

산학연 연구실 소개

포항가속기연구소 산업기술융합센터 (Industrial Technology Convergence Center)

주소: 경상북도 포항시 남구 지곡로 127번길 80 포항가속기연구소 연구1동 201호 (우: 37673)

전화: 054-279-1599

E-mail: itcc-pal@postech.ac.kr, Homepage: <http://industry.pal.postech.ac.kr>

센터장 | 김종현 박사

포항가속기연구소 책임대우연구원
포항공과대학교 기계공학과 겸직교수

1. 포항가속기연구소 소개

포항방사광가속기는 국내 유일의 3세대 방사광 가속기이자 세계에서 다섯번째로 완공된 3세대 방사광 가속기이다. 전자가 자기장 속을 지날 때 궤도가 휘어지면서 접선 방향으로 나오는 방사광을 이용하는 거대 공동 연구 시설로서 적외선에서부터 X-선까지 넓은 영역의 연속적인 빛(광원)을 제공할 수 있기 때문에 결정학(X-ray crystallography), 적외선 분광학(infrared spectroscopy), 산란(X-ray scattering), 회절(diffraction), 연 X-선 흡수 분광학(soft X-ray spectroscopy), 경 X-선 흡수 분광학(hard X-ray spectroscopy), X-선 영상(X-ray imaging) 등 다양한 기법을 통한 분석이 가능하다. 뿐만 아니라 실험실 단위에서 사용 가능한 광원에 비해 고휘도의 광원을 제공할 수 있기 때문에 다양한 형태의 in-situ, in-operando 및 시분해 실험이 가능하며 비파괴적으로 분석이 가능하다. 이러한 장점으로 인하여 물리, 화학, 생물과 같은 기초 과학뿐만 아니라 디스플레이, 에너지, 환경, 고분자, 철강 및 생체 재료와 같은 다양한 응용 과학 분야 이용이 되어 국내 과학 기술 발전과 원천기술 확보에 이바지해왔다. 1995년 최초 가동을 시작한 이후로 매년 3,000명의 이상의 이용자가 방사광 가속기를 이용하기 위하여 방문하고 있으며 연간 400건 이상의 우수한 논문이 발표되고 있다. 지속적인 분석 기법 개발과 연구를 통해서 현재에는 총 34기의 첨단 빔라인 분석 설비를 갖추고 있으며 규모와 성능면에서 선진국 대비 최고 수준의 방사광 연구 환경을 제공하고 있다. 2015



그림 1. 포항가속기연구소 전경.

년에는 세계에서 3번째로 4세대 가속기를 성공적으로 구축 완료하여 세계적인 대형연구소로 자리매김함과 더불어 과학 기술분야를 선도적으로 이끌어 가기 위해서 경주하고 있다.

2. 방사광과 산업 기술의 융합 : 산업기술융합센터

3세대, 4세대 방사광 가속기의 준공과 30여 년에 걸친 운전을 통하여 선형 가속기, 저장링, 빔라인 건설 등 여러 분야에서 산업체에 대한 기술 파급 효과가 나타났다. 하지만 방사광 가속기의 핵심 기술인 가속기 활용 부문에서는 30년 동안 연구 목적으로는 많은 성과를 거둘 수 있었지만 산업 기술 분야에 대한 직접적인 응용이 매우 미비한 상황이었다.



그림 2. 포항가속기연구소 조직도.

2010년 이후 반도체, 제약, 정밀 화학 및 에너지 소재와 같은 첨단 기술 분야가 급격하게 성장하기 시작하면서 정밀 소재 분석에 대한 수요도 동시에 급격하게 증가하기 시작했다. 포항 가속기 연구소는 이러한 산업계 전반의 요구에 맞춰 2013년 산업기술융합센터를 신설하였다.

