - SMA (F)
- 패널 체결용 나사의 재질 : SUS (반드시 비자성체)

④ [Extension 패널 사양]

- 형상 : 19″ 3U 혹은 4U. 4 × 16개의 어댑터 장착
- 어댑터 형태 : SMA (F) - SMA (F)

⑤ 4GSR BPM 케이블 사양

Pickup Cable, Diagnostics Cable, Extension Cable은 모두 동급 사양을 사용하며 다음 <표 3.1.11.8>의 기준에 부합하는 사양을 사용해야 한다. <표 3.1.11.8>은 4GSR BPM cable 요구 사양을 보여주고 있다.

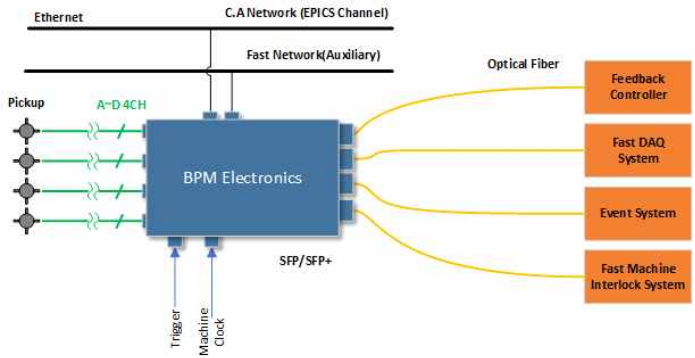
<표 3.1.11.8> Specification of 4GSR BPM cable

Specification	4GSR BPM cable
Operating Frequency	DC ~ 26.5 GHz
Maximum VSWR	1.25:1
Impedance (Nominal)	50 Ω
Amplitude Stability in Insertion Loss	< ± 0.05 dB
Phase Stability vs Temperature	2°
Attenuation at 500 MHz Frequency	< - 0.3 dB/m
Velocity of Propagation	83%
Shield Effectiveness (Through 18 GHz)	< 100 dB
Temperature Ranges (℃)	– 55° ~ + 150°
Minimum Bend Radius	28 mm
Crush Resistance (kg-f/cm)	41.2

○ BPM 일렉트로닉스 하드웨어 구성

4GSR BPM 일렉트로닉스는 Turn by Turn (TbT) data를 획득하고 처리할 수 있도록 설계되었다. Feedback controller에 연결하는 방식과 EPICS에 직접 데이터를 전송하는 방식의 차이를 기준으로 Fast BPM 일렉트로닉스, Slow BPM 일렉트로닉스로 구분하고 있지만 실제 성능적으로 동일한 일렉트로닉스를 사용한다. 따라서 향후 필요에 따라 Slow BPM 일렉트로닉스로도 TbT data를 획득할 수 있다. <그림 3.1.11.24>는 4GSR BPM 일렉트로닉스의 하드웨어 구성을 보여주고 있다. 4개의 BPM을 연결할 수 있는

16채널 RF signal input port가 있어야 하며, 이를 통해 4개의 BPM의 TbT data를 계산할 수 있다. 또한, 4개의 SFP/SFP+ 포트를 활용해 FOFB controller, Fast DAQ server, Fast Machine Interlock System에 TbT data를 375 kHz 속도로 Optical fiber를 통해 전송한다. 마지막 한 개 남은 SFP 포트는 일렉트로닉스 내부 EVR에 연결되며, EVG (Event Generator)에서 전송되는 Event signal을 디코딩해서 Trigger 신호와 Machine Clock (MC)을 생성한다. 다음은 4GSR BPM 일렉트로닉스의 설계 목표 사양을 보여준다.



<그림 3.1.11.24> 4GSR BPM 일렉트로닉스 주요 I/O 포트의 연결구성

① 4GSR BPM 일렉트로닉스 주요 설계 사양

- Pickup Calibration factor를 10 mm로 가정하였을 경우 조건

② Resolution : BPM Electronics는 각 조건에서 다음의 해상도 사양을 만족한다.

- TBT (~375 kHz, 1024 multi-bunch, 400 mA) : ≤ 1 μm rms
- TBT (~375 kHz, commissioning, single-bunch, 0.1~1 mA) : ≤ 100 μm rms
- FA(1 kHz) : ≤ 100 nm rms
- SA(~10 Hz) : ≤ 20 nm rms

③ Long Term Stability : ±0.5 ℃ 환경 기준

- Day Drift : ≤ ±0.2 μm

위 사양을 만족하기 위해 반드시 일렉트로닉스 Calibration 기능이 있어야 한다. TDP (Time Domain Processing) 로직을 사용할 경우, Crossbar Switch 및 Cal. tone을

활용한 Calibration 기능을 고려하고 있다. 다만, FDP (Frequency Domain Processing)을 활용할 때는 Pilot tone 방식으로 Calibration을 수행하고자 한다.

④ 기계적 사양

I/O Port

- SFP/SFP+ 포트 : 4개 (Event, FOFB Data, Machine Interlock, Fast DAQ)
- RF Input Channel : A, B, C, D 4채널 × 4 BPM (RF Pick up 신호 16채널)
- RF Input Connector : SMA
- Trigger Channel : LEMO 1 Port
- MC Clock : LEMO 1 Port
- A/B Contact : 1 EA (A or B 접점)
- TCP/IP Port : 2 EA (Control Network, Fast Network)
- Power : 220 V, 1 Port
- Size : 19 inch Sub-Rack, 4 U 이하, Depth 미정

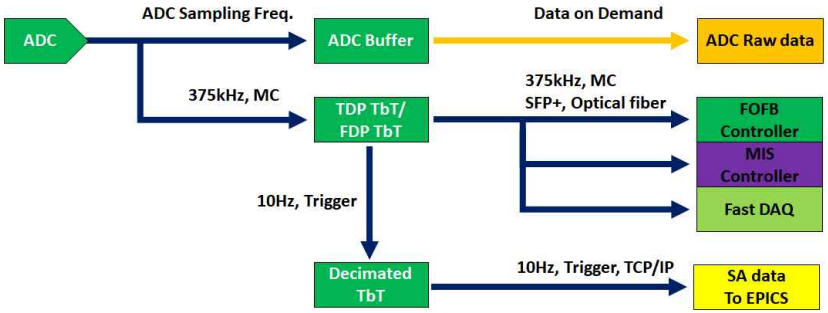
⑤ 전기적 사양

- RF Input VSWR : ≤ 1.2 (500 MHz, BW 20 MHz)
- RF Input Frequency : 500 MHz
- Max Input Power : ~12 dBm
- RF Gain : ≥ 20 dB
- Gain Control / Step : ≥ 30 dB / 0.5 dB
- Dynamic range: ≥ 50 dB

⑥ S/W 사양

- Control Toolkit : EPICS 7
- Embedded EVR 기능 내장
- Network Booting 지원
- Remotely FPGA file update 지원

<그림 3.1.11.25>는 4GSR BPM의 data flow를 보여주고 있다. ADC 샘플링 주파수에 동기화되어 획득한 Raw data는 ADC buffer에 저장되고 있다가 사용자의 요청이 있으면 응답해 Raw data를 제공한다. Raw data는 375 kHz 또는 MC에 동기화되어 매턴마다 TbT 빔 위치정보를 SFP+ 포트를 활용해 3가지 응용 어플리케이션으로 데이터를 보낸다. 마지막으로 TbT data는 10 Hz Trigger에 동기화되어 SA (Slow Acquisition) data를 TCP/IP 포트를 활용해 EPICS로 전달한다. TbT data는 FOFB에 사용되며, SA data는 Global closed orbit 계산에 사용된다.

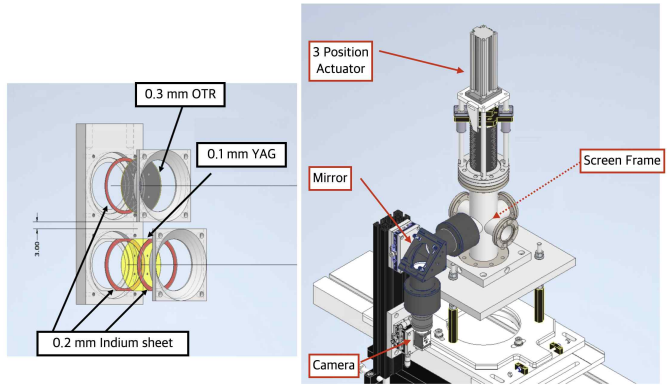


<그림 3.1.11.25> 4GSR BPM 일렉트로닉스 data flow

(2) 빔 형상 모니터 Beam Profile Monitor

○ BPRM 하드웨어 구성

빔 형상 모니터 Beam Profile Monitor (BPRM)는 형광 Screen과 OTR을 이용하여 빔 형상을 측정한다. OTR Screen은 100 nm 알루미늄 코팅을 한 실리콘 웨이퍼를, 형광 Screen은 YAG를 사용한다.



<그림 3.1.11.26> BPRM Screen frame과 Chamber의 3D 도면

<그림 3.1.11.26>은 BPRM의 Frame과 Chamber 3D 도면이다. Frame에는 지름 25 mm의 형광 Screen과 OTR 판을 위아래로 35 mm 간격으로 설치하고 Screen을 Frame에 고정과 전기적 충격에 의한 파손을 방지하기 위해 인듐 시트(indium sheet)를 사용한다. 형광 Screen에는 카메라의 좌표 보정을 위한 십자 표시를 8 mm 간격으로 표시한다. 이 프레임은 빔 입사에서 45° 기울여 설치되고 3단 Actuator를 이용하여 삽입한다. Actuator는 공압으로 작동되며 반복 작동 시 위치 정확도는 0.1 mm이지만 y축의 위치 정확도는 BPRM의 Profile 측정에서는 영향을 주지 않는다. 빔 진행 방향의 90° 각도에 광학장치와 카메라를 설치하여 Actuator에 의해 선택된 판으로부터 나오는 형광/OTR 광을 이용하여 빔의 형상을 측정한다. 방사선에 의한 피해를 최소화하고자 위해 거울을 설치하여 빔 수직면에서 X, Y 축을 피하여 카메라를 위치하도록 하였고 OTR로 측정 시 카메라와 Screen 간의 각도가 중요하므로 카메라와 거울에 각도 및 위치를 정밀하게 조절할 수 있는 Stage를 설치하여 상이 잘 맺히도록 조절한다. 외부 노이즈를 차단하기 위해 Chamber의 Optical view port부터 카메라까지 튜브를 사용하여 외부의 빛을 차단한다. 그리고 View port 앞에는 LED를 설치하여 빔 라인에 설치 후에도 LED를 이용하여 screen frame의 위치를 확인하고 좌표를 보정한다.

○ 광학장치 구성

<표 3.1.11.9> 4GSR에 사용될 카메라와 렌즈 사양

카메라		렌즈	
Shutter	Global	Focal length	75 mm
Pixels	1440 × 1080	Optical Mag	× 0.15 ~ × 0.35
Pixel Size	3.45 μm	WD	< 500 mm (300 mm)
Sensor size	5 mm × 3.7 mm	FoV @ 300 mm	25 mm × 20 mm
FPS	> 10 fps	DOF @ 300 mm	7.6 mm
Mount	C type	Lens size	~ 50 mm
ADC	12 bit	Resolution	3.45 μm

4GSR LINAC과 수송라인에서의 빔의 크기는 대부분의 경우 100~500 μm로 예상되고 Gaussian 형태의 100 μm의 빔 크기는 pixel 당 20 μm × 20 μm로 측정한다면 분해능은 5 μm으로 측정가능하다. 그리하여 작동거리 300 mm에서 20 μm 픽셀사이즈 측정을 목표로 카메라와 렌즈를 선정하였고 그의 규격은 <표 3.1.11.9> 에 표기하였다. 선정된 카메라와 렌즈로 작동거리 300 mm에서 Y 축으로 15 μm, X 축으로 20 μm의 픽셀사이즈로 상을 측정할 수 있다. 렌즈의 초점 영역인 DOF는 7.6 mm로 초점을 렌즈 중심에 맞출 경우 8 mm 간격의 좌표 보정용 십자 격자 역시 초점 영역 안에 있어 실시간 좌표 보정도 가능하다.

형광스크린의 경우 스크린 자체 포화량이 있다. YAG의 측정된 포화량은 13 fC/μm^2 [2)3)]이고 이를 환산하면 10 Gy이고 빔의 크기가 100 μm 경우 0.9 nC 이상의 전하량에서 YAG 자체가 포화되어 왜곡된 신호를 방출한다. 그리하여 1 nC 이상은 높은 전하의 펄스는 포화가 되지 않는 OTR로 측정한다.

<표 3.1.11.10> YAG screen에서 빔 크기별 카메라 센서에서의 광전자량

Beam Size	YAG
100 μm	6.609 × 10^5
200 μm	1.656 × 10^5
500 μm	2.652 × 10^4
1,000 μm	6.631 × 10^3

카메라 센서는 픽셀당 10,000개의 광전자까지 측정할 수 있다. 이 포화를 방지하기 위해 카메라의 형광스크린과 OTR 스크린의 발광량을 조사하였다. 형광스크린의 광전자 측정량은 아래의 공식으로 나타난다.

2) A. Novokshonov *et. al*, "SCINTILLATOR NON-PROPORTIONALITY STUDIES AT PITZ", IBIC2022, Kraków, Poland

3) R. Yang *et. al*, "DEVELOPMENT OF A YAG/OTR MONITOR FOR BEAM HALO DIAGNOSTICS" IBIC2018, Shanghai, China

$$N_{PE} = E_{dep} \times Y \times \pi r_L^{\,2}/(4\pi r_d^{\,2}) \times M_{px} \times QE \times N_e \quad \text{(수식 3.1.11.4)}$$

위의 식에서 $\pi r_L^{\,2}/(4\pi r_d^{\,2})$는 렌즈까지의 입체각, M_{px}는 중심 pixel에 도착하는 전자 개수, Y는 YAG의 형광량, QE는 카메라의 양자효율로 일반적인 카메라는 약 60%이다. E_{dep}은 전자가 형광스크린에 에너지를 흡착시키는 양으로 Geant4를 이용한 시뮬레이션 결과는 4GSR 에너지 영역과 관계없이 전자 당 250 keV의 에너지를 45° 기울어진 스크린에 Deposit 하였다. 그리하여 빔 크기별로 3 nC의 전자가 스크린에 입사되었을 때 포화량을 <표 3.1.11.10>에 나타내었다. 빔 크기가 100 μm일 경우 포화 방지를 위한 1/100 ND 필터가 필요하다. 그리하여 BPRM 위치별로 빔 크기를 조사 후 적정한 ND를 선정한다.

OTR 광은 고에너지 입자가 Screen에 입사 시 경계면에서 OTR 광이 특정한 각도로 방출된다. OTR의 광량과 방출 각도는 에너지의 함수로 광량 N_{ph}와 방출 각도 W(Θ)의 관계는 아래와 같다.

$$N_{ph} = \frac{\alpha}{\pi}(2\ln\gamma - 1)\ln\frac{\nu_2}{\nu_1} \quad \text{(수식 3.1.11.5)}$$

$$W(\omega,\theta) = \frac{e^2\beta^2}{\pi^2 c}\frac{\sin^2\theta}{(1-\beta^2\cos^2\theta)^2} \quad \text{(수식 3.1.11.6)}$$

β와 γ는 상대론적 속도와 로렌츠인자, θ는 방출각도, ν는 파장을 나타낸다. 이로부터 카메라 센서에서의 광전자량과 관계는 (수식 3.1.11.7)과 같다.

$$N_{PE} = N_{ph}(\gamma) \times A(\gamma) \times M_{px} \times QE \times N_e \quad \text{(수식 3.1.11.7)}$$

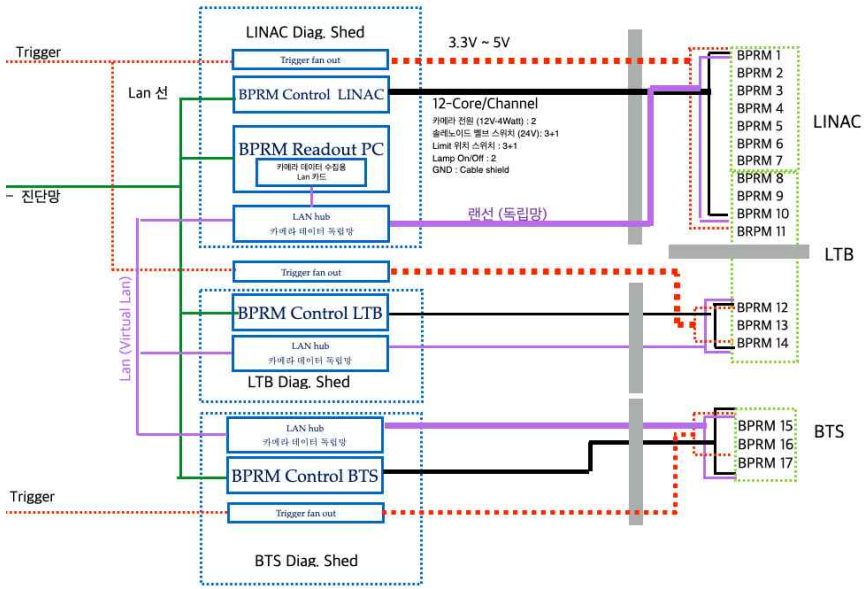
<표 3.1.11.11> OTR의 에너지별 카메라에서의 광전자수 (200 μm, 3 nC)

Energy	A	Nph/Ne
5 MeV	0.03%	3.441
100 MeV	27.9%	2.087 × 10^4
200 MeV	55.9%	4.814 × 10^4
4,000 MeV	97.5%	1.316 × 10^5

$N_{ph}(\gamma)$는 전체 발광 광자수를 $A(\gamma)$는 전체 방출 광자 수 대비 카메라 렌즈에 도착한 광자수의 비율을 나타낸다. 그리하여 스크린-렌즈 작동 거리 300 mm, 방출 파장을 500~600 nm, 빔 크기가 200 μm일 경우 센서의 최대 광전자수와 렌즈 도착비율 A를 <표 3.1.11.11>에 나타내었다. OTR을 사용하더라도 BTS의 4 GeV

에너지를 측정할 경우 ND 필터가 필요하다. OTR 광량은 YAG보다 광량이 약 1/10 정도라 낮은 전하량에서는 형광판을 사용하고 높은 전하량에서 OTR 판을 사용한다.

○ BPRM 진단/제어 연결 구성



<그림 3.1.11.27> BPRM 연결구성

<그림 3.1.11.27>은 BPRM의 연결구성을 나타내고 각 특징은 아래에 기술하였다. BPRM은 LINAC에 7개, LTB에 7개, BTS에 3개가 설치한다. LTB 라인의 절반은 차폐벽 넘어있으므로 상류 절반은 LINAC control shed에서 제어한다. BPRM은 신호처리 장치도 카메라 내부에 있고 공압 Actuator의 제어를 위해 여러 신호선이 차폐벽 내부로 들어간다. 카메라는 Trigger 신호를 위해 BNC Connector를 가진 동축케이블을 사용하고 카메라의 촬영 Image 신호 및 제어를 위한 Cat 6 이상의 LAN 케이블을 사용한다. Camera 데이터는 용량이 클 수 있으므로 다른 진단 및 제어망에 간섭을 피하고자 Virtual lan을 사용하여 분석 PC로 독립적인 연결을 한다. BPRM 제어기는 카메라 전원 및 Actuator 제어를 한다. 제어기에서 카메라 전원 및 Actuator 연결은 12코어의 케이블을 사용하고 그 코어별 구성은 <그림 3.1.11.27>에 표시하였다. 카메라는 Trigger 신호 시 이후 100 μs 혹은 경우에 따라 넓은 Time window를

사용하여 측정하고 전송하고 이를 PC에서 읽어 들여 분석한다.

제어는 DCV로 카메라 신호는 Digital 전송이므로 케이블 길이는 제어 및 데이터 수집에 영향을 주지 않는다. Trigger 신호도 마이크로초 수준의 분해능이 요구되므로 길이에 민감하지 않다. BPRM 제어를 위한 DCV와 카메라의 Digital 신호는 온도에 영향이 없으므로 항온항습 Rack은 필요하지 않다. 분석 PC는 EPICS IOC가 설치되어 ethernet을 통하여 카메라 제어 및 분석 결과를 송수신한다.

(3) 빔 전류/전하 모니터 (Beam Current/Charge Monitor)

LINAC 및 빔 수송라인에서는 ICT 와 Faraday cup을 이용하여 빔 pulse의 전하를 측정하고, BR과 SR에서 DCCT로 빔 전류를 측정, FCT로 filling pattern과 Bunch 별 빔 전하를 측정한다.

○ 선형가속기와 빔 수송라인에서의 빔 전하량 측정

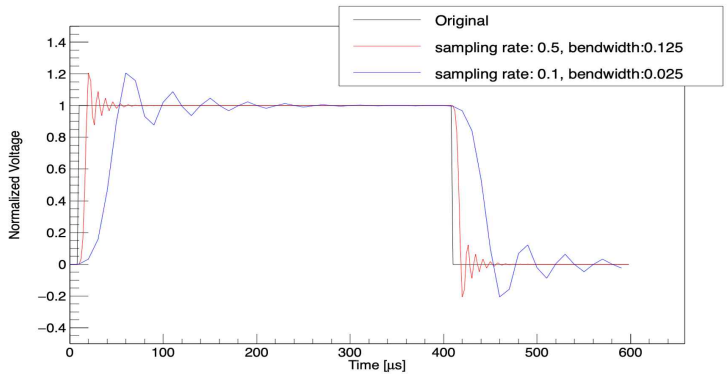
4GSR의 LINAC은 Multi bunch mode (MB mode)와 Single bunch mode (SB mode)로 빔을 방출하고 두 모드의 총 전하를 측정하기 위해 Integrated Current Transformer (ICT)와 Faraday cup을 사용한다. ICT는 Bergoz 사의 In-flange model의 ICT를 구매하여 LINAC 및 수송라인의 전후에 설치하고 각 라인에 입/출사 시 총 전하량을 측정한다. 그리고 Faraday Cup을 E-gun 부의 에너지 측정을 위한 Bending Magnet 후단에 설치하여 빔의 전하를 측정하고 ICT의 Droop 효과 상호 보정 및 교차 측정을 하고자 한다.

○ Integrate Current Transformer

<표 3.1.11.12> ICT와 Digitizer 사양

	Parameter	Value
Bergoz ICT	Range	0~40 nC
	Trigger Rate	0~60 Hz
	Resolution	0.2 pC (4 nC Range)
	Flange	2.75 Inch
	Length	40 mm
	Output	± 7 V
	Droop	20%/μs
Digitizer	Sampling Rate	> 500 kSPS
	Bandwidth	> 125 kHz
	Trigger Rate	> 10 Hz
	Input	> ± 7 V

선형가속기 및 빔 수송라인에서 입/출사된 빔 Pulse의 총 전하량은 ICT를 이용하여 측정한다. ICT는 Bergoz 사의 ICT-5.0-LD 모델을 사용하고 그 규격을 <표 3.1.11.12>에 정리하여 기술하였다. 해당 모델은 최대 40 nC까지 측정 가능하고 4GSR 선형가속기의 3 nC 전하 측정을 위한 4 nC 측정 영역에서는 2 pC의 분해능을 가지고 있다. ICT는 multi-bunch를 측정할 때 Droop이 발생하는데 이를 최소화하기 위해 Low Droop Option을 가진 5.0-LD 모델을 선택한다. Low Droop 옵션은 Multi-bunch pulse 길이인 128 ns 동안 2.2%의 Droop이 발생하여 크지는 않으나 Droop 효과에 의한 오차를 설치 전 scope 파형 분석으로 교정하고 설치 이후에는 Faraday cup의 결과와 비교 측정하여 보정한다.



<그림 3.1.11.28> ICT의 출력을 125 kHz와 0.025 kHz로 digitizer로 측정 시 파형

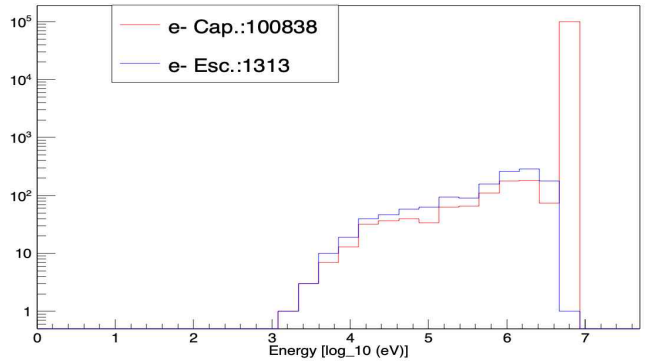
Bergoz 사의 ICT readout 모듈은 측정 신호의 적분한 결과를 그 결과를 400 μs 동안 ±7 DCV로 출력하므로 ICT 출력 데이터를 수집하기 위해 제어 및 분석 모듈이 필요하다. 매뉴얼 상의 신호 분석의 요구조건은 200 μs 이상의 신호를 평균 내어 측정하는 것이다. ICT의 Readout module의 출력 신호의 Rise time은 7 μs이고 최대 적분 구간은 50 μs이므로 Trigger 신호 이후 150 μs ~ 350 μs 구간의 출력 전압을 측정하고자 한다. 이를 위한 필요 Digitizer ADC 규격을 정하기 위한 시뮬레이션 결과를 <그림 3.1.11.28>에 나타내었다. 검정색은 Rise/Fall time을 고려한 실제 신호이고 각 컬러는 두 종류의 ADC 규격으로부터 나온 파형이다. 위의 그림에서 샘플링 속도가 500 kSPS, 대역폭이 125 kHz인 수직 분해능 16 bit의 ADC를 사용할 때 100 μs 이후 신호가 안정되며 1,000개의 전압측정을 평균하므로 Digitizer에 의한 오차는 무시할 만큼 작아진다.

○ Faraday cup

<표 3.1.11.13> Faraday-cup의 요구사항

	Parameters	Values
Faraday Cup	Cylinder Size Cup	30 mm φ × 40 mm 20 mm φ × 10 mm
	Material	Copper
Digitizer	Charge Range	0 ~ 10 nC
	Trigger Rate	0 ~ 60 Hz

Faraday Cup (FC)의 주요 목적은 ICT의 Droop calibration이다. FC는 e-gun 구간 에너지 측정용 이극 자석 이후에 설치되어 ICT의 보조로 LINAC commissioning 동안에만 사용된다. E-gun 구간의 Beam Energy는 4 MeV로 구리 원소에서 Bethe -Bloch formula에 의한 stopping 길이는 10 mm 미만이므로 이보다 충분하게 30 mm 깊이로 정한다. 그리하여 FC는 지름 30 mm 높이 40 mm인 구리 실린더에 back-scattering을 방지하기 위해 깊이 지름 20 mm 깊이 10 mm의 컵의 홈을 낼 것이다. FC에 의해서 흡수된 전하는 동축케이블을 이용하여 1 pC 이하 분해능의 Charge Integrator로 측정한다. Charge Integrator 상용품은 0.2% 혹은 0.4 pC의 분해능을 가지고 있어 다른 조건을 선택 충분히 고려 후 선택한다.

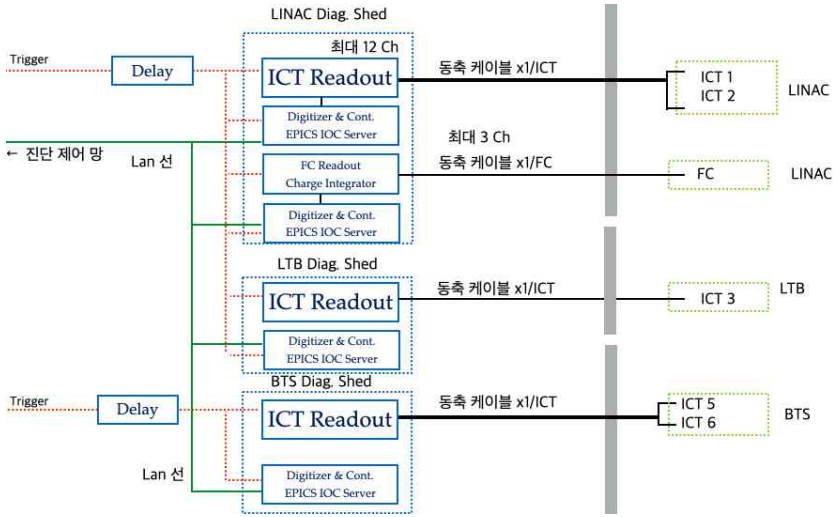


<그림 3.1.11.29> 4 MeV를 10만 개 쏘았을 때 FC에 흡수 및 탈출한 입자 에너지 분포

FC의 전자 흡수율은 Geant4를 이용한 시뮬레이션을 활용하였다. 에너지가 4 MeV이고 지름 3 mm의 Gaussian 분포의 직진 빔을 FC로 10만 개 쏘아 흡수된 전자/양전자 그리고 탈출한 전자/양전자를 분석하여 FC의 흡수율을 구하였다. <그림

3.1.11.29>는 시뮬레이션의 결과로 x축은 에너지 y축은 전자의 개수이다. 시뮬레이션에서 양전자의 흡수 및 탈출은 없었고 10만 개 전자 입사 중 컵의 경사면에서 탈출한 이차 전자가 다시 재입사하여 10만보다 많은 전자가 흡수되었고 1% 정도인 1,300여 개의 전자가 FC를 탈출하였다. 그러므로 총 전자의 흡수율은 99.5%이므로 0.5% 보정이 필요하다.

○ 전하 측정기 제어 및 데이터 연결 구성



<그림 3.1.11.30> LINAC과 빔 수송라인에서의 케이블 연결구성

<그림 3.1.11.30>은 선형가속기 및 빔 수송라인에서 연결구성을 나타낸다. 각 특징은 아래에 기술하였다. ICT는 LINAC에 두 개 LTB에 하나, BTS에 두 개 설치하고 FC는 LINAC에 하나 설치한다. ICT는 Readout Module에, 업체에서 제공하는 40 m 동축케이블로 연결한다.

- Digitizer 및 제어 모듈에서 SMA 동축케이블로 출력 신호를 받고 DB9 단자 케이블을 이용하여 Readout 모듈의 측정 영역 및 Calibration 세기를 제어한다. 그리고 EPICS IOC 서버 설치되어 ethernet으로 원격 제어 및 데이터를 수집한다.

- ICT Bergoz에서 제공하는 sensor와 readout 모듈은 온도에 의한 신호 변화를 무시할 수 있는 수준이므로 항온항습 Rack이 필요하지 않다.

- 터널 안의 FC는 Shed의 FC Charge Integrator와 BNC 단자 동축케이블로 연결하고 케이블에서 나온 아날로그 출력 신호를 FC의 Digitizer 및 제어 모듈 받아 Digital화 시킨다. Integrator Digitizer 모두 Trigger 신호가 필요하고 FC의 Digitizer 및 제어 모듈 ethernet으로 연결되어 EPICS IOC로 진단 제어망으로 데이터를 송신한다.

○ Booster & Storage Ring에서 빔 전류

Booster 및 Storage Ring에서 전류의 절댓값 측정을 위해 DC Current Transformer를 사용하고 번치 별 전하 및 filling pattern을 측정하기 위해 Fast Current Transformer (FCT)를 설치하여 측정한다.

- DC Current Transformer

<표 3.1.11.14> DCCT와 Digitizer의 요구사항

	Parameter	Value
DCCT Bergoz NPCT	Range	~40 A
	Resolution	0.5 μA
	Baking	< 100 ℃
	Output	± 10 V
Digitizer	Sampling Rate	> 100 kSPS
	Bandwidth	DC
	Trigger Rate	10 Hz
	Input Range	> ± 10 V

DCCT는 마이크로 번치 빔의 전류를 측정하는 장치로 ring에 설치되어 흐르는 빔 전류를 측정한다. Bergoz 사의 NPCT In-Air 모델을 구매하여 각 Ring에 적합한 Chamber를 설계하여 설치한다.

Bergoz의 NPCT는 high impedance ± 10 DCV를 출력하므로 읽어들이는 digitizer 성능에 크게 영향을 받지 않으므로 ICT에 사용할 신호 분석모듈과 같은 규격의 digitizer를 사용한다. DCCT는 100 ℃ 이상 발열하게 되면 기능을 상실하므로 체임버 설계에는 발열 제어가 중요하다. Bergoz 사의 report에 의하면 500 mA에서 냉각장치 없이 1시간 이상 작동 시 58°를 기록하여 문제가 없었고[4] 4GSR 조건과 비교해서 분석해 본 결과도 문제없다고 확인되었다. 다만, 베이킹온도에 의한 손상을 피하고자 진공 베이킹 구간과는 떨어져서 설치하기로 결정되었다.

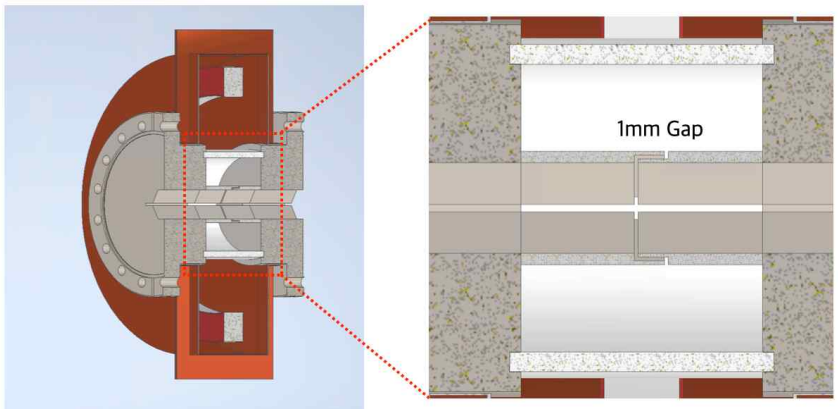
4) D. Martin *et. al.*, "EVALUATION OF BERGOZ INSTRUMENTATION NPCT", Bergoz Internal Report

- Fast Current Transformer

<표 3.1.11.15> FCT와 요구 Digitizer 사양

	Parameter	Value
FCT Bergoz FCT 0.5 V/A 모델	Rise time	< 0.5 ns
	Conversion ratio	0.5 V/A
	Max Current	2.7A
	Peak A	980 kA
	Max Charge/Pulse	2 mC
	Baking	< 100 ℃
Digitizer	Rise Time	< 1 ns
	Sampling Rate	> 10 GSPS
	Bandwidth	> 1.5 GHz
	Trigger Rate	10 Hz
	Input Range	> ± 10 V

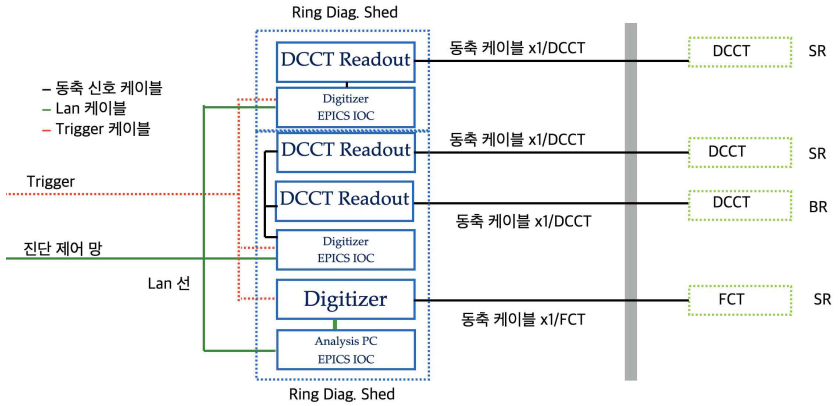
4GSR의 Storage Ring에서 Filling Pattern과 번치 별 전하 측정을 위해 Bergoz사의 FCT In-Air 모델을 구매하고 Ceramic Gap을 포함한 체임버를 설계하여 SR에 하나 설치한다. Bergoz사 FCT의 주요 규격을 <표 3.1.11.15>에 요약하였다. 4GSR의 빔 조건에 충분히 측정할 수 있고, 1 nC의 빔이 측정될 경우 출력 최대 전압이 약 1 V이다. 그리하여 FCT를 측정하기 위한 Digitizer는 1.5 GHz, 25 GSPS 이상의 Oscilloscope를 사용한다.



<그림 3.1.11.31> FCT 구조, FCT 내부에는 파이프에 1 mm Gap과
절연과 진공을 위한 세라믹 파이프로 이루어져 있고 외부에는
Wall current가 흐르고 외부잡음을 막기 위해 구리 원통을 설치할 것이다.

FCT의 Ceramic gap은 wake impedance와 Coupling에 의한 Bandwidth와 연관되므로 충분히 시뮬레이션을 이용하고 조사하여야 한다. <그림 3.1.11.31>은 디자인 단계의 3D 도면이다. FCT의 Chamber는 1 mm gap을 만들고 세라믹 파이프를 둘러 진공을 유지하게 설계하였다. 그리고 FCT 외부에는 외부 노이즈를 차단하고 Wall current가 흐르게하기 위해 구리 원통 구조물을 설치하였다.

○ DCCT/FCT 연결구성



<그림 3.1.11.32> FCT DCCT 케이블 연결구성

<그림 3.1.11.32>는 FCT와 DCCT 케이블 연결구성이고 특징은 아래에 기술하였다. SR에 DCCT 2기, FCT 1기를 설치한다. CT는 RF 노이즈를 방지하기 위해 SR 입사구간과 RF Cavity 구간에서 어느 정도 멀고 설치를 위해 짧은 ID가 들어가는 직선구간에 설치하여야 한다.

- DCCT와 FCT는 각각 SMA 단자 동축케이블을 통하여 readout 및 Digitizer로 신호를 보낸다.

- DCCT readout 모듈 하나당 하나의 채널 데이터를 읽으며 출력 아날로그 데이터를 SMA-BNC 단자 동축케이블을 이용하여 하나의 다채널 Digitizer 모듈로 수집한다.

- DCCT DAQ에 EPICS IOC를 설치, Ethernet을 통해 제어 및 데이터를 수집한다.

- DCCT와 readout 모듈의 온도변화는 5 μA/K이므로 몇 도의 온도 변화량에는 민감하지 않지만, 항온항습 Rack 사용을 고려해야 한다.

- FCT의 파형은 PC에서 분석되며 PC는 EPICS IOC를 포함하고 진단 망으로 데이터를 송신한다.

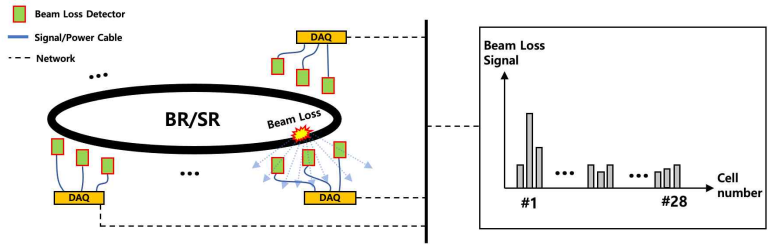
(4) 빔 유실 모니터 Beam Loss Monitor

<표 3.1.11.16> 저속 고속 빔 유실 모니터 비교

	고속 빔 유실 모니터	저속 빔 유실 모니터
검출기구성	형광체 + 광전자 증배관	형광 섬유 + 카메라
설치위치 및 개수	Storage Ring, Booster Ring	전 구간
요구 샘플링	>= 375 kSPS	100 SPS
모듈 당 채널	4	25
사용목적	Turn by Turn 빔 유실 확인, 정확한 타이밍의 빔 손실 측정	Ring에서 F-BPM의 보조 역할 LINAC 및 빔 수송관에서는 주 역할

4GSR의 Ring에서는 빔이 고속 빔 유실 모니터를 주로, 저속 빔 유실 모니터를 보조로 사용할 것이고 빔 반복률이 낮은 선형가속기 및 빔 수송라인에서 저속 유실 모니터를 사용하여 빔 유실을 측정할 것이다. 따라서 4GSR의 Ring에서는 빔 유실 모니터는 고속과 저속 빔 유실 모니터를 사용하고 그 목적과 사양을 <표 3.1.11.16>에 역할 및 요구사항을 요약하였다.

○ 고속 빔 유실 모니터



<그림 3.1.11.33> F-BLM의 작동 원리와 측정 예제

<표 3.1.11.17> F-BLM 구성품의 필요 사양

Scintillator		PMT		Digitizer	
Rising time	< 1 ns	Rising time	< 1 ns	Bandwidth	50 MHz
Light Yield	10,000/MeV	Gain	> 10^3	Sapling Rate	125 MSPS
Pulse width	< 10 ns	Response wavelength	visible	Trigger Rate	5 MHz
Peak wavelength	Visible	-	-	V resolution	12 bit

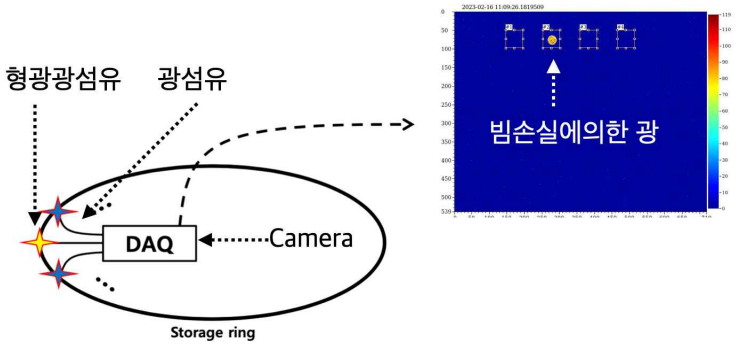
고속 빔 유실 모니터(F-BLM)는 빠른 반응과 데이터 취득 속도를 가져 Booster Ring과 Storage Ring의 Turn by Turn (TbT) 수준의 속도로 정확한 타이밍의 빔 유실을 측정할 수 있는 검출기이다. <그림 3.1.11.33>은 F-BLM의 장치 구성과 원리이며 <표 3.1.11.17>은 상용품 규격의 요약이다. F-BLM의 검출기는 형광체와 PMT로 이루어져 있고 데이터 수집장치의 Sampling Rate는 125 MSPS이고 최대 trigger rate 5 MHz이기 때문에 375 kHz의 revolution의 Turn by Turn을 충분히 측정할 수 있다.

○ 저속 빔 유실 모니터

4GSR의 저속 빔 유실 모니터(S-BLM)는 선형가속기 및 빔 전송라인에서 주 용도로 사용하고 ring에서는 빔 손실 위치 파악에 사용된다.

<표 3.1.11.18> S-BLM 시작품에 사용된 camera와 형광 광섬유 사양

Camera		Scintillation fiber		
Interface	USB 3.0	Model	SCSF-78	BCF-12
Sensor	CMOS, 1/2.9"	Dimeter [mm]	1	1
Resolution	720 × 540	Bending Dia. [mm]	80	80
FrameRate	525 fps	Peak wavelength [nm]	450	435
Bit Depth	12 bits	decay time [ns]	2.8	3.2
Conformity	GenICam, USBVision	Yield [#/keV]	~10,000	~8,000



<그림 3.1.11.34> S-BLM의 작동 원리

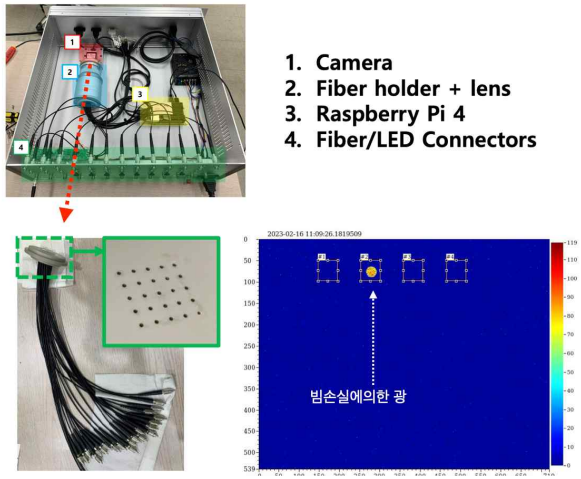
4GSR의 S-BLM은 광섬유와 카메라를 사용하는 25채널 저속 유실 검출기를 다른 연구소의 모니터를 참고하여 개발한다.[5][6] <그림 3.1.11.34>는 현재 개발된 시작품 S-BLM의 구성과 작동 원리를 나타낸다. S-BLM은 형광 광섬유, 빔 전송 광섬유, CMOS 카메라로 구성되어 있고 <표 3.1.11.18>에 시작품에 사용된 제품의 성능을 요약하였다.



<그림 3.1.11.35> s-BLM의 검출기, 알루미늄 상자에 형광 광섬유를 넣고 2개의 입출력 포트를 내었다.

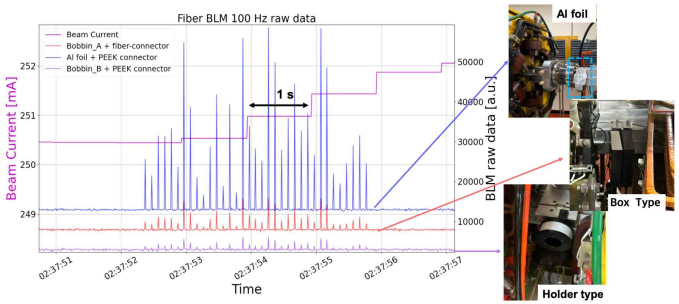
5) Torino, L. & Scheidt, K., Proceedings of the 7th Int. Beam Instrumentation Conf., IBIC2018, China.
6) Ozkan Loch, C. Ischebeck, R. Stampfli, Proceedings of the 10th International Beam Instrumentation Conference, Rep. of Korea.

<그림 3.1.11.35>는 형광 광섬유 다발로 구성된 검출기를 나타낸다. 검출기는 형광 광섬유를 15 m 감아 다발로 만들어 알루미늄 상자에 넣어 만들었고 입출력 포트를 2개 내었다. 입출력 포트의 한쪽은 DAQ의 카메라와 연결하였고 다른 한쪽은 교정용 LED로 연결되어 있다. 현재 시작품에서 더 나은 출력을 위해 플라스틱 형광체를 추가할 수 있다.



<그림 3.1.11.36> DAQ 모듈 구성과 광섬유 배열

<그림 3.1.11.36>은 시작품 S-BLM의 데이터 수집 및 분석 모듈의 구조 사진이다. 시작품의 DAQ 모듈은 광 입력 포트 25개 광 출력포트 25개, 신호 측정을 위한 카메라, 보정을 위한 LED 그리고 카메라 제어 및 신호 분석을 위한 Single board computer로 이루어져 있다. 25개의 입력포트의 광섬유 다발을 <그림 3.1.11.36>의 왼쪽 아래와 같이 5 × 5 격자의 배열을 만들어 카메라 렌즈 앞에 두어 <그림 3.1.11.36>의 오른쪽 아래의 예시처럼 광 포트 발광을 측정하여 손실 위치를 파악할 수 있다. 그리고 출력 광 포트에는 보정용 LED가 설치되어 있어 검출기 부분에서 기술한 입력 포트로 들어가서 출력 포트로 나오며 빛의 세기를 측정하여 손실 및 보정을 한다. 카메라의 작동 주기는 최대 500 Hz로 선형가속기 및 빔 수송라인에서는 충분히 빠른 속도이며 Ring에서는 느리지만 고속 빔 손실 모니터에 비해 월등히 저렴하여 다수 설치가 가능하므로 손실 위치를 파악하는 용도로 사용된다.

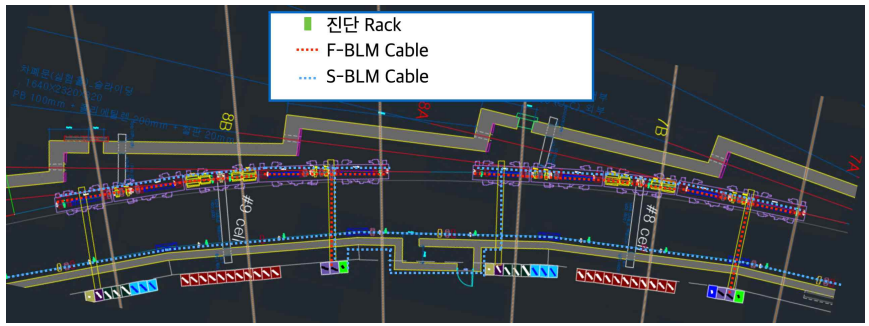


<그림 3.1.11.37> PLS II에서 시험 결과

<그림 3.1.11.37>은 PLS II에서 시험한 결과이다. 가속기에 전자를 채우는 중에 미미한 손실을 측정하였다. 결과에 따르면 모두 빔 손실을 측정할 수 있었고 형광 광섬유를 빔 파이프에 최대한 가까이 붙이는 것이 신호 측정에 유리하지만, 형광 광섬유의 파손 위험이 있고 유지보수가 어려워 <그림 3.1.11.37> 두 번째처럼 검출기를 라인에 붙이는 것으로 정하였다.

S-BLM은 LINAC, LTB, BTS에서 각각 하나의 DAQ 모듈을 사용하여 각각 4~6개의 검출기를 설치하고 BR과 SR에 명확한 설치 위치는 아직 정해지지 않았으나 BR에서는 총 4개의 모듈로 Bending Magnet에 설치한다. SR에서는 14개의 DAQ 모듈을 이용하여 초 주기당 10개의 검출기를 설치한다.

○ 빔 유실 모니터 연결구성



<그림 3.1.11.38> BLM 케이블 연결

<그림 3.1.11.38>은 BLM 케이블 연결구성이다. SR에서 F-BLM은 Cell 당 하나의 4채널 DAQ 모듈, S-BLM은 두 개의 cell마다 하나의 25채널 DAQ 모듈이 담당한다. 그리하여 F-BLM은 SR cell 당 4개의 검출기를 S-BLM은 SR cell 당 10개 검출기를 배치한다. SR의 F-BLM은 트레이 높이를 고려하여 업체에서 제공하는 40 m 길이의 케이블을 사용하고 S-BLM의 경우는 Storage ring 직선구간 위에는 케이블 트레이가 없으므로 터널 외부로 케이블을 연결하므로 60 m 광케이블을 사용한다.

Booster-ring에서 F-BLM은 timing이 중요한 입사 출사 구간에 설치하고 S-BLM은 4개의 모듈로 100 m 광케이블을 이용하여 Bending magnet마다 총 60개를 설치한다. S-BLM의 시작품에서 100 m 케이블로 시험이 성공하였고 F-BLM의 카탈로그 규격으로는 최대 100 m를 지원하므로 케이블 길이는 문제없이 빔 손실을 측정할 수 있다.

다. Orbit Feedback System

(1) Slow & Fast Orbit Feedback system

저장링에서 빔 궤도 왜곡을 발생시키는 요소는 여러 가지가 있을 수 있으며, 저장링 시스템 구성 및 운영환경에 따라 다를 수 있다. 하지만 일반적으로 다음과 같은 진동 요소가 빔 궤도 왜곡의 원인이다.

1. 자기 진동: 저장링 내의 전자석(Magnet, Pulsed Magnet 등)은 전류가 흐를 때 발생하는 자기 진동을 유발할 수 있다. 이러한 자기 진동은 빔 궤도에 영향을 미칠 수 있다.

2. 기계 진동: 저장링의 구조물, 자석과 거더 등의 장비는 외부 요인(예: 주변 환경의 진동, ID gap 변화에 따른 진동, LCW 진동 등)에 의해 유발된 기계 진동을 발생시키며 주요한 빔 궤도 왜곡의 원인 중 하나이다.

3. 온도 변화: 저장링 내의 온도 변화는 장치들의 팽창과 수축을 유발할 수 있으며, 이는 느린 속도로 빔 궤도에 영향을 줄 수 있다.

4. 외부 요인: 저장링 주변의 도로 트래픽, 건물 구조물의 진동, 자연재해와 같은 외부 요인은 저장링 내의 진동에 불규칙한 영향을 미치며, 이 또한 빔 궤도 왜곡의 영향을 준다.

이러한 진동 요소는 저장링 설계 및 운영에서 고려되어야 하며, 빔 궤도 안정성을 유지하기 위한 진동 저감 시스템 및 보정 기술이 개발되고 사용되어야 한다. 이러한 시스템과 기술은 저장링 내의 빔 궤도 왜곡을 최소화하고 원하는 빔 궤도 안정화 목표를 달성하기 위해 중요하다. 따라서, 4GSR 저장링은 두 개의 다른 피드백 시스템을 활용해서 여러 주파수 대역의 진동 영향을 억제해서 빔 궤도 안정화를 달성하고자 한다.

4GSR 저장링의 궤도 보정 시스템은 cell 당 10개의 BPM과 10개의 corrector를 사용한다. 그중에서 Fast BPM 8개와 Fast corrector 4개를 활용해 TbT 빔 위치 데이터를 기반으로 새로운 궤도 보정 값에 대한 Set point를 15.6 kHz 속도로 제공하며, Set point data를 기반으로 Fast corrector로 빠른 궤도 보정을 수행한다. 나머지 Slow BPM과 Slow corrector는 Fast BPM과 Fast corrector와 함께 2 Hz의 낮은 속도로 전체 저장링의 closed orbit을 찾는 데 사용된다. 따라서 궤도 보정은 두 개의 피드백 시스템이 병렬로 작동해 수행될 것이다.

4GSR의 피드백 시스템은 먼저 느린 궤도 보정 시스템(SOFB)이 선행 수행된다. 저장링 전체 288개의 Fast BPM 및 Slow BPM, 그리고 288개의 Slow corrector 및 Fast corrector를 사용해 2Hz의 속도로 Closed Orbit을 계산 및 보정한다. 이렇게 보정된 Closed Orbit은 새로운 Ref. Orbit이 되며, 빠른 궤도 보정 (FOFB) 시스템은 Ref. Orbit에서 벗어나는 정도를 Fast BPM 및 Fast corrector를 사용해 각 cell 별로 10 kHz의 속도로 계산하고 보정한다. 저장링 전체의 Master feedback controller는 없지만 FOFB controller는 앞뒤 셀의 정보를 매 턴 교환 해서 결과적으로 전체 저장링의 궤도 변화 정보를 바탕으로 해당 cell의 왜곡된 빔 궤도를 및 보정을 위한 킥 앵글을 계산해서 빠르게 빔 궤도를 보정한다. <표 3.1.11.19>는 4GSR 피드백 시스템의 달성 목표 parameter들을 보여주고 있다.

<표 3.1.11.19> Specification goal of 4GSR Beam stability

Type	Data	Spec.	Conditions
Position resolution [RMS]	Turn by Turn (375 kHz)	1 μm rms	400 mA, 1024 bunch
	SA (10 Hz)	20 nm rms	
	Turn by Turn (375 kHz)	100 μm rms	0.1~1 mA (Commissioning)
	SA (10 Hz)	1 μm rms	
Beam Current Dependence	-	~ 1 μm	From 0.1 mA to 400 mA
Absolute accuracy	-	< 500 μm	Before BBA
		< 5 μm	After BBA
Long-term Stability	-	±0.2 μm	Daydrift
		1 μm rms	Weekdrift

○ Diagnostic Hutch

다목적 방사광가속기의 진단 빔라인은 Long straight section 직후 두 곳 Cell-1, Cell-15에 집중적으로 설치되어 있다. 시설은 모두 터널 상부에 위치하며 각각의 이름은 VDH-S1, VDH-S15, VDH-S15B, VDH-B1이다. VDH는 Visible light Diagnostic Hutch의 약자이고, S는 저장링, B는 부스터링을 의미, 숫자는 section 번호를 의미한다. 마지막 알파벳이 없는 경우 LGBM (Longitudinal Gradient Bending Magnet)을 광원으로, B로 끝나는 경우 Center bend가 광원임을 의미한다.

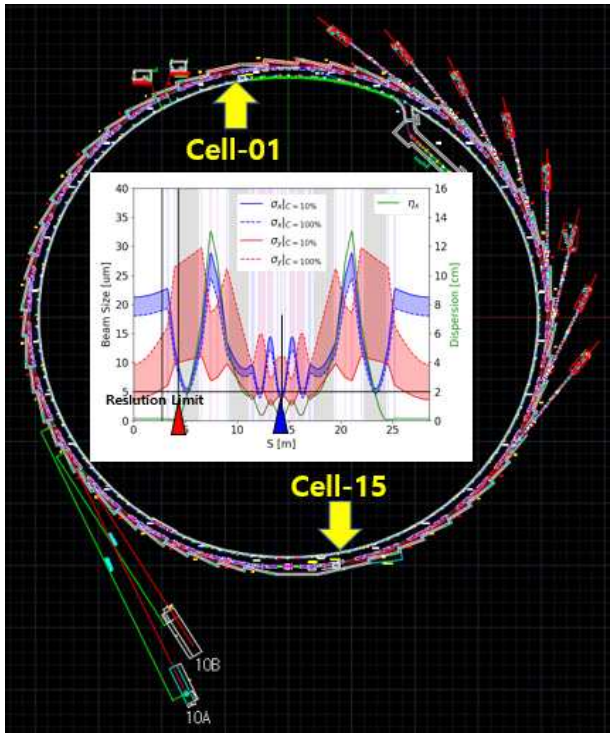
<표 3.1.11.20> Diagnostic Hutch 요약표

허치 이름	계측 물리량	위치
VDH-S1	사이즈, Emittance	저장링, 1번 cell L.G. Bending
VDH-B1	사이즈, 기계진동	부스터, 1번 cell 일반 Bending
VDH-S15	사이즈, 기계진동	저장링, 15번 cell L.G. Bending
	번치 길이, 번치 위상, 필패턴	저장링, 15번 cell Center Bending
XDH-S15B	2-Dim profile, Emittance, 에너지 분산도	저장링, 15번 cell Center Bending

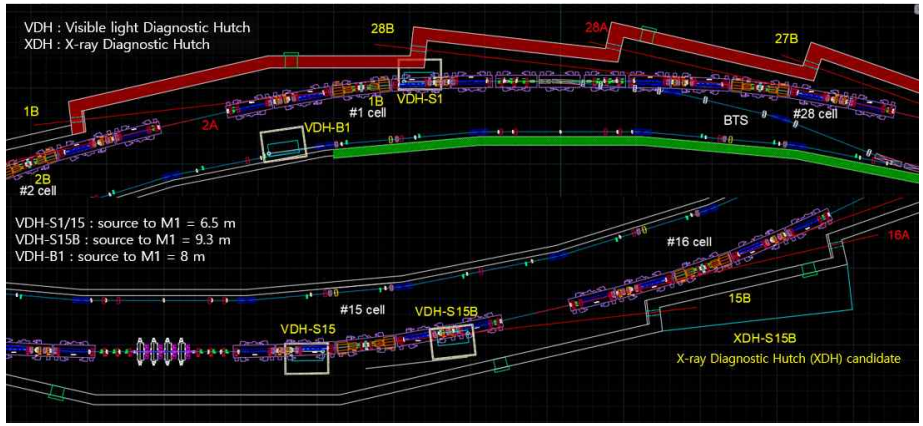
진단 빔라인의 1차적 기능은 방사광의 Transverse beam size, Longitudinal position & size (신호의 시간, 신호의 시간 폭) 정보를 측정하는 것이다. Transverse size는 전자빔의 Beta function과 Dispersion function이 서로 같은 곳을 측정하는 동일 물리량 교차 측정, 서로 다른 곳의 Transverse beam size를 측정하는 경우 색수차를 분리한 수직 및 수평 emittance를 계측하는데 이용된다. 측정 방식은 450 nm 근처의 단파장

광원을 이용한 가시광 간섭계이다.

근래 건설된 타 유사 시설(DLSR)의 경우, 광원까지의 거리가 길어 빔 사이즈 분해능이 목표치 이하로 떨어지거나, 협소한 포톤빔 전송 경로 진공함 내부 공간으로 인해 opening angle 안쪽으로 난반사가 일어나고, 이 경우 가시광 간섭계의 활용이 어려워 엑스선 광원으로 대체하는 사례가 보고되고 있다. 이러한 가능성에 대비하기 위해 XDH-S15B (엑스선 빔 진단 허치, 저장링, Section-15, Center bend) 빔라인을 예비 진단 빔라인으로 구성했다.



<그림 3.1.11.39> 진단 빔라인들의 위치



<그림 3.1.11.40> 진단 빔라인들의 세부 위치, VDH 3곳(부스터1, 저장링2) 확정, XDH 1곳 예비

Longitudinal 빔 정보는 Streak camera 및 Avalanching photo diode를 이용하여 Bunch Length Longitudinal Beam Instability, Bunch filling pattern, Bunch Purity를 모니터링한다. 또한 Fast photo-diode와 Wide-band Digitizer를 이용하여 Bunch length와 phase 정보를 온라인으로 제공한다.

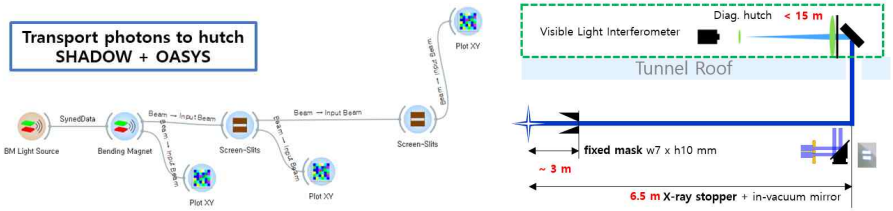
○ VDH-S1, S15 빔라인 설계

VDH-S1과 S15는 모두 Long straight section의 downstream 쪽 LGBM의 Gradient 초기 구간 0.7 T 영역을 사용하기 때문에, 해당 셀 직선구간의 연장선상에 위치 해 있다. 모두 광원에서 최대한 가까운 위치의 터널 내부 진공함에 In-vacuum mirror를 설치하여 6인치 Quartz 윈도우를 통해 수직으로 빔을 인출한다. In-vacuum mirror는 X선에 의한 열 침입을 최소화하기 위한 구조, 냉각을 위한 구조, X선의 위치를 판별하여 수직 위치를 조정하기 위한 구조를 포함한다. VDH-S1, S15의 광원 정보는 아래의 <표 3.1.11.21>과 같다.

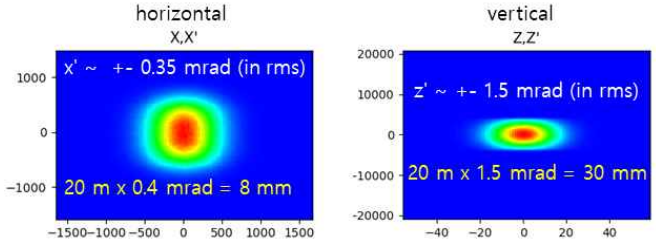
<표 3.1.11.21> VDH-S1, S15 광원의 사양

Parameters	Horizontal	Vertical
Beta function (β) [m]	1.54	17.72
Dispersion (η) [m]	2.62×10^{-4}	0
E. Spread (δ) [%]	0.13	
Emittance (ϵ_{rms}) [pm]	59.0	5.90
B Field Strength [T]	0.734	
Beam Size (σ) [μm]	**9.53**	**10.2**

결정된 Lattice를 이용하여 SHADOW와 OASYS 프로그램들로 S1, S15에서의 빔 프로파일을 분석했다. LGBM 광원의 정의, Photon mask 정의, 빔 이송, In-vacuum mirror 생략, Optical table까지 이송하여 계산 과정 중의 광자의 에너지, 위치, 각도 관계를 추적했다. 목적하는 가시광 점광원의 divergence 정보들로 진단 테이블 위의 광학장치에서 광원 크기를 환산할 경우 약 수평 8 mm in rms, 수직 30 mm in rms이므로 간섭계 등을 활용하는 데 문제가 없음을 확인했다.



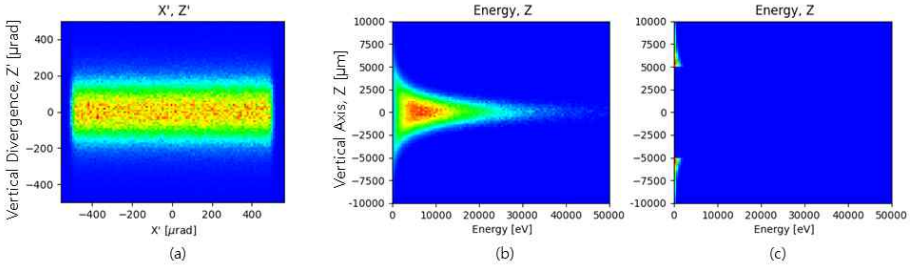
<그림 3.1.11.41> 시뮬레이션 모델 (좌), VDH-S1, S15 빔라인 구성의 schematic diagram (우)



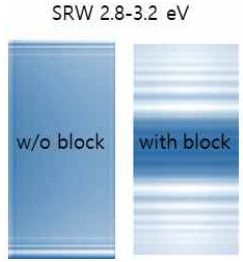
<그림 3.1.11.42> 2 ~ 4 keV 가시광 점광원의 위상분포

가시광 반사를 위한 In-vacuum mirror는 X선에 의한 발열과 기계적 변형을 방지하기 위해 차폐 기능이 필요하다. 이를 위해서는 광원에서 발생된 광자들의 에너지와 각 분포를 검토하여 적절한 위치에 X선 블록커 혹은 X선 투과기를 배치해야 한다. 지배적 열원인 50 keV 이상 에너지를 가진 광자(X선)의 수평, 수직 각 분포는 아래 그림과 같다. 수평으로는 넓게 퍼지고 수직으로는 Gaussian 분포를 띈다.

가시광 빔 진단과 무관한 엑스선 영역은 ± 115 μrad in rms로 In-vacuum mirror 설치가 예상되는 7~8 m 떨어진 지점의 transverse 평면상에서 ± 0.8 mm 수준의 분포를 갖는다. 이를 X선 블록커가 위치할 7 m 이후에서의 크기로 환산하면 약 0.8 mm이고, 96% 이상의 차폐를 위해 3-sigma, Full-size로 6배를 곱하면 4.8 mm의 너비가 나온다.



<그림 3.1.11.43> (a) 50 keV 이상 열원 X선의 수평, 수직 각 분포, (b) 차폐 전 열원 X선의 에너지-수직 공간상 분포, (c) 차폐 후 열원 X선의 에너지-수직 공간상 분포



<그림 3.1.11.44> 최종 광학 테이블에서의 가시광 분포

○ VDH-S15B 빔라인 설계

VDH-S1의 계산과 마찬가지로, 광원의 특징은 아래와 같으며, 동일한 방법으로 X선 차폐를 진행했다. 다만 설계된 Lattice는 Center Bend에서 빔 사이즈가 4~5 μm 수준으로 계통오차 추정치 1 μm를 고려하면 빔 사이즈 측정이 무의미하다.

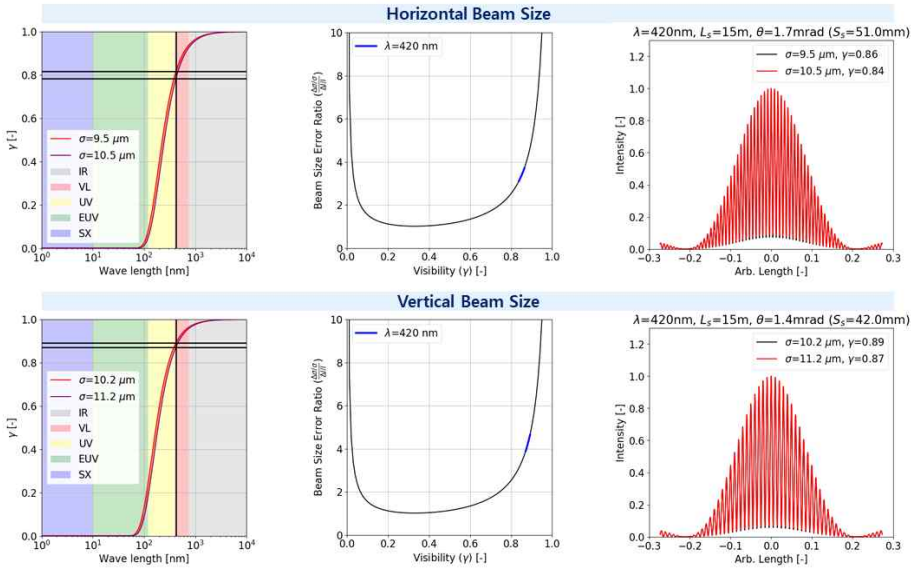
<표 3.1.11.22> VDH-S15B 광원의 사양

Parameters	Horizontal	Vertical
Beta function (β) [m]	0.366	3.435
Dispersion (η) [m]	6.54×10^{-4}	0
E. Spread (δ) [%]	0.13	
Emittance (ϵ_{rms}) [pm]	59.0	5.90
B Field Strength [T]	1.994 (0.186 m)	
Beam Size (σ) [μm]	**4.7**	**4.5**

하지만, 2 T 수준의 높은 자기장 세기로 광량이 가장 큰 Bending 광원이다. 그러므로 높은 광량이 측정에 유리한 Streak Camera와 Photo-diode로 실시간 번치 길이, 번치 필링 패턴, 번치 퓨리티 등을 측정한다.

○ Interferometer : Beam size & Emittance 측정

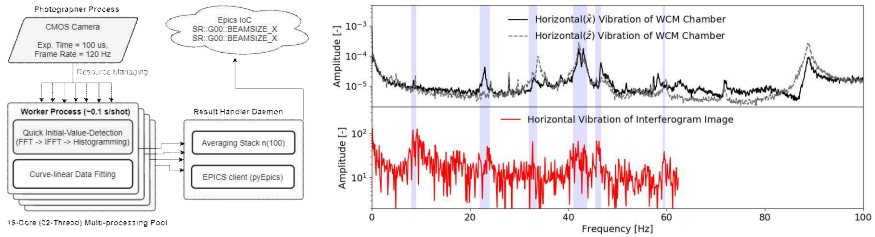
가시광 간섭계는 저장링에 두 군데 VDH-S1, VDH-S15, 부스터링에 한 군데 VDH-B1 설치된다. 설계 수치는 420 nm 파장, 1.2 m의 초점거리, 15 m 광원거리, 약 4~5 cm의 슬릿 거리를 가정했다. 이때 간섭도 γ는 수평 크기 약 0.8 근처, 수직 크기 약 0.9 근처에 형성된다. 이때 광세기 민감도 $\frac{\Delta\sigma/\sigma_0}{\Delta I/I_0}$는 모두 약 4 수준에 있다. 이는 영상의 밝기가 400 level 정도로 분해가능할 경우 빔 사이즈 분해능이 약 0.1 μm임을 의미하기 때문에 충분히 사용가능한 디자인임을 의미한다. 그러나 통상적으로 CMOS 센서에서 발생하는 white noise, 렌즈나 거울에서 발생하는 광파면 오차 등을 모두 고려하면 보수적으로 10배 이상의 분해능 저하(약 1 μm 이상의 계통오차)를 추정할 수 있어 노이즈 제거와 신호처리에 신중해야 한다.



<그림 3.1.11.45> 설계된 간섭계의 수직 (위) 수평 (아래) 간섭도 γ,
광세기 민감도 $\frac{\Delta\sigma/\sigma_0}{\Delta I/I_0}$, 이미지 시뮬레이션 결과

○ 기계진동 측정

광량이 충분히 확보된 경우 100 Hz 이하 수준의 빔 진동은 간섭계 자체만으로도 측정이 가능하다. 짧은 노출시간과 멀티코어 데이터 프로세싱으로 200 frame/sec 이상 간섭 이미지를 측정하는 것으로 가능하며, 이미 PLS-II 진단 빔라인에서 이를 보인 바 있다. VDH-S1, VDH-S15, VDH-B1에 설치될 예정이며 처리 로직과 계측 데이터는 아래 그림과 같다. 라인 스캔 카메라(2,000~4,000 frame/sec)를 이용할 경우, 충분한 광량이 확보된다면 kHz 수준의 빔 진동도 측정할 수 있고 비용도 저렴하므로 구축 예정이다.



<그림 3.1.11.46> 간섭계 진동측정을 위한 병렬처리 로직 (좌),
실제 테이블 진동과 간섭계 빔 진동측정 비교 (우)

- Emittance & Momentum Spread

빔 사이즈는 다음의 관계식으로 주어지며, 정비기간 및 커미셔닝 시 LOCO를 진행한 후엔 베타 함수 β와 색수차 D가 상수로 결정되게 된다.

$$\langle x \rangle = \sqrt{\beta_0 \epsilon + D_0 \Delta p/p} \quad \text{(수식 3.1.11.8)}$$

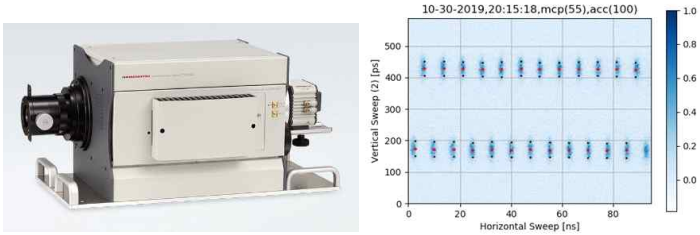
가시광 간섭계를 이용하여 두 군데의 서로 다른 위치에서 빔사이즈를 측정하고 두 개의 식을 연립하면 emittance와 운동량 분산을 모두 구할 수 있다. 이 방법은 XDH-S15B를 이용하는 경우 가능은 하지만, 빔사이즈가 측정 장치들의 분해능 한계에 가까워 정밀도가 떨어질 가능성이 있다.

XDH-S15B는 X선 Pinhole Camera 진단 빔라인이다. Monochromator와 central X-ray block, zone plate를 통과하여 scintillation plate에 맺힌 상을 거울을 통해 관측하는 시스템이다. 고전적 방식의 pin hole은 엑스선의 차폐를 위해 구멍이 두껍고 좁아 회절 패턴을 피할 수 없다.

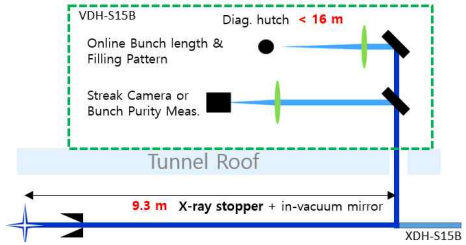
- Emittance & Momentum Spread

VDH-S15B 가시광 진단 빔라인은 다음 그림과 같이 터널 위에 구성된다. 구멍이 뚫린 진공 내 거울을 이용해 가시광은 터널 위로 올리고, 중심부 엑스선은 downstream 쪽 XDH-S15B로 이송시킨다. VDH-S15B 가시광 진단 빔라인은 Streak camera를 이용하여 다양한 multi-bunch instability를 관측한다. 대부분은 longitudinal instability를, 필요에 따라 transverse 정보를 관측한다.

Electron 혹은 Photon 빔의 시간 특성을 세밀하게 관측하기 위해 Hamamatsu의 Streak Camera를 진단에 이용한다. 예상되는 저장링의 단위 Bunch length는 약 20 ps 수준이므로 Single 혹은 Dual Synchroscan을 사용하여, 약 2 ps resolution을 갖게 구성하여 사용한다. 이 장치는 가시광 진단 빔라인에 설치하여 활용한다.

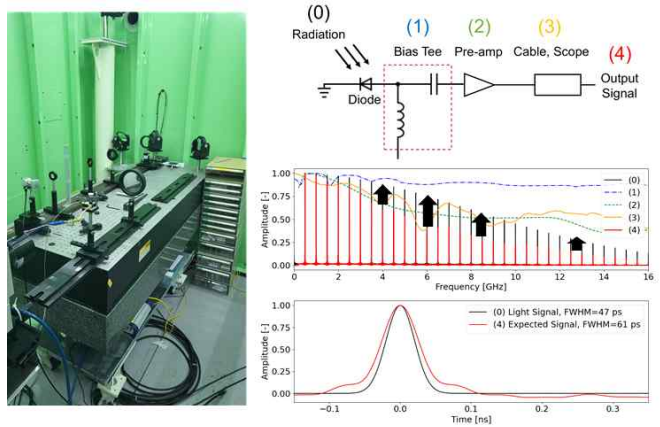


<그림 3.1.11.47> Streak Camera (좌), Streak Camera로 PLS-II Bunch 촬영 후 해석한 그림 (우)



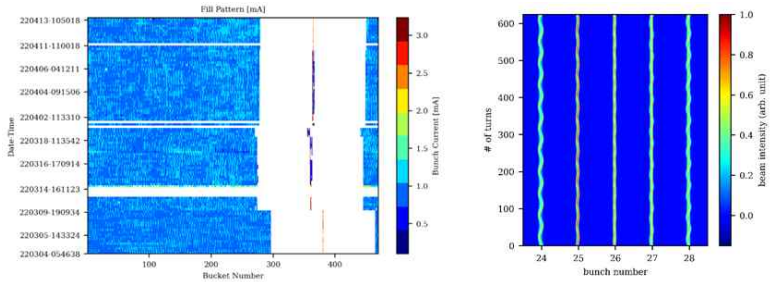
<그림 3.1.11.48> VDH-S15B 진단 빔라인 구성도

MSM Photodiode (metal-silicon-metal schottky diode) 기반의 bunch length monitor는 실시간 번치 길이와 각 번치별 phase 정보를 진단하고 서비스한다. 100 GS/s, 15 GHz ABW 수준의 고성능 광대역 디지타이저를 이용하여 방사광에 의해 여기된 photodiode의 시분해 신호를 분석한다.



<그림 3.1.11.49> Photodiode의 결선모습 (좌), 동작 원리 (우)

PLS-II에 구현되어있는 시스템이며, 번치 길이 이외에도 아래와 같은 필패턴 정보와 coupled mode instability를 실시간 측정할 수 있다.



<그림 3.1.11.50> Photodiode 시스템을 이용한 온라인 filling pattern 측정 (좌), 빔 불안정성 모니터링 (우)

라. TFS, LFS : Multi-bunch Feedback System

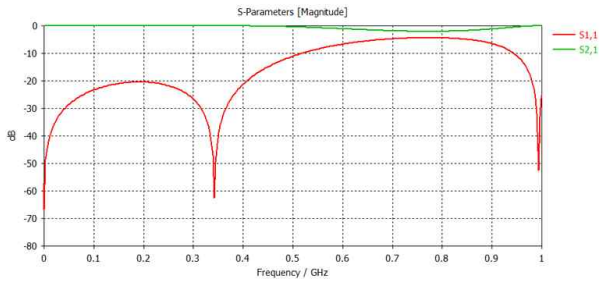
4세대 방사광가속기에서 매우 밝은 포톤 빔을 얻기 위해서는 저장링에서 최대한 높은 빔 전류를 저장할 수 있어야 한다. 저장링의 빔 전류를 높이기 위해서는 번치별 전하량을 높이거나 많은 전자빔 번치를 저장링 안에 안정적으로 저장하는 것이 중요하다. 일반적으로 저장링 내의 빔 번치들은 횡방향(베타트론) 및 종방향(싱크로트론)으로 각각 진동하며 이는 시간이 지남에 따라 자연적으로 감쇠된다.

하지만, 많은 빔 번치들이 저장링을 일주하는 동안에 RF cavity와 진공함, BPM 등과 같은 장치들과 상호작용하며 웨이크필드를 생성하게 되며, 이는 다시 빔에 작용해 '결합된 번치 불안정성'(Coupled bunch mode instability, CBMI)이라 불리는 비선형 효과를 일으킬 수 있다. 저장링에 생성된 웨이크필드가 다시 빔에 작용하면 횡방향과 종방향으로 각각 진동을 증폭시킨다. 이러한 효과에 의한 진동의 증폭이 자연 감쇠보다 강하다면 빔 번치들은 불안정해지고, 번치들이 만드는 전자기장의 세기는 번치별 전하량에 비례하기 때문에 이러한 빔 불안정성 일반적으로 저장링의 빔전류에 비례해 증가하게 된다. 결과적으로 빔 전류가 높아짐에 따라 빔 불안정성은 더욱 강하게 작용하고 빔 손실을 유발해 저장링의 최대 저장 전류를 제한할 수 있다. 따라서, 빔 불안정성을 억제하고 저장링의 최대 저장 빔 전류를 높이기 위해서는 횡방향과 종방향에 각각 빔 불안정성을 억제할 수 있는 Multi-bunch feedback system이 요구된다.

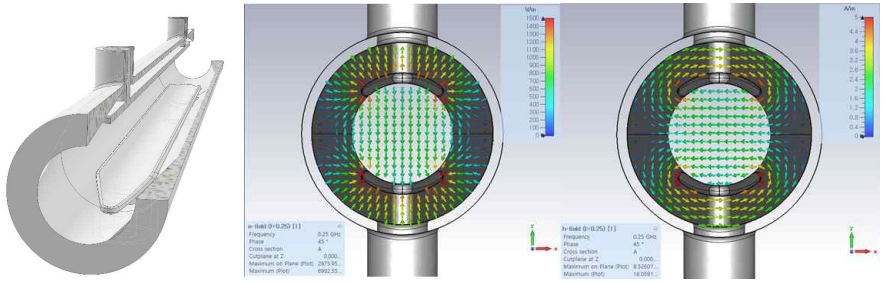
(1) Hardware

TFS의 동작 주파수는 $f_{RF}/0.5h$ ~ $f_{RF}/2$ 범위이다. Transverse multi bunch feedback용 kicker는 TEM 모드가 활성되는 strip-line 장치이다. 수평 및 수직 방향의 독립적 운영을 위해 동일한 TFS kicker를 90°를 돌려 설치, 운영한다. Wide-band RF 증폭기로부터 출력된 전력 고주파는 180° splitter를 사용하여 양단의 stripline을 downstream 끝에 인가시키고, upstream 끝은 50 dummy load에 연결한다.

Load 설계의 방점은 1) 해당 주파수 영역대에서 반사파가 2% 미만, 2) Wake Impedance에 의한 전원장치 손상을 줄이기 위해 적당한(even mode와 odd mode가 서로 50에서 살짝 벗어나도록) impedance 매칭 할 것, 3) 500 Watt 기준, 킥 각도가 1.5 μrad 이상일 것이다. 아래는 물리설계 결과이다.



<그림 3.1.11.51> 전압 기준, TFS odd mode (180° 위상차)의 반사 및 투과계수

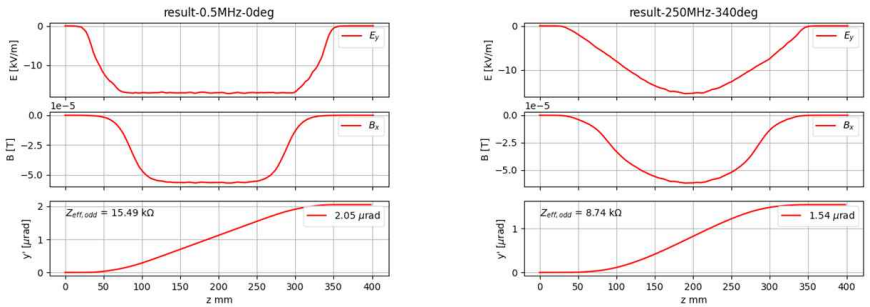


<그림 3.1.11.52> TFS cavity의 형상과 바르게 생긴 E, H field 모양 (좌측부터 순서대로)

오차범위가 큰 해석적 방법(형상 대푯값을 이용한 임피던스 추산과 이로 모델링한 kicking angle 계산) 대신 3차원 시변 Traveling wave의 전기장과 자기장 분포를 모두 활용하여 실제 전자빔 트래킹을 수행했다. 결과로 주어진 RF power에 대한 Transit time factor가 반영된 킥 앵글을 얻었고, 현실적인 Effective Shunt Impedance를 계산했다. 수치 해석적인 빔 트래킹을 수행할 때의 Effective shunt impedance는 다음의 (수식 3.1.11.9)로 정리된다.

$$R_{\perp}T^2 = \frac{(\frac{1}{q}\int[E_y(t) + cB_x(t)]cdt)^2}{P_0} \quad \text{(수식 3.1.11.9)}$$

실제 500 W의 Wideband Amplier를 사용할 것이기 때문에 P0는 484 W로 가정하고 0.5 MHz와 250 MHz의 TFS Stripline kicker에 대해 실제 전자를 트래킹하여 다음을 설계했다. Downstream 방향에서 전력을 인가하여 E와 H가 모두 전자에 동일한 방향의 힘을 전달한다. Transit time을 고려한 계산을 하기 위해 Traveling wave에 직접 정방향 빔 트래킹을 진행했으며 결과는 <그림 3.1.11.53>과 같다.

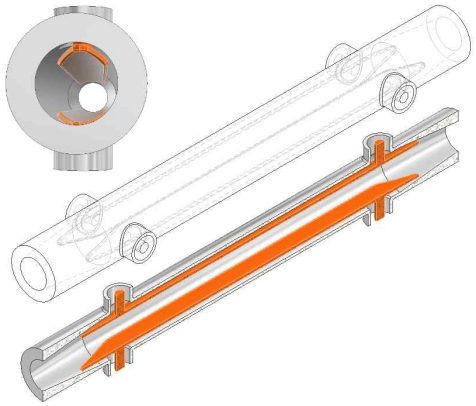


<그림 3.1.11.53> 전자빔 트래킹 시뮬레이션 결과 (0.5 MHz 운전 시 (좌), 250 MHz 운전 시 (우))

결과적으로 해당 TFS Cavity는 multi-bunch beam instability 상황에서 낮은 주파수의 불안정성의 경우 cavity 당 484 W 당 2 μrad kick을, 가장 높은 주파수 불안정성을 갖는 경우 cavity 당 1.5 μrad kick을 전달하도록 설계했다.

<표 3.1.11.23> TFS cavity parameter

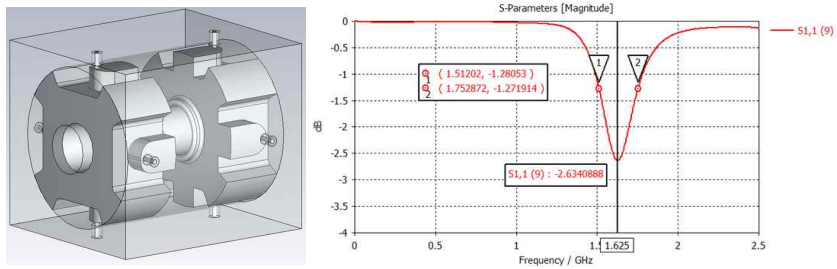
Parameters	Values
Electrode Length (L) [mm]	300
Impedance Z_{odd} [Ω]	49.75
Impedance Z_{even} [Ω]	To Be updated
Kick angle [μrad]	1.5 ~ 2.0
Eff. Shunt Impedance [kΩ]	8.74 ~ 15.49
Input Power / Cavity [W]	< 500



<그림 3.1.11.54> 설계된 TFS Kicker

○ LFS Kicker

LFS cavity는 TFS와 마찬가지로 모든 경우의 수의 multi bunch instability를 교정하기 위해, nf_{RF}부터 $(n+1/2)f_{RF}$범위의 주파수 동작을 지원해야 한다. 다목적 방사광가속기의 경우 약 500 MHz의 고주파 cavity를 사용한다. 정수 n을 3으로 하여 중심주파수 f_c를 1.625 GHz, 대역폭 반폭치 f_{BW}를 125 MHz로 잡고 설계했다 ($f_c \pm f_{BW}$). RF 주파수의 3배수를 잡은 이유는 1) 설치하기에 적당한 크기의 Cavity Geometry 구현, 2) Quality factor와 shunt impedance가 운전하기에 적합한 수준 등을 고려했기 때문이다.

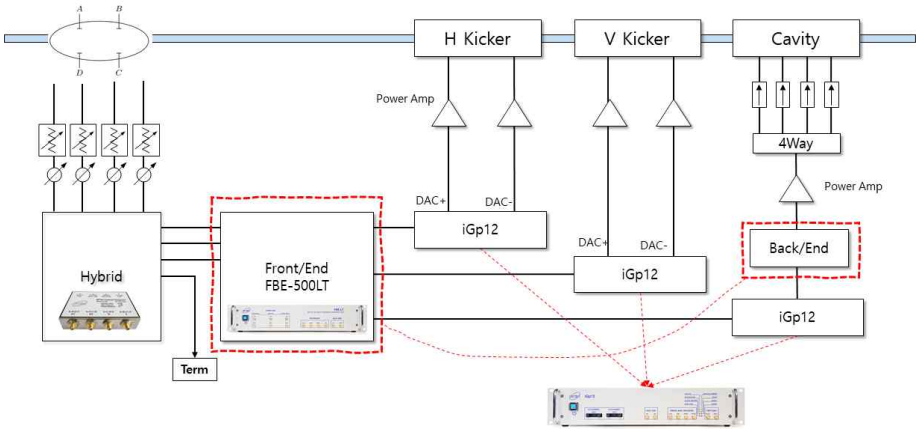


<그림 3.1.11.55> LFS Kicker Cavity

LFS Kicker Cavity 기하구조는 커플링 구조 면에서 DAΦNE 형태를, Nose cone이 거의 없다는 면에서 BESSY-II 형태의 중간 형상을 취한다. 설계 달성 목표 loaded Q는 중심주파수 1.625 GHz에서 6.5 (=$f_C/f_{BW} = 2n+0.5$) 정도이다. 8개의 포트가 달려있지만 2개의 포트를 제외한 나머지는 50 Ω termination 시킨다. 상용 dummy load를 사용한다.

(2) Multi-bunch feedback system configuration

앞서 언급한 바와 같이 Multi-bunch feedback system은 크게 두 방향으로 나눠서 작동한다. 횡 방향의 피드백 시스템은 각 번치별 위치를 측정하고 스트립라인 키커를 활용해서 멀티 번치 트레인의 번치별 위치 차이를 최소화해서 베타트론 감쇠 시간을 최소화 시키는 것이 목적이다. 또한, 종방향의 피드백 시스템은 멀티 번치 트레인의 번치간의 위상을 측정하고 간격을 일정하게 만들기 위해 길이 방향의 cavity kicker를 활용해서 피드백을 수행한다. 다음 <그림 3.1.11.56>은 전체 멀티 번치 피드백 시스템의 구성도를 보여주고 있다.



<그림 3.1.11.56> The configuration of TFS/LFS Feedback system for 4GSR

멀티 번치 피드백을 위한 빔 위치 및 위상을 측정하기 위한 BPM이 저장링에 설치되며, 이로부터 위상변화가 90°가 진행되는 구간에 피드백을 위한 kicker 류가 설치된다. BPM으로부터 나오는 신호들은 hybrid를 통과하여 SUM, Delta 값을 Front-End 일렉트로닉스에 제공한다. Front-end 단에서는 BPM 신호의 진폭 제어, 위상 제어, 필터링, Down Conversion (option) 등을 수행하며 최종적으로 피드백 프로세서에서 피드백을 위한 횡 방향 kicker의 피드백 앵글과 종 방향 cavity kicker의 RF 위상을 계산해 각 방향의 멀티 번치 피드백을 수행한다. 멀티 번치 피드백을 위한 프로세서는 Dimtel 사의 상용 제품인 iGp12를 구매해서 시스템을 구성할 예정이다.

마. 저장링의 에너지 측정

저장링의 에너지 측정은 두 가지 방식으로 측정한다. 첫 번째는 전통적인 방법인 저장링이 안정적인 궤도를 유지할 때 이극 자석의 자기장 세기와 저장링 빔 에너지의 관계를 이용하여 측정하며 두 번째는 아래에 기술한 스핀 분극을 활용하여 정밀하게 측정하는 것이다.

스핀 분극을 이용한 에너지 측정은 스핀이 정렬된 전자빔을 TEM kicker를 이용하여 RF Kick을 주어 공명이 나타나는 kick 주파수로부터 측정한다. 이는 저장링의 일반적인 구성인 Strip-line kicker와 BLM을 활용하여 측정하므로 특별한 장치를 추가하지 않아도 되면서 PPM 수준의 정확도로 측정할 수 있다.

스핀 정렬 시간은 Sokolov-Ternov effect로부터 계산할 수 있다. 저장 링에 전자가 입사 시 스핀 방향이 전 방향으로 균일하다고 가정하였을 때, 스핀이 정렬되는 시간상수 τ_P는 다음과 같이 쓸 수 있다. [7][8]

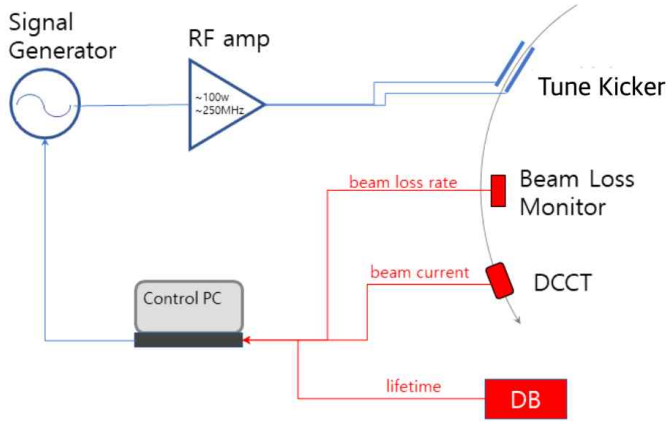
$$\tau_P^{-1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{5\sqrt{3}}{8}\frac{e^2\gamma^5\hbar}{m^2c^2}<\frac{1}{|\rho|^3}> \quad \text{(수식 3.1.11.10)}$$

4GSR의 설계값에 따른 τ_P는 (수식 3.1.11.10)으로부터 약 54분 정도이다.

저장링 안에서 세차운동(precession) 전자의 운동방정식을 Larmor precession equation으로 나타낼 수 있고 상대론적 움직임의 전자빔 각운동량은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Omega = \frac{e}{m_e\gamma}(1+a\gamma)B = (1+a\gamma)\omega_{rev} \quad \text{(수식 3.1.11.11)}$$

위 식의 $a\gamma$ 항은 저장링의 자기장 내에서 운동하는 전자빔의 스핀 세차운동 튠 또는 스핀튠(spin tune: ν_{spin})으로 정의된다. $\nu_{spin} = a\gamma$에서 a는 전자의 anomalous magnetic moment이고 γ는 로렌츠 펙터로 스핀튠은 에너지만의 함수라 4GSR의 4 GeV의 경우 ν_{spin} = 9.0775308이다.



<그림 3.1.11.57> TPS Kicker를 이용한 에너지 측정의 장치 구성

7) A. A. Sokolov and I. M. Ternov, "On the Spin and Polarization Effects in the Theory of Synchrotron Radiation", Sov. Phys. Dokl. 8, 1203(1964).
8) A. Chao, "Polarization of a Stored Electron Beam", SLAC-PUB-2781, July 1981.

저장링의 스핀이 안정되었을 때 Kicker를 이용하여 수평 방향의 교류자기장을 가하여 전자빔 스핀 정렬을 급격히 소거시켜 빔 손실이 증가하는 공명주파수를 찾아 ν_{spin}을 정확히 측정하고 $\nu_{spin} = a\gamma$ 관계로부터 전자빔 에너지를 정확히 측정할 수 있다.

<그림 3.1.11.57>은 정밀 에너지 측정을 위한 구성을 나타내었다. 4GSR 장치 설계 값에서 자기분극화 시간(spin polarization time)은 계산된 시간(약 54분)을 기준으로 빔 입사 후 충분한 시간 동안 빔 손실 및 전류변화를 측정하면서 스핀이 정렬되는 것을 기다리고, 정렬되면 Tune kicker에 RF 주파수를 Scan 하여 빔 손실이 급격히 증가하는 공명주파수를 찾는다. 이때 설곗값의 스핀튠 $\nu_{spin\,D}$ 와 측정할 스핀튠 $\nu_{spin\,M}$ 의 차이는 크게 나지 않을 것이므로 $\nu_{spin\,D}$ 을 중심으로 공명주파수 스캔을 시작하고 공명이 일어나는 $f_{kick} = f_{dep}$의 주파수를 찾아 측정 스핀튠 ($\nu_{spin\,M}$)을 측정한다. 그리하여 스핀튠과 에너지와의 관계 (수식 3.1.11.12)를 통해 정밀하게 측정할 수 있다.

$$E = 0.440648626\,\nu_{spinM}\ [\mathrm{GeV}] \quad \text{(수식 3.1.11.12)}$$

스핀튠을 이용한 방법은 자기분극화 시간 및 스캔을 하는 동안 빔이 불안정해지므로 사용자 서비스 중에는 할 수 없다. 그리하여 Commissioning 동안 스핀 분극 이용하여 에너지를 측정한다. 이후 사용자 서비스 운전에서는 이극 자석의 MPS readout 데이터로 역산한 이극 자석의 자장을 계산하고 이를 바탕으로 저장링의 에너지를 측정한다.

참고문헌

[1] A. Novokshonov et. al, “SCINTILLATOR NON-PROPORTIONALITY STUDIES AT PITZ”, IBIC2022, Kraków, Poland.

[2] R. Yang et. al, “DEVELOPMENT OF A YAG/OTR MONITOR FOR BEAM HALO DIAGNOSTICS” IBIC2018, Shanghai, China.

[3] D. Martin et. al., “EVALUATION OF BERGOZ INSTRUMENTATION NPCT”, Bergoz Internal Report.

[4] Torino, L. & Scheidt, K., Proceedings of the 7th Int. Beam Instrumentation Conf., IBIC2018, China.

[5] Ozkan Loch, C. Ischebeck, R. Stampfli, Proceedings of the 10th International Beam Instrumentation Conference, Rep. of Korea.

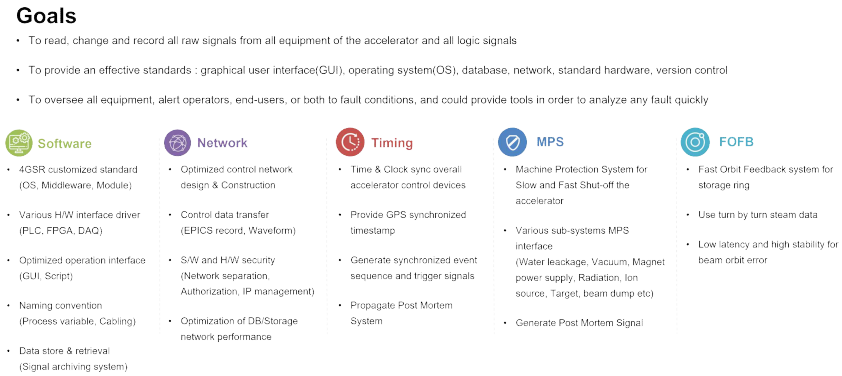
[6] A. A. Sokolov and I. M. Ternov, “On the Spin and Polarization Effects in the Theory of Synchrotron Radiation“, Sov. Phys. Dokl. 8, 1203(1964).

[7] A. Chao, “Polarization of a Stored Electron Beam”, SLAC-PUB-2781, July 1981.

바. 통합 제어시스템

(1) 개요

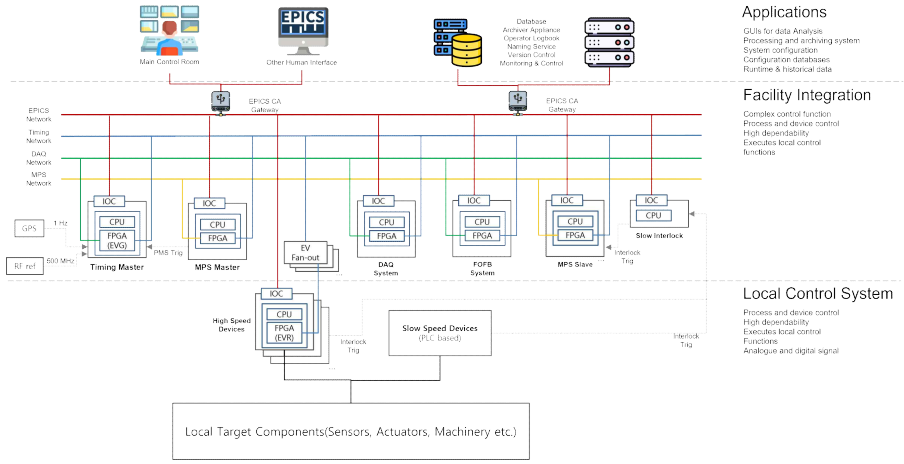
다목적 방사광가속장치는 장치 특성상 여러 이기종 시스템을 하나로 통합하는 전용의 제어시스템이 필요하다. 다양한 시스템을 하나의 유기적인 시스템으로 통합하기 위해서 이기종 장치들은 EPICS middleware framework에서 integration되어 운영한다. 통합 제어시스템은 통합 제어실에 구축되며 분산된 로컬 장치들에 대한 모든 신호의 모니터링을 통해, 다양한 가속기의 모든 요소에 대한 제어를 지원한다. 이기종 시스템을 하나의 통합시스템으로 구축하기에 앞서 무분별하게 파생될 수 있는 이기종 시스템을 성능 및 목적에 따른 형태로 분류하고 표준화하는 것은 향후 발생할 수 있는 큰 손실 비용을 절감할 수 있으며, 제어시스템의 표준화는 다목적 방사광가속 시설이 건설되는 시기보다 빠르게 진행하는 것이 중요하다. 또 가속기는 수십 년을 운영해야 하는 장치로 장기간의 운영을 위해 시스템의 확장성 및 유연성을 고려하는 것이 중요하며, 이를 위해 초기부터 제어 인프라 구축에 충분히 반영되어야 한다. 가속기 통합 제어시스템의 설계부터 통합 제어시스템 완성까지의 일련의 작업을 진행함으로써 표준화, 인프라 설계 구축을 통한 4GSR의 안전성, 신뢰성, 확장성, 가용성을 가지는 통합 제어시스템을 개발하고 적용함을 목표로 한다.



<그림 3.1.11.58> 통합 제어시스템의 목표 및 핵심기술

(2) 제어시스템 구성

다목적 방사광가속장치의 제어시스템은 분산된 이기종 장치의 환경을 통합하기 위한 software framework로 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)을 사용한다. EPICS는 내부에 Ethernet 통신 계층을 포함한 분산 제어용 미들웨어로 4GSR의 각 로컬장치는 EPICS IOC (Input Output Controller)를 이용해 제어시스템을 구성해야 한다. 이는 로컬 제어시스템과 통합 제어시스템을 구분하는 경계로 볼 수 있다. 4GSR의 통합 제어 시스템 구조설계는 아래 <그림 3.1.11.59>를 참고한다. 4GSR은 4가지 형태의 네트워크(EPICS network, Timing network, DAQ network, MPS network)를 중심으로 구성한다. EPICS network는 Control network라고도 불리며, 4GSR의 각 로컬 제어시스템과 통합 제어 시스템을 연결하는 네트워크이다. Timing network는 Timing system에 정의된 고속의 이벤트 신호를 정밀한 시각 동기화된 신호를 요구하는 장치에 전송하기 위한 광 통신 네트워크이다. DAQ network는 일반적인 control 신호가 아닌 대량의 NDarray, waveform 데이터를 전송하기 위한 광통신 네트워크로 control 신호와 데이터의 분리를 통해 네트워크의 안정성을 높이기 위해 사용한다. MPS (Machine Protection System) Network는 가속기에 치명적인 위협이 될 수 있는 신호인 BPM (Beam Position Monitor), BCM (Beam Current Monitor)과 같은 진단장치나, 가속기에 파워를 공급하는 RF 장치들의 trip 신호를 고속으로 전달하기 위한 광통신 네트워크이다.



