



Special Review Paper on “Exploring Earth and Environmental Science with Synchrotron: From Atoms to Planet”

From Atoms to Earth: A Review of Synchrotron Techniques and Case Studies in Earth and Environmental Sciences

Huijeong Hwang¹, Chanbi Lee¹, Sungwook Choung^{2,3}, Donghoon Seoung^{4,*}

¹Department of Environment and Energy Engineering, Gwangju Institute of Sciences and Technology

²Research Center for Earth and Environmental Sciences, Korea Basic Science Institute (KBSI)

³Department of Environmental System Engineering, Korea University

⁴Department of Geological and Environmental Sciences, Chonnam National University

*Corresponding author : dseoung@jnu.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 16 September 2025
Received in revised form 20 October 2025
Manuscript accepted 21 October 2025
Available online 28 October 2025

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2025.58.5.451>

Research Highlights

- A comprehensive review of synchrotron techniques in Earth & Environmental Sciences.
- Synchrotron techniques — such as XAS, XRD — are introduced with case studies.
- Prepares the Earth-Environmental science research community for the upcoming K-4GSR.

ABSTRACT

A synchrotron is a state-of-the-art research infrastructure that links micro-scale processes at atomic and molecular levels with macroscopic phenomena in Earth and environmental systems. Although the application of synchrotron radiation has steadily increased across various academic fields, there has been a lack of domestic research that comprehensively introduces the latest analytical techniques and research trends in the field of Earth and environmental sciences. This review was planned to fill this research gap and prepare for the upcoming era of 4th generation synchrotrons. It introduces the fundamental principles of synchrotron radiation, the status of facilities in Korea and abroad, and presents key analytical techniques -such as X-ray Absorption Spectroscopy (XAS), X-ray Imaging (STXM, X-ray CT), X-ray Scattering/Diffraction (XRD/SAXS), and Infrared spectroscopy (IR)- along with published research. The principles of each technique are elucidated, and studies that utilize them to comprehensively understand complex Earth systems -such as identifying the chemical speciation of pollutants, investigating mineral phase transitions under extreme environments, and tracing the alteration processes of fossils-are introduced. Finally, in anticipation of the next-generation synchrotron (K-4GSR) to be completed in 2029, this paper aims to propose measures to maximize domestic research capabilities in Earth and environmental sciences, including expanding the user and encouraging active participation from academia in beamline planning.

Keywords : synchrotron, X-ray absorption spectroscopy, X-ray scattering/diffraction, X-ray imaging, 4th generation synchrotron

Citation: Hwang, H., Lee, C., Choung, S., Seoung, D. (2025) From Atoms to Earth: A Review of Synchrotron Techniques and Case Studies in Earth and Environmental Sciences. Korea Economic and Environmental Geology, v.58, p.451-463, doi:10.9719/EEG.2025.58.5.451.

Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.
pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2025 The KSEE. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

해설 (“방사광가속기와 자원·환경·지질과학” 특별호)

원자에서 지구까지: 지구·환경과학에서의 방사광가속기 기법과 연구 사례 리뷰

황희정¹ · 이찬비¹ · 정성욱^{2,3} · 성동훈^{4,*}

¹광주과학기술원 (GIST) 환경에너지공학과

²한국기초과학지원연구원 지구환경연구부

³고려대학교 환경시스템공학과

⁴전남대학교 지질환경과학과

*책임저자 : dseoung@jnu.ac.kr

요 약

방사광가속기는 원자 및 분자 수준의 정밀 분석을 통해 지구·환경 시스템의 미시적 과정과 거시적 현상을 연결하는 최첨단 연구 인프라이다. 최근 다양한 학문 분야에서 방사광의 활용이 꾸준히 증가하고 있으나, 지구·환경과학 분야의 최신 분석 기법과 연구 동향을 종합적으로 소개하는 국내 연구는 부족한 실정이었다. 본 논문은 이러한 연구 공백을 메우고 다가올 4세대 방사광 가속기 시대를 준비하기 위해 기획되었다. 이를 위해 방사광의 기본 원리와 국내외 방사광가속기 현황을 소개하고, X-선 흡수 분광(XAS), X-선 이미징(STXM, X-ray CT), X-선 산란/회절(XRD/SAXS), 적외선분광(IR) 등 핵심 분석 기법들을 국내 연구자들의 국내외 주요 연구 사례와 함께 제시한다. 각 기법의 원리를 설명하고, 이를 활용하여 오염물질의 화학종 규명, 극한 환경에서의 광물 상전이 규명, 화석의 변질 과정 추적 등 복잡한 지구 시스템을 총체적으로 이해하는 연구들을 소개한다. 마지막으로 2029년 준공될 차세대 방사광가속기(K-4GSR)를 맞이하여, 국내 지구·환경과학 연구 역량을 극대화하기 위한 방안으로 이용자 저변 확대와 빔라인 기획에 대한 학계의 적극적인 참여 등을 제안하고자 한다.

주요어 : 방사광가속기, X선 흡수분광, X선 산란/회절, X선 이미징, 4세대 방사광가속기

1. 서 론

방사광가속기(Synchrotron)는 원자 및 분자 수준에서 구조적·화학적 특성을 정밀하게 규명하는 최첨단 연구 인프라이다. 물리학, 화학, 재료과학 등 기초과학 분야를 비롯한 다양한 학문 분야에서 물질의 원자 단위에서의 근원적 거동을 규명하는 핵심적 역할을 수행해온 방사광은 그 적용 범위를 넓혀 최근 지구·환경과학 분야에서도 연구의 새로운 지평을 열고 있다. 방사광 X-선은 이온 흡착, 광물 상전이와 같은 원자 및 분자 수준의 미시적 과정을 관찰함으로써, 오염물질의 이동, 맨틀의 동역학, 생지화학적 순환과 같은 거시적 지구시스템의 메커니즘을 이해하는 결정적 단서를 제공하고 있다. 예를 들어, 토양-지하수 계면에서 일어나는 미량 중금속 이온의 흡착 및 탈착 기작을 원자수준에서 규명하는 것은 오염물질의 거동 및 지역 수계의 오염 확산을 예측하는 데 필수적이다(Namgung et al., 2020; Lee et al., 2022) 또한, 지구 내부와 같은 초고압·고온의 극한환경을 모사하여 광물의 결정 구조 변화를 직접 관찰하는 연구는 거시적 영역에서

의 고체지구의 변화를 미시적 규모에서 설명하는 핵심적인 실험적 증거가 된다(Chanyshv et al., 2022; Yun et al., 2022). 이처럼 서로 다른 규모의 현상을 연결하고 근본적인 메커니즘을 규명하기 위해서는 원자 수준의 정밀한 분석 능력과 실제 지구 환경 조건을 재현할 수 있는 실험 기법이 요구된다. 이때 ‘거대 현미경’으로 비유되는 방사광가속기는 원자수준의 분해능인 옹스트롬(Å) 단위에서부터 센티미터(cm) 규모의 암석 내부까지 광범위한 길이 스케일을 아우르며 물질을 탐구할 수 있는 강력한 분석 도구로 기능한다(Fig. 1). 더 나아가, 방사광가속기는 단일 시료에 대해 복합적인 정보를 얻을 수 있는 다중 분석(Multi-modal analysis)을 가능하게 한다. 연구자는 X-선 회절(X-ray Diffraction, XRD)로 물질의 결정 구조 정보를, X선 흡수 분광(X-ray Absorption Spectroscopy, XAS)으로 특정 원소의 화학적 상태와 국소 구조 정보를, 그리고 X선 형광(X-ray Fluorescence, XRF) 이미징으로 미량 원소의 공간 분포를 종합적으로 분석함으로써 복잡한 지구 시스템에 대한 총체적이고 심도 있는 이해를 도모할 수 있다(Fig. 2).

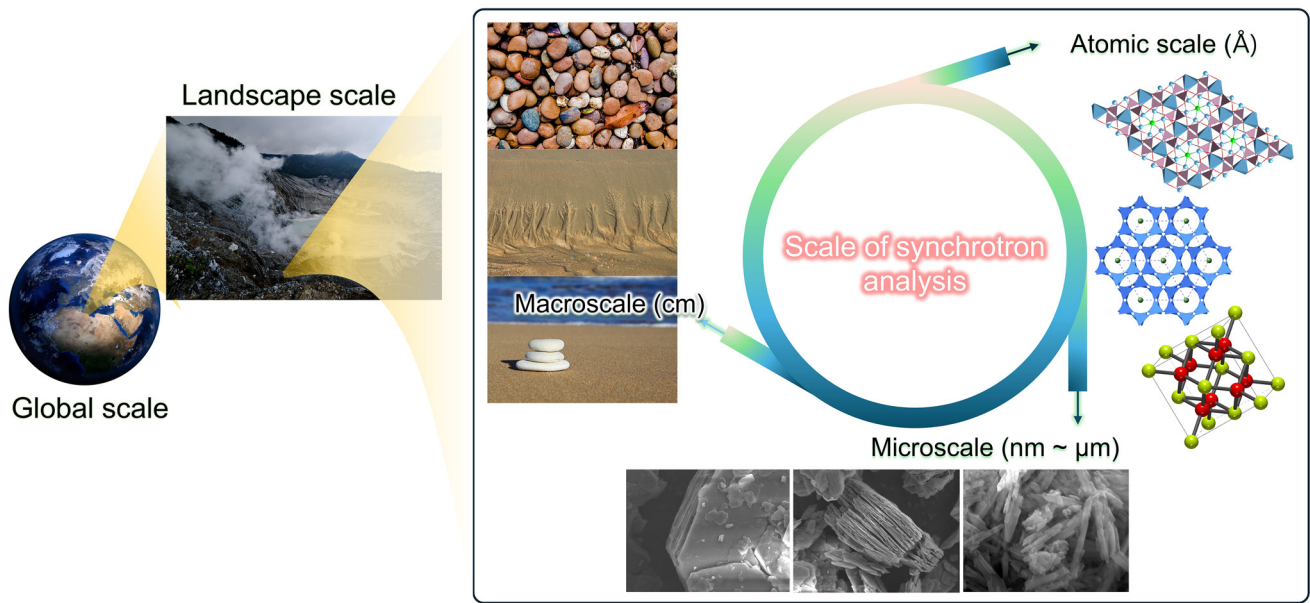


Fig. 1. A schematic demonstrating how synchrotron analysis bridges macroscopic to atomic scales in Earth and environmental sciences. This approach allows researchers to link observations of geological materials at the macroscale (cm) to their underlying structures at the microscale (nm- μ m) and atomic scale ($\text{\AA}$), revealing fundamental atomic-level mechanisms that govern large-scale natural processes.

