April. 2021

다목적 방사광가속기 (Korea-4GSR) 개념설계 보고서



2021. 4.



1장. 개요 (PAL)

1.1 서론

1.1.1 연구분야 및 빔라인

1.1.2 방사광가속기

1.2 설계 요약

1.2.1 방사광가속기 설계 목표

1.2.2 방사광가속기 설계 사양

1.2.3 방사광가속기 주요 파라메타

1.2.4 빔라인 구성

1.2.5 기반시설

2장. 연구분야 (PAL+KOSUA+KBSI)

2.1 서론

2.1.1 포항 방사광가속기 빔라인 현황

2.1.2 4GSR에서의 주요 활용 유망분야

2.1.3 해외 4GSR 구축 및 3GSR의 성능 개선 현황 및 활용분야

2.1.4 4세대 원형 방사광가속기 광원 특성

2.2 제안 빔라인 및 활용분야

2.2.1 바이오신약-바이오소각산란 빔라인 (BioPharma-BioSAXS)

2.2.2 소재 구조 분석 빔라인 (Material Structure Analysis)

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

2.2.4 나노스케일 각분해 광전자분광 빔라인 (Nano-ARPES)

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

2.2.6 결맞음 소각산란 빔라인 (Coherent SAXS)

2.2.7 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인 (Real-time X-ray Absorption Fine)

2.2.8 생체분자 나노 결정학 빔라인 (Bio Nano Crystallography)

2.2.9 고에너지 현미경 빔라인 (High Energy Microscopy)

2.2.10 나노 프로브 빔라인 (Nano-probe)

2.3 실험기법별 빔라인의 구성

2.3.1 실험기법별 빔라인의 구성

2.3.2 해외 성능향상 방사광가속기 빔라인 구성

2.3.3 해외 신규 4세대 원형 방사광가속기 빔라인 구성

2.4 빔라인별 예산

1장. 서 론

1.1 서론

1.1.1 연구분야 및 빔라인

방사광 시설에서 발생하는 X-선이 물질의 특성 분석에 유용하다는 것이 널리 알려지면서, 2세대 방사광가속기 (2GSR)를 보유한 선진국가는 X-선 회절 (XRD), X-선 광전자분광학 (PES), X-선 흡수분광학 (XAFS)과 같은 X-선 기반 분석기법들의 적극적인 활용 토대를 구축하였고, 얻어진 데이터 해석을 위한 물질 분석 이론을 개발함으로써 다양한 활용을 시도하였다. 많은 부분에서 성공적이었고, 특히 고체물리, 화학 분야의 급격한 발전을 가져오기 시작했으며, 그 결과로 경쟁력 있는 반도체 물질의 개발에 큰 기여를 하였다. 이 시기만 해도 2020년 현재의 기술력에는 떨어지지만 X-선 발생장치, 빔라인 구성, X-선 분석 기법, X-선 검출장치 등에서 다양한 개발들이 이루어져 왔는데, 이를 이용하여 얻어진 데이터의 질이 기존보다 좋아지고, 이로 인해 많은 기초과학의 발전과 기술의 발전이 이루어졌다. 이러한 발전에 대한 기대감은 폭발적으로 증가하여 각 국가에서는 양질의 광원, 효율적이고 경쟁력 있는 빔라인 구성, X-선 분석기법 그리고 검출기 개선을 위한 치열한 노력을 하였고, 이러한 노력의 일환으로 3세대 방사광가속기 (3GSR)가 경쟁적으로 구축되기 시작하였다. 3GSR의 경우 전자빔 궤도에 언듈레이터와 같은 삽입장치를 두어 광원의 휘도 (brightness)를 획기적으로 개선하는 방사광 시설로서, 미국, 유럽, 일본을 중심으로 1990년대 초반에 건설되기 시작하면서, 지금은 30개 이상의 3GSR 시설이 구축되어 운영되고 있다. 방사광 시설 구축과 관련된 기반 기술이 거의 전무했으며, 일부 과학자를 제외하고는 활용 분야에서의 경험이 부족했던 우리나라도 다행히 세계에서 5번째로 3GSR을 구축할 수 있었다.

3GSR에서는 포항의 PLS-II이 36개의 빔라인을 운영 중인 것과 같이 동시에 수십 개의 빔라인을 운영할 수 있는데, 세계적으로 동종의 분석기법을 가지는 빔라인이 다수 존재한다. 이러한 상황에서 각 빔라인은 물질 분석의 경쟁력 유지를 위해 X-선 분석기법과 분석기술의 개발을 꾸준히 추진해 오고 있다. 일부는 완전히 정착된 분석기법으로 이용자가 활용하기 편하게 하거나, 자동화 혹은 high throughput 분석능력까지 제공하는 수준을 추구하기도 한다. 다른 면에서는 물질 분석에 있어서 새로운 물리 화학적 현상을 도출해 내기 위한 분석기술 개발을 추구하기도 한다. 이러한 노력으로 인해 초기에는 X-선 회절 분석기법 (XRD)로 대표되었던 분석기술이 포괄적으로 다양한 기법들로 분류되고, 발전해 왔다. 예를 들어, 소각 X-선 산란 (small angle X-ray scattering), 스침각 입사 소각 X-선 산란 (grazing incidence X-ray scattering), 결맞은 X-선 산란 (coherent X-ray scattering), 간섭성 회절 영상 (coherent diffraction imaging), 공명 X-선 산란 (resonant X-ray scattering), 단백질 결정학 (protein crystallography), 시분해 X-선 산란 (time-resolved X-ray scattering), 분말 회절 (powder diffraction), X-선 반사율 측정 (X-ray reflectivity measurement), X-선 상관 분광기법 (X-ray correlation spectroscopy), X-선 단층촬영 (X-ray tomography) 등 다양하고 전문적인 분석기법으로 개발되어 각 분야에서 많은 활용분야를 파생시켰고 관련 연구자가 증가하면서 발전하고 있다.

광전자분광 분석기법 (PES)의 경우도, 기본적인 화학 분석을 위한 전자분광 (electronic spectroscopy for chemical analysis) 기능 외에도 각분해 광전자분광 (angle-resolved PES), 스핀 및 각분해 광전자분광 (spin- and angle-resolved PES), 유사대기압 광전자분광 (near ambient X-ray PES), 고에너지 광전자분광 (high-energy PES), 주사 광전자분광 현미경 (scanning photoelectron microscopy), 광전자 방사 (photoemission electron microscopy) 등으로 발전하며 활발한 응용이 현미경 이루어지고 있다. 이러한 다양한 빔라인과 분석기법 개발의 대부분은 우선 삽입장치 광원의 개발로 광원의 세기/휘도가 커지면서, 빔라인에서의 에너지 분해능을 좋게 하더라도 충분한 밝기의 방사광 (flux)이 시료에 쪼여져, 다양한 측정기법에서 측정 신호의 신뢰성이 커졌기 때문이다. 여기에 더해 검출기 센서의 효율이 좋아지고, 2차원 검출기 (detector)도 개발되었으며, noise 제거, 신호 인출 기술, 그리고 프로그래밍 기술 등이 개발되어 방사광 연구의 효율을 증대시켰다. 한편, 얻어진 데이터를 해석하는 물리화학적 이론, 특히 전산모사 수준이 매우 높아져서, 실험데이터와 이론의 결합으로 임팩트 있는 연구결과가 활발히 나오는 상황이다.

이러한 결과, 앞서 이야기한 반도체뿐 아니라, 산화물 반도체, 전도성 반도체, 투명 반도체, 투명 도체와 같은 소재 개발은 물론, 반도체 소자의 제작상의 문제점 발견, 소자의 구동에 따르는 결함 발생 원리 규명, 자성 박막의 도메인의 모양과 형성원리 규명, gate oxide 물질의 표면 및 경계면에서의 결합상태 및 전자구조 연구, 촉매 물질 개발, 화학 섬유, 폴리머 소재 개발, 단백질 구조 연구, 각종 마이크로 혹은 나노 크기 입자 소재의 특성 규명, 타이어 내부 혹은 제작물 내부의 결함 규명, 나노 바이오 시료에서의 나노 물질의 영향 및 바이오 시료에 대한 약물 혹은 나노물질의 영향 규명, 동식물 내부 구조의 원소 및 모양 규명 등 매우 다양하고 중요한 연구 주제를 분석하는 데 활용되고 있다. 국내 3GSR인 PLS-II의 경우, 2019년도에 약 6,000여 명의 인원이 1,600여 과제를 수행하며, 논문 당 평균 I.F.가 7.7 정도 되는 논문을 560여 편 발간하였다.

3GSR의 경우 전자빔 에미턴스 (emittance)가 5~10 nm·rad이며, 입사기를 사용하여 발생하는 광원의 휘도 (brightness)가 크기는 하지만, 광원의 에너지를 선정하고 단색광으로 만들어 주는 빔라인의 exit slit 위치에서의 수평방향으로의 크기는 대략 수백 μm 이상이다. 한편, nano-probe 기법과 같이 시료에서의 X-선의 크기를 작게 (수 마이크로미터 혹은 수십 나노미터로 집속) 해서 실험해야 하는 경우는 발생한 광원의 대부분을 사용하지 못하고 있다. 그동안 가속기 기술의 발전으로 광원의 크기와 퍼짐을 3GSR 대비 100배 이상 작게 하는 4세대 방사광 광원 (4GSR) 기술이 최근 구현되었다. 이 경우는 nano-probe의 virtual source로 사용되는 exit slit의 크기가 수 ~10 µm이라 하더라도, 발생한 광원이 잃어버림 없이 들어오게 됨으로써 시료에서의 밝기 (flux)는 3GSR 대비 100배 이상 커지게 된다. 한편, 광원의 크기가 작기 때문에, 결맞음 (coherence) 또한 수십 배 이상 좋아지게 된다. 이러한 장점은 결국, 3GSR에서는 광원의 세기가 부족했던 실험기법과 sub-micrometer 수준으로 집속해 수행하는 실험기법, coherence를 활용하는 실험기법에 있어서 새로운 무대를 제공하는 계기가 된다. 즉, 3GSR에서의 X-선 분석 기법의 장점과 다양성을 그대로 유지하면서도, 몇 분야에서는 더욱 발전된 경쟁력 있는 X-선 기법을 제공해 줄 수 있게 된다. 이 외에도 전체적으로 고에너지에서 강한 X-선을 제공해 주는 장점으로 기존의 기법들도 경쟁력이 한 층 높아진다. 다양한 in-situ 실험이 가능해지고, 같은 in-situ 실험이라 하더라도 빠른 시간 주기를 필요로 하는 in-situ 실험이 가능하고, 각종 nanoscopy, near ambient high energy PES, resonant X-ray scattering, nano-probe, small-size protein crystallography 등의 분야에서 경쟁력이 향상될 것이며 이로 인한 폭넓은 활용이 기대된다.

이러한 이유로 전 세계 3세대의 방사광가속기들이 4GSR로의 성능향상을 계획하고 있으며, 새로운 4GSR 건설도 속속히 나타나고 있다. 3GSR의 4GSR로의 성능향상은 미국의 APS-U, ALS-U, 일본의 Spring-8 II, 스위스의 SLS-2, 영국의 Diamond-II, 프랑스의 SOLEIL-II, 유럽연합 ESRF-EBS, 독일의 PETRA-IV, 이탈리아의 ELETTRA 2.0이 있으며, 신규 건설하는 곳은 스웨덴의 MAX-IV, 브라질의 SIRIUS, 중국의 HEPS, 일본의 SLit-J 등이 있다.

우리나라의 경우 3GSR인 PLS에서 1994년에 첫 방사광 X-선이 발생하였으며, 1995년 XRD와 PES 2개의 빔라인에서 X-선을 활용하기 시작했으며, 2011년 PLS-II로 성능 향상되었다. PLS-II는 3GSR 장치로 5.8 nm·rad의 에미턴스 (emittance)를 가지고, 3GeV, 400mA의 전자빔 특성을 가지고 있다. 어느덧 PLS/PLS-II는 2개의 빔라인에서 첫 X-선을 인출한 지 25년간 운영되고 있는 상황이며, PLS-II를 가지고 앞으로 10년, 20년을 지내게 된다면, 지금은 대등한 경쟁력을 유지하고 있지만, 전 세계를 대상으로 하는 X-선 분석능력에서는 뒤처질 것으로 예상된다. 다행히 현재 4GSR 건설을 기획하고 있는데, 시기적으로 다소 늦은 감도 있지만 적절하다고 판단되며, 광원의 우수한 성질과 X-선 기법의 기술력 및 신기술 개발 능력을 바탕으로 하는 4SGR을 구축하면 전 세계와의 분석 경쟁에서 우위를 차지할 수 있을 것으로 판단된다. 경쟁력 있는 분석력을 바탕으로 다양한 과학 응용 분야에서의 우수한 연구결과 도출뿐만 아니라, 산업체 관련 소재, 소자 연구에 많은 활용이 기대된다. 예를 들어, 고에너지 현미경을 이용한 산업체 소자, 소재의 비접촉, 비파괴적인 내부 구조 분석, X-선 형광분석 및 현미경 장치를 이용한 배터리 소재의 충방전 상태에 따른 시료의 각 원소별 산화가 변화 연구, 전자구조 연구 등을 통한 경쟁력 있는 충방전 물질 개발, 막단백질 연구를 통한 신약 개발과 같은 다양한 산업체 활용 기회가 주어질 것이다. 참고로, 산업체 활용은 대부분의 시료가 모델 상태가 아니고 다양한 분위기 상태의 시료이기 때문에, 원하는 데이터를 얻거나 얻은 데이터를 분석하는 기술이 여러 면에서 비산업체 시료 대비 어려운 경우가 많은데, 지금까지 발전한 분석 기술력은 이러한 산업체 시료에 대한 분석에 신뢰성을 충분히 확보하고 있는 상태로, 최근 들어 산업체 활용 건수가 급격하게 늘어나고 있다. 한편, 기존 PLS-II의 경우, 시료에서의 X-선이 tight하게 집속되지 않아도 되거나, 세기가 부족한 광원이어도 가능한 분석들에 활용될 수 있다. 이를 고려하면, PLS-II와 4GSR과의 역할 분담을 할 수 있는 아이디어를 도출하고, 이를 근거로 경쟁력이 떨어져 가는 빔라인은 경쟁력 강화를 위해 성능 개선함으로써, 국내의 많은 이용자에게 방사광 X-선 분석의 기회를 확대시켜 나가야 할 것이다. 참고로 PAL-XFEL (X-선 자유전자레이저; 4세대 선형 방사광가속기)은 선형가속기를 기본으로 하는 수십 펨토초 (fs)의 시간 폭을 가지면서 pump & probe 실험을 할 수 있는 매우 차별적이며 세계적인 경쟁력이 우수한 장치이다.

본 개념설계보고서의 2장. 연구분야 및 4장. 빔라인 부분에서는 PLS-II와 PAL-XFEL의 빔라인 현황, 각 국의 4GSR 건설 현황 및 3GSR의 성능향상 현황,

PLS-II와 4GSR 장치의 상호 역할분담(안), 그리고 4GSR을 이용하여 경쟁력 있게 활용하기 위해 제안하는 빔라인 기법 및 빔라인 관련 부대시설과 관련된 내용을 다룬다. 경쟁력 있는 4GSR 빔라인 구축으로 국가 경쟁력 향상에 기여하기를 기대한다.

1.1.2 방사광가속기

첫 번째 4GSR (4세대 원형 방사광가속기)로써 MAX-IV가 성공적으로 운전을 시작한 후 그 뒤를 이어 SIRIUS (브라질)와 ESRF-EBS (프랑스)가 최근 초기운전을 성공적으로 진행하고 있다. 다른 4GSR 건설 프로젝트로 APS-U(미국), ALS-U (미국) 등이 기존 3GSR (3세대 방사광가속기)을 4GSR로 업그레이드를 추진하고 있으며, HEPS (중국) 등도 새로운 4GSR 건설을 진행하고 있다. 그 외에도 많은 3GSR이 4GSR로 업그레이드를 계획하고, 새로운 4GSR 프로젝트를 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 시점에 한국에서도 신규로 4GSR 구축을 위한 설계가 진행되고 있다.

4GSR은 빔분산 범프 (dispersion bump)를 가진 한 셀에 7개의 휨자석을 고려한 Hybrid 7BA 격자구조로, 성능을 더 증가시키기 위해 3GSR 저장링에서는 잘 사용하지 않았던 종방향 자기장의 변화가 있는 전자석, 횡방향 자기장 변화가 있는 휨자석, reverse 휨자석 개념을 격자구조에 적용하였다. 전산모사 결과, 주어진 저장링 규모에서는 계획된 저장링 성능을 기대할 수 있다.

범라인에서 방사광의 대표적 성능지표 중 하나는 휘도 (brightness)이다. 휘도를 높이기 위해서는 저장링 설계 시 에미턴스는 최소화하고 범전류는 최대화하는 것을 목표로 한다. <그림 1.1.2.1>에서 보듯이 에미턴스 관련 성능은 국제적으로도 경쟁력을 갖추고 있으며, 범전류도 3GSR 저장링에서의 최고 수준인 400 mA를 목표로 하여, 10~30 keV 광자범에서는 세계 최고의 경쟁력을 갖고, 100 keV 이상 까지 광자범을 제공하여 국내외 방사광 이용자가 고에너지 X-선까지 광자범을 제공받을 수 있도록 한다.

이를 궁극적인 목표로 하고 약속된 일정에 이용자가 목표성능을 달성한 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 추구하여야 한다. 본 개념설계보고서에서는 빔물리 설계에서부터 장치 구현까지 개념적으로 "10~30 keV 광자빔 영역에서 세계 최고의 경쟁력을 갖추는 방사광가속기를, 깊이 있는 빔물리 연구 그리고 검증된 기술로 설계 및 구축하여 예정된 일정에 이용자에게 빔을 제공"하는 것을 목표로 한다.

여기에 더해 국내에서 성공적으로 운영 중인 기존 방사광가속기인 PLS-II와 PAL-XFEL의 역할분담을 간략하게 다루어, 상호 시너지를 극대화하여 국내외 방사광 이용자의 모든 요구사항을 충분히 지원할 수 있는 방안을 제안한다.



<그림 1.1.2.1> 4세대 원형 방사광 가속기의 저장링 둘레에 따르는 성능 분포. 세로축의 값이 작을수록 성능은 더 높다. (By Dr. Hwang, BESSY-II, Germany)

1.2 설계 요약

1.2.1 방사광가속기 설계 목표

목표	 예상되는 구축비용 등 상황에서 방사광이용자에게 극대화된 성능을 제공하기 위하여 10~30 keV 에너지 영역에서는 세계 최고의 경쟁력을 구현하고, 고에너지 영역에 대한 이용자 수요를 충족 위해 100keV까지 가능토록 설계 4GeV 에너지에서도 다양한 삽입장치를 활용하여 고에너지 영역의 실험 지원 가능
원칙	 낮은 에미턴스, 운영비, 빔불안정성(instalility), 빔수명(Touschek lifetime) 등 고려가능한 다양한 요소를 검토하여 가장 적합한 빔에너지를 선정하고 기존 운영장비(포항 3세대, 4세대(XFEL))와 가급적 호환가능한 장비를 채택하여 운영단계에서 상호보완적인 운전이 가능할 수 있도록 설계하며 기존 장비와 역할분담을 고려한 설계를 통하여 효율적 지원이 가능토록 설계 3세대 원형(PLS-II) : 빔에너지를 조정하여 10 keV 보다 낮은 에너지에서의 경쟁력을 갖도록 설계하고, 짧은 번치의 빔을 제공하여 저장링에서 시분해 모드 실험을 지원하도록 설계 다목적 방사광가속기 : 10~30 keV 등 영역 및 100 keV 에너지 등 경X-선 영역에 경쟁력을 갖도록 설계

1.2.2 방사광가속기 설계 사양

가속장치 설계 사양	 전자빔 에너지 : 4 GeV (전자빔 원형궤도 : 약 800 m) 전자빔 에미턴스 : 100 pm·rad 이하 (개념설계 : 58 pm·rad) 빔라인 : 40기 이상 (삽입장치 빔라인 : 28기) 가속방식 : 전자총, 인젝터 리낙, 4 GeV 부스터 저장링 : MBA (HMBA) 기반 7BA 전자석 배열
전자빔 에너지 관련 인자	 전자빔 에미턴스 : 전자빔 에너지의 제곱에 비례 요구되는 고주파 출력(RF power) : 전자빔 에너지의 4제곱에 비례 자기장의 기울기 강도(magnetic Field gradient) : 전자빔 에너지에 비례 광자빔(방사광) 발생 에너지(keV) : 전자빔 에너지의 제곱에 비례
전자빔 에너지에 따른 광자빔 성능	 동일 저장링 둘레 (약 800 m)를 기준으로 목표하는 10~30 keV 에너지 영역에서는 높은 에너지의 전자빔 조건 (6 GeV)보다 낮은 에너지 조건 (4 GeV) 에서 광자빔 성능이 우수함을 확인함 * 언듈레이터 휘도 : 4 GeV > 6 GeV (~30 keV) / 삽입장치 밝기 : 4 GeV > 6 GeV (~27 keV) * 슈퍼벤드 휘도 : 4 GeV > 6 GeV (~80 keV) / 슈퍼벤드 밝기 : 4 GeV > 6 GeV (~50 keV)
빔안정성	 빔안정성은 주변 노이즈(소음·진동 등)에 의한 빔의 요동정도임 4세대 원형방사광가속기는 빔에미턴스가 기존의 3세대 원형방사광가속기에 비하여 100배 이상 줄어들어 빔불안정성(beam Instability)의 영향이 커지므로 이에 대한 고려가 반드시 필요함 저장링에서 중요한 빔궤도 안정성(orbit stability)는 빔에너지 보다는 외부 노이즈에 큰 영향을 받으며, 빔에너지가 높아지면 저장링과 빔라인에서 열부하(heat load)가 증가하여 장치냉각 과정에서 빔궤도 안정성을 저해할 수 있음 위 내용을 고려하여 기존 PLS-II에서 사용하는 빔안정화 장치들과 해외 사례를 바탕으로 빔안정성 향상 방법을 도출하고 이를 적용함





구 분	3세대 방사광가속기 (PLS-II)	PLS-III (성능향상, '30~)	다목적 방사광가속기 (4세대 원형 방사광)	4세대 선형 방사광가속기 (PAL-XFEL)
대지/건물	126,800㎡ 18개동 45,35	(38,357평)/ 8㎡(13,721평)	연면적 69,400㎡ (20,994평)	126,620㎡(36,488평)/ 9개동 36,764㎡(11,121평)
주요 사양	▶선형가속기 : 170m ▶빔에너지 3 GeV ▶저장링 : 둘레 281.8m ▶빔전류 400mA ▶에미턴스 : 5.8nm	▶4세대 원형 가속기로 성능향상 검토 중 ▶에미턴스 : 약 100pm	 ◆선형가속기 : 약 20m ◆부스터 : 둘레 757m ◆저장링 : 둘레 800m ◆ 빔전류 400mA ◆에미턴스 : 58pm (설계치) 	 ・가속장치: 1,030m ・빔에너지 10GeV ◆삽입장치(경X선20, 연X선7) •빔라인: 길이 80m, 경X선 2기, 연X선 1기
빔라인 수	최대 40기 (삽입장치 빔라인 20기)	40기 이내 (삽입장치 빔리인 20기 이내)	40기 이상 (삽입장치 빔라인 28기)	최대 5기
빛의 밝기	태양의 100억 배	3세대의 약 100배	3세대의 100~1,000배	3세대의 1억 배
시간 분해능	수십 피코(10 ⁻¹²)초	수백 나 <u>!</u>	ェ(10 ⁻⁷)초	펨토(10 ⁻¹⁵)초
공간 분해능	수백 나노(10 ⁻⁷)m	수~수십 니	ት노(10- ⁸)m	수 나노(10 ⁻⁹)m
빛의 성질	적외선에서 경X-선까지 넓은 파장대			연X-선 및 경X-선 단일 파장(레이저)
실험수준	정적분석 (특정 시점, 사진), 결정단백질, 냉동세포	일부 분야(이차전지, 촉매 등)의 동적분석 능력 강화		동적분석 (변화관찰, 동영상), 비결정단백질, 살아있는 세포
실험환경 및 역할분담	- 국내 모든 방사광 이용자가 원하는 광자빔 에너지 영역대 제공 - 다목적 방사광가속기 이용자 육성	 - 극자외선과 연 X-선 영역에서 세계 최고 성능의 광자빔 제공 - 경 X-선 영역에서 이용자층이 두터운 XRD, XAFS 분야 지속적 지원 - 시분해 실험 지원 	 경 X-선 영역에서 국내 미구현 실험(이미징, 비탄성산란분광, 고압실험) 지원 첨단산업기술 확보 및 수요와 새로운 실험기법 발전에 따른 빔라인 구축 	 시분해 실험에서 세계 최고의 안정도와 분해능제공 국가전략프로젝트 지원 해외 저명연구자 유치하여 실험노하우 전수

<표 1.2.2.1> 국내 방사광가속기 비교

1.2.3 방사광가속기 주요 파라메타

가. 일반 파라메타 (General Parameter)

구 분	값		
Energy / GeV	4		
Symmetry / Sub-Symmetry	28		
Straight Sections: No & Length / m	28 / 6.5		
Ring Circumference / m	798.8		
# Dipole Magnets	28 * 7 = 196		
Nat. Emittance / prad m	58		
regular hor/ver @ coupling	55 / 6 @ 10 %		
IBS(400mA) hor/ver @ coupling	76 / 8 @ 10 %		
Diffraction limited source for	λ > 1.7 / 0.365 nm		
Energy spread	1.20E-03		
Bunch Length s _t / ps	10.68 (without HC) / 53.40 (with HC)		

<표 1.2.3.1> 다목적 방사광가속기 일반 파라메타

나. 고주파 파라메타 (RF Parameter) 등

<표 1.2.3.2> 고주파 파라메타

구 분	값			
RF frequency / MHz	499.877			
# cavities / total Voltage	3 x nc / 3.5 MV (1.8 MV max)			
# buckets: total / gap	1332 / 267			
Harmonic RF system	3 rd , passive, sc, 800 kV			
Average current / mA	400			
Lifetime / h	4.54 (flat) / 8.81 (round)			
Top up operation	yes			
Injection scheme	4 Kicker bump			
Beam pipe (in achrom.) / mm ²	D: 24(H)*20(V) @ Straight Section			
max. bending magnet field / T	2			
max. quadrupole grad. T/m	56			
max. sextupole strength T/m ²	1844			
max. octupole strength T/m ³	-			

다. 저장링 격자구조 (Lattice) 파라메타

구 분	값		
Super / Anti / TrG / LG bend	yes / yes / yes /yes		
Momentum Compaction a _c	7.86E-05		
Tune n _x / n _y	67.44 / 23.17		
Damping times t_x / t_y / t_z / ms	11.1 / 21.1 / 19.3		
Nat. Chromaticity x _x / x _y	1.474358974		
Syn. Rad. Integrals I _n	$ \begin{array}{rcl} I_1 &=& 0.06 \mbox{ m}, & I_2 &=& 0.2 \mbox{m}^{-1} \mbox{ ,} \\ I_3 &=& 0.02 \mbox{ m}^{-2} \mbox{ ,} \mbox{ I}_4 &=& -0.25 \mbox{ m}^{-1} \\ I_5 &=& 1.33 \times 10^{-6} \mbox{ m}^{-1} \end{array} $		

<표 1.2.3.3> 저장링 격자구조 파라메타



<그림 1.2.3.1> 한 셀의 구조와 셀에서의 Twiss Parameter

라. 휨자석 파라메타 (Radiation Parameter : Bends)

구 분	값
Flat Top magn. Field / T	2
critical wavelength / Å	0.58
critical energy / keV	21.3
Spectral flux @ 10 keV	1.73x10 ¹⁴
Spectral brilliance @ 10 keV	5.25x10 ¹⁷

<표 1.2.3.4> 휨자석 파라메타

마. 삽입장치 파라메타 (ID Parameter : Bends)

<표 1.2.3.5> 삽입장치 파라메타

구 분	값
ID1: type	IVU16
ID1: period length & # periods	16 mm / 310



<그림 1.2.3.2> 광자빔 에너지에 따른 방사광의 밝기

1.2.4 빔라인 구성 (우선 빔라인)

연번	후보 빔라인	3세대 방사광가속기	다목적 방사광가속기
	바이오신약-	• 다목적 방사광가속기의 향상된 밝기외	결맞음으로 정밀도 및 분석효율 증가
1	바이오소각산란	(주로 기초연구에 활용)	(신약 / 약 선달 개말 등 산업세의 응용연구 지원)
2 -	소재 구조 분석	• 다목적 방사광가속기 기술의 발견 활용이 높은 XRD, XAFS 실험 지원	전과 성능향상에 맞추어 산업체에서 ^원 .
	· 또에 가 또 한 다 비라인	(주로 기초연구에 활용)	(산업체가 요구하는 실험지원)
	연엑스선	• 기본 분석기법인 XPS, XAS 기법의 경우 경우 3세대 가속기 대비 100~1,000 배 5000 eV) 제공	· 자동호하여 분석 효율 향상, 분광현미경의 효율이 높아지며, 넓은 에너지 영역(100 ~
3	나노프로브 빔라인	(주로 기초연구에 활용, 산업활용에는 제한적)	(높은 사양의 기능, 빠른 실시간, 다양한 실험 환경에서 연구 가능, 넓은 에너지 영역으로 활용 분야 확장)
4	나노 스케일 각분해 과저자비과	 3세대 가속기 대비 에미턴스가 작아, 시료에 충분한 밝기(flux)를 제공하여, ARPES 정보 획득 	X-선이 시료에 수십 nm로 집속됨에도 , 기존에 불가했던 높은 공간분해능으로
	평전자군영 빔라인	(마이크로 빔 ARPES만 구현)	(4세대 광원의 장점을 살려 ARPES를 수십~100 nm 분해능으로 구현)
5	결맞음 X-선 회절 빔라인	 다목적 방사광가속기에서는 결맞음이 연구의 새로운 영역 개발하여 편광 기 	10-100 배 증가, 결맞음을 활용한 시료 능을 통한 전자구조에 대한 정보도 확보
5		(결맞음이 매우 낮음, 만족하는 광원 없음)	(편광 및 결맞음 기능으로 첨단 과학 연구를 가능하게 함)
	결맞음 소각 산란	 기존 3세대 가속기에도 있는 범용 좋게 하여 보다 명확한 정보를 제공히 	실험기법이나 입사하는 광원의 결맞음을 H며, 그 결과 활용 범위가 넓어짐
6	빔라인	(스침각 소각산란 기법은 있으나 X-선의 결맞음 부족)	(결맞음을 이용하는 명확한 분석 기능이 추가)
7	실시간 엑스선 흡수 분광학	 기존 3세대 가속기에도 있는 범용 강하고 넓은 에너지 영역을 가지게 5 수 있으며 응용 범위가 넓음 	실험기법이나 입사하는 광원의 세기가 되어, 실시간 실험을 경쟁력 있게 수행할
	김대언	(실시간·시분해 실험의 한계)	(빠른 시간 대의 실시간 실험 가능)
0	생체분자	• 3세대 가속기에서는 30μm 크기 이상 다목적 방사광가속기는 10μm 이하의	의 단백질 결정에 대한 연구가 가능하나, 단백질 결정 시료 연구도 가능
0	나노결성악 빔라인	(30 um 크기 이상의 결정 시료 필요)	(10um 정도로 결정화된 막단백질도 연구 가능)
0	고에너지 현미경	 3세대 가속기는 에너지의 한계로 높은 특 4세대의 높은 에너지와 높은 공간분해능 	투과율이 필요한 시료 연구에 부적합한 반면 을 이용하여 다양한 시료의 정밀 연구 가능
9		(높은 에너지 없으며, 해상도가 낮거나 투과율이 부족)	(높은 에너지 가능하며 해상도와 투과율 모두 만족)
10	나노 프로브 빔라인	• 3세대 가속기에서 10µm 수준의 대 방사광가속기에서는 50 nm 이하 Ptychography 구현이 가능하고 특수 프로브를 구축함	마이크로 빔을 제공하는 반면, 다목적 h의 나노빔 제공을 통해 XRS/XRF/ `환경물질 활용이 가능한 다목적 나노
		(동일한 기능을 수행하는 빔라인 없음)	(경엑스선 기반의 나노프로브 기술을 50 nm 이하 분해능으로 구현)

<표 1.2.4.1> 다목적 방사광가속기 빔라인 구성(안)

<표 1.2.4.2> 다목적 방사광가속기 빔라인 개요

빔라인	빔에너지	분해능	광원	실험기법	활용	예산 (억원)
① 바이오신약-바이오소각산란 (BioPharma-BioSAXS)	5~20 keV	SAXS: 1 Å 이하 ΔΕ/Ε < 10 ⁻⁴	IVU	① Bio-SAXS	바이오	130
② 소재 구조 분석 빔라인 (Material Structure Analysis)	5~40 keV	Δ E/E < 10 ⁻⁴	Undulator	 XRD XAFS 	소재, 에너지	140
③ 연엑스선 나노프로브 빔라인 (Soft X-ray Nano-probe)	0.1~5.0 keV	sub-micro beam ΔE/E>1.5×10 ⁻⁴ @1keV	EPU	 XAS XPS 	반도체, 소재	155
④ 나노스케일 각분해 광전자 분광 빔라인 (Nanoscale Angle-resolved Photoemission Spectroscopy)	0.1~2 keV	100 nm 이하 ΔΕ/Ε < 10 ⁻⁴	Undulator	① Nano-ARPES	반도체, 소재	148
⑤ 결맞음 X-선 회절 빔라인 (Coherent X-ray Diffraction)	3~30 keV	sub-micro beam	Undulator	 XRD CDI 	반도체, 지질, 소재, 화학	130
⑥ 결맞음 소각산란 빔라인(Coherent Small-angle X-ray Scattering)	4~40 keV	수 nm ~ 수 μm ΔΕ/Ε < 2×10 ⁻⁴	IVU	 SAXS/WAXS (GI 기법 포함) XPCS 	소재, 화학	110
 ② 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔리인 (Real-time X-ray Absorption Fine Structure) 	5~40 keV	수 µm	Undulator	① XAFS	에너지, 환경, 소재, 지질	100
 ⑧ 생체분자 나노 결정학 빔라인 (Bio Nano crystallography) 	5~20 keV	1 Å 이하	IVU	① MX	바이오	142
⑨ 고에너지 현미경 빔라인 (High Energy Microscopy)	5 ~ 100 keV	공간분해능 0.1μm	Superbend	① Projection imaging	소재, 에너지, 바이오	100
⑩ 나노 프로브 빔라인 (Nano-probe)	5~25 keV	50nm 이하(나노프로브) 1~10 μm(마이크로프로브)	IVU	 Ptychography/XRF XRS 	반도체, 소재, 에너지, 환경, 화학	150
계						1,305



<그림 1.2.4.1> 우선 구축 빔라인 개념도 1



<그림 1.2.4.2> 우선 구축 빔라인 개념도 2

1.2.5 기반시설

구분	건물명	연면적 (㎡)	주요 시설	비고
	본부동	7,500	 공용공간 및 사무실(6,200㎡) 산업지원분석실(900㎡), 비즈니스 지원실(100㎡) 산업체 인력양성실(300㎡) 	2,500㎡×3층
	연구동 1,2	7,000	 X-선 광학계개발실(400m²) 기계진공조립실(400m²), 전기전자개발실(600m²) 제어개발실(600m²), 데이터센터(600m²) 진공테스트실(1,000m²), machine shop(900m²) 광학장치개발실(400m²), 운전시설·공용공간·빔라인지원시설(2,100m²) 	3,500㎡×2층
	저장링동	37,500	 터널, 실험홀, 빔라인 * 직경 300~400m의 원형 건물 	1층
	선형가속기동	1,500	 터널(300m²), 갤러리(480m²) 클라이스트론 조립실(180m²) 연구실(360m²), 보관실(180m²) 	1층
핀스	초전도고주파동	1,200	 초전도실(300m²), 제어실(50m²) 클라이스트론실(450m²), 압축기실(300m²) 보관실(100m²) 	1층
지설	중앙 수변전동	1,800	 154kV 수변전 시설(30m×60m) 야외 야드(2,000m²) 	1층
	전력설비동	1,600	• 조닝별 전력설비 (400㎡ × 4개소)	1층, 4개소
	중앙 기계동	3,000	• 중앙 기계시설(3,000㎡)	1층
	공조기계동	1,600	• 조닝별 기계설비 (400㎡ × 4개소)	1층, 4개소
	연구실험지원 1동	5,600	 가속장치시험실(200㎡), 대전력연구실(200㎡) 자장측정실(400㎡), 진공조립실(200㎡) 진단장치연구실(150㎡), MPS연구실(150㎡) 가공실(100㎡), 정밀측정실(100㎡) 빔라인장치실(400㎡), 장비보관실(1,000㎡) 연구실 등(2,700㎡) 	3층
	연구실험지원 2동	400	• 화학세정실(300㎡), 화학약품보관시설(100㎡)	1층
	연구실험지원 3동	500	 방사선안전 관련 보관시설 및 교정실(300m²) 가스·유류 보관시설(200m²) 	1층
	보안관리동	200	• 출입시설, 보안관리시설	
	소 계	69,400	-	
	연구동 3,4	6,000	• 빔라인 실험지원, 연구실	
大っし	연구실험지원 4동	600	• 장치 보관시설, 폐기물 보관시설	1층
구가 필요	숙소동	6,000	• 방사광이용자 숙소	1,200㎡×5층
시설	식당 및 홍보관	3,000	• 식당, 홍보시설	1,500㎡×2층
. —	롱빔라인	5,000	 롱빔라인 3기 	
	소계	20,600	-	
	계	90.000		

<표 1.2.5.1> 다목적 방사광가속기 기반시설 (안)



<그림 1.2.5.1> 다목적 방사광가속기 기반시설 배치도 및 조감도

2장. 연구분야

2.1 서론

4GSR은 저장링 내 전자빔의 에미턴스 (emittance)를 3GSR 대비 100 배 이상 개선하여 방사광의 활용 경쟁력을 한 차원 높이는 시설이다. 4GSR에서는 수직뿐 아니라 수평방향으로의 전자빔의 크기도 획기적으로 작아지고, 발생하는 X-선의 상하좌우 크기 및 퍼짐이 작아진다. 이 결과 X-선은 광량의 큰 손실 없이 광원에서 시료까지 도달할 수 있어, 많은 실험기법의 효율이 높아지는 등 물질 분석에 있어 새로운 패러다임을 제공하며 기존의 3GSR로 제공할 수 없었던 임팩트 있는 분석결과를 가져오게 된다.

전자빔의 에미턴스 (emittance)가 작아짐으로 해서 생기는 장점은, 3GSR 대비,

- 시료에 집속되는 X-선의 세기 (intensity)를 크게 하며 (수백~수만 여배 향상),

- X-선의 결맞음 (coherency)이 상응하여 증가하며,

- 시료에 도달하는 X-선의 공간적 안정성의 향상이라 할 수 있다.

이러한 장점들은 (i) 5시간 걸리는 실험이 3분 만에 이루어지게 하며, (ii) 간섭성을 이용하는 기법 실험의 경우 측정시간 단축뿐 아니라 background noise를 줄임으로써 보다 정확한 정보를 얻게 하며, (iii) 공간분해능을 가지는 물성 분석의 신뢰성을 높게 만든다. 특히 시료에서의 X-선의 크기를 매우 작게 하여 실험하는 기법들 (spectro-nanoscopy, X-ray microprobe 등)과 고밀도의 광자가 필요한 실험 기법들 (resonant inelastic X-ray scattering, ambient pressure XPS (X-ray photoelectron spectroscopy), high energy XPS, small-size-protein crystallography, 혹은 quick XAFS/quick X-ray scattering 기법 등)의 활용이 크게 기대된다.