<그림 3.1.11.59> 통합 제어시스템 Architecture

○ 소프트웨어 표준화

EPICS 미들웨어는 운영체제 독립적인 오픈소스 프로그램이지만, 여러 무분별한 운영환경을 막기 위하여 EPICS 운영을 위한 표준화 가이드를 마련했다. 운영체제 및 시스템 운영에 필요한 의존성이 발생하는 경우 별도의 예외 사항을 통하여 시스템 유지보수 및 운영 비용을 최소화한다. 4GSR을 운영하기 위한 표준적인 소프트웨어 운영 가이드는 아래와 같다.

① EPICS middleware (EPICS7 7.0.7 or later)

② 기본운영체제 (Debian 및 Redhat 계열 리눅스 64 bit)

- Debian11, Ubuntu 22.04 or later
- Rocky7 or later
- Xilinx - SoC (PetaLinux)

③ Display (GUI) Manager : Phoebus

④ Centralized Storage System

- EPICS Archiver Appliance on Network Attached Storage (NAS)
- Storage Area Network (SAN) for array data

⑤ Industrial Protocol : ModbusTCP

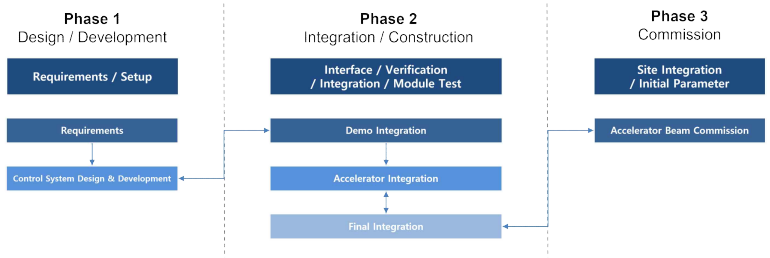
⑥ EPICS CA Gateway : Redundant on L4 switch

⑦ Database : MariaDB

⑧ Version Control : Git Lab

(3) 제어시스템 개발 사이클

가속기를 위한 제어시스템의 개발 사이클은 프로젝트의 일정에 따라 조율되며, 크게 3가지 단계로 구분한다. 1단계는 4GSR의 구성 장치들을 운영하기 위한 제어시스템의 요구사항 분석 및 설계 개발을 진행한다. 이 과정에서 개발된 시제품 또는 상업용 제품 시험이 진행되고, 2단계의 통합 및 구축 단계를 거친다. 2단계가 완료되면 최종 3단계에서 실 운전을 진행한다. 각 단계별로 검증 순서를 만들어 검증해야 하며, 검증된 내용을 기반으로 제어시스템의 통합을 완료해야 한다.



<그림 3.1.11.60> 통합 제어시스템 개발 사이클

○ 1단계 및 2단계 사이의 검증

- EPICS 미들웨어 시스템 통합검증
- 상용 uTCA 기반 타이밍 시스템 인터페이스 검증
- Timing System 검증
- Fast Orbit Feedback System (FOFB) 검증
- Fast Data Acquisition (DAQ) System 검증
- Machine Protection System (MPS) : Machine Interlock System (MIS), Fast Orbit Interlock (FOI) 검증

○ 2단계 및 3단계 사이의 검증

- 각 모듈 단위 I/O 검증 (모든 Local System에 따른 검증)
- 각 시스템 통합 및 연동 시험
- 빔 시운전을 위한 parameter 설정값
- 빔 시운전 시나리오에 따른 운전 모드
- 빔 시운전 빔 물리 어플리케이션 연동 시험

(4) 통합 제어시스템 인프라 구성

통합 제어시스템은 향후 주 제어실 및 서버실에 포함할 전산 인프라 및 이 위에서 동작해야 하는 4GSR Operation 환경을 구성한다.

○ Operation을 위한 소프트웨어 개발

4GSR은 다양한 이기종 장비를 하나의 유기적인 시스템으로 만들기 위해 EPICS 미들웨어를 사용한다. 가속기 운영을 위한 여러 프로그램(UI 및 high level application)도 EPICS와 유기적으로 결합하여야 하며, 4GSR의 안정적인 운영을 위해서는 다양한 EPICS 기반 운영 모듈들의 개발이 필요하다. EPICS 기반 운영 모듈에는 OPI 및 제어 네트워크를 위한 CA gateway, Web base의 EPICS 신호 모니터링을 지원하는 WebOPI, Elasticsearch를 지원하는 Channel Finder, 가속기 운영 상황이나 특이상황 기록을 위한 Logbook, EPICS 신호에 대한 Alarm Event를 위한 Alarm 등이 있다.

○ 인프라 구성

① 주 제어실 구성

- Display Wall
- Operation 환경
- Operator Interface 서버 구성
- Public 네트워크망 구성
- 제어 네트워크 구성

- Personal Safety Interlock 모니터링 시스템
- 컨트롤 쉐드 및 터널 관제용 모니터링 시스템
- Emergency 수동 버튼
- 전관 방송 시스템
- 서버실 구성
- 운영 서버 구성
- 가속기 운전 관련 서버 구성 (EPICS IOC 서버, OPI 서버, Archive 서버 등)
- 스토리지 시스템 구성
- 데이터 백업 스토리지 시스템 구성
- 제어 네트워크 백본 스위치 구성 (EPICS 제어, Timing, MPS, DAQ 네트워크)
- 항온항습
- 전원 이중화 및 UPS 전원

② 네트워크 구성

- 서버실 MDS 및 각 FDF 간 구성
- 48 core 폐쇄망 전용회선
- EPICS 제어 네트워크 4 core (10 G 이중화)
- Timing 네트워크 4 core (이중화)
- FOFB 네트워크 4 core (이중화)
- MPS 네트워크 4 core (이중화)
- DAQ 네트워크 4 core (이중화)

○ 표준 설치 스크립트

4GSR 가속장치를 개발하는 내부 인력 및 외부 인력에 대한 개발 환경의 표준화를 마련하여 제어시스템에서 소프트웨어 개발 및 운영의 형상 불일치에 대한 문제를 사전에 방지하기 위해 표준 설치 스크립트를 개발한다. 수많은 장치의 제어시스템을 일관된 방법으로 개발 운영하기 위한 환경으로 구성된다.

Install script는 EPICS 개발 환경 자동 설치 스크립트로 Debian, Ubuntu, Rocky 환경에서 EPICS Base, EPICS synApps, EPICS extension 설치를 지원하고 있다. Install scripts를 통한 개발 환경 설치 시 설치 항목에 대한 의존성 패키지는 스크립트에서 자동으로 설정되게 되어있지만, 의존성 항목의 설치 및 설정을 위해서는 관리자 권한이 필요하다.

EPICS를 설치하는 호스트 계정에서 오픈소스 EPICS 미들웨어를 표준환경으로 구성하며, EPICS에서 사용하는 환경변수들이 들어있는 setEpicsEnv.sh 파일이 생성된다.

```
Auto Installation script
Enter the number of you want to install
1 : EPICS V7 version 7.0.7
2 : EPICS synApps
3 : EPICS extension
0 : Exit script
Enter the number : 0
```

<그림 3.1.11.61> Install script 실행화면

스크립트에서 EPICS base는 OS 인터페이스 라이브러리, CA 클라이언트 및 서버 라이브러리, 장치 및 드라이버 지원으로 구성되며 EPICS의 핵심이다. EPICS module은 synApps module로 Asyn, StreamDevice, autosave 등 기본적으로 필요한 라이브러리를 포함하고 있는 라이브러리 모음집이다. EPICS extension은 디스플레이 관리하기 위해 src 폴더에 EDM, MEDM을 구성하고 있다. 스크립트 설치 항목에 없는 EPICS IOC와 EPICS lib 폴더는 직접 개발한 IOC 및 라이브러리 코드가 포함되어 있다.

실행 화면에서 모든 항목을 설치하면 base, module, extension 등 <그림 3.1.11.62>와 같이 실행 화면을 확인할 수 있다.

```
example@example:/usr/local/epics/EPICS7$ tree -L 2
.
├── base
├── epics_ioc
│   ├── control_ioc
│   └── local_ioc
├── epics_lib
├── extensions
├── modules
│   └── synApps
└── setEpicsEnv.sh

9 directories, 1 file
```

<그림 3.1.11.62> EPICS base 설치 완료 화면

EPICS Base 개발 라이브러리 외에 4GSR에서 사용될 라이브러리는 modules directory로 이루어지며, directory는 통합 제어시스템 관련 인터페이스를 이루는 개발 코드 directory와 로컬 장치 제어시스템의 개발 코드 directory로 구성된다. 개발에 관련된 코드는 형상 관리를 위해 오픈소스 기반의 형상 관리 툴을 구축하여 운영한다.

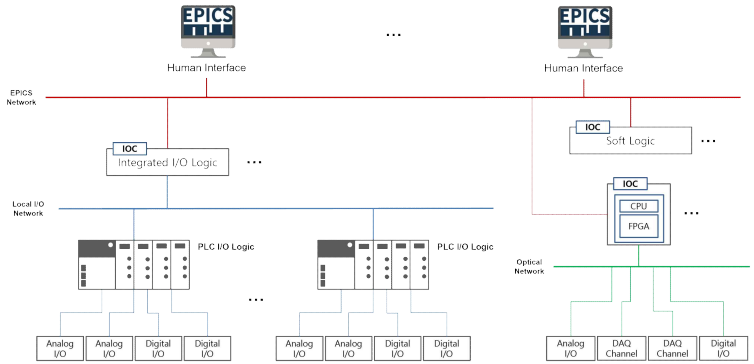
(5) 로컬 제어시스템 통합

4GSR 통합 제어시스템은 각 로컬 장치의 제어시스템을 통합하기 위해 로컬 장치에서 구성하고 있는 제어시스템의 플랫폼을 파악하고 이에 대한 EPICS interface를 마련하기 위해 큰 노력을 기울여야 한다. 각 로컬 장치 사이에 여러 형태의 이기종 시스템이 고려되고 있으며, 해당 시스템을 EPICS로 통합하기 위해 많은 EPICS 인터페이스 모듈을 고려해야 한다. 가속기를 이루는 다양한 장치들은 각각의 시스템으로 구성되므로 여러 형태의 이기종 시스템 통합에 복잡성이 따른다. 무분별한 이기종 시스템의 통합은 향후 유지보수 및 운영을 위한 형상을 맞추는데 복잡성을 초래한다. 필요치 않은 이기종 시스템 발생을 최소화한 후 시스템을 통합하기 위해서, 우선 각 장치에서의 요구사항을 파악 후 성능 및 목적에 따라 시스템 표준화를 진행해야 한다. 유지보수 및 효율성 증진을 위해서 이기종 시스템 발생을 최소화하고, 장치에서의 성능 및 목적에 맞도록 표준화를 진행한다.

중앙 제어 시스템 개발의 표준화를 목적으로 UI 가이드, Naming Convention, IOC 개발 가이드를 로컬 제어시스템을 위해 작성 및 배포하였다. 이 가이드들은 제어시스템을 위한 기술적 지침을 제공한다. 이를 통해 개발자는 일관된 코드 스타일을 유지하고, 개발 효율성을 극대화할 수 있다. UI 가이드는 일관된 사용자 경험을 제공하기 위해 설계 원칙, 레이아웃, 색상 및 테마, 아이콘 및 그래픽 요소, 접근성 등을 다룬다. 설계는 일관성, 사용자 중심, 반응성을 중시하며, phoebus를 활용한 레이아웃 구성, 색상, 테마 설정, 직관적인 아이콘과 그래픽 사용을 권장한다. 또한, 접근성을 고려하여 모든 사용자가 쉽게 이용할 수 있도록 설계한다. Naming Convention은 EPICS PV (Process Variable)의 명명 규칙을 정의한다. 일관된 명명 규칙을 통해 신호의 의미를 명확히 하는데 목적이 있다. IOC (Input Output Controller) 개발 가이드는 시스템 구성 요소 간의 의존성을 관리하고, 모듈화된 코드 작성을 위해 필요한 지침을 제공한다. IOC의 개요, 구성 요소, 설정 및 구성 방법, 테스트 및 디버깅 절차 등을 포함하여 개발자가 효율적으로 작업할 수 있도록 지원한다. 이를 통해 시스템의 유연성을 높이고, 코드 재사용성을 극대화한다. 이

가이드는 중앙 제어시스템과 로컬 제어시스템 간의 일관성을 유지하고, 개발 과정에서의 효율성을 극대화하기 위한 필수적인 지침을 제공한다.

○ 로컬 제어시스템 구성



<그림 3.1.11.63> 로컬 제어시스템 Architecture

로컬 장치의 제어시스템 구성은 크게 Programmable Logic Computer (PLC) 기반의 Slow Processing 영역과 Field Programmable Gate Array (FPGA) 기반의 Fast Processing 영역으로 나뉜다. <그림 3.1.11.63>과 같이 slow processing 영역의 PLC I/O 데이터는 EPICS IOC와 Ethernet 기반의 산업용 TCP/IP 프로토콜을 사용해 통합된다. Fast processing 영역은 반도체 기반의 SoC 상에서 FPGA 로직과 내장된 CPU의 미들웨어에서 통합된다.

<표 3.1.11.24> 로컬 제어 소프트웨어 개발을 위한 표준화 모델

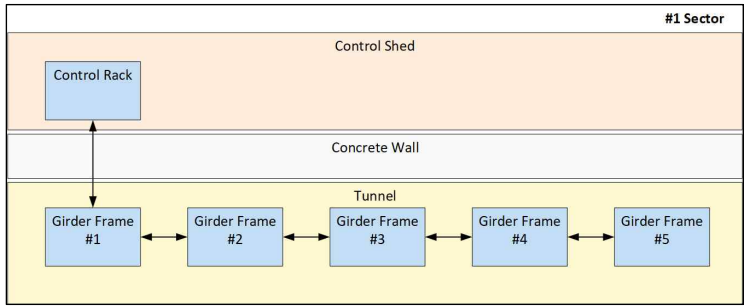
장치 컨트롤러	내용		EPICS Module	관련 시스템
PLC	- 산업용 통신 프로토콜 (ModbusTCP)		ModbusTCP	진공 Slow Interlock
Programmable SoC	Xilinx Zynq	- Vivado (FPGA코드) - Peta Linux (Xilinx Linux Kernel) - Linux Device Driver	asyn Stream user-driver	Timing FOI FOFB LLRF
시리얼 컨트롤러	- MOXA 시리얼 서버 - Ethernet to RS232 / 485 - SCPI 시리얼 command 표준 - Embedded EPICS IOC Controller		asyn Stream	자석 Power Supply 진공

○ 통합 제어시스템을 위한 요구사항

4GSR 통합 제어시스템은 수많은 로컬 제어시스템에 대해서 설계 및 개발 단계, 통합 및 구축 단계로의 진행을 위해 통합검증을 수행해야 한다. 각 로컬 장치의 제어시스템을 성공적으로 통합하기 위해서 로컬 제어시스템은 통합 제어시스템의 요구사항 및 환경을 준수해야 한다.

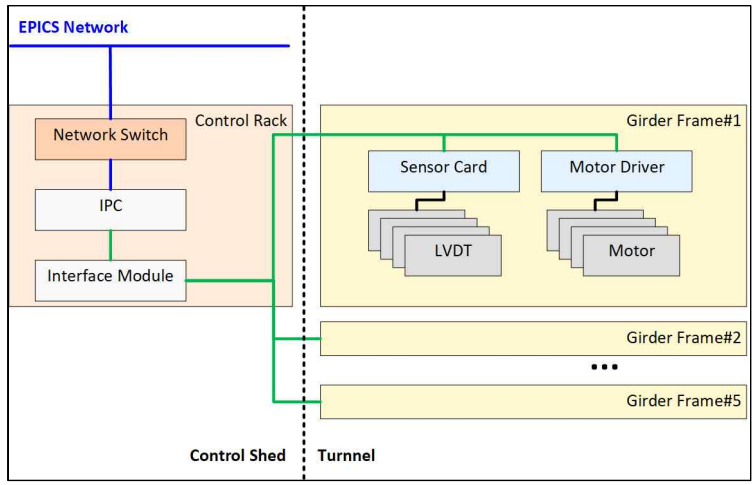
○ Girder Control System

거더는 4GSR의 방사광 실험에서 빔이 진행하는 빔라인들의 받침대 역할을 한다. 거더의 경우 여러 외적인 요인(지진, 바닥 진동 등)에 의해서 높이 및 좌우의 정렬이 틀어질 수가 있다. 거더의 정렬이 틀어지면 방사광 실험에서 빔의 궤도에 영향을 끼치게 되므로 유지보수 동안 거더 정렬을 통해 빔이 정상궤도로 진행할 수 있도록 해야 한다. 거더 제어시스템은 각 거더에 4개의 모터를 장착하여 거더의 높낮이 정렬을 원격지에서 제어할 수 있도록 구성하는 것을 목표로 한다.



<그림 3.1.11.64> Girder Control System 기본 구성

<그림 3.1.11.64>는 Girder Control System의 기본 구성을 표현한 그림으로 저장링 1 cell을 대표적으로 보여준다. 거더는 총 28개의 컨트롤 쉐드에 개별적으로 위치하게 되며 각 쉐드마다 5개의 거더 프레임이 1세트의 거더 제어시스템에 포함한다. 그러므로 저장링 전체 28개의 거더 제어 랙이 구성된다.



<그림 3.1.11.65> Girder Control System Composition - 1 EA Sector

<그림 3.1.11.65>는 Girder Control System의 상세 구성을 표현한 그림으로 저장링 1 cell의 거더를 대표적으로 보여준다. <그림 3.1.11.65>와 같이 각 1 set의 거더 제어시스템은 5개의 거더 프레임을 구성하며 EPICS Network에 연결이 되어 원격지의 OPI를 통해 사용자가 거더 제어를 가능하게 구성한다. 개별 거더 제어시스템은 1개의 IPC를 통해 5개의 거더 프레임의 센서와 모터를 모니터링하고 제어한다.

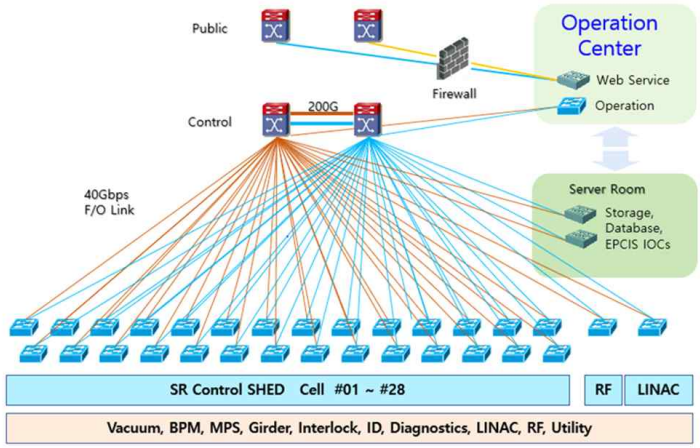
사. 제어 인프라 설계

통합 제어시스템은 오랜 운전 기간을 고려한 제어 인프라 구축, 성능향상, 유연성 및 확장성이 고려되어야 한다. 이러한 특성을 고려한 IT 및 네트워크 인프라 구축을 기본 설계에 반영해야 한다. 인프라에는 종합 관제실 역할을 수행하는 제어센터 구축 및 IT, 네트워크 등이 포함되며, 표준화에 따른 규모 산정을 통해 적절한 인프라 설계 및 구축이 진행되어야 한다.

(1) 네트워크 설계

가속기 빔 운전을 위해 필요한 모든 장치들의 가동 정보는 주 제어실에서 실시간으로 모니터링되고 제어될 수 있도록 네트워크 인프라를 구성해야 한다. 저장링 컨트롤 쉐드, 선형가속기, RF, 공조 및 유틸리티, 빔라인 ID 등 빔 운전에 필요한 모든 장치 데이터는 서버실로 수집이 된다. 서버실은 각종 장치 제어용 EPICS IOC 제어

장치들과 데이터 프로세싱을 거쳐 스토리지에 저장되는 장소로 트래픽이 집중되는 곳이다. 이렇게 수집된 데이터는 고용량 고속으로 운전 및 빔 물리 진단 요원에게 시각적으로 혹은 추출된 데이터의 형태로 네트워크상에서 제공하게 된다. 또한, 제어 네트워크 설계 시 광케이블 설치는 건물 건축 초기부터 고려되어, 대량의 데이터를 고속으로 전송하는 광선로를 미리 확보하도록 설계되어야 한다. 네트워크 확장성은 장비 추가/제거의 수월성을 고려한 중앙집중식 토폴로지를 선택하였다.



<그림 3.1.11.66> Control Network Topology

원격 실험 환경에서 각 장치를 담당하는 전문가들과 일반 사용자에게 데이터를 제공할 때, EPICS 게이트웨이를 활용하면 트래픽 절감과 보안 강화에 유리하므로 PV 데이터를 효과적으로 관리하고 전송한다. 모든 데이터 전송 과정은 제어가 용이하도록 설계되어야 하며, 네트워크의 성능과 속도를 최적화하여 설계에 반영하는 것이 중요하다. 이러한 접근 방식은 원격 실험에 필요한 효율성과 신뢰성을 보장한다.

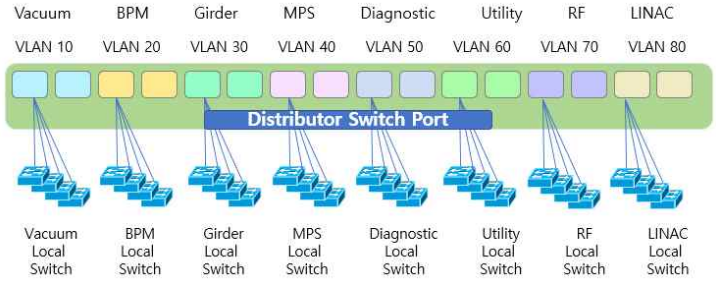
○ 장치 그룹별 VLAN 분류

각 장치는 VLAN (Virtual Local Area Network)을 활용하여 시스템을 구성한다. 장치별로 VLAN을 설정함으로써 이벤트마다 모든 노드에 전송되는 브로드캐스팅 트래픽을 최소화하고 성능과 효율성을 높일 수 있다. VLAN은 물리적으로 분산된 네트워크를 논리적으로 통합하여 중앙 집중화를 실현하도록 한다.

각 장치에 할당된 VLAN ID를 통해 서브 시스템을 구분할 수 있으며, 이를 위해

VLAN을 지원하는 네트워크 스위치를 사용해야 한다. 이렇게 VLAN ID로 구분된 장치들은 같은 스위치를 사용하더라도 독립된 네트워크를 구성할 수 있다. 이는 네트워크 관리의 효율성을 극대화한다.

VLAN이 구현된 시스템에서는 동일한 VLAN ID를 가진 장치들끼리 자유롭게 통신할 수 있으며, 다른 VLAN에 속한 장치 사이의 통신은 메인 백본 라우터를 통해 이루어진다. 이를 통해 네트워크 트래픽이 효과적으로 분리되고 관리된다. 그리고 장치별로 독립된 VLAN을 구성함으로써, 서브 시스템 간의 보안을 강화할 수 있다. 이는 네트워크의 효율성과 안전성을 크게 향상하는 요소로 작용한다. VLAN을 적절히 활용함으로써 네트워크의 성능, 효율성, 보안 및 관리 등 다양한 측면에서 전반적인 품질과 안정성을 높일 수 있다.



<그림 3.1.11.67> VLAN ID Allocation for Devices

○ 장치 IP address 체계

네트워크의 효율적인 운영을 위해 각 장치에 IP 주소를 체계적으로 할당할 필요가 있다. 이를 위해서 IP 주소 관리에 대한 원칙과 적절한 정책을 수립하여 운영해야 한다. 제어 네트워크에 연결되는 모든 단말기는 임의로 IP 주소를 할당하면 안 되며, 네트워크 관리자가 정한 일관된 절차에 따라 할당되어야 한다. IP 주소 관리를 효율적으로 수행하기 위해 관리 도구를 활용하는 것 또한 요구된다.

IPv4에서는 사설 IP 대역인 10.0.0.0 대역이나 172.16.0.0~172.31.255.255의 대역을 선택하여 사용할 수 있다. 대규모 제어시스템에서는 IP 주소를 직관적이고 효과적으로 할당하기 위해 Class A 사설 IP(10.0.0.0)를 활용하여 IP Address를 할당하여 사용한다. 각 장치 담당자에게 사설 IP 대역의 네트워크를 할당하고, 장치 순서에 따라 IP 주소를 부여한다.

다음은 IP Class A 주소 체계를 기반으로 장치별로 IP를 할당한 것이며 향후 공용 및 제어 네트워크 담당자와 협의를 통해 변경될 수 있다.

10.10.0.0 : public Network

10.100.0.0 ~ 10.199.0.0 : 가속장치 IP 할당 범위

10.101.0.0 : Vacuum

10.102.0.0 : BPM

10.103.0.0 : Girder

10.104.0.0 : MPS

10.105.0.0 : Diagnostic

10.106.0.0 : RF

10.107.0.0 : LINAC

10.108.0.0 : Utility

10.109.0.0 : Common

10.110.0.0 : etc

10.200.0.0~10.251.0.0 : Beamline 제어 장치 IP 할당 범위

○ Network 광케이블 구성

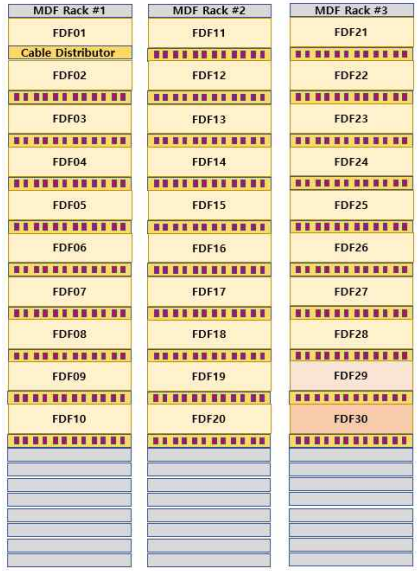
제어시스템 네트워크 인프라 구축을 위한 MDF 광케이블 및 MDF 랙 배치는 현장 제어시스템 랙과 상호 간섭을 피하고자 FDF 랙 위치를 조정하고, 연결의 효율성을 극대화하기 위해 각 Cell의 중앙에 Network 랙을 배치하는 것을 제안한다.

<그림 3.1.11.68>은 제어시스템 서버실의 MDF Rack layout을 보여준다. MDF 랙은 제어시스템의 네트워크 분기의 중심 허브로서 다양한 네트워크를 연결하고 집중화한다.

현장 FDF 랙 및 광케이블 설치는 SR Control SHED, RF, LINAC 등 30곳에 분산된 FDF 랙이 설치되며 광케이블을 통하여 서버실의 MDF로 집중된다. 건설 인프라에서 광케이블 끝 처리를 할 것이며, 제어에서는 광 매체를 통해 스위치에 연결된다.

광케이블의 직진성을 고려하여 케이블 이동 공간을 확보하고, 랙의 하단은 광케이블 이동 통로로 비워 둘 필요가 있다.

각 cell 별로 48 Core 광케이블의 용도는 듀얼 시스템으로 구성하여 송수신용으로 사용하며, 다른 용도로는 시스템의 제어 신호를 전송에 활용할 수 있다. 각 cell의 48 Core 광케이블은 Data Network뿐만 아니라 독립적인 네트워크 MIS, BPM 고용량 Data, FOFB, Timing Network 등에 활용이 가능하다.



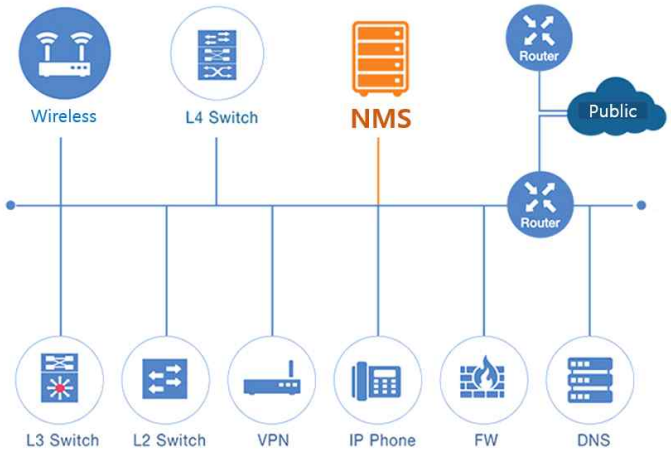
<그림 3.1.11.68> MDF Rack Layout

○ Network의 안정적 유지

네트워크 관리 시스템(Network Management System, NMS)은 네트워크 운영에서 핵심적인 역할을 담당한다. 특히 대규모 네트워크 환경에서 NMS의 중요성은 더욱 드러난다. 대규모 네트워크는 다양한 장비와 복잡한 구조로 되어 있으므로 직접적인 관리에 상당한 어려움이 따른다. 이러한 환경에서 NMS는 네트워크의 효율적인 관리와 운영을 가능하게 하며, 잠재적인 문제를 신속하게 진단하고 해결하는 데 중요한 역할을 한다.

NMS는 네트워크 장비의 상태, 트래픽, 고장 발생 여부 등 다양한 정보를 실시간으로 모니터링하고, 이를 바탕으로 네트워크 성능을 최적화한다. 또한, 네트워크의 보안을 강화하고, 장애 발생 시 즉각적인 대응을 가능하게 함으로써 네트워크의 안정성을 유지하는 데 필수적이다. 따라서 대규모 네트워크 환경에서 NMS의 도입은 네트워크의 효율적인 관리와 안정적인 운영을 위한 필수 요소이다.

NMS는 보안 관리, 대역폭 관리, 성능 분석 등 다양한 기능을 제공하여 네트워크 운영을 효율적으로 지원해야 한다. 첫째, 네트워크 장비들의 동작 상태를 실시간으로 모니터링하고, 상태를 정량적으로 수집하여 예측 분석을 제공한다. 둘째, 장애를 감지하고 경보를 발생시켜 관리자에게 알림을 줌으로써 신속한 대응을 가능하며 셋째, 네트워크 구성 정보의 변경 사항을 추적하여 구성의 일관성을 유지하도록 보고서로 제공되어야 한다. 따라서, NMS는 제어망에서 네트워크 운영을 지원하고, 안정성과 효율성을 향상하는 데 필수적인 역할을 수행한다.



<그림 3.1.11.69> NMS Management Environment

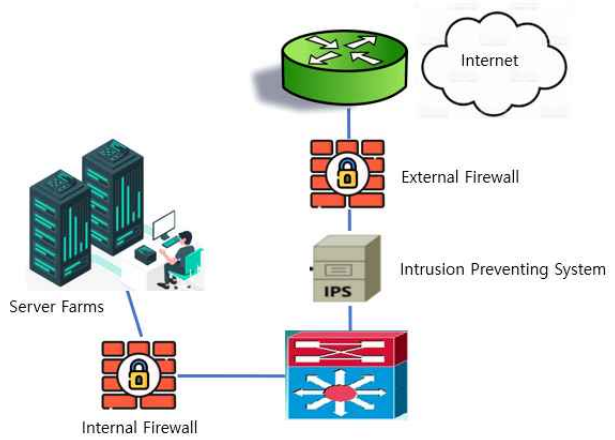
○ Network 보안

가속기 제어시스템은 국가 보안 시설로 원칙적으로는 외부 연결을 불허하는 정책을 설정해야 한다. 유사시 외부 인터넷으로부터 분리하여 해커의 공격이나 악의적인 접근을 차단하고 독립적인 빔 운전이 가능하게 한다. 네트워크 보안의 궁극적인 목적은 다양한 디바이스들에 대한 보호를 제공하고, 잠재적인 위협으로부터 네트워크를 안전하게 유지하는 역할을 한다.

보안 강화는 외부로부터의 침입, 데이터 유출, 악성 코드 감염 등의 위험에 노출을 최소화하고 기관의 중요한 정보와 데이터가 보호하는 것을 목적으로 한다.

따라서 가속기 제어망은 네트워크 보안을 강화하고 적절한 보안 정책과 방어 메커니즘 구축하여야 한다. 방화벽 장비에서 IP 및 프로토콜 관리와 IPS 장비를 활용한 유해 트래픽을 자동으로 차단하는 등 허가된 트래픽과 비 허가된 트래픽에 대하여 관리가 필요하다. 이러한 보안 기술과 절차를 도입하여 네트워크를 안전하게 유지해야 하는 것이 필수적으로 요구된다.

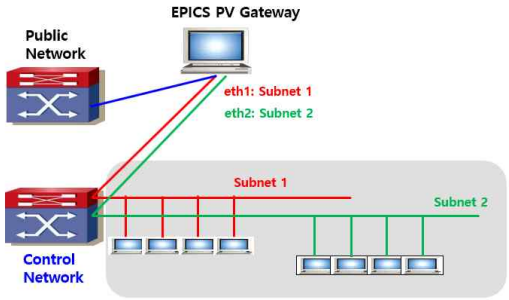
4GSR 가속기 제어망은 폐쇄망으로 운영되며, 폐쇄망 환경에서는 원격 실험, 개발, 디버깅, 업데이트 등을 진행하는 것은 일반적인 네트워크보다 더 많은 제약과 보안이 요구된다. 폐쇄망은 외부 공격으로부터 보호받지만, 동시에 외부 자원과의 상호작용도 제한된다. 폐쇄망 환경에서 수동 작업을 최소화하고 효율성을 높이기 위해 중앙제어시스템에서는 격리 네트워크 구역을 이용하거나, 관리시스템을 구축하는 방안을 고려하고 있다. 폐쇄망 환경에서 보안정책으로 인해 외부와의 연결이 제한되므로 OS 패치 및 커널 패키지 업데이트를 자동화하는 것이 중요하다. 커널 패키지의 경우, 중앙 관리시스템에서 자동 업데이트 기능을 제공하고 격리된 테스트 환경에서 검증하여 수행한다. 검증이 완료되면 운영환경에 자동으로 업데이트를 배포한다. 이러한 폐쇄망 환경에서 중앙 관리시스템을 구축하여 OS 패치, 소프트웨어 업데이트 등 자동화함으로써 시스템을 최신 상태로 유지하고 효율적으로 관리한다.



<그림 3.1.11.70> Network Security

○ EPICS PV Gateway

PV (Process Variable) Gateway는 다수의 클라이언트가 PV에 액세스할 수 있는 수단을 제공하는 EPICS CA (Channel Access) 서버이자 PV를 생성하는 IOC (Input/Output Controller) 서버 접속은 한 번만 연결되는 CA 클라이언트이다. 즉, PV Gateway는 다른 시스템이나 장치와 EPICS 시스템 간의 통신을 담당하는 중개자 역할을 한다. 이러한 Gateway 역할은 IOC 서버를 보호하는 동시에 IOC 장치의 PV에 대한 접근을 제한할 수 있으며, 여러 네트워크 카드가 있는 컴퓨터에서 실행되며 클라이언트와 서버는 서로 다른 서브넷에 있을 수 있다.



<그림 3.1.11.71> PV Gateway

EPICS PV Gateway는 다른 시스템과의 통신을 용이하게 하고, 데이터의 흐름을 효율적으로 관리하여 EPICS 시스템의 유연성과 확장성을 높여준다. PV Gateway를 통해 다양한 제어시스템과의 통합, 데이터 분석, 원격 모니터링 등을 통하여 다양하게 EPICS 시스템을 활용할 수 있다.

EPICS에서 새로 채택한 프로토콜인 PV Access는 신호 모니터링 및 과학 데이터 서비스 상호 연결을 위한 고성능 네트워크 통신 프로토콜로 기존 CA의 UDP 브로드캐스팅 방식 대신 IP 멀티캐스팅을 활용한다. PV Gateway를 이용한 멀티캐스팅 방식은 기존의 브로드캐스팅 방식보다 네트워크 자원을 효율적으로 사용하고 특정 그룹들에 데이터를 전달하는데 매우 유용한 방식으로, 특히 복잡한 네트워크에서 효과적으로 트래픽을 관리하고 전달하는데 중요한 역할을 한다.

PV Access는 로드 밸런서(Load Balancer)를 활용하여 클라이언트 요청을 적절하게 각 그룹으로 라우팅함으로써 네트워크 구간에 집중되는 트래픽을 분산시킨다. 이를 통해 네트워크 부하를 줄이고 전체적인 시스템 성능을 향상시킨다. 멀티캐스팅 기능을

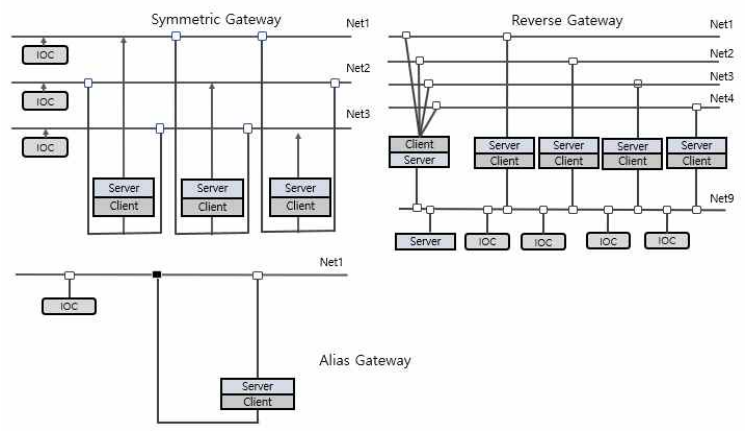
활용하면 PV 데이터의 전송 빈도 및 크기를 최적화하여 대역폭 사용을 최소화한다. 즉, 브로드캐스팅 방식에 비해 멀티캐스팅은 대역폭을 효율적으로 관리할 수 있다. 또한, 멀티캐스팅을 통해 실시간 제어 데이터와 같은 중요한 PV 데이터에 우선순위를 부여하여 안정적인 서비스를 제공한다. 네트워크 환경에서 핵심 데이터의 전송을 보장하고 전체적인 Qos (Quality of Service) 수준을 향상시킨다. 따라서, 네트워크 부하 분산, 대역폭 절약 등 다양한 방식을 통해 복잡한 네트워크 환경에서 효과적으로 트래픽을 관리할 수 있다.

EPICS Gateway version 2는 모든 표준 EPICS Base 3.14.6 이상에서 작동하며 이전 버전보다 성능과 기능이 많이 개선되었다. 즉 초당 수십만 개의 이벤트를 처리하면서 수만 개의 PV를 처리할 수 있다. 설정 파일에서 접근 보안 설정은 'gateway.pvlist' 파일에서 허용 또는 거부에 대한 PV 이름 패턴을 정의하고 'gateway.access' 파일은 접근 보안 규칙을 정의한다.

EPICS Gateway를 사용하는 데에는 세 가지 목적은 첫째, 다수의 Client가 하나의 PV에 액세스할 수 있게 하기 위하여, IOC 서버는 한 번의 연결만을 허용하도록 메커니즘을 제공한다. 둘째, 한 서브넷에서 다른 서브넷으로 PV를 액세스할 수 있도록 제공한다. 마지막으로 셋째로 IOC PV에 대한 접근 제한을 통하여 보안을 강화한다.

EPICS PV Gateway의 형태로는 대칭형, 역방향, 별칭의 3가지 게이트웨이가 있다. 대칭형 게이트웨이는 다른 두 개의 서브넷 또는 그 이상에서 하나의 PV를 찾는 데 사용되며, 역방향 게이트웨이는 다른 게이트웨이에서 내부 PV에 액세스하는 데 사용된다. 루프를 방지하기 위해 역방향 게이트웨이는 다른 하나의 게이트웨이와 자신의 내부 프로세스 변수만 허용하고, 다른 모든 게이트웨이 내부 PV를 거부해야 한다. 별칭 게이트웨이는 하나의 서브넷에서 PV의 별칭을 위해서만 사용된다.

PV 게이트웨이는 요약하면 PV 접속 시 IOC 성능에 미치는 영향을 최소화하고, 다수의 사용자에게 IOC PV에 대한 접근을 편리하게 제공하는 것을 목적으로 한다.



<그림 3.1.11.72> Architectures of EPICS PV Gateways

(2) 하드웨어 플랫폼

High performance를 위한 open hardware platform은 PC-104, COM EXPRESS, VME (Versa Module Europa), cPCI, ATCA (Advanced Telecommunications Computing Architecture), MicroTCA (Micro Telecommunications Computing Architecture) 순으로 지속적으로 변화해 왔으며 세대가 거듭됨에 따라 안정성과 성능이 비례해서 증가해왔다. 4GSR 제어시스템에서는 이 중 high performance 영역에 있는 TCA 계열의 플랫폼을 염두에 두고 개발을 진행하고 있다. 가장 최근에 나온 MicroTCA의 경우 2010년 PICMG (PCI Industrial Computer Manufacturers Group)에서 공식적으로 도입했다. MicroTCA는 기존에 사용되던 ATCA보다 공간적인 문제로 많은 I/O를 구성할 수는 없으나 에너지 효율이 높고 compact 하며, 경제적인 새로운 모듈형 컴퓨터 시스템이다. MicroTCA는 ATCA AMC (Advanced Mezzanine Card)의 많은 장점을 도입하고, 이전에 개발된 AMC 보드를 MicroTCA 시스템에서 사용할 수 있도록 재사용성을 염두에 두고 설계되었다. 입자가속기 제어시스템을 연구하는 고에너지 물리학 분야에서 MicroTCA.4를 신속하게 채택하여 과학계에서 사용되기 시작했고, 현재 많은 분야에서 사용되고 있다. MicroTCA.4는 까다로운 물리적 환경에 적합한, 보다 견고한 버전을 의미하며 하드웨어 플랫폼의 자체적인 버전관리를 통해 하드웨어 표준을 크게 확장하였다. 제어그룹에서 사용하고자 하는 TCA 계열의 하드웨어 플랫폼의 key benefit은 <표 3.1.11.25>에 나타내었다.

<표 3.1.11.25> MicroTCA Key Benefit and Feature

MicroTCA Key Benefit and Feature
Better signal quality than VME and CPCI
Better flexibility and scalability than VME and CPCI, addressing low cost, mid-range and high performance applications
Support for Rear Transition Module
Best mixture of state-of-the-art interfaces like PCIe, SRIO, Gbe, XAUI
Re-use of modules like IP (Industrial Pack), PMC and others
Carriers for XMC, FMC and other new modulestandards
Competitive with industrial PC technology and small form factors
Definition of different levels of ruggedization from “no” to “full”
Redundancy built into the standard, no longer proprietary
Built-in error detection, isolation and protection

(3) 주 운전실 설계

4GSR 주 운전실은 가속장치의 운영 및 빔 진단에 필요한 IT 및 네트워크 인프라가 구축된 종합관제상황실 역할을 한다. 주 운전실에서는 4GSR 가속장치와 관련한 모든 신호가 모니터링이 가능하고, 가속기를 구성하는 장치들을 제어할 수 있어야 한다.

○ 주 제어실 환경구성

주 제어실은 24시간 근무자가 가속기를 운영 및 관제하는 곳으로 인간공학적 환경에 초점을 맞추어 설계한다. 주 제어실은 운전원의 판단 능력을 저해하는 환경요소를 최소화하고, 작업능률, 편리성 및 쾌적성을 만족시킬 수 있는 환경이 제공되어야 한다.

① Display Wall

Display Wall을 보다 효율적으로 사용하기 위하여 하드웨어적인 비디오 매트릭스 스위치 또는 소프트웨어 방식의 화면전환 솔루션을 사용하여 Display Wall을 다양하고 유연하도록 시스템을 구축한다.

② Operator Interface

주 제어실에서 운전원이 가속장치를 운전상황을 모니터하고 제어하기 위한 Operator Interface PC 및 네트워크 구성을 진행해야 한다.

③ 서버실

4GSR 통합 제어시스템 서버실은 제어망의 백본 스위치 운영과 가속장치 운영을 통해 발생하는 데이터 저장하는 스토리지 시스템, 가속장치 운영을 위한 제어기들을

보관하는 장소이다. 제어 서버실은 접근 통제구역으로 특정인만이 출입 권한을 가진다. 4GSR 제어시스템 규모 산정을 위해 현재 운영중인 PLS-II의 EPICS 시스템 규모를 확인하고 4GSR 규모에 대입해 상대적인 시스템 규모를 산정했다.

<표 3.1.11.26> Summary of PLS-II EPICS system

Object	Count
Server EPICS	10
IOCs	about 350
Database	1
Process Variables (PV)	about 40,000
PV Archived	4,969
GUI Pannels	18

PLS-II의 저장링은 12 Cell을 가지는 가속기로 4GSR의 시스템 규모 산정을 위하여 28 Cell 가속기에 대입하는 경우 디지털 제어기의 발달로 인한 신호 수량 상승을 고려하여 PLS-II 대비 2.5배의 시스템 규모를 산정하였다. 4GSR 통합제어시스템의 IOC는 약 875개, PV의 수는 100,000개로 예상된다. 하지만 4GSR 가속기의 경우 가속기 규모와 복잡성이 I/O 수에 직접적인 영향을 미치며, 기술 발전에 따른 영향을 고려해야한다. 새로운 기술의 도입으로 더 정밀한 제어를 위해 추가적인 모니터링 시스템이 필요할 수 있다. 4GSR 가속기와 유사한 4세대 방사광가속기인 NSLS-II의 EPICS PV는 약 1,000,000개 이상, Sirius의 PV는 약 500,000 이상, ESRF-EBS의 PV는 1,500,000개 이상으로 많은 수의 IOC 및 PV를 충분히 핸들링하고, 차후 시스템의 업그레이드와 확장을 위해서 규모에 맞는 서버 시스템 구축을 고려해야 한다. 4GSR 제어시스템에서 최소 시스템 구축을 위한 서버들에 대한 산정은 <표 3.1.11.27>과 같다.

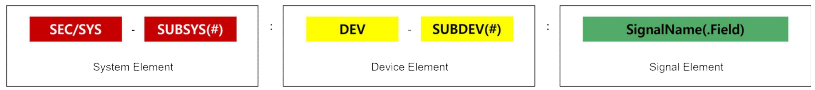
<표 3.1.11.27> 서버실 구성 시스템

서버	내용	수량	비고
Storage System	Centralized EPICS data storage - EPICS 제어 및 모니터링 데이터 - Expected signal : 50 k 이상 - Expected data rate : 20 TB/y - 9 months online-5 years archive-Older data on tape	1	- Useable 100 TB for 5year - Flash Disk
	Centralized experimental data storage (DAQ) - 빔 진단 및 실험 데이터 - BPM data rate (15.6 kHz) - BPM data rate (375 kHz) - 9 months online-1 monthsarchive-Older data on tape-미정	1	- Useable 120 TB for 1 months (15.6 kHz) - Useable 2 PB for 1 months (375 kHz)-Flash Disk
Backup Storage System	Data backup 정책에 따른 backup storage	1	- SATA Disk
CA Gateway	OPI 및 제어 네트워크 Channel Access connection 구성	6	- Workstation 급 - Failover
Archiver Appliance	EPICS PV signal archiving to storage system	2	- Useable 2 TB ram disk for Short Term Storage
WebOPI	EPICS 환경이 갖추어지지 않은 환경에서 EPICS 신호 모니터링 및 Web-based 실험정보 요약	2	- Server 급
EPICS Extension	Elasticsearch를 사용한 EPICS PV를 사용자가 쉽게 검색하기 위한 channel finder 및 기타 extension 관리용	8	- Server 급
Logbook	가속기 운영 상황이나 특이사항 등에 관한 기록을 위한 Log 작성	3	- Server 급
Alarm	EPICS 신호에 대한 Alarm Event 서버	3	- Workstation 급
EPICS IOCs	4GSR 가속장치 운영을 위한 SoftIOC 서버	12	- Server 급
Database	Archiver metadata 및 운영 관련 정보	2	- Server 급
Boot	가속장치 임베디드 장치 부팅 TFTP 서버	3	- Server 급
Control Development	프로그램 개발 및 테스트 서버	3	- Server 급
Device Monitoring	가속장치 감시 서버	3	- Server 급

(4) Naming Convention

4GSR 제어시스템의 명명 규칙은 전체 가속기를 제어하고 신호를 모니터하기 위한 신호 및 장치의 이름을 명명하는 규칙이다. 모든 하위 시스템에서 naming convention을 사용해 4GSR의 제어시스템을 체계화하고 통합하며, 효율적인 명명 규칙을 사용해 신호를 보고 어떤 신호인지, 어느 곳에 있는지, 어느 장치와 연관이 있는지 등에 대한 정보를 빠르게 인지할 수 있다. 모든 신호는 고유한 이름으로 명명해 혼란과 충돌을 방지해야 하며, 특히 EPICS 미들웨어 상에서 제어시스템 신호의 고유성은 엄격한 요구사항이다. 다목적 방사광 가속장치에서 사용할 아래의 naming convention은 그룹 간 협의를 통해 변경될 수 있다.

EPICS 기반 제어시스템에서 신호는 Process Variable (PV)로 표현되며, 명명 규칙을 통해 결정된 이름은 4GSR을 위한 UI, 소프트웨어, 데이터베이스 등 모든곳에서 사용된다.



<그림 3.1.11.73> 4GSR Naming Convention

<그림 3.1.11.73>은 고유한 신호의 이름을 부여하기 위한 3가지 Element(System, Device, Signal) 구성으로 이루어지며, 각 Element의 구분은 콜론(:)으로 한다. System 및 Device의 Element는 Sub-System 및 Sub-Device를 가질 수도 있다. 각 Element의 명명 규칙은 아래와 같다.

- SES/SYS : 구역 또는 시스템 명령
- SUBSYS : Sub-System 명명
- DEV : 디바이스 명명
- SUBDEV : Sub-Device 명명
- # : Sub- Device 넘버링 명명
- Signal Name : 신호이름 명명
- Filed : PV 명명
  (EPICS Record에서 명명되는 규칙으로 사용자가 정의 할 수 없음)

정의된 Naming Convention의 또 다른 중요성은 가속기 Lattice 별로 반복되는 시스템에 대한 소프트웨어의 재사용성을 극대화할 수 있다. Cell 1, Cell 2 등 구간별로 반복되는 Signal Name에 고유의 System 및 Device Name에 따라 고유한 신호가 명명되고, 이에 따른 I/O 신호를 구성하는 소프트웨어는 매크로 정의를 통해 구성된다.

① Naming Convention for Host Name

RACK##UNIT##SLOT##-DEVICE

Example

○ cr013456-PLC

- Control Rack : 1
- Unit : 34
- Slot : 56
- Device PLC

② Naming Convention for Cable

RACK##UNIT##PORT##-DEVICE

Example

○ cr010203-FDF

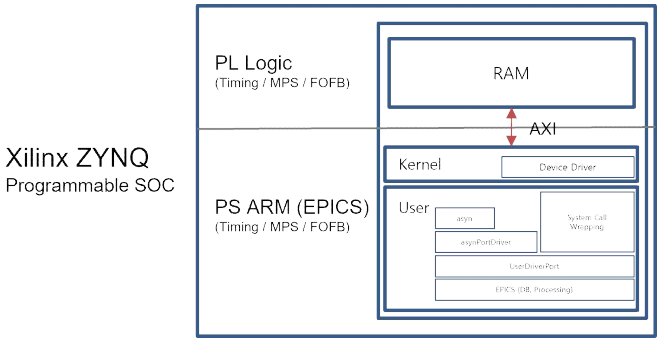
- Control Rack : 1
- Unit : 2
- Port : 3
- Device FDF



<그림 3.1.11.74> Cable Labeling

아. 핵심 제어시스템

통합 제어시스템의 핵심 제어시스템은 실시간 제어시스템에 대한 오버헤드 및 네트워크 지연에 대한 발생을 최소화하기 위해 FPGA를 사용한다. Xilinx 사의 ZYNQ SoC는 FPGA와 ARM 코어가 집적된 칩으로 FPGA 칩에 운영체제를 올려서 사용한다. 여기에 Linux 커널을 적재하기 위한 Petalinux를 사용하여 FPGA HDL로 개발 합성된 Bit Stream에서 기본적인 Linux Device Driver 코드를 생성할 수 있다.



<그림 3.1.11.75> ZYNQ SoC

고속 제어를 위한 SoC 개발은 PL (Programmable Logic) 영역 및 PS (Processing System) 영역으로 나뉜다. 이중 PS 영역에는 ARM CPU가 탑재되어 Linux 운영체제가 porting 되어야 하며, EPICS 미들웨어가 cross-compile 후 적용한다. PL 영역에서는 FPGA의 critical 한 logic이 수행되어야 한다. PS 영역은 현재 embedded 시스템에서 가장 많이 사용되고 있는 ARM 코어에 Linux 커널을 빌드한다. Linux 운영체제에 GNU 툴 체인을 사용하여, EPICS 미들웨어를 빌드하며, EPICS 미들웨어 빌드 후

EPICS 비동기 라이브러리를 표준화하고 FPGA 펌웨어와 시스템 콜을 통한 interface가 이루어져야 한다. Linux user space에서 kernel space 영역에 진입하는 FPGA와의 인터페이스 모듈이 개발되면, user space의 시스템 콜과 EPICS 비동기 라이브러리를 사용해 EPICS interface 모듈을 개발한다.

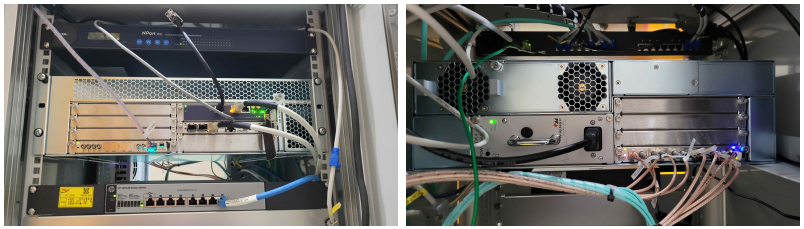
FPGA 기반 고속 제어시스템의 업데이트는 TFTP (Trivial File Transfer Protocol)를 활용하며, 펌웨어 및 설정 파일을 신속하고 효율적으로 전송할 수 있는 방법을 제공한다. 통합 제어시스템에서 TFTP 서버를 네트워크에 설치하고, 최신 펌웨어와 설정 파일을 서버에 업로드한 뒤, FPGA 컨트롤러의 네트워크 설정을 구성한다. 하위 FPGA에서는 프로세서나 임베디드(embedded) 소프트웨어를 통해 TFTP 클라이언트를 구현한다. FPGA 컨트롤러는 TFTP 서버에 연결하여 필요한 파일을 요청하고 수신하며, 수신한 파일의 무결성을 체크섬 등을 통해 검증하며, 검증된 파일은 FPGA에 로드되어 적용되어 필요 시 FPGA를 리부팅하여 새로운 펌웨어를 활성화한다. TFTP를 사용한 업데이트 방법은 단순하며, 빠른 전송 속도와 표준화된 지원을 통해 FPGA 기반 고속 제어시스템에서 신뢰성 있고 효율적인 업데이트를 가능하게 한다.

(1) Event Timing System

Event timing system은 시간에 따라 정확한 순서로 event를 조정하고 동기화하는 시스템을 말한다. 이 시스템은 4GSR 전반에 설치된 로컬 장치 간에 정밀한 타이밍을 제공하는 역할을 한다. 시스템 구성은 하나의 Event Master (EVM)와 다수의 Event Fanout (EVF) 그리고, 다수의 Event Receiver (EVR)로 구성되어, 각 로컬 장치들은 EVR로부터 event, 트리거 및 타임스탬프 정보를 받는다. 로컬 장치에게 제공되는 event timing 출력 신호는 TTL 신호 또는 광학 신호로 제공된다. 로컬 장치가 광학 신호로 event를 제공받을 경우 로컬 장치는 event 정보와 타임스탬프를 모두 수신할 수 있다. 다만, EVR이 로컬 장치에 내장되어 있어야 한다. EVR을 내장한 로컬 장치의 구성에 원활한 지원을 위해 Micro Research Finland (MRF)에서 개발한 프로토콜을 사용한다. 이 프로토콜을 사용함으로써 EVR FPGA IP 기능 및 상용 장비 내의 기능(예: I-Tech Libera Brilliance+ BPM)을 활용할 수 있게 된다.

Event system은 mTCA.4 form factor에 기반하여 인프라를 구성할 예정이다. <그림 3.1.11.76>은 mTCA.4 인프라를 이용하여 구성한 EVR의 예를 보여준다. 이러한 구성을 위하여 mTCA.4 form factor에 따라 설계된 CPU, MCH, Chassis, Power 등이 필요하다. 그리고 전체적인 시스템 구성을 위하여 광케이블 및 동축 케이블의 설치도

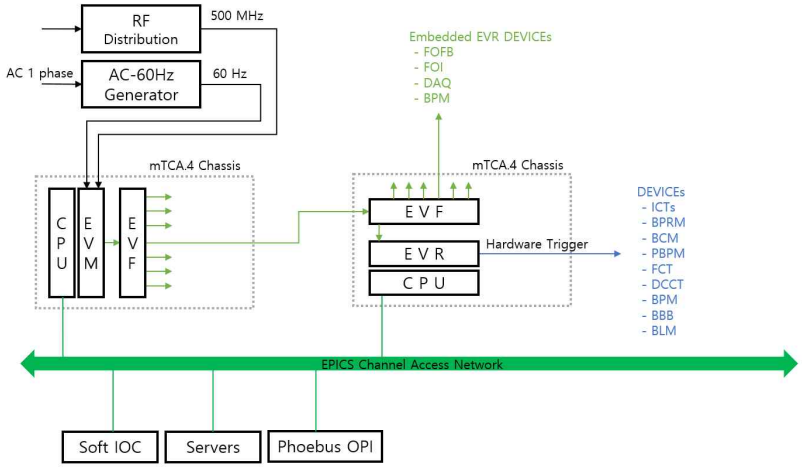
필요하다.



<그림 3.1.11.76> mTCA.4 인프라를 이용하여 구성한 event timing system 예시

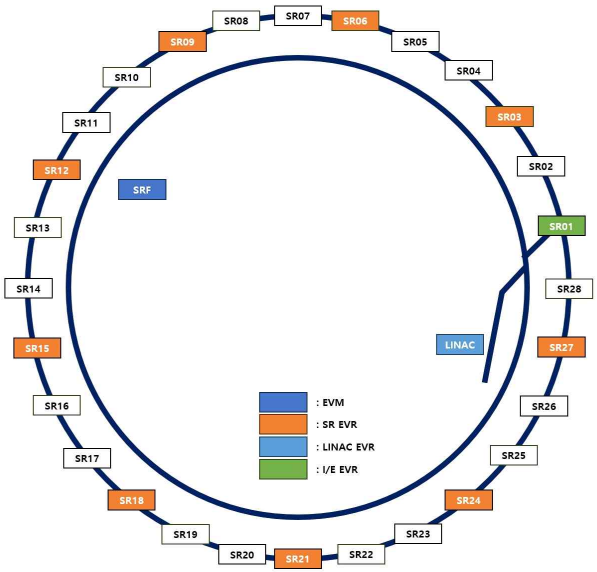
○ EVM, EVF 그리고 EVR 배치

Event timing system은 clock 동기로 작동한다. Clock 동기는 여러 EVR 간에 일어나는 event를 동기화하고, 데이터 통신과 제어 동작을 정확하게 조정함으로써 전체 시스템의 신뢰성과 정확성을 확보하는 데 중요한 역할을 한다. 이러한 clock 동기신호는 Master Oscillator로부터 제공받는다. 따라서 EVM은 Master Oscillator와 근접한 곳에 위치해야 한다. 또한 EVM은 Master Oscillator로부터 제공받는 RF clock과 AC 1상 신호를 동기시켜서 작동한다. AC 1상 신호에서 phase가 가장 안정적인 구간인 zero cross 지점을 기준으로 60 Hz를 생성하고, 이 신호를 EVM에 제공한다. AC 1상과 동기된 event는 EVF를 거쳐 다수의 EVR에 전송한다. 따라서 EVM이 위치한 mTCA에는 다수의 EVMF (Event Master's Fanout)가 설치되고 EVMF의 출력신호는 저장링에 설치된 여러 EVRF (Event Receiver's Fanout)들과 연결된다. <그림 3.1.11.70>은 EVM의 구성 및 EVR을 내장한 로컬장치들과 mTCA.4로 구성된 EVR들이 EVRF와 연결되는 구조를 나타내는 상세 구성도를 나타낸다. EVR을 내장한 장치들은 event를 받아서 자체적으로 트리거 기능을 구현하고, EVR을 내장하지 않은 장치들은 mTCA.4에서 출력되는 하드웨어 트리거 신호를 제공받는다.



<그림 3.1.11.77> Event Timing System 상세 구성도

mTCA.4 chassis 한 대당 EVR 및 EVF 모듈은 한 개 또는 그 이상 설치하여 mTCA.4 chassis의 과잉 설치를 줄여 불필요한 요소나 비용을 줄이고, 트리거 출력 신호 케이블의 길이가 증가함에 따라 발생하는 전송 손실과 리플랙션 현상에 대한 영향을 예방할 수 있도록 적절히 배치해야 한다. 이에 맞게 케이블은 낮은 손실과 뛰어난 신호 품질을 제공하는 제품을 선정해야 한다. LINAC은 전체 길이가 50 m로 LINAC 가운데에 LINAC EVR을 1 set 설치하여 E-gun으로부터 LINAC kicker까지 신호를 제공한다. SR은 총 28개의 cell이 있고 셀당 길이가 28 m이다. 저장링 3 cell 간격으로 EVR을 가운데 설치하여 좌, 우 cell에 신호를 제공한다. 따라서 SR에는 총 9 set의 mTCA.4 chassis가 위치한다. SR의 남은 한 cell은 LTB와 BTS가 만나는 지점으로 해당 구역에 I/E EVR (Injection/Extraction EVR)을 1 set 설치한다. <그림 3.1.11.78>은 Event timing system의 전체 배치도를 나타낸다.



<그림 3.1.11.78> Event Timing System 전체 배치도

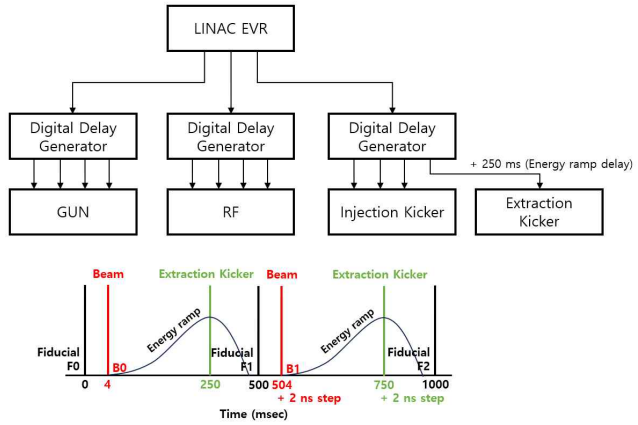
○ Event 종류와 Timing

LINAC & KICKER: 빔 운전 반복률에 맞춰서 LINAC 구간의 모든 장치에 2 Hz 트리거 신호를 제공한다. Klystron은 효율적인 동작을 위해 AC 전압이 가장 높은 값을 가지는 구간에서 동작하여야 한다. 그리하여 빔 발생은 시점은 AC 60 Hz zero cross 기준으로부터 약 4 ms의 지연이 필요하다. 생성된 빔은 부스터를 거쳐 저장링의 버켓으로 들어간다. 이때, RF 주파수에 맞춰 delay를 조정하여 번치를 원하는 버켓에 잘 넣는 것은 가속기 운영에서 중요한 단계이고, event timing system의 중요한 역할 중 하나이다. Delay 해상도는 저장링의 버켓 간 간격에 맞춰 2 ns가 요구되며, 이를 구현하기 위해서 정밀 디지털 delay 생성기인 DG645를 이용한다. DG645의 네 개의 출력신호를 이용하여 injection 및 extraction kicker에게 트리거를 제공한다. Event timing system은 LINAC EVR은 DG645에게 timing 신호를 제공하고, 버켓 주입 패턴을 디자인이 가능한 소프트웨어 툴을 제공한다.

부스터 & 저장링: LINAC에서 발생된 200 MeV의 에너지를 가진 빔은 부스터에서 빔 에너지 4 GeV가 되도록 램핑한다. Ramp-up 시간은 약 250 ms로 예상하며, Ramp-up이 완료되면 extraction timing을 발생하여 저장링 버켓에 빔을 주입한다.

저장링 내에서 한 바퀴를 도는 데 걸리는 시간인 revolution clock은 저장링의 높은 에너지와 안정성을 유지하기 위해 정확한 타이밍을 요구한다. Event timing system은 부스터 및 저장링에 각 하모닉 넘버에 맞게 revolution clock 타이밍(부스터: 387.88 kHz, 저장링: 375.07 kHz)을 제공한다. 또한 데이터 수집 및 실험 제어를 위하여 10 Hz 타이밍을 제공한다.

<그림 3.1.11.79>는 2 ns step으로 빔을 버킷에 넣기 위한 구성도와 타임라인을 나타낸다. LINAC EVR은 각 정밀 delay 생성기에 타이밍 신호를 제공하고 정밀 delay 생성기는 버켓 주입 패턴에 맞춰 LINAC delay를 조절하고, Extraction Kicker 용 출력신호는 에너지 램핑 시간만큼 delay를 추가한다. 이와 같은 형식으로 2 Hz 주기로 생성되는 빔은 각기 다른 버켓에 주입할 수 있다. GUN 및 RF는 각기 다른 event 코드를 가져 빔과 별도의 운전을 가능해지게 해야 하고, 에너지 램핑 delay는 Extraction Kicker와 연결된 정밀 delay 생성기에서 조정한다.



<그림 3.1.11.79> LINAC EVR 구성도 및 Injection / Extraction timeline

4GSR의 Timing system은 Micro Research Finland (MRF) 제품으로 채택하였다. 많은 가속기 시설에서 MRF 제품을 사용하고 있으며, 노후화된 VME 플랫폼을 더 우수한 사양 및 성능의 mTCA 플랫폼으로 결정하였다. mTCA 플랫폼을 사용하여 소프트웨어 개발 및 시스템 통합을 지원하고 EVR 펌웨어의 출력 신호 지연을 정밀하게 조정할 수 있다. 정확한 지연 제어가 가능하도록 UNIV-TTL-DLY 모듈을 활용하여 시스템의 클럭 및 타이밍 관리를 최적화할 수 있다. 또한, 광케이블을 통한 신호 전송 시, 광케이블의 길이 편차 또는 온도 변화에 따라 Delay Drift가 발생한다.

이를 보상하기 위해 EVM에서 로컬 장치까지 이벤트가 왕복하는 지연 시간을 조절하는 방식인 미세 조정 기능이 필요하게 된다. Delay Drift를 측정하고 보상하는 Delay Compensation 기능을 사용하려면 EVM 및 로컬 장치를 연결하는 팬아웃에도 지연 보상 기능이 필요하여 팬아웃 모듈 개발을 고려하고 있다.

기존의 mTCA 기반 팬아웃 모듈은 SFP 트랜시버 포트가 7개만 있고 새롭게 만들 타이밍시스템에는 EVR이 내장되어 있어 많은 포트가 필요하기 때문에 사용하는 데 있어 효율적이지 않다. 따라서, 팬아웃 모듈은 Timing system에 구조 및 비용 측면에서 유리하지 않으므로 mTCA 기반 또는 독립형 팬아웃 모듈을 자체 개발도 고려하고 있다.

(2) Fast Orbit Feedback System

FOFB (Fast Orbit FeedBack) 시스템은 저장링의 전자빔에 영향을 주는 노이즈나 진동을 효과적으로 감쇄하여 안정적인 빔 궤도를 유지하는 역할을 수행한다. 다목적 방사광 가속장치의 저장링은 총 28개의 구역(Cell)이 있으며 각 구역에는 BPM (Beam Position Monitor) 10개와 Corrector 10개가 설치되어 있다. FOFB 시스템은 한 구역에서 slow BPM 2개를 제외한 8개의 BPM과 4개의 corrector (수직, 수평)를 사용한다.

FOFB 시스템은 저장링의 노이즈와 진동을 실시간으로 빠르게 감쇄하는 것이 목적이므로 이를 달성하기 위하여 FPGA (Field-Programmable Gate Array)를 활용한 펌웨어 기반의 저지연 시스템을 구축하여 고성능 병렬처리를 사용하여 그 목표를 달성해야 한다.

안정적인 시스템 운영을 위해 전용 네트워크를 설계한다. 이 네트워크는 데이터의 안정적인 송수신을 보장하고 오류를 최소화하는 데 중점을 둔다. Redundancy와 신뢰성을 갖춘 통신 링크를 구성하여 데이터 손실을 최대한 줄이고 실시간으로 처리가 가능하도록 네트워크를 구성하였다.

○ 하드웨어

FOFB 시스템은 고속의 계산 성능과 안정성을 요구하는 중요한 시스템이다. 이 시스템은 FPGA 기술을 활용하여 구현되며 MPSoC (Multi-Processor System on Chip) architecture를 사용한다. MPSoC는 PS (Processing System)와 PL (Programmable Logic)로 나누어져 있으며 각 컨트롤러는 이 구성을 효과적으로 활용하여 시스템을 구성한다.

PS 영역은 Linux 시스템과 EPICS IOC (Input/Output Controller)를 실행할 수 있도록 설계되었다. 이 부분은 높은 수준으로 시스템을 관리하고 통신할 수 있는 역할을 담당하며 안정성 있는 운영체제 및 EPICS IOC를 통해 사용자의 명령을 처리할 수 있도록 상호작용한다. PL 영역은 컨트롤러의 핵심 기능을 담당하며 데이터 계산과 처리를 위한 펌웨어가 실행되며 실시간으로 작동한다.

PS와 PL의 통신은 AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture) BUS를 사용하며 통신을 위한 인터페이스는 GP (General purpose port), HP (High performance port) 그리고 ACP (Accelerator coherency port)를 목적에 맞게 설계에 적용한다. GP 포트는 일반 목적의 데이터 전송을 위한 인터페이스로 사용되므로 다양한 데이터를 송수신할 수 있다. HP 포트는 고성능 데이터 전송을 위한 인터페이스로 사용되며 높은 대역폭과 낮은 지연시간을 제공한다. ACP 포트는 펌웨어와 메모리 간 데이터 일관성(Coherency)을 관리하기 위하여 사용한다.

PL 내부에 사용할 주요 통신 프로토콜은 AXI (Advanced eXtensible Interface)와 AXIS (AXI Stream)을 사용한다. AXI 프로토콜은 대용량 데이터 전송에 적합한 프로토콜로 메모리 주소 기반의 burst mode로 데이터를 송수신한다. 이것은 BRAM (Block Random Access Memory) 및 DDR RAM (Double Data Rate Random Access Memory)과 같은 대용량 데이터 전송에 적합하므로 response matrix와 같은 데이터 전송에 사용한다. AXIS 프로토콜은 스트리밍 데이터 처리에 적합한 프로토콜로 Tready, Tdata, Tvalid의 채널을 사용하며 데이터를 스트리밍한다. 이것은 실시간 연산 처리에 사용하며 FPGA 로직 내부 통신에도 사용할 수 있으므로 FOFB 컨트롤러의 지연시간을 최대한 줄이는 목적으로 적합하다.

대용량 또는 저지연 통신을 위하여 SFP+포트를 적용하여 최대 16 Gb/s의 대역폭을 처리할 수 있는 성능을 가진다. BPM electronics와의 데이터 통신은 optical 매체를 통한 serial 통신을 지원한다. 그리고 Fast MPS와의 통신은 기가비트의 고속통신을 지원한다. RJ45 포트는 PS 영역의 linux 운영체제에서 단독으로 EPICS IOC 통신 처리를 할 수 있도록 한다.

이러한 구조와 프로토콜은 FOFB 컨트롤러의 안정성과 성능을 보장하기 위해 설계에 반영하였다. 신뢰성 있는 데이터 처리와 실시간 처리에 효과적으로 작동할 수 있는

시스템을 만들어 준다.

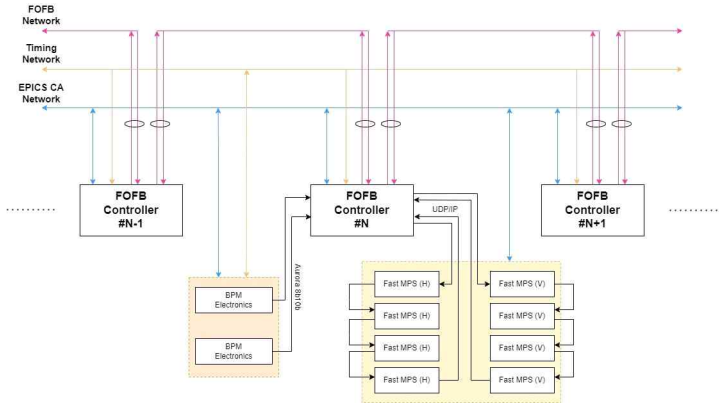
○ FOFB 시스템 네트워크

FOFB 시스템에 사용할 제어 네트워크는 각 컨트롤러에 효과적으로 연결하기 위해 3개의 주요 네트워크로 구성되어 있다.

FOFB 전용 네트워크는 컨트롤러들이 빔 위치정보 및 상태 정보를 송수신 목적으로 사용된다. 이 데이터 통신은 빠르고 안정적인 광섬유 통신을 사용하여 고속통신을 지원해야 하며 하위 네트워크로 BPM electronics와 Fast MPS와의 연결을 가능하게 한다.

Event timing 네트워크는 FOFB 컨트롤러 동기화를 위한 네트워크이다. 타이밍 정보와 트리거 정보를 수신하여 모든 FOFB 컨트롤러 간에 정밀한 동기화를 가능하게 한다.

EPICS CA 네트워크는 시스템의 제어 및 모니터링을 위한 EPICS 네트워크이다. 컨트롤러 제어를 담당하고 사용자 인터페이스와 상호 작용을 위한 환경을 구성할 수 있도록 한다.



<그림 3.1.11.80> FOFB 시스템 네트워크 구성도

① FOFB 네트워크

FOFB Network는 컨트롤러 간의 데이터 전송 안정성을 위하여 독립된 원형 네트워크 구조를 사용한다. FOFB 컨트롤러는 FOFB network를 위해 2개의 SFP+포트를 사용한다. 각 포트는 LC 타입의 Multimode 광섬유 케이블을 사용하며 LC 커넥터는 송신과 수신 각각 1개의 광섬유 코어를 포함한다. 따라서 각 LC 커넥터는 2개의 광섬유 코어를 가지고 있고 이를 통해 이중 송수신 통신이 가능하다. 광섬유 케이블은 데이터의 안정적이고 고속의 광 통신을 지원하며 FOFB 시스템의 데이터 전송 요구사항을 충족시킨다. LC 타입의 커넥터는 작은 크기와 높은 성능을 제공하며 광섬유 네트워크의 신뢰성과 성능을 유지한다.

저장링에 위치한 다른 FOFB 컨트롤러로부터 수신된 빔 위치 측정값을 전송한다. 이러한 작업을 통해 모든 컨트롤러 간에 28개 구역의 빔 위치 측정값을 공유한다.

② Timing 네트워크

FOFB 컨트롤러는 저장링 28개 구역에 분산 배치되어 있으며 Master-Slave 구조를 채택하지 않기 때문에 전체 시스템 내에서 전역 동기화가 필수적이다. 이를 위해 Event timing system으로부터 동기화에 필요한 여러 정보를 수신한다. 이 정보는 revolution clock, trigger 그리고 timestamp가 포함되어 있다.

전역 동기화를 달성하기 위해서는 각 컨트롤러에 신뢰성 있는 통신을 제공하는 전용 Event timing network가 필요하다. 이 네트워크를 통해 각 FOFB 컨트롤러는 정확한 타이밍 정보를 사용하여 동기화를 유지할 수 있다.

이 목적을 달성하기 위해 embedded EVR (Event Receiver) 기능을 구현한다. 이 기능은 컨트롤러가 정확한 시간에 동기화를 맞출 수 있도록 한다.

③ EPICS 네트워크

EPICS 네트워크는 FOFB 컨트롤러에서 제어를 위하여 EPICS IOC를 구동한다. FOFB 전용 네트워크와 다르게 사용자가 명령을 주거나 측정된 데이터를 확인하는 모니터링 용도로 EPICS 네트워크를 통해 데이터를 송수신한다.

④ BPM electronics 통신

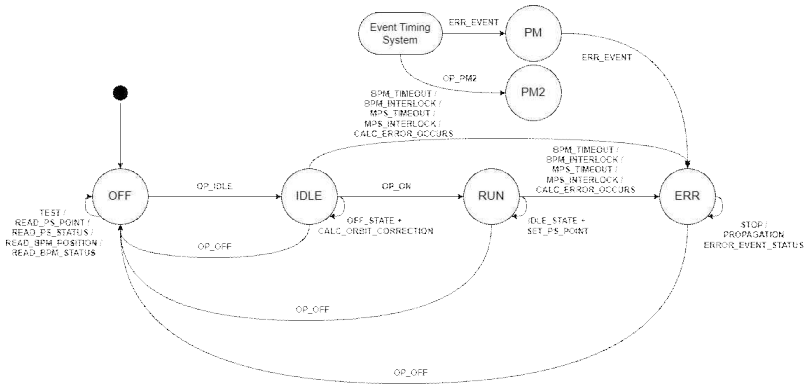
BPM electronics는 FOFB network와 같은 multimode 광섬유 케이블을 사용하여 빔 위치 측정값을 FOFB 컨트롤러에게 serial 통신으로 전송한다. FOFB 컨트롤러는 SFP+포트 2개를 할당하여 4개의 BPM으로부터 빔 위치 측정값을 1개의 포트로 수신받는다.

⑤ Fast MPS 통신

Fast MPS는 Ethernet 프로토콜을 사용하는 UDP/IP 프로토콜을 기반으로 설계하였다. UDP/IP 프로토콜은 높은 성능과 안정적인 통신을 지원하기 때문에 전원장치에 적절한 선택이 된다. 그리고 저지연을 위해서 8 b/10 b 또는 64 b/66 b 프로토콜을 사용할 수 있다. Fast MPS는 저장링의 각 구역에 수평 방향으로 4개, 수직 방향으로 4개의 전원장치가 배치된다. 이 장치는 daisy chain으로 연결되어 데이터 전송 및 효율성을 높일 수 있다. 그러므로 FOFB 컨트롤러와 Fast MPS 사이에 안정적인 통신을 지원할 수 있도록 한다.

(3) FOFB 컨트롤러 상태전이도

FOFB 컨트롤러는 시스템이 정확하게 작동하고 의도되지 않은 예외 상황을 방지하기 위해 <그림 3.1.11.81>과 같은 6가지 상태와 상태 전이를 가지며 이러한 상태 전이를 엄격하게 관리하여 시스템의 안정성을 확보한다.



<그림 3.1.11.81> FOFB 컨트롤러 상태전이도

① OFF 모드

OFF 모드는 여러 목적으로 사용할 수 있도록 시험 모드를 작동할 수 있게 하였다. 그 외에 Fast MPS의 status와 read point를 지속적으로 수신할 수 있도록 하여 Fast MPS의 오작동 여부를 확인할 수 있도록 하였다. 그리고 BPM electronics 또한 Fast MPS와 마찬가지로 상태 및 현재 빔 위치정보를 FOFB 컨트롤러가 지속적으로 수신하여 FOFB 시스템이 작동하기 전 주변장치에 대한 정보를 파악할 수 있도록 대기

상태로 둔다.

② IDLE 모드

IDLE 모드에서는 OFF 모드에서 작동하는 작업과 함께 빔 위치 측정 정보를 활용하여 orbit correction까지 점검하는 단계이다. 이 모드에서는 전체적으로 FOFB 시스템을 작동할 수 있는지를 확인하는 목적으로 BPM electronics와 FOFB 컨트롤러의 전역 동기화 상태를 점검하고 orbit correction 값이 정상적으로 계산되어 Fast MPS의 set point 값을 확인할 수 있는 단계를 확인할 수 있도록 한다. 이 과정에서 계산 오류나 타 장치의 Interlock 등 에러를 발생하거나 수신하게 되면 ERR 모드로 전환하게 된다.

③ RUN 모드

RUN 모드는 OFF 모드와 IDLE 모드의 기능 및 작업과 함께 Fast MPS로 계산 결과인 set point를 전송하는 단계로 FOFB 시스템이 정상적으로 작동하는 상황으로 상태를 전이한다. Feedback이 정상적으로 작동하는 단계이므로 이때 발생하는 각종 연산 에러나 타 장치의 상태 정보를 확인하게 된다.

④ ERR 모드

ERR 모드는 계산 결과의 오류나 타 장치의 오류를 수신하는 경우 feedback 작동이 중지하게 된다. 이때 모든 FOFB 컨트롤러는 FOFB network를 통해 ERR 모드에 진입한 상태의 컨트롤러 정보를 수신받으므로 모두 ERR 모드로 진입하게 된다. 오류 발생 정보는 EPICS network를 통해 사용자가 원인을 파악할 수 있도록 제어 데이터를 제공한다.

⑤ PM (Postmorterm) 모드

PM 모드는 Event timing system으로부터 PM event 코드를 수신받는 경우 ERR 모드 상태로 전이되도록 한다. PM은 FOFB 시스템이 아닌 외부에서 발생하는 Interlock 신호로 빔 덤프와 같은 event에 대응한다. 이 경우 FOFB 컨트롤러는 feedback을 수행하는 동안 원인 파악을 위해 PM에 관련된 데이터를 컨트롤러에 저장하므로 PM event를 수신하는 경우 빔 위치나 correction 정보와 같은 정보를 EPICS network를 통해 확인할 수 있도록 한다.

⑥ PM2 모드

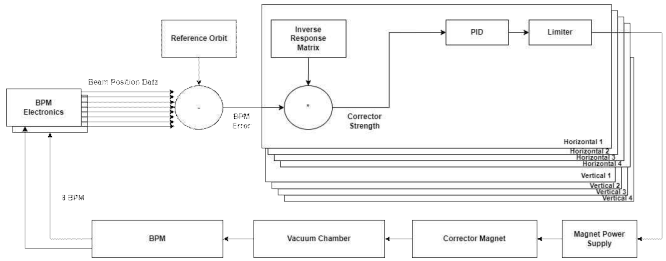
PM2 모드는 사용자가 PM buffer의 데이터 확인을 원할 때 Event timing

system으로부터 event를 발생시킨다. PM2는 ERR 모드로 진입하지 않고 buffer에 쌓인 데이터를 확인하는 용도로 사용하며 feedback은 지속적으로 수행할 수 있다.

(4) FOFB 계산

FOFB 계산은 실시간 처리 요구사항을 충족해야 하며 지연을 최소화하기 위해 병렬처리 방법을 사용한다. 또한, 펌웨어에서 내부 jitter나 불명확한 상황과 같은 추가 지연을 대비하여 목표 시간의 약 10~15% 정도 여유를 확보해야 한다.

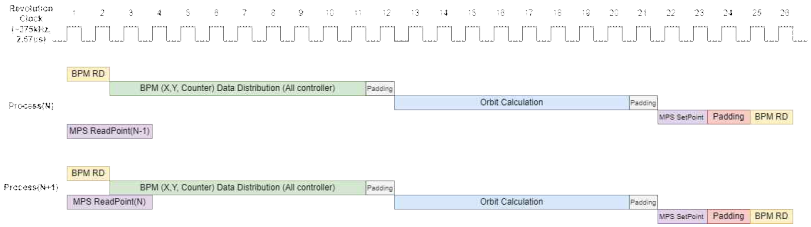
계산의 첫 번째 단계에서는 BPM electronics에서 얻은 빔 위치정보 데이터를 처리하여 빔의 위치를 확인하여 그 오차인 BPM error를 얻는다. 두 번째 단계에서 BPM error 값과 IRM (Inverse Response Matrix)과의 연산을 통해 corrector strength를 계산한다. 마지막 단계에서 corrector strength를 디지털필터 및 PID (Proportional -Integral-Derivative) 제어 알고리즘을 적용하여 데이터를 얻은 후 limiter를 통해 최소 최대 전류값을 확인하여 최종적으로 Fast MPS에 전송할 set point 값을 얻은 후 빔 위치를 제어한다.



<그림 3.1.11.82> FOFB Feedback

(5) FOFB 계산

FOFB는 가속기의 revolution clock인 375 kHz로 작동하며, FOFB의 모든 task는 22 clock 안에 동작하는 것을 목표로 하고 있다. 15.6 kHz(약 64 μs)의 repetition rate를 충족시키기 위해 22 clock (약 56 μs) 내에 FOFB의 모든 task가 종료되어야 한다.



<그림 3.1.11.83> FOFB Time Diagram

FOFB의 동작은 위 <그림 3.1.11.83>과 같이 표현되며, 각 테스크의 데이터 처리 절차는 아래와 같다.

① BPM 데이터 읽기 (BPM RD)

Clock 신호의 첫 번째 상승 에지(Clock N)에서 BPM 데이터 읽기(BPM RD) 단계가 시작된다. 이 시점에서 시스템은 X, Y 좌표와 카운터 값을 포함한 BPM 데이터를 수집한다.

② BPM 데이터 배포 (BPM (X,Y, Counter) Data Distribution)

BPM 데이터가 수집된 후, 데이터 배포가 시작된다. 모든 컨트롤러는 최신 BPM 데이터를 수신하여 동기화한다.

③ 패딩 (Padding)

데이터 배포 후, 시스템은 몇 clock 주기 동안 패딩 시간을 가진다. 패딩 시간은 데이터 처리 사이의 지연을 반영하며, 시스템이 안정적으로 다음 단계로 넘어갈 수 있도록 한다. 패딩 시간은 시스템의 요구사항에 따라 조절될 수 있으며, 이는 클럭 주기를 기준으로 측정된다.

④ 궤도 계산 (Orbit Calculation)

패딩 시간이 끝나면, 궤도 계산이 시작된다. 궤도 계산은 수집된 BPM 데이터를 바탕으로 피드백을 위한 MPS의 적절한 setting 값을 실시간으로 계산한다.

⑤ 패딩 (Padding)

계산이 완료된 후, 다시 몇 clock 주기 동안 패딩 시간이 있다. 이는 궤도 계산과 다음 단계 사이의 지연을 고려한 것이다.

⑥ MPS 설정점 (MPS SetPoint)

패딩 시간 후, 다음 클럭 신호의 상승 에지에서 MPS (Magnet Power Supply) 설정점이 조정된다. 이는 계산된 값을 바탕으로 MPS의 설정점을 동기화한다.

⑦ 패딩 (Padding)

MPS 설정점 조정 후 다시 몇 clock 주기 동안 패딩 시간이 있다. 이는 설정점 조정과 다음 단계 사이의 지연을 고려한 것이다.

⑨ BPM 데이터 읽기 (BPM RD)

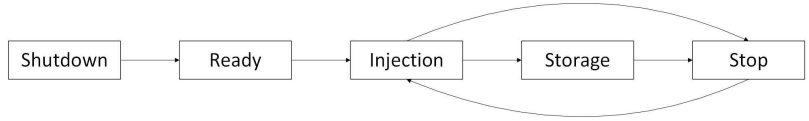
마지막으로 시스템은 다음 clock 신호(Clock N+1)의 상승 에지에서 다시 BPM 데이터를 읽어온다. 이후는 첫 번째 BPM RD 단계와 동일하게 수행된다. 이 단계는 주기적으로 반복되어 시스템의 지속적인 데이터 수집을 보장한다.

자. Machine Protection System

(1) Machine Interlock System

MIS (Machine Interlock System)는 가속기 전반에 걸쳐 구성된 각 장치에 고장 상황 및 가속기 운전에 관한 위해 상황이 발생되었을 시 연관된 장치에 위해를 끼칠 수 있는 동작을 방지하기 위한 시스템이며 가속기 운전의 필수 요소이다. MIS는 각 가속기 운용 정책에 따라 구역별, 레벨별, 장치별 등으로 분류하기도 하며 각 장치들의 안전성을 확보하는 것을 목표로 한다. MPS (Machine Protection System)에서 MIS는 여러 분류의 신호 중 상대적으로 반응속도가 느리고 중요도가 낮은 신호들을 주로 담당한다. Interlock 상황에 대해 발생된 신호는 지역 장치로부터 중앙장치가 인지하고 최종 목적지까지 전달되는 신호의 루트별 속도 차이는 존재한다. 하지만 MIS의 신호 루트는 최소화하여 신호별 속도의 차이를 최소화할 수 있도록 고려하여 설계한다. MIS의 제어기는 PLC (Programmable Logic Controller)로 산업 전반과 실험물리학 분야의 제어기로 다양하게 사용되고 있으며 시스템의 신뢰성 확보 및 고장 대응에 대한 가이드라인이 다양하게 제시되고 있어 다른 타입의 제어기보다 견고한 시스템을 구성하기 손쉽다. MIS는 기본적으로 장치의 장애 상황(PLC 제품 고장, 정전 등)을 고려하여 High Availability가 확보되어 구성된다. 또한, 데이터의 안전성 및 신뢰성 확보를 고려한 High Reliability의 설계는 필수이다. Central PLC와 Local PLC의 연결은 Profinet과 같은 산업 ethernet 프로토콜을 사용하여 서로 데이터 통신을

유기적으로 주고받는다. 또한, EPICS IOC와 연동되어 사용자를 위한 서비스를 제공할 수 있는 것을 특징으로 한다.



<그림 3.1.11.84> MIS의 sequence

<그림 3.1.11.84>는 MIS의 sequence이다. 현재는 초기 단계로 추후 빔운영 시나리오가 완성되는 대로 MIS sequence를 빔운영 시나리오에 맞춰 상세하게 보완할 예정이다.

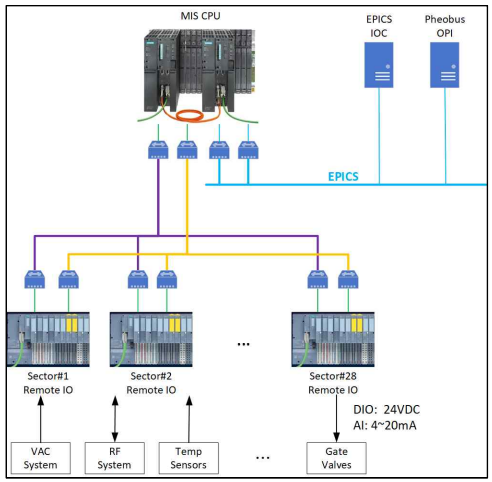
- Shutdown: MIS의 Off 상태로 MIS의 유지보수나 가속기의 장기간 유지보수시의 상태이다.

- Ready: MIS 실행 전 대기 상태로 MIS 제어기와 각 가속장치들과 접점의 정상 유무를 점검한다.

- Injection: 빔을 입사하는 상태이며 입사 중 Machine Fault 발생 시 즉시 Beam Dump 모드로 변경된다.

- Storage: 저장링에 빔을 저장하는 상태이며 빔 저장 중 Machine Fault 발생 시 즉시 Beam Dump 모드로 변경된다.

- Stop: Beam Dump 후 가속장치를 멈춘 상태로 장치담당자와 운전실의 확인 전까지 래치 상태를 유지한다. 장치 점검이 완료되면 Injection Mode로 이동해서 빔 입사를 다시 시작한다.



<그림 3.1.11.85> MIS Architecture

<그림 3.1.11.85>는 Central MIS, Local MIS 그리고 EPICS 및 주변장치 간 연관성을 간단하게 보여준다. 4GSR의 MIS PLC는 전 영역을 관장하기 위해 가속기 총 28 cell로 구분하여 각 cell에 랙이 위치하여 주변부 장치들의 신호를 수집하고 또한 Interlock 상태를 발생 및 전달한다. MIS PLC를 통해 수집/발생된 모든 신호는 주 운전실에 나타내기 위하여 EPICS 네트워크에 연결이 될 것이며 사용자로부터 MIS의 상태를 모니터링 및 명령을 할 수 있도록 한다. MIS는 크게 3가지 레이어로 표현이 가능하며 이는 각 레이어 별로 다음과 같이 표현한다.

○ The Device & System Layer

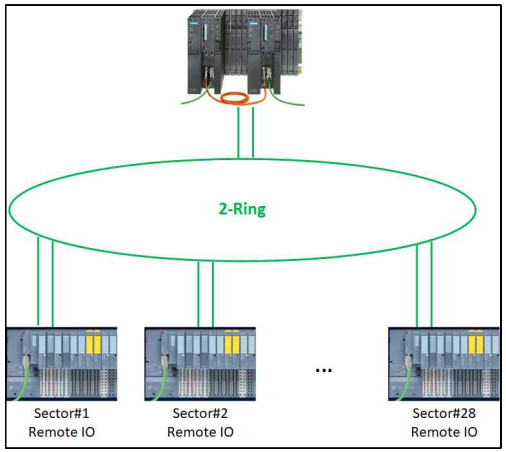
가속기 운전에 연관된 장치들의 보호 기능을 갖는다. 자체 감시를 통해, 문제 발생 시 자기보호 및 연관된 다른 모든 시스템에 상태를 전달한다. 또한, 관련된 시스템들로부터 Interlock Signal을 수신받아 제어한다.

○ The MIS Local Layer

가속기 운전에 연관된 장치들로부터 제공되는 상태 신호를 목적별(지역별, 기능별)로 수집하여 Central MIS로 전달한다. 또한, Central MIS에서 분석된 결과 신호를 전달받아 The Device & Equipment Layer에 전달하는 역할을 한다.

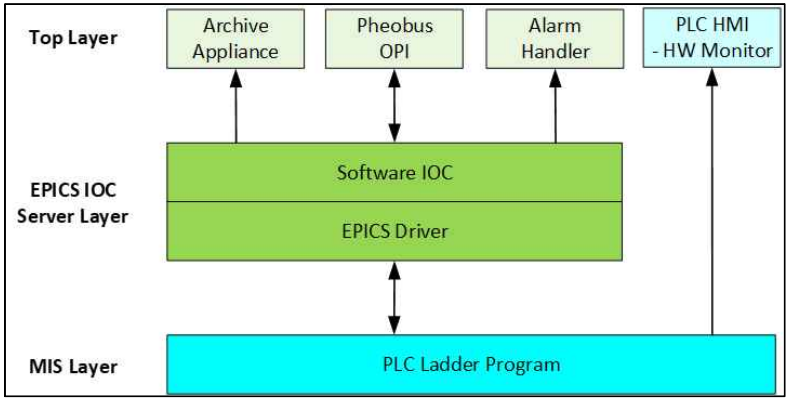
○ The MIS Central Layer

수집된 데이터를 목적별(지역별, 기능별)로 신호들을 감시하고, 분석하여 장치들의 감시 및 보호 조치를 한다.



<그림 3.1.11.86> MIS Ring Topology

<그림 3.1.11.86>은 MIS에서 사용되는 PLC 간의 통신 topology를 표현한 그림이다. 각 MIS는 고가용성, 고신뢰성을 확보하기 위해 Central MIS는 이중화 CPU, 네트워크 이중화, 전원 이중화를 적용하여 구성된다. 특히 PLC 간의 통신연결을 Ring topology 구성을 하여 각 Local PLC의 통신 고장 및 HW 고장 등의 문제가 발생하였을 때 다른 루트의 Local PLC를 통해 데이터를 지체없이 전달하여 Central PLC가 데이터를 판단하는 데 문제가 없도록 Central PLC는 즉각적으로 문제상황을 판단하고 상황에 따른 조치를 취할 수 있도록 구성한다. Local PLC 및 Central PLC의 모든 신호는 상위 EPICS Network와 연결하여, 원격지의 MIS용 EPICS IOC와 통신을 하여 최종적으로는 사용자에게 서비스할 수 있어야 한다.



<그림 3.1.11.87> SW Architecture

<그림 3.1.11.87>은 MIS의 SW architecture를 표현한 그림으로 각 layer 별로 사용되는 소프트웨어의 연관성을 보여준다.

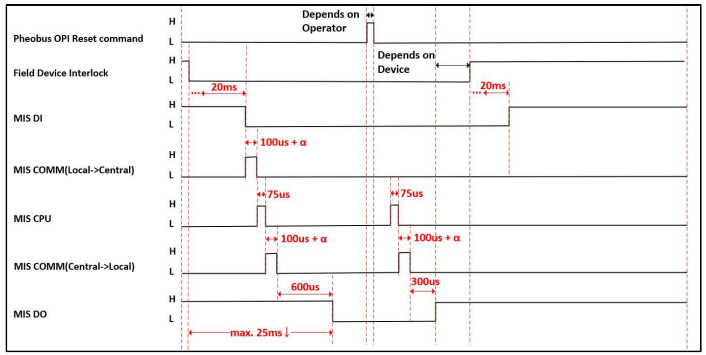
○ Top Layer

사용자 혹은 운전원에게 서비스하는 것을 목적으로 한다. 데이터 저장을 위한 Archive Appliance와 사용자에게 MIS의 신호를 모니터링 및 제어할 수 있는 OPI, MIS의 알람 상태를 표현하는 Alarm Handler, 구역별로 MIS PLC 상태를 모니터링할 수 있는 PLC HMI로 나뉜다.

○ EPICS IOC Server Layer

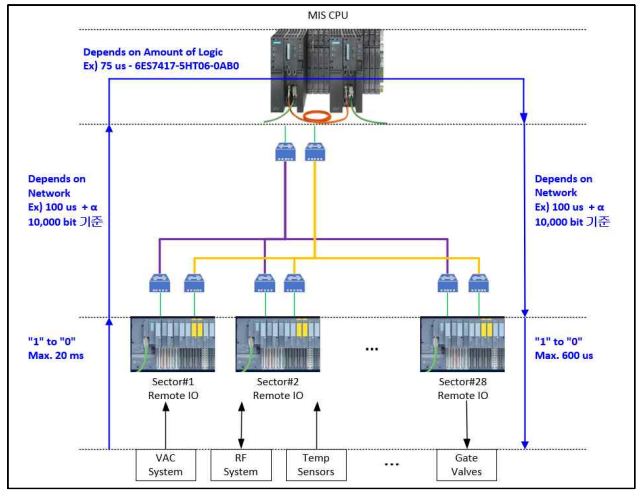
EPICS 기반과 PLC의 연결 및 Top Layer와의 중계를 담당하며, PLC와 EPICS를 EPICS Driver 및 EPICS IOC를 통해 연동할 수 있게 한다.

○ MIS Layer



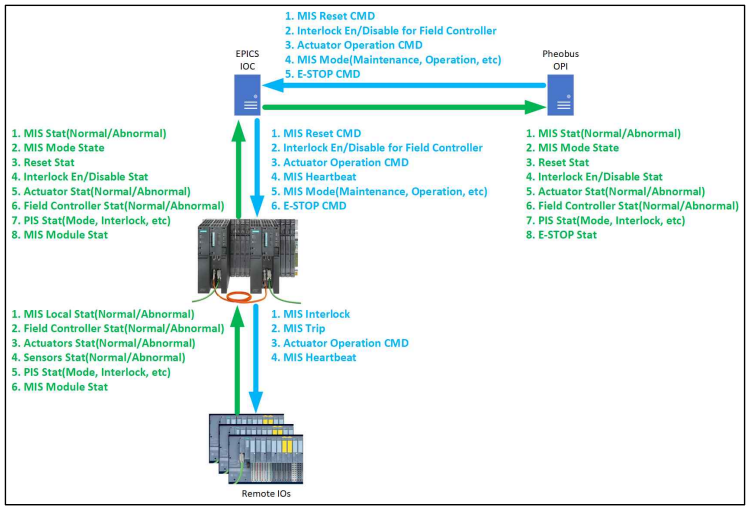
<그림 3.1.11.88> MIS Fault Reset Command & Fault Processing Timing

Central/Local MIS의 모든 PLC Logic을 포함하는 소프트웨어 레이어를 표현한다. <그림 3.1.11.88>은 MIS의 Fault Reset Command & Fault Processing Timing을 표현한 그림이다. 각 Local PLC 및 Central PLC에서의 발생 된 Interlock 신호는 사용자가 Reset 버튼을 눌러 처리하기 전까지는 Latch 상태를 유지해야 하며, MIS EPICS IOC와 Central PLC 및 Local PLC의 통신은 Heartbeat 등의 데이터를 통해 통신 건전성을 상시 확인한다. 또한, PLC 외의 타 시스템과의 연동에도 H/W 또는 S/W Heartbeat을 통해 통신 및 시스템 건전성을 상시 확인이 가능해야 한다.



<그림 3.1.11.89> Local/Central MIS Timing

각 Local PLC는 지역 장치들에서 발생하는 Interlock 신호는 DI 또는 AI 카드를 통해 입력받고 Central PLC 또는 Local PLC의 로직을 통해 연산 후, 처리된 신호 값을 DO 카드를 통해 출력하여 각 지역 시스템에 전달하여 Interlock 상황을 차질 없이 대응한다. MIS 네트워크는 통신 장애 상황을 고려하여 이중화 구성을 하여 Central PLC와 Local PLC 간 통신의 끊어짐이 없어야 한다. MIS PLC 및 전장품 등은 19′ 랙 내부에 장착하여 유지보수 목적 외 타인의 접근을 할 수 없도록 구성한다.



<그림 3.1.11.90> Signal Flow Diagram

<그림 3.1.11.90>은 MIS의 계층별로 주고받는 신호의 종류 및 단계를 표현한 그림이다. 이를 통해서 HW별, SW별 장치를 거치며 단계별 신호가 어떠한 형태로 변환되는지 블록도를 통해 간접적으로 알 수 있다.

<표 3.1.11.28>은 4GSR의 가속기 운전 중 MIS Interlock이 발생하는 조건 및 동작을 정리한 것으로 PSI, MIS의 주변장치의 상태에 따라 MIS의 Interlock 발생 상황이 변경됨을 알 수 있다. 해당 표는 지속적으로 업데이트가 필요하며 4GSR 가속기의 운영 정책에 따라서도 유연하게 변경될 것이다.