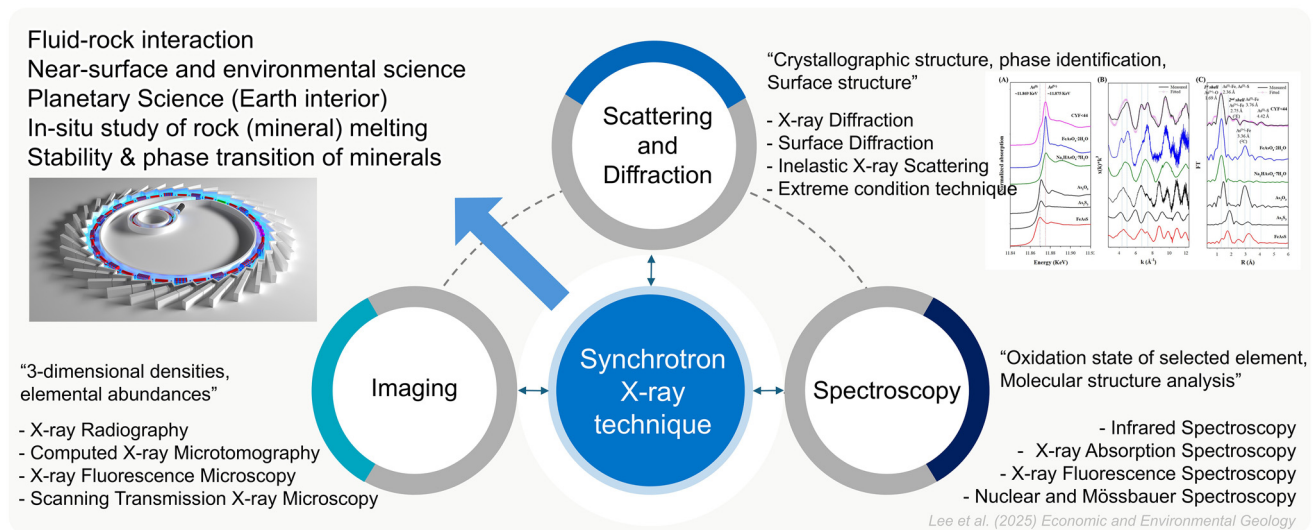


Fig. 2. An overview of representative synchrotron X-ray techniques and their applications in the Earth and environmental sciences. The techniques are broadly categorized into three groups: Imaging, for analyzing 3D structures and elemental abundances; Scattering and Diffraction, for identifying crystallographic structures and mineral phases; and Spectroscopy, for determining the oxidation states and molecular structures of elements.

이러한 중요성으로 인해 최근 국내 지구·환경과학계의 방사광가속기의 활용은 꾸준히 증가하는 추세이다(Fig. 3). 하지만 높은 수요에 비해 제한적인 시설 접근성 및 관련 정보 부족의 어려움이 상존하고 있다. 무엇보다 지질·환경과학 분야에서 방사광의 활용법을 종합적으로 소개한 국내 연구논문은 Kim (2001)의 연구 이후 부재한 실정으로, 최신 지견을 공유하는 데 상당한 공백이 있었다

(Kim, 2001). 이러한 결정적 시점에 2029년 충북 청주 오창에 4세대 원형 방사광가속기 (Korea-4th Generation Storage Ring, K-4GSR)의 운영이 예정되어 있어, 향상된 휘도와 결맞음 특성을 활용한 새로운 차원의 연구가 가능해질 것으로 기대를 모으고 있다. 따라서 본 논문은 이러한 연구 공백을 메우고 다가오는 4세대 방사광가속기 시대를 준비하기 위해 기획되었다. 본 논문에서는 방사

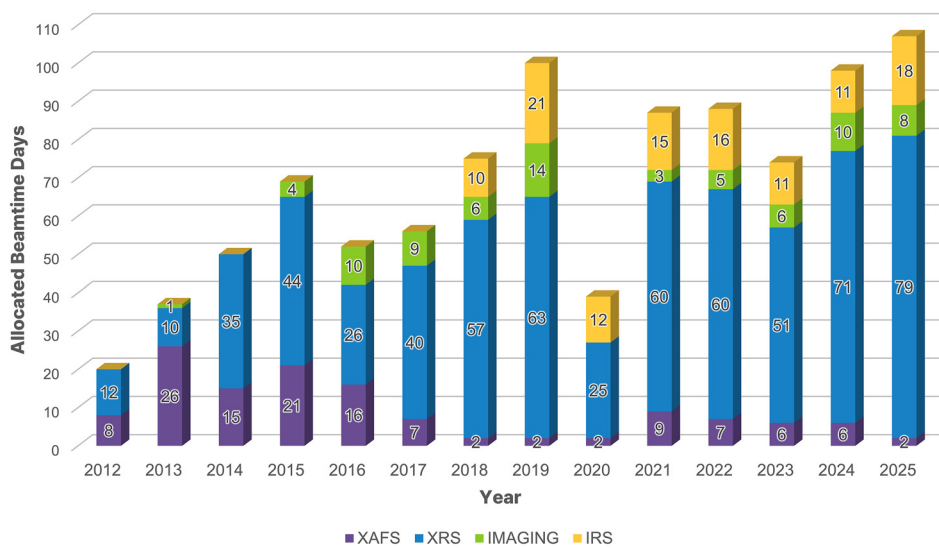


Fig. 3. Annual allocation of PLS-II beamtime (in days) for the Earth and Environmental Science research field from 2012 to 2025. The stacked bars show the distribution of beamtime across four major techniques: X-ray Absorption Fine Structure (XAFS), X-ray Scattering (XRS), Imaging, and Infrared Spectroscopy (IRS).

광가속기의 기본 원리와 핵심 측정 기법을 개관하고, 이를 활용한 지구·환경과학 분야의 다양한 연구 사례들을 국내에 발표된 연구를 중심으로 소개함으로써 국내 지질·환경과학 분야 연구자들의 방사광가속기에 대한 이해를 돕고 미래 연구 활성화를 촉진하고자 한다.

2. 방사광가속기의 구성 및 국내·외 방사광선원 현황

2.1. 방사광가속기(Synchrotron)란?

방사광(Synchrotron radiation)은 빛의 속도에 가깝게 가속된 전자가 자기장에 의해 궤도가 휘어질 때 궤적의 접선 방향으로 방출되는 집속성과 방향성이 높은 고휘도 전자기파다. 다양한 에너지로 방출되는 방사광 중 가장 활용도가 많은 X-선 영역에서, 이는 일반적인 실험실 X-선 광원(X-ray tube)보다 수만~수억 배 이상 밝은 고휘도(High brilliance) 특성을 가지며, 적외선에서 경 X-선(Hard X-ray)에 이르는 광범위한 범위의 연속 스펙트럼을 제공하여 목적에 맞는 특정 파장의 빛을 선택적으로 활용하는 것을 가능하게 한다. 이러한 방사광을 생성하고 활용하기 위한 방사광가속기는 크게 세 가지 주요 부분으로 구성된다.

(1) 선형가속기(LINAC) 및 전자 입사 장치(Electron injector): 전자총에서 생성된 전자를 빛의 속도에 근접할 때까지 가속하여 저장링에 주입하는 장치.

(2) 저장링 (Storage ring): 전자 입사 장치로부터 주입된 고에너지 전자가 안정적인 궤도를 유지하며 장시간

순환하는 부분. 전자는 저장링의 궤도를 따라 회전하면서, 경로에 배치된 휨자석의 접선 방향과 삽입장치에 의한 궤도 조작을 통해 방사광을 방출한다.

(3) 방사광관 (Beamline): 저장링에서 발생한 방사광을 실험 장치까지 전달하고, 단색화 장치(Monochromator), 집광용 거울/렌즈 등을 이용해 연구 목적에 맞게 방사광을 가공한 후 다양한 분석장비를 통해 실험을 수행하는 시설.