예를 들어, 신약개발에 있어 중요 연구 대상인 막단백질 혹은 거대단백질은 단백질 결정의 성장이 매우 어려워서 구조 분석 연구의 주요 걸림돌로 작용하고 있다. 그러나 4GSR을 이용하게 되면 3GSR에서 필요한 30 µm 이상의 결정시료 보다 훨씬 작은 크기의 단백질 결정(약 10 µm)을 가지고도 실험이 가능하다. 이는 생명과학 및 신약개발 분야의 연구범위 확장과 함께 연구 개발 활성화를 유도함으로써 질병의 이해와 신약 개발 가능성을 한층 높일 것으로 기대된다. 다른 한 예로, 이차전지 물질연구에 있어서 충방전 상태 환경에서의 결정 구조 및 국부적인 원자의 움직임에 대한 정보를 실시간으로 획득할 수 있다. 4GSR에서는 고속 XAFS, 고속 X-선 산란 등의 기법으로 실시간 (in-situ) 혹은 작동 (operando) 상태로 충방전에 따른 화학상태 반응을 연구할 수 있기 때문이다. 더 나아가 회절 이미징 (Ptychography) / 주사투과 X-선 현미경 (STXM) 기법을 이용하여 분석하게 되면, 이차 전지의 충전 과정에서 발생하는 나노미터급의 공간분해능으로 1 마이크론 (µm) 이하의 개별 입자 내분의 공간적인 산화가의 변화 혹은 망가지는 현상을 실시간 관찰할 수 있다. 4GSR에서의 국부적-실시간 측정 정보는 보다 경쟁력 있는 이차전지 전극 소재 혹은 소자 개발에 크게 기여할 것이다. 또한, 시료내부의 결함이나 미세구조를 연구하는 단층촬영의 경우 간섭성 및 광원의 성질이 좋음으로 인해 해상도가 보다 좋아지게 된다. 4GSR의 경우 높은 에너지를 얻기가 상대적으로 유리한데, 이 경우 두꺼운 시료에 대해서 다양한 시료 분위기 속에서 연구를 할 수 있기 때문에, 고속 이미징/단층촬영 혹은 분광 나노현미경 활용을 다른 probe보다 경쟁력 있게 할 수 있게 되며, 그 결과 경쟁력 있는 분석 결과를 제공해 줄 것이다.

X-선의 휘도 (brightness), 간섭성의 증가 이외에, 광원 에너지 영역의 확장으로 4GSR을 이용하는 X-선 기법들 (Ptychography/STXM, μ-XRF (X-ray fluorescence analysis), Projection Imaging, CDI (coherent diffraction imaging), Bragg CDI, quick XAFS, Powder Diffraction, Protein Crystallography, AP-XPS, Resonant XRS 등)은 더욱 경쟁력을 가지면서 다양하게 발전할 것으로 기대가 되며, 이를 이용한 활용 범위는 더욱 넓어질 것이다.

2.1.1장에서는 국내 유일의 3GSR인 PLS-II의 기법 및 활용 현황, 그리고 다른 국가에서 이루어지고 있는 4GSR 신규구축 혹은 기존 3GSR의 개선 현황과 이를 이용한 기대되는 활용 분야를 간략하게 살펴본다. 3GSR 대비 4GSR의 휘도 (brightness), 밝기 (flux) 비교를 몇 가지 사례에 대해서 비교하였으며, 4GSR 광원에 구축하면 경쟁력이 있을 빔라인들을 제안하였다. 빔라인의 제안은 기법 별로 제시하였는데, 국내외의 활용 현황을 고려할 때 각 기법 빔라인은 1기가 아닌 2~3기를 구축하여도 활용도가 충분히 높을 것으로 기대한다.

2.1.1 포항 방사광가속기 빔라인 현황

가. 3GSR PLS-II 빔라인 현황

현재 포항가속기연구소의 3GSR인 PLS-II는 3.0 GeV의 전자빔 에너지, 5.8 nm·rad의 emittance를 가지며 400 mA의 전류로 운전 중이며, 36개 빔라인이 구축되어 운영되고 있다. 아래의 <그림 2.1.1.1>은 36기('20년 완공 1기 및 fs-THz 빔라인 포함)의 빔라인의 위치를 표시한 도식도이다.



<그림 2.1.1.1> 포항 3세대 방사광가속기의 '20년 기준 빔라인 맵 ('21년 36기 빔라인 운영 중)

36기의 빔라인은 각기 특정된 X-선 분석기법들을 가지고 있다. X-선 분석기법들은 지난 수십 년 동안 경쟁적으로 개발되어 왔기 때문에 다양하고 경우에 따라 매우 정교하다. 현재, 각 빔라인의 기법과 장치들은 개성 있는 특징을 가지고 있을 뿐 아니라, 경우에 따라 상보적인 기능을 같은 실험장치 내에 접목하는 경우들이 있다. 이용자들은 실험 목적에 따라 적절한 실험기법이 구비된 빔라인을 선택하여 활용하고 있다. 36기의 빔라인을 분류해 본다면, 간단하게 X-선 산란 (scattering), X-선 분광 (spectroscopy), X-선 현미경 (microscopy), 기타로 분류할 수 있다. 이를, 각 기법의 장점을 표현하는 용어로 들여다보면, 아래와 같이 다양한 기법들로 세분화 할 수 있다. 예를 들어, X-선 scattering의 경우는 X-선 diffraction (XRD), powder diffraction, small-angle X-선 scattering (SAXS), wide-angle X-선 scattering (WAXS), grazing incidence small/wide- angle scattering (GI-SAXS/WAXS), protein crystallography (PC) 등으로 세분화 할 수 있고,

X-선 spectroscopy의 경우는 X-선 absorption spectroscopy, X-선 absorption fine structure (XAFS), X-선 photoelectron spectroscopy (XPS or PES), angle resolved XPS (AR-PES), ambient pressure XPS (AP-XPS), high energy XPS 등으로 세분화 할 수 있으며,

X-선 microscopy의 경우에는 X-선 projection imaging, full field X-선 microscopy (XM), tomography, scanning transmission X-선 microscopy (STXM), scanning photoelectron microscopy (SPEM), photoemission electron microscopy (PEEM), coherent diffraction imaging (CDI), Bragg coherent diffraction imaging, fast Fourier transform holography, Ptychography 등 다양한 현미경학들로 세분화할 수 있다.

위의 36기 빔라인 위치를 나타내는 개념도와 아래의 표에는 세분화되어 이름 지어진 빔라인을 나타내었다. 이용자들은 가급적이면 한 빔라인에서 시료의 모든 정보를 얻는 것을 원하지만 현실적으로 하나의 빔라인에서 모든 정보를 얻지 못하는 경우가 많다. 가장 큰 이유는 많은 물질은 여러 원소들로 이루어져 있으며, 물질의 결정구조, 원자구조, 분자구조, 화학적 상태, 전자구조, 거시적 미시적 형상에 대한 정보 등 매우 다양한 정보들을 다 얻어야 하는 것이 최근의 분석 트렌드이며, 이 모든 것을 종합적으로 세계 최고 수준의 경쟁력으로 데이터를 제공해 주는 기법은 현실적으로 없기 때문이다. 분석 기술적인 측면에서의 이유는, 세계적인 경쟁력 있는 수준의 분석을 위해 각 기법마다 그 목적에 맞게 최적화되어야 하는데, 이를 위해서 다중 기법을 같이 구현하기에는 많은 경우 기하학적인 또한 원리적인 어려움이 있기 때문이다. 예를 들어, 흡수 분광학의 경우, low Z, high Z, mid Z 원소를 한꺼번에 가지고 있는 시료에 대해서 모든 원소에 대한 흡수분광 분석을 하고자 할 경우, 표면과 bulk의 구조를 모두 알고자 할 경우, 단층막 (monolayer)의 화학작용과 대기환경에서의 화학작용 메커니즘을 규명하고자 할 경우 여러 빔라인을 이용한 연구가 불가피한 경우가 있다. 현실적으로 한 빔라인에서는 하나 혹은 몇 가지만의 물리화학적인 특성을 얻는다고 할 수 있다. 반면, 이용자들은 실험을 할 때 하나의 시료에 대해서 multi-modal 기법들을 이용해 여러 분석데이터를 얻기 원하는 추세이기 때문에, 하나의 빔라인에 다양한 분석 장치가 구비되고 몇 가지 분석기술이 같이 존재하는 경우들이 있다.

<표 2.1.1.>과 <표 2.1.1.2>에는 PLS-II의 '20년 기준의 35기 빔라인의 번호와 간략한 기법 이름이 있다. 또한, 최근 몇 년간의 [빔타임 신청 일수 / 과제수], [배정 일수 / 과제수], [수행 일수 / 과제수]가 나타나 있다. <표 2.1.1.>, <표 2.1.1.2>를 보면, 빔라인의 빔타임 경쟁률은 전반적으로 높아서 신청 일수 대비 배정 일수가 적은 (약 60%) 상황이다. 실제로, 빔타임 경쟁률이 높은 상황에서는 이용자들이 빔타임 신청을 꺼리거나 신청 일수를 원하는 양보다 작게 신청해서 빔타임 배정에 유리하게 하려는 경향도 있기 때문에, 실제 각 빔타임을 사용하려는 이용자의 수와 빔타임 사용 일수 수요는 통계보다 많다는 것이 일반적인 의견이다.

<표 2.1.1.1>	(참고)	최근	4년간	공용빔타임	신청-배정	현황	(일수)
-------------	------	----	-----	-------	-------	----	------

		'16년		'17년		'18년		'19년			계			수용률	과제당				
		구분 (밈라인명)	신청	배정	실적	신청	배정	실적	(배정/신청)	실험일 (실적기준)									
-	협약	(KRISS,IBS)사탼해X-선(10, '20년준공	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
1	협약	(KIST) X-선 산란/흡수분광 (1D)	161	93	92	107	87	78	142	95	91	130	90	75	540	365	336	68%	2.5
2	협약	(MPK) 자성분광 (2A)	130	94	94	164	97	82	129	95	95	119	95	75	542	381	346	70%	3.1
3	공용	초분자 결정학 (2D)	167	132	130	218	123	119	213	124	120	255	128	119	853	507	488	59%	1.3
4	공용	물질물리 X-선 산란 (3A)	168	120	113	151	121	118	141	131	121	157	133	112	617	505	464	82%	4.0
5	공용	소각 X-선 산란I(3C)	148	133	133	195	125	112	193	133	131	173	132	121	709	523	497	74%	1.8
6	공용	X-선 산란 (3D)	122	128	120	167	130	121	177	129	123	191	130	105	657	517	469	79%	2.7
7	공용	마이크로빔 광전자분광 (4A1)	145	33	5	96	60	52	123	61	61	100	66	60	464	220	178	47%	3.4
8	협약	(IBS) 스핀 광전자분광 (4A2)	58	27	5	32	47	42	84	45	40	65	40	40	239	159	127	67%	4.5
9	협약	(GIST) X-선 미세회절 (4B)	86	86	82	86	73	69	64	64	64	84	77	73	320	300	288	94%	3.8
10	공용	소각 X-선 산란 Ⅱ (4C)	196	135	133	198	124	115	203	132	124	201	132	117	798	523	489	66%	1.6
11	공용	광전자분광 (4D)	204	132	126	150	128	120	236	131	119	212	133	112	802	524	477	65%	3.0
12	공용	X-선 소재과학 (5A)	227	130	127	238	129	126	303	130	124	290	132	118	1058	521	495	49%	2.4
13	협약	단백질결정학 Ⅲ (5C)	166	121	120	147	112	101	152	112	104	139	111	100	604	456	425	75%	1.2
14	전용	(GIST) X-선 산란 (5D)	50	51	51	70	55	43	55	53	53	61	55	34	236	214	181	91%	3.5
15	협약	(MPK) 중에너지 X-선 분광학 (6A)	-	-	-	6	3	0	86	49	42	75	54	51	167	106	93	63%	3.2
16	공용	생명의학영상 (6C)	186	119	114	248	115	105	213	131	127	267	130	122	914	495	468	54%	2.4
17	협약	(UNIST) X-선 다목적 연구 (6D)	104	66	66	132	63	57	160	67	65	172	65	60	568	261	248	46%	1.5
18	협약	단백질결정학 (7A)	130	121	119	139	121	109	135	118	106	113	108	106	517	468	440	91%	1.2
19	공용	X-선 나노영상 (7C)	144	125	125	175	108	93	197	129	118	190	116	103	706	478	439	68%	2.9
20	공용	X-선 흡수분광 (7D)	236	133	132	236	128	124	299	132	129	362	133	121	1133	526	506	46%	1.6
21	공용	분광 현미경 (8A1)	145	69	69	180	80	66	110	78	75	109	58	53	544	285	263	52%	2.6
22	협약	대기압 광전자분광(8A2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	106	40	37	38%	3.1
23	공용	나노 X-선 흡수분광 (8C)	279	133	132	300	128	121	345	133	129	398	132	120	1322	526	502	40%	1.5
24	전용	(POSCO) X-선 산란/흡수분광 (8D)	12	9	3	35	32	27	34	13	10	51	35	32	132	89	72	67%	2.3
25	공용	극소각 X-선 산란 (9A)	251	133	131	269	125	116	282	133	128	307	131	122	1109	522	497	47%	1.5
26	공용	고분해능 분말회절 (9B)	248	133	133	278	131	122	264	133	133	239	129	113	1029	526	501	51%	1.7
27	공용	결맞은 X-선 산란 (9C)	136	131	131	113	105	92	163	133	133	173	127	127	585	496	483	85%	5.1
28	공용	X-선 나노마이크로머시닝 (9D)	195	132	129	151	105	102	188	126	126	198	123	122	732	486	479	66%	3.7
29	공용	연X-선 나노현미경 (10A1)	149	119	107	167	97	82	187	67	67	165	67	57	668	350	313	52%	2.8
30	공용	고분해능 광전자분광 (10A2)	151	66	64	103	40	32	116	67	58	131	66	56	501	239	210	48%	2.5
31	공용	고선속 X-선 흡수분광 (10C)	388	132	132	433	129	98	423	133	123	454	133	115	1698	527	468	31%	1.6
32	협약	(KIST) 고분해능 광전자분광 (10D)	179	95	91	121	95	66	176	82	80	197	95	82	673	367	319	55%	3.0
33	공용	마이크로 거대분자 결정학 (11C)	-	-	-	73	56	54	127	122	114	159	125	114	359	303	282	84%	1.2
34	공용	적외선 분광학 (12D)	-	-	-	91	53	51	168	116	111	130	121	114	389	290	276	75%	3.6
35	공용	펨토초 테라헤르츠 분광	146	130	119	166	129	128	149	129	121	124	121	121	585	509	489	87%	5.3
합계		5,107	3,261	3,128	5,435	3,254	2,943	6,037	3,526	3,365	6,297	3,563	3,209	22,876	13,604	12,645	59%	2.1	

			'16년			'17년			'18년			'19년			계			배정률
		구분 (빔라인명)	신청	배정	실적													
-	협약	(KRISS,IBS)사분해 X-선(10) '20년 준공	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1	협약	(KIST) X-선 산란/흡수분광 (1D)	45	35	34	28	30	24	51	43	40	45	45	37	169	153	135	91%
2	협약	(MPK) 자성분광 (2A)	36	33	33	46	31	25	37	30	30	34	28	23	153	122	111	80%
3	공용	초분자 결정학 (2D)	71	71	70	99	98	94	111	110	105	131	127	118	412	406	387	99%
4	공용	물질물리 X-선 산란 (3A)	35	29	27	32	31	30	32	32	30	36	34	28	135	126	115	93%
5	공용	소각 X-선 산란I(3C)	70	71	71	78	73	63	84	72	71	78	77	71	310	293	276	95%
6	공용	X-선 산란 (3D)	39	39	39	53	47	44	57	47	44	61	48	44	210	181	171	86%
7	공용	마이크로빔 광전자분광 (4A1)	32	10	2	22	16	15	25	19	19	23	18	16	102	63	52	62%
8	협약	(IBS) 스핀 광전자분광 (4A2)	13	8	1	6	9	8	14	10	9	13	10	10	46	37	28	80%
9	협약	(GIST) X-선 미세회절 (4B)	22	22	21	21	20	17	16	16	16	23	23	22	82	81	76	99%
10	공용	소각 X-선 산란 Ⅱ (4C)	95	75	74	101	79	73	104	79	73	102	89	78	402	322	298	80%
11	공용	광전자분광 (4D)	63	45	43	43	40	37	69	49	44	61	43	36	236	177	160	75%
12	공용	X-선 소재과학 (5A)	75	47	47	78	53	52	101	58	56	100	53	48	354	211	203	60%
13	협약	단백질결정학 Ⅱ (5C)	113	107	106	106	101	90	105	92	82	102	98	87	426	398	365	93%
14	전용	(GIST) X-선 산란 (5D)	12	12	12	17	16	13	15	14	14	16	14	12	60	56	51	93%
15	협약	(MPK) 중에너지 X-선 분광학 (6A)	-	-	-	2	1	0	19	14	12	20	18	17	41	33	29	80%
16	공용	생명의학영상 (6C)	39	39	36	54	51	43	57	54	51	74	67	63	224	211	193	94%
17	협약	(UNIST) X-선 다목적 연구 (6D)	43	44	38	53	46	41	70	50	48	69	47	42	235	187	169	80%
18	협약	단백질결정학 (7A)	106	104	102	110	112	100	93	92	79	73	70	68	382	378	349	99%
19	공용	X-선 나노영상 (7C)	28	26	27	44	43	34	53	52	45	53	51	46	178	172	152	97%
20	공용	X-선 흡수분광 (7D)	84	77	76	79	65	64	113	83	81	142	94	86	418	319	307	76%
21	공용	분광 현미경 (8A1)	42	24	24	47	35	28	34	30	29	34	21	19	157	110	100	70%
22	협약	대기압 광전자분광(8A2) '18년 준공	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33	13	12	33	13	12	39%
23	공용	나노 X-선 흡수분광 (8C)	94	82	81	102	82	78	130	86	84	149	97	90	475	347	333	73%
24	전용	(POSCO) X-선 산란/흡수분광 (8D)	4	3	1	15	13	11	16	6	4	21	17	15	56	39	31	70%
25	공용	극소각 X-선 산란 (9A)	110	80	79	119	81	74	130	90	87	143	100	93	502	351	333	70%
26	공용	고분해능 분말회절 (9B)	88	72	72	103	76	71	104	78	78	97	74	68	392	300	289	77%
27	공용	결맞은 X-선 산란 (9C)	26	23	23	24	21	21	27	23	23	30	27	27	107	94	94	88%
28	공용	X-선 나노마이크로머시닝 (9D)	35	35	34	31	29	28	33	32	32	38	38	37	137	134	131	98%
29	공용	연X-선 나노현미경 (10A1)	41	39	36	42	37	30	51	28	28	47	22	19	181	126	113	70%
30	공용	고분해능 광전자분광 (10A2)	44	24	23	41	16	17	35	24	21	42	25	22	162	89	83	55%
31	공용	고선속 X-선 흡수분광 (10C)	134	82	82	153	73	53	151	90	83	164	94	83	602	339	301	56%
32	협약	(KIST) 고분해능 광전자분광 (10D)	45	31	30	59	32	21	47	28	27	58	32	29	209	123	107	59%
33	공용	마이크로 거대분자 결정학 (11C)	-	-	-	59	53	52	101	104	89	103	100	90	263	257	231	98%
34	공용	적외선 분광학 (12D)	-	-	-	21	18	17	38	35	32	31	31	28	90	84	77	93%
35	공용	펨토초 테라헤르츠 분광	24	22	19	26	25	23	29	28	26	25	23	23	104	98	91	94%
합계			1,708	1,411	1,363	1,914	1,553	1,391	2,152	1,698	1,592	2,271	1,768	1,607	8,045	6,430	5,953	80%

<표 2.1.1.2> (참고) 최근 4년간 공용빔타임 신청-배정 현황 (과제수)

나. 이용자 및 연구성과 현황

1995년도에 X-선 회절 (XRD)와 X-선 광전자분광학 (PES 혹은 XPS) 2기의 빔라인으로 시작해서 국내의 방사광 활용분야를 개척하기 시작한지 25년이 지난 요즈음, PLS-II를 활용하는 인원은 한해 약 6천여 명이며 1,600여 과제를 수행하고 약 550여 편의 SCI급 논문을 배출하고 있다. 아래의 표는 연도별 과제 수행 수와 과제를 수행한 연구자 수를 나타내고 있다.



<그림 2.1.1.2> 3세대 실험수행 과제 및 실험인원

다. 빔라인 활용 분석

빔라인의 각 기법을 이용하면 물질의 격자 구조, 국부적인 원자 구조, 분자구조, 거대분자 구조, 분자의 배향, 산화가, 위상 등의 화학적 상태, 전자 구조, 전자의 회전 방향 등에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이러한 정보들은 물리화학적인 현상의 이해뿐 아니라 신소재 개발 및 소자 개발에 있어 큰 기여를 하게 되어 매우 넓은 응용 분야를 가지게 된다. 특히 국내의 많은 이용자는 소재 개발에 오리엔트 되어 있으며, 관련하여 산업체 연관된 물질연구 주제들이 많다고 할 수 있다.

아래 <표 2.1.1.3>에는 3GSR PLS-II에서 이루어지고 있는 연구 분야의 일부를 나타내었다.

<표 2.1.1.3> 3세대 방사광가속기를 활용한 연구 분야

연구분야	주요연구내용
생명공학	. 단백질 분자구조 분석 . 신약개발 및 기작원리 관측 . 식품 및 산업효소 개발
재료과학	. 결정 및 비정질 물질 분석 . 고압/고.저 온도에서의 구조적 상변이 연구 . 초전도 물질, 강자성 재료 구조 분석 . 그린에너지 소재 발굴 . 신물질 개발 및 구조분석
화학분야	. 촉매 물질의 동역학 연구 . 에너지물질의 구조규명 및 실시간구조 연구 . 표면에서의 X-선 광화학 과정 연구 . 원자 및 분자 분광학 . 극한조건의 화학적 상태 분석 . 외부조건에 따른 상전이현상 연구
지구과학	. 지구 내 초고압과 초고온 상태의 물질 관찰 . 지진 형성 연구 . 운석이나 태양계의 미세 먼지 등 구조 분석
환경과학	. 생체 물질내 함유된 극소량의 독성 성분 분석 . 배기 가스내 오염 물질을 제거하는 촉매 개발 . 고품질 전지나 수소저장합금 연구
물리학분야	. 자성체 및 소자용 물질의 스핀/자기 구조 연구 . 전이금속 및 반도체 표면의 원자구조 . Anomalous 산란 활용 나노구조 특성 분석
기계분야	. 반도체 공정 및 패키징 공정의 정밀패턴, 정밀금형 구조 제작 . 청색기술 적용 생체(생물) 동작 및 기작원리 연구 . 마이크로 이하의 초소형 기어 제작 및 활용
산업응용	. 제약 설계 . 나노미터나 마이크로 전자구조 . 극미량 화학적 성분 분석 . 재료의 마이크로 이미징 촬영 . 첨단 제품의 잔여 응력 분석
의학응용	. 탁월한 공간 분해능 기술로 모세 혈관이나 암세포의 의학적 진단
인문과학	. 유물 (문화재) 제조 시대 및 지역 판별 . 유물 및 예술품 제조 기법 분석

<표 2.1.1.4>와 <표 2.1.1.5>는 3GSR의 활용 중에서도 몇 기법들과 관련이 있는 연구 주제를 모은 표이다.

실험기법 구분	활용분야	활용 사례							
	u = +1	XPS	- 반도체 소자 물질 등의 전자·화학적 구조와 특성 - 소자 내 절연 물질의 전자 구조 연구						
	반노제	XMCD	- 자성체 및 스핀/자기 소자의 자기 구조 연구 및 계면의 자기 상호 작용 연구 - 반도체 소자의 절연 물질 자기적 성질 연구(HfO ₂)						
	에너지	XPS	- 리튬 2차 전지 양극재 원소의 화학 구조의 정성 및 정량 분석 - 리튬 2차 전지 양극 활물질 구성원소의 원자가 분석 - 리튬 2차 전지 음극소재의 규소 산화물 나노 입자 분석 - 리튬 2차 전지 물질의 충방전 상태에 따른 화학 구조의 변화에 대한 단계적 분석 - 유기 태양 전지 소재 함유 원소의 화학 결합 상태 분석						
X-선 광전자/자성 분광		XMCD	- 촉매의 스핀 상태 분석						
(PES, MS)	바이오	XPS	- 대장균 샘플에 대한 근상압 XPS 분석						
	화학	XPS	- XPS를 이용한 이기종 촉매의 표면 특성 관찰 - 근상압 XPS를 이용한 CO산화에 대한 전이 금속 촉매 연구						
	소재	XMCD	- 철강 소재(전기강 등)의 조성비와 자기 특성 연관 관계 연구 - 철강 소재 함유 원소 사이의 자기 상호작용 연구						
	회견지진	XPS	- 광물질 구성원소의 조성 및 화학 결합 상태 연구 - 방사광 XPS를 활용한 환경규제 물질의 미량 검출 및 화학 상태 연구						
	10,M2	XMCD	- 자성광물 함유 원소의 스핀/자기 소자의 자기 구조 연구 및 계면의 자기 상호 작용 연구 - Iron-garnet 물질의 철원자 상하간의 자기 상호작용 연구						
	반도체	SAXS/ WAXD	- 반도체용 정밀 나노 소자 및 패턴의 구조 분석 - 무기물 기판의 불량 분석을 위한 내부 공극 분석 - 유/무기 반도체형 고분자의 결정 및 배향성에 따른 소자 성능 상관 관계 규명 - Bias에 따른 활성 물질의 변화 관계 규명 - 반도체용 물질의 공정 과정에 따른 불량 발생 원인 규명						
	에너지	SAXS/ WAXD	- 이차 전지용 전극 물질의 충방전 과정에 따른 전극 물질 변화 관찰 - 태양 전지 소재용 유/무기 물질의 전하 이동도와 결정 구조간 상관 관계 규명 - 태양 전지용 소재와 도핑 물질의 혼합에 따른 혼화성 평가						
X-선 산란·회절 (XRS, XRD, SAXS)	৸৻৸ঢ়	SAXS	- 농도 및 pH 변화에 다른 제약용 단백질 및 생채 분자 물질의 수십 나노 크기 규명 - 외부 조건 변화(온도, 압력, 습도)에 따른 구조 변화 관찰 - 화장품 산업에 응용이 되고 있는 다양한 제형 제품(크림)의 콜로이드 구조 규명						
	회학	SAXS/ WAXD	- 촉매용 나노 입자의 성장 메커니즘 규명						
	소재	WAXD	- 철강 재료 고온 반응 현상 규명 - 소결 재료 고온 반응 현상 규명						
	환경지질	WAXD	- 지올라이트 계열 광물 시료의 고온/고압 환경에서의 결정 구조 분석 가능						

<표 2.1.1.4> 실험기법별 활용 사례 (X-선 분광, X-선 산란)

<표 2.1.1.5> 실험기법별 활용 시례 (X-선 흡수분광, X-선 이미징, X-선 결정, 적외선 분광, 리소그래피)

실험기법 구분	활용분야		활용 사례
	반도체	XAFS	- 반도체 소자 물질 등의 전자 및 화학적 구조와 특성
	에너지	XAFS	- 유기 태양전지 소자의 탄소 화학 결합 상태 분석 및 정량 분석 - 리튬 2차 전지의 전극 소재 물질의 원자가 분석과 결합구조 분석 - 리튬 2차 전지 물질의 충방전 상태에 따른 회학 구조의 변화에 대한 실시간 분석
X-선 흡수분광	바이오	XAFS	- 그래핀을 활용한 암세포 내의 활성 산소 관찰 - 절지동물 외골격의 색깔에 따른 원소 분포 및 화학결합 상태 분석
(XAFS)	화학	XANES, NEXAFS	- 반응셀(reaction cell)을 이용한 금속 촉매 반응에 대한 분광학적 연구 - 전이금속 원소 기반 물 산화 촉매의 실시간 XANES 분석
		EXAFS	- 세약 압성 및 성밀와학의 균실 급족 족매 반응에 내한 EXAFS분석 - 전이금속 원소 기반 물 산화 촉매의 실시간 EXAFS 분석
	환경지질	XANES, NEXAFS	- 토양에 대한 XANES기법을 이용한 As (III) / As (V) 비율의 결정과 토양과 물 사이의 비소 분배에의 적용 - 환경 규제 물질에 대한 XANES 기법을 이용한 화학 구조 분석
	반도체	X-선 CT	- packaging 된 반도체 소자의 내부 구조 비파괴 분석 및 3D 입체영상화 - 반도체 소자의 100nm 이하 극미세 내부 구조에 대한 3D 입체 영상화
		X-선 topography	- 화합물반도체의 결정성 기판의 내부 품질 및 결정 결함 분포 영상화 - SiC, GaN, AIN, 합성 Diamond 등의 기판에 대한 품질 평가
	에너지	XANES/ XRF_CT	- 양극재/음극재 간 물질 이동 관찰 - 연료전지 내 수소극에 대한 물 생성, 배출 및 플러딩 현상 관찰
	비아오	X-선 CT, XRF CT	 골 이식재 내부 구조 삼차원 규명, 골 재건 후 잔여 아삭재 주변의 골 밀도 정량 분석 유전적 결함에 의한 폐 기관(氣管) 구조 차이 규명 질병에 의한 신장의 혈관 구조 변화 규명, 유방암의 미세 조직 변화 규명 파킨슨 모델 동물의 뇌신경 세포 형태 3차원 규명
	화학	XANES/ XRF CT	- 내부 구조 비파괴 분석 및 3D 입체영상화 - 소재의 성분 정보를 포함한 3차원 입체 영상화 - 해양 기름 유출 오염을 가정하여 기름 분리막 개발 및 파울링 현상의 이해
X-선 이미징	소재	X-선 CT, XRF CT	 소재의 내부 구조 비파괴 분석 및 3D 입체영상화 금속 공정의 모사 및 In-situ 이미징 철강 제조 공정 및 가공 공정 중의 소재 특성 및 개재물 성분 이미징 합금의 재응고 과정에서 dendrite 구조 생성 관찰 티타늄 재응고 관찰 디스플레이용 소재(OLED, LC) 물질의 공정 조건 (증착 조건, 열처리 온도) 및 외부 조건 변화(전기장)에 따른 분자 구조 변화에 따른 소자 성능 예측
	환경지질	XANES/ XRF CT	 지질 소재의 내부 구조 비파괴 분석 및 3D 입체영상화 소재의 원소별 성분 정보를 포함한 3차원 입체 영상화 지진에 따른 암석 내 알갱이 형태 변화 관찰 소형 화석의 3차원 입체 영상 획득 세일 내 기공 비율 관찰 콘크리트 내 물질 분포 파악 단열 콘크리트 내 기공 분포 3D 파악 인장에 따른 콘크리트 내부 구조 변형 3D 관찰 석탄 구성, 구조 및 내부 기공 구조 관찰 석탄의 열간 강도 변화 관찰
X-선 결정학	바이오	X-선 고분자 결정학	- 신약개발을 위한 표적단백질 분석
리소그래피 (lithography)	반도체	X-선 리소그래피	- 반도체 공정 혹은 패키징 공정에서 사용되는 정밀 패턴 혹은 정밀 금형 구조 제작
÷ ;	반도체	현미경 분광	- 표면 유기성 이물 분석
	비아오	현미경 분광	- Cell 및 tissue 구조 분석 - 질병에 따른 Cell 구조 변화 분석 - 외부 조건 변화에 따른 구조 변화 관찰 (pH, 첨가제, 시간 등)
적외선 분광 (IRS)	회학	현미경 분광	- 촉매 표면 반응 분석 가능 - 단결정 표면에서의 촉매 반응 분석 가능
	소재	현미경 분광	- 철강 재료 표면 특성 분석 - 디스플레이 재료 구조 및 배향 특성 분석 - 다층 박막 구조 분석
	환경지질	현미경 분광	- 고압 환경에서의 구조 분석 가능

라. 산업체 활용 성과

<표 2.1.1.4>와 <표 2.1.1.5>에서 보면 X-선 기법을 이용한 연구물질 대상은 직간접적으로 산업체 소재/소자와 관련이 있으며, 다양한 주제의 산업체 응용 및 활용이 이루어져 왔다. 한편, PLS-II에서는 2013년 산업기술융합센터를 신설하였고, 그동안 산업체 방사광 이용 저변 확대와 산업체 활용을 위해 적극적인 노력을 해 오고 있다. 아래의 표는 그 동안의 실적이며, 앞으로 안정적인 산업체 활용 환경이 되기 위해서는, 산업체 지원 인프라 확충 노력이 이루어져야 하겠다.

- (산업체 직접수행) 산업체가 직접 수행하는 실험 건수는 연간 약 50건 수행 중임
- (산업체 간접수행) 산업체의 재원으로 대학·연구소가 연간 약 100건의 실험·분석 수행
- (산업체 지원분야) 반도체·디스플레이(38.6%), 에너지·화학(36.8%), 기타 소재(23.2%), 생명 등(1.4%)

구·	′13년	'14년	'15년	'16년	′17년	'18년	'19년	계	
산업체	직접 (산업체 직접실험)	29	41	17	23	30	26	26	192
공용빔타임(건)	간접 (산업체 재원)	29	43	71	73	101	95	89	501
센터접수 융합	-	14	24	50	37	70	42	237	
 7	58	98	112	146	168	191	157	930	
기타 (선도기 ⁻		1	7	8	8	10	8	42	

<표 2.1.1.6> 최근('13~'19) 산업체 방사광 이용 현황

* 자료 : 포항가속기연구소 결과보고서(공용빔타임, 융합분석)

2.1.2 4GSR에서의 주요 활용 유망 분야

가. 단백질구조 및 신약 (Structural biology and medicine)

단백질은 생명체가 살아가는데 있어서 복잡한 과정을 수행하는 매우 중요한 물질이다. 단백질의 기능을 이해하는 것은 생명체가 어떻게 살아가고, 생명현상을 유지하는 원리와 작용을 이해하는데 반드시 필요하며, 단백질의 기능은 단백질의 구조에 기인하기 때문에 단백질 입체 구조분석은 단백질의 기능을 분자 수준에서 이해하는데 가장 중요한 연구 수단이다.

방사광가속기를 이용하여 최근 SARS, MERS, COVID-19와 같은 신종 바이러스에 의한 치명적인 감염병의 백신 및 치료제 개발연구가 가속화 할 수 있을 것으로 기대하며, 단백질 구조 분석을 통한 질병 제어를 위한 신약개발 연구에 이용할 수 있다. 신약 개발 과정에서 질환 단백질에 맞는 화합물질을 찾기 위해서는 많은 화합물질들과 질환 단백질 간의 결합구조를 규명하는 것이 필요하다.

생명과학 분야에서는 기존 DNA, RNA와 단백질 특성 규명에 집중된 연구에서 세포 또는 세포기관의 생리학적 기능연구에 필요한 3차원 이미징 및 구조물성 연구가 가능하여 생명과학 분야의 발전에 기여할 것으로 예상된다. 또한 high-throughput SAXS 측정 플랫폼을 바탕으로 기초과학적 관점에서 생명과학의 대상 물질의 거시적/미시적 거동 이해와 함께 신종 감염병 백신 및 치료제 개발에 효율성을 높이고, 신속대응 능력을 향상한다.

- 아타미플루와 같은 유전자 정보기반 신약개발, 신약 개발 및 약물 최적화를 위한
 자동화 시스템을 갖춘 고속대량 (high-throughput) 단백질 결정학
- 약제의 인체확산, 세포와의 반응성 추적, 연성물질의 특성분석, 환경조건에 따른
 약물 반응, 변성 특성분석, 의료용 나노소재

원자 수준에서 약물이 치료 표적과 상호 작용하는 방법에 대한 구조적 정보 규명
 정적 및 동적 상황에서 생물학적 조직 (근육, 인대, 힘줄 등)의 미세 구조 결정


나. 화학 및 촉매 (Chemistry and catalysis)

방사광가속기를 이용하여 광전자분광 (PES), X선 흡수분광 (XAFS), X선 회절 (XRD), 고분해능 분말회절 (HRPD) 등의 분석기법을 통해, 다양한 실험환경 (상압환경 ~ 초고진공환경)에서 표면-계면-표면 벌크의 화학적, 전자적 구조 및 결정 구조의 변화를 체계적으로 분석이 가능하다.

100~2000 eV로 기체/고체 계면분석에 이용하는가 하면, 2~12 keV의 에너지 범위로 기체/액체/고체의 삼상 계면 분석 등에도 이용한다. 계면은 두 가지 이상 다른 상이 만나는 매우 얇은 경계면으로 이 안에 존재하는 화학성분의 양이 매우 작고, 영역이 매우 좁기 때문에 관찰이 매우 어렵다. 방사광가속기를 이용하여 전기화학 촉매의 다양한 실시간 분석 (in-situ/operando 분석)이 가능하다.

화학반응을 실시간 관찰하여 새로운 촉매제 개발을 하는 연구에도 사용되며, 루테늄 결정체와 일산화탄소 결합물에 레이저를 쏘아 일산화탄소가 분리되는 과정을 실시간으로 관찰하는가 하면, 촉매제와 일산화탄소가 예상된 시간보다 더 늦게 분리되는 사실을 알게 되어 향후 일산화탄소와 더 오래 반응하는 촉매제를 개발하기도 한다.

반도체, 태양광전지, 이차전지, 다양한 촉매 등의 소재 및 소자의 연구에 방사광가속기 실험기법들을 한 곳에 모아서 활용하면, 표면 및 계면, 벌크의 전자·화학적 특성 및 구조의 연구 분야에서 중요한 응용의 기회를 제공할 것으로 기대되며, 자동차 배기가스 저감용 촉매 개발 활용연구, 고효율·저가형 수소생산 촉매 연구에 기대해본다.

 오염 저감 촉매 (집진장치, 정수장치 등), 생활용화학제 (세제, 섬유유연제, 샴푸, 화장품 등), 석유화학물질 (휘발유, 합성섬유, 화학부산물) 연구

○ 액체와 기체 혹은 고체촉매와 액체, 기체간의 표면, 계면의 특성 분석

• 화학반응(공정반응)의 반응중간체에 대한 원자수준의 동적, 정적 상태 조건 연구

o 연 X-선 ptychography를 이용한 촉매 내 원소 분포 측정

연 X-선 ptychography는 CDI 기법을 통한 공간분해 이미지와 연 X선 광원의 에너지에 따른 분광정보를 결함하여 물질내의 원소 분포 및 구조적 정보를 함께 결합하여 분석할 수 있다. 이를 이용하여 나노스케일에서 일어나는 촉매물질들의 반응 매커니즘을 밝힐 수 있다. ※ A. N. Wise et al., ACS Catal. 6, 2178(2016)



o 전기화학 반응에 따른 Pt 4f core level 변화

경 X-선 광전자분광실험(HAXPES, Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy)는 높은 전자 탈출 깊이를 이용하여 실제 장치 내부의 상대적으로 깊숙한 영역까지 측정을 가능하게 해 준다. 유사 상압 측정조건과의 결합을 통해 실제 촉매반응이 일어나는 환경에서의 in-situ/operando 분광정보를 추적할 수 있게 되어 전기화학 반응에 기여하는 변화의 전자 구조적 원인을 추적할 수 있다.

