2025년도 연구보고서
공모과제-01-02

방사광 가속기 기반 탄소중립 기술개발
- 연구 방법, 내용 및 동향 -

2025. 07.

삼척시탄소중립지원센터

SAMPYO Cement (주)삼표시멘트
시멘트산업사회공헌재단 Cement Industry Social Contribution Foundation
환경부
삼척시 SAMCHEOK CITY
KNU 강원대학교 KANGWON NATIONAL UNIVERSITY

제 출 문

❍ 과 제 명 : 방사광 가속기 기반 탄소중립 기술개발 : 연구 방법, 내용 및 동향

❍ 계약기간 : 2025년 04월 18일 ~ 2025년 07월 17일 (총3개월)

❍ 계 약 일 : 2025년 04월 18일

❍ 착 수 일 : 2025년 04월 18일

❍ 완 료 일 : 2025년 07월 17일

상기와 같이 「2025 제 1차 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업」의 최종 연구보고서를 제출합니다.

2025년 07월 17일

소 속 : 강원대학교

직 위 : 교수

성 명 : 이현준 (인/서명)

삼척시탄소중립지원센터장 귀하

요 약 문

Ⅰ. 연구개요

삼척시의 미래 먹거리 기반 산업인 탄소중립 기술 개발을 위해 가속기를 활용한 연구 방법, 내용 및 동향을 조사하고 이를 토대로 탄소중립 소재 및 소자 기술 연구과제를 도출하여, 삼척시의 탄소중립 달성에 기여함

Ⅱ. 연구의 필요성 및 목적

○ 기후 위기와 탄소중립의 중요성

- 전 세계적으로 기후위기의 심각성이 대두되며, 탄소중립은 국가·지역·산업을 막론하고 인류의 생존과 지속가능성을 좌우하는 핵심 과제가 되었다. 특히 삼척시와 같은 에너지 공업도시는 산업활동에서 배출되는 탄소 저감이 필수적이다. 우리나라는 "2050 탄소중립"을 선언하고 온실가스 감축 및 친환경 에너지 전환에 적극 나서고 있으며, 이에 부응하는 지역 단위의 실효적 탄소중립 모델 개발이 필수적으로 요구된다.

○ 삼척시의 특수성과 현안

- 삼척시는 전통적인 에너지 산업 도시로, 대규모 발전소와 시멘트 공장 등 다량의 이산화탄소를 배출하는 산업이 지역경제의 큰 비중을 차지한다. 동시에 천혜의 자연환경과 관광자원도 보유하고 있어 산업과 환경이 공존하는 지속가능한 발전전략이 절실하다. 삼척시는 강원지역 18개 시군 중 최초로 ‘탄소중립지원센터’를 설립하는 등 지역 차원의 능동적 대응체계를 구축하였으나, 구체적 실현 수단 및 최첨단 친환경 기술 확보가 시급하다.

○ 방사광 가속기 기반 기술의 혁신적 가치

- 방사광 가속기는 기존의 연구장비로는 탐지 및 분석이 어려운 미세한 소재 구조, 반응 메커니즘 분석에 탁월하며, 이는 고성능 촉매 개발, 이산화

탄소 활용(CCU), 그린수소 생산 등 탄소중립 핵심 기술 개발에 필수적이다. 특히, 연X-선 흡수분석법 등 실시간 · 정밀 분석이 필요한 전극, 촉매 등의 연구에서 방사광 가속기 기술은 국·내외적으로 높은 파급효과와 수요를 보이고 있다.

○ 글로벌 및 국내 정책 동향

- 유럽, 미국, 영국 등 선진국에서는 탄소중립 목표 달성을 위한 R&D와 연구 인프라 고도화에 집중 투자하고 있으며, 한국도 태양광, 수소, CCUS 등 100대 탄소중립 기술 로드맵을 추진 중이다. 이에 부응해 삼척시도 지역특화 탄소중립 기술개발 및 실증이 필요하다.

Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

○ 방사광 가속기 활용 에너지 소재 기술 메커니즘 분석 연구 동향 조사

- CO_2 전환 및 활용 기술 연구 동향 조사
- 그린수소 생산 기술 연구 동향 조사
- 재생에너지 효율 향상 사례 조사

○ In-Situ 실험 고도 분석

○ 중입자 가속기를 활용한 탄소중립 연구 현황 및 미래

○ 가속기를 활용한 기술 혁신을 위한 정부 정책 조사

○ 삼척시내 기업의 니즈에 맞는 가속기 기반 분석법 제안

Ⅳ. 연구결과

○ 방사광 가속기의 촉매 · 재료 실시간 분석 적용성과 우수성

- In-situ X선 흡수분광(XAS), 대기압 X-선 광전자 분광(AP-XPS), X-선 회절(XRD) 기반 분석법을 도입하여, 촉매 내부 원자 · 전자의 실시간 구조 변화, 반응 메커니즘, 활성상 생성 · 소멸 과정을 정밀하게 해석함으로써 고효율 · 고내구성 촉매 설계의 혁신적 기반을 마련함

○ 신재생에너지 · 에너지저장 소재 분야 분석 성과

- 방사광 가속기 기반 XRD, XAS, In-situ 현미경 분석을 이용해, 태양전지 박막(페로브스카이트 등), 마찰나노소자, 풍력복합소재의 미세결함 · 변형 · 성능 향상을 구체적으로 실증한 국내외 선도 연구사례들을 정리함. 특히, 고효율 · 고내구성 소자 설계를 뒷받침하는 미세구조 분석 방법론을 확립함

◯ 산학연/기업 현장 연계 분석법 제안 및 정책·클러스터 방향 제시

- 삼척시 내 탄소 다배출 기업의 공정 개선 및 신소재 적용 수요와, 방사광 가속기 실험의 연계 방안(전문인력 양성, 맞춤형 컨설팅, 산학협동 프로그램 등)을 제안함
- 방사광 가속기 인프라 확충 및 전용 빔라인 구축, 산업체 직접 지원 정책, 현장 맞춤 실험컨설팅 체계의 필요성을 도출함

V. 연구결과의 활용계획

본 연구의 결과는 삼척시 탄소중립을 위한 소재 개발에 활용하여 현장 적용 가능성을 높일 계획이다. 방사광 가속기를 통한 첨단 분석 기법을 실증 현장에 적용함으로써 소재의 성능과 효율성을 극대화할 예정이다. 또한 연구성과를 바탕으로 지역 산업체의 기술 혁신과 정부 탄소중립 정책 실현에도 기여할 것이다.

<목 차>

제1장 연구개요 ····· 1

제2장 연구의 내용 및 목적 ····· 1

2.1 연구의 필요성 ····· 1

2.2 연구의 목적 ····· 2

제3장 연구의 내용 및 범위 ····· 3

3.1 연구의 목표 ····· 3

3.2 연구의 범위 ····· 3

제4장 연구결과 ····· 5

4.1 가속기를 활용한 국내외 연구 현황 ····· 5

4.1.1 가속기의 정의와 개요 ····· 5

4.1.2 국내 가속기 현황 ····· 5

4.1.3 국내 중입자 가속기 현황 ····· 6

4.1.4 국외 가속기 현황 ····· 7

4.1.5 국외 중입자 가속기 현황 ····· 8

4.2 방사광 가속기를 활용한 CO_2 전환 및 활용 기술 연구 동향 ····· 8

4.2.1 AP-XPS ····· 8

4.2.2 In-situ XAS ····· 11

4.2.3 In-situ XAS-Microscopy 연동분석법 ····· 14

4.2.4 방사광 X-선 회절 (XRD) ····· 16

4.3 그린수소 생산 기술 연구 동향 조사 ····· 18

4.3.1 그린수소 생산 기술의 정의와 필요성 ····· 18

4.3.2 방사광 가속기를 활용한 그린수소 생산 관련 연구 결과 ····· 18

4.3.3 그린수소 생산의 연구의 한계점 ····· 20

4.4 재생 에너지 효율 향상 사례 조사 ····· 21

4.4.1 태양전지 ····· 21
4.4.2 나노제너레이터 ····· 23
4.4.3 풍력 ····· 24
4.4.4 바이오매스 ····· 25
4.4.4 해양에너지 ····· 26
4.5 In-Site 실험 고도 분석 ····· 26
4.6 중입자 가속기를 활용한 탄소중립 연구 현황 및 미래 ····· 29
4.7 가속기를 활용한 기술혁신을 위한 정부 정책 조사 ····· 32
4.8 삼촉시 기업의 니즈에 맞는 가속기 기반 분석법 제안 ····· 33

제5장 연구결과의 활용계획 ····· 36
5.1 연구성과 활용방안 ····· 36
5.2 연구수행 기대 및 하급효과 ····· 36

참고문헌 ····· 38

<표 목 차>

<표 1> 국내 주요 가속기 위치 및 구축 연도 ····· 7

<그림목차>

<그림 1> 2018년 구축된 포항가속기연구소 내 AP-XPS 실험실 ····· 6
<그림 2> Cell을 작동하면서 XAS를 측정하는 모식도 ····· 14
<그림 3> 솔라셀 GI-XAD 결과 ····· 15
<그림 4> 고에너지 아이온빔에 의해 데미지가 물질내 생성되고 이에 따른 원자들의 확산을 그린 모식도 ····· 18

제1장 연구개요

본 연구는 삼척시의 미래 산업 동력으로서 탄소중립 기술 개발을 목표로 하며, 이를 위해 방사광 가속기를 활용한 연구 방법, 관련 연구 내용 및 국내외 동향을 체계적으로 조사하였다. 방사광 가속기는 기존 분석장비로는 한계가 있던 소재의 미세구조와 반응 메커니즘을 실시간·정밀하게 규명할 수 있는 첨단 인프라로, 고성능 촉매 개발, 이산화탄소 전환(CCU), 그린수소 생산 등 탄소중립 핵심 소재 및 소자 기술 연구에 필수적인 기반을 제공한다. 본 연구를 통해 방사광 가속기 기반의 에너지 소재·소자 분석 및 실증적 활용방안을 도출하고, 삼척시 산업 특성에 맞는 맞춤형 탄소중립 소재 및 기술 개발 로드맵 마련에 기여하고자 하였다. 이를 바탕으로 삼척시가 실제 산업현장에서 온실가스 저감, 친환경 에너지 전환을 실현할 수 있도록 구체적인 실증과 기술적 지원 전략을 제시하였다.

제2장 연구의 필요성 및 목적

2.1. 연구의 필요성

○ 지구온난화와 이상기후로 인해 탄소중립 실현은 인류 생존을 위한 필수 과제가 되었으며, 이를 위해 그린수소 생산과 이산화탄소 전환(CCU) 기술 개발이 중요합니다.

○ 이러한 기술의 상용화를 위해서는 물산화 전극의 성능 향상, 촉매 반응 메커니즘 이해, 소재 전자구조와 반응도와 같은 핵심 요소 기술의 개발이 필요하며, 방사광 가속기를 활용한 실시간 분석법은 이를 가능하게 하는 혁신적 도구로 주목받고 있습니다.

○ 방사광 가속기는 기존 장비로 어려웠던 소재의 미세구조, 표면 반응 메커니즘을 실시간·정밀하게 분석할 수 있다. 이는 이산화탄소 포집·저장·활용(CCUS), 그린수소 생산에 필요한 촉매 및 전극 개발의 핵심 기반 기술입니다.

○ 삼척시는 발전소, 시멘트 등 탄소 다배출 산업 기반을 갖추고 있다. 방사광 가속기 기술을 활용하면 해당 산업의 공정 개선, 온실가스 저감 검증, 신소재 적용 등 구체적 솔루션의 실증·검증이 용이합니다.

○ 방사광 가속기를 활용한 탄소중립 연구는 삼척시의 대학, 기업, 연구기관들이 공동으로

혁신 생태계를 조성할 기회를 제공한다. 이는 지역 맞춤형 인재 양성과 일자리 창출로 이어져 지속가능한 탄소중립 모델을 뒷받침할 수 있습니다.

2.2. 연구의 목적

방사광 가속기 기반 기술은 삼척시의 탄소중립 실현을 위한 필수적 도구로, 산업별 온실가스 저감, 친환경 에너지 생산, 미래 산업 생태계 조성 등 다양한 분야에서 구조적인 변화를 이끌 잠재력이 크다. 실증적 연구와 혁신 인재 양성을 병행함으로써 삼척시는 대한민국 탄소중립 선도도시로 도약할 수 있다.

제3장 연구의 내용 및 범위

3.1. 연구의 목표

삼척시의 탄소중립 실현을 위해 방사광 가속기를 활용한 첨단 에너지 소재 연구 및 탄소중립 기술개발을 목표로 한다. 본 연구는 가속기 기반 분석법을 다양한 에너지 전환 기술과 연계하여, 실질적 온실가스 감축과 기업 수요에 부합하는 분석 인프라 혁신을 도모하는 데 그 핵심 목적이 있다.

3.2. 연구의 범위

○ 방사광 가속기 기반 에너지 소재 메커니즘 분석

- 차세대 에너지 소재의 구조·전자 상태 및 반응 메커니즘을 방사광 가속기와 In-situ X선 산란 실험을 통해 정밀 분석함으로써, 고성능 에너지 소재의 개발 기반을 마련한다.

○ CO_2 전환 및 활용(활용) 기술 동향 조사

- 이산화탄소의 전기화학적 전환, 고체 탄소소재 합성 등 탄소 자원화 기술의 국내외 연구 동향을 분석하고, 고부가가치 화합물 및 신소재 생산의 가능성을 탐색한다.

○ 그린수소 생산 기술 동향 조사

- 수전해 등 그린수소 생산의 첨단기술 및 실증 프로젝트 현황을 조사하고, 방사광 가속기를 활용한 수소생산용 촉매 분석 등 연계 발전 가능성을 제시한다.

○ 재생에너지 효율 향상 사례 조사

- 태양광 등 재생에너지 활용의 효율 개선 사례와 실질적 탄소 저감 효과를 분석한다.

○ In-situ X선 산란 실험의 신기술 동향 조사

- 실시간·비파괴적 소재 구조 분석을 위한 X선 산란·회절 이미징의 혁신 동향과 연구 벤치마킹 포인트를 정리한다.

○ 가속기 활용 기술 혁신을 위한 정부 정책 분석

- 가속기 기반 신소재 개발 및 산업적 활용 촉진을 위한 정부 정책, 인프라 투자, 지원제도 및 법제화 현황을 조사한다.