방사광은 1947년 미국 General Electric Laboratory에서 70 MeV 전자 싱크로트론을 운전하는 과정에서, 투명한 유리로 된 가속관을 통해 처음으로 직접 관측되었다. 1세대 가속기는 본래 입자 물리학 연구용 가속기에서 부수적으로 나오는 방사광을 활용하였으며, 2세대 가속기부터는 처음부터 방사광 생성을 목적으로 전용 장치가 설계되었다. 이 시기에는 가속된 전자가 저장링의 휨자석(Bending magnet)을 통과하면서 궤도가 휘어질 때 방출되는 방사광을 주 광원으로 사용했다. 3세대 가속기에서는 저장링의 직선구간에 다수의 N-S 극쌍을 교번 배열한 삽입장치(Insertion device)를 추가하여, 전자 궤도를 주기적으로 진동하도록 설계하였다. 이러한 위글러(Wiggler)나 언둘레이터(Undulator)와 같은 삽입장치에서 발생하는 방사광은 휨자석에서 발생하는 빛에 비해 훨씬 높은 휘도와 집속도를 가진 고품질의 X-선을 제공한다. 참고로, 국내 포항 방사광가속기(PLS-II)가 3세대 방사광가속기에 속한다. 현재 방사광가속기의 발전은 3세대에 머무르지 않고, 다중 굽힘 자석 (Multi-bend achromat, MBA) 기술을 적용한 Diffraction-Limited Storage Ring (DLSR)의 4세대 가속기로 발전하였다. 이는 전자가 퍼져 있는 정

도를 나타내는 에미턴스(Emittance)를 획기적으로 낮춰 X-선의 결맞음(Coherence)를 극대화하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 기존의 방법으로는 관찰할 수 없었던 나노미터 크기 입자의 3차원 구조나 원자들의 미세한 동적 거동을 직접 관찰할 수 있다는 특징이 있다. 현재 스위덴 **MAX-IV**, 브라질 **Sirius**, 미국 **APS-U**, 그리고 프랑스

ESRF-EBS에서 운영되고 있으며, 다수의 기존 3세대 가속기들도 DLSR로의 성능 향상을 추진하고 있다.

2.2. 국내 방사광가속기 시설 개요: PLS-II와 K-4GSR

현재 국내에는 포항의 3세대 원형 방사광가속기인 **PLS-II**가 운영되고 있으며, 충북 오창에는 차세대 4세대 원형

Table 1. List of PLS-II beamlines currently applied to Earth and Environmental Science and their performance

Beamline	Experimental technique (Representative technique)	Energy range and monochromator	Beam size	Areas of research
1D	KIST X-ray Scattering/ Absorption Spectroscopy (XRS_KIST)	4–16 keV at Si(111)	<1 mm (H) × 0.5 mm (V)	- Surface and interface of thin films - X-ray scattering experiments of single crystals
3D	X-ray Scattering (XRS)	8–20 keV	0.5 × 1.0 mm ²	- X-ray diffraction for single crystals, thin films, and powder samples
5A	X-ray Science Material Science (MS-XRS)	5–16 keV at Si(111)	< 0.6 mm (H) × 0.5 mm (V)	- Soft matter, amorphous and nano-structured materials
6C	Biology and Medical Imaging (BMI)	10–55 keV	Large FOV imaging : 80 × 10–30 mm ² High resolution : 8 × 5 mm ²	- X-ray imaging and radiotherapy
7C	X-ray Nano-Imaging (XNI)	9.3 keV (tomography) 6–12 keV (XANES) at Si(111)	Focusing mirror: 260 μm (H) × 15 μm (V) CRL: 70 μm (H) × 8 μm (V)	- Nano X-ray tomography - XANES Imaging
7D	X-ray Absorption Fine Structure (XAFS)	5–21 keV (collimated & focused) 5–27 keV (unfocused)	1(V) × 5 (H) mm ²	- Energy resolution: ca. 2×10 ⁻⁴ @ 10 keV - Identification of short-range structures in materials - Transmission and fluorescence
8C	Nanoprobe XAFS (Nano XAFS)	4–22 keV at Si(111)	200 μm × 300 μm K-B mirror: 1 μm × 1 μm	- In situ and ex situ catalysis chemistry - Surface and interface - Amorphous and nanostructure
9A	Ultra Small Angle X-ray Scattering (U-SAXS)	11–20 keV	30 (V) × 290 (H) μm ² @FWHM	- Nanostructure of pure polymers, biological macromolecules (proteins, DNA, RAN), and amorphous materials
9B	High Resolution Power Diffraction (HRPD)	8–20 keV	1 (V) × 20 (H) mm ²	- Metals, alloys, and inorganic compounds - Organic compounds and biomaterials
10C	Wide Energy XAFS (Wide XAFS)	4–50 keV 5–30 keV (unfocussed with Si(111)) 7–40 keV (unfocussed with Si(311))	0.5–2 (H) × 0.2–1 (V) mm ²	- Energy storage & advanced conversion materials - Nano chemistry
12D	Infrared Spectroscopy (IRS)	Globalar Beamsplitter: KBr	—	- Dispersion analysis of multi- component organic materials

※ This is a representative specifications, focusing on beamlines highly relevant to the analysis of earth and environmental samples. The actual performance may be different based on how the optical system and the sample environment equipment are set up. For the most up-to-date information, it is advisable to refer to the information for each beamline on the Pohang Accelerator Laboratory (PAL) website.

방사광가속기(Korea-4th Generation Synchrotron Radiation, K-4GSR)가 건설 중이다. PLS-II는 1994년 최초 가동을 시작한 포항방사광가속기(PLS)를 2011년 성능을 대폭 향상하여 업그레이드한 3세대 방사광가속기 시설이다. 특히 전자빔의 에미턴스를 줄이기 위해 강한 사극자석(Quadrupole magnets)을 다수 배치함으로써, 2세대 가속기와 비교해 품질 향상을 보였다. 약 3 GeV의 전자 에너지로 다양한 파장의 X-선(약 0.01 – 10 nm)을 안정적으로 제공하며, 재료과학, 화학, 생명과학 및 지구·환경과학 등 폭넓은 연구 분야에 최적화된 35개의 빔라인을 성공적으로 운영하고 있다(Table 1). PLS-II는 지난 수십 년간 국내 방사광 연구의 중심지로서 핵심 인프라 역할을 수행해왔다.

나아가, 2029년 준공을 목표로 충북 청주 오창에 건설 중인 K-4GSR는 차세대 4세대 원형 방사광가속기이다. K-4GSR는 4 GeV의 전자 에너지와 약 800 m 원주의 저장링을 갖추며, PLS-II 대비 약 100배 높은 휘도의 빛을 제공할 예정이다. K-4GSR의 구축은 국내 방사광 연구 인프라를 양적·질적으로 크게 확장시키는 계기가 될 것이다. 특히, 초기 구축되는 10개의 빔라인 중 결맞음 X-선 회절(Coherent X-ray Diffraction), 실시간 엑스선 흡수 분광학(Real-time X-ray Absorption Fine Structure), 그리고 나노 프로브(Nano-probe) 빔라인은 지질·환경과학 분야에 직접적으로 활용될 잠재력이 매우 크다. 이러한 최첨단 빔라인들은 광물·토양의 미세구조 및 비정질 성분 분석, 환경오염 물질의 화학종 규명, 나노입자 및 콜로이드의 거동 해석, 그리고 경원소 기반 생지화학 반응 추적 등 기존의 한계를 뛰어넘는 새로운 연구를 가능하게 할 것이다.

2.3. 해외 방사광가속기 시설 동향과 4세대 방사광가속기 선원 업그레이드

전 세계적으로 다수의 3세대 방사광가속기들이 DLSR로의 성능 향상을 완료했거나 추진 중에 있으며, 이는 차세대 방사광 연구의 핵심적인 흐름이다(Fig. 4, Table 2). DLSR의 핵심 목표는 전자빔의 퍼짐 정도를 나타내는 에미턴스를 획기적으로 낮추는 것이다. 에미턴스가 낮아질수록 X-선의 공간적 결맞음(Spatial coherence)이 향상되어 빛의 집속성과 안정성이 크게 개선된다. 이는 곧 기존보다 월등히 높은 품질의 데이터를 얻을 수 있음을 의미한다(Eriksson et al., 2014).

이러한 기술적 차이는 실제 가속기들의 사양 비교를 통해 명확히 확인할 수 있다. 예를 들어, 동일한 3 GeV 전자 에너지를 사용하면서 비슷한 원주를 가진 저장링인 세계 최초의 DLSR 시설인 스웨덴의 MAX IV는 수평 에미턴스가 200-330 pm·rad(수직 에미턴스 2-8 pm·rad)에 불과하다. 반면 아직 DLSR 업그레이드를 진행하지 않은 영국의 Diamond Light Source는 3,140 pm·rad(3.14 nm·rad), 그리고 한국의 PLS-II는 5,800 pm·rad(5.8 nm·rad) 수준의 수평 에미턴스를 가진다. 특히 PLS-II는 저장링의 다른 두 시설에 비하여 원주가 상대적으로 작아 에미턴스를 낮추는 데 물리적인 제약이 존재한다. 이처럼 에미턴스를 획기적으로 낮춘 기술은 나노미터(nm) 수준의 초고해상도 분석과 새로운 결맞음 영상·산란 기법을 가능하게 한다. 이를 통해 물질의 정적인 미세구조는 물론, 그 동역학적 변화까지 실시간으로 정밀하게 추적하는 새로운 연구의 지평이 열 수 있을 것으로 기대한다.