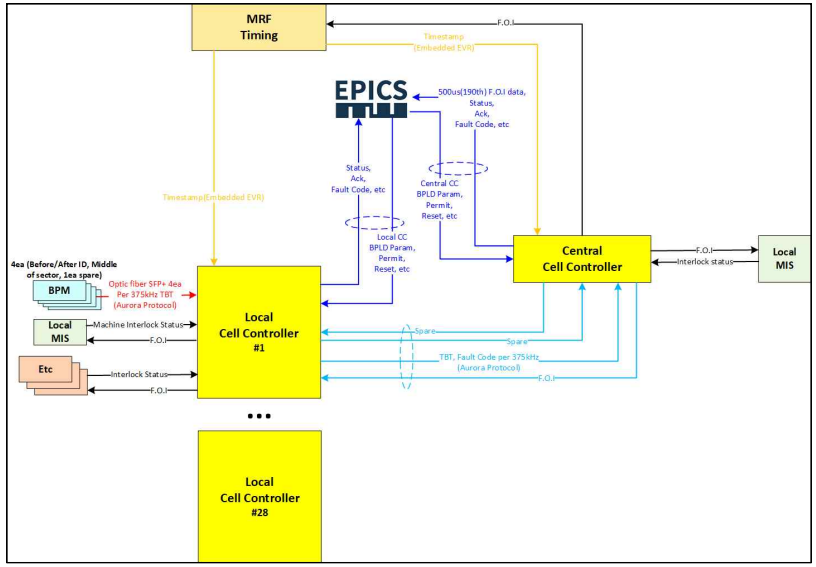
<표 3.1.11.28> Interlock Condition & Action

조건	액션	주체	비고
PSI No Access 상태, MIS Operation Mode 상태 - 전체 Beam Line 중 Beam Dump Request 발생 시 - SR 진공 챔버 온도(PS) IR 발생 시 - ID Interlock 발생 시 - FOI Interlock Request 발생 시	Beam Dump	MIS	-
PSI No Access 상태, MIS Beam Operation 상태 - SR BPM Orbit IR 발생 시	Beam Dump, Interlock 전송	FOI	-
PSI Restricted Access, No Access, MIS Beam Operation, Maintenance 상태, SR에 Beam이 없는 상태 - SR 진공 Interlock 이상 발생 시	Gate Valve Close	MIS	-
PSI Restricted Access, No Access, MIS Beam Operation, Maintenance 상태, SR에 Beam이 있는 상태 - SR 진공 Interlock 이상 발생 시	Beam Dump, Gate Valve Close	MIS	-

MIS는 작업자 안전을 고려한 시스템과 Hard-wired 또는 통신을 통해 연결되어 가속기의 운전, 유지보수 등의 상황에 유연하게 대응할 수 있도록 구성이 고려되고 개발되어야 할 것이다.

(2) Fast Orbit Interlock

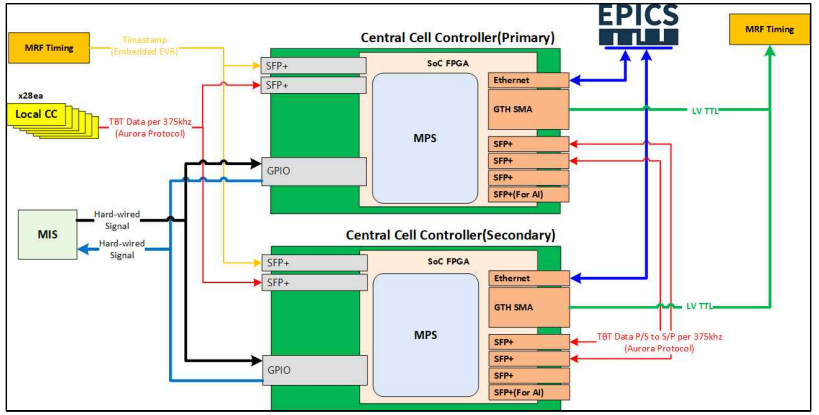
FOI (Fast Orbit Interlock)은 방사광가속기 운전 중 BPM (Beam Position Monitor)을 통해 timing system과 동기된 빔의 궤도 상태, 정보를 수집 및 분석하여, 빔의 궤도이탈 상황과 관련하여 시스템의 파손 방지와 보호를 목적으로 빠르게 빔 덤프 신호를 출력하고 연관 장치들의 운전 상태는 운전실에 표현하는 역할을 한다. 또한, 가속기 운전 중 빔 궤적 이탈에 관련한 정보 및 모든 신호는 Orbit Interlock 발생 전/후 약 500 μs 시간 동안(약 190^{th} TBT 데이터)의 데이터를 Archiver Appliance를 통해 수집하고, 수집된 데이터는 Phoebus OPI를 통해 운전실에서 사용자에게 알려준다.



<그림 3.1.11.91> FOI (Fast Orbit Interlock System) Architecture

<그림 3.1.11.91>은 FOI Architecture를 표현하였다. FOI는 Master/Local Cell Controller로 구분이 되며 동일한 메인칩으로 구성이 되나 주변부 회로만 다르게 설계한다. 그 이유는 각 시스템이 담당하는 세부적인 기능이 일부 다른 부분이 있기 때문이고 Master CC (Cell Controller)와 Local CC (Cell Controller)는 서로 다른 기능을 담당한다.

Local CC는 timing system과 375 kHz의 주기로 동기화되며 이 주기에 맞추어 Aurora Protocol을 사용하는 고속 시리얼 통신을 통해 BPM으로부터 빔의 위치정보를 수집한다. BPM으로부터 수집되는 데이터는 빔 궤도에 관한 TBT (Turn By Turn) 데이터이다. 각 Local CC는 BPM과 통신을 위한 Aurora Protocol과 Central CC의 통신을 위한 Aurora Protocol 고속 시리얼 통신 포트를 보유한다. 각 Local CC는 전, 후 섹터에 위치한 각각 4 EA의 BPM의 빔 궤도 데이터를 연산하여 FOI 발생을 판단하고 주변의 MIS, RF 장치 및 기타 장치들에게 신호를 트리거링 한다. Central CC는 상호 간 통신 및 신호 등을 통해 동작 건전성을 수시로 확인하여 구성품 자체 장애 대응이 가능하여야 한다.



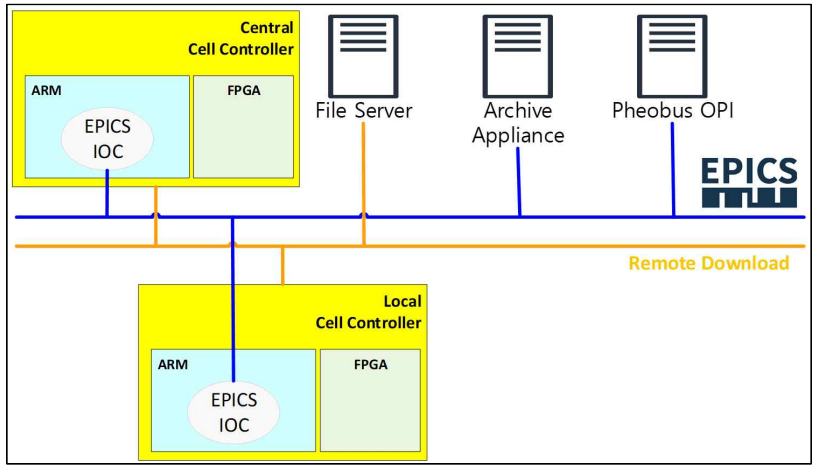
<그림 3.1.11.92> Central CC (Cell Controller) Architecture

<그림 3.1.11.92>는 Central Cell Controller Architecture를 표현한 그림이다. Central CC는 운전 중에 중단 상황을 방지하기 위해 동일한 타입의 제어기를 Primary, Secondary로 이중화 구성한다. Central CC의 각 보드는 Local CC로부터 같은 데이터를 수신하고 항상 작동한다. 단, EPICS IOC는 동일 시간에 하나의 Soft IOC만을 실행한다. 이는 Primary 혹은 Secondary 둘 중 하나의 제어기만이 Soft IOC를 실행하는 것을 말한다. 기본적으로 Primary 제어기가 우선권을 갖게 되지만, Primary 제어기에 문제가 생겼을 경우 Secondary 제어기가 Primary 제어기의 고장을 판단하여 Soft IOC의 우선권을 갖고 실행한다. Central CC의 이중화는 멈춤 없이 FOI 기능을 수행하기 위해 두 제어기의 출력은 외부 게이트 로직 보드를 통해 두 제어기의 상태를 로직으로 판단하고 최종 출력하게 된다. 또한, Central CC는 상호 통신 및 신호 등을 통해 상호 동작 건전성을 수시로 확인하여 구성품 자체의 장애 대응이 가능하도록 원격지에서 사용자에 의해 내부 프로그램 다운로드가 가능하도록 개발이 될 것이다.

<표 3.1.11.29> FOI 입/출력 신호

분류	FOI In/Out	설명	비고
Time Stamp	In	Timing System Time Stamp	
ID Status	In	ID Gap 상태 등	
DCCT value	In	빔 전류 또는 정상 상태	
BPM data	In	X, Y, Sum, etc	
Timing Event	In	Operation Event	
MIS Interlock	In	MIS Interlock 출력	
Fast Orbit Interlock to MIS	Out	FOI Interlock 출력	
Fast Orbit Interlock to Timing System	Out	FOI Interlock 출력	
Fast Orbit Interlock to RF Device	Out	FOI Interlock 출력	
Fast Orbit Interlock to Peripheral Device	Out	FOI Interlock 출력	

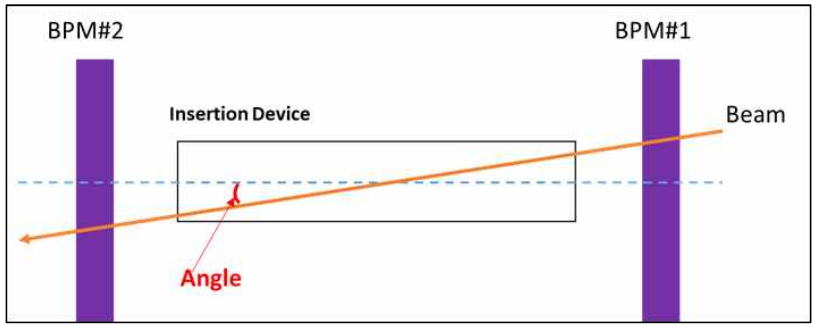
<표 3.1.11.29>는 FOI의 입/출력 신호를 정리한 것이다. FOI의 Orbit Interlock은 빔 궤도를 판단할 수 있는 입력 데이터와 Orbit Interlock을 실행 여부를 판단할 수 있는 파라미터 데이터 그리고 연산 후 Orbit Interlock을 발생시키는 데이터로 구분할 수 있다. 각 데이터의 입/출력과 연관된 장치들은 종류가 다양하며 각 장치들의 신호 레벨 등을 고려하여 개발할 것이다.



<그림 3.1.11.93> FOI 하드웨어 및 소프트웨어 구성

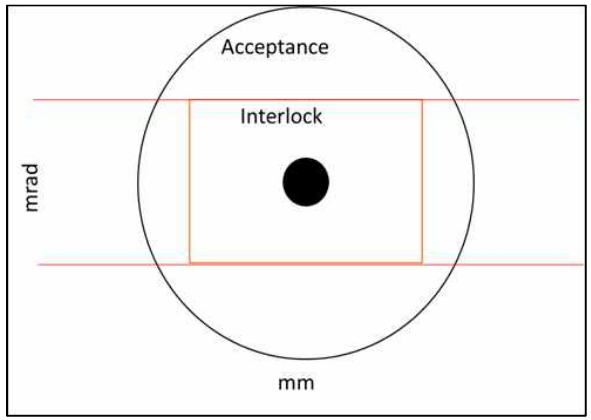
<그림 3.1.11.93>은 FOI의 제어기 및 소프트웨어의 구성을 대표한다. Local/Central CC는 ARM과 FPGA 부분으로 구성되며 소프트웨어 개발을 위해 ARM의 운영체제는

Peta Linux가 설치될 것이며 EPICS7 버전을 기반으로 EPICS IOC를 개발 및 구동하게 된다. FPGA의 내부 로직 개발의 경우 Vivado를 사용하여 개발 및 구동을 하도록 한다. 또한 EPICS Network 및 리모트 다운로드, 데이터 저장을 위한 네트워크와의 연결을 통해 FOI의 기능을 구현한다.



<그림 3.1.11.94> 빔 Angle 검출 예

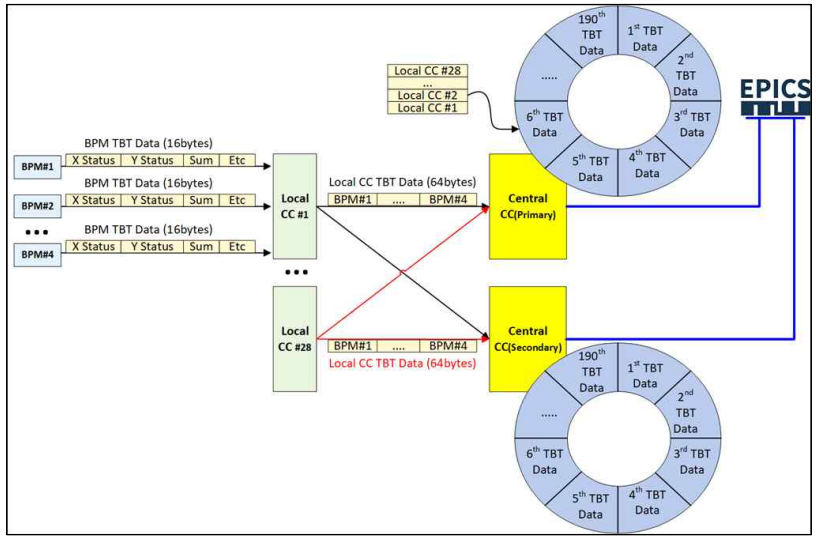
<그림 3.1.11.94>는 FOI에서 빔 궤도를 검출하기 위한 예이다. BPM은 BM 전/후, ID 전/후에 위치하게 되며 빔이 BPM #1, #2를 지나가며 검출되는 빔 궤도의 편차를 데이터로 수집하고 이를 바탕으로 저장링 내에서 빔의 궤도이탈 여부를 판단한다.



<그림 3.1.11.95> Orbit Interlock 허용영역 예

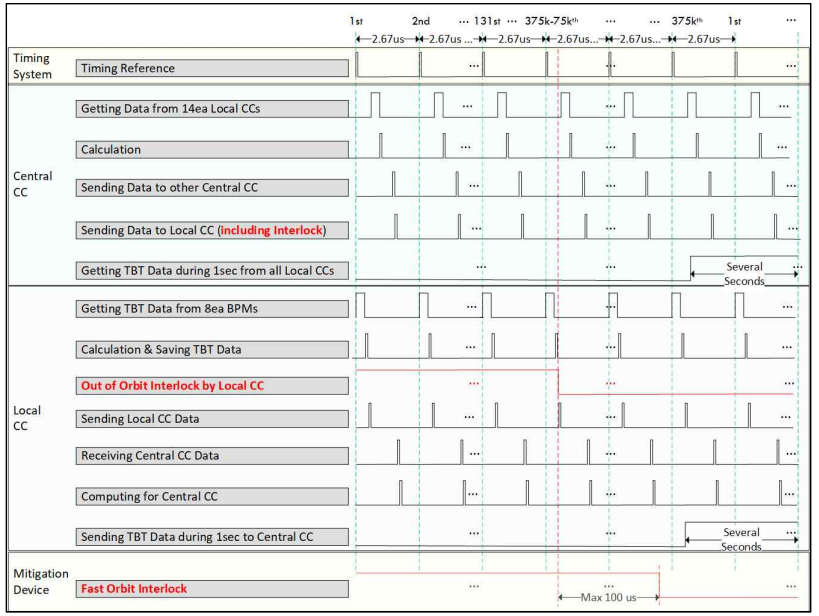
<그림 3.1.11.95>는 저장링 내 빔 운전 중 Orbit Interlock의 허용영역을 도식화한 것이다. 상세한 Orbit Interlock의 허용기준은 빔의 위치 정보와 ID, BM을 통과하는

빔의 각도 정보를 통해 정의가 되어야 한다. 이는, 실제 가속기를 운용하며 충분한 데이터가 누적함으로써 Orbit Interlock의 허용 기준을 상세하게 추후 정의할 것이다.



<그림 3.1.11.96> Turn by Turn Data Processing

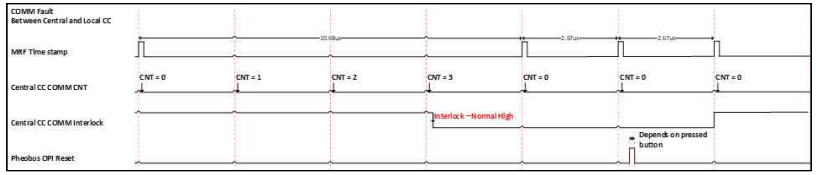
<그림 3.1.11.96>은 Local/Central Cell Controller 메모리 운용을 표현한 그림이다. BPM의 TBT 데이터는 375 kHz 주기로 Local CC의 내부 버퍼에 지속적으로 저장 및 업데이트되며 가속기 운전 중 빔이 정상궤도를 이탈했는지를 판단할 근거가 된다. Local CC는 이러한 데이터를 연산하고 BPM 8 EA의 데이터를 연속적으로 내부 버퍼에 저장한다. 내부버퍼는 최대 375,000회를 저장할 것이며 375,000회 중 가장 오래된 데이터는 삭제하고 마지막 데이터를 저장하는 링버퍼 방식으로 동작한다. 이렇게 저장되는 375,000회의 TBT 데이터는 Orbit Interlock 발생 시점 전/후 약 1,000 ms (BPM TBT Data 375,000회)의 데이터를 취합하여 데이터 서버에 전송한다. 전송된 데이터는 추후 다른 사용자가 빔 궤적에 대한 정보를 활용할 수 있도록 하며, Local CC 및 Central CC는 원격지에서 사용자에 의해 내부 프로그램 다운로드가 가능하도록 개발될 것이다. Central CC는 Local CC와는 다르게 Local CC로부터의 TBT Data를 저장 및 취합하고 주변부 장치들로부터의 interlock 상황 전달 및 운전 명령을 수행하는 역할이 차이가 있다.



<그림 3.1.11.97> FOI Orbit Interlock Timing Chart

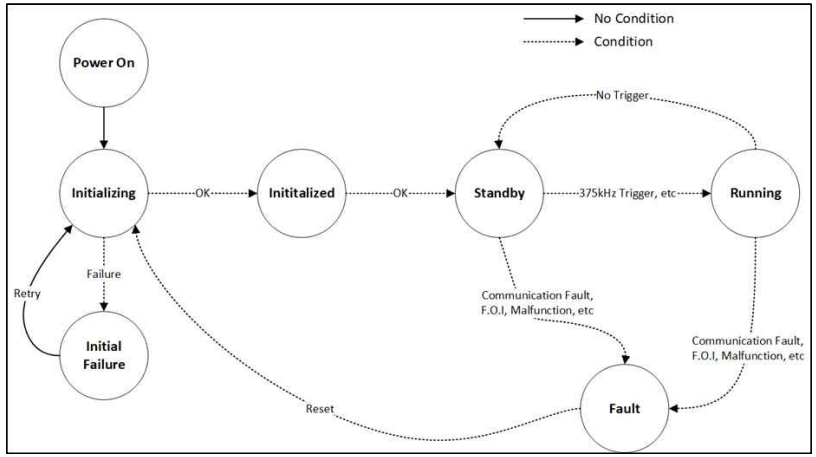
<그림 3.1.11.97>은 Central/Local CC의 FOI 및 FOI 발생 시 1,000 ms 시간 동안 수집한 TBT Data 및 Orbit Interlock 처리를 타이밍 차트로 표현한 것이다. 상세한 설명은 아래 기술하도록 한다.

가속기 운전 중 빔이 정상궤도에서 벗어났을 경우 해당 섹터를 담당하고 있는 Local CC에서 로직 연산을 통해 FOI를 발생하고 Central CC에 통신을 통해 FOI 신호를 전송하고 Local CC에서 주변부 장치에 FOI 신호를 트리거링 발생까지 걸리는 기능 요구 사양의 시간인 100 μs 이내의 처리와 Local CC에서 FOI를 판단하고 FOI 판단 전/후 1,000 ms 동안 버퍼에 저장하였던 BPM TBT Data를 제어 네트워크에 보내는 동작까지의 시간 흐름을 표현하였다.



<그림 3.1.11.98> Timing Chart - Communication Fault

<그림 3.1.11.98>은 Central CC와 Timing System 간의 Communication Fault 발생 및 해당 Fault를 사용자에 의해 Reset 하는 과정을 타이밍 차트로 표현한 것이다. 가속기 정상 운전 중 Central CC와 Timing System 간의 통신이 끊긴 경우를 예로 들었다. Central CC와 Timing System 간의 통신은 375 kHz의 주기로 지속적으로 전송하게 되며 Central CC 기준으로 Timing System과의 통신 패킷이 일정 시간 동안 확인이 되지 않게 되면 Interlock 신호를 발생한다. 이는 운전실에서 확인할 수 있으며, 해당 고장이 해결되었을 경우 운전원이 OPI (Operator Interface)를 Fault Reset 버튼을 눌러 시스템을 정상화하게 되는 것을 표현한 흐름도이다.

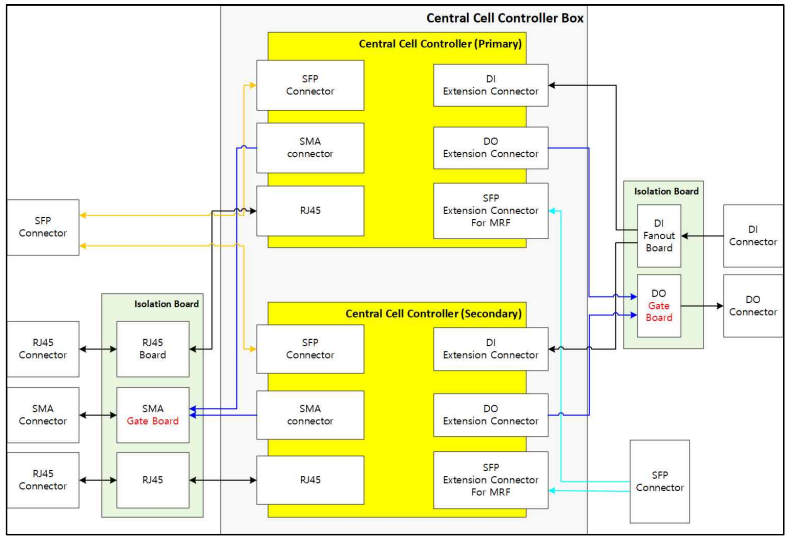


<그림 3.1.11.99> FOI Sequence

<그림 3.1.11.99>는 FOI 제어기의 sequence를 표현한 것이다. 크게 Initial, Standby, Running, Fault 4단계로 구분하고 세부적인 sequence는 조건에 따라 추가될 것이다.

- Initial: 제어기를 초기화하고 제어기의 정상 유무를 판단
- Standby: Event Timing System으로부터 타이밍 수신 대기

- Running: Event Timing System으로부터 타이밍을 받고 TBT 데이터를 반복적으로 처리
- Fault: Interlock, 장치 고장 등의 상황. 사용자에 의한 Reset 명령 전까지 Fault 상태 래치



<그림 3.1.11.100> Central Cell Controller H/W Architecture

<그림 3.1.11.100>은 Local/Central Cell Controller의 H/W 구성을 표현한 것이다. Local Cell Controller와 Central Cell Controller는 동일한 H/W에 S/W적인 기능만 별개로 구성할 것이다. 해당 제어기의 포트들은 외부 제어기들과의 인터페이스의 하드웨어적인 문제로 인해 파손을 방지하기 위해 외부 제어기와 isolation 되는 구성을 한다. 또한 외부 제어기들과의 신호 레벨을 고려하여 3.3 V, 5 V, 24 V 및 광케이블 연결하여 신호 분배 기능을 수행할 수 있도록 한다.

3.1.12 빔 불안정성 및 제어 (Beam Instability and Feedback)

가. 개요

저장링 성능은 brightness로 지표화되고 brightness는 빔 전류에 비례하기 때문에 저장링 운전 시에는 빔 전류를 가능한 높은 값으로 올린다. 그러나 최대 운전 전류는 빔의 불안정성(beam instability)에 의해 제한되게 된다. Beam instability는 두 가지 요소 1) 저장링 impedance와 2) 운전 전류에 반비례하여 instability의 threshold가 결정된다. 따라서 최대 목표 전류 400 mA를 얻기 위해선 최소화된 저장링의 impedance와 bunch-by-bunch feedback system를 준비할 필요가 있다. 본 절에서는 성공적인 400 mA 운전을 위한 4GSR의 impedance 현황과 저장링에서의 빔 불안정성 그리고 이를 제어하기 위한 feedback 시스템을 다루기로 한다.

나. 임피던스 관리 (Impedance budget)

저장링에서 발생하는 impedance는 크게 두 가지로 Resistive wall (RW) impedance와 Geometric impedance로 구분한다. 4GSR의 경우 작아진 aperture로 인해 Resistive wall impedance의 영향이 더욱 증가하였다. 따라서 <표 3.1.12.1>과 같이 전도도가 높은 알루미늄으로 상당수의 진공 챔버를 제작하게 된다. 소수 챔버의 경우 공학적 요구조건에 의해 전도도가 상대적으로 낮은 스테인리스 스틸로 제작이 된다. Bellows의 finger 그리고 In-vacuum undulator (IVU)의 코팅 부분이 구리로 제작이 되며 injection을 위한 kicker 챔버의 경우 3 μm 두께의 티타늄 코팅이 된 알루미나로 제작된다.

<표 3.1.12.1> 저장링의 부품의 재료에 따른 길이와 그에 상응하는 전도도

재료	길이 (m)	전도도 (S/m)
알루미늄	639.06	2.46×10^7
스테인리스 스틸	79.72	1.35×10^6
구리	72	5.8×10^7
티타늄 코팅 알루미나	2.52	3.33×10^5, 10^{-12}
전체	799.30	-

4GSR 아크 구간의 진공 챔버는 가로 폭 24 mm와 세로 폭 18 mm의 오각형 형태의 빔이 지나가는 채널이 존재하며 채널 좌우 끝단에 진공 펌핑과 X-선 차단을 위한 antechamber가 존재한다. 직선구간은 26개의 Insertion device (ID) 구간과 2개의

High-beta 구간이 존재한다. 초기 건설 단계에선, 26개의 ID 구간 중 8개의 in-vacuum undulator (IVU)와 1개의 elliptically polarizing undulator (EPU)가 계획되어 있다. 그러나 본 TDR에서는 추후 추가될 IVU와 EPU의 RW impedance 효과를 고려하여 총 24개의 IVU와 2개의 EPU가 최종적으로 존재한다는 가정하에 작성되었다. 4GSR의 IVU는 길이 3 m에 최소 수직 갭을 5 mm와 15 mm로 설계가 진행되고 있다. <표 3.1.12.2>는 4GSR의 RW impedance 계산에 사용된 parameter들이다. 오각형 형태의 진공, 센터 밴드 그리고 EPU 챔버들은 계산을 위해 근접한 형태인 타원으로 근사가 되었으며, IVU, Injector kicker 챔버는 평행한 두 판으로 근사하여 Impedance Wake2D로 RW impedance를 계산하였다. IVU는 open 기준 수직 폭 15 mm와 close 기준 5 mm 두 가지 경우로 계산하였다. <그림 3.1.12.1>은 4GSR의 RW impedance 계산 결과이다.

<표 3.1.12.2> 저장링 진공 부품들의 단면 근사값

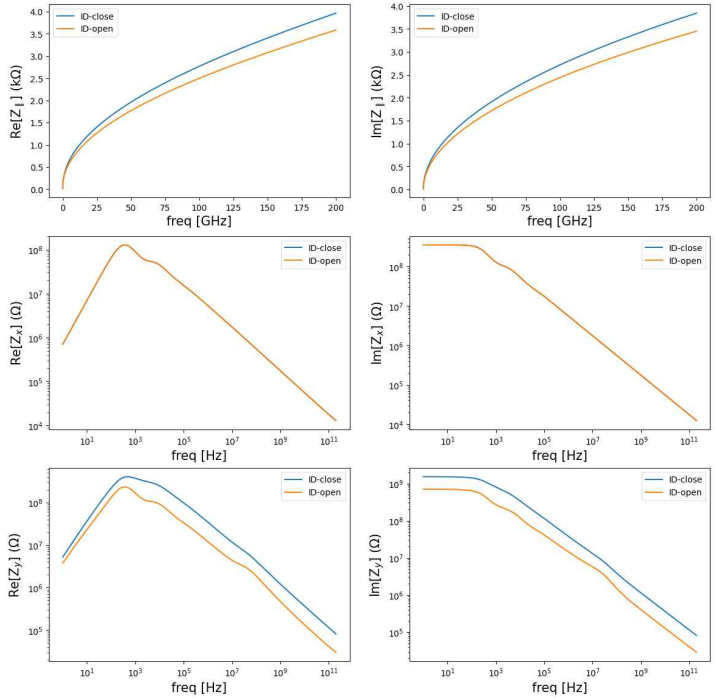
	형태	값
진공 챔버	타원	장축 10 mm, 단축 9 mm
센터 밴드	타원	장축 10 mm, 단축 4.87 mm
IVU	평행한 두 개의 판	폭 15 mm, 5 mm
EPU	타원	장축 10 mm, 단축 7.5 mm
Injection kicker 챔버	평행한 두 개의 판	폭 5 mm

Geometric impedance는 GdfidL를 이용하여 진공 부품들의 impedance를 계산하였다. GdfidL를 이용한 geometric impedance 계산에는 번치 길이 1 mm가 사용되었으며, 1 m 또는 10 m의 wake 길이가 시뮬레이션에 주어졌다. 또한 횡 방향 impedance 계산을 위해 빔의 오프셋은 mesh 사이즈의 3배로 주어졌으며, impedance 및 wakefield 결과들은 주어진 오프셋에 대해 normalize 하였다.

4GSR은 총 288개의 BPM이 존재하며 현재 BPM은 Glass-Ceramic과 Alumina feedthrough의 2가지 형태를 고려하고 있다. 본 TDR 단계에서는 impedance 최적화 디자인이 적용된 Alumina feedthrough BPM보단 impedance가 더 큰 Glass feedthrough BPM이 impedance 예산에 반영되었다.

진공 챔버의 flange는 기본적으로 CF flange를 사용하지만, impedance 효과를 완화하기 위해 빔이 지나가는 진공 근처를 구리-베릴륨 합금 소재의 RF Contact spring을 이용하여 둘러주게 된다. CF flange만 단독으로 사용하게 된다면 빔의 입장에선 길이가 0.1 mm 수준의 pillbox cavity를 보는 것과 동일한 impedance 효과를

받게 된다. 이로인해 long-range wakefield 효과와 flange에서 발열 문제 등이 발생한다. 따라서 Korea-4GSR은 flange joint의 빔이 지나가는 진공 근처에 RF contact spring을 둘러줌으로 인해 빔이 만들어 내는 wakefield 효과를 최소화한다. GdfidL 시뮬레이션 상에서 flange는 빔 파이프 중앙에 폭 1 mm 두께 0.1 mm의 얇은 띠를 두른 형태로 계산을 진행하였다.



<그림 3.1.12.1> 4GSR RW impedance 계산 결과. 각 결과들은 ID가 열렸을 경우와 닫혔을 경우 2가지에 대해 계산이 되었다.

4GSR은 진공 챔버는 양쪽으로 안테챔버가 존재한다. 이 안테챔버에는 진공 펌핑을 위한 포트들과, NEG 게터 그리고 포톤 마스크와 absorber가 존재하는데 이는 빔이 지나가는 메인 채널이 아닌 안테챔버에 존재함으로써 빔에 의해 생성되는 임피던스가 최소화 되도록 해준다.

4GSR은 상전도 cavity인 EU 타임 Higher order mode (HOM)-damped RF cavity를 main RF로 채택하였다. HOM은 빔의 불안정성 중 multi-bunch instability를 유발하여

많은 3GSR 시설들이 초전도 RF cavity를 채택하게 된 원인이다. 하지만 EU 타입 HOM-damped cavity는 damper를 이용하여 효과적으로 HOM을 완화할 수 있으며 이는 Diamond와 ESRF 등과 같은 시설들의 운영을 통해 증명되었다. 따라서 본 절에선 main RF cavity의 HOM에 의한 multi-bunch 효과보단 single bunch 효과만 고려하였다.

Longitudinal feedback system (LFS)와 transverse feedback system (TFS)들이 4GSR에서 발생할 coupled-bunch mode instability들을 억제하기 위해 준비되었다. 두 시스템은 각자 종 방향과 횡 방향에서 저장링의 빔에게 impedance와 반대되는 kick을 주어 instability를 억제시킨다. 하지만 LFS와 TFS kicker들 역시 자체적으로 상당한 impedance를 유발하기 때문에 저장링의 임피던스 계산에 포함되어야한다.

4GSR의 번치 길이는 higher harmonic cavity (HHC)가 없을 때 RMS로 4 mm, 존재할 경우 14 mm이다. 시운전 초기 단계에선 HHC를 이용한 번치 길이 증가가 어려운 경우를 대비하여 저장링의 impedance에 의한 loss factor 및 kick factor들을 4 mm와 14 mm 두 가지 경우에 대해 조사하였다. 아래 (수식 3.1.12.1)과 (수식 3.1.12.2)는 loss factor와 kick factor 계산에 사용된 정의이다.

$$k_z = -\int_{-\infty}^{\infty} \lambda(s)\, W_z(s) ds, \quad \text{(수식 3.1.12.1)}$$

$$k_{x,y} = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda(s)\, W_{x,y}(s) ds \quad \text{(수식 3.1.12.2)}$$

위 수식들에서 $\lambda(s)$는 빔의 longitudinal density이며, $W_{z(s)}$와 $W_{x,y}(s)$는 longitudinal과 transverse wakefield이다. $\lambda(s)$의 경우 Gaussian 번치를 가정하였으며, wakefield 값들은 IW2D 및 GifidL 시뮬레이션을 통해 얻은 결과물들을 사용하였다.

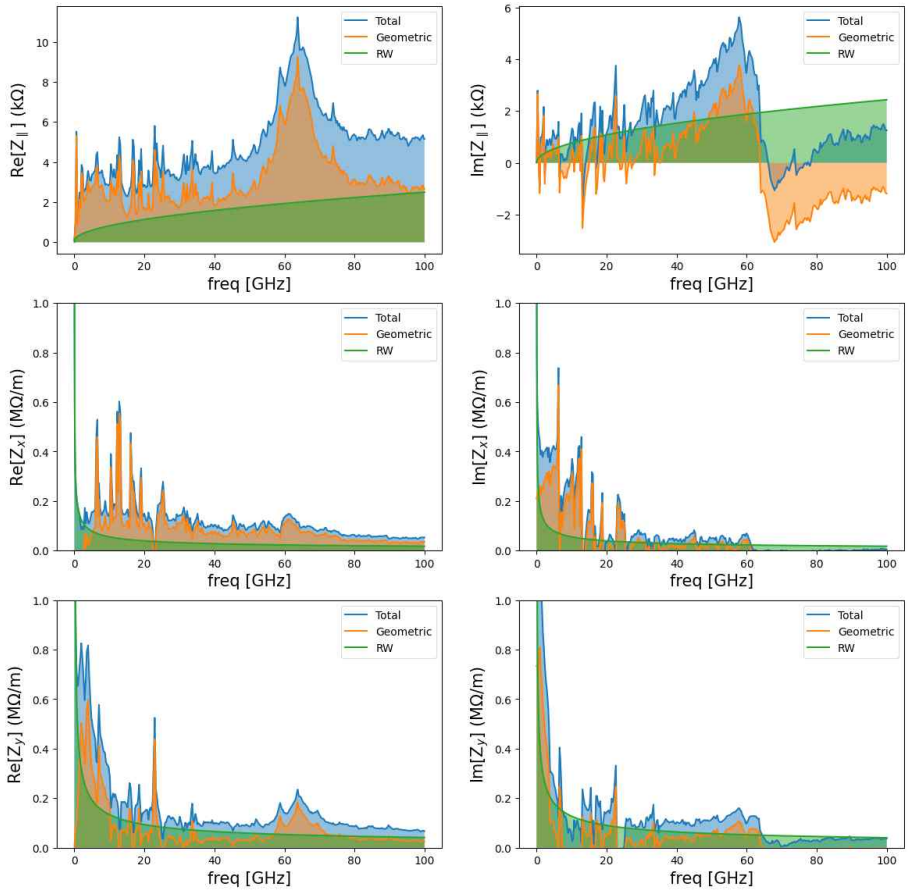
<표 3.1.12.3> 번치 길이 4 mm 기준 주요 단일 부품의 Loss factor, Horizontal과 vertical kick factors

부품	개수	Loss factor (V/pC)	Hor. Kick factor (V/pC/m)	Ver. kick factor (V/pC/m)
Resistive wall (open/close)	1	13.4/14.78	-2202.38	-5244.82/-14506.8
BPM	288	0.023	-1.833	0.475
Bellows	314	0.005	-0.256	-0.693
Flange	728	0.000	-0.311	-0.715
Gate valve	56	0.243	-7.742	-18.479
Pumping tee	28	0.093	-18.761	3.860
Photon mask	84	0.000	0.000	0.000
Main RF cavity	12	1.165	-7.826	-7.826
LFS kicker	2	1.582	-108.46	-114.94
Hor. TFS kicker	1	0.182	-38.56	-1.689
Ver. TFS kicker	1	0.182	-1.689	-38.56
Total		55.31/56.69	-4347.02	-7136.93/-16398.90

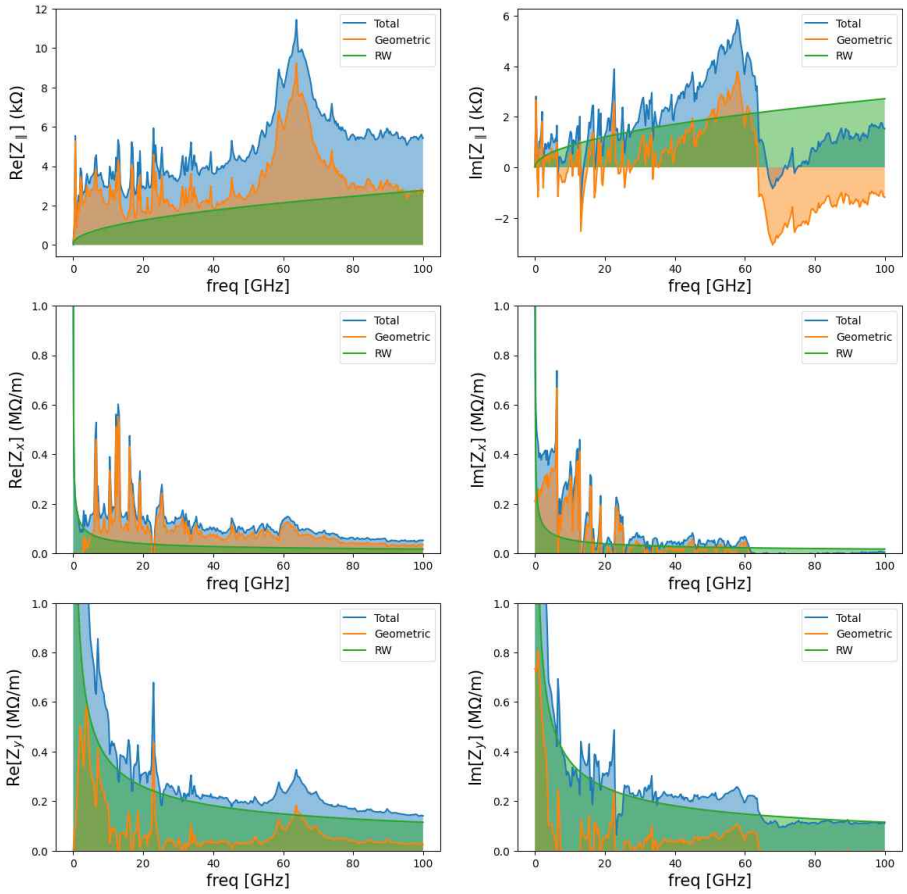
<표 3.1.12.4> 번치 길이 14 mm 기준 단일 주요 부품의 Loss factor, Horizontal과 vertical kick factors

부품	개수	Loss factor (V/pC)	Hor. Kick factor (V/pC/m)	Ver. kick factor (V/pC/m)
Resistive wall (open/close)	1	2.214/2.424	-1176.19	-2900.758/-7846.268
BPM	288	0.001	-4.677	0.257
Bellows	314	0.000	-0.291	-0.332
Flange	728	0.000	-0.087	-0.200
Gate valve	56	0.087	-6.986	-52.547
Pumping tee	28	0.000	-11.344	2.325
Photon mask	84	0.000	0.000	0.000
Main RF cavity	12	0.199	-2.090	-2.090
LFS kicker	2	0.240	-20.575	-22.173
Hor. TFS kicker	2	0.027	-8.406	1.343
Ver. TFS kicker	2	0.027	1.343	-8.406
Total		10.296/10.506	-3460.02	-6030.61/-10976.10

위 <표 3.1.12.3>과 <표 3.1.12.4>는 번치 길이에 따른 단일 저장링 부품들의 loss factor와 kick factor들이다. 저장링의 impedance 모델링은 현재도 진행 중임으로 포함되어 있지 않은 부품도 존재한다. RW impedance의 경우 20개의 모든 in-vacuum undulator의 gap이 최소 5 mm (open)와 최대 15 mm (close) 일 때로 구분하였다. <그림 3.1.12.2>와 <그림 3.1.12.3>은 IVU의 gap이 close와 open일 때 impedance의 실수부와 허수부를 보여주고 있다. Horizontal impedance가 IVU의 열림과 닫힘 여부 상관없이 일정한 이유는 IVU의 RW impedance 계산 모델에 평행한 두 판 모델을 사용하여 horizontal impedance에 영향을 주지 않기 때문이다.



<그림 3.1.12.2> 모든 IVU의 gap이 15 mm로 열려있을 때 impedance의 실수부와 허수부



<그림 3.1.12.3> 모든 IVU의 gap이 5 mm로 닫혀있을 때 impedance의 실수부와 허수부

다. 빔 불안정성 정리 (collective effect)

Impedance에 의해 다양한 instability들이 발생할 수 있으며, 두 가지 single bunch instability와 coupled-bunch mode instability로 구분된다. Single bunch instability는 하나의 번치가 자신이 만들어 낸 impedance에 의해 발생하는 불안정성이다. 그중 가장 대표적인 불안정성으론 번치 길이와 에너지 스프레드가 증가하는 microwave instability 그리고 immittance 증가 및 전자빔의 궤도 등에 영향을 주는 transverse-mode coupling instability (TMCI)가 있다.

먼저 4GSR에서의 microwave instability를 수식적 그리고 수치적 계산을 통해 효과를 예측해 보고자 한다. (수식 3.1.12.3)과 (수식 3.1.12.4)는 microwave instability를 평가하는 기준인 Keil-Schnell-Boussard criteria와 effective impedance의 정의이다.

$$\left|\frac{Z_\parallel}{n}\right|_{eff} < (2\pi)^{3/2}\frac{E_0|\eta_p|\sigma_z\sigma_\delta^2}{e^2 N_0 c}, \quad \text{(수식 3.1.12.3)}$$

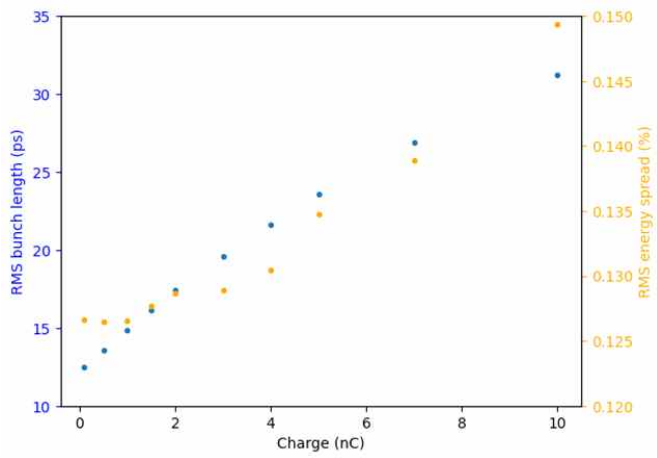
$$\left|\frac{Z_\parallel}{n}\right|_{eff} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} dw Z_\parallel \frac{\omega_0}{\omega} h_m(w)}{\int_{-\infty}^{\infty} dw h_m(w)} \quad \text{(수식 3.1.12.4)}$$

위 수식들에서 E_0는 빔의 에너지, η_p는 slip phase factor, σ_z는 번치길이, σ_δ는 빔의 에너지 스프레드, e는 전자의 전하량이며, N_0는 번치당 전자의 개수, c는 빛의 속도, h_m는 번치 스펙트럼이다. Keil-Schnell-Boussard criteria에 따르면 4GSR이 microwave instability가 발생하는 threshold는 <표 3.1.12.4>에서 주어진 것과 같이 번치 길이가 4 mm의 경우 104.3 mΩ이며, 14 mm의 경우 389.3 mΩ이다. 하지만 4GSR의 effective impedance는 기준치를 상회하는 결과를 보여주고 있다. 그러나 Keil-Schnell-Boussard criteria가 보수적인 수식임을 감안하면 실제 운전에선 threshold보다 더 많은 전류를 넣을 수 있다. 그러므로 tracking 시뮬레이션을 통해 현실적인 microwave instability의 threshold를 확인할 필요가 있다.

<표 3.1.12.5> 번치 길이에 따른 Boussard criteria와 4GSR의 effective impedance 값들

	번치 길이 4 mm	번치 길이 14 mm
Bussard's criteria	104.3 mΩ	389.3 mΩ
Korea-4GSR	421.38 mΩ	1222.4 mΩ

<그림 3.1.12.4>는 tracking 코드인 ELEGANT에 현재 계산된 4GSR의 longitudinal impedance를 추가하여 단일 번치의 차지별 번치 길이와 에너지 스프레이를 확인한 결과이다. 위 시뮬레이션에선 IBS 효과와 undulator에 의한 damping 효과는 고려되지 않았으며, 번치를 10,000 턴 돌려 마지막 500 턴의 평균값을 계산하였다. 번치 길이의 경우 임피던스에 의해 charge가 증가함에 따라 같이 증가하는 경향을 보인다. 에너지 스프레드는 1 nC까진 설계된 값을 가지지만 그 이후 약간 증가하다 4 nC 이상의 경우 0.13% 이상으로 증가한다.



<그림 3.1.12.4> 단일 번치 차지별 번치 길이와 에너지 스프레드 스캔 결과

4GSR은 번치 당 1 nC의 빔이 총 1,020개로 채워져 있다. 그렇기 때문에 RW impedance, ion collision 그리고 RF cavity의 Higher order mode (HOM)에 의해 coupled-mode bunch instability (CBMI)들이 발생한다. 앞서 impedance 관리 섹션에서 언급하였듯이 4GSR은 NCRF cavity에서 문제였던 HOM들을 damper를 이용하여 효과적으로 억제하기 때문에 longitudinal 방향 CBMI는 발생하지 않을 것으로 예상한다. 하지만 줄어든 챔버 사이즈로 인해 RW이 비약적으로 증가하였으며 이는 transverse 방향 CBMI에 주요한 원인이다.

(수식 3.1.12.6)은 rigid body의 번치를 가정하여, 번치들이 betatron oscillation 할 때 impedance로 인해 betatron frequency의 이동을 나타낸 식이다.

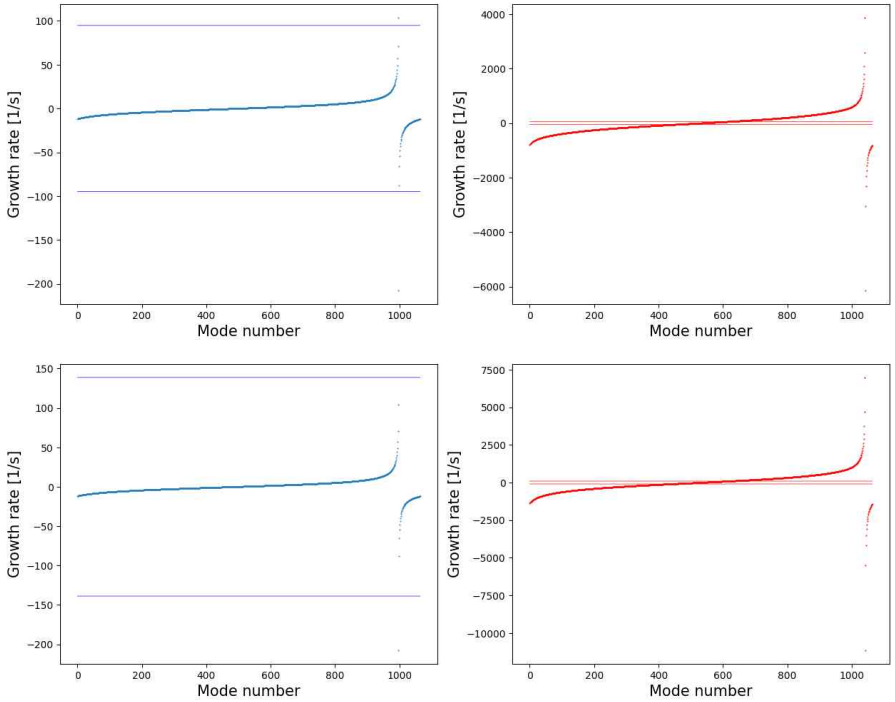
$$\Omega_\mu - \omega_\beta = -i\frac{4\pi}{Z_0}\frac{n_b N_b \gamma_0 \omega_0 c}{8\pi\gamma_0\nu_\perp}\sum_{p=-\infty}^{\infty} Z_\perp\{\omega_\beta + (\mu - n_b p)\omega_0\}, \quad \text{(수식 3.1.12.6)}$$

$$Z_\perp(\omega) = \frac{1}{\beta_\perp}\sum_{i,element}\beta_{\perp,i}Z_{\perp,i}(\omega) \quad \text{(수식 3.1.12.7)}$$

Ω_μ는 모드의 주파수, ω_β는 betatron 주파수, n_b는 저장링의 번치 개수, N_b는 번치 당 전자의 개수, r_0는 classical electron radius, ω_0는 revolution frequency, Z_0는 진공의 impedance, γ_0는 빔의 Lorentz factor, $\nu_\perp$는 transverse 방향 tune, 그리고 μ는 모드 넘버이다. (수식 3.1.12.6)의 실수 부분은 impedance에 해 이동한 주파수를 의미하고 허수부는 growth rate를 나타낸다. Transverse 방향 impedance의 경우 (수식 3.1.12.7)과 같이 각 부품의 위치에서 beta 값 ($\beta_{\perp,i}$)과 lumped impedance가 위치할 곳의 beta 값 ($\beta_\perp$)을 고려한 beta-weighted impedance이다.

<그림 3.1.12.5>는 위 수식을 사용하여 4GSR의 400 mA 빔 기준으로 ID가 전부 열렸을 때와 전부 닫혔을 때 모드 넘버에 따른 horizontal과 vertical plane growth rate를 나타낸 그림이다. ID과 open 했을 때와 close 하였을 때 horizontal current threshold가 바뀌지 않는 것은 IVU의 RW 계산에 vertical 방향 parallel한 두 개의 plate 모델을 사용하였기 때문이다. 각 그림의 실선은 저장링의 damping rate를 의미한다. ID가 모두 열렸을 때 horizontal damping time은 10.54 ms이며, vertical damping time은 19.43 ms이다. ID가 모두 닫힌 경우 horizontal damping time은 7.21 ms vertical damping time은 10.48 ms이다. RW impedance에 의한 growth rate가 저장링의 damping rate보다 크게 되면 CBMI가 발생하게 된다.

따라서 Horizontal과 vertical 방향 최대 growth rate를 저장링의 damping rate보다 작게 되는 전류는 <표 3.1.12.6>과 같이 나타나게 된다. 표에서 확인이 되듯이 vertical 방향 CBMI의 threshold가 5 mA 수준으로 매우 제한이 되어 있다. 그러나 (수식 3.1.12.7)은 모든 번치들이 rigid body를 가정하였으며, 또한 chromaticity가 0이다. 따라서 실제 상황에 비해 매우 비관적으로 바라보았을 때의 결과라고 할 수 있다. 그러므로 저장링의 chromaticity를 조정하여 RW에 의한 transverse CBMI가 발생하지 않는 값을 찾아 줄 필요가 있으며, 각 번치 내 전자들의 coherent한 frequency shift에 의해 완화되는 수준도 평가할 필요가 있다. Chromaticity를 통한 CBMI 효과를 완화할 수 있지만, life time 역시 변화하기 때문에 최적의 chromaticty로 운전하지 못할 가능성도 존재한다. 이 경우 transverse feedback system을 이용하여 CBMI를 억제할 필요가 있다. 앞에 언급된 내용들은 현재 진행 중이다.



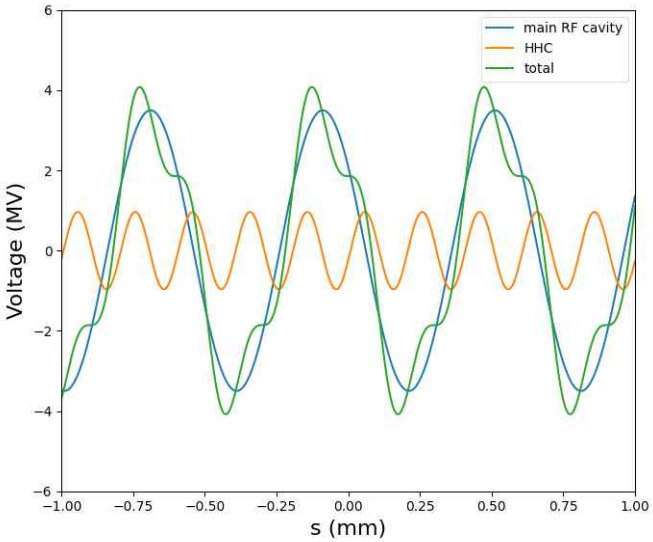
<그림 3.1.12.5> 상단과 하단 행들은 ID가 열렸을 때와 닫혔을 때의 Growth rate를 보여준다. 왼쪽 열은 horizontal 방향이며 오른쪽 열은 vertical 방향의 growth rate이다. 각 그림의 실선들은 horizontal 및 vertical 방향 저장링의 damping rate를 의미한다.

<표 3.1.12.6> RW impedance로 인해 Transverse CBMI가 발생하기 시작하는 bunch current threshold

	ID open	ID close
Horizontal	365.47 mA	534.34 mA
Vertical	5.31 mA	5.46 mA

라. Higher harmonic cavity (Bunch lengthening cavity)

4GSR에서는 emittance를 줄이기 위해 빔퍼짐(dispersion)이 작아지도록 lattice를 설계하기 때문에 momentum compaction이 작은 값을 가지고 이로 인해 bunch 길이가 짧아진다. 줄어든 emittance와 짧아진 번치길이는 bunch 내 전자들의 충돌을 더욱더 높은 확률로 일어나게 한다. 이로 인해 touschek lifetime이 짧아지고, IBS 효과에 의한 emittance 증가가 일어나고, 빔 instability가 더 쉽게 일어나게 한다. 4GSR에서의 번치길이는 4 mm로 빔물리 부분에서 언급되었듯이 15 mm 정도로 번치길이가 길어져야 좀 더 성능 좋은 4GSR을 운영할 수 있다. Higher harmonic cavity (HHC)의 옵션으로는 normal conducting 옵션과 super-conducting 옵션이 있으며 외부 RF power를 사용하는 active HHC와 beam loading을 이용하는 passive HHC가 있는데, 4GSR은 main RF system과 동일한 active system normal conducting cavity를 우선적으로 고려하고 있다. 기존 normal conducting cavity는 빔이 지나가며 발생한 HOM에 의해 심각한 빔 불안정성을 유도하지만, 4GSR은 main RF cavity와 동일하게 HOM들을 억제시켜줄 수 있는 HOM-damped cavity를 고려하고 있다. 본 TDR에서는 HHC가 NC HOM-damped cavity를 사용한다는 가정하에 기술되었다.



<그림 3.1.12.6> Bare lattice 기준 main RF 전압과 HHC 전압 그리고 전체 RF 전압

번치길이를 증가하기 위해서는 momentum compaction을 증가하거나 HHC를 설치하여 번치 길이를 증가시킬 수 있는데 momentum compaction이 증가하면 emittance도 증가하므로, 4GSR에서 번치 길이는 HHC를 사용하여 번치 길이를 늘인다. HHC는 main cavity보다 정수배가 높은 주파수를 사용하여 total voltage의 기울기를 조정하여 bunch 길이를 늘이는데 total RF voltage와 phase들은 다음과 같이 주어진다.

$$V(t) = V_{RF}\sin(\omega_{RF}t+\phi_s)+k\,V_{RF}\sin(n\omega_{RF}t+n\phi_h), \quad \text{(수식 3.1.12.8)}$$

$$k=\sqrt{\frac{1}{n^2}-\frac{1}{n^2-1}\left(\frac{U_0}{e\,V_{RF}}\right)^2}, \quad \text{(수식 3.1.12.9)}$$

$$\tan(n\phi_n) = -\frac{\frac{n\,U_0}{e\,V_{RF}}}{\sqrt{(n^2-1)^2-\left(n^2\frac{U_0}{e\,V_{RF}}\right)^2}} \quad \text{(수식 3.1.12.10)}$$

n은 HHC의 하모닉 넘버, V_{RF}와 ϕ_s는 main RF cavity의 전압과 페이즈, ϕ_h는 HHC의 페이즈, U_0는 energy loss per turn, 그리고 e는 전자의 전하량이다. 위 조건은 <그림 3.1.12.6>에서 보여주듯이 synchronous particle 주변 전압을 flat 하게 만들어 주어서 빔의 길이를 늘여주게 된다. 4GSR에서는 500 MHz의 main RF 진동수를 사용하며 HHC로는 3rd harmonics (1,500 MHz)를 고려하고 있고 이를 바탕으로 15 mm bunch 길이를 확보하기 위해 main RF cavity와 HHC의 voltage와 phase를 <표 3.1.12.7>과 같이 주어진다.

<표 3.1.12.7> Bare lattice와 ID가 포함된 SR의 경우 필요한 main RF cavity와 HHC의 전압 그리고 페이즈

	without IDs	with IDs
Main RF voltage (MV)	3.03	3.5
Main RF phase (degree)	155.95	143.33
HHC voltage (MV)	0.93	0.96
HHC phase (degree)	351.54	346.06

위 <표 3.1.12.7>의 without IDs 경우의 parameter를 적용하여 시뮬레이션을 진행하였을 경우, 기존 3.8 mm의 번치 길이는 14.5 mm 수준을 유지할 수 있었으며, fractional energy와 energy spread 또한 허용범위 내에 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 시뮬레이션에선 빔이 cavity를 지나며 발생하는 wakefield에 의한 효과가 전혀 고려되지 않았다. 대표적인 wakefield 효과로는 Robinson instability와 phase transient beam loading이 존재하며, damper에 의해 완전히 제거되지 않은 HOM에 의한 효과도 존재한다. Robinson instability는 cavity의 tuning이라는 해결책이 있으며 HOM 역시 longitudinal feedback cavity를 통해 해결이 가능한 반면, beam-loading은 bunch는 전하량과 filling pattern에 따라 bunch lengthening에 큰 영향을 주기 때문에 이와 관련된 연구는 현재 계속해서 진행 중에 있다.

참고문헌

[1] “https://gitlab.cern.ch/IRIS/IW2D”

[2] “http://www.gdfidl.de/”

[3] M. Abbott, et al, “Diamond-II Technical Design Report”

3.2 빔 안정성 (Beam stability)

3.2.1 서론 (Overall Stability Criteria)

방사광가속기에서 얻는 빛의 성능은 방사광가속기의 기존 설계 목표치에 더하여 빔 안정성이 포함되어 결정된다. 방사광가속기 이용자들이 안정적으로 측정 결과를 얻기 위해서는 빛의 세기, 빛의 위치, 빛의 편광도나 결맞음성 등의 성질 등이 일정하게 유지되어야 한다. 이를 빔 안정성이라고 하며 이를 향상시키기 위해서 가속기의 모든 부서의 노력이 필요하다. 빔 안정성에 영향을 주는 요소를 간략히 나열하면 다음과 같다.

○ 가속기 및 빔라인 장치

○ 수도 전기 등 기반 시설

○ 기계 진동

○ 온도

○ 전기 노이즈

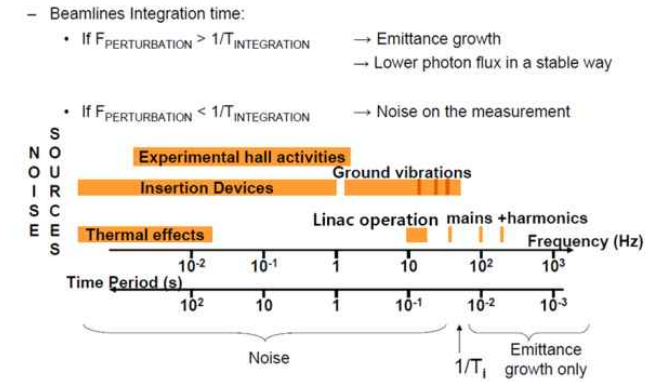
○ 지반 움직임

이러한 요소들이 이상적인 값과 다를 경우 빔 안정성에 영향을 주며, 이 차이를 error라고 통칭한다. 이러한 error는 정적인 경우도 있고 시간에 따라 변하는 경우도 있다. 또한 error는 랜덤인 경우도 있고 systematic인 경우도 있다. 이러한 error에 대한 분석은 APS-U의 정보를 토대로 하여 3.2.2 장에서 이루어질 것이다.

방사광가속기의 빔 안정화를 효과적으로 이루기 위해서는 방사광가속기의 건설 계획 단계에서부터의 준비가 필요하다. 건설 이후에 빔 안정화를 증대시키기 위해서는 active system을 통하는 방법밖에 없다. 대표적인 active system이 되먹임 장치인데 이러한 되먹임 장치를 통한 빔 안정화 증대에는 한계가 있다. 따라서 건설 계획 단계에서 빔 안정화를 최대한 고려한 설계가 필요하다. 세부적으로는 지반 조사 및 다지기, 기계 장치 설계 및 설치 시 진동 측정 및 감쇄 노력, 전력 장치 설계 및 설치 시 전류 안정성 극대화 등이 있다. 3.2.3장에서는 진동 기준 및 관리에 대해 설명할 것이다.

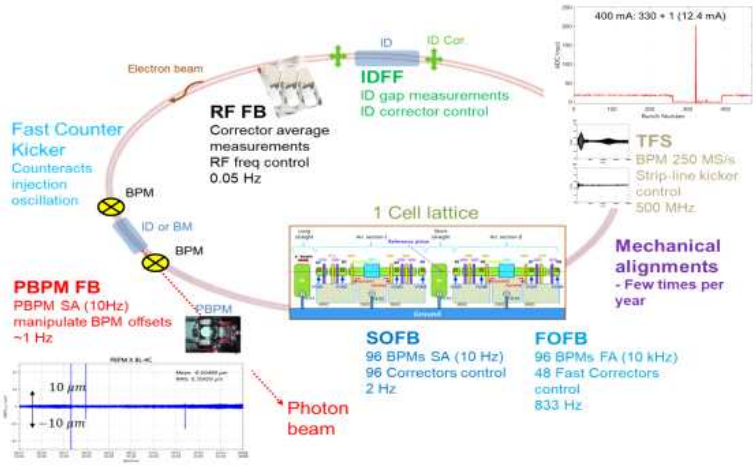
4GSR 저장링의 전자빔 크기는 기존 3GSR 저장링 빔 크기의 1/10에 불과하고 이에 따라 전자빔의 안정성 또한 그에 맞게 증가하여야 한다. 전자빔의 안정성은 크게 정적 안정성과 동적 안정성으로 나눌 수 있다. 그리고 동적 안정성은 short-term 안정성과 long-term 안정성으로 나눌 수 있다. Short-term 안정성은 0.1 Hz에서 1 kHz에 이르는 빠른 움직임의 폭이 빔 크기의 1/10이 되는 것을 목표로 한다. Long-term 안정성은 수 주 간의 전자빔 위치의 변화가 1 μm 이하가 되는 것을 목표로 한다. 정적 안정성은 장치 제작 및 정렬의 정밀도에 의해서 결정되고 동적 안정성은 전자석의 자기장 세기 안정성 그리고 기계적 진동과 지반 움직임에 의해 결정된다. 정적 안정성으로 인해 건설 및 커미셔닝 단계에서 빔 포지셔닝이 결정되며 빔 포지셔닝이 첫 커미셔닝 단계에서 빔 입사 후 몇 턴 동안 충분히 안정한 영역에 있어야 교정 자석 등을 이용한 궤도 수정으로 빔 저장을 할 수 있다. 정적 안정성은 커미셔닝 외에도 shut down 이후에 재운전 시 가속기 및 빔라인 정렬의 필요성 정도에도 영향을 미친다. 자석의 정렬 상태 또한 중요한데 전자빔이 자석의 중간을 정확하게 지나야 다중극 (multi-pole) 영향을 최소화할 수 있고 이 기준은 보통 수십 μm 정도이다.

<그림 3.2.1.1>은 노이즈 소스별 주파수 영역을 보여준다. 노이즈의 주파수가 빔라인 실험 주파수보다 높으면 빔라인에서는 빛의 세기가 저하된다고 느끼고, 노이즈의 주파수가 실험 주파수보다 낮으면 빔라인에서는 빛의 세기가 불안정하다고 느낀다. 우리는 궤도 되먹임 시스템(orbit feedback system)을 이용하여 이러한 노이즈를 DC에서부터 100 Hz까지 감쇄시킬 수 있다.

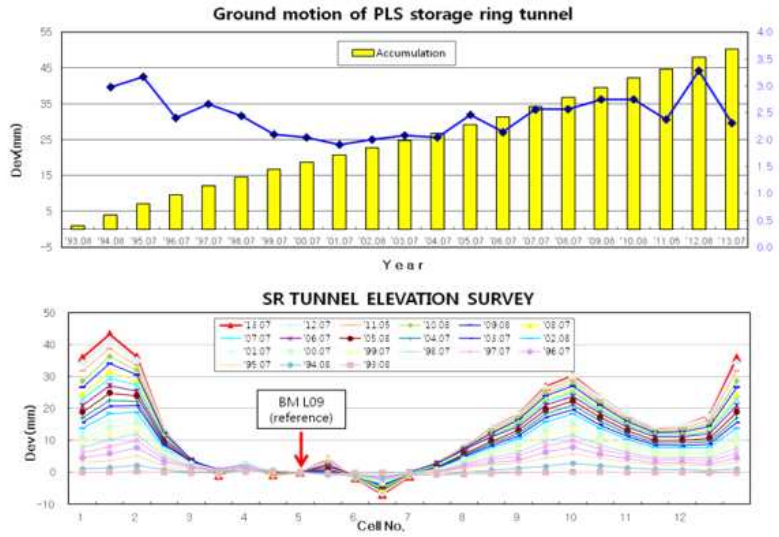


<그림 3.2.1.1> 노이즈별 주파수 대역

위에 언급한 노이즈를 상쇄하여 안정한 빔을 제공하기 위하여 여러 가지 되먹임 장치를 사용한다. <그림 3.2.1.2>는 PLS-II에서 빔 안정화를 위해 사용하는 장치들을 요약해놓은 것이다. Insertion device feedforward (IDFF)는 삽입 장치 양단에 교정 자석을 배치하여 삽입 장치의 parameter가 변화할 때 전자빔 궤도에 주는 영향을 상쇄시키는 역할을 한다. Transverse feedback system (TFS)은 전자빔의 불안정성을 제어하기 위하여 필수적으로 있어야 하는 장치이다. TFS는 전자빔의 위치를 500 MHz 속도로 읽고, 앞선 수 턴 간의 데이터를 이용하여 finite impulse response filter를 이용하여, 원 궤도를 벗어나지 않도록 매 턴마다 strip-line kicker로 궤도를 교정해 준다. Long-term drift를 줄이기 위해 지반의 변화를 측량하여 재정렬한다. <그림 3.2.1.3>에서 PLS의 연도별 지반 움직임을 확인할 수 있다. 전자빔 궤도 교정에 사용되는 교정 자석의 전류값이 너무 커지지 않도록 저장링 RF 진동수를 조절해주는 것이 RF feedback (RFFB)이다. 입사 시 빔 흔들림을 줄이기 위해 fast counter kicker가 이용된다. 전자빔 궤도가 안정하더라도 삽입 장치나 빔라인 광학장치 등의 원인으로 광자빔이 흔들릴 수 있는데, 이를 광자빔 위치 모니터링 장치로 읽고 전자빔 궤도를 수정하여 광자빔을 안정하게 유지하는 것이 photon beam position monitor feedback (PBPM Feedback)이다. 전자빔 궤도 되먹임(SOFB, FOFB)은 3.2.4장에서 설명할 것이다.



<그림 3.2.1.2> PLS-II 저장링 빔 안정화 장치들



<그림 3.2.1.3> PLS의 연도별 지반 움직임

3.2.2 빔요동 분석 (Error analysis)

가. 정적 랜덤 에러

정적 에러는 시간에 따라 변하지 않거나 연 단위의 긴 시간에 대해 변하는 에러를 통칭한다. 정적 에러에는 정렬 에러, 자석 측정 에러, 전원 교정 에러 등이 있다. 이러한 에러는 전자빔을 측정하여 확인되고 또한 교정될 수 있다. 정적 에러는 설치 후 한 번 발생하는 initial 에러가 있는가 하면 자석 전원처럼 장기간 껐다가 다시 켤 때 발생하는 reproducibility 에러가 있다. 다음 <표 3.2.2.1>에서 다양한 parameter에 대한 initial 에러와 reproducibility 에러의 목푯값을 정리하였다. Initial 에러의 목표치는 원활한 시운전(commissioning)을 위해 필요한 값으로 제시하였고 reproducibility 에러의 목표치는 shut down 이후 큰 교정 없이 운전을 재개할 수 있는 값으로 설정하였다. 이 값은 각 장치의 에러 tolerance를 구할 때 고려되어야 한다.

<표 3.2.2.1> Parameter 별 initial 에러 및 reproducibility 에러의 목표치

Parameter	Initial 에러 목표치	Initial 에러에 영향을 주는 자석	Reproducibility 에러 목표치	Reproducibility 에러에 영향을 주는 자석
전자빔 에너지	5 MeV	휨 자석	0.5 MeV	휨 자석
전자빔 궤도	3 mm	휨 자석, 사극 자석	0.1 mm	휨 자석, 교정 자석
Betatron tune	0.1	휨 자석, 사극 자석, 육극 자석	0.01	휨 자석, 사극 자석
Beta 함수	20%	사극 자석, 육극 자석	2%	사극 자석
Chromaticity	1	육극 자석	0.1	육극 자석

(1) 전자빔 에너지 에러

전자빔 에너지는 전자빔 궤도의 둘레와 휨 자석 세기에 의해 결정되는데, 실제 장치에서는 둘레와 휨 자석 세기에 오차가 생기기 때문에 전자빔 에너지 또한 디자인 값에서 내려가게 된다. 사극 자석과 육극 자석 또한 전자빔 궤도를 바꿀 수 있다. 사극 자석과 육극 자석의 영향은 배제한 체, 휨 자석의 영향부터 살펴보면 휨 자석의 세기가 디자인 값에서 ΔB 만큼 다를 때, 전자빔 에너지는 ΔE 만큼 변한다고 하면 전자빔 궤도 한 바퀴에 해당하는 360°는 유지되므로 (수식 3.2.2.1)과 같은 식이 주어진다.

$$\frac{1}{B\rho(1+\frac{\Delta E}{E})}\left(\int Bds+\Delta BL\right)=2\pi \quad \text{(수식 3.2.2.1)}$$

여기서, L은 세기가 변한 휨 자석의 길이이다. (수식 3.2.2.1)을 이용하여 전자빔 에너지의 변화를 휨 자석의 전류 에러 ΔI로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta E}{E}=\frac{\Delta\alpha}{2\pi}=\frac{\alpha}{\pi}\times\frac{\Delta I}{I} \quad \text{(수식 3.2.2.2)}$$

여기서 α는 휨 자석의 디자인 휨 각이며, $\Delta\alpha=\Delta BL/B\rho_0$이다. 저장링의 여러 휨 자석의 영향을 합친 식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2_{rms}=\sum\left(\frac{\alpha_i}{2\pi}\right)^2\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2_{rms_i} \quad \text{(수식 3.2.2.3)}$$

여기서 α_i는 한 전자석 전원에 연결된 모든 휨 자석의 휨 각을 나타낸다. 따라서 전자석 전원을 series로 연결하는 경우 개별 연결보다 휨 자석 전원 에러에 의한 전자빔 에너지 민감도가 크다. 만약 각각 α_1만큼의 휨 각을 가지는 휨 자석 N개가 전원에 개별 연결되어 있을 때 에너지 변화에 주는 영향은 $\sqrt{\sum\alpha_1^2}=\sqrt{N}|\alpha_1|$에 비례하지만, 전원에 series로 연결된 경우 그 영향은 $\alpha=N|\alpha_1|$에 비례한다.

위 경우는 휨 자석의 error만을 가지고 이론적으로 접근해 본 것이다. 현실적으로는 사극 자석과 육극 자석의 error까지 포함하여 시뮬레이션 코드를 통해 에러의 영향을 확인하여야 한다. 또한 이러한 에러 영향을 교정 자석 등을 이용하여 상쇄시키는 시뮬레이션도 수행하여야 한다.

(2) 전자빔 궤도 에러

전자빔 궤도의 initial 에러는 휨 자석의 세기와 종 방향 정렬 에러 및 사극 자석의 횡 방향 정렬 에러에 의해 발생한다. 그리고 shut down 후 재운전 시 발생하는 전자빔 궤도의 에러는 휨 자석과 교정 자석 전원의 reproducibility 에러에 의해 생긴다. 자석 에러에 의해 발생하는 전자빔 궤도 에러는 증폭 인자 F로 표현할 수 있고 이는 자석 세기 에러에 대한 궤도 에러의 비율이다. 이 증폭 인자는 저장링 격자구조와 자석의 위치, 자석 위치와 측정 위치의 betatron 위상차 등에 의해 결정된다. 휨 자석 정렬 에러, 전자석 전원 에러, 사극 자석 정렬 에러는 독립적으로

영향을 준다. 따라서 전자빔 궤도 에러는 각각의 에러의 영향을 모두 구한 뒤 이를 합하여 얻을 수 있다. 이를 정리하면 (수식 3.2.2.4)와 같다.

$$\Delta X_{rms}^2 = \beta \sum_{dipole} \left(F_{dip_{str}}\right)_i^2 \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)_{rmsi}^2 + \beta \sum_{dipole} \left(F_{dip_z}\right)_u^2 z_{rmsi}^2 + \beta \sum_{quad} F_{quad}^2 u_{rmsi}^2 + \beta \sum_{cor} F_{cor}^2 (\Delta\theta)_{rmsi}^2 \quad \text{(수식 3.2.2.4)}$$

여기서 β는 측정 위치에서 beta 함수이며, α와 θ는 각각 휨 자석과 교정 자석의 휨 각, z는 휨 자석의 종 방향 정렬 오차, u는 사극 자석의 횡 방향 정렬 오차이다. 사극 자석의 정렬 오차는 실제로는 거더의 정렬 오차와 거더 위에서의 각각의 사극 자석의 정렬 오차로 나뉜다. (수식 3.2.2.4)를 가지고 정렬 tolerance를 구하면 사극 자석의 정렬 오차 tolerance가 비현실적으로 나오게 된다. 따라서 single-turn 궤도 교정을 통해 closed-orbit을 만드는 과정을 추가하여 이 tolerance를 더 키워야 한다.

(3) Betatron tune 에러

Betatron tune 에러는 사극 자석 세기, 전자빔 에너지, 육극 자석 내의 전자빔 궤도 에러로 생긴다. 시운전 단계에서는, 전자빔 궤도 에러가 크면 육극 자석의 중앙으로 빔이 지나가지 않으므로, 이로 인한 betatron tune 에러가 가장 크게 된다. 이 영향을 식으로 나타내면 (수식 3.2.2.5)와 같다.

$$\delta\nu_{rms}^2 = \left(\frac{1}{4\pi}\right)^2 \sum (\beta_i K_2 L_i u_i)^2 \quad \text{(수식 3.2.2.5)}$$

여기서 β_i는 i번째 육극 자석에서의 beta 함수, L_i는 i번째 육극 자석의 길이, u_i는 i번째 육극 자석에서의 횡 방향 전자빔 궤도 에러이다. APS-U의 경우, (수식 3.2.2.5)를 계산해보면, 1 mm의 전자빔 궤도 에러에서 betatron tune이 0.9 정도로 크게 바뀌게 된다. 따라서 커미셔닝 단계에서 single-turn 궤도 교정 이후에 곧바로 betatron tune 교정이 이어져야 한다. 비록 커미셔닝 단계 초반부터 betatron tune 교정이 이루어지긴 하지만, 사극 자석과 휨 자석이 betatron tune 에러에 미치는 정도를 제한할 필요가 있다. 사극 자석의 세기 에러 δK_1이 betatron tune 에러에 미치는 영향은 (수식 3.2.2.6)과 같다.

$$\delta\nu_{rms}^2 = \left(\frac{1}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{\delta K_1}{K_1}\right)_{rms}^2 \sum N_i (\beta_i K_1 L_i)^2 \quad \text{(수식 3.2.2.6)}$$

여기서 K_1은 사극 자석의 gradient, N_i는 i번째 사극 자석의 개수, β_i는 i번째 사극 자석에서의 beta 함수, L_i는 i번째 사극 자석의 길이이다. 이극 자석의 경우 앞서 보았듯 전자빔 에너지 에러에 영향을 주는데 이 에너지 에러가 chromaticity에 따라 betatron tune을 변화시킨다. 이는 간단히 $\Delta\nu = \xi \Delta E/E$로 표현된다. 여기서 ξ는 natural chromaticity이다. APS-U의 경우 계산되는 initial 에러 목표치 0.1을 달성하기 위한 사극 자석과 이극 자석 에러의 tolerance는 각각 $\Delta K_1/K_1 = 3\times10^{-3}$, $\Delta\alpha/\alpha = 1.2\times10^{-3}$ 이다. 여기서 α는 휨 자석의 휨 각이다. Reproducibility 에러는 initial 에러 목표치의 1/10로 한다.

(4) Beta 함수 에러

Beta 함수 에러는 사극 자석 에러와 육극 자석 내 전자빔 궤도 에러로 생긴다. 커미셔닝 단계에서는 betatron tune과 마찬가지로 육극 자석 내 전자빔 궤도 에러로 인해 주로 생기며 궤도 교정을 통해 20% 수준으로 beta 함수 에러를 줄이는 것을 목표로 한다. LOCO를 통해 추가적으로 교정할 수 있다. Reproducibility 에러는 initial 에러 목표치의 1/10로 한다.

(5) Chromaticity 에러

Chromaticity 에러는 육극 자석 에러와 저장링 격자 에러로 인해 발생한다. Chromaticity 에러는 커미셔닝 초반에 single-turn 단계에서는 매우 큰 값이지만 궤도 교정 이후에는 한 자리 숫자로 줄어든다. 육극 자석 세기 에러로부터 변경되는 chromaticity 또한 한 자리 숫자를 목표로 한다. Reproducibility 에러는 그의 1/10로 한다.

나. 정적 Systematic 에러

정적 systematic 에러에는 장치 설계 및 필드 측정, 설치, 정렬 과정에서 오는 에러가 해당한다. 만약 사극 자석의 길이가 디자인 값과 다를 경우, 해당 사극 자석의 자기장 값의 적분값은 전원의 전류값을 조정하여 디자인 값으로 맞출 수 있다. 하지만, 적분값을 맞췄다고 해도 사극 자석의 길이가 달라지므로 이는 격자구조에 영향을 미친다. 그리고, 이는 자석을 교체하지 않는 한 교정되지 않으므로, systematic 에러를 고려하여 적정한 tolerance를 규정하고 이에 맞는 자석 설계를 하는 것이 중요하다. 사극 자석의 systematic 에러를 시뮬레이션에 적용하여 betatron tune 변화를 계산할 수 있는데, APS-U의 경우 만약 사극 자석의 길이를 1% 짧게 했다고 가정했을 시 각각의 사극 자석별로 betatron tune을 0.009~0.128까지 변화시킴을 확인하였다. 그 결과 betatron tune의 에러 목표치 0.1을 달성하기 위해서 사극 자석 길이 정확도를 0.3%로 설정하였다.

다. 동적 에러

동적 에러는 시간에 따라 변하는 에러를 통칭한다. 동적 에러의 특징은 이를 측정하여 실시간으로 보정할 수 있다는 것이다. 전자빔 궤도의 경우 동적 에러를 보정하는 것이 orbit feedback system이다. 따라서 동적 에러에 대한 tolerance를 정할 때는 이러한 교정 시스템의 영향까지 포함하여야 한다. 이를 포함하지 않으면 현실적으로 달성하기 힘든 tolerance가 결정될 수 있다.

(1) 전자빔 궤도 에러

동적 에러 중 대표적인 것이 전자빔 궤도 에러인데, 이는 곧 전자빔 궤도 안정성과 연결된다. 전자빔 궤도의 안정성은 곧 광자빔의 안정성과 연결되어 방사광 실험 결과의 질과 직결된다. 빔 궤도 안정성은 long-term 안정성(DC to 0.1 Hz)과 short-term 안정성(0.1 Hz to 1 kHz)으로 주로 나누어 관리한다. 앞선 <그림 3.2.1.1>에 빔 궤도 안정성에 영향을 주는 노이즈가 주파수에 따라 나열되어 있다. 앞서 서술하였듯이, 통상 저장링에서 빔 궤도 안정성은 전자빔의 횡 방향 rms 크기의 1/10을 목표로 한다. 이는 3GSR 저장링에서는 진동 저감과 fast orbit feedback을 이용하여 충분히 달성할 수 있지만, 4GSR 저장링으로 오면서 전자빔 크기가 1/10 줄어들어 수직 방향으로는 달성하기 힘든 수치가 되었다. 따라서 APS-U와 마찬가지로

전자빔 사이즈 안정성의 목표를 DC에서 1 kHz까지 수평 방향으로는 전자빔 크기의 1/10을 목표로 하고, 수직 방향으로는 1 μm를 목표로 한다.

대부분의 방사광 실험자는 단일 전자빔 뭉치에서 나오는 방사광으로 실험 결과를 얻지 않고 한 턴 이상의 방사광을 누적시킨 데이터를 실험 결과로 삼는다. 따라서 이는 전자빔 위치의 변화가 방사광 실험자 입장에서는 방사광의 크기가 커진 것으로 영향을 받게 된다. 전자빔 궤도 안정성은 주로 전자석 전원장치의 전기 노이즈와 자석의 진동으로부터 영향을 받게 된다. 동적 에러에 대한 tolerance를 구하기 위해서는 각 노이즈의 주파수 특성을 파악할 필요가 있다. 전자빔 움직임은 크게 세 원인으로 생긴다 (전자석 전원 노이즈, 자석 진동, 그리고 전자빔 위치 모니터의 진동). 이 중 전자빔 위치 모니터의 진동은 실제 전자빔의 움직임은 아니지만, orbit feedback에 의해서 교정 자석의 전류값의 변화를 초래하는 방식으로 실제 전자빔 위치를 이동시킨다.

각각의 노이즈 원인은 여러 전달 과정을 통해 실제 방사광 실험에 영향을 미친다. 만약 특정 교정 자석의 전기 노이즈에 의해 전자빔의 휨 각이 생길 경우를 고려한다. 먼저 전기 노이즈가 자기장 변화를 발생시키면, 이는 진공 챔버를 지나면서 감쇄되고 또한 delay가 생긴다. 이 변화된 자기장이 결국 전자빔에 kick을 발생시키는데 이는 저장링 격자구조에 의해 증폭되어 저장링 전체에 영향을 준다. 이에 따라 변화된 전자빔 궤도는 orbit feedback에 의해 일정량 원상복구 되며 이 과정이 방사광 이용자의 실험 결과 데이터에 고스란히 기록된다. 마찬가지로 자석 진동, 전자빔 위치 모니터의 움직임 등도 비슷한 과정을 통해 방사광 실험에 영향을 미치고, 우리는 각 단계별 특성을 파악하여 대응하여야 한다. 예를 들어 바닥 진동은 거더 등을 거쳐 자석 진동으로까지 전달되는 동안 증폭되는데, 이를 실제 측정하고 또 감쇄시키는 노력이 필요하다.

삽입 장치의 parameter 변화에 따라서도 전자빔의 위치가 변화하는데 이는 주로 fast orbit feedback에 의해 효과적으로 상쇄되어왔다. 하지만 4GSR 저장링의 더 작은 전자빔 사이즈를 고려하여 삽입 장치의 영향 또한 새로이 관리되어야 할 것이다.

(2) Betatron tune 에러

정적 betatron tune에 더하여 사극 자석과 휨 자석의 전원의 노이즈 및 육극 자석 내 전자빔 궤도의 에러로 인해 동적 betatron tune 에러가 발생한다. 사극 자석과 휨 자석의 영향은 기본적으로 가. 정적 랜덤 에러 항목에서 다뤘던 내용과 같지만, 동적 에러의 경우 진공 챔버를 지나면서 감쇄되는 것을 고려하여야 한다. APS-U의 경우 0.77의 감쇄 상수를 가진다.

또한 육극 자석 전원의 노이즈도 betatron tune을 변화시킨다. 이 효과는 육극 자석 내 전자빔의 횡 방향 위치에 에러가 있을 때 발생한다. 이 효과의 크기는 보통의 경우 사극 자석이나 휨 자석의 경우보다 훨씬 크다. 이 효과를 줄이기 위해서는 무엇보다 육극 자석 내 전자빔의 횡 방향 위치를 육극 자석의 정중앙에 잘 정렬시키는 것이 중요하다. 그 후 각 전자석 전원장치의 tolerance를 정하고 관리하여야 한다. 육극 자석 전원의 노이즈가 betatron tune을 변화시키는 것과 같은 이유로 육극 자석 내 전자빔 궤도의 에러 또한 betatron tune을 변화시키는데, 전자빔 궤도가 전자빔 사이즈의 1/10 이내 혹은 1 μm로 관리되고 있을 때 betatron tune 변화를 계산하여 총 betatron tune 에러 관리에 포함하여야 한다.

이렇게 발생하는 betatron tune 에러는 betatron tune feedback을 통하여 상쇄시키게 되는데 betatron tune feedback은 사극 자석의 전원을 제어하여야 하고 이는 느린 속도로 제어된다.

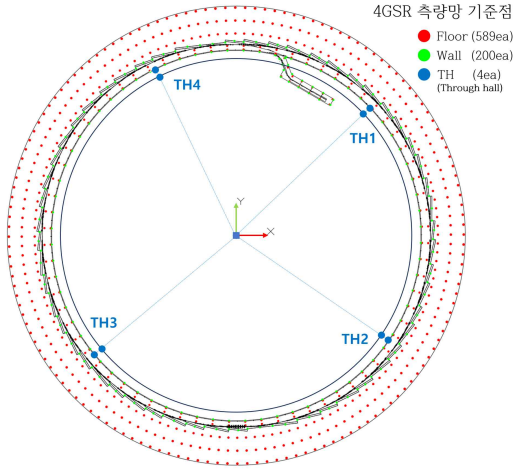
3.3 정밀측량 및 정렬 (Precision Survey and Alignment)

3.3.1 정밀측량 및 정렬

4GSR의 주요 장치들은 높은 정렬 정확도로 설치되고 유지되어야만 최고의 성능을 발휘할 수 있는 최첨단 가속기이다. 가속기를 연속적이고 안정적으로 운영하기 위해서는 설계하는 기초단계에서부터 측량 및 정렬을 기반으로 장치 설치 계획이 검토되어야 한다. 본 보고서는 4GSR 건설을 위해서 정밀 측량 및 정렬 장비의 구축, fiducial 설치, 주요 장치 정렬, 측량망 및 모니터링 장치와 소요 인력 등에 관하여 기술하였다.

가. 측량 기준 좌표계 (Survey Reference Coordinate)

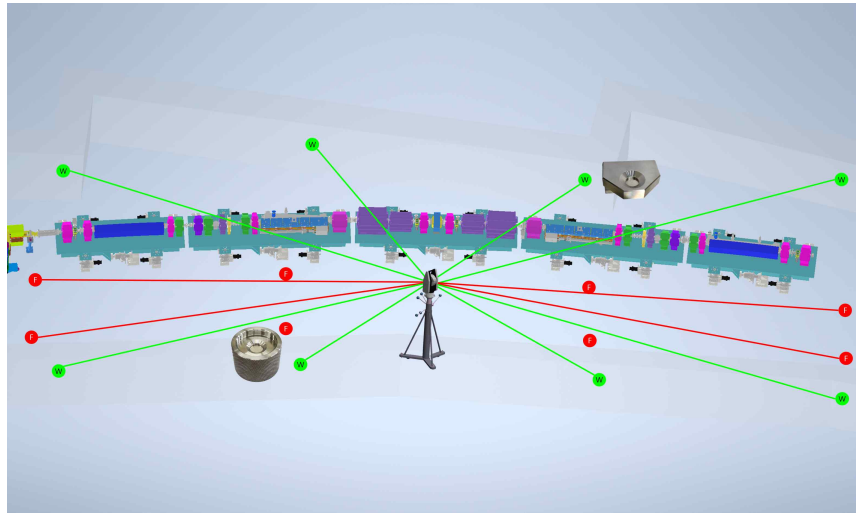
특정 공간에 임의의 장치를 원하는 지점에 위치시키기 위해서는 특정 공간에 대한 측량 좌표를 정의하고 물리적인 좌표축을 설정하여야 한다. 방사광가속기의 경우 MPS, controller rack, modulator, klystron 등이 설치되는 갤러리와 가속관이 설치되는 선형가속기 터널, 그리고 전자석과 삽입 장치, 진단장치 등이 설치되는 저장링, 실험 장치들이 설치되는 빔라인에 대하여 각 구간의 공간 크기를 고려하여 아래 <그림 3.3.1.1>과 같이 측량망을 구축한다.



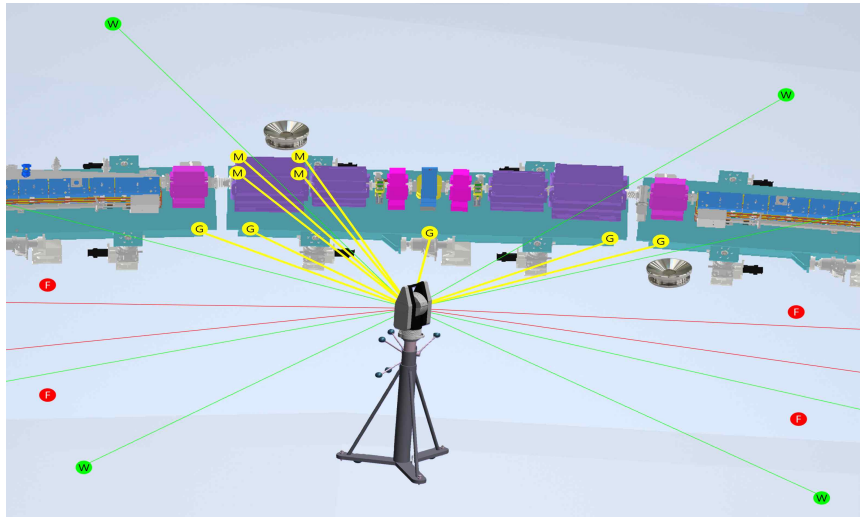
<그림 3.3.1.1> 4GSR 측량망 구성

기본적으로 측량망은 피 측정물을 충분히 커버할 수 있도록 넓게 구축하여야 오차를 최소화한다. 선형가속기, 저장링은 물론 빔라인 장치까지 완벽하게 측정할 수 있도록 4GSR 측량망을 구성하였다. 전체 기준 좌표계를 위와 같으며 저장링 원점이 (0, 0, 0)이 되며, 참고로 4GSR 바닥의 높이는 GL (ground level) 156.3 m이다. 오른손 좌표계로 정하여 기계 캐드 좌표계와 통일하면 장치팀과 좌표정보를 교환할 때 혼란이 없다.

측량 기준 프레임을 형성하기 위하여 벽면과 바닥면에 측량점을 설치한다. <그림 3.3.1.2>와 <그림 3.3.1.3>은 4GSR 측량기준점 측량망 구축 상세와 장치 측정 개념도이다. 측량망은 그 구역의 특성을 고려하여 각 기준점의 간격과 높이, 너비 등을 설정 후 전 구간에 걸쳐 설치한다. 저장링 바닥에는 두 줄로 10 m 간격으로, 벽면에는 높이 1.8 m, 간격 10 m 정도로 측량망을 구축한다. 간격은 10 m를 기준으로 건물과 장치의 배열에 따라 가감한다. 장치 측량기준점은 시준이 용이하도록 대부분 장치의 상면 모서리에 설치한다. 위치정보를 표현하기 위해서는 3점이면 충분하나 만일에 발생하는 기준점 손상 및 오류를 방지하기 위하여 4개를 설치하며 정밀도 향상에도 도움이 된다. 아래 그림에서 F는 바닥(floor), W는 벽(wall) 기준점, M은 전자석(magnet), G는 거더(girder) 측량기준점을 각각 표시한 것이다.



<그림 3.3.1.2> 4GSR 측량망 구축 상세 개념도



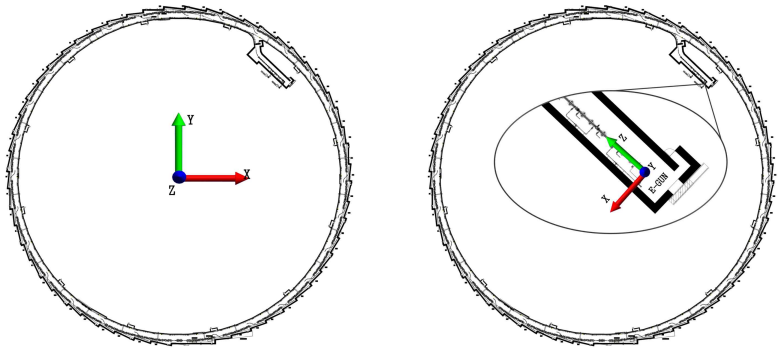
<그림 3.3.1.3> 장치 측정 개념도

나. 절대 위치화 (Absolute Positioning)

일반적으로 글로벌 좌표계라고 일컫는 global reference grid에 가속기 장치를 위치시키는 것을 말한다. 가속기와 빔라인 구성 장치의 절대 위치는 측량 및 정렬의 중요한 데이터베이스 기준이 되기 때문에 상대 위치와 함께 주의 깊게 관측해야 하는 측량 자료이다.

다. 상대 위치화 (Relative Positioning)

방사광가속기를 구성하는 장치를 정밀 정렬 시 절대 위치화와 함께 반드시 고려되는 정렬 기법으로써 서로 인접한 장치 간의 로컬 공차(local tolerance)를 허용하여 상대적으로 구성 요소들을 정렬하는 것을 의미한다. 각 구간의 장치들의 상대 위치 오차를 설정한 다음 이에 맞게 정밀 정렬을 진행하여야 빔의 안정화를 높일 수 있다. <그림 3.3.1.4>는 global coordinate (a)와 local coordinate (b)를 나타내며 (a)는 저장링 중심을 원점으로 오른쪽이 X(+), 중력 반대 방향이 Z(+) 그리고 나머지가 Y(+)이며, (b)는 빔 진행 방향이 Z(+), 중력 반대 방향이 Y(+) 그리고 빔 진행 방향 왼쪽이 X(+)이다. 모두 오른쪽 좌표계를 사용한다. Global coordinate 좌표계를 두고 또 하나 local coordinate를 사용하는 이유는 정렬 업무에는 빔 진행 방향에 대하여 장치가 얼마나 틀어져 있는지 표현해야 이해가 쉽고 다른 장치팀과 정보 교환에도 유리하기 때문이다. 최종 정렬 작업 및 정렬 결과를 표시할 때도 local coordinate를 사용한다.



<그림 3.3.1.4> Global coordinate (a)와 Local coordinate (b)

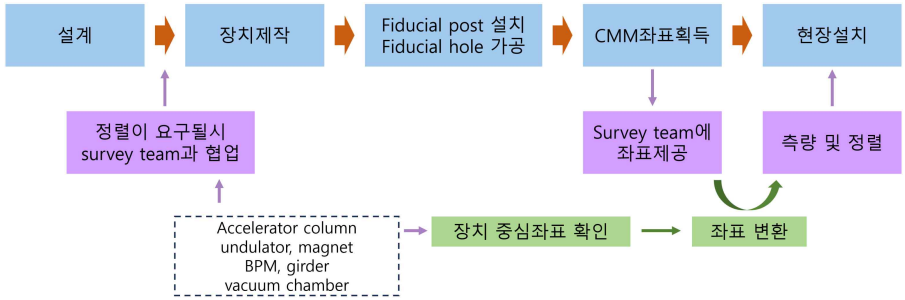
라. 레이아웃 기준 프레임 (Layout Reference Frame)

빔물리 차원에서 방사광가속기는 lattice coordinate system에 의해 디자인되고, 각 장치들의 공간적인 위치는 이 좌표시스템에 따라 정의된다. 이러한 관점에서 가속기를 구성하는 장치들의 공간적인 위치와 장치의 중심좌표를 조합하여 생성한 것을 레이아웃 기준 프레임이라고 하며, 이러한 레이아웃 기준 프레임을 특정 공간에 위치시키기 위해서는 특정 공간의 측량 기준 프레임과 연관하여 좌표 회전, 좌표변형 등의 과정을 진행한다.

마. 피듀샬리제이션 (Fiducialization)

Fiducialization은 각 장치의 기계적 혹은 전기적, 자기적인 중심점이나 중심선을 측정하여 각 장치들의 외부에 설치되어 있는 fiducial point에 그 좌표정보를 옮겨 놓는 작업이다. 즉 레이아웃 기준 프레임에 장치를 설치할 수 있도록 장치의 측량점과 기준점을 연관시키는 것이다. 정밀 측량 및 정렬이 필요한 가속관, 전자석, 진공 용기, BPM 및 기타 광학장치 등 정밀한 장치들은 반드시 이 작업 과정을 거쳐야 한다. Fiducialization 업무는 설계단계에서부터 정렬 업무를 수행하는 부서와 협의를 하여 장치의 fiducial 종류, 위치, CMM 좌표측정, 현장 설치, 정밀 정렬에 이르기까지 전체 공정을 효율적으로 진행하여야 한다.

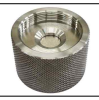
<그림 3.3.1.5>에는 fiducialization 업무 흐름을 표시하였다. 예를 들어 개별 전자석 위치의 좌표 중심, 높이와 방향을 결정한 후 fiducialization 과정을 거쳐 획득한 측량기준점 좌표를 이용하여 전체 좌표계에 장치를 위치하여 개별 좌표를 표시한다. 이 좌표는 장치팀과 정렬 전문가가 함께 공유하고 설치 기간은 물론 장치 운영 기간에도 계속 사용한다. 전자석은 특별히 기계 중심을 구한 후 다시 자장 중심을 측정하는 단계(magnet field measurement)를 거쳐 보정된 최종 좌표를 구하여 측정 및 정렬에 사용한다. 전자석 장치 fiducial 수량을 살펴보면 4GSR LINAC 및 LTB에서 주요 전자석이 30개, Booster 및 BTS 구간에서 주요 전자석이 515개, Synchrotron 구간에서 주요 전자석이 1,120개를 포함하면 모두 1,665개의 전자석이 사용되는데, 한 개의 전자석에 평균 4개의 fiducial이 설치되므로 6,912개가 필요하다.



<그림 3.3.1.5> Fiducialization 업무 흐름도

<표 3.3.1.1>은 fiducialization의 타입별 모양, 크기 및 설치 장치 구분표이다. 진공 용기 같은 경우에는 두께가 얇고 자성 간섭이 우려되므로 접시 타입을 설치하기 어려운 경우가 많으며 이 경우에는 측정 시준이 양호한 위치를 선정하여 직접 구멍을 뚫어 fiducial의 기능을 대신한다.

<표 3.3.1.1> 장치에 따른 fiducial 종류

장치	타입	크기	비고
Magnet, girder	 Dish type	⌀34.0, H: 12.3 mm	-
Magnet, girder, BPM chamber, strong back	 1/4" hole	1/4" drilling hole	-
Wall structure	 Wall type	L: 60.0 mm W: 46.0 mm H: 41.0 mm	-
Building floor	 Floor type	⌀50.0, H: 35.0 mm	-
Magnet, girder	 Cone type	⌀25.0, H: 19.0 mm	자성 영향에 민감한 장치에 설치

<표 3.3.1.2>에 전자석의 구역별 타입 및 fiducial 상세 수량을 정리하였다. 주요 장치 중에서 정렬이 요구되는 장치들은 모두 fiducial을 설치하여야 한다.

<표 3.3.1.2> 전자석의 설치 구역별 타입 및 fiducial 수량

LINAC, LTB magnet summary

Magnet Type	Magnet Name	Total	Fiducial
Accelerating column	LIACC1	1	6
	LIACC2	1	6
	LIACC3	1	6
	LIACC4	1	6
	LIACC5	1	6
	LIACC6	1	6
total		6	36
Quadrupole, Quadrupole + Corrector	LIQ1	1	4
	LIQ2	1	4
	LIQ3	1	4
	LIQ4	1	4
	LIQ5	1	4
	LIQ6	1	4
	LIQ7	1	4
	LIQ8	1	4
	LIQ9	1	4
	LIQ10	1	4
	LIQ11	1	4
	LIQ12	1	4
	LIQ13	1	4
	LIQ14	1	4
	LIQ15	1	4
	LIQ16	1	4
	LIQ17	1	4
	LIQ18	1	4
	LIQ19	1	4
total		19	76
Bending magnet	LIBM1	1	4
	LIBM2	1	4
	LIBM3	1	4
	LIBM4	1	4
total		4	16
Septum	LISEP	1	4
total		1	4

Booster ring magnet summary

Magnet Type	Magnet Name	Total	Fiducial
Combined magnet	BD1	4	16
	BD2	56	224
total		60	240
Quadrupole	QD1	4	16
	QF1	4	16
	QF2	4	16
	QF3	54	216
	QK1	4	16
	QK2	26	104
total		96	384
Sextupole	SF	30	120
	SD	30	120
total		60	240
Sextupole + Slow corrector	S31U	28	112
	S32U	28	112
	S33U	28	112
	S33D	28	112
	S32D	28	112
	S31D	28	112
total		168	672
Corrector	CHV	116	464
total		116	464

BTS magnet summary

Magnet Type	Magnet Name	Total	Fiducial
Combined Bending	BD1	1	4
total		1	4
Bending Magnet	BTSBM1	1	4
	BTSBM2	1	4
total		2	8
Septum	BTSEP1	1	4
	BTSEP2	1	4
	BTSEP3	1	4
	BTSEP4	1	4
total		4	16
Quadrupole	BTSQ1	1	4
	BTSQ2	1	4
	BTSQ3	1	4
	BTSQ4	1	4
	BTSQ5	1	4
	BTSQ6	1	4
	BTSQ7	1	4
	BTSQ8	1	4
total		8	32

SR magnet summary

Magnet Type	Magnet Name	Total	Fiducial
Longitudinal Gradient Bending Magnet	LGBM1U	28	168
	LGBM2U	28	168
	LGBM2D	28	168
	LGBM1D	28	168
	Spare part	8	48
total		120	720
Center Bend	CB	28	112
	Spare part	2	8
total		30	120
Quad-Bend and Reverse Bend	DQ31U	28	112
	DQ32U	28	112
	DQ51U	28	112
	DQ52U	28	112
	DQ52D	28	112
	DQ51D	28	112
	DQ32D	28	112
	DQ31D	28	112
	Spare part	16	64
total		240	960
Octupole Magnet	O31U	28	112
	O31D	28	112
	Spare part	4	16
total		60	240
Fast-Slow Corrector	C1U	28	112
	C2U	28	112
	C2D	28	112
	C1D	28	112
	Spare part	8	32
total		120	480
Sextupole + Slow corrector	S31U	28	112
	S32U	28	112
	S33U	28	112
	S33D	28	112
	S32D	28	112
	S31D	28	112
	Spare part	12	48
total		180	720
Quadrupole	QHU1	2	8
	QHU2	2	8
	QHU3	2	8
	QHU4	2	8
	Q11U	26	104
	Q12U	26	104
	Q31U	28	112
	Q32U	28	112
	Q51U	28	112
	Q52U	28	112
	Q52D	28	112
	Q51D	28	112
	Q32D	28	112
	Q31D	28	112
	Q12D	26	104
	Q11D	26	104
	QHD4	2	8
	QHD3	2	8
	QHD2	2	8
	QHD1	2	8
	Spare part	26	104
total		370	1,480

4GSR magnet	Total	Fiducial
	1,665	6,912

3.3.2 정밀 측량 장비 구축 및 정렬팀 구성

가. 측량 장비 (Measurement Equipment)

4GSR 장치를 설치, 정렬하기 위한 측량 장비로는 Laser tracker, Total station, Optical tooling, Digital level 및 분석 소프트웨어 SA 등이 있다. 4GSR 건설에 사용될 주요 장비의 목록은 <표 3.3.2.1>에 기술하였다. 가장 많이 사용하는 대표적인 장비 중의 하나로 Laser tracker system은 최신의 비접촉식 3차원 측정 시스템의 하나로서 거리를 정밀하게 측정할 수 있는 laser interferometer와 연직, 수평 각도를 측정하는 엔코더를 이용하여 관측한 각각의 각도 정보를 온라인으로 컴퓨터에 전송하여 좌표 설정 및 변환, 형상 해석, 오차 분석 등으로 구성된 프로그램으로 피 측정물의 3차원 공간상에서의 위치를 결정한다. 4GSR 장치 조립을 위한 정렬 및 단위 기계장치의 형상 측정, 기준지표의 위치 측정 등 가장 많이 사용될 장비이다. <그림 3.3.2.1>은 4GSR과 유사한 장치를 보유한 연구소의 정렬팀에서 주로 사용하는 장비이며, <그림 3.3.2.2>는 Laser tracker를 사용하여 포항가속기의 PLS-II 저장링에서 삽입 장치를 측정하는 사진이다.