X S. Axnanda et al., Scientific Reports 5, 9788(2015)



다. 연성 응집물질 (Soft condensed matter)

소재·부품산업은 우리나라의 주력 기간산업이나 첨단 소재·부품의 경우 일본, 미국, 독일 등 선진국에 의존하고 있다. 우리나라의 경제에 큰 위협을 주었던 일본의 한국 수출규제의 사례를 미연에 방지하기 위하여 핵심·소재 부품의 자립화가 시급하다.

4세대 원형 방사광가속기는 3세대에 비해 100~1,000 배 효율이 높아지며, 넓은 에너지 영역 (150~3000 eV)을 제공하므로, 높은 사양의 기능, 빠른 실시간, 다양한 실험환경에서 연구가능, 넓은 에너지 영역으로 활용분야를 확장할 수 있다. 다양한 시료의 분위기에서 실시간 구동에 따른 연구가 가능하여 개발하는 신소재, 소자의 경쟁력을 높일 것으로 보인다.

다양한 산업체의 대량의 시료를 분석하기 위해, 대량의 시료를 마운트 할 수 있는 샘플 스테이지, 시료 교체 및 측정 분석의 자동화 시스템을 적극 활용하여 산업체의 필요에 맞게 (AP)XPS, XAS, PEEM 등의 실험 장치를 구성하여 빠른 시간대의 대량의 시료에서 실시간 연구까지 가능할 것이다. 반도체, 유기, 태양전지, 디스플레이, 유기 발광다이오드 (OLED), 환경오염센서 등의 주재료가 되는 박막, 양자점, 나노 패터닝 물질 등의 연구가 가능하며, 나노스케일에서의 소재 분석연구를 통해 실제 소재·소자의 성능을 향상하고 개선하는데 유용할 것이다.

차세대 반도체 소재·소자의 미소영역 내 극한 압력, 온도 및 인위적 환경 변수의
 조절을 통한 물질 변화 연구

• 나노 소재의 화학적, 구조적 특성과 전기, 자기적 성질의 미시적 원인 규명

○ 나노물질의 3차원 이미징을 통한 구조, 형태의 조사

• 고기능성 고분자, 고분자 섬유 등의 나노구조 측정

라. 양자물질(Quantum Materials) 연구

양자물질 연구는 물성을 결정하는 전자구조, 스핀구조, 격자상태 등의 자유도들이 강한 상관관계로 얽혀 있어 복합적 현상이 양자역학적 스케일에서 기술되어야 한다. 이를 이해하기 위해서는 기저상태, 동역학적 여기상태의 측정뿐만 아니라 상호작용의 결과로 발생하는 상전이 (phase transition) 및 상분열 (phase separation) 등에 대한 미시적 및 중시계적 (mesoscopic) 연구가 필요하다.

위상전자구조 (topological electronic structure)에 대한 최근의 이해는 기존의 전자구조에 대한 이해를 뛰어넘어 물질 내 대칭성에 따른 전자구조의 특성이 물성과 어떻게 연관되는가에 대한 이해로 나아가고 있다. 전자구조의 직접적인 측정은 각분해 전자분광 실험을 통해 수행될 수 있다. 최근 가속기 광학계의 발달과 삽입장치 및 분광장치의 발전은 나노스케일 광원을 이용하여 역격자공간의 전자구조와 스핀구조를 측정할 수 있게 해 준다. 최근 연구되는 위상부도체, 바일 반금속과 같은 문제들뿐만 아니라, 격자 대칭성에 의해 발현되는 전자구조의 특징 및 궤도함수 및 스핀구조의 상호관계를 분석하여 물질의 미시적 원인을 규명할 수 있을 것이다. 또한 여기에 나노빔을 이용하여 매우 작은 저차원 물질, 층상구조체 등에 대한 정교한 측정 및 상분열 상태와 같은 현상의 국소적 측정 및 이미징이 결합된 분석을 수행할 수 있을 것이다.

스핀 자유도가 물질의 기저상태에 끼치는 영향은 일반적인 자성물질의 연구로부터 고온초전도체 및 양자스핀상태에 이르는 연구 분야에 중요하다. 최근의 엑스선 실험의 발달은 엑스선의 편광을 자유롭게 조절함과 동시에 높은 밝기와 에너지 분해능을 제공한다. 일차적으로는 이러한 엑스선을 이용한 편광 이색성 분광실험 및 편광 회절실험 등을 구현할 수 있다. 한국에서 기존에 수행되기 힘들었던 경엑스선 영역의 편광실험을 통해 4d, 5d, 5f 물질에서 발생하는 자성현상 및 전자구조에 대한 연구가 가능하다. 최근 측정정밀도의 향상은 물질 내 대칭성에 의해 발생하는 이색성 및 공간분포 등에 대한 측정을 가능하게 한다. 여기에 높은 밝기와 에너지 분해능을 이용한 비탄성분광실험의 구현은 양자물질의 기저상태를 분석하는데 새로운 가능성을 열어준다. 특히 양자물질이 다중극 (multipolar) 상태등에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이를 통해 과학적 분석능력의 기술적 격차를 추격하고 선도연구를 수행할 수 있을 것이다. 양자물질의 대표 격인 고온초전도체, 양자스핀계 등의 연구에 있어서는 물질의 여기상태 및 동역학에 대한 이해가 필요하다. 저에너지 영역의 고분해능 비탄성산란실험의 구현은 물질의 여기상태 및 동역학에 대한 직접적인 측정을 가능하게 해 준다. 대표적인 연구주제가 키타에프 스핀계에서 나타나는 스핀 액체 기저상태의 관찰이다. 여기에 스핀궤도결합에 의해 나타나는 양자적 기저상태들의 연구, 저차원계에서 발현되는 스핀, 전하 배열 상태 등에 대한 연구가 가능하다. 최근 측정기술의 발전은 소수의 선도가속기 뿐만 아니라 다수국가의 범용가속기에서도 구현되는 단계로 진입하였다. 이러한 양자현상에 대한 연구는 이후 양자소자시대의 중요한 기반연구역량으로 자리매김 할 것이다.

새로운 가속기에서 향상된 경엑스선 산란 및 분광실험이 구현되는 것은 극한환경에서 발생하는 현상들을 연구할 수 있는 기회를 부여한다. 새로운 가속기의 보다 밝고 집속된 광원은 고온, 고압환경에서 발현되는 물질상태연구를 가능하게 할 것이다. 특히 고압환경에서 발생하는 고온초전도현상, 구조상전이, 스핀상전이를 비롯하여 고온, 고압환경에서만 발현되는 새로운 물질상에 대한 연구의 길을 열어놓을 것이다. 이는 양자물질에서 중요하게 다루어지는 양자극한점과 그 주위에서의 현상들에 대한 보다 깊은 이해의 길을 열어준다. 또한 지구과학 및 우주과학 관련 물질에 대한 국내연구역량 확보에 기여할 것이다.

여기에 덧붙여 새로운 광원의 결맞음을 이용한 나노스케일 이미징 혹은 중시계 (mesoscopic) 영역에서의 산란, 분광실험의 가능성이 있다. 이는 기존에 실험적 해석의 영역에서 머물렀던 양자물질의 동적 평형상태에 대한 문제에 대한 보다 직접적인 측정 관찰을 가능하게 해 준다. 여기에는 분해능의 향상과 맞물려 분광학적 결과 향상을 통해 양자적 상분열에 따른 공간적 전자, 스핀구조의 현미경 (microscope) 측정 혹은 중시계 영역에서의 전자, 스핀, 격자구조의 상호관계 및 동적 변화에 대한 추적이 가능할 것이다. 여기에 덧붙여 방사광 펄스 광원을 이용한 시분해 실험이 가능하며 앞서 언급된 전자분광실험, 편광엑스선실험, 비탄성 산란 및 분광실험, 극한환경실험등과 결합하여 보다 종합적인 양자물질의 미시적 상태와 현상의 원인을 규명하게 도울 것이다.

마. 기계 (Engineering)

마이크로미터 크기 및 나노미터 크기의 각종 부품을 방사광을 이용하여 미세 가공하는 첨단기술인 MEMS는 응용범위가 넓고 각종 첨단 부품 개발을 가능하게 한다. MEMS 기반 기술은 무통증 극미세 바늘, 마이크로 기어, 마이크로 튜브, 마이크로 센서, 마이크로 액추에이터, 초정밀 광학 부품 등에 주요 요소로 사용되고 있으며, 초정밀 금형 생산기술은 산업에 응용될 수 있다.

- 항공, 우주관련 금속부품 연구
- 생산 공정에서 발생하는 결함 및 이상상태 조사를 통한 품질관리
- 타이어, 엔진 등의 피로, 흡착물, 반응성 추적, 기계소재 표면처리 상태 추적

o 마그네슘 합금에서 발생하는 공간의 성장 및 유착연구

금속소재에서 발생하는 공간과 이들의 유착에 의한 균열의 성장은 기계소재 연구에 중요한 정보중 하나이다. Laminography를 이용한 imaging을 통해 금속 안에 발생한 결함들을 직접적으로 관찰, 추적할 수 있다. ※ B. Kondori et al., Acta Materialia 155, 80(2018)



조소형 나노/마이크로 기계부품의 제작
 고휘도 X선을 이용하여 마이크로 및 나노 크기의 부품 및 소자를 제작
 ※ 포항 방사광가속기 9D 빔라인



바. 환경, 지구과학, 핵물리 등 (Environment, earth sciences, nuclear physics. etc.)

지진, 화산 활동 및 지구 자기장 등의 지구 물리학적 현상들을 이해하기 위해서는 지구 내부 구조와 화학적 조성에 대한 이해가 필요가 필요하다. 지구 내부는 고온, 고압의 극한 환경이기 때문에 지구내부 구조와 화학적 조성에 대해서 이해하기 위해서는 고온, 고압의 극한 환경에서의 물성 및 물질 구조를 조사할 필요가 있다. 방사광가속기를 이용하여 고온, 고압 연구와 에너지 문제와 관련하여 원자력 발전과 핵폐기물 처리에 대한 응용 연구도 가능할 것으로 기대된다. 또한, 입자의 내부구조 등을 밝히고 강한 상호작용의 근원과 성질을 이해하는 핵물리와 입자물리학의 기초 연구를 위해 사용할 수도 있다.

매우 높은 휘도, 넓은 영역의 에너지 스펙트럼을 가지는 방사광의 특성을 이용하여 지구 구성 물질에 대한 연구, 지구 내부물질의 거동에 대한 연구와 더불어 지구 환경적으로 중요한 미세원소의 분석이 가능할 것으로 기대한다.

• 지구 내 초고압과 초고온 상태의 물질 관찰

ㅇ 지진 형성 연구

운석이나 태양계의 미세먼지 등 구조분석

○ 우주, 항공, 국방 등 극한환경 특이조건에서의 전략적 특수 소재 개발

○ 원자력 시설 제염·해체 및 방사성폐기물 관리 등 국가현안 해결

• 편극 광자빔을 이용한 강입자 생성 반응 연구

2.1.3 해외 4GSR 구축 및 3GSR의 성능 개선 현황 및 활용분야

3GSR 보다 경쟁력 있는 방사광 시설은 emittance를 줄임으로써 실험장치에서의 효율을 각 목적에 맞게 최적화한 시설인데, 이러한 맥락에서 현재의 3GSR을 업그레이드하는 방안도 있으며, 신규 4GSR을 건설하는 경우도 있다. 아래 표는 전 세계에서 이루어지고 있는 4GSR 신규 건설 혹은 3GSR 업그레이드 프로젝트를 정리한 것이다.

			설계(계획)			
구분	가속기명	빔에너지 (GeV)	저장링 둘레 (m)	에미턴스 (nm·rad)	현황	
	스웨덴 MAX-IV	3	528	0.33 (0.25)	'16년 가동 시작	
	브라질 SIRIUS	3	518.4	0.27	구축 중 ('20년 완공 예정)	
신귰 구축	중국 HEPS	6	1,360.4	0.059	구축 중 ('25년 완공 예정)	
	일본 SLiT-J	3	354	0.93	구축 중 ('24년 완공 예정)	
	태국 SPS-II	3	321.3	0.96	계획 중	
성능하상	미국 APS-U	7 → 6	1,104	3.1 → 0.042	'11년 개념설계 완료 ('22~'23년 셧다운 예정)	
	미국 ALS-U	2	196.8	2 → 0.07	'18년 개념설계 완료	
	일본 SPring-8 II	8 → 6	1,436	2.4 → 0.149	'14년 개념설계 완료	
	스위스 SLS-2	2.4	290.4	5 → 0.13	'17년 개념설계 완료 ('23~'24년 셧다운 예정)	
	영국 Diamond-II	3 → 3.5	561.6	2.8 → 0.125	'19년 개념설계 완료 ('25~'26년 셧다운 예정)	
	프랑스 SOLEIL II	2.75	353.1	3.7 → 0.072	개념설계 중 ('26년 셧다운 예정)	
	유럽연합 ESRF-EBS	6	844.4	4 → 0.13	'20년 성능향상 완료 ('19~'20년 셧다운)	
	독일 PETRA-IV	6	2,304	1 → 0.02	'19년 개념설계 완료	
	이탈리아 ELETTRA 2.0	2	259.2	7 → 0.25	'19년 개념설계 완료	

<표 2.1.3.1> 세계 4세대 원형 방사광가속기 구축 추진 현황

표에서 알 수 있듯이, 현재 진행 중인 차세대 가속기들은 에미턴스를 기존 원형 방사광가속기 대비 수십-수백 배 줄이고 있음을 알 수 있다. 위의 주요 가속기들의 현황 및 추구하는 활용 예에 대해 조사한 것들을 다음과 같이 정리하였다.

가. 스웨덴 MAX-IV

ㅇ 개요

- 세계 최초의 MBA(Multi-Bend-Achromat) 방식의 원형 방사광가속기
- 기존 3세대 방사광 대비 휘도(brightness)와 결맞음이 향상되어 신소재, 생명과학 분야에 중점 지원
- 다양한 전자빔(1.5 GeV, 3 GeV, FEL)을 지원하여 다양한 파장의 실험, 시분해 실험, 다양한 실험기법(산란, 현미경 분광, 이미징 등)을 지원
- 활용분야 및 산업체 지원
 - 활용분야 분포 : 생명과학(35%), 신소재(25%), 물리(12%), 화학(8%), 지구과학(7%), 환경과학(4%), 고고학(3%), 기타(6%)
 - 나노과학, 환경공학, 지구화학 분야에서도 향상된 연구 지원
 - 북유럽 지역의 강점인 재료설계(materials design), 제약산업 지원



<그림 2.1.3.1> 스웨덴 MAX-IV 활용 사례

○ 빔라인 구성

- 2개의 링으로 다양한 전자빔(1.5 GeV, 3 GeV, FEL)을 지원하여 다양한 파장의 실험, 시분해 실험, 다양한 실험기법(산란, 현미경 분광, 이미징 등)을 지원
- 최대 26기의 빔라인 구축 가능하며 '20년도 기준 16기 빔라인을 운영 또는 구축
 중, 대학 협약 빔라인 7기, 해외 협약 빔라인 2기, 정부지원 빔라인 7기로 구성됨



<그림 2.1.3.2> 스웨덴 MAX-IV 빔라인 배치도

- 이용자 지원 초기('18.10~'19.7)에 3개 빔라인의 빔타임 경쟁률은 3:1로 나타남



<그림 2.1.3.3> 스웨덴 MAX-IV 초기 빔타임 배정 현황

단계	빔라인명	전자빔 에너지	실험기법	광자빔에너지 (빔사이즈)	투자기관
Phase I	Balder	3 GeV	XAS, XES	2.4~40 keV (100µm x 100µm, focused)	KAW & Swe universities
	BioMAX	3 GeV	MX, MAD, SAD, SSAD, Atomic resolution data collection, Large sample ensemble screening, In situ crystal diffraction	5~25 keV (20µm x 5µm)	KAW & Swe universities
	Bloch	1.5 GeV	high resolution angle-resolved photoelectron spectroscopy (ARPES), optionally spin resolved (Spin-ARPES) and core-level spectroscopy (CLS)	10~1000 eV (10μm x 25μm, V×H)	KAW & Swe universities
	FemtoMAX	Linac (FEL)	Time-resolved X-선 scattering, Time-resolved X-선 spectroscopies, Time-resolved SAXS, Time-resolved reflectivity	1.8~20 keV (0.01mm x 0.04mm)	KAW & Swe universities
	FinEstBeAMS	1.5 GeV	XPS, XAS, PEPICO, TOF	4.3~1000 eV (0.02mm x 0.1mm)	Estonia & Finland
	HIPPIE	3 GeV	AP-XPS, AP-XAS	110~2000 eV (50µm x 50µm)	KAW & Swe universities
	NanoMAX	3 GeV	Scanning transmission microscopy (STXM) with absorption and phase contrast X-선 fluorescence microscopy (XRF) Coherent diffraction imaging techniques (CDI) Ptychography in forward direction and Bragg geometry	5~30 keV (300nm~30nm, Goal: 10nm)	KAW & Swe universities
	Veritas	3 GeV	RIXS	275~1000 eV (1µm × 5µm)	KAW & Swe universities
Phase II	CoSAXS	3 GeV	SAXS, BioSAXS, Time resolved SAXS, Micro beam SAXS, Anomalous SAXS, XPCS	4~20 keV (100µm x 100µm)	VR
	FlexPES	1.5 GeV	High-resolution XPS and XAS, resonant photoemission (ResPES) and angle-resolved valence band spectroscopy (ARPES), electron-ion coincidence experiments	40~1500 eV (50μm~2mm)	VR
	MAXPEEM	1.5 GeV	LEEM, DF-LEEM, UVPEEM, XPEEM, DF-XPEEM, micro-ARPES, micro-LEED, XMCD, micro-XAS	30~1200eV (16µm x 16µm, minimum)	VR
	SoftiMAX	3 GeV	STXM, Ptychography, Fourier Transform Holography	250~2500 eV (25nm, STXM) (100nm, Ptycho) (20μm, Fourier)	VR
	SPECIES	1.5 GeV	RIXS, NEXAFS, XPS, HP-XPS, XAS	27~1500 eV (5μm x 25μm, RIXS) (100μm x 100μm, HP-XPS)	VR & KAW
	DanMAX	3 GeV	Powder X-선 diffraction, Full-field imaging, absorption, phase and diffraction contrast tomography	15~35 keV (5µm~5mm)	Denmark & MAX IV
Phase III	ForMAX	3 GeV	Full-field tomography, SWAXS, and scanning SWAXS imaging	8~25 keV (10µm~1.5mm)	KAW
	MicroMAX	3 GeV	Macromolecular Serial Crystallography with a wide range of sample delivery systems, time-resolved studies	5~30 keV (1μm~10μm)	NNF

<표 2.1.3.2> 스웨덴 MAX-IV 빔라인 구성

나. 일본 SPring-8

- 일본의 경우 10기의 방사광가속기를 운영 중이며 1기를 추가 구축 중임
 - 11기 중 방사광의 결맞음이 좋은 SPring-8(4세대 원형으로 성능향상 추진), SACLA(4세대 선형), SLit-I(4세대 원형)는 과학기술 예산으로 운영 로드맵 설정



<그림 2.1.3.4> 일본 방사광가속기 로드맵

- 일본 효고현에는 4세대 선형 방사광가속기(SACLA), 4세대 원형 방사광가속기로 성능향상 예정인 SPring-8, 1.5 GeV의 3세대 방사광가속기(New SUBARU)가 집적되어 있어 기초과학 뿐 아니라 일본 전역 및 지역 산업체에 직간접으로 지원하고 있으며, SPring-8의 경우, '18년 약 28%가 산업적으로 활용되고 있음 (산업체 멤버는 64개 기업, 13개 기타 법인)
- 세계에서 1,436m의 저장링을 가진 일본 SPring-8은 '18년 공용빔타임 1,577과제
 중 423과제(26.8%), 협약빔타임 682과제 중 200과제(29.3%), 총 623과제(27.6%)가
 산업적으로 활용되고 있음
 - ※ 한국의 경우 공용빔타임 121과제(전체 1,592과제 중 7.6%, 산업체 직접수행
 25과제), 방사광융합분석 70과제(협약 빔타임 별도) 수행
- SPring-8의 경우 산업체에게 빔타임을 할당하는 빔라인 9기(협약 6기, 공용 3기)를 운영하고 있으며 활용 용도는 주로 신소재·생명 분야임

F	·분	빔 라 인	활용 내용		
1		도요타 중앙연구소 (BL33XU)	자동차 부품소재 생산 분석		
2		효고 삽입장치 (BL24XU)	효고현 지역산업체 지원		
3	혀야	효고 휨자석 (BL08B2)			
4	11-1	SUNBEAM 휨자석 (BL16B2)	13개의 일본 중화학, 전자, 전기, 금속 회사 컨소시엄		
5		SUNBEAM 삽입장치 (BL16XU)	지원		
6		Advanced Softmaterial (BL03XU)	신소재 컨소시엄에게 할당		
7		Engineering Science Research I (BL19B2)	물질구조 분석 (산업체 지원) * Multi-axis X-선 diffraction, Powder diffraction, X-선 imaging, Small angle X-선 scattering		
8	공용	Engineering Science Research II (BL14B2)	소재 분석 (산업체 지원) * XAFS(X-선 Absorption Fine Structure), X-선 imaging		
9		Engineering Science Research III (BL46XU)	물질구조 분석 (산업체 지원) * Multi-axis X-선 diffraction, Hard X-선 photoemission spectroscopy		

<표 2.1.3.3> 일본 SPring-8 산업체 전용 빔라인 현황

○ SPring-8의 SUNBEAM 컨소시엄

- 목적 : 산업적 활용 증진, 컨소시엄 회사의 경쟁력 향상, 각 회사의 빔타임 확정
- 연혁 : '96년 컨소시엄 설립, '99년 빔라인 운영 개시
- 멤버 : 가와사키 중공업, 고베철강, 주우전자공업, 소니, 관서 전력, 도시바, 도요타, 니시아, 닛산자동차, 파나소닉, 히타치, 후지츠, 미쓰비시 전자



<그림 2.1.3.5> SPring-8 SUNBEAM 빔라인

○ SPring-8의 도요타 빔라인

- 목적 : 자동차 산업의 소재(배터리, 연로전지, 촉매제) 개발 분석
- 분석 : 시분해 실험(밀리세컨드 단위), Operando 측정(다양한 기압, 기온 상태에서 측정)



<그림 2.1.3.6> SPring-8 도요타 빔라인

○ SPring-8의 Advanced Soft material 빔라인 컨소시엄

- 목적 : 산업적 활용 증진, 산학연 협력 지원

산업체 멤버 : 아사히 가세이, 관서학원대학, 캐논, 쿠라레이, 쇼와 덴코, 스미토모 화학,
 스미토모 고무, 스미토모 베이클라이트, 덴소, 도요보, 도레이, 니토 덴코,
 브릿지스톤, 미츠이 화학, 미츠비시 화학, 미츠비시 레이온, 요코하마고무, 테이진, DIC

- 학연 멤버 : 도쿄대, 나고야기술연구소, 교토대, 교토기술연구소, 키타규슈, 규슈대학



<그림 2.1.3.7> SPring-8 소재산업체 빔라인

- SPring-8의 산업지원 공용빔라인(3기)의 지원 실험분야
 - 자동화된 X-선 흡수분광(XAFS; X-선 absorbtion Fine Structure), X-선 회절(XRD; X-선 diffraction), 소각 X-선 산란(SAXS; Small-angle X-선 scattering)
 - 측정 서비스 (XAFS, XRD, SAXS/USAXS, HAXPES(Hard X-선 Photoelectron Spectroscopy; 경X-선 광전자분광)
 - 원격 실험(Remote Experiment) 서비스 (XAFS, XRD)
 - BL46XU의 산업체를 위한 추가 허치 (2개의 광전자분광 실험장치 구비)



<그림 2.1.3.8> SPring-8 산업체 공용 빔라인

○ SPring-8의 주요 산업적 활용 (Hyogo SPring-8 Award)



<그림 2.1.3.9> 일본 SPring-8 산업적 활용 성과

일본의 방사광가속기 중 6기의 시설(SPring-8, New SUBARU, Aichi SR, SAGA-LS, PF/ PF-AR, AURORA)은 산업적 활용 증진을 위한 협력체(PHOTON BEAM PLATFORM) 구성



<그림 2.1.3.10> 일본 방사광가속기 산업적 활용 협력체

○ SPring-8의 성능향상의 기대

- 밝기 향상 : 향상된 해상도로 초미세구조의 실시간 분석 가능
- 고반복률 : 측정 시간 상수를 초단위에서 밀리초 또는 마이크로초 단위로 감소하는 효과
- 기존의 정적 분석에서 동적 분석으로의 도약
- 고해상 X-선 회절, 나노 단위의 Ultra 소각 X-선 산란 실험 가능
- 활용 분야 : 에너지, 촉매, 생명과학, 나노기술 및 재료, 바이오 분야 등

다. 일본 SLiT-J

○ 산업적 부흥 효과

- 일본 동북지역의 산업 활성화 (지진지역에 대한 정부 지원 차원에서 가속기 건설 추진)
- 농업혁신 : 과학에 기초하여 농림수산업 발전
- 방사능 제염 및 시설 폐기의 중·장기적 과제 해결에 대한 해결책 제공

○ 활용 분야

- (자동차·기계) 강판 특성 평가, 연료전지, 촉매제, 타이어 및 플라스틱 구조 분석 등

- (전자부품) 반도체 결정 분석, 자기특성 분석, 유기소재 고분자 구조분석 등
- (생명·농림·수산) 단백질 구조 해석, 식품 등의 원소 화학상태 분석, 유기·무기 생체물질 고차구조 분석
- (화학) 무기·유기결정의 구조분석, 원소단위 화학상태 분석, 유기고분자 분석, 탄소 활용 등
- (에너지·환경) 결정성 물질 구조 분석, 광산자원 원소단위 화학상태 분석, 유기·무기물질 고차구조 분석

라. 독일 PETRA III (PETRA IV로 성능향상 추진)

○ 성능향상으로 가능한 실험

- 해상도(공간분해능) 5배~100배 향상으로 원자스케일 분석 가능
- 전기화학 촉매의 다양한 실시간 분석 가능 (in-situ/operando 분석)
- 3세대 방사광가속기보다 1만배 향상된 시분해 실험이 가능하여 불규칙한 상태의
 시분해 분석 가능
- 성능향상으로 기대되는 산업체 활용 분야
 - 에너지, 기후 분야 : 친환경 발전, 2차전지, 초전도 전력선 (나노스케일 분석)
 - IT 분야 : 연산처리, 센서, 저장장치, 반도체 (나노스케일에서의 전자기장 적합 분석)
 - 지구환경 분야 : 천연자원, 공해 (초미세 구조분석)
 - 소재 분야 : 경량 소재 등 (기계 특성을 고려한 분석)
 - 생명과학, 화학, 촉매 : 신약 개발 (원자스케일의 구조분석)



<그림 21.3.11> 독일 PETRA IV(4세대 원형 방사광가속기)의 3세대 방사광가속기와의 성능 비교



<그림 21.3.12> 독일 PETRA IV(4세대 원형 방사광가속기)의 기대 활용 분야



<그림 21.3.13> 독일 PETRA IV(4세대 원형 방사광가속기)의 기대 실험분야

마. 유럽 ESRF (ESRF-EBS로 성능향상 중)

○ 공용빔타임의 40%가 산업적 활용과 관련된 연구임, 2%는 산업체 비공개 빔타임

- 산업체 주요 연구분야 : 항공우주, 제약, 생명과학, 촉매, 식품 등



<그림 2.1.3.14> ESRF 산업체 지원 모델

(산업체지원현황) 산업체 응용 및 이용 활성화를 위해 산업체 전담 부서 운영, 산업체 지원
 프로그램을 운영하고 있음, '18년 말부터 산업체 연구 지원을 위한 4개의 빔라인을
 구축 진행

- (조직) 산업체 이용자 지원 사업 운영 인력, 실험 지원을 위한 연구인력, 이용자 지원을 위한 행정 인력으로 구성되고, MX 빔라인 빔타임 조율을 위한 전담 인력이 따로 있음
- (산업체이용활성화프로그램) 11개 유럽국가에 있는 20여개 연구소 및 산업체, 13개 3세대 방사광가속기, 4세대 방사광가속기연구소로 구성된 범유럽컨소시엄 프로그램(CALIPSO)을 운영

주요 프로그램	상세 내용
대형시설 포털사이트 운영	대형 가속기 이용 창구 단일화 대형 시설 소개 자료 및 신청서 표준화
이용자협회 운영	대형시설 이용자 협회 단일화를 통한 협력 활성화
이용자 교육 프로그램 (HERCULES) 운영	후학 양성 및 중소기업 대형시설 활용 활성화
대형시설 이용 지금 지원	선진국들이 개발도상국 연구자들이 대형시설을 이용할 수 있도록 자금을 지원함, 국가간 연구협력 체계 구축
연구장비 공동 개발	가속기 관련 연구장비 공동 개발
산업체 지원 조직 협력 강화	대형시설 산업체 지원 조직간 협력 체계 구축

<표 2.1.3.4> CALIPSO 주요 내용

- (산업체지원 빔라인 구축) 대형 물체, 금속 재료, 비정질 재료, 약물 설계 분야에 중점적으로 적용 가능한 빔라인 구축 추진

<표 2.1.3.5> ESRF에 구축 추진 중인 산업체 지원 빔라인 상세 내용

적용 분야	상세 내용	
대형 물체 3차원 형상 측정 (항공우주, 자동차)	무게 300 Kg, 직경 60 cm, 높이 2.5 m 시료 3차원 형상 측정	
금속 재료 구조 분석 (반도체, 철강, 세라믹 등)	1 mm 이하의 크기를 갖는 금속 재료의 미세 내부 결정 구조 및 구조 실시간 측정 (해상도: 100 nm)	
미세 결정 구조 분석 (약물 설계)	마이크로 크리스탈 결정 구조 분석 기술 확보	
비정질 재료 특성 분석 (유리, 합금, 겔, 에멀전 등)	비정질재료 동역학 반응 및 미세 3차원 구조 분석 (해상도: 수 nm, 반응시간: < μs)	

- 4세대 원형 방사광가속기로 성능향상 시 기대되는 중점 활용분야
 - 펌프-프로브 실험 및 시분해 실험
 - 구조 및 기능 생물학 : 세포 및 분자 수준의 새로운 실험
 - 실시간 반복 (in-situ) 재료화학 실험
 - 나노스케일의 신소재 실험
 - 극한 압력과 기온에서의 실험 (지구과학 분야)



<그림 2.1.3.15> ESRF 성능향상 시 가능한 실험

바. 미국 APS (APS-U로 성능향상 추진)

- (산업체 빔타임 활용)
 - General users : 일반이용자
 - Partner users : APS와 공동과제, 공익 장치 및 펀드 제공 단체
 - Collaborative Access Teams (CAT) : large-scope partnership (대학, 연구소, 기업체 포함한 컨소시엄 형태)
- (산업체 활용 현황) 230개 업체와 협업을 추진 중임

- 주연구분야 : 고분자, 촉매, 전자, 제약, 재료

- * Chevron, 3M, MERCK, Exxon, Monsanto, Ford, Pfizer, Bristol-Myers, NORVARTIS, Dupont, Dow chemical, Texas instrument 등
- (산업체지원현황) 산업체 지원 부서 및 산업체 전용 빔라인은 부재하며, 컨소시엄
 형태의 CAT 빔라인 25기 운영 중
- 4세대 원형 방사광가속기로 성능향상 시 기대되는 실험
 - 나노미터 단위의 화학, 생물구조 실험, 시분해 실험
 - 공간분해능 향상으로 불균질 물질의 분석능력 향상 (원자구조 단위 분석 가능)

THE APS Upgrade: building a world-leading hard X-ray facility

Small-Beam Scattering & Spectroscopy

 Nanometer imaging with chemical and structural contrast; few-atom sensitivity

Room-temperature, serial, single-pulse pink beam macromolecular crystallography



Resolution with Speed

- Mapping all of the critical atoms in a cubic millimeter
- Detecting and following rare events
- Multiscale imaging: enormous fields of view with high resolution



Coherent Scattering & Imaging

- Highest possible spatial resolution: 3D visualization; imaging of defects, disordered heterogeneous materials
- XPCS to probe continuous processes from nsec onward, opening up 5 orders of magnitude in time inaccessible today,



<그림 21.3.16> APS 성능향상 시 기대되는 실험

사. 이탈리아 ELETTRA (ELETTRA 2.0으로 성능향상 추진)

- (산업체 빔타임 활용) 최근 5년간 약 70개사가 활용
 - 화학 : ENI
 - 제약 : Zambon, Chiesi, Merck Serono
 - 반도체 : ASML, ST Microelectronics

- 재료 : Carvico, Wartsila
- 센서 : Honeywell

○ 가속장치 성능향상으로 변경할 수 있는 실험장치

- 개선된 공간분해능으로 현재의 많은 분광법을 마이크로 또는 나노 분광법으로 변환 가능
- 저수율 방법 실험인 RIXS (공명 비탄성 X-선 산란) 및 HAXPES (경 X-선 광전자분광) 실험장치의 스펙트럼 분해능을 향상시켜 성능향상 가능
- 결맞은 향상으로 CDI(광학렌즈가 필요 없는 결맞음 이미징), ptychography (현미경 이미징) 분야실험을 나노스케일로 확대

○ 성능향상으로 기대되는 중점 활용분야

- 화학 및 생명 센서, 촉매, 노벨 나노소재(신소재)
- 반도체 산업, 생명과학, 바이오연료, 미생물 과학

아. 영국 Diamond (Diamond II로 성능향상 추진)

- (산업체 빔타임 활용) 연간 약 1,000개의 공용 과제 중 40%가 산업체와 직간접으로
 관련됨
 - 성능향상을 통하여 산업체 활용 확대를 기대하고 있음 (UK Government's Industrial Strategy의 핵심으로 기대)
 - DIAMOND는 기존 단백질 분석에 특화되어 있어 생명분야 활용 확대 기대

○ 성능향상 방향

- 밝기 향상, 결맞음 향상, 빔에너지 향상으로 시간분해능 및 공간분해능 향상



<그림 21.3.17> 시간분해능 향상으로 가능한 실험 (Diamond-II)

○ 성능향상으로 기대되는 활용분야

- 통합 구조 생물학, 생명공학, 에너지, 화학 및 촉매

- 양자재료, 엔지니어링 소재, 지구과학



<그림 2.1.3.18> 공간분해능 향상으로 가능한 실험 (Diamond-II)

2.1.4 4세대 원형 방사광가속기 광원 특성

- 4GSR (4세대 원형 방사광가속기)의 광원은 기존 3GSR과 비교하여 더 높은 광자빔에너지와 최대 100배 이상의 밝은 brilliance를 가져 다양한 스펙트럼에서 더욱 밝은 방사광을 생성할 수 있다.
 - 고휘도의 4GSR 방사광은 3GSR에 비하여 시료 위치에서의 광자빔 flux를 100여 배 이상까지 제공해 줄 수 있으므로 더욱 미세한 실험이 가능하여, 현재 3세대 방사광을 활용한 반도체, 신소재, 이차전지, 신약개발, 생명과학, 디스플레이 등의 연구가 진일보 할 것으로 기대된다.



Brilliance

38 Brilliance : photon flux per unit transverse phase-space area, which is called the source emittance

<그림 2.1.4.1> 3세대 방사광과 4세대 원형 방사광의 휘도(brightness) 비교

Flux

PLS-II 3GeV: ----- / 4GSR 4GeV : -----



<그림 2.1.4.2> 3세대 방사광과 4세대 원형 방사광의 광속(Flux) 비교



<그림 2.1.4.3> 4세대 원형 방사광의 광속과 휘도(brightness) (BM, 위글러, 초전도 위글러)



<그림 2.1.4.4> 4세대 원형 방사광의 광자빔 분포

2.2 제안 빔라인 및 활용분야

- (우선 도출 빔라인) 관련 중장기 계획 등 정책방향 및 수요자 중심의 의견 수렴을
 통해 다목적 방사광가속기 건설 목적에 부합하는 빔라인 선정
- 다목적 방사광가속기 개념연구 기술심의위원회 의결을 통해 필요한 실험기법 등을 포함하는 최종 빔라인 10기 확정
- (빔라인 개념설계) 기술심의위원회에서 검토된 실험기법 구현을 위하여 해외 사례조사
 및 관련 전문가 검토를 통해 실험장치 도출



<그림 2.2.1> 우선 구축 빔라인 도출 방법

연번	후보 빔라인	3세대 방사광가속기	다목적 방사광가속기
	바이오신약-	• 다목적 방사광가속기의 향상된 밝기외	결맞음으로 정밀도 및 분석효율 증가
1	바이오소각산란	(주로 기초연구에 활용)	(신약 / 약 선달 개발 등 산업제의 응용연구 지원)
2	소재 구조 분석 빔라인	• 다목적 방사광가속기 기술의 발견 활용이 높은 XRD, XAFS 실험 지원	전과 성능향상에 맞추어 산업체에서 ^원 .
		(주로 기초연구에 활용)	(산업체가 요구하는 실험지원)
2	연엑스선	• 기본 분석기법인 XPS, XAS 기법의 경우 경우 3세대 가속기 대비 100~1,000 배 5000 eV) 제공	·자동화하여 분석 효율 향상, 분광현미경의 효율이 높아지며, 넓은 에너지 영역(100 ~
3	나노프로므 빔라인	(주로 기초연구에 활용, 산업활용에는 제한적)	(높은 사양의 기능, 빠른 실시간, 다양한 실험 환경에서 연구 가능, 넓은 에너지 영역으로 활용 분야 확장)
4	나노 스케일 각분해 광저자부광	 3세대 가속기 대비 에미턴스가 작아, 시료에 충분한 밝기(flux)를 제공하여, ARPES 정보 획득 	X-선이 시료에 수십 nm로 집속됨에도 기존에 불가했던 높은 공간분해능으로
	빔라인	(마이크로 빔 ARPES만 구현)	(4세대 광원의 장점을 살려 ARPES를 수십~100 nm 분해능으로 구현)
5	결맞음 X-선 회절	 다목적 방사광가속기에서는 결맞음이 연구의 새로운 영역 개발하여 편광 기 	10-100 배 증가, 결맞음을 활용한 시료 능을 통한 전자구조에 대한 정보도 확보
	빔라인	(결맞음이 매우 낮음, 만족하는 광원 없음)	(편광 및 결맞음 기능으로 첨단 과학 연구를 가능하게 함)
6	결맞음 소각 산란	 기존 3세대 가속기에도 있는 범용 좋게 하여 보다 명확한 정보를 제공히 	실험기법이나 입사하는 광원의 결맞음을 며, 그 결과 활용 범위가 넓어짐
-	빔라인	(스침각 소각산란 기법은 있으나 X-선의 결맞음 부족)	(결맞음을 이용하는 명확한 분석 기능이 추가)
7	실시간 엑스선 흡수 분광학 비라이	 기존 3세대 가속기에도 있는 범용 강하고 넓은 에너지 영역을 가지게 5 수 있으며 응용 범위가 넓음 	실험기법이나 입사하는 광원의 세기가 티어, 실시간 실험을 경쟁력 있게 수행할
	846	(실시간·시분해 실험의 한계)	(배른 시간 대의 실시간 실험 가능)
8	생체분자 나노결정학	• 3세대 가족기에서는 30µm 크기 이상 다목적 방사광가속기는 10µm 이하의	의 난맥실 결정에 내안 연구가 가능아나, 단백질 결정 시료 연구도 가능
	빔라인	(30 um 크기 이상의 결정 시료 필요)	(10um 정도로 결정화된 막단백질도 연구 가능)
٩	고에너지 현미경	 3세대 가속기는 에너지의 한계로 높은 특 4세대의 높은 에너지와 높은 공간분해능 	『과율이 필요한 시료 연구에 부적합한 반면, 을 이용하여 다양한 시료의 정밀 연구 가능
9		(높은 에너지 없으며, 해상도가 낮거나 투과율이 부족)	(높은 에너지 가능하며 해상도와 투과율 모두 만족)
10	나노 프로브 빔라인	• 3세대 가속기에서 10µm 수준의 대 방사광가속기에서는 50 nm 이히 Ptychography 구현이 가능하고 특수 프로브를 구축함	바이크로 빔을 제공하는 반면, 다목적 h의 나노빔 제공을 통해 XRS/XRF/ *환경물질 활용이 가능한 다목적 나노
		(동일한 기능을 수행하는 빔라인 없음)	(경엑스선 기반의 나노프로브 기술을 50 nm 이하 분해능으로 구현)

<표 2.2.1> 다목적 방사광가속기 빔라인 구성(안)

<표 2.2.2> 다목적 방사광가속기 빔라인 개요

빔라인	빔에너지	분해능	광원	실험기법	활용	예산 (억원)
① 바이오신약-바이오소각산란 (BioPharma-BioSAXS)	5~20 keV	SAXS: 1 Å 이하 ΔΕ/E < 10 ⁻⁴	IVU	① Bio-SAXS	바이오	130
② 소재 구조 분석 빔라인 (Material Structure Analysis)	5~40 keV	Δ E/E < 10 ⁻⁴	Undulator	 XRD XAFS 	소재, 에너지	140
 ③ 연엑스선 나노프로브 빔라인 (Soft X-ray Nano-probe) 	0.1~5.0 keV	sub-micro beam ΔE/E>1.5×10 ⁻⁴ @1keV	EPU	 XAS XPS 	반도체, 소재	155
④ 나노스케일 각분해 광전자 분광 빔라인 (Nanoscale Angle-resolved Photoemission Spectroscopy)	0.1~2 keV	100 nm 이하 ΔΕ/Ε < 10 ⁻⁴	Undulator	① Nano-ARPES	반도체, 소재	148
⑤ 결맞음 X-선 회절 빔라인 (Coherent X-ray Diffraction)	3~30 keV	sub-micro beam	Undulator	 XRD CDI 	반도체, 지질, 소재, 화학	130
 ⑥ 결맞음 소각산란 빔라인 (Coherent Small-angle X-ray Scattering) 	4~40 keV	수 nm ~ 수 μm ΔΕ/Ε < 2×10 ⁻⁴	IVU	 SAXS/WAXS (GI 기법 포함) XPCS 	소재, 화학	110
 ② 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔리인 (Real-time X-ray Absorption Fine Structure) 	5~40 keV	수 µm	Undulator	① XAFS	에너지, 환경, 소재, 지질	100
 ⑧ 생체분자 나노 결정학 빔라인 (Bio Nano crystallography) 	5~20 keV	1 Å 이하	IVU	1 MX	바이오	142
 ③ 고에너지 현미경 빔라인 (High Energy Microscopy) 	5 ~ 100 keV	공간분해능 0.1μm	Superbend	 Projection imaging 	소재, 에너지, 바이오	100
⑩ 나노 프로브 빔라인 (Nano-probe)	5~25 keV	50nm 이하(나노프로브) 1~10 μm(마이크로프로브)	IVU	 Ptychography/XRF XRS 	반도체, 소재, 에너지, 환경, 화학	150
계						1,305

※ 빔라인별 예산은 2.4장 참고



<그림 2.2.2> 우선 구축 빔라인 개념도 1





<표 2.2.3> 다목적 방사광가속기의 광자빔 밝기 및 에너지 영역대

2.2.1 바이오신약 - 바이오소각산란 빔라인 (BioPharma-BioSAXS)

가. 빔라인 개요

현대 신약개발 과정에서 단백질 구조 정보의 활용은 신약 개발의 성공 가능성을 높일 수 있다. 예를 들면, COVID-19 치료제 개발 경쟁에서 단일항체치료제 뿐만 아니라 저분자 약물의 개발과 작용 기전 이해를 위해서 단백질 구조 분석을 활용하고 있다 [1,2]. 그리고 2012년에는 주요 약물 타겟으로 알려진 GPCR (G-protein coupled receptor) 막단백질의 구조 분석만으로 노벨상이 수여되었다. 즉, 신약개발 과정에서 단백질의 구조가 제공하는 정보의 가치를 알 수 있다.