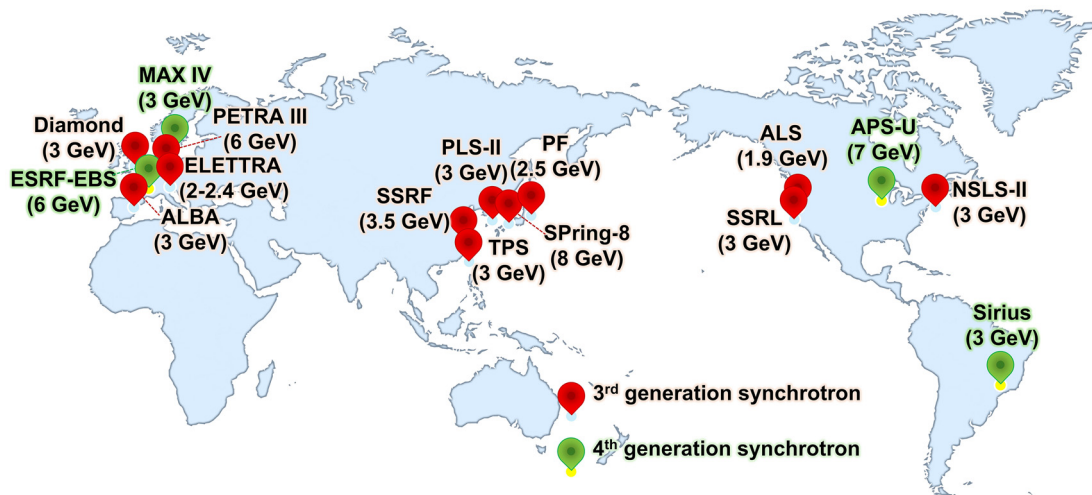


Fig. 4. A world map illustrating the global distribution of major synchrotron light source facilities. The map differentiates between 3rd generation (red pins) and the more advanced 4th generation (green pins) synchrotrons, providing an overview of this cutting-edge research infrastructure.

Table 2. List of Synchrotron radiation sources worldwide

Facility (Country)	Gen. of storage ring	Energy (GeV)	Circumference (m)	Emittance (nm·rad)
PLS-II (South Korea)	3 rd gen.	3	281.8	5.8
ESRF-EBS (France)	4 th gen.	6	844	H: 0.133
APS-U (USA)	4 th gen.	7	1104	H: 0.045
MAX IV (Sweden)	4 th gen.	3	528	H :0.2-0.3 / V: 0.002-0.008
Diamond (UK)	3 rd gen.	3	561.6	H: 3.14 / V: 0.008
SPring-8 (Japan)	3 rd gen.	8	1436	2.4
PETRA III (Germany)	3 rd gen	6	2304	H: 1.2 / V: 0.012
ALS (USA)	3 rd gen	1.9	196.8	H: 2 / V: 0.04
Sirius (Brazil)	4 th gen.	3	518.396	0.251
SSRF (China)	3 rd gen	3.5	432	3
PF (Japan)	2 nd gen	2.5	187	~36
TPS (Taiwan)	3 rd gen	3	518.4	1.6
SSRL (USA)	3 rd gen	3.5	234	~160
NSLS-II (USA)	3 rd gen	3	792	~0.5
ELETTRA (Italy)	3 rd gen	2-2.4	260	7
ALBA (Spain)	3 rd gen	3	270	4.6

2.4. 지질·환경과학에서의 방사광가속기 선원의 필요성

지구·환경시스템은 암권(Lithosphere)-대기권(Atmosphere)-수권(Hydrosphere)-생물권(Biosphere)이 상호작용하는 복잡계(Complex system)로, 특히 미시영역에서는 광물-물-미생물 간의 경계면에서의 일어나는 반응이 전체 시스템의 거동을 좌우한다. 특히 이러한 반응은 극히 낮은 농도의 원소에 의해서도 크게 영향을 받으며, 이들의 화학종, 미세 분포, 구조적 특성을 정밀하게 파악하는 것은 환경 위해성 평가와 지구화학적 거동 이해에 필수적이다. 그러나 실제 자연 시료는 극미량 농도, 복잡한 매질(Matrix), 그리고 시·공간적 불균질성이라는 분석적 난제를 동시에 가지고 있어 기존 실험실 수준의 분석법에는 명확한 한계가 존재한다. 이러한 난제를 해결하는 데 방사광가속기는 독보적인 해법을 제시할 수 있다. 방사광의 고휘도 특성은 극미량 원소의 존재 형태를 ppm 이하 수준까지 분석 가능하게 하며, 높은 에너지 분해능은 복잡한 매질 속 특정 원소의 미세한 화학적 상태변화의 구분이 가능하게 한다. 더 나아가, 최근 DLSR 기술을 기반으로 한 4세대 방사광가속기가 제공하는 고 결맞음(High coherence) 및 나노 집속빔은 이전에는 관찰할 수 없었던 나노미터 스케일의 불균질성을 규명하고, 실시간(In situ / In operando) 실험을 통해 동적인 지구화학 반응을 직접 추적할 수 있는 강력한 기반을 제공한다. 고결맞음(Coherence) 특성을 활용한 기법으로는 시료의 회절 패턴을 분석해 위상 정보를 복원하는 결맞음 회절 이미징(Coherent diffraction imaging, CDI) 및 굴절률 차이에 따른 위상 변화를 영상

화하는 위상차 이미징(Phase-contrast imaging, PCI) 등이 있다. 결맞음 회절 이미징을 통해 화산 유리 내 나노결정과 같은 미세 구조를 정밀하게 분석한 연구(Bamber et al., 2025)와 초고속 위상차 이미징을 이용하여 운석 시료의 동적 파괴 및 파편화 과정을 in situ로 관찰한 연구(Farbaniec et al., 2021)가 보고된 바 있으며, 이러한 연구들은 방사광의 결맞음 특성을 활용하는 기법이 지구 및 환경과학 분야의 미세 구조 분석과 동적 과정 규명에 폭넓게 적용될 수 있음을 시사한다.

3. 방사광 기반 핵심 분석 기법과 원리 / 국내 논문 활용 사례

3.1. X선 흡수 분광 기법: XANES/EXAFS & HERFD-XAS

X선 흡수 분광법(X-ray Absorption Spectroscopy, XAS)은 특정원소의 산화 상태(Oxidation state)와 국소 구조(Local structure)를 원자 수준에서 규명하는 가장 핵심적인 기법이다(Fig. 5). XAS는 분석 대상원소의 흡수단(Absorption edge)을 중심으로 X선 에너지를 변화시키며 흡수 스펙트럼을 측정하는 기법으로, 크게 XANES와 EXAFS의 두 분석 영역으로 나뉜다(Rehr and Albers, 2000). (1) XANES(X-ray Absorption Near Edge Structure)는 흡수단 부근 약 10-150 eV 좁은 에너지 영역을 다루는 분석법으로, 스펙트럼의 모양과 피크 위치가 원소의 산화 상태, 전자구조, 그리고 대칭성에 매우 민감하여 화학적 상태를 규명하는 데 주로 사용된다. (2) EXAFS(Extended

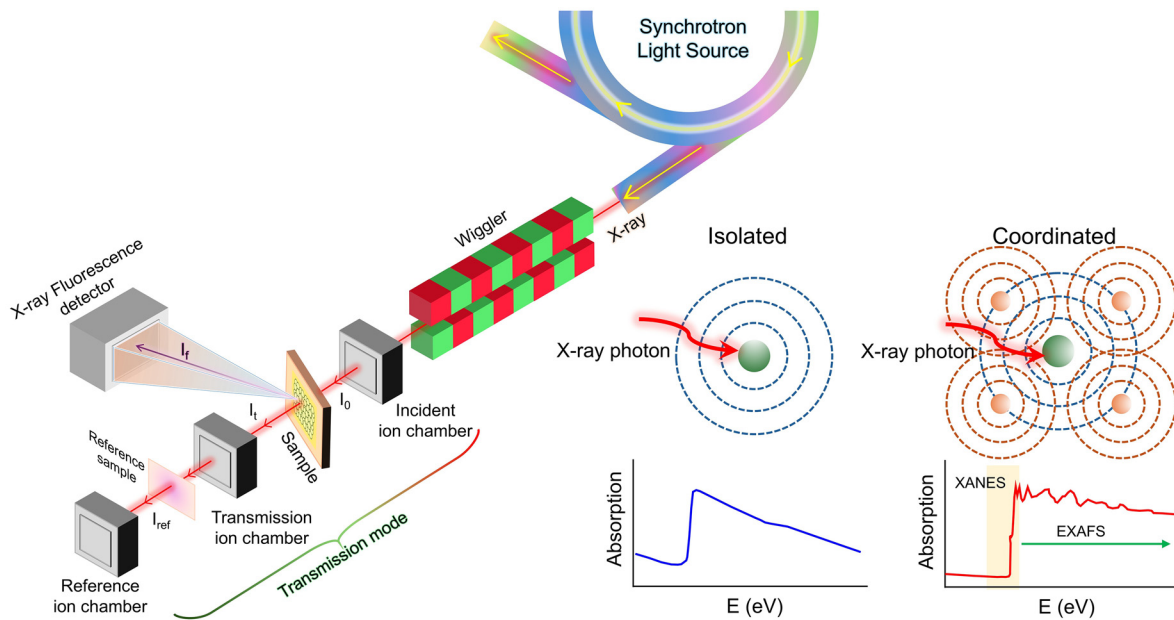


Fig. 5. Schematic images of the experimental setup and fundamental principles of X-ray Absorption Spectroscopy (XAS). When X-rays from a synchrotron source irradiate a sample, the absorption involves the ejection of a core-level electron, which then scatters off neighboring atoms. The resulting energy spectrum is divided into the XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) and EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) regions, which provide key information on the element's chemical state and local atomic structure, respectively.