<표 3.3.2.1> 측량 및 측정 주요 장비

장치	측정 범위	측정 정밀도		용도
Laser tracker A	0~15 m (max. 60 m)	Ux,y,z = ± 15 μm + 6 μm/m		Network Measurement, Alignment
Laser tracker B	1.5~15 m (max. 80 m)	Ux,y,z = ± 15 μm + 6 μm/m		Network Measurement, Alignment
Theodolite Total station	1.5~100 m (max. 600 m)	Angular	0.15 mgon (0.5″) (0.1 mm/40 m)	Network Measurement, Axis-Alignment
		Distance	0.2 mm + 2 ppm (0.3 mm/40 m)	
Theodolite	0.5~20 m	Angular	0.15 mgon (0.5″) (0.1 mm/40 m)	Axis-Alignment, Auto Collimation
Precision Level A	1.6~10 m	± 0.3 mm/km (Optical/Analog)		Network Measurement, Height transfer
Precision Level B	5~10 m	± 0.3 mm/km (Barcode/Digital)		Network Measurement, Height transfer



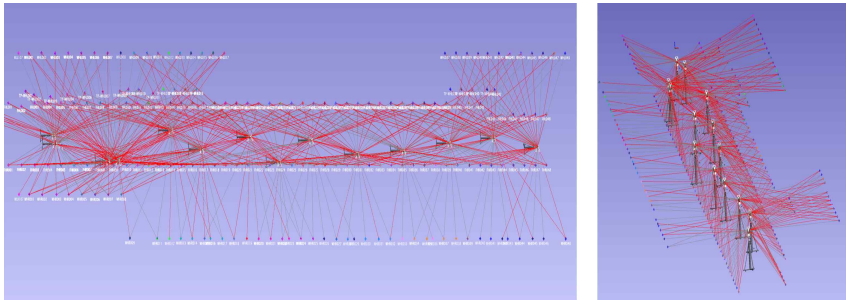
<그림 3.3.2.1> Laser Tracker 및 Precision Level



<그림 3.3.2.2> Laser tracker를 통한 ID 측정 사례 (PLS-II)

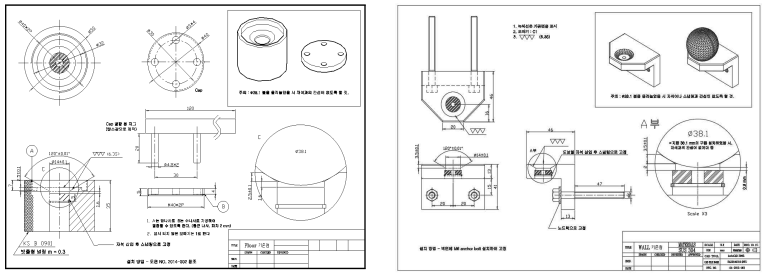
나. 측량망 구축 (Surveying Network)

가속기 저장링 터널에서는 평균적으로 8~12 m 간격의 측량망을 구성하는데, 4GSR 장치의 정렬 정밀도가 높아지면 간격이 촘촘할 필요가 있다. <그림 3.3.2.3>은 PAL-XFEL 터널 측량망 측량을 나타낸 것으로 보통 한 단면에 4개의 측량점을 구성하는데, 바닥에 2개, 좌우 벽에 2개로 설치하며, 아래와 같이 측점을 중첩하여 측정함으로 정밀도를 향상시킨다. 빔라인 측량망은 저장링보다 약 2~3배 정도 길게 설치하며 빔라인 장치가 놓이는 공간을 고려하면서 구성한다.

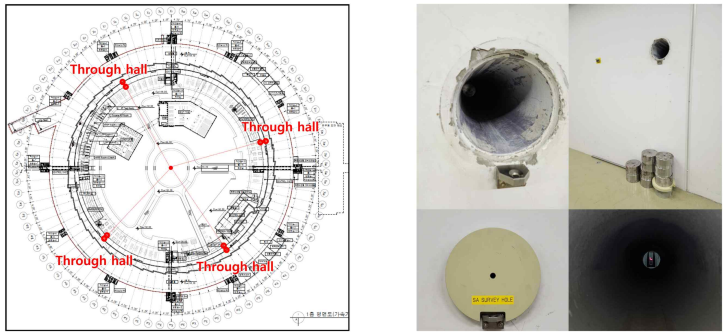


<그림 3.3.2.3> 포항가속기 PAL-XFEL 측량망

<그림 3.3.2.4>는 터널 바닥과 벽에 설치하는 측량망 monument 설계도이며, <그림 3.3.2.5>는 측량망에 through hall을 설치한 그림이다. 800 m에 달하는 4GSR 저장링에 긴 거리에서 발생하는 누적 오차를 줄이기 위하여 수평으로 서로 관통하여 시준선을 확보할 수 있도록 건물을 관통하는 through hall 4개소를 설치하였다. 오른쪽 그림은 포항가속기 PAL-XFEL 터널에 실제로 설치한 through hall 사진이다. 오차를 줄이는 목적으로 optical plummet을 사용하는 수직 구심 이동 방법보다 성능이 획기적으로 발전한 laser tracker 장비를 사용하는 수평 through hall 설치 방법을 채택한다.



<그림 3.3.2.4> 터널 바닥과 벽에 설치되는 측량망 monument

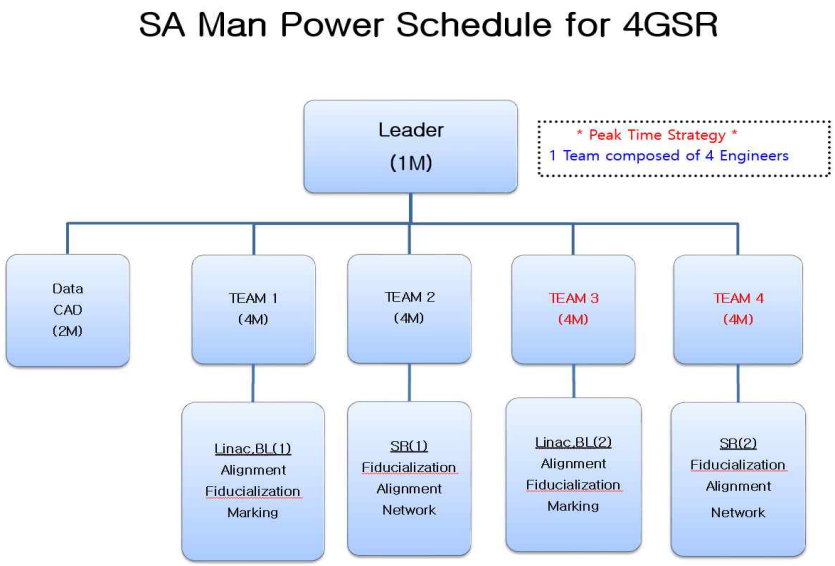


<그림 3.3.2.5> Through hall 측량망 및 설치 사례

다. 인력 계획 (Man Power)

가속기 건설 사업은 설치와 정렬에 필요한 인력이 짧은 기간에 집중되기 때문에 인력 구성 문제가 항상 어려운 문제로 대두된다. 가속기 측량 및 정렬 업무는 이 분야의 경험이 중요하며, 특히 4인 1조로 구성되는 팀 리더의 경험과 역할이 크다. 해외 연구소 경우 반드시 일정 기간 전문적인 가속기 측량 및 정렬 교육을 다시 받고 업무에 투입하도록 규정하고 있다. 특히 조립 설치 단계에서 정밀한 정렬 작업에는 최소 2~5년 이상인 기술자를 사용하도록 권고하고 있다. (프랑스 ESRF, Design Report, 2019 참고)

<그림 3.3.2.6>은 설치 정렬 업무가 최고조일 때의 소요 인력을 표시한 그림이다. 측량 및 정렬 팀은 건설 기간에 가장 먼저 시작하고 마지막으로 작업을 완료한다. 건설 사업을 시작할 때부터 충분한 인력을 준비한다.



<그림 3.3.2.6> SA 업무 소요 인력

3.3.3 장치 정렬

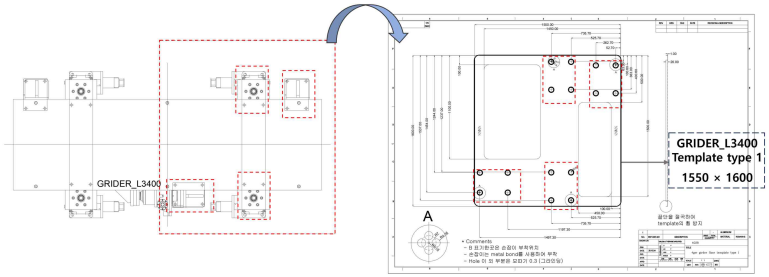
가. 거더 및 주요 장치 앵커 마킹

저장링에 설치 작업 첫 단계는 거더 및 주요 장치 앵커 위치를 마킹하는 것이다. 마킹할 앵커의 위치와 개수는 거더 및 장치 담당자로부터 입수한다. <그림 3.3.3.1>은 포항가속기 성능향상 사업 진행 사진으로 왼쪽은 저장링 거더 앵커 위치를 마킹하는 모습이고, 오른쪽은 빔라인 구간 중심선을 마킹하는 모습이다. 저장링 거더의 앵커 마킹은 개수가 많으므로 짧은 설치 기간을 고려하여 template를 제작해서 준비하고 테스트 작업을 수행한다. Template를 통하여 작업 시간을 50% 정도 획기적으로 단축할 수 있을 뿐만 아니라 작업 중 발생할 오류를 확실하게 방지할 수 있다.



<그림 3.3.3.1> 주요 장치 앵커 마킹 작업 (PLS-II 저장링과 빔라인 구간)

<그림 3.3.3.2>는 4GSR 저장링 거더 앵커 볼트 마킹용 template 제작도면 중에서 하나이다. 거더 길이에 따라 운반 및 변형을 고려하여 2 m 이내 길이로 나눈다. 거더의 형태에 따라 길이 방향 4.8 m 거더의 경우 template를 3개로, 3.8 m, 3.4 m의 거더는 2개로 나누었다. 총 타입은 7개이며 2팀이 작업한다고 가정할 때 14개의 template가 필요하다. <표 3.3.3.1>은 저장링 거더 template 종류 및 수량을 표시하였다.



<그림 3.3.3.2> 4GSR 저장링 거더 앵커 볼트 마킹용 template

<표 3.3.3.1> 저장링 거더 template 종류 및 수량

Girder	Template Type	Total
GIRDER_L4800	L4800-1	2
	L4800-2	2
	L4800-3	2
GIRDER_L3800	L3800-1	2
	L3800-2	2
GIRDER_L3400	L3400-1	2
	L3400-2	2
Total		**14 ea**

나. 담당자 간의 협업

측량 및 정렬 엔지니어는 다음과 같은 측면에서 반드시 해당 분야의 업무에 능동적으로 개입을 하고 그 분야의 전문가와 유기적인 관계를 구축한다.

1. 이론적으로 완벽한 장치의 정렬과 실제로 실현할 수 있는 장치의 정렬 사이의 효율적인 정렬 오차의 산정
2. 장치의 정렬 안정도에 영향을 주는 장치 주변의 열 안정도와 지반 거동에 대한 논의
3. 제작 초기 단계에 장치의 서포트와 정렬 메커니즘에 대한 디자인 협의
4. 지진이나 화재 등 비상 상황에서 각 장치 전문가와 함께 피해 상황을 파악하고 효율적으로 장치가 긴급히 복구되도록 우선순위를 협의

다. 주요 장치 정렬

주요 장치 중에서 대표적인 전자석 정렬을 예로 든다. 전자석은 그 기능뿐만 아니라 형상도 다양하여 측량기준점 좌표 설정 과정이 매우 중요하다. 그러므로 본격적인 장치 설치 전에 제작사의 자장 측정 및 장치 기준좌표 설정 과정에 참여하여 검증 과정을 거쳐야 한다. 자장 측정 업무 선행작업으로 자장 측정 장치 자체를 정렬하는 단계를 시행하는데 이때도 마찬가지로 검증 과정을 거치는 것이 필요하다. 업무의 중요성을 고려하여 제작사와 직접 기술적인 문제를 의논하면 진행이 훨씬 원활하다. 다른 주요 장치들도 전자석의 절차와 비슷하다. 설치 정렬 업무의 순서는 다음과 같다.

1. 거더 조립 건물의 베이스 플레이트를 가능한 한 평평하게 맞춘다.
2. 필요한 경우 그라우팅 처리를 한다.
3. 평평한 베이스 플레이트 위에 거더를 설치한다.
4. 거더 평균값을 설계 높이로 정렬한다.
5. 자석, 용기 및 기타 구성 요소를 설치하고 정렬한다.
6. 위치를 측정하고 저장하고 저장링 좌표로 변환한다.
7. 저장링 터널의 베이스 플레이트를 가능한 한 평평하게 맞춘다.
8. 거더를 저장링 터널로 운반하고 정렬 메커니즘을 사용하여 설치한다.
9. 거더 조립 건물에서와 동일하게 장치를 설치 측정하여 거더를 조정한다.
10. 처음 설치할 때는 거더의 정렬과 함께 거더 위 장치를 모두 측정한다.

<그림 3.3.3.3>은 전자석의 타입별 측량기준점 설치 위치와 수량을 나타내고 있다. 보통 피 측정물의 상면 모서리에 4점을 택하여 설치하는데 피 측정물이 긴 경우에는 정밀도 향상을 위하여 6점 혹은 8점으로 결정한다. 이 과정은 전자석 장치팀과 협의하여 결정하였으며 fiducial point 타입은 접시형으로 통일하였다.

LINAC, LTB magnet summary

Magnet	Number	Fiducial
Accelerating column	6	36
Quadrupoles	19	76
Bending magnet	4	16
Septum	1	4
Total	31	132

Booster magnet summary

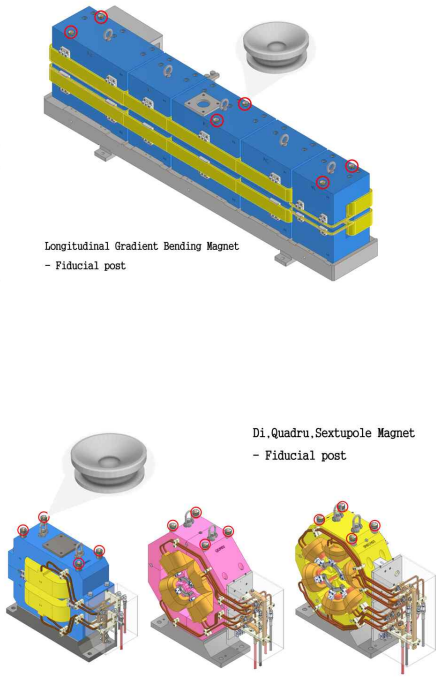
Magnet	Number	Fiducial
Combined magnet	60	240
Quadrupoles	96	384
Sextupole	60	240
Sextupole + Slow corrector	168	672
Corrector	116	464
Total	500	2000

BTS magnet summary

Magnet	Number	Fiducial
Bending Magnet	2	8
Combined Bending	1	4
Quadrupole	8	32
Septum	4	16
Total	15	60

SR magnet summary

Magnet	Number	Fiducial
Long. BM	120	720
Central BM	30	120
Quad-Bend and Reverse Bend	240	960
Quadrupole	370	1480
Sextupole + Slow corrector	180	720
Octupole Magnet	60	240
Fast-Slow Corrector	120	480
Total	1120	4720



<그림 3.3.3.3> 전자석 fiducial point 설치 위치와 수량

라. 장치 정렬 오차

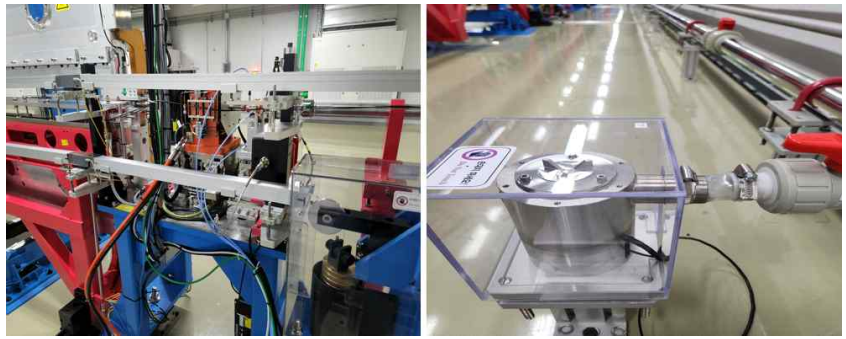
가속기의 장치 정렬은 빔운전을 위해 매우 중요하다. 오정렬 값이 클 때 진공 용기 내부와 충돌하는 경우도 있다. 따라서 효율적인 빔 수송을 보장하고 빔 손실을 최소화하기 위해 정렬 오차를 최소화하는 것이 필요하다. 정렬 오차의 발생 원인으로는 측량망 오차, 측정 장비의 오차, 장치 fiducialization 과정에서의 오차 및 데이터 획득과 처리 과정에서의 휴먼에러가 있다. 여기서는 다른 요소들을 모두 최상의 상태로 통제하였을 경우, 순수하게 장치 정렬 오차를 기술한다. <표 3.3.3.2>는 4GSR 및 세계 각국의 가속기 규모와 장치 정렬 허용 오차를 나타냈다. 4GSR 전자석과 거더 인접한 장치 서로 간의 허용 오차는 30 μm와 100 μm이다.

<표 3.3.3.2> 가속기 주요 장치 정렬 허용 오차 (RMS)

Machine	E (GeV)	C (m)	Magnet-to magnet (μm)	Cut-off (±σ)	Girder-to-girder (μm)	Cut-off (±σ)
4GSR	**4**	**799**	**30**	**2**	**100**	**2**
ALS-U	2	196.5	10	2	50	2
APS-U	6	1103.6	30	2	100	1
Diamond-II	3.5	560.57	25	2	150	2
ESRF-EBS	6	843.97	60	2.5	NA+	NA+
NSLS-II	3	792	30	1	100	1
SIRIUS	3	518.4	40	1	80	1
MAX-IV	3	528	20	1	NA*	NA*
SOLEIL-II	2.75	353.74	30	2	50	2

마. 지반 모니터링 장치 (Ground monitoring system)

4GSR 지반은 기반암이 화강암으로 안정적이기 때문에 건설 초기에는 모니터링 장치를 제외하였다. 다만 건설 초기 지반의 거동 상황을 정밀하게 측정한 후에 필요하면 변위가 큰 구간에만 따로 설치하면 된다. 지반 모니터링 센서는 전 세계적으로 프랑스 F사와 러시아 B사를 통하여 활용할 수 있다. 1차 운영 소프트웨어는 제작사에서 제공하나 실제 운영 소프트웨어는 현장 여건에 적합하게 개발하여야 한다. <그림 3.3.3.4>는 포항가속기 PAL-XFEL 터널에 실제 설치되어 운영 중인 WPS 및 HLS 장치이다.



<그림 3.3.3.4> 포항가속기 PAL-XFEL 터널에 설치된 WPS 및 HLS 장치

3.3.4 거더 시스템

가. 개요

Korea 4GSR 거더 시스템은 PLS-II 거더 시스템의 안정적인 가속기 운영을 기반으로 저장링 둘레 800 m 수준에 부합하게 고안되었다. 전 세계 원형 방사광가속기 거더 시스템 사례를 보면 모터 구동형 캠 무브, 수동형 웨지잭 및 모터 구동형 웨지잭 등의 정렬 메커니즘이 활용되고 있다. 현재 PLS-II 거더 시스템은 스크류잭을 통한 정렬 메커니즘이 사용되고 있으며, 이를 통하여 넓은 구동 범위 및 기계적 강성 확보를 가능하게 설계되어 운용되고 있다. 4GSR 거더 시스템은 기존의 동력 전달용 TM 스크류잭에서 이송정밀도와 내구성이 향상된 볼 스크류잭을 활용하여 개발되었다. 또한, 가속장치 운영 편의성을 위한 모터 제어 구동부와 변위 센서를 이용한 거더 시스템이 개발되었다.

<표 3.3.4.1> Comparison of the adjustment mechanism to the girder system

Factility	Adjustment method	
Spring-8	Manual adjustment	6-Point Support
SOLEIL		4-Points supports, 3-Alignment Airloc jacks
SSRF		3-Wedge jacks, 3-Assistant supports
NSLS-II		8-Point support
APS-U		3-Point support, 3-points adjustment
SIRIUS		4-Point wedge jacks
SLS	Automatic adjustment	5-cam mover mechanisms
Diamond		5-cam mover mechanisms
TPS		6-cam mover mechanisms
ESRF-EBS		4-Motorized wedges, 3-Manual sedges

나. 요구사항

4세대 다목적 방사광가속기인 4GSR은 기존의 원형 가속기에 비하여 특별한 설계 요건을 충족하여야 한다. 3세대에서 4세대 원형 가속기로의 업그레이드가 진행되었던 해외 사례들의 경우 지반 특성 및 가속기 건물의 특성이 충분히 이해를 바탕으로 가속장치의 해체와 설치에 대하여 중요하게 고려되었다면 4GSR은 새로운 지반 및 건축물 등의 환경에 안정적으로 구동이 되어야 하므로 거더 시스템을 위해서 아래와 같은 요구조건 들을 만족하는 개발이 진행되어야 한다.

- 전자빔 높이: 1.4 m
- 거더 상판의 높은 평탄도 및 가속장치 설치 및 운용에 대한 낮은 변형률
- 제한된 조건에 대한 높은 1차 공진주파수 확보
- 모터 구동형 정렬 메커니즘 확보
- 저장링 터널의 여유 공간확보를 위한 최적 거더 설계
- 다양한 장치 설치를 위한 마운팅 홀 확보
- 열 안정성 확보

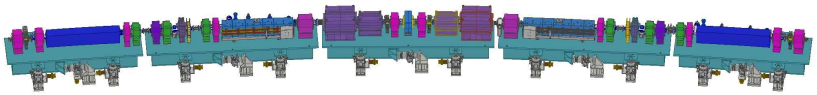
4GSR의 거더 시스템을 개발하기 위한 주요 파라미터는 <표 3.3.4.2>에서 확인할 수 있다. <표 3.3.4.2>를 통하여 거더 시스템의 조정 범위, 공진주파수 특성, 조정 메커니즘 및 조정 정밀도가 결정되었다.

<표 3.3.4.2> Main parameter for the girder system

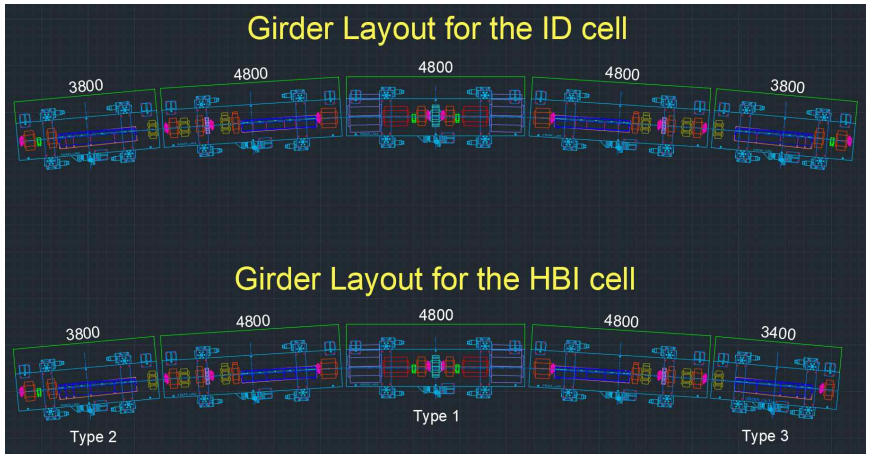
Parameter	Value			
	Korea 4GSR	**ESRF-EBS**	**APS-U**	**HEPS**
# of Cell	**28 cells**	32 cells	40 cells	48 cells
Circumference or SR	**799 m**	844 m	1100 m	1360.4 m
Beam height	**1.4 m**	1.2 m	1.4 m	1.2 m
Leveling range (Y-axis)	**± 10 mm**	± 5 mm	± 13 mm	± 9 mm
Lowest natural frequency	**50 Hz**	50 Hz	42 Hz	54 Hz
Maximum Girder length	**< 5 m**	5.1 m	5.568 m	3.8 m
Girder to girder alignment	**± 50 μm**	50 μm	50 μm	± 50 μm
Adjustment method (Y-axis)	**Motorized**	Motorized	Manual	Manual
Adjustment method (X, Z-axis)	**Manual**	Manual	Manual	Manual
Positioning accuracy (Y, X-axis)	**± 50 μm**	50 μm	30 μm	± 50 μm
Positioning accuracy (Z-axis)	**± 200 μm**	1 mm	70 μm	± 200 μm

다. 레이아웃

거더 설계는 빔물리설계와 장치 구성에 따라 크게 영향을 받는다. 저장링 둘레 약 800 m에서 cell의 개수는 총 28개이며 종류는 크게 일반 cell과 High Beta Injection (HBI) cell로써 각 cell은 5개의 거더로 개발되었다. 일반 cell은 중앙 굽힘 구간을 기준으로 upstream과 downstream 방향이 대칭으로 구성되고 HBI cell은 일반 cell과 비교하여 HBI 구간에서 다른 구성을 하고 있어 거더 시스템의 레이아웃 또한 2가지 형태로 구성하였다.



<그림 3.3.4.1> Design of the girder in the achromat



<그림 3.3.4.2> Girder system layout in the storage ring

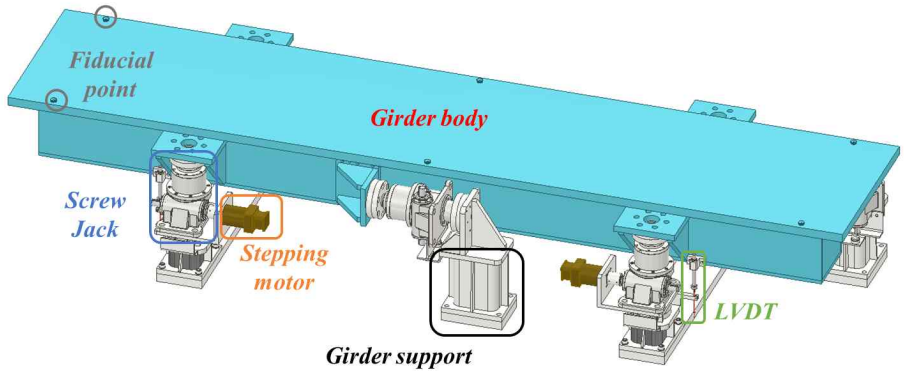
저장링 가속장치 설치를 위한 거더는 총 3가지 종류로 구성되어 있다. 모든 거더는 Y 방향 4지점으로 지지하고 X 방향 및 Z 방향이 조정 가능하도록 설계되어 있다. 일반 Cell의 경우 각 Cell의 중심부 기준 3개의 거더가 길이 방향 4.8 m로 설계되어 있으며 셀 양 끝단의 거더는 3.8 m로 설계되었다. HBI cell은 일반 cell과 마찬가지로

각 cell의 중심부 3개의 거더는 4.8 m로 설계되어 있으며 upstream 방향의 거더는 3.4 m 그리고 downstream 방향 거더는 3.8 m 길이로 설계되었다. 각 거더의 위치하는 전자석의 종류는 <표 3.3.4.3>과 같다.

<표 3.3.4.3> Magnet placement on each girder

Girder			Magnet Placement	
Type	Length	Position	Normal cell	HBI cell
1	4.8 m	Upstream to Center	DQ31U, S32U, DQ32U, Q31U, S33U, Q32U, LGBM2U, Q51U	
		Center	DQ51U, DQ52U, CO2U, Q52U, CENT, Q52D, CO2D, DQ52D, DQ51D	
		Center to Downstream	Q51D, LGBM2D, Q32D, S33D, O31D, DQ32D, S32D, DQ31D	
2	3.8 m	Upstream	Q11U, CO1U, Q12U, LGBM1U, Q31U, S31U	-
		Downstream	S31D, Q31D, LGBM1D, Q12D, CO1D, Q11D	
3	3.4 m	-	-	QH4U, LGBM1U, Q31U, S31U

라. 거더 디자인



<그림 3.3.4.3> Girder design

거더 설계는 일반적으로 빔안정성, 정렬 및 설치 용이성 등의 요구사항 또는 제약사항에 맞추어 진행된다. 4GSR의 거더는 크게 거더 몸체, 거더 서포트 그리고 조정 장치로 구성되어 있다. 4개의 수직 방향 거더 서포터는 거더 자체의 무게 5 tone과 마그넷 및 챔버의 최대 무게 10 tone을 포함한 15 tone 자중을 지지할 수 있도록 설계되었다. 저장링 거더 설계에 대한 사양은 <표 3.3.4.4>에서 확인할 수 있으며 3가지 형태의 거더 시스템 총 수량, 조정 장치의 성능 및 거더 모니터링 시스템의 특성이 포함되어 있다. 또한, 설계된 거더 시스템의 기계적 강성과 가공성을 확보하기 위하여 SS400과 S45C 계열의 소재를 사용하여 제작 예정이다.

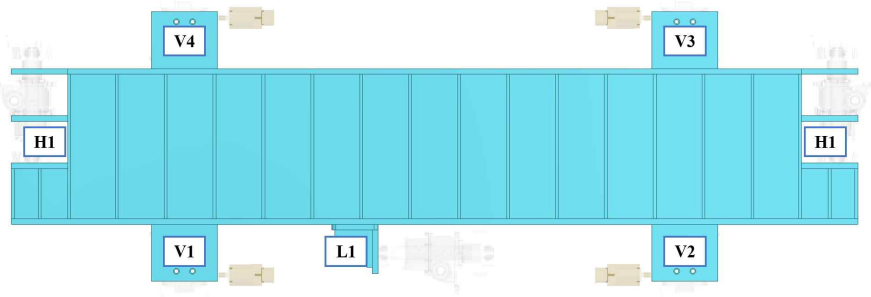
<표 3.3.4.4> Specification of girder system

Description		Type 1	Type 2	Type 3
Girder body	Quantity of Girder [set]	84	52	4
	Total length [m]	4.8	3.8	3.4
	Vertical adjusting method	Stepping Motor with Screw Jack		
Adjustment System	Transverse and longitudinal adjusting method	Manual with Screw jack		
	Quantity of screw jack [set]	588	364	28
	Quantity of stepping motor system [set]	336	208	16
	Quantity of digital probe [set]	336	208	16
	Screw jack, load capacity [tone]	12		
	Stepping motor, maximum torque [N*m]	3.33		
	Gear box with 3 stages, gears ratio	320:1		
	Screw jack, working range [mm]	40		
	Digital probe (LVDT), working range [mm]	20		

<표 3.3.4.5> Mechanical properties of the girder material

Mechanical Properties	Value	
	SS400	S45C
Density [kg/mm^3]	7.85 × 10^{-6}	7.85 × 10^{-6}
Tensile strength [MPa]	415~515	686
Young's Modulus [GPa]	160	205

총 7개의 조정 장치로 구성된 거더 시스템의 조정 장치 배열은 아래 <그림 3.3.4.4>와 같이 vertical, horizontal 그리고 beam lattice 방향에서 구동할 수 있게 구성되어 있다. 가속기 운전을 위해 하중을 견디는 것은 주로 vertical 조정 장치라고 할 수 있으며, 이는 가속장치의 설치 및 유지보수를 위한 정렬 시 조정의 편의성을 위하여 motor 구동 방식으로 되어있다. Horizontal과 lattice 방향의 조정 장치는 초기 설치 및 빔운전에 지대한 영향을 미치는 경우 조정이 가능하도록 manual 조정 기법으로 구성되어 있다. 거더 몸체 무게를 포함한 15 tone 이상의 무게를 지지하기 위해 소재의 선정뿐만 아니라 거더 몸체의 보강도 필수적이다. 4GSR을 위해 거더 몸체 내부, 거더 상판의 끝단 및 조정 장치 설치 부분에 rib 및 추가 보강대를 설치하여 거더의 강성을 높였다. 이 결과 vertical 지지부의 각 허용하중이 7 tone 이상으로 총 20 tone 이상의 하중을 견디게 구성하였고, horizontal은 각각 450 kg, lattice 방향은 900 kg 이상을 견딜 수 있도록 설계하였다.



<그림 3.3.4.4> Structural reinforcement and Load point of the girder body

<표 3.3.4.6> Load distribution applied to the adjustment device

Screw Jack	Static load [kgf]	Seismic Load [kgf]	Total Load [kgf]
V1	3,691	3,928	7,619
V2	3,670	3,904	7,574
V3	3,620	3,844	7,464
V4	3,612	3,835	7,447
H1	0	460	460
H2	0	458	458
L1	0	918	918

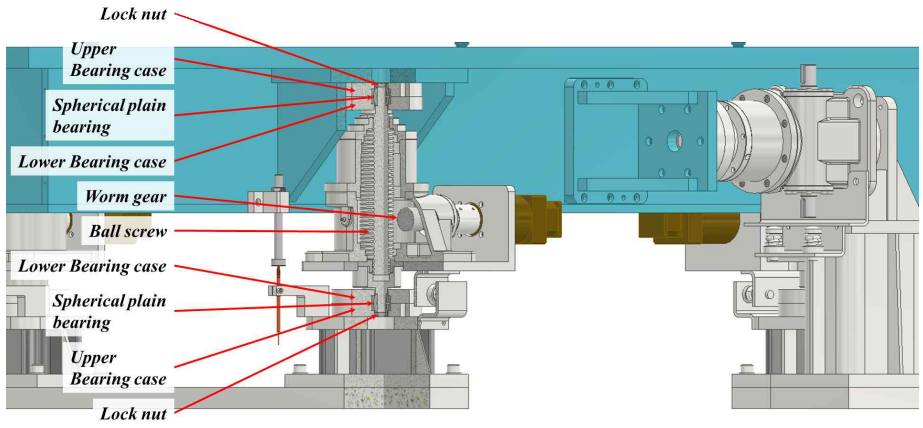
거더 시스템의 고유진동수와 같은 진동 특성을 높이기 위해 아래 식에서 확인할 수 있듯이 시스템의 강성을 키우고 무게를 줄이는 방향으로 개발되어야 한다. 4GSR에 적용되는 거더 시스템의 강성을 유지하면서 무게를 줄이기 위해 거더 몸체 전체 높이를 600 mm 이하, 몸체를 이루는 판재의 두께를 20 mm 수준으로 구성하였다. 자중에 의한 변형 및 비틀림 강성을 확보하기 위해 내부 보강재의 구성 또한 거더 시스템의 전체 무게를 줄이기 위해 형상 최적화를 진행하였다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{(수식 3.3.4.1)}$$

f_n: Natural frequency, k : Stiffness of the system, m : Effective mass

Ball screw 기반의 조정 장치는 거더 몸체와 조정 장치의 구속을 위한 disk 형태의 bearing case를 사용하여 조립할 수 있게 하였으며, bearing disk 사이에 spherical plain bearing을 활용하여 설치와 유지보수 시 조정 장치의 설치와 해체를 쉽게 구성하였다. bearing을 사용한 체결 방법은 disk의 체결력을 낮추었을 때, lock nut로 고정된 상태에서 회전 운동이 가능하므로 vertical, horizontal, beam lattice 방향에서 설치가 가능하다는 장점을 가지고 있고 disk의 체결력을 높이면 사용자가 원하는 각도를 유지하고 기계적 강성을 유지하면서 구조를 결박해 주는 역할을 수행하게 된다. 조정 장치를 연결하는 부분은 거더 몸체와 하부 서포터 양단에 구성되어 ball screw 설치 및 유지보수 간 설치 위치 확보에 대한 공정 여유를 확보하였다. 조정장치 하단부를 disk로 체결하게 되면서 일반적으로 조정장치 몸체에 결속하는 형태와 다른 형태로 구성되면서 조정장치 하단 케이스의 강성보강이 필수적으로 고려되었다. 하단 케이스의 강성보강을 위해 기존 케이스 설계에서 부품의 두께를 늘리고 길이를 짧게 변경함으로써 추가적인 보강 조치 없이 최소한의 조치를 통해 강성보강을 진행하였다. Ball screw에 사용된 S45C는 일반 탄소강보다 높은 기계적 강성을 가지고 있으므로 거더 시스템에서 사용하였으며, 수직 운동과 회전 운동을 변환해 주는 worm gear를 사용함으로써 제한된 공간에서 step motor를 활용한 구동을 가능하게 하였다. worm gear에 연결된 step motor는 두 가지 기능을 수행하게 된다. 첫 번째 기능은 ball screw jack의 brake 기능이다. worm gear를 통해서 수직 운동을 하는 screw jack은 조정이 완료된 후 worm gear 축 상에 기계적 stopper를 사용하여 변위 이동을 억제하지만, 추가적인 안전장치로 motor의 brake 기능을 활용하여 이중 안정 기법을 적용하였다. 두 번째 기능은 거더 시스템 vertical 방향의 motor 제어 메커니즘이다. 원형 방사광가속기는 전자빔이 원형 orbit을 따라 반복 회전하기 때문에 방사광

가속기의 운전 환경에 따른 정렬은 필수적이다. 28개 cell의 정렬 용이성과 안정성을 높이기 위해 motor 제어 기법이 활용되었다. vertical 방향 변위 제어를 위하여 Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) 기반의 고정밀 변위 센서를 사용하였다. 변위 센서의 신호는 제어시스템을 통하여 방사광가속기의 운영을 위한 모니터링 시스템으로 사용되며 획득된 변위 데이터를 기반으로 motor 제어를 진행할 예정이다.



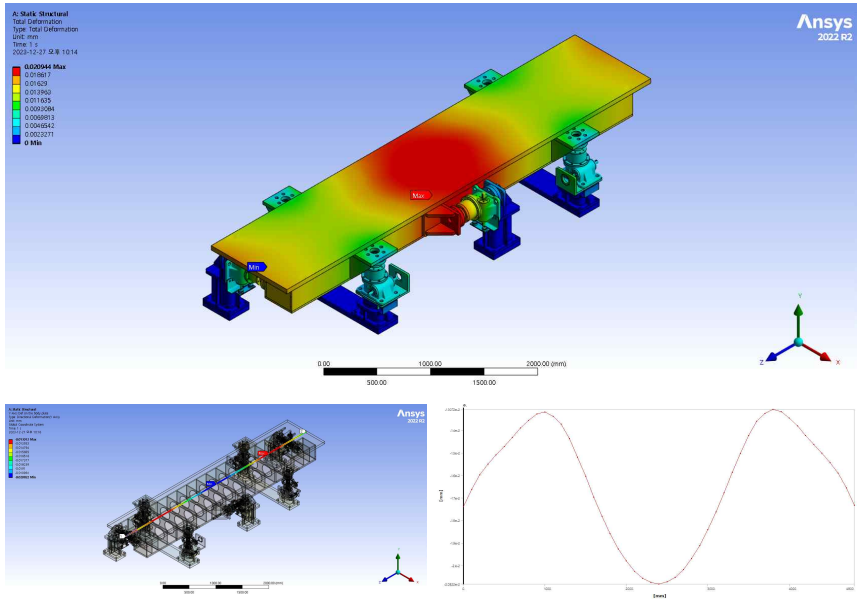
<그림 3.3.4.5> Assembly of ball screw jack and girder support

마. 거더 성능

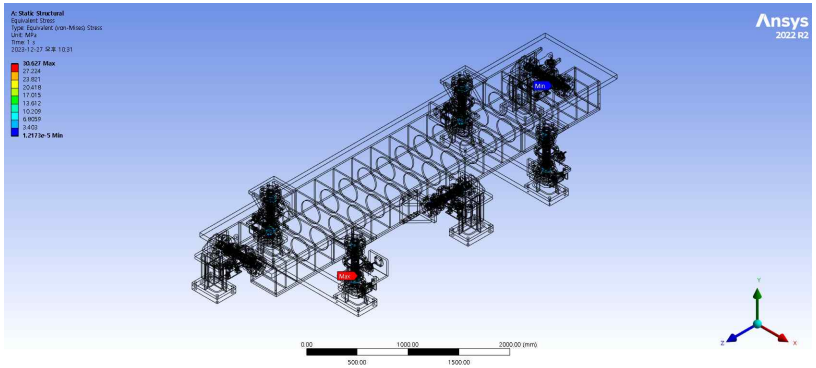
자석, 진공 챔버 및 거더 시스템의 자중에 의한 변형을 확인하기 위해 정적 유한요소분석 (FEA)을 활용한 구조적 안정성 해석이 수행되었다. 이 분석 방법은 기존에 설계된 거더 및 조정 장치를 기반으로 거더 시스템을 이루는 전체 구조물에 대한 기계적 분석이 진행되었다. 자중에 의한 변형 해석은 Ansys를 이용하고 정적 해석 기법으로 진행되었다. 정적 해석을 진행하기 위해 거더 시스템을 이루는 물질의 성질과 조정시스템을 구성하는 요소들의 경계조건을 포함하여 해석이 수행되었다. 첫 번째 해석에서는 길이 방향 4,800 mm의 거더 시스템 자체의 정적 해석이 진행되었다. <그림 3.3.4.6>에서 거더 시스템 자체의 변위량을 확인할 수 있으며 최대 변위는 20.9 μm로 확인되었다. 거더 몸체의 무게 중심인 Beam 길이 방향 중심점에서 최대 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있다. <그림 3.3.4.7>에서는 거더 시스템의 응력 분포를 확인할 수 있으며 최대 응력은 30.6 MPa로 실제 거더 몸체를 지지하는 수직 방향 조정 장치에서 집중하중이 분포됨을 확인할 수 있다. <그림 3.3.4.8>에서 거더

시스템의 구조적 안전율까지 확인할 수 있으며 최소 안전율이 7.5로 평가되면서 교량과 건물의 금속 구조물 안전율인 4~7 사이의 값보다 더욱 높은 안전율을 가지고 있음을 확인하였다.

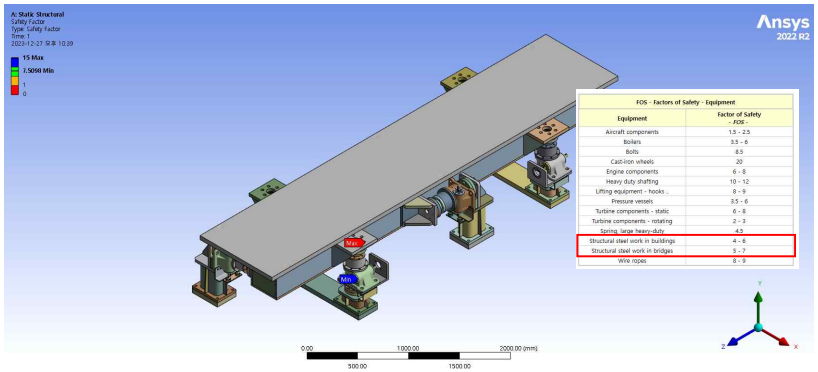
두 번째 해석에서는 거더 시스템 상부에 전자석 등 가속장치의 무게가 고려된 해석이 수행되었다. <그림 3.3.4.9>에서 확인할 수 있듯이 가속장치를 포함한 해석에서는 거더 설계 원점으로부터 최대 변위는 98.3 μm로 계산되었다. 거더 상판의 변위를 확인 한 결과 최대 변위 지점은 거더 상부 끝단에서 발생하고 거더 몸체 중심부에서는 31 μm의 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 가속장치의 조정장치 및 결속 구조가 명확하지 않은 상태로써 제작 예정인 프로토타입을 기반으로 상세한 검증이 필요하다. 정적 해석을 통하여 거더 시스템의 변위량 및 변위 지점을 분석한 결과는 가속장치 건설 시 거더 시스템으로 정밀 측량 및 정렬을 할 수 있는 수준으로 가속장치 설치 및 운용을 가능하게 할 것이다.



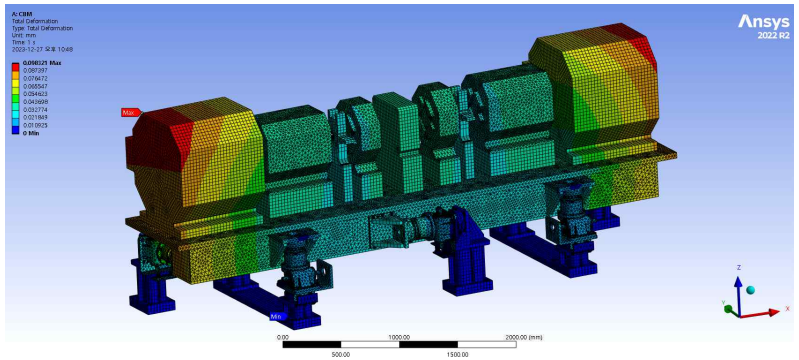
<그림 3.3.4.6> The total deformation with gravity analysis



<그림 3.3.4.7> The equivalent stress with gravity analysis



<그림 3.3.4.8> The safety factor of the girder system

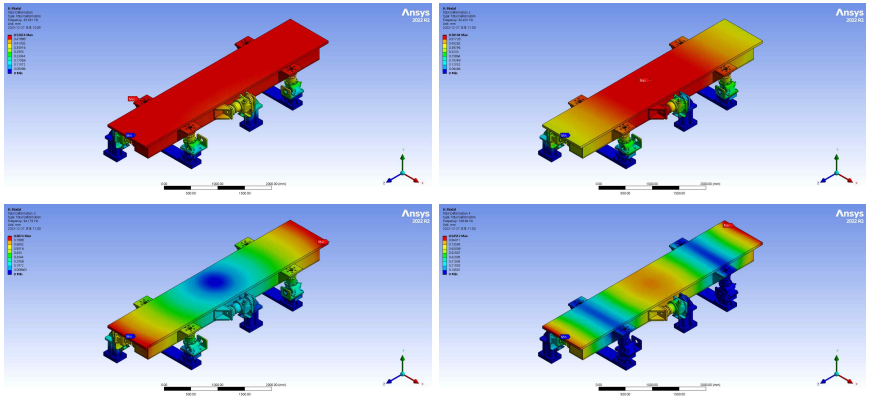


<그림 3.3.4.9> The gravity analysis of girder system with the payload

저장링 거더 시스템의 변위와 진동 전파는 가속된 beam의 궤도에 영향을 미치면서 원형 가속기의 성능을 저하하는 원인이 된다. ESRF-EBS의 경우 기계 시스템의 진동 안정성을 전자빔 크기의 10% 이하로 유지하는 것을 목표로 하고 있다. 4GSR에서는 빔물리의 error study를 통한 진동 안정성이 제시될 것이며, 이를 위해 거더 시스템에서 외부 진동에 의한 진동 안정성을 유지하면서 강성을 가지는 시스템을 확보하여야 한다. 현재 거더 시스템에서는 기존에 보유하고 있는 거더 구성 요소들을 기반으로 강성 보강을 위한 rib 등을 활용하여 기계적 강성과 진동 억제 능력을 확보하려 한다.

거더 시스템의 구조 및 소재 특성을 고려하여 시스템의 동적 특성을 연구하고 구조 내부의 고유진동수를 감소하여야 한다. 선형 진동 이론과 유한요소 기법을 기반으로 한 modal 분석을 통해 거더 진동 부분의 설계를 진행하였다. 거더의 동적 특성을 분석하는 것은 공진 현상을 피하고 진공에 의한 변위를 감소시키는 데 중요한 역할을 한다.

Modal 분석을 위한 3D 모델에는 거더 몸체, 조정 장치 및 서포터가 포함된다. <그림 3.3.4.10>과 <표 3.3.4.7>에서는 거더 시스템의 FEA modal 분석 결과를 확인할 수 있다. 거더 시스템의 1차 고유 주파수는 49.59 Hz 이상으로 확인되었으며 국내 상용 주파수와 중첩이 되지 않는 수치라고 할 수 있다. 고유 주파수는 가속장치의 공진 특성과 매우 높은 연관성을 가지고 있으며 기계 장치 기준으로 판단하였을 때, 낮은 주파수에서 공진 현상이 발생하는 것 보다 고주파 대역에서 공진이 발생할 때 증폭되는 변위량이 적기 때문에 거더 시스템의 고유진동수를 높이는 방법 및 외부 진동을 억제하는 기술의 연구가 지속해서 수행되어야 한다. FEA를 통한 고유진동수를 기반으로 프로토타입 제작 시 실제 실험적 분석 방법들은 적용하여 최종 거더 시스템의 자체 진동 안정성 및 외부 진동 억제 능력을 향상할 예정이다.



<그림 3.3.4.10> Modal analysis

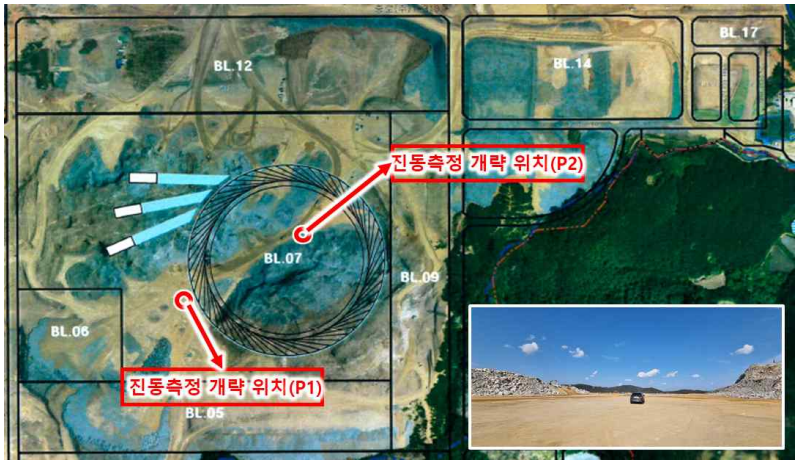
<표 3.3.4.7> Frequency of difference distortion modes

Mode	Frequency [Hz]	Type
1st	49.59	Transversal translation
2nd	62.40	Transversal translation + Roll
3rd	94.17	Translation along beam direction

안정적인 가속장치 운영 및 전자빔 유지를 위해서는 기계적 안정성을 확보하는 것이 필수적이다. 방사광가속기에서의 기계적 안정성은 외부 진동에 대한 억제력을 확보하는 것이라 할 수 있다. 가속장치에 영향을 끼치는 외부 진동 요인은 크게 자연적 요인, 외부 차량 통행 및 이상 충격 그리고 가속장치의 온도 안정성을 유지하기 위한 설비시설들로부터 발생하는 진동 요인들을 포함할 수 있다. 자연적 요인에는 가속기 지반 자체의 진동 전파 특성, 계절적 변화 및 지진 등의 현상을 확인할 수 있다. 여기서, 지반 자체의 진동 특성은 가속기 건물을 통하여 가속장치에 직접적으로 영향을 미칠 수 있으므로 지반 진동 데이터를 획득하고 분석하여 가속기 안정성을 확보하여야 한다. 특히, 거더 시스템은 가속장치 중 지반 진동을 1차적으로 받아들이는 구조물이기 때문에 지반에서 발생하는 진동 요인을 적절하게 억제하기 위한 연구가 수행되어야 한다.

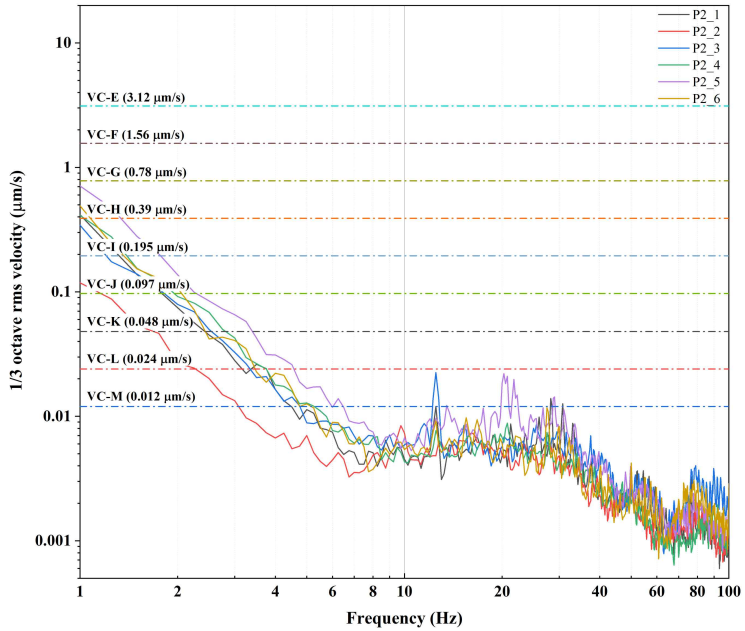
지반 진동 데이터를 획득하기 위해 10 V/g의 정확도를 가진 가속도계를 사용하여 진동 데이터를 측정하였다. <그림 3.3.4.11>은 오창에 위치한 4GSR의 가속기 부지이며

건축을 위한 지반 조성이 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 지반 진동 측정은 가속기 터널이 위치할 P1과 P2의 위치에서 측정이 수행되었다.



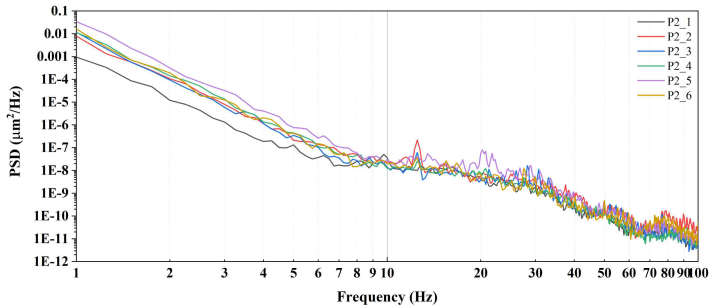
<그림 3.3.4.11> Korea 4GSR site for the vibration measurement

오창 부지의 지반 진동 측정 결과 Vibration Criteria (VC) 기준 E 등급 이하의 진동 범위를 가지고 있는 것을 확인하였으며, 이는 포항가속기연구소의 PAL-XFEL의 진동 범위와 유사한 수치를 보여주었다. VC-E 등급은 레이저 기반의 나노미터 스케일에 작동하는 E-beam 등의 매우 민감한 시스템에 적용되는 등급이다. <그림 3.3.4.12>에서 오창 지반 진동 범위는 VE-G 이하급으로 가속장치 건설 및 운용에 문제가 없음을 보여준다. 다만 측정된 데이터는 가속기 부지의 측정 데이터로써 실제 건설이 완료된 후 지속적인 진동 모니터링이 필요하다.



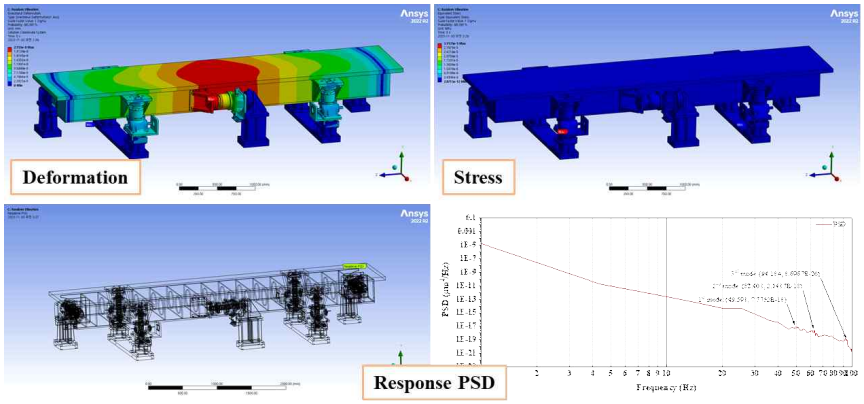
<그림 3.3.4.12> The vibration result of 1/3 octave rms velocity & VC on the Ochang site

<그림 3.3.4.13>은 오창 가속기 부지의 Power Spectral Density (PSD) 데이터를 보여주고 있으며 측정된 데이터는 P2 지점의 반복 측정 데이터를 확인할 수 있다. 획득된 진동 데이터는 설계된 거더 시스템에 random vibration analysis 외력 데이터로 활용이 가능하다.



<그림 3.3.4.13> The PSD result on the Ochang ground

4GSR의 안정적인 운영을 위해서 가속기 부지에서 획득된 진동 데이터(PSD)를 기반으로 random vibration analysis를 수행하였다. 앞서 수행되었던 modal 해석에서는 거더 시스템 자체의 고유진동수를 확인하면서 결과 데이터의 일부로 변형에 관한 내용이 포함되었지만, modal 해석 엔진 특성상 실제 변위 데이터로 활용하기 부적절하다. 실제 외력에 따른 기계 시스템의 거동을 확인하기 위해서는 random motion에 대한 해석이 필요하다. <그림 3.3.4.14>와 <표 3.3.4.8>을 통하여 지반 진동 수준에 따른 거더 시스템의 변동 특성을 확인한 결과 변위의 경우 21.5 pm의 낮은 변화를 확인하였으며, modal 해석을 통하여 도출된 고유진동수에 대한 PSD 값은 1차에서 3차 모드까지 각각 7.77×10^{-18}, 2.14×10^{-18}, 8.69×10^{-20} [$\mu m^2/Hz$]의 값을 확인하였다. 이는 4GSR의 빔 사이즈에 비하여 현저히 낮은 수준으로 거더 시스템으로써 충분히 가치가 있음을 확인하였다.



<그림 3.3.4.14> Analysis of mechanical structural behavior for the external vibration

<표 3.3.4.8> Result of random vibration analysis

Contents		Values	Note
Deformation [mm]		2.15×10^{-8}	Vertical axis
Stress [MPa]	1-Sigma	3.11×10^{-5}	Probability: 68.269%
	2-Sigma	6.22×10^{-5}	Probability: 95.45%
	3-Sigma	9.34×10^{-5}	Probability: 99.73%
PSD response with natural Freq. [$\mu m^2/Hz$]	1^{st} mode	7.77×10^{-18}	at 49.59 Hz
	2^{nd} mode	2.14×10^{-18}	at 62.40 Hz
	3^{rd} mode	8.69×10^{-20}	at 94.18 Hz

바. 이송 및 설치

4GSR 가속장치 현장 설치 안정성 확보 및 일정 최적화를 위해 아래와 같은 설치 과정을 통하여 진행될 예정이다. 전자석 및 진공장치 등은 장치별 사전 평가를 통하여 설치를 위한 최적화 컨디션을 확보하여야 하며, 설치 현장의 정밀 측량은 엄격하게 이루어져야 한다.

주요 설치 과정은 아래와 같다.

1. 저장링 터널 정밀 측량 및 가속장치 좌표화
2. 정밀 측량 데이터 기반 거더 설치 위치 그라우팅
3. 거더 조립
4. 거더 사이 정밀 측량 및 정렬
5. 전자석 조립
6. 전자석 정밀 측량 및 정렬
7. 전자석 상부 분리
8. 서포트 및 관련 부품 조립
9. 진공 챔버 설치
10. 진공 챔버 정밀 측량 및 정렬
11. 진공 연결부 체결
12. 전자석 재조립
13. 케이블 및 LCW 조립
14. 최종 정밀 측량 및 정렬 확인
15. 진공 펌핑 및 누출 평가
16. Bake out and NEG 활성화
17. 게이트 밸브 개방

사. 프로토타입

4GSR의 건설 기간 거더 시스템의 제작 정밀도, 구조 강성 및 진동 모드 등의 기계적 특성 평가와 정렬 정밀도의 검증을 위해 거더 시스템의 프로토타입 제작 및 실험적 분석이 진행될 예정이다. 이를 통하여 제안된 기계적 안정성 확보 및 설치 절차가 적절하게 구현 가능한지 검증하게 될 것이다.

4장. 빔라인

4.1 빔라인 프론트엔드 (Front End) 진공 부품

4.1.1 빔라인 진공부품 설계 개요

빔라인 진공 시스템의 구축은 빔라인 건설에 있어 가장 기본적인 사항이며 최적의 조건으로 시스템을 구축하는 것이 운영 및 유지보수에 있어 중요한 사항이 될 것이다. 따라서 설치되어지는 진공 시스템 유지에 절대적으로 필요한 펌프 및 게이지, 펌핑 스테이션의 역할과 기능에 대해 점검하고 적절한 수량을 계산하여 적용하는 것이 필요하다. 4GSR 빔라인은 크게 프론트엔드(Front End), 광학허치(OH, Optical Hutch), 실험허치(EH, Experimental Hutch)의 세 부분으로 나누어질 수 있는데, 각 부분마다 진공도 설정이 다르다. 특히 프론트엔드 부분은 저장링 챔버와 접속되는 부분으로서 진공 설정에 주의가 필요하며 진공 사고에 대비한 Interlock 시스템이 함께 구축되어야 한다.

본 보고서는 프론트엔드, 광학허치 그리고 실험허치의 세 부분으로 크게 나누어 작성하였다. 일반적으로, 광자 빔라인은 기능적으로 네 개의 구간으로 구분 지을 수 있다. 첫 번째 구간은 삽입 장치 또는 휨 자석으로써, 빛을 발하는 방사광원(Radiation Source)을 의미한다. 두 번째 구간은 저장링 바로 바깥의 차폐벽 내부지역, 즉 프론트엔드 구간이다. 이곳은 저장링과 빔라인의 가교 역할을 담당하며, 광자 빔의 크기 제어와 감시가 이루어진다. 세 번째 구간인 광학허치는 차폐벽 바깥의 실험 구역으로 광자 빔을 단색광(Monochromatic Photon Beam)으로 분광시키는 기능을 갖는다. 마지막 네 번째 구간은 부대적인 광학 설비를 설치하여 실험을 직접 수행하는 구간으로 보통 실험허치 구역을 의미한다.

4.1.2 프론트엔드 설계 기준

가. 프론트엔드 설계의 기본요건

빔라인의 프론트엔드 구간은 다음 다섯 가지 기본적인 요구조건을 충분히 만족하도록 설계・제작・설치되어야 한다.

1. 프론트엔드의 진공도는 저장링의 진공도와 같거나 더 양호해야 하며, 양측의 진공 사고로부터 서로를 보호하기 위하여 저장링과 빔라인의 진공을 신속하게 격리할 수 있는 장치를 갖추어야 한다. 이를 구현하기 위해 연동장치(Interlock System)를 구성하여야 한다. 저장링 진공용기와 마찬가지로 프론트엔드의 진공도는 저장링 운전 중에 5×10^{-9} Torr, 저장링을 운전하지 않을 때는 5×10^{-10} Torr를 권장값으로 규정하고 있다. 이러한 진공도를 만족시키기 위하여 프론트엔드 구간에는 충분한 배기 용량을 갖춘 이온 펌프를 적절히 배치해야 한다.

2. 일반적으로 진공 사고로 인하여 발생하는 파괴압력파(Rupture Pressure Wave)는 충격파로 분류되며, 이때 공기에 대한 충격파의 속도는 약 1,000 m/s 정도이고, 헬륨에 대해서는 2,000 m/s 정도로 알려져 있다. 프론트엔드에서는 이러한 충격파압을 감지하여 충격파가 저장링에 도달하기 전에 빠른 잠금 셔터와 음압지연관을 이용하여 지연시킴과 동시에 저장링과 빔라인 사이의 차단 밸브를 닫아 저장링의 진공을 충격파로부터 보호하여야 한다.

3. 프론트엔드는 빔라인 실험 시 저장링으로부터 발생하는 유해 방사선의 범위를 하류 진공용기 플랜지 직경의 2배 범위 이내로 최소화하고 안전 셔터가 작동하였을 때는 유해방사선을 콘크리트 방호벽 내부에서 완전히 차폐시킴으로서 빔라인 이용자를 유해 방사선으로부터 보호하여 생체적으로 안전한 실험 환경을 제공하여야 한다.

4. 방사광에 직접 노출되는 구성부품은 저전도수(LCW, Low Conductivity water)를 이용하여 냉각시킴으로써, 휨 자석 및 ID 방사광 열부하로 인한 진공도의 저하와 구성부품의 파손 등을 방지하여야 한다. Fixed mask, Beam stopper, Photon shutter 등과 같이 방사광에 직접 노출되는 구성부품은 많은 열부하를 받기 때문에 방사광이 냉각 표면에 비스듬히 입사하게 하여 열부하 강도를 낮춰줌과 동시에 충분한 유량의 저전도수를 공급하여 냉각시킬 수 있도록 하여야 한다. 불순물과 이온을 제거한 저전도수(LCW)는 보통 1 MΩ·cm 이상의 순도(저항)를 가지며, 높은 온도 정밀도를

갖춰 방사광에 노출되는 장치의 냉각수로 활용된다.

5. 프론트엔드의 작동상태는 여러 종류의 센서에 의해 검출될 수 있도록 구성되어야 한다. 초고진공 상태 감시, 충격파 검출, 공압 감시, 냉각수 흐름 상태, 그리고 각종 개폐장치의 위치 검출용 스위치 등을 적절히 선정하여 프론트엔드의 작동 상황을 면밀히 감시해야 한다.

나. 프론트엔드 구성품의 일반적 설계 기준

앞서 기술한 설계 기본요건을 만족하면서, 제작과 설치가 용이하고 구성부품이 안정적으로 동작할 수 있도록 품질관리에 중점을 두고 프론트엔드를 구성하여야 한다. 몇 가지 중요한 사항은 아래와 같다.

1. 프론트엔드의 모든 진공 용기의 최소 직경은 빔라인 운용자가 사용하고자 하는 수직과 수평의 방사광 크기에 일정량의 여유 간격을 부가한 것 이상이어야 한다. 이 여유 간격의 최소량은 일반적으로 ± 10 mm로 하는 것이 보편적이다. 이 최소 여유 간격보다 진공 용기의 내경이 크면 진공 용기의 배기 성능을 향상시킬 수 있으므로 진공 용기의 제작에 영향을 주지 않는 범위에서 진공 용기의 내경을 확대시키는 것이 바람직하다.

2. 일반적인 Spool류(특별한 용도가 없는 진공 용기)는 가능하면 상류를 회전 플랜지로 하류쪽을 고정형 플랜지로 하여 설치가 용이하도록 한다.

3. 성형 벨로우즈(Formed Bellows)는 취급이 간편하고 가격이 경제적이며 내부 표면적이 작아 진공 측면에서 유리하나, 용접형 벨로우즈(Welded Bellows)에 비하여 연성이 작다. 벨로우즈의 변형 길이는 150 ℃의 베이크아웃 과정에서 프론트엔드 진공 용기의 열팽창에 대비하기 위한 것이므로 (수식 4.1.2.1)에 의해 변형 길이를 계산할 수 있다.

$$\Delta l(m) = (t_2 - t_1) \times (17.3 - 18.7) \times 10^{-6} \times l_0(m) \quad \text{(수식 4.1.2.1)}$$

벨로우즈는 베이크아웃 시 반드시 제 위치를 유지해야 하는 고정 진공 용기 주변에는 반드시 설치하여야 한다. 벨로우즈의 진정한 유용성은 설치의 편의성에 있으므로 적어도 1.5 m 간격으로 벨로우즈를 삽입하는 것이 바람직하다.

4. 방사선 (Bremsstrahlung Radiation) 준위가 매우 높은 콘크리트 차폐벽 내부에서는 방사선에 의하여 고무, 플라스틱 등의 재질이 경화 (Hardening) 현상을 일으키므로

Elastomer나 Buna-N 재질의 씰(Seal)이나 호스 등을 사용하여서는 안 되며 반드시 금속제 씰과 금속제 냉각유로관을 사용하여야 한다.

5. 냉각수 배관의 크기는 외경 $\frac{1}{4}''$, $\frac{3}{8}''$ 두 종류로 규격화하여 제작 및 설치 시에 혼돈이 생기지 않도록 규격화하는 것이 좋다. 냉각유로는 압력 손실이 0.5 기압 이하가 되도록 구성하고, 주 냉각계 배관은 저압용 저전도수 냉각라인을 이용한다. 공압 배관의 재질은 STS (Stainless Steel)를 사용하며, 구경의 크기는 $\frac{3}{8}''$과$\frac{5}{8}''$로 통일하여 사용한다.

6. 프론트엔드의 구성부품은 모두 초고진공용이므로 전해연마(Electro- polishing)와 엄격한 진공용 화학세척(Chemical Cleaning) 작업이 수행되어야 하며, 진공과 접하는 부위의 금속 접합 방식은 TIG 용접, 진공브레이징, 전자빔 용접 등으로 국한되어야 한다. 특히 진공 내에서 냉각수로를 연결할 경우에는 냉각수가 누출될 때 진공에 곧바로 노출되지 않도록 연결부위를 설계하여야 한다.

다. 냉각장치의 설계 기준

방사광에 직접 노출되는 Fixed mask, Beam stopper, Photon shutter 등은 저전도수에 의한 충분한 냉각이 필요하며, 초고진공 특성의 유지와 아울러 운전 온도상승에 따른 부품의 구조적인 결함을 최소화하기 위하여 열전달 특성이 우수한 소재를 사용하는 것이 요구되고 있다. 빔라인에 이용되고 있는 각 부품의 냉각장치 설계에 있어서 주요 고려 사항은 다음과 같이 요약해 볼 수 있다.

1. 입사 방사광 전체를 완전히 차단할 때도 열부하로부터 안정적으로 운전될 수 있도록 충분한 안전율을 고려하여 냉각 부품을 설계해야 한다.

2. 진공 사고 등으로 FCS (Fast Closing Shutter)가 닫히고 이어서 Photon shutter가 닫히는 순간에는 방사광이 FCS의 개폐부를 수 초간 가열시킬 수 있는데, 이 경우를 고려하여 셔터 날(Blade)을 설계해야 한다.

3. 방사광이 직접 입사되는 Fixed mask, Beam stopper, Photon shutter 등의 냉각장치의 표면 온도는 연화온도(softening temperature)를 초과하지 않도록 한다.

4. 냉각수관의 벽면 온도는 100 ℃를 초과하지 않도록 한다.

5. 냉각수의 입출구 온도차는 10 ℃를 초과하지 않도록 하여야 하고, 냉각수의 공급 온도는 25~30 ℃의 범위로 한다.

6. 냉각 부품은 열부하 밀도를 가능한 한 희석시키기 위한 구조로 설계해야 한다.

7. 냉각수관의 외경을 규격화하여 부품의 호환성을 유지하여야 한다.

8. 초고진공용 냉각장치의 관로 부식 방지 및 전자기에 의한 냉각수의 도전화를 방지하기 위하여 저전도수를 냉각 매체로 사용하여야 한다.

라. 방사선 차폐 관련 요구조건 및 지침

프론트엔드 구간에서 방사선을 방어하기 위한 장치로는 안전 셔터(Safety Shutter, or Bremsstrahlung Shutter)와 납 차폐 조준기(Lead Collimator)등의 부속 차폐물이 있다. 방사선 누설을 막기 위해 사용되는 안전 셔터와 부속 차폐물은 다음과 같은 방사선을 복합적으로 고려하여야 한다.

1. 입사모드(Injection Mode)에서는 저장링 터널 내의 분사된 다수의 지점에서 전자의 손실에 의해 생성되는 방사선, 임의의 한 지점에서 전자빔 전체의 손실에 의해 생성되는 방사선, Gas Bremsstrahlung, 그리고 이차선원으로부터의 산란 방사선 등을 차폐계산에 반영해야 한다.

2. 정상 운전상태인 저장운전모드(Stored Mode)에서는 전자빔이 임의의 한 지점에서 전량 손실되어 생성되는 방사선, Gas Bremsstrahlung, 궤도상에서 점차적인 전자 손실에 의해 생성되는 방사선 등을 고려해야 한다.

위에서 언급한 방사선을 방어하기 위한 안전 셔터와 부속 차폐물의 요구조건과 설계를 위한 지침(Guideline)은 다음과 같이 요약해 볼 수 있다.

요구조건으로는, 1) 안전 셔터는 입사 시간 동안과 빔라인을 사용하지 않을 때는 반드시 방사선을 차단할 수 있도록 닫혀있어야 한다. 2) 부속차폐는 방사선 투과를 최대로 억제할 수 있는 형태로 구성되어야 한다. 3) 빔라인 설비의 공간확보를 위하여 가능한 한 축소 지향적인 구조를 갖도록 해야 한다. 특히 길이 방향으로 짧게, 폭 방향으로는 넓게 구성하는 것이 바람직하다.

차폐 설계를 위한 지침으로는, 1) 저장링 터널 안에서 임의의 어떤 방향에서도 250 mm 납에 등가한 차폐 두께를 유지해야 한다. 2) Safety shutter는 터널벽의 광자 빔 인출구를 충분히 막을 수 있는 크기로 제작하여야 하고 Tungsten 200 mm 두께를 가져야 한다. 3) Safety Shutter는 가능한 한 터널벽의 광 인출구에 근접시켜 누설

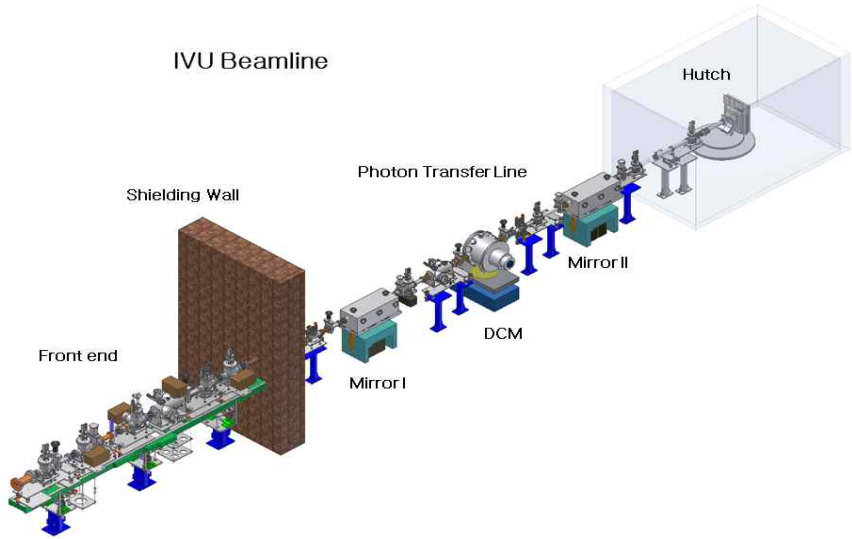
각도를 최대한 좁힘으로써 부속차폐의 크기를 최소화해야 한다.

위에서 언급한 지침에 따라 Safety shutter로 사용할 텅스텐 합금의 두께는 20 cm 이상으로 규정하였다. 부속 차폐물인 납 조준기는 각각 최소 10 cm의 두께로 방사선 누출이 가능한 방향의 직선 경로를 차단하기 위해 프론트엔드 구간 내에 설치하는 것을 원칙으로 한다. 또한, 터널밖에는 산란 방사선(Scattered Radiation)을 최대한 차폐할 수 있도록 빔라인 구성 상태에 따라 적절한 차폐를 시행해야 한다.

마. 공학 설계의 근간

4GSR 빔라인은 표준화, 모듈화, 집중화의 세 가지 원칙에 근거를 두고 공학 설계의 시작, 설계, 제작 및 설치 공정에 적용한다. 첫째로, 장치의 표준화를 함으로써 예산 절감은 물론, 설계 노력을 줄일 수 있고, 제작공정 단축, 품질관리 및 품질보증을 용이하게 할 수 있다. 그 결과, 장치의 운영·유지·보수가 수월해지고 신뢰성을 높일 수 있다. 두 번째 원칙은 모듈화로서 빔라인 운영에 있어 매우 절실히 요구된다. 즉, 빔라인 운영 특성상 하계, 동계의 정기 점검 기간 중에만 저장링 내부에 접근할 수 있으며, 이 기간에만 유지보수 작업을 진행할 수 있으므로 각 구간을 모듈화하여 단기간 내에 작업을 효과적으로 완료할 필요성이 있다. 세 번째 원칙은 집중화로, 이는 빔라인의 기본 구성상 요구되는 원칙이다. 보통 빔라인은 길이가 대략 55~60 m 정도로 넓은 구역에 많은 제어장치가 분산되어 있다. 이를 효과적으로 운영하기 위하여, 분산된 제어장치를 한곳에 모아 집중적으로 제어 감시할 필요가 있으므로 집중화가 요구된다. 특히 진공 제어 및 연동장치의 운영은 한곳에 집중시켜야만 관리 측면에서 용이하다.

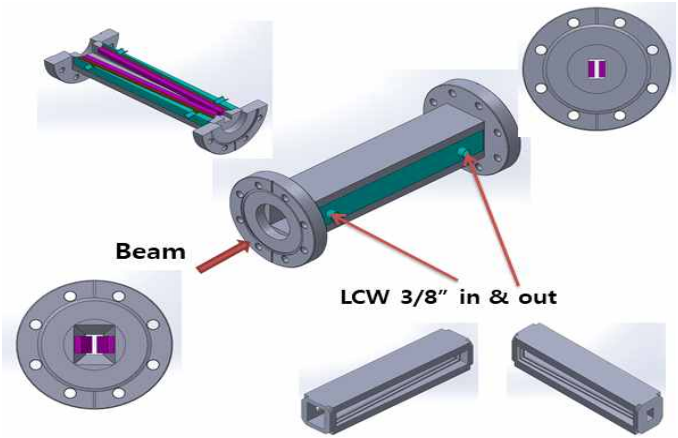
4.1.3 진공 부품



<그림 4.1.3.1> IVU beamline layout

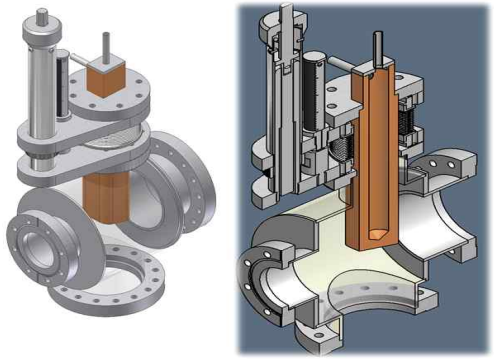
<그림 4.1.3.1>은 IVU 빔라인 전체 진공 부품 배열을 보여주는 것으로 주요 부품으로는 Fixed Mask, Beam Stopper, Photon Shutter, Movable Mask, Screen Monitor 등이 프론트엔드에 설치되며 광학장치(DCM, mirror), slit, 진단장치 등이 광학허치(OH)에 설치되어진다. 주요 진공 부품의 설명은 다음과 같다.

○ Fixed mask : Fixed mask는 프론트엔드에서 방사광에 가장 먼저 노출되는 부품으로 재질은 GlidCop이며, 모양은 DN200CF 크기의 플랜지 형태의 구조로 제작한다. 이는 불필요한 방사광의 유입을 차단하여 빔 하류(Down Stream) 쪽에 배치되어있는 주요 부품들이 손상되거나 진공도가 저하되는 것을 방지한다. 인가되는 열부하를 냉각시키기 위해 외경 $\frac{3}{8}$″의 평행한 냉각수 유로를 적용시켰다. 불필요한 방사광을 차단하는 개구부의 선단 부위는 경사를 주어 단위 면적당 열량 부하를 감소시키도록 하였으며 마스크의 과열 여부를 감지할 수 있도록 K-type의 열전대(Thermocouple)를 개구부 가까이에 설치하도록 하였다. <그림 4.1.3.2>는 Fixed mask의 조립도 및 내부 형상을 보여주고 있다.



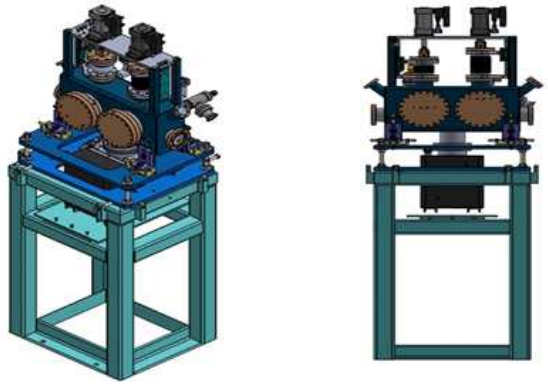
<그림 4.1.3.2> Fixed mask 조립도

○ Beam stopper : Beam stopper는 photon shutter 전단부에 설치하는 것으로 일차적으로 불필요한 빔을 차단하는 역할을 수행한다. GlidCop을 소재로 사용하며 입사각 15°를 유지하여 일정하게 빔 사이즈를 조절한다. Beam stopper는 Insertion device와 연동하여 연결되어있는 밸브를 보호하기 위해 개폐장치로 구동한다. <그림 4.1.3.3>은 Beam stopper 내부 형상 및 조립도를 보여주고 있다.



<그림 4.1.3.3> Beam stopper 조립도

○ Photon shutter : Photon shutter는 프론트엔드에 설치되는 핵심적인 부품으로 빔 운전 사고 및 기타 유지/보수 업무 수행 시 고속으로 작동되어 광자 빔을 완전히 차단함으로써 프론트엔드 하류 부품을 보호하는 기능을 수행한다. 빔과 직접적으로 접촉하는 부분은 GlidCop 소재로 하며, 입사 각도를 최대로 작게하여 빔의 전력밀도를 낮추어 열부하를 최대로 감소시키도록 하였다.



<그림 4.1.3.4> Photon shutter 조립도

Photon shutter는 위에서 언급된 것처럼 빔을 완전히 차단하여 하단부 진공 부품 및 광학장치를 보호하는 기능을 하며, 이를 위해 광자빔을 직접 노출되는 부분의 Heat load로부터 장치의 안전성을 확보하는 것이 매우 중요하다. Heat load에 직접 접촉하는 소재를 보호하기 위해서는 다음의 세 가지 내용에 주목해야 한다.

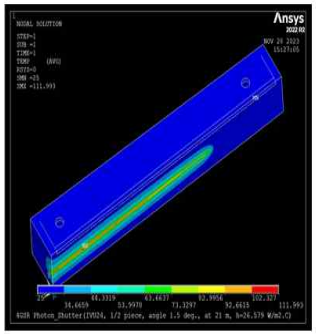
1. Heat load로 인한 구조적 응력이 항복강도를 넘어서지 않도록 한다.

2. Heat load로 인한 온도상승에 있어 해당 소재에 대한 softening temperature를 넘어서지 않도록 한다(GlidCop: 300 ℃).

3. LCW 벽면 온도가 물의 비등 온도(100 ℃)를 넘어서지 않도록 한다.

<그림 4.1.3.5>와 <그림 4.1.3.6>은 방사광 빔과 직접적으로 접촉하는 IVU, Bending beam photon shutter blade 온도 분포를 보여주고 있다. IVU24 undulator 빔라인은 heat load가 매우 크기 때문에 가능하면 입사각을 최대로 작게 하며, 또한 source point에서 가능하면 멀리 떨어져 설치할 필요가 있다. 또한 냉각수 유량을 높이 하여 film coefficient 계수를 크게 하여 냉각 효율을 높여야 한다. 하나의 빔라인에 유입되는 LCW 유량은 90 L/min으로 설정되었으며, 따라서 냉각에 민감한 photon shutter 및

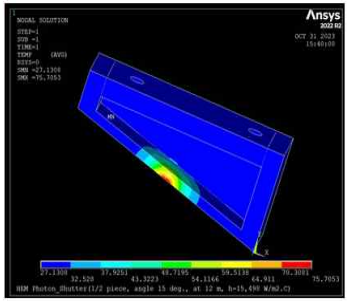
movable mask 진공 부품은 최대 유량(10 L/min)으로, 유속을 증가시켜 film coefficient 수치를 증가시키는 것이 필요하며 그 외 진공 부품은 기본적인 유량 5 L/min로 설정이 된다. HEM은 bending magnet 빔라인으로 상대적으로 전력밀도가 IVU24에 비해 매우 적지만 빔 사이즈가 매우 큰 관계로 해석을 통해 안전성을 확인하는 것이 필요하며, 입사각 15°로 설정해서 해석을 진행한 결과 blade 표면 온도는 75.7 ℃로 안전한 것으로 나왔다. <표 4.1.3.1>은 냉각 파이프 직경과 유량에 대한 film coefficient 수치를 보여주고 있다.



- Parameters
  - Power density (P_{max})=165.54 kW/mrad^2
  - Thickness : 5 mm
  - Incidence angle : 1 – 2 degrees
- Material
  - GlidCop
- Convection Heat Transfer
  - Film coefficient(W/m^2 ℃) : 파이프내경 **5.4 mm**
    10,127(유량 3 L/min, 유속 : 2.18 m/s)
    15,266(유량 5 L/min, 유속 : 3.64 m/s)
    26,579(유량 10 L/min, 유속 : 7.28 m/s)
- Distance(21 m)

(1.5 deg. ½ piece, max temp. 111.9 ℃ (blade surface), 63.4 ℃(LCW wall), h=26,579 W/m^2 ℃, 21 m)

<그림 4.1.3.5> IVU24 Photon shutter 열 해석 결과



- Parameters
  - Power density (P_{max})=1.11 kW/mrad^2
  - Thickness : 5 mm
  - Incidence angle : 15 degree
- Material
  - GlidCop(Softening temperature 300 ℃)
- Convection Heat Transfer
  - Film coefficient(W/m^2 ℃) : 파이프 내경 5.4 mm
    15,266(유량 5 L/min, 유속 : 3.64 m/s)
- Distance
  - 12 m from source point

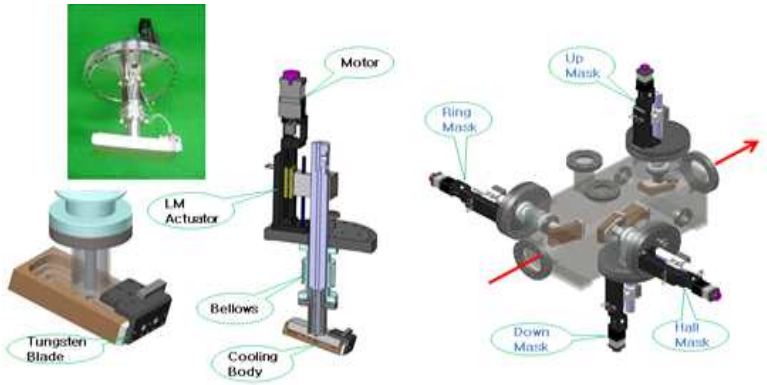
(15 deg. ½ piece, max temp. 75.7 ℃(Blade surface), h= 15,266 W/m^2 ℃)

<그림 4.1.3.6> HEM Photon shutter 열 해석 결과

<표 4.1.3.1> 냉각 파이프 직경 변화에 대한 Film coefficient

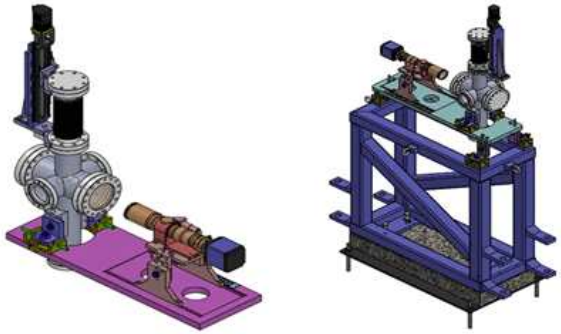
파이프 내경	유속 (Velocity)	Film coefficient (W/m^2 ℃)
1/4″ (5.4 mm)	3.64 m/s	15.266
	7.28 m/s (10 L/m)	26.579
3/8″ (8.53 mm)	1.46 m/s	6.708
1/2″ (11.7 mm)	0.78 m/s	3.811

○ Movable mask : Movable mask는 불필요한 빔을 광학장치에 인가되기 전 제거하는 것으로 slit의 기능을 가지고 있을 뿐 아니라 필요한 경우 빔의 완전 차단도 가능하게끔 설계된다. 실험의 종류 및 용도에 따라 빔과 접촉되는 블레이드 재질을 변경할 수 있게 설계하였으며, LM actuator 및 Stepping motor를 사용하여 정밀도를 향상시키고 이용의 편리성을 위해 원격 조정이 가능하도록 하였다. <그림 4.1.3.7>은 movable mask 내부 형상 및 조립도를 보여주고 있다.



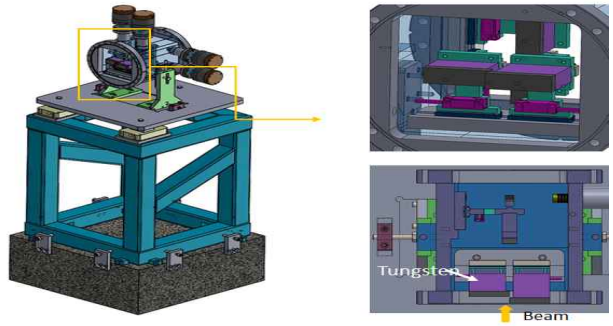
<그림 4.1.3.7> Movable mask 형상 및 조립도

○ Screen monitor (Imager & Pop-in) : 빔라인에는 여러 가지 진단장치가 설치되어지는데 빔의 형상 및 위치정보를 확인하고자 screen monitor를 설치한다. Imager와 Pop-in은 기본 형상은 유사하며 보다 정밀한 정보를 확인하기 위해 카메라 성능을 높인 것이 Imager이며, 따라서 Pop-in은 빔 정보 확인이 필요한 여러 곳에 설치하도록 했다. <그림 4.1.3.8>은 screen monitor 형상 및 조립도를 보여주고 있다.



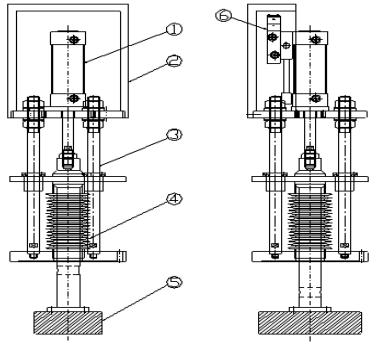
<그림 4.1.3.8> Screen monitor 형상 및 조립도

○ Slit : Slit은 광학장치에 인가되는 빔 크기를 정밀하게 조절해 주는 역할을 한다. 따라서 제품의 설계부터 조립 및 설치까지 매우 정밀하게 준비해야 하며, 특히 빔과 접촉되는 부분은 정밀 가공을 통해 접촉 시 발생되는 방사선 산란을 줄이도록 해야 한다. Slit은 광학허치에 설치되는 광학장치(DCM, Mirror) 전단에 설치되며, 또한 실험장치가 있는 실험허치 내에도 설치되어진다. <그림 4.1.3.9>는 Slit의 내부 형상과 조립도를 보여주고 있다.



<그림 4.1.3.9> Slit 형상 및 조립도

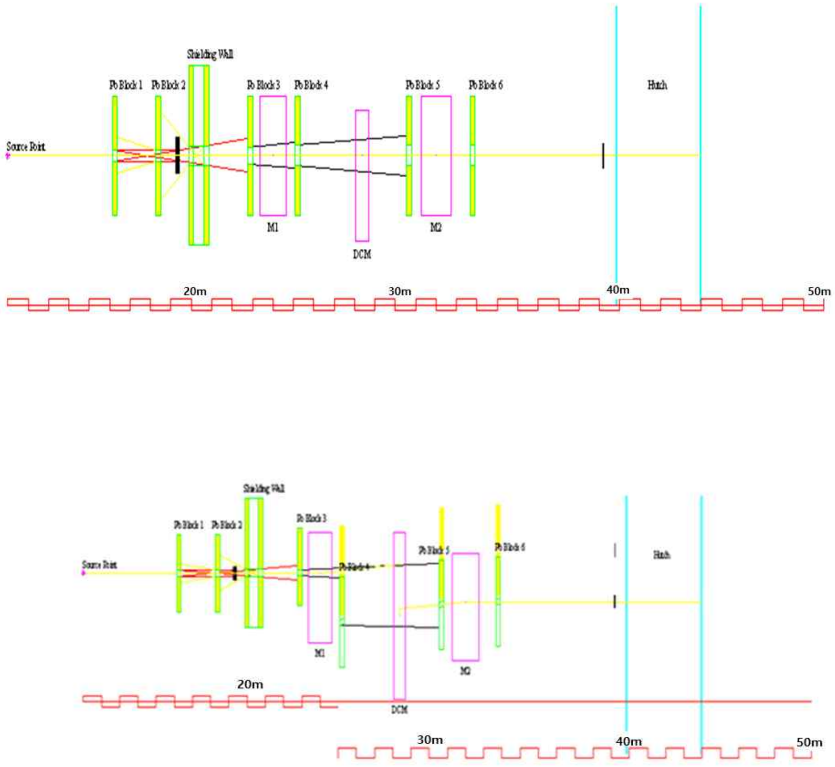
○ Safety shutter : Safety shutter는 저장링이 정상운전 중이라도 빔라인을 가동하지 않을 경우, 혹은 빔라인에서의 진공 사고 등으로 인하여 갑작스럽게 고속 잠금 셔터 등이 닫힐 때, 콘크리트 방호벽 내부로 제동복사 방사선을 완전히 차폐시키는 기능을 가지고 있다. 기본적으로 기체방출 요소를 최소로 해야 하며, 별도의 냉각시스템을 구축하지 않는 관계로 photon shutter와 맞물림 장치로 연동해야 한다.



<그림 4.1.3.10> Safety shutter 조립도

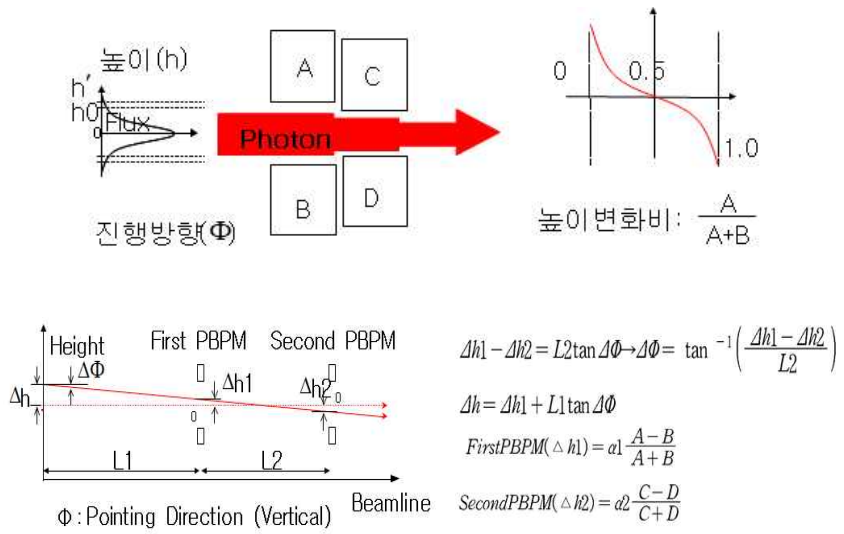
<그림 4.1.3.10>은 safety shutter 조립도를 보여주고 있다. 위 조립도에서 ① Pneumatic Cylinder (Stroke: 50 mm), ② Cover, ③ Guide Rod, ④ Welded Bellows ⑤ W-Block, ⑥ Solenoid Valve (DC 24 V) Safety shutter를 나타낸다.

Safety shutter는 일반적으로 프론트엔드 끝단, 즉 shielding wall 앞에 설치되는 것이 보통이며 이는 제동복사 방사선을 최대로 차폐시키고자 함이며, 저장링에서 발생하는 제동복사선을 최대로 진공 spool 내로 집속시키려면 적절한 납 블록을 프론트엔드와 광학허치에 설치하여야 한다. 이와 동시에 Collimating spool의 개구부를 최대로 적게 하여 실험 홀에서의 이용자 안전을 보장해야 한다. Collimating spool 개구부 크기는 향후 지반 운동의 영향을 충분히 고려하여 결정해야 하며, 아래 <그림 4.1.3.11>의 제동복사선 추적도(수평, 수직)는 IVU 빔라인에 설치되어진 납 블록 및 Collimating spool의 위치 및 크기를 고려하여 계산된 값의 일례를 보여주고 있다.



<그림 4.1.3.11> 제동복사 방사선의 추적선도. 수평 추적선도 (상), 수직 추적선도 (하)

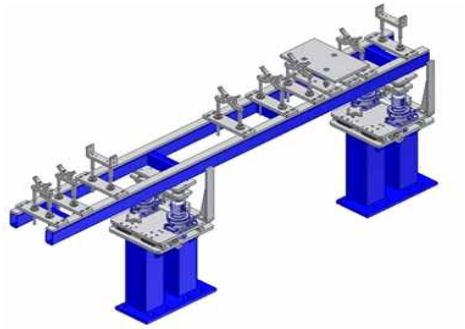
○ PBPM (Photon Beam Position Monitor) : 빔라인 실험에 있어 빔 위치의 정확한 모니터링은 매우 중요하다. PBPM을 이용하여 빔의 안정성을 파악할 수 있으며, 광학장치의 위치 정렬도 매우 효율적으로 수행할 수 있다. 2개의 PBPM이 프론트엔드에 설치되어지며 저장링 광원으로부터 방출된 방사광의 위치 및 빔 profile을 정확하게 파악할 수 있다. 빔라인 프론트엔드의 PBPM 정보는 저장링과의 연계성을 가지며 실시간 빔 위치 및 궤도 수정도 가능하여 빔라인 정렬을 매우 효율적으로 이루어질 수 있도록 하였다. <그림 4.1.3.12>는 PBPM 측정 원리를 보여주고 있으며, 빔 검출 방식에는 대략 Blade, Wire, Mesh 등 세 가지 타입이 있는 것으로 ID 특성에 잘 맞는 Wire 타입 적용이 고려되고 있다.



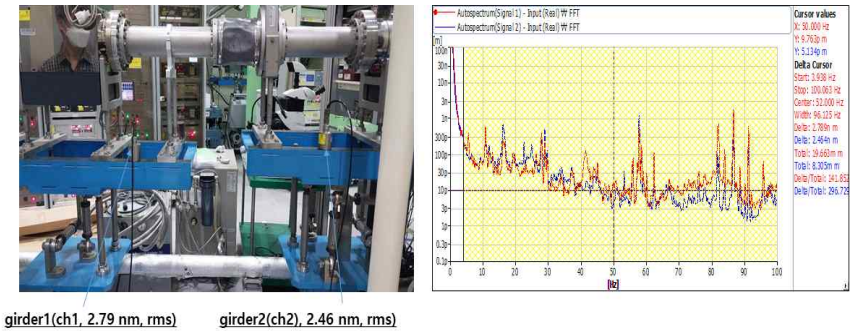
<그림 4.1.3.12> PBPM 측정 개념도

○ Girder & Support 시스템 : 빔라인의 진공장치를 지지하는 구조물로 정밀 조정 장치, 진동 흡수, 열팽창 흡수 등 설계 요구조건을 충족시키는 조건으로 제작되어야 한다. 조정 장치는 이중으로 되어있으며 일차적으로 하단부에 screw-jack을 사용하여 개략적인 조정 역할을 하고, 상단부에서는 더욱 정밀한 조정을 하게 된다. 특히 프론트엔드처럼 설치 공간의 제약이 큰 공간에서, 원활한 빔 정렬을 하기 위해서는 일체형 거더를 적용하는 것이 유용하다. <그림 4.1.3.13>은 빔라인에 적용되는 일체형 거더 시스템을 보여주고 있다. 지지구조물은 진공 및 지진 부하를 이겨낼 수 있는

강성을 갖도록 설계하였으며, 정밀 조정 완료 후 진동을 방지하기 위한 별도의 보강 지지대를 설치하여 고정해야 한다. 지지대 내부에는 건조 모래를 채워 방진 효과를 추구하며, 표면은 경제적이며, 내식성 및 내구성이 좋은 분체도장을 적용한다. 일체형 거더 시스템은 포항 가속기 빔라인에도 적용이 되고 있으며 <그림 4.1.3.14>와 같이 진동 결과도 매우 좋으므로 4GSR 빔라인 거더 시스템 적용이 가능하다.