○ 삼척시 기업의 니즈와 연계한 가속기 기반 분석법 제안

- 지역 기업의 요구를 파악하여, 맞춤형 방사광 가속기 분석법 및 기술지원 전략을 제안하고, 기술 상용화와 지역 산업 고도화의 로드맵을 수립한다

○ 의료용 중입자 가속기 활용 가능성 모색

- 의료용 중입자 가속기 유치 및 연구 인프라 확대는 향후 의료바이오와 소재과학 융합을 통한 지역 의료서비스 고도화, 고부가 가치 산업 창출에 기여할 수 있는 전략적 선택이 될 수 있다. 이에 따라, 중입자 가속기의 기술적 특성과 운영 사례, 국내 정책 방향 등을 함께 조사하고, 향후 삼척시의 가속기 클러스터 발전 전략에 포함시킬 수 있는 기반을 마련한다.

제4장 연구결과

4.1 가속기를 활용한 국내외 연구 현황

4.1.1 가속기의 정의와 개요

가속기는 전하(電荷)를 띤 입자(전자, 양성자, 이온 등)를 빛의 속도에 가깝게 가속시키는 장치다. 이 장치를 통해 입자에 큰 운동 에너지를 공급함으로써 기존에 관측할 수 없던 물질의 미세 구조, 물리 법칙, 새로운 현상 등을 규명할 수 있다. 초기에는 핵물리학 등 기초과학 연구에 주로 활용됐으나, 최근 생명과학, 의학, 재료공학, 신산업 분야까지 활용 범위가 급속히 확대되고 있다.

가속기 내에서 전기를 띤 입자는 전기장과 자기장의 힘을 받아 직선 또는 곡선 궤도를 따라 빠르게 운동하게 된다. 이렇게 가속된 입자는 물질을 관통하거나, 다른 입자와 충돌해 다양한 입자나 방사광을 발생시킨다. 충돌 과정에서 원자핵이 분열하거나, 새로운 미지의 입자가 생성되며, 방사광(고에너지 X선 등)이 동시에 방출된다. 이를 분석해 미시세계의 물리적 원리를 밝혀낸다.

4.1.2 국내 가속기 현황

현재 우리나라에는 총 6기의 대형가속기가 구축 및 운영되고 있다. 대표적으로는 포항의 3세대(1995년 개소)와 4세대(2016년 개소) 방사광가속기, 경주의 양성자가속기(2012년 완공), 대전의 중이온가속기(2011년 착공, 2025년 R&D 단계), 부산의 중입자가속기(의료용, 구축 중), 그리고 충북 청주 오창에 들어설 다목적 방사광가속기(2027년 완공 예정)가 있다. 히, 포항 방사광가속기는 세계적으로도 손꼽히는 빛의 원천 기술을 제공하며, 다목적 방사광가속기(청주 오창)는 반도체・2차전지・바이오 등 미래 핵심 산업을 지원하는 국가적 인프라로 주목받는다. 정부는 대형가속기 인프라의 지속적인 확대와 효율적 운영, 산업체 활용 활성화를 위해 체계적인 장기 투자와 혁신 전략을 추진하고 있다.

본 연구 보고서에서 주로 다루는 포항 방사광가속기로 대표되는 전자 가속기는 초대형 국가연구 인프라로, 초기 건설부터 정부와 민간이 공동 투자하는 방식으로 추진됐다. 3세대 가속기는 1,500억 원의 건설비 중 약 60%를 포스코(구 포항제철) 등 민간이, 나머지

600억 원은 정부가 부담하여 1994년 완공되었다. 이후 4세대 방사광가속기는 2011년부터 2015년까지 약 4,300억 원이 투자됐으며, 이 중 대부분을 국가가, 260억 원을 지방자치단체가 분담하였다. 2010년 이후 포항가속기연구소의 운영비는 전액 정부에서 지원하며, 연간 600억~675억 원 대가 투입된다. 특히, 연간 운영에는 수백억 원이 소요되며, 그 중 전기료만 매년 100억 원 이상을 차지할 정도로 대규모 예산이 집행되고 있다.

포항가속기연구소는 정부로부터 100% 출연금으로 운영된다. 2025년 기준 연간 지원 예산은 약 675억 원이다. 이 예산에는 인건비, 장치 유지보수비, 실험 운영비, 전력 비용 등이 포함된다. 포항가속기 이용은 공개 과제의 경우 하루 10만 원, 비공개 과제는 150만 원의 이용료로 빔라인 배정이 이뤄진다. 고정 예산 외에도 R&D 프로젝트, 빔라인 신규 구축과 성능 향상 등에 수십~수백억 원 단위의 추가 투자가 정기적으로 이루어진다.

포항 방사광가속기는 국내외 과학자·산업체 연구자들에게 실질적으로 제공되어 연간 6,000명 이상의 이용자가 빔라인 서비스를 활용한다. 현재 3세대 방사광가속기는 39개 빔라인을, 4세대(XFEL)는 독립된 레이저 빔라인을 제공한다. 매년 발표되는 SCI(E) 논문은 500여 편을 넘으며, 인용지수(IF)도 평균 7~9대에 이른다. 다수의 세계적 학술지(Nature 등) 논문 게재, 신약 개발을 위한 구조 규명, 신소재·반도체·이차전지 등 핵심 산업 분야에서의 구조 분석, 광통신 소자·철강제품 생산 공정 혁신 등의 실적을 기록해왔다. 누적 연구과제는 4,300건을 넘으며, 2,200여 건 이상의 논문 성과가 축적되어 있다. 산업체 참여율도 높아, 선진국 대비 실용적 활용 성과가 빠르게 늘어나고 있다.[1)]

<표 1> 국내 주요 가속기 위치 및 구축 연도

국내 가속기	위치	구축 연도	주요용도
포항3세대	포항	1995	방사광 X선
포항4세대	포항	2016	방사광 X선
경주 양성자	경주	2012	기초과학, 의료
대전 중이온	대전	2025 (예정)	기초과학
청주 다목적	청주	2027 (예정)	다목적 첨단연구
부산 중입자	부산	구축 중	의료

4.1.3 국내 중입자 가속기 현황

연세의료원 신촌세브란스병원이 2025년 기준으로 중입자 가속기를 활용한 치료를 본격

1) pal.postech.ac.kr

적으로 시행하며 중입자치료의 시대를 열고 있다. 이 센터에는 대형 싱크로트론과 갠트리 등 최첨단 중입자 치료설비가 도입되었고, 전체 사업비는 3,000억 원을 상회한다. 국내 최초로 도입된 이 중입자치료 시설은 암 환자 치료 효율과 생존율을 크게 높일 것으로 기대되며, 두경부암, 췌장암, 직장암 등 난치성 암종을 중심으로 진료 영역을 확장하고 있다. 최근 5년 내 전국적으로 중입자 가속기 도입이 확산되는 추세다. 서울대병원은 과학기술정보통신부 및 부산시와 함께 부산 기장군에 중입자치료센터를 2027년 개원을 목표로 건립 중이다. 서울아산병원 또한 송파구 본원에 중입자치료기 도입을 공식화했으며, 제주대병원 역시 2026년 초가동을 목표로 약 5,000억 원 규모의 사업을 추진하고 있다. 중입자 가속기는 수소보다 무거운 탄소 이온 등 중이온을 빛에 가까운 속도로 가속시키는 첨단 장비로, 주로 의료용 암 치료에 활용되지만 그 활용 범위는 탄소중립을 위한 에너지신소재 개발을 포함한 다양한 과학기술 연구로 확장되고 있다. 중입자 가속기의 고에너지 입자 빔은 물질 내 미세 구조 변화를 유발하거나 신물성을 창출하는 데 유용하며, 이를 이용해 고기능성 신소재 개발이 가능하다.

4.1.4 국외 가속기 현황

전 세계적으로 미국, 유럽, 일본, 중국 등 선진국을 중심으로 4세대 방사광가속기, 중이온가속기, 자유전자레이저(XFEL) 등 초고성능 가속기 구축이 활발하게 이뤄지고 있다. 미국은 LCLS-II, APS-U와 같은 첨단 방사광가속기를 운영 중이며, 스위스의 SLS-2, 독일의 European XFEL, 스웨덴의 MAX IV 등 유럽 역시 세계적 연구 인프라를 확보했다. 일본은 SPring-8과 SACLA, 중국은 SSRF, BEPCII와 더불어 초대형 XFEL 및 강입자가속기를 지속적으로 확장 투자하면서 가속기 기술력을 빠르게 높이고 있다. 이처럼 각국은 기초과학, 산업, 의료 등 첨단 분야의 글로벌 경쟁력 강화를 위해 국가 주도로 대규모 인프라를 조성하고, 차세대 가속기 개발에 전략적 투자를 아끼지 않는다.

최근에는 가속기를 활용한 기초과학 연구뿐만 아니라 신소재・에너지・생명과학・첨단의료 등 실용적 연구 지원과 산업화 연계가 더욱 강조되고 있다. 주요 국가들은 가속기 기반 국제 공동 연구, 혁신적 빔라인 서비스 개발, 빅데이터・AI 융합 빅사이언스 추진 등 세계적 연구 네트워크를 강화하며, 신규 가속기 건설과 동시 업그레이드를 병행해 미래 과학기술 허브로 도약하고 있다. 이러한 추세 속에서 가속기는 혁신 기술의 핵심적 인프라로 자리매김하고 있으며, 세계 각국의 과학 및 산업 발전을 이끄는 중추적 역할을 하고 있다.

4.1.5 국외 중입자 가속기 현황

주요 선진국은 대규모 중입자(heavy ion) 가속기 시설 구축을 선도적으로 진행 중이다. 대표 시설로는 미시간 주립대의 FRIB(희귀동위원소 빔 시설), 버클리 랩의 BEVALAC, Brookhaven 국립 연구소의 RHIC, 독일의 GSI(Helmholtz Center for Heavy Ion Research), 일본은 치바 HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba), 스위스, 프랑스 등도 각국의 입자물리 연구소에 중이온 가속기 시설을 구비하고, 국제 공동연구 환경을 지원하고 있다. 중국은 2024년 LEAF(Low Energy high-intensity heavy-ion Accelerator Facility) 등 신형 중입자 가속기 개발을 완료하였다. 선진국의 중입자 가속기는 단순 의료용 뿐만 아니라 탄소 중립을 위한 에너지 신소재 개발에 다양하게 응용되고 있다.

4.2 방사광 가속기 활용 CO_2전환 및 활용 기술 연구 동향 조사

이산화탄소(CO_2) 전환 기술은 대기 중 또는 산업 공정에서 포집된 CO_2를 효율적으로 변환하여 에틸렌(C_2H_4), 포름산(HCOOH), 일산화탄소(CO) 등 고부가가치 연료 또는 화합물로 활용하는 기술을 말한다. 이는 단순한 탄소 포집·저장(CCS)을 넘어, 실제 자원화(Carbon Utilization)를 추구하는 '탄소순환경제'의 핵심 기술로 평가받고 있다. 최근에는 재생에너지(태양광, 풍력 등)와 연계하고, 그린수소 기반의 전기화학적 전환공정과 접목되면서 다양한 산업 현장에서 활용 가능성이 높아지고 있다.

방사광 가속기는 이 과정에서 매우 중요한 역할을 한다. CO_2 전환 반응은 보통 나노 수준의 촉매 소재를 기반으로 복잡한 화학적 변화 메커니즘을 동반하게 되는데, 이를 실시간으로 분석하고 원자·전자 수준에서 반응성을 규명하기 위해서는 고해상도의 X-선을 활용한 In-situ 및 Operando 분석기술이 필요하다. 이러한 분석이 가능한 대표적인 도구가 바로 방사광가속기이며, 현재 국내외에서 해당 시설을 이용한 촉매 분석 및 신소재 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 보고서에서는 CO_2 전환 반응 연구에서 널리 활용되고 있는 In-situ XAS, AP-XPS, XRD, XAS-현미경 연동 분석법의 원리와 특징을 문장 중심으로 상세히 기술하고자 한다.

4.2.1 AP-XPS (Ambient Pressure X-ray Photoelectron Spectroscopy)

대기압 X-선 광전자 분광(AP-XPS, Ambient Pressure X-ray Photoelectron

Spectroscopy)은 고체 표면에 X-선을 조사하여 방출되는 광전자의 에너지를 분석함으로써, 해당 표면의 원소 조성, 화학 결합 상태, 산화수, 전자 구조 등을 정밀하게 규명하는 표면 분석 기법이다. XPS는 물질 내부의 원자가 고에너지 X-선을 흡수하면, 그 결과로 내부 전자가 이탈하여 표면 밖으로 방출되며, 이 광전자의 운동 에너지를 측정하면 원자의 결합 에너지를 역산할 수 있다. 각각의 원소는 고유한 결합 에너지를 가지므로, 이 분석을 통해 표면에 존재하는 원소의 종류뿐 아니라 그 화학적 상태(예: 산화 상태, 전하 상태)까지 파악할 수 있다.

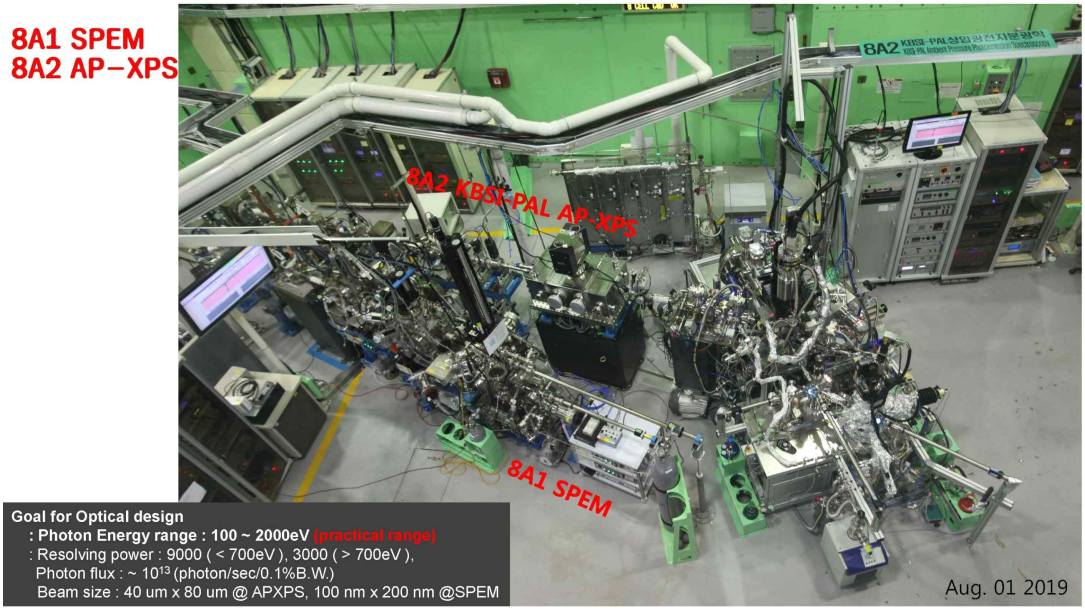
전통적인 XPS 기술은 초고진공(10^{-7}~10^{-10} torr) 환경에서만 작동 가능하기 때문에, 실제 반응이 일어나는 조건과는 큰 차이가 있으며, 반응성이 높은 촉매 표면이나 기체 분자와의 상호작용을 관찰하는 데에 제약이 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위해 개발된 AP-XPS는 수십에서 수천 Pa(0.1~10 torr 수준)의 비교적 높은 압력 조건에서도 정밀한 전자 분석이 가능하도록 구성되어 있어, 실제 환경 조건에서 시료의 화학적 변화를 실시간(in-situ 또는 operando 조건)으로 관찰할 수 있는 첨단 장비이다.