X-ray Absorption Fine Structure)는 흡수단 이후 수백에서 최대 1000 eV에 이르는 넓은 에너지 영역의 미세한 진동을 분석한다. 이를 통해 중심 원자 주변에 어떤 원자들이 얼마나 멀리, 몇 개나 존재하는지에 대한 정보, 즉 배위수, 원자 간 결합 거리, 국소 구조 변형 등을 알 수 있다.

기존 XAS는 코어 전자의 짧은 수명으로 인한 에너지 불확정성, 즉 ‘코어-홀 수명 broadening (core-hole lifetime broadening)’ 현상 때문에 스펙트럼 피크가 넓어져 미세한 구조를 해석하는 데 한계가 있었다(Bauer, M., 2014). 이러한 한계를 극복하기 위해 최근 고에너지 분해능 형광 검출 XAS(High Energy Resolution Fluorescence Detected X-ray Absorption Spectroscopy, HERFD-XAS)가 개발되었다. HERFD-XAS는 스펙트럼의 분해능을 획기적으로 향상시켜 기존에 겹쳐 보이던 피크들을 명확하게 분리할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, 검출 감도를 크게 높여 기존에 최소 약 10 $\mu\text{g/g}$ 이상의 농도가 필요했던 분석의 검출 한계를 수백 ng/g 수준까지 낮출 수 있음이 보고되었다(Hu et al., 2020). 이처럼 향상된 분해능과 감도는 정량적인 화학종 분석의 신뢰도를 높여, 실제 자연 환경에 존재하는 낮은 농도의 시료를 훨씬 더 정밀하게 분석할 수 있는 길을 열었다.

현재 PLS-II에는 총 6개의 XAS 빔라인(1C, 1D, 6D,

7D, 8C, 10C)이 운영되고 있으며, 국내 연구진들은 해당 빔라인을 활용하여 다양한 지구·환경과학 연구를 수행해 왔다. Park et al. (2020)에서는 10C (Wide XAFS) 빔라인을 활용하여 비소 오염 토양의 안정화 공법 연구에서, XAS를 통해 시간이 지남에 따라 토양 내에 형성된 철산화물의 종류와 구조 변화를 관찰하여 공법의 장기적 안정성을 평가하는 연구를 수행하였다(Park et al., 2020). 또한 Han et al. (2022)에서는 환원 환경에서의 비소 거동 연구에서, 다양한 pH 조건에 따른 비소(As)와 황화철(FeS)의 상호작용을 8C (Nano XAFS) 빔라인을 이용하여 비소의 산화 상태 변화와 결합 형태를 규명하는 연구를 수행하였다(Han et al., 2022).

또한 국내 연구진들은 더 다양한 실험 환경을 위해 해외 방사광가속기도 적극적으로 활용하고 있다. Ko et al. (2022)에서는 미국 APS의 12-BM-B 빔라인을 이용하여, 얼음썩기 시료가 녹는 조건에서 산화·환원에 민감한 철(Fe)과 망간(Mn)의 화학적 상태 변화를 추적하여, 그 결과 서로 다른 해동 조건에서도 이들 원소의 광물학적 특성 변화가 미미하다는 것을 확인하여 기후변화에 따른 물질 순환 연구에 기여하였다(Ko et al., 2022). 또한 2011년 발표된 Yoon & Bleam에서는 미국 NSLS 방사광가속기에서 EXAFS 분석을 통해 메틸수은이 부식유기산의 특정 작용기(티올기, 카르복실기 등)와 pH 변화에 따라 어

떻게 결합하는지를 원자 수준에서 직접 관찰하였다. 이 연구는 pH 7 조건에서 약 20%의 메틸수은이 기존에 알려진 티올기가 아닌 다른 작용기와 결합한다는 사실을 최초로 밝혀내, 수은의 생지화학적 거동을 이해하는 데 중요한 기여를 했다(Yoon & Bleam, 2011).

상기 기재한 연구들 외에도 다양한 지구·환경 연구에서 XAS 기법은 지구환경의 화학적 연구에 분석기법으로 활용되고 있으며, 점차 주된 분석 기법으로 여겨지고 있는 추세이다.

3.2. X선 이미징: STXM, X-ray CT/Nano-CT

특정 원소의 환경적 거동을 이해하기 위해서는 단순한 평균 농도의 측정을 넘어, 시료 내 공간적 분포와 화학적 형태에 대한 미시적 정보가 필수적이다. 원소의 용출성, 반응성, 이동성은 이러한 미시적 특성에 의해 결정되기 때문에, 시료의 표면뿐 아니라 내부 구조까지 비파괴적으로 규명할 수 있는 고해상도 분석 기법은 최근 지구·환경과학 연구에서 핵심적인 역할을 하고 있다. 주사 투과 X선 현미경(Scanning Transmission X-ray Microscopy, STXM)은 X선을 이용하여 나노미터 수준의 공간 분해능을 구현하는 X선 이미징 기법이다(Nilsson et al., 2005). 이 기법은 주로 존 플레이트(Zone plate)와 같은 X선 광학소자를 이용해 나노미터 크기로 집속한 X선 빔을 시료에 주사하여 투과된 X선의 흡수 스펙트럼으로 이미지를 획득한다(Fig. 6). STXM의 가장 큰 장점은 단순한 원소 분포 이미지를 넘어, 각 픽셀에서 XANES 스펙트럼을 얻어 원소의 산화 상태와 화학적 결합 상태까지 2차원적으로 매핑할 수 있다는 것이다. 존 플레이트 기반의 STXM은 최대 12 nm의 공간 분해능을 달성한 바 있으

며(Chao et al., 2012), 국내 PLS-II의 10A1(연엑스선 나노현미경, STXM) 빔라인은 X선 빔을 ~30 nm 크기로 집속시켜 나노미터 규모의 화학적 이질성 분석을 지원하고 있다.

X선 컴퓨터 단층촬영(X-ray CT)는 샘플의 3차원 내부 구조 분석에 사용되는 분석 기법으로, STXM이 화학적 이질성 분석에 강점을 갖는 것과는 달리 시료 내부의 구조적 이질성을 비파괴적으로 파악하는데 주로 사용된다(Claro et al., 2023). 이 기법은 시료를 여러 각도에서 회전시키며 투과 X선 영상을 연속적으로 수집하고, 이를 수학적 알고리즘으로 재구성하여 내부 구조를 3차원 이미지로 시각화한다. 일반적인 마이크로 CT(μ -CT)의 공간 분해능은 수 μ m 수준이며, 나노 CT(nano-CT)의 경우 수십 nm까지 가능하며 미세 균열, 공극 분포, 입자 형태 등 다양한 구조적 정보를 제공한다.

국내에서는 PLS-II 6C 빔라인(생명의학 영상, BMI)의 μ -CT를 이용하여 단층암 시료의 3차원 형상 선호 배향(3D-SPO)을 분석하고, 이를 통해 양산·울산 단층의 과거 운동 방향과 성격을 복원한 연구가 보고된 바 있다(Sim et al., 2020). Won et al. (2025)에서는 PLS-II의 7C 빔라인(엑스선 나노영상, XNI)을 활용하여, 자체 제작한 냉동 스테이지 위에서 투과 X선 현미경(TXM) 실시간 분석을 수행하였다(Won et al., 2025). 해당 결과와 APS 12-BM-B 및 PLS-II 7D 빔라인에서 측정한 XANES 분석 결과를 통합하여 얼어붙은 용액 내에서 로도크로사이트(Rhodochrosite, MnCO_3) 입자가 형성되는 과정을 직접 관찰하여, 물이 얼 때 일어나는 광물화 작용이 자연계 원소 순환의 중요한 경로가 될 수 있음을 밝혔다. 국내외 방사광가속기를 동시에 활용하여 X-ray fluorescence 및