단백질의 구조 정보를 획득할 수 있는 가장 대표적인 방법은 전통적으로 단백질 결정학으로 잘 알려져 있으며, 최근 막단백질 및 거대 단백질(200 kDa 이상)은 초저온전자현미경(Cryo-EM)을 이용한 구조 분석이 대세를 이루고 있다. 시판 약물의 60%는 막단백질을 타겟으로 하고 있지만 [3], 막단백질은 단백질 결정학으로 구조를 분석하기 위해 요구되는 단결정 시료를 얻기가 매우 어렵다. 2019년 단백질 구조 데이터베이스의 통계에 따르면 막단백질의 65% 정도는 초저온전자현미경을 통해서 규명되고 있다. 즉, 막단백질을 주요 타겟으로 하는 신약개발을 지원하기 위해서는 초저온전자현미경 도입이 필수적임을 알 수 있다. 그러나 초저온전자현미경은 단백질의 분자량이 100 kDa 보다 커야만 적용할 수 있는 기술이다. 반면 단백질 결정학은 분자량에 상관없이 결정화된 시료가 있다면, 자동화를 통해서 고속으로 시료를 측정하고 단백질의 구조를 분석할 수 있다. 그리고 초저온전자현미경에 비해서 고해상도의 구조 정보 획득이 가능한 장점을 가지고 있다. 반면, 생체내의 거대 분자인 단백질과 DNA/RNA분자는 태생적으로 유연한 구조적 특성을 가지는 경우가 많으며 대략 90% 정도는 결정화가 쉽지 않으며, 분자량이 100 kDa보다 작을 경우에는 초저온전자현미경으로도 분석이 어려운 경우가 대부분이다. 따라서 용액 내에서 생체 고분자가 가지는 용액상 구조에 대한 연구는 단백질 의약품 및 약물 전달체의 개발에 중요한 정보를 제공할 수 있다. 그러나 소각산란의 용액 구조는 나노미터급의 해상도를 제공하기 때문에 전체적인 모양은 알 수 있지만 분자수준의 구조 정보는 획득할 수 없는 단점이 있다. 앞서 기술한 바와 같이 단백질의 구조 분석을 위한 주요 실험기법인 초저온전자현미경, 단백질 결정학 그리고 소각산란법은 시료의 특성에 따라서 서로 다르게 적용해야 하며, 각 기술은 상호 보완적 성격을 가지고 있다.

신약/제약 산업과 바이오산업 분야의 지원을 주요 목표로 하는 바이오신약 -

바이오소각산란 빔라인은 산업체에서 요구하는 다양한 형태의 시료에 대해서 종합적인 분석 능력을 확보하고 있어야 하며 단백질 결정학 기법은 생체분자 나노결정학 빔라인을 활용하며 바이오신약 - 바이오소각산란 빔라인은 바이오 소각산란 기법을 제공한다. 산업 시료에 대한 다층적인 분석을 통해서 시료의 구조적 특성 파악은 물론 구조 획득에 소요되는 시간과 비용을 획기적으로 단축시킴으로써 국내 신약/제약 산업의 경쟁력을 향상 시킬 수 있을 것이다.

구 분	내 용		
에너지 범위	5 - 20 keV		
공간 분해능	1 nm 이하 (MX), 수 nm (SAXS)		
실험기법	bio-SAXS (Small-angle X-ray scattering)		
광원	in-vaccum undulator		
광학장치	 Double Crystal Monochromator Focus mirror (beam collimation) Exit Slit 		
Beamline PTL	 진공펌프 (Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump) 진공장비 (gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts) support & girder (smart girder & support) 진단장비 (BPM, 진공(Ion gauge, cold cathode gauge)) shutter (F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter) 냉각수 및 utility (cooling system & utility / gas) BL control electronics (safety & interlock system, 전자/전기 시스템) 컴퓨터, 장치제어, 데이터 S/W (control & DAQ, program server system) BL monitoring & data storage Optical Hutch Experimental Hutch (interlock 포함) 		
실험장치	 Fast readout Detector (EIGER2 × 4M 성능 이상) Automatic Sample Changer 자동화(High throughput) 장치 등 SEC-SAXS 실험용 HPLC(high performance liquid chromatography) 시스템 MALS 검출기(multi-angle light scattering), DLS 검출기(dynamic light scattering) 관련 전자현미경 등 데이터 분석용 프로그램(ATSAS 등), 컴퓨터 SAXS/WAXS setup 형광검출기, 시료준비 장치 		

<표 2.2.1.1> 바이오신약 - 바이오소각산란 빔라인 사양

나. 빔라인의 중요성

국내 신약 바이오산업이 국제 경쟁력을 확보하기 위해서는 단백질 및 바이오 시료에 대한 분자 구조의 특성을 전문성을 가지고 심도 있게 연구하는 것이 매우 중요하다.

그러나, 단백질 구조 분석을 위한 시설이나 기술은 국내 여러 기관에 산재하여 있으며, 시료의 특성에 맞는 분석기술을 찾아서 각 기관과 시설의 협조를 받아야 하는 불편함이 있다. 따라서, 산업체 입장에서는 일원화된 창구를 통해서 시료의 특성에 맞는 분석 기술을 추천 받거나 혹은 동일 시료에 대해서 동시에 여러 가지 분석 기술을 적용함으로써 최대한 빠른 기간에 종합적인 분석 결과를 도출할 수 있다면 매우 유용할 것이다. 또한 신약/바이오 빔라인의 목표가 국내 신약 및 바이오산업의 경쟁력 강화를 위한 단백질 및 바이오 시료에 대한 분석 기술의 제공이라면, 그 분석 기법을 굳이 방사광 활용에 국한 할 필요는 없을 것이다.

바이오신약 - 바이오소각산란 빔라인은 방사광을 활용한 소각산란기법 제공 및 생체분자 나노결정학 빔라인의 활용을 통하여 신약-제약 사업에서 필요로 하는 다양한 수준의 단백질 분석 요구를 모두 만족시킬 수 있을 것이다.

다. 실험기법 실현 가능성 및 차별성

• 단백질 결정 구조 분석법 (Protein Crystallography, 생체분자 나노결정학 빔라인 활용)

단백질 결정학은 단결정에서 발생하는 회절 패턴의 분석을 통해서 시료의 고해상도 분자 구조를 획득할 수 있다. 단백질 결정학은 100 kDa보다 작은 단백질의 고해상도 구조 분석에 많은 장점을 보유하고 있다. 최근 단백질 결정학은 자동화와 초고속 검출기를 활용한 데이터의 생성 및 처리량이 획기적으로 증대하였다. 단백질 결정학을 이용한 리간드 스크린 및 약물 탐색에 활용하고자 하는 시도가 증가하고 있다. 뿐만 아니라, 마이크로빔을 활용하여 막단백질의 구조 분석에 필요한 충분한 회절능을 제공함으로써 약물 타겟의 절반이상을 차지하는 막단백질 구조 분석에 활용할 수 있다. 일반적으로 막단백질의 경우 LCP 결정화 방법을 활용해서 단백질 결정을 생성할 수 있으나, 그 크기가 수십 마이크로미터 전후로 생성되어 충분한 해상도의 데이터를 획득하기 매우 어렵다. 이 경우 4세대 방사광원의 마이크로 크기로 집속된 빔은 충분한 회절능을 획득할 수 있다.

○ 용액 소각산란분석법 (solution SAXS)

단백질 및 생체 고분자의 용액 구조는 나노미터급의 해상도를 가지면서 시료의 전체적인 구조 및 구조 변화를 관찰할 수 있다. 생체 고분자는 외부의 여러 환경 혹은 조건 (온도, 압력, pH, Salt, 리간드) 따라서 구조적 변화가 유발될 수 있으며, 단백질의
기능에 매우 중요한 역할을 수행한다. 용액 소각산란분석법은 생체 고분자의 구조 변화를 관측함으로써 시료의 특성에 대해서 파악할 수 있다. 바이오 소각산란실험은 자동화된 시료교환 로봇을 사용하며, 데이터 분석의 자동화를 구현할 수 있다. 이용자는 다양한 조건에 대한 단백질 및 생체시료의 구조 변화를 측정/분석할 수 있다.



<그림 2.2.1.1> 통합구조생물학 계략도 및 실험기법에 따른 구조분석 범위 [9]

• 초저온전자현미경 (Cryo-EM, 옵션)

초저온전자현미경의 기술적 혁명은 기존에 결정화가 불가능한 다양한 단백질에 대한 분자 수준의 구조분석을 가능하게 하였다. 최근 100 kDa 크기의 단백질에 대해서도 분 자 수준의 구조 분석이 가능한 것으로 알려져 있다. 향후 막단백질을 포함한 거대 단 백질의 구조분석을 위해서는 Cryo-EM의 1차적 활용이 필수사항이 될 것이다. 또한, 해 상도의 증가로 인해서 약물과 같은 소형 분자의 결합 방법까지 규명할 수 있다. 따라 서 바이오-신약 빔라인의 극저온전자현미경은 막단백질 및 거대 단백질 복합체의 3차 원 분자 구조 연구를 위한 핵심 장비가 될 것이다. 신약개발 과정에서 표적 단백질이 100 kDa 이상이 되더라도 초저온전자현미경을 통해서 구조 정보를 획득할 수 있다면 신약개발의 성공 가능성을 한층 높일 수 있으며, 구조기반 신약개발을 위한 타겟 단백 질의 범위를 획기적으로 확장할 수 있다. 최근 SARS-CoV-2 (코로나바이러스 19) 바이 러스의 저해제로 알려진 램데시비르 (Remdesivir)가 결합하는 RNA중합효소의 구조를 초저온전자현미경을 통해서 규명하였으며, 램데시비르의 결합 부위를 제안할 수 있었 다 [1]. 초저온전자현미경은 독립적인 실험 장비로 신약-바이오 빔라인의 여타 실험 장 치들과는 별도로 운영될 수 있는 장점이 있다.



<그림 2.2.1.2> 초저온전자현미경을 이용한 거대 단백질의 고해상도 구조 분석

라. 빔라인·실험기법을 통한 연구분야

○ 막단백질 및 거대 단백질 복합체의 3차원 분자 구조 연구



<그림 2.2.1.3> 거대 막단백질 TRPM의 초저온 전자 현미경 구조. 2017년과 2018년에 TRP채널 단백질에 대한 구조가 거의 유사한 시기에 주요 저널에 출판됨 [8].

• 단백질 분자의 용액 구조 변화 연구



<그림 2.2.1.4> 실시간 SEC-SAXS 실험을 통하여 분리된 BSA 단백질 시료의 dimer와 monomer의 ab-initio envelop 용액 구조 모델[7].

○ 중동호흡기증후군 코로나바이러스 (MERS-CoV) 핵단백질의 구조 연구

중동호흡기증후군 코로나바이러스 (MERS-CoV)는 2012년 중동지역에서 발생하여 2016년 국내에서 심각한 호흡기 질환을 일으킨 인간 병원체로 용액 SAXS측정을 통해 RNA 게놈 캡슐화를 담당하는 핵단백질의 C-말단 도메인 구조를 이루는 분자가 결정구조에서 이량체로 존재함을 확인하였으며 신규로 구축될 다목적 방사광가속기 Bio SAXS 빔라인의 high-throughput 용액 SAXS 측정 및 분석시스템을 이용하여 SARS, MERS, COVID-19와 같은 신종바이러스에 의한 치명적인 감염병의 백신 및 치료제 개발을 가속화할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.



<그림 221.5> 중동호흡기증후군 코로나바이러스 C-말단 도메인의 SAXS 측정 및 분석결과 [10]

• 신약개발을 위한 단백질-약물 복합체 구조 분석



<그림 22.1.6> 면역 체크포인트 단백질과 면역 항암제 결합 구조 [4,5]



<그림 221.7> Tamiflu-Neuramidase 결합 구조 (PDB : 2HU4)와 Gleevec-Abl 단백질 결합 구조 (PDB : 1IEP) [6]

마. 세계 방사광가속기 내 설치 현황

- 바이오 소각산란 빔라인은 미국 방사광가속기(APS, ALS, SSRL), 독일 방사광가속기(PETRA III), 캐나다 방사광가속기(CLS), 스위스 방사광가속기(SLS), 영국 방사광가속기(DLS), 일본 방사광가속기(Spring-8, PF) 등에서 운영하고 있다.
- (참고) 단백질의 구조 분석을 위해서 MX 빔라인 및 SAXS 빔라인과 함께 초저온전자현미경(Cryo-EM)을 운영하는 방사광가속기는 다음과 같다.
 - 1) eBIC: Electron Bio-Imaging Centre at Diamond Light Source
 - 2) CM01: Cryo-EM beamline at ESRF
 - 3) Cryo-EM facility at Photon Factory
 - 4) Cryo-EM facility at SSRL

바. 기타

제약 및 신약 사업체의 신약개발 성공 가능성을 높이기 위한 단백질 구조 분석을 위해서는 초저온전자현미경, 단백질 결정학, 소각산란분석법 등 다양한 방법을 이용한 종합적 분석 지원이 가능할 때 효율성과 시너지 효과를 나타낼 수 있다.

참고문헌

- [1] W. Yin et al., Science 368, 1499 (2020).
- [2] B. Ju et al., Nature 584, 115 (2020).
- [3] L. Tiefenauer and S. Demarche, Materials 5, 2205 (2012)
- [4] A. Ribas et al., Clin Cancer Res. 18, 336-341 (2012).
- [5] J. Y. Lee et al., Nat Commun. 7, 13354 (2016).
- [6] M. von Itzstein et al., Nature 363, 418-423 (1993).
- [7] Panjkovich, A. et al, Bioinformatics, 34, 1944 (2017).
- [8] Y. Cheng. Curr Opin struc biol, 52, 58 (2018).
- [9] Current Opinion in Structural Biology, 2019, 58, 197-213.
- [10] T.H.V. Nguyen et. al, Acta Cryst., 2019, D75, 8-15.

2.2.2 소재 구조 분석 빔라인 (경 X-선, Material structure analysis beamline)

가. 빔라인 개요

구 분	내 용		
에너지 범위	5~40 keV		
광원	in-vaccum undulator		
빔 Size	• 마이크로 빔 (< 0.1 µm)		
Energy resolution	• $\triangle E/E < 1 \times 10^{-4}$		
실험장치	 Air-sensitive 시료 처리를 위한 글러브박스 TEY-NEXAFS 검출기 XRD, HRPD 관련 실험장치 반응생성물 검출을 위한 Residual gas analyzer 교환 가능한 모바일 실험 스테이지 완전 자동 샘플 이송 장치 및 매너퓰레이터 전기화학실험을 위한 Electrical feedthru 시료 준비를 위한 화학실험실 		
Beamline PTL	 mirror chambers diagnostics front end components beam transfer line components vacuum components mechanical engineering hardwares electronics system integration control DAQ 		

<표 2.2.2.1> 소재 구조 분석 빔라인 사양

나. 빔라인의 중요성

- 방사광을 이용한 실험기법은 광전자분광학, X-선 산란/회절, X-선 흡수분광, X-선
 이미징/현미경 등으로 나눌 수 있음
- 현재까지 이들 실험기법은 각각의 가용 에너지 영역에서 장점이 될 수 있는 독립적인 기법을 활용한 빔라인으로 건설되어 운용되고 있으나, 3GSR, 4GSR로 방사광이 진화하면서, 성능이 향상된 광원이 도래하였으며, 이와 부합한 기반기술의 발전과 함께 이들 실험기법을 한 빔라인 혹은 동일한 시료 위치에서 적용하는 것이 가능해짐
- X-선 흡수분광 (XAFS), 고분해능 분말회절 (HRPD) 기법을 경 X-선 광원에서 활용하고, 다양한 실험환경을 제공하여 반도체, 촉매 소재 및 각종 에너지 소자의 동작 환경에서의 표면-계면-표면 벌크의 화학적, 전자적 구조 및 결정구조의 변화를 체계적으로 분석이 가능함

- 미국, 독일, 일본, 스웨덴 등의 선진국에서는 소재가 반응하거나 작동하는
 상황에서의 분석을 수행할 수 있는 기술을 이미 완성하여 다양한 종류의 소재 및
 응용 분야에 대한 연구를 수행하고 있음
- 계면은 두 가지 다른 상이 만나는 매우 얇은 경계면으로 이 안에 존재하는
 화학성분의 양이 매우 작고, 영역이 매우 좁기 때문에 관찰이 매우 어려움
- 소재 또는 소자가 작동하는 상황에서 발생하는 현상을 실시간으로 분석하는 기법
 또한 매우 어려우나 in-situ 특성 분석을 목표로 함
- XRD를 이용하는 고분해능 분말회절 (HRPD) 기법은 고체물질의 구조 및 특성 분석을 위해 기초과학연구와 함께 산업체에서 널리 사용되고 있는 분석법으로, 분말회절패턴 분석의 목표인 Rietveld 분석에 적합한 패턴을 제공할 수 있음
- 다양한 실험기법을 한 빔라인에서 같은 시료에 대해 적용하여, 시료를 분석할 수
 있는 빔라인이 구축된다면, 이는 산업체에서 필요로 하는 정보를 체계적으로
 신속하게 제공할 수 있음

다. 실험 기법 특성 및 차별성

- PLS-II의 XAFS 빔라인과 비교하였을 때 100배 이상의 증가된 고휘도로 인한 XAFS 데이터의 S/N 비 10배 이상 증가, 초미량 원소 분석 가능 / 작은 빔 크기와 고휘도의 특성을 활용하여 묽은 시료 및 극미량 시료에 대한 XAFS 분석 가능
- PLS-II의 HRPD 빔라인은 광원이 bending magnet으로 광원의 한계 (low flux, high beam divergence)로 인하여 측정시간이 길기 때문에 수요충족이 어려우나, 고분해능 분말회절 기법을 가진 신규 빔라인 구축 시 측정시간 단축으로 산업체를 비롯한 이용자 수요 충족이 기대됨

라. 빔라인을 통한 연구 분야

- 기체/고체 계면 분석을 통한 촉매 성능 개선 촉진
- 화학합성촉매: 반응 후 분석 (Post-mortem analysis)을 통한 촉매의 성능 발현 및
 열화 과정 연구에서 발전하여 반응 과정 중 계면 분석을 통해 촉매의 활성점 및
 열화 메커니즘 규명

- 자동차 배기가스 처리 촉매: 배기가스 저감 촉매의 내구성 및 최적 운전 조건의 파악을 위한 In-operando 계면 분석 연구가 필요함
- 고체/고체 계면 분석을 통한 반도체 소자 성능 개선 과정 촉진
 - 반도체 소자에 대한 계면 분석의 필요성: 반도체 소자는 두 종류의 반도체 또는 도체와의 계면을 통해 기능이 발현됨 (Interface is the device, 2000년 노벨상 수상자 Herbert Kroemer) [1]
 - 반도체 소자의 기능 발현을 이해하고 성능을 향상시키기 위해서는 기능이
 발현되는 근원부인 계면 분석이 필수적임
 - · 인공 광합성 전극에 대한 반도체 계면 분석 : 온실기체 저감을 위해 최근
 광전기화학적 이산화탄소 전환 반응 연구가 활발히 수행되고 있음
 - 이 기술을 연구하기 위해서는 액체전해질/용존기체/촉매-반도체를 비롯한 삼상계면이 반응 과정에서 어떻게 작용하는지를 이해하기 위한 분석 연구가 필요함
- 액체/고체 계면 분석법을 기반으로 이차전지/연료전지 산업 발전 가속화
 - 이차전지에서는 SEI (Solid Electrolyte Interface)가 전지의 수명을 좌우하는 것으로 알려져 있음 [2]
 - 또한 연료전지는 전극/전해질/반응물 사이의 삼상계면 설계가 출력 성능을
 좌우하는 중요한 요소로 알려짐 [3]
 - 그러나 한 요소 소재의 성능 향상이 소재들이 결합한 계면의 성능을 보장하지
 못하는 문제가 있음



<그림 2.2.2.1> SPring-8 BL36XU의 개념도 및 이를 이용한 연료전지 연구 [4]

- 또한 합성 직후의 물성이 작동 과정에서 변화하거나 계면에서 다른 형태로 변화할 수 있어, 소자의 성능과 직접적으로 관련된 물성을 탐지하기 어려운 한계가 있음
- 제안한 빔라인을 통한 in-operando 계면 분석을 통해 전지의 성능 및 직접적으로 관련된 물성을 효과적으로 파악할 수 있을 것으로 기대

마. 세계 방사광가속기 빔라인 현황

- 실험 기법 실현 가능성: 제안한 실험 기법들은 <그림 2.2.2.1>과 같이 이미
 일본의 SPring-8 BL36XU에서 구축되어 운영하고 있음
- 따라서 이 사례를 충실히 벤치마킹함으로써, 제안하는 빔라인을 실현할 수 있음

참고문헌

- [1] https://www.nature.com/articles/nmat3244
- [2] https://www.liverpool.ac.uk/chemistry/research/hardwick-group/research/
- [3] https://www.electrochem.org/dl/ma/206/pdfs/1849.pdf
- [4] T. Uruga, M. Tada, O. Sekizawa, Y. Takagi, T. Yokoyama, Y. Iwasawa, SPring-8 BL36XU: Synchrotron Radiation X-Ray-Based Multi-Analytical Beamline for Poly mer Electrolyte Fuel Cells under Operating Conditions, The Chemical Record. 19 (2019) 1444 - 1456. https://doi.org/10.1002/tcr.201800193.

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

가. 빔라인 개요

연엑스선 나노프로브 빔라인은 4GSR의 나노포커싱 광원을 기반으로 전자소재 분석에 핵심적인 연 X-선 영역의 광전자분광 및 흡수분광과 발전된 나노분광 (nanoscopy) 실험을 통해 공간분해 실험을 구현하도록 한다. 특히 nm 분해능을 목표로 실험장치를 구현하여 이미징 실험과 분광실험을 결합한 분석방법을 제공한다.

100 eV ~ 5000 eV의 X-선을 EPU 삽입장치를 통해 다양한 편광조건으로 빔라인에 공급하고, 저온 (4 K)부터 일반적 진공조건에서 수용 가능한 고온영역 (450 K) 정도의 조건에서 실험을 구현한다. 실험 조건에 따라 빔 집속도를 조절할 수 있도록 하며, 고분해능 나노분광을 위해 capillary 혹은 fresnel zone plate를 이용한 나노빔 실험조건을 제공한다.

항 목	사 양
에너지 영역	150 eV ~ 5000 eV
광원	Elliptical Polarized Undulator
집속광학장치	KB Mirror (µm 빔) + FZP/capillary (nm 빔)
빔 사이즈	< 30 nm at sample position to 100 μ m
실험장치	XPS and XAS

<표 2.2.3.1> 연엑스선 나노프로브 빔라인 사양

나. 빔라인의 중요성

최근의 전자소재 물질의 경우 nm 스케일의 물질의 반응에 따른 불균질성이 매우 중요한 역할을 하고 있다 [1,2,3,4]. 특히 에너지/촉매 물질의 경우 다양한 산화/환원 반응에 따라 시료의 부분적인 변화가 중요한 역할을 하게 되며, 여기에 대한 분광학적 연구가 필수적이다. 반도체/디스플레이 소재의 경우에도 마찬가지로 기본 소자의 크기가 수 nm 크기로 낮아진 상태이며, 전체 소자 구성에서 부분적인 상변이로 인한 현상들이 산업소재의 성능/수율에 결정적인 영향을 끼치고 있다.

기초 소재연구 측면에서도 나노분광은 기존의 고체물질 기반 신소재 연구뿐만 아니라, 화학섬유, 폴리머, 자성박막, 나노-바이오소재, 동식물 시료 등에 대한 연구에서도 중요성이 높아지고 있다. 특히 이러한 물질의 부분적 결함 혹은 불균질성에 대한 연구를 위해서는 나노분광실험이 필수적이며 [1,2,3,4], 향후 나노소재 분야에서 국제적 경쟁력 우위를 선점하기 위한 기초 소재연구에 필수적인 빔라인이라고 할 수 있다.

다. 실험기법 및 특징

• X-ray Photoemission Spectroscopy (XPS)

광전자 분광실험은 전자구조 연구에서 가장 중요하게 사용되고 있는 실험기법으로 입사된 X-선에 의해 발생하는 광전자의 에너지 분포를 측정하여 물질의 전자구조를 연구하는데 사용된다. 기존의 광전자 분광실험의 경우 마이크로 크기의 광원을 통해 주로 이루어 졌으며, 입사면 전체의 정보를 얻게 된다. X-선 광학계와 광원의 발전으로 나노 포커싱이 가능하게 되었으며, 나노빔을 이용한 스캐닝 실험을 통해 시료의 2차원 평면위의 전자구조 분석이 가능해졌다. 현재 대부분의 가속기에서 SPEM 실험을 지원하고 있으며, 4GSR 보다 높음 집속도와 밝기의 획득은 더 정밀한 에너지, 공간분해능을 가지는 SPEM 실험을 가능하게 할 것이다.

• X-ray Absorption Spectroscopy (XAS)

연엑스선 영역에서 매우 중요하게 사용되는 기법 중 하나가 광흡수분광이다. 이는 해당 원소의 resonance edge에서 발생하는 흡수스펙트럼을 분석하여 원소의 구분뿐만 아니라, 원자가의 차이, 구조적 차이, 편광조건에 따른 실험을 통한 궤도함수, 자성에 이르기까지 분석이 가능하다. 역시나 나노빔을 이용하게 되면서 흡수분광실험에 기반을 둔 이미징 실험이 가능해 졌다. 이 경우 transmission 조건에서 주로 실험이 이루어지는 편이나, 시료가 투과실험을 수행하기에 두꺼울 경우에는 electron yield 혹은 fluorescence yield를 통한 nano-XAS 실험도 가능하다. 4GSR 보다 높음 집속도와 밝기는 고분해능 XAS 실험의 구현을 가능하게 한다. 연엑스선 흡수분광의 공명조건에서는 매우 큰 산란단면적의 변화가 있으므로 이를 이용한 CDI의 구현이 가능하다. 기본적으로 소각산란 조건에서 2D detector를 이용하게 되며, FOV를 나노빔으로 더 줄인 후 공간을 스캔하여 CDI를 연속적으로 측정하는 ptychography 방법을 통해 10 nm 이하의 공간분해능으로 나노분광/이미징이 가능하다.

○ 빔라인 구성

EPU 삽입장치를 이용하여 편광조건을 바꾸면서 실험이 가능하며, XPS와 XAS에 기반한 나노프로브 실험을 구현한다. 개략적인 빔라인 구성은 아래 그림과 같다.



<그림 2.2.3.1> 연엑스선 나노프로브 빔라인 개념도

EPU 삽입장치는 광전자분광실험의 에너지 분해능을 높이기 위해 낮은 에너지의 제공이 필요하다. 다만 CDR에서는 탄소 K-edge를 볼 수 있도록 100 eV부터 통상 연엑스선 빔라인에서 제공 가능할 것으로 기대되는 3 keV 까지를 목표 에너지대역으로 설정하고 5 keV 까지의 지원의 가능성을 모색한다. 단색화 장치는 PGM을 통해 구성하며, 에너지 영역에 따른 2~3 개의 grating을 채용한다. X-선 집속은 마이크로미터 빔은 KB mirror로 제공을 하되 capillary 혹은 FZP를 이용한 나노 포커싱을 통해 공간분해능을 최대화 할 수 있도록 한다. 실험장치는 전자분광기에 기반을 둔 실험장치와 XAS에 기반을 둔 나노프로브 실험으로 구분할 수 있으며, 여기에 추가적인 fluorescence detector등의 소형화를 통해 multimodal detection이 가능하도록 한다.

라. 빔라인을 통한 연구 분야 [1,2,3,4]

- 에너지/촉매등 나노물질 기반 소재연구
 - 배터리 원천 소재의 반응특성 및 나노스케일 상분리 현상 연구
 - 전기화학 반응 시 수반되는 전이금속의 원자가 변화의 공간분해 분석
 - 촉매물질 반응에서의 표면생성물질의 국소적 전자구조 분석
 - 향상된 CXI 기법 등을 통한 3차원 공간분해 분광분석
- 반도체 및 디스플레이 소재의 공간분해 분광분석
- 반도체/디스플레이 기반물질의 비 균질성에 따른 전자구조 변화 분석
- 반도체/디스플레이 나노스케일 작동소자의 국소적 전자구조 분석

- 2D 전자소재의 국소적 전자구조 분석
- 층상 chalcogenide, 그래핀 등 2차원 전자소재의 국소적 전자구조 분석
- 층상물질에 기반한 nano-scale device의 작동조건에서의 전자구조 분석
- 자성 물질의 국소적 자성구조 분석
- PEEM을 통한 2차원 평면에서의 자성구조 분석 및 분광실험
- 고분해능 CXI를 이용한 나노자성체의 자성현상 및 구조 분석 연구
- 나노스케일 화학분석
 - 나노스케일의 soft-matter, bio-organic tissue, molecular complexes등에 대한 연엑스선 분광분석

마. 세계 방사광가속기 빔라인 현황

본 빔라인에서 제시한 형태의 연엑스선 나노분광 빔라인은 대표적으로 프랑스 Soleil의 HERMES 빔라인 [5,6]과 대만 TPS의 27A Nanoscopy 빔라인 [7]이 있으며 후자는 현재 건설 중이다. 이 이외에도 다수의 연엑스선 광전자분광기반 nanoscopy와 흡수분광 기반 imaging 빔라인들이 다수 존재하며 대표적으로 ALS의 COSMIC 빔라인 [8,9]과 BESSY의 MAXYMUS 빔라인[10]과 같은 빔라인을 들 수 있다. 최근 건설된 NSLS-II에서는 PEEM이 21-ID-2 [11]에서 CDI가 23-ID-1 [12]에서 수행되는 사례도 있다.

참고문헌

- [1] 2.1 Thrust areas, Advanced Light Source Five-Year Strategic Plan FY2020
- [2] 3.7 Soft X-Ray Coherent Scattering and Imaging, CDR of NSLS-II
- [3] PETRA IV Decoding Complexity in Nature and Technology, CDR of PETRA-IV
- [4] 5. Science and Technology Drivers, CDR of PETRA-IV

- [5] SOLEIL HERMES beamline (https://www.synchrotron-soleil.fr/en/beamlines/hermes)
- [6] Rachid Belkhou et al., J. Synchrotron Rad. 22, 968 (2015).
- [7] TPS 27A beamline (http://tpsbl.nsrrc.org.tw/bd_page.aspx?lang=en&pid=1064&port=27A)
- [8] ALS COSMIC beamline (https://als.lbl.gov/beamlines/7-0-1/)
- [9] Proceedings of the 14th International Conference on X-ray Microscopy (XRM2018)), Microscopy and Microanalysis 24, 8 (2018).
- [10] R. Follath et al., AIP Conference Proceedings 1234, 323 (2010).
- [11] NSLS-II 21-ID-2 beamline (https://www.bnl.gov/ps/beamlines/beamline.php?r=21-ID-2)
- [12] NSLS-II 23-ID-1 beamline (https://www.bnl.gov/ps/beamlines/beamline.php?r=23-ID-1)

2.2.4 나노스케일 각분해 광전자분광 빔라인

(Nanoscale Angle-resolved Photoemission Spectroscopy)

가. 빔라인 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)을 측정하는 기법이다. 이 에너지와 운동량의 분산관계는 물질의 전자 에너지 띠 구조를 나타낸다. ARPES 분석 대상은 단결정 (single crystal)과 같이 결정 방향이 잘 정의된 시료이다. 본 빔라인은 이러한 ARPES 분석기법의 측정 범위를 nm 크기의 시료영역에 대하여 분석을 시행하기 위한 빔라인으로 이와 같은 측정을 가능하게 하기 위하여 입사하는 X-선을 100 nm급의 크기로 집속하기 위한 집속 광학계 (focusing optics)를 필요로 한다. [1][2]



<그림 2.2.4.1> nano-ARPES schematic diagram and ARPES dispersions measured along the Γ - K - M direction on MoTe₂ flakes with thickness of 3, 5, and 7 ML, respectively (Quantum Well State)

- Light Source : Dual Elliptically Polarizing Undulator
- Photon energy: 100 eV ~ 2,000 eV
- Resolving power: $E/\Delta E > 1 \times 10^4$ @100 eV with 100X100 nm²
- \circ Photon flux: 10¹³@100 eV with 100X100 nm²

- Beam Size : < [Horizontal] 100 x [Vertical] 100 nm²
- Main Devices : Optics(Mirror & Monochromator)

Beam diagnostic device

nm-Beam focusing optics

Electron analyzer with 3D-Spin detector

PEEM-based momentum microscope

나. 빔라인의 중요성

각도분해 광전자 분광기법 (ARPES)은 물질의 밴드 구조를 정확하게 분석할 수 있는 유일한 수단이며, 현재 대부분의 장비로는 마이크로미터 이상의 구조에서만 전자구조를 측정할 수 있다. 산업 현장에서 반도체의 공정이 수 nm 범위로 작아지고 있고 첨단 나노신소재들의 나노크기에서 발현되는 독특한 전자구조를 정확하게 측정할 수 있는 장비가 전무한 실정이다. 4GSR에서 저장링에서 방출하는 X-선의 경우는 3GSR의 그것과 비교하여 광원의 크기가 작고 광원의 퍼짐 (emittance)이 작은 특징이 있다. 이 특성으로 얻을 수 있는 장점은 첫번째가 단색광을 파장한계 공간 해상도 (wavelength limited spatial resolution)까지 집속시킬 수 있다. 두 번째는 작은 갭과 강한 자기장을 가지는 삽입장치를 이용할 수 있어서 방출되는 X-선의 광속 (photon flux)의 향상이 가능하다. 이 광속의 증가와 공간해상도의 향상으로 10~100 nm급의 분해능을 가진 ARPES 실험을 가능하게 할 수 있다. [3~5]

다. 실험기법 실현 가능성 및 차별성

실험기법에 대한 부분은 크게 광전자의 에너지와 운동량을 분석하는 전자 분석기 (electron analyzer)의 형태와 nm X-선 광자빔을 만드는 접속계에 대한 부분으로 나누어 살펴볼 수 있다.