이 기술의 가장 큰 장점은 반응이 진행되는 순간에도 시료 표면의 전자 구조와 화학 상태를 직접 추적할 수 있다는 점이다. 예를 들어 CO_2 전기화학 환원 반응(catalytic CO_2 RR)에서, 촉매 표면에 CO_2 가스를 도입한 상태로 실험을 진행하며, 전압을 인가한 조건에서 구리(Cu) 촉매의 산화 상태가 Cu^+에서 Cu^0으로 변환되거나, 반응 중간체(formate, CO 등)가 생성되면서 결합 에너지에 미세한 변화를 일으키는 과정을 실시간으로 기록할 수 있다. 이를 통해 촉매의 활성 부위가 어디인지, 특정 조성이나 결정면이 어떤 생성물 선택성을 유도하는지를 원자 수준에서 이해할 수 있게 된다.

이와 같은 성능 덕분에, AP-XPS는 오늘날 탄소중립 핵심 기술로 주목받고 있는 CO_2 전환(catalytic CO_2 utilization), 수소 생산(water splitting), 산소 환원(oxygen reduction) 반응 등 다양한 에너지 소재 연구에 폭넓게 활용되고 있다. 특히, 촉매의 중간 산화 상태, 금속과 비금속 간의 상호작용, 표면 재구조화 현상 등 초미세한 전자화학적 변화를 추적함으로써, 기존의 열역학 중심 설계에서 벗어난 전자구조 기반의 맞춤형 촉매 설계로의 전환이 가능해졌다.

또한, AP-XPS는 실험 가능한 시료 환경 범위의 확대로 인해 고체 촉매뿐 아니라 액상 셀 전극, 연료전지 계면, 이차전지 소재 등 복합계면에서도 유효하게 동작할 수 있으며, 3~5나노미터 수준의 표면 분해능을 통해 표면 반응뿐 아니라 계면 반응 영역에서도 정밀한 분석이 가능하다. 이 기술은 고온, 고압, 습식 등의 조건을 직접 센서나 셀에 구현하면서도 높은 에너지 분해능과 공간 분해능을 유지할 수 있다는 점에서 연구자 및 산업계 모두에게 매우 중요한 실험 도구로 자리매김하고 있다.

결론적으로, AP-XPS는 고전적인 XPS 기술의 공간적·환경적 한계를 과학적으로 극복하면서, 실제 반응 조건에서 촉매나 재료의 화학적 특성을 실시간으로 관찰할 수 있는 분석 플랫폼을 제공한다. 이러한 분석 결과는 반응 메커니즘의 정량적 해석, 신규 촉매 설계, 에너지 소재 기능 평가 등 다양한 분야에서 활용되며, 탄소중립 실현을 위한 핵심 원천기술로서 연구 가치를 인정받고 있다.



<그림 1> 2018년 구축된 포항가속기연구소내 AP-XPS 실험실

2023년, KAIST와 UNIST 공동연구진은 포항 4세대 방사광가속기의 In-situ XAS(X-ray Absorption Spectroscopy) 및 AP-XPS(대기압 X-선 광전자분광) 기법을 사용하여, 구리(Cu) 기반 촉매의 CO_2 전기환원 반응(CO_2 RR) 중 표면 상태 변화와 생성물 선택성 메커니즘을 공동 분석하였다.

일반적인 평면 구조(Cu(111))가 아닌, 계단과 결함이 다수 존재하는 비평면 결정면인 Cu(997) 표면에 주목하였다. 이는 실제 산업 및 전기화학 반응 환경에서 흔히 발생하는 구조이기 때문에, 이 표면에서의 CO_2 반응 특성을 규명하는 것이 중요한 연구 과제로 여겨진다. Cu(997) 표면의 계단(edge) 영역은 CO_2 분자의 해리에 매우 높은 활성을 가지며, 이 계면에서 CO_2가 해리되어 일산화탄소(CO)와 원자 상태의 산소(O)가 형성되는 것이 직접 관측되었다. 해리된 산소는 구리 표면에 흡착되어 재구조화를 유도하고, 이로 인해 표면의 금속 원자는 군집화(nanocluster)되거나 다층적 구조변화를 일으키는 것으로 나타났다. 이때 생성된 CO는 표면에 단단히 결합하지 않고 약하게 흡착되어 있으며, 인접한 CO 분자 간의 척력(repulsive interaction)이 표면에서 동적 구조 변화(구조적

군집의 확산 및 재정렬)를 촉진함을 밝혔다. 이렇게 형성된 표면 구조는 CO_2 해리 반응성이 높아지는 활성 상(active phase)의 핵심임이 입증되었다.

또한, 연구진은 O_2 또는 CO 가스를 투입하여 구조적 복원 가능성을 테스트하였으며, 일부 구조는 가역적으로 복구되었지만, 일정 수준 이상의 산화가 진행된 후에는 비가역적 결함(fixed defects)이 표면에 잔존함을 확인하였다. 이는 CO_2 전환 중 구조 재배열이 촉매의 장기 성능 및 수명에 영향을 줄 수 있음을 시사한다. 이러한 연구는 방사광 기반 분광 기술이 복잡한 전기화학 반응의 본질을 규명할 수 있는 결정적 도구로 활용되었다.

4.2.2 In-situ XAS (X-ray Absorption Spectroscopy)

In-situ X-선 흡수 분광법(이하 In-situ XAS)은 특정 원소의 X-선 흡수 특성을 분석함으로써, 물질 내 원자의 산화 상태, 전자 구조, 주변 원자 배열 등 미세 구조 정보를 실시간으로 파악하는 정밀 분석 기술이다. 이 방법은 특히 반응이 일어나는 환경에서 시료를 측정할 수 있다는 점에서, 전기화학 반응, 촉매 작용, 배터리 구동 등 동적인 시스템을 연구하는 데 필수적인 도구로 활용되고 있다.

XAS의 기본 원리는 시료에 조절된 X-선을 조사했을 때 대상 원소가 가지는 고유의 흡수 에너지에서 강한 흡수 현상이 나타나는 점을 이용하는 데 있다. 이때 발생한 신호는 크게 두 개의 영역으로 나뉘는데, 첫 번째는 X선 흡수 에지 근처에서 관찰되는 XANES(X-ray Absorption Near Edge Structure) 영역으로, 주로 측정 대상 원소의 산화수, 전자 배위 환경, 국소대칭성 등을 파악할 수 있다. 두 번째는 흡수 에지 이후 에너지 영역에서 나타나는 EXAFS(Extended X-ray Absorption Fine Structure) 영역으로, 원자 간 결합 거리, 주변 원자 수, 구조적 결함 등 정량적인 국지 구조 정보를 제공한다.

In-situ XAS는 이러한 XAS 분석을 실험실 내 조건이 아닌, 실제 반응이 일어나는 환경 즉, 온도, 압력, 전압, 반응 기체 등이 조성된 상태에서 수행할 수 있도록 한 실시간 분석 기술이다. 예를 들어, CO_2 전기화학 전환 반응 연구에서는, 촉매 위에 CO_2 를 주입하고 전압을 가한 상태에서 촉매 금속의 산화수가 어떻게 바뀌는지, 표면 구조가 어떻게 재구조화되는지 등의 과정을 연속적으로 측정할 수 있다. 이러한 정보는 반응 중 형성되는 활성 종(active species)이나 중간체(intermediate) 구조를 파악하고, 실제 반응성과 선택성에 어떤 영향을 미치는지를 규명하는 데 결정적인 역할을 한다.

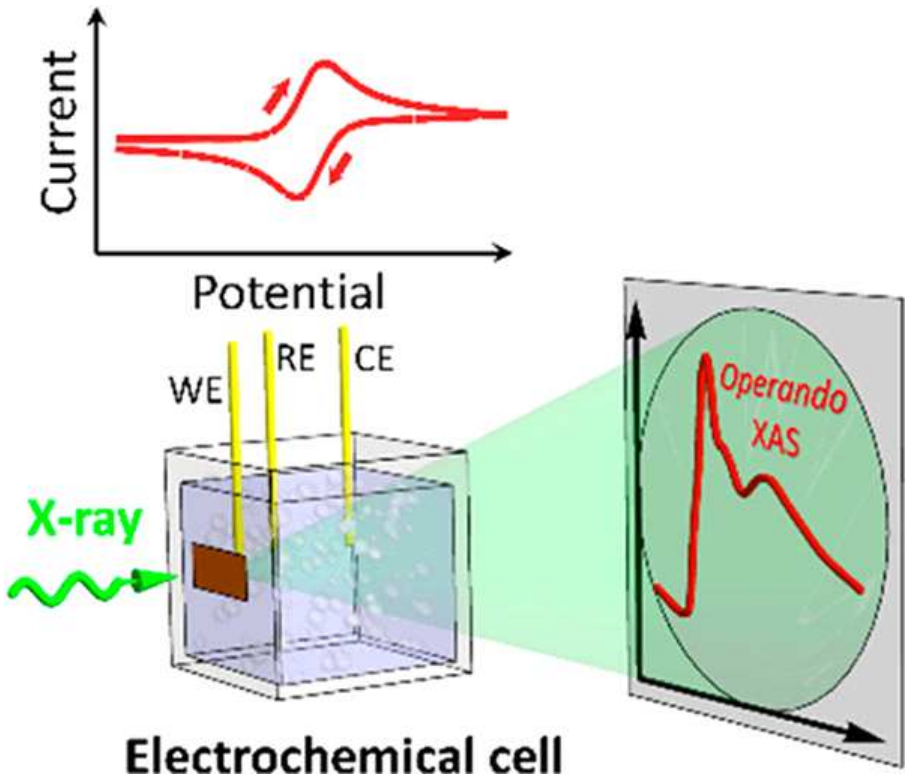
In-situ XAS의 가장 큰 장점은 반응이 진행되는 중에도 시료를 비파괴적으로,

연속적으로 측정할 수 있다는 점이다. 또한, 이 기법은 원소 선택성이 뛰어나 다성분 복합 재료에서도 원하는 특정 금속이나 원소의 상태만을 분리해 분석할 수 있으며, 촉매와 반응물 간의 전자 이동이나 전자 밀도 분포의 변화를 시간의 흐름에 따라 정밀하게 파악할 수 있다. 이에 따라 XAS는 기존의 ex-situ(반응 전·후의 상태 분석) 방식으로는 얻기 어려웠던 동적 구조 변화와 일시적 상태를 포착할 수 있는 분석 수단으로 점차 표준화되고 있다.

실제로, 전기화학 CO_2 디바이스를 이용해 이산화탄소를 포름산, 일산화탄소, 에틸렌 등으로 환원시키는 반응의 경우, 금속 촉매가 반응 과정에서 명확하게 산화·환원 과정을 거치는 것으로 알려져 있다. In-situ XAS는 이와 같은 산화 상태 변화와 구조 불균일성, 촉매의 재배열 과정 등을 실시간으로 보여주며, 반응을 정량적 데이터로 해석할 수 있게 해준다.

이 기술은 오늘날 ▲전기화학 촉매 반응, ▲이차전지 양·음극재, ▲수소 발생 및 저장, ▲환경 오염물 제거 기술, ▲기초 재료 물성 분석 등 다양한 분야에서 폭넓게 활용되고 있으며, 나노촉매 및 신소재 기술과 접목해 촉매의 설계와 성능 예측에 기여하고 있다. 특히 In-situ XAS와 인공지능(AI), 머신러닝 기반 모델링 기술이 결합되면서, 실험 기반의 반응 예측과 맞춤형 촉매 디자인이 가능해지고 있어 과학기술 패러다임의 전환을 이끌고 있다.

결론적으로, In-situ XAS는 재료 내부에서 일어나는 복합 구조 변화와 전자 상태의 움직임을 실시간으로, 정량적으로, 그리고 원소 특이적으로 측정할 수 있는 강력한 분석 도구이며, 탄소중립을 위한 핵심 기술인 CO_2 전환 연구에 있어 필수적인 기반 장비로 자리매김하고 있다.



<그림 2> Cell을 작동하면서 XAS를 측정하는 모식도

구리(Cu)와 주석(Sn)으로 구성된 이중 금속 합금 촉매를 사용하여, CO_2를 전기화학적으로 환원시켜 고부가가치 화합물인 포름산(HCOOH)으로 선택적으로 전환하는 반응 과정을 방사광 기반 In-situ XAS(X-ray Absorption Spectroscopy)를 통해 실시간 분석하고, 반응 메커니즘 및 전환 효율을 정밀하게 규명한 사례가 있다.

다양한 몰비의 Cu-Sn 합금을 제조하고, 이 합금 촉매를 수용액 기반 전기화학 셀에 장착하여 −0.5 ~ −1.0 V (vs. RHE)의 전위 영역에서 CO_2 전기환원 반응을 수행하였다. 반응 중 촉매 표면의 구조와 화학 상태 변화는 In-situ XANES 및 EXAFS 분석을 통해 추적되었다. XANES 분석 결과, 반응 초기에 Sn은 Sn^{2+}의 산화 상태로 존재하며, 반응 중에도 이 산화 상태가 일정 부분 유지되는 것이 확인되었다. 이는 Sn이 촉매 표면에서 안정적인 전자 공급원(전자 도너)으로 작용함을 시사하며, 이와 동시에 Cu는 Cu^0 상태로 존재하여 CO_2 분자의 흡착 및 활성화에 관여하였다. 중요한 점은 Cu와 Sn 간 계면 부위에서 전자 밀도 분포가 변화하면서, $HCOO^-$ (formate) 중간체 형성이 가속화되고, H 또는 CO 중간체로의 전환은 상대적으로 억제된다는 사실이었다. EXAFS 분석을 통해서는 Cu-Sn 간 결합 거리 변화, 주변 원자 수(N) 감소 등이 실시간으로 관찰되었으며, 이는 반응 활성화에 따라 촉매 표면이 재구조화(restructuring)되고 있음을 뒷받침한다.

인공적인 귀금속 촉매(Co, Ag 등) 없이도, 전이금속 기반 저가 촉매로 이와 같은 전환

효율과 선택성을 달성했다는 점에서 본 연구는 탄소중립 기반의 산업적 CO_2 자원화 기술로서 매우 높은 평가를 받고 있다.