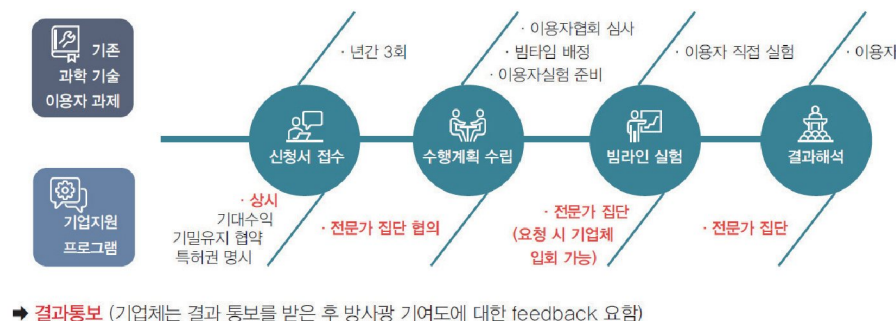
산업기술융합센터는 포항가속기연구소의 연구인력, 기술, 연구 기자재 및 설비 등의 우수한 연구역량을 활용하여 중소기업 및 산업체의 기술개발을 지원하여 경쟁력 향상에 기여하고, 방사광 기반 기술과 분석 기법의 산업적 응용 저변 확대를 목적으로 설립되었다(그림 2).

30년간 축적된 연구소 기반 보유 기술의 산업체 활용을 활성화하고 주요 연구 인프라를 기반으로 하는 융합기술의 산업기술 지원 및 육성을 효율적으로 수행하기 위해 센터장 산하 2개의 팀인 방사광응용팀과 기업지원팀으로 구성되어 있다. 방사광응용팀은 기업체에서 요청한 방사광을 이용한 분석 업무를 수행하는 것을 주요 업무로 하고 있으며, 기업지원팀은 기업지원에 필요한 행정 및 설비 지원 업무를 담당하고 있다.

3. 산업기술융합센터 활동

3.1 방사광 융합분석

방사광 융합 분석은 포항가속기연구소의 고유 임무에 해당하는 빔라인을 이용한 측정 및 분석 서비스로 산업체를 대상으로 한 긴급 측정 서비스를 의미한다(그림 3). 산업체의



▶ 결과통보 (기업체는 결과 통보를 받은 후 방사광 기여도에 대한 feedback 요청)

그림 3. 포항가속기연구소 기업지원 프로그램.

재료연, 포항가속기연구소-가속기 이용 소재개발 협력

발행일 : 2018.04.23



그림 4. 포항가속기연구소-재료연구소 업무 협약 체결 사진.



그림 5. 포항가속기연구소-중국 SSRF 협회 협의.

경우 일반 이용자와는 다르게 시료 측정의 시급성과 분석 결과의 보안성에 대한 요구에 대응하기 위해 신설된 분석 서비스로 통상 빔라인 이용 제안서 제출부터 실제 실험까지 5~8개월 소요되던 시간을 1개월 이내로 대폭 단축하였다. 또한 시료 측정 결과를 분석하기 위한 전문성이 부족한 산업체에 대하여 포항가속기연구소의 전문가 집단에 의한 데이터 해석 서비스도 동시에 제공하고 있다. 이러한 방사광 융합분석 프로세스를 통해 산업체의 다양한 기술개발, 공정 및 불량 이슈에 대한 원인 파악 및 개선점 도출을 통해 국내 산업체 경쟁력 향상에 기여하고 있다.

3.2 기술협력 체계 구축

산업기술융합센터는 포항가속기연구소의 첨단 분석 기술 및 시설 인프라를 이용하여 일반 산업체를 포함한 대외 연구기관 혹은 정책/연구 관리 기관등과 기술 협력 체계를 구축하고 있다.

융합 기술 개발 및 오픈 이노베이션등을 통한 기술개발 지원 및 활성화를 도모하고, 향후 체계적인 기술 지도 체계 구축 및 정보 교환을 위하여 업무 협약을 통해 다양한 기술 협력 체계 구축 및 사업 공동 설명회를 통한 기술 지원 활동을 추진하고 있다.

또한 다양한 산업체 및 유관기관과의 지속적인 기술 교류 회 및 기업 홍보 활동을 통하여 방사광을 이용한 산업적 응용에 대한 관심과 이해를 올리고, 첨단 거대 연구시설 및 연구장비를 활용한 산업체의 연구 개발 및 선도 기술 발전에 기여하기 위한 활동을 수행하고 있으며 동시에 국제적인 유관 연구 및 지원 활동을 위하여 국외 여러 국가들과 공동으로 가속기를 활용한 산업체 지원 활동 및 공유 및 기술 정보 교환을 위하여 국제 공동 협력 체계를 구축하고 있다.