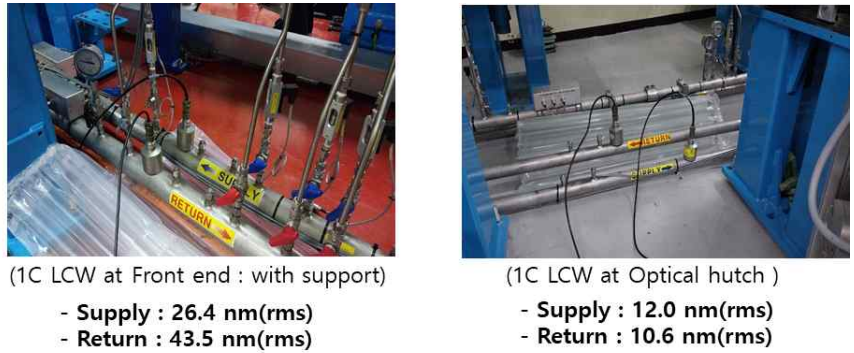
<그림 4.1.3.13> 일체형 거더 시스템



<그림 4.1.3.14> 일체형 거더 시스템 진동 측정 결과

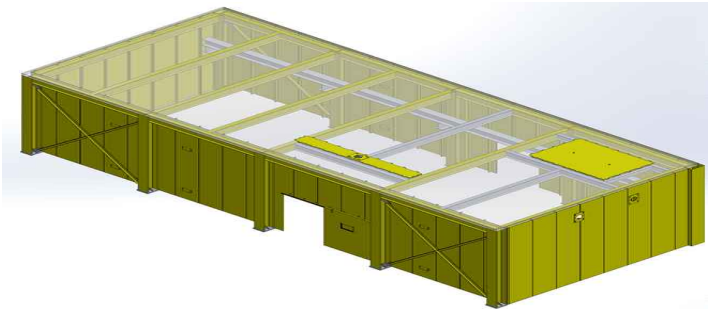
○ LCW 시스템 : 빔라인에 설치되어지는 LCW 시스템은 견고하게 설치하여 바닥 또는 거더 시스템에 주는 진동 영향을 최소화해야 한다. 빔라인에서의 진동 유발 요소를 제거하는 것이 가장 좋은 방법이겠지만 기본적으로는 각각의 시스템의 강성도를 크게 하여 발생하는 진동 변위를 최소화하고, 또한 주변장치로의 전달을 사전에 방지하는 것이 좋은 방법이 될 것이다. <그림 4.1.3.15>는 PLS-II 빔라인에 설치되어진 LCW 진동 변위에 대해 각각의 장소에서 측정된 결과를 보여주고 있다.

기본 진동 변위 기준을 0.1 μm 설정하고, 그 기준 이하로 진동 변위를 관리하는 것이 필요한데 프론트엔드 및 허치 내에서의 진동 변위는 기준을 충족하고 있으며 매우 좋은 결과를 보여주고 있다. 이러한 LCW 시스템은 4GSR에도 적용될 예정이다.



<그림 4.1.3.15> 빔라인 LCW 진동 측정

○ 허치 (Hutch) : 빔라인 허치는 실험장치가 설치되어 각 빔라인 특성에 맞는 실험을 할 수 있도록 하는 공간으로서 방사선 차폐는 아주 중요한 요소이다. 크게 허치는 광학허치와 실험허치로 나누어질 수 있는데, 광학허치에는 각종 광학장치 및 heat load 저감용 필터/윈도우 그리고 진단장치 등이 설치되어지며, 실험허치에는 실험과 직접적으로 연결된 실험장치가 설치되어진다. 각 빔라인 특성에 맞게 허치가 설치되어지지만, 기본적인 차폐 사양은 공통으로 적용될 수 있으며, 그에 따라 표준화 적용도 중요한 부분이다. 기본적인 틀에 있어서 방사선 특성에 따라 콘크리트 또는 철판(납 포함)으로 할 수 있는데, 출입문은 수동 sliding door와 여닫이 형식 중에 설치 현장 조건에 따라 선택할 수 있으며 허치 천정에는 최대 크기의 문을 설치하여 대형 장비의 설치가 용이하도록 해야 한다. 각각의 벽면에는 적절한 위치에 창문, Interlock 및 전력 패널, 가스 용기, 후드, 방사선 차폐용 납 블록 등을 설치하며 설치 완료 후 내부에서 검사하여 빛이 새어 들어오지 않게 완전히 차단시켜 마무리한다. <그림 4.1.3.16>은 허치 개념도를 보여주고 있는 것으로 빔라인 특성에 맞게 크기 및 형상은 변경될 수 있다.



<그림 4.1.3.16> 빔라인 실험허치 개략도

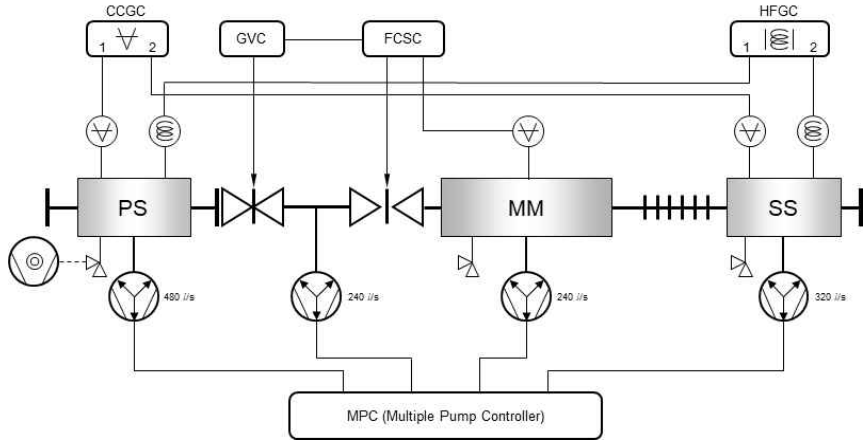
○ 장치 정렬 : 모든 빔라인 기계 및 진공장치는 설치 후 정렬 작업을 수행해야 한다. 정밀 설치가 요구되는 장치를 측량하기 위해서는 반드시 외부 타겟을 부착해야 관측할 수 있다. 이 타겟을 피듀셜(Fiducial)이라 부르며, 측량 및 정렬 시 사용하는 기준점이 된다. <그림 4.1.3.17>은 피듀셜 시스템의 분리 및 조립 상태를 보여주고 있다. 빔라인 정밀 장치(광학장치 및 slit 등)는 진공 용기 내부에 있으므로 외부에서 관측을 직접 할 수 없으며, 이런 장치는 내부 장치 특성을 외부의 관측 가능한 지점으로 옮겨 놓는 과정, 즉 측량 좌표 기준점 설정 작업이 필요하다. 이러한 작업은 CMM 측정실에서 이루어지며, 주의할 사항은 CMM 측정실에서 작업 시 기계 좌표계의 중심은 반드시 전자빔이 지나는 중심과 일치해야 한다는 점이다. 이러한 작업 없이 외부 플랜지의 중심을 기계 좌표 중심으로 설정하면 용접이나 조립 오차 등이 좌표 기준점으로 전달되어 위치 오차를 유발한다.



<그림 4.1.3.17> 피듀셜 포스트 및 타겟 ((a) con type, (b) plate type, (c) hole type)

4.1.4 프론트엔드 진공계

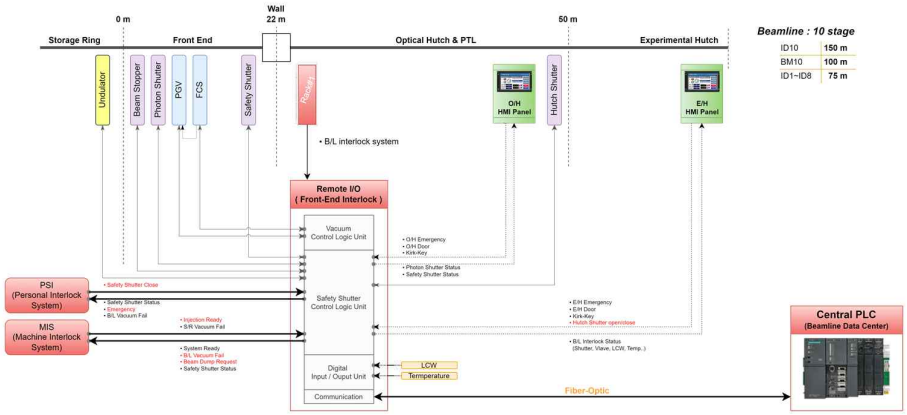
프론트엔드는 저장링과 빔라인의 가교역할을 하므로 어느 한쪽의 진공상태가 직접 상대편에 영향을 주게 된다. 그러므로 안정적인 저장링의 운전을 위해서 프론트엔드의 진공상태는 항상 저장링보다 양호한 상태를 유지해야 한다. 프론트엔드의 진공상태는 저장링을 운전하지 않는 경우 2×10^{-10} Torr 이하의 상태를 목표로 빔라인 진공계통을 설계하며, 실제로 저장링을 운전하지 않는 경우 5×10^{-10} Torr, 빔라인을 운전하는 경우 5×10^{-9} Torr 이하의 상태를 유지하도록 한다. 이를 위하여 모든 진공부품은 이 조건에 부합되는 부품을 사용해야 하며, 규정 진공도를 얻기 위하여 200 ℃까지 열처리가 가능한 부품이 선정되어야 한다. 더욱이 차폐벽 내에서는 방사선에 의해 쉽게 경화되는 고무 재질의 씰을 사용해서는 안 된다. 진공계는 <그림 4.1.4.1>과 같이 크게 진공 측정계, 진공 용기 및 밸브, 배기계로 크게 나눠 볼 수 있다. (PS : Photon Shutter, MM : Movable Mask, SS: Safety Shutter, CCGC : Cold Cathode Gauge Controller, HFGC : Hot Filament Gauge Controller, FCSC : Fast Closing Shutter Controller, GVC : Gate Valve Controller)



<그림 4.1.4.1> 프론트엔드 진공계통의 계략도

4.1.5 Interlock System

인터락 시스템(Interlock System)은 크게 개인 안전 연동장치(PSI, Personal Safety Interlock System)와 가속기 장치 연동장치(MIS, Machine Interlock System)로 구성되어있다. 인터락 시스템은 저장링과 빔라인에서 발생하는 연동장치 조건들을 PSI 및 MIS와 공유하며, 각종 장치와 이용자를 보호하게 된다. 작동 조건에는 진공 계통, 각종 밸브와 셔터, 냉각수의 흐름과 온도, 저장링의 운전 상태 등이 포함된다. 인터락 시스템에 이상이 발생할 때 큰 위험을 초래할 수 있기 때문에 Reliability, Fail Safe, Redundancy, 케이블 보호 등의 요구조건을 만족하여야 한다. 빔라인 인터락 시스템은 크게 프론트엔드와 허치로 구분될 수 있다. <그림 4.1.5.1>은 빔라인 인터락 시스템 개념도를 보여주고 있다.

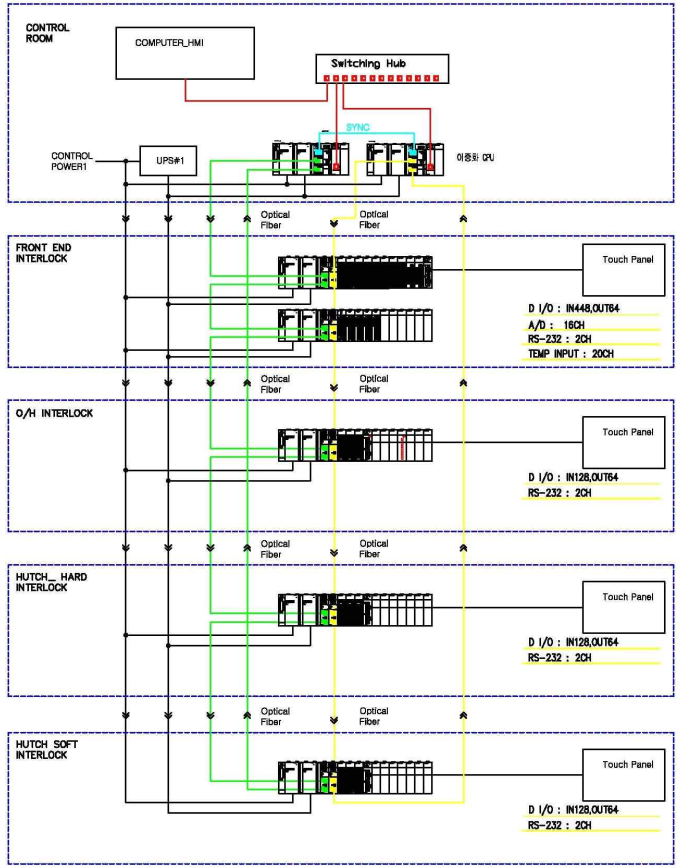


<그림 4.1.5.1> 빔라인 인터락 시스템 개념도

가. Beamline interlock system

빔라인 인터락 시스템의 제어기는 PLC (Programmable Logic Controller)로 산업 전반과 실험물리학 분야의 제어기로 다양하게 사용되고 있으며 시스템의 신뢰성 확보 및 고장 대응에 대한 가이드라인이 다양하게 제시되고 있어 다른 타입의 제어기보다 견고한 시스템을 구성하기 손쉽다. 빔라인 인터락은 기본적으로 빔라인 방사선으로부터 작업자를 보호하고, 장치의 장애 상황(PLC 제품 고장, 진공 사고, 부품 과열 등)을 고려하여 High Availability가 확보되도록 구성하여야 한다. 또한 데이터의

안전성 및 신뢰성 확보를 고려한 High Reliability의 설계는 필수이다. Local PLC와 Control Room의 연결은 Profinet과 같은 산업 ethernet 프로토콜을 사용하여 서로 간의 데이터 통신을 유기적으로 주고받는다. 또한 EPICS IOC와 연동되어 사용자를 위한 서비스를 제공할 수 있는 것을 특징으로 한다. <그림 4.1.5.2>는 빔라인 인터락 시스템의 Local PLC CPU의 이중화와 Remote I/O 지역 장치들에 대한 구성을 나타내었다.



<그림 4.1.5.2> 빔라인 인터락 CPU 이중화 및 Remote I/O 구성

Local PLC는 두 개의 PLC로 이중화 되어있다. 두 개의 PLC는 동일한 기능을 발휘하도록 같은 내용으로 프로그램이 되어있다. 이는 Control system을

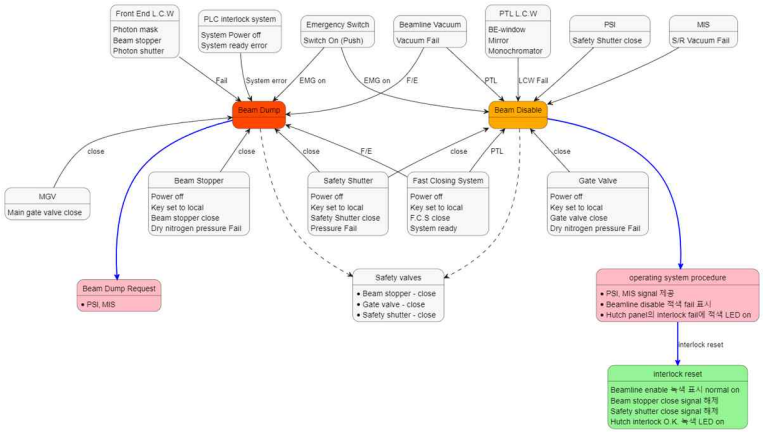
이중화함으로써 하나의 System에 이상이 발생하더라도 다른 System에 의하여 빔라인 인터락이 정상적으로 작동하도록 하는 데 그 목적이 있다. 두 개의 System이 모두 작동 불능 상태에 이른 경우에는 사용자와 장비의 안전을 위하여 Photon Shutter와 Safety Shutter를 닫도록 설계되어 있다.

나. Front End System

(1) 인터락 로직

전자빔은 Photon shutter, safety shutter open 상태에서 빔을 입사하고 beam disable 또는 beam dump 상태에서는 safety shutter, photon shutter를 close 한다. Front-End의 진공도가 10^{-6} 이상일 때 Front-End fail을 발생하고 beam dump와 동시에 fast closing shutter (FCS), gate valve, photon shutter 그리로 safety shutter를 close 한다.

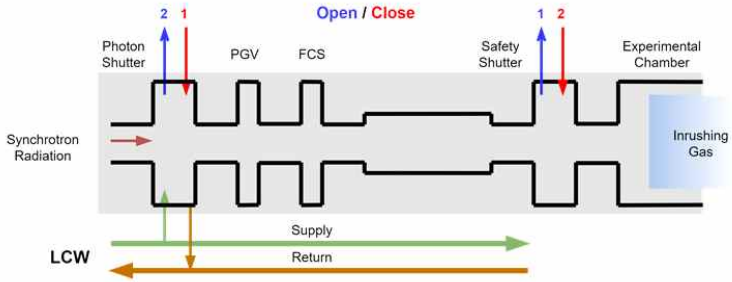
Photon shutter, safety shutter, 진공, 냉각수, hutch 및 전원 상태를 감지하여 이상이 발생하였을 경우 규정된 조치를 취한다. 규정된 순서에 따라 빔라인의 photon shutter, safety shutter 및 gate valve를 여닫도록 함으로써 사용자와 장비를 보호한다. <그림 4.1.5.3>은 빔라인 인터락에서 발생하는 주요 인터락에 대한 구성을 나타내었다.



<그림 4.1.5.3> 빔라인 인터락 로직 구성도

(2) 광자 셔터(Photon Shutter)와 안전 셔터(Safety Shutter)의 개폐

광자 셔터와 안전 셔터는 이용자 보호를 위해 방사광을 차단하는 역할을 한다. 안전 셔터는 광자 셔터와 달리 광자빔으로 인한 온도상승에 취약하므로 직접적으로 방사광을 맞지 않도록 해야 한다. 따라서 방사광을 이용할 때는 안전 셔터를 먼저 열고 광자 셔터를 열어야 하며, 이용을 종료할 때는 광자 셔터를 먼저 닫고 나서 안전 셔터를 닫아야 한다. 이를 위해 광자 셔터와 안전 셔터는 서로 연동되어 작동되어야 한다. 따라서 일정 시간 이상 두 셔터의 상태가 다를 경우 문제가 있음을 인식하고 신호를 보내는 과정도 필요하다. <그림 4.1.5.4>는 광자 셔터와 안전 셔터의 상관관계를 보여주고 있다.



<그림 4.1.5.4> 광자 셔터 및 안전 셔터 개폐 순서

(3) 냉각수 및 온도

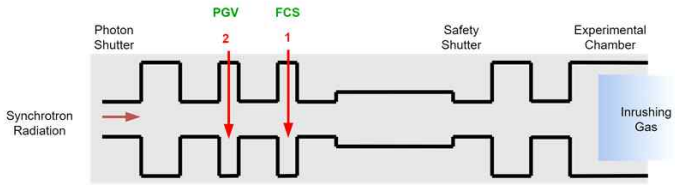
인터락 시스템은 전자빔과 방사광으로 인한 기구물의 온도상승으로 발생하는 피해를 최소화하기 위해 냉각수와 온도를 감시한다. 냉각수의 경우 flow meter를 이용하고, 온도 점검은 thermocouple을 이용한다. 냉각수와 온도의 경우 순간적으로 이상이 발생하는 경우가 발생할 수 있기 때문에 일정 시간 동안 이상 상태가 유지될 때 신호를 보낼 수 있도록 한다. 일반적으로 광자 셔터를 기준으로 하단부에 문제가 발생할 경우 광자 셔터를 닫아 방사광이 들어오는 것을 차단하고, 전단부에 문제가 발생할 경우 저장링의 전자빔을 dump 시켜 피해를 최소화한다. <그림 4.1.5.5>는 빔라인에 사용되는 flow meter 및 thermocouple 부품을 보여주고 있다.



<그림 4.1.5.5> Flow meter & Thermocouple

(4) 진공 (Vacuum)

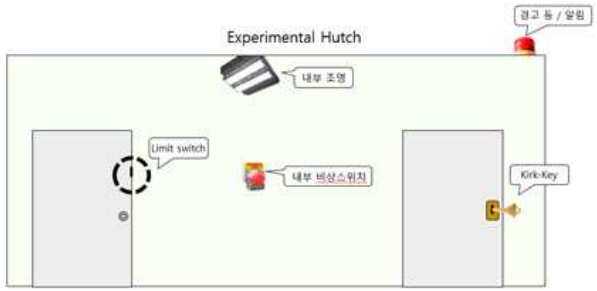
프론트엔드에서 사용되는 밸브는 크게 MGV (Manual Gate Valve)와 PGV (Pneumatic Gate Valve)로 나눌 수 있다. MGV는 진공을 분리하기 위해 수동으로 조작하고, PGV는 설정된 진공값에 따라 자동으로 개폐된다. 인터락 시스템은 진공도를 항시 모니터링하며, 프론트엔드 진공도가 설정값보다 높을 때(진공도가 좋지 않을 때) 전자빔을 dump 시키고, PTL (Photon Transfer Line)에서 진공도가 설정값보다 높을 때는 해당 빔라인만 disable 시킨다. 빔라인에는 또한 빠른 잠금 셔터 제어기(Fast Close Shutter Controller)가 설치되어 있다. 빔라인의 진공계통은 저장링과 서로 연결되어 있으므로 빔라인에서 진공 사고가 발생할 때 전체 구간의 진공도에 영향을 주게 된다. 이때 빠른 잠금 셔터 제어기는 프론트엔드 내부의 진공 밸브와 연동되어 갑작스럽게 진공이 파괴될 때 안전 셔터의 상태와 상관없이 빠른 시간 내에 닫혀 진공 사고의 영향을 최소화한다. 이때 최종적으로 전자빔의 dump도 함께 진행되어야 후속 사고를 예방할 수 있다. <그림 4.1.5.6>은 PGV와 FCS의 연관 관계를 보여주고 있다.



<그림 4.1.5.6> PGV 및 FCS 설정 시스템

다. Hutch Interlock System

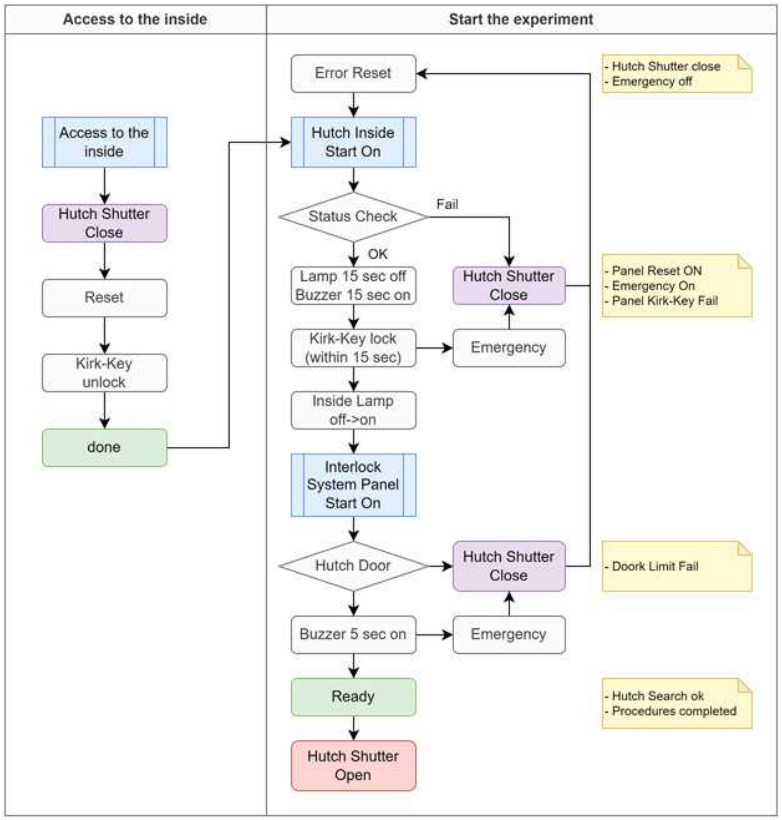
실험허치의 인터락 시스템은 방사광과 방사선으로부터 이용자를 보호하는 데 목적이 있다. 실험허치는 이용자가 실험을 진행할 때, 실험장치의 조작을 위해 항시 출입하기 때문에 인터락 시스템을 활용한 이용자의 보호가 필요하다. 실험허치 내에서 실험을 진행할 때 이용자의 유무를 확인하고, 실험 중에 발생하는 방사선이 차폐될 수 있도록 하는 것이 중요하다. 따라서 허치에 출입할 때 Kirk-key를 이용하도록 해 이용자가 문을 제대로 닫지 않았을 경우 안전 셔터를 열 수 없도록 한다. 또한, 경고 시스템과 비상 스위치를 이용해 미처 나오지 못한 인원이 안전 셔터를 개방하려 할 때 그를 알고 중지시킬 수 있도록 해야 한다. 또 한 여러 개의 출입문이 있는 허치의 경우 모든 출입문에 리미트 스위치 등을 부착해 문의 개폐 여부를 확인한 뒤 안전 셔터를 조작할 수 있도록 한다. 또한, 실험허치 외부에는 실험허치의 상황을 이용자가 쉽게 파악할 수 있도록 상황을 표시해 준다. <그림 4.1.5.7>은 허치에 적용된 인터락 시스템을 보여주고 있다.



<그림 4.1.5.7> 실험허치 인터락 시스템 구성도

실험허치 이용 시 Hutch shutter는 실험허치 출입문이 잠겨져 있는 상태에서만 열 수 있도록 설계되어 있다. 이용자가 hutch shutter를 작동시키고자 한다면, 실험허치 내부에 혹시 남아있는 사람이 있는지 확인해야만 한다. 이를 위하여 실험허치 내부에 있는 작동스위치(start switch)를 누르면 조명등이 꺼지고 경고등이 켜지면서 일정 시간 경고음이 울리게 된다. 만약, 실험허치 안에 사람이 있다면 경고음이 울리는 일정 시간 내에 실험허치 내부 혹은 외부에 있는 비상 스위치(emergency switch)를 눌러서

언제든지 hutch shutter를 열고자 하는 다음 과정을 중지시킬 수 있다. 실험허치 연동시스템은 일정한 순서를 작동한 후에는 허치 내부에 있는 사람이 비상 스위치를 해제하고 작동 스위치를 재작동시킬 수는 없으며 반드시 실험허치 출입문을 여닫는 과정을 거쳐야만 재작동시킬 수 있도록 되어있다. 방사광을 실험허치 앞에서 차단하고 있는 규정된 절차와 제한된 방법에 의해서만 열 수 있다. <그림 4.1.5.8>은 실험허치 출입 절차를 나타내었다.



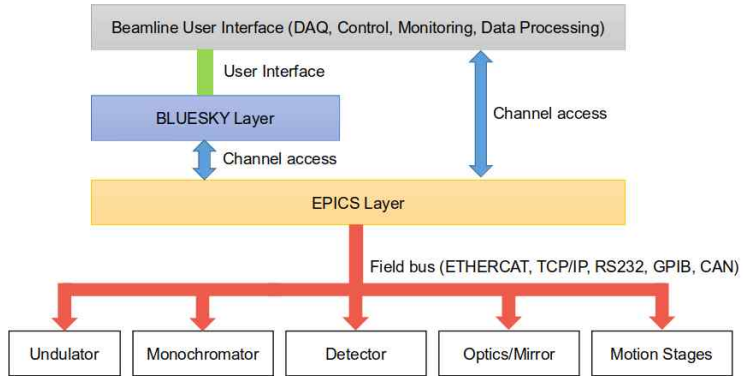
<그림 4.1.5.8> 실험허치 출입절차

4.2 빔라인 제어/DAQ

4.2.1 개요

빔라인 제어/DAQ는 다음의 업무를 포함하고 있다.

- 빔라인 네트워크
- 삽입 장치 사용자 인터페이스
- 광학장치 제어 및 빔라인 구성기기 제어와 상태 감시
- 데이터 획득을 위한 관련 기기의 동기화
- 빔라인 진단 지원과 샘플 환경제어
- 데이터 수집 및 저장
- 사용자 인터페이스 및 실험 제어



<그림 4.2.1.1> 빔라인 제어 시/DAQ 시스템의 구성도

시스템 구성은 <그림 4.2.1.1>과 같이 빔라인을 구성하는 광학장치, 검출기, 진단장치, 모션 장치 등 모든 장치는 분산 제어시스템용 오픈소스로 개발된 Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS)를 사용하여 용도별(장치별, 구역별 모두 가능)로 다수의 Input Output Controller (IOC)로 구현된 장치 서버(<그림 4.2.1.1>의 EPICS Layer)가 존재한다. Channel Access (CA) / Processor Variable Access (PVA) 프로토콜을 사용하여 클라이언트(Monitoring, DAQ, Archive, etc)에서 접근하여 제어된다.

빔라인을 구성하는 제어, 측정 장치들은 그 용도와 네트워크 점유율을 고려하여 빔라인 자체 Virtual LAN을 구성한다. 서버의 물리적 수를 최소화하여 유지관리가 용이하도록 서버가상화를 적용한다. HCI (Hyper Converged Infrastructure) 구성을 통한 가상화 인프라를 고도화하고 XEN을 패치한 오픈소스인 XCP-NG를 적용한다. 이를 통하여 빔라인 제어 및 DAQ에 필요로 하는 X86 기반의 다양한 Guest OS 지원(Windows 및 Linux 등)이 가능하므로 운영체제는 Debian 11 리눅스를 표준으로 하지만 특별히 단일 운영체제만 정의할 필요가 없다.

가. 제어

빔라인 제어에 필요한 모든 장치는 EPICS IOC로 구현된다. 관련 모듈은 지원되지 않거나 없는 경우를 제외하고 안정성과 성능향상, 자료화를 위해서 synApps를 활용한다.

- EPICS Base : Version 7.x

- synApps : http://epics-synapps.github.io/support/synApps_docs_all.html

EPICS V7은 툴킷의 최신 개발 스레드이며 PVA (Process Variable Access)라고 하는 TCP/IP를 통한 보다 복잡한 데이터 구조 통신이 가능하다. PVA는 일반 프로세스 변수(PV)와 PVA 데이터가 동일 네트워크에 존재할 수 있도록 채널 액세스(CA)와 함께 작동한다. PVA는 데이터와 함께 메타데이터를 유지하기 위한 중요한 개발이므로 빔라인 검출기에서 발생하는 이미지 캡처 또는 처리 응용 프로그램에 즉각 적용할 수 있다.

장치관리를 위한 사용자 인터페이스는 CS-Studio의 Eclipse/RCP 프레임워크를 사용하지 않는 Phoebus 애플리케이션 적용할 것이다. 데이터의 용량이 큰 이미지를 공급하는 2D 검출기의 데이터 압축을 지원하고, 스칼라 및 어레이 유형 이상으로 지원된 데이터 유형의 범위를 확장할 수 있는 EPICS Base version-7 사용을 원칙으로 한다. 빔라인 특성상 검출기를 제외한 빔라인 구성 장치는 Soft IOC로 구현된다. 데이터 카운터, on-the-fly 시험에 필요한 위치 동기된 데이터 획득은 FPGA로 IOC를 개발 중이며 2024년 개발이 완료된다. 개발 중인 카운터 및 위치동기 신호 발생기는 위치동기 신호로 증분형 엔코더 신호를 받아서 분주하여 측정 및 동기신호가 발생한다.

EPICS IOC와 장치의 실시간 제어용 통신에 사용되는 Field bus는 1,000 Hz 미만의 제어 속도를 가지는 장치에는 EtherCAT을 사용한다. EtherCAT은 이더넷 기반 필드버스 시스템으로 프로토콜이 표준화되어있다. EtherCAT 적용에는 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

(1) 네트워크 토폴로지

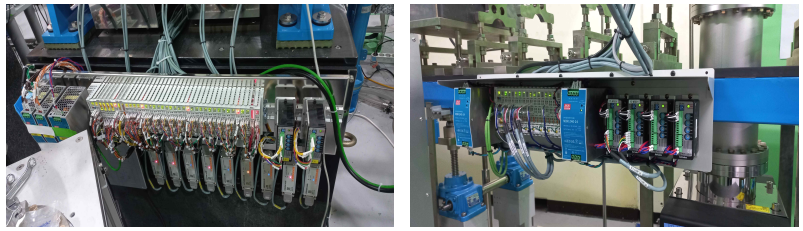
EtherCAT은 유연한 네트워킹 토폴로지를 제공하고 있으나 빔라인의 특성상 실험조건에 따라 장치의 잦은 변경이 요구된다. 이러한 변경에 유연하게 적응할 수 있고 하드웨어변경에 따른 제어시스템 Reboot을 최소화할 수 있는 STAR 토폴로지를 적용한다.

(2) EtherCAT Realtime Master

Realtime control system으로서 네트워크 Master의 지터는 제어시스템 전체의 지터를 발생하게 된다. EtherCAT을 개발한 Beckhoff 사의 TwinCAT3를 적용한다.

(3) 제어기 프로그램 언어

빔라인의 실시간 제어를 요구하지 않는 범주의 장치들은 Programmable Logic Controller (PLC)를 사용한다. PLC는 TwinCAT XAE를 사용한다. <그림 4.2.1.2>는 EtherCAT을 적용한 장치들의 모습을 보여주고 있다.



<그림 4.2.1.2> EtherCAT을 적용한 광학장치, 슬릿 제어장치

광학계, 검출기 정렬 장치, 분광기, 슬릿 등 조정 장치들은 모터로 구현되어 있고 모터는 실시간성이 없는 범주에 속하며 빔라인 제어 대상의 약 90%를 차지한다. 프론트엔드 장치의 제어기는 유지보수를 위해서 제어 모듈이 19인치 랙에 설치된다. 그 외 PTL, 일부 실험장치의 지지대에 제어 모듈을 설치하여 케이블 단순화를 통한 노이즈 발생을 최소화하고, 19인치 랙의 수량이 대폭 축소된다. PLC는 PC 기반의 PLC인 TwinCAT3를 사용한다. 중요 장치(예: 광학계, 샘플 로드, 슬릿 등)별로 PLC

Task를 분리할 수 있어 장치의 이동, 변경, 추가 등 변화를 고려하여 모터 제어기 하나를 변경하는 것 같은 기능이 되도록 구현되어 진다. PLC의 각 Task는 Soft IOC와 1:1로 구현되어 제어용 IOC 컴퓨터에는 PLC Task 수만큼 IOC가 존재한다. 최근 빔라인 분광기와 삽입 장치 갭 컨트롤 사이의 모션을 동기화 필요성에 대한 요구사항이 있다. 삽입 장치 제어기는 EtherCAT/TwinCAT3-PLC 조합으로 제작될 것이며 분광기 제어기 또한 EtherCAT/TwinCAT3-PLC 조합으로 구성하여 우선 각 장치별 운영이 가능한 후 통합시 하드웨어 변경사항 없이 프로그램 개발로 가능하다. 구성하는 제어장치 및 PLC, 계장 설비들은 EPLAN을 사용하여 도면 표준화한다.

나. 데이터 획득

(1) 데이터 획득 개념

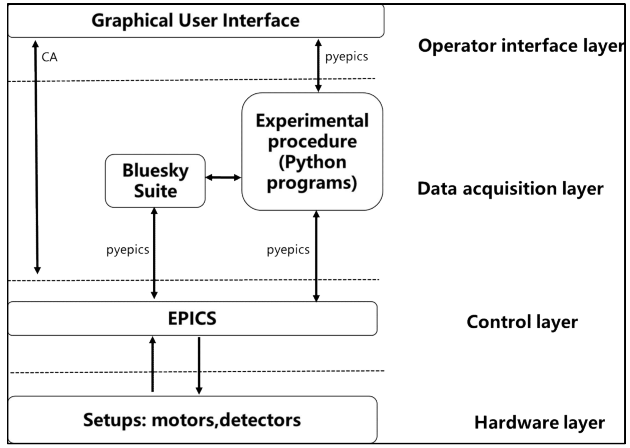
데이터 획득 설계는 다음과 같은 개념에 의해 구동된다.

- 상용/검증된 하드웨어의 사용 및 확장성
- 새로운 시스템을 사용할 수 있는 유연성
- 안정적인 저장 및 송수신의 보장을 위한 논리/물리 네트워크의 세분화
- 검출기에 의해 생성된 대규모 순간 데이터 대역폭 처리
- 실험 데이터의 저장은 데이터베이스를 이용
- 로컬 데이터의 저장 및 처리는 아스키와 HDF5 포맷 사용

(2) 데이터 획득 계층

- 데이터 수집 소프트웨어의 구성은 NSLS-II에서 공개한 Bluesky를 기반으로 한다.
- 데이터 수집 계층은 Python 기반의 Bluesky를 사용
- 운영 인터페이스 계층의 GUI는 Qt5 기반, 시각화는 pyqtgraph를 사용

<그림 4.2.1.3>은 EPICS & Bluesky 표준 프레임워크 연관 관계도를 보여주고 있다.



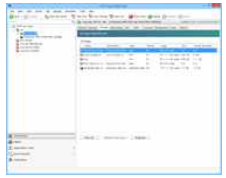
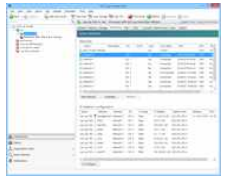
<그림 4.2.1.3> Control (EPICS) & DAQ (Bluesky) 표준 프레임워크 연관관계도

(3) 데이터 획득 시스템

- xcp-ng 가상화 적용을 통한 시스템 통일성 및 중앙 집중화된 관리
- 시스템 간의 상호호환성을 위한 운영체제의 일관성
- 네트워크 장치의 대역폭 확장 (≥ 100 Gbps)
- 짧은 대기시간 보장을 위한 인피니밴드 (Infinite) 활용

(4) 데이터 획득 시스템 구축 및 관리

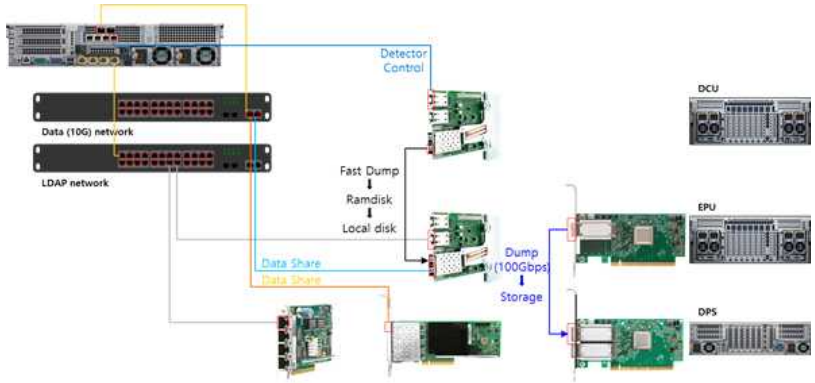
- xcp-ng center 툴을 통한 시스템 관리

가상머신 관리	메모리 관리	하드 디스크 관리
		
네트워크 관리	**GPU 설정 및 사용 현황**	**시스템 사용현황 (그래프)**
		

<그림 4.2.1.4> DAQ 용 빔라인 컴퓨터 시스템 자원관리 방법

(5) 데이터 획득 과정 및 처리

- DCU에 설치된 EPICS IOC를 통해 검출기 제어 및 데이터 측정
- EPU에 준비된 램디스크 영역으로 순간 데이터 저장
- 이더넷 또는 인피니밴드 장치를 통해 DPS로 순간 데이터 전송 및 처리



<그림 4.2.1.5> 결정학 빔라인의 DAQ 용 네트워크 및 컴퓨터 시스템 구성도

다. 데이터 획득 소프트웨어

(1) 개념

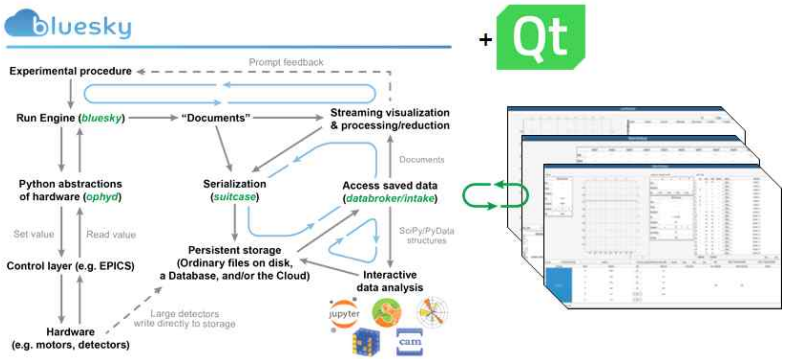
- 표준화를 위한 Bluesky 기반의 데이터 수집, 처리 및 분석 (결정학 빔라인의 MxDC 데이터 획득 소프트웨어는 Bluesky에서 제외)
- 데이터의 수집은 CLI (Command Line Interface)를 기본으로 제공
- 정적/반복적인 데이터의 수집은 GUI (Graphics User Interface)를 개발 및 제공

(2) 도구

- 소프트웨어의 개발 및 구동 환경은 Python (≥3.10.0)을 사용
- 이용자 편의성을 위한 GUI는 Qt5 (≥5.14.2)를 활용
- 데이터의 시각화에는 pyqtgraph (opengl) 그래픽 라이브러리 활용
- 데이터의 획득(MxDC제외)은 bluesky, ophyd, databroker 파이썬 패키지를 활용
- 데이터의 관리는 MongoDB 시스템을 활용

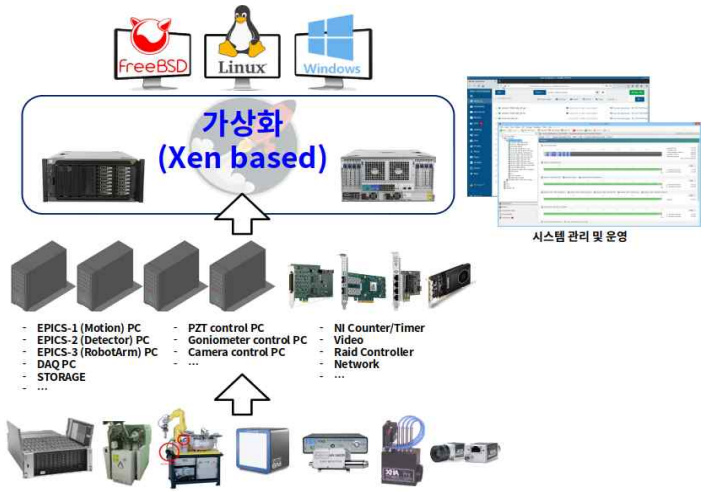
(3) 계층 및 흐름도

- Ophyd : 하드웨어 장치 (모터, 카운터/타이머, 검출기, 계측기 등)들의 추상화
- Bluesky : 추상화된 하드웨어를 이용하여 실험 계획에 따른 데이터 획득 (절차) 수행
- Suitcase & Databroker : Bluesky를 통해 획득된 데이터를 보관 및 관리



<그림 4.2.1.6> DAQ 과정과 Document system 예시

라. 빔라인 컴퓨터 시스템



<그림 4.2.1.7> 빔라인 컴퓨터 시스템 가상화 적용

제어/검출기/DAQ/특수장치 등으로 구성되는 빔라인에는 다양한 컴퓨터가 다양한 목적으로 사용된다. <그림 4.2.1.7>은 빔라인 컴퓨터 시스템 가상화 적용을 보여주고 있는 것으로 필요 장치공급자에 따라서 사용하는 운영체제도 다양하고 시간이 지날수록 사용하는 운영체제가 많아진다. 장치의 도입 시기에 따라서 추가로 컴퓨터가 점차 증가한다. 물리적 컴퓨터의 수가 많아지면 갑작스러운 고장 복구로 인해 실험이 중지될 수 있고 관리가 어렵다. 관리 및 고장 대응, 필요시 빠른 신규 컴퓨터 생성이 가능한 가상화 기법을 적용한다. 중앙에 강력한 물리적 컴퓨터, 네트워크를 두고 내부에 소프트 컴퓨터를 다수 개 생성할 수 있는 가상화 기법은 장애 발생에 대한 빠른 대응과 기능별 분리된 컴퓨터 환경구성과 각 컴퓨터 간 100 GBit 내부적 네트워크 속도의 장점이 있다. 하드웨어 종속적인 장치(Path through가 안되는 장치)를 제외한 모든 컴퓨터는 가상화 기법을 적용하여 목적별로 만들어진 가상컴퓨터를 사용하고 이미지를 별도로 저장하여 장애 발생 시 신속 복원이 가능하게 한다. 가상화 컴퓨팅 인프라만 사용할 필요는 없다. 컴퓨팅 인프라는 로컬 서버와 중앙 서버를 모두 제공해야 한다. 이러한 서버의 주요 기능은 EPICS IOC를 실행하기 위한 플랫폼을 제공하는 것이다. 컨테이너화된 환경을 사용하면 IOC 자체를 실행하는 데 필요한 OS에서 서버 OS의 특정 버전을 분리할 수 있다. 이렇게 하면 서버 OS와 IOC OS가 서로 의존하지 않고 진화하고 업데이트될 수 있다. 로컬 서버는 IOC가 제어하는 하드웨어 가까이에서 인스턴스화 될 수 있도록 준비한다. 중앙 집중식 서버는 각 빔라인 가상컴퓨터에 다수의 IOC 및 기타 모니터링 시스템을 실행할 수 있는 기능을 제공한다. 컴퓨팅 인프라는 운영자 워크스테이션과 EPICS archiving 도구도 제공한다.

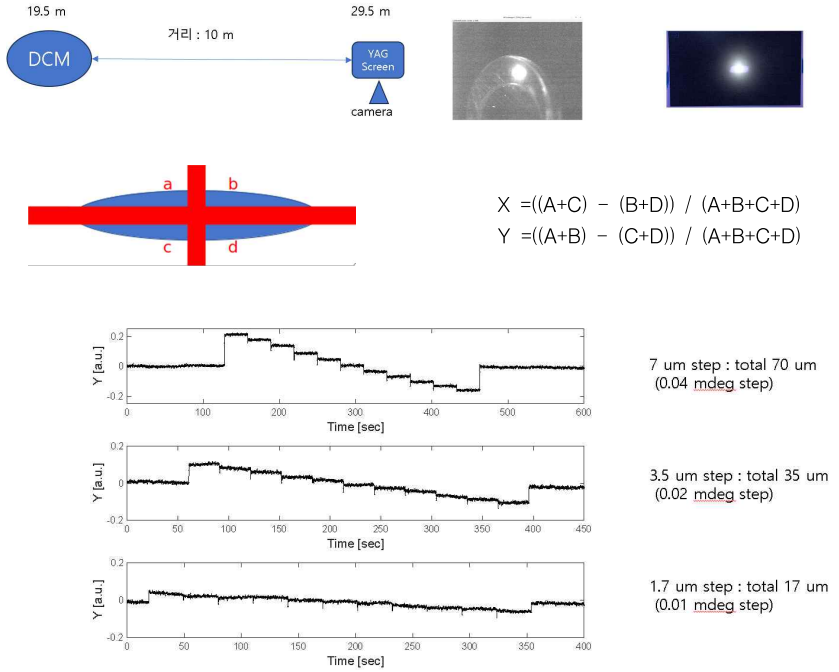
가상화 서버용 컴퓨터의 요구조건은 다음과 같다.

- CPU Core : 128 core
- Memory : 1,024 GByte
- Video card : 4개
- 저장장치: NVME(1T), SSD(20T)
- LAN CARD : 100 G × 4, 10 G × 2, 1 G × 2개

이상으로 구성된 하드웨어에 구동될 VM은 EPICS IOC 2개 (Windows, Linux), Work station 4개 (DAQ, 빔라인 모니터 × 2, Data processing terminal), Archive Appliance가 구동된다.

(1) 진단용 Vision (카메라 시스템)

광원으로부터 실험장치까지 광자빔이 도달하기 위해서 필요한 진단장치 중 카메라를 통한 육안 확인이 필요하다. “GigE Vision/GenICam”을 지원하는 카메라를 사용하면 EPICS areaDetector를 적용하여 영상을 데이터화 할 수 있다. AreaDetector에서 공급되는 영상을 사용하여 육안으로 빔 모양 확인과 동시에 위치별로 빔 크기 측정, 장시간 빔 위치 경향(long term drift)을 기록할 수 있다. 적용되는 카메라는 POE를 사용해서 전원 케이블 수를 줄이고 카메라용 네트워크를 별도로 구성하며 POE를 지원하는 1 Gbit 이상의 이더넷 스위치가 필요하다. 위치 측정 방법은 areaDetector를 적용한 IOC로부터 공급되는 영상을 QBPM 방식을 적용하여 위치를 계산한다. 정확한 위치정보를 얻기 위해서 4개의 영역을 지정하고 계산하는 GUI가 필요하다. 열부하 감소를 위한 다이아몬드 필터, 빔 위치 진단용 YAG, 거울, 분광기 등에 필수적으로 설치되는 모든 카메라는 EPICS areaDetector를 적용하여 영상이 데이터화 되고 위치정보, 밝기정보 등은 아카이브에 기록될 것이다. Vision system (카메라)과 EPICS areaDetector를 사용한 QBPM 구현으로 얻어진 결과는 다음과 같다. 카메라의 픽셀 크기, 렌즈의 종류를 밝기, 거리, 크기 등을 고려하여 적절히 선정하면 시험에서 얻어진 결과의 2배 이상 분해능이 향상될 것이다.



<그림 4.2.1.8> YAG/Diamond filter에 Vision system으로 진단장치 활용

AreaDetector로 변환된 카메라 이미지는 ROI 및 플러그인을 이용하여 특정 영역의 프로파일을 구하고, 합, 변화량을 확인할 수 있고 아카이브를 통한 기록, 열람이 가능하게 되어 빔라인의 상태변화 추적 등에 사용된다. <그림 4.2.1.8>은 YAG/Diamond 필터에 vision system을 적용한 예를 보여주고 있다.

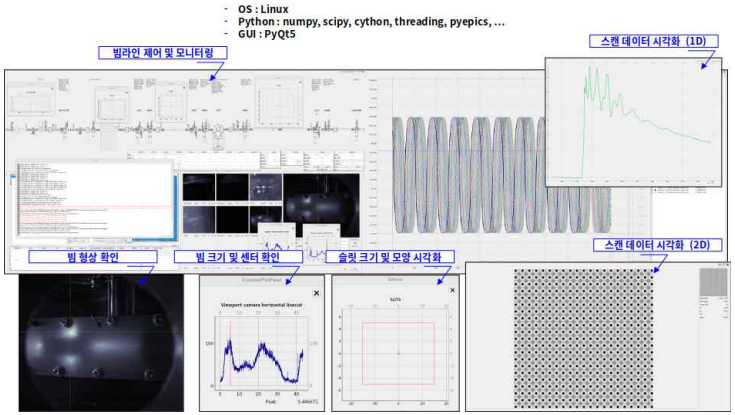
(2) 빔라인 상태 감시용 Archive system

진공도, 온도, 모터의의 상태, 빔 위치 등 빔라인의 상태를 시계열 데이터로 기록하는 것은 빔라인 유지, 관리, 사고 예방 및 원인 추적에 사용된다. 이러한 용도로 EPICS 제어시스템에서 공급된 대량의 데이터를 저장, 관리 및 검색하도록 EPICS Archive Appliance (EAA, https://slacmshankar.github.io/epicsarchiver_docs/index.html)를 각 빔라인에 구축한다. 저장소는 빔라인 통합컴퓨터 시스템의 로컬 저장소를 사용한다.

EAA는 데이터의 수명 주기를 설정할 수 있어 필요 이상의 오래된 데이터는 자동 제거할 수 있다. EAA는 설정에 따라 저장하고자 하는 PV의 주기를 변경할 수 있다. 정적인 데이터는 1초 주기 저장을 목표로 하고 한 빔라인은 1만 PV를 초과하지 않을 것으로 예상되어 1년에 1 TB의 이하의 데이터가 누적될 것이다. 저장된 데이터는 빔라인 관리자가 CSS와 웹 브라우저로 검색 및 시각화할 수 있다. Raw data export를 지원하며 파이썬 인터페이스를 제공한다.

(3) 정렬 및 운영 프로그램

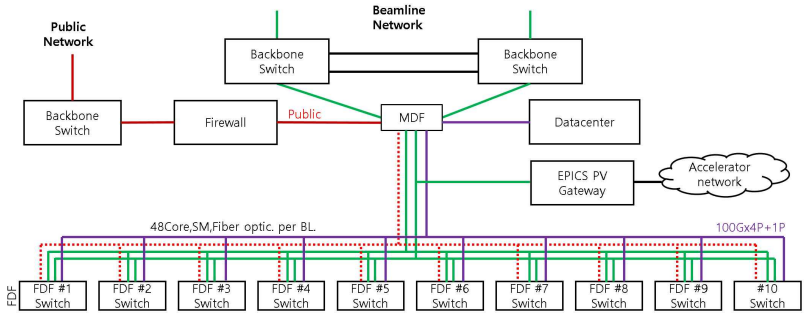
빔라인을 구성하는 요소별로 진단하고 상태를 확인하는 운영 프로그램이 필요하고 이는 IOC를 서버로 하는 클라이언트 프로그램이다. 장치를 설정하고 진단하는 목적으로는 MEDM/EDM/CS-Studio가 사용되고 빔라인 정렬, 빔라인 상태 감시를 위한 사용자 인터페이스 목적으로 Python+Qt를 사용한 직관적인 관리프로그램이 구현될 것이다.



<그림 4.2.1.9> 빔라인 유지관리, 빔정렬용 프로그램

(4) 빔라인 네트워크

빔라인은 인접한 빔라인 장치와 실시간 정보 교환이 이루어질 필요성이 없다. 네트워크는 빔라인 자체적으로 하드웨어를 구성하는 제어 네트워크, 카메라 네트워크, DAQ 네트워크로 분류되고 원격 실험을 지원할 수 있는 네트워크가 필요할 수 있다. 제어 네트워크는 빔라인 장치 설정 및 제어와 감시, 빔라인을 구성하는 기기(진공, 온도, 빔 위치, 기타)의 상태 기록에 사용된다. <그림 4.2.1.9>는 전체 빔라인 제어 네트워크 구성도를 보여주고 있다.

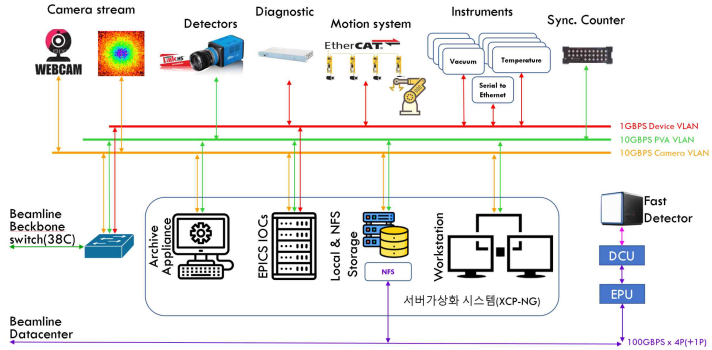


<그림 4.2.1.10> 전체 빔라인 제어 네트워크의 구성도

가속장치 제어시스템과의 모든 데이터 교환은 전용 EPICS PV gateway를 통하여 이루어진다. DAQ 네트워크는 검출기를 비롯하여 고용량 2D/3D 실험 data 저장 및 data center로부터 실험 데이터를 분석 후 피드백에 사용되는 고속 데이터 네트워크다.

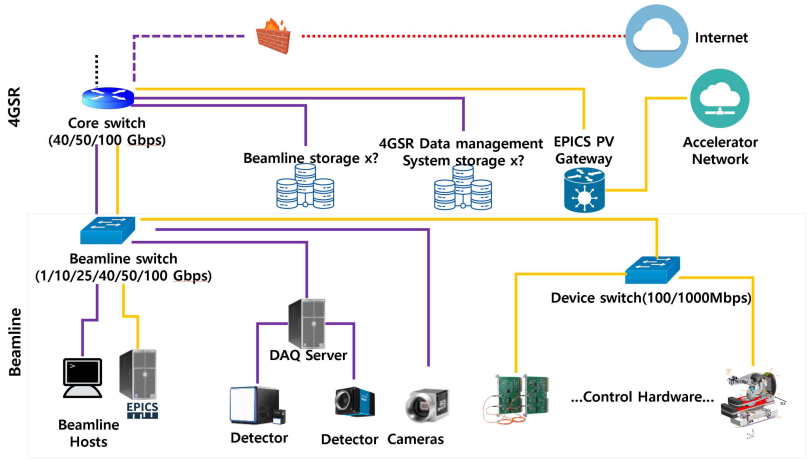
Core Switch는 빔라인 데이터 센터에 위치하고 각 빔라인으로 48 core 광케이블이 포설된다. 연결 속도는 상대적으로 데이터량이 많은 이미지 빔라인을 고려하여 10 G로 한다.

빔라인 실험 데이터는 NFS를 통하여 원격의 데이터 센터에 직접 저장할 수 있도록 100 G 4회선을 준비한다. 향후 데이터센터로부터 빔라인으로 피드백될 여지가 있어 여분의 1회선을 추가한다. <그림 4.2.1.11>은 각 빔라인 네트워크 구성도를 보여주고 있다.



<그림 4.2.1.11> 각 빔라인 네트워크 구성도

각 빔라인은 그림과 같이 장치 구성별로 VLAN을 구축한다. 카메라(10 G), 모션 및 진공 등 이더넷 장치(1 G), 검출기 및 EPICS 네트워크(10 G)로 구현한다. VLAN으로 구분된 네트워크는 장치에서 발생하는 트래픽이 분리된 장치로 전송되지 않으므로 안정된 데이터 전송이 가능하다. 가상화 서버에는 Open Virtual Switch (vSwitch)가 소프트웨어로 작동하여 각 가상화 장치가 트래픽이 외부로 나오지 않고 100 GBPS를 확보할 수 있다. vSwitch를 사용하여 EPICS IOC와 workstation 간 안정된 데이터 전송이 이루어진다.



<그림 4.2.1.12> 실험 및 제어 데이터망 구성도

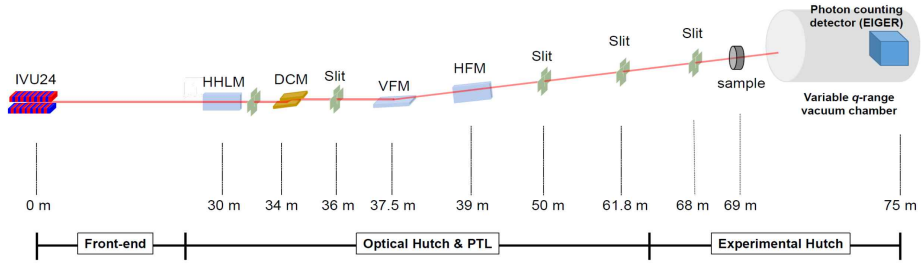
실험과 제어의 데이터망 구성도는 <그림 4.2.1.12>와 같다. 고속의 2D 검출기를 사용하지 않는 빔라인에서는 데이터 센터로 전용망을 구축할 필요가 없다.

4.3 빔라인 광학장치

4.3.1 빔라인 광학장치 설계 개요

4GSR의 초기 10기 빔라인 구축사업이 진행되면서 이에 따른 광학 설계가 진행되고 있으며, 빔라인 핵심 구성품인 분광기와 거울장치 제작 기술력 확보 및 국산화가 중요한 과제로 떠올랐다. 이를 위해 4GSR 원형 방사광가속기의 빔라인 특성에 최적화된 광학장치를 국산화 개발 진행하여 초기 10기 빔라인에서 빔을 안정적으로 운영할 수 있는 분광기와 거울장치를 제작하고, 지속적인 연구개발을 통해 성능을 향상시키기 위한 기술력 확보가 요구된다.

<그림 4.3.1.1>은 빔라인별 광학장치 배치를 보여주는 예시이며 <표 4.3.1.1>은 현재까지 설계된 4GSR 빔라인별 광학장치의 수요를 정리한 자료이다.



<그림 4.3.1.1> 4GSR BL01. BioPharma-BioSAXS

<표 4.3.1.1> 4GSR 초기 10기 빔라인 광학장치 현황

빔라인	빔에너지	분해능	광원	실험기법	활용	거울장치	분광기
1. 바이오신약 – 바이오소각산란 (산업우선지원)	5~20 keV	8~4000 Å (SAXS) ΔE/E < 2 × 10^{-4}	IVU24	Solution SAXS	바이오	3 EA	1 EA
2. 소재 구조 분석 (산업우선지원)	5~40 keV	ΔE/E < 2 × 10^{-4}	IVU24	Powder XRD, XAFS	소재, 에너지	2 EA	1 EA
3. 연액스선 나노프로브 (산업우선지원)	0.1~5 keV	sub-micro beam ΔE/E < 1.5 × 10^{-4} @400 eV, 4 keV	EPU78 IVU24	XPS, XAS	반도체, 소재	4 EA	2 EA
4. 나노스케일 각분해 광전자분광	0.1~2 keV	100 nm 이하 ΔE/E < 10^{-4}	EPU98	ARPES	반도체, 소재	4 EA	1 EA
5. 결맞음 X-선 회절	3~30 keV	sub-micro beam	IVU22	XRD, CDI	반도체, 소재, 지질, 화학	2 EA	1 EA
6. 결맞음 소각산란	4~40 keV	수 nm ~ 수 μm ΔE/E < 1 × 10^{-4}	IVU20	SAXS/WAXS (GI기법 포함), XPCS	소재, 화학	4 EA	1 EA
7. 실시간 엑스선 흡수분광학	5~40 keV	100 μm 미만 ΔE/E < 2 × 10^{-4}	IVU24	XAFS	에너지, 환경, 소재, 지질	3 EA	2 EA
8. 생체분자 나노 결정학 빔라인	5~20 keV	0.7~3.5 Å	IVU20	MX	바이오	3 EA	1 EA
9. 고에너지 현미경 빔라인	5~100 keV	0.3~0.5 μm	Centerbend	Projection imaging	소재, 에너지, 바이오	-	1 EA
10. 나노 프로브	5~25 keV	50 nm 이하 @10 keV	IVU24	Ptychography/ XRF	반도체, 소재, 에너지, 환경, 화학	3 EA	1 EA
계						28 EA	12 EA

4.3.2 빔라인 광학장치 설계 목표

4GSR 빔의 emittance가 3세대 원형 방사광가속기에 비하여 100배 이상 줄어들어 빔의 불안정성이 증대되어 빔라인에서 우수한 실험 결과를 얻기 위해서는 안정된 빔 제공이 필수적이다. 광학장치의 성능은 안정된 빔 제공에 많은 영향을 끼치기 때문에 광학장치의 성능에 미치는 요인들을 파악하여 더 안정적이고 향상된 성능의 광학장치를 설계하는 것이 중요하다. 광학장치의 성능을 결정짓는 요인으로는 크게 정밀성, 진동, 온도, 진공 등이 있다.

광학장치 내부로 빔이 집속될 때 매우 정밀한 반사각 조정이 필요하므로 수십 nm 위치, 수십 nrad 각도 수준의 분해능을 가진 정밀한 구동 성능이 요구된다. 또한 광학장치에 사용되는 부품들은 UHV (5 × 10^{-10} Torr 이하) 환경에 사용할 수 있는 부품들로 제작되어야 빔에 의한 광학장치의 핵심 부품인 Crystal 혹은 거울의 표면 오염을 줄일 수 있다. 따라서 120 ℃에서 베이크아웃이 가능하고, 표면 기체 방출률이 낮아 UHV 환경에 사용 적합한 소재 선정 및 가공 기법들이 고려되어야 한다.

또한 광학장치는 내, 외부로부터 발생하거나 전달되는 진동을 최소화하는 구조로 설계되어야 하며, 이를 위해 구조 강성을 증가시키는 방향으로 거더 및 챔버 설계가 이루어져야 한다.

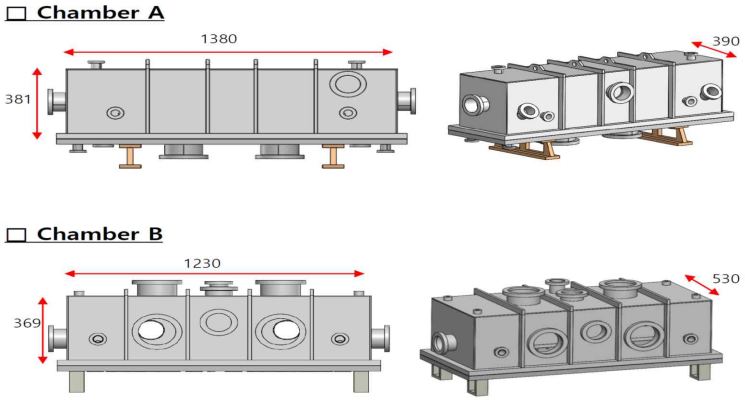
마지막으로 광자빔의 높은 열부하로 인한 Crystal 및 거울 반사면의 변형인 Slope error를 줄이기 위해 LN2 Cooling 장치의 구조와 냉각 채널의 최적화된 설계가 필요하고, 이를 위해 거울 단면 모양을 포함하여 열해석과 구조해석을 통해 효율 높은 냉각장치의 설계가 필요하다.

4.3.3 빔라인 광학장치 설계 기준

가. 진공 챔버 (vacuum Chamber)

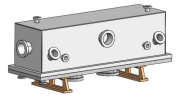
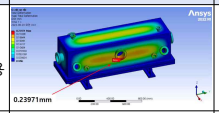
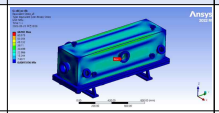
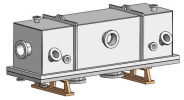
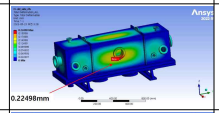
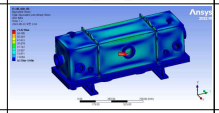
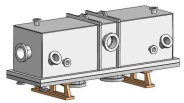
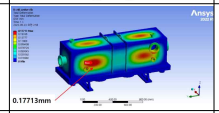
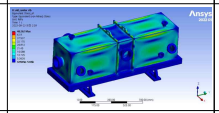
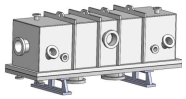
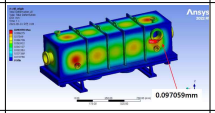
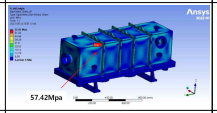
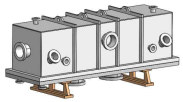
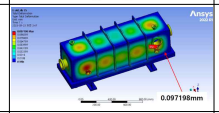
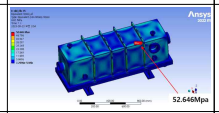
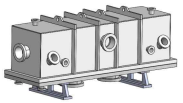
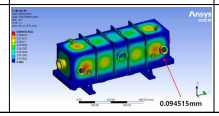
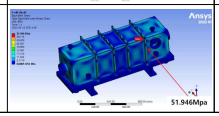
4GSR 광학장치(분광기, 거울장치)의 주요 장치들은 UHV 환경($\leq 5\times10^{-10}$ torr)에서 동작한다. 따라서 Vacuum Force에 의한 변형량을 고려한 진공 챔버 제작이 필수적이며 PLS-II와 해외 가속기에 설치되어 운영 중인 기존 광학장치의 사례들을 비교·분석하여 보다 개선되고 향상된 성능의 장치를 개발하는 것 또한 중요하다.

진공 챔버 제작에 앞서, Vacuum Force에 의한 챔버의 변형량을 살펴보기 위해 <그림 4.3.3.1>과 같이 두 가지 모델의 거울장치를 기준으로 진공 챔버 보강대 적용 위치 및 보강대 적용 높이를 다르게 하여 6가지 타입을 해석용 모델로 설정하였다.



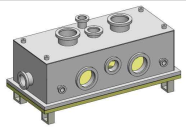
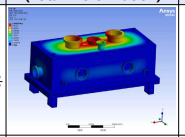
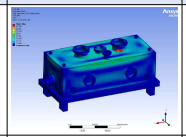
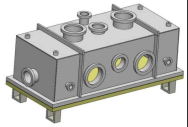
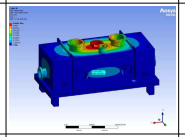
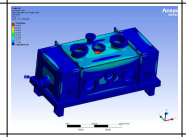
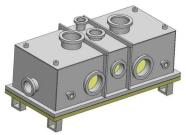
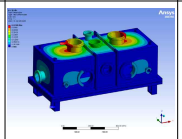
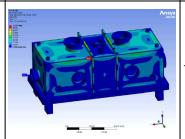
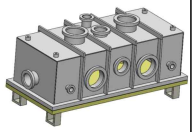
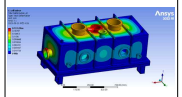
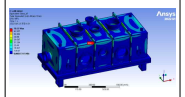
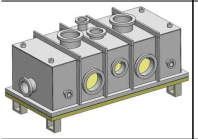
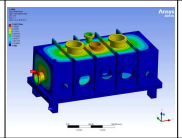
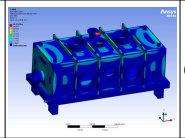
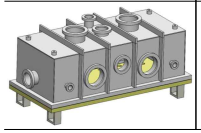
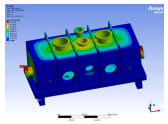
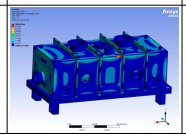
<그림 4.3.3.1> 거울장치 진공 챔버 A 타입과 B 타입 3D 모델링 형상

<표 4.3.3.1> 거울장치 진공 챔버 A 타입 변형량 해석 결과

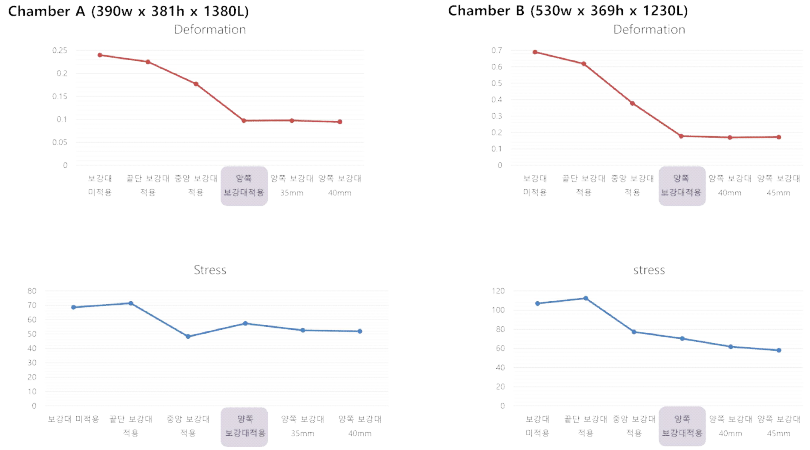
사진 (Chamber A) (390 W × 381 H × 1380 L)	이름	사진 (Total Deformation)	Total Deformation	사진 (Equivalent Stress)	Equivalent Stress
	Chamber A 보강대 미적용		0.23971 mm		68.597 MPa
	Chamber A 끝단 보강대 적용		0.22498 mm		71.42 MPa
	Chamber A 중앙 보강대 적용		0.17713 mm		48.262 MPa
	**Chamber A 양쪽 보강대 적용 (현재)**		**0.097059 mm**		**57.42 MPa**
	Chamber A 양쪽 보강대 35 mm		0.097198 mm		52.646 MPa
	Chamber A 양쪽 보강대 40 mm		0.094515 mm		51.946 MPa

<표 4.3.3.1>과 같이 챔버 A의 중앙과 끝단에 보강대를 모두 적용한 모델이 현재 설계에 반영 중인 모델이며 이는 최대 약 97 μm 수준의 챔버 변위 값을 가진다. 보강대가 없는 모델이 200 μm의 변형량을 갖는 것과 비교하였을 때 챔버 중앙과 끝단에 모두 보강대를 적용한 모델이 상대적으로 2배 정도 낮은 수준의 변형량을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 보강대의 높이에 따른 기준에서 비교하였을 때는 모두 90 μm 수준의 비슷한 값을 가진다.

<표 4.3.3.2> 거울장치 진공 챔버 B 타입 변형량 해석 결과

사진 (Chamber B) (530 W × 369 H × 1230 L)	이름	사진 (Total Deformation)	Total Deformation	사진 (Equivalent Stress)	Equivalent Stress	Safety Factor
	Chamber B 보강대 미적용		0.69009 mm		106.97 MPa	2.3566
	Chamber B 끝단 보강대 적용		0.61887 mm		112.39 MPa	2.243
	Chamber B 중앙 보강대 적용		0.37789 mm		77.234 MPa	3.2641
	**Chamber B 양쪽 보강대 적용 (현재)**		**0.17760 mm**		**70.32 MPa**	**3.585**
	Chamber B 양쪽 보강대 40 mm		0.16973 mm		61.815 MPa	4.0783
	Chamber B 양쪽 보강대 45 mm		0.17167 mm		58.044 MPa	4.3433

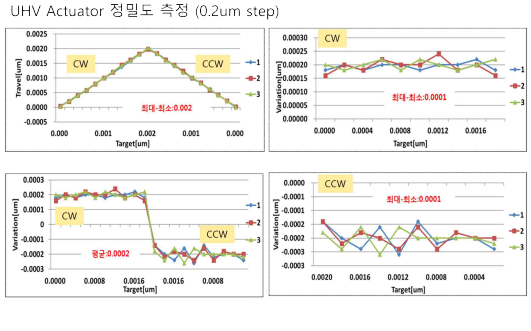
<표 4.3.3.2>에서와 같이 챔버 B의 중앙과 끝단에 보강대를 모두 적용한 모델이 현재 설계에 반영 중인 모델이며 최대 약 178 μm 수준의 챔버 변위 값을 가진다. 보강대가 없는 모델이 690 μm의 변형량을 갖는 것과 비교하였을 때 현재 모델이 상대적으로 3배 정도 낮은 변형량 수준을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 보강대의 높이에 따른 기준에서 비교하였을 때는 모두 170 μm 수준의 비슷한 값을 가진다.



<그림 4.3.3.2> 거울장치 진공 챔버 A타입 & B타입 해석 결과 그래프

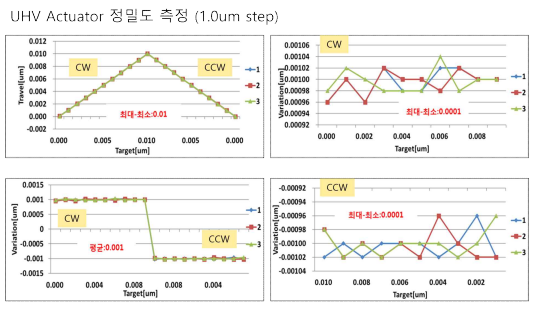
나. 정밀 UHV Actuator

포항가속기연구소에서는 보다 높은 수준의 정밀성 확보를 위해 핵심장치 국산화 기술개발 사업의 일환으로 sub micron 수준의 정밀도를 가지며 진공 환경에서 매우 정밀하게 광학장치 축 정렬, 조정이 가능한 UHV actuator를 자체 개발하였다. 해당 actuator의 정밀도를 확인하고 광학장치 구동부 적용 가능 여부를 측정하기 위해 20 nm 정밀 엔코드를 이용하여 10번 왕복, 3회 반복으로 actuator의 정밀도를 0.2 μm, 1.0 μm, 10.0 μm 수준으로 움직였을 때의 정밀도를 측정 및 분석하였다. 측정 결과는 아래 <그림 4.3.3.3>, <그림 4.3.3.4>, <그림 4.3.3.5>와 같다. Actuator의 정밀도는 actuator가 목표 위치에 얼마나 정확하게 도달할 수 있는지를 나타내는 지표로써 마이크로미터 (0.001 mm) 이하면 정밀급 수준으로 분류할 수 있다. 따라서 sub micron 수준의 정밀도를 가지는 해당 장치는 정밀 등급의 actuator로 정의할 수 있으며, 이는 4GSR 빔라인의 광학장치뿐만 아니라 다양한 UHV 장치의 구동부에 적용되어 장치의 정밀도 향상에 기여할 것으로 판단된다.



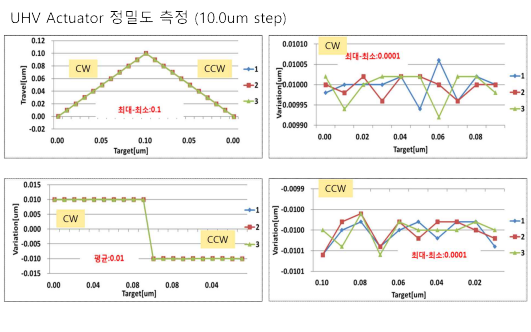
UHV Actuator_Precision_Test (0.2um)				
Position Index	Encoder reading (3 times)			PV Error
0.0000	0.00004	0.00004	0.00002	0.00002
0.0002	0.00022	0.00020	0.00022	0.00002
0.0004	0.00042	0.00040	0.00040	0.00002
0.0006	0.00060	0.00058	0.00060	0.00002
0.0008	0.00080	0.00080	0.00082	0.00002
0.0010	0.00100	0.00100	0.00100	0.00000
0.0012	0.00118	0.00120	0.00122	0.00004
0.0014	0.00138	0.00144	0.00142	0.00006
0.0016	0.00158	0.00162	0.00160	0.00004
0.0018	0.00180	0.00182	0.00180	0.00002
0.0020	0.00198	0.00198	0.00202	0.00004
0.0018	0.00184	0.00184	0.00184	0.00000
0.0016	0.00164	0.00162	0.00160	0.00004
0.0014	0.00140	0.00144	0.00144	0.00004
0.0012	0.00124	0.00124	0.00118	0.00006
0.0010	0.00098	0.00100	0.00102	0.00004
0.0008	0.00084	0.00084	0.00082	0.00002
0.0006	0.00062	0.00060	0.00062	0.00002
0.0004	0.00042	0.00042	0.00042	0.00000
0.0002	0.00022	0.00022	0.00022	0.00000
0.0000	-0.00002	0.00002	0.00000	0.00004
			Average	0.00003
			max-min	0.00006

<그림 4.3.3.3> UHV Actuator 정밀도 측정 (0.2 μm step)



UHV Actuator_Precision_Test (1.0um)				
Position Index	Encoder reading (3 times)			PV Error
0.0000	0.00008	0.00006	0.00004	0.00004
0.0010	0.00104	0.00102	0.00102	0.00002
0.0020	0.00204	0.00202	0.00204	0.00002
0.0030	0.00300	0.00298	0.00304	0.00006
0.0040	0.00402	0.00400	0.00402	0.00002
0.0050	0.00500	0.00500	0.00500	0.00000
0.0060	0.00598	0.00600	0.00598	0.00002
0.0070	0.00700	0.00698	0.00702	0.00004
0.0080	0.00802	0.00800	0.00800	0.00002
0.0090	0.00902	0.00900	0.00900	0.00002
0.0100	0.01002	0.01000	0.01000	0.00002
0.0090	0.00900	0.00902	0.00902	0.00002
0.0080	0.00800	0.00800	0.00800	0.00000
0.0070	0.00698	0.00700	0.00700	0.00002
0.0060	0.00598	0.00598	0.00598	0.00000
0.0050	0.00498	0.00498	0.00498	0.00000
0.0040	0.00398	0.00396	0.00398	0.00002
0.0030	0.00296	0.00300	0.00298	0.00004
0.0020	0.00196	0.00200	0.00196	0.00004
0.0010	0.00100	0.00098	0.00096	0.00004
0.0000	-0.00002	-0.00004	0.00000	0.00004
			Average	0.00002
			max-min	0.00006

<그림 4.3.3.4> UHV Actuator 정밀도 측정 (1 μm step)



UHV Actuator_Precision_Test (10.0um)				
Position Index	Encoder reading (3 times)			PV Error
0.0000	0.00004	0.00004	0.00004	0.00000
0.0100	0.01002	0.01004	0.01006	0.00004
0.0200	0.02002	0.02002	0.02000	0.00002
0.0300	0.03002	0.03004	0.03000	0.00004
0.0400	0.04002	0.04000	0.04002	0.00002
0.0500	0.05004	0.05002	0.05004	0.00002
0.0600	0.05998	0.06004	0.06006	0.00008
0.0700	0.07004	0.07004	0.06998	0.00006
0.0800	0.08000	0.08000	0.08000	0.00000
0.0900	0.09002	0.09000	0.09002	0.00002
0.1000	0.10002	0.10000	0.10000	0.00002
0.0900	0.08996	0.08994	0.09000	0.00006
0.0800	0.07996	0.07996	0.07996	0.00000
0.0700	0.06998	0.07000	0.07000	0.00002
0.0600	0.05994	0.05996	0.05994	0.00002
0.0500	0.04994	0.04998	0.04996	0.00004
0.0400	0.03996	0.03996	0.03996	0.00000
0.0300	0.02994	0.02998	0.02996	0.00004
0.0200	0.01996	0.02000	0.01996	0.00004
0.0100	0.00998	0.01000	0.00998	0.00002
0.0000	-0.00006	-0.00002	-0.00002	0.00004
			Average	0.00003
			max-min	0.00008

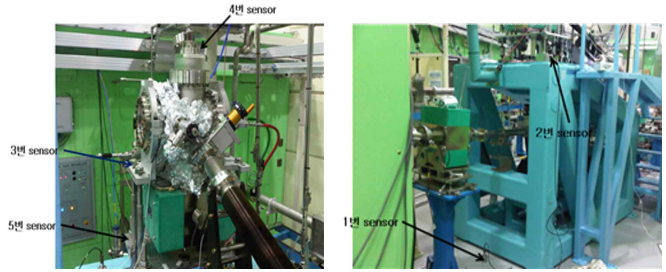
<그림 4.3.3.5> UHV Actuator 정밀도 측정 (10 μm step)

다. 진동 (Vibration)

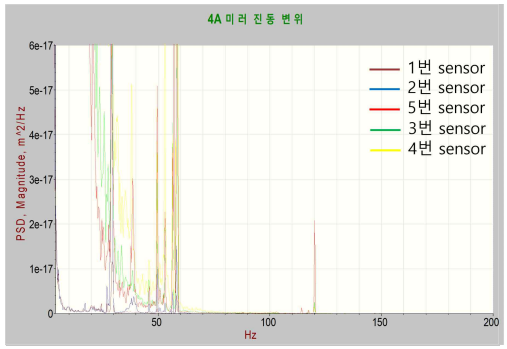
정밀하고 안정된 광학장치 설계 및 제작을 위해서는 광자빔의 열-부하로 인한 장치의 안정성 저하와 기구의 구조적 변형의 검토도 중요하지만, 냉각장치와 같이 장치의 내부에서 발생되거나 외부로부터 전달되어 오는 진동을 감쇠시키는 것 또한 매우 중요한 사항이다. 따라서 광학장치의 지지 구조대는 강성을 최대한 크게 하여 진동 변위를 최소화하고 장치를 빔라인 설계 위치에 일괄 정렬을 위한 조정 장치의 설계도 필수적이다.

(1) 진동 검사

4GSR 거울장치의 지지 구조대를 설계하기 위해 기존 PLS-II에 설치된 거울장치 진동 상황을 확인하였다. PLS-II 빔라인 실험 홀 floor 기준, <그림 4.3.3.6>과 같이 거울장치에 진동 센서를 부착하여 각 위치에서의 진동 변위 측정을 진행하였으며 측정 결과는 <표 4.3.3.3>과 같다.



<그림 4.3.3.6> 거울장치 부착 진동 센서 위치



<그림 4.3.3.7> 거울장치의 진동 변위(PSD)

<표 4.3.3.3> 각 위치에서의 진동 변위

위치	RMS	PkPk
1-sensor	7.74 nm	21.5 nm
2-sensor	13.0 nm	36.2 nm
3-sensor	490.5 nm	1.38 μm
4-sensor	651.8 nm	1.81 μm
5-sensor	603.6 nm	1.68 μm

거울이 설치되어 있는 floor, frame, vacuum chamber 등의 진동을 측정하였으며, 각 위치에서의 진동 변위가 상대적으로 큰 수치를 나타내고 있지는 않지만, 구조체 자체에서의 감쇠를 통한 진동 저감의 효과를 얻기 위해서는 강성도를 더욱 높이는 것이 필요하다. 또한 구조체 자체 무게를 키워 전체적으로 진동 변위 수치를 낮추는 것이 필요할 것으로 판단되며 이는 4GSR 거울 시스템 설계에 반영될 예정이다. 일반적으로 바닥의 진동은 보행 같은 인간의 활동이나 기계에 의해 발생하는 반복적인 힘과 관련이 있는데 특히 보행은 다른 요소들보다 다소 복잡하고 힘의 위치가 스텝별로 변한다.

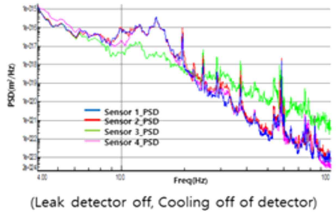
적용되는 힘은 sinusoidal forces의 조합으로 표현되고 사인 하중에 의한 진동수는 인간 활동에 대한 스텝 진동수 같은 반복적인 힘에 의한 기본 진동수의 배수 또는 조화진동수이다. 시간에 의해 좌우되는 반복적인 힘은 Fourier series에 의해 (수식 4.3.3.1)과 같이 표현된다.

$$F = P\left[1 + \sum \alpha_i \cos(2\pi i f_{step} t + \Phi_i)\right] \quad \text{(수식 4.3.3.1)}$$

여기서, P는 무게, α_i는 조화 하중(harmonic force)에 대한 동적 계수, l은 harmonic 배수(1, 2, 3, ...), f_{step}는 활동에 의한 가진진동수, t는 시간, Φ_i는 조화진동수(harmonic frequency)에 대한 위상각(phase angle)이다.

바닥을 지지하는 거의 모든 콘크리트 슬래브, 철골의 고유진동수는 인간 활동에 의한 조화진동수(Harmonic Forcing Frequency)와 같거나 거의 근접하기 때문에 공진 증폭은 철골 건물에서 일어나는 대부분의 진동 문제와 관련이 있다. 따라서 광학장치의 지지 구조대는 이러한 영향을 고려하여 제작되는 것이 필요하다.

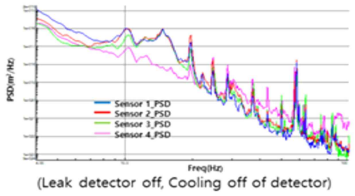
광학장치가 설치된 floor에서 인간의 발걸음 영향뿐만 아니라 공조시스템으로부터도 많은 영향을 받고 있다. 이러한 영향을 평가하기 위해 PAL-XFEL에 설치된 KB-mirror 시스템을 이용하여 진동을 평가하였다. 일반적으로 정밀 장치에 있어 공조기 영향을 최소화하려는 방법으로 풍향과 간접적으로 접촉하는 시스템 구축이 필요하며, 아래 <그림 4.3.3.8>과 <그림 4.3.3.9>에서도 보여주고 있는 것처럼 공조에 의한 진동 영향을 무시할 수 없다. <그림 4.3.3.8>은 공조기 가동 상태에서 측정한 진동 변위 결과이며, <그림 4.3.3.9>는 공조기 가동을 중단한 상태에서 측정한 결과로 진동 변위 영향은 무시할 수가 없으며, 그에 따라 4GSR 광학장치 설계 및 건물 공조에 있어 이와 같은 결과를 고려하여 반영할 필요가 있다.



	RMS	PkPk
Sensor 1	36.8 nm	104 nm
Sensor 2	37.0 nm	105 nm
Sensor 3	25.9 nm	73.3 nm
Sensor 4	40.7 nm	115 nm

- Sensor 1 : Upstream of KB Mirror Stage
- Sensor 2 : Downstream of KB Mirror Stage
- Sensor 3 : Floor of EH2
- Sensor 4 : Top plate of KB Mirror

<그림 4.3.3.8> 공조기 가동 환경에서의 각 위치 진동 변위



	RMS	PkPk
Sensor 1	25.6 nm	71.2 nm
Sensor 2	25.9 nm	73.4 nm
Sensor 3	20.1 nm	56.8 nm
Sensor 4	14.9 nm	42.3 nm

- Sensor 1 : Upstream of KB Mirror Stage
- Sensor 2 : Downstream of KB Mirror Stage
- Sensor 3 : Top plate of KB Mirror
- Sensor 4 : Floor of EH2

<그림 4.3.3.9> 공조기 가동 중단 환경에서의 각 위치 진동 변위

일반적으로 동적 계수의 크기는 조화진동수의 증가에 따라 감소한다. 보행의 첫 번째 네 개의 조화진동수와 관련된 동적 계수는 각 0.05, 0.1, 0.2, 0.5이다. 사람이나 기계는 질량에 사인 수직력을 발휘한다. 바닥을 지지하는 거의 모든 콘크리트 슬래브, 철골의 고유진동수는 인간 활동에 의한 조화진동수(Harmonic Forcing Frequency)와 같거나 거의 근접하기 때문에 공진 증폭은 철골 건물에서 일어나는 대부분의 진동 문제와 관련이 있다. 따라서 광학장치의 지지구조체는 이러한 영향을 고려한 제작이 필요하다.

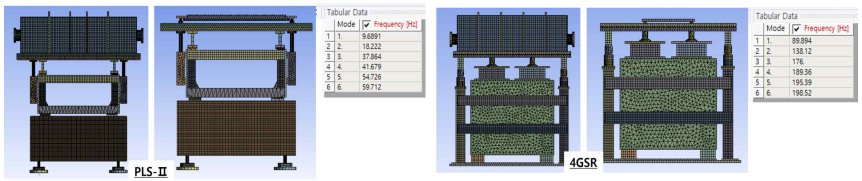
(2) 거더 진동해석

PLS-II의 거울장치 거더에는 화강암 소재의 석정반 아래에 장치를 6축으로 정렬할 수 있는 조정 장치가 설치되어 있으며, 그 위의 석정반에 조립된 철재 프레임이 거울장치를 지지하고 있다. 반면 4GSR 거울장치 거더는 지반에 에폭시(epoxy) 몰딩을 하고 에폭시 몰딩 상부에 복층의 철재 베이스 플레이트 두어 장치를 수평 방향(x, z)의 정렬을 하고 화강암 소재 석정반 하부에 조립된 고-하중 용의 웨지 마운트를 통해 장치의 높이 방향 (y, roll, pitch) 미세정렬을 가능하게 하였다. 광학장치의 주요 구성 부품들은 대부분 진공 챔버 내부에 설치되고, 진공 챔버는 crystal과 mirror와 정밀 구동 장치들의 사용 환경을 진공 환경으로 만들기 위함이다. 그러나 진공 챔버로 인해 유발되는 외력이나 내부 장치로 진동 전달될 수 있는 여지가 많아 내부 정밀 장치와 별도의 분리된 서포트 구조로 설계하여 기존의 PLS-II의 거더 구조보다 진동에 안정적인 구조를 가진다. 또한 4GSR 거더 장치는 진동방지 및 평탄화를 위해 바닥에 에폭시를 몰딩 후 그 상부에 설치하여 지반 바닥의 진동으로부터 안정적인 구조를 가지도록 설계하였다.

고유진동수는 어떤 물체가 갖고 있는 고유의 진동수 혹은 공진하는 주파수이며, 감쇠는 진동계에서 에너지를 소멸시켜 진동을 줄이는 특성이다. 고유진동수의 식은 (수식 4.3.3.2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 m = 질량, k = 강성이다.

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{(수식 4.3.3.2)}$$

광학장치의 지지 구조대를 설계할 때는 강성과 질량을 변화시켜 공진 발생을 회피하고 상대적으로 높은 고유진동수를 갖는 것을 목표로 삼을 수 있다. 따라서 PLS-II와 4GSR 거울장치 거더의 모달 해석을 통하여 <그림 4.3.3.10>과 같이 고유진동수를 비교하였다.



<그림 4.3.3.10> PLS-II와 4GSR 거더의 모달 해석 및 고유진동수 비교

PLS-II의 거울장치 거더의 1차 고유진동수가 9.689 Hz, 4GSR의 거울장치 거더의 1차 고유진동수가 89.894 Hz로 PLS-II 거울장치 거더 대비, 고유진동수가 약 9.3배 증가하였음을 확인할 수 있다.

라. 냉각장치

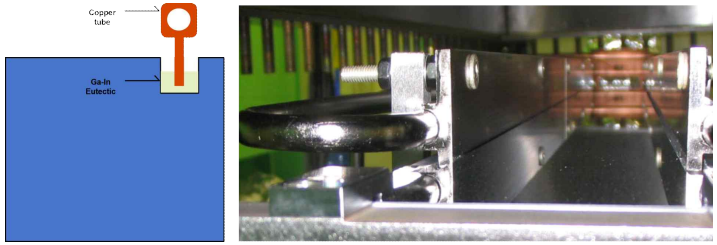
거울은 높은 열에너지를 가진 빔을 반사하면서 열에 의한 표면변형이 일어나고 변형량의 크기에 따라 Slope error가 비례하여 커질 수 있다. 따라서 4GSR에서는 PLS-II 광학장치의 냉각장치를 분석하고 그 결과를 반영하여 효율적인 냉각시스템을 도입하고자 한다.

(1) Cooling

거울의 냉각장치에 주로 적용되는 방법으로는 Galinstan Bath Cooling, Side Contact Cooling 그리고 거울 반사면 내부에 냉각 채널을 가공하는 직접냉각 방식이 있다.

○ Galinstan Bath Cooling

<그림 4.3.3.11>과 같이 거울 표면이나 측면에 홈(bath)을 가공하고 Galinstan (Ga-In 공융혼합물)을 주입한 후에 구리패드와 구리 튜브를 브레이징으로 고정하여 튜브 내부로 LCW를 흘려 거울 표면을 간접 냉각하는 방식이다. 이는 해외 여러 가속기에서도 채택되어 사용 중인 방법으로 거울과 냉각 패드가 물리적인 접촉이 없어 냉각라인에서 발생하는 진동으로부터 분리가 되고, 또한 냉각 패드를 거울 냉각면에 접촉을 위한 물리적인 외력이 가하지 않아도 되므로 거울의 slope error를 줄일 수 있다. 또한 냉각패드 설치는 광자빔이 거울에 반사되는 Footprint 구간만 설치하여 거울 표면의 온도 편차를 줄여 전체적인 Slope error를 줄일 수 있다. 본 방법은 거울 장치의 이동이나 운영 시 과도하게 기울거나 진공 작업 시 사소한 부주의로 인해 액상 상태의 Galinstan이 비산하여 거울 표면을 오염시키는 사고로 이어질 수 있는 위험성이 있으므로 장치 조립이나 운영 시 세심한 주의가 필요하다.

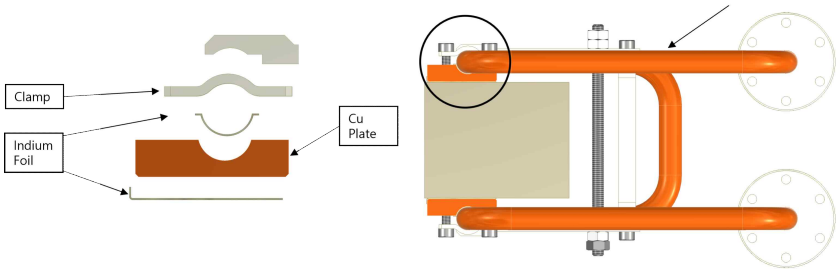


<그림 4.3.3.11> Mirror Ga-In Bath Cooling

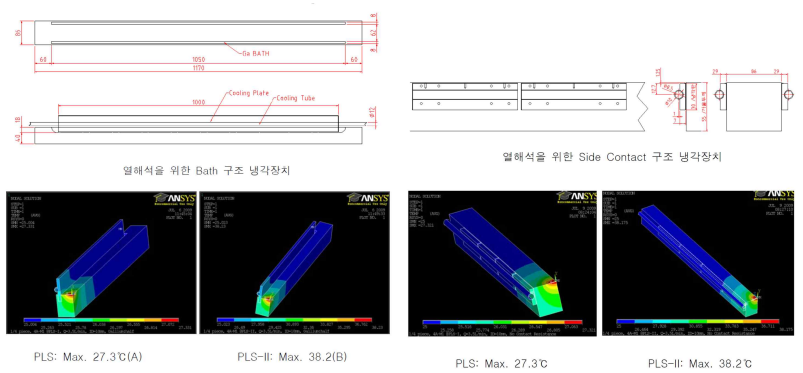
○ Side Contact Cooling

Side Contact Cooling은 거울 측면에 냉각용 구리패드를 밀착하고 구리패드와 동파이프의 접촉면은 indium foil로 밀착하여 동파이프 내부로 LCW를 흘려 거울을 냉각시키는 방식이다. 이 방식 또한 해외 여러 가속기의 거울 장치에 보편적으로 적용되고 있으나, 냉각 효율을 높이기 위해 냉각 패드를 거울 측면에 밀착시켜야 하므로 거울에 가해지는 물리적인 외력으로 인해 정밀하게 가공된 거울 반사면의 slope error를 증가시킬 수 있어 조립 시 설계와 조립 시 높은 기술이 필요하다.

거울 측면과 냉각판이 접촉하는 면의 상호 평면도가 좋을수록, 접촉 시 고체 사이간의 열전도도가 높을수록 냉각 효율이 높아지게 된다. 따라서 <그림 4.3.3.12>와 같이 거울 면에 Indium foil + Cu Pad + Indium foil + Water Cooled Cu pipe의 순서로 조립한 다수의 냉각판을 거울 양 측면에 볼팅형 클램프 방식으로 밀착시켜 조립하여 접촉 효율을 높인다.



<그림 4.3.3.12> Mirror Side Contact Cooling 조립 단면도



<그림 4.3.3.13> Ga-In Bath Cooling vs Side Contact Cooling

PAL에서는 PLS와 PLS-II의 거울 모델을 통해 Ga-In bath 방식과 Side contact cooling 방식의 열 해석을 진행한 사례가 있으며, 해석 조건은 아래와 같다.

- Incident angle : 4.2 mrad
- Heat Power PLS : 0.0676 kW/mrad^2
- Heat Power PLS-II : 0.221 kW/mard^2
- Water Temp : 25 ℃

해석 결과 두 방법에서의 거울 냉각 효과가 <그림 4.3.3.13>에서와 같이 온도 측면에서 큰 차이가 없음이 확인되었다. 따라서 4GSR에서는 분광기 전단에 설치되는 냉각이 필요한 거울장치에는 Side contact cooling 방법을 채택하여 장치의 관리 및 유지보수의 안정성을 확보하고 냉각장치와 거울 측면의 밀착장을 높이기 위한 물리적인 외력으로 거울 반사면의 변형인 slope error를 줄이기 위한 설계를 적용하였다.

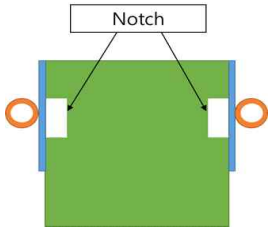
○ 거울 형상 (Notch)

4GSR 방사되는 빔의 크기는 PLS-II의 1/100 수준으로 작아짐에 따라 거울장치에 입사되는 빔의 크기 또한 매우 작아졌다. 이로 인해 거울 반사 면에 작용하는 Peak Power Density는 상대적으로 매우 높아졌고 냉각장치의 효율성 극대화와 slope error 최소화를 위한 기술적인 설계기술이 요구된다. 따라서 냉각장치의 방식뿐만 아니라 거울의 형상, 크기 등 다양한 설계 요소를 고려하여 빔의 열부하로 인한 반사면의

slope error를 줄이는 노력이 진행하였다.

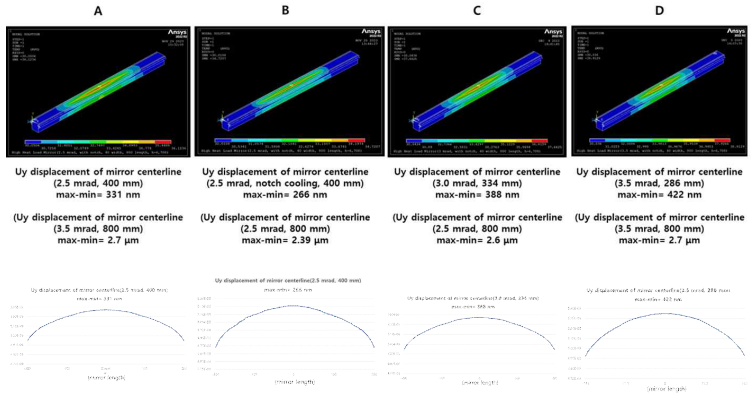
아래 <그림 4.3.3.14>와 같이 거울 측면에 길이 방향으로 홈을 파고 거울 측면과 냉각 패드 사이에 접촉 효율을 높이기 위해 Mirror + Indium foil + cu pad + indium foil + copper pipe 순서로 조립하여 거울 양-측면의 냉각 패드를 클램핑하여 거울을 냉각시키는 열 해석을 진행하였다. 열 해석 조건은 다음과 같다.

- Distance from source : 30 m
- Mirror length : 800 mm
- Incident angle : 2.5 mrad, 3.0 mrad, 3.5 mrad



<그림 4.3.3.14> Side contact Cooling (notch)

<그림 4.3.3.15>는 거울에 빔의 입사각이 2.5 mrad 일 때 거울 길이의 중간 위치에서 변위 편차값이 331 nm, 빔 입사각이 3.0 mrad 일 때 388 nm, 빔 입사각이 3.5 mrad 일 때 422 nm 수준의 편차값이 나타남을 보여준다. 특히 빔을 2.5 mrad으로 입사하고 notch 면을 모두 cooling 한 B type의 모델이 비교적 낮은 slope error 값을 가진 것을 확인하였다. 이에 따라 빔의 열부하로 인한 거울 반사면의 slope error를 개선하기 위해서는 거울 측면의 Notch 형상을 고려함과 동시에 냉각구조물의 배치, 거울과 조립되는 구조물의 위치 또한 필요한 요소임을 확인하였다.



<그림 4.3.3.15> 빔 입사각에 따른 열해석 결과 (notch)

○ 분광기 Crystal

광자빔의 높은 열부하로 인해 Crystal 표면에 빔이 직접 조사되는 위치와 빔이 조사되지 않은 위치와 온도 편차를 최대한 줄이는 설계기술이 필요하다. Crystal 표면의 온도가 불균일할수록 Slope error가 커지게 되고 이는 실험에서 빔의 불안정하게 만드는 요인이 되므로 빔이 조사되는 Crystal 표면의 열을 최대한 빠르게 냉각시켜 주는 것이 중요하다. Crystal의 빠른 냉각을 위해서는 LN2 냉각 채널의 구조와 Crystal 폭이나 두께의 변화에 따른 Crystal 표면의 냉각효율 Simulation을 통해 최적의 냉각 채널의 구조와 Crystal Size를 선정하는 것이 중요하다. 4GSR 분광기의 Crystal은 LN2 냉각방식으로 빔라인에 따라 Si (111) 한 종류 또는 Si (111) & Si (311) 두 종류가 모두 설치된다. 분광기 냉각장치는 Crystal 양-측면에 냉각 패드(Glid-cop)를 부착하는 방식으로 Crystal과 냉각 패드 사이에는 접촉 효율을 높여 열전달율을 높이기 위한 액체금속 합금인 Galinstan을 도포한다. Crystal 두 종류를 설치하는 분광기 역시 동일한 방법으로 냉각장치를 설계하고 설계 구조는 <그림 4.3.3.16>, <그림 4.3.3.17>과 같으며 냉각 효율에 있어 중요한 설계 요소인 냉각 채널의 모양과 Crystal 두께를 달리하며 냉각 효율을 검토하기 위한 열해석을 수행하고 또한 Crystal 표면변형 최소화를 위한 구조해석도 함께 진행하였다. 해석 조건 및 결과는 다음과 같다.