(1) 전자 분석기

① 반구형 전자 분석기(hemispherical electron analyzer)

가장 일반적으로 사용하는 전자분석기의 형태로 반지름이 다른 두 개의 반구 사이의

전위차를 이용하여 전자의 에너지를 분석하는 방식을 사용한다. 분석 방식은 광전자의 에너지와 1축 방향의 운동량을 동시에 측정하는 2차원 검출기를 이용하는 방식으로 발전하고 있다. 최근에는 전자 광학계 (electron optics)를 개량하여 2축 방향의 운동량을 측정할 수 있는 기능이 부여된 분석기가 개발되어 전세계 가속기의 ARPES 측정 빔라인의 장비가 점차적으로 신형 장비로 교체되고 있다. [6][7]



<그림 2.2.4.2> Schematic of Hemispherical Deflection electron Analyzer geometry

② 시간 비행 전자 분석기(time-of-flight electron analyzer)

시간 비행 전자 분석기는 원통형 전자 분석기 (cylinderical electron analyzer)를 진화시킨 장비이다. 이 분석기의 특징은 광전자의 에너지 분석을 광전자의 비행시간으로 측정한다. 시료에 X-선 펄스가 입사된 시간과 방출되는 전자가 검출기에 도달하는 시간을 측정하여 그 차이인 광전자의 비행시간 (time of flight)으로 광전자의 에너지를 분석한다. 이 측정 방식은 방사광가속기의 전자 번치의 주기와 동기화를 이용하거나 펄스빔을 만드는 장치를 빔라인에 설치하여 이용할 수 있다. 이 장치의 장점은 광전자의 에너지를 TOF로 측정하기 때문에 전자의 방출각도를 두 개의 축방향으로 동시에 측정할 수 있다는 장점이 있다. 최근에는 TOF 분석기에 PEEM 기능을 함께 조합한 분석기를 제작하고 있으며 스핀 검출기도 2차원적인 정보를 획득할 수 있게 되었다. [8]



<그림 2.2.4.3> 비행시간 전자분석기(TOF electron analyzer)의 기본구조와 원리

③ 광전자 현미경 분석기(PhotoEmitted Electron Microscopy, PEEM)

광전자 현미경 분석기 (PEEM)은 기본적이 개념은 주사전자현미경의 전자총을 X-선 광자빔으로 대체한 장비로 볼 수 있다. 즉, 기본적으로는 시료 표면에서 방출되는 전자의 공간정보를 그대로 획득하도록 설계되어 있다. 이 경우 공간분해능은 30 nm급까지 측정이 가능하다. 최근에는 PEEM과 반구형 전자분석기를 조합하여 방출되는 광전자의 공간분포에 대한 정보뿐 아니라 각도 정보를 정확하게 획득할 수 있도록 개량이 진행되어 있다. 현미경으로 이용한 이미지에서 측정할 지점을 설정하고 그 지점에 대한 ARPES 측정을 할 수 있게 되었다. 하지만 아직은 PEEM을 ARPES 모드로 사용하는 경우 공간해상도가 1 µm 수준이고 반구형 전자분석기나 TOF 전자분석기와 비교하여 각도 분해능이 낮기 때문에 그 한계를 개량하기 위한 개발이 진행되고 있다. 장점은 nm급의 광자빔을 집속하기 위한 광학계의 설치가 필요 없기 때문에 빔라인의 구조나 챔버의 구조가 상대적으로 단순하게 구성된다. [9]



<그림 2.2.4.4> Schematic view of the lens optics of the PEEM

(2) nm급 X-선 집속 광학계 (nm scale X-ray focusing optics)

4GSR의 경우 수평 방향으로의 전자빔 에미턴스가 100배 가량 줄어들기 때문에 빔을 집속하는데 월등히 유리함. 또한, zone plate, capillary 형태의 광학계도 지속적으로 발전하여 빔라인 건설 시점에는 안정적인 집속 광학계 이용이 가능할 것으로 예상된다.[10-12]

① 존 플레이트(Zone-plate)

X-선을 nm급까지 집속하는데 이용할 수 있는 가장 대표적인 광학장치로 X-선의 회절을 이용하여 X-선을 모아주게 된다. 회절을 이용하기 때문에 투명한 고리와 불투명한 고리가 교대로 만들어져 있는 구조물로 형성되어 있다. 기본적인 원리가 오귀스탱 장 프레넬 (Augustin-Jean Fresnel, 1788 - 1827)의 연구결과를 기반으로 하기 때문에 프레넬 존 플레이트 (Fresnel zone plate)라고 불리기도 한다. 구조는 나노기술을 기반으로 나노급 해상도를 가지는 동심원의 회절 격자 구조체를 제작하게 된다. 이 광학계의 장점은 비교적 구조가 간단하게 광자빔을 집속시킬 수 있다는 점과 높은 해상도, 큰 개구수 (numerical aperture)이고 단점은 효율이 낮으며 미세 구조로 인해 제작이 어렵고 내구성이 낮다.



<그림 2.2.4.5> Fresnel zone plate geometry

② KB 거울장치(Kirkpatric-Baez mirrors)

Kirkpatric-Baez 거울 장치 (K-B mirrors)는 방사광가속기에서 가장 일반적으로 사용하는 광학 장치의 하나이고 빔라인의 업스트림쪽과 다운스트림쪽에 설치된 두 개의 거울이 서로 수직으로 한 개는 수평방향으로 다른 한 개는 수직방향으로 빔을 접속시키는 형태이다. 두 개의 거울의 초점은 1개의 지점이 되도록 두 개 거울의 곡률과 형상을 설계하게 되어 있다. K-B 접속은 접속 해상도를 매우 높일 수 있고 광자빔 에너지에 대해 초점거리 차이가 작다는 점이 장점이다. 하지만 광자빔의 크기에 따라 거울 장치의 크기가 커지고 더 작은 빔을 만들기 위해 초점거리를 늘이면 빔라인의 길이가 길어지는 단점이 있다.



<그림 2.2.4.6> Schematic view of the two-mirror Kirkpatrick - Baez system

③ 축 대칭형 광학계(Axially symmetric x-ray optics) - 모세관(capillary)형 광학계

모세관 광학계는 거울 광학계와 유사하게 튜브의 내부 표면에서 X-선의 반사를 이용하여 X-선을 집속하게 됩니다. 초기에는 직선형태의 관을 사용했으나 최근에는 테이퍼 진 모세관을 사용하여 X-선을 매우 작은 지점으로 집속할 수 있게 되었고 포물선 및 타원형의 반사면을 가지게 만들면 초점 거리가 크고 반사율이 매우 높은 설계가 가능하다.



<그림 2.2.4.7> appeared multibounce capillary and single bounce one

라. 빔라인을 통한 연구 분야

그래핀, 전이금속 칼코겐 화합물, 철 기반 초전도체 등 2차원 층상물질의 독특한 전자구조 연구에 필수적인 빔라인이다. 초고진공 성장 또는 기계적 박리 방법으로 신 물질을 구현할 때 시료 표면의 상태가 nm 영역으로 다른 경우가 STM과 같은 현미경학적인 장비 (microscopic device)를 이용한 연구에서 발견되고 있어 nm-급의 전자구조 분석이 필요한 nano-ARPES 장비가 필수적이다.

ARPES 실험의 결과를 얻기 위해 가장 중요한 부분이 시료의 결정성이다. 측정에 사용하는 시료의 결정성이 우수할수록 정확하고 우수한 결과를 빠른 시간 안에 얻을 수 있다. 하지만 이러한 우수한 결정성을 가지고 있는 단결정을 실험에 사용할 수 있는 충분한 크기로 성장시키기 위해서는 많은 시간과 자원, 인력이 소요되고 있다. 하지만 nano-ARPES 장치의 경우는 µm 크기의 단결정으로도 실험이 가능하기 때문에 우수한 단결정 성장에 소비하는 자원, 시간, 인력을 크게 줄일 수 있다. 이 점은 신물질의 연구의 효율성과 연구 개발의 속도를 크게 향상시킬 수 있는 요소가 될 것이다.

마. 세계 방사광가속기 nano-ARPES 빔라인 현황

nano-ARPES 실험장치는 미국 ALS, 프랑스 SOLEIL, 영국 DIAMOND, 이태리 Elettra 등의 가속기에서 10여 년 전부터 관련 기술을 개발해왔고 nano-ARPES를 이용하여 물질들의 nm급 크기의 전자구조 분석과 나노 구조체의 전자구조를 측정한 결과들을 발표하고 있다. 현재 사용하고 있는 nano ARPES 빔라인의 구조는 두 가지로 요약할 수 있다. 집속 광학장치를 이용하여 nm-광자빔을 만들고 광전자 측정은 반구형 전자분석기를 사용하는 방식으로 nm급 위치 제어장치로 시료를 움직여서 측정하는 방식과 µm급 광자빔과 현미경 역할을 하는 PEEM 전자분석기를 결합하여 넓은 면적을 측정한 다음 특정 위치의 정보를 추출하는 방식을 이용하고 있다. [12 - 16]

기관/국가	빔라인	에너지 범위 (eV) (nano-ARPES)	집속 광학계 (분석기)	최대 공간분해능
SOLEIL/프랑스	ANTARES	12 – 11000 (95 – 1000)	Zone-plate	30 X 30 nm ²
~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~	MAESTRO(7.0.2.2)	20 - 1000	Zone-plate	120 X 120 nm ²
ALS/미국	MAESTRO(7.0.2.3)	20 - 1000	(PEEM)	35 nm
Diamond/영국	105	18 - 240 (60 - 150)	Zone-plate	700 X 700 nm ²
Elletra/이탈리아	1.2L NanoESCA	5 - 1000	(PEEM)	150 nm
TPS/대만	27A Nanoscopy PRINS	90 - 1500	(PEEM)	80 nm

<표 2.2.4.1> 세계 방사광가속기 nano-ARPES 빔라인 현황

바. 기타

상업적인 용도의 UV 광원으로는 nano-ARPES를 구현할 수 없기 때문에 방사광가속기의 광원을 이용하여야 한다. 4GSR의 낮은 에미턴스와 결맞음 (coherence) 특성은, 3GSR과 비교하여 빔을 집속하는데 절대적으로 유리할 것으로 기대한다.

또한, 많은 신소재는 나노 스케일이며 이 스케일에서 물질의 특성을 좌우하는 전자구조를 자세히 볼 수 있는 분석기법은 nano-ARPES가 유일하므로 신소재 개발과 관련된 소재산업에 필수적인 분석기법으로 사료 된다.



<그림 2.2.4.8> SOLEIL(프랑스) ANTARES 빔라인에서의 nano-ARPES 실험 예[17]

참고 문헌

- Andrea Damascelli, Probing the Electronic Structure of Complex Systems by ARPES, Physica Scripta. Vol. T109, 61–74, 2004
- [2] F. J. Himpsel, et. al. J. Magnetism and Magnetic Mat., 200 456(1999).
- [3] J. Avila, et al., Synchrotron Radiation News 27, 24(2014).
- [4] A. Bostwick, et. al., Synch. Rad. News 25 19(2012).

- [5] H. Zhang, et. al, Nano Lett. 18, 4664(2018).
- [6] Photoelectron Spectroscopy, Stefan Hüfner, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
- [7] T. J. M. Zouros, et. al., J. Elect. Spect. Rel. Phenom. 125 221(2002).
- [8] D. Kühna, et. al., J. Elect. Spect. Rel. Phenom. 224, 45(2018).
- [9] M. Kotsugi, et. al., Rev. Sci. Instr., 74, 2754 (2003).
- [10] A. C. Thompson, et. al., Zone plate: X-RAY DATA BOOKLET, Center For X-ray Optics, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California
- [11] A. Erko, et. al., modern Developments in X-Ray and Neutron Optics, Springer Berlin Heidelberg New York (2008)
- [12] https://www.synchrotron-soleil.fr/en/beamlines/antares
- [13] https://als.lbl.gov/beamlines/7-0-2/
- [14] http://tpsbl.nsrrc.org.tw/bd_page.aspx?lang=en&pid=1070&port=27A
- [15] https://www.diamond.ac.uk/Instruments/Structures-and-Surfaces/I05.html
- [16] https://www.elettra.trieste.it/elettra-beamlines/nanoesca.html
- [17] K. Nakayama, et al., Nano. Lett. 19, 3737(2019).

2.2.5 결맞음 X-선 회절 (Coherent X-ray Diffraction)

가. 빔라인 개요

결맞음 X-선 회절 빔라인은 차세대 방사광원인 diffraction limited storage ring (DLSR)의 대표적인 특성인 (1) 결맞는 X-선과 (2) 집속된 편광 X-선을 최대로 활용해야 실험이 가능한 첨단 X-선 산란 실험 전용 빔라인을 목표로 한다.

o 결맞는 X-선 (Coherent X-ray Beam)

- 4세대 원형 가속기는 coherent volume이 증가, 이로 인한 에너지 제어 개선

21세기 물성 및 구조 분석 연구의 핵심 화두는 국소성 (locality)과 무질서 (disorder)이다. 이로부터 기인한 첨단 물성 및 생명 현상에 관한 소개와 함께 도전적인 과학의 난제를 해결할 수 있는 결맞는 엑스선을 이용한 새로운 연구 방법을 제안한다. 차세대 방사광원으로 주목을 받는 DLSR (4GSR)의 대표적인 특성인 방사광의 공간 결맞음 특성은 여기서 소개하는 결맞는 엑스선 회절-이미징 연구의 핵심 요소이다. 더불어 결맞는 엑스선 회절-이미징 연구를 통해 중요한 과학적 난제를 풀 가능성이 있는 연구 사례를 소개한다. 첨단 기능성 소재의 개발과 생체 시스템의 이해를 가능하게 하는 새로운 실험방법을 제안하고 시도한다.

○ 편광 X-선 (Polarized X-ray Beam)

- MBA 기반 방사광원은 3세대와 다르게 수평/수직 방향의 광원이 대칭, 집속 효율 증가

4세대 방사광 가속기의 장점인 접속된 X-선 (focused X-ray beam) 기반 편광이 효율적으로 제어되는 빔 X-선 (polarized X-ray beam)을 이용한 양자 물성을 연구한다. 차세대 전자소재인 이차원 물질, 전자의 강상관계 시스템, 이종접합구조, 스핀트로닉스 등에 나타나는 양자 발현, 즉 저차원 효과, 스핀-궤도 상호작용, 계면 효과 등을 이해하고 궁극적으로 소자로 활용하기 위해서는 이러한 양자 물성에 대한 첨단 측정 기법이 필수적이다. 복잡한 양자 물질계의 스핀-궤도 상태와 직접 상호작용할 수 있는 X-선 편광과 공명 현상을 이용하여 양자 물성을 연구한다. 이를 위해 전용 X-선 편광 조절 장치를 고정적으로 설치하며, 양자 물성 연구에 필수적인 저온, 고자기장, 고압, 시분해 등 극한 환경의 실험 조건을 구축하도록 제안한다.

ㅇ 빔라인 설계

A-hutch와 B-hutch로 구성되며, 결맞음, 집속, 에너지 제어에 최적화된 빔라인 설계가 중요하다. **빔라인 건설 시** 저온, 고자기장, 고압, 시분해 등 극한 환경을 적절히 제공할 수 있는 end-station 구축이 필수적이다.

<표 2.2.5.1>	결맞음	X-선	회절	빔라인	가	요
-------------	-----	-----	----	-----	---	---

Photon energy	3000 ~ 30,000 eV		
Photon flux	10 ¹⁴ photon/sec (in-vacuum undulator)		
Coherent focused beam	A-hutch: < 500 (H) x 500 (V) nm ² B-hutch: < 100 (H) x 100 (V) nm ²		
Polarized beam	Linearly(Horizontal and Vertical) and circularly(right- and left-handed) up to high Energy		
	Coherent Diffraction Imaging (CDI), Bragg CDI		
편광	Resonant x-ray magnetic scattering (RXMS)		
집속	High-pressure x-ray scattering (HP), Time-resolved experiments		

* CDI 와 XRD 실험을 통한 실험에 집중



<그림 2.2.5.1> 결맞음 X-선 회절 빔라인 개념도

나. 빔라인 중요성

최근 물성의 이해는 비균일적이고 정돈되지 않은 구조의 이해가 필수 불가결하다. 한 세기 동안 정돈된 구조를 주로 분석하는 연구의 엑스선 결정 회절 실험기법은 새로운 도전을 맞이했다. 하지만, 국소적이며 정돈되지 않은 구조 또한 엑스선 회절로 이해할 수 있다. 빛의 공간 결맞는 특성에서 얻어지는 스펙클 (speckle) 패턴을 이용한 결맞는 회절 이미징은 이러한 스펙클로부터 시료의 이미지를 직접 얻는 수 있도록 하는 실험 방법이다 <그림 2.2.5.2>. 특히, 파장이 짧은 엑스선이 가지는 결맞는 특성을 활용할 경우 원자 스케일의 고분해능을 얻을 수 있는 장점을 제공한다. 즉, 결맞는 엑스선 회절 이미징 연구는 새로운 물성 유발의 핵심 요소인 국소적 비정돈 구조를 직접 관측할 수 있게 하여, 첨단 물성 이해의 실마리를 제공할 것으로 기대된다. 생체시료의 경우 역시 기본적으로 비 정돈된 특성을 가지는 시스템으로 결맞는 엑스선 회절 이미징 실험 방법은 이러한 생체시료의 고분해능 구조 분석 연구에서도 유용하게 활용된다. 수십 마이크론 크기의 세포, 소포체, 그리고 막 단백질과 같은 결정으로 만들기 어려운 단일시료에 관한 상세 구조를 분석할 수 있는 특징으로 관련 분야 연구가 이미 활발히 진행 중인 상황이다. 결맞는 엑스선 회절 이미징 연구는 첨단 소재의 개발에 관한 핵심적인 기반 지식을 제공할 뿐 아니라 생체시료의 연구에도 새로운 돌파구를 제공할 수 있다.



<그림 2.2.5.2> 결맞는 X-선을 이용한 나노스케일 구조 분석. 결맞는 광원을 이용한 다양한 방법의 회절 이미징 실험 방법 (A-E) 이 나열되어 있다. 결맞는 회절 패턴으로부터 시료의 이미지를 얻는 방법은 위상복원이라는 과정을 거쳐 이루어지는데 그 알고리즘이 기술되어 있다 (F) [1].

다. 실험기법 실현 가능성 및 차별성

○ 편광 X-선을 이용한 X-선 공명 산란(XRS)

경 X-선 에너지 영역에서 원 편광 (circular polarization)을 비롯한 편광 조절은 위상 지연판 (phase plate retarder)을 주로 이용하는데, 다이아몬드 같은 단결정을 통과하는 X-선이 동역학적 회절에 따라 투과하는 빔과 회절하는 빔 사이에 위상차이가 발생하여 <그림 2.2.5.3>와 같이 X-선의 편광 조절이 이루어진다. X-선 공명 산란 (XRS: x-ray resonant scattering)기법은 서로 다른 편광에 따른 산란 세기를 비교하는데, 편광에 따른 위상 지연판 결정의 회절 각도가 달라 시료에 입사될 빔의 세기 차이가 뚜렷이 나타나므로, 이 차이를 상쇄하기 위해 한 쌍의 위상 지연판을 연동하여 운용해야 한다. 또한 X-선 공명 에너지를 이용하기 때문에 에너지 스캔을 할 경우 단색 장치 (monochromator)와 함께 X-선 에너지 변화에 따라 위상 지연판 단결정의 회절 각도를 연동해야 한다. 따라서, 이러한 기술적 문제를 감안할 때 위상 지연판을 이용한 편광 조절 장치는 반드시 빔라인 앞부분에 고정적으로 설치하여 활용하는 것이 필수적이다.



<그림 2.2.5.3> 경 X-선 에너지 영역의 편광 조절을 위한 다이아몬드 단결정 위상 지연판(phase plate retarder) 도식도 [3]

참고로, 미국 APS 가속기의 업그레이드 계획안[2]에는 경 X-선 에너지 영역에서도 편광 조절이 가능한 undulator 삽입장치를 제안했는데, 이는 단결정 위상 지연판으로 편광 조절을 할 수 없는 고 에너지 (20 keV 이상) 영역을 위한 것이다. 하지만 중요 자성 원소 대부분의 X-선 공명 에너지가 20 keV 보다 낮기 때문에, 본 빔라인의 제안단계에서는 이처럼 기술적 난이도가 높은 삽입장치는 논의를 미루도록 한다.

라. 빔라인·실험기법을 통한 연구분야

○ 자성 시료의 나노 스케일 복합 구조

자성은 물질의 특성을 유도하는 기본적인 요소 중 하나인 원자의 자성 모멘트 (주로 전자에 의한) 즉 스핀의 공간적 정렬 상태에 의해 유도되는 현상으로, 이러한 스핀이 공간적으로 어떠한 정렬을 하고 있는지를 파악하는 것은 기본적인 자성 특성을 이해하는데 중요한 정보를 제공한다. 특히 수 나노미터에서 수십 또는 수백 나노미터 크기로 나타나는 복합 구조는 각 자성 원자들이 상관성을 가지고 집단적인 패턴으로 만들어내는 구조로 자성 도메인, 도메인 사이의 경계 구역 (magnetic domain wall), 고유의 위상 성질을 가지는 자성 스커미온 (skyrmion) 등이 있다 <그림 2.2.5.4>. 이러한 나노스케일의 자성 구조는 그 자체가 보유한 특성으로 인한 학문적 중요성뿐 아니라 자성 메모리 스핀트로닉스 소자 등 첨단 기능성 소재로서의 응용성으로 인해 많은 관심이 집중되어 있다. 특히 스커미온을 이용한 스핀트로닉스 활용은 기존의 전류 소자에 비교할 때 낮은 임계전류를 가지고도 구동이 가능한 장점과 위상 특성으로 인해 보유하게 되는 고유의 시스템 안정성으로 인해 신개념의 전류 소자로 활용을 염두에 둔 연구가 활발하게 진행 중이다.



<그림 2.2.5.4> 자성 시료의 나노 스케일 복합 구조. 자성 도메인 경계 및 나노스케일 도메인, 자성 스커미온 격자에 이르기까지 수 나노미터에서 수 마이크론 크기에 걸쳐 나타나는 다양한 자성 복합 구조의 모습 [4].

○ 강상관계 시스템의 국소적 비 균일 현상 이해

물질의 특성을 나타내는 근본 자유도인 전자, 스핀, 오비탈 그리고 격자 간의 밀접한 상호 작용으로 새로운 상태의 물성을 유도하는 경우가 강한 상관성을 가진 전자계 물질 (strongly correlated electron systems)에서 빈번하게 등장해 왔으며 응집물리 연구의 주된 시스템으로 간주되어 왔다. 이러한 격자-스핀-전자-오비탈의 연관된 상호 작용은 자발적으로 대칭성을 깨뜨리고 긴 거리의 정렬 상태를 만드는 새로운 상으로의 상전이를 거쳐 물성을 유도하기도 하지만, 긴 거리의 정렬을 만들지 못하고 국소적으로 유도되는 비 균일한 상이나 요동을 통해 흥미로운 새로운 물성을 유도하기도 하는 경우가 있음이 학계에 다양하게 보고되었다 <그림 2.2.5.5>.



<그림 2.2.5.5> 치환 이온의 국소적인 분포 효과로 유도되는 모트 절연체 (Mott insulator) 의 Pseudogap & 초전도 현상 [10].

○ 나노회절 및 나노형광을 이용한 3차원 이미징

Transmission geometry에서 회절 패턴을 측정하는 CDI로는 Bragg geometry에서와는 달리 시료의 결정성에 관계없이 3차원 이미지를 얻을 수 있다. 여기에서도 회절 패턴과 동시에 형광 X-선을 측정하여 집속빔에 대한 시료의 정렬 상태를 검증하는 수단으로 활용하는 한편, 미소영역 내 구성원소를 정성/정량화 하여 3차원 X-선 형광 이미지를 얻는다. 이러한 분석기법은 생체/기능/반도체 소재의 내부 구조를 화학적 조성 분포와 함께 규명하는데 유용하게 활용될 수 있다.



<그림 2.2.5.6> Ptychographical BCDI를 나노와이어 소재 내 strain 분석에 활용한 예 [13]. 단일 InGaAs 나노와이어 내의 strain 분포를 3차원적으로 재구성한 결과

○ 4세대 광원을 이용한 극한환경 연구

극한환경연구라 함은 통상적으로 온도는 3,000~7,000 K, 압력의 경우 수백만 기압 (~109 Pa)에 해당하며 이러한 조건에서 발현하는 물성을 의미한다. 이러한 압력과 온도를 구현하기 위하여 <그림 2.2.5.7>과 같은 두 개의 다이아몬드 사이에 시료를 넣어 압력을 가하는 다이아몬드 앤빌셀이 가장 보편적으로 사용되고 있으며 온도는 YAG혹은 연속발진 레이저를 사용하여 순간적으로 시료에 온도를 가하는 방식을 사용하고 있다. 다이아몬드의 경우 모스강도가 10/10으로 가장 강하며, 전자기파에 투명하기에 X-선을 이용한 구조분석에 이상적인 재료이며 특히 시료의 크기가 수십 마이크로 미터로 매우 작은 만큼 작은 빔 사이즈에도 불구하고 고휘도를 가진 광원을 사용해야 하기에 신형방사광가속기 시설의 활용이 절대적으로 필요하다. 특히 최근에는 다이아몬드 엔빌셀 (DAC) 을 이용한 high pressure image 등 고압환경에서 시료 이미지 연구도 시작되고 있다.





<그림 2.2.5.7> 고압연구에서 가장 많이 사용되는 Mao-type symmetry cell 의 압력발생 개념도(왼쪽) 실제 cell 사진(오른쪽).

마. 세계 방사광가속기 내 설치 현황

경 X-선 에너지 영역에서 편광에 따른 실험이 가능하도록 전용 편광 조절 장치가 최근 운영중인 빔라인은 4세대 원형 가속기 업그레이드를 마친 ESRF(유럽 빔라인과 미국 APS의 4-ID-D 방사광가속기)의 ID 12 빔라인(2023년 APS-U 업그레이드 후에는 Polar 빔라인)[1]이 거의 유일하다.

참고문헌

[1] J. Miao, et al., Science 348, 6234 (2015)

[2] APS Upgrade Project Fianl Design Review Report, Chapter 4: Experimental Facilities (https://www.aps.anl.gov/APS-Upgrade/Documents)

[3] L. Paolasini, "Chapter 12. Resonant and Magnetic X-ray Diffraction" in "Synchrotron Radiation: Basics, Methods and Applications" edited by S. Mobilio, F. Boscherini, and C. Meneghini (Springer, 2015).

[4] "Nanoscale Magnetic Domain Memory", K. Chesnel (DOI: 10.5772/intechopen. 71076)

- [5] D. Sung et al., Nanoscale, 10, 13158 (2018).
- [6] S. Mühlbauer et al., Science 323, 915 (2009); X. Z. Yu et al., Nature 465, 901 (2010). S. Woo et al., Nature Materials 15, 501 (2016).
- [7] S. Das et al., Nature 568, 368 (2019).
- [8] J.-Y. Chauleau et al., Phys. Rev. Lett. 120, 037202 (2018).
- [9] A. K. Yadav et al., Nature 530, 198 (2016).
- [10] I. Battisti, et al., Nat. Phys. 13, 21 (2017).
- [11] G. K. Williamson et al., Acta Metall. 1, 22 (1953).
- [12] M. A. Pfeifer et al., Nature 442, 63 (2006).
- [13] M. O. Hill et al., Nano Lett. 18, 811 (2018).
- [14] Mirko Holler et al., Nature 543, 402 (2017).
- [15] B. Iyer et al., BMC Biophys. 4, 8 (2011).
- [16] C. Song et al., Biophys. J. 107, 1074 (2014)
- [17] 신소재 경제뉴스 (http://www.amenews.kr/news/view.php?idx=34449)
- [18] D. Kim et al., Nano Lett. 19:5044 (2019).
- [19] M. Somayazulu et al., Phys. Rev. Lett., 122, 027001 (2019).
- [20] Z. M. Geballe et al., Angewandte Chem. Int. Ed. 57 688 (2018).

- [21] P. Soderlind et al., Phys. Rev. B 53, 14063 (1996).
- [22] S. K. Saxena et al., Science 260, 1312 (1993).
- [23] E. Wigner and H. B. Huntington, J. Chem. Phys. 3, 764 (1935).
- [24] S. Tateno et al., Science 330, 359 (2010).
- [25] R. F. Smith et al., Nature Astronomy 2, 452 (2018).
- [26] N. Dubrovinskaia et al., Science Advances 2(7), e1600341, (2016).
- [27] M. Jo et al., Adv. Funct. Mater. 28, 39, 1802003 (2018).
- [28] H. Lee et al., Phys. Rev. Lett. 123, 217601 (2019).
- [29] P. Mehrabi et al., Nat. Methods. 16, 979 (2019).

2.2.6 결맞음 소각산란 (Coherent SAXS beamline)

가. 빔라인 개요

결맞음 소각 X-선 산란 (coherent SAXS) 빔라인의 목적은 고체 물리, 유기 화학, 생물학의 다양한 연구 분야에서 제어 가능한 시료 환경 하에서 수 Å에서 µm 단위에 이르는 다양한 구조를 가지는 물질의 구조 분석에 적용하는 것이다.

국내외적으로 에너지 소재를 포함한 나노 기술 분야의 연구가 활발히 진행 되면서, 에너지 소자, 반도체, 디스플레이, 광학소자 및 기능성소자 등 다양한 분야에서 이루어지고 있으며 소각 x선 산란 빔라인의 활용도는 매우 높아지고 있다. <그림 2.2.6.1>은 이제까지 3GSR 소각 산란 빔라인에서 연구되어온 연구 분야이며, 유·무기 박막, 양자점, 나노 패터닝 물질의 구조와 형태 그리고 다양한 환경 하에서 이러한 물질의 시간 또는 온도에 따른 변이를 탐색하고자 하는 것들이었다.



<그림 2.2.6.1> SAXS 빔라인에서 적용되어 온 연구 분야

최근 들어 방사광가속기 이용자들은 연구 대상 물질의 분자들이 과거에 비해서 거대화 및 복합화되고 있고, 그에 따라 나타나는 여러 가지 기술상의 문제점에 대한 돌파구를 찾고, 새로우면서도 진보된 응용 분야를 개척하고자 노력하고 있다. 그래서 더 나은 성능을 가진 소각 산란 빔라인 건설을 지속적으로 요구하고 있다. 본 장에서는 새로이 대두되는 연구 분야와 그를 이루기 위한 4세대 원형 방사광가속기에서 결맞음 소각산란 빔라인의 요구사항을 기술하였다.

나. 빔라인 중요성

반도체, 유기 태양전지, OLED, 디스플레이, 환경오염센서 등의 주재료가 되는 유/무기 박막, 양자점, 나노 패터닝 물질은 <그림 2.2.6.2>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 분위기 하에서 이러한 물질의 시간 또는 온도에 따른 구조 변이를 탐색하고자 하는 실험 환경은 매우 중요하다. 즉 새로운 촉매 또는 용매를 이용한, 제어 가능한 in-situ 환경 하에서 분자 단위로 성장하는 표면 유기층의 구조 또는 형태의 연구는 매우 중요하다.



<그림 2.2.6.2> 유기 박막의 구조 & 형태 [1].

다. 실험기법 실현 가능성 및 차별성

결맞은 X선 빔을 이용한 마이크로 스침각 소각 산란 기법 (µGISAXS, 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 연구하는 데 매우 적합한 방법이다.

마이크로 스침각 소각산란기법은 분자 수준에서 새로운 촉매, 용매 환경 하에서

물질 표면의 유기층의 성장을 실시간으로 탐구하는 새로운 연구 분야를 도입할 수 있도록 하는 것이다.

그래서 이러한 재료에 대한 실험을 위해 본 실험 기법이 실현되는 데 요구되는 사양을 정리하여 보면 <표 2.2.6.1>과 같다. 즉, 4GSR 저장링의 언듈레이터 광원에서 인출되는 결맞고 강력한 빔을 바탕으로 분광기와 집속거울을 이용해서 시료 위치에 제공된 빔이 <표 2.2.6.1>의 성능을 만족한다면 충분히 가능할 것이다.

	Hard X-ray
에너지 범위	4 ~ 40 keV
에너지 해상도 (Ε/ΔΕ)	~ 2×10 ⁻⁴
광량	10 ¹² - 10 ¹⁴ photon/sec in the range of 4-40 keV Coherent flux: ~10 ¹³ photon/sec at 12.4 keV
광원	 in-vacuum Undulator (Length: 2 m, Period: 18.5 mm)
실험기법	 SAXS / WAXS XPCS (X-ray Photon Correlation Spectroscopy)
Monochromator	- $LN_{\rm 2}$ cooled Double Crystal Monochmotor with Si(111) & Si(311) crystal pair
Optics	 Dual Kirkpatrick-Baez (KB) mirror pair (VFM1,2 and HFM1,2) in two bounce geometry
Focused beamsize	• ~10 μm
Beamline PTL	 진공펌프 (lon pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump) 진공장비 (gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts) support & girder (smart girder & support) 진단장비 (BPM, 진공측정(lon gauge, cold cathode gauge)) shutter (F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter) 냉각수 및 utility (cooling system & utility / gas) BL control electronics (safety & interlock system, 전자/전기 시스템) 컴퓨터, 장치제어, 데이터 S/W (control & DAQ, program server system) BL monitoring & data storage Optical Hutch Experimental Hutch (interlock 포함)
실험장치	 Fast readout Detector (SAXS용) Fast readout Detector (XPCS용) Automatic Sample Changer 데이터 분석장치 자동화(High throughput) 장치 등 데이터 분석용 프로그램, 컴퓨터 광학테이블, 온도조절 시스템, 실험챔버, TR-stage

<표 2.2.6.1> 결맞음 소각산란 빔라인 사양

라. 빔라인·실험기법을 통한 연구분야

마이크로 스침각 소각산란기법은 물질 표면의 원자 또는 분자 수준의 구조를 결정하게 만들게 하는 주요기법이다. 4GSR을 이용한 스침소각산란기법은 실험조건 (고온, 저온,
자기장, 전기장, 가스분위기, 습도)에서 표면 결정 성장 또는 구조 전이 과정을 실시간으로 관찰할 수 있다. 이와 관련한 과학 분야는 다음과 같다.

(1) 금속 또는 불활성 기판 상 유기 박막 : 기판 위에 코팅되어 있는 유기 분자의 결정 구조, 분자 정렬 방향성, 정렬도를 특성화하는데 유용한 도구임을 많은 연구를 통해 입증하였다. 잘 정의되고 조정 가능한 특성을 가지는 기능성 표면을 생성할 수 있는 자체 조립 공정의 개발은 전자 및 광학 응용 분야에 고유한 특성을 가진 반도체 소자 개발과 실용화로 이어질 수 있습니다.

(2) 박막, 다/단결정에서의 이종 원소의 이온 & 촉매 반응

(3) 3D scanning SAXS 기법을 활용하여 박편시료에 수 마이크론에서 수십 마이크론으로 집속된 빔을 일정 간격으로 시료에 조사하면서 SAXS 패턴을 얻고 이 패턴들을 분석하여 미세 나노구조와 특정 구조의 배향을 밝힐 수 있으며, 4세대 결맞음 SAXS 빔라인은 마이크론 수준으로 집속된 고선속의 결맞음 빔을 제공하므로 동일한 공간 분해능을 가정한다면 3세대 광원에 비하여 1/100 이상 측정시간을 단축시킬 것으로 기대되고 있다.



(b) 마이크로 CT (12.1 μm 분해능)로 측정된 뼈기둥. (c) 벡터필드로 나타낸 뼈기둥의 3차원 초미세구조 배향

<그림 2.2.6.3> 3D 스캐닝 SAXS 측정 개략도 [2]

마. 세계 방사광가속기 내 설치 현황

나노 소자 개발 과정에서 물질의 구조 정보를 보다 적극적으로 활용하기 위해서 SAXS 빔라인은 많이 활용되어 왔으며, 자국의 산업 발전에 기여하고 있다. 최근 유럽을 포함한 선진국에서 새로이 건설되고 있는 4세대 원형 방사광가속기에 SAXS 빔라인이 도입되었고, 새로운 방사광원과 빔라인의 장치를 고도화하여 고도화된 탐색 시설을 구축함으로써 산업체 수요에 대응하고, 국가 나노 기술 개발과 경쟁력 향상에 기여하고 있다.

Facility		Source	실험 분야
스웨덴	CoSAXS	Undulator	SAXS, BioSAXS, Time resolved SAXS, Micro beam SAXS, Anomalous SAXS, XPCS
MAX IV	FemtoMAX	Undulator	Time-resolved X-ray scattering, Time-resolved X-ray spectroscopies, Time-resolved SAXS, Time-resolved reflectivity

<표 2.2.6.2> 세계 결맞음 소각산란 빔라인 설치 현황

참고문헌

- [1] Jonathan Rivnay et. al. Chem. Rev. 2012, 112, 5488-5519.
- [2] Marios Georgiadis et. al., Bone, 2015, 71, 42-52.