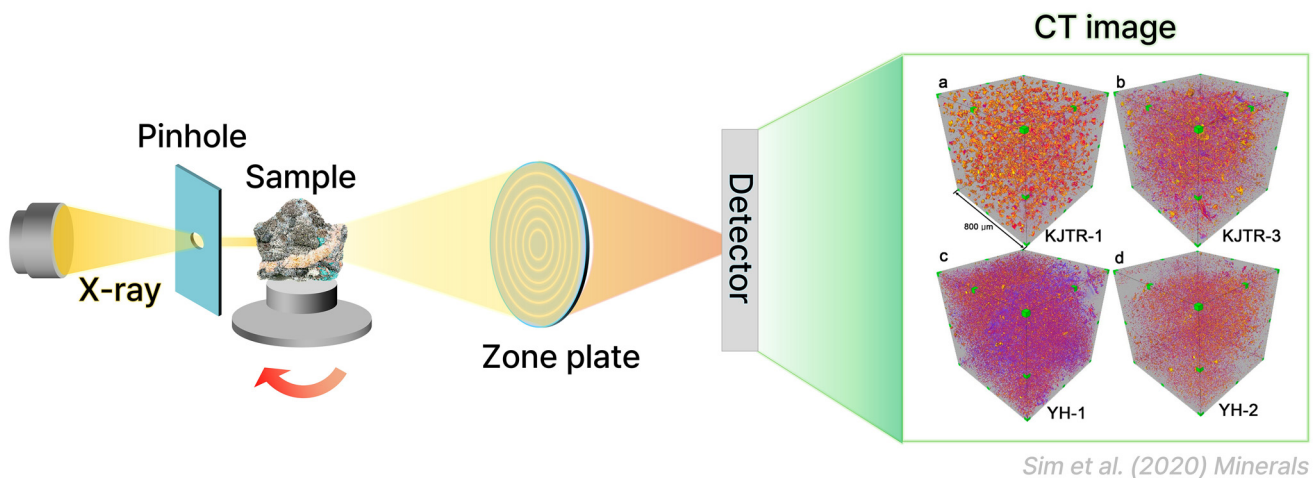


Fig. 6. A schematic illustration of the experimental setup for X-ray computed tomography (CT). A sample is rotated while being illuminated by an X-ray beam, and a series of 2D projection images are collected by a detector. These projections are then used to reconstruct a 3D model of the sample's internal structure.

CT를 통해 화석의 변질과정을 규명한 연구도 진행되었다. Kim et al. (2018)은 미국 스탠포드 방사광가속기연구소(SSRL)의 XRF 빔라인(BL 10-2a)과 PLS-II의 6C 빔라인을 활용하여 각각 2차원 원소 분포(μ -XRF)와 3차원 내부 구조 영상(μ -CT) 분석을 통해 한국의 검은색 공룡 화석과 몽골의 밝은색 공룡 화석을 비교하는 연구를 수행하였다(Kim et al., 2018). 한국 화석은 철(Fe)을 포함한 광물(Chamosite, $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_3\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$)이 기존 뼈 성분을 치환하며 색이 어두워진 반면, 몽골 화석은 2차 광물(Goethite(α -FeO(OH)), Barite(BaSO_4))이 뼈의 빈 공간을 채우는 데 그쳤음을 밝혔습니다. 이러한 화석화 과정의 차이는 화산 활동이 활발했던 한반도의 경상 분지와 상대적으로 안정적이었던 몽골 네메겟 분지의 서로 다른 지질학적 환경을 반영하는 결과임을 보여주었다.

3.3. X-ray 산란 기법: (In-situ) SAXS/WAXS/XRD

지구·환경 시료는 결정성 광물에서 비정질 나노입자에 이르기까지 폭넓은 구조적 스펙트럼을 보이며, 이러한 복잡성은 시료를 구성하는 물질의 정밀한 규명할 필요성을 제기한다. 이를 위해 활용되는 대표적 기법은 X-선 산란(X-ray scattering)으로, 시료 내부의 전자 밀도 분포에 기초하여 결정질과 비정질을 아우르는 정보를 제공할 수 있어, 복잡한 시료의 결정 구조 및 조성을 이해하는 데 핵심적인 분석 도구로 활용된다.

X-선 산란에서 얻어지는 정보는 브래그(Bragg)각 θ 와 입사 X-선 파장 λ 에 의해 정의되는 산란 벡터 (Scattering vector) q 의 크기 범위에 따라 결정된다 (Eq. 1).

$$q = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \sin \theta \quad (\text{Eq. 1})$$

작은 q 영역(low q -range, 일반적으로 2θ 2° 이하)를 측정하는 소각 X선 산란(Small-angle X-ray Scattering, SAXS)은 수 나노미터에서 수백 나노미터 크기의 구조정보를 제공한다. 따라서 나노입자의 크기, 모양, 분포 및 입자간 상호작용과 같은 나노스케일 구조를 분석하는데 적합하다. 반면에, 큰 q 영역(high q -range, 2θ 2° 이상)를 측정하는 광각 X선 산란(Wide-angle X-ray Scattering, WAXS)은 옹스트롬($\text{\AA}$) 수준의 원자 배열에 대한 정보를 담고 있다. 이는 일반적으로 X-선 회절(X-ray diffraction, XRD)로 더 잘 알려져 있으며, 결정 구조, 격자 상수, 결정의 배향성, 결정화도 그리고 상(Phase) 동정 등에 활용된다. SAXS와 WAXS는 서로 다른 스케일의 정보를 제공하기 때문에, 복잡한 시료를 완벽하게 이해하기 위해 함께 사용되는 경우가 많다(Beale et al., 2006). 예를 들어, 토양 속에서 새로 생성된 어떤 나노 광물을 분석하기 위해서 WAXS(XRD)를 이용해 회절 피크를 분석하여 이 광물이 '침철석(Goethite)'이라는 것을 동정하고, SAXS를 이용해 이 침철석이 평균 20 nm 크기의 막대 모양으로 존재하며, 서로 뭉쳐 있다는 사실을 규명할 수 있다. 이처럼 두 기법을 함께 사용하면 "어떤 물질이(WAXS), 어떤 나노 구조로(SAXS) 존재하는지"를 종합적으로 파악하는데 활용할 수 있다.

특히 싱크로트론 기반의 고휘도 X-선은 다양한 환경모사실험에서 실시간으로 회절 패턴을 측정하는 실시간(In-

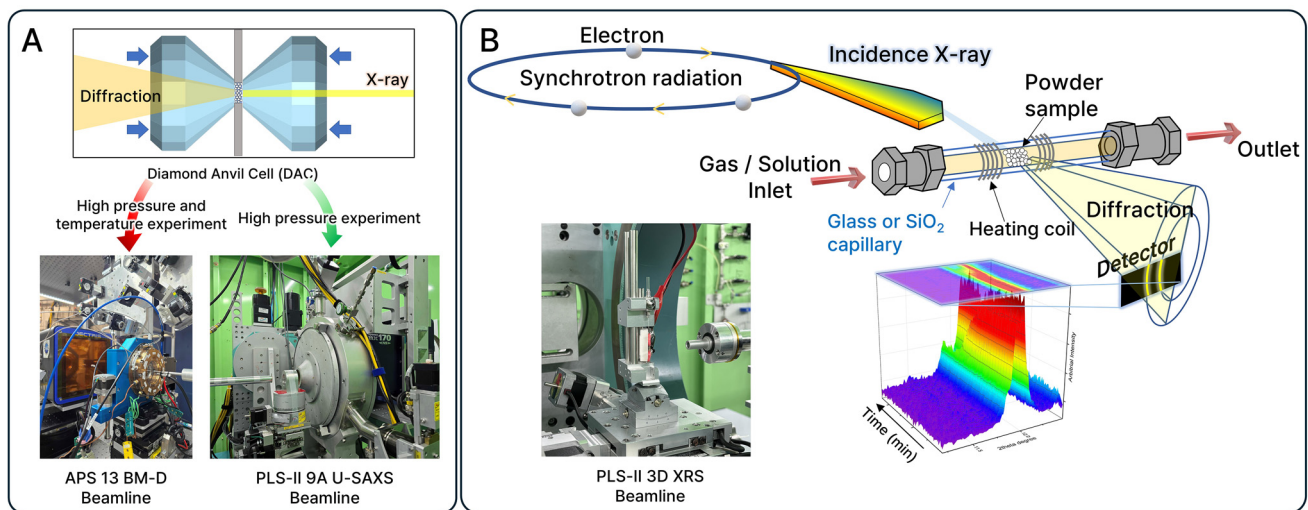


Fig. 7. Experimental setups for synchrotron *in-situ* X-ray diffraction using sample environment cells. (A) Diamond Anvil Cell (DAC) used for generating extreme pressures (and temperatures), along with photographs of high-pressure beamlines at the Advanced Photon Source (APS) and Pohang Light Source II (PLS-II). (B) A schematic of a capillary heating cell that enables real-time high temperature diffraction studies of samples under controlled temperature and reactive gas or solution flow, with an example beamline setup at 3D (XRS) at PLS-II.

situ/-operando) XRD 분석을 가능하게 한다. 대표적인 열역학 인자인 온도와 압력뿐만 아니라, 가스, 용액 등의 실시간 반응 현상을 독립적으로 혹은 동시에 조절하면서 실시간 회절 패턴을 측정할 수 있으며, 이를 통해 지구 물질의 특정 환경에서 발생하는 상전이, 탈수/탈탄산화와 같은 분해반응, 격자 상수 변화를 통한 열팽창률 및 압축률, 그리고 새로운 상의 형성과 반응 경로까지 직접 규명할 수 있다. 이러한 분석은 지구 및 행성의 지표에서 내부에 이르는 온도-압력 환경을 구현하는 시료환경장치를 통해 이루어진다(Fig. 7). 대표적으로 지구 내부의 압력을 구현할 수 있는 장치인 다이아몬드 앤빌 셀(Diamond Anvil Cell, DAC)을 이용해 수십~수백 GPa에 이르는 초고압 조건을 구현하거나, 캐필러리(Capillary) 내부에 시료를 넣고 가열하여 고온 조건을 만들 수 있다. 특히 다이아몬드 앤빌 셀은 저항가열 또는 레이저 가열과 결합하여 고온·고압 조건을 동시에 구현할 수 있어, 지구 내부와 유사한 조건에서 일어나는 물질 변화를 직접 관찰할 수 있는 독보적인 실험 환경을 제공한다(Hwang et al., 2023).