- Initial T : 295 K
- Convection : 77 K (2,500 W/mm^{2}K)
- Heat Flux : 100 W/mm^2
- Aging Time : 77 K (0~25 s)
-Beam irradiation : 25~50 s



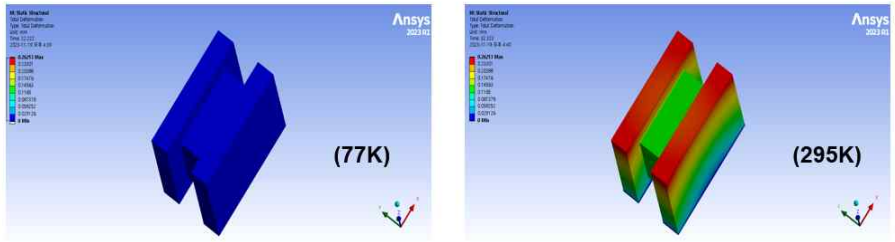
<그림 4.3.3.16> The thermal analysis of crystal according to beam position

<표 4.3.3.4> DCM Crystal 두께별 Maximum temperature 해석 결과

Crystal Size	Maximum Temp.
30 mm × 80mm × 40 mm	939
15 mm × 80 mm × 40 mm	918
30 mm × 60 mm × 40 mm	934
15 mm × 60 mm × 40 mm	878
30 mm × 40 mm × 40 mm	968
15 mm × 40 mm × 40 mm	911

<표 4.3.3.4>와 같이, Crystal Size가 15 mm × 60 mm × 40 mm의 조건에서 가장 낮은 Maximum Temperature를 나타냈으며, 추가적으로 열응력에 의한 변형량을 확인하기 위해 아래 조건에서 구조해석을 시행하였다. 결과는 <그림 4.3.3.17>과 같다.

- Initial T : 295 K
- Convection : 77 K (2,500 W/mm^{2}K)
- Heat Flux : 100 W/mm^2
- Aging Time : 295 (0~24 s)
- Cooling Time : 77 K (25~100 s)
- Beam irradiation : 50~100 s



<그림 4.3.3.17> The deformation results of crystal system

4.3.4 분광기

분광기는 빔라인 PTL 구간에 설치되어 저장링으로부터 방사된 여러 파장이 섞인 백색광에서 실험에 필요한 특정 파장의 단색광을 분리, 인출하는 빔라인 주요 광학장치이다. 분광기는 크게 경X-선 (Hard x-ray) 빔라인에서 사용되는 DCM (Double Crystal Monochromator)과 DMM (Double Multilayer Monochromator), 연X-선 (Soft x-ray) 빔라인에서 사용되는 SGM (Single Grating Monochromator)으로 구분되며 각 빔라인별 실험 목적에 따른 요구되는 파장 범위, 에너지 분해능, 빔에 의한 열부하 조건 그리고 구동축의 정밀도 등의 특성을 종합적으로 고려하여 적합한 분광기가 선정된다. 4GSR 빔라인에 설치되는 DCM은 경X-선 빔라인용 Vertical In Vacuum Type, Horizontal In Vacuum Type 2종류, 경X-선 센터벤더 빔라인용 DMM 1종류, 연X-선 빔라인용 SGM 1종류로 하여 모두 4종류로 개발 진행 중이다.

4GSR 빔라인에 적용을 위한 분광기 설계는 기구적인 정밀도, 진동 안정성, 온도 균일성 등 분광기의 성능을 결정짓는 중요 요소들을 개선하고자 하였고 4세대 원형 방사광가속기의 특성에 맞는 고도화된 분광기를 개발하여 빔라인에 적용한다.

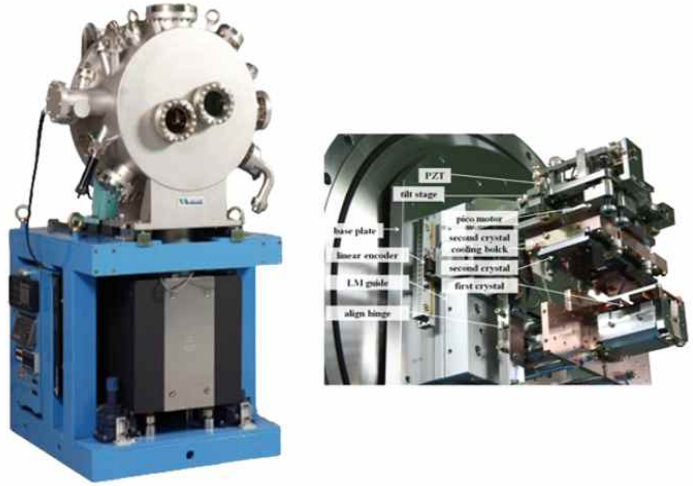
가. Double Crystal Monochromator (DCM)

Double Crystal Monochromator (DCM)는 경X-선 빔라인에 설치되어 2개의 Crystal을 사용해 여러 파장이 섞인 방사선 백색광으로부터 실험 목적에 필요한 특정 단색광을 분리, 인출하는 장치이다. DCM 장치의 Crystal은 반드시 1st & 2nd 조합으로 설치되고 빔라인 실험에 필요한 에너지 범위에 따라 1 pair Si (111) 또는 2 pair Si (111) + Si (311)가 함께 설치될 수도 있다. DCM을 구성하는 주요 장치들은 Silicon Crystal (1st Crystal & 2nd Crystal)과 Crystal을 구동하는 정밀 Motion stage, 광학식 엔코드와 각종 센서 및 전체 유닛을 제어하고 모니터링을 위한 제어장치, 저에미턴스와 고출력의 소스로부터 방사되는 방사광에 의한 Crystal의 열적 변형을 방지하기 위한 냉각장치, 내-외부 진동을 감쇄하고 장치의 전체적인 안정도를 높이기 위한 화강암 구조체의 서포트, 진공을 유지해 주는 진공 챔버 등으로 구성된다.

1st Crystal은 DCM에 입사되는 첫 번째 Crystal로서 광자빔에 의한 열부하를 많이 받는다. 1st Crystal이 충분한 냉각이 이루어지지 않을 경우 열변형으로 인해 최적화된 빔의 제공을 어렵게 하고 이는 빔라인 전체의 성능에 지대한 영향을 준다. 따라서 열해석, 진동 및 구조해석 등의 Simulation을 통한 이론적인 검증과 이를 반영한

시제품을 제작하여 본 제품 제작 전 실증을 통한 검증을 진행하였다. 2nd Crystal은 열부하가 1st Crystal에 비해 매우 낮아 냉각을 위한 방안보다는 1st Crystal & 2nd Crystal의 상대온도 편차가 낮을수록 빔의 안정도가 좋아지므로 빔라인 특성에 맞추어 직접 냉각방식과 간접 냉각 방식을 혼용하여 적용한다. DCM의 성능에 중요한 영향을 미치는 요인으로는 (1) 효율적인 냉각장치로 Crystal 온도 균일성, (2) 냉각장치 또는 구조적 특성에 의한 진동, (3) 에너지 분해능을 높이기 위한 각도 분해능이 높은 고니오미터, (4) Crystal Pair를 정밀하게 정렬하고 안정하게 동작할 수 있는 정밀 구동 장치, (5) 장시간 진공 유지를 위한 진공 챔버, (6) DCM 전체를 안정하게 정렬하고 지지하기 위한 서포트 등이 있으며 이러한 성능향상을 위한 다양한 기술이 적용되었다.

<그림 4.3.4.1>은 PLS-II에 설치되어 운영 중인 DCM 장치의 내·외부 형상이고 <표 4.3.4.1>은 해당 장치의 Motion 사양이다. PLS-II 및 타 가속기에서 운영 중인 DCM 모델을 참고하여 4세대 원형 방사광 특성에 적합한 보다 개선된 성능으로 안정적인 빔 운영이 가능하도록 하였다.



<그림 4.3.4.1> PAL DCM 내·외부 형상

<표 4.3.4.1> PAL DCM System Motion Specifications

Part	Function	Actuator / Monitor (Encoder)	Range	Resolution	Remark
Bragg angle		Huber 420 goniometer + Paker HV343 micro-stepping motor + Zeta6108 controller	360°	0.07″ min	-
		RCN829 angle encoder + ND287 display (Heidenhain)	360°	0.0024″	-
		Electrical limit	0~35°	-	Typical
		Mechanical limit	< 0°, > 35°	-	Typical
2nd Crystal	Pitch	8302-UHV pico-motor + 8753 driver (New-focus)	> ± 1°	0.013″	
		HSA750-050 LVDT + DMC-A2-812 display (Macro Sensors)	> ± 1°	-	Calibration necessary
	Fine Pitch	P-843K027 PZT + E-625.SR(PI)	150 μrad	0.3 nrad	-
	Roll	8302-UHV pico-motor + 8753 driver (New-focus)	> ± 1°	0.018″	-
		HSA750-050 LVDT + DMC-A2-812 display (Macro Sensors)	> ± 2°	-	Calibration necessary
	Y2	N-216K002 PZT actuator + E755.101 controller (PI)	10~35 mm	6 μm max 0.03 nm min	Typical
		RGS20-S scale + REF0400E01A Amp + RGH25F15M01C read head (Renishaw) + LY72 display	> 30 mm	50 nm	-

(1) In Vacuum (Vertical Motion) Type DCM

In vacuum DCM은 고니오미터를 포함한 모든 구동 장치 및 스테이지가 진공 챔버 내부에 위치하고 모두 UHV 또는 HV 호환 장치로 구성됨을 뜻한다. 본 장치는 두 개의 Crystal을 상하 방향인 수직 방향으로 설치하여 단색광을 만들어내는 방법으로 많은 빔라인에서 사용되는 일반적인 구조이다. 본 장치는 Beam offset 값이 25 mm가 되도록 하였으며 모든 스테이지는 PAL에서 국산화 설계, 개발된 제품을 적용하였다. 1st Crystal Part는 Bragg angle, Roll 2축의 제어가 가능하고 2nd Crystal Part는 Pitch, Y, Z 총 3축의 모터 제어가 가능하도록 구성된다. 또한 PZT를 장착하여 2nd Crystal Fine Pitch Motion의 피드백 및 정밀 제어가 가능하도록 하였으며 장치의 기구적인 위치 정밀도 및 재현성 향상을 위해 UHV Encoder, Limit Switch, 모터 온도센서가 적용된다. 장치를 제어하기 위한 구동축은 모두 UHV ($\leq 5\times10^{-10}$ torr) 환경에서 사용 가능한 모터로 제어되는 Actuator로 구성되고 모든 신호선은 feedthrough를 통하여 진공 챔버 외부로 인출된다.



<그림 4.3.4.2> 4GSR In Vacuum (Vertical Motion) Type DCM

<표 4.3.4.2> In Vacuum (Vertical Motion) Type DCM Motion Specifications

Part	Function	Actuator / Monitor (Encoder)	Range	Resolution	Remark
Bragg angle		Huber 430 goniometer + Stepping motor + Harmonic gear type + Micro drive	360°	0.34 μrad min.	-
		RCN829 angle encoder + ND287 display (Heidenhain)	360°	0.012 μrad	-
		Electrical limit	0~65°	-	Typical
		Mechanical limit	≤ 0°, ≥ 65°	-	Typical
1st Crystal	Roll	VSS32.200.1,2 + GPL (PHYTRON) + Micro drive	≥ ± 1°	5 μrad	-
		RGSZ20 scale + TI0400A10A + T1631-15M read head (Renishaw)	≥ ± 2°	0.065 μrad	-
2nd Crystal	Pitch	VSS32.200.1,2 + GPL (PHYTRON) + Micro drive	≥ ± 1°	5 μrad	-
		RGSZ20 scale + TI2000A10A + T1631-15M read head (Renishaw)	≥ ± 1°	0.013 μrad	-
	Fine Pitch	P-843K027 PZT + E-625.SR(PI)	≥ 150 μrad	0.3 nrad	-
		RGSZ20 scale + TI2000A10A + T1631-15M read head (Renishaw)	≥ ± 1°	0.013 μrad	-
	Y2	VSS42.500.2,5 + GPL (PHYTRON) + Micro drive	10~35 mm	0.05 μm	Typical

(2) In Vacuum(Horizontal Motion) Type DCM

본 장치는 두 개의 Crystal을 수평 방향으로 이동시켜 파장을 선택하고 Bragg Angle에 대한 구동 파트가 진공 챔버 내부에 설치되어 구동하는 Horizontal Motion & In Vacuum Type의 DCM 장치이다. 본 장치는 Beam offset 값이 25 mm가 되도록 하였으며 Crystal 간의 Horizontal Motion Mechanism을 구현하기 위해 Vacuum

Stage가 적용되었다. 1st Crystal Part는 Bragg angle, Roll 2축의 제어가 가능하고 2nd Crystal Part는 Pitch, Y, Z 총 3축의 제어가 가능하도록 구성된다. PZT를 장착하여 2nd Crystal Fine Pitch Motion의 피드백 및 정밀 제어가 가능하도록 하였으며 장치의 기구적인 위치 정밀도 및 재현성 향상을 위해 UHV Encoder, Limit Switch, 모터 온도센서가 적용된다. 장치를 제어하기 위한 구동축은 모두 UHV ($\leq 5\times10^{-8}$ torr) 환경에서 사용 가능한 스텝모터로 제어되는 Actuator로 구성되고 모든 신호선은 feedthrough를 통하여 진공 챔버 외부로 인출된다.



<그림 4.3.4.3> 4GSR In Vacuum (Horizontal Motion) Type DCM

<표 4.3.4.3> 4GSR In Vacuum (Horizontal Motion) Type DCM Motion Specifications

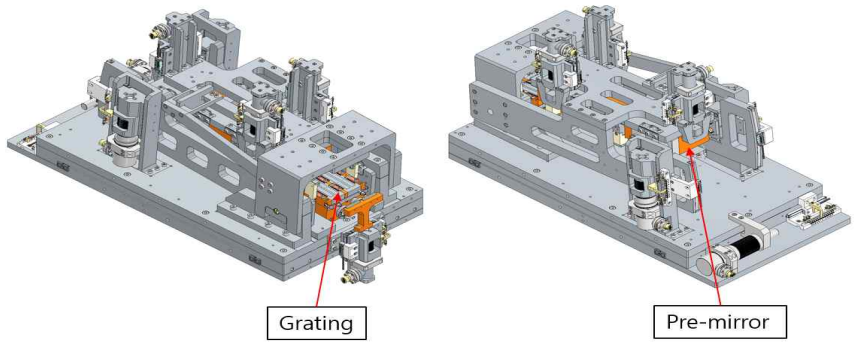
Part	Function	Actuator / Monitor (Encoder)	Range	Resolution	Remark
Bragg angle		Huber 430 goniometer + Stepping motor + Harmonic gear type + Micro drive	360°	0.34 μrad min.	-
		RCN829 angle encoder + ND287 display (Heidenhain)	360°	0.012 μrad	-
		Electrical limit	0~65°	-	Typical
		Mechanical limit	≤ 0°, ≥ 65°	-	Typical
1st Crystal	Roll	VSS32.200.1,2 + GPL (PHYTRON) + Micro drive	≥ ± 1°	5 μrad	-
		RGSZ20 scale + TI0400A10A + T1631-15M read head (Renishaw)	≥ ± 2°	0.065 μrad	-
2nd Crystal	Pitch	VSS32.200.1,2+GPL (PHYTRON) + Micro drive	≥ ± 1°	5 μrad	-
		RGSZ20 scale + TI2000A10A + T1631-15M read head (Renishaw)	≥ ± 1°	0.013 μrad	-
	Fine Pitch	P-843K027 PZT + E-625.SR (PI)	≥ 150 μrad	0.3 nrad	-
		RGSZ20 scale + TI2000A10A + T1631-15M read head (Renishaw)	≥ ± 1°	0.013 μrad	-
	Y2	VSS42.500.2,5+GPL (PHYTRON) + Micro drive	10~35 mm	0.05 μm	Typical

나. Single Crystal Monochromator (SGM)

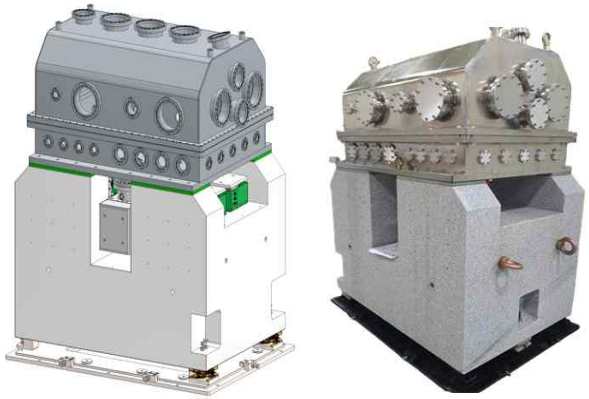
Single Grating Monochromator (SGM)은 연X-선 빔라인에 설치되어 빔의 Grating에 입사각 조절을 통해 여러 파장이 섞인 방사선 스펙트럼으로부터 실험 목적에 필요한 특정 단색광을 분리, 인출하는 장치이다. 일반적으로는 Pre-mirror와 Grating이 하나의 진공 챔버 내부에 설치되는 구조이다. Pre-mirror는 어느 각도에서도 반사된 빔이 Grating의 일정 위치에 조사되도록 하여 안정된 에너지의 빔을 인출하는 구조이다. SGM은 상대적으로 넓은 범위의 파장 선택이 필요한 연X-선 빔라인에서 활용된다.

(1) Plane Grating Monochromator (PGM)

PGM은 SGM의 일종으로, 본 장치에는 1개의 Pre-mirror와 2개의 Grating Substrate가 설치되며 모든 구동장치가 진공 챔버 내부에 설치되어 구동하는 In Vacuum Type의 장치이다. Grating과 Mirror를 통한 에너지 스캔을 위해 Sine Bar 방식이 적용되었으며 Grating 각도 조절을 통해 원하는 파장을 얻을 수 있는 Mechanism이 구현되었다. <그림 4.3.4.4>와 <그림 4.3.4.5>는 PGM의 내부장치 구조와 챔버, 지지구조체를 포함한 외부 형상을 보여주고 있다.



<그림 4.3.4.4> PGM System Grating, Pre-mirror



<그림 4.3.4.5> 4GSR PGM System

본 장치는 3개의 Actuator를 이용하여 Pitch, Roll, Y 3축의 제어가 가능하고 Grating Substrate는 3개의 Actuator를 이용하여 Pitch, Roll, Y 3축의 제어가 가능하다. 장치의 기구적인 위치 정밀도 및 재현성 향상을 위해 UHV Encoder, Limit Switch, 모터 온도센서가 설치되며 장치를 제어하기 위한 구동축은 모두 UHV ($\leq 5\times10^{-8}$ torr) 환경에서 사용 가능한 스텝모터로 제어되는 Actuator로 구성되고 모든 신호선은 feedthrough를 통하여 진공 챔버 외부로 인출된다. 4세대 원형 방사광 특성과 일치하면서 안정적인 빔 운영이 가능하도록 <표 4.3.4.4>~<표 4.3.4.6>과 같이 PGM Motion 사양을 결정하였다.

<표 4.3.4.4> PGM Grating Motion Specifications

위치	Motor resolution	Encoder resolution	Precision	Range
Scan motor	≤ 0.02 μrad	≤ 0.03 μrad	≤ 0.25 μrad	0.5~4.0 deg.
Pitch align motor	≤ 0.5 μrad	≤ 0.25 μrad	≤ 2.5 μrad	± 1.5 deg.
Roll align motor	≤ 0.4 μrad	≤ 0.25 μrad	≤ 2.5 μrad	± 1.5 deg.
Y align motor	≤ 0.01 μm	≤ 0.1 μm	≤ 0.5 μm	± 15.0 mm

<표 4.3.4.5> PGM Pre-mirror Motion Specifications

위치	Motor resolution	Encoder resolution	Accuracy	Range
Scan motor	≤ 0.02 μrad	≤ 0.03 μrad	≤ 0.25 μrad	0.5~4.0 deg.
Pitch align motor	≤ 0.5 μrad	≤ 0.25 μrad	≤ 2.5 μrad	± 1.5 deg.
Roll align motor	≤ 0.4 μrad	≤ 0.25 μrad	≤ 2.5 μrad	± 1.5 deg.
Y align motor	≤ 0.01 μm	≤ 0.1 μm	≤ 0.5 μm	± 15.0 mm

<표 4.3.4.6> PGM X-axis Specifications

위치	Motor resolution	Encoder resolution	Accuracy	Range
X align motor	≤ 0.01 μm	≤ 0.1 μm	≤ 0.5 μm	± 25.0 mm

다. DMM (Double Multilayer Monochromator)

Double Multilayer Monochromator (DMM)는 2개의 multilayer를 사용해 백색광으로부터 단색광을 추출하는 장치이다. DMM 장치의 multilayer는 1st & 2nd 조합으로 설치되고 필요한 에너지 범위에 따라 Si 결정 위에 쌓아 올린 Ruthenium/Carbon (Ru/C)과 Tungsten/Boron carbide (W/B4C)를 사용하여 각각 10~22 keV, 22~60 keV 영역의 단색광을 생산한다. 두 multilayer는 수 mm의 거리를 두고 coating 되므로 광경로상에서 Si 결정 substrate의 위치를 이동하여 어떤 multilayer를 사용할 것인지 선택할 수 있다.

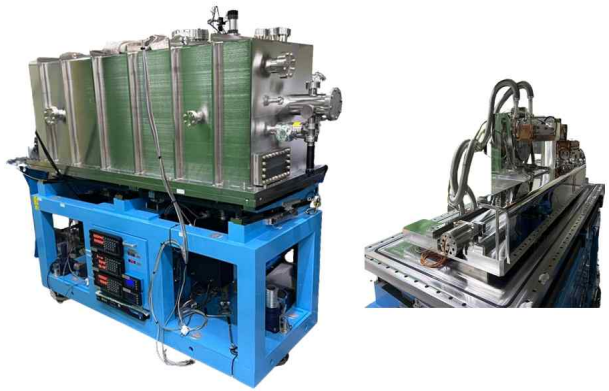
DMM을 구성하는 주요 장치들은 한 쌍의 1st and 2nd multilayer와 이를 구동하는 구동 장치, 초고진공 환경을 제공하는 진공 챔버, 열적 부하로부터 multilayer를 보호하기 위한 냉각장치, 장치를 지지 및 정렬하는 서포터, 진공펌프 등으로 구성된다.

1st multilayer는 bragg 반사를 통해 단색광을 생산하는 역할을 하고, 2nd multilayer는 생산된 단색광을 반사시켜 지면과 평행하게 출사 되도록 한다. 이때, 각각의 multilayer에 설치된 linear stage를 이용하여 서로 다르게 표면처리 된 부분을 선택하거나 white beam mode를 위해 multilayer들이 Z와 -Z 방향으로 이동하여 white beam에 간섭하지 않고 그대로 통과시킨다.

DMM은 구동 메커니즘이 DCM과 유사하지만, bragg 반사를 위해 DCM에서는 crystal을 사용하고 DMM에서는 밀도 차이가 많이 나는 두 종류의 물질을 교대로 쌓아 올린 multilayer를 사용한다는 차이점이 있다. 또한 DMM은 단색광의 파장 폭 ($\Delta\lambda/\lambda$)이 1%로 DCM보다 출사광 밝기가 약 100배 이상 밝다는 특징이 있어 X선 영상이나 방사선 치료와 같은 에너지 분해능보다 광량이 더 중요시되는 분야에서 주로 사용된다.

<그림 4.3.4.6>은 DMM 장치의 내·외부 형상이고 <표 4.3.4.6>은 해당 장치의 Motion 사양이다. PAL에서 개발 제작되어 PLS-II에서 운영 중인 DMM 장치에서의 경험과

해외 가속기에서 운영 중인 DMM 장치들을 참고하여 문제점을 개선하고 4세대 원형 방사광 특성에 적합하면서 보다 개선된 성능으로 안정적인 빔 운영이 가능하도록 하였다.



<그림 4.3.4.6> DMM System 내·외부 형상

<표 4.3.4.6> DMM System Controller and Monitor Specifications

Part	Function	Actuator / Monitor (Encoder)	Range	Resolution	Remark
1st Crystal	Pitch	Huber 411-X2W2 Goniometer + stepping motor + motor drive	360°	0.18″	-
		RESR20USA206 scale + REE0400A08A + RGH20F30M30C readhead (Renishaw)	360°	0.1″	-
2nd Crystal	Pitch	HUBER 411-X2W2 Goniometer + stepping motor + motor drive	360°	0.18″	-
		RESR20USA206 scale + REE0400A08A + RGH20F30M30C readhead (Renishaw)	360°	0.1″	-
	Roll	Pico-motor	± 0.63°	0.00001″	-
	Z2	KOHZU MVXA16A-R1 Linear Stage	± 25 mm	1 μm	-
		RGS20-S scale + REE0040E01A + RGH25F30M01C readhead (Renishaw)	± 25 mm	0.5 μm	-
	Longitudinal	PHYRTON VSS80.200-7.5 Stepper Motor + Rack and Pinion	± 500 mm	1 μm	-
		RGS20-S + REE0040E01A + RGH25F30M01C readhead (Renishaw)	± 500 mm	0.5 μm	-
Chamber (include 1st & 2nd Crystal)	Lateral	Oriental PK596A-P24 Stepper Motor + SAMYANG SJ-32 (24:1) Screw Jack	± 50 mm	33 nm	-
		MGSCALE GB-010ER Linear Encoder	± 50 mm	0.5 μm	-
	Vertical	Oriental PK596A-P24 Stepper Motor + SAMYANG SJ-32 (24:1) Screw Jack	± 6.537 mm	2.88 nm	-
		MGSCALE GB-015ER Linear Encoder	± 75 mm	0.5 μm	-

1st & 2nd multilayer는 각각 고니오미터에 설치되어 원하는 영역의 bragg angle을 만들어내며, 고니오미터의 회전축과 tilt stage를 통해 각각 Pitch와 Roll이 조정되고 두 multilayer 간의 평행을 유지한다. 1st multilayer를 제어하는 Goniometer Stage는 하부가 전체 프레임에 고정되어 회전축에서 bragg 각을 조절하고 2nd multilayer를 제어하는 고니오미터 stage는 수평 방향으로 이동할 수 있다.

DMM의 성능에 중요한 영향을 미치는 요인으로는 효율적인 냉각장치를 통한 multilayer 온도 균일성 유지, 냉각장치 또는 구조적인 요인에 의한 진동방지, 에너지 분해능을 높이기 위한 각도 분해능 높은 고니오미터, multilayer Pair를 정밀하게 정렬하고 안정적으로 동작할 수 있는 정밀 구동장치, 장시간 진공 유지를 위한 진공 챔버, DMM 전체를 안정적으로 정렬하고 지지하는 서포트 등이 있으며 이러한 다양한 기술적인 부분이 적용되었다.

4.3.5 거울장치

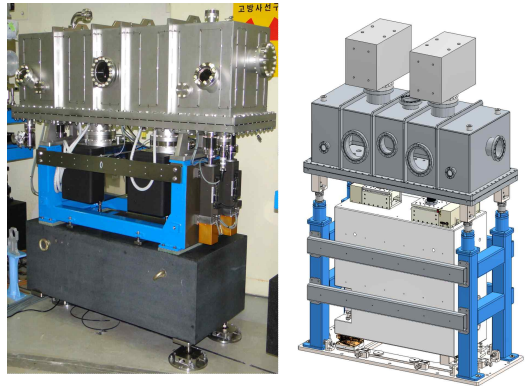
거울장치는 빔라인의 실험 목적에 맞도록 거울 반사면의 형태나 크기가 다양하고 그에 따른 거울조정장치 구동축의 종류와 장치의 구성이 다양한 형태로 제작되며, 이를 설계 및 제작하기 위해서는 열해석, 기구해석, 진동해석 등의 기술적인 계산과 더불어 전문적인 정밀기구 장치의 설계기술, 조립기술, 제어기술, 정밀하게 조립된 장치의 테스트 및 측정을 위한 다양한 분야의 전문 지식과 기술이 필요하다.

4GSR 빔라인에 설치되는 거울장치의 기능별 종류는 저장링의 휨 전자석이나 직선구간에 설치된 Undulator 혹은 wiggler와 같은 삽입 장치에서 방사된 광자빔의 발산각을 줄여 분광기에 입사시켜 에너지 분해능을 높여주는 시준 목적의 거울장치, 광원에서 나오는 광대역의 백색광이 분광기 Crystal에 직접 조사되어 높은 열부하로 인한 빔의 불안정성을 줄이기 위해 분광기 앞단에 설치되는 열부하 감소용 거울장치, 분광기에서 방사된 단색광을 시료에 집속시키기 위한 수직(VFM), 수평(HFM), 수직+수평(KB) 거울장치 그리고 빔의 경로 변경을 위한 거울장치와 같이 크게 구분되고 빔라인 실험 방법이나 주변 환경에 따른 요청으로 맞춤형 설계, 제작이 필요하다.

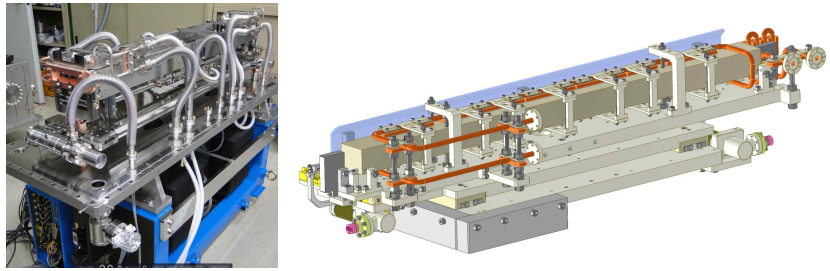
가. First Mirror System (M1)

빔라인에서 분광기 앞단에 첫 번째로 설치되는 M1 거울장치는 고-열부하(High Heat Load) 감소용 거울장치, 고차수 에너지(High Order Harmonics) 제거용 거울장치, 시준(Collimation) 거울장치 등의 단독 또는 공통의 목적으로 설치된다. 분광기 앞단에 설치됨에 따라 발생하는 거울의 높은 열부하로부터 거울의 열변형을 최소화하기 위해서는 냉각장치가 반드시 필요하다. 4GSR은 저에미턴스와 고출력의 특성을 가져 거울 표면은 높은 열부하를 받게 되고 효율적인 냉각이 이루어지지 않을 경우 빔 안정도를 크게 저하시킨다. M1 거울장치의 설계에는 앞서 기술한 열해석, 구조해석, 진동해석의 기술적인 계산과 더불어, 빔 정렬을 위한 거울 위치조정 시 사용자에 의한 제어 잘못으로 빔이 거울 이외 다른 곳에 조사되지 않도록 거울과 거울장치의 기구적, 전기적 안전장치 설계가 반드시 수반되어야 한다. M1 거울장치는 일반적으로 거울을 Pitch, Roll, Yaw, x, y 5축 조정이 가능하고 빔라인의 실험 목적에 따라 거울표면 가공을 고정된 반경으로 제작하여 설치하거나, 거울 반경의 조절을 위해 거울반사면은 평면으로 제작하고 거울 벤딩 장치를 설치하여 실험에 맞게 반경을 조절할 수 있게 한

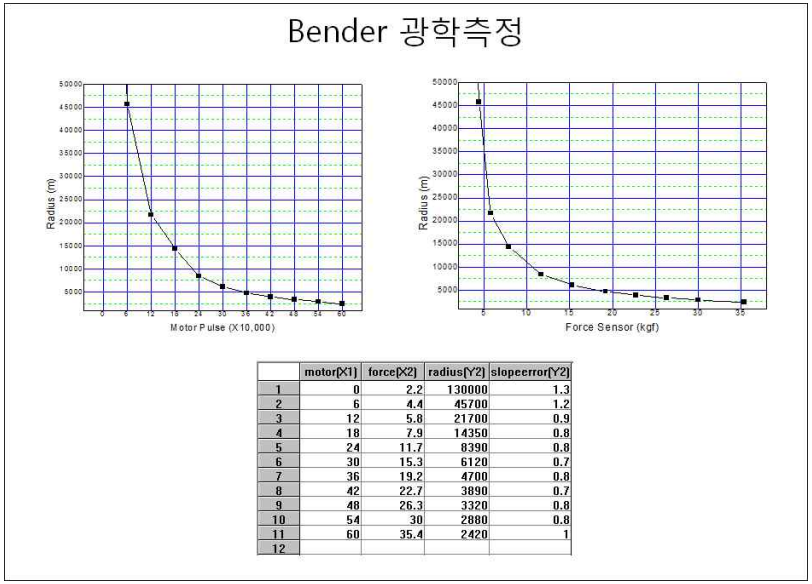
장치도 있다. 장치의 기구적인 위치 정밀도 및 위치 재현성 향상을 위해 UHV Encoder, Limit Switch, 모터 온도센서, 정밀 각도센서 등이 설치된다. 장치를 제어하기 위한 구동축은 모두 UHV ($\leq 5\times10^{-10}$torr) 환경에서 사용가능한 스텝모터로 제어되는 Actuator로 구성되고 모든 신호선은 feedthrough를 통하여 진공 챔버 외부로 인출된다. <그림 4.3.5.1>과 <그림 4.3.5.2>는 PLS-II와 4GSR의 시준 거울장치 외형과 장치 내부 모습을 보여주고 있다. 또한 <표 4.3.5.1>에서 M1 Mirror Manipulator의 상세 제작 사양을 보여준다.



<그림 4.3.5.1> PLS-II, 4GSR M1 Mirror Manipulator Chamber & Support



<그림 4.3.5.2> PLS-II & 4GSR M1 Mirror Manipulator



	motor[X1]	force[X2]	radius[Y2]	slopeerror[Y2]
1	0	2.2	130000	1.3
2	6	4.4	45700	1.2
3	12	5.8	21700	0.9
4	18	7.9	14350	0.8
5	24	11.7	8390	0.8
6	30	15.3	6120	0.7
7	36	19.2	4700	0.8
8	42	22.7	3890	0.7
9	48	26.3	3320	0.8
10	54	30	2880	0.8
11	60	35.4	2420	1
12				

<그림 4.3.5.3> M1 Bendable Mirror Radius & Slope Error

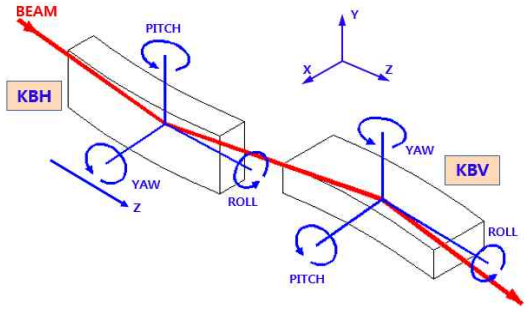
<표 4.3.5.1> M1 Mirror Manipulator Specification

Motion	Parameters	Specification
Horizontal Axis (x-axis)	Driver	Horizontal actuator (UHV)
	Range	± 15 mm
	Resolution	0.02 μm (motor) / 0.10 μm (encoder)
	Precision	0.2 μm (linear encoder)
	Drive type	5P Harmonic Step Motor
Vertical Axis (z-axis)	Driver	Vertical actuator
	Range	± 15 mm
	Resolution	0.05 μm (motor) / 0.10 μm (encoder)
	Precision	0.2 μm (linear encoder)
	Drive type	5P Harmonic Step Motor
Roll	Driver	Vertical actuator
	Range	± 2.60° (± 45.45 mrad)
Axis distance = 220 mm	Resolution	0.094 arcsec (0.455 μrad) (enconder)
	Precision	0.375 arcsec (1.818 μrad) (enconder)
	Drive type	5P Harmonic Step Motor
Pitch (separate installation of PZT)	Driver	Vertical actuator
	Range	± 2.68° (± 46.73 mrad)
Axis distance = 1070 mm	Resolution	0.019 arcsec (0.093 μrad) (enconder)
	Precision	0.077 arcsec (0.374 μrad) (enconder)
	Drive type	5P Harmonic Step Motor
Yaw	Driver	Horizontal actuator
	Range	± 2.14° (± 37.38 mrad)
Axis distance = 1070 mm	Resolution	0.008 arcsec (0.037 μrad) (enconder)
	Precision	0.077 arcsec (0.374 μrad) (enconder)
	Drive type	5P Harmonic Step Motor
Mirror Bender Actuator (if installed)	Driver	Bender actuator
	Range	± 12 mm (100 kgf)
	Resolution	0.02 μm
	Precision	0.1 kgf (by force sensor)
	Drive type	5P Harmonic Step Motor
Base Alignment System	Driver	Manual adjustment
	Range	Z direction, ± 25 mm (with roll, pitch)
		X, Y, Z direction, ± 15 mm
UHV Angle Sensor X & Y axis	Range	X & Y : ± 1 deg
	Resolution	0.0001 deg

나. KB Mirror Manipulator

KB 거울장치는 빔을 수평과 수직 집속을 위해 두 개의 거울이 조합으로 함께 진공 챔버 내에 설치되는 거울장치로 주로 광자빔의 가로, 세로 크기를 수 마이크론 이하의 크기로 시료에 직접 집속을 위해 시료와 가까운 거리에 설치된다. KB 거울장치는

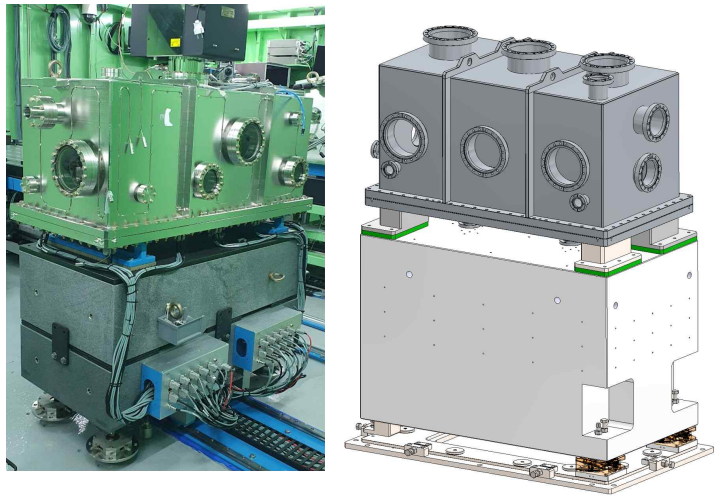
거울위치 및 자세 정렬을 위한 스테이지의 구조와 거울 각운동을 위한 관절 및 피벗 구조의 설계 방법에 따라 Kinematic 구조와 Pivot 구조의 두 방법으로 분류할 수 있다. 최근에는 거울 가공 기술의 발달로 한 개의 거울 면에 Tangential 방향과 Sagittal 방향의 반경을 크게 가공하여 집속 거리를 짧게 하면서 하나의 위치에 수평과 수직 집속 가능한 Ellipsoidal 거울 제작이 가능하여 하나의 거울로 KB 기능을 대체 가능하다. <그림 4.3.5.4>에 KB Mirror Manipulator 좌표계를 나타내었다.



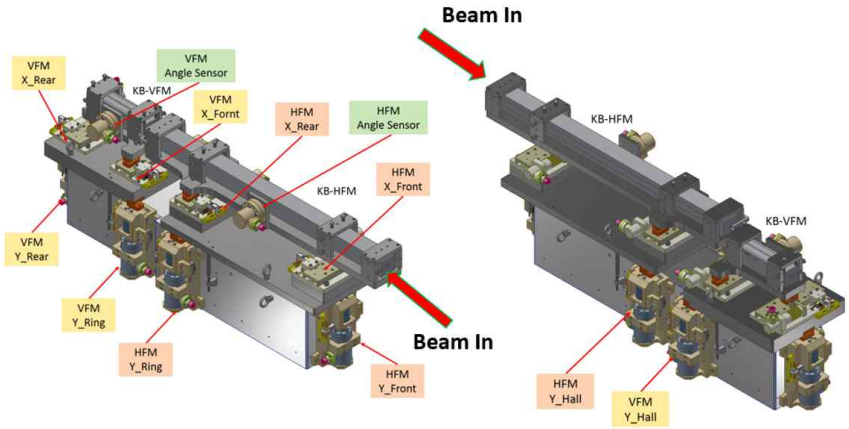
<그림 4.3.5.4> KB Mirror Manipulator 좌표계

(1) Kinematic KB Mirror Manipulator

Kinematic KB 거울장치 구조는 <그림 4.3.5.7>과 같이 Cone, Vee, Flat 조합의 3점 지지구조로 구성된 각 Mount 사이에 정밀 변위를 위한 S-DLC 코팅된 강구를 조립하여 Pitch, Roll, Yaw 3축의 각운동이 가능하다. Kinematic 구조의 KB 거울장치는 직선운동과 각운동을 위한 스테이지가 안정된 3점으로 지지되고 또한 적층으로 조립되어 외부 진동에 강하고 거울 냉각장치로 인해 장치 내부에서 발생할 수 있는 진동에도 강한 구조적인 강점이 있다. 단점으로는 Pitch, Roll, Yaw 3축이 독립된 구조로 되어있지 않아 한 축의 동작 시 다른 축의 의도하지 않은 Coupling 발생되고 또한 거울의 각운동의 회전 중심이 거울 중심에 있지 않아 거울 정렬을 위해 어느 한 축의 동작 시 다른 축의 병진 변위가 발생하여 불필요한 축의 보상 동작을 반드시 해주어야 한다. <그림 4.3.5.5>에 Kinematic KB 거울장치의 외형과 <그림 4.3.5.6>에 장치의 내부구조를 보여준다. 또한 <표 4.3.5.2>에 Kinematic Horizontal KB Mirror Manipulator <표 4.3.5.3>에는 Kinematic Vertical KB Mirror Manipulator의 상세사양을 기재하였다. 4GSR 빔라인에는 Kinematic 방식과 Pivot Bearing 방식의 KB 거울장치가 운영방식에 따라 적합한 방식을 선택하여 설치된다.



<그림 4.3.5.5> Kinematic KB Mirror Manipulator (외형)



<그림 4.3.5.6> Kinematic KB Mirror Manipulator (내부 장치)

<표 4.3.5.2> Kinematic KBH System Specifications

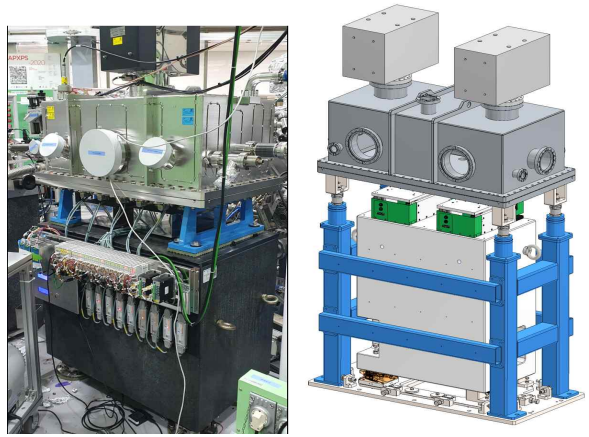
Axis(7) / spec.	Motor resolution	Encoder resolution	Precision	Range
Pitch axis (separate installation of PZT)	≤ 0.05 (0.25 μrad)	≤ 0.1 (0.485 μrad)	≤ 0.2 (0.97 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
Roll axis	≤ 0.1 (0.485 μrad)	≤ 0.2 (0.97 μrad)	≤ 0.5 (2.42 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
Yaw axis	≤ 0.1 (0.485 μrad)	≤ 0.1 (0.97 μrad)	≤ 0.5 (2.424 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
X axis	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 μm	≤ 0.2 μm	≥ ± 10.0 mm
Y axis	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 pm	≤ 0.2 μm	≥ ± 10.0 mm
Z axis	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 μm	≤ 0.2 μm	≥ ± 10.0 mm

<표 4.3.5.3> Kinematic KBV System Specifications

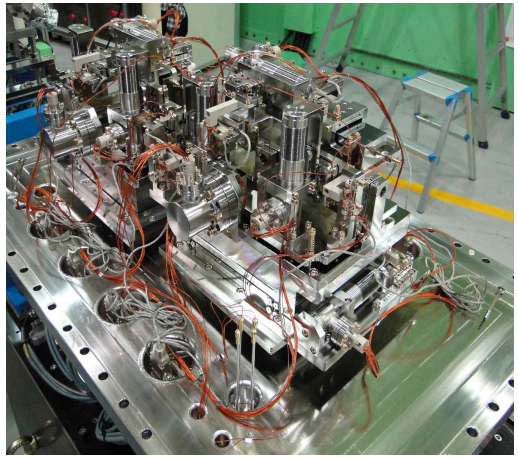
Axis(6) / spec.	Motor resolution	Encoder resolution	Precision	Range
Pitch axis (separate installation of PZT)	≤ 0.05 (0.25 μrad)	≤ 0.1 (0.485 μrad)	≤ 0.2 (0.97 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
Roll axis	≤ 0.1 (0.485 μrad)	≤ 0.2 (0.97 μrad)	≤ 0.5 (2.42 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
Yaw axis	≤ 0.1 (0.485 μrad)	≤ 0.1 (0.97 μrad)	≤ 0.5 (2.424 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
X axis	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 μm	≤ 0.5 μm	≥ ± 10.0 mm
Y axis	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 μm	≤ 0.5 μm	≥ ± 10.0 mm

(2) Pivot Bearing KB Mirror

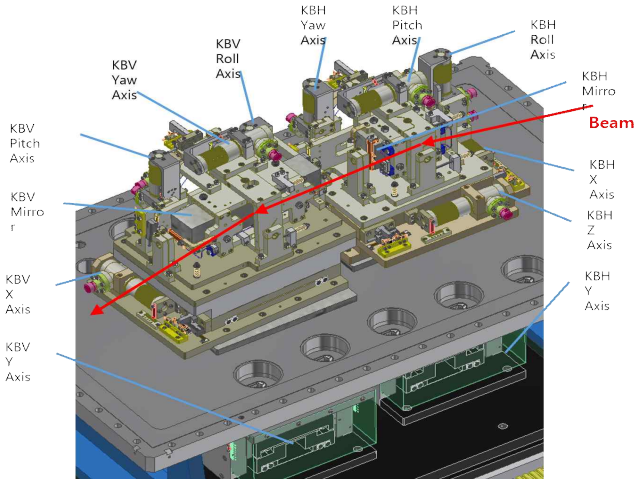
Pivot Bearing KB 거울장치 구조는 <그림 4.3.5.8>, <그림 4.3.5.9>과 같이 Pitch, Roll, Yaw 3축의 회전을 위한 부품은 물리적인 마찰과 백래시 없이 회전 운동이 가능한 Pivot Bearing을 적용하였다. 거울의 정렬 시 3축 각변위의 회전 중심이 거울 반사면의 중심과 일치하여 거울 정렬을 위한 각도 변경 시 필요 변위 각도 값과 입력 각도 값이 일대일 대응하고 또한 모든 각변위 축이 독립적으로 동작하므로 Coupling이 적어 Kinematic KB 거울장치에 비해 거울 정렬이 수월하다. 축의 동작을 위한 Actuator와 사인바 구조로 연결되어 사인바 길이를 길게하여 분해능을 높일 수 있다. Pivot Bearing KB 장치 구조의 단점으로는 거울 회전 운동을 위해 설치하는 Pivot Bearing과 Actuator의 직선운동을 사인바(sine bar)로 연결하여 회전 운동으로 변환을 위해서는 다수의 링크가 필요한 구조여서 Actuator 운동 방향의 진동에 취약한 구조이다. 지반이 견고하고 진동에 대한 우려가 없는 환경의 빔라인에서는 설치를 고려해 볼 수 있다. 4GSR 실험 특성상 빔 정렬이 빈번하게 요구되는 빔라인에 설치될 예정이다.



<그림 4.3.5.7> Pivot KB Mirror Manipulator (외형구조)



<그림 4.3.5.8> Pivot KB Mirror Manipulator (내부구조)



<그림 4.3.5.9> Pivot KB Mirror Manipulator (내부 모델링)

<표 4.3.5.4> Pivot KBH System Specifications

Axis(6) / spec.	Motor resolution	Encoder resolution	Precision	Range
Pitch axis (separate installation of PZT)	≤ 0.05 (0.25 μrad)	≤ 0.1 (0.485 μrad)	0.2 (0.97 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
Roll axis	≤ 0.1 (0.485 μrad)	≤ 0.2 (0.97 μrad)	0.5 (2.42 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
Yaw axis	≤ 0.1 (0.485 μrad)	≤ 0.1 (0.97 μrad)	0.5 (2.424 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
X axis	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 μm	0.2 μm	≥ ± 10.0 mm
Y axis	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 μm	0.2 μm	≥ ± 10.0 mm
Z axis	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 μm	0.2 μm	≥ ± 10.0 mm

<표 4.3.5.5> Pivot KBV System Specifications

Axis(5) / spec.	Motor resolution	Encoder resolution	Precision	Range
Pitch axis (separate installation of PZT)	≤ 0.05 (0.25 μrad)	≤ 0.1 (0.485 μrad)	0.2 (0.97 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
Roll axis	≤ 0.1 (0.485 μrad)	≤ 0.2 (0.97 μrad)	0.5 (2.42 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
Yaw axis	≤ 0.1 (0.485 μrad)	≤ 0.1 (0.97 μrad)	0.5 (2.424 μrad)	≥ ± 1.5 deg.
X axis	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 μm	0.5 μm	≥ ± 10.0 mm
Y axis	≤ 0.05 μm	≤ 0.1 μm	0.5 μm	≥ ± 10.0 mm

4.3.6 광학장치 설계 및 제작공정

광학장치는 다수 개별 장치들의 복잡한 조합으로 최종 시스템이 완성되기 때문에 장치의 기구적인 특성과 고유 기능을 설계에 맞게 제작하기 위해서는 제작공정을 철저히 관리하여 장치의 품질과 성능을 보장하는 것이 중요하다.

특히 광학 장치는 방사선에 직접적으로 노출되는 장치로, 장시간 방사선에 노출되어도 부품과 장치의 물리적인 성질 변화가 없어야 하고 기구적인 특성 및 고유 기능에도 변화가 없어야 한다. 또한 구성 장치 중 UHV 환경에 직접 노출되는 재료 및 구성부품은 가스 발생이 없어야 하고 최대 120 ℃ 온도 환경에서 100시간 이상 노출 시에도 기구적인 특성과 고유 기능에 변화가 없어야 한다.

다음은 분광기와 거울장치 제작을 위한 상세 공정을 기술하였고 외부 업체 제작 시 기술된 제반 공정에 대한 엄격한 관리 감독이 필요하다.

1) 3D 모델링 설계에 의한 개념설계와 상세설계를 거쳐 최종적으로 부품별 가공을 위한 제작도면을 완성한다.

2) 기계가공, 표면처리 : 진공 환경에 노출되는 가공품의 표면 거칠기는 가공 후 N (Ra1.6) 이하여야 하고 가공 후에는 도면에 표시된 표면처리 지시를 따른다.

3) 가공품의 외관 및 치수 검사는 중요 부위에 대한 치수공차 검사와 형상공차 검사 후 제작도면에 기록한다. (공간상 기준위치 및 상대 위치와 각도 변위 값 측정 시에는 CMM 측정기를 이용한다.)

4) 광학장치는 대부분의 구동 장치가 진공 내부에 설치되므로 UHV 케이블 작업이 필요하다. 진공 내부의 신호선 연결은 반드시 UHV 환경에서 사용할 수 있는 U or O 규격 터미널을 이용하고 (볼트로 케이블 연결 불가) 케이블 간의 연결 또한 UHV 커넥터를 사용한다.

5) 진공 장치류 조립 및 구동 검사

1. 진공 내부에 사용하는 모든 볼트의 측면에 Vent 홈을 방전가공하고 Stainless 소재에 Gold 도금하여 사용한다. (샘플 볼트 확인)
2. 제작 현장에서 전체 진공 장치류를 조립하여 구동에 대한 일반적인 작동 검사 및 테스트를 시행한다.

6) 진공 챔버 제작공정

1. 소재 발주

- 챔버 제작용 판재는 설계 두께의 헤어라인 판재를 표면가공 없이 사용하고 기타 다른 모든 소재의 진공 내부 부품은 반드시 기계가공(버핑금지)으로 완성한다.

2. 기계가공

- 양면 헤어라인 작업 된 원판을 이용하여 레이저 절단 후 가공이 필요한 부분에만 기계가공을 한다. (표면 스크래치 주의)
- CF Flange 용 Pipe류는 Seamless Pipe를 이용하여 도면 치수에 맞게 외경-내경을 가공한다. (용접관 파이프 사용 금지)
- 지정된 중요 포트(슬릿 설치 포트)는 챔버 사각 용접 후 가공 기계에서 위치 세팅하여 포트홀 가공을 하고 포트 용접 시에는 지그를 이용하여 위치 및 각이 맞도록 한다.
- 챔버용 판재, 스풀, 플랜지 등은 가공이 완료되고 용접전 진공로에서 400~450 ℃로 약 4시간 탈-가스 후에 표면은 EP 처리하는 방식으로 후처리 작업을 실시한다.

3. 용접 작업

- 모든 용접은 반드시 진공 내면 용접이 되도록 하고, 용접 전 아세톤 또는 시너로 세미 세정작업을 한다.
- 중요 치수가 표기된 부분은 지그를 이용하여 위치 고정 및 측정 후 용접한다.
- 용접 비드면은 stain-bright 작업을 한다.
- 용접 완료 후 챔버 내부를 전체적으로 알코올 또는 시너로 세정하고, 헬륨 누설 검사를 실시하여 누설량이 5×10^{-10} torr l/s 이하인지 확인한다.
- 진공 챔버의 UHV 세정은 UHV 전문 세정 시설 및 약품을 갖춘 환경에서 UHV 진공 세정 공정에 따라 실시한다.
- 챔버 Baking 용 열선은 챔버 외곽 면에 Ø2.3 MI STS Heating Cable (MIH 023A C2R22)을 전체적으로 스폿 용접하여 부착하고, MI Heater 양 끝단에는 전선 연결용 커넥터를 설치한다.

4.3.7 광학장치 시험 및 검사

가. 검사 준비 및 필요 측정기

모터로 구동되는 모든 장치는 단계별로 개별 축 동작 정밀도와 최종 조립된 상태에서의 복합 축 동작 정밀도를 측정하였을 때 요구되는 정밀도 조건을 만족하여야 하고 이후 최종적으로는 장치를 Baking 과정을 거쳐 UHV 환경으로 만든 후 복합 축 동작 정밀도 측정 및 작동 테스트가 이루어져야 한다.

또한, 광학장치 측정 및 검사 시에는 청결하고 진동이 없는 환경에서 진행하여야 하고 장치의 동작 정밀도 측정을 위하여 Autocollimator (정밀도 ≤ 0.01 arcsec), 2대 이상의 디지털 측정기 (정밀도 ≤ 0.01 μm), 각도 측정기 (분해능 ≤ 0.0001 deg.), 4채널 이상의 스텝모터 제어기, 자동화된 측정 프로그램 개발 등의 측정 장비 준비가 필요하다.

나. 시험 및 검사

1. 부품 단위 가공 표면, 치수 및 형상 검사
2. 세정 전 모든 개별 축에 대한 누설검사, 조립성 검사, 동작 테스트, 정밀도 측정
3. 세정 전 완성조립 상태에서 장치의 조립성 검사, 동작 테스트, 복합 축의 동작 정밀도 측정, 진동 및 안정도 (Stability) 측정
4. 복합 축 검사 시 동작축 외에 고정된 다른 축의 각도 및 위치 변위 값인 Coupling을 동시에 측정한다.
5. 세정 전 조립 상태에서 검사, 측정이 완료되면 모두 분해하여 UHV 세정작업 진행
6. UHV 세정 후 모든 개별 축의 재조립 후 누설검사, 동작 테스트, 정밀도 측정
7. UHV 세정 후 전체적인 장치의 재조립 후 동작검사, 복합 축의 정밀도 측정, 진동 및 안정도 (Stability) 측정
8. 복합 축 검사 시 동작축 외에 고정된 다른 축의 각도 및 위치 변위 값인 Coupling을 동시에 측정한다.
9. 냉각라인에 대한 10 kg (30분 유지) 수압 테스트
10. 전체적인 헬륨 누설검사

11. Baking 후 최종 진공도 검사

다. 시험방법

모든 검사 항목에 대한 성적서는 표준검사 양식에 준하여 작성하고 아래 검사 항목에 대한 검사 결과를 기록한다.

1) 도면 치수 공차, 조립 공차, 형상 공차 검사

- 치수 측정기구나 장치를 이용하여 기계가공 부품의 치수 공차 검사를 실시하여 제작품이 도면에 부합하는지 확인한다.

- 조립공차, 형상공차, 정밀도 조건을 검사, 측정하여 합격하여야 한다.

- 장치의 외형 및 표면결함 (패인 곳, 스케일, 크랙 등)이 없어야 한다.

2) 모터, 엔코드 동작 테스트 및 리미트 스위치 위치설정

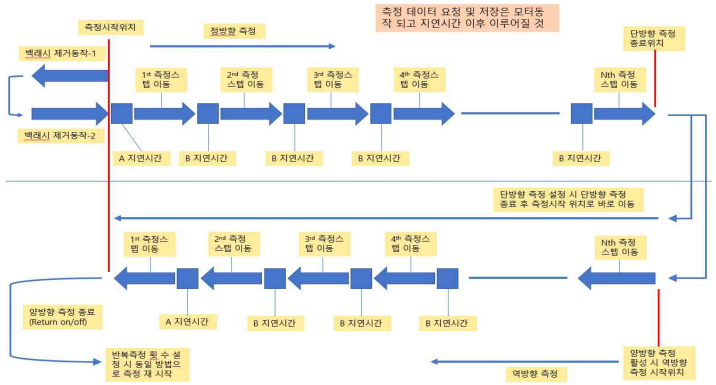
- 본 작업에 앞서 모터, 엔코드, 리미트 스위치는 설계된 결선도를 기준으로 케이블 연결을 위한 커넥터 작업을 완료한다.

- 장치의 각 축에는 스텝모터, 엔코드, 리미트 스위치가 설치된다. 장치의 최종 조립이 완료되고 스텝모터 및 엔코드 동작에 문제가 없을 경우, 설계 기준위치로부터 양쪽 리미트 위치를 설정하고 그 값을 기록한다.

3) 구동검사, 정밀도 검사

- 위 '시험 및 검사' 항의 ~5 항목과 같이 모든 개별 축과 전체 조립 후 복합 축에 대한 정밀도 검사를 실시한다.

- 정밀도 측정 순서 : "1. 리미트 구간 왕복동작 → 2. 측정 시작 위치 이동 → 3. 백래쉬 제거동작 → 4. 측정 정밀도로 정방향 20회 진행 → 5. 측정 정밀도로 역방향 20회 진행" 순서로 3~5 구간 정밀도 측정 과정을 총 3회 반복 측정한다.



<그림 4.3.7.1> 정밀도 측정 순서도

- 아래의 5가지의 경우에 대해 Encoder 모드(Closed-loop)로 테스트를 진행한다.

1. 1st 정밀도로 왕복 20회 3번 반복 측정

2. 2nd 정밀도로 왕복 20회 3번 반복 측정

3. 3rd 정밀도로 왕복 20회 3번 반복 측정

4. 4th 정밀도로 왕복 20회 3번 반복 측정

5. Actuator 전체 행정을 10구간으로 나누어 왕복 20회, 3번 반복 측정

- 동작 테스트 및 정밀도 측정은 청결하고 항온이 되는 공간의 석정반 위에서 진행한다.

- 동작 테스트 및 정밀도 측정 결과는 지정된 양식으로 정리한다.

4) 냉각라인 수압 테스트

30분 동안 10 kg 수압으로 Water Cooling Line 누설검사를 실시한다.

5) 진공도 검사

진공 테스트는 진공 챔버에 이온펌프 및 터보펌핑 시스템을 설치하여 최대 100 ℃ 온도로 72시간 Baking 후 상온에서 이온게이지 기준 진공도가 5.0 × 10^{-9} torr 이하 수준에 도달하여야 한다.

5장. 기반시설

5.1 4GSR 기반시설 개요

5.1.1 도입

4GSR의 기반시설은 가속기와 빔라인의 각종 장치를 설치하고 운영하는데 필요한 건물과 유틸리티 시스템을 지칭한다. 기반시설은 가속장치가 최고의 성능을 안정되게 운영되고 안전하고 쾌적한 연구활동이 수행될 수 있도록 설계되고 건설되어야 한다. 나아가 프로젝트의 장치설치와 시운전 일정에 맞춰 건설되고 각각의 설비가 최적의 상태와 최소의 에너지를 사용하도록 배치하고 건설되어야 한다. 이를 위하여 향후 발전계획을 포함하는 마스터플랜을 세우고 단계별 예산에 맞춰 추진하여야 한다. 4GSR 장치의 안정성은 가속기와 빔라인을 이루는 개별 장치의 안정성과 더불어 유틸리티의 안정성, 그리고 공조 온도의 변화, 진동과 지반 변위와 같은 환경변수에 많은 영향을 받는다. 특히 진동과 가속기 지반의 안정성은 가속기의 성능뿐만 아니라 운영 단계에서 장치 가동 일정에도 영향을 미치므로 충분한 조사와 설계, 시험, 정확한 시공이 이루어지도록 하여야 한다. 이 장에서는 4GSR 기반시설의 설계에 고려할 내용과 범위에 관하여 기술한다.

5.1.2 목표

기반시설의 설계 개념과 목표는 다음과 같다.

○ 장치의 성능을 확보하고 연구 능력을 최대로 발휘할 수 있는 환경 제공

○ 가속장치와 빔라인 간의 긴밀한 협력이 가능한 공간 구축

○ 다양한 변화에 유연하게 대응할 수 있는 건축물

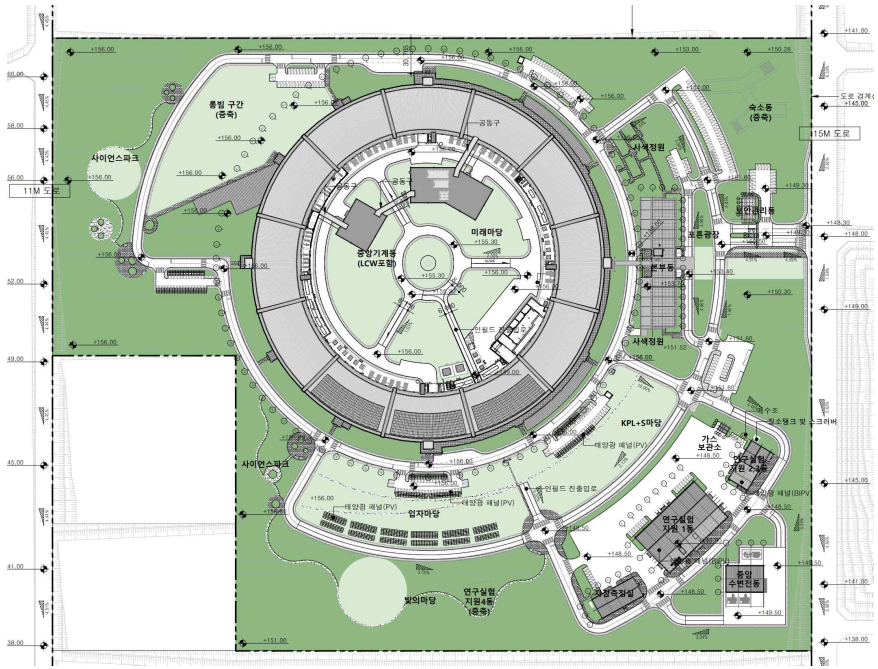
○ 지속 가능하고 경제적인 건설 및 운영비용

○ 안전이 확보되는 공간 구성

○ 장치설치, 운영, 유지보수, 접근 등의 편의성 확보

5.1.3 구성

4GSR의 기반시설은 각종 건축물과 수배전 및 전력시설, 공조 및 냉각장치 등 유틸리티 장치로 구분할 수 있다. 주요 건축물은 회의 및 행정기능을 하는 본부동, 가속장치와 빔라인 장치가 설치되고 운영되는 가속기동, 연구 및 연구지원을 하는 연구실험지원 (1, 2, 3) 전력을 공급하는 중앙수변전동과 전기실 (1, 2, 3), 공조 및 기타 유틸리티를 공급하는 중앙기계동, LCW를 생산하고 공급하는 LCW 기계동, 경비 및 보안관리를 위한 보안관리동으로 구성되고 건물의 총 연면적은 약 69,000 m^2 (롱빔라인 포함)이다. 향후 건설될 롱빔라인이 기반암에 위치하도록 고려하고 이용자를 위한 숙소동, 식당 및 휴게시설이 있는 식당동, 빔라인이 증설되면 필요한 연구동 (3, 4) 등은 증축을 위해 기본 배치에 반영한다.



<그림 5.1.3.1> 4GSR 기반시설 배치도

본부동은 지상 3층 연면적 약 7,500 m^2로 행정, 회의, 연구 기능을 위한 건물로 컨퍼런스룸(대강당)을 포함하고 입구 로비에는 전시 공간 및 간단한 회의를 수행할 수 있는 공간을 둔다. 저장링동 접근 편의성을 위해 브릿지(Bridge)로 연결한다.

저장링동은 가속장치가 설치되는 터널과 빔라인 장치가 설치되는 실험홀로 구성되며 연면적은 약 38,600 m^2이다. 터널은 main ring과 booster ring이 설치되므로 장치의 이송과 유지보수의 편의성을 고려하여 터널 내부의 최소 폭은 저장링과 부스터링의 간격이 4.1 m가 확보되도록 하고 높이는 4.0 m가 되도록 한다. 방사선 차폐를 위해 터널의 상하좌우 벽의 두께는 방사선 차폐를 위한 계산 결과를 반영하여야 하며 외측벽은 약 0.8~1.0 m, 내측벽은 0.6~0.8 m 정도로 예상된다.

가속장치를 안정적으로 운영하기 위해서는 터널 바닥의 변위 제어와 진동 제어가 매우 중요하다. 터널 바닥의 변위 발생은 저장링 지반의 움직임과 터널 바닥을 구성하는 콘크리트 덩어리의 신축에 의해 나타난다. 대형 가속기의 지반변위에 대한 연구에 따르면 밤과 낮의 일사량에 의한 건물의 변위, 달의 인력에 의한 바다수면 변동에 따른 지반의 움직임, 지하수위의 변화, 지반 자체의 융기 또는 침하에 따른 변위 등이 영향을 미치는 주요 요인으로 지목되었다. 그러므로 가속기가 건설될 부지 주변의 변위 요인들을 장기간에 걸쳐 조사하고 지반 변위를 최소화할 수 있도록 건축 기초에 반영하여야 한다. 실험홀을 포함한 저장링 건물 전체가 동일한 지반조건이 달성될 수 있도록 하고 장기간의 변위를 제어하는데 유의하여야 한다.

저장링 터널과 실험홀의 진동 제어는 0~120 Hz 범위의 진동에 대하여 조사하고 진동원을 터널 및 실험홀과 격리하는데 주의하여 건축물의 배치, 진동 발생원의 이격, 장치 지지대의 형식 등에 반영하여야 한다. 바람에 의한 건축물의 진동이 장치에 전달되지 않도록 건축 외벽 및 지붕의 기초를 터널 및 실험홀 기초와 격리하는 것이 중요하다. 펌프, 모터, 공조기, 냉각수 등 진동 발생원의 격리, 냉각수와 공조 공기의 유속 제어, 지지대의 진동 흡수 등을 통해 가속장치 및 실험장치에 진동이 전달되지 않도록 하는 것이 매우 중요하다.

저장링 터널, 선형가속기 터널, BTS 터널은 전자빔의 안정도를 위해 공조 온도를 일정하게 유지하도록 하고 대전된 입자의 외부 유출을 방지하기 위하여 항상 음압이 유지되도록 한다. 선형가속기 갤러리, 저장링 실험홀도 일정한 온도와 습도를 유지하여야 한다. 이러한 공조 환경을 유지하기 위하여 공조 공간과 외기가 직접 접촉하지 않도록 반드시 양쪽에 문이 있는 복도로 연결한다. 선형가속기 터널과 저장링 터널은 장치의 설치, 시운전 등 사용 편의성 및 방사선 차폐와 공조 온도 관리를 위하여 공간을 분리한다.

저장링 외곽에서 내부(infield)로 차량이 접근할 수 있는 도로를 만들어 질소탱크, 부대시설, 각종 가속기 장치 등을 이송할 수 있도록 한다. 도로는 저장링 건물 아래를 통과하는 터널 형태로 하고 저장링 터널이 외기의 영향에 의해 신축되는 것을 방지하도록 콘크리트 외벽을 충분한 단열재로 감싸야 한다. 진입도로의 측면에는 유틸리티의 공급과 배수시설을 위한 공간을 둔다.

저장링 터널로 사람과 물건의 출입 및 이동을 위해 방사선 차폐가 되는 도어를 둔다. 실험홀에서 터널로 연결되는 도어는 1단계에서 건설되는 빔라인을 위한 슬라이딩 도어를 각 cell의 A 포트에 설치하고 향후 건설될 빔라인에는 슬라이딩 도어를 만들 수 있도록 출입구를 만들고 이동식 블록을 이용하여 막는다. 슬라이딩 도어의 크기는 폭 1 m, 높이 2 m로 한다. 터널 내의 빔라인 장치 설치를 위해 터널 천정에 호이스트를 설치할 수 있는 철판을 콘크리트 타설 시 매입하여 설치한다. 터널 내 장치의 반입을 위해 저장링 infield에서 터널로 연결되는 물품 반입실(loading area)과 차폐문을 4곳에 배치한다. 물품 반입실에는 언듈레이터와 같은 중량물의 하역을 위해 높이 5 m, 폭 4 m 크기의 출입구와 후크 하단높이 8 m 이상의 20 ton 크레인이 필요하다. 인필드의 코어 건물에는 터널 지붕(tunnel mezzanine)으로 연결되는 계단을 설치하고 3시와 9시 방향 2곳에는 승강기를 설치한다. 터널로 연결되는 계단은 빔라인이 설치되지 않는 실험홀에 2곳, 쉐드에 8곳에 설치한다. 쉐드의 계단은 각종 랙과의 간섭을 피하기 위해 내측벽에 설치하고 터널 위로 연결한다. 인필드 쪽의 차폐문은 폭 3 m, 높이 3 m, 두께 50 cm의 크기이고 콘크리트로 제작한다. 설치되는 구역의 기초는 차폐문의 무게를 고려하여 처짐이 없도록 한다. 쉐드에서 터널로 진입하는 도어는 부스터링 전자석이 없는 곳을 택하여 미로 모양으로 만들고 필요시에는 부스터링의 장치 일부를 철거/재설치가 용이하도록 한다.

저장링 실험홀은 빔라인 장치, 실험허치, 실험자 공간, 사람의 이동 및 장치 이송을 위한 복도 등을 위해 톱니모양의 터널 벽 외곽으로부터 약 23 m (빔 소스로부터 약 80 m+복도)의 공간이 필요하다. 실험홀 복도는 지게차를 이용하여 물품을 운송할 수 있도록 2.5 m 이상의 너비를 확보한다. 1단계 빔라인 구축에는 2개의 long-빔라인을 고려하여 설계하고 향후 2개의 long-빔라인을 건물 외곽으로 확장할 수 있도록 한다. 실험홀에는 장치의 설치를 위해 3 ton 호이스트 크레인을 2대 설치한다. 크레인을 이동할 수 없는 실험홀 구역은 청자에 설치되는 조명, 공조설비 등의 유지보수를 위한 작업 발판을 만들고 크레인을 활용할 수 있는 공간은 이동식 작업 거더를 설치한다.

크레인 이동으로 인한 진동이 가속장치와 실험장치에 전달되지 않도록 크레인 지지대를 저장링 터널과 실험홀 기초와 분리한다. 독성 가스 등의 배기를 위해 각 빔라인마다 단독 배기 라인을 구성하고 이 배기 라인은 통합 배기 라인과 분리되어야 한다.

선형가속기동은 터널, 갤러리, 조립실, 연구실 등으로 구성된다. 갤러리는 지게차를 이용하여 장치의 설치가 가능하도록 폭 6 m 이상이 되도록 하고 갤러리와 연구실 사이에 복도를 두어 소음이 연구실로 전달되는 것을 막도록 한다.

RF동은 중층구조로 하고 1층에는 HPRF실, 제어실, 예비품 보관실, High power 실험실 등으로 구성하고 중층에는 도파관과 도파관에 연결되는 각종 장치를 설치한다. 도파관은 RF 실에서 쉐드를 통하여 저장링 터널에 연결된다. 도파관이 지나가는 쉐드 구역에는 도파관의 설치를 위한 구조물을 설치한다. 중층에 설치되는 장치의 이송과 설치를 위하여 호이스트 크레인을 둔다. 각 실은 사람과 장치의 이동을 고려하여 출입문을 둔다. 선형가속기동과 RF동은 외부와 연결되는 출입구는 건물내부의 공조환경이 잘 유지되도록 한다.

연구 1동과 연구 2동은 가속기 운전실, 가속장치 운영자, 샘플 준비실, 빔라인 운영자와 이용자를 위한 공간으로 1단계 빔라인 건설에 맞춰 저장링 외곽 2시 및 5시 방향에 배치한다. 연구동과 저장링 실험홀은 양쪽에 문을 가진 복도로 연결하여 저장링 실험홀의 공조가 외기로부터 받는 영향을 최소화한다.

연구실험지원동은 연구실험지원 1동, 연구실험지원 2동, 3동(자장 측정실) 등 3개의 건물로 구성된다. 연구실험지원 1동은 유틸리티 공급을 위한 지하실(전기실, 기계실)과 향후 대형 연구에 대비한 대공간과 작은 연구실 및 2층 연구실로 구성한다. 대공간에는 진공조립실, 빔라인조립실, 장비보관실을 구성하고 1층의 낮은 곳에는 RF 실험실, MPS 연구실, 사무실과 편의시설로 구성한다. 2층은 연구실과 편의시설 등으로 구성한다.

연구실험지원 2동은 방사선 검출기 교정실, 방사선 분석실, 방사선폐기물보관소 등 방사선 관련 공간과 화학세정실 및 각종 화학물질을 보관할 수 있는 공간으로 구성한다. 화학물질은 성상에 따라 분리하여 보관하여야 하고 사고 발생 시 사고의 확대/확산을 방지하고 피해를 최소화할 수 있도록 공간을 구성하여야 한다. 이곳은 화학물질을 다루는 곳이므로 적절한 배기시설과 계절별 바람의 영향을 고려하여 배치한다.

연구실험지원 3동(자장 측정실)은 진동의 영향을 줄이기 위하여 별도의 건물로 구축한다. 대형 물품의 이동을 위한 출입문은 폭 4 m, 높이 6 m의 크기로 하고 내부 공조를 유지하기 위하여 이중문으로 한다. 내부 공간 전부를 이동할 수 있는 20 ton 크레인을 설치한다.

연구실험지원동 등의 연구지원 시설은 저장링 건물과 인접한 곳에 배치하고 저장링과 연결되는 도로를 잘 정비하여 조립된 물품을 안전하게 이동할 수 있도록 한다. 연구실험지원 2동은 대류에 의해 냄새나 가스가 본부동 및 저장링으로 흘러가지 않는 곳에 배치하고 지게차를 이용하여 물품을 이송할 수 있도록 도로를 만들고 안전하게 관리될 수 있도록 한다.

중앙수변전동과 중앙기계동 및 LCW 기계동은 외부로부터 전력과 상수도를 공급받아 1차 가공한 다음 지역 전기실과 공조 및 냉각장치로 유틸리티를 공급하는 곳이다. 중앙수변전동은 4GSR 뿐만 아니라 향후 확장될 모든 건물과 장치에 전력을 공급하고 한전으로부터 인입되는 경로를 고려하여 연구부지의 남동쪽에 배치한다. 154 kV 주변압기 2대는 옥외에 설치하고 부대설비도 옥외 설치가 가능한 것은 옥외에 설치하도록 한다. 중앙기계동은 공조용 냉온수를 위한 시설과 압축공기, 소방, 생활용수 등을 위한 시설들이 설치되는 곳으로 회전기기에 의한 진동과 수증기를 발생하므로 가속장치 건물(저장링)과 기초지반이 이격되도록 하고 배관의 길이, 수송에너지 등을 고려하여 인필드 12시에서 1시 방향에 배치한다. LCW 기계동은 장치용 냉각수인 LCW를 생산하고 공급하는 곳으로 열부하가 많은 RF 동 주변에 위치하고 인필드 9시 방향에 배치한다.

지역 전기실은 설치공간과 부하를 고려하여 인필드 3곳에 분산 배치한다. 저장링 터널과 실험홀을 위한 공조기는 저장링 인필드에 균등하게 배치하여 공조덕트의 크기와 길이를 최소화하도록 한다.

5.1.4 소요면적

4GSR 건축물은 예산을 고려하여 1단계 구축 기간에 가속기 장치의 설치와 이를 위한 운영에 필수적인 건축물을 아래 표 <표 5.1.4.1>과 같이 건설하고 향후 필요에 따라 증축할 계획이다. 1단계에서 건축될 연면적은 약 69,000 m^2이다.

<표 5.1.4.1> 건물 면적

구분		면적 (m^2)	합계 (m^2)
본부동		7,465	7,465
가속기동	저장링동	38,629	51,241
	선형가속기동	1,551	
	RF동	1,805	
	전기실 1, 2, 3	2,156	
	연구 1동, 2동	7,100	
중앙기계동, LCW 기계동		3,077	3,077
연구실험지원 1동		5,470	5,470
연구실험지원 2동		804	804
중앙수변전동		782	782
보안관리동		187	187
연면적 합계		69,026	69,026

5.1.5 부지 및 배치

부지는 각종 건물과 시설이 유기적으로 연결되어 최고의 연구성과를 발휘할 수 있도록 배치하고 향후 확장을 수용할 수 있는 규모로 한다.

4GSR을 구성하는 다양한 기능 영역의 인접성은 가속장치, 빔라인, 지원시설, 유틸리티, 방사선 및 일반 안전, 유지보수, 관리 등 다양한 구성요소를 고려하여 결정하여야 한다. 특히 저장링과 연구동은 사용될 수 있는 다양한 화학물질과 유해가스를 안전하게 수용할 수 있도록 구역을 나누어야 한다. 그리고 각각의 건물은 화재와 같은 비상 상황에서 피해가 확산되지 않도록 배치하고 구성하여야 한다.

화학물질과 가스를 보관하는 곳은 사용 전 및 사용 후의 적법한 보관량을 고려하고 안전하게 보관할 수 있는 시설을 갖추어야 한다. 특히 물질의 성상별 관리방법에 맞게 처리할 공간과 시설을 갖추어야 한다.

저장링 건물의 외부와 인필드를 연결하는 전기, LCW와 같은 유틸리티는 도로를 따라 설치한다.

부지의 지반 특성을 조사하여 재하 하중에 의한 지반 변위, 진동 특성 등을 설계에 반영할 수 있도록 한다. 특히 차량 등에 의한 진동을 고려하여야 한다.

계절별 지하수 높이를 조사하여 강우에 의한 지하수위 변화가 지반 변위에 미치는 영향을 설계에 반영하여야 한다.

54 kV 수전이 용이하도록 하고 가능하면 수전철탑이 없이 한전 변전소로부터 직접 연결이 가능하도록 한다. 수전철탑을 설치하면 초기비용이 많이 소요될 뿐만 아니라 민원과 관리 비용에 많은 어려움이 따른다.

생활용수와 공조용 설비에 필요한 급수 및 냉온수, 가속장치 및 빔라인 장치 등에 공급되는 LCW 생산을 위하여 일일 약 1,000 m^3 정도의 상수도를 공급받는 것을 고려한다.

폭우나 강풍으로부터의 피해를 줄이기 위해 배수 및 대지의 높이를 고려하여 배치한다.

고압가스 탱크, 언듈레이터 등과 같이 크고 무거운 물건의 이송을 고려하여 대형 트레일러의 통행이 가능하도록 도로를 구성한다.

5.1.6 유틸리티

아래의 유틸리티를 공급받거나 처리하기에 부족함이 없어야 한다.

○ 상수도 및 오폐수

○ 오수 및 우수의 배수

○ 전력 : 154 kV, 40 MVA

○ 전화 및 고속통신 네트워크

5.1.7 건물 지붕 및 외벽

건물의 지붕, 외벽, 창호 등은 정밀 공조환경에 유리하고 에너지 소모가 적도록 단열성능이 “건축물의 에너지절약설계기준”을 상회하도록 한다. 저장링동, 선형가속기동, RF동은 창호의 면적을 10% 이내, 창호의 열관류율을 1.0 $W/m^2 \cdot K$ 이하로 하고 기밀성능이 확보되도록 하여 외기로부터 실내의 공조 환경을 보호할 수 있도록 한다. 모든 건물의 동, 서, 남측 창문은 전동으로 구동되는 외차양(블라인드)을 도입하고 실내 유입 일사량을 원격 제어할 수 있도록 구성한다.

모든 건물의 지붕, 외벽, 창호는 구조적으로 누수가 없는 방법으로 하고 실리콘 마감을 적용하지 않도록 한다. 본부동, 연구동, 연구실험지원동은 자연 채광을 적극 적용하고 충분한 환기가 되도록 한다.

5.1.8 사용 인원

4GSR은 휴지기를 제외하고 연중 24시간 운전되므로 이에 적합한 환경을 조성하여야 한다. 각 건물의 수용/상주 인원은 아래 <표 5.1.8.1>과 같다.

<표 5.1.8.1> 건물별 사용 인원

건물명		주용도	수용인원	상주인원
본부동		회의, 행정, 방문연구원	500	100
연구 1동		운전실, 전산실, 연구실	100	60
연구 2동		빔라인 운영, 이용자	100	40
저장링동	실험홀	실험장치, 이용자	300 (6*50B/L)	100
선형가속기동	연구실	연구실	10	10
RF동	제어실	RF 운전	-	10
중앙수변전동		154kV 수변전 설비	-	0
전기실 1, 2, 3		변압기, UPS	-	0
LCW 기계동		LCW 설비	-	-
중앙기계동	감시제어실	수처리 설비, 압축공기	-	20
연구실험지원 1동	진공조립실	진공부품 조립, 보관	-	-
	빔라인조립실	빔라인장치 조립, 보관	-	-
	RF Test실	RF 장치 시험	-	-
	MPS 연구실	MPS 측정	-	-
	용접실	진공장치 용접	-	-
	장비보관실	기타 장치의 보관	-	-
	연구실	연구실	-	40
	소계	-	-	40
연구실험지원 2동	화학세정실	화학세정	-	
	방사선분석실	-	-	
	연구실	-	-	
	소계	-	-	5
연구실험지원 3동(자장 측정실)		-	-	4
보안관리동	보안관리, 외부방문자 대기실 등	-	20	2
합계				391

5.1.9 주차

모든 건물은 직원, 방문자, 이용자 등을 위한 주차장 및 자전거 주차대를 마련한다. 주차장은 급발진과 같은 상황으로부터 건축물이 보호되도록 방어벽을 구축하여야 한다. 특히 일일 방문자, 학회 또는 세미나 참석자를 고려한다. 1단계 공사에서는 325대의 주차면을 확보하고 향후 건물의 증축 시 확장하도록 한다.

5.2 가속장치와 빔라인 장치용 건물

가속장치와 빔라인 장치용 건물은 선형가속기동, RF동, 실험홀을 포함하는 저장링동으로 구성된다. 가속기를 이루는 주요 장치가 설치, 운영되고 빔라인 이용자들이 실험하는 곳이므로 빔 안정도에 영향을 주는 환경변수를 엄격히 제어하고 일반 안전 및 방사선 안전이 확보될 수 있어야 한다.

이 건물은 다양한 출입자를 위한 출입 관리가 필요하므로 건물 설계단계에서 방사선 안전 담당자, 연구실 안전 담당자, 연구자, 홍보 담당자, 시설관리자 등의 의견을 충분히 반영하도록 노력하여야 한다. 관람이나 시설 유지보수를 위해 방문하는 사람이 가능하면 방사선 관리구역을 출입하지 않도록 하면 유리하다. 또한 빔라인 이용자들이 방사선 안전과 관련하여 건축물 구조상 편의성을 확보하는 방법이 있는지 고려할 필요가 있다. 이러한 출입을 고려하여 도어를 배치한다.

가속장치는 선형가속기동, LTB (linac to booster-ring), BTS (booster-ring to storage-ring) 터널과 저장링 터널에 설치한다. 각종 제어 및 감시용 장치와 MPS 장치는 가속장치와 인접한 터널 내측 쉐드에 설치한다. 선형가속기동과 RF 동은 대전력 펄스 전원장치가 사용되므로 고조파, EMI 차폐를 고려한다.

저장링과 빔라인 실험홀은 사용될 수 있는 다양한 화학물질과 유해가스를 안전하게 수용할 수 있도록 필요한 설비를 구축하여야 한다. 실험에 사용되는 유해가스를 안전하게 배기할 수 있는 독립배기시설을 빔라인마다 구축한다. 독립배기시설은 건물의 배기 시설과 엄격하게 구분하고 빔라인이 설치될 때 연결하면 되도록 건축물 설계에 반영한다. 빔라인의 실험준비실도 독립배기시설을 갖추어야 한다.

빔라인 장치에 필요한 액체질소는 저장링 인필드에 탱크를 설치하고 파이프라인을 통하여 각 빔라인에 공급하도록 한다. 샘플을 위한 액체질소는 저장링 실험홀에 액체질소 공급소(LN2 filling station)를 만들고 여기에서 봄베를 이용하여 받아서 사용할 수 있도록 한다.

각각의 건물은 화재와 같은 비상 상황에서 피해가 확산되지 않도록 배치하고 구성하여야 한다. 화학물질과 가스를 보관하는 곳은 사용 전 및 사용 후의 적법한 보관량과 시설을 갖추어야 한다. 특히 물질의 성상별 관리 방법에 맞게 처리할 공간과 시설을 갖추어야 한다.

5.2.1 저장링 터널

○ 장치의 설치나 유지보수를 위하여 인필드에서도 접근이 가능하여야 한다.

○ 터널내부의 최소 폭은 저장링과 부스터링의 간격이 최소 4 m가 되도록 하고 높이는 4 m가 되도록 한다.

○ 터널의 바닥, 천정, 양쪽 벽은 방사선 차폐가 요구된다. 일반적으로 고밀도 콘크리트, 일반 콘크리트, 납 등으로 만든다. 차폐벽의 두께는 방사선으로부터 사람과 시설을 안전하게 보호할 수 있도록 한다.

○ 터널에서 실험홀로 접근하는 통로는 1단계에서 구축될 빔라인마다 1개의 슬라이딩 차폐문을 설치한다. 향후 건설될 빔라인을 고려하여 각 cell 마다 차폐문을 설치할 수 있도록 시공에 반영한다. 차폐문과 관련한 사항은 방사선 안전 기준에 따른다.

○ 인필드에서 터널로 장치를 운반하기 위한 통로(물품 반입구)를 4곳에 균등하게 배치한다. 장치의 크기와 운반에 필요한 설비의 크기를 고려하여 결정하고 (폭 3 m, 높이 3 m) 방사선 차폐를 위한 도어가 설치되어야 하므로 중량물에 의한 콘크리트 바닥의 변위가 발생하지 않도록 하중을 고려하여 설계한다.

○ 쉐드에서 터널로 소규모의 정비나 점검을 위한 장비(진공펌프 등)의 이송을 위한 통로를 12곳에 균등하게 배치한다. 이곳은 방사선 차폐가 되도록 이중으로 꺾인 미로 모양으로 한다.

○ 터널에는 장치에서 누수가 발생할 경우 외부의 방사선관리용 맨홀로 배수하도록 트랜치를 두고 인필드쪽 건물 외곽에 맨홀과 배수펌프 등을 설치한다.

○ 터널의 장치 높이는 1,400 mm로 한다.

○ 터널 바닥의 불균일한 변위가 발생되지 않도록 기초지반을 충분히 보강하고 터널 바닥 콘크리트는 구조적으로 단일체가 되도록 한다.

○ 터널의 바닥은 기초 콘크리트 위에 SFRC (steel fiber reinforce concrete)를 300 mm 두께로 타설하고 에폭시 라이닝으로 마감하여 균열방지, 편평도 확보, 장치설치를 위한 앙카(Anchor) 작업이 쉽게 한다. 또한 터널의 미세먼지 발생을 방지하여 진공장치의 설치 및 유지보수에 도움이 되도록 한다.

○ 진단 랙, MPS 랙 등은 저장링 쉐드에 설치한다.

○ LCW, 공조설비, 전기설비, MPS 케이블 등의 설비가 공조 흐름을 방해하지 않도록 배치하여야 한다.

○ 터널의 공조 환경이 유지되도록 외기의 유입을 차단하고 터널 내부는 음압이 걸리도록 한다.

○ 제어실에서 저장링 터널에 쉽게 접근할 수 있도록 한다. 제어실을 방사선 관리 구역 외부에 위치시키면 편리하다.

5.2.2 저장링 터널 지붕 (Tunnel mezzanine)

○ 터널 상부에 LCW, 공기압, LN2 배관을 설치한다.

○ 터널 상부에 진단 빔라인 4개와 Kicker Power Supply 장치가 설치된다.

○ 터널 상부로 연결되는 계단/통로는 빔라인 실험홀에서 2곳, 컨트롤 쉐드에서 8곳, 다리(bridge)에서 4곳이다.

○ 저장링 인필드의 물품 반입구(loading area)에서 터널 위로 접근할 수 있는 승강기와 계단을 둔다. 승강기는 화물과 사람을 이송할 수 있도록 용량을 2 ton 이상으로 한다.

5.2.3 실험홀과 복도 (Experimental hall and access corridor)

○ 실험홀은 빔라인이 구축되어 실험이 이루어지는 곳으로 각종 빔라인과 허치가 설치되고 이용자가 상주하는 공간이다.

○ 실험홀의 폭은 빔라인의 길이를 저장링의 long-straight 라인의 중심으로부터 접선 방향으로 80 m로 예상하고 결정한다. (터널내부 ~25 m, 실험홀 ~55 m)

○ 실험홀 가장 바깥쪽은 최소폭 2.5 m의 통로를 두어 지게차와 사람이 통행할 수 있도록 한다.

○ 실험홀 바닥에 이동 통로를 빔라인이 설치될 수 없는 2곳에 배치하고 실험홀에서 터널 위로 연결되는 계단을 설치한다.

○ 실험홀의 공조환경을 유지하기 위하여 외기의 유입을 차단한다.

○ 실험홀은 향후 건물의 외부로 Long-빔라인을 수용할 수 있도록 한다.

○ 실험홀의 바닥과 터널의 바닥은 장치의 설치 높이를 고려하여 결정한다. 빔라인 장치 높이는 1,400 mm로 하고 각각의 빔라인을 위한 콘크리트 바닥은 구조적으로 단일체가 되도록 한다.

○ 실험홀 바닥은 기초 콘크리트 위에 SFRC (steel fiber reinforce concrete)를 300 mm 두께로 타설하고 에폭시 라이닝으로 마감하여 균열 방지, 편평도 확보, 장치 설치를 위한 앙카 작업이 쉽게 한다. 또한 터널의 미세먼지 발생을 방지하여 진공장치의 설치 및 유지보수에 도움이 되도록 한다.

○ 빔라인 장치 정렬을 위한 가시선(line-of-sight)이 확보되어야 한다.

○ 장비와 사람이 빔라인에 접근할 통로를 빔라인 주변에 둔다.

○ 빔라인에서 연구실에 쉽게 접근할 수 있도록 출입구를 구성한다.

○ 각 빔라인마다 독립적인 배기시설을 구성한다.

○ 각각의 빔라인에 액체질소를 공급하는 설비를 구축한다.

○ 빔라인 장치에 필요한 액체질소는 저장링 인필드에 탱크를 설치하고 파이프 라인을 통하여 각 빔라인에 공급하도록 한다.

○ 샘플을 위한 액체질소는 저장링 실험홀에 액체질소 공급소(LN2 filling station)를 만들고 여기에서 봄베를 이용하여 받아서 사용할 수 있도록 한다.

○ 액체질소공급소에서 실험홀의 복도로 연결되는 통로를 확보한다.

○ 실험홀에는 각종 빔라인 장치 및 허치의 설치를 위한 호이스트 크레인(3 ton) 2대를 설치한다. 또한 천정의 조명이나 기구물을 정비할 수 있도록 별도의 작업 발판(데크)이 있는 이동식 작업대(크레인 형식)를 설치한다.

○ 실험홀의 조명은 유지보수의 편의성을 고려하여 낮게 배치하거나 하강식 전등을 적용한다.

5.2.4 선형가속기동

선형가속기동은 클라이스트론 조립 및 준비, 전자총 준비, 가속관 시험 등을 할 수 있는 조립 및 준비실, 가속장치가 설치되는 터널, K&M (klystron & modulator)와 제어 및 감시 장치가 설치되는 갤러리로 구성된다.

○ 인필드의 저장링 터널에 인접한 곳에 배치한다.

○ 선형가속기가 운전되는 동안 방사선 차폐가 필요하다.

○ 선형가속기 장치의 높이는 저장링과 같이 1,400 mm이다.

○ 터널 바닥은 기초 콘크리트 위에 SFRC (steel fiber reinforce concrete)를 300 mm 두께로 타설하고 에폭시 라이닝으로 마감하여 균열 방지, 편평도 확보, 장치 설치를 위한 앙카 작업이 쉽게 한다. 또한 터널의 미세먼지 발생을 방지하여 진공장치의 설치 및 유지보수에 도움이 되도록 한다.

○ 갤러리에서 터널로 연결되는 도파관 관통 구멍의 위치를 설계에 반영한다.

○ 갤러리에서 터널로 연결되는 LCW, 제어 케이블, 전기, 소방 등의 인입구멍은 방사선 차폐와 설치 및 유지보수를 고려하여 터널 바닥보다 낮게 트랜치를 만들고 터널 배수로를 겸하게 한다.

○ 터널에는 장치에서 누수가 발생할 경우 외부의 방사선관리용 맨홀로 배수되도록 트랜치, 맨홀, 배수펌프 등을 설치한다.

○ 터널과 갤러리는 온도 및 습도를 엄격히 제어하는 영역이다. 그러므로 외기의 영향을 최소화하도록 설계한다. 출입문은 3 m 정도의 복도를 두고 양쪽에 문을 설치하여 외기 유입을 차단한다.

○ 터널은 대전된 입자가 유출되지 않도록 음압이 걸리도록 한다. 공조기는 헤파필터(HEPA: High Efficiency Particulate Air)가 있는 것으로 선정하고 연구/사무 공간과 공기가 섞이지 않도록 한다.

○ 갤러리의 장치는 전동 지게차(2.5 ton)를 사용하여 설치/해체할 수 있도록 복도의 폭을 약 6 m로 한다. 크레인은 설치하지 않는다.

○ 클라이스트론 조립 및 준비실은 5 ton 크레인을 설치하고 리프팅 높이는 5미터를 확보한다.

○ 클라이스트론 조립 및 준비실 인근에 절연유 보관고를 둔다.

○ 선형가속기동 인근에 질소 및 헬륨을 보관할 수 있는 가스 저장고를 둔다. (RF 동과 같이 사용)

5.2.5 RF동

○ RF동은 HPRF실, 제어실, RF 시험실로 구성된다.

○ 도파관 설치를 위해 중층구조를 적용한다. 중층에는 장비 운송을 위해 호이스트(2톤)을 설치한다.

○ 장비와 사람의 이동을 위한 출입구를 적절히 배치한다.

5.3 연구 및 지원시설

5.3.1 본부동 및 부속시설

가. 본부동

○ 본부동은 약 400명을 수용할 수 있는 컨퍼런스 룸을 포함한다.

○ 본부동 입구에는 간단한 다과를 하고 전시를 할 수 있는 로비를 둔다.

○ 컨퍼런스 룸 앞에는 참여자의 접수, 휴식, 담화 등을 위한 공간을 둔다.

○ 1층은 로비, 컨퍼런스 룸, 소회의실, 휴게실, 준비실, 건물 관리실, 화장실 등의 공간으로 한다.

○ 2층은 행정, 중회의실, 자료실 등의 공간으로 한다.

○ 3층은 소장단, 방문 연구자, 회의실, 접견실 등의 공간으로 한다.

○ 각 층마다 중규모 회의실과 휴게실(breakout room)을 둔다.

나. 데이터센터

○ 빔라인 실험 데이터를 초고속으로 처리할 수 있는 통신망과 서버룸을 이용자가 편리한 곳에 배치한다.

○ 각종 계산용 서버와 인트라넷, 공용 서비스를 위한 서버 등을 위한 공간이다.

○ 천정 높이를 4 m 이상 확보하고 바닥은 액세스플로어로 한다.

○ 항온항습 설비는 여유분을 설치하여야 한다.

○ 서버 및 항온항습기는 무정전 전원장치에 연결하여야 한다.

○ 서버룸의 크기는 확장성과 서버의 열이 잘 발산되도록 충분한 여유를 가지도록 한다.

다. 연구동

○ 연구동은 저장링동 외곽에 배치한다. 향후 증설이 가능하게 설계단계에서는 4개의 연구동을 배치하고 연구 1동과 연구 2동은 초기 건설 단계에 건축하고 저장링의 1, 4 사분면에 배치한다.

○ 연구실과 사무실은 각각의 장치에 접근이 쉬운 가까운 곳에 배치한다.

○ 연구동의 입구에는 이용자들이 쉬거나 간단히 대화할 수 있는 공간을 둔다.

○ 연구동에서 저장링동으로의 접근은 이중으로 된 문을 거치도록 한다.

○ 독성물질을 취급하는 고위험 연구실은 독립 배기장치를 둔다.

○ 연구실과 사무실은 개별 냉난방 기구를 설치한다.

○ 복도 등 공용 공간은 HVAC 시스템을 적용한다.

라. 연구실험지원동

○ 연구실험지원 1동은 각종 가속장치와 빔라인 장치를 시험하고 조립하는 공간이다. 층고가 높은 대공간을 만들고 건물의 외곽을 2층으로 하여 연구실을 배치한다. 대공간을 구획하여 가속장치 및 빔라인 장치의 조립과 실험을 수행할 수 있도록 구성하고 향후 공간 변경이 가능하게 한다. 연구실 구역의 1층은 높은 층고가 필요하지 않은 연구실을 배치한다. 연구실험지원 1동의 지하에는 전력 배전반과 LCW 공급설비를 충분히 배치한다. 20 ton 천정 크레인이 건물의 대공간 전체를 대응할 수 있도록 한다. 대형 트레일러가 출입할 수 있는 문을 둔다.

○ 연구실험지원 2동은 화학세정실, 방사선분석실과 각종 화학물질과 방사선폐기물을 보관하는 곳으로 배기시설과 화학약품을 안전하게 보관하고 취급할 수 있도록 필요한 설비를 구축한다.

○ 연구실험지원 3동(자장 측정실)은 전자석 및 삽입 장치의 측정과 보관을 고려하여 안정된 공조환경과 진동으로부터 이격이 필요하다. 또한 중량물의 이동을 위해 20 ton 크레인을 설치한다.

마. 유틸리티동

○ 4GSR의 유틸리티는 크게 전력과 급수로 구분된다.

○ 전기는 한전 변전소로부터 154 kV를 수전받아 중앙수변전동에서 22.9 kV로 변압시켜 지역전력설비동으로 보내고 각종 장치에서 필요한 전압으로 강압하여 각종 장치에 공급한다. 무정전 전원이 필요한 설비를 위한 UPS와 배터리, 정전에 대비한 비상 발전기를 구축한다.

○ 상수도는 일일 1,000 m^3를 공급받을 수 있도록 한다. 단수에 대비하여 적절한 크기의 수조를 갖추어야 한다. 중앙기계동에서 유틸리티 공동구를 통하여 각 건물에 필요한 상수도를 공급한다. LCW 기계동에서 장치를 위한 LCW를 생산하여 유틸리티 공동구를 통하여 저장링, 실험홀 등으로 공급한다. 화학세정을 위한 LCW는 자체 생산시설을 갖추도록 한다.

○ 유틸리티 감시 시스템은 중앙기계동의 제어실에 구축하고 가속기 운전실에는 PV 값을 제공한다.

사. 중앙수변전동

중앙수변전동은 한전으로부터 154 kV의 전기를 수전받아 22.9 kV로 변압시켜 지역전력설비동에 전기를 공급하기 위한 설비를 위한 건물이다. 주 변압기는 옥외에 설치하고 그 외 수배전반은 옥내에 설치한다. 건물의 높이는 최소 5 m 이상을 확보한다. 수배전설비의 안전한 운영을 위해 적절한 공조설비를 구축한다. 전력계통 감시를 위한 SCADA 시스템은 중앙기계동에 구성한다. 154 kV 수전설비가 구축되는 실내 공간에는 5톤 크레인을 설치한다.

아. 전기실 1, 2, 3

지역전력설비동은 중앙수변전동으로부터 받은 전기를 변압하여 각각의 장치에 공급하는 설비를 위한 건물이다. 가속장치 및 실험홀 장치를 위한 지역전력설비동은 저장링 인필드 3곳에 균등하게 배치한다. 본부동과 연구실험지원 1동에도 전기실을 둔다. 변압기의 용량에 따라 옥외 또는 옥내에, 수배전반은 옥내에 설치한다. 건물의 높이는 최소 5 m 이상을 확보한다. 수배전설비의 안전한 운영을 위해 적절한 공조설비를 구축한다.

자. 중앙기계동, LCW 기계동

유틸리티용 기계설비를 위한 건물은 중앙기계동과 LCW 기계동으로 나누어 구축한다. 중앙기계동은 냉온수를 생산하여 각 건물과 장치에 필요한 생활용수를 공급하고, 인필드 내에 위치한 공조용 설비에 냉온수를 공급한다. 중앙기계동은 상수도 설비, 소방설비, 공조설비 및 압축공기설비 등이 설치되고 비상발전기, 유틸리티 설비(기계, 전기)의 원격감시와 제어를 위한 제어실을 둔다.

LCW 기계동은 상수도를 이용하여 장치용 냉각수(LCW, low conductivity water)를 생산하고 각 가속장치와 빔라인 장치 등으로 공급한다. 기계동에는 소음과 진동을 발생시키는 요인들이 많으므로 가속장치와 실험홀 장치로부터 이격하여 배치한다.

5.4 구조공학 및 기계공학

5.4.1 건물 설계 하중

건물의 지붕과 외벽은 설치되는 지역의 적설량, 풍속, 강우량 등을 충분히 고려하여 설계하여야 한다. 각 기계동의 지붕은 냉각탑이 설치될 경우 하중 및 진동을 고려한다. 건물의 내진기준은 건물의 중요도에 따라 0.2~0.25 g로 한다. 건물의 설계 하중은 <표 5.4.1.1>과 같다.

<표 5.4.1.1> 설계 하중

Location	Load (kg/m^2)
Laboratories	610
Experimental Hall	1,220 (to be confirmed in final design)
Ring Tunnel	1,220 (to be confirmed in final design)
Tunnel mezzanine	610
Ring Building access corridor	610 (or wheel loads from fork lift trucks)
Corridors	500
Stairs and lobbies	500
Offices	500 (includes 100 kg/m^2 for partitions)
Light storage areas	610
Mechanical rooms	730 (or actual weight of equipment)

5.4.2 선형가속기 터널, 저장링 터널 및 실험홀 바닥의 평활도 및 허용 변위

선형가속기 터널, 저장링 터널 및 실험홀은 가속장치와 시험장치가 설치되는 곳으로 콘크리트 바닥의 평활도와 변위 제어가 매우 중요하다. 가속장치와 시험장치는 장치간의 상대위치와 절대위치가 매우 중요하다. 장치간의 상대위치와 절대위치가 관리 범위를 벗어나면 가속기 운전을 중단하고 다시 조정하는 정렬작업을 하여야 하므로 지반의 수직 및 수평 방향 변위는 가속기의 성능과 운전의 중요한 인자이다. 그러므로, 터널과 실험홀 바닥 콘크리트를 타설하기 전에 기초지반의 안정성 확보를 위해 지질 조사와 시공방법을 결정하고 충분한 시험을 거쳐 지반 안정성을 검증하는 것이 필요하다. 기초지반의 변위는 지하수위의 변화, 기온의 변화 등과 관계된다.