2.2.7 실시간 엑스선 흡수분광학 (Real-time X-ray Absorption Fine Structure)

가. 빔라인 개요

- 실시간 엑스선 흡수분광학 빔라인은 향상된 4GSR 방사광 광원, focusing mirror를 통한 µm 수준의 빔 크기, 및 millisecond ~ microsecond 영역의 고속 측정을 기반으로 함
- 기존의 XAFS 빔라인들에서 구현하기 어려운 극한환경 및 특이환경 하에서 시-/공간- 분해능을 보유한 XAFS 측정/분석을 통하여 새로운 연구 분야를 개척하고 국가적·사회적 난제 해결에 이바지하고자 함
- 5~40 keV의 광범위한 경 X-선 에너지영역을 활용하여, 에너지/환경/화학/ 물리/바이오/방사선소재 등 다양한 연구 분야의 소재에 대한 high throughput- 및 in situ(operando) 측정 시스템 구축을 통한 미래세대 연구 트렌드를 제시하고자 함

Light Source	Undulator
Photon energy	5,000 ~ 40,000 eV
Data acquisition time	< several <i>m</i> sec
Energy resolution	$\Delta E/E < 2 \times 10^{-4}$
Beam Size	[Horizontal] 10 x [Vertical] 2 mm ² (conventional); < 100 μm (focused beam)
Main Devices	 Continuous scan Double Crystal Monochromator (DCM) 60Hz Quick scan DCM Energy Dispersive Detector Kirkpatric-Baez(KB) Optics Fast response ion-chamber High-throughput sample holder and automatic samples change system

<표 2.2.7.1> 실시간 엑스선 흡수분광학 빔라인 개요



<그림 2.2.7.1> 실시간 시분해 흡수분광학 빔라인 개요 [1]

나. 빔라인의 중요성

- 최근 세계적인 첨단 소재의 연구동향은 빠른 화학 반응 속도나 구조 전이 등 수
 초~수 밀리초 스케일에서 일어나는 구조변화에 대한 관찰을 필요로 함
- 수 밀리초 스케일에서 약 1 keV에 해당되는 에너지영역을 실시간으로 X-선 흡수분광 측정을 함으로써 수 초 이내에 발생하는 반응 및 구조변화를 관찰할 수 있는 빔라인 건설을 제안함
- 또한 focusing mirror를 통한 집속을 통하여 수 마이크로미터 (μm) 수준의 빔크기를 구현하며, 우수한 시간 분해능과 구조적/화학적 공간분해능을 동시에 구현할 수 있는 첨단 XAFS 빔라인을 제안함
- 상기 빔라인을 통하여 기존에 알 수 없었던 중간체, 전이 상태 등을 확인할 수 있게 함으로써 다양한 특성 변화 및 메커니즘을 규명하게 해줄 것으로 기대되며, 최근 미래 소재로 주목받는 재료들의 특성들은 비균일, 무질서한 구조에 기인함
- 시/공간 분해능을 활용한 XAFS 분석은 기존의 분석법으로 확인 할 수 없었던,
 소재의 물리/화학적 특성 변화를 마이크로미터 수준의 이미징 정보로 획득할 수 있고, 또한 뛰어난 시간 분해능과 조합하여 이러한 정보를 실시간으로 수 밀리초
 마다 측정/분석이 가능함
- 다양한 분야의 첨단 소재에 적용하여 새로운 반응 및 퇴화 메커니즘을 규명하고, 최종적으로 획기적으로 향상된 성능을 보유한 신소재개발에 큰 기여가 가능할 것으로 예상되며 빔 크기가 작고 고휘도인 빔의 특성을 활용하여 실시간 화학반응 및 동력학 연구가 가능하며, 화학반응의 공간 mapping 분석도 가능할 것으로 판단됨

다. 실험기법 실현 가능성 및 차별성

- 현재의 X-선 흡수분광실험은 1 keV 에너지 스캔에 대한 근본적 한계로 인해 약
 20분 이내에서 하나의 XAFS 데이터 획득이 가능하나, 수 초~수 분 이내의 실시간 XAFS 측정은 일반적인 XAFS 장비와는 다른 개념의 분광계를 이용해야 구현이 가능함
- X-선 흡수분광실험은 i) 60Hz 이상의 quick scan DCM을 활용한 수초 이내의

시간분해능 모드와, ii) single bent Si polychromator를 이용한 수 밀리 초 이내 시간분해능 모드의 두 가지를 제안함

- Quick scan DCM 모드의 경우 기존의 측정 환경을 그대로 사용가능한 장점을 보유하며, single bent Si polychromator의 경우 focused X-선 빔을 시료에 조사한 후, 먼거리에서 위치감지 검출기 또는 CCD를 이용하여 에너지를 분해함으로써 X-선 흡수 분광실험이 가능하며, 수 밀리초 & 마이크로초 스케일의 XAFS 측정이 가능함
- 또한, 기존의 빔라인에서 얻을 수 없었던 마이크로미터 빔 크기의 X-선을 polychromator를 활용하여 확보할 수 있는 집속된 최상의 광량을 이용하여, 기존 빔라인 사양의 한계로 접근할 수 없었던 생체, 환경 및 첨단 재료 물질의 구조분석이 가능하며, 가벼운 원소부터 희토류의 무거운 원소까지 특성 평가가 가능하도록 넓은 영역의 즉 5.0 keV에서 40 keV 에너지 가용 범위를 제안함

라. 빔라인을 통한 연구 분야

- 에너지 소재 분야
- (리튬 및 차세대 이차전지 소재의 고속 충방전시 실시간 구조분석 연구) 현재 대부분의 실생활에 응용되는 이차전지의 경우, 고속 충방전 시, 원래의 용량을 발현하지 못하고, 전극물질 구조의 재현성 등에 문제가 발생함. 따라서, 5C-rate이상의 고속 충방전을 시킴으로써, 단계별 실시간 구조변화의 관찰을 통해, 문제 원인을 파악하고 향상된 소재 및 시스템 개발에 직접적인 해결책을 제시할 수 있음



<그림 2.2.7.2> Time-resolved/Spatial-resolved XAFS 빔라인을 통한 리튬이차전지 소재 연구[2]

고속 충전 시 밀리초~마이크로초 영역의 시분해 (time-resolved) 방사광

구조분석을 활용하여, 1) 실시간으로 원자 선택적 전이금속의 기하학적 미세구조와 전자구조 변화를 관찰할 수 있는 비파괴 구조분석 플랫폼을 구축하고, 2) 고속 충전과정의 활물질 내 리튬의 불균등 상태를 sub-micron 수준의 2차원적, 3차원적 공간분해 (spatial-resolved) 이미지화 할 수 있는 방법을 개발하여, 이로부터 고속 충전 반응 메커니즘을 명확히 규명함



- (연료전지, 수전해 등 촉매소재의 실시간 동역학적 메커니즘 연구)

<그림 2.2.7.3> Time-resolved XAFS 빔라인을 통한 연료전지 촉매 소재 연구 [3, 4]

○ 의료분야

암세포의 발견을 위해 조영제 물질을 생체 내에 주입하여 그 이동경로를 따라 마이크로미터 스케일로 XAFS 측정을 함으로써 암세포에만 선택적으로 흡착되는 과정 및 원리 규명이 가능함

○ 환경분야

토양 내에 존재한 유해 광물요소를 환경친화적으로 제거하거나 안정한 물질로 변화시키기 위해 생명체를 이용하는 연구가 활발히 진행 중임. 예를 들면, 폐광이나 토양 내에 존재하는 인체에 매우 유해한 As5+ (arsenate) 이온을 지렁이를 이용하여 인체에 무해한 As3+ (arsenite) 상태로 전환시키는 연구에서, Arsenate가 존재하는 토양을 지렁이에게 먹이면 이를 장기 내로 흡수하여 arsenite로 환원시켜 장기 내에 축적을 하거나 몸 밖으로 배출하는데, 고선속 마이크로미터 X-선 XAFS 측정을 하여 이러한 과정을 규명할 수 있음

○ 지구과학분야

Diamond anvil로 가해지는 고압 하에서 광물시료의 구조 변화 관찰이 가능하다. 광물 내 존재하는 원자들의 공간적 분포를 mapping하고, 원하는 공간 부분에 대해 선택적으로 XAFS 분광학 실험을 수행함으로써, 부위별 형성된 불균등한 구조적 차이를 밝힐 수 있음



<그림 2.2.7.4> Time-resolved/Spatial-resolved XAFS 빔라인을 통한 지구과학분야 연구

○ 방사성 물질 분야

- 의료용 진단기술, 방사성의약품 개발, 신약 설계
- · 항공우주, 국방 등 국가전략산업에 사용되는 배터리, 발전시스템, 발열소자 등
 특수소재 개발
- 블록, super heavy 원소 화합물의 에너지 전환/저장, 물질변환, 센싱 및 극한환경 대응물질 합성, 물리화학적 특이 특성 규명, 화학반응 및 거동의 이해
- 동위원소를 이용한 대기, 지질, 환경 관련 연구, 미세먼지 기원 추적 및 제거, 지하수
 및 바닷물 내 오염물질의 화학종 규명, 지각 내 초고압, 초고온 상태의 물질 구조 연구

마. 세계 방사광가속기 빔라인 현황

현재 전세계 방사광 가속기에서 운영하고 있는 실시간 XAFS 측정이 가능한 빔라인들을 <표 2.2.7.2>에 정리하였음

방사광가속기	빔라인명	광원	에너지	비고
NSLS-II (미국)	7BM-QAS (Quick X-ray Absorption)	Three-pole wiggler	4.7~31.0 keV	-continuous scan DCM -unfocused(10×1mm²) -focused (500µm)
NSLS-II (미국)	8ID-ISS (Inner-Shell Spectroscopy)	Damping wiggler	4.9~32.0 keV	-continuous scan DCM -focused (500μm)
APS (미국)	Beamline 9BM	Bending magnet	2.1~22.5 keV	-continuous scan DCM -unfocused(3×1mm²) -focused (500µm)
SSRL (미국)	LBL2-2	Bending magnet	4.5~37.0 keV	-continuous scan DCM -unfocused(15×3mm ²)
Spring-8 (일본)	BL01B1 (Wide energy XAFS)	Bending magnet	4.5~110.0 keV	-4.5~37keV: Si(111) -8.6~70keV: Si(311) -13.5~110keV: (Si511) -focused beam < 0.2mm
Spring-8 (일본)	BL36XU	In-vacuum type tapered undulator	4.5~35.0 keV	-focused beam (1µm/100nm)
Photon Factory (일본)	AR-NW2A	Tapered undulator	5.0~25.0 keV	-Bent crystal detector -focused (0.6×0.2mm ²)
SLS(스위스)	SuperXAS-X10DA	Bending magnet	4.0~32.0 keV	-40Hz quick scan DCM -focused beam (100µm)
ESRF(프랑스)	ID24 (Energy dispersive XAFS)	4 planar undulators	5.0~27.0 keV	-EDS detector -Pump/probe mode down to micro-seconds -focused beam (Minimum: 3μm, Maximum: 200μm)
DESY-PETRAIII (독일)	P64 (Advanced XAS)	Undulator	4.0~44.0 keV	-continuous scan DCM -unfocused (2x1mm²) -focused (150x50µm²)
SOLEIL (프랑스)	ROCK-beamline	Bending magnet	4.5~40.0 keV	-continuous scan DCM -unfocused (5×2mm ²) -focused (350x190µm ²)
Diamond (영국)	I20-EDE	Two-pole wiggler	6.0~26.0 keV	-Bent Si polychromator -focused beam (Minimum: 100x30µm²)

<표 2.2.7.2> 세계 주요 방사광가속기 시설의 실시간 XAFS 빔라인 현황

참고문헌

- [1] O. Müller et al., Quick-EXAFS setup at the SuperXAS beamline for in situ X-ray absorption spectroscopy with 10 ms time resolution, J. Synchrotron Rad., Vol. 23 (2016) 260p.
- [2] S. Myeong et al., Understanding voltage decay in lithium-excess layered cathode materials through oxygen-centred structural arrangement, Nat. Commun., Vol. 9 (2018) 3285p.
- [3] T. Uruga et al., Status of Synchrotron Radiation X-ray-based Multi-analytical Bea mline BL36XU for Fuel Cell Electrocatalysis Research at SPring-8, Synchrotron R adiation News, Vol. 33(1) (2020) 26p.
- [4] N. Ishiguro, M. Tada, Structural Kinetics of Cathode Events on Polymer Electrol yte Fuel Cell Catalysts Studied by Operando Time-Resolved XAFS, Catalysis Let t., Vol. 148 (2018) 1597p.

2.2.8 생체분자 나노결정학 (Bio Nano crystallography)

가. 빔라인 개요

현재 상업적으로 사용되고 신약의 약 60%는 GPCR (G-protein coupled receptor)와 같이 세포막에 박혀 기능을 하는 막 단백질을 타켓으로 한다[1]. 세포막을 이루는 단백 질 혹은 거대 복합 단백질은 X-선 결정학으로 구조를 분석하기 위해 요구되는 단결정 시료를 얻기가 매우 어렵다. 그리고 초기 결정화 조건이 확보되더라도, X-선 회절에 적 합한 크기 (약 30 µm 이상)의 결정을 얻기 위한 최적화가 쉽지 않아 확보된 결정의 크 기는 10 µm이하가 대부분이다. 이렇게 작은 결정 하나만 이용하여 회절 공간에서의 완전 데이터 (약 180도)를 얻기는 쉽지 않다. 하지만 현재 3세대 빔라인보다 약 100배 강하고 약 30 x 30 µm² 의 빔크기를 가지는 X-선을 이용하면 데이터 머징, 연속 X-선 결정학 (Serial X-ray crystallography) 등을 활용하여 구조 분석이 가능하다[2~3]. 이러 한 실험 방법은 현재 널리 사용되는 단결정을 이용한 회절 실험과 더불어 회절 공간에 서 완전 데이터를 획득하는 일반적인 실험 기법이 될 것이다.



이용한 회절실험

생체분자 나노결정학 빔라인은 (1) high flux와 작은 빔사이즈를 통한 미세결정, 바늘 모양 결정 등의 데이터 수집, (2) defocusing을 통한 큰 빔 사이즈를 이용한 단결정이나 큰 단위격자를 갖는 결정의 데이터 수집, (3) 결정 기반 fragment 고속 스크리닝, (4) serial crystallography 및 time-resolved crystallography의 구현 (5) 5-25 keV (실제 6-19.6 keV)의 넓은 범위에서 에너지 선택을 통한 다양한 물질 분석, (6) 자동화, 사용자 친화적 환경, 원격 조율 시스템, 초고속 수집 및 계산 시스템 등이 가능함을 보여준다.

구 분	내 용
에너지 범위	5 ~ 20 keV
공간 분해능	1 Å 이하
광원	in-vaccum undulator
광학장치	 Double Crystal Monochromator Focus mirror (beam collimation) Slit
Beamline PTL	 진공펌프 (Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump) 진공장비 (gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts) support & girder (smart girder & support) 진단장비 (BPM, 진공측정(Ion gauge, cold cathode gauge)) shutter (F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter) 냉각수 및 utility (cooling system & utility / gas) BL control electronics (safety & interlock system, 전자/전기 시스템) 컴퓨터, 장치제어, 데이터 S/W (control & DAQ, program server system) BL monitoring & data storage Optical Hutch Experimental Hutch (interlock 포함)
실험장치	 Fast readout Detector (MX용) Automatic Sample Changer high-throughput screening system, FBDD MX 회절기 데이터 분석용 프로그램, 컴퓨터 광학테이블, Cryo-jet

<표 2.2.8.1> 생체분자 나노결정학 빔라인 사양



<그림 2.2.8.2> micro회절기 (ESRF, MAX IV) <-그림 2.2.8.3> 검출기 및 sample changer



나. 빔라인 중요성

전자현미경 (Electron microscopy)을 이용한 구조분석에서 해상도는 점점 올라가 약 350kDa 크기의 단백질로 1.8Å 해상도에서 구조가 규명되었다[4]. 하지만 활성에 매우 중요한 부분을 담당하는 작은 영역의 경우, 원자수준 (약 1Å 이하)의 해상도를 알아내기 위해 결정학 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 원자 수준에서의 해상도는 중요 타겟 단백질과 약물 타겟 사이의 중요 상호작용을 제공하기 때문에 새로운 First-in-class 신약이나 기준 신약의 효능을 향상시키는 Better 신약의 개발에 없어서는 안 될 중요한 정보를 제공한다. 따라서, 차세대 방사광 가속장치에서 건설될 생체분자 나노결정학 빔라인의 필요성은 점점 확대될 것이다.

다. 실험기법 실현 가능성 및 차별성

· 연속 결정학 (Serial crystallogrpahy)

XFEL에서 생성된 펨토초의 X-선 펄스는 현재 3GSR 빔라인과 비교해서 약 1억배 강하다. 따라서 3GSR 빔라인에서 유의미한 데이터를 얻지 못하는 크기의 결정 (약 1 µm)을 이용하여 연속 결정학 방법으로 데이터 획득이 가능하다[5]. 매우 강한 X-선 펄스에 한번 노출된 결정은 파괴되어 더 이상 사용되지 못한다. 따라서 세계적으로 XFEL 빔라인이 건설중에 있지만, XFEL을 이용한 실험을 진행하기 위한 빔타임 확보가 쉽지 않다. 다목적 방사광가속기 (4GSR) 가속장치의 경우 XFEL에 비교는 되지 않지만, 현대 3GSR 빔라인보다 약 100배 강한 X-선을 생산할 수 있다. 따라서, XFEL에 이용 가능한 크기보다 큰 결정 (약 10 µm)을 이용한다면 데이터 획득이 가능할 것이라 생각된다. 다목적 방사광가속기 (4GSR) 가속장치의 경우 원형 저장링을 사용하기 때문에 많은 수의 빔라인 건설이 가능하고, 동시에 모든 빔라인에서 실험이 가능하기 때문에 빔타임 확보도 매우 용이할 것이다.

라. 빔라인·실험기법을 통한 연구분야

ㅇ 일반 단결정학

현재 일반적으로 이용되는 결정을 이용한 단백질 구조분석 방법으로, 최종 30 × 30 µm² 크기로 집속된 X-선 회절 이미지 데이터 수집이 가능할 것이다. 약 100 배 증가된 빔 세기를 가지는 X-선은 감쇠기를 통한 약한 X-선 제공이 가능하며, 작은 크기의 단백질에 의해서도 매우 큰 단위 격자의 결정이 흔히 만들어지는데, 이럴 경우 작은 빔 퍼짐을 가진 X-선의 이용은 데이터 획득을 매우 용이하게 할 것이다.

ㅇ 마이크로 및 나노 결정학

결정의 크기가 30 µm이하 결정은 하나의 결정을 이용하여 전체 데이터 세트를 얻기는 쉽지 않다. 이런 경우 한 개의 결정에서 얻어지는 이미지수가 제한적이라 여러 결정을 이용한 데이터 수집 및 병합이 필요 할 것이다. 현재 3GSR 빔라인의 X-선을 이용하여 제한적인 이미지를 획득하더라도 회절 해상도는 제한적일 것이다. 이런 샘플을 이용하여 약 100 배 증가된 빔 세기와 매우 작은 크기와 빔 퍼짐을 가지는 X-선을 이용하고 감도가 높은 검출기를 이용한다면 보다 해상도가 좋은 회절데이터를 획득할 수 있을 것이다.

초미세 결정을 이용한 연속 결정학

마이크로 결정학에 사용되는 결정보다 더 작은 약 5 μm 이하의 경우 단결정의 마운팅이 힘들기 때문에, LCP (liquid cubic phase) 혹은 비슷한 매질을 이용하여 결정을 준비하여 계속적으로 X-선 빔에 흘려보내 우연히 X-선에 맞는 부분에서 회절이 일어나면 그 회절 데이터을 얻을 수 있을 것이다[6]. 혹은 결정을 매우 얇은 박막에 뿌리거나, 박막 혹은 결정화 플레이트에 결정화하여 샘플을 준비하여 X-선에 노출시킴으로써 데이터 수집이 가능하다. XFEL의 경우 X-선의 세기가 매우 강해 X-선에 한번 노출된 결정은 파괴되어 더 이상 회절 시키지 못한다. 차세대 방사광 가속장치에서 생성된 X-선의 경우 세기가 XFEL보다 약하여 단일 조사로는 샘플이 파괴되지 않아 여러 장의 회절 이미지 획득이 가능하여 보다 넓은 역격자 공간에서의 샘플링이 가능하다. 초고속 검출기를 이용한다면 방사선 손상이 언제 일어나는지 확인 가능하여, 최적의 실험방법설정이 가능할 것이다. 초고속 검출기는 또한 Fine phi slicing 방법을 이용한 데이터 수집이 가능하여, 결정을 회전시키면서 데이터를 수집할 때 XFEL의 단지 한 방향 회절데이터보다 넓은 범위에서 샘플링이 가능할 것이다. 회전을 동반시한 회절실험은 indexing이나 정확한 intensity의 integration을 용이하게 할 것이다.

○ 신약개발을 위한 고속 프레그먼트 탐색 (HTFI)

결정학을 이용한 신약타켓 단백질과 화학적 복합물 (Drug 이전 소형 화합물 혹은 fragment)의 원자수준에서 구조분석은 화합물이 어디에서 어떤 방향으로 결합하는지 명확하게 보여준다. 이 구조적 정보는 신약의 선도 물질을 빨리 최적화하는데 중요한

정보를 제공한다. 따라서 기존 방법에 의한 신약 개발 단계중 선도물질 최적화에서 매우 중요한 역할을 하였다. 하지만 국가적 새로운 방사광의 건설, 새로운 광학계 및 검출기 개발 그리고 소프트웨어적 발전으로 방사광 빔라인을 이용한 단백질 구조분석은 접근성이 매우 용이해졌고, 각 빔라인이 처리할 수 있는 샘플량이 급속히 증가하게 되었다. 이는 신약 개발에서 선도물질 최적화에서 결정학을 주 툴로 사용하는 것이 아니라, 맨 처음부터 어떤 fragment가 가장 가능성이 높은지 구조 분석을 통하여 분석을 시작하게 되었다. 대표적으로 Xchem (DLS, UK) 와 BioMX (MAX IV, Sweden) 빔라인이 구조분석을 통한 Fragment 탐색을 위해 대용량 결정 탐색 서비스를 제공하고 있다. 비슷한 개념으로 신약 개발 초기 단계에서 Fragment 동정을 용이하게 할 수 있는 빔라인 셋업은 국가적 혹은 기업적 경쟁력을 높이는데 반드시 필요한 기반이 될 것이다.

ㅇ 국내 신약 개발 지원

포항 PLS-II의 결정학 빔라인을 활용하여 국내 셀트리온社의 COVID-19 치료제(CT-P59)와 COVID-19 단백질 (SARS-CoV-2RBD)의 결합 구조를 단백질 결정학 기술을 이용, 해상도 0.27 nm 수준에서 규명하였다. 결합 구조 분속을 통해, 바이러스가 세포의 부착에 이용하는 스파이크 단백질의 표면에 치료제가 정확하게 결합하는 것을 확인하였으며 셀트리온社의 항체 치료제 (CT-P59)는 기존에 알려진 타사의 항체 치료제와 구분되는 새로운 결합 특성을 보였다. 결정학 빔라인을 활용하면 질병 바이러스의 돌연변이가 항체 치료제의 작용에 미치는 영향을 예측할 수 있다.



<그림 2.2.8.4> COVID-19(SARS-CoV-2 RBD)와 치료제(CT-P59) 구조 [7]

마. 세계 방사광가속기 내 설치 현황

○ 스웨덴 가속기의 BioMX 빔라인

MAX IV laboratory의 3 GeV링에 건설된 MX 빔라인이다. 약 20 x 5 µm²의 빔 크기를 가지며, Photon flux는 500mA에서 2 x 10¹³ ph/s 이다. Beam defocusing을 통하여 단위 격자의 한축이 약 1000Å 이상인 결정의 데이터 수집이 가능하다. 연속 결정학 및 고속 fragment 탐색 실험시설이 갖추어져 있으며, 2017년부터 이용자에게 빔타임 제공 중이다.

Facility	Beamline	Source	Energy range(keV)	Flux	Detector	Beam size
PLS II , South Korea	5C 7A	In-vacuum Undulator	6.5-17 6.2-15	7.0 x 10 ¹¹ ph/s 1.0 x 10 ¹² ph/s	Eiger 9M ADSC Q270	50~100um xtał size
PLS II, South Korea	110	In-vacuum Undulator	5.0-20	1.0 x 10 ¹² ph/s	Pilatus3 6M	20 µm x 5 µm beam size
4GSR, South Korea			(3.5-20)	2 x 10 ¹³ ph/s (2 x 10^14)	Piltus or Eigher	1 μm x 1 μm beam size
MAX IV (4GSR), Sweden	BioMX	In-vacuum Undulator	5 - 20	2 x 10 ¹³ ph/s	Eiger16M Hybrid-pixel	20 μm x 5 μm beam size

<표 2.2.8.2> 스웨덴 MAX-IV의 빔라인과 비교

바. 기타

빔라인-실험기법을 통한 연구 분야에서 언급된 일반적 단결정학, 마이크로 결정학, 연속 결정학, HTFI의 내용은 현재 포항가속기연구소 3GSR MX 빔라인에서 셋업중에 있다. 하지만 약 100배 증가한 Flux와 작은 빔퍼짐의 약 30 x 30 µm² 의 빔크기로 집 속된 X-선을 이용한다면, 세계적인 추세인 실험기법의 3세대 MX 빔라인의 사양을 뛰 어넘어, routine한 실험 procedure로의 역할을 할 것이라 기대된다. 앞서 언급 된 바와 같이 drug target으로 언급되는 GPCR 막 단백질의 경우 결정학에 필요한 시료의 결정 화가 힘들어, 전자 현미경을 이용한 구조분석이 점점 증가하고 있다. 따라서, 결정학 빔라인의 이용이 점점 줄어 들 것이라고 생각되어진다. 이런 경우 포항가속기연구소 3GSR MX 빔라인의 주요한 연구자들을 academic basic science 혹은 실험기법개발을 추구하는 그룹으로 유도하는 반면, 다목적 방사광가속기 (4GSR)의 MX 빔라인의 경우 제약회사 혹은 벤처기업과 같이 신약개발을 주목적으로 하는 그룹의 사용을 유도하면 포항가속기연구소 MX 빔라인과 4GSR의 MX 빔라인의 상호 시너지효과를 기대할 수 있을 것이다. 현재 대한민국은 점점 고령화시대로 진입하여 100세 시대를 바라보고 있 어 새로운 의약품의 개발의 필요가 점점 증가하고 있다. 구조기반 새로운 의약품 개발 에 매우 중요한 정보를 제공할 수 있는 툴을 가진 4GSR 가속장치의 생체분자 나노결 정학 빔라인은 없어서는 안 될 중요한 전초기지의 역할을 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] L. Tiefenauer and S. Demarche, Materials 5, 2205 (2012)
- [2] F. Stellato et al., IUCrJ 1, 204 (2014).
- [3] X. Ji et al., J. Struc. Biol. 192, 88 (2015).
- [4] A. Merk et al., Cell 165, 1698, (2016).
- [5] S. Boutet et al., Science 337, 362 (2012).
- [6] U. Weierstall et al., Nat. Commun. 5, 3309 (2014).
- [7] Kim, C., Ryu, DK., Lee, J. et al. A therapeutic neutralizing antibody targeting receptor binding domain of SARS-CoV-2 spike protein. Nat Commun 12, 288 (2021).

2.2.9 고에너지 현미경 (High Energy Microscopy)

가. 빔라인 개요

투과력이 높은 5~100 keV 고에너지 X-선을 사용하여 다양한 재료, 유체, 생체 시료에 대한 기초·응용 실험과 산업계 지원 (철강 소재, 패키징된 전자 소자, 정밀 기계 부품, 치과 재료 등)을 위한 고해상도 및 고감도의 비파괴 영상 검사를 수행하여 기초·응용 연구와 산업체를 지원하고자 한다.



<그림 2.2.9.1> 고에너지 현미경의 활용 예 (그림 출처: [1])

나. 빔라인 중요성

산업용 소재, 소자, 부품에 다양한 멀티스케일의 소재, 유체, 생체 물질들이 필수적으로 사용된다. 이 때문에 크고 두꺼운 물질 내부를 투과할 수 있는 5~100 keV 범위의 고에너지 X-선 영상 기술을 써서 비파괴 영상 검사를 하고 있으나, 일반 X-선 영상의 해상도는 100~1000 µm 수준이며, 휘도·에너지·해상도의 부족으로 초고속 (High-throughput), 고화각 (Large field of view), 멀티스케일 (Hierarchical multi-scale) 영상을 얻기에 충분치 못한 실정이다. 한편, 방사광을 이용한 X-선 현미경은 1~10 µm의 고해상도와 위상차 효과를 이용한 고감도 영상 획득이 가능한 반면, 광자 에너지가 낮음으로 인해 (40 keV 미만) 물질 투과력이 부족하여 산업적으로 활용하기에 적합하지 못하다 (그림 2.2.9.2).

최근 방사광 기술이 발전하면서 40~100 keV 범위의 높은 광자 에너지의 방사광을 생산할 수 있게 되었다. 이러한 고에너지 X-선 영역의 방사광을 사용하는 현미경

범라인에서는 산업용 소재, 소자, 부품들을 0.1 μm 내외의 고해상도 및 위상차 고감도 영상화할 수 있는 유일한 비파괴 검사 설비이다. 초고속·고화각·멀티스케일 영상 획득이 가능한 고에너지 현미경 기술은 아직 보편화되지 않은 기술이며, 프랑스의 ESRF에서 최초의 전용 범라인 건설을 서두르고 있다 [1]. 고에너지 현미경 기법은 미세 구조 조절이 중요한 고부가 가치 산업에서의 R&D 및 생산 불량 원인 규명을 위한 획기적인 분석 기술로 활용될 것이다.



<그림 2.2.9.2> 4GSR Super-bend (SBM) 빔라인과 Bending magnet (BM) 빔라인, ESRF-EBS 3PW18 (건설 예정) 빔라인과 현행 3PW 빔라인의 휘도와 에너지 범위 비교

* 에너지 5-100 keV 범위의 고에너지 X-선 휘도는 ESRF-EBS 3PW18 빔라인과 4GSR Super-bend 빔라인의 성능이 동등 수준임

다. 실험기법 실현 가능성 및 차별성

실험기법 및 실현 가능성

방사광 X-선 투영 현미경 기법을 적용한다<그림 2.2.9.3>. 이때 해상도는 point spread function에 의해 결정된다 [2]. 그리고, 위상차 효과는 시료와 검출기 사이의 거리에 비례 한다 [3]. 검출기는 섬광체에 맺힌 가시광선 영상을 광학적으로 확대하여 고해상도 영상을 얻는다.



<그림 2.2.9.3> 방사광 X-선 투영 현미경 기법

고에너지 X-선을 효율적으로 검출할 수 있는 섬광체 또는 검출 기술 개발이 필요하다. 5~100 keV 범위의 높은 에너지의 밝은 방사광 생산을 위해 광원으로서는 Super-bend가 적합하며 (그림 2.2.9.2), bending magnet 광원을 사용할 경우 20~100 keV 영역의 고에너지 휘도 저하가 예상된다. 따라서, 4GSR에서 5~100 keV 범위의 고에너지 활용성을 극대화하기 위해서 Super-bend 광원을 채용한 빔라인 건설이 바람직하다. 프랑스 ESRF에서 건설 중인 현미경 빔라인의 길이는 220 m이며 [1], 중국 신규 HEPS의 빔라인은 350 m로 설계 되었다 [4]. 한국의 4GSR은 광특성을 고려시, 200mm x 28mm 이상의 빔크기를 얻기 위해서는 빔라인의 길이가 100~150 m 정도가 바람직하다. 100m 길이의 빔라인 구축 시, 약 200mm x 28mm 의 빔크기를 구현할 수 있으므로 다양한 시료 및 산업체 시료에 대한 실험분석이 가능할 것으로 기대된다.

ㅇ 기존 감마선 영상과의 차별성

광자 에너지가 높아질수록 영상의 감도가 급격히 나빠진다. 위상차 효과를 이용하여 영상의 감도를 보완한다.

방사광 X-선의 직진성으로 인해 시료와 검출기 사이 거리를 멀리할 수 있어서, in-situ 장비들을 사용한 실험이 가능하다.



<그림 2.2.9.4> 일반 X-선 투영 영상과 방사광 X-선 투영 영상의 비교

○ 기존 방사광 X-선 영상과의 차별성

최근 방사광 기술의 발전으로 기존 방사광에서도 5~100 keV 범위의 X-선을 생산할 수 있게 되었다 (그림 2.2.9.2). 그러나, 이 경우 bending magnet 광원일 때 20~100 keV 영역에서 휘도의 현저한 감소가 예상되며 광원의 크기가 수평 방향 및 수직 방향으로 차이가 커서, 영상의 해상도 및 감도 또한 수평 및 수직 방향이 다르다. 4GSR은 광원의 크기가 원형이기 때문에, 등방 해상도 및 감도의 영상 획득이 가능하다. 그리고, 빔의 직진성이 기존 방사광보다 더 우수하므로, 긴 빔라인 건설에 유리하고 더 우수한 영상 획득을 보장한다.

라. 빔라인·실험기법을 통한 연구분야

고속대량·고화각·멀티스케일 영상 획득이 가능한 고에너지 현미경 기술

고휘도·고에너지·고해상도 빔 특성을 활용하여 고속대량 (high-throughput), 고화각 (large field of view), 멀티스케일 (hierarchical multi-scale) 영상 획득이 가능하다. 크고 두꺼운 다양한 멀티스케일의 재료, 유체, 생체 물질 내부의 구조분석과 물성변화를 정밀하게 연구할 수 있다.

2차원 투과 영상과 3차원 입체 영상이 동시 획득 가능한 고에너지 현미경 기술

재료, 유체, 생체 물질의 2차원 투과 영상을 고속으로 촬영하여 3차원 입체 영상을 컴퓨터의 도움으로 자동 생성할 수 있으며, 구조변화와 상변화 등의 기초·응용 연구는 물론 크고 두꺼운 산업체 시료의 투과 및 입체 영상 획득에 활용할 수 있다.

○ 오페란도 (operando) 영상 획득 가능한 고에너지 현미경 기술

디스플레이 소재, 반도체 소자, 배터리 부품 등 실제 작동 환경에서 ('operando') 소재, 소자, 부품 내부의 물질 변화와 파괴 과정을 실시간 투과 및 입체 영상으로 분석할 수 있다. 산업계에서 요구하는 다양한 소재, 소자, 부품 문제를 해결할 수 있다.

고품질 뇌영상 획득 가능한 고에너지 현미경 기술

고속대량·고화각·멀티스케일 영상 기법을 활용하여 고에너지에 의한 시료 손상을 최소화 하여 쥐나 인간의 뇌구조 전체를 투과할 수 있는 고에너지 현미경으로 촬영할 수 있어 고품질 뇌영상을 획득할 수 있다.

마. 세계 방사광가속기 내 설치 현황

ESRF의 Extremely Brilliant Source (EBS) 성능 향상에서 건설되는 4개 flagship 빔라인 중 하나는 5~100 keV 까지 생산할 수 있는 X-선 영상 빔라인이다. 이 빔라인은 투과력이 높은 고에너지 X-선 빔을 사용하여 우주/항공/자동차 등의 소재 개발이나 의료 기술 개발에 활용하려고 한다 [1]. Super-bend를 채용한 4GSR 고에너지 현미경 빔라인의 성능은 이 빔라인과 동등 수준의 품질을 획득할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] D. Chenevier, A. Joly, ESRF: Inside the Extremely Brilliant Source Upgrade, Synchrotron Radiation News, 31 (2018) 32-35.
- [2] A. Pogany, D. Gao and S. W. Wilkins, Review of Scientific Instruments 68 2774-2782 (1997).
- [3] S. Wilkins, et al., Nature 384 335 (1996).
- [4] G. Li, Hard X-ray imaging beamline, High Energy Photon Source (http://english.ihep.cas.cn/heps/doc/3663.html)

2.2.10 나노 프로브 빔라인 (Nano-probe beamline)

가. 빔라인 개요

제안하는 나노프로브 빔라인은 기술적 한계로 인해 PLS-II에는 동일한 기능을 갖는 빔라인이 제공되지 않고 있다. 향상된 4GSR의 고휘도, 높은 결맞음성, 작은 광자빔의 특성을 극대화하여 세계적인 추세인 경 X-선 기반의 multi-modal 나노 프로브 빔라인을 구축함으로써 X-선의 나노 빔 회절/흡수/방출 기법과 나노 이미징 기술을 구현하고자 한다. 최근 나노미터 스케일을 갖는 다양한 형태의 소재들이 에너지/나노/바이오/반도체산업 전반에 걸쳐 연구/응용되기 시작하면서 극소영역의 구조 특성을 측정하고 분석할 수 있는 기술 개발이 요구되고 있으며, X-선 나노 프로브 기술은 이러한 추세에 맞추어 다양한 분야에서 가장 필요한 솔루션을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

나노 프로브 빔라인 구축을 위해 150 m 내외의 롱빔라인이 요구되며, 빔라인 이용의 효율성을 고려하여 2개의 허치를 구축(A hutch 위치: 100 m, B hutch 위치: 150 m), A hutch에서는 4GSR의 작은 광자빔을 활용하는 나노프로브를 구축하고, 방해가 되지 않는 선 내에서 이장치의 일부를 활용하는 마이크로 프로브를 동시 구축할 예정이다. 나노프로브 엔드스테이션에서는 < 50 nm 수준의 빔사이즈를 구현하여 PXCT, 2D nano-XANES, 3D XRF 실험기법을, 마이크로 프로브 엔드스테이션에서는 1~20 µm의 빔을 제공하여 micro-XRS/micro-XRF를 구현함으로써 기초/원천연구의 선도성과 산업적 활용성을 극대화하고자 한다. 또한, PLS-II 빔라인에서 제공하지 못하고 있는 5f-블록원소 및 RI 물질을 활용할 수 있도록 설계함으로써 기존 물질의 특성을 뛰어넘는 획기적 성능을 기대할 수 있는 5f-block 원소 기반 신물질 개발연구를 개척하는데 크게 이바지할 것이다.

항 목	사 양
에너지 영역	5 keV ~ 25 keV
광원	In vacuum Undulator
집속광학장치	KB Mirror (µm 빔) + KB/FZP (nm 빔)
빔 사이즈	< 50 nm (nano-probe), 1~20 µm (micro-probe)
Hutch A	3D-PXCT, 2D-nanoXANES, 3D-XRF
Hutch B	micro-XRS, micro-XRF

<표 2.2.10.1> 나노 프로브 빔라인 사양

나. 빔라인의 중요성

세계적인 경 X-선 나노 현미경 기술 개발의 추세는 multi-modal X-선 nano-probe를 구축하는 것이다 [1]. 현재 구축된 세계 최고 수준의 X-선 nano-probe는 나노스케일 시편으로부터 다양한 X-선 신호를 동시에 검출하여 종합적인 분석이 가능한 all-in-one 시스템으로 고도화되고 있다. 고성능 X-선 집속광학계가 구현되면서 X-선의 휘도가 획기적으로 증가하고 X-선 나노 빔의 크기가 10 nm 급으로 향상되면서 다양한 multi-modal 분석법을 동시에 활용할 수 있다. X-ray fluorescence, X-ray diffraction, X-ray absorption spectroscopy, Differential phase contrast imaging, X-ray excited optical luminescence, 2D/3D X-ray imaging 측정이 동시에 이루어진다. 아울러 coherent volume이 증가하고 energy tunability가 개선되면서 Bragg coherent diffractive imaging과 X-ray fluorescence imaging이 결합되어 나노스케일 소재의 3차원 구조적/화학적 정보를 동시에 분석할 수 있다 [1-3]. MBA 기반 4세대 원형 방사광가속기는 수평/수직방향의 광원 크기가 비슷하기 때문에 X-선 집속광학계의 비대칭성이 해소되어 X-선 집속 효율이 크게 향상된다. 또한 우수한 coherency를 갖기 때문에 5 ~ 25 keV의 경 X-선 에너지 영역에서 획득한 3D imaging에서의 분해능도 크게 향상된다. 궁극적으로 지금까지 제공되지 못했던 고성능 경 X-선 나노 프로브 기반시설을 제공할 수 있다.



<그림 2.2.10.1> Multi-modal X-선 나노 프로브 개념도

또한, 이러한 고성능의 경 X-선 기반의 다양한 분석기법 활용이 가능하면서 in-situ,

real-time, operando 분석 기법 활용이 보강된 나노프로브 빔라인이 구축됨으로써, 다양한 환경에서 물질의 구조와 특성이 획기적으로 변하는 새로운 신소재 발굴이 기대되며, 한계에 부딪힌 과학기술을 기초영역에서 한 단계 끌어올릴 수 있을 것으로 예상된다. 또한 아직까지 미개척 분야로 남아있으면서 동시에 기존 물질의 특성을 뛰어넘는 획기적 성능을 기대할 수 있는 5f-블록 원소 기반 신물질 개발연구를 개척하는데 크게 이바지할 것이다.

다. 실험기법 실현 가능성 및 차별성

○ 경 X-선 기반의 나노 프로브 빔라인 실현 가능성

지난 20년 동안 X-선을 나노미터 크기로 집속할 수 있는 X-선 집속 광학계의 개발로 현재는 15 nm급 X-선 나노현미경 기술이 개발되었고, 이를 활용한 극소영역의 구조적/화학적 분석 연구가 시연되고 있다. 대표적인 X-선 집속광학계는 K-B mirror[4], multilayer Laue lens[5], compound reflective lens[6], Fresnel zone plate (FZP)[7]가 있다. 미국 APS (26ID), NSLS-II (3-ID), 영국 DLS-II (I14), 유럽연합 ESRF (ID16B)를 비롯한 4세대 방사광가속기인 스웨덴의 MAX-IV (nano-MAX) 등에서 나노 프로브 빔라인을 구축하여 운영하고 있으며, 대부분의 경 X-선 nano-probe 시설은, 30 nm급 분해능으로 2D 바이오 시편의 원자분포 mapping, 50 nm급 분해능으로 3D nano-tomography 연구가 가능하다.

ㅇ 기존 빔라인과의 차별성

포항방사광가속기가 2012년에 3세대 방사광가속기인 PLS-II로 업그레이드되어 극소영역 X-선 분석이 가능해지고 다양한 X-선 nano-probe 기술이 개발되기 시작하여, 1기의 coherent X-선 회절 (9C 빔라인)[8] 및 2기의 X-선 현미경 시설이 구축되었다. 7C 빔라인에서는 경 X-선 (E~7.5 keV) 영역에서의 full-field phase contrast X-선 현미경 인프라가 구축되어 일반 이용자에게 제공되고 있다. 하지만, 3세대 방사광가속기 광원의 한계점으로 인해 5~15 keV 에너지 영역에서 10 μm 수준의 마이크로 빔을 제공하고 있기 때문에 나노 프로브 빔라인에서 추구하고 있는 5-25 keV영역에서의 10 nm 수준의 나노 빔 회절/흡수/방출 기술, 나노이미징 기술이 구현 가능한 빔라인은 없다.