최근에는 단일 원자 수준에서 금속이 고정된 질소 도핑 탄소 구조체(M-N-C; Metal-Nitrogen-Carbon) 기반 촉매가 CO_2 전환 반응에서 높은 활성을 보이는 것으로 밝혀졌다. Ni-N-C, Fe-N-C, Co-N-C와 같은 단원자 촉매(Single-Atom Catalyst, SAC), 그리고 Fe-Co-N-C와 같은 이중원자 촉매(Dual-Atomic Catalyst, DAC)를 활용하여 CO_2 전환 반응의 전자 구조 변화와 선택성 메커니즘을 방사광 가속기 기반 In-situ XAS 분석을 통해 실시간으로 관찰했다. In-situ XANES 분석에서는, 반응 초기 Ni-N-C 촉매 내에서 니켈의 산화 상태가 Ni^{2+}에서 Ni^0 혹은 $Ni^{\delta+}$ (partial reduction)로 점진적으로 환원됨이 확인되었으며, 이때 Ni 주위 배위 구조는 4배위 또는 5배위 질소 착물($Ni-N_4$, $Ni-N_5$) 형태로 비대칭적 구성임이 나타났다. 이 구조 변화는 CO_2 분자의 전자성과 상호작용하며, CO 중간체의 안정화와 탈착 단계를 조절하여 CO 생성 선택성 >90%를 실현하였다.

이중원자 촉매(Fe-Co-N-C)의 경우, 보다 복합적인 전자 밀도 이동과 결합 거리 변화가 EXAFS 분석에서 동시적으로 포착되었다. 반응성이 높은 Fe/Co의 이중 중심에서, 전자 밀도 재분포에 따라 CO_2가 최초로 흡착되는 부위와 분해 반응이 일어나는 부위가 구별되었고, 이에 따라 CH_4 또는 메탄올과 같은 다중환원 생성물이 선택적으로 형성되는 경향이 관찰되었다. 또한, 반응이 진행됨에 따라 Fe 또는 Co 금속이 부분적으로 금속 군집 초기 형태로 응집되는 현상(재구조화)도 확인되었는데, 이는 반응 효율의 향상보다는 선택성 변화 및 장기 안정성 저하에 일정한 영향을 미치는 것으로 평가된다. 이러한 동적 변화는 In-situ XAS 기술 없이는 포착하기 어려운 매우 정밀한 반응 메커니즘 정보이며, 합성 및 조성 제어를 통한 촉매 설계에 결정적인 데이터를 제공하고 있다.

이러한 연구는 SAC/DAC 구조의 전자 밀도 제어와 국소 배위 구조 조절이 CO_2의 선택적 전환 효율 및 생성물 분포에 직접적인 영향을 준다는 사실을 실험적으로 입증한 의미 있는 결과이며, 다양한 M-N-C 촉매 플랫폼에서 고정밀 원자 단위 설계의 필요성과 가능성을 동시에 보여준다.

4.2.3 In-situ XAS-Microscopy 연동분석법

In-situ XAS-Microscopy 연동 분석법은 X-선 흡수 분광법(XAS)과 고해상도 현미경 분석(Microscopy)을 결합하여, 한 실험 내에서 물질의 전자 구조 변화와 나노·미세 구조

변화를 동시에, 실시간으로 관측할 수 있는 첨단 분석 기술이다. 이 방법은 물질 내 국소 구조의 화학적 변화와 물리적 구조의 시각적 변화를 통합적으로 분석함으로써, 복합적인 반응 시스템이나 동적인 재료 변화 현상을 보다 입체적으로 이해할 수 있도록 돕는다.

XAS는 특정 원소의 흡수 단에 해당하는 에너지의 X-선을 시료에 조사하고, 그 흡수량을 분석함으로써 해당 원소의 산화 상태, 전자 배위 환경, 주변 원자와의 결합 거리 등을 정밀하게 파악하는 데 사용된다. 동시에, 고해상도 전자현미경(SEM, TEM), 혹은 싱크로트론 기반의 X-선 현미경 기술을 활용하면, 물질의 표면 구조, 나노 크기의 입자 배열, 입자 간 응집 혹은 재결정화 현상 등을 시각적으로 관찰할 수 있다.

연동 분석에서는 같은 시료 내 동일 위치 또는 동일 시점에서 이 두 방법을 함께 적용하여, XAS로 측정된 전자 구조 변화와 현미경으로 관찰된 공간적 구조 변화 사이의 상관관계를 직접적으로 분석한다. 예를 들어, 전기화학적 CO_2 환원 반응 중 구리 촉매의 산화수가 Cu^+에서 Cu^0로 환원되는 것이 XAS를 통해 확인되었을 때, 이 반응 과정에서 나타나는 표면의 나노구조 변화나 입자의 재배열은 현미경 영상으로 동시에 관찰될 수 있다. 이렇게 양쪽 데이터를 결합하면, 단순한 전자 상태 변화뿐 아니라, 해당 변화가 어떤 형태적 재구성으로 연결되는지, 어떤 반응 활성 부위가 형성되는지를 분명히 해석할 수 있다.

In-situ 방식에서는 이런 분석이 실제 반응 조건, 예를 들어 특정 온도, 압력, 기체 조성, 또는 전기화학적 전압이 가해진 상태에서 이루어진다. 따라서 반응 과정 중에만 나타나는 일시적인 전이 상태나 중간체, 혹은 동적 재구조화 현상까지도 실시간으로 관찰할 수 있다는 점이 가장 큰 장점이다. 이러한 연동 분석은 기존에는 분리된 기법으로 각각 수행되던 화학 분석과 구조 분석을 하나의 시스템 안에서 동시에 수행할 수 있도록 한 매우 진보된 기술이다.

이 분석법은 특히 CO_2 전환, 수소 생산, 연료 전지, 이차전지, 고체 촉매 및 나노소재 등 다양한 분야에서 실제 반응 조건 하에서 물질이 어떻게 변화하는지를 입체적으로 조사하는 데 유용하다. 예를 들어, Ni 기반 단원자 촉매(Ni-N-C)의 CO_2 환원 연구에서 XAS로 Ni의 산화 상태 변화를 실시간 추적하고, 동시에 TEM을 통해 Ni 원자가 반응 중 표면에 재배열되는 현상을 관찰함으로써, 촉매의 활성화 메커니즘을 보다 정확하게 규명할 수 있다.

결과적으로, In-situ XAS-Microscopy 연동 분석법은 단일 기법으로는 얻기 어려운 전자 구조 변화와 물리적 구조 변화의 시간적·공간적 상관관계를 통합적으로 해석할 수 있게 하며, 이를 통해 고성능 촉매 설계, 에너지 소재 개발, 반응 메커니즘 규명 등에 크게 기여하고 있다. 이는 과학기술의 기초 이해뿐 아니라, 실제 산업 응용과 탄소중립 실현을

위한 실용 기술 개발 측면에서도 매우 중요한 분석 방식으로 평가된다.

4.2.4 방사광 X-선 회절 (XRD)

방사광 X-선 회절(XRD)은 결정성 물질의 미세 구조와 배열을 규명하는 가장 대표적인 비파괴 분석법 중 하나이다. 이 기법의 기본 원리는 단일 파장 또는 다중 파장의 고강도 X-선 빔이 시료에 입사될 때, 결정 내부의 원자면에서 X-선이 반사되어 특정 각도에서 강한 간섭과 회절 무늬를 생성하는 데 있다. 이는 브래그(Bragg)의 법칙으로 표현되며, 각 원자평면 간 거리와 입사 X-선의 각도, 그리고 파장 사이의 수학적 관계를 이용해 시료의 결정 구조를 정밀하게 분석할 수 있게 해준다.

방사광 가속기를 활용한 XRD는 기존 X-선 장치에 비해 수십~수백 배 이상 밝고, 매우 짧은 펄스(수 ps~ns) 및 넓은 파장 범위의 X-선을 생성할 수 있으므로, 극히 미량의 시료나 나노미터 크기의 결정체에서도 강한 회절 신호를 얻어낼 수 있다. 이로써 미세입자, 박막, 나노재료 등 정밀도가 요구되는 첨단 소재를 분석할 수 있을 뿐 아니라, 빠르게 변화하는 화학 반응이나 구조 전이도 실시간으로 모니터링할 수 있다.

일반적인 XRD 분석에서는 X-선을 시료에 조사하면서 회절 신호가 발생하는 각도를 측정하고, 이 신호의 패턴을 해석해 시료의 격자 상수, 대칭성, 결정 구조, 미세결정 크기, 결함, 잔류응력 등 다양한 구조 정보를 파악한다. 방사광 XRD는 고속 검출기와 연동해 환경 변수(온도, 압력, 전기장 등)가 변화할 때의 시료 내 구조 변화, 상변화, 자발적 재결정화, 새로운 상 생성과 소멸 등 극도로 짧은 시간 단위(수 ms~μs)의 동적 변화를 정밀하게 측정할 수 있다.

실제로, 전기화학적 CO_2 전환 반응처럼 촉매 표면이나 구조체가 빠르고 복잡하게 변화하는 경우, 방사광 XRD를 이용하면 반응 전후뿐 아니라 반응이 진행되는 중에도 결정 상의 변환, 새로운 활성상(phase)의 형성 및 소멸, 나노클러스터의 응집 또는 확산 등 미세 구조 변화를 명확히 추적하고 해석할 수 있다. 이를 통해 촉매 및 신소재의 반응 메커니즘을 구체적으로 밝히고, 최적의 합성·운용 조건을 도출할 수 있다.

방사광 X-선 회절(XRD)는 결정성 소재의 반응 및 구조 변화를 실시간으로 정밀하게 추적할 수 있기 때문에, 최근 CO_2 전환 촉매 및 신소재 연구에서 핵심 분석 도구로 각광받고 있다. 구체적으로, 다음과 같은 주요 연구 성과들이 보고되고 있다.

(1) 서울대학교와 KAIST 공동연구진은 방사광 XRD를 활용해 구리(Cu) 기반 전기화학 촉매에서 CO_2가 에틸렌으로 환원되는 반응 중 촉매의 구조적 변화와 활성 상 전이

현상을 실시간으로 추적하였다. 이 연구에서 연구진은 전기화학적 환원 과정에서 촉매 표면에 수산화구리($Cu(OH)_2$)와 구리 이온상(Cu^{2+})이 일시적으로 형성되고, 이는 일종의 보호막 구실을 하면서 일시적으로 매우 활성이 높은 상(active phase)이 촉매에 출현함을 확인하였다. 이러한 활성 상의 형성은 에틸렌 생성의 선택성과 효율을 비약적으로 향상시키는 것으로 나타났으며, XRD와 X-선 미세현미경(STXM) 등의 연동 분석을 통해 산화 상태 변화, 결정상 재배열, 생성물 선택성 간의 인과관계가 정량적으로 입증되었다.[2)]

(2) 현무암 등 천연광물 기반 소재 내에서 CO_2 가 고정되는 광물화(mineralization) 과정 역시 방사광 XRD를 이용해 상세히 분석되고 있다. 연구진은 고온·실시간 in-situ XRD 측정으로, 현무암에 주입된 CO_2 가 칼슘·마그네슘·철 탄산염 등 새로운 광물 상으로 변화하는 반응 경로와 주요 속도 결정 단계, 그리고 탄산염 생성·소멸 메커니즘을 실제 반응 시나리오 하에서 파악할 수 있었다. 이러한 데이터는 대기 또는 배기가스 CO_2 의 제어된 광물 고정, 탄소자원화 신공정 개발, 그리고 천연 탄소순환 공학 최적화의 과학적 기반이 된다.[3)]

(3) 코발트, 니켈 등 금속 촉매의 CO_2 환원·전환에 있어서도 XRD는 반응 온도, 환원·산화 분위기, 전기화학 조건 변화에 따른 상(phase) 전이, 결정립 성장, 금속-산화물 상간 변환 등을 정밀하게 계측한다. 이러한 실시간 구조 변화 계측은 촉매의 열화, 구조적 안정성, 장시간 운전에 따른 내구성 평가 및 장기 재현성 확보에 중요한 실험 데이터로 활용되고 있다.[4)]

마지막으로, CO_2 에서 출발한 고부가가치 탄소 나노튜브, 그래핀 등의 합성 공정에서도 방사광 XRD는 합성 진행 중의 결정상 전이, 다층 그래핀/단층 그래핀 분포, 나노튜브 직경 분포, 신생 나노구조 형성 등을 온도·반응 조건별로 정밀하게 추적할 수 있다. 이 데이터는 최적 조건 도출과 첨단 전자소재 개발의 실용적 근거로 활용되고 있다.

이처럼 방사광 XRD는 매우 짧은 시간 간격과 극미량의 시료 측정에서도, 촉매 및 소재의 결정상 변화, 활성 상 형성, 구조 재배열 등 CO_2 전환 반응의 미세 구조 변화를 비파괴적으로, 실시간으로 해석한다. 이로써 CO_2 전환의 효율 및 생성물 선택성 향상, 최적 반응 조건 및 신소재 설계, 촉매 수명 및 구조 안정성 평가 등, 탄소중립 실현 핵심기술 분야에서의 과학적 확증 자료를 지속적으로 제공하고 있다.

---

2) J. Kim et al., Spatiotemporal active phase evolution for CO2 electrocatalysis, Joule, 8, 3373 (2024)
3) J. H. Park et al., Role of intercalated water in calcium hydroxide interlayers for carbonation reaction, Chemical Engineering Journal, 420, 130422 (2021)
4) 조흔태, 김재훈, Co2 Conversion by controlling the reduction temperature of cobalt catalyst, Clean Technol., 30, 118 (2024)

4.3 그린수소 생산 기술 연구 동향 조사

4.3.1 그린수소 생산 기술의 정의와 필요성

그린수소 생산 기술이란, 태양광·풍력 등 재생에너지를 활용해 전기를 생산하고, 이 전기를 이용해 물을 전기분해하여 얻는 수소(H_2)를 말한다. 생산 전 과정에서 이산화탄소(CO_2) 등 온실가스가 발생하지 않거나 극소로 억제됨으로써, '진정한 탄소중립 에너지 캐리어'로 인정받는 기술이다. 주로 알칼리 수전해(Alkaline Electrolysis), 고분자전해질 수전해(PEM), 고체 산화물 수전해(SOE) 등이 그린수소 생산 대표 방식으로 활용된다.

이 기술은 전통적인 화석연료 개질 방식(그레이/블루 수소)에 비해 친환경성이 극도로 높고, 장기적으로는 수소경제, 재생에너지원 연계 수소사용 체계(ESS, 연료전지차, 산업용 에너지 등)의 근간을 이루게 된다. 특히, 국가·산업 및 글로벌 기후위기 대응에서 탄소중립 정책을 실질적으로 실현하기 위해 꼭 필요한 에너지 전환 기술로 꼽히며, 전력망 잉여 전력 활용, 계절·지역적 에너지 불균형 해소, 산업 분야 고부가가치 창출의 기초가 된다.