장치의 설치를 위한 콘크리트 바닥의 평활도도 매우 중요하다. 평활도를 확보하기 위해 기초 콘크리트를 타설한 후 그 위에 강섬유콘크리트 (SFRC, steel fiber rainforce concrete)를 300~500 mm 타설하면 평활도와 균열 방지뿐만 아니라 각종 지지대(support)를 고정하기 위한 앙카 구멍을 뚫는데도 매우 좋다. 콘크리트 바닥의 평활도와 수직 변위 허용량은 <표 5.4.2.1>과 같다.

<표 5.4.2.1> 콘크리트 바닥의 평활도 및 수직 변위 허용량

평활도 (smoothness)	< 4 mm / 10 m
	< 10 mm / floor
수직 변위 (long term settlement-vertical)	< 100 μm / 10 m / 년
	< 10 μm / 10 m / 일
	< 1 μm / 10 m / 시간

5.4.3 진동 기준

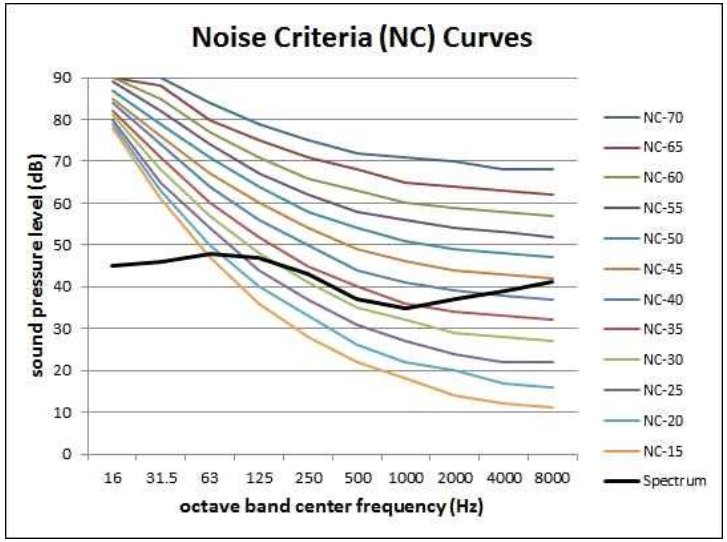
실험홀의 허용 진동 기준은 빔라인 이용자들이 사용하는 연구 장치와 밀접한 관계가 있다. 현 단계에서 빔라인장치의 특성이 확정되지 않았지만, 실험홀 바닥의 진동 기준은 일반적인 과학 연구장치와 XFEL을 참고하여 VC-E 또는 이보다 엄격하게 적용한다.

<표 5.4.3.1> 건물의 허용 진동

Static Load		< 6 μm / 0 m @ 500 kg
		< 1 μm / 2 m @ 500 kg
Dynamic Load		1 μm / 2 m @ 100 kg (ptp)
Vibration (0.1 ~ 70 Hz)	**Induced by facility**	< 1 μm (ptp)
	Added to the external effects	< 4 μm (ptp)
	Vertical	< 1 μm (ptp)
	Horizontal	< 4 μm (ptp)

5.4.4 소음 (noise) 기준

소음발생의 주요인은 공조, 냉각수 등과 같은 기반시설에서 발생하는 것과 펌프, 칠러 등과 같은 사용자들의 연구장비에서 발생하는 것이다. 사용자들의 연구장비에서 발생하는 소음은 상황에 따라 제어 가능하기도 하지만 기반시설에서 발생하는 소음은 설계단계에서 반영하여야 한다. 기반시설의 소음은 공기흐름 속도 조절, 냉각수 흐름 속도 조절, 흡음재 사용 등으로 제어한다. 주요 공간의 소음 기준은 <표 5.4.1.4>와 같다.



<그림 5.4.4.1> Noise Criteria Curves

<표 5.4.4.1> 건물의 소음 기준

Space	Type Noise Criteria (NC) Level
Office	35 ~ 40
Laboratory	45 ~ 50
Conference rooms	30
Interaction space	40
Common use areas	40 ~ 45
Accelerator tunnel None Experimental Hall	60 ~ 65
Mechanical / electrical rooms	안전관리기준 적용
Seminar room	30

5.4.5 기계장치

각 건물에는 일상생활에 필요한 상수도, 공조설비, 환기장치 등을 갖추어야 한다. 본부동, 연구동, 연구실험지원동은 개별 냉난방기를 적용하고 가속기 장치가 설치되는 구역과 연구실험지원 1동은 중앙공조를 적용한다. 선형가속기 터널, 저장링 터널, 연구실험지원 1동은 독립된 공조설비와 환기설비를 갖추어야 하고 환기설비의 배출구에는 헤파필터가 설치되어야 한다. 롱빔라인은 정밀한 공조환경을 요구한다. 롱빔라인 실험홀은 가속기동 실험홀과 공간을 구분하고 25 ℃ ± 0.5 ℃의 공조 환경을 조성한다. 롱빔라인 허치는 25 ℃ ± 0.1 ℃로 제어한다. 각 건물의 공조환경은 <표 5.4.5.1>과 같다.

저장링 실험홀에는 액체질소와 건조압축공기를 공급하는 배관을 설치하고 각각의 빔라인에 공급할 수 있도록 한다. 실험홀에는 액체질소를 공급할 수 있는 충전소(filling station)를 설치한다. 액체질소탱크는 인필드에 배치한다.

선형가속기동, RF동, 저장링 터널과 터널 상부, 실험홀, 연구실험지원 1동은 정밀온도제어 LCW를 공급한다. 연구실험지원 1동은 단독 LCW 설비를 구축한다.

<표 5.4.5.1> 공조 조건

저장링 터널	25 ℃ ± 0.1 ℃, 습도 50% 이하
실험홀	25 ℃ ± 1 ℃, 습도 50% 이하
선형가속기(입사기)	25 ℃ ± 1 ℃, 습도 50% 이하
선형가속기 터널	25 ℃ ± 1 ℃, 습도 50% 이하
RF 건물	25 ℃ ± 1 ℃, 습도 50% 이하
사무실, 연구실	25 ℃ ± 5 ℃, 습도 50% ~ 70%
롱빔라인 실험홀	25 ℃ ± 0.5 ℃, 습도 50% 이하
롱빔라인 허치	25 ℃ ± 0.1 ℃, 습도 50% 이하

5.5 기계설비

기계설비는 가속장치 및 빔라인 장치 등의 냉각을 위한 LCW 공급설비, 모든 실내 공간의 온도와 습도를 제어하기 위한 공조설비와 각 건물에 필요한 생활용수를 공급하는 설비, 압축공기 설비, 그리고 소방설비 등으로 구성된다.

장치용 냉각수 공급설비는 LCW를 생산하고 온도와 압력을 제어하여 각종 장치에 보내는 설비이다. LCW 공급설비는 냉각탑, 냉동기, 열교환기로 연결되는 3중 루프로 구성하고 장치의 LCW 온도 요구조건에 따라 컨트롤밸브의 냉수 유량제어를 통해 LCW의 온도를 제어한다. LCW의 공급온도는 25 ℃ ± 0.1 ℃이다. 장치용 LCW는 폐회로로 구성되며 가속장치 및 빔라인 장치의 온도를 일정하게 유지하기 위한 것으로 가열로의 냉각, 장치의 세척 등을 위하여 사용하는 것을 금지한다.

공조는 빔운전 관련 장치들을 위한 정밀 공조 구역과 사무실과 실험실 등을 포함하는 일반 공조 구역으로 구분된다. 정밀 공조 구역의 경우 공조기를 활용한 중앙제어 방식으로 운영되고 공조 구역 내 장치의 특성에 따라, 온도 제어 범위가 결정된다. 공조기의 성능 및 단열조건에 따라 최고 25 ℃ ± 0.1 ℃의 온도 범위 내에서 공조 온도를 유지할 수 있다. 일반 공조 구역 중 사무실과 실험실은 개별 냉/난방 장치와 전열교환기를 설치하여 개인의 성향에 맞게 운영되고 복도와 로비 등의 공동 사용 구역은 공조기와 FCU를 활용하여 중앙에서 공조를 운영한다.

공조용 냉동기와 LCW 냉동기는 장치 부하에 따라 설계용량을 결정하여야 하고 공조용으로 750 usRT 터보냉동기 5대와 600 usRT 흡수식 냉동기 2대, LCW 용으로 500 usRT 6대의 터보냉동기가 소요될 것으로 추정된다. 냉각탑과 냉수/냉각수 펌프류는 냉동기 설계용량에 맞게 설치한다. 냉동기, 냉각탑, 펌프류, 컨트롤밸브 등 주요 설비들은 고장을 대비하여 1대 이상의 예비기를 포함하여 설계하고 연중 가동 가능한 시스템으로 구성한다.

기계설비를 위한 건물은 LCW 설비를 위한 LCW 기계동과 일반 건물의 공조용 냉온수 공급설비, 소방설비, 상수도 공급설비 등을 위한 중앙기계동으로 나누어지며 인필드에 배치한다. LCW 기계동은 RF동 근처에, 중앙기계동은 LCW 기계동과 인접한 12시에서 1시 사이의 방향에 배치하여 장치 운영의 편의성을 확보하고 부하가 큰 지역 인근에 배치하여 열매체의 수송 동력과 설비 구축 비용을 절감할 수 있도록 한다. 공조기는 공조 구역과 가까운 곳으로 방사선 관리 구역 외에 배치하여 고장이나 정비의 편의성을 확보하도록 한다. 기계동과 공조기에서 발생하는 회전기기류의

진동이 빔운전에 영향을 줄 수 있으므로 기계동과 공조기 설계 시 진동 감소를 위한 설계가 반영되어야 한다.

상수도 및 소방설비는 건축물의 규모, 용도, 수용인원 등을 참조하여 결정한다. 일일 물 사용량은 최대 1,000 m^3로 예상되며 급수 압력이 1.5 kgf/cm^2 이상 유지될 수 있도록 한다. 가속기 부지의 용수공급 능력을 고려하여 냉각탑에 필요한 물은 공업용수를 사용한다. 저수조의 규모는 “건축물의 설치 기준 등에 관한 규칙”을 적용하고 장치의 안정적인 운영과 생활용수를 위한 저수탱크를 각각 적정용량으로 구축하고 냉각탑으로 공급되는 용수는 계량기를 설치하여 관리한다.

5.5.1 LCW 시스템

LCW 기계설비는 냉각탑, 냉동기, 열교환기로 연결되는 3중 루프로 구성하고 장치의 온도 요구조건에 따라 컨트롤밸브의 냉수 유량제어를 통해 LCW의 온도를 제어한다. 공급하는 LCW의 온도는 25 ℃ ± 0.1 ℃의 정밀도를 유지하도록 한다. 장치용 LCW는 폐회로로 구성되며 가속장치 및 빔라인 장치의 온도를 일정하게 유지하기 위한 것으로 LCW의 온도와 물성에 영향을 주는 가열로의 냉각용, 장치 세척용 등으로 사용하는 것을 금지한다. 이종금속 접촉부식(galvanic corrosion)을 예방하고 장치에서 요구하는 LCW의 압력, 부하 장치의 위치 및 부하특성 등을 고려하여 LCW 공급 회로를 4개의 독립된 단위로 분리하여 운영한다.

장치의 부식 방지와 LCW 누설 시 전기적 사고 예방을 위하여 저항값 6 MΩ·cm 이상의 LCW를 공급한다. LCW를 생산하고 순도를 유지하기 위하여 순수제조장치(make-up 시스템)와 mixed-bed 시스템으로 구성한다. Make-up 시스템은 카본필터, 마이크로필터, 복합 이온수지 필터, UV 살균장치 등으로 구성되며, 상수도를 LCW로 생산하기 위한 시스템으로써 LCW의 누수 및 신규 공급 등에 이용된다. Mixed-bed 시스템은 마이크로필터, 복합 이온수지 필터, UV 살균장치 등으로 구성되며 LCW가 순환하는 과정에서 발생하는 이온과 이물질들을 포집하여 순도 감소를 막는다.

기계설비의 운전 상태와 LCW의 온도, 압력, 저항값 등은 네트워크를 통해 중앙기계동 제어실에 저장되고 감시되도록 구성한다.

가. 시스템 요구조건

○ 가속장치와 빔라인 장치 등에서 발생하는 열의 냉각을 위한 매체로 저전도수(Low Conductivity Water, LCW)를 사용한다. LCW는 재료의 부식을 방지하고 LCW의 누설에 따른 전기적 위험을 예방한다.

○ LCW의 공급온도는 25 ℃이고, ±0.1 ℃ 이내의 정밀도를 유지한다.

○ LCW의 전기저항값은 6 MΩ·cm 이상을 유지한다.

○ LCW의 공급 압력은 고압용 8 kgf/cm^{2}와 저압용 5 kgf/cm^{2}로 구분한다.

○ LCW와 접촉하는 부하측 사용금속의 이종금속 접촉에 의한 부식을 방지하기 위해 구리용 LCW와 알루미늄용 LCW를 구분한다.

○ LCW의 불순물을 제거하기 위하여 유량의 5%는 mixed-bed 시스템을 통과하도록 시스템을 구성한다.

○ 단위 장치가 상용의 LCW 온도(25 ℃ ± 0.1 ℃)보다 높은 온도를 요구하면 단위 장치용 개별 히터를 적용한다.

○ 모든 LCW 기계설비는 원격 운전 및 감시를 할 수 있도록 하며, 저장링 가속기 제어실에 온도, 압력, 유량, 순도 등 LCW 관련 데이터를 제공한다.

○ 저장링 터널 내 모든 제품은 내방사선 재질을 사용한다.

나. 시스템 구성

(1) LCW 공급 계획

○ LCW는 공급 위치, 부하측 재료, 공급 압력 등을 기준으로 <표 5.5.1.1>과 같이 4종류로 구분하여 공급한다.

○ LCW와 접촉하는 부하측 사용 금속은 구리, 알루미늄, 스테인리스 스틸이며 구리용 LCW와 알루미늄용 LCW를 구분하여 공급한다. 부하측 사용 금속이 스테인리스 스틸인 경우 LCW 종류와 상관없이 LCW를 공급한다.

<표 5.5.1.1> LCW 공급 계획

LCW 종류	공급압력 (kgf/cm^2)	부하측 사용금속	공급위치	장치 발열량 (kW)	LCW 순환유량 (m^3/h)
고압(Cu)	8	Cu, STS304	터널 내부	1,792	304
저압(Cu)	5	Cu, STS304	실험홀, Shed, Linac	1,652	824
저압(Al)	5	Al, STS304	터널 내부	196	67
RF(Cu)	5	Cu, STS304	RF 룸, 터널 내부	5,126	901

○ LCW를 활용한 장치 냉각열량은 8,766 kW로서 각 장치의 최대 발열량을 기준으로 설계하였다. 각각의 LCW 시스템별 냉각열량은 고압(Cu) 1,792kW, 저압(Cu) 1,652 kW, 저압(Al) 196kW, RF(Cu) 5,126 kW이다.

○ LCW 전체 순환유량은 2,096 m^3/h로 고압(Cu) 304 m^3/h, 저압(Cu) 824 m^3/h, 저압(Al) 67 m^3/h, RF(Cu) 901 m^3/h이다.

○ 고압(Cu) LCW가 공급되는 각 장치별 열량 및 유량은 <표 5.5.1.2>와 같다.

<표 5.5.1.2> 고압(Cu) LCW 열량 및 유량

사용위치	장치명	장치 발열량 (kW)	LCW 순환 유량 (m^3/h)
SR Tunnel	SR Magnet	1,215	158.4
	Booster Magnet	352	25.1
	SR Chamber_Cu	29	10.1
	SR Mask	98	33.6
	Photon Absorver	98	33.6
	Harmonic Cavity	SSPA 포함	43.2
합계		1,792	304.0

○ 저압(Cu) LCW가 공급되는 각 장치별 열량 및 유량은 <표 5.5.1.3>과 같다.

<표 5.5.1.3> 저압(Cu) LCW 열량 및 유량

사용위치	장치명	장치 발열량 (kW)	LCW 순환유량 (m^3/h)
실험홀	빔라인	706	302.4
Shed	MPS Rack	273	415.8
	Harmonic HPRF 1 ~ 4	144	25.9
Linac Tunnel	Magnet	70	4.8
	가속관	88	14.4
	도파관	-	6.0
	전자총	11	0.6
	레이저	-	3.0
Klystron Gallery	모듈레이터	360	45.0
	항온 랙	-	6.0
합계		1,652	823.9

○ 저압(Al) LCW가 공급되는 각 장치별 열량 및 유량은 <표 5.5.1.4>와 같다.

<표 5.5.1.4> 저압(Al) LCW 열량 및 유량

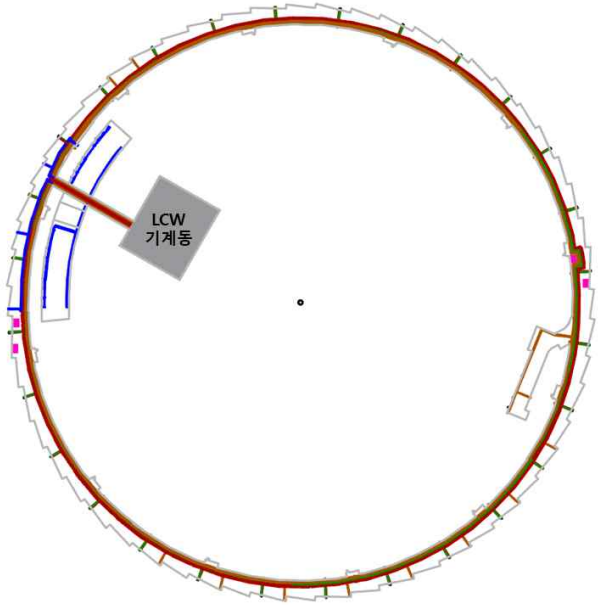
사용위치	장치명	장치 발열량 (kW)	LCW 순환 유량 (m^3/h)
SR Tunnel	SR Chamber	69	23.5
	ID Chamber	29	10.1
	BPM Chamber	98	33.6
합계		196	67.2

○ RF(Cu) LCW가 공급되는 각 장치별 열량 및 유량은 <표 5.5.1.5>와 같다.

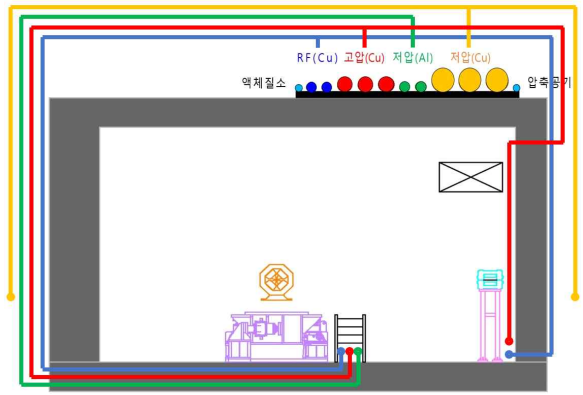
<표 5.5.1.5> RF(Cu) LCW 열량 및 유량

사용위치	장치명	장치 발열량 (kW)	LCW 순환 유량 (m^3/h)
SR Tunnel	SR Cavity	SSPA 포함	103.0
	Booster Cavity	SSPA 포함	32.4
HPRF Room 1	150 kW SSPA 1 ~ 4	1,400	130.8
	180 kW Load 1 ~ 4	SSPA 포함	60.0
	Booster HPRF 1 ~ 3	576	75.6
	Booster Load 1 ~ 3	SSPA 포함	45.0
	RF Test Facility	350	47.7
HPRF Room 2	150 kW SSPA 5 ~ 12	2,800	286.2
	180 kW Load 5 ~ 12	SSPA 포함	120.0
합계		5,126	900.7

○ LCW 배관은 LCW 기계동과 가속기동을 연결하는 공동구를 통하여 RF 동과 터널 상부로 연결된다. 공동구를 통과하는 배관은 총 14개로 <그림 5.5.1.1>, <그림 5.5.1.2>와 같이 설치한다.

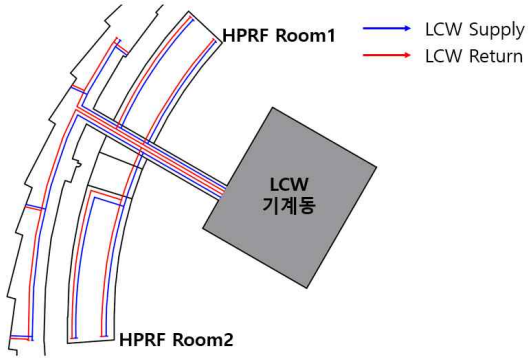


<그림 5.5.1.1> 터널 상부 LCW 배치 계획_평면도



<그림 5.5.1.2> 터널 상부 LCW 배치 계획_단면도

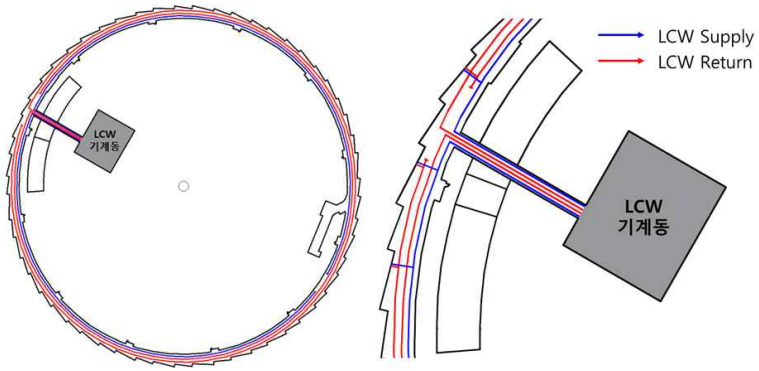
○ RF(Cu) LCW 배관은 직환수방식을 적용하고 SSPA, RF Load, RF Cavity 등의 장치에 LCW를 공급하며 <그림 5.5.1.3>과 같이 설치한다.



<그림 5.5.1.3> RF(Cu) LCW 공급 계획_평면도

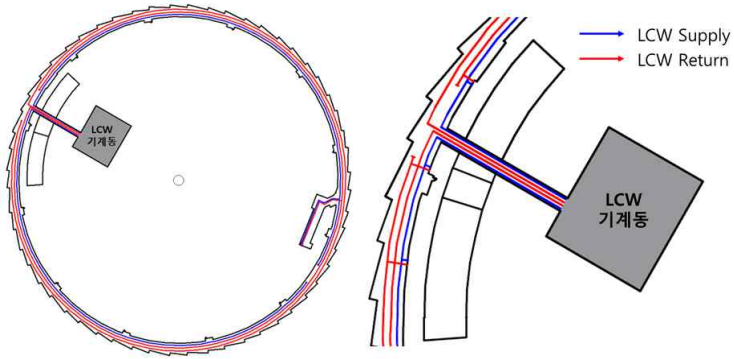
○ 고압(Cu), 저압(Cu), 저압(Al) LCW 배관은 역환수방식(Reverse Return)을 적용한다.

○ 고압(Cu) LCW 배관은 유량과 배관의 길이를 고려하여 <그림 5.5.1.4>와 같이 공동구를 중심으로 양쪽으로 나뉘어 구성한다.



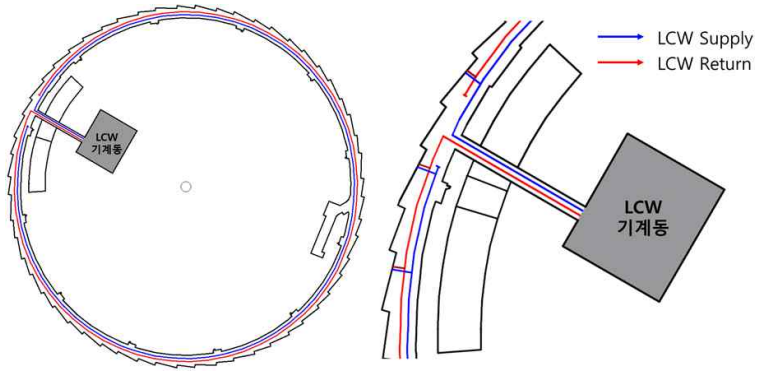
<그림 5.5.1.4> 고압(Cu) LCW 공급 계획_평면도

○ 저압(Cu) LCW 배관은 <그림 5.5.1.5>와 같이 구성한다.



<그림 5.5.1.5> 저압(Cu) LCW 공급 계획_평면도

○ 저압(Al) LCW 배관은 작은 유량을 고려하여 <그림 5.5.1.6>과 같이 공급관 1개와 환수관 1개로 구성한다.



<그림 5.5.1.6> 저압(Al) LCW 공급 계획_평면도

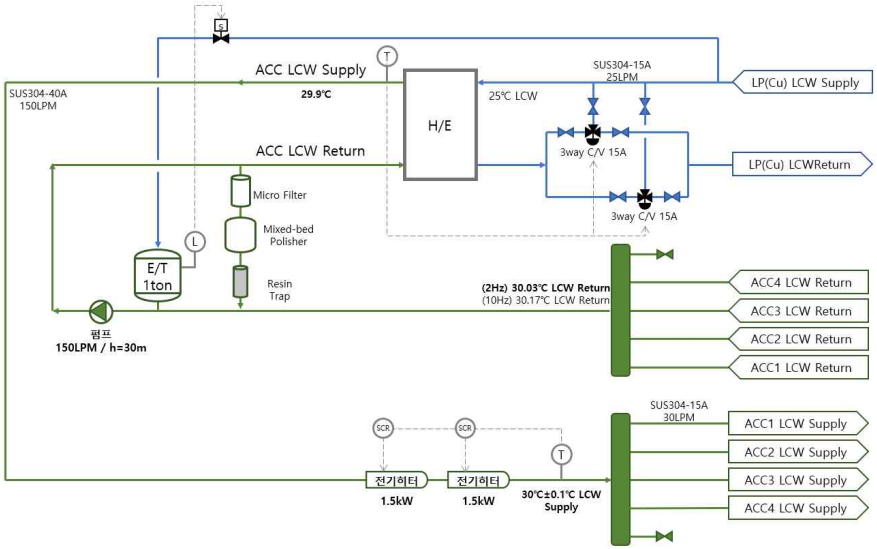
○ 터널 내부에는 고압(Cu), 저압(Al), RF(Cu) 3종류의 LCW를 공급한다. 고압(Cu) LCW는 터널 내부의 저장링 및 부스터링 마그넷 등에 주로 공급되고, 저압(Al) LCW는 알루미늄 진공 Chamber에 공급된다. RF(Cu) LCW는 터널 내부의 저장링 및 부스터링 Cavity에 공급된다.

○ 빔라인, 컨트롤 쉐드, 선형가속기동의 Linac 터널과 Klystron Galley에는 저압(Cu) LCW를 공급한다.

○ 시운전과 같이 단위 장치의 운영 단계에서는 일부의 장치에만 냉각수를 공급하는 상황이 발생할 수 있으므로 바이패스 배관을 적절하게 설치하여 펌프에 과부하가 걸리지 않도록 한다.

○ LCW 공급온도 (25 ℃ ± 0.1 ℃)보다 높거나 낮은 온도의 LCW를 필요로 하는 장치는 개별적으로 열교환기와 히터를 설치하여 LCW의 온도를 조절한다.

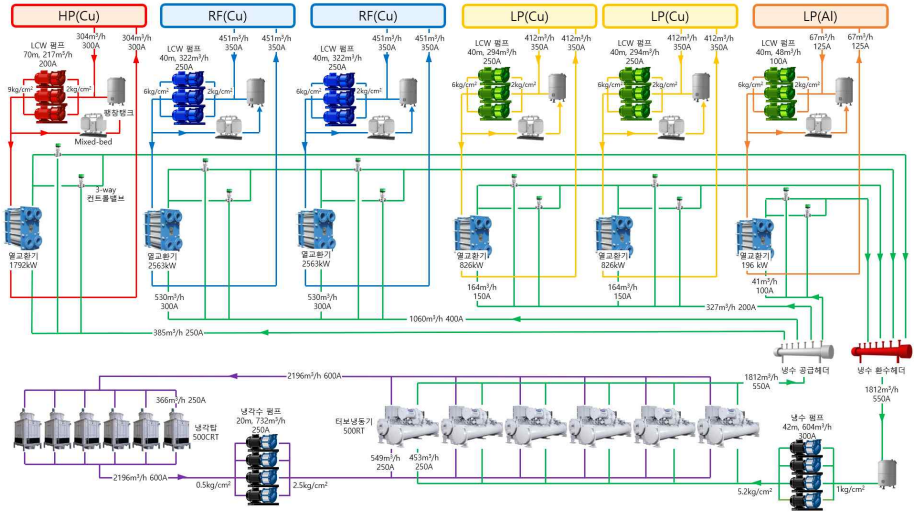
○ 선형가속기 가속관은 장치 요구 기준 온도 30 ℃ ± 0.1℃에서 필요에 따라 ±3 ℃를 가변할 수 있는 시스템을 구성한다. 이를 위하여 단독 폐회로 시스템을 <그림 5.5.1.7>과 같이 구성한다. 가속관에서 발생하는 열량은 25 ℃의 저압(Cu) LCW를 사용하여 열교환기를 통해 냉각시키고, 가속관에 공급되는 LCW는 전기히터의 SCR 제어를 통하여 온도를 정밀하게 제어하여 공급한다.



<그림 5.5.1.7> 선형가속기 가속관 LCW 계통도

(2) LCW 기계설비

○ LCW의 공급 및 온도 제어를 위해서 <그림 5.5.1.8>과 같이 냉동기와 냉각탑, 열교환기, 펌프 등으로 구성한다.



<그림 5.5.1.8> LCW 기계설비 계통도

○ LCW 공급을 위한 모든 설비는 중앙기계동 제어실을 통해 감시 및 제어가 가능하도록 하고 가속기 운전실에 PV 값을 제공한다.

○ LCW 순환펌프는 계통별 유량을 고려하여 고압(Cu)은 3대 × 1set, RF(Cu)는 3대 × 2 set, 저압(Cu)은 3대 × 2 set, 저압(Al)은 3대 × 1 set로 각각 구성한다. 각 set별 3대로 구성된 펌프는 상시 2대가 운전되며 1대는 예비기로 활용된다.

○ LCW 펌프는 싱글볼류트 또는 입형펌프를 주로 선정하고 유지보수 용이성을 고려하여 펌프 소비전력은 100 kW 이하로 설계한다.

○ 냉동기는 터보냉동기로 선정하고 냉동능력 500 RT, 6대로 구성한다. 장치 최대 발열량을 기준으로 5대가 상시 가동되고 1대는 예비기로 활용한다.

○ 냉각탑은 개방형 직교류형 냉각탑으로 선정하고 냉동기의 냉동능력에 맞게 500 CRT 6대로 구성한다. 냉각탑은 6대가 상시 가동되고, 냉각탑 팬은 인버터로 제어하여 연중 외기온도 변화에 대응하도록 설계한다.

○ 냉각탑은 LCW 기계동 측면 인필드에 설치한다.

○ 터보냉동기에서 생산된 냉수는 냉수공급헤더를 통해서 각 열교환기로 공급되고 환수헤더와 팽창탱크를 거쳐 일정한 압력으로 냉동기로 순환되도록 설계한다.

○ 열교환기는 판형 가스켓 타입 열교환기로 선정한다. 열교환기는 각 시스템별로 1대를 설치한다. 고압(Cu)은 1대, RF(Cu)는 2대, 저압(Cu)은 2대, 저압(Al)은 1대이며 총 6대로 구성한다. 열교환기는 각 계통별 유량과 냉각량에 맞게 용량을 선정한다.

○ 각 열교환기에는 LCW 온도제어를 위해 3-way 컨트롤밸브 2대를 열교환기 출구측 냉수 배관에 배치한다. 컨트롤밸브 1대는 상시 가동되고 1대는 예비기로 활용한다. 컨트롤밸브의 고장 및 유지보수 시에 나머지 1대를 이용하여 정상적인 온도조절이 가능하도록 한다.

○ 열교환기 출구측 LCW 배관에 온도센서를 설치하고, LCW 온도에 따라 열교환기 출구 측 냉수 배관에 설치된 3-way 컨트롤밸브의 개도 제어를 통해 열교환기 출구 측 LCW의 온도가 25 ℃ ± 0.1 ℃가 되도록 한다.

○ LCW 온도 변화에 따른 압력 변화를 최소화하기 위하여 4종류의 LCW 라인에 각각 팽창탱크 1기를 설치한다. 부하 측 사용 차압을 고려하여 팽창탱크 내 압력은 1~2 kgf/cm^2 범위 내에서 목표값을 설정하여 일정하게 유지한다. 팽창탱크의 압력 유지는 건조 질소를 활용한다. 팽창탱크는 각 계통별 배관 내 LCW 보유수량을 고려하여 용량을 선정한다.

○ LCW가 흐르는 설비의 모든 재질은 스테인리스 스틸(SUS 304)로 한다. 배관의 두께는 SCH10이다.

○ 냉수와 냉각수 관련 설비는 아연도금강 또는 스테인리스 스틸로 선정한다. 배관의 두께는 SCH10이다.

○ LCW 기계동 내 LCW, 냉수, 냉각수 배관은 소음 및 진동의 발생과 침식에 의한 부식을 방지하기 위해 설비의 용량과 적정 유속에 따라 배관의 규격을 설계한다.

○ RF 건물 및 저장링 터널 상부에 배치되는 LCW 배관에서 발생하는 진동은 장치에 영향을 줄 수 있으므로 배관 내 유속이 1.5 m/s 이하가 되도록 한다.

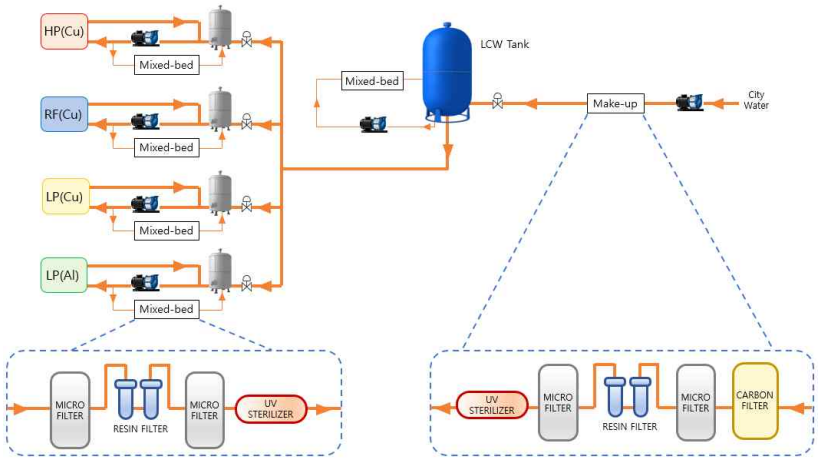
○ LCW, 냉수, 냉각수 등 관련 설비의 보온은 고무발포보온재로 하며 옥외 노출배관은 보온재보호용 시트로 마감한다.

○ LCW의 원활한 공급 및 제어를 확인하기 위하여 적정한 위치에 온도, 압력, 유량, 순도를 확인할 수 있도록 센서를 설치한다.

(3) LCW 순수 제조설비

○ LCW는 저전도수(Low Conductivity Water)를 의미하며 상수도에서 이물질과 이온을 제거하여 저항값 6 MΩ·cm 이상을 유지해야 한다. LCW의 순도 유지를 위하여 <그림 5.5.1.8>과 같이 시스템을 구성한다.

○ 상수도의 압력을 3 kgf/cm^{2}으로 가정하고 이보다 낮은 경우 펌프를 가동하여 3 kgf/cm^2 이상의 압력을 유지한다. Make-up 시스템은 카본필터, 마이크로필터, 이온수지필터, UV 살균기를 순차적으로 구성한다.



<그림 5.5.1.9> LCW 순수제조설비 계통도

○ 카본필터는 상수도에 포함된 유기물을 여과하고, 이온수지필터 전단에 위치한 마이크로필터는 상수도에 포함된 미세입자를 여과한다. 이온수지필터는 양이온 및 음이온 교환수지로 구성되며 수중에 함유된 이온을 제거한다. 이온수지필터 후단에는 마이크로필터를 설치하여 이온교환수지 내 수지알갱이가 넘어가는 것을 방지한다. UV 살균기는 미생물을 제거한다.

○ 초도 LCW를 배관에 충진하기 위한 Make-up 시스템은 3 m^3/h 이상으로 공급되도록 설계하고 Make-up 시스템을 통해 생산된 LCW는 LCW 탱크에 저장된다.

○ LCW 탱크의 크기는 4 ton으로 하고 상시 80%의 수위를 유지한다. 약 3.2 ton의 LCW를 저장하여 누수 등에 의해 보충이 필요한 경우 순도의 저하 없이 LCW가

공급될 수 있도록 한다.

○ LCW 탱크는 Mixed-bed 시스템을 포함하여 정체되어 있는 LCW의 순도 저하를 방지한다. Mixed-bed 시스템은 마이크로필터, 이온수지필터, UV 살균기로 구성한다.

○ 고압(Cu), RF(Cu), 저압(Cu), 저압(Al) 배관에는 각각 팽창탱크를 포함하고, 팽창탱크 내 압력은 1~2 kgf/cm^{2}으로 유지한다. 누수 등에 의해 팽창탱크 수위가 70% 이하로 감소하는 경우, 전자밸브가 자동 개방되어 LCW 탱크로부터 LCW를 공급받으며 70%의 수위에 도달하면 전자밸브가 자동으로 닫히도록 설계한다.

○ 고압(Cu), RF(Cu), 저압(Cu), 저압(Al) 각각의 LCW는 혼합되지 않도록 설계하고, 4종류의 LCW는 각각의 Mixed-bed 시스템을 포함한다. Mixed-bed 시스템은 LCW 유량의 약 5%를 순환하여 각 LCW의 순도를 유지하고 이물질을 제거한다.

다. 분야별 설비계획

(1) 기계, 배관분야

○ 냉동기는 환경규제를 고려하여 R-134a를 적용하며 부하변동에 대처하는 타입으로 설치한다.

○ 모든 펌프의 모터는 노이즈와 진동을 고려하여 4 pole을 선정한다.

○ 진동발생기기는 바닥의 베이스를 철근콘크리트로 구분하여 설치 후 그 위에 설치한다.

○ 배관계의 상층부는 자동에어벤트를 설치한다.

○ 배관이나 밸브류의 가스켓은 테프론으로 적용한다.

○ LCW 각 개소별 스트레이너는 100 mesh를 적용한다. 단 냉수, 냉각수는 10 mesh를 적용한다.

○ 드레인 라인은 배수로까지 설치한다.

○ 냉각수배관을 제외한 모든 배관은 에어로플렉스 25 T 이상으로 보온한다.

○ 모든 배관 용접 연결부는 TIG 용접을 적용하고, 알곤 퍼지는 고려하지 않는다.

○ 냉각탑은 동절기 온도하강을 방지하기 위한 히터를 설치한다.

(2) 전기분야

○ 고압모터는 안전을 위하여 local에서 manual로만 운전하도록 한다.

○ 고압패널은 VCB 등과 같은 보호설비를 포함하며 전기실에 설치한다.

○ 냉동기 기동기반은 냉동기 주변에 설치한다.

○ 냉각탑의 케이블은 케이블 덕트를 사용한다.

(3) 계장분야

○ 감시시설은 중앙기계동 방재센터에 구축하여 리모트로 운전 및 감시가 가능하도록 하고, 온도, 압력, 유량, 전기저항값 등을 상시 감시 및 제어할 수 있도록 구성한다.

○ 중앙기계동 방재센터에서 LCW의 온도, 압력, 유량 등의 PV 값을 가속기 운전실 제어프로그램으로 전송해야 된다.

○ 자동제어용 설비는 UPS 전원을 공급한다.

○ 3-Way 컨트롤밸브는 전기식을 적용하며, 출력 및 입력 신호를 감시시설에 나타나도록 한다.

○ 냉각탑 팬모터는 인버터로 전체가 가동하도록 한다.

○ 냉동기는 중앙기계동 방재센터에서 모든 상태를 확인할 수 있도록 프로그래밍하며, 기동 및 정지 등을 수행하도록 한다.

5.6 전기설비

전기설비는 한전으로부터 전력을 공급받는 수변전설비, 각 지역 전기실 및 부하로 공급하는 배전설비, 정전 시 비상 전원을 공급하기 위한 예비전원설비, 피뢰 및 접지설비 등으로 구성한다. 전기실 위치선정 시 전원 인·출입의 편리성, 부하의 위치, 지반, 침수 등을 고려하여야 하며 지진 발생 시 설비의 전도, 이동, 오동작 등이 없이 계속 기능을 유지할 수 있도록 내진 대책을 수립하여야 한다. 전력 설비 사고로 인한 정전 시 비상 대응을 위해 상호 호환이 가능한 전력기기를 채용하고 설비 용량을 여유 있게 산정하는 것이 필요하다.

5.6.1 수변전설비

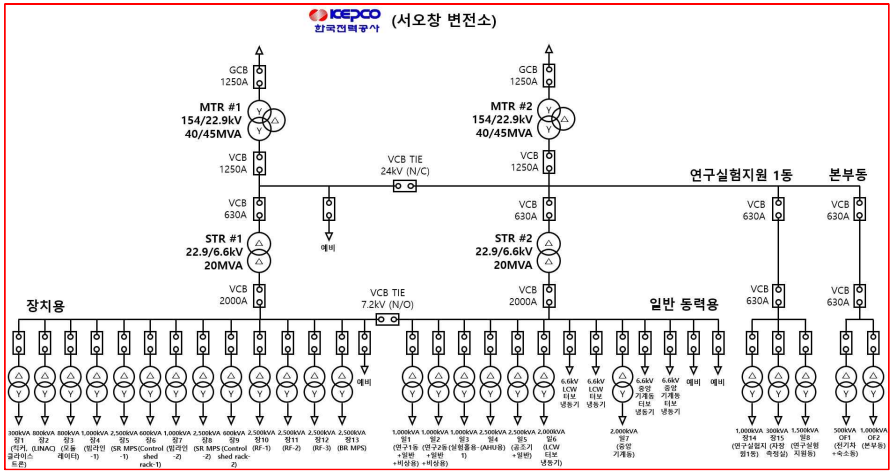
수변전설비의 계획은 전력회사(한전)의 공급규정을 검토하여 관련 부처와 사전에 협의하여 진행해야 한다. 한전 서오창 변전소에서 중앙수변전동으로 지중 선로를 통해 전력을 공급받으며 계약 용량은 40 MVA이다. 부하 전류의 개폐뿐만 아니라 사고 시 선로를 안전하게 개폐하여 전력 계통을 보호할 수 있는 GIS (가스절연개폐장치)를 통하여 수전 받으며 수전 용량, 향후 부하 증설, 한전 계통전압의 안전성 등의 이유로 수전 전압은 154 kV로 한다. 부하 설비의 용량 및 향후 부하 증가에 대한 확장성을 함께 고려하여 설비의 배치, 구성, 운영 방법 등에 대해서도 충분한 검토가 이루어져야 한다.

5.6.2 배전설비

배전설비는 전력공급의 안정성과 신뢰성을 보장하기 위한 중요한 설비이며 배전용 변압기, Cable, Cubicle Panel (차단기, 보호계전기 포함), 분전함 등으로 구성한다.

한전에서 154 kV를 수전 받아 중앙수변전동에서 22.9 kV로 강압하여 인필드 및 본부동, 연구실험지원 1동의 변압기 1차 측으로 보낸다. 22.9 kV 회선은 인필드 2회선과 본부동 1회선, 연구실험지원 1동 1회선, 총 4회선으로 구성한다. 22.9 kV에서 6.6 kV로 강압시키는 인필드 내의 변압기 2대는 장치용과 동력용으로 구분하여 배전계통을 구성한다. 본부동 및 연구실험지원 1동에서는 각 건물 전기실에서 380/220 V로 강압하여 사용하며 자장 측정실 및 연구실험지원 2, 3동은 연구실험지원 1동에서 전력을 공급받는다.

장치용 변압기는 전기실 1에, 동력용 변압기는 중앙기계동에 둔다. 평시에는 Bus Tie를 상시 개방하여 계통을 분리한다. 하지만 한쪽 변압기가 고장 나는 등의 사고 시 Bus Tie를 단락시켜 임시로 전체 부하에 전력을 공급할 수 있도록 한다. 장치용 부하에는 고조파 및 노이즈를 발생시키는 장치가 많아 1차적으로 변압기를 통해 장치 전원을 분리시키고 AHF (Active Harmonic Filter, 능동형 고조파 필터)를 설치하여 고조파 및 노이즈를 상쇄시킨다. 동력용 부하는 고전압 회전기기를 포함하며 기동 시 5~6배의 기동 전류를 발생시키는 특징이 있기 때문에 적절한 기동법을 선정하여 다른 장치에 영향을 주지 않도록 하여야 한다. 회전기기 부하로 인해 역률이 90% 미만인 경우 한전으로부터 패널티를 받게 되며, 이를 개선하기 위해 SVC (Static Var Compensation, 정지형 무효전력 보상장치)를 구비하여야 한다. SVC는 6.6 kV 변압기 후단에 각각 연결하여 설치하며, 사고를 대비하여 보호장치를 구비한다. 수배전계통은 <그림 5.6.2.1>을 참고한다.



<그림 5.6.2.1> 수배전설비 단선 결선도

전력 계통에서 발생하는 사고(지락, 과부하, 단락 등)를 신속히 검출하고 차단하여 인명 및 재산피해를 최소화할 수 있도록 계통 보호시스템을 구성해야 한다. 상-하 계통 간 긴밀한 보호협조가 가능하고, data 분석이 용이한 디지털 보호계전기를 적용하여 원격감시제어시스템(SCADA)을 함께 구축하는 것이 필요하다.

4GSR에서 사용하는 전압은 <표 5.6.2.1>에, 변압기 구성은 <표 5.6.2.2>에 나타내었다.

<표 5.6.2.1> 배전설비의 사용전압 분류

구 분	6,600 V	480/277 V	380/220 V
결선 방식	3상 3선식	3상 4선식	3상 4선식
부하 종류	고압 회전기기	모듈레이터	동력, 전등, 전열 등

<표 5.6.2.2> 변압기 구성과 용량 및 수량 (예상)

No.	변압기 위치	변압기 명칭	Type	1차 전압 (V)	2차 전압 (V)	변압기 용량 (kVA)
1	중앙수변전동	MTR #1	Oil	154,000	22,900	40,000
2	중앙수변전동	MTR #2	Oil	154,000	22,900	40,000
3	전기실1	STR #1	Oil	22,900	6,600	20,000
4	중앙기계동	STR #2	Oil	22,900	6,600	20,000
5	전기실1	TR-장1 (킥커, 클라이스트론)	Mold	6,600	380	300
6	전기실1	TR-장2 (LINAC)	Mold	6,600	380	800
7	전기실1	TR-장3 (모듈레이터)	Mold	6,600	480	800
8	전기실2	TR-장4 (빔라인-1)	Mold	6,600	380	1,000
9	전기실2	TR-장5 (SR MPS-1)	Mold	6,600	380	2,500
10	전기실2	TR-장6 (Control shed rack-1)	Mold	6,600	380	600
11	전기실3	TR-장7 (빔라인-2)	Mold	6,600	380	1,000
12	전기실3	TR-장8 (SR MPS-2)	Mold	6,600	380	2,500
13	전기실3	TR-장9 (Control shed rack-2)	Mold	6,600	380	600
14	전기실3	TR-장10 (RF-1)	Mold	6,600	380	2,500
15	전기실3	TR-장11 (RF-2)	Mold	6,600	380	2,500
16	전기실3	TR-장12 (RF-3)	Mold	6,600	380	2,500
17	전기실2	TR-장13 (BR MPS)	Mold	6,600	380	2,500
18	전기실2	TR-일1 (연구1동+일반+비상용)	Mold	6,600	380	1,000
19	전기실2	TR-일2 (연구2동+비상+비상용)	Mold	6,600	380	1,000
20	전기실2	TR-일3 (실험홀용-1)	Mold	6,600	380	1,000
21	전기실2	TR-일4 (AHU용)	Mold	6,600	380	2,500
22	전기실3	TR-일5 (공조기+일반)	Mold	6,600	380	2,500
23	중앙기계동	TR-일6 (LCW 터보냉동기)	Mold	6,600	380	2,000
24	중앙기계동	TR-일7 (중앙기계동)	Mold	6,600	380	2,000
25	연구실험지원 1동	TR-A	Mold	22,900	380	1,000
26	연구실험지원 1동	TR-B (자장측정용)	Mold	22,900	380	300
27	연구실험지원 1동	TR-C	Mold	22,900	380	1,500
28	본부동	TR-OF1 (전기차+숙소동)	Mold	22,900	380	500
29	본부동	TR-OF2 (본부동)	Mold	22,900	380	1,000

5.6.3 예비전원설비

한전 상용전원의 정전에 대비하여 건축법, 소방법에 규정된 비상 설비에 안정적으로 전력을 공급하기 위한 자가용 발전설비(비상 발전기), 무정전 전원공급장치(UPS, uninterruptible power supply system), 축전지 설비 등을 구비해야 한다. 4GSR 장치의 안정적인 운영을 위한 UPS 용량은 <표 5.6.3.1>에 정리하였다.

비상 발전기는 상용전원 정전 시 가동되어 비상 부하에 전원을 공급한다. 비상 부하는 UPS 부하, 소방설비, 비상 조명, 승강기, 펌프 등으로 구성되며 발전기 기동 및 ATS 절체에 걸리는 시간 동안 UPS 부하를 제외한 비상 부하는 정전된다. 비상 발전기는 중앙기계동에 1,000 kW 1대가 놓일 예정이나 원거리 설비 및 용량 부족의 문제로 인필드 밖에 1대를 추가하는 것이 검토되어야 한다.

UPS 설비는 정전압정주파수(CVCF)의 고품질 전력을 부하에 공급한다. 인필드 내 각 전기실에 UPS실을 구축하며 상용전원 정전 시 무순단절환되어 비상 발전기가 기동되는 동안 부하에 Battery로 전원공급이 가능하도록 설계한다.

<표 5.6.3.1> 장비별 UPS 예상 용량

건물명	실명	용도	장비 명칭	UPS (kVA)
연구 2동	생물 준비실-1	빔 라인 공용공간	-	10
	X-선 광학계 개발실	거울 제작 기술개발 및 측정	-	10
	전기전자 개발실	전기전자 실험 조립실 포함	-	10
연구 1동	데이터센터	빔라인 데이터 보관 관리	-	60
	생물준비실-2	빔라인 공용공간	-	10
가속기동	SR 터널	SR Kicker	SR Kicker Power Supply	4
	Control Shed	Booster injection	Booster injection power supply	2
		Booster extraction	Booster extraction power supply	2
		진공장치 CONTROL RACK	진공장치	56
		진단/제어 RACK	진단/제어랙	84
		PSI RACK	PSI	39.6
		RMS	RMS	4
	실험홀(빔라인)	1. 바이오신약-바이오 소각산란 빔라인 (BioPharma-BioSAXS)	hard x-ray	5
		2. 소재 구조 분석 빔라인 (MaterialStructureAnalysis)	hard x-ray	5
		3. 연엑스선 나노프로브 빔라인 (Soft X-ray Nano-probe)	soft x-ray	5
		4. 나노스케일 각분해 광전자분광 빔라인 (Nano-ARPES)	soft x-ray	5
		5. 결맞음 X-선 회절 빔라인 (Coherent X-ray Diffraction)	hard x-ray	5
		6. 결맞음 소각산란 빔라인 (Coherent SAXS)	hard x-ray	5
		7. 실시간 엑스선 흡수분광학 빔라인 (Real-timeX-ray Absorption Fine)	hard x-ray	5
		8. 생체분자 나노 결정학 빔라인 (BioNano Crystallography)	hard x-ray	5
		9. 고에너지 현미경 빔라인 (High Energy Microscopy)_100 m	hard x-ray	5
		10. 나노 프로브 빔라인 (Nano-probe)_150 m	hard x-ray	5
	가속기 제어실	가속기 제어실 (운전실)	TV/Monitor/PC	15
		서버룸 (가속장치 제어서버)	Server	80
			PSI Rack	13.2
Linac	Linac 레이저룸	전자총	레이저	3
	Klystron 갤러리	선형가속기 가속장치용 설비	UPS	6
			PSI	2
			Vacuum	8
			Control Rack용	8
	Klystron 갤러리 조립실	장치조립, 가속장치 시험, 오일교환	모듈레이터 제어기	2
RF동	HPRF ROOM-2	LLRF, 제어랙, 약 16개+예비 2개	RF UPS 분전함3	36
	RF CONTROL ROOM	LLRF, 제어랙, 약 16개+예비 2개	RF UPS 분전함2	36
	HPRF ROOM-1	LLRF, 제어랙, 약 16개+예비 2개	RF UPS 분전함1	36
연구 실험지원 1동	RF TEST ROOM	RF 실험실	RF Test Room UPS 분전함	5
연구 실험지원 2, 3동	방사선분석실	-	-	10

5.6.4 피뢰 및 접지설비

피뢰설비는 건물에 접근하는 뇌격을 확실하게 유도, 흡수하고 뇌격 전류를 안전하게 대지로 방류하여 시설물을 보호하는 목적으로 관련 법규에 따라 설치되어야 한다. 뇌격을 흡인하여 피보호물을 보호하는 돌침부, 뇌전류를 접지 전극으로 전달하는 피뢰도선, 뇌전류를 대지로 방류하는 접지전극으로 구성된 설비이다.

인축의 안전 확보 및 전기설비나 전력기기 등의 안정된 동작을 위해 접지설비를 구축해야 한다. 접지 설비용 기기(접지극, 접지선, 주접지단자 등)의 선정과 접지공사 시공방법에 대해서는 한국전기설비규정(KEC)에 의거하여 결정한다.

건물 접지는 전기설비의 접지계통, 피뢰설비, 통신설비 등의 접지극을 통합하여 접지하는 통합접지를 채택한다. 통합접지는 설비 간의 전위차를 해소하여 등전위를 형성하는 접지방식으로 접촉전압을 현저하게 저감시켜 인체를 감전으로부터 보호한다. 낙뢰나 서지 (Surge) 유입 시 이상 전류가 통합 접지된 접지선을 따라 내부에 침투하여 기기를 파손시키거나 오동작을 일으킬 수 있기 때문에 전기설비의 보호를 위해 SPD (Surge Protective Device)의 설치가 필수적이다.

현재 오창 다목적 방사광가속기 건설부지는 화강암반이 넓게 분포되어 있어 대지 저항률이 매우 높다. 따라서 장치별 접지 요구사항과 향후 건물 신축 등 부지의 효율적인 활용을 모두 고려하여 적절한 접지설비 매설지역과 접지 공법을 선정하여야 한다.

장치의 접지는 장치별 접지 요구조건 <표 5.6.4.1>에 따라 타 접지와 분리하고 충분히 이격하여 시공함으로써 타 장치의 오동작을 예방하여야 한다. Kicker, Klystron, Modulator, RF, MPS는 고전압 Pulse 전원을 사용하기 때문에 접지 망을 분리하였으며 레이저, 빔라인과 같이 작은 전류를 사용하는 장치는 다른 Pulse 전원에 의해 영향을 받지 않기 위해 망을 분리한다. 또한, 가속기 제어 서버는 전기적인 노이즈와 과전압으로부터 서버를 보호하기 위해 접지 망을 분리한다.

<표 5.6.4.1> 장치별 접지 요구조건

건물명	실명	용도	명칭	특별 접지
LINAC	Linac 레이저룸	전자총	레이저	NCT, 망 분리, 10 Ω 이하
	KLYSTRON 갤러리	선형가속기 가속장치용 설비	클라이스트론	망 분리, 10 Ω 이하
			모듈레이터	
	KLYSTRON 갤러리 조립실	장치조립, 가속장치 시험, 오일교환	클라이스트론	
			모듈레이터	
가속기동	SR kicker room	SR kicker	SR kicker power supply	
	Control shed	Booster injection	Booster injection power supply	
		Booster extraction	Booster extraction power supply	
		SR MPS rack	SR MPS	망 분리, 100 Ω 이하
		BR MPS rack	BR MPS	망 분리, 100 Ω 이하
	실험홀 (빔라인)	실험홀	제 1사분면	망 분리, 10 Ω 이하
			제 2사분면	망 분리, 10 Ω 이하
			제 3사분면	망 분리, 10 Ω 이하
			제 4사분면	망 분리, 10 Ω 이하
	가속기제어실	서버룸(가속장치 제어서버)	Server	망 분리, 10 Ω 이하
RF동	HPRF ROOM-1	LLRF, 제어랙 약 16개+예비2개	RF UPS 분전함1	
	RF control room	일반부하	RF 상용 분전함2	
		LLRF, 제어랙 약 16개+예비2개	RF UPS 분전함2	
	HPRF ROOM-2	LLRF, 제어랙 약 16개+예비2개	RF UPS 분전함3	
		저장링 CAV용 SSPA 03~10 (8기)	SSPA 150 kW	망 분리, 10 Ω 이하
		저장링 CAV용 Load + Circ. 03~10 (8기)	Load + Circulator 180 kW	
		일반부하	RF 상용 분전함3	
	HPRF ROOM-1	부스터 CAV용 SSPA01~03 (3기)	SSPA 80 kW	
		부스터 CAV용 Load + Circ. 01~03 (3기)	Load + Circulator 180 kW	
		저장링 CAV용 SSPA 01~02,11~12 (4기)	SSPA 150 kW	
		저장링 CAV용 Load + Circ. (4기)	Load + Circulator 180 kW	
		Test Facility용 SSPA (1기) 예비	SSPA 150 kW(Test용 SPARE)	
		저장링 CAV용 Load + Circ. 03~10 (8기)	Load + Circulator 180 kW	
		일반부하	RF 상용 분전함1	
연구실험지원 1동	RF Test room	RF 실험실 (LLRF 제어랙)	RF Test room UPS 분전함	망 분리, 10 Ω 이하
	MPS 연구실	MPS 실험실 (전자석 실험실)	MPS	망 분리, 10 Ω 이하
자장 측정실	자장 측정실	MPS 전원	MPS	
	자장 측정실	전자석 측정, 보관	자장 측정	망 분리, 10 Ω 이하

6장. 방사선안전

6.1 방사선안전관리 정책

6.1.1 방사선안전 요건

다목적 방사광가속기(4GSR)의 운전 중 작업자 및 방사광이용자에 대한 방사선안전을 확보하고, 가속기 주변 거주민과 환경에 대한 위해 방지를 위해서는 적합한 방사선안전관리 정책의 수립이 선행되어야 한다. 방사선안전관리 정책 수립을 위한 필수 요건은 원자력안전법의 준수이다. 허가기준에 따른 인력, 장비의 확보뿐만 아니라 시설 기준, 취급 기준에 적합하도록 하여야 한다. 원자력안전법의 허가기준에 따른 요건은 작업자, 일반인, 환경에 대한 선량한도를 초과하지 않도록 하는 것과 연관되며 선량한도 기준은 다음과 같다.

○ 방사선작업종사자 : 연간 20 mSv

○ 수시출입자 : 연간 6 mSv

○ 일반인(방사광이용자 포함) : 연간 1 mSv

○ 부지 경계 선량 : 연간 0.25 mSv

따라서 방사선차폐와 방사선안전시스템은 주어진 선량한도 기준을 초과하지 않도록 설계되어야 한다. 원자력안전법에서 부지경계 선량은 원자로와 관계된 시설에만 적용되지만, 직접 방사선(skyshine)에 의한 환경 영향 평가를 위한 기준이 요구되기 때문에 해당 값을 차용한다. 선량한도 기준 외에도 다음 기준을 만족하여야 한다.

○ 시설에서 배출되는 액체 및 기체 상태 방사성물질의 농도가 원자력안전법의 기준에 맞을 것

ALARA (as low as reasonably achievable; 사회경제적인 요소들을 감안하여 방사선 피폭 수준을 합리적으로 달성 가능한 한 감소시킨다는 방호 철학) 원칙에 따라 원자력안전법의 기준 내에서 다목적 방사광가속기의 운영 주체가 방사선안전관리를 위한 한도를 정할 필요가 있다. 방사선차폐 설계 시에는 안전 여유분(safety margin)이 검토되어야 하므로, 다음과 같은 차폐설계 제한치를 적용한다.

○ 차폐설계 제한치

- 정상운전 (방사선작업종사자 상시 출입 지역) : 연간 10 mSv

(방사광이용자 상시 출입 지역) : 연간 1 mSv

- 사고 조건 : 하나의 사건에 대해서 최대 방사선량 1 mSv

방사선작업종사자가 상시 출입하는 지역에 대해서는 연간 선량한도의 절반을 적용한다. 방사선작업종사자 외의 수시출입자는 동일 지역을 출입하더라도 출입 기간이 연간 2,000시간보다 충분히 적기 때문에 별도의 차폐설계 제한치를 설정하지 않는다. 방사광이용자의 출입 기간 역시 짧기 때문에 방사광이용자 상시 출입 지역인 빔라인 실험지역에 대한 연간 1 mSv의 제한치는 충분한 안전 여유분을 제공한다. 사고 조건에 대해서는 하나의 사건에 대해서 최대로 피폭될 수 있는 방사선량을 일반인의 연간 선량한도인 1 mSv를 초과하지 않는 설계 제한치를 적용한다.

6.1.2 구역관리 및 안전관리 절차

방사선안전 확보를 위해서는 구역을 분류하고 그에 따른 적합한 구역관리가 필요하다. 선량 기준에 따라 다음과 같이 구역을 분류한다.

○ 제한구역 : 연간 0.25 mSv 이상, 연간 1 mSv 미만

○ 일반관리구역 : 연간 1 mSv 이상, 연간 20 mSv 미만

○ 방사선관리구역 : 연간 20 mSv 이상, 시간당 1 mSv 미만

○ 고방사선구역 : 시간당 1 mSv 이상 (출입 금지)

방사선관리구역은 원자력안전법에 규정된 구역으로 주당 400 μSv를 초과할 우려가 있는 지역이다. 연간 선량으로 환산하면 20 mSv에 해당한다. 방사선관리구역은 원자력안전법에서 규정하는 교육과 건강진단을 받은 방사선작업종사자 및 수시 출입자가 법정 개인선량계를 착용하고 출입할 수 있다. 순간방사선량률을 적용할 때는 ALARA를 적용한 차폐설계치와 같이 시간당 관리기준은 5 μSv로 설정하여 관리한다. 일반관리구역은 시간당 0.5 μSv로 관리한다. 출입이 불가능한 고방사선구역은 빔 운전 중 가속기 터널 내부에 해당한다. 운전이 종료된 가속기 터널 내부는 방사선관리구역으로 설정한다.

실험허치를 포함한 빔라인 실험지역은 일반관리구역으로 관리할 필요가 있다. 해당 구역에 출입하는 방사광이용자는 일반인으로 분류하지만, 일반인의 선량한도가 초과할 우려가 있는 지역이므로 개인선량계를 착용하도록 한다. 방사광이용자는 빔라인 실험지역에서 광학 허치 등의 일반관리구역이 아닌 장소의 출입은 금지된다. 실험허치와 광학 허치는 방사광이 조사되는 동안은 모두 고방사선 구역으로 출입금지 구역으로 지정된다.

6.2 방사선차폐

6.2.1 방사선원 및 차폐설계 고려사항

가. 방사선원 및 차폐설계 방법

가속기 운전 중 전자빔이 직선구간에 설치된 삽입장치 또는 이극 자석을 통과하면서 접선 방향으로 발생되는 광자선인 방사광 이외에도 전자빔이 가속기 구조물(진공용기, 콜리메이터, 진단장비 등) 및 진공 챔버 내 잔여 기체와의 반응에 의하여 고에너지 제동복사선(Bremsstrahlung)과 중성자가 생성된다.

가속기 차폐 설계에서는 고에너지 광자(제동복사선)와 중성자에 대한 차폐가 중요한데, 터널 두께 결정(bulk shielding)에는 SHIELD11 code[1]를 적용하였다. 세부 구조에 대한 상세 방사선 안전해석에서는 Monte Carlo 코드인 FLUKA[2]를 사용하였다. 주요 빔운전 변수는 다음과 같다.

○ 저장링 : 4 GeV, 400 mA

○ 부스터(Booster) : 200 MeV → 4 GeV

○ 입사용 선형가속기 : 200 MeV, 5 nC, 2 Hz, (400 ns pulse duration)

나. 빔손실 시나리오

저장링의 운전 모드는 top-up 운전이고, 차폐 해석을 위해 검토된 저장링 저장빔, 운전 주기 및 입사/인출 효율은 다음과 같다. 저장링이나 부스터(Booster)의 경우에는 전자빔이 원형궤도를 돌면서 빔불안정성 요인으로 인해 일부가 연속적으로 가속기 구조물과 충돌하면서 손실될 수 있는데 이 평가에서는 이러한 손실이 전 궤도에 걸쳐 균일하게 발생한다고 가정하였다(균등 손실).

○ 저장빔 전류 : 400 mA = 6.67×10^{12}개 전자

○ Top-up 운전 주기 : 240시간 = 10일 (매 2주 단위 운전 형태)

첫 입사는 full-injection, 이후에는 2분마다 top-up 입사로 총 7200회

○ 저장빔 전류 손실률(균등 손실) : 2분간 4 mA (= 6.67×10^{10}개 전자)

○ 입사/인출 과정에서의 전자빔 손실률 : 10% (전송 효율 90%)

→ 손실된 빔 중 50%는 입사/인출 지점(Septum magnet)에서 손실

→ 나머지 50%는 저장링에서 균등 손실

○ 연간 저장링 운전시간 : 6000시간

부스터를 입사기로 사용하는 방사광가속기에 대한 저장링 차폐 평가의 입사 또는 인출 위치에 대한 효율은 80 ~ 90% 수준의 높은 효율을 적용하는 추세이다. 가속기 설계 및 제작 능력의 향상뿐만 아니라 top-up 운전 등의 경험과 데이터의 축적 등을 통해 이와 같은 높은 효율이 검증되고 있다.

SIRIUS[3]에서는 80%, APS-U[4]에서는 80%, BESSY-VSR[5]에서는 90%를 적용하고 있으며 Spring-8-II[6]에서는 Spring-8의 경험을 토대로 85% 수준의 입사효율을 예상하였다. 다소 보수적인 값이다.

앞에서 언급한 조건을 바탕으로 도출한 저장링의 균등 손실 조건에서 손실되는 총 전자의 수는 다음과 같다. 하나의 top-up 운전 주기 내에서 처음 저장링을 완전히 채우고 채워진 저장빔이 모두 손실되는 조건의 비율은 전체 손실의 1.4%로 매우 적다.

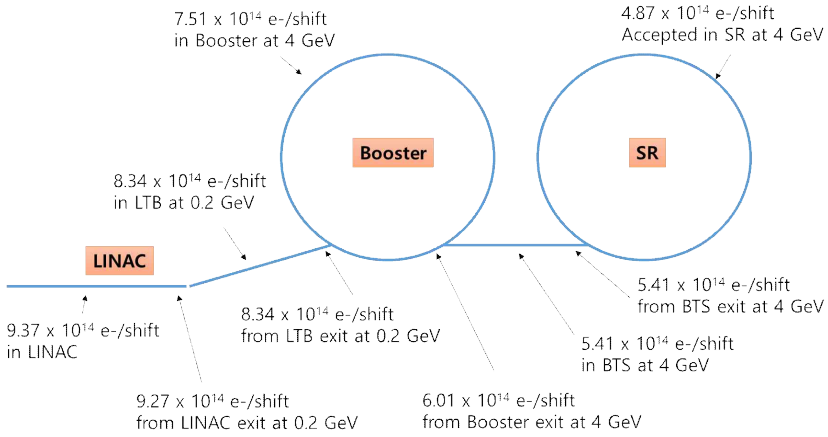
○ Top-up 운전 1 주기 동안 전체 균등 손실	5.13×10^{14}개
- Full-injection 중 입사에 의한 저장링 균등 손실	3.69×10^{11}개
- Top-up 운전 중 저장 전류 손실 (7200회)	4.80×10^{14}개
- Top-up 운전 중 입사에 의한 저장링 균등 손실	2.67×10^{13}개
- Top-up 운전 종료 후 저장빔 전류 완전 손실	6.67×10^{12}개
○ 연간 작업자 선량 평가 손실 (8.33 주기=2000시간)	4.28×10^{15}개
○ 연간 환경 영향 평가 손실 (6000시간)	1.28×10^{16}개

저장링 균등 손실 외의 입사 지역 등 다른 지역에 대한 입사 전자수와 손실 전자수를 개략적으로 나타낸 것은 <그림 6.2.1.1>, <그림 6.2.1.2>와 같다. 부스터는 저장링과 터널을 공유하고 있지만, 개략도에서는 별도 표기하였다. 실제 빔 손실 지점은 <그림 6.2.1.3>과 같이 입사 및 인출 지역이 모여 있기 때문에 저장링-부스터 터널은 입사지역과 그 외 지역으로 나누어 평가하였다.

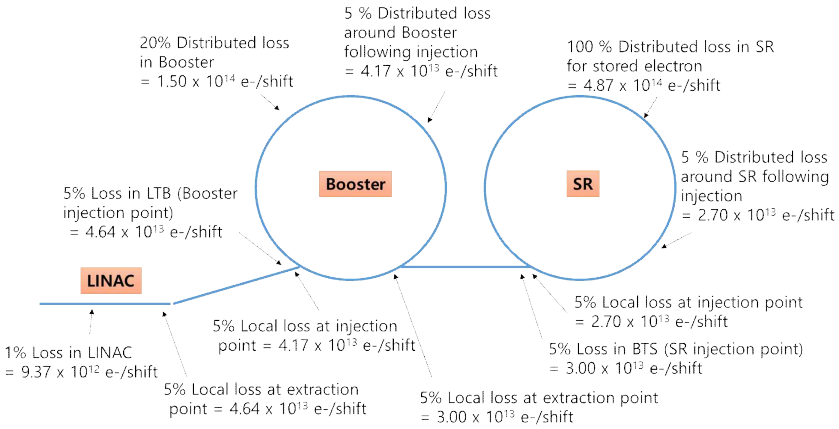
부스터에서의 균등 분포 손실률의 경우, 개념설계보고서에서는 APS의 부스터 차폐 계산[7]에 사용된 2% 손실률을 적용하였으나, 최근 조사된 부스터 손실률(SIRIUS: 20%[3], NSLS-II: 10~20%[8,9])을 바탕으로 20% 손실률을 적용하였다. 부스터에서의 빔에너지는 보수적으로 최대 가속 에너지인 4 GeV로 가정하였고, <그림 6.2.1.2>의 BTS에서의 손실률은 부스터에서 인출 손실에 해당한다.

LINAC의 경우에는 LINAC 구간만의 상시 운전 시나리오를 고려하였다. LINAC에서의 손실률은 PAL-XFEL에서의 가정[10]과 마찬가지로 1%로 설정하였고 LINAC 빔 덤프에서 완전 손실되는 것을 가정하였다. 1% 손실 조건은 photo-cathode RF gun을 사용하는 경우 LINAC 전체 구간에서, thermionic gun을 사용하는 경우 buncher 이후 구간에 적용된다.

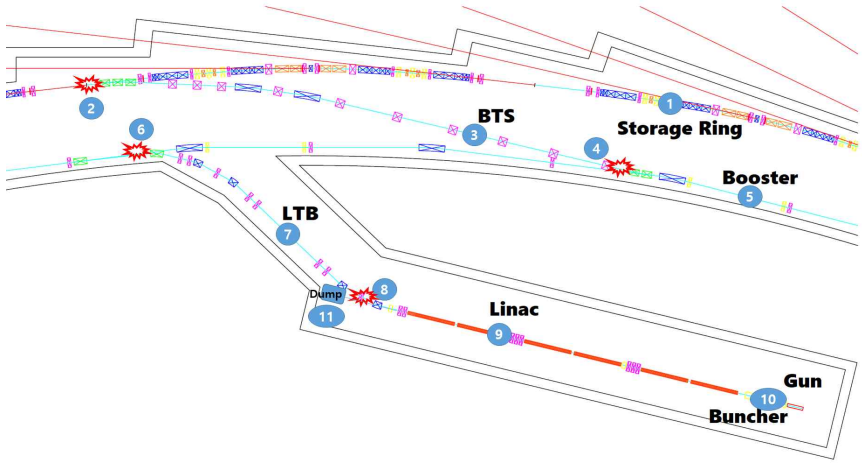
사고 조건에 대해서는 한 지점에서 100% 빔이 모두 손실되는 조건으로 빔 손실 시간이 제한된다. 방사선량이나 손실 제한 시간 등의 연동조건을 설정해서 과도한 빔손실이 발생할 때 개인안전연동시스템에 의해 빔 운전이 정지된다.



<그림 6.2.1.1> Top-up 운전 1 주기 동안 전자빔 세기 개략도



<그림 6.2.1.2> Top-up 운전 1 주기 동안 전자빔 손실 개략도



<그림 6.2.1.3> 전자빔 손실 위치

6.2.2 반실험식을 이용한 가속기 차폐외형 설계

가. 저장링-부스터 터널

저장링-부스터 터널 외벽 외부는 실험지역으로, 일반인인 방사광이용자가 출입가능한 지역이다. 저장링과 부스터가 동일한 터널에 존재하기 때문에 저장링의 빔 손실에 의한 방사선량과 부스터의 빔 손실에 의한 방사선량을 합산한 값이 연간 1 mSv를 초과하지 않도록 외벽 터널 두께를 결정하였다. 내벽 외부 infield 지역은 일반인 출입이 허용되지 않으므로 연간 10 mSv의 차폐설계 제한치를 적용하였다.

<그림 6.2.1.3>의 부스터의 인출지점에 인접한 지역을 포함하는 입사지역은 입사 및 인출 시의 일시적인 전자빔 손실이 크므로 차폐 두께를 다르게 설정한다. 입사지역은 두 개의 저장링 기본 cell에 걸쳐 분포하며, 입사지역의 방사선량평가는 보다 세부적으로 지역에 따라 다음 조건에 대한 선량을 각각 계산하여 합산하였다. 각 조건의 부여 번호는 차폐 평가를 위한 분류 번호로 <그림 6.2.1.3>에 표시하였다.

○ 입사 외 지역 : ① Storage Ring, distributed + ⑤ Booster, distributed

○ 입사 지역

: ① Storage Ring, distributed + ② Storage Ring, injection area

+ ③ BTS, distributed + ④ Booster, extraction area

+ ⑤ Booster, distributed + ⑥ Booster, injection area

①, ⑤와 같이 저장링 또는 부스터에서의 균등 손실에 대해 저장링과 벽체 구조를 원형으로 단순화하여 <그림 6.2.2.1>, <그림 6.2.2.2>와 같이 규모를 산출하였다.

이후 저장링 ratchet 구조를 설정하여 평가하였다. 이때 빔 손실 지점의 경우, 개념설계보고서에서는 빔 손실 데이터가 없었기에 PLS-II 운영 경험을 토대로 설정하였지만(1 cell 당 6개), 이번에는 빔물리진단제어팀에서 제공한 정상운전 중 빔 손실 예상 지점[11] 데이터에 근거하여, 1 cell 당 5개 지점을 선정하였다. 부스터 손실 지점은 dipole magnet의 downstream으로 설정하였고 총 60개소이다. 저장링-부스터 터널의 입사 외 지역의 차폐 평가 결과를 요약하면 다음과 같다.

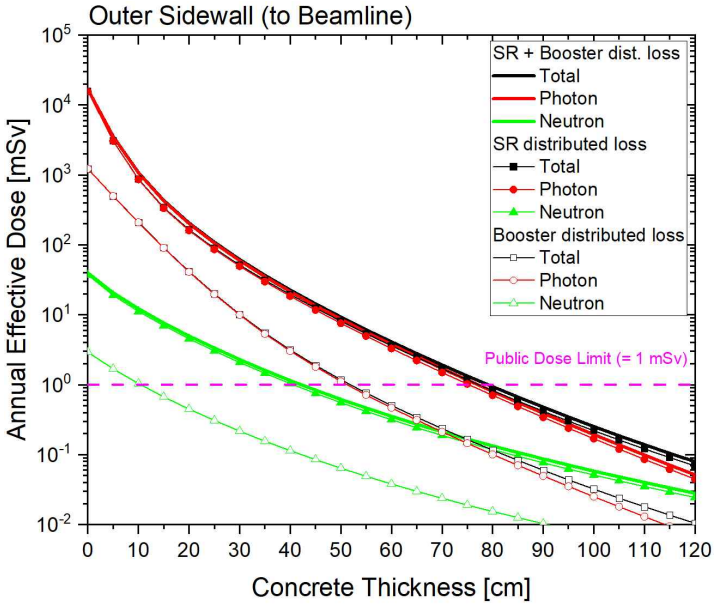
○ Ratchet side wall : O.C. (Ordinary Concrete) 80 cm

○ Ratchet end wall : O.C. 130 cm + Pb 10 cm for ID beamline

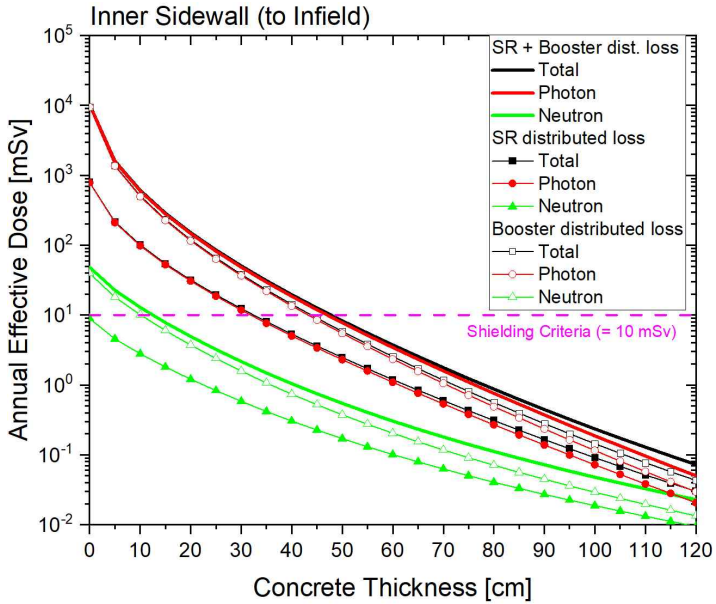
O.C. 200 cm for BM beamline

○ Inner wall to infield : O.C. 50 cm

○ Roof : O.C. 50 cm



<그림 6.2.2.1> 저장링 및 부스터에서 균일하게 전자빔 손실 시 차폐체 두께 증가에 따른 저장링-부스터 터널 외벽 외부 연간 유효선량 변화



<그림 6.2.2.2> 저장링 및 부스터에서 균일하게 전자빔 손실 시 차폐체 두께 증가에 따른 저장링-부스터 터널 내벽 외부 연간 유효선량 변화

입사지역으로 정하여 터널 차폐체를 두껍게 하여야 하는 지역은 <그림 6.2.2.3>과 같다. 입사지역의 SHIELD11 계산을 위한 조건은 다음과 같다.

○ 90% 입사/인출 효율로 정상 입사 시 모든 입사 손실 지점의 기여분의 합산하여 개별 터널 벽체 외부 선량 평가

- 입사 또는 인출 조건의 빔 손실 지점은 septum의 downstream으로 설정

- BTS의 distributed loss는 없다고 가정함



<그림 6.2.2.3> 저장링-부스터 터널 입사지역 두께 증가 위치 및 입사 중(BTS, LTB) 빔 손실 위치

입사지역은 미입사지역에 비해 두꺼운 콘크리트가 필요하며, 부스터의 인출 지점에 가까운 infield 방향에 대해서는 제한적인 영역에서 설계 제한치 대비 선량 증가가 크기 때문에 <그림 6.2.2.4>와 같은 로컬 차폐체의 설치가 효과적인 것으로 나타났다. 부스터와 벽체간의 거리가 가깝기 때문에 작업 공간 확보를 위해 2 m 구간의 콘크리트는 65 cm로 줄이고 5 cm 두께의 납 차폐체를 넣어 차폐체 전체 두께는 70 cm를 유지하도록 한다.

저장링-부스터 터널 입사지역의 차폐 평가 결과를 요약하면 다음과 같다.

○ Long ratchet side wall : O.C. 100 cm

○ Short ratchet side wall : O.C. 100 cm

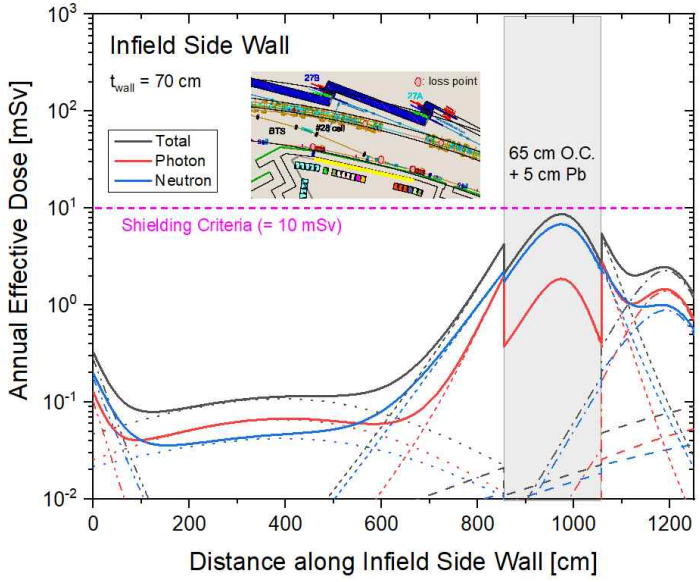
○ Ratchet end wall : O.C. 145 cm + Pb 10 cm for ID beamline

O.C. 200 cm for BM beamline

○ Inner wall to infield : O.C. 70 cm

(Booster extraction area : O.C. 65 cm + Pb 5 cm, 2 m local shield)

○ Roof : O.C. 70 cm



<그림 6.2.2.4> 부스터 인출 지점 주변 infield 방향 벽체 외부 연간 방사선량

저장링-부스터 터널 내 사고 손실에 대한 선량 평가 시 저장빔의 일시적인 손실이 중요하다. 다만 내벽 외부 infield 지역 선량 증가의 경우에는 부스터의 거리가 저장링에 가까우므로 부스터에서의 사고 손실 조건에 대해서도 검토하였다. 손실 지점은 보수적으로 벽면에서 가장 가까운 지점으로 정하였다. 저장링에 대해서는 사고 손실이 발생하더라도 사고 조건에 대한 설계 제한치인 1 mSv를 초과하는 지역은 없고, 부스터에 대해서 설계 제한치에 도달하는데 소요되는 시간이 8.3초이므로 해당 시간 내에 사고 상황을 파악하고 개인안전연동시스템을 통하여 빔을 정지시켜야 한다.

○ 저장링 손실 조건 : 400 mA 저장 전류(= 6.65 × 10^{12} e-)가 100% 손실

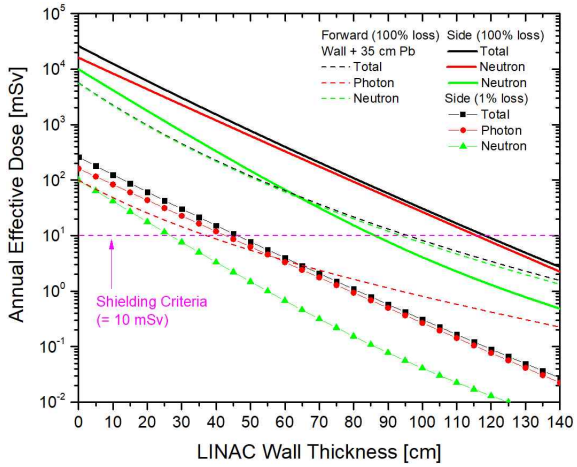
○ 부스터/BTS 손실 조건 : 부스터의 최대 입사 속도인 4 mA/s (= 6.65 × 10^{10} e-/s)로 입사하는 전자빔이 100% 손실

나. LINAC 터널

Top-up 운전 주기를 고려하였을 때 주기 내 LINAC 운전 시간이 매우 짧지만, 산업지원 다목적 방사광가속기의 건설 및 인허가 과정을 검토해볼 때, 전체 가속기의

완성 전 LINAC 구간에 대한 시운전(commissioning)을 충분히 예상할 수 있다. 따라서 LINAC 터널 두께 결정에는 LINAC만의 단독 상시 운전 시나리오(작업자 기준 연간 2000시간)를 검토하였다. 앞서 제시한 것과 같이 전자빔 1% 손실을 가정하였고, LINAC 빔 덤프에서 완전 손실된다.

빔 덤프 위치 이전의 LINAC 터널 최소 요구 옆벽 두께는 50 cm이지만, 빔과 직접 반응하는 스크린 등 진단장비를 사용하는 경우(100% 손실)에는 필요 두께가 120 cm까지 증가한다. 얇은 옆벽 두께를 적용할 경우, 진단장비 등의 좌우에는 로컬 차폐체가 설치되어야 한다. 진단장비 사용 시간을 상시 운전 시간의 1/4 수준으로 가정하였을 때, 진단장비 주위의 로컬 차폐체가 필요하지 않은 콘크리트 두께는 100 cm이다. 빔 진행 방향으로의 완전 손실은 빔 덤프 두께 결정의 주요 인자로, 콘크리트가 100 cm일 때 납 35 cm가 요구된다. 사고 손실 하에 개인안전연동시스템 동작 시간을 고려하면 100 cm 두께의 콘크리트는 설계 제한치를 초과하지 않도록 하기에 충분하다.



<그림 6.2.2.5> LINAC 구간 빔손실 조건에 따른 벽체 외부 연간 방사선량

다. 방사광 빔라인 차폐

삽입장치 또는 이극 자석 광원에서 발생하여 ratchet end wall을 통해 빠져나간 방사광을 이용하여 실험을 수행하는 빔라인은 광원에서 end wall 사이의 front-end 구간과 광학계가 위치한 광자빔 전송관(PTL), 실험 설비로 크게 구분된다. 산업지원 다목적 방사광가속기의 방사광 에너지가 PLS-II에 비해 증가할 것이기에 광학계가

위치한 구간과 실험 설비가 위치한 구간을 별도의 허치로 구분하고 일부 구간을 실험 지역에 노출시키기보다 모든 빔라인 구간을 허치 내부에 넣어 빔으로부터 이용자를 보호할 수 있도록 하는 것이 적절하다.

Front-end에는 사용하지 않는 방사광을 차폐하기 위해 가장 먼저 설치되는 fixed mask, 저장링에서 빔라인으로 나오는 방사광 차단을 위한 beam stopper와 photon shutter, Bremsstrahlung과 방사광 누설을 막고 계획된 경로를 통해 방사광을 실험 장치까지 유도하기 위한 collimator, 빔라인 휴지 중 방사광관을 따라 누설되는 방사선을 차폐하기 위한 safety shutter가 존재한다. PTL의 광학계에는 다수의 collimator가 설치되며, 허치 말단에는 빔 덤프가 존재한다.

(1) Safety Shutter

빔라인에 적용되는 Safety Shutter는 기본적으로 저장링 내 전자 손실 시나리오에 따라 결정된 ratchet end wall 두께에 등가한 차폐 성능이어야 한다. 또한 Safety shutter는 매우 제한된 입체각을 가지고 빔라인을 통해 빠져나올 수 있는 Gas Bremsstrahlung을 차폐하기에 충분하여야 한다. Gas Bremsstrahlung은 저장링 진공 챔버 내 잔여 기체와 저장링을 따라 회전하는 고에너지 전자가 반응하여 발생한다. 저장링 궤도의 모든 위치에서 발생하지만, 삽입장치가 설치되는 긴 직선 구간에서는 발생확률이 증가하고 직진성이 있어서 방사광 빔라인 지역에서 방사선량 준위를 증가시키는 요인이 된다. Gas Bremsstrahlung에 의한 선량 평가에는 Tromba[12]와 Ferrari[13]의 식을 비교하여 검토하였다. Safety Shutter에 요구되는 최소 납 두께는 31 cm이고, safety shutter는 이와 등가한 능력을 가진 최소 23 cm 두께의 텅스텐으로 제작되는 것이 적합하다.

방사광 사용 중, 즉 safety shutter가 열린 상태에서는 광학 mirror의 offset 이후에 위치한 collimator가 Gas Bremsstrahlung을 차폐하는 역할을 하므로 해당 collimator는 safety shutter와 동일한 두께 요구조건을 갖는다. Mirror 주변과 front-end에 설치되는 collimator는 방사광과 제동복사선의 ray-tracing을 통해 상세 위치와 필요한 두께가 결정된다.

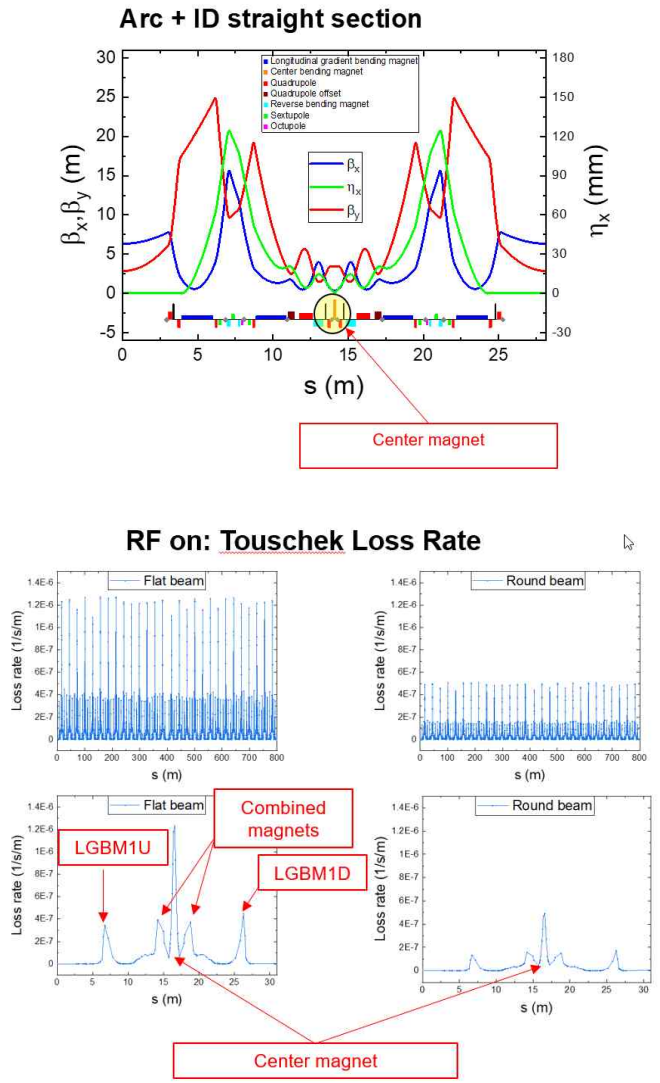
6.2.3 몬테카를로 코드(FLUKA)를 이용한 방사선차폐 상세설계

4GSR 가속기 및 방사광 빔라인 설계가 완료됨에 따라 몬테카를로 코드인 FLUKA (ver. 4-4-0)를 이용하여 앞의 반실험식에 의해 결정된 차폐 요건들을 검증하고 세부 방사선차폐 구조물에 대한 설계와 방사선량 평가를 진행하였다. 또한 보다 세밀한 구조에 대한 설계내용은 운전허가 승인을 위한 방사선안전보고서에 기술될 것이다. FLUKA 코드를 기반으로 방사선량 평가를 하였지만 일부 구조물에 대해서는 몬테카를로 코드인 PHITS나 방사광빔라인 차폐설계 전용코드인 STAC8 등을 비교 평가 및 세부구조 설계는 수행하였다. 특히 저장링-부스터 터널의 기본 차폐구조인 각 위치별 터널 두께를 정밀 평가하였고 설치될 예정인 차폐문 및 미로형 출입구에서의 방사선 누설을 평가하였다. 중성자 라이브러리는 JEFF-3.3을 사용했으며 선속변환계수는 ICRP74의 AP model을 적용하였다.

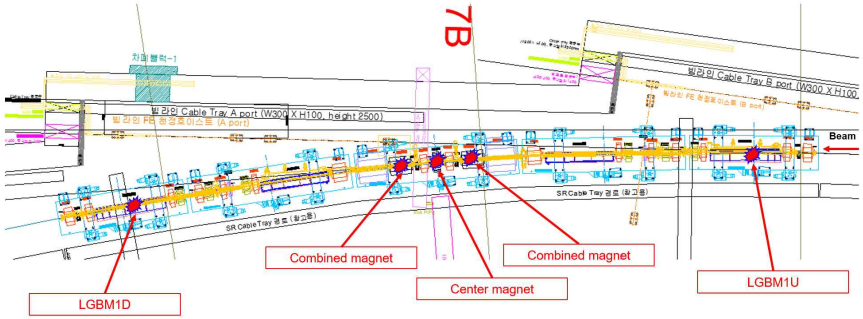
가. 저장링내 전자빔 손실에 대한 상세 평가 (정상운전조건)

본 상세설계 단계에서는 몬테카를로 코드인 FLUKA를 이용하여 다음 절의 반실험식에 의한 차폐 요건에 대한 검증과 함께 세부 차폐구조를 평가하고 설계하였다. 빔손실 정보에 있어서도 저장링 터널 내의 360° 회원 궤도를 따라 일정하게 전자빔 손실이 발생하는 것을 가정하였으나 좀 더 보수적으로 일정 위치에서 주로 전자빔 손실이 발생하는 것으로 평가하였다. 현 설계단계에서 빔궤도 설계그룹의 모사 결과에 근거하여 다음 <그림 6.2.2.6>과 같이 각 셀의 전자빔 궤도에서 5개 지점에서 (center magnet, 2개의 LGBM, 2개의 combined magnet) 전자빔 손실이 발생하며 손실량은 균일하다고 가정하였다.

실제 가속기가 설치되면서 삽입장치나 빔 collimation용 slit 등이 설치되는 경우에 이 빔손실 분포는 변경될 수 있으나 현재 5개 지점의 가정은 3개의 지점이 차폐벽과 가장 가까운 위치에 모여 있는 형태로 빔손실이 극대화되어 있어 충분히 보수적이다라고 할 수 있다.



<그림 6.2.2.6> 저장링 각 셀 기준 빔궤도 모사에 따른 빔손실 예상지점
(5개 지점: center magnet, 2개 LGBM, 2개 combined magnet)



<그림 6.2.2.7> 저장링 각 셀 기준 실제 구성도에 표시한 빔손실 예상지점 예
(5개 지점: center magnet, 2개 LGBM, 2개 combined magnet)

나. 저장링 – 부스터 터널

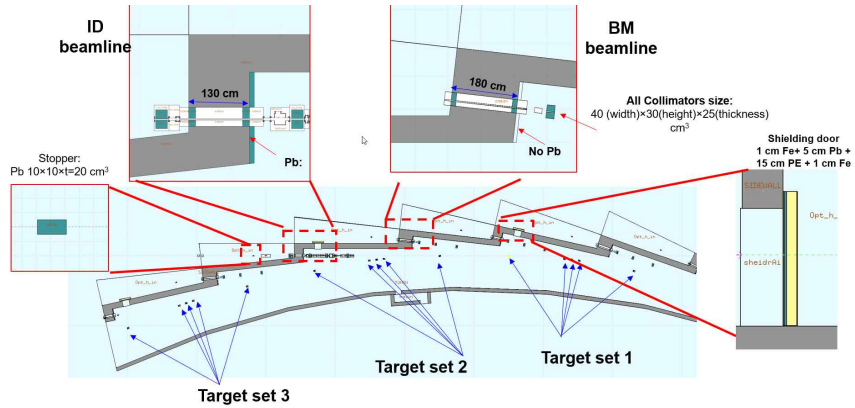
반실험식을 이용한 계산에서 가속기 터널의 기본 구조를 결정하였으나 건설 예산 및 실제 장치의 설치를 고려하여 FLUKA 코드를 이용한 평가에서 일부 차폐 구조를 변경하였다.

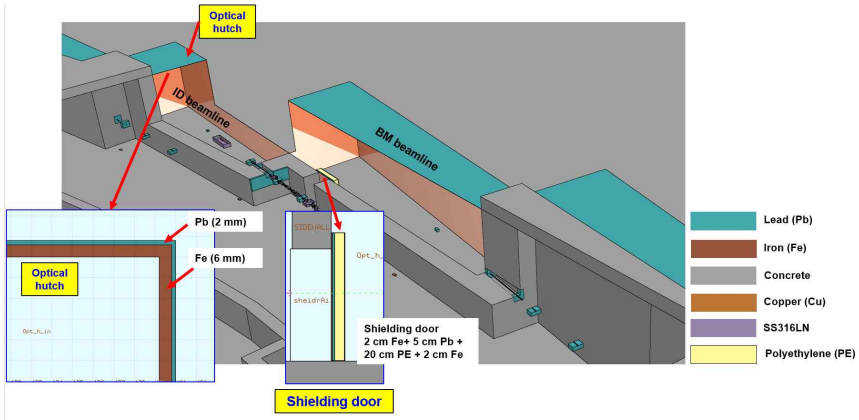
(1) Ratchet wall의 구조 결정

다음 <그림 6.2.2.8>과 같이 저장링의 구조를 FLUKA 입력문에 적용하여 모사하였고 5개의 빔손실 지점에 두꺼운 표적을 (직경 8.7 cm, 길이 17.57 cm Fe target) 가정하고 한 셀의 빔손실량이 5개 지점에 균일하다고 가정하였다.

앞 절에서 반실험식을 이용한 평가에서는 콘크리트와 납으로 구성하여 차폐구조물의 점유 공간을 줄이고자 하였으나 Ratchet end wall에 설치되는 납의 양이 적지 않아서 설치비용이 증가하고, 매우 큰 곡률반경으로 인해 터널 밖의 근접지역은 방사광 빔라인과 터널벽 외부와의 거리가 너무 가까워서 사용불가능한 공간이 된다. 그러므로 가속기 터널 내에 설치되는 납차폐체의 양을 줄이면서 차폐성능을 확보할 수 있는 방향과 수직구조 설계까지 고려해서 Ratchet end wall의 두께와 구성을 새롭게 조정하였다. ID가 설치되는 A 포드 벽에는 콘크리트의 두께를 130 cm로 늘이고 대신

터널 안쪽 납차폐체의 양은 4 cm로 줄였으며, 수직면에서 빔라인 높이로부터 멀어진 위치는 2.5 cm Fe 패널 구조의 차폐체를 설치하였다. 또한 이극 자석의 방사광 빔라인이 설치되는 B 포트에는 터널 내부 벽면의 납차폐를 제거하고 콘크리트 두께를 180 cm로 늘리는 방법으로 구조를 개선하였다.





<그림 6.2.2.8> 방사선량 평가를 위한 Fluka 입력문의 저장링 셀의 구조
(표적은 빔손실 지점을 의미)

ID 빔라인의 Front-end에 설치되는 차폐문은 최대한 두께를 얇게 설계하여 BM 빔라인 설치에 방해가 되지 않도록 하는 것이 중요하다. 외부 철판과 납, 폴리에틸렌(Polyethylene; PE)판으로 구성된 차폐문을 평가하였다. 구성은 다음과 같다.

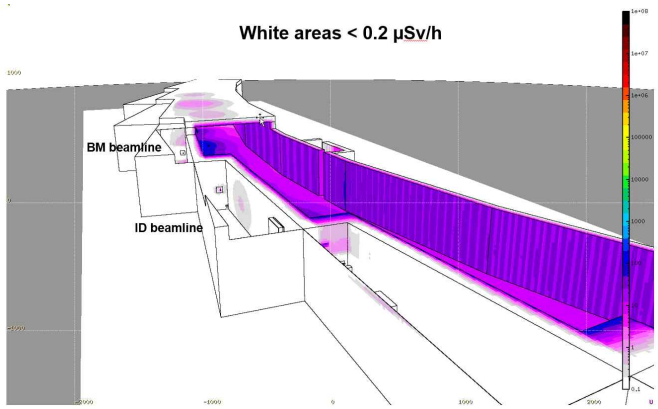
- 1 cm Fe + 5 cm Pb + 15 cm PE + 1 cm Fe

다만 Control shed를 향하는 터널의 차폐벽면(Inner wall)에 설치되는 차폐문은 공간적인 제약이 없으므로 주변 벽 두께와 동일하게 50 cm 콘크리트 문을 설계하였다. <그림 6.2.2.8>에는 방사선량 평가를 위한 차폐문의 대략적인 구조를 보여준다.

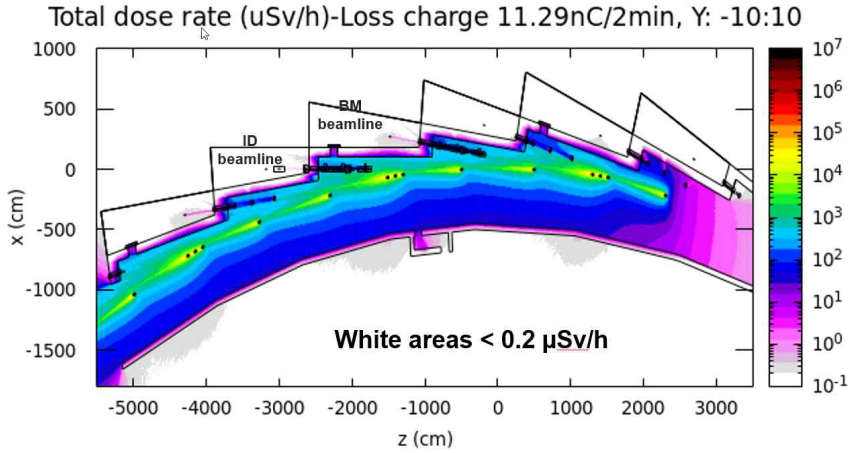
또한 위 <그림 6.2.2.8>에서 보듯이 Control shed에서 가속기 터널로 접근하기 위한 미로 구조에서 철판 문은 안전을 위해 바깥쪽에만 설치하였으며 방사선량 평가에서 철판문에 의한 감소효과는 무시하고 계산하였다.

(2) 가속기 터널 주변의 방사선량 분포 (정상운전조건)

정상적인 운전조건 즉 부스터를 통해 전자빔이 2분마다 공급이 되고 그만큼의 전자빔 만이 2분 동안 저장링 궤도를 따라 고르게 손실되는 경우에 계산되는 방사선량 분포를 다음의 여러 개의 위치에서 제시를 하였다. 3차원 구조에서 전체적인 분포 정도는 보면 <그림 6.2.2.9>와 같이 계산된다. 설계에 반영된 차폐구조물이 충분한 차폐능력을 가지고 있는 것으로 판단된다.