4세대 원형 방사광가속기에 구축될 경 X-선 nano-probe 기술 개발의 추세는 in-situ,

real-time, operando 분석 기법을 고도화하는 것이다. 경 X-선 nano-probe 기술을 적용한 실시간 복합 물성 측정기술은, in-situ & operando X-선 회절 기술과 X-선 CT 기술을 적용하여 다양한 물성 분석 기법이 가능하다. 외부자극 (온도, 가스 분위기, 전기장, 빛)에 따른 에너지/나노/반도체/바이오 소재의 극미세 원자 구조 및 화학정보를 동시에 분석할 수 있다. 원자 및 화학 조성의 3D tomography/imaging이 가능할 뿐만 아니라, 차세대 나노/양자 반도체 소자 내부의 복잡한 전자 수송 특성을 규명할 수 있다. 또한 photovoltaic system, 배터리 내의 전기적 특성 분석과 원자/구조/물질의 종합적 특성 분석이 가능하다. In-situ, operando X-선 복합 물성 측정 기술은 기존의 10 µm² 영역의 평균적인 구조적 물성을 규명하는 단계에서 발전하여 100 nm² 이하의 극소영역의 구조적/화학적 물성을 종합적으로 규명할 수 있다.

ㅇ 빔라인 구성

50 nm 이하의 (궁극적으로 10 nm 이하까지 구현) 나노 집속빔 구현을 위해 대략적으로 150 m의 롱빔라인이 요구된다. 이를 위해선 두 번에 걸친 집속을 통해 나노 빔이 구현될 수 있으며, 롱빔라인의 공간적 이점을 최대한 활용하여, 첫 번째 집속지점인 100 m 부근에 hutch를 구성하여 나노프로브 구축에 방해되지 않는 선에서 1~20 µm 크기로 제공되는 마이크로 빔을 이용한 실험기법을 제공한다. 궁극적으로 두 번째 집속지점인 150 m 지점에 또 다른 hutch를 구축하여 나노 프로브를 구축하여 PXCT, 2D nano-XANES, 3D XRF등의 실험 기법을 제공한다. 개략적인 빔라인 구성은 아래 그림과 같다.



<그림 2.2.10.2> 경 X-선 기반 나노 프로브 빔라인 개략도

라. 빔라인을 통한 연구 분야

- In-situ X-선 나노 프로브 기법을 이용한 극미세 구조적/화학적 물성분석을 통한
 새로운 차원의 연구 플랫폼 제공
 - 반도체 칩 내부 구조의 3D X-선 Ptychography를 통한 향상된 분해능을 바탕으로 구동환경에서의 구성물질의 전기적, 열적 안정성 변화의 체계적 분석
 - X-선 나노 프로브 기법 중 nano-XRF를 활용한 실리콘 기반 소자 및 유무기
 복합 태양전지 등 신재생에너지 소재 내 원소 분포 이미징을 구현하여 실 사용
 환경에서 조성적 변화 거동 및 에너지 변환 효율에 영향을 미치는 메카니즘을
 실시간으로 관찰
 - Ptychography 이미징과 nano-diffraction을 활용하여 생체시료 이미징 활용에 큰 장애물인 radiation damage를 최소화함으로써 nano-probe를 활용하는 생체 시료 이미징 연구 분야의 활성화
- 나노소재 활용 다양한 분야의 차세대 소자 개발
 - 고분해능 X-선 나노 프로브 기법 활용을 통한 대기 환경의 나노스케일 오염
 물질의 성분 분석과 정량화
 - Operando 환경에서 LED 소자의 고분해능 이미지 관측을 통한 복합물성 규명
 - 나노스케일 반도체/에너지/자성 소재의 실시간 상전히 현상 규명 및 금속 나노 결정의 non-thermal melting 의 이미지/메카니즘 규명
 - Binary 나노 결정 촉매의 상변태 및 strain field 측정 및 poisoning 과정 규명
- 항공우주, 국방 등 특이/극한환경에서의 전략적 특수소재 개발
 - 초장거리 우주여행 등 극한환경(고온, 고압, 극저온, 고진공, 고방사선 등)에서
 장기적 안정성이 확보된 특수 소재 개발 연구
 - 철강산업, 우주항공 및 초음속 체계 분야에서 사용되는 초고온 및 초음속
 공력가열 환경에서 실시간 구조 및 물성 연구
 - Nucleation 이론의 이해와 적용을 통한 알루미늄 합금 기반 3D 프린팅 연구
 - 미래전 승리를 위한 내열/구조재료, 생존/방호재료, 첨단지능형 방산기능 재료
 등 국방기술개발에 대응할 수 있는 특수 소재 연구

○ 5f-block 원소 기반 신물질 개발

- 4차 산업혁명의 핵심인 데이저 저장분야에서 5f-block 원소의 강한 스핀-궤도 결합작용, 큰 자기등방성, 향상된 자기 교환성 등 월등한 성능에 기반을 둔 단분자 자성제 개발
- 무거운 페르미온 물질 기반 의료용 MRI, 핵융합, 특수 검출기 개발 및 전력 수송
 시 에너지 손실을 최소화하고 고압선이 불필요한 혁신기술로 기대를 모으고 있는
 초전도체 연구
- 대기 내 이산화탄소 및 질소 고정화, hydrogenation, reductive silylation 등 기존 전이금속 기반 촉매의 한계를 극복할 수 있는 새로운 촉매제 개발 연구

원자력시설 제염·해체, 방사성폐기물 관리 등 국가적 난제 해결

- · 안전하고 경제적인 원자력시설 제염·해체 및 글로벌 원전해체시장 선점을 위한
 주요 방사성핵종 구조 및 거동 연구
- 처분전략 및 처분환경에 따른 고준위폐기물 내 주요성분인 악티나이드 원소들의
 복잡한 화학거동 분석을 통한 영구처분장 안전성 연구

마. 세계 방사광가속기 빔라인 현황

경 X-선 나노 프로브 기술은 미국 APS 방사광가속기의 26ID Center for Nano Materials 빔라인[9]과 NSLS-II 방사광가속기의 Hard X-ray nano-probe beamline[10]이 가장 체계적으로 연구를 진행하고 있다. 최근에는 영국 Diamond 방사광가속기에 nano-probe 시설이 가동되고 있고[11], ESRF의 ID16B 빔라인은 2016년 이후 우수한 연구 성과를 보고하고 있다[12]. 4세대 원형 방사광가속기인 MAX-IV도 NanoMAX nano-probe 빔라인을 구축하여 운영하고 있다[13]. 대부분의 경 X-선 nano-probe 시설은, 30 nm급 분해능으로 2D 바이오 시편의 원자분포 mapping, 50 nm급 분해능으로 3D nano-tomography 연구가 가능하다. 현재 고도화된 X-선 nano-probe 기술을 개발하고 있으며, 최근에는 실제 작동되고 있는 operando 환경의 소재/소자를 외부자극(온도, 가스 분위기, 전기장, 빛)에 따른 in-situ 환경에서 측정 및 분석할 수 있는 인프라를 구축하고 있다. 또한, 5f-블록원소를 위한 빔라인 역시, 원소 특성상 극소량의 시료의 분석에 용이하고 다양한 기법을 활용해야되기 때문에 한 빔라인에서 다양한 기법의 구현이 가능한 Multi-modal 빔라인의 구축을 추구하고 있다. 현재

세계에서 운영하고 있는 경 X-선 기반 나노프로브 빔라인과 5f-block 원소 측정이 가능한 빔라인은 각각 <표 2.2.10.2> 및 <표 2.2.10.3>와 같다.

국가	방사광	빔라인	Energy	Beam size & flux
미구		2610	6 12 koV	Beam size: 30 nm × 30 nm
비석	AFS	2010	0-12 KeV	flux = 1×10^9 @ 10 keV
				Beam size: 30nm × 30nm (FZP)
미국	NSLS-II	3-ID	6-25 keV	10nm × 10nm (MLL)
				flux = 5×10 ⁸ @ 10 keV
여구		11 /	E 22 koV	Beam size: 50 nm (<100nm)
0 H	DLS	114	5-25 KeV	Long beamline(185m)
				Beam size: 50nm × 50nm
유럽	FCDF			1.0μm × 10μm
연합	ESKF	ID 16B	6-65 KeV	flux: 10 ⁹ ~10 ¹⁰ ph/s
				Long beamline(185m)
~ 에 데			6 29 koV	Beam size: 50~200 nm
눼끤		IND-IVIAX	0-20 KeV	$flux = 3 \times 10^{10}$ @ 10 keV

<표 2.2.10.2> 전세계 운영 중인 경 X-선 기반 나노 프로브 빔라인[9-13]

<표 2.2.10.3> 전세계 운영 중인 5f-block 원소 사용 가능 빔라인[14-18]

국가	방사광가속기	빔라인	운영기관	비고	
유럽연합	ESRF	ROBL (BM20)	HZDR		
두이		INE			
독립	KAKA	CAT-ACT	KIT-IINE		
프랑스	SOLEIS	MARS	CEA	185 Bq 시료 분석가능	
이보	CDring 9	Actinide Science I			
き亡	SPIIIg-0	Actinide Science II	JAEA		
스위스	SLS	X05LA	PSI		
	SLAC			•	
미국	ALS	별도의 전용	용빔라인은 없지만 를 활용하여 측정가능		
	APS	별도의 차폐용기			
영국	DLS				

참고문헌

- [1] H. Yan et al., Nano Futures 2, 11001 (2018).
- [2] G. Martínez Criado et al., Advanced Materials 26, 7873 (2014).
- [3] Karolina Stachnik et al., Sci. Rep. 10, 1784 (2020).

- [4] H. Mimura et al., Nature Phys. 6, 122 (2010)
- [5] J. Vila-Comamala et al., J. Synchrotron Rad. 19, 705 (2012)
- [6] A. Narikovich et al., J. Synchrotron Rad. 26, 1208 (2019)
- [7] A. J. Morgan et al., Sci Rep. 5, 9892 (2015)
- [8] C. J. Yu et al., J. Synchrotron Rad. 21, 264 (2014)
- [9] R. P. Winarski et al., J. Synchrotron Rad. 19, 1056 (2012)
- [10] E. Nazaretski et al., J. Synchrotron Rad. 24, 1113 (2017)
- [11] P. Quinn et al., Microscopy and Microanalysis 24, 244 (2018)
- [12] G. Martinez-Criado, J. Synchrotron Rad. 23, 344 (2016)
- [13] U. Vogt et al., Proc. of SPIE 10389, 103890K (2017)
- [14] https://www.esrf.eu/UsersAndScience/Experiments/CRG/BM20
- [15] https://www.ine.kit.edu/english/1279.php
- [16] https://www.synchrotron-soleil.fr/en/beamlines/mars
- [17] https://www.spring8.or.jp/en/about_us/whats_sp8/facilities/bl/list/
- [18] https://www.diamond.ac.uk/industry/industry-News/Latest-News/Synchrotorn-I nducstry-News-Focus-Nuclear-Research.html

2.3 실험기법별 빔라인의 구성

2.3.1 실험기법별 빔라인의 구성

<표 2.3.1.1> 실험기법별 빔라인의 구성(현재-미래) 1

기법 분류		As-Is		To-be			
		PLS-II	해외유사빔라인 (3GSR급)	해외유사빔라인 (4GSR급)	다목적 방사광가속기	비고	
회절 / 산란	XRS/XRD (X-ray scattering)	 ○ 1D XRS ○ 3A RXS ○ 3D XRS ○ 5A MS-XRS ○ 1C Tr-XRS ○ 9C CXS 	 ESRF: ID01, ID16-B, ID22, ID31, ID27, BM32, ID06, ID28 Diamond: I16, B16, I21 APS: 3-ID-B,C,D, 4-ID-D, 6-BM-A,B, 11-ID-B,C 등 	 ESRF-EBS: ID01, ID16-B, ID22, ID31, ID27, BM32, ID06, ID28 Diamond II: I16, B16, I21 APS-U: 3-ID-B,C,D, 4-ID-D, 6-BM-A,B, 11-ID-B,C 등 MAX IV: FemtoMAX, Veritas HEPS: BL-1, BL-2, BL-3, BL-6 	2.소재 구조 분석 빔라인 5.결맞음 X-선 회절 빔라인 10.나노 프로브 빔라인 *Hard X-ray	 산업체에서는 기본적으로 구조 규명에 XRS/XRD를 요구함 (한편, 산업체 요구 중 전자구조 규명은 아래의 분광학 기법을 요구) 5f-블록원소 연구 활용 시 극소량의 시료로 분석을 해야 하므로 4GSR 의 고선속, 고집속(µm 수준)의 빔 사 양을 갖는 다양한 실험기법이 적용 되고 있음 	
	HRPD (high-resolution powder diffraction)	∘9B HRPD	 ESRF: ID15B, ID22, ID27 Diamond: I11, I15, B21 APS: 5-BM-C, 5-ID-B,C,D, 6-ID-D, 11-BM-B, 17-BM-B 등 	 ESRF-EBS: ID15B, ID22, ID27 Diamond II: I11, I15, B21 APS-U: 5-BM-C, 5-ID-B,C,D, 6-ID-D 11-BM-B, 17-BM-B 등 MAX IV: DanMAX 	2.소재 구조 분석 빔라인 *Hard X-ray	○ XRD, XRS와 같이 꾸밀 수 있으며, XRS/XRD 빔라인 사례 참조	
	SAXS (small angle X-ray scattering)	 ∘ 3C SAXS I ∘ 4C SAXS II ∘ 9A U-SAXS ∘ 6D C&S ∪NIST-PAL 	 ○ ESRF: ID31, ID13, BM26, BM29, ID02, ID10 ○ Diamond: I07, B21, I22 ○ APS: 1-ID-B,C,E, 6-ID-B,C, 8-ID-E,I, 9-ID-B,C, 12-BM-B, 12-ID-B,C,D, 15-ID-B,C,D 등 	 ○ ESRF-EBS: ID31, ID13, BM26, BM29 ID02, ID10 ○ Diamond II: I07, B21, I22 ○ APS-U: 1-ID-B,C,E, 6-ID-B,C, 8-ID-E,I, 9-ID-B,C, 12-BM-B, 12-ID-B,C,D, 15-ID-B,C,D, 15-ID-B,C,D 등 ○ MAX IV: COSAXS ○ HEPS: BL-4, BL-9, BL-11 	1.바이오신약 바이오소각산란 6.결맞음 소각산란 *Hard X-ray	 발전방향의 핵심은 얼마나 짧은 temporal resolution의 고분해능 GISAXS(XPCS)를 구현하는가임 4GSR의 coherence 및 brilliance 향상 그리고 nano-focusing을 통해 향상된 spatial, temporal resolution을 달성 	

		As-Is To-be		_		
	기법 분류	PLS-II	해외유사빔라인 (3GSR급)	해외유사빔라인 (4GSR급)	다목적 방사광가속기	비고
			○ Diamond: 105	 Diamond II: 105 		○Nano-ARPES는 해외 4GSR 여러 곳에서 추구하고 있음
	ARPES	0 402 SARPES IRS	○ APS: 29-ID-C,D 등	○ APS-U: 29-ID-C,D 등	4.나노스케일 각분해 광전자	○PLS-Ⅱ의 수준은 4GSR 빔라인에 비하여 매우 떨어짐
	photoemission spectroscopy)	ο 4A1 μ-ARPES		○ MAX_IV: Bloch	분광 빔라인 *Soft X-ray	○나노 물질 기반 소자 구현에 중요한 전자구조 정보 제공함
				• HEPS: BL-12		 · 넓은 ₩₩ 영역(<10 eV ~ 200 eV)의 나노 각분해 전자분광은 국내에서 실험불가
			○ ESRF: ID21	○ ESRF-EBS: ID21		◦ XPS는 물성분석 전자구조 규명에 기본으로 사용되며 산업체
		• 4D PES	◦ Diamond: B07	∘ Diamond II: B07	3.연엑스선 나 <u>노프로브</u> 비라이	물질 분석요구의 기본 • SPEM은 해외 4GSR 여러 곳에서
	XPS (X-ray photoemission	SAT SPEIM SA2 KBSI-PAL AP-XPS	◦ APS: 4-ID-C,	○ APS-U: 4-ID-C,	4.나노스케일	추진 중
	spectroscopy)	 OD HR-PES I/ XAS KIST O 10A2 HRPES-II 	<u>ם</u> ח-חו-סו	• MAX IV: FinEstBeAMS, HIPPIE, FlexPES, SPECIES	각문애 평신자 분광 빔라인 *Soft X-ray	FLS-II의 구군은 응신준에응, flux 면에서 많이 떨어지므로 Spatial resolution을 높임과 동시에 statistics 확보가 중요함 (nano-scopy, nano-imaging, nano-ARPES 빔라인등에서 병행)
분		○국내 없음	 Diamond: 109 	• Diamond II: 109		○도인화경에서 경 ⊻.서/여 ⊻.서
お하	Two color Spectroscopy		 SPring-8: BL 22-XU, BL-23SU NSLS-II: 7 ID 	° PETRA-IV: Two-colour beamline	-	· 응 실원 영에지 영 사진 전 사진 분석기법을 동시에 활용함으로써 동작 환경에서의 표면-계면- 벌크의 화학적, 전자적 구조 및 결정구조의 변화를 종합적 분석 가능하나 빔라인 운영의 복잡성으로 인하여 소수의 가속기에서만 운영 중
			 ○ ESRF: ID16B, ID21, ID20, ID12, ID24, ID26, ID32 	 ESRF-EBS: ID16B, ID21, ID20, ID12, ID24, ID26, ID32 		
			 Diamond: 106, 118, B18, 120 	 Diamond II: 106, 118, B18, 120 		○ Time resolving 실험의 경우 quick scan과 Energy dispersive
	XAFS (X-ray absorption fine-structure spectroscopy)	 7D XAFS 8C Nano XAFS 10C Wide XAFS 	○ APS: 5-BM-D, 9-BM-B,C, 10-BM-A,B, 10-ID-B, 11-ID-D, 13-ID-C,D,E 등	○ APS-U: 5-BM-D, 9-BM-B,C, 10-BM-A,B, 10-ID-B, 11-ID-D, 13-ID-C,D,E 등	7.실시간 엑스선 흡수분광	방식으로 구현 가능 • time resolution을 높이고, statistics를 개선하고 micro, nano probing을 하고, 극한조 건을 수용하는 발전방향으로 개선
				 MAX IV: Balder 		
				 ○ HEPS: BL-8, BL-13, BL-14 		

<표 2.3.1.2> 실험기법별 빔라인의 구성(현재-미래) 2

		As	-ls	To-	be	_	
	기법 분류	PLS-II	해외유사빔라인 (3GSR급)	해외유사빔라인 (4GSR급)	다목적 방사광가속기	비고	
결정하			 ESRF: ID23-1, ID23-2, ID29, ID30A, ID30B, ID13 	 ESRF-EBS: ID23-1, ID23-2, ID29, ID30A, ID30B, ID13 			
			 Diamond: I02, I03, I04, I19, I23, I24 	 Diamond II: 102, 103, 104, 119, 123, 124 			
	MX (Macromolecular crystallography)	 ○ 5C SB II ○ 7A SB I ○ 11C Micro-MX ○ 2D SMC 	○ APS: 14-BM-C, 14-ID-B, 17-ID-B, 21-ID-D,E,F,G, 23-ID-B,D 24-ID-C,E 등	○ APS-U: 14-BM-C, 14-ID-B, 17-ID-B, 21-ID-D,E,F,G 23-ID-B,D 24-ID-C,E 등	8.생체분자 나노결정학 빔리인 *Hard X-ray	◦신약 개발 산업체 활용 수요 반영	
				 MAX IV: BioMAX, MicroMAX 			
				 ○ HEPS: BL-10 			
	CDI (coherent diffraction imaging)		 ○ ESRF: ID11, ID15A, ID16A, ID21 	 ○ ESRF-EBS: ID03, ID11 ID15A, ID16A 		 ○ 광원의 밝기와 집속도 결맞음의 ○ 향상에 따라 공간부해능이 	
		∘ 9C CXS	 Diamond: DIAD 	○ Diamond II: DIAD	5.결맞음 X-선 회절 빔라인 *Hard X-ray	향상	
			○ APS: 2-ID-D 7-BM-B, 26-ID-C, 32-ID-B,C 등	○ APS-U: 2-ID-D 7-BM-B, 26-ID-C, 32-ID-B,C 등		 ○ ptychography를 통한 공간분해능 향상 ○ tomography 를 통한 3차원 	
				 MAX IV: NanoMAX HEPS: BL-1, BL-4, 		중간문애등 양성 ○ statistics의 향상을 통한 3차원 공간분해 나노스코피로 발전 중	
			◦ ESRF:	BL-7 ° ESRF-EBS:			
미			ID17, ID19 • Diamond:	D17, ID19 ○ Diamond II:			
싱	хст		I12, I13, B24 ◦ aps•	112, 113, B24 ○ APS-U:	9.고에너지	 ○ ESRF-EBS에서 활용되며 medical imaging, medical therapy 분야에 	
	(X-ray computerized	° 6C BMI ° 7C XNI	2-BM-A,B, 13-BM-D 등	2-BM-A,B, 13-BM-D 등	연미경 *Hard X-rav	임팩트가 가능함	
	tomography)			○ MAX_IV: ForMAX	That's A ruy	○다양한 시료에의 활용 기대	
				○ HEPS: BL-14			
	STXM, PEEM		∘ Diamond: I08	• Diamond II: 108		○해외 4GSR 여러 곳에서 추진 중	
	(Scanning Trasmission X-ray Mcroscopy,	○ 10A1 STXM	○ APS: 4-ID-E	○ APS-U: 4-ID-E	3.연엑스선 나노프로브 빔라인 *Soft X-ray	◦투과 조건에서 Ptychography 기능 접목 가능	
	Photoemission electron microscopy)			 MAX IV: MAXPEEM, SoftiMAX 		○ PLS-II의 10A1 장치는 광원 flux의 1/100~1/1000 만 사용하고 있음	

<표 2.3.1.3> 실험기법별 빔라인의 구성(현재-미래) 3

2.3.2 해외 성능향상 방사광가속기 빔라인 구성

<표 2.3.2.1> 유럽 ESRF-EBS(성능향상) 삽입장치 빔라인 구성 (33기) *BM 빔라인 별도

		ESRF (현재)			성능향상 시 (ESRF-EBS)		
구분	빔라인명		실험기법 (ESRF)	에너지 (keV)	New type of experiments	Flux 향상	
	ID01 – Microdiffraction imaging	0	X-ray diffraction and scattering	6~24	Combination of coherent diffraction with in-operando chemistry, electronic devices, ageing	50~2000배	
Structure of Materials Group	ID03 - Surface Diffraction Beamline	0	in-situ studies of the structure and morphology of surfaces	5~30	CDI for in situ surface processe(ms), heterogeneous catalysis, electrochemically controlled growth of corrosion	최대 100배	
	ID11 - Materials science beamline	0	high energy diffraction and imaging	18~240	3D diffraction tomography (point scanning)	20배	
	ID15A - Materials Chemistry and Materials Engineering	0	Diffraction contrast tomography Imaging, phase-contrast	20~ 500	5D diffraction imaging	100배	
	ID22 - High resolution powder diffraction beamline	0	XRD - X-ray diffraction Powder diffraction	6~80		5배	
	ID31 - High-energy beamline for buried interface structure and materials processing	0	XRD - X-ray diffraction SAXS - small-angle X-ray scattering	21~150	CTRs on the facets of nanoparticles	11배	
	ID16A - Nano-imaging Beamline	0	Coherent imaging MicroXRF - micro X-ray fluorescence	17~33.6	fast/ ultra-fast X-ray fluorescence and nano-tomography, in-situ experiments	20배	
	ID16B - Nano-analysis Beamline	0	MicroXANES - micro X-ray absorption near-edge structure XRD - X-ray diffraction	6~65	-	50배	
X-ray Imaging Group	ID17 - Biomedical Beamline	0	Imaging	25~185	fast 2D/3D in-vivo imaging of shole animal/organ, high resolution CT of large objects (industrial), improved complementarity with ID19	최대 100배	
	ID19 - Microtomogra phy beamline	0	imaging	10~250	detection in the 10 ps range, suitable to follow crack propagation in semiconductor materials of fuel injection processes in engines	최대 100배	
	ID21 - X-ray Microscopy Beamline	0	MicroXANES - micro X-ray absorption near-edge structure XAS - X-ray absorption spectroscopy	2.1~9.2	multi dimensional full field spectroscopy (3D, 4D); time resolved spectroscopy, micrometric emission spectroscopy based on CDI	15배	

		ESRF (현재)		성능향상 시 (ESRF-EBS)	
구분	빔라인명	실험기법 (ESRF)	에너지 (keV)	New type of experiments	Flux 향상
Structure of Soft Matter Group	ID02 - Time-Resolved Ultra Small-Angle X-Ray Scattering	 ultra small-angle and wide-angle scattering 	8~20	phase retrieval in small angle diffraction dynamics by exploiting the high degree of coherence and resolution	3배
	ID09 - White Beam Station - Time-resolved Beamline	 experiments with a time resolution down to 100 picoseconds 	8.5~28	laser shocks in Mbar range, EOS in warm dense matter and planetary research	20배
	ID10 - Soft interfaces and coherent scattering beamline	 high-resolution X-ray scattering and surface diffraction on liquid coherent small-angle X-ray scattering, X-ray photon correlation spectroscopy 	7~24	high pressure XPCS with 10 nm resolution on 1 mm objects with CDI	CS: 60~100배 LSIS: 5배
	ID13 - Microfocus Beamline	 Microcrystallography SAXS - small-angle X-ray scattering 	7~30	time and space resolution 20 nm and 400 ms for spacially resolved in operando experiments	10배
Dynamics & Extreme Conditions Group	ID06 - Large Volume Press	 under high pressure and temperature conditions 	33, 55		최대 10배
	ID06 - Hard X-ray Microscope	• hard X-ray microscopy	11~55		
	ID15B - High Pressure Diffraction Beamline	• Powder diffraction	30	use of coherence	50배
	ID18 - Nuclear Resonance Beamline	 Nuclear resonance techniques 	7~80	spin/valance/oxidations state selectivity, surface nanostructure mapping	4배
	ID20 - Inelastic Scattering	 RIXS - resonant inelastic X-ray scattering XAS - X-ray absorption spectroscopy 	4~20	evolutional extreme conditions experiments and mapping	2배
	ID27 - High Pressure Beamline	 Powder diffraction XRD - X-ray diffraction 	20~90	nanosecond time resolved laser shock experiments	100배
	ID28 - Inelastic Scattering II	 IXS - inelastic X-ray scattering GID - grazing incidence diffraction 	13.48~ 25.8		-
	ID28 Side Branch	신규		efficient measurements above 50 GPa	-

		ESRF (현재)		성능향상 시 (ESRF-EBS)	
구분	빔라인명	실험기법 (ESRF)	에너지 (keV)	New type of experiments	Flux 향상
Electronic Structure & Magnetism Group	ID12 - Circular Polarisation Beamline	 XAS - X-ray absorption spectroscopy XMLD - X-ray magnetic linear dichroism 	2~15	ultra low, ultra high p with high field combined with XMCD, sub monolayer investigations on substrates, polarisation dependent spectroscopy	최대 100배
	ID24 - Energy Dispersive X-ray Absorption Spectroscopy Beamline	 XAS - X-ray absorption spectroscopy XMLD - X-ray magnetic linear dichroism 	5~27	laser shock dynamical high pressure, high temperature, photocatalysis, solution chemistry (industrial)	최대 2.5배
	ID26 - X-ray absorption and emission spectroscopy	 EXAFS - extended X-ray absorption fine structure RIXS - resonant inelastic X-ray scattering 	2.4~27	Photosynthesis	-
	ID32 - Soft X-ray spectroscopy	 XMCD - X-ray magnetic circular dichroism XAS - X-ray absorption spectroscopy 	0.3~1.6	-	-
Structural biology Group	ID23-1: Gemini - Macromolecular Crystallography	 MX - macromolecular crystallography MAD - multi-wavelength anomalous dispersion 	5~20	multi-crystal datasets, ultra-fast RT data collection; serial crystallography; propagation-based phase contrast imaging	10배
	ID23-2: Gemini - Macromolecular Crystallography	 MX - macromolecular crystallography 	14.2	ultra fast room temperature data colleciton	10배
	ID29 MX tunable microbeam	 MX - macromolecular crystallography MAD - multi-wavelength anomalous dispersion 	6~20	serial crystallography, ultra-fast room temperature data collection	10배
	ID30A-1 / MASSIF-1	 Massively Automated Sample Selection 	12.65	-serial crystallography, multiple crystal analysis, optically adapting beam to crystal	-
	ID30A-2 / MASSIF-2	Integrated Facility - Macromolecular			
	ID30A-3 / MASSIF-3	crystallography - XRD - X-ray diffraction	12.81	(CRL, focusing)	
	ID30B / MAD	 MX - macromolecular crystallography 	6~20	serial crystallography, room temperature measurements	2배

빔라인명		실험기법 (Diamond-I)	성능향상 방향 (Diamond-II)	에너지 (keV)
l02-1 - Versatile MX micro (VMXm)	0	Micro- and nano-focus in vacuum cryo-macromolecular crystallography (VMXm)	New position of beam, realigning equipment, hutch changes	7~28 → 5~30
102-2 - Versatile MX <i>in situ</i> (VMXi)		<i>In-situ</i> microfocus macromolecular crystallography, Serial Synchrotron Crystallography	Upgrades completed as part of ongoing upgrade program	10~25 → 5~30
 Macromolecular crystallography (MX), Multiwavelength Anomalous Diffraction (MAD) 		New filters and window	5~25 → 5~30	
04 - Microfocus AX		New filters and window	6~18 → 6~30	
104-1 - Monochromatic MX	0	MX, XChem fragment screening	Relocation(K04)	13.53 → 10~25
105 - ARPES	0	Angle-Resolved PhotoEmission Spectroscopy (ARPES) and nano-ARPES	New ID to reduce heatload, otherwise new M1	0.018~0.2 4
106 - Nanoscience		X-ray Absorption Spectroscopy (XAS), X-ray photoemission microscopy and X-ray magnetic circular and linear dichroism	Improved cooling for M1. And possible replacement of M3, M6 optics	0.08~2.2 → 0.25~2.1
107 - Surface and Interface Diffraction	0	Surface X-ray diffraction, Grazing Incidence X-ray Diffraction (GIXD), Grazing Incidence Small Angle X-ray Scattering (GISAXS), X-ray Reflectivity (XRR)	Upgrades completed as part of ongoing upgrade program	6~30 → 8~35
B07 - VERSOX: Versatile Soft X-ray		Ambient Pressure XPS and NEXAFS	Relocation, but reusing current endstation	0.25~2.8
		NEXAFS and High-Throughput XPS		0.05~2.2
108 - Scanning X-ray Microscopy	0	Scanning X-ray microscopy, NEXAFS/ XANES, X-ray fluorescence	New grating and diagnostics	0.25~4.2
109 - Atomic and Electronic Structure of Surfaces and Interfaces	0	XPS (including HAXPES), X-ray Standing Waves (XSW), Near Edge X-ray Absorption Fine Structure (NEXAFS), energy-scanned photoelectron diffraction	New mirrors SM1 and HM3	0.1~2
110 - BLADE: Beamline for Advanced Dichroism Experiments	0	Soft X-ray resonant scattering, XAS and X-ray magnetic circular and linear dichroism	Improved cooling for M1. May need new gratings	0.25~1.6
11 - High Resolution Powder o X-ray powder diffraction Diffraction		Upgrades completed as part of ongoing upgrade programme	6~25 → 9~35	
DIAD. Dual Imaging and Diffraction	0	Simultaneous imaging and diffraction	New optics and realignment	7~38
I12 - JEEP: Joint Engineering, Environmental and Processing	0	Time-resolved imaging and tomography (phase- and attenuationcontrast), time-resolved powder diffraction, single crystal diffraction, diffuse scattering, energy dispersive X-ray diffraction (EDXD), highenergy small angle X-ray scattering (under development)	Upgrade to primary heat filters. Increased shielding for hutches	53~150

<표 2.3.2.2> 영국 Diamond-II(성능향상) 빔라인 구성 (33기)

빔라인명		실험기법 (Diamond-I)	성능향상 방향 (Diamond-ll)	에너지 (keV)
I13 - X-ray Imaging and Coherence	0	Phase contrast imaging, tomography, full-field microscopy (under commissioning), coherent diffraction and imaging (CXRD,CDI), ptychography and photocorrelation spectroscopy (XPCS) (under commissioning), innovative microscopy and imaging	New CRL's, new optics	5~25
114 - Hard X-ray Nanoprobe	0	Scanning X-ray fluorescence, X-ray spectroscopy, ptychography and transmission diffraction	Improved cooling and performance on primary mirror system	6~23 → 5~25
I15 - Extreme Conditions	0	Powder diffraction, single crystal diffraction	Heatload needs mitigating, new	20~80
115-1 - XPDF	0	X-ray Pair Distribution Function (XPDF)	linters	
116 - Materials and Magnetism	0	Resonant and magnetic single crystal diffraction, fundamental X-ray physics	Upgrades completed as part of ongoing	2.5~15
B16 - Test beamline	0	Diffraction, imaging and tomography, topography, reflectometry	upgrade program	4~45
I18 - Microfocus Spectroscopy	0	Micro XAS, micro Extended X-ray Absorption Fine Structure (EXAFS), micro fluorescence tomography, micro XRD	Upgrades completed as part of ongoing upgrade program	2~20.5 → 2~27
B18 - Core XAS	0	X-ray Absorption Spectroscopy (XAS)	New optics throughout and extra shielding	2~35
I19 - Small-Molecule Single-Crystal Diffraction	0	Small-molecule single-crystal diffraction	Upgrades completed as part of ongoing upgrade program	5~25 → 5~30
120 - LOLA: Versatile X-ray Spectroscopy	0	X-ray Absorption Spectroscopy (XAS), X-ray Emission Spectroscopy (XES) and Energy Dispersive EXAFS (EDE)	New M1 and M2	4~26 → 4~34
121 - Inelastic X-ray Scattering	0	Resonant Inelastic X-ray Scattering (RIXS), X-ray Absorption Spectroscopy (XAS)	Heatload can be mitigated by new ID	0.25~1.5 → 0.25~3
B21 - High Throughput SAXS	0	BioSAXS, solution state small angle X-ray scattering	New front end and optics	8~15
I22 - Small Angle Scattering and Diffraction	0	Small angle X-ray scattering and diffraction: SAXS, WAXS, USAXS, GISAXS. Micro-focus.	Upgrades completed as part of ongoing upgrade program	7~20 → 6~30
B22 - MIRIAM: Multimode InfraRed Imaging And Mircrospectroscopy	0	IR micro- & nano-spectroscopy, IR imaging, THz spectroscopy	New front end and optics	1∼100 µm
l23 - Long Wavelength MX	0	Long wavelength macromolecular crystallography	Upgrades completed as part of ongoing upgrade program	3~8 → 2~11
B23 - Circular Dichroism	0	Circular Dichroism (CD)	New front end and optics	125~500 nm
124 - Microfocus and Serial MX	0	Macromolecular crystallography, MAD, Serial Crystallography	Upgrades completed as part of ongoing upgrade program	6.5~25 → 5~30
B24 - Cryo Transmission X-ray Microscopy (TXM)	0	Full field X-ray imaging	New front end, new M1 and other mirrors	0.2~2.6
구분	빔라인명(안)	삽입장치 (광원)	비고	
-----------------	------------------------------------	--	---	
PETRA-IV 실험홀	ultimate X-ray microscopy	10m in-vacuum undulator	Exploiting the brightest coherent hard X-ray nanobeam, multimodal 3D X-ray imaging down to 1nm resolution could be realised using scanning coherent diffraction microscopy	
	X-ray scanning microscopy	10m undulator	hard X-ray scanning microscopy with inelastic scattering (nanoIXS) or nuclear resonant scattering (nanoNRS) as contrast	
	dynamic coherence applications	10m in-vacuum undulator	a high coherent photon flux in the hard X-ray range to perform correlation spectroscopy experiments (XPCS) with high temporal resolution.	
	high-energy X-ray applications.	10m cryo-cooled or superconducting in-vacuum undulator	Compton tomography of biological specimens	
	Two-colour beamline	two independent, optimised undulators (e.g. 5m APPLE in sequence with 5m standard undulator)	spectroscopy and structure determination	

<표 2.3.2.3> 독일 PETRA-IV(성능향상) 신규 빔라인 구성(예시안)

<표 2.3.2.4> 독일 PETRA-III 현 빔라인 구성 (26기)

구분	빔라인명(PETRA-III)	삽입장치(광원)	광자빔에너지(keV)
	P01 High Resolution Dynamics	U32-10m	5~70
	P02.1 Powder Diff. & Total Scat.	U23-2m	60
	P02.2 Extreme Conditions	U23-2m	9~77
	P03 Micro & Nano Focus X-ray Scat.	U29-2m	8~23
	P04 Variable Polarization XUV	UE65-5m	0.25~3
	P05 Imaging (HZG)	U29-2m	5~50
Max yon Laua	P06 Hard X-ray Micro/Nano-Probe	U32-2m	2.4~100
Hall	P07 High-Energy Mat. Sci. (HZG)	IVU21-4m	50~200
Tian	P08 High-Resolution Diffraction	U29-2m	5~30
	P09 Resonant Scattering & Diffraction	U32-2m	2.7~50
	P10 Coherence Applications	U29-5m	4~25
	P11 Bio Imaging & Diffraction	U32-2m	2.4~30
	P12 BioSAXS (EMBL)	U29-2m	4~20
	P13 Macromolec. Cryst. (EMBL)	U29-2m	5~20
	P14 Macromolec. Cryst. (EMBL)	U29-2m	5~20
	P21 Swedish Mat. Sci. BL	U29-2m/IVU21-4m	40~150
	P22 Hard X-ray Photoel. Spect.	U33-2m	2.4~15
Ada Yonath Hall	P23 In-situ & Nano Diffraction	U32-2m	5~35
	P24 Chemical Crystallography	U29-2m	8, 17~44
	P25 HIMAX	(계획)	-
	P61 High-Energy Wiggler BL	wiggler-40m	50~200
	P62 Small-Angle X-ray Scat.	U32-2m	10~35
Paul Peter Ewald	P63 Catalysis Beamline	(계획)	-
Hall	P64 Advanced XAS	U32-2m	4~44
	P65 Applied XAS	U32-0.35m	4~44
	P66 Time-Resolved Luminescence	BM	UV