PLS-II에는 총 4개의 SAXS 빔라인, 9개의 WAXS 빔라인이 구축되어 있으며, 이 중 3D(XRS), 5A(MS-XRS), 6D(UNIST-PAL C&S), 9A(U-SAXS), 9B(HRPD) 빔라인 등이 지구·환경과학 연구자들에 의해 활발하게 활용되고 있다. 최근 국내 연구팀은 **PLS-II** 6D 빔라인을 이용하여 마리아나 해구 인근 심해 퇴적물의 깊이에 따른 광물 분포 변화를 방사광 X-선 회절법으로 분석하여, 퇴적물을 구성하는 석영, 운모, 녹니석 등과 함께 깊이에 따라 함량이 변하는 제올라이트 광물(필립사이트, 홀란다이트)을 동정하였다(Heo et al., 2023). 또한 **PLS-II** 3D 빔라인에서는 다이아몬드 앤빌셀을 이용하여 최대 5.18 GPa와 250 °C 조건에서 합성 제올라이트 X의 상전이 거동과 체적탄성계수를 조사하여, 특정 압력조건에서의 제올라이트 X의 구조적 안정성을 평가하였다(Lee et al., 2023).

3.4. 적외선 분광법 IR 이미징

대부분의 방사광 기반 분석법이 X선을 사용하는 것과 달리, 푸리에 변환 적외선 분광법(Fourier-transform infrared spectroscopy, FT-IR)은 적외선을 이용해 시료 내 분자의 작용기(Functional group)를 분석한다(Berthomieu and Hienerwadel, 2009). 연구실 장비보다 휘도가 월등히 높은 방사광을 광원으로 사용하면 신호대잡음비(SNR)가 우수한 데이터를 얻을 수 있으며, 이를 현미경과 결합하면 특정 분자의 공간적 분포를 이미지로 얻을 수 있다. FT-IR 현미경은 단일 검출기(Mercury-Cadmium-Telluride, MCT)로 지점을 순차적으로 주사하는 매핑과, 초점 평면

배열(Focal Plane Array, FPA)로 넓은 영역을 동시에 측정하는 이미징이 있다. MCT 기반 매핑은 높은 SNR을 바탕으로 좁은 영역에서 정밀 농도 분석에 적합하며, FPA 기반 이미징은 이용하면 넓은 영역의 화학 이미지를 단 시간에 획득할 수 있다는 장점이 있다(Bhargava et al., 2000). 이와 더불어, 반사모드와 투과모드를 연구방법 및 분석시료에 따라 최적화하여 실험진행이 가능하게 함으로써 기존의 연구실 스케일에서 분석하기 힘든 보다 다양한 실험에 활용될 수 있는 장점을 가지고 있다.

현재 **PLS-II**에는 1개의 IR 빔라인(12D, 적외선 분광학-IRS)이 존재한다. 12D 빔라인은 적외선 현미경 분광장치를 구비하고 있으며, 시료 특성, 개구 크기 및 파장에 따라 약 수~수십 μm 수준의 공간 분해능으로 적외선 현미경 분광 및 이미징 분석을 수행할 수 있다. Choi et al. (2023)에서는 12D 빔라인의 FPA 모드 FT-IR을 이용해 DAC을 이용한 고압·고온 반응 후 회수된 시료를 분석한 사례가 있다(Choi et al., 2023). 이 연구는 O-H 및 C-O 작용기의 진동 분포를 이미징하여 철과 유체의 반응 과정에서 발생하는 화학적 변화를 성공적으로 규명하였으며 해당 연구 결과를 통하여 달을 형성한 거대 충돌 당시, 충돌체의 철과 원시 지구의 물(H_2O)이 반응하여 생명 탄생에 필수적인 환원성 대기가 형성되는 과정을 실험적으로 재현했다는 점에서 큰 의의를 가진다. 또한 Hwang et al. (2017)에서는 미국 **NSLS-II** 및 **ALS**의 적외선 분광 빔라인에서 MCT 검출기가 장착된 FT-IR 현미경을 이용해 DAC 내 카올리나이트의 구조 변화를 실시간으로 측정하였다(Hwang et al., 2017). 이 연구는 압력과 온도가 증가함에 따라 물 분자가 카올리나이트 층 사이로 삽입되어 '초수화 카올리나이트'가 형성될 때, 기존 O-H 작용기 진동 밴드의 변화와 함께 삽입된 물 분자에 의한 새로운 O-H 진동 밴드(약 $3,543\text{ cm}^{-1}$) 나타나는 것을 관찰하여, 물의 구조내 유입 현상을 IR 측정 기법을 이용하여 직접적으로 확인을 하였다. 해당 연구 결과는 차가운 섭입대 환경에서 함수광물인 카올리나이트가 기존에 알려진 것보다 훨씬 깊은 맨틀까지 물을 운반할 수 있는 새로운 메커니즘을 제시하여, 지구 심부 물 순환과 섭입대 화산 활동 및 지진 발생 원인을 이해하는데 크게 기여하였다.

3. 결론 및 향후 연구를 위한 제언

본 논문에서는 방사광 가속기의 기본 원리부터 최신 4세대 DLSR 기술 동향, 그리고 X-선 흡수 분광, 현미경/영상, 산란/회절 등 핵심 분석 기법들이 지구·환경과학 분

야에서 어떻게 활용되는지를 다양한 연구 사례를 통해 살펴보았다. 이를 통해 방사광 가속기가 원자 수준의 미시적 메커니즘과 지구 시스템의 거시적 현상을 연결하고, 자연계의 복잡성을 총체적으로 이해하는 데 필수불가결한 연구 도구임을 확인하였다.

현재 전 세계 방사광 연구는 기존 3세대를 넘어 4세대 DLSR 시대로의 전환이라는 패러다임 변화를 맞이하고 있다. 에미턴스를 획기적으로 낮춰 구현한 초고휘도·고결맞음 X-선은 기존에 분석이 어려웠던 극미량 시료나 비정질 나노물질의 구조를 규명하고, 실제 지구 환경과 유사한 조건에서 일어나는 동적 반응을 실시간으로 추적하는 새로운 연구의 지평을 열고 있다. 이러한 흐름 속에서 2029년 준공될 오창 차세대 방사광가속기(**K-4GSR**)는 국내 지구·환경과학 연구 역량을 비약적으로 발전시킬 핵심 동력이 될 수 있을 것이다. **K-4GSR**는 탄소 저장, 핵심 광물, 오염물질 거동, 지질 재해 등 국가적·전지구적 난제 해결에 필요한 독보적인 분석 인프라를 제공할 것이다.

이러한 혁신적인 기회의 장을 최대한 활용하기 위해서는 기술적 발전과 더불어 연구 커뮤니티의 체계적인 준비와 노력이 반드시 필요하다. 현재 국내 방사광 시설의 전체 빔타임 중 지구·환경과학 분야의 비중은 아직 성장 잠재력이 큰 상황이다. 따라서 다가오는 4세대 방사광 시대를 맞이하여, 우리 연구 커뮤니티는 다음의 과제에 집중해야 한다.

첫째, 이용자 저변 확대와 차세대 연구자 양성이 시급하다. 정기적인 워크숍과 교육 프로그램을 통해 새로운 분석 기법의 활용법을 적극적으로 홍보하고, 다양한 분야의 연구자들이 방사광을 활용한 융복합 연구를 시도할 수 있는 생태계를 조성해야 한다.

둘째, **K-4GSR** 빔라인 기획 및 구축에 대한 학계의 적극적인 참여가 필요하다. 지구·환경과학 분야의 핵심 난제 해결에 최적화된 빔라인과 실험 장치가 구축될 수 있도록, 이용자 그룹을 중심으로 의견을 결집하고 이를 정책에 반영하는 노력이 중요하다.

또한 해외와 비교하여 국내에서는 아직까지 전체 빔타임 중 지구·환경분야의 연구가 차지하는 비율이 적은 편에 속한다. 지속적 빔타임 제안서 작성 체계의 정립, 이용자 저변 확대와 오창 가속기 빔라인 기획에 대한 적극적인 참여, 그리고 이용자협회를 중심으로 한 심사·전문위원 활동의 활성화는 향후 방사광가속기의 활용도를 극대화하는 핵심 과제라고 할 수 있다. 이러한 노력이 뒷받침될 때, 차세대 방사광가속기는 과거를 해석하고 현재를 진단하며 미래를 예측하는 지구·환경과학의 핵심 인프라로서 그 역할을 다하게 될 것이다.