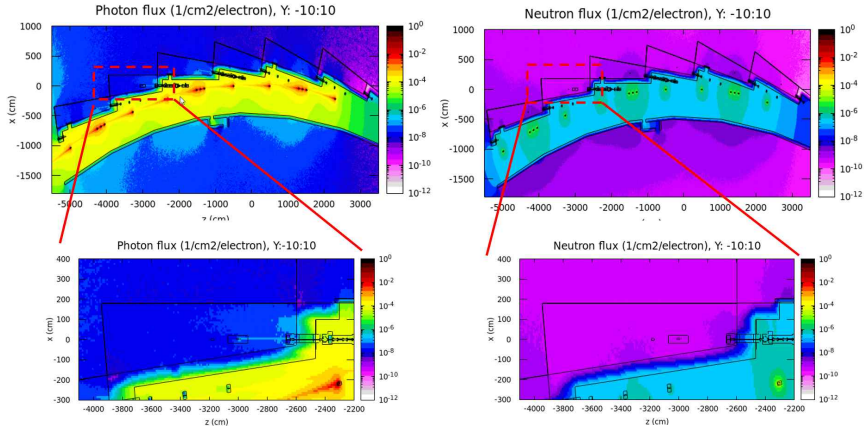


<그림 6.2.2.9> 정상적인 운전 조건에서 저장링 터널내와 주변의 방사선량의 3차원 분포

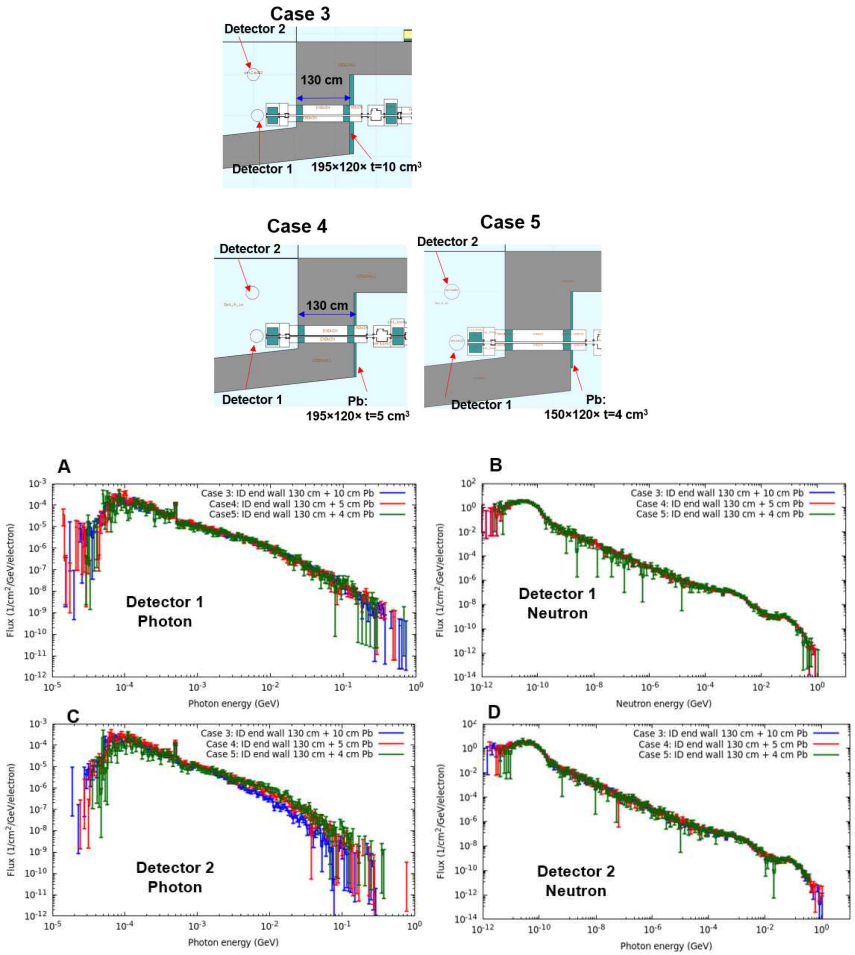


<그림 6.2.2.10> 정상적인 운전조건에서 저장링 터널내와 주변의 방사선량 분포

좀 더 명확하게 ID 빔라인 위치에서 감마선과 중성자의 선속 분포는 다음과 같다. 전자 저장링의 특성상 저장링-부스터 터널 주변에서는 감마선이 상대적으로 많은 것으로 확인된다. 또한 터널 밖의 주요 위치에서 감마선과 중성자의 에너지 분포도 확인을 하였으며 그 결과는 <그림 6.2.2.12>와 같다. 서로 다른 차폐조건에서 비교를 하였으나 에너지 분포형태는 다르지 않았다.

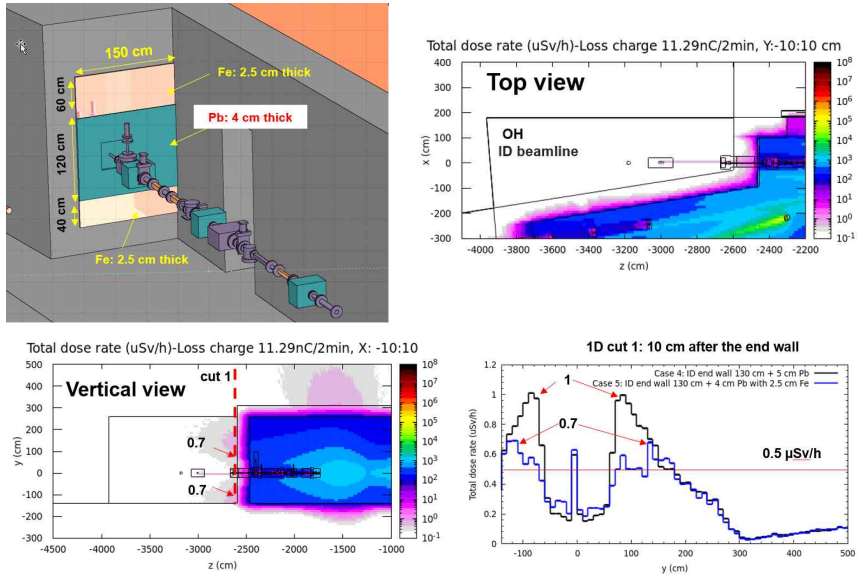


<그림 6.2.2.11> 정상적인 운전 조건에서 저장링 터널내와 주변의 방사선속 분포



<그림 6.2.2.12> 서로 다른 차폐 조건에서 터널 외부의 방사선 에너지 분포 계산 결과
(최종 평가된 설계조건은 Case 5임)

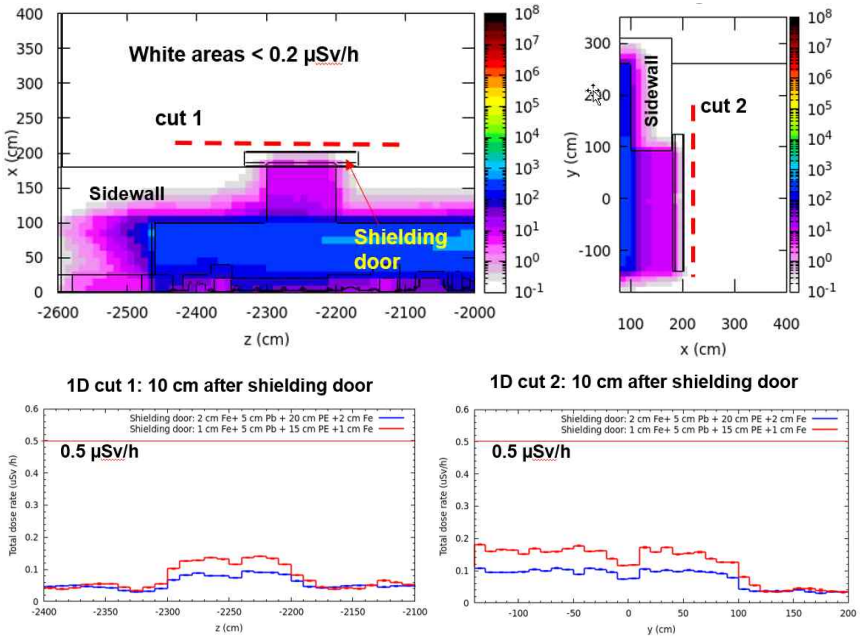
정상운전조건에서 ID 빔라인의 저장링 터널내 구조 및 방사선량 분포는 <그림6.2.2.12>와 같다. 터널 외부에 바로 광학허치를 배치하고 광학허치 내에는 first optical component로 mirror를 설치하여 방사선의 산란도 함께 평가하였다. <그림 6.2.2.13>의 수직분포에서 모서리와 인접한 지점에서 기준치인 0.5 μSv/h를 초과하는 방사선량이 확인되지만 실제 접근가능한 지역이 아닐 것으로 예상된다. 필요에 따라 2.5 cm 철판의 높이를 아래쪽으로 확장할 수 있다.



<그림 6.2.2.13> Ratchet end wall 내외부의 방사선량 분포
(최종 평가된 설계조건은 Case 5임)

동시에 정상운전조건에서 터널벽에 해당하는 80 cm 콘크리트, 50 cm 콘크리트는 모두 충분한 차폐성능을 갖는 것으로 확인되며 천정의 경우에도 50 cm 콘크리트 조건에서 일부 출입을 제한하는 것이 가능하다고 판단된다.

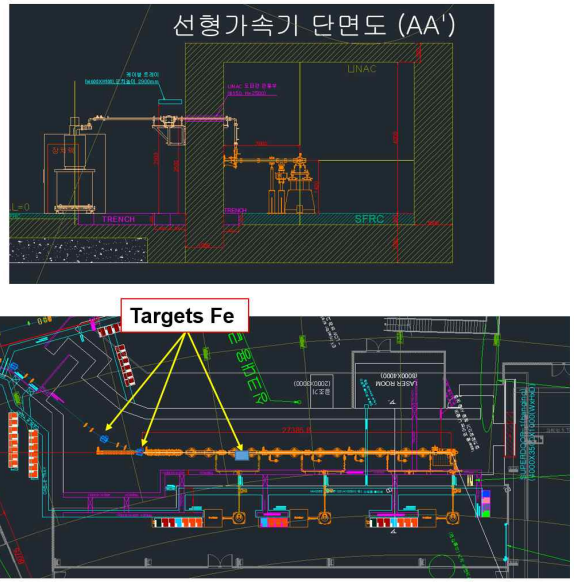
앞에서 언급한 차폐문에 대한 방사선량 평가 결과를 자세히 살펴보면 <그림 6.2.2.14>와 같다. 현재 설계된 차폐구조 (1 cm Fe + 5 cm Pb + 15 cm PE + 1 cm Fe) 설계조건에서 충분한 차폐성능을 갖는 것으로 확인된다. 차폐문외부에서 최대 방사선량이 0.2 μSh/h 미만이므로 좀 더 얇은 두께의 차폐문이 가능할 것으로 예상되며, 실제 차폐문의 제작용 설계도가 작성되면 세부 구조에서의 누설을 평가하기 위해 재계산을 할 예정이다.



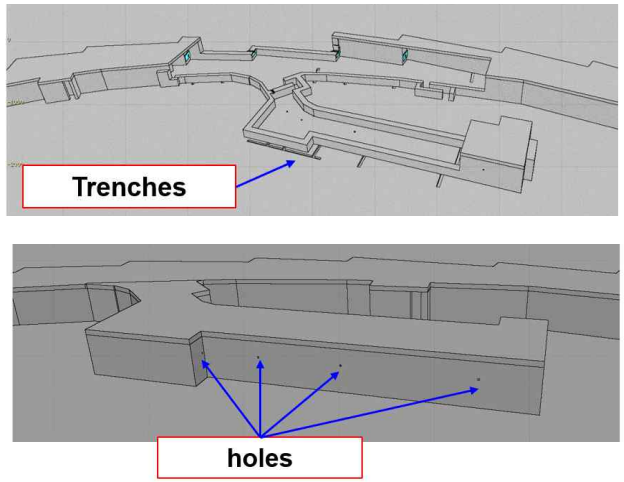
<그림 6.2.2.14> 실험지역 쪽 차폐문 주변의 방사선량 분포

다. 선형가속기 터널

선형가속기의 최대 전자빔 에너지는 200 MeV 현재 2대의 Klystron에서 공급되는 RF 출력에 의해 4개의 가속관에서 전자빔을 가속하는 구조이다. 선형가속기 터널의 콘크리트 벽과 천정의 두께는 모두 일정하므로 200 MeV로 완전히 가속된 상태에서 두꺼운 표적에 충돌하는 경우에 대해서 방사선량을 평가하였다. 동시에 설계상에 언급되어 있는 터널 벽면의 관통구와 트렌치도 함께 Fluka 입력 구조에 설정하여 이를 통한 누설도 평가하였다. 선형가속기 터널은 저장링-부스터 터널과 미로형태의 통로를 통해 출입할 수 있으며, LTB 전자빔라인은 콘크리트 벽에 설치된 관통구를 통해 연결된다. 각각 독립적인 운전이 가능하여 상호 운전 중일 때 반대편 터널에 사람이 출입할 수 있도록 하고자 한다. (통제출입조건)

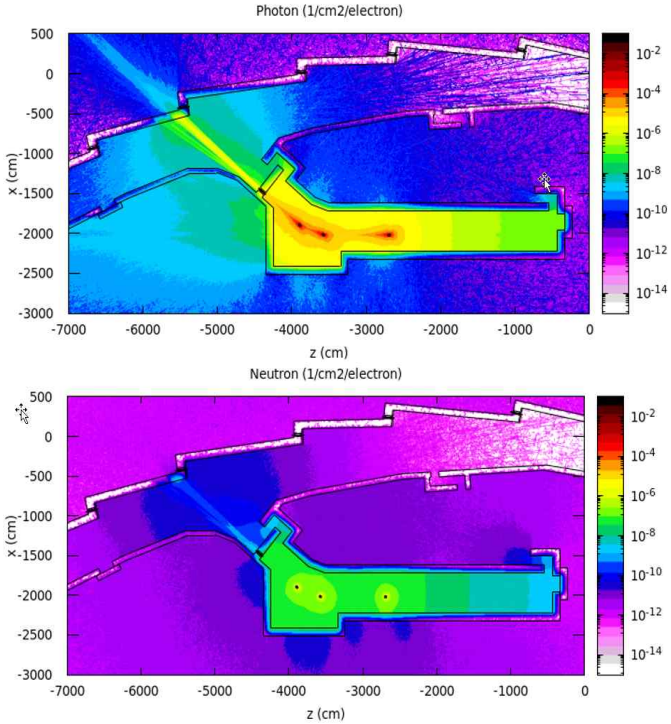


<그림 6.2.2.15> 선형가속기 및 터널의 구조와 빔손실 가정 위치

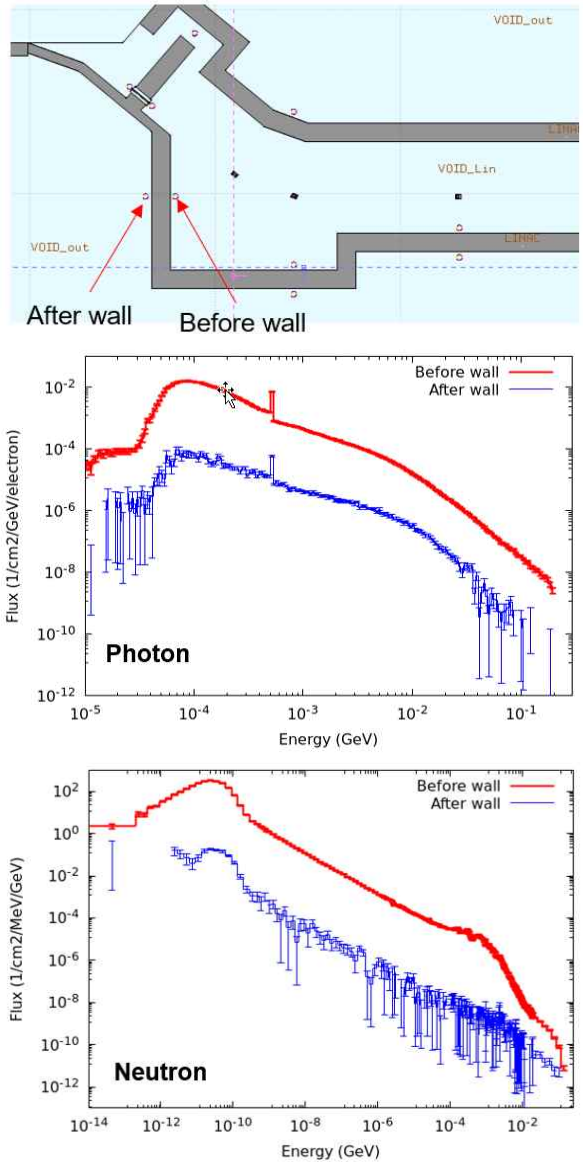


<그림 6.2.2.16> 방사선량 평가를 위해 FLUKA 코드의 입력문에 작성된 선형가속기 터널 구조

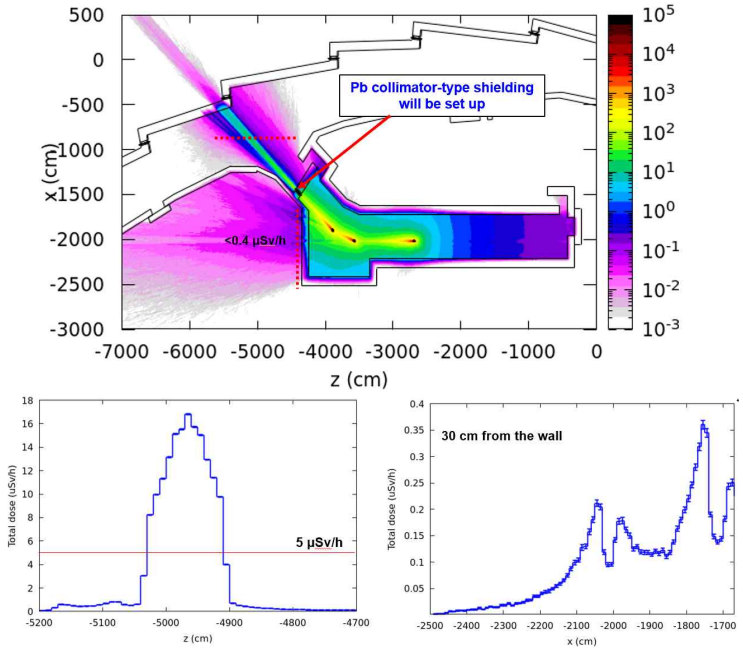
현재 방사선량 평가에서는 LTB 빔라인의 관통구를 밀폐구조가 아닌 40 cm × 40 cm 오픈형으로 설정하였기 때문에 <그림 6.2.2.17>의 계산 결과에서와 같이 상당한 방사선량이 저장링 터널쪽에서 확인된다. 그러나 LTB 빔라인 설치와 함께 콜리메이터 형태의 철 구조물 차폐체를 설치하면 해당 방사선량은 기준치 미만으로 줄어들 것이 예상된다. 또한 3지점에서 균일하게 빔손실이 발생하는 경우로 평가되었기 때문에 추후 재평가할 때는 더 낮은 방사선량이 도출될 것이다. 사고조건의 방사선량은 본 계산의 결과로서 추정할 수 있는데 터널 외부에서 0.1 mSv/h로서 방사선감시시스템과 interlock 시스템을 통해 방사선량이 관리될 것이다.



<그림 6.2.2.17> 3개의 지점에 전자빔 손실이 발생할 경우 선형가속기 터널 주변의 감마선과 중성자 선속 분포

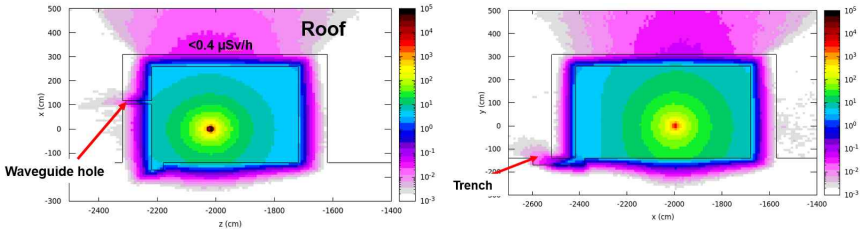


<그림 6.2.2.18> 선형가속기 터널 내부와 외부에서 감마선과 중성자의 에너지 분포



<그림 6.2.2.19> LTB의 저장링 터널 위치에서의 방사선량 분포 및
선형가속기 터널 외부에서의 방사선량 분포 (빔라인 높이)

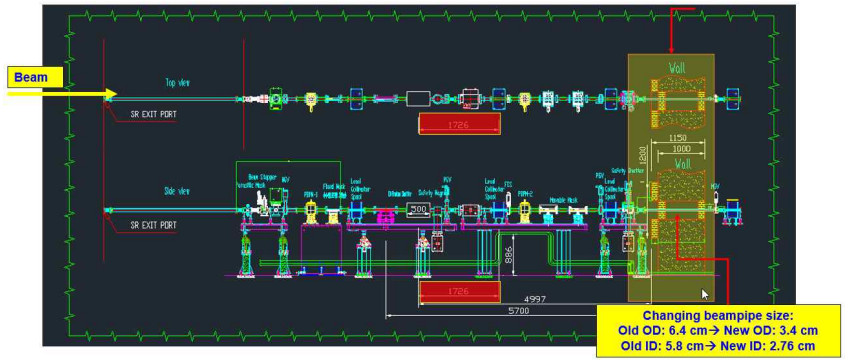
선형가속기 터널에는 여러 개의 관통구와 트렌치가 설치되는데 대표적인 것에 대해서 아래와 같이 누설되는 방사선량을 평가하였는데 기준치 이하임을 확인하였다.



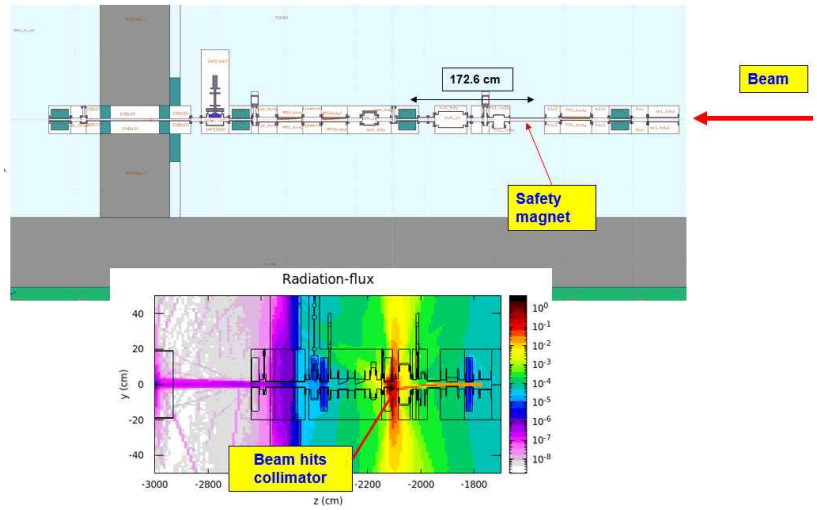
<그림 6.2.2.20> 선형가속기 터널의 관통구와 트렌치로의 누설 방사선량 평가

라. 방사광 빔라인 - 안전용 자석 배치 설계 (비정상 운전조건)

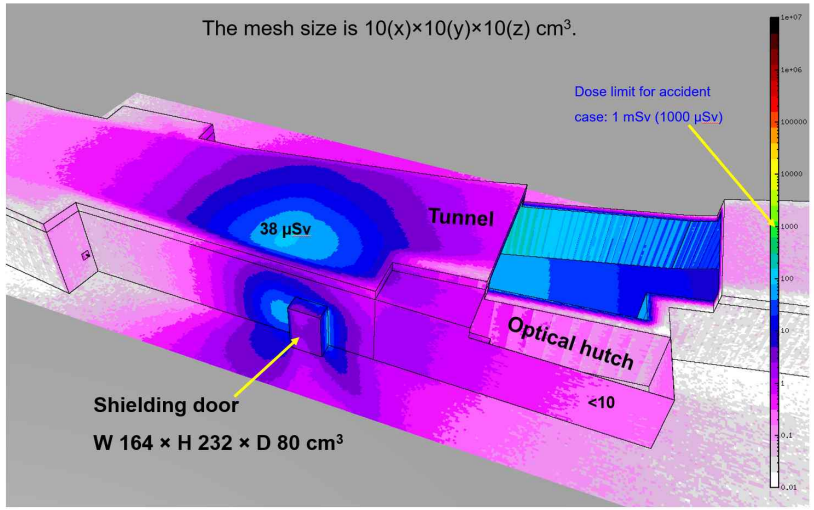
4GSR 저장링의 이극 자석들은 각각의 별도의 전원장치로부터 전류를 공급받기 때문에 해당 전원장치가 고장나는 경우에 전자빔이 방사광 빔라인의 경로를 따라 저장링-부스터 터널 외부로 누설될 수가 있다. 이것은 방사광가속기 시설에서 최악의 사고 시나리오로 평가된다. PLS-II와 같이 전체 이극 자석을 한 개의 전원장치에서 일괄 공급하는 방사광가속기에서는 고려하지 않아도 되는 것이지만 4GSR에서는 해당 시나리오가 가능하기 때문에 이를 대비한 안전장치를 설치해야 한다. 이것이 Safety magnet (안전용 자석)이다. 즉 방사광 빔라인 경로를 통해 진행하는 4 GeV 전자빔을 50 cm 구간의 영구자석을 이용해서 아래쪽으로 방향을 꺾어주고 결국 후방에 설치된 두꺼운 덤프용 납에 충돌하게 하는 것이다. <그림 6.2.2.21>에 방사광 빔라인의 front-end 지역 장치의 배치도와 이를 이용해 작성된 Fluka 코드의 입력 geometry 그리고 계산된 방사선량 분포를 보여준다. 사고조건 (비정상 운전조건), 즉 저장된 모든 전자빔이 safety magnet에 의해 덤프용 납 콜리메이터에 충돌하는 경우 광학허치 내외의 방사선량 분포는 <그림 6.2.2.22>와 같다. 이러한 비정상 운전조건에서 사람이 피폭에 놓일 수 있는 경우는 2가지로 safety shutter가 close 상태에서는 광학허치 내의 방사선량이 중요하고, safety shutter가 open 상태에서는 광학허치 외부의 방사선량이 중요하다. 평가된 방사선량은 모두 사고 조건의 기준치인 0.1 mSv/event보다 작은 최대 38 μSv/event로 확인되었다.



<그림 6.2.2.21> 방사광 빔라인 front-end의 수평 및 수직 구조:
적색으로 표시한 부분이 안전용자석과 덤핑용 납콜리메이터간의 거리



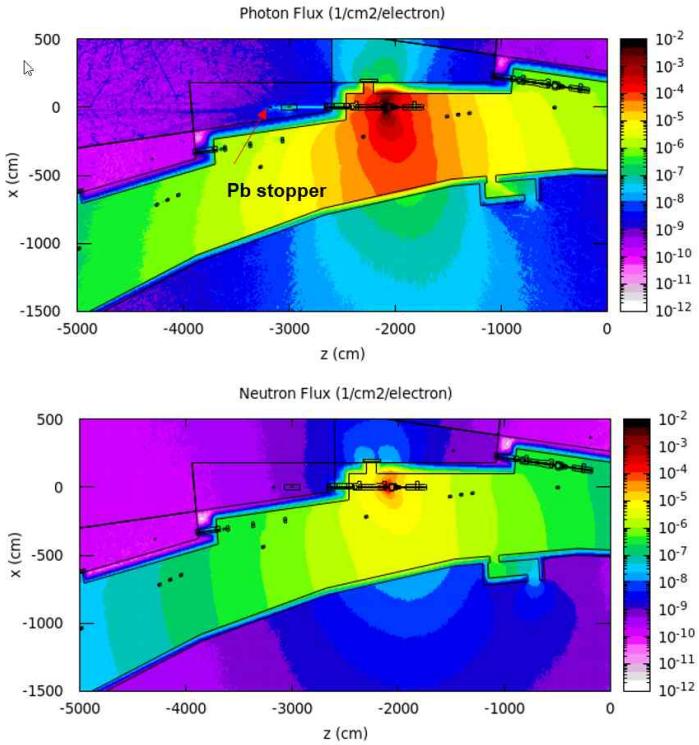
<그림 6.2.2.22> 방사광빔라인 프론트엔드를 반영한 FLUKA 코드의 입력구조 및 방사선량 분포



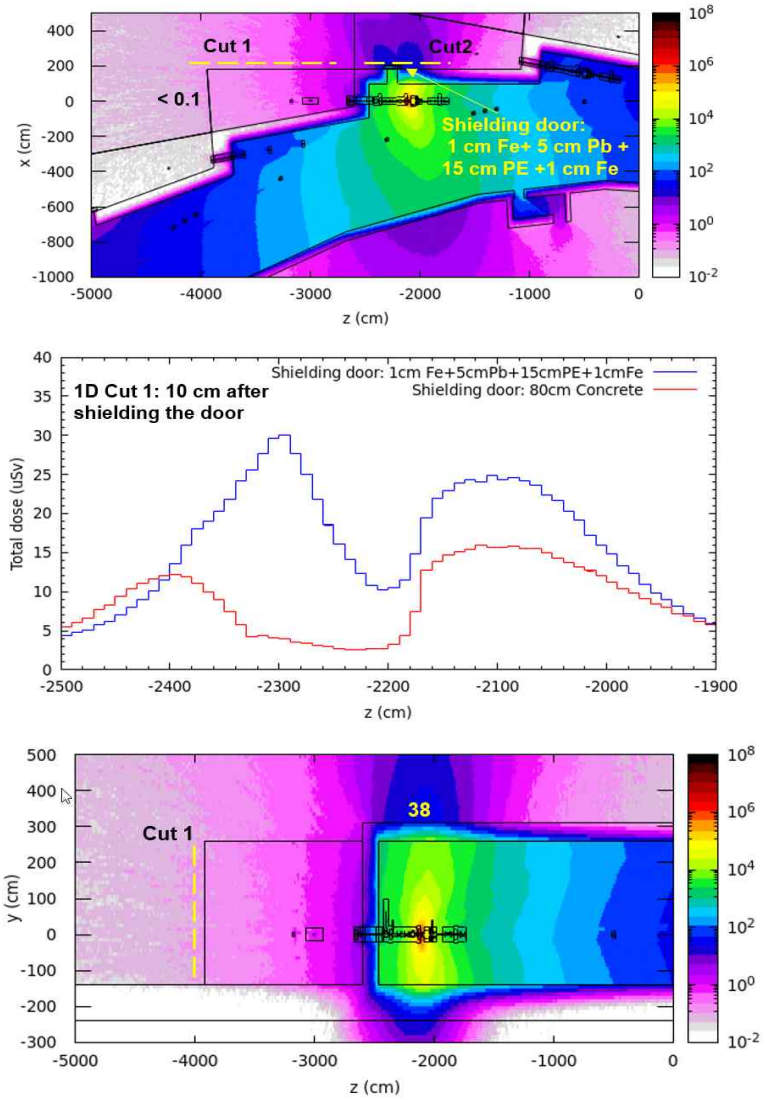
<그림 6.2.2.23> 안전용 자석 주변의 저장링-부스터 터널 내외의 방사선량 분포

방사광 빔라인마다 설치되어 있는 Safety shutter도 open된 상태에서 전자빔이 터널 밖으로 진행하는 것을 예방하는 것이기 때문에 이 사고 조건에서는 Safety shutter는 열려 있고 Optical hutch는 close 되어있는 상태이다. 따라서 다음 계산 결과 그림에서와 같이 Optical hutch 내에 광학기기를 설치한 상태에서 방사광관을 통해 누설된 고에너지 방사선이 광학기기와 충돌하여 외부 방사선량에 얼마나 기여하는지도 평가하였다.

방사광 빔라인의 방사선차폐에서 고려되는 ray-tracing에서는 터널 안쪽 Front-end 영역에는 2개의 납콜리메이터로 충분하지만 여기서는 전자빔 차단용으로 1개의 납콜리메이터가 추가된 것이다.



<그림 6.2.2.24> 저장되어 있는 4 GeV 전자빔이 모두 안전용 자석에 의해 경로가 변경되어 납콜리메이터와 충돌하는 경우 감마선과 중성자의 공간분포



<그림 6.2.2.25> 저장되어 있는 4 GeV 전자빔이 모두 안전용 자석에 의해 경로가 변경되어 납콜리메이터와 충돌하는 경우 방사선량 분포

6.3 방사화 평가 및 환경영향

4GSR은 약 4 GeV 정도의 상대적으로 높은 에너지 입자를 사용한다. 그러나 입자의 종류가 전자이기 때문에, 수백 MeV의 양성자가속기와 비교해도 핵반응 발생률과 중성자 생성률이 낮다. 이런 특성으로 인해 가속기 운전 중 가속기 구조물의 방사화 현상은 매우 제한적으로 특정 지점에서만 발생하며, 그 규모도 크지 않다. 이는 PLS-II를 포함한 여러 방사광가속기의 운전 기록에서 확인된다. 하지만 장기간 운전하면 특정 구조물을 교체하거나 해체하는 과정에서 소량이지만 방사화된 부속품이 생성될 수 있다. 이런 상황에 대비하기 위해 방사화된 부속품을 처리할 인프라를 미리 준비해야 한다.

방사광가속기가 공기나 냉각수와 같은 액체상의 방사성 동위원소를 거의 생성하지 않기 때문에, 외부 환경에 미치는 영향은 매우 적다. 그러나 이런 점을 보장하기 위해 초기 검증과 주기적인 확인이 필요하다. 반면, 가속기 운전 중 발생한 중성자는 하늘 위의 공기 분자와 충돌해 먼 지역까지 방사선을 전달할 수 있다. 이를 "skyshine" 현상이라고 한다. 이 현상에 대한 평가를 수행하고, 부지 경계에서의 방사선량을 계산해야 한다. 이를 통해 방사선량이 안전 정책과 규정에 부합하는지 확인할 수 있다. 따라서, 방사광가속기의 운전이 외부 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 구조물의 방사화 현상, 방사성 동위원소의 생성, "skyshine" 현상 등을 고려하고 주기적인 검증과 평가를 실시해야 한다. 이렇게 함으로써 방사광가속기의 안전성과 장기 운전이 환경에 미칠 수 있는 영향을 최소화할 수 있다.

6.4 방사선 안전시스템

방사광가속기의 안전한 운영을 위해 필수적인 요소로, 지역 및 환경 방사선 감시시스템과 개인안전연동시스템이 강조된다. 방사선차폐의 설계와 시운전 결과는 초기 계획 단계에서 결정되며, 이는 기기의 기본적인 안전 구조를 확립한다. 그러나, 실제 운전기간 동안 연구소의 직원들과 방사광 이용자들의 안전을 보장하는 것은 방사선 감시시스템과 개인안전연동시스템의 역할이 매우 중요하다.

이 시스템들은 연속적인 감시와 즉각적인 대응을 가능하게 함으로써, 어떠한 운영 상황에서도 연구 활동이 안전한 환경에서 이루어질 수 있도록 한다. 방사선감시 시스템은 실시간으로 방사선 수준을 측정하여 연구소원 및 사용자의 방사선량이 설계 기준치를 초과하는지 연속적으로 감시 및 관리하고, 개인 안전연동 시스템은 위험 수준이 증가할 경우 자동으로 기기의 운영을 중지시켜, 신속한 안전조치를 취할 수 있도록 한다.

6.4.1 방사선감시시스템

가. 개요

방사광가속기에서 발생되는 방사선은 주로 전자빔이 물체와 충돌하여 발생하는 이차방사선으로 제동방사선과 중성자로 구성된다. 방사선감시시스템은 이렇게 생성된 직접 방사선과 유도 방사선을 실시간으로 모니터링하여 시설 내외부의 작업종사자, 이용자 및 일반인들의 안전을 보장하고 적절한 조치를 취할 수 있도록 한다.

방사선감시시스템은 지역방사선감시시스템(Radiation Monitoring System, RMS)과 환경방사선감시시스템(Environment Radiation Monitoring System, ERMS)으로 구분되며, 각각 연구소 내부와 주변 환경의 방사선량을 연속적으로 모니터링한다. 연구소는 차폐체 외부의 방사선 선량이 법적 선량한도 연간 20 mSv를 초과하지 않도록 엄격히 제한하고 있으며, 작업자에 대해서는 더욱 보수적인 연간 10 mSv의 한도를 설정하고 있다. 이러한 제한치를 준수하기 위하여 4GSR의 설계 기준치를 초과하는 방사선량을 감지할 수 있도록 RMS가 특히 중요한 위치에 설치되어 운영된다. 또한 본 연구소의 부지 경계에서의 방사선량이 연구소 관리기준 연간 0.25 mSv를 초과하지 않도록 연구소 주변에 ERMS를 설치하여 환경에 대한 방사선량을

연속적으로 감시 및 관리한다. 방사선감시시스템은 기준 이상의 방사선량을 감지하거나 회로 고장 시 경보 알람을 발생시키며 필요시 PSI와 연동된 빔 정지 인터록 신호를 발생시켜 작업자와 이용자들의 안전을 지킨다.

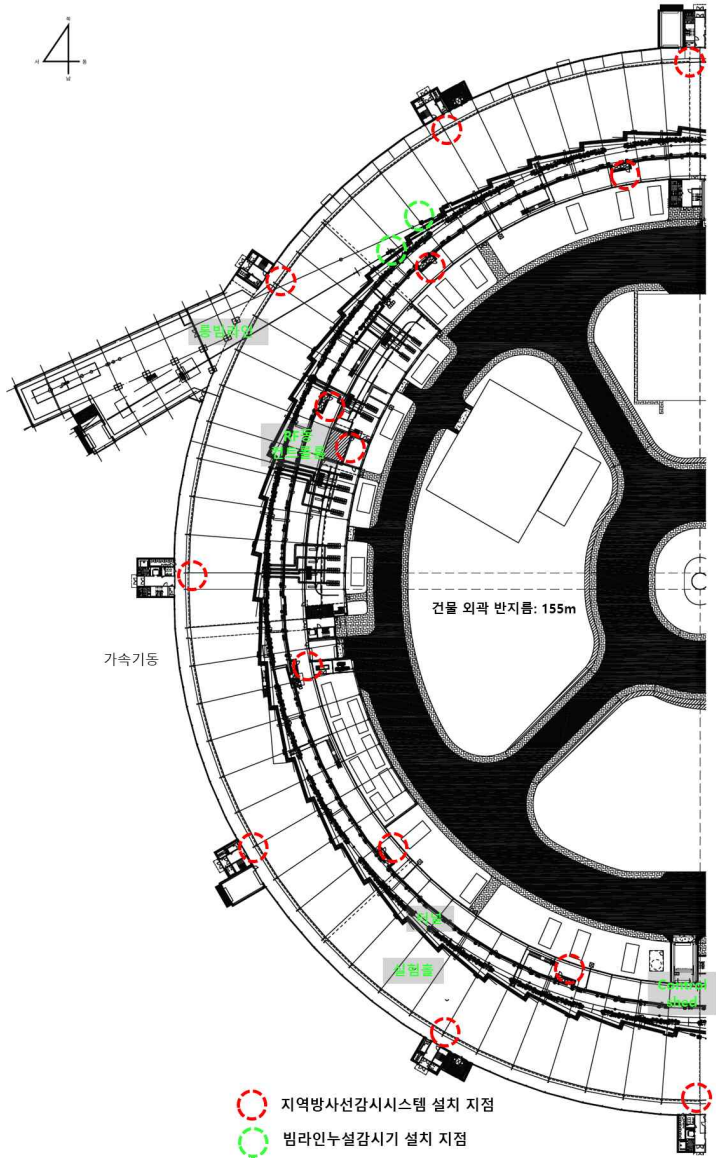
나. 방사선감시시스템 설치 위치

방사선감시시스템의 검출기 설치 위치를 선정할 때에는 시설의 운영한도, 빔손실 지점 및 터널 외부의 선량 분포 정보를 고려해야 한다. 방사선감시시스템의 검출기는 운영 한도와 비교하여 측정된 방사선량률이 그 값이 근접하거나 초과할 우려가 있는 곳에 주로 설치되며 그 위치는 빔손실이 잦은 지점과 사고 운전 시 선량이 높은 곳으로 예상되는 곳이다. 지역방사선감시시스템는 주로 터널의 주요 출입구, 전자빔의 경로가 변경되는 위치, 입사구역, 빔라인 실험지역 등 방사선 준위가 높을 것으로 예상되는 지점에 설치한다. 또한 ERMS 경우 일반인에 대한 방호 차원에서 가속기 시설 부지 경계에서 인가와 인접한 위치에 설치되어 선량의 변화에 유의하여야 한다.

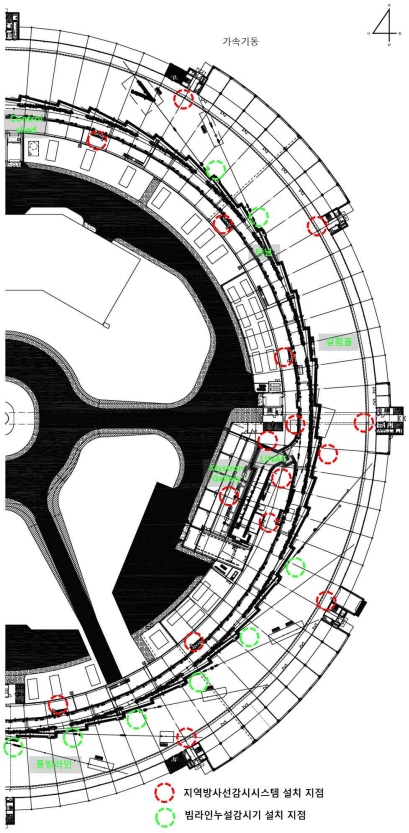
지역 및 환경 방사선감시시스템은 가속기동에 총 40개 지점, 환경에 4개 지점에 설치된다. 가속기동의 경우, 입사구역 Downstream of linac dump, Linac-to-booster ring (LTB), Booster ring-to-storage ring (BTS) 부근에 4곳, klystron Gallery에 1곳, Control shed에서 Maze door 부근에 12곳, RF동 Control room 부근에 1곳, 가속기동 출입구 부근 12곳마다 한 쌍의 중성자 측정용 검출기와 광자선 측정용 검출기를 모두 설치, 빔라인 optical hutch 부근 10곳에 빔라인 beam loss 모니터링으로 광자선 측정용 검출기를 설치하여 총 40개소의 지역방사선 감시시스템을 구성 및 운영할 예정이다. 환경의 경우, 부지 경계 북측으로 제1주차장 부근 1곳, 동측으로 제4주차장 부근 1곳, 서측으로 사이언스파크 부근 1곳, 남측으로 연구실험지원 3동 부근 1곳마다 한 쌍의 중성자 측정용 검출기와 광자선 측정용 검출기를 설치하여 총 4개소의 환경방사선감시시스템을 구성 및 운영할 예정이다. 참고로 상세 위치는 추후 필요에 따라 조정될 수 있다.

<표 6.4.1.1> 지역 및 환경 방사선감시시스템 설치 위치 및 설치 대수

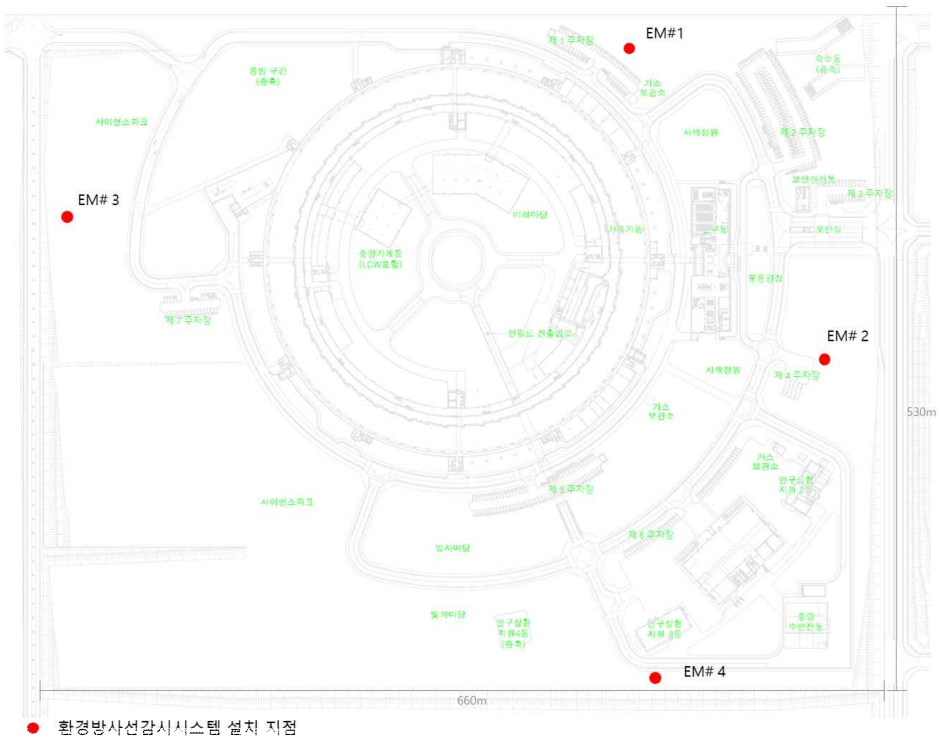
방사선감시시스템	위치	설치 지점 수	측정 방사선
지역방사선감시시스템 (RMS)	Linac dump, LTB, BTS 부근	4	광자선(γ,X), 중성자
	Klystron Gallery 내	1	
	Maze door 부근	12	
	RF동 Control room	1	
	가속기동 출입구 앞	12	
	빔라인 optical hutch 부근	10	광자선(γ,X)
환경방사선감시시스템 (ERMS)	북측 제 1주차장 부근	1	광자선(γ,X), 중성자
	동측 제 4주차장 부근	1	
	서측 사이언스파크 부근	1	
	남측 연구실험 3동 부근	1	
총 설치 지점 수		44	



<그림 6.4.1.1> 가속기동 서측 지역방사선감시시스템 설치 위치



<그림 6.4.1.2> 가속기동 동측 지역방사선감시시스템 설치 위치



<그림 6.4.1.3> 환경방사선감시시스템 설치 위치

다. 방사선감시시스템 구성

방사선감시시스템은 크게 방사선 측정을 위한 광자선/중성자용 검출기, 측정된 방사선의 준위와 위험을 실시간으로 알리며 컨트롤하는 현장지시계, 안정적인 신호 송수신을 위한 네트워크 통신, 시스템의 제어, 데이터 저장 및 관리, 그리고 사용자에게 실시간 정보 제공을 위한 서버와 운영프로그램으로 구성된다. 이러한 구성요소 및 장치들은 정전이 발생하더라도 안전을 보장하기 위해, 무정전 전원공급장치(UPS)를 통해 전력을 공급받아 정상적으로 작동할 수 있도록 설계하였다.

(1) 광자선/중성자 검출기

방사선감시시스템에 사용되는 Survey meter 검출기를 선정하기위해 고려되어야 하는 성능으로는 민감도, 에너지 측정 범위, 에너지 의존도, 방향 의존도, 응답 속도, 최대측정선량률, 등가선량범위, 장기적 안전성, 방사선 구분능력, 측정불확도 등이 존재한다. 방사광가속기에서는 높은 에너지로 가속된 전자가 구조물이나 차폐체와 상호작용하면서 에너지를 잃으면서 주로 포톤과 중성자 형태로 수백 MeV에 이르는 연속적인 에너지의 이차방사선을 방출한다. 따라서 방사선감시 시스템에 사용되는 검출기는 저에너지 범위부터 수백 MeV까지 폭넓은 에너지 측정 범위의 사양을 요구한다. 특히, 고에너지의 중성자는 투과력이 강해 차폐벽을 뚫고도 수십에서 수백 MeV의 고에너지의 중성자가 살아남을 수 있어 중성자 검출기의 고에너지 측정 상한이 중요하다. 또한 방사광가속기의 전자빔은 RF 장치를 통해 가속되기 때문에 반복적인 짧은 주기를 가진 펄스 형태이며 이로 인해 발생되는 이차방사선들 역시 동일한 주기를 가진 펄스 형태이다. 따라서 결국 방사선감시시스템에 사용되는 검출기는 이러한 펄스형태의 고에너지, 고선량의 방사선을 높은 효율과 빠른 응답 속도로 측정할 수 있어야 한다. 외에도 기계적 내구성과 안정성을 지녀 극한 환경에서도 안정적인 작동이 가능해야 한다. 이러한 성능 요건들을 고려했을 때, 방사선감시시스템 검출기는 광자선 측정을 위한 가압형이온전리함과 중성자 측정을 위한 Modified AB rem counter를 한 세트로 구성하여 사용하려고 한다. 다만, 빔라인 optical hutch 부근에 설치될 방사선 감시 시스템의 검출기는 섬광체 기반 검출기로 구성된다. 섬광체 기반 검출기는 상대적으로 높은 검출 효율로 빔라인 PTL (Photon Transfer Line) 부근으로 누설되는 Bremsstrahlung 광자선의 방사선을 감지하고 고준위 알람 혹은 interlock을 작동시켜 optical hutch 부근에 상주하는 작업종사자와 이용자의 안전을 확보하려한다.

앞서 기술되었던 검출기들의 주요 특징들을 <표 6.4.1.2>에 간략히 기술하였다.

<표 6.4.1.2> 이온전리함, AB rem counter, 섬광체 검출기 주요 특징

구 분	특 징
Ionization chamber (이온전리함)	- 전류모드로 사용하여 높은 선량장에서 정밀 선량 측정 적합 (사실상 dead-time 없이 측정) - 넓은 에너지측정범위 - 펄스방사선 측정에 사용 용이 - 내구성, 안정성 뛰어남
Modified AB Rem counter	- 기존 AB rem counter의 Attenuator 주변 납레이어 추가 - 넓은 에너지 측정 범위 및 개선된 에너지 response - 중성자 민감도 좋음 - 내구성, 안정성 뛰어남
Scintillation detector (섬광체 검출기)	- resolving time이 매우 짧음 - 측정효율이 상대적으로 높음 - 펄스방사선 측정에 사용 용이 - 에너지 선형성, 방사선 에너지 분간 가능 - 값이 쌈

(2) 현장지시계

현장지시계는 방사선감시시스템의 핵심 요소로, 검출기에서 측정된 신호를 수집하고 입력받은 변수에 의해 다양한 환경마다 방사선 단위로 환산하여 실시간으로 방사선 준위와 위험을 알리며, 필요한 경우 interlock을 작동시켜 안전조치를 취하는 역할을 수행한다. 현장지시계의 요건이자 주요 기능은 다음과 같다.

○ 방사선 신호 수집, 환산 및 출력 : 검출기로부터 신호를 수집하고, 이를 입력변수에 따라 방사선 단위로 환산하여 이를 실시간으로 출력한다. 방사선 단위 환산은 정상운전 상황과 사고 상황 등 각 상황에 맞게 적용할 수 있는 계산 모드를 내장하며 연결된 검출기와 완벽히 호환되어야 한다.

○ 알람 및 경고, Interlock 시스템 : 미리 입력된 설정된 제한값(접근 경보, 고준위 경보 등)에 따라 여러 경광등과 부저음이 작동한다. 선량이 고준위 경보를 초과하면, 내부 릴레이가 작동하여 인터락 신호를 송출하고, 외부 회로를 활성화시킨다.

○ 통신 및 제어 : RS-485 혹은 RS-232의 시리얼통신 포트 2개 이상을 지원하여 중성자와 광자선용 계측기 신호들을 동시에 수집 및 컨트롤을 하게 되며 중앙서버와 실시간 데이터를 송수신하게 된다.

○ 부가적 기능 : 앞서 설명한 주기능 외에도 자동시간교정, 자동제로보정, 자동백라이트조명 기능들이 일반적으로 필요하다.

(3) 네트워크 통신

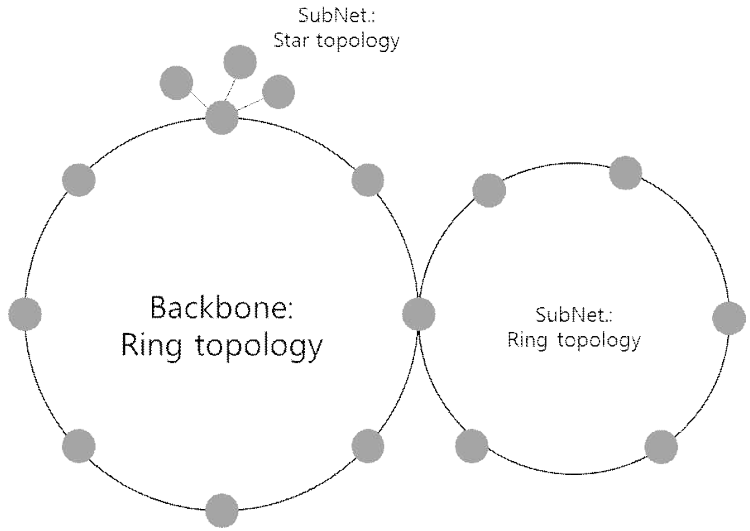
방사선감시시스템은 부지 경계와 시설 내 여러 지점에 분포된 다양한 현장지시계와 중앙 서버 간에 안정적이고 신뢰할 수 있는 네트워크 통신을 필요로 한다. 이러한 네트워크 통신은 트래픽(Traffic) 혼잡이나 장애 없이 안정적으로 동작해야 하며, 이를 통해 실시간 방사선 신호를 수집하고 현장지시계와 관련 장치를 원격으로 제어하는 데 문제없어야 한다. 네트워크 통신 기반이자 필수요소인 물리계층과 데이터링크계층을 환경과 목적에 따라 적절히 구성하여 효율적이고 안정적인 네트워크 통신을 구성한다.

○ 물리 계층

물리계층은 네트워크 통신의 물리적 기반을 형성하는 계층으로 데이터 전송을 위한 물리적 매체와 네트워크 토폴로지를 의미한다. 가속기동 건물의 지름이 약 310 m에 달하며, 그 내부에는 전자빔 발생 및 가속장치, 그리고 수십 개의 빔라인 주변에 수많은 지역방사선감시시스템들이 넓게 분포하고 있다. 심지어 가속기동 주변 외부 환경에는 환경방사선감시시스템이 지역방사선감시시스템보다 더욱 넓게 분포해 있다. 따라서 이러한 넓은 지역에서 시스템간 서버간 서로 안정적이고 효율적인 통신을 위해서 구리 도선 LAN 케이블이 아닌 광케이블을 사용한다. 구리 도선 LAN 케이블을 이용한 통신은 긴 거리에서 주로 Intersymbol Interference (ISI)와 같은 현상으로 데이터 손실과 전송 지연 등의 문제를 야기하는 반면 광케이블을 이용한 광통신은 긴 거리에서도 데이터 손실 없이 빠르게 데이터를 전송할 수 있기 때문이다. 또한 광케이블은 시설 내 RF 장비들에 의한 전자기파 영향을 받지 않는다는 장점을 가지고 있다.

가속기동 건물 내 지역방사선감시시스템 주요 네트워크의 물리적 토폴로지는 링형으로 구성한다. 1개 이상의 현장지시계들과 연결된 각각의 수 십개의 노드들은 서로 원형으로 연결되어 backbone을 구성하고 있으며, 하나의 노드나 링크에 장애가 발생하더라도 반대 방향으로 우회시켜 데이터 전송이 계속될 수 있도록 Redundancy를 제공할 수 있다. 또한 Star형 토폴로지처럼 케이블을 1:1로 연결시키지 않으므로 작업 시간이나 케이블 비용을 크게 절감하면서 한 노드에 2개 이상의 링크가 구성되어 Redundancy 또한 제공하게된다. 한 번에 하나의 노드에서만 데이터를 제공하기 때문에 패킷이 충돌할 위험이 거의 없어 효율적으로 전송할 수 있다. 또한 필요시

<그림 6.4.1.4>와 같이 다양한 토폴로지의 SubNet 네트워크 추가적으로 구성하여 효율적인 네트워크 통신망을 구성할 수 있다.



<그림 6.4.1.4> 링형토폴로지 네트워크의 다양한 토폴로지 네트워크 확장성

○ 데이터링크 계층

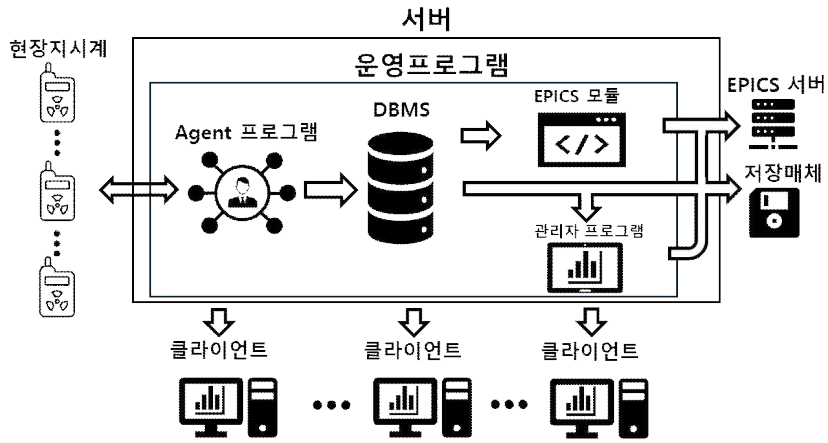
데이터링크 계층은 물리계층에서 전달된 데이터를 프레임으로 구성하고, 오류를 검출 및 수정하며, 흐름 제어와 네트워크 장치 간의 통신을 관리하는 역할을 한다. 이러한 역할을 수행하는 네트워크의 핵심 장치로 스위치가 있다. 특히, 광케이블 통신을 지원하는 광스위치는 네트워크의 주요 노드로, 데이터 전송, 트래픽 제어, VLAN 구성, 포트미러링, 멀티캐스트, snooping, Redundancy, 장치 간 통신 관리 등 다양한 프로토콜과 기능을 제공한다.

방사선감시시스템의 경우 안전이 최우선이므로, 데이터링크 계층에서는 시스템 장애 발생 시 신속한 복구와 데이터 전송의 지속성을 보장해주는 내고장성, Redundancy를 지원하는 프로토콜이 가장 중요하다. 이러한 내고장성 기술을 가진 프로토콜은 대표적으로 ERPS (Ethernet Ring Protection Switching), RPR (Resilient Packet Ring), RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol), FDDI (Fiber Distributed Data Interface),

SONET (Synchronous Optical Network), RPR (Resilient Packet Ring), AFDX(Avionics Full-Duplex Switched Ethernet) 등이 있으며 이러한 프로토콜을 지원해주는 스위치를 선정하는 것이 중요하다.

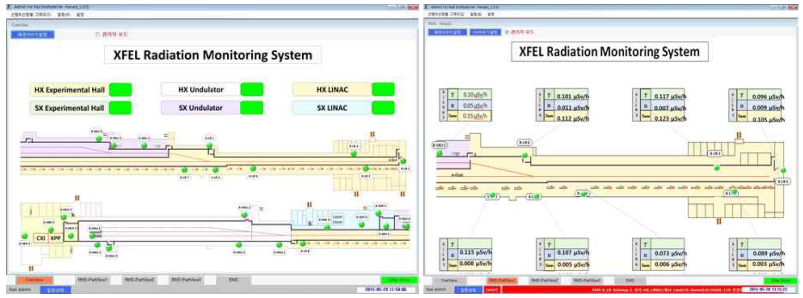
(4) 서버와 운영프로그램

방사선감시시스템에서 서버는 네트워크의 중심 역할을 수행하며, 각 현장지시계와 통신하여 측정 데이터를 수집하고 저장한다. 서버에 설치된 운영프로그램은 이러한 데이터를 처리, 분석, 각종 클라이언트에 전송, 출력, 제어하는 기능을 담당하게 된다. 운영프로그램은 각 현장지시계와 통신하여 데이터를 수집하는 Agent, 수집된 선량률 및 여러 데이터를 안전하게 보관하고 관리하는 Data Base Management System (DBMS), 저장된 데이터를 실시간 조회, 출력, 제어, 분석을 수행하는 관리자 프로그램, 저장된 데이터를 EPICS 서버로 전송하는 EPICS module로 구성된다. 운영프로그램의 각 구성요소는 모두 내부망(Intranet) TCP/IP 통신 프로토콜 기반으로 동작하여 안정적이고 신뢰있는 데이터 송수신이 이루어진다. 서버는 전력 손실을 대비하여 UPS 전원을 독립적으로 공급받으며 데이터 손실에 대비하여 현장지시계로부터 수집한 데이터와 처리된 데이터들은 주기적으로 CD와 DVD 등과 같은 저장 매체에 저장시킨다. EPICS 서버와 이동식 저장매체에 데이터를 백업함으로써, RMS 중앙서버의 데이터베이스에 문제가 발생하더라도 과거의 데이터가 손실되지 않고 안전하게 보존할 수 있다.

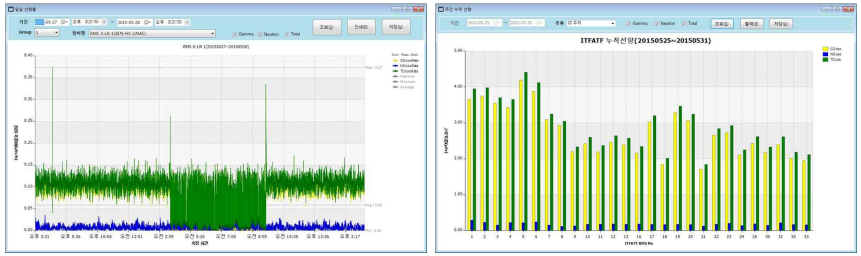


<그림 6.4.1.5> 서버와 운영프로그램 구성도

운영프로그램의 관리자 프로그램은 서버 프로그램과 클라이언트 프로그램으로 나뉜다. 서버의 서버 프로그램은 현장지시계의 제어와 수집된 데이터의 분석을 담당하며, 교정변수, 경보, 빔 정지 신호, interlock 설정과 같은 장치 제어 작업을 수행할 수 있다. 클라이언트 프로그램은 서버뿐만 아니라 클라이언트에 설치되어 데이터베이스에 저장된 데이터를 실시간으로 모니터링하고, 보고서 출력 등의 기능을 지원한다. 서버 프로그램과 클라이언트 프로그램의 화면 예시와 세부 기능을 다음 그림과 표로 나타내었다. 그림 화면 예시와 같이 관리자 프로그램을 통해 실시간 선량 변화를 지역별로 한눈에 파악할 수 있도록 하여 방사선 정보의 추적과 사고 시 빠른 대응을 할 수 있도록 한다.



<그림 6.4.1.6> 관리자프로그램 RMS 모니터링 화면 예시 (참조. PAL-XFEL 모니터링 화면)



<그림 6.4.1.7> 관리자프로그램 선량 및 선량율 화면 예시 (참조. PAL-XFEL 모니터링 화면)

<표 6.4.1.3> 관리자 프로그램 세부 기능

	관리자 프로그램	
	서버 프로그램	클라이언트 프로그램
세부기능	- 데이터 수집 및 전송: 지시계 데이터 수집, 데이터베이스 구축, EPICS 모듈을 통한 EPICS 서버로 실시간 전송 - 실시간 데이터 조회: 지시계의 데이터, 선량률 그래프 실시간 조회 - 현장지시계 제어: BKG, 교정변수, 운영모드, 알람, 인터락 설정 - 운영 상태 확인: 각 현장지시계의 운영 상태를 실시간 모니터링 - 데이터 조회 및 보고서 출력: 과거 선량률 데이터, 알람 및 비정상 데이터 조회 및 자동 보고서 출력 - 통신 지원: TCP/IP, RS485, Optical 등의 통신 지원 - 프로그램 구성: 프로그램 Visual C++로 구성, 그래픽 NI Measurement Tool로 구성	- 모니터링 기능: 각 현장지시계의 상태와 데이터를 지속적으로 관찰 - 실시간 데이터 조회: 각 현장지시계로부터 실시간 데이터 및 선량률 그래프 조회 및 변화 수치 즉각 확인 - 과거 데이터 조회: 데이터베이스에 저장된 과거 데이터 조회 - Visual C++로 프로그램 구성 - NI Measurement Tool 그래픽 구성

다. 운영

(1) 경보 및 빔정지 기준

4GSR의 운전은 RMS ready 신호가 PSI에 입력되어야 가능하다. RMS의 상태를 알려주는 RMS ready 신호는 각 구역별 그룹화된 최소 1개의 검출기가 정상 작동해야 Ready 신호가 켜진다. 운전 중에는 기준 방사선량이 초과하면 경보 혹은 빔 정지신호를 송출한다. 그 값은 아래 표와 같다. 빔정지에는 1시간 누적선량을 사용한다. 빔 정지신호(Interlock 신호)는 각 현장지시계에서 내부 릴레이를 작동시켜 PSI의 Remote IOC에 접점신호를 제공한다. 기준선량을 초과할 경우, 가속기 운전이 정지되며, 원인을 조치한 후 운전을 재개한다.

<표 6.4.1.4> 지역방사선감시시스템의 경보 및 빔정지 기준

기준값	방사선량률	1시간 누적선량	동작
접근 경보 (Alert Alarm)	3 μSv/h	-	황색 경광등, 1초 주기 경고음
고준위 경보 (High Alarm)	5 μSv/h	-	적색 경광등, 연속 경고음
빔정지 (Interlock)	-	5 μSv	PSIS 연동

(2) 검교정

4GSR의 방사선감시시스템 검출기는 자체적으로 검교정을 실시할 계획이다. 검교정의 주기는 제조사에서 권장하는 검교정 주기를 따른다. 4GSR의 정기 보수기간에 대부분의 검출기를 검교정하고, 정기보수 기간에 교정하지 못한 검출기는 가속기 운영 중에 검교정한다. 이러한 상황에 대비하기 위하여 여분의 예비 검출기를 구매, 준비하여 가속기 운영 중 방사선감시 지점이 누락 되지 않도록 한다.

라. 방사화 및 시료 분석시스템

각종 가속기 부품들의 방사화나 공기나 가속기의 냉각을 위한 저전도수의 방사성 오염을 측정하기 위하여 HPGe 검출기 측정시스템을 운영한다. 핵종 식별 및 핵종별 방사능 크기를 측정하여 오염을 정량적, 정성적으로 분석한다. 소량의 샘플링이 쉬운 시료는 고정형 HPGe 검출기 시스템으로 오염을 측정한다. 가속기 금속 부품들 주로 진공 용기, 전자석 등 샘플링이 어렵거나 넓은 면적에 대한 불특정 환경에서의 오염을 In-Situ 방식으로 측정을 할 시 이동형 검출기 HPGe 측정시스템을 이용한다. HPGe 검출기 측정시스템은 크게 HPGe 검출기, Preamplifier, Amplifier, ADC, MCA로 구성된다.

마. 이동형 방사선 측정기

현장에서 방사선을 측정하기 위해 휴대용 방사선 검출기를 운용할 계획이다. 공간 감마선 측정을 위해 이동형 이온 전리함을, 공간 중성자선 측정을 위해 휴대용 REM 카운터를 사용하며, 잔류 방사능(방사화) 측정을 위해 GM 계수관과 다목적 운영을 위한 다양한 프로브를 지원하는 비례계수관 검출기를 사용할 예정이다. 또한, 방사선작업종사자가 고방사선 구역에 출입할 때와 임시출입자에게 필요한 보조 선량계로 전자선량계를 운용할 계획이다.

참고문헌

[1] Ko, I. S., Kang, H. S., Heo, H., Kim, C., Kim, G., Min, C. K., ... & Lee, K. B. (2017). Construction and commissioning of PAL-XFEL facility. Applied Sciences, 7(5), 479.

[2] Jung, N. S., Kim, M. H., Kim, H. H., Shin, D. C., Kim, G., & Lee, H. S. (2021). Development and operation of fiber-based radiation protection beam-loss monitor for PAL-XFEL. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 330, 521-528.

[3] Jung, N. S., Lee, H. S., Oh, J. H., & Kim, B. J. (2015). Radiation shielding design of the PAL-XFEL. Journal of the Korean Physical Society, 66, 425-431.

[4] Sheu, R. J., Wang, J. P., Chen, C. R., Liu, J., Chang, F. D., & Jiang, S. H. (2003). Network-based real-time radiation monitoring system in Synchrotron Radiation Research Center. Health physics, 85(4), 485-493.

[5] Rajan, G. O. V. I. N. D. A., & Izewska, J. O. A. N. N. A. (2005). Radiation monitoring instruments. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, Vienna: International Atomic Energy Agency, 101, 121.

[6] Berkvens, P., Holbourn, M., Ryder, R., Pruvost, J. B., & Colomp, P. (2006). Design and practices at four European synchrotron radiation facilities. Radiation measurements, 41, S200-S205.

[7] Lin, Y. C., Chen, C. R., Chen, A. Y., Liu, J. C., Huang, S. J., Wen, P. J., ... & Kao, S. P. (2021). Real-Time Radiation Monitoring System with Interlock Protection Mechanism in Taiwan Photon Source. Proc. IPAC'21, 2256-2259.

[8] 윤건, 권대현, 권순창, 박용운, & 이영준. (2006). 산업용 네트워크에서 링 토폴로지 기반 이중화 네트워크에 관한 연구. 한국통신학회 학술대회논문집, 1676-1679.

6.4.2 개인안전연동시스템(Personnel Safety & Interlock System)

가. 개요

4GSR 시설에 설치되는 개인안전연동시스템(Personal Safety & Interlock System, 이하 PSIS)은 4GSR 운영에 있어 주요 안전시설 중의 하나로서, 비정상 운전 및 불의의 사고로부터 연구소원 및 실험자의 생명을 보호하기 위한 계통이다. 장비 보호를 위한 계통은 대부분 각 장치의 고유한 특성에 따라 이루어지므로 각 실무 부서들에게 다루게 되며, 여기서는 인명보호의 측면에서 설치되어, 방사선으로부터 연구소원 및 실험자의 안전을 보장한다.

나. 기본요구조건

○ 신뢰도 (Reliability)

신뢰도란 장비가 주어진 환경에서 의도된 기간 동안 목적하는 기능이 고장나지 않고 발휘할 확률을 말한다. 즉 장비가 주어진 시간 또는 거리동안 고장이 일어날 수 있는 횟수를 확률적으로 산출한 값을 말하며, 일반적으로 고장률이라 말하고 "λp"로 표시한다. PSIS는 104시간을 기준으로 한다.

$$\lambda_p - \frac{\text{고장횟수}}{10{,}000\,(\text{시간})} \quad \text{(수식 6.4.2.1)}$$

○ 고장안전 (Fail-safe)

결함이나 오류 동작이 발생했을 때 미리 정해진 안전 상태로 되돌리는 시스템으로 전원중단으로 감지기(sensor)가 단락되거나 케이블 연결 등이 단락되었을 때의 상태가 안전 상태가 되도록 설계한다.

○ 이중화 (Redundancy)

동일한 기능을 하는 제품을 중복 사용하여 고장에 대비하고 신뢰성을 높인다.

○ 자기진단 (Self-test)

기기와 선로의 동작시험이 가능하도록 하는 자가진단 기능이 있어야 한다.

○ 단순화 (Simplicity)

오작동을 방지하기 위해 최대한 간단한 구조로 하며 다른 제어 케이블과는 분리하여

설치한다. 구역별로 케이블을 정리하고 유지보수 및 테스트가 용이하도록 한다.

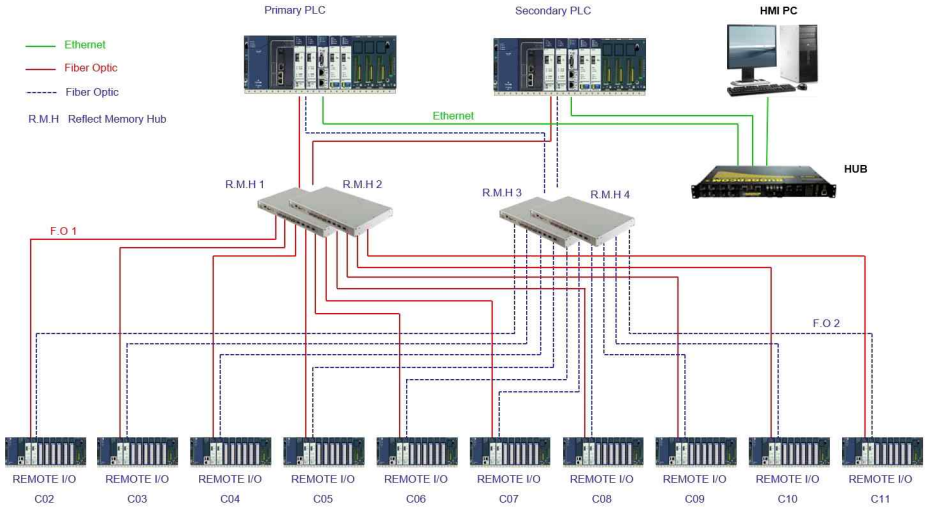
○ 케이블 보호 (Cable Protection)

케이블 손상에 의한 기능저하 및 예기치 못한 작업자들의 실수에 의한 단선, 피복절개 등을 미연에 방지하도록 독립된 케이블 덕트를 사용한다.

다. 구성 및 기능

○ Main Sequence System

Programmable Logic Controller (PLC) 기반의 이중화된 PSIS의 주 관리체계를 말한다. PSIS의 모든 작동 시나리오를 저장하고 있으며, 하부 시스템으로부터 신호를 입력받으면 정해진 작동 시나리오대로 하부 시스템을 작동시키기 위한 신호를 출력한다.



<그림 6.4.2.1> Main Sequence System 구성도

Main Sequence System의 구성도는 <그림 6.4.2.1>과 같고, 그 구성 기기는 PLC CPU, Memory Sync, Data Link, Remote Input/Output 모듈이다. 하나의 PLC Rack에는 CPU, Memory Sync, Data Link가 설치되는데, 이중화를 위하여 두 개의 PLC Rack이 병렬로 설치되며, Hot Standby 방식을 사용한다. 4GSR에서 Remote I/O

Rack은 총 10개소로 나누어서 설치하는데, 4GSR의 저장링 둘레가 크고 입출력 제어 요소가 곳곳에 있기 때문이다. CPU Rack과 Remote I/O Rack #1은 서버실에 설치되고, 나머지 9개의 Remote I/O Rack은 Linac과 SR Control Shed에 설치된다. PLC CPU Rack과 Remote I/O Rack과의 통신은 Memory Xchange module을 통해서 PLC CPU에 전달되며, 이때의 케이블은 광섬유를 이용한다. Reflect Memory Hub와 Remote I/O는 Star 방식으로 구성하여 Network를 최대한 안정적으로 구성한다. Main Sequence System의 구성 방식 및 PLC 구성품은 다음과 같다.

(1) PSI PLC CPU Hot Standby 방식

운전중인 시스템과 동일한 시스템이 동시에 실행되는 것으로서 운전중인 시스템에 장애가 발생하면 Standby 중인 시스템이 즉시 작동함으로써 시스템의 중단없이 계속적인 운전이 실행되는 것이다. 두 시스템 사이의 데이터는 실시간으로 미러링(Mirroring)을 통해 동기화되고 있으므로 Standby System으로 절체되더라도 데이터 손실이나 값의 변화 없이 운전을 한다.

(2) PSI PLC CPU Hot Standby 방식의 기본 조건

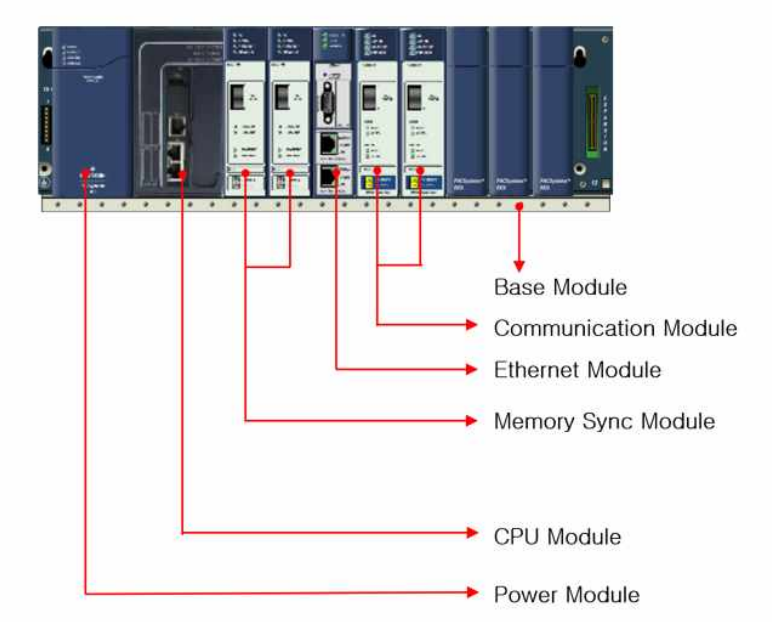
- Active System과 동일한 구성의 Standby System이 구현되어 있어야 함
- Active System과 Standby System 간 실시간 메모리 동기화가 구현되어야 함
- 절체시 Remote I/O와 즉각적인 데이터 교환이 이루어져야 함
- 절체시 데이터 손실 또는 메모리값의 변화가 있어서는 안 됨

(3) PSI PLC CPU Hot Standby System의 장점

- 시스템 신뢰성 및 안정성 증가 : Hot Standby 방식을 통해 PSI 시스템의 중단없이 연속운전이 가능하므로 시스템의 신뢰성과 안정성이 증가함
- 위험감소 : Hot Standby 방식은 예상치 못한 하드웨어 오류로부터 사용자의 설비 및 시설을 보호하며 위험에 대한 노출을 줄여줌

(4) Main PSI PLC CPU Rack (C01) 구성요소

Main PSI PLC CPU 시스템은 신뢰성을 충분히 갖는 CPU를 사용하여 병렬로 Redundancy CPU를 설치하며, Hot Standby 방식을 사용하여 실시간 절체가 가능하도록 하기 위해서는 다음과 같은 구성요소들이 필요함



<그림 6.4.2.2> Main PSI PLC CPU Rack (C01) 구성도

① Power Module

- Input Voltage : 120 ~ 240 VAC, 125 VDC
- Input Power : 40 W
- 모델명 : IC695PSA140
- 제조사 : EMERSON

② CPU Module

- Processor Speed : 1 GHz dual-core
- CPU Memory : 64 Mbytes
- User Flash Memory : 64 Mbytes built-in
- Redundancy Central Processing CPU
- 모델명 : IC695CPE330
- 제조사 : EMERSON

③ Memory Sync Module

이중화 통신을 위한 모듈로써 이중화 링크로 설치된 RMX (Redundancy Memory Xchange) 모듈(모델명 : IC695RMX128)에 의해 제공

- 이중화 CPU간 메모리 동기화를 위해 필요함
- User memory : 128 MB SDRAM
- Connectors : Fiber Optic LC type
- Fiber Optic Cable : Multi-Mode Cable
- Operation Speed : 2.12 Gbaud
- 모델명 : IC695RMX128
- 제조사 : EMERSON

④ Communication Module

- PLC CPU와 Remote I/O module을 연결하기 위한 통신 모듈
- R.F.M 통신 모듈은 광케이블을 통해 연결되며, 통신속도는 2.12 GByte
- Reflect Memory 네트워크에 연결된 모든 R.F.M 통신 모듈과 2.12 GByte의 속도로 memory를 교환하는 Reflect Memory 통신방식
- User memory : 128 MB SDRAM
- Connectors : Fiber Optic LC type
- Fiber Optic Cable : Single-Mode Cable

- Operation Speed : 2.12 Gbaud
- 모델명 : IC695RMX228
- 제조사 : EMERSON

⑤ Ethernet Module

- Data Rate : 10/100 Mbps
- Connectors : RJ-45
- Ethernet Port : 2
- 모델명 : IC695ETM001
- 제조사 : EMERSON

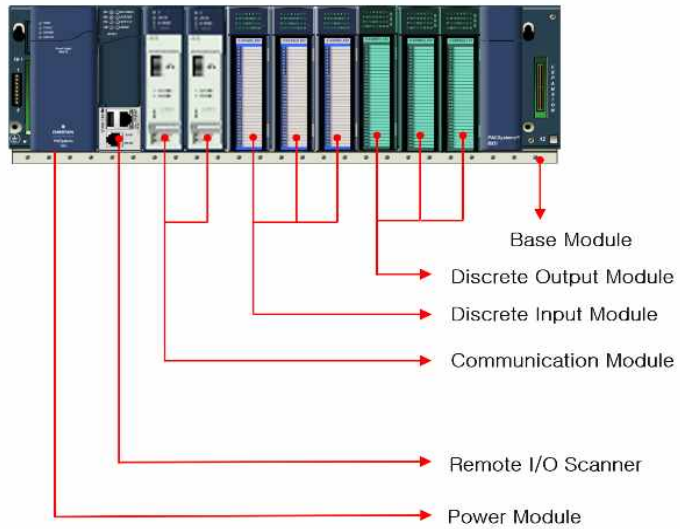
⑥ Base Module

- Slot no : 12 slot
- 모델명 : IC695CHS012
- 제조사 : EMERSON

⑦ R.F.M(Reflect Memory) HUB

- 여러 개의 Reflect Memory 통신 모듈을 연결하여 Reflect Memory 통신 네트워크를 구축하는 장치로서 2.12 G Speed로 통신
- Single-Mode Cable Length : 10 km (max)
- Multi-Mode Cable Length : 300 m (max)
- Power Requirements : 90 to 264 VAC, 47 to 440 Hz
- Temperature : -40 ℃ ~ +85 ℃
- 모델명 : VMIACC-5595
- 제조사 : GE / ABACO

(5) Local Remote I/O Rack (C02~C011) 구성요소



<그림 6.4.2.3> Local Remote I/O 구성도

⑧ Power Module

- Input Voltage : 120 ~ 240 VAC, 125 VDC
- Input Power : 40 W
- 모델명 : IC695PSA140
- 제조사 : EMERSON

⑨ Remote I/O Scanner

- Memory : DI-32 Kbits, DO-32 Kbits
- Program storage : 5 Mbytes
- 모델명 : IC695CPE305
- 제조사 : EMERSON

⑩ Communication Module

- Reflect Memory 통신 모듈
- User memory : 128 MB SDRAM
- Connectors : Fiber Optic LC type
- 모델명 : IC695RMX228
- 제조사 : EMERSON

⑪ Discrete Input Module

- Input Voltage : 24 VDC
- Input point : 32 point
- Response time : 0.5 ms
- 모델명 : IC694MDL660
- 제조사 : EMERSON

⑫ Discrete Output Module

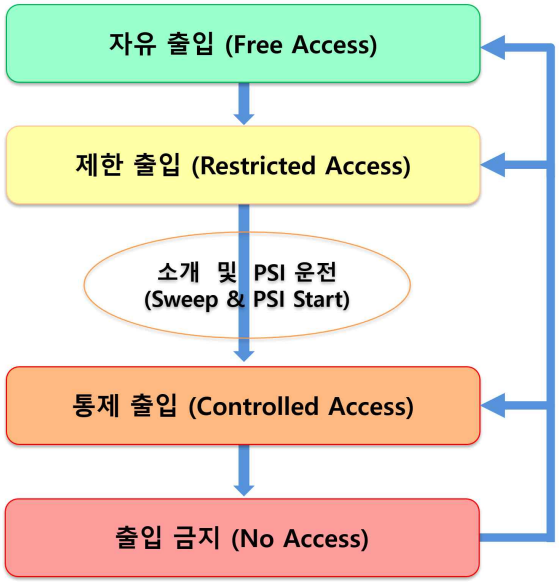
- Output Voltage : 24 VDC
- Output point : 32 point
- Response time : 0.5 ms
- 모델명 : IC694MDL754
- 제조사 : EMERSON

⑬ Base Module

- Slot no : 12 slot
- 모델명 : IC695CHS012
- 제조사 : EMERSON

○ Access Control System

방사선관리구역의 출입을 관리하기 위한 시스템으로 센서와 동작기기를 말한다. Access Control System의 구성 기기는 Limit Switch, ID Card Reader, Key bank와 Mechanical Door Lock, Electric Door Lock, Emergency Exit/Entrance Box, 영상감시(CCTV)이다. 출입관리체계는 자유출입(Free Access), 제한출입(Restricted Access), 통제출입(Controlled Access), 출입금지(No Access) 4단계로 나누어진다.



<그림 6.4.2.4> 출입관리체계 흐름도

(1) 자유 출입 (Free Access)

모든 작업자에게 가속기 터널 등 해당지역이 개방된다.

(2) 제한 출입 (Restricted Access)

지역에 따라 설정단계를 달리할 수 있으며 Maintenance 등 방사선 등의 위험은 없으나 장비보호 등 기타 이유에 의해 출입자들을 제한하고자 할 때 Access Control System에 출입기록이 입력된다.

(3) 통제 출입 (Controlled Access)

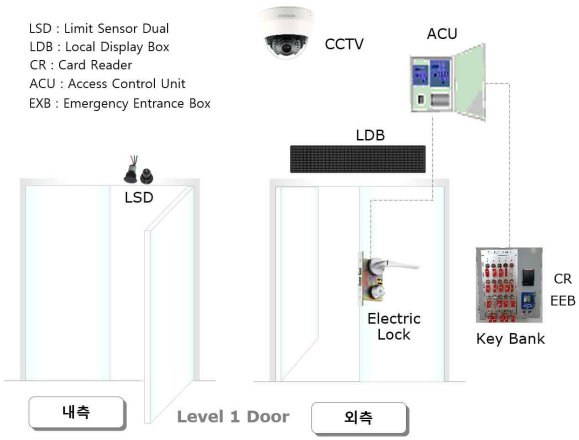
빔 운전 준비상태가 되면 방사선구역의 출입이 통제된다. 즉 허가받은 작업자만이 ID Card를 사용하여 출입이 가능하며 출입자들의 상황은 항상 기록된다. 가속기터널 내로의 출입은 ID Card와 Key bank를 이용해야만 한다. 가속기 터널 내로 출입할 때 반드시 1인당 1개씩의 Personal Key를 소지하여야 하며, 이때는 PSI에 의해 빔 운전이 허락되지 않는다.

(4) 출입 금지 (No Access)

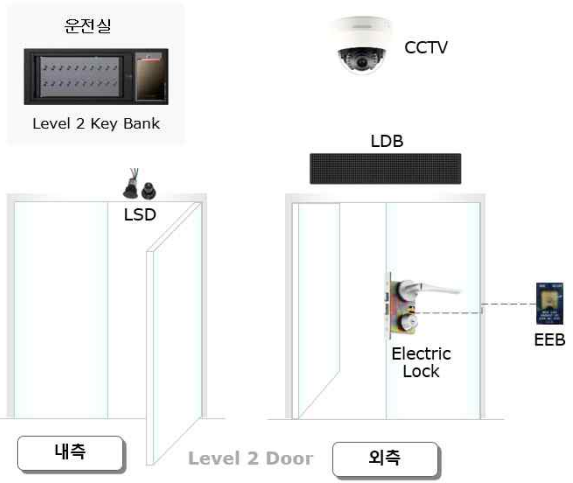
빔운전 중이거나 잔류방사선이 남아있는 경우를 말하며 누구의 출입도 허락되지 않는다. 다목적 방사광가속기 문들은 용도에 따라 작업자용 출입구와 물품의 반입, 반출에 사용되는 반입구로 구분하고 모든 문들을 다음과 같이 4단계로 등급을 분류한다.

<표 6.4.2.1> 다목적방사광가속기 문 등급 분류

단계	Card Key	PSI
1단계 (Level 1)	O	연결됨
2단계 (Level 2)	O	연결됨
3단계 (Level 3)	O	연결됨
4단계 (Level 4)	O	연결 없음



<그림 6.4.2.5> Level 1 Door의 구성도



<그림 6.4.2.6> Level 2 Door의 구성도



<그림 6.4.2.7> Level 3 Door의 구성도

① Level 1

Level 1 문은 통제 출입 상황에서 터널 내부를 출입하도록 허락된 문으로서, PSI와 연결되어 있어 문이 열리거나 Key Bank의 Personal Key가 인출되면 빔운전이 금지된다. Level 1 문의 구성은 <그림 6.4.2.3>과 같고, 선형가속기동 1개소, 저장링동 4개소이다.

② Level 2

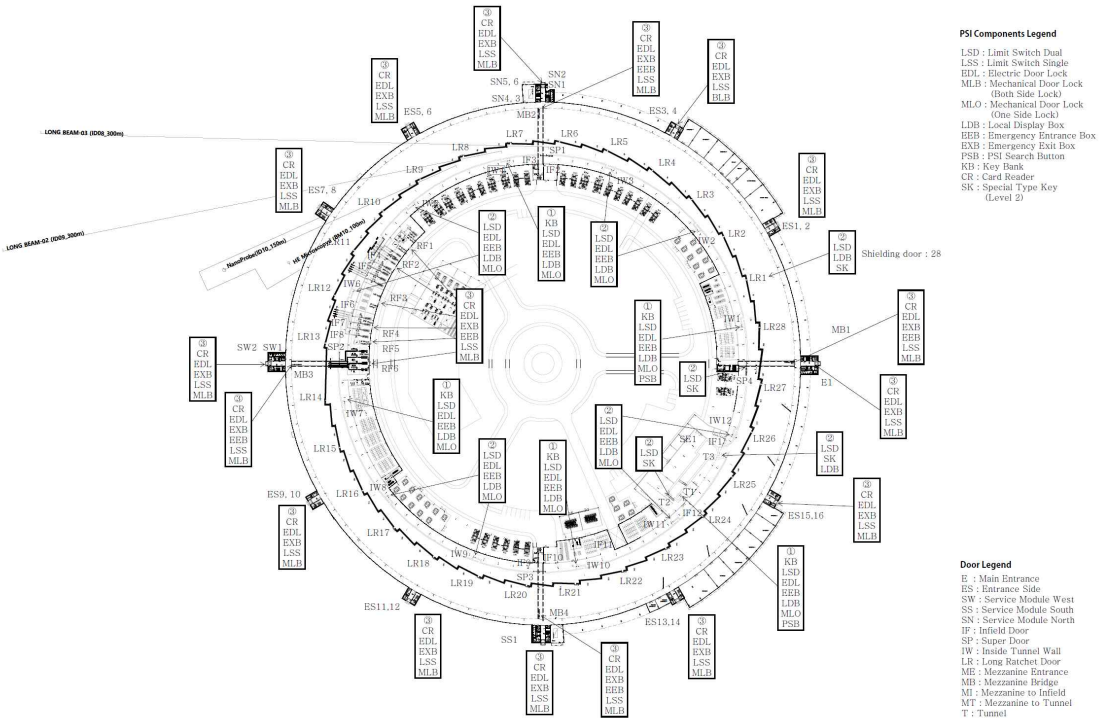
기능상으로는 Level 1 문과 동일하여 문이 열리거나 Key Bank로부터 Key가 빠져나가면 PSI 계통에 의해 빔 운전을 중지시킨다. 안전의 측면에서 관리되어야 하는 문들의 수가 적을수록 효과적이므로 상시 사용가능한 문은 Level 1의 문으로 하고, Level 2는 보수기간이나 장비반입 등 해당문의 사용이 반드시 필요할 때만 이용하게 한다. Leve 2 문의 구성은 <그림 6.4.2.4>와 같고, 출입문은 선형가속기동 2개소, 저장링동 43개소이다.

③ Level 3

Level 1, 2 문의 터널 내부 출입을 금지하는데 비해 Level 3 문은 다목적 방사광가속기의 관리구역 출입을 제한하는 역할을 한다. PSI 기기가 설치되지만, 빔 운전과 연동되지 않는다. Level 3 문은 ID card를 이용하거나, 운전실의 Level 3 Key Bank의 Key를 이용하여 출입할 수 있다. 상시로 출입하는 문에는 ID Card Reader가 문 안팎에 설치되어 출입하는 작업자들의 정보는 출입관리용 서버에 기록된 사항과 비교, 점검하여 기록된다. Level 3 문은 52개소이다.

④ Level 4

방사선안전과 관련하여 관리되지 않는 문으로 PSI에 의하여 제어되지는 않는다. 건물 내부의 개인 사무실 등의 문 외에도 다목적 방사광가속기 건물의 보안관리를 위하여 ID card가 설치된 문도 Level 4에 해당한다. ID Card Reader로 관리되는 문은 출입 기록이 남는다.



<그림 6.4.2.8> 출입관리 시스템 구성도

○ Machine Interface System

PSI 시스템의 Trip이나 기기의 오류가 발생했을 때 위험인자를 차단하는 시스템으로 이 계통은 실제적으로 각 PSI 설비로부터 오는 신호들에 따라 운전 중 PSI의 심장부인 Main Sequence System과 운전자와의 관계를 설정함으로써 빔 운전을 관리하는 체계이다. 이 체계는 PSI와 다목적 방사광가속기 운전의 관계를 유기적으로 연결하여, 가속기 운전에 있어서 각 상황에 적합한 통제를 하고자 하는데 목적이 있다.

Machine Interface System의 기능은 PSI 시스템의 PLC Remote I/O 입출력 모듈과 연결된다. 입력 모듈은 기기의 작동상태를 접점신호로 읽어오며, 출력 모듈은 DC 24 V를 사용하여 릴레이를 구동시켜 기기 작동을 가능하게 한다. Trip 발생 시에는 릴레이 출력을 끊어 기기의 작동이 정지되도록 한다. 이와 같은 구성은 시스템의 안정성을 높여주는 것으로 신호를 주지 않을 때나 정전 시에는 전개되는 것을 원칙으로 하는 Normal Close 방식으로 구성한다. <표 6.4.2.2>는 PSI의 Remote I/O module을 통해 연결되는 4GSR 가속기의 주요 기기를 정리한 것이다.

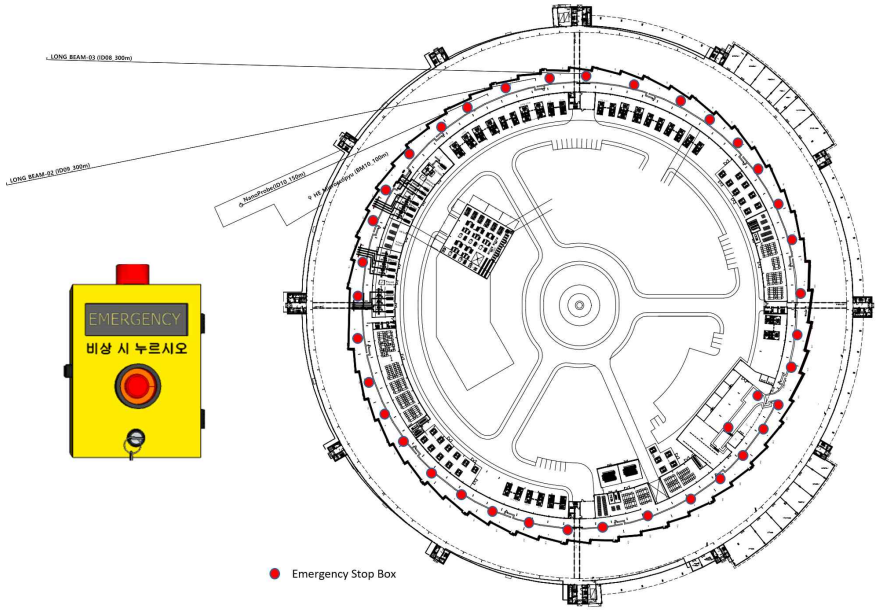
<표 6.4.2.2> 개인안전연동시스템과 연결되는 4GSR 가속기의 주요기기

주요 기기	PLC 입출력	의미	설명
전자총 레이저 셔터	입력	Beam ON	전자총 레이저 셔터 상태 모니터링
	출력	Beam OFF	전자총 작동 차단, 전차총에서의 전자방출 차단
Linac Gate Valve	입력	Beam ON	Gate Valve 작동 상태 모니터링
	출력	Beam OFF	Gate Valve Closed, 전자빔 전송 차단
Linac RF의 LLRF	입력	RF ON	Linac LLRF 작동 상태 모니터링
	출력	RF OFF	Linac LLRF 작동 차단, 전자빔 가속 차단
Linac RF의 Mod. H.V P/S	입력	RF ON	가속관 작동 상태 모니터링 Linac RF ON 신호
	출력	RF OFF	가속관 작동 차단, 전자빔 가속 차단
BTL E-Beam FCS	입력	Top-up ON	Top-up 모드에서 작동 상태 모니터링
	출력	Top-up OFF	Top-up 모드에서 전자빔 차단
BTL Safety Shutter	입력	Top-up ON	Top-up 모드에서 작동 상태 모니터링
	출력	Top-up OFF	Top-up 모드에서 전자빔 차단
SR RF의 LLRF	입력	RF ON	SR LLRF 작동 상태 모니터링
	출력	RF OFF	SR LLRF 작동 차단, 전자빔 또는 암전류 차단
SR RF의 H.V	입력	RF ON	가속관 작동 상태 모니터링 SR RF ON 신호
	출력	RF OFF	가속관 작동 차단, 전자빔 가속 차단
SR Beam Stopper	입력	Beam ON	SR 가속관 작동 상태 모니터링
	출력	Beam OFF	SR 가속관 작동 상태 차단, 전자빔 전송 차단
SR Booster Ring LLRF	입력	RF ON	Booster Ring LLRF 작동 상태 모니터링
	출력	RF OFF	Booster Ring LLRF 작동 차단, 전자빔 가속 차단
빔라인 Safety Shutter	입력	Safety Shutter Open	빔라인 Safety Shutter 여닫힘 상태 모니터링
	출력	Safety Shutter Closed	빔라인으로의 방사광 또는 사고 시 방사선 차단

○ Emergency Stop System

비상상황을 감지하기 위한 시스템이다. 실제 빔 정지는 Machine Interface System이 담당한다. 터널 내부 비상정지함은 약 30 m 간격으로 저장링 터널에 36개, 선형가속기에 2개를 배치할 계획이다.

비상정지함(Emergency Stop Box)의 구성은 Reset Key 스위치, 비상정지버튼, 램프로 이루어진다. 비상정지함은 눈에 잘 띄는 노랑색과 빨강색으로 구성 설치하며 Reset은 Main Sequence System 입력으로만 사용하며, 램프는 Main Sequence System 출력에 의해서만 동작한다. 비상정지버튼을 누르면 Main Sequence System은 해당 비상정지함의 램프와 운전실 상황판의 LED를 점멸시키는 것과 동시에 빔운전을 정지시킨다.



<그림 6.4.2.9> 비상정지함 모형 및 비상정지함 배치도

○ Display & Alarm System

Display 시스템은 지역표시기와 PSI 상황판으로 구분할 수 있다. 지역표시기(Local Display Box)는 관리구역 내에 위치하며, 해당문의 출입 가능여부를 표시한다. 터널 출입문의 지역표시기의 표출 내용은 “출입금지”, “출입통제” “출입허가” 3가지이다. 지역표시기 배치는 터널로 직접 출입하는 출입문과 실험지역, 건물 주출입문에 배치 설치할 예정이다.

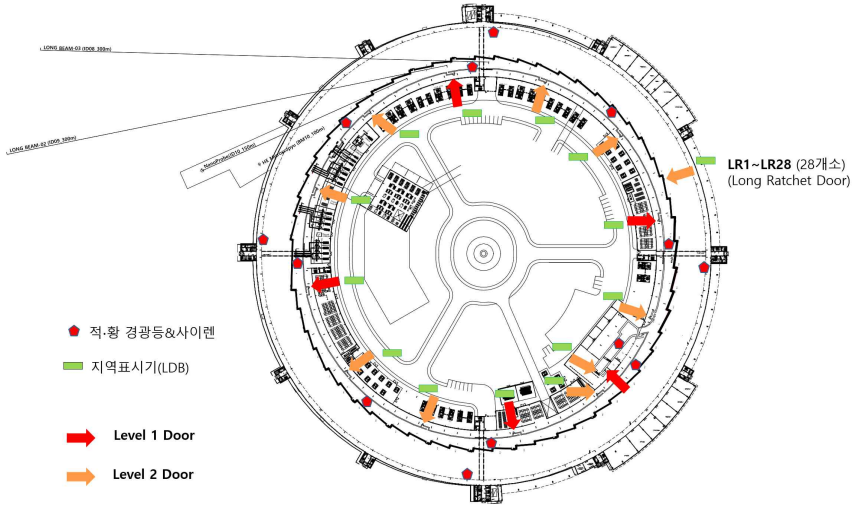
Alarm 시스템은 PSI Trip으로 인한 비상정지, 운전 시작과 PSI 운전모드 전환 등을 알려주는 시스템으로 경광등과 경보기로 구성된다. 터널 내부 100 m 간격으로 16세트, 실험지역은 200 m 간격으로 배치하여 설치할 예정이다.

(1) 경광등

적색은 출입금지 모드의 시작을 알려주거나 비상상태임을 의미하고 황색은 통제 출입 모드의 시작을 알려준다.

(2) 경보기

출입금지 모드의 시작을 알려주거나 비상상태임을 의미한다.

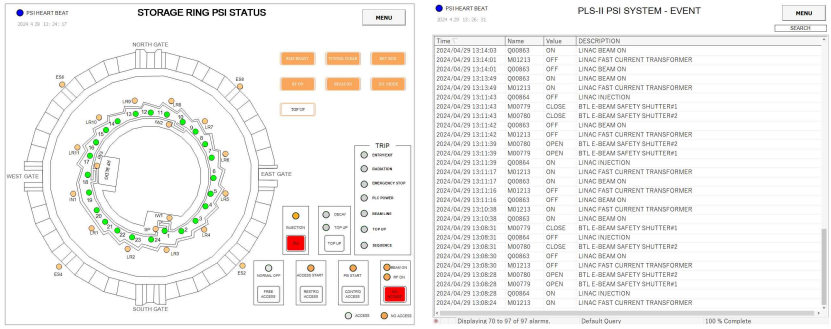


<그림 6.4.2.10> Display & Alarm 시스템 배치도

○ Human Machine Interface (HMI) System

컴퓨터 환경에서 실시간으로 Main Sequence System (PLC)으로부터 현장의 각종 설비를 감시하고 운영자가 현장의 상태 및 상황을 파악할 수 있도록 그림이나 값의 형태로 표현한다.

HMI 기능은 감시만 존재하며, HMI System을 이용하여 Main Sequence System을 제어할 수는 없다. 현장상태를 그림으로 보여주는 기능, 실시간 혹은 과거의 이력 데이터들에 대한 데이터 처리를 하여, 현장의 이상 상황이 발생하였을 때 사용자에게 알림으로써 사용자가 비정상 상황에 대해 조치를 할 수 있도록 하는 Alarm Status 기능 등이 있다.



<그림 6.4.2.11> Human Machine Interface System 구성 예시

7장. 공정 제안