<표 2.3.2.5> 미ㅋ	7 APS	빔라인	(71フ	빔라인)
----------------	-------	-----	------	------

빔라인명	실험기법		에너지	성능향상 방향 (APS-U)
1-BM-B,C	 Optics testing Detector testing Topography White Laue Single Crystal Diffraction 	•	6~30 keV 50~120 keV	
1-ID-B,C,E	 High-energy x-ray diffraction Tomography Small-angle x-ray scattering Fluorescence spectroscopy Pair distribution function Phase contrast imaging 	•	41~136 keV 45~116 keV	Enhanced SAXS resolution detector distance extension
2-BM-A,B	 Tomography Phase contrast imaging STXM 	•	10~170 keV 11~35 keV	
2-ID-D	 Microfluorescence (hard x-ray) Micro x-ray absorption fine structure Nano-imaging Ptychography CDI 	•	5~30 keV	10 nm Resolution Bionanoprobe-II
2-ID-E	 Microfluorescence (hard x-ray) STXM Tomography 	•	5~20 keV	Enhanced microprobe
3-ID-B,C,D	 Nuclear resonant scattering Inelastic x-ray scattering High-pressure diamond anvil cell 	•	7~27 keV 14.41~14.42 keV	KB-mirror system
4-ID-C	 Magnetic circular dichroism (soft x-ray) X-ray magnetic linear dichroism X-ray photoemission spectroscopy Anomalous and resonant scattering (soft x-ray) 	•	400~2800 eV	
4-ID-D	 Magnetic circular dichroism (hard x-ray) Anomalous and resonant scattering (hard x-ray) Magnetic x-ray scattering High-pressure diamond anvil cell 	•	2.7~40 keV	
4-ID-E	 Synchrotron X-ray Scanning Tunneling Microscopy (SX-STM) 	•	500~1800 eV	
5-BM-C	 Powder diffraction Tomography Wide-angle x-ray scattering 	•	10~42 keV	
5-BM-D	 X-ray absorption fine structure High-energy x-ray diffraction General diffraction 	•	4.5~25 keV 4.5~80 keV	
5-ID-B,C,D	 Powder diffraction X-ray standing waves X-ray optics development/techniques Small-angle x-ray scattering Surface diffraction X-ray reflectivity Wide-angle x-ray scattering 	•	6~17.5 keV	Upgraded HHL Monochromator
6-BM-A,B	 Energy dispersive x-ray diffraction High-pressure multi-anvil press Radiography Tomography 	•	20~200 keV	
6-ID-B,C	 Magnetic x-ray scattering Anomalous and resonant scattering (hard x-ray) General diffraction Grazing incidence diffraction 	•	4~38 keV	Beryllium paraboloid CRL lenses with transfocator
6-ID-D	 High-energy x-ray diffraction Powder diffraction Pair distribution function 	•	50~100 keV 70~130 keV	Aluminum paraboloid CRL lenses with transfocator

빔라인명	실험기법		에너지	성능향상 방향 (APS-U)
7-BM-B	 Radiography Tomography Microfluorescence (hard x-ray) STXM 	• •	5~150 keV 6~15 keV 15~60 keV	
7-ID-B,C,D	 Time-resolved x-ray scattering Time-resolved x-ray absorption fine structure Phase contrast imaging 	•	6~18 keV 12~26 keV	Nanofocusing KB mirror system, Detector arm
8-BM-B	• Microfluorescence (hard x-ray) STXM	•	9~18 keV	
8-ID-E	 Grazing incidence small-angle scattering X-ray photon correlation spectroscopy 	•	7.35~7.35 keV 10.9~10.9 keV	
8-ID-I	 X-ray photon correlation spectroscopy Small-angle x-ray scattering 	•	7.35~7.35 keV 10.9~10.9 keV	
9-BM-B,C	 X-ray absorption fine structure X-ray absorption near-edge structure 	•	2.1~22.5 keV	
9-ID-B,C	 Nano-imaging Microfluorescence (hard x-ray) Ptychography Ultra-small-angle x-ray scattering Tomography 	•	4.5~30 keV	
10-BM-A,B	 X-ray absorption fine structure Time-resolved x-ray absorption fine structure Microfluorescence (hard x-ray) 	•	4~32 keV	
10-ID-B	 X-ray absorption fine structure Time-resolved x-ray absorption fine structure Microfluorescence (hard x-ray) X-ray photoemission spectroscopy X-ray emission spectroscopy 	•	4.8~32 keV 15~65 keV	
11-BM-B	Powder diffraction	•	15~33 keV	
11-ID-B	 Pair distribution function High-energy x-ray diffraction 	•	58.66 keV 86.7 keV	
11-ID-C	 High-energy x-ray diffraction Diffuse x-ray scattering Pair distribution function 	•	105.7 keV	
11-ID-D	 Time-resolved x-ray absorption fine structure Time-resolved x-ray scattering 	•	6~25 keV	Multiple sets of compound refractive lenses
12-BM-B	 X-ray absorption fine structure Small-angle x-ray scattering Wide-angle x-ray scattering 	•	4.5~30 keV 10~40 keV	
12-ID-B	 Small-angle x-ray scattering Grazing incidence small-angle scattering Wide-angle x-ray scattering Grazing incidence diffraction 	•	7.9~14 keV	
12-ID-C,D	 Small-angle x-ray scattering Grazing incidence small-angle scattering Wide-angle x-ray scattering Surface diffraction 	•	4.5~40 keV	12-meter-Long SAXS tube/enclosure upgrade, USAXS Facility Upgrade
13-BM-C	 Surface diffraction High-pressure diamond anvil cell Single-crystal diffraction 	•	15~15 keV 28.6~28.6 keV	
13-BM-D	 Tomography High-pressure diamond anvil cell High-pressure multi-anvil press 	•	4.5~100 keV	

빔라인명	실험기법		에너지	성능향상 방향 (APS-U)
13-ID-C,D	 Surface diffraction X-ray standing waves Microdiffraction X-ray absorption fine structure Resonant inelastic x-ray scattering High-pressure diamond anvil cell High-pressure multi-anvil press X-ray emission spectroscopy 	•	4.9~45 keV 10~75 keV	Repolish KB mirrors (1000 mm), Repolish KB mirrors (350 mm)
13-ID-E	 Microfluorescence (hard x-ray) Micro x-ray absorption fine structure Microdiffraction Fluorescence spectroscopy 	•	2.4~28 keV 5.4~28 keV	New dual horizontal mirrors (500 mm), Repolish two sets of KB mirrors (250 mm), Double crystal monochromator enhancement
14-BM-C	 Macromolecular crystallography Fiber diffraction Biohazards at the BSL2/3 level 	•	8~14.9 keV	
14-ID-B	 Time-resolved crystallography Time-resolved x-ray scattering Laue crystallography Wide-angle x-ray scattering Biohazards at the BSL2/3 level Macromolecular crystallography Serial Crystallography 	•	7~19 keV	
15-ID-B,C,D	 Resonant diffraction (DAFS)-single crystal High-pressure diamond anvil cell-single crystal Photo-crystallography Single-crystal diffraction Liquid interface scattering Liquid interface spectroscopy Anomalous Small Angle X-ray Scattering 	•	5.5~32 keV 10~70 keV	New single harmonic rejection mirror system
16-BM-B	 White Laue Single Crystal Diffraction Energy dispersive x-ray diffraction Phase contrast imaging Radiography Pair distribution function 	•	10~120 keV	
16-BM-D	 Powder angular dispersive x-ray diffraction Single-crystal diffraction X-ray absorption near-edge structure X-ray absorption fine structure Tomography 	•	6~45 keV	
16-ID-B	 Microdiffraction Single-crystal diffraction 	•	18~50 keV	
16-ID-D	 Nuclear resonant scattering Inelastic x-ray scattering (1 eV resolution) X-ray emission spectroscopy 	•	5~37 keV 14.41~14.42 keV	
17-BM-B	 Powder diffraction Pair distribution function 	•	27~51 keV	
17-ID-B	 Macromolecular crystallography Multi-wavelength anomalous dispersion Microbeam Single-wavelength anomalous dispersion Large unit cell crystallography Subatomic (<0.85 Å) resolution 	•	6~20 keV	
18-ID-D	 Fiber diffraction Microdiffraction Small-angle x-ray scattering Time-resolved x-ray scattering 	•	3.5~35 keV	

빔라인명	실험기법		에너지	성능향상 방향 (APS-U)
19-BM-D	 Macromolecular crystallography Multi-wavelength anomalous dispersion Single-wavelength anomalous dispersion Macromolecular crystallography 	•	6~18.5 keV	
19-ID-D	 Multi-wavelength anomalous dispersion Large unit cell crystallography Serial Crystallography Single-wavelength anomalous dispersion Subatomic (<0.85 Å) resolution 	•	6~19 keV	
20-ВМ-В	 X-ray absorption fine structure Microfluorescence (hard x-ray) 	•	2.7~32 keV 2.7~35 keV	
20-ID-B,C	 X-ray absorption fine structure X-ray Raman scattering Micro x-ray absorption fine structure Microfluorescence (hard x-ray) X-ray emission spectroscopy 	•	4.3~27 keV 7~52 keV	
21-ID-D	Macromolecular crystallography	•	6.5~20 keV	
21-ID-E	Macromolecular crystallography	•	12.6~12.8 keV 13.3~13.7 keV	
21-ID-F	Macromolecular crystallography	•	12.7 keV	
21-ID-G	Macromolecular crystallography	•	12.7 keV	
22-BM-D	 Macromolecular crystallography Single-wavelength anomalous dispersion Multi-wavelength anomalous dispersion 	•	8~16 keV	
22-ID-D	 Macromolecular crystallography Multi-wavelength anomalous dispersion Single-wavelength anomalous dispersion Microbeam 	•	6~16 keV	
23-ID-B	 Macromolecular crystallography Microbeam Large unit cell crystallography Subatomic (<0.85 Å) resolution Multi-wavelength anomalous dispersion Single-wavelength anomalous dispersion 	•	3.5~20 keV	
23-ID-D	 Macromolecular crystallography Microbeam Large unit cell crystallography Subatomic (<0.85 Å) resolution Multi-wavelength anomalous dispersion Single-wavelength anomalous dispersion Serial Crystallography 	•	11~13.5 keV	
24-ID-C	 Macromolecular crystallography Microdiffraction Single-wavelength anomalous dispersion Single-crystal diffraction Microbeam Multi-wavelength anomalous dispersion Subatomic (<0.85 Å) resolution 	•	6.5~20 keV	
24-ID-E	 Macromolecular crystallography Microbeam Microdiffraction Single-wavelength anomalous dispersion Single-crystal diffraction 	•	12.68 keV	
26-ID-C	 Nano-imaging Nanodiffraction Coherent x-ray scattering Synchrotron X-ray Scanning Tunneling Microscopy (SX-STM) 	•	7~12 keV	Stacked zone plate optics, High-speed high-range Nanoprobe scanning upgrade
27-ID-B	• Resonant inelastic x-ray scattering	•	5~14 keV	Extension of the high-energy-resolution monochromator, RIXS spectrometer upgrade

빔라인명	실험기법		에너지	성능향상 방향 (APS-U)
29-ID-C,D	 Resonant soft x-ray scattering (RSXS) Angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) 	•	250~2200 eV 2200~3000 eV	
30-ID-B,C	 Inelastic x-ray scattering Nuclear resonant scattering 	•	23.7~23.9 keV	New cryogenic high-energy resolution monochromator
31-ID-D	 Macromolecular crystallography Single-wavelength anomalous dispersion 	•	5~22 keV	
32-ID-B,C	 Phase contrast imaging Radiography Transmission x-ray microscopy Tomography 	•	7~40 keV	Pair of small deflecting multilayer (ML) mirrors and hardware, Dual-beam instrument
33-BM-C	 Diffuse x-ray scattering General diffraction Powder diffraction X-ray reflectivity Grazing incidence diffraction Anomalous and resonant scattering (hard x-ray) 	•	5~35 keV	
33-ID-D,E	 Anomalous and resonant scattering (hard x-ray) Diffuse x-ray scattering General diffraction Surface diffraction Surface diffraction (UHV) X-ray reflectivity 	•	5~30 keV	
34-ID-C	 Coherent x-ray scattering 	•	5~15 keV	
34-ID-E	 Microdiffraction Laue crystallography Microbeam Microfluorescence (hard x-ray) 	•	7~30 keV	
35-ID-B,C,D,E	 Time-resolved x-ray scattering Phase contrast imaging Radiography 	• • •	7~35 keV 7~100 keV 24~24 keV	

2.3.3 해외 신규 4세대 원형 방사광가속기 빔라인 구성

단계	빔라인명	정자빌 에너치	실험기법	광자빔에너지 (빔사이즈)	투자기관	일반이용자 지원 시점
Phase I	Balder	3 GeV	XAS, XES	2.4~40 keV (100µm x 100µm)	KAW & Swe universities	2019년~
	BioMAX	3 GeV	MX, MAD, SAD, SSAD, Large sample ensemble screening, In situ crystal diffraction	5~25 keV (20μm x 5μm)	KAW & Swe universities	2017년~
	Bloch	1.5 GeV	high resolution angle-resolved photoelectron spectroscopy (ARPES), optionally spin resolved (Spin-ARPES) and core-level spectroscopy.	10~1000 eV (10μm x 25μm, V×H)	KAW & Swe universities	2019년~
	FemtoMAX	Linac (FEL)	Time-resolved X-ray scattering, Time-resolved X-ray spectroscopies, Time-resolved SAXS, Time-resolved reflectivity	1.8~20 keV (0.01mm x 0.04mm, V×H)	KAW & Swe universities	2021년~
	FinEstBeA MS	1.5 GeV	XPS, XAS, PEPICO, TOF	4.3~1000 eV (0.02mm x 0.1mm)	Estonia & Finland	2019년~
	HIPPIE	3 GeV	AP-XPS, AP-XAS	110~2000 eV (50μm x 50μm)	KAW & Swe universities	2018년~
	NanoMAX	3 GeV	Scanning transmission microscopy (STXM) X-ray fluorescence microscopy (XRF) Coherent diffraction imaging techniques (CDI) Ptychography in forward direction and Bragg geometry	5~30 keV (300nm~30nm, Goal: 10nm)	KAW & Swe universities	2017년~
	Veritas	3 GeV	RIXS	275~1000 eV (1μm × 5μm)	KAW & Swe universities	2019년~
	CoSAXS	3 GeV	SAXS, BioSAXS, Time resolved SAXS, Micro beam SAXS, Anomalous SAXS, XPCS	4~20 keV (100µm x 100µm)	VR	2020년~
	FlexPES	1.5 GeV	High-resolution XPS and XAS, resonant photoemission (ResPES) and angle-resolved valence band spectroscopy (ARPES), electron-ion coincidence experiments	40~1500 eV (50µm~2mm)	VR	2020년~
Phase II	MAXPEEM	1.5 GeV	LEEM, DF-LEEM, UVPEEM, XPEEM, DF-XPEEM, micro-ARPES, micro-LEED, XMCD, micro-XAS	30~1200eV (16µm_x_16µm, minimum)	VR	2020년~
	SoftiMAX	3 GeV	STXM, Ptychography, Fourier Transform Holography	250~2500 eV (25nm, STXM/ 100nm, Ptycho/ 20μm, Fourier)	VR	2020년~
	SPECIES	1.5 GeV	RIXS, NEXAFS, XPS, HP-XPS, XAS	27~1500 eV (5µmx25µm, RIXS/ 100µmx100µm, HP-XPS)	VR & KAW	2020년~
	DanMAX	3 GeV	Powder X-ray diffraction, Full-field imaging, absorption, phase and diffraction contrast tomography	15~35 keV (5μm~5mm)	Denmark & MAX IV	2021년~
Phase III	ForMAX	3 GeV	Full-field tomography, SWAXS, and scanning SWAXS imaging	8~25 keV (10μm~1.5mm)	KAW	2022년~
	MicroMAX	3 GeV	Macromolecular Serial Crystallography with a wide range of sample delivery systems, time-resolved studies	5~30 keV (1μm~10μm)	NNF	2022년~

<표 2.3.3.1> 스웨덴 MAX-IV 빔라인 구성 (16기)

빔라인명	실험기법	삽입장치 (광원)	광자빔에너지 (빔사이즈)
BL-I (X-ray operando spectroscopy)	 Ambient-pressure X-ray photoelectron spectroscopy Ambient-pressure X-ray absorption fine structure spectroscopy X-ray diffraction 	In-vacuum plane undulator	2~20 keV (100nm)
BL-II (X-ray structural and electronic-state total analysis)	 Scanning transmission X-ray microscopy Small-angle/wide-angle X-ray scattering X-ray absorption fine structure spectroscopy 	Multipole wiggler	2~20 keV (50µm)
BL-III (X-ray multiscale structure analysis)	 X-ray absorption, imaging Phase contrast imaging Scanning X-ray fluorescence imaging X-ray diffraction X-ray fluorescence holography 	Multipole wiggler	4.4~30 keV (50μm)
BL-IV (X-ray coherent imaging)	 Coherent X-ray diffraction imaging X-ray ptychography Pthchography X-ray absorption fine structure spectroscopy 	In-vacuum plane undulator	0.13~2 keV (50µm) (100nm, focused)
BL-V (Soft X-ray magnetic imaging)	 Soft X-ray phase-contrast imaging Scanning transmission imaging Scanning X-ray fluorescence imaging Soft X-ray magnetic imaging X-ray magnetic circular dichroism X-ray magnetic linear dichroism X-ray magneto-optical Kerr effect 	APPLE undulator	0.13~2 keV (< 50nm)
BL-VI (Soft X-ray electronic state analysis)	 Nanoscale photoemission spectroscopy Resonant Inelastic X-ray scattering 	APPLE undulator	0.05~1 keV (< 50nm)
BL-VII (Soft X-ray operando spectroscopy)	 Near ambient pressure X-ray photoemission spectroscopy Near ambient pressure X-ray absorption fine structure spectroscopy 	APPLE undulator	0.13~2 keV (< 50nm)
BL-VIII (Soft X-ray nanoscale photoemission spectroscopy)	 Nanoscale spin-resolved angle-resolved photoemission spectroscopy 	APPLE undulator	0.05~1 keV (50nm-1µm)
BL-IX (Soft X-ray nanoscale absorption spectroscopy)	 X-ray magnetic circular dichroism X-ray magnetic linear dichroism X-ray magneto-optical Kerr effect X-ray linear dichroism X-ray ferromagnetic resonace spectroscopy 	Segmente d APPLE undulator	0.13~2 keV (50nm-10µ m)
BL-X (Soft X-ray superhigh-resolution resonant inelastic scattering)	 Superhigh-resolution resonant inelastic X-ray scattering 	APPLE undulator	0.25~1 keV (<500nm)

<표 2.3.3.2> 일본 SLit-J 빔라인 구성 계획 (10기)

<표	2.3.3.3>	중국	HEPS	빔라인	구성	계획	(147)
----	----------	----	------	-----	----	----	--------

빔라인 No.	빔라인명	실험기법	삽입장치 (광원)	광자빔 에너지
1	NAMI (hard X-ray nanoprobe multimodal imaging beamline)	 high resolution X-Ray Fluorescence imaging (n-XRF) Ptychography nano X-ray diffraction (n-XRD) X-ray Absorption Near Edge Structure spectroscopy (n-XANES) 	Cryo-cooling Permanent Magnet Undulator	5-23 keV
2	EM (Engineering materials beamline)	 X-ray diffraction/scattering 	CPMU	50-170keV
3	SDB (Structural Dynamic Beamline)	 X-ray diffraction/scattering ultrafast X-ray techniques including phase contrast imaging 	CPMU	> 20 keV
4	HXCS (Hard X-ray Coherent Scattering Beamline)	 Coherent Diffractive Imaging (CDI) X-ray Photons Correlation Spectroscopy (XPCS) 	CPMU	7-25keV
5	HXHRS (Hard X-ray High Resolution Spectroscopy Beamline)	 high energy resolution nuclear resonance scattering resonant inelastic X-ray scattering 	in-vacuum undulator	2.2meV@14. 4 keV
6	High Pressure Beamline	 X-ray diffraction method under extreme conditions high pressure imaging and PDF 	in-vacuum undulator	20-50keV
7	Hard X-ray imaging beamline	 SRX in-line phase contrast imaging diffraction contrast imaging 	CPMU, wiggle	10-300 keV
8	X-ray absorption spectroscopy beamline	 high-brightness XAFS 	In air undulator	4.8-45keV
9	Low-dimensional structure probe beamline	 surface X-ray scattering resonant and non-resonant surface X-ray diffraction incidence X-ray photon correlation spectroscopy (GIXPCS) 	in-vacuum undulator	4.8-40keV
10	Microfocusing x-ray protein crystallography beamline	• x-ray protein crystallography beamline	In air undulator	5-18keV
11	Pink Beam SAXS Beamline	• SAXS/WAXS	out of vacuum undulator	8~12, 33 keV
12	High Resolution Nanoscale Electronic Structure Spectroscopy Beamline	$^\circ~\mu\text{-}ARPES$ and nano-ARPES	Apple-KNOT undulator	200-2000eV
13	Tender X-ray Beamline	 absorption spectroscopy experiments with fluorescence and transmission mode 	bending magnet	2.1-7.8keV
14	Transmission X-ray Microscope Beamline	 full-field x-ray imaging XANES (X-ray absorption near edge structure) 	in-air undulator	5-15keV

단계	빔라인명	실험기법	삽입장치 (광원)	광자빔 에너지
1-A	Carnaúba (Coherent X-rAy NAnoprobe BeAmline)	• X-Ray Nanoscopy	ID	2~15 keV
	Cateretê (Coherent And TimE REsolved scatTEring)	 Coherent and Time-resolved X-ray Scattering 	ID	5~20 keV
	EMA (Extreme condition x-ray Methods of Analysis)	 X-ray Spectroscopy e Diffraction in Extreme Conditions 	ID	2.7~30 keV
	Manacá (MAcromolecular micro and NAnoCrystAllography)	 Macromolecular Micro and Nanocrystallography 	ID	5~20 keV
	Mogno	• X-ray Micro- and Nanotomography	ТВА	22 39 67.5 keV
	Imbuia (Infrared Micro and Nanospectroscopy Beamline)	• Infrared Micro and Nanospectroscopy	BM	550~3500 cm ⁻¹
	Ingá	• Inelastic X-ray Scattering	TBA	ТВА
	Ipê (Inelastic and Photo-Electron spectroscopy)	 High Resolution UV and Soft X-ray Spectroscopy 	ID	0.1~2 keV
	Jatobá	 High Energy X-rays Tomography and Diffraction 	TBA	40~70 keV
1-B	Paineira	• Powder Diffraction	TBA	5~30 keV
	Quati (QUick X-Ray Absorption Spectroscopy for TIme-Resolved experiments)	 X-ray Spectroscopy with Temporal Resolution 	ТВА	4.5~35 keV
	Sabiá (Soft X-Ray ABsorption Spectroscopy and ImAging)	 Soft X-Ray Absorption Spectroscopy and Imaging 	ТВА	0.1~2 keV
	Sapucaia	• Small Angle X-ray Scattering	ТВА	6~17 keV

<표 2.3.3.3> 브라질 Sirius 빔라인 구성 계획 (13기)

2.4 빔라인별 예산

<표	2.4.1.1>	바이오신약	-	바이오소각산란	빔라인	구축	예산
----	----------	-------	---	---------	-----	----	----

항 목	총사업비 (백만원)	비고
	(1.000)	
1. 광원 (삽입장지)	(1,000)	
	1,000	
2. 광악상지 (십속/문광상지)	(2,200)	
1 Focus mirror HM	500	
 Focus mirror VM 	500	
③ Double Crystal Monochromator	1,000	
④ Exit Slit	200	
3. 빔라인 PTL, 데이터시스템, 허치	(3,500)	
① 진공펌프	330	Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump
② 진공장비	500	gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts
③ support & girder	200	smart girder & support
④ 진단장비(BPM, 진공측정)	370	BPM, 진공측정(Ion gauge, cold cathode gauge)
(5) shutter	300	F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter
⑥ 냉각수 및 utility	200	cooling system & utility / gas
⑦ BL control electronics (interlock, 전자/전기)	400	safety & interlock system, 전자/전기 시스템
(8) control & DAQ, S/W, program server	200	control & DAQ, program server system
 BL monitoring & data storage 	400	real time monitoring, data storage room & equipment
10 Optical Hutch	200	
1) Experimental Hutch	400	interlock 포함
4. 실험장치	(6,300)	
① Fast readout Detector (EIGER2 × 4M 성능 이상)	2,500	
② Automatic Sample Changer 및 High throughput 장치 (HPIC, MAIS, DIS 등)	1,500	
③ 데이터 분석용 프로그램, 컴퓨터, storage	350	
④ SAXS/WAXS setup (광학테이블, 챔버 등)	750	
⑤ 형광검출기	950	
⑥ 시료준비, 진단장치	250	
합 계	13,000	
재의 정부출연금	13,000	
^게 선 자체자금		

<표 2.4.1.2> 소재 구조 분석 빔라인 구축 예산

항	목	총사업비 (백만원)	비 고
	TL+I\	(1.000)	
I. 평권 (집법	성시) mundulator	(1,000)	
	Thundulator 진속/분광장치)	(2 400)	
① Focus m	irror	800	
② Double③ Monoch	Crystal	1,000	
③ Exit Slit		600	
3. 빔라인 PTL 데이터시스	, 텍, 허치	(3,300)	
 ① 진공펌프	_,	200	Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump
② 진공장비		400	gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts
③ support	& girder	150	smart girder & support
④ 진단장비(E	PM, 진공측정)	250	BPM, 진공측정(lon gauge, cold cathode gauge)
5 shutter		200	F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter
⑥ 냉각수 달	utility	200	cooling system & utility / gas
⑦ BL contro (interloct)	ol electronics k, 전자/전기)	600	safety & interlock system, 전자/전기 시스템
8 control & program	१ DAQ, S/W, server	200	control & DAQ, program server system
Ist of the storage Istorage	oring & data	500	real time monitoring, data storage room & equipment
(i) Optical	Hutch	200	
(1) Experime	ental Hutch	400	interlock 포함
4. 실험장치		(7,300)	
 1 XRD Det (1D, 2D, ar 	ector nalyzer)	2,500	
② EXAFS De	etector	1,300	형광검출기 포함
③ 화학실험	준비실	600	
④ Focusing 시료홀더	&Scanning, 류	1,000	
S XRD End-station		1,600	데이터분석용 프로그램, 컴퓨터 50 회절기(HRPD 위주) 1,400 광학테이블, 정렬장치 50 Cryostat 50 Gas-absorption 챔버 50
6 EXAFS End-station		300	데이터 분석용 프로그램, 컴퓨터 50 Ge array detector 200 실험 스테이지 50
합	계	14,000	
재원	정부출연금	14,000	
· 11 62	자체자금		

<표 2.4.1.3> 연엑스선 나노프로브 빔라인 구축 예산

항	목	총사업비 (백만원)	비고
	171+1	(1.000)	
1. 광원 (삽입	[상시]	(1,000)	
	m undulator	1,000	
2. 경역경시 (* ① Eocus m	입국/군경경시) hirror1	(2,050)	
② Focus m	hirror2 &	200	
Grating	system	2,000	
③ Focus m	irror3	250	
4 Exit Slit		200	
3. 빔라인 PTL 데이터시스	, 템, 허치	(3,400)	
① 진공펌프		350	Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump
② 진공장비		400	gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts
③ support	& girder	200	smart girder & support
④ 진단장비([SPM, 진공측정)	300	BPM, 진공측정(Ion gauge, cold cathode gauge)
5 shutter		250	F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter
⑥ 냉각수 5	및 utility	200	cooling system & utility / gas
⑦ BL control (interloc)	ol electronics k, 전자/전기)	600	safety & interlock system, 전자/전기 시스템
8 control & program	& DAQ, S/W, server	200	control & DAQ, program server system
In the storage (In the storage) (In t	toring & data	400	real time monitoring, data storage room & equipment
Optical	Hutch	200	
(1) Experimental Hutch		300	interlock 포함
4. 실험장치		(8,450)	
1 XAS Det	ector	3,350	반도체 나노크기 분석
② XPS Dete	ctor	3,000	Zone plate 포함, 반도체 나노크기 분석
③ 시묘올더 시료 사건	'뉴, 던검사장치	500	
④ pump&p	probe 시스템	500	Laser
⑤ XAS End	l-station	500	데이터분석용 프로그램, 컴퓨터 100 In-situ analyzer 등 분석장치 250 실험 챔버 150
6 XPS End	station	600	데이터 분석용 프로그램, 컴퓨터 100 In-situ analyzer 등 분석장치 250 광학테이블 등 50 Cryostat 50 실험챔버 (시료 stage 등) 150
합	계	15,500	
재의	정부출연금	15,500	
세권	자체자금		

<표 2.4.1.4> 나노스케일 각분해 광전자 분광 빔라인 구축 예산

항	목	총사업비 (백만원)	비 고
1. 광원 (삽입	장지)	(2,000)	
1 EPU		2,000	Elliptically Polarized Undulator
2. 광학장치 (집속/분광장치)	(5,800)	
 Focus m 	nirror1	250	with feedback system
② Focus m Grating	nirror2 & system	2,500	
③ Focus m	nirror3	250	
④ Re-focusin	g mirror system	500	
5 Exit Slit		150	
6 Capillary	• Optics	2,000	
3. 빔라인 PTI 데이터시스	- .템, 허치	(2,500)	
① 진공펌프	1	200	Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump
② 진공장비		400	gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts
③ support & girder		150	smart girder & support
④ 진단장비(BPM, 진공측정)		200	BPM, 진공측정(Ion gauge, cold cathode gauge)
5 shutter		150	F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter
⑥ 냉각수 및 utility		150	cooling system & utility / gas
 ⑦ BL control electronics (interlock, 전자/전기) 		350	safety & interlock system, 전자/전기 시스템
8 control a program	& DAQ, S/W, server	150	control & DAQ, program server system
Ist of the storage	toring & data	250	real time monitoring, data storage room & equipment
① Optical	Hutch	200	
 Experiment 	ental Hutch	300	interlock 포함
4. 실험장치		(4,500)	
1 Nano-Al	RPES 검출기	2,500	
② 시료관련 장치		500	
③ XAS End-station		1,500	데이터분석용 프로그램, 컴퓨터 50 In-situ analyzer 등 분석장치 1,300 실험 챔버 150
합	계	14,800	
	정부출연금	14,800	
세권	자체자금		

<표 2.4.1.5> 결맞은 엑스선 회절 빔라인 구축 예산

항	목	총사업비 (백만원)	비 고
1 고난이 /사이	176+1	(1.200)	
1. 평권 (갭귑 ① Lindulate	1경시) ar	(1,200)	
	기 진속/부광장치)	(2 400)	
① Focus m	irror1	1.000	
	romator	1 400	
		1,400	
3. 빔라인 PTL 데이터시스	, 템, 허치	(2,300)	
① 진공펌프	1	100	Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump
② 진공장비		400	gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts
③ support	& girder	100	smart girder & support
④ 진단장비(E	SPM, 진공측정)	200	BPM, 진공측정(Ion gauge, cold cathode gauge)
5 shutter	_	150	F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter
⑥ 냉각수 달	및 utility	150	cooling system & utility / gas
⑦ BL control (interloc)	ol electronics k, 전자/전기)	250	safety & interlock system, 전자/전기 시스템
8 control & program	& DAQ, S/W, server	200	control & DAQ, program server system
③ BL monitoring & data storage		250	real time monitoring, data storage room & equipment
10 Optical	Hutch	200	
① Experime	ental Hutch	300	interlock 포함
4. 실험장치		(7,100)	
 Scatterin (Diffraction) 	lg 검출기 n)	2,400	K-B 미러, XRF 검출기 포함
② Scatterin (Transmiss	ig 검출기 ion)	2,500	K-B 미러, PZT 포함
③ 시료관련	장치	600	시료홀더류, 시료 사전검사 장치
 3 Scattering End-station 		1,600	데이터분석용 프로그램, 컴퓨터 50 회절기 600 Laser heating 장치 300 시분해 장치 400 광학테이블 50 Cryostat 50 결맞음, 진단장치 150
합	계	13,000	
재원	정부출연금	13,000	
	자체자금		

<표 2.4.1.6> 결맞은 엑스선 회절 빔라인 구축 예산

항	목	총사업비 (백만원)	비고
1 과워 (사인	- እት አበ ነ	(1,000)	
	m undulator	1 000	
2. 광학장치 (?	집속/분광장치)	(3,000)	
 Focus m (two bounding) 	irror g K-B mirror 등	1,300	
② Double Monoch	Crystal romator	1,500	
3 Slit		200	
3. 빔라인 PTL 데이터시스	, 템, 허치	(2,590)	
① 진공펌프		150	Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump
② 진공장비		400	gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts
③ support	& girder	100	smart girder & support
④ 진단장비(E	SPM, 진공측정)	150	BPM, 진공측정(Ion gauge, cold cathode gauge)
5 shutter		190	F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter
⑥ 냉각수 등	빑 utility	210	cooling system & utility / gas
⑦ BL contro (interloct)	ol electronics k, 전자/전기)	290	safety & interlock system, 전자/전기 시스템
(8) control & program	32 DAQ, S/W, server	200	control & DAQ, program server system
Image BL monit storage	oring & data	400	real time monitoring, data storage room & equipment
10 Optical I	Hutch	200	
① Experime	ental Hutch	300	interlock 포함
4. 실험장치		(4,410)	
① SAXS 2D (4M 성능 (Detector 이상)	1,800	
② XPCS(GIS)	AX) Detector	1,300	
③ Automat Changer	ic Sample	600	
④ 데이터 분 Storage	분석장치,	410	
⑤ 데이터 분 컴퓨터	석용 프로그램,	50	
⑥ 광학테이블 등		100	
⑦ 온도조절 시스템		50	
⑧ 실험챔버	, TR-stage	100	
합	계	11,000	
재원	정부출연금	11,000	
· 11 E2	자체자금		

<표 2.4.1.7> 실시간 엑스선 흡수 분광학 빔라인 구축 예산

항	목	총사업비 (백만원)	비고
1 과의 (사이		(1 500)	
1. 궁전 (입법	1°6 ^1) mundulator	1 500)	
III-Vacuu	M undulator	(2,000)	
2. 6464 (비ㅋ/한하하지)	(2,000)	
 Focus m 	irror1	500	
② Focus m	iirror2	300	
③ Double Monoch	Crystal romator	1,000	
④ Slit		200	
3. 빔라인 PTL 데이터시스	, 템, 허치	(2,500)	
① 진공펌프		100	Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump
② 진공장비		400	gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts
③ support	& girder	100	smart girder & support
④ 진단장비(6	SPM, 진공측정)	200	BPM, 진공측정(Ion gauge, cold cathode gauge)
5 shutter		200	F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter
⑥ 냉각수 5	및 utility	200	cooling system & utility / gas
⑦ BL contro (interloc	ol electronics k, 전자/전기)	300	safety & interlock system, 전자/전기 시스템
8 control a program	& DAQ, S/W, server	200	control & DAQ, program server system
Ist of the storage Istorage	toring & data	300	real time monitoring, data storage room & equipment
10 Optical	Hutch	200	
1 Experime	ental Hutch	300	interlock 포함
4. 실험장치		(4,000)	
1 XAFS De	etector	2,500	quick XAFS, single bent Si polychromator 포함
② 시료관련	장치	400	In-situ sample annealing system, Sample changer
③ Scattering End-station 시스템		1,100	데이터 분석용 프로그램, 컴퓨터 50 In-situ 장치 200 Windowless diffraction Pumping system 300 광학테이블 등 50 Cryostat 50 실험 스테이지(고온, 자장 등) 150
합	계	10,000	
재의	정부출연금	10,000	
에면	자체자금		

<표 2.4.1.8> 생체분자 나노결정학 빔라인 구축 예산

항	목	총사업비 (백만원)	비고
1. 광원 (삽입	장치)	(1,000)	
1 In-vacuu	m undulator	1,000	
2. 광학장치 (집속/분광장치)	(1,700)	
 Focus m 	irror	500	
② Double Monoch	Crystal romator	1,000	
3 Slit		200	
3. 빔라인 PTL 데이터시스	, 템, 허치	(3,500)	
① 진공펌프		330	Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump
② 진공장비		400	gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts
③ support	& girder	200	smart girder & support
④ 진단장비(E	PM, 진공측정)	370	BPM, 진공측정(lon gauge, cold cathode gauge)
5 shutter		300	F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter
⑥ 냉각수 닭	및 utility	200	cooling system & utility / gas
⑦ BL electr (interloc	onics k, 전자/전기)	500	safety & interlock system, 전자/전기 시스템
8 control & program	& DAQ, S/W, server	300	control & DAQ, program server system
⑨ BL monit storage	oring & data	400	real time monitoring, data storage room & equipment
10 Optical	Hutch	200	
1 Experime	ental Hutch	300	interlock 포함
4. 실험장치		(8,000)	
 Fast read 	out Detector	2,000	
② Automat Changer	ic Sample	1,000	
③ MX회절기	'	350	
④ HTS, FBDD		4,500	
⑤ 데이터 분 컴퓨터	석용 프로그램,	50	
⑥ 광학테이 시료준비	블, 현미경, 도구	50	
⑦ cryo-jet		50	
합	계	14,200	
재위	정부출연금	14,200	
세권	자체자금		

<표 2.4.1.9> 고에너지 현미경 빔라인 구축 예산

항	목	총사업비 (백만원)	비고
1. 광원 (삽입	장치)	(1,000)	
① Super be	end Magnet	1,000	
2. 광학장치 (집속/분광장치)	(3,600)	
 Focus m 	irror	500	
 Monoch 	romator1	1,000	DMM
③ Monoch	romator2	1,000	Double Laue monochromator
④ KB mirro	or 시스템	1,100	
3. 빔라인 PTL 데이터시스	, 템, 허치	(3,400)	
① 진공펌프		430	Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump
② 진공장비		400	gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts
③ support	& girder	300	smart girder & support
④ 진단장비(E	SPM, 진공측정)	370	BPM, 진공측정(Ion gauge, cold cathode gauge)
(5) shutter		300	F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter
⑥ 냉각수 5	및 utility	100	cooling system & utility / gas
⑦ BL electr (interloct)	onics k, 전자/전기)	100	safety & interlock system, 전자/전기 시스템
8 control & program	& DAQ, S/W, server	200	control & DAQ, program server system
Istorage	oring & data	400	real time monitoring, data storage room & equipment
10 Optical	Hutch	200	
1 Experime	ental Hutch	600	interlock 포함, Long-path (100m)
4. 실험장치		(2,000)	
 Projection imaging setup 		1,500	Projection imaging & Camera
② 시료 관련 장치		200	시료 준비장치, 고정장치
③ End-station 시스템		300	데이터 분석용 프로그램, 컴퓨터 50 경 X-선 이미징 장치 200 광학테이블 등 50
합	계	10,000	
재원	정부출연금	10,000	
~~~ 전	자체자금		

## <표 2.4.1.10> 나노프로브 빔라인 구축 예산

항	목	총사업비 (백만원)	비고
1. 광원 (삽입	장치)	(1,500)	
1 In-vacuu	m Undulator	1,500	
2. 광학장치 (	집속/분광장치)	(3,000)	
<ol> <li>Focus m</li> </ol>	irror	1,500	
<ol> <li>Monoch</li> </ol>	romator	1,500	DCM
3. 빔라인 PTL 데이터시스	, 템, 허치	(4,500)	
① 진공펌프		200	Ion pump & controller, turbo pump, rotary or vane pump
② 진공장비		600	gate valve, angle valve, bellows, nipples, gasket, bolts & nuts
③ support	& girder	200	smart girder & support
④ 진단장비(E	SPM, 진공측정)	200	BPM, 진공측정(lon gauge, cold cathode gauge)
<b>5</b> shutter		200	F.E beam stopper, FCS, photon mask / End-station shutter
⑥ 냉각수 뜻	및 utility	300	cooling system & utility / gas
⑦ BL electr (interloc	onics k, 전자/전기)	1,200	safety & interlock system, 전자/전기 시스템
8 control & program	९ DAQ, S/W, server	200	control & DAQ, program server system
(9) BL monitoring & data storage		400	real time monitoring, data storage room & equipment
10 Optical	Hutch	300	
(1) Experime	ental Hutch	700	interlock, 차폐시스템 포함
4. 실험장치		(6,000)	
<li>① Ptychogi</li>	rahy 검출기	2,000	
② XRD 검출	키	1,000	
③ XRF 검출	기	1,000	Spectrometer 포함
② 시료 관련 장치		1,000	시료 준비실(extreme condition 제조 등) 500 In-situ extreme condition setup, 시료홀더 등 500
③ End-station 시스템		1,000	데이터 분석용 프로그램, 컴퓨터 100 회절기 400 광학테이블 등 150 Cryostat 50 Ptychography 장치 100 XRF 장치 200
합	계	15,000	
재원	정부출연금	15,000	
- 11 - 22	자체자금		