4.3.2 방사광 가속기를 활용한 그린수소 생산 연구 결과

방사광 가속기는 그린수소 생산에 사용되는 촉매 및 전극 소재의 미세구조와 전자구조, 반응 환경에서의 구조 변화까지 실시간·정밀하게 해석할 수 있는 첨단 플랫폼을 제공하며, 최근 다양한 혁신적 연구 결과가 보고되고 있다.

(1) 물 분해 전극 촉매의 작동 메커니즘 규명

한국과학기술연구원(KIST) 및 국내 여러 대학 연구팀이 방사광 X-선 흡수 분광(In-situ XAS) 기술을 이용하여, 전이금속(니켈, 철, 망간 등) 기반 수소 발생 전극(HER)과 산소 발생 전극(OER)에서 촉매 표면의 활성화 과정을 실시간 분석하였다.[5)]

연구진은 실제 전기화학 물분해 반응 조건을 그대로 모사한 셀 내에서, 촉매 표면 금속 이온의 산화수가 작동 도중 $Ni^{2+} \rightarrow Ni^{3+}$, $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ 등으로 동적으로 변하는 것을

5) Kim, J., et al. "Tracking operando active sites of oxygen evolution on nickel iron layered double hydroxide catalyst by advanced spectroscopic methods." ACS Catalysis, 10(19), 11280-11289, 2020.

XANES/XAFS 분석으로 확인했다. 이 산화수 변화가 수소 혹은 산소 발생에 기여하는 활성상(Active Phase)을 형성하는 핵심임을 세계적으로 최초로 실험적으로 입증하였다.

동시에, EXAFS 분석에서는 촉매 표면에서 결합 거리, 배위수, 결정격자 왜곡 등 미세구조 변화가 발생하며, 이 변화가 촉매 작동 초기 성능, 수명, 내구성 등과 직결됨을 정량적으로 해석했다.

(2) 전극의 내구성 열화 및 개선 경로 분석

방사광 X-선 회절(XRD) 및 대기압 X-선 광전자 분광(AP-XPS) 등 연계 분석법을 적용하면, 물분해 반복 실험(충·방전, 가역 운전 시나리오 등) 중 실제 전극 소재에 일어나는 결정상 전이, 미세결정 성장, 산화물층 두께 변화, 표면 재구조화, 금속-비금속 결합 붕괴 현상까지 모두 추적할 수 있다.

예컨대, 고성능 OER 전극 소재로 주목받는 NiFe layered double hydroxide(NiFe LDH)에서는, 수전해 반복 과정에서 Ni–O, Fe–O 결합의 길이 변화와 새로운 구조적 결함 생성이 동시에 나타나며, 이 변화가 내구성 저하나 활성도 변화의 주된 원인임이 밝혀졌다. 이 데이터는 미세조성조절·합금화·나노구조 공학 등 새로운 내구성 향상법의 근거 정보로 직접 활용된다.[6)]

(3) 신소재 촉매 설계 및 실제 고효율 수전해 구현

방사광 분석 정보를 바탕으로, 연구진은 고출력 방사광가속기에서 얻은 in-situ XAS 데이터와 전기화학적 성능 데이터를 통합해 머신러닝 모델을 만들고, 고내구성·고활성화 신촉매(Ni-Co-Mn, Ni-Fe-Co 등 다중 금속계, 비귀금속계 등)를 최적화해 산업용 수전해 파일럿 플랜트에 실제 적용하는 데 성공했다.[7)]

실제로, 방사광 가속기 실험에서 전극 내 활성 부위(atomic cluster), 전자 밀도 분포, 반응 경로를 고해상도로 규명해, 제안된 촉매 소재가 높은 수전해 전류밀도(>500 mA/cm²)와 장시간 지속 활성(>2000 h 이상 내구성)을 실현하도록 설계되었다. 이러한 혁신 소재 개발은 현재 산업 현장(그린수소 대량 생산 플랜트, 연료전지 내 노드, 이차전지 일체형 수전해 시스템 등)에서 실제 상용화 단계로 진입하고 있다.

---

6) Povia, M., et al. "Operando X-ray absorption study of the surface structure of highly active perovskite catalysts during oxygen evolution." Nature Communications, 12, 1578, 2021.

7) Lee, Y., et al. "Highly efficient and stable Ni-Fe layered double hydroxide catalyst for water splitting revealed by operando X-ray analysis." Nature Communications, 11, 4778, 2020.

4.3.3 그린수소 생산 연구의 현 한계점

방사광 가속기 기반의 첨단 분석 기술은 그린수소 생산 촉매 및 전극 소재의 원자·전자 구조 해석에 있어서 세계적으로 가장 신뢰성 높은 연구방법 중 하나로 평가된다. 그러나 실제 연구와 산업 현장에서의 적용에는 여러 한계점이 공존하고 있음을 지적할 수 있다.

(1) 방사광 실험의 대부분은 이상적인 실험실 샘플이나 소규모 촉매, 나노 규모 전극을 중심으로 이루어진다. 이로 인해 산업용 플랜트 환경에서 사용하는 대면적 전극, 장시간 연속 운전 조건 등 실제 그린수소 생산 과정과의 간극이 크다는 점이 문제로 지적된다. 산업적 고전류, 고온, 다양한 이온 환경에서 나타나는 소재의 구조 변화를 온전히 재현·실시간 분석하는 데는 여전히 기술적 한계가 따른다.

(2) 방사광 실험의 시간 할당(빔타임)과 분석 설비의 제한 등으로 인해, 촉매의 열화 현상이나 장주기 내구성 등 “진짜 현장 주기”의 구조 변화를 충분히 긴 시간 동안 지속적으로 관측하는 것이 어렵다. 특히, 촉매의 활성상 형성이나 순간적으로 일어나는 구조 변화와 같은 동적 현상을 완전히 포착하기 위해서는 펨토초~나노초 수준의 초고속 측정이 요구되지만, 모든 실험에 적용하기에는 제약이 있다.

(3) 수전해 촉매·전극 시스템에서는 합금, 산화물, 탄소계 등 다양한 이종 재료가 혼합되어 사용되며, 전해질, 첨가제, 불순물 등 환경 변수가 성능에 영향을 끼친다. 방사광 기반 분석은 이와 같이 복합계 재료의 상호작용과 계면·전자 구조의 미세한 변화를 동시에 정량적으로 해석하는 데 한계가 있다.

(4) 방사광 가속기는 고가의 설비이고, 제한된 사용자만 사용할 수 있으므로, 대규모 반복 실험이나 산업 현장과의 접목이 쉽지 않다. 실험 준비, 샘플 제작, 셀 구축에서부터 데이터의 해석, 결과 도출까지 많은 전문인력과 시간이 요구된다는 점도 또다른 장애 요소로 작용한다.

(5) 방사광 분석에서 도출된 복잡한 다중 데이터의 해석에는 고도의 전문성이 필요하지만, 현장 및 연구자 간 해석 표준화가 미흡하고, 다양한 분석 장비 간 데이터의 호환성과 연계성이 충분히 확보되어 있지 않다. 이로 인해 인공지능(AI)·머신러닝 기반의 신촉매 발굴 등 빅데이터 활용의 실효성도 제한적이다.

마지막으로, 방사광 분석 결과로 규명된 미세구조 및 활성 메커니즘 정보가 곧바로 실제 산업용 촉매 설계, 대면적 제조, 실증 운전에 연계되는 데에는 여전히 ‘기초-실용 간’ 기술적·공정적 간극이 존재한다.

따라서 방사광 가속기 기반 그린수소 생산 연구는 원자 단위에서의 역할 규명에는

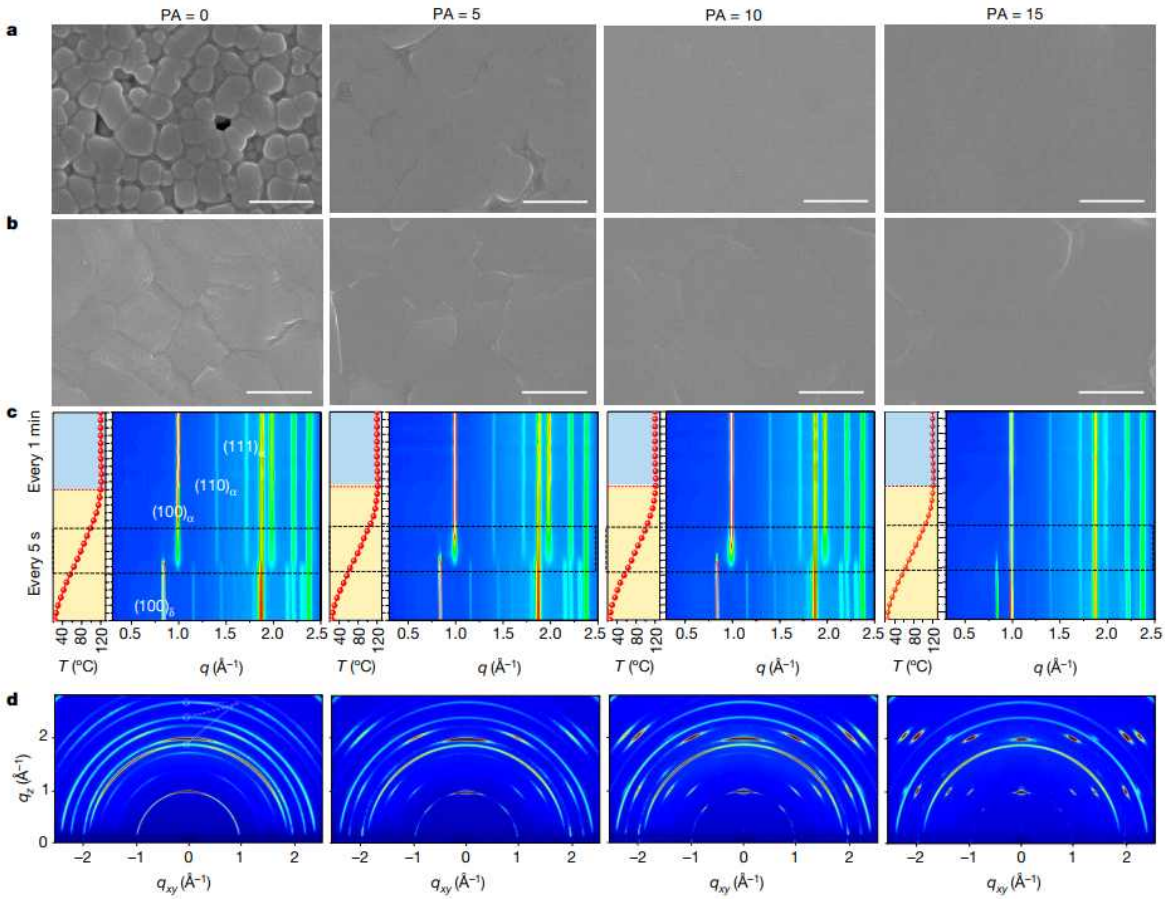
혁신적인 도구이나, 앞으로는 산업 장면에 맞는 대면적·복합계 시스템 실험, 장기적 반복 시험, 데이터 해석 표준화 및 실용화 연계 등 여러 한계점을 극복할 추가적인 연구개발이 병행되어야 할 것이다.

4.4 재생에너지 효율 향상 사례 조사

4.4.1 태양전지(Photovoltaics)

태양전지는 빛의 에너지가 반도체 재료 표면에서 전자를 들뜨게 하여 전자-정공 쌍을 만들고, 이들이 분리돼 외부 회로로 흘러 전기가 발생하는 광전효과를 이용한다. 방사광가속기에서는 실시간 X-선 흡수 분광(XAS), X-선 회절(XRD), 스캐닝 투과 X-선 현미경(STXM) 기법을 활용해 태양전지 핵심 소재의 미세 구조, 결정상 및 불순물, 계면 결함 변화 등을 정밀 관찰한다.

XAS는 태양전지 내 특정 원소의 산화 상태와 전자 환경 변화, 결함 존재를 실시간 계측하여, 결정상 전이와 전하 이동 경로 형성 메커니즘을 밝힌다. XRD는 소재 내 결정 면간 거리, 상(phase), 격자 결함, 상변화 등을 고해상도로 추적하고, 전지 제작 및 노화 과정 중 구조적 최적화를 도출한다. STXM은 도메인 미세구조와 계면 조성 불균일성을 시각화해 소재 구조 설계의 효과를 데이터로 확인한다.



<그림 3> 솔라셀 GI-XAS 결과

a, 0-15 mol% PACl이 첨가 됨에 따른 표면 형상 변화, b. 스핀 코팅된 박막의 어닐링 이후의 표면, c. RT에서 120도까지 상승시키면서 측정한 GI-WAXD의 변화, d. 온도에 따라 측정된 2D GI-WAXD 결과

UNIST 석상일 교수 연구팀은 방사광 가속기를 활용해 페로브스카이트 태양전지용 박막의 결정화 과정을 정밀하게 제어하고 분석한 연구하였다. 연구진은 α-형태의 고결정성 $FAPbI_3$ 박막 형성을 위해 다양한 알킬암모늄 클로라이드(RACl)를 첨가하였으며, 이들이 박막의 표면 평탄도, 결정립 크기, 그리고 δ-상에서 α-상으로의 상 변환율에 미치는 영향을 방사광 기반 실시간 비스듬한 입사 와이드앵글 X-선 회절(GI-WAXD)과 X-선 흡수 분광(EXAFS) 기법을 이용해 관찰하였다.[8)]

특히, 포항 방사광가속기의 GI-WAXD 측정을 통해 PACl(프로필암모늄 클로라이드)을 10mol% 첨가할 경우, $\delta \rightarrow \alpha$ 상 전이가 60~80° C 구간에서 빠르게 이루어지고, α-상 결정립의 지향성과 결정성이 크게 향상되는 것을 확인했다. EXAFS를 통해서는 Pb-I 및 Pb-Cl 결합 거리와 조성 변화를 명확히 규명하며, RACl 첨가가 박막의 미세구조와 표면

8) J. Park et al., Controlled growth of perovskite layers with volatile alkylammonium chlorides, Nature, 616, 724 (2023)

에너지 저감에 기여하여 우수한 결정화와 표면 평탄도를 유도하는 기작을 밝혀냈다.

이러한 구조 및 전자특성 개선은 실제 소자효율에 반영되어, MACl과 PACl을 최적 혼합한 박막으로 제작한 페로브스카이트 태양전지가 미국 NREL 공인 기준에서 최고 26.08%의 변환 효율(인증 25.73%)을 기록했으며, 600시간 이상 광 노출 테스트에서 초기 효율의 약 88%를 유지하는 뛰어난 내구성을 입증했다.