4. 방사광 융합분석 기술 및 활용분야

4.1 고해상도 X-선 CT 기법

방사광 X-선 영상은 현미경처럼 고해상도의 영상을 비파괴적으로 얻는데 사용된다. X-선의 투과력을 활용하여 시료 내부구조를 영상화하며, 전산화단층촬영술(CT)를 적용하면 삼차원 영상의 구현이 가능하다.

일반적인 X-선 영상과 다르게 포항방사광 가속기의 X-선 영상 기법은 광원의 우수성으로 인하여 높은 해상도의 X-선 영상을 고속으로 측정 가능하다는 장점이 있다. 이러한 방사광 X-선 영상 기법은 주로 학술적인 연구에 활용되어 왔지만 최근 산업적인 활용도가 급격하게 증가하여 상용화되거나 개발 중인 제품의 내부 구조 중 미세한 구조적 결함을 검출하거나 제품 내에서 발생하는 현상을 비파괴적으로 가시화하는데 사용이 되며 주로 해부학적 영상, 삼차원 조직학, 식품 및 다양한 유/무기 재료의 미세 구조 거동 관찰에 응용될 수 있다(그림 6).

4.2 나노 X-선 영상 기법

회절 광학계를 활용하여 3차원 영상을 측정하는 나노 X-선 영상 기법은 광학 현미경 및 마이크로 CT 영상보다 월등히 뛰어난 공간분해능을 지니면서 동시에 전자현미경과 달리 시료의 내부를 관찰할 수 있는 초 고해상도 영상 기법이다(그림 7). 최근 들어 급속도로 발전하고 있는 경 X-선 회절 광학 기술을 적용하여 방사광가속기 광원의 고휘도 X-선을 이용하면 최소 선폭 20 nm 이하의 미세 구조를 관찰하는 것이 가능하다. 해당 기법은 반도체 내부의 극미세 결함을 찾아내는 비파괴 연구에 적용이 가능하고 에너지, 금속, 촉매 및 다공성 구조체에 이르기까지 다양한 시료의 분석이 가능하다. 또한 최근에는 X-선 흡수 스펙트럼을 관찰하는 XANES 기법이 접목된 XANES 이미징 기법을 이용할 경우 3차원 영상 뿐만 아니라 물질의 화학적 변화를 2차원 또는 3차원으로 50nm 해상도로 구분할 수 있기 때문에 에너지 소재 및 신소재 개발 분야에 적극적으로 활용되고 있다.

4.3 X-선 기반 단결정 소재 평가 기법

방사광 X-선 토폴로그래피 기법은 단결정 내부의 결정 결함을 검사하는 대표적인 비파괴 검사 기법이며 단결정 성장의 질적 향상을 위한 품질 평가와 에피층 분석을 통한 불량 분석이 가능하다(그림 8). 소재 내 여러 결정 결함과 전위 불량의 규명이 가능하기 때문에 고품질의 단결정 재료/소자를 위한 공정 최적화에 활용이 가능하다. 특히 방사광 광원을

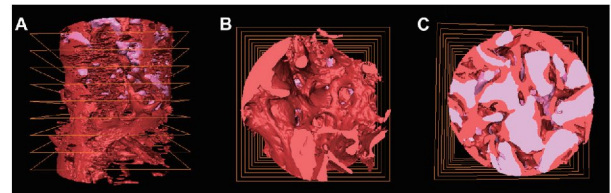


그림 6. 마이크로 X-선 영상 기법을 이용한 뼈 재생 부피 계측 연구(포항가속기연구소 6C Bio-Medical Imaging 빔라인).

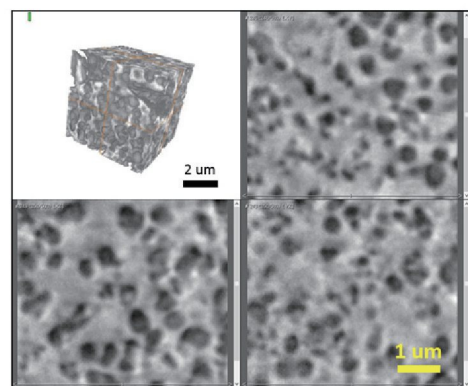


그림 7. 나노 X-선 영상 기법을 이용한 탄소 공극 소재 3차원 영상(포항가속기연구소 7C X-ray Nano Imaging 빔라인).