사 사

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS-2025-00557111) 및 한국기초과학지원연구원(KBSI) 방사광 가속기 기반 회트류 및 토양유기물 분석과 지구환경 응용 연구 (C526116)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Bamber, E.C., Arzilli, F., Cipiccia, S., Batey, D.J., La Spina, G., Polacci, M., Gholinia, A., Bagshaw, H., Di Genova, D., Brooker, R., Giordano, D., Valdivia, P. and Burton, M.R. (2025) 3D quantification of nanolites using X-ray ptychography reveals syn-eruptive nanocrystallisation impacts magma rheology. *Nature Communications*, v.16, 7083. doi:10.6084/m9.figshare.29430371
- Bauer, M. (2014) HERFD-XAS and valence-to-core-XES: new tools to push the limits in research with hard X-rays? *Physical Chemistry Chemical Physics*, v.16, p.13827-13837. doi:10.1039/C4CP00904E
- Beale, A.M., van der Eerden, A.M.J., Jacques, S.D.M., Leynaud, O., O'Brien, M.G., Meneau, F., Nikitenko, S., Bras, W. and Weckhuysen, B.M. (2006) A combined SAXS/WAXS/XAFS setup capable of observing concurrent changes across the nano-to-micrometer size range in inorganic solid crystallization processes. *Journal of the American Chemical Society*, v.128(38), 12386-12387. doi:10.1021/ja062580r
- Berthomieu, C. and Hienerwadel, R. (2009) Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Photosynthesis Research*, v.101(2-3), 157-179. doi:10.1007/s11120-009-9439-x
- Bhargava, R., Wall, B.G., and Koenig, J.L. (2000) Comparison of the FT-IR Mapping and Imaging Techniques Applied to Polymeric Systems. *Applied Spectroscopy*, v.54(4), p.470-479. doi:10.1366/0003702001949870
- Chanyshev, V., Ishii, T., Bondar, D., Bhat, S., Kim, E.J., Farla, R., Nishida, K., Liu, Z., Wang, L., Nakajima, A., Yan, B., Tang, H., Chen, Z., Higo, Y., Tange, Y. and Katsura, T. (2022) Depressed 660-km discontinuity caused by akimotoite-bridgmanite transition. *Nature*, v.601, p.69-73. doi:10.1038/s41586-021-04157-z
- Chao, W., Kim, J., Rekawa, S., Fischer, P. and Anderson, E.H. (2009) Demonstration of 12 nm resolution Fresnel zone plate lens based soft X-ray microscopy. *Optics Express*, v.17(20), p.17669-17677. doi:10.1364/OE.17.017669
- Choi, J., Husband, R. J., Hwang, H., Kim, T., Bang, Y., Yun, S., Lee, J., Sim, H., Kim, S., Nam, D., Chae, B., Liermann, H.-P. and Lee, Y. (2023) Oxidation of iron by giant impact and its implication on the formation of reduced atmosphere in the early Earth. *Science Advances*, v.9(50), eadi6096. doi:10.1126/sciadv.adi6096
- Claro, P.I.C., Borges, E.P.B.S., Schleder, G.R., Archilha, N.L., Pinto, A., Carvalho, M., Driemeier, C.E., Fazzio, A. and Gouveia, R.F. (2023) From micro- to nano- and time-resolved X-ray computed tomography: Bio-based applications, synchrotron capabilities,

- and data-driven processing. *Applied Physics Reviews*, v.10(2), 021301, doi:10.1063/5.0129324
- Eriksson, M., van der Veen, J.F. and Quitmann, C. (2014) Diffraction-limited storage rings – a window to the science of tomorrow. *Journal of Synchrotron Radiation*, v.21(5), p.837-842. doi:10.1107/S1600577514019286
- Farbaniec, L., Chapman, D.J., Patten, J.R.W., Smith, L.C., Hogan, J.D., Rack, A. and Eakins, D.E. (2021) In-situ visualisation of dynamic fracture and fragmentation of an L-type ordinary chondrite by combined synchrotron X-ray radiography and microtomography. *Icarus*, v.359, 114346. doi:10.1016/j.icarus.2021.114346
- Han, Y.S., Lee, M.Y. and Seong, H.J. (2022) Mechanistic study of FeS reacted with arsenate under various pH conditions. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, v.27(1), p.25-30. doi:10.7857/JSGE.2022.27.1.025
- Heo, J., Yun, S., Kim, J., Ko, Y. T. And Lee, Y. (2023) Depth-dependent Variations in Elemental and Mineral Distribution in the Deep Oceanic Floor Sediments (WP21GPC04) near the Mariana Trench in the Western Pacific Ocean. *Economic and Environmental Geology*, v.56(5), p.581-588. doi:10.9719/EEG2023.56.5.581
- Hu, H., Zhao, J., Wang, L., Shang, L., Cui, L., Gao, Y., Li, B. and Li, Y.F. (2020) Synchrotron-based techniques for studying the environmental health effects of heavy metals: Current status and future perspectives. *Trends in Analytical Chemistry*, v.122, 115721. doi:10.1016/j.trac.2019.115721
- Hwang, H., Seoung, D., Lee, Y., Liu, Z., Liermann, H.-P., Cynn, H., Vogt, T., Kao, C.-C. and Mao, H.-K. (2017) A role for subducted super-hydrated kaolinite in Earth's deep water cycle. *Nature Geoscience*, v.10(12), p.947-953. doi: 10.1038/s41561-017-0008-1
- Hwang, H., Bang, Y., Choi, J., Cynn, H., Jenei, Z., Evans, W. J., Ehnes, A., Schwark, I., Glazyrin, K., Gatta, G. D., Lotti, P., Sanloup, C., Lee, Y. and Liermann, H.-P. (2023) Graphite resistive heated diamond anvil cell for simultaneous high-pressure and high-temperature diffraction experiments. *Review of Scientific Instruments*, v.94, p.083803. doi: 10.1063/5.0132981
- Kim, T., Lee, Y. And Lee, Y.-N. (2018) Fluorapatite diagenetic differences between Cretaceous skeletal fossils of Mongolia and Korea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 490, p.579-589. doi: 10.1016/j.palaeo.2017.11.047
- Kim, Y.-H. (2001) Earth and environmental sciences with synchrotron radiation. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, v.10(3), p.212-221.
- Ko, S., Ahn, J., Fedorov, A. and Lee, G. (2022) Effects of Thawing Conditions in Sample Treatment on the Chemical Properties of East Siberian Ice Wedges. *Economic and Environmental Geology*, v.55(6), p.727-736. doi: 10.9719/EEG2022.55.6.727
- Lee, H., Lee, S., and Lee, Y. (2023) Phase transition of Zeolite X under high pressure and temperature. *Economic and Environmental Geology*, v.56(1), p.13-21. doi:10.9719/EEG2023.56.1.13
- Lee, S. Y., Chang, B., Kim, Y., Jang, H. and Lee, Y.J. (2022) Characterization of arsenite (As(III)) and arsenate (As(V)) sorption on synthetic siderite spherules under anoxic conditions: Different sorption behaviors with crystal size and arsenic species. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.613, p.499-514. doi:10.1016/j.jcis.2022.01.066
- Lee, S. Y., Yim, G.-J., Hwang, H. and Chon, C.-M. (2025) Investigation of Mineralogical Properties and Arsenic Speciation in Soils from an Abandoned Gold Mine Using Synchrotron-Based X-ray Techniques. *Economic and Environmental Geology*, v.58(5).
- Namgung, S., Guo, B., Sasaki, K., Lee, S.S. and Lee, G. (2020) Macroscopic and microscopic behaviors of Mn(II) (ad)sorption to goethite with the effects of dissolved carbonates under anoxic conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.277, p.300-319. doi:10.1016/j.gca.2020.03.036
- Nilsson, H.J., Tylliszczak, T., Wilson, R.E., Werme, L. and Shuh, D.K. (2005) Soft X-ray scanning transmission X-ray microscopy (STXM) of actinide particles. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v.383(1), 41-47. doi:10.1007/s00216-005-3355-5
- Park, J., Chung, H., Kim, S.H., An, J. and Nam, K. (2020) Study on Stabilization of Arsenic in Soil through in situ Formation of Amorphous Fe Oxides and use of X-ray Absorption Spectroscopy. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, v.25(2), p.9-15. doi:10.7857/JSGE.2020.25.2.009
- Rehr, J.J. and Albers, R.C. (2000) Theoretical approaches to X-ray absorption fine structure. *Review of Modern Physics*, v.72(3), 621-654. doi:10.1103/RevModPhys.72.621
- Sim, H., Song, Y., Hong, S. and Choi, S. (2020) 3D fabric analysis in fault rock using synchrotron μ -CT: a statistical approach to SPO (Shape Preferred Orientation) for estimation of fault motion. *Minerals*, v.10, 994. doi:10.3390/min10110994
- Won, Y., Lee, S., Lee, S. and Lee, G. (2025) Freeze-induced crystallization: an overlooked pathway for mineral genesis in natural waters. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.122(22), e2421822122. doi:10.1073/pnas.2421822122
- Yoon, S.J. and Bleam, W.F. (2011) pH dependence of CH_3Hg^+ -binding sites in humic acid: an X-ray absorption study. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, v.16(6), p.122-132. doi:10.7857/JSGE.2011.16.6.122
- Yun, S., Hwang, H., Hwang, G., Kim, Y., Blom, D., Vogt, T., Post, J.E., Jeon, T.Y., Shin, T.J., Zhang, D.Z., Kagi, H. and Lee, Y. (2022) Super-hydration and reduction of manganese oxide minerals at shallow terrestrial depths. *Nature Communications*, v.13, 1942. doi:10.1038/s41467-022-29328-y