요약하자면, 방사광 가속기로 수행한 GI-WAXD와 EXAFS를 통해 실시간 결정화 과정을 입체적으로 해석하고, 알킬암모늄 클로라이드의 종류 및 첨가비율이 미세구조와 태양전지 성능에 미치는 영향을 정밀하게 규명함으로써, 고효율·고내구성 페로브스카이트 태양전지 개발의 핵심 원리를 성공적으로 밝힐 수 있었다.

4.4.2 나노제너레이터(Nanogenerator)

나노제너레이터는 압전효과나 마찰전기효과로 외부 진동·변형이 소자 내 전하 분포에 변화를 일으켜 전기에너지로 변환된다. 방사광 기반 XRD와 XAS 분석을 활용하면, 압전 소재(ZnO, P(VDF-TrFE) 등)의 결정 상, 결정립 크기, 계면 결함·trap 등 미세구조를 정밀하게 규명할 수 있다.

XRD로는 결정성, 배향도, 미세균열 여부를 실시간으로 분석하며, XAS는 결함 상태나 내부 전하 분포, 압전 활성 도메인의 생성·소멸을 추적한다. 이런 실험 결과는 실제로 나노제너레이터의 출력 전력 수십~수백 % 향상을 이끌었으며, 유연·웨어러블 에너지 소자의 신뢰성과 내구성 개선에도 실증적 설계 기반을 제공하였다.

최근 마찰전기 나노제너레이터(Triboelectric Nanogenerator, TENG) 분야에서 방사광 가속기를 활용한 연구가 의의 있는 전환점을 만들어내고 있다. 대표적인 연구 사례로는 루테늄(Ru)이 도핑된 질화탄소($g\text{-}C_3N_4$) 나노시트를 이용한 고출력 마찰전기 나노제너레이터 설계를 들 수 있다. [9)]

이 연구에서는 방사광 기반의 X-선 흡수 미세구조 분석(XAFS) 기법을 이용하여, Ru가 도핑된 $g\text{-}C_3N_4$ 나노시트의 원자 구조와 전자 환경 변화를 원자 수준에서 정밀하게 규명하였다. XAFS 분석 결과, Ru 도핑에 따라 진동수와 결합 거리, 산화수 분포 등 미세구조가 크게 변화하고, 전자 밀도 및 계면 결합 특성이 강화됨이 확인되었다. 더불어, X-선 광전자분광(XPS), X-선 회절(XRD) 등 방사광 분석법을 함께 적용해, 복합 소재화된 상태(PDMS 매트릭스 내)에 존재하는 금속 나노시트의 산화 상태와 결정성,

9) A. M. Sonawane et al., High performace triboelectric nanogenerator by synchrotron x-ray assisted Ru/g-C3N4 nanostructure incorporated into PDMS matrix, J. Appl. Phys 137, 025301 (2025)

표면 조성 등을 입체적으로 평가했다. 특히, 방사광 실험 결과는 도핑 처리나 복합화 공정에서 일어나는 미세구조 변화와 실제 마찰전기 효율 데이터(전압, 전류)의 상관관계를 직접적으로 도출하는 데 결정적인 역할을 했다.

실제 마찰전기 나노제너레이터로 구현한 결과, Ru가 도핑된 질화탄소 복합소재는 미도핑 또는 일반 소재 대비 개방전압(Open Circuit Voltage)이 약 두 배에서 세 배, 전류밀도(Output Current Density)는 3.8배 이상 향상되는 등 탁월한 에너지 변환 효율을 기록했다. 또한, 10만 회 이상의 반복 작동 테스트에서도 초기 출력의 90% 이상을 꾸준히 유지하는 강력한 내구성 역시 실험적으로 입증했다.

4.4.3 풍력(Wind Energy)

풍력 발전은 바람의 운동 에너지가 블레이드를 회전시켜 발생하는 운동 에너지로부터 발전기 내에서 전류가 생성된다. 이 산업에서는 풍력발전기 블레이드 및 기어부품 소재의 내구성과 효율이 중요하다. 방사광 X-선 현미경과 XRD, XAS는 복합소재(카본/유리섬유복합, 금속 등)의 미세균열, 내마모성, 표면 산화나 계면 변화를 3D로 영상화하거나, 결정적/비결정적 구조 모두에서 신뢰성・수명 평가에 활용된다.

방사광 X-선 회절(XRD) 기법을 활용한 연구에서는 대형 풍력 블레이드 복합소재 내부의 섬유 배열, 계면 결함, 미세균열 발생 및 성장, 응력 하에서의 구조 변화 등을 원자~나노 수준에서 실시간으로 분석할 수 있었다. 예를 들어, 카본 파이버 강화 플라스틱(CFRP) 블레이드의 경우, 방사광 XRD 분석을 통해 반복 하중이나 진동 환경에서 유발되는 결정벽 왜곡과 미세 크랙의 확산 경로가 정량적으로 추적되어, 실제 블레이드 수명과 피로 저하 메커니즘을 과학적으로 규명하는 데 큰 도움이 되었다.

한편, 신소재(예: 바살트 섬유 복합소재)나 친환경 대나무 복합소재에 대한 평가에서도 방사광 X-선을 활용한 구조 분석이 핵심적으로 적용되고 있다. 이들 소재의 내구성, 표면 내식성, 수분 흡수 특성, 섬유계면 결합 안정성 등은 방사광 XRD 및 X-ray 나노현미경, X-ray 마이크로-토모그래피 등 다양한 방사광 기반 도구로 고분해능 영상화・정량 평가된다. 특히 해상풍력과 같은 가혹한 환경에서는 실제 배열 상태, 응력집중 부위에서 형성되는 복합소재 내 미시 결함(기공, 크랙 등)의 3D 위치와 연결성을 비파괴적으로 영상화하고, 온도・습도・진동 등 실증 조건에서의 결함 진화 양상을 실시간으로 추적할 수 있다.

이러한 미세구조 및 결함 데이터는 FEM(유한요소법)이나 피로수명 예측모델에 직접 반영되어, 블레이드 잔류 수명, 신뢰성 검증, 최적의 설계 개선을 지원한다. 실제 한

연구에서는 방사광 XRD 분석 결과를 토대로 복합소재 블레이드의 피로 수명을 30% 이상 연장하고, 유지보수 주기를 기존 대비 1~2년 늦출 수 있음이 입증되었다. 또한 코팅 소재의 결정성 유지를 통한 마모량 40% 저감 등, 방사광 기반 소재 분석이 풍력 설비의 구조적 효율 강화와 장기적 운영비 절감에 기여하는 정량적 결과도 보고되고 있다.

4.4.4 바이오매스(Biomass)

바이오매스 발전은 나무, 농산 부산물, 유기성 폐기물, 미생물 등 자연 유래 물질을 연소・가스화・발효하여 얻은 열/가스를 증기나 엔진 구동에 활용, 전기로 변환한다. 방사광 가속기는 바이오매스 연구에서 재료의 구조적・화학적 변화를 미세 단위에서 실시간, 비파괴적으로 분석할 수 있는 첨단 연구 인프라로 널리 활용되고 있습니다. 예를 들어, 셀룰로오스나 리그닌 등 바이오매스 구성 성분이 열분해 또는 전환 촉매 반응을 거치는 과정에서, 방사광 기반의 X-선 흡수 미세구조(XAS), X-선 회절(XRPD), 그리고 Fourier 변환 적외선 분광(SR-FTIR) 기법을 통해 원자・분자 수준의 결합 변화, 산화수 변동, 반응 중생성물 및 중간체의 실시간 거동까지 정밀하게 추적할 수 있습니다.

실제 연구에서는 방사광 FTIR과 X-선 단층촬영(μCT) 기술을 적용하여, 바이오매스 열분해 과정에서 고리 열림・탈수・중간체 생성을 비롯한 주요 화학변화와 입자 수축, 미세공극 생성 등 미세 구조적 변화를 고해상도 영상과 시계열 스펙트럼 데이터로 동시에 분석하고 있습니다. 이처럼 고온 가열 또는 촉매 조건에 따라 만들어지는 바이오차의 3차원 기공 구조와 화학 구조 변화가 방사광 X선을 활용한 마이크로 단층촬영(μCT)에서 뚜렷하게 관찰됐으며, 이러한 미세구조는 물 흡수성, 미생물의 접근성, 비식용 바이오매스의 환경 기능과 직결된다는 사실이 규명되었습니다.

또한, 방사광 X선 형광(μ-XRF), XANES 분석 등은 열분해 부산물이나 잔류물 내 중금속(Cd 등)과 미량 원소의 분포 및 화학적 형태를 비파괴적으로 매핑합니다. 이를 통해 바이오매스 활용 및 소각 부산물의 환경 안전성 평가와 금속 자원 회수 가능성까지 구체적으로 연구되고 있습니다.

식물 조직, 씨앗, 바이오매스 저장물에서 지방, 단백질, 탄수화물 등 주요 성분의 분포와 미세구조도 방사광 기반 마이크로 단층촬영(μCT), FTIR, XAS 등의 기법을 연계해 영상과 스펙트럼 데이터로 세밀하게 해석하게 되었습니다. 이러한 결과는 바이오매스의 품질 및 변환 효율, 미세 성분 및 구조 분석, 그리고 환경・바이오 에너지 시스템 설계의 근거 데이터로 활용되고 있습니다.

4.4.5 해양에너지

파력, 조력, 해수온도차, 염분차 등 해양에너지는 바다의 운동에너지, 열, 삼투압을 전기에너지로 변환한다. 최근 해양에너지 분야에서는 방사광 가속기를 이용해 해상풍력, 파력, 조력 등 다양한 해양에너지 설비용 소재와 부품의 미세구조, 부식 특성, 내구성 변화를 정밀하게 분석하는 연구가 활발히 이루어지고 있습니다. 대표적으로 해상풍력 발전 블레이드, 타워, 해양구조물 등은 유리섬유나 카본섬유, 바살트섬유 등으로 만든 고강도 복합소재와 내식 합금이 사용되며, 이들 재료는 해양의 강한 염분, 반복적인 하중, 파도에 의해 피로 및 부식 손상이 누적되는 특성이 있습니다.

방사광 X-선 회절(XRD)과 나노 X-선 현미경, 마이크로 단층촬영(μCT)과 같은 기법을 활용하면, 블레이드나 구조 부재 내부의 섬유 배열, 미세 균열, 계면 결함, 응력 집중 지역, 미세 크랙의 성장 경향 등을 나노~마이크로미터 수준에서 비파괴적이고 실시간으로 입체 영상화할 수 있습니다. 실제 연구에서는 반복 하중 실험 결과 블레이드 복합소재 내 미세 크랙의 확산과 계면 결함의 진화를 3D로 정량 분석함으로써, 구조물의 피로 수명 예측과 내구성 향상을 위한 과학적 근거가 확보되었습니다.

또한, 해수 부식에 취약한 철강 혹은 표면 개질 합금(예: Zn-Al 코팅, 희토류 합금 등)에 대해 방사광 X-선 형광(μXRF), X-선 흡수 분광(XAS), XANES와 같은 고분해능 분광 기법이 적용됩니다. 이 분석을 통해 해수 침투로 인한 표면 산화물, 수산화물 및 염소 이온 분포, 피막 생성 및 손상 과정을 깊이별・시간별로 실시간 관찰할 수 있으며, 실제 실험 결과 내식 신소재의 피막 두께, 화학 조성, 부식 생성물 분포와 내구성(수명)이 정량적으로 해석됩니다. 친환경 신소재(예: 바살트, 바이오섬유 복합체, 내염 폴리머 등) 및 재생합금 설계에서도 방사광 기반 고해상도 X-선 분석이 소재 구조 안정성, 내식 피막 특성, 장기 내구성 평가에 적극 활용되고 있습니다.

4.5 In-Situ 실험 고도 분석

방사광 가속기를 이용한 In-Situ 실험의 개념은 실험실 수준의 단순 관찰 방법을 뛰어넘어, 실제 작동환경(operando condition) 또는 실시간 반응 환경에서 시료의 구조, 조성, 분자적 거동을 직접적으로 관찰한다는 데 그 본질적인 의의가 있습니다. 이는 기존의 사후(post-mortem) 분석 방법이 외부 처리 후 샘플의 상태 변화를 정적으로 파악하는 데 그쳤던 한계를 극복한 혁신적 접근입니다. 방사광 가속기의 고휘도 X-선,

넓은 에너지 범위, 그리고 극히 짧은 시간 해상도(마이크로초, 나노초 이하 수준)는 기존 실험장비로는 결코 구현할 수 없었던 초고속·고분해능 실험 조건을 제공합니다. 이를 통해 연구자는 시료 내부의 원자 배열, 결정 구조, 산화 상태 등에 나타나는 미묘한 변화를 실시간으로 추적할 수 있습니다. 예를 들어, 촉매 표면에서 반응 가스가 흡착되고 반응이 일어나는 과정, 금속재료의 상변태와 결정립 변화, 나노입자의 형성 및 성장 과정 등은 모두 In-Situ 실험이 도입됨으로써 새로운 해석이 가능합니다. 해당 기술은 연료전지, 배터리, 촉매 개발, 금속 부품의 피로 및 손상 메커니즘 연구 등 다양한 응용 분야에 이미 널리 활용되고 있습니다. 촉매 표면에서 촉매의 산화상이 전기화학 반응 중 어떻게 실시간 변하는지를 동적 X-선 흡수 분광법으로 추적하여, 기존 정적 분석으로는 설명 불가했던 활성화 메커니즘을 명확하게 밝혔습니다. In-Situ 실험 덕분에 활성상(Active Phase)과 비활성상(Dead Phase)의 상호변환 타이밍, 반응 인터미디어트의 순간적 생성 및 소멸 현상까지 관찰이 가능해졌습니다. 이처럼 In-Situ 실험은 반응 메커니즘의 직접적인 가시화뿐만 아니라 이론 모델링 및 시뮬레이션과 상호 검증에도 크게 기여하고 있습니다. 개념 자체가 재료과학, 물리화학, 생명분자 분석 등 전 분야에 영향을 미치고 있으며, 최신 방사광 가속기(ESRF, APS, SPring-8 등)와 연계해 지속적으로 실험기법이 진화하고 있습니다.