사용하기 때문에 측정 시간이 매우 짧고 일반 광학 영상으로 관찰이 되지 않았던 다양한 결정 결함의 관찰이 가능하다.

4.4 소각 X-선 산란 나노 구조 평가 기법

선진국을 비롯하여 전세계적으로 나노 기술에 대한 관심과 기대가 증가하면서 수 나노 미터 크기 미세 구조 분석에 대한 수요가 급격하게 증가하기 시작했다. 소각 X-선 산란 기법은 X-선이 시료를 통과하면서 발생하는 산란 및 회절 현상을 분석함으로써 시료가 가지고 있는 미세 구조를 분석하기 위한 기법이다.

이러한 소각 X-선 산란 기법은 다양한 종류의 자기조립 유기물, 무기물, 분자/나노구조, 고분자 블렌드, 고분자 공중합체, 나노 복합체, 나노 입자, 단백질, DNA의 구조분석에 널리 사용되고 있으며 미세 구조체의 크기, 모양 및 분산도 뿐만 아니라 결정성을 가지는 시료의 결정 구조, 결정도 및 결정 배향의 평가가 가능하다.

우수한 공간 분해능을 가지고 있으며 시료 측정에 제한성이 없는 소각 X-선 산란 기법은 반도체, 태양 전지, 이차 전지와 같은 기술 집약형 산업 부문뿐만 아니라 화장품, 바이오, 식품, 타이어와 같은 일상 산업군까지 다양하게 적용이 되고 있다(그림 9).

Optical image (일반 광학 영상) X-선 토폴로그래피 이미지 (X-선 회절 영상)

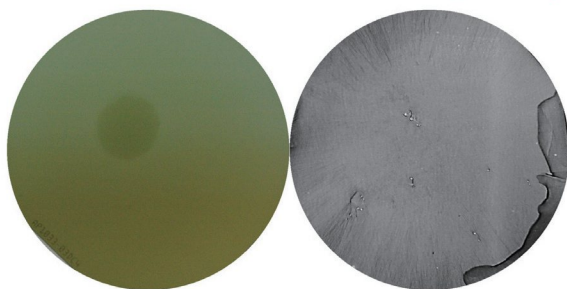


그림 8. 방사광 X-선 기반 단결정 품질 평가 예시(포항공대기연구소 9D 백색광 이미징 빔라인).

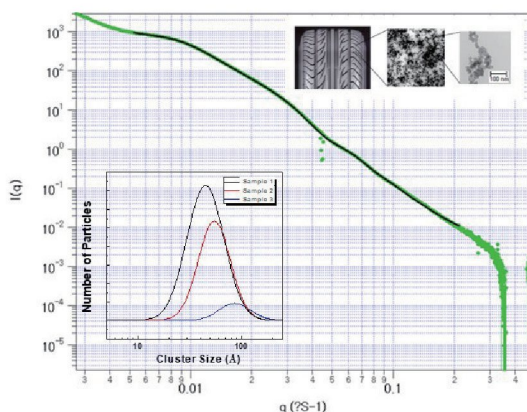


그림 9. 타이어 소재 실리카 입자 분산도 분석 예.

4.5 방사광 적외선 광원을 활용한 재료 분석

적외선 분광법은 적외선 영역의 복사선과 물질과의 상호작용을 이용한 분광법으로 분자 내에 존재하는 고유의 진동 운동이나 회전 운동에 따라서 특징적인 흡광도를 가진다. 일반적으로 분자의 진동 방식 및 회전 운동은 분자 내에 존재하는 작용기에 따라 흡수스펙트럼을 나타내기 때문에 스펙트럼 분석을 통해 작용기에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이러한 분석 기법은 디스플레이 소재, 전도성 고분자, 이차전지 분리막 및 세포 분석을 통한 질병 진단에 이르기까지 다양한 분야에서 활용이 가능하며 액체, 고체, 박막, 겔 등 다양한 형태의 시료에 대하여 실시간 분석이 가능하다.