방사광 X선을 이용한 In-Situ 3차원 이미징 및 4차원(시간해상도 포함) 분석은 복합재료·금속·세라믹 등 다양한 산업재료의 역학적 거동 및 파괴 메커니즘을 규명하는 데 있어 가장 대표적인 실험기법 중 하나로 자리잡았습니다. 고속 X-ray 마이크로 토모그래피(Micro-CT)는 재료 내부의 미세구조, 예를 들어 섬유 복합재의 매트릭스 크랙, 금속 내 간극(공극) 성장 및 계면상의 상호작용을 실시간으로 시각화할 수 있습니다. 실제 인장 조건에서 복합재 내부 크랙의 분기, 파단, 그리고 최종 파괴까지의 3차원 거동이 나노 단위 해상도로 추적되었습니다. 이러한 실험은 기존의 파단면 분석, 2D 이미징 등에서는 도저히 알 수 없는 내부 미세 파괴 거동의 시간적 순서를 규명하는 데 큰 역할을 했습니다. 또한, 리튬이온 배터리의 충·방전 과정에서 전극 내부에 리튬입자 분포와 계면 형성, 덴드라이트 성장 위치와 확장 속도를 3차원/4차원 분석으로 동적으로 관찰하였습니다. 이러한 누적 분석 데이터는 머신러닝, 딥러닝 기반 모델링과 결합해 미세구조 변화가 배터리 수명, 성능 열화, 급속 충전 조건에 어떻게 연관되는지 예측 가능한 수준으로까지 발전하고 있습니다.

세라믹 부품의 열-기계 싸이클 중 결함 발생, 미세 공극 및 크랙 진화 관찰에도 In-Situ X-ray CT가 이용되어, 실제 운전환경에서 발생 가능한 치명적 고장 메커니즘 분석에 크게 기여하고 있습니다. 반도체 패키지 소재의 신뢰성 평가, 유연 전자기기 소재 내

미세 손상 추적 등에서도 활용 범위가 급증하고 있습니다. 이처럼 방사광 기반 In-Situ 3D/4D 이미징은 제조공정, 설계, 실장 reliability까지 전주기를 근본적으로 혁신하고 있으며, 관련 논문과 특허도 급격히 증가하고 있습니다.

금속 및 합금 분야에서의 In-Situ 방사광 가속기 실험, 특히 X선 회절과 흡수 분광법 기반 연구는 복합상 이중구조 금속, 초내열 합금, 경량합금 등 최첨단 소재의 미세조직 진화 및 공정 제어에 매우 중요한 역할을 합니다. 대표적으로, 금속 적층 제조(Additive Manufacturing; 3D프린팅) 중 실시간 응고 미세조직, 상변태, 입자 성장 등을 동적으로 추적한 연구가 있습니다. 싱크로트론 In-Situ XRD와 본딕스(방사광 이미지) 분석을 통해 고엔트로피 합금의 용융풀 내 상분리 및 결정립 성장 속도, 그리고 냉각 속도에 따른 미세구조 발달 경로를 실시간으로 관찰했습니다.[10] 이 같은 분석은 적층 제조 시 잔류응력, 결함 발생, grain boundary 형성 메커니즘을 구체적으로 해석하는 데 큰 도움이 되었습니다. 최근에는 고온/고압 하에서의 상변태, 원자 확산 행동, 미세균열 발생 및 성장 메커니즘 등도 실시간으로 해석이 가능하여, 심지어 핵연료 피복관, 항공 엔진소재 등 극한 환경용 합금의 실질적 신뢰성 평가에도 큰 파급 효과를 주고 있습니다.

에너지 소재와 나노재료 분야에서도 방사광 가속기 기반 In-Situ 실험은 핵심적인 분석 방법으로 폭넓게 활용되고 있습니다. 리튬이온 배터리, 리튬황전지, 고체산화물 연료전지, 페로브스카이트 태양전지와 같은 차세대 에너지 변환・저장 소재의 경우, 충・방전 또는 촉매 반응 과정에서 내부 구조, 계면 반응, 측벽 성장 등 매 순간 변화하는 현상들이 성능과 직결됩니다. 실제 배터리 운전 환경에서 X-선 흡수 경계면 미세분광법과 X-선 소각산란 기법을 동시 적용해, 전기화학 반응에 따른 가시적 구조·조성 변화, 리튬 인터칼레이션(de/intercalation) 메커니즘, 전극 내 피로 누적 현상까지 장시간 추적했습니다.[11] 페로브스카이트 태양전지의 경우, In-Situ GIWAXS(Grazing-incidence Wide-angle X-ray Scattering)나 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy) 기반 실험으로, 광조사 및 열 스트레스 환경에서 재료의 결정화, 이온 마이그레이션, 계면 분극 현상 등을 실시간 분석할 수 있습니다. 또한, 백금계 촉매의 CO 산화, 수전해 반응, 연료전지 촉매 내 옥사이드 계면 형성 등도 In-Situ X선 분광 및 산란법으로 동적 거동을 밝힐 수 있습니다. 나노입자의 코어-셸 구조 형성, 자기조립 나노클러스터 성장, 나노와이어의 결정립 전환 등 나노스케일에서 시간 분해 실험은 반응 최적화, 효율 향상에 실질적

10) R. Cunningham, Kehole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahihg-speed X-ray imaging, Science, 363, 849 (2019)

11) A. P. Black, Synchrotron radiation based operando characterization of battery materials, Chemical Science, 14, 1641 (2023)

인사이트를 제공합니다. 이와 관련, 연구들은 In-Situ XRD/EIS/SEM/TEM, XAS를 유기적으로 결합한 멀티모달 분석법을 적용해 많은 논문을 내고 있으며, 산업계에서도 양산화 조건 최적화에 필수적 데이터로 활용되는 추세입니다. 앞으로 방사광 가속기를 활용한 In-Situ 실험의 활용 분야와 기술적 진보는 더욱 확장될 전망입니다. 재료의 동적 분석이 가능해지면서, 그간 경험적으로만 접근하던 신소재 설계, 고신뢰성 산업 부품 개발, 미래형 에너지 시스템의 운전 조건 설계 등 과학/산업계 거의 전 분야에서 새로운 혁신이 이뤄지고 있습니다. 머신러닝·AI와의 융합 분석은 In-Situ 데이터의 고해상도 자동 추출·예측 정확도 향상, 복잡한 반응 경로의 시간상 동기화(temporal synchronization)를 구현하는 데 필수 도구로 자리잡고 있습니다. 또한, 다차원 데이터(공간, 시간, 에너지, 조성 등)의 반복적 분석을 통해 반응 경로 최적화, 미세 조직 진화의 실시간 제어, 나아가 공장 현장이나 공정 장비에 직접 적용할 수 있는 on-line 분석 및 피드백 시스템이 개발되고 있습니다. 학계의 중요한 논문에서는 실제 원자로 내 금속 피복체의 방사선 손상 실시간 관찰, 고출력 반도체 기판 내 핫스팟 동적 생성과 소멸 메커니즘 실측, 인간 세포 단백질의 스트레스 반응 연속 모니터링 등 다양한 최첨단 응용이 꾸준히 보고되고 있습니다. 방사광 가속기의 시간분해, 공간분해, 원소 특이적 해상도가 10배 이상 향상된 4세대 싱크로트론 ‘MAX Ⅳ’, ‘Sirius’, ‘PAL-XFEL’ 등은 앞으로 실제 소재 내 복합적(상호작용적) 반응까지 동시다발로 추적하는 시대를 열고 있습니다. 공정 자동화 및 현장 직접 적용성이 높아짐에 따라 신속한 품질검사, 결함 원인 실시간 진단, 맞춤형 공정제어 등 산업 소프트웨어와의 융합 적용도 본격화되고 있습니다. 방사광 기반 In-Situ 실험의 혁신은 자연과학뿐 아니라 스마트팩토리, 환경·생명·헬스케어 등 미래 산업에도 큰 영향을 미칠 것으로 기대되고 있습니다. 그 잠재력은 아직 다 풀리지 않은 ‘블랙박스’였던 복잡계 반응을 직접 데이터 기반 과학으로 전환한다는 점에서, 향후 수많은 융합 기술 혁신의 출발점이 될 것입니다.

4.6 중입자 가속기를 활용한 탄소중립 연구 현황 및 미래

중입자 가속기(Heavy Ion Accelerator)는 탄소(C), 헬륨(He) 등 무거운 입자를 빛의 70~80%에 가까운 속도로 가속시키는 첨단 장치로, 주로 암 치료, 첨단 재료 개발, 방사선 응용 연구 등에서 활용되고 있습니다. 중입자선은 기존 양성자·X선에 비해 생물학적 효과와 선택성이 매우 높아, 난치성 암 치료와 더불어 재생에너지, 탄소중립, 친환경

신소재 개발 등 미래 에너지·환경 분야 연구로 확장가능 합니다.

중입자 가속기는 탄소, 헬륨 등 무거운 이온(중이온)을 빛의 70~80%에 가까운 속도로 가속해, 주로 암 치료, 신소재 내방사선 내성 평가, 극한 환경 소재 실증 등에 활용된다. 반면 방사광 가속기는 전자 같은 경입자를 원형(혹은 직선)으로 가속시키면서, 궤도에서 빠져나오는 초고광도·고집광의 X-선(방사광)을 얻어, 주로 소재 분석, 생명과학, 나노구조 영상 등 기초과학 및 정밀 소재 해석 연구에 사용된다. 중입자 가속기는 강력한 이온화 및 높은 선량량으로 물질의 구조를 변화시킬 수 있는 반면, 방사광 가속기는 시료에 거의 영향을 주지 않으면서 미세 구조를 비파괴적으로 관찰할 수 있다는 차이가 있다. 또한 중입자 가속기는 치료나 신소재 가공과 같이 입자빔을 소재나 인체에 직접 쏘는 응용에 초점이 맞춰져 있지만, 방사광 가속기는 다양한 분광·이미징 실험 장치와 연동해 수백~수천 명의 연구자가 동시에 다양한 샘플을 분석할 수 있도록 설계되어 있다. 장치 측면에서 중입자 가속기는 싱크로트론, 직선형 가속장치 등으로 구성되어 있지만, 매우 높은 에너지와 대형 치료 시스템, 두꺼운 차폐가 필요하다. 반면 방사광 가속기는 전자 빔을 정밀하게 제어하고, 다양하게 파장 조정이 가능한 X-선을 공급할 수 있도록 다수의 빔라인과 실험실이 통합된 형태로 구축된다.

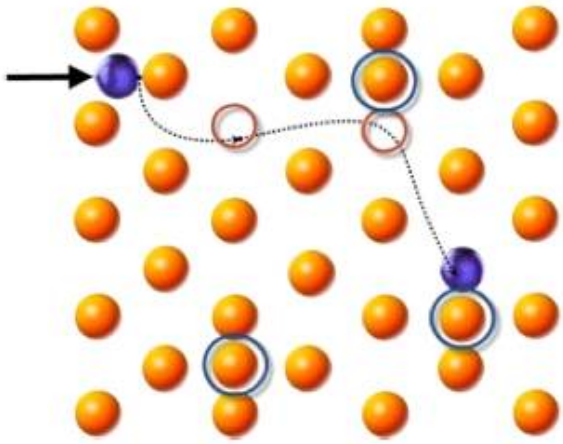
중입자 가속기를 신소재 및 탄소중립 연구에 활용하는 데에는 몇 가지 근본적인 어려움이 존재한다. 우선, 중입자 가속기 설비 구축과 운영, 유지 비용이 매우 높아 대규모 투자와 국가적 R&D 지원 없이는 연구에 폭넓게 활용하기 어렵다. 두 번째로, 장치의 복잡성, 노하우 부족, 그리고 운전 안정성 확보 문제로 인해 실제 원하는 실험적 정밀도와 재현성을 꾸준히 유지하는 데 아직 한계가 따른다. 세 번째, 중입자 가속기는 암 치료 등 의료 분야 중심으로 활용되어 왔고, 신소재 실증 및 에너지 소재 개선, 탄소중립 분야에서는 실험 환경 제한과 검증 데이터 부족 등으로 확산이 더디다. 또한 방사광 가속기와 달리 중입자 빔 자체가 시료에 구조적 변형이나 영구적 손상을 일으킬 수 있기 때문에, 정밀 분석이나 비파괴 구조 해석에선 한계가 뚜렷하다. 시설소수와 복잡한 승인·안전 규정으로 인해 실험자 접근성이 낮고, 다양한 소재·환경 조건의 반복적 시험이 쉽지 않다.

그런데도, 중입자 가속기는 신소재 및 탄소중립 연구에 독특한 장점을 제공한다. 첫째, 중입자 빔을 이용하면 재료 내부 깊숙한 곳까지 강한 이온화 에너지를 전달해, 기존에 경험하지 못한 극한 환경(방사선, 고온, 고에너지 등)에서 신소재의 내구성, 구조적 변화, 물성 진화를 실시간으로 관찰할 수 있다. 둘째, 반복적 방사선 피폭이나 고에너지 처리로 기존 소재를 극미세 결함 제어, 결함 공학, 나노구조화 등 새로운 물성 부여 및 기능성 신소재 개발에 활용할 수 있다.

삼척시가 추진 하는 의료용 중입자 가속기를 활용한 신소재 및 반도체, 에너지 소재 연구는 원론적으로 가능하다. 의료용 중입자 가속기로부터 발생하는 이온빔은 소재에서 입자 기반 가공, 표면 개질, 방사선 손상 실험등 다양하게 응ㅇ요이 가능하다. 이를 통해 극한 환경 내구성 검증, 결함 공학, 나노 구조화, 방사선 저항 특성 개선등을 연구 할 수 있다. 하지만, 의료용 중입자 가속기 자체는 설계 목적상 환자 치료에 최적화되어 있어, 연구용으로 즉시 전환하거나 다양한 재료를 반복적으로 실험하는 데는 기술적 운영상 한계가 있다. 일부 대형 의료 가속기 (예: 일본 HIMAC등)나 유럽/미국 신규 의료 연구 융합센터 (예: FermiLab, Argonne 등)는 의료용과 실험용 빔라인, 실험실을 별도로 병행 구축 하여, 신소재, 반도체, 핵연료 방사선 손상, 재료 변환 연구가 이루어 지고 있다.

일본 HIMAC(Chiba), HIT(독일), CNAO(이탈리아), SPHIC(중국) 등은 탄소이온 치료용 중입자가속기와 별도로 신소재・반도체・핵연료 방사선 내구성 실험, 우주 환경 재현, 첨단 재료 시험용 빔라인을 함께 운용하고 있습니다. 이러한 시설에서는 소재 피폭, 구조 변화, 결함 성장, 방사선 손상 누적 연구 등을 중입자빔으로 수행하며, 실제로 원자력, 반도체, 미래 에너지 소재 분야 데이터가 도출되고 있습니다.

미국 Argonne, Fermilab 등은 신규 중입자 가속기 및 다기능 실험동을 의료, 소재, 에너지 분야에 개방・공동 활용하며, 반도체 소자, 신합금, 열핵 소재, 고분자 등 다양한 신소재 연구에서 중이온빔 조사 효과를 데이터로 축적 중입니다



<그림 4> 고에너지 아이온 빔에 의해 데미지가 물질내 생성되고 이에 따른 원자들의 확산을 그린 모식도12)

12) https://www.anl.gov/aai/material-irradiation-with-ion-beams

4.7 가속기를 활용한 기술 혁신을 위한 정부 정책 조사

다목적 방사광가속기 구축

정부는 첨단 연구와 산업기술 혁신을 촉진하기 위해 대규모 방사광 및 입자 가속기 인프라 구축에 대대적 투자를 하고 있다. 2029년까지 총 1조 1,643억 원이 투입되는 다목적 방사광가속기 사업은 장치 발주와 시설 입찰, 빔라인 구축 등을 단계적으로 추진하며, 설계와 총사업비 조정도 완료되어 정책적 일관성을 확보하고 있다.[13)]

대형 연구시설 지원 제도화

방사광 및 입자 가속기 등 대형 연구시설 구축사업의 효율적 지원이 제도화됨으로써, 사업 지연이나 계획 변경을 최소화하고 안정적인 운영 및 기술 개발을 돕고 있다.[14)]

국내 활용 및 산업 연계

방사광가속기는 반도체, 디스플레이, 2차전지, 바이오 신약, 신소재 개발, 철강 등 다양한 첨단산업의 원천기술 연구 및 응용에 폭넓게 활용되고 있다. 예컨대 청주와 포항의 방사광가속기는 혁신 신약, 암기작 규명, 차세대 반도체 공정 혁신 등 실제 산업 현장에서 활용 사례가 다양하며, 일부 빔라인은 중소·중견기업 산업 지원용으로 우선 할당되어 현장 중심의 혁신을 유도하고 있다.[15)]

기술 클러스터와 산학연 연계

방사광가속기 구축 지역에서는 기업, 대학, 연구기관이 공동으로 산학연 혁신클러스터를 조성해, 네트워크 강화, 인력양성, 기술공유, 연구개발 등을 촉진하는 정책적 노력이 병행된다. 또한 충북 등 지역에서는 방사광가속기 활용 역량 강화와 진입장벽 해소를 위해 교육, 컨설팅, 정책지원 프로그램이 마련되어 있다.

입자 가속기 지원사업

정부는 경주 양성자가속기(2002~2012, 3,143억 원), 중이온가속기 구축(RAON, 2011~2022, 1조 5,473억 원), 중입자가속기 구축(2010~2024, 2,596억 원) 등 입자 가속기 인프라에 장기적·대규모 예산을 투입해 첨단소재, 신약, 의료, 원전 해체 기술 등

13) https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156657635
14) https://m.etnews.com/20220929000123?mc=mm_004_00001
15) https://www.inews365.com/news/article.html?no=814588

첨단분야 연구지원 사업을 육성하고 있으며, 해당 장비와 빔라인을 공개 활용 형태로 기업과 연구현장에 제공하고 있다.[16)]

기술 표준화 및 국제 진출 지원

의료용 입자 가속기의 해체, 안전기준, 국제표준 개발 등에서 정부 지원을 통해 원전 해체기술, 안전진단 등 첨단 산업으로의 기술 확산과 해외시장 진출 기반도 마련되고 있다.

해외 정책 및 사례

일본 효고현 SPring-8과 SACLA는 산・학・관 공동이용 공공연구시설로, 관련 기업 650여 개가 사업화에 참여하고 있다. 정부는 지역 정책적으로 집적과 클러스터 기반 혁신거점 구축을 적극드라이브하고 있다.[17)]

대만 정부와 기업(특히 TSMC)은 방사광가속기 빔라인 1000시간 이상을 반도체 공정 혁신에 활용하며, 국가 전략산업 경쟁력 확보에 기여한다. 정부는 빔타임 확보와 산업현장 활용 확대, 인접 캠퍼스 집적 등을 정책적으로 지원한다.

미국, 유럽 등은 DOE 등 정부 산하기관을 통해 입자 가속기 인프라를 장기적 관점에서 예산 지원, 민관협력, 국제공동연구, 기술상용화 촉진 중심의 정책을 시행한다. 미국은 스탠퍼드 방사광가속기 활용 신약개발(예: 타미플루), 유럽은 범유럽 대형 시설을 통한 공동연구와 스타트업, 중소기업 대상 지원체계가 대표적이다.

4.8 삼척시내 기업의 니즈에 맞는 가속기 기반 분석법 제안

국내 기업이 방사광 가속기를 활용해 연구를 진행할 때에는 여러 가지 뚜렷한 장점이 있다. 첫째, 방사광 가속기의 강력한 X-선을 이용하면 반도체, 2차전지, 바이오, 신소재 등 첨단 산업의 핵심 소자와 물질 구조를 원자・분자 단위까지 정밀하게 분석할 수 있어, 신제품 개발과 공정 혁신 과정에서 상업적으로 중요한 기술적 문제를 기존 분석기술보다 훨씬 빠르고 정확하게 해결할 수 있다. 둘째, R&D 효율성이 크게 높아지는데, 신속한 결함 분석이나 신물질 구조 해석이 가능해 제품 개발 기간이 단축되고, 글로벌 경쟁 기업 대비 차별화된 기술 확보에 유리해진다. 셋째, 방사광 가속기 활용을 통해 산학연 공동 연구, 대학 및 연구기관 전문가와의 네트워크 형성 등

16) 국회예산정책처 사업평가, 과학기술인프라 대형가속기 구축 운영사업 분석, 이병철
17) 과학벨트 연계(기반) 대전 과학경제 혁신전략, 대전세종연구원

기술 협업 환경이 활성화되어 최신 연구 트렌드를 공유하고 전문 인재와의 접점을 넓힐 수 있다. 넷째, 정부의 장비 이용료 지원, 빔타임 배정 정책에 힘입어 고가의 장비 투입 없이 세계 최고 수준의 연구 인프라를 이용할 수 있으므로 R&D 비용 부담과 사업화 실패 리스크도 효과적으로 줄일 수 있다. 또한 최근 산업체 전용 빔라인 등 적극적 지원책이 도입되어, 현장에서 곧바로 실용가능한 결과를 얻고 이를 빠르게 제품화나 양산 단계와 연계할 수 있다는 점도 큰 강점이다.

그러나 이러한 장점과 더불어 몇 가지 현실적 한계도 존재한다. 무엇보다 방사광 가속기 신청 수요가 매우 높고 이용 가능한 빔타임이 한정적이어서, 중소기업이나 초기 진입 기업이 원할 때 자유롭게 장비를 이용하기는 쉽지 않다. 실험 설계와 데이터 해석에는 고도의 전문성이 요구되므로, 관련 경험이 부족한 기업에서는 기대만큼의 분석 효율이나 효과를 거두지 못할 수도 있다. 또, 원자 수준의 정밀 분석 결과가 실제로 대량 생산이나 양산 공정 개선에 바로 연결되지 않아, 실용화 단계까지는 추가 노력이 필요할 때가 많다. 빔타임 지원이 있더라도 특정 샘플 준비와 실험 전후 연구에는 상당한 시간과 인적·금전적 비용이 들어가고, 연구 장소가 거리상 멀거나 접근이 까다로운 경우 현장 활용도가 저하될 수 있다. 요약하면, 방사광 가속기는 국내 기업이 첨단산업 분야에서 기초·응용 연구 역량을 크게 제고하고 기술 혁신을 이끌 수 있는 강력한 도구이지만, 접근성, 전문성, 산업화 연계 등 해결해야 할 과제도 동반된다고 할 수 있다.

삼척내 기업이 방사광 가속기 활용 연구에서 직면하는 주요 한계점을 극복하기 위해 다음과 같은 다양한 전략과 정책적 접근이 필요하다. 방사광 가속기 및 가속기는 접근이 어렵고 전문가의 숫자가 적은것이가장 큰 문제일 것이다. 특히 기업에서 가속기 전문가를 고용하기에는 그 리스크가 매우 크기 때문에 사실상 불가능하다. 정책적으로 방사광 분석, 실험설계, 데이터 해석에 필요한 전문 인력을 양성하기 위해 맞춤형 교육 및 전문가 파견 및 협력 연구 프로그램 확대가 필요하다. 실험 설계부터 결과 해석까지 전 과정을 지원하는 통합 컨설팅 체계를 제공하면 기업이 자체적으로 가속기를 활용한 연구가 가능 할 수 있다. 동시에 가속기 사용에 필요한 비용을 지원하는 프로그램을 운영하여 가속기 실험의 실패 부담을 덜어주는것도 필요하다.

방사광 가속기는 최초 기초과학을 위해 설계 되었으나 신소재 및 탄소중립을 위한 에너지 소재의 초고도화로 인해 이제는 산업에서도 필수인 분석 장치이다. 가장 현실적으로 기업이 빠르게 가속기를 활용한 연구를 할 수 있는 방법은 산학연계 방법일 것이다. 삼척내 강원대학교를 비롯하여 대학의 가속기 전문가 또는 교원들과 협업을 긴밀하게 유지하면 기업이 새로운 인원 교육 및 고용 없이도 가속기 활용이 가능해질 것이다. 대학에서도 가속기 활용 연구를 위해 학생을 교육시켜야 할 것이며 인력을

배출하면 그들이 기업에 취업하여 가속기 전문가로서 자리 잡아 선순환이 만들어 질 것으로 보인다.

제5장 연구결과의 활용계획

5.1. 연구성과 활용방안

첨단 분석 인프라 활용: 방사광 가속기 및 In-situ X선 등 첨단 분석 플랫폼을 적용해 CO_2 포집용 고체 흡착제의 구조·화학적 특성을 미세·실시간으로 규명, 향후 삼척시 화력발전소·시멘트 산업 등 실제 현장에 맞는 최적의 소재 선별과 신공정 설계에 직접 활용할 수 있습니다. 특히, 현장에서 적용가능한 맞춤형 소재 평가·실증에 방사광 가속기 분석법이 중추적으로 도입될 전망입니다.

산업기업 기술혁신 지원: 대규모 탄소배출 기업(석탄화력, 시멘트 등)에 방사광 기반 분석·검증 서비스, 신소재 도입 컨설팅, 맞춤형 기업연계 연구 등을 제공함으로써, 기술 고도화와 공정 혁신을 선도하는 기반으로 사용됩니다. 또한 산학연 협력 클러스터 구축, 인재양성 프로그램 등과 연계되어 삼척시 탄소중립 산업 생태계 조성에 활용됩니다.

정책·실증사업 근거: 본 연구에서 도출된 소재별 분석 결과, 효율성 데이터는 삼척시 탄소저감 R&D 사업, 정부 탄소중립정책 실증, 대형공정 적용사업의 기초자료로 활용할 수 있습니다. 특히 중앙정부 가속기 활용 클러스터 정책, 대형 인프라 투자 논리 제공, 예타(예비타당성)연구 등에서 근간 자료로 쓰일 수 있습니다.

5.2. 연구수행 기대 및 파급효과

고효율·저비용 탄소 포집기술 확산: 삼척시 산업 맞춤형 고체 흡착제를 실증해, 온실가스 감축 비용 절감과 동시 산업 부문의 탄소중립 이행력이 크게 강화됩니다. 방사광 분석법으로 촉매·흡착제의 활성상, 구조 변화, 내구성까지 정밀 검증해 상용화 가능성이 높아집니다.

산업 경쟁력 및 신시장 창출: 탄소중립 소재·공정의 실증 데이터가 축적되고, 방사광 가속기 기반 신기술이 지역 내에서 실효적으로 적용될 경우, 삼척시는 친환경 산업혁신 거점으로 부상할 수 있습니다. 기술 이전, 제품 상용화, 전문 인력 양성을 바탕으로 초고정밀 분석서비스, 신소재 평가·컨설팅 등 신규 비즈니스가 확장됩니다.

산학연 협력 및 지역경제 파급력: 대학(강원대 등), 연구기관, 기업 간 연계가 활성화되어 맞춤형 인재양성・고용 창출, 지역 경제 활성화, 지속가능한 산업 생태계가 구축됩니다. 방사광 가속기 기반의 혁신 인프라 확장과 글로벌 협력 사례가 삼척시를 전국・아시아 탄소중립 기술의 허브로 성장시킬 것입니다.

기초–응용–산업 연계 촉진: 단순 기초연구가 아닌 실환경 실증, 산업 체감형 기술로 전환됨에 따라, '실시간 미세분석-현장 실증-상용화 지원'까지 전주기적 연계가 실현됩니다. 향후 신규 소재・기술 발굴, 지역 내 신사업 육성의 파급 효과도 상당히 클 것으로 전망됩니다.

참고문헌

1. pal.postech.ac.kr
2. J. Kim et al., Spatiotemporal active phase evolution for CO2 electrocatalysis, Joule, 8, 3373 (2024)
3. J. H. Park et al., Role of intercalated water in calcium hydroxide interlayers for carbonation reaction, Chemical Engineering Journal, 420, 130422 (2021)
4. 조흔태, 김재훈, Co2 Conversion by controlling the reduction temperature of cobalt catalyst, Clean Technol., 30, 118 (2024)
5. Kim, J., et al. “Tracking operando active sites of oxygen evolution on nickel iron layered double hydroxide catalyst by advanced spectroscopic methods.“ ACS Catalysis, 10(19), 11280-11289, 2020.
6. Povia, M., et al. “Operando X-ray absorption study of the surface structure of highly active perovskite catalysts during oxygen evolution.“ Nature Communications, 12, 1578, 2021.
7. Lee, Y., et al. “Highly efficient and stable Ni-Fe layered double hydroxide catalyst for water splitting revealed by operando X-ray analysis.“ Nature Communications, 11, 4778, 2020.
8. J. Park et al., Controlled growth of perovskite layers with volatile alkylammonium chlorides, Nature, 616, 724 (2023)
9. A. M. Sonawane et al., High performace triboelectric nanogenerator by synchrotron x-ray assisted Ru/g-C3N4 nanostructure incorporated into PDMS matrix, J. Appl. Phys 137, 025301 (2025)
10. R. Cunningham, Kehole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahihg-speed X-ray imaging, Science, 363, 849 (2019)
11. A. P. Black, Synchrotron radiation based operando characterization of battery materials, Chemical Science, 14, 1641 (2023)
12. https://www.anl.gov/aai/material-irradiation-with-ion-beams
13. https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156657635
14. https://m.etnews.com/20220929000123?mc=mm_004_00001
15. https://www.inews365.com/news/article.html?no=814588
16. 국회예산정책처 사업평가, 과학기술인프라 대형가속기 구축 운영사업 분석, 이병철
17. 과학벨트 연계(기반) 대전 과학경제 혁신전략, 대전세종연구원

【주　　의】

1. 이 보고서는 삼척시탄소중립지원센터에서 시행한 ‘2025 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업’으로 수행된 최종보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 삼척시탄소중립지원센터에서 시행한 ‘2025 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업’의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

삼척시탄소중립지원센터의 연구사업은 ㈜삼표시멘트의 후원과
시멘트산업사회공헌재단의 지원을 받아 시행하고 있습니다.