특히 방사광 광원을 활용한 적외선 분광법은 상용화된 적외선 광원에 비하여 100 ~ 1,000배 정도 밝은 광원 특성을 가지기 때문에 높은 공간 분해능을 가지며 동시에 작은 크기의 광원을 활용함으로써 마이크로 크기의 시료 측정이 가능하며 2차원 형태의 적외선 분광 이미지 구현이 가능하다(그림 10).

5. 산업체 활용 특화분석 기법 개발

5.1 단결정 소재 평가를 위한 백색광 토폴로그래피 시스템

방사광 X-선 토폴로그래피 이미징 기법은 현미경처럼 고해상도의 소재 영상 정보와 더불어 단결정 소재의 결함에 대한 정보를 부각하여 보여줄 수 있는 고속 고정밀 비파괴 분석 방법이다.

최근 실리콘 소자 및 Ge, GaN 등의 차세대 웨이퍼 소자 뿐만 아니라 실리콘카바이드(SiC) 등 단결정 소재 개발의 니즈 증가와 함께, 방사광 토폴로그래피 영상 기법을 활용해 고품질의 단결정 기판을 개발하는 연구가 활발히 수행되고 있다(그림 11).

5.2 실시간 X-선 영상 획득용 고속 측정/인장기

방사광 X-선 영상 현미경을 사용하여 공정이나 실제 사용 환경에서 내부 구조 변화로 인한 재료의 물성 변화를 비파괴적으로 관찰할 수 있다. 영상의 해상도는 수 마이크로미터이다. 유기물의 경우 초당 1,000장의 촬영이 가능하다. CT를 적용하면 1초 간격의 삼차원 영상을 획득할 수 있다. 철강 재료는 초당 10장의 촬영이 가능하다.

Optical image (일반 광학 영상) Chemical Image (적외선 현미경 분광 분석)

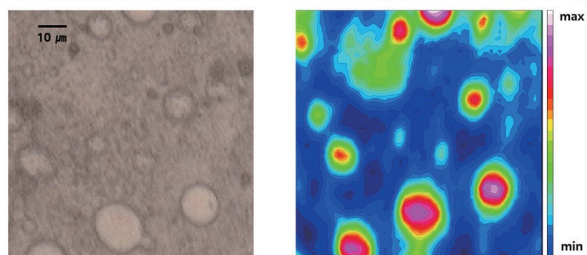


그림 10. 적외선 현미경 분광법을 이용한 열전도성 고분자 소재 상분리 현상 분석 예(포항공대기연구소 12D 적외선 분광 분석 빔라인).

공정 및 실제 사용 환경을 모사하기 위해 인장기와 고온 가열로를 구축하였다(그림 12). 인장기의 경우 최고 5000 N의 인장을 부하할 수 있으며, CT를 통해 형상 변화 및 크랙 발생을 삼차원 추적할 수 있다. 가열로는 대기 환경에서 1000도까지 가열이 가능하다. 현재 CT를 구현할 수 있도록 장치를 개선 중에 있다.

5.3 에너지 소재 개발을 위한 XANES 성분 분석 이미징 기법

나노급 해상도를 가지는 방사광 엑스선 나노 현미경의 경우 방사광 특유의 에너지 분해능을 활용하여 다양한 에너지 소재의 개발에 기여하고 있다. 소재의 특정 파장에 대한 흡수 특성을 활용하여 벌크 소재의 특성 평가에 사용되던 XAFS 기법을 이미징에 접목한 XANES imaging 기법을 개발하여 에너지 저장 소재 및 이차전지 소재의 특성 개선 및 신제품 개발에 활용 가능한 신개념 성분 이미징 기법을 고도화하는 연구가 진행 중이다(그림 13).

5~10 keV 범위의 absorption k-edge 를 가지는 소재의 경우 XANES imaging 기법을 활용하면, 소재 내부의 화학적인 특성을 40 nm의 공간 해상도를 가지는 비파괴 영상과 함께 규명할 수 있다. 예를 들면 이차전지 양극소재 개발에 XANES imaging 을 활용할 경우 이차전지의 충방전 시 일어나는 소재의 화학적 성분 변화를 영상화 가능하며, 이차전지를

구동하며 측정하는 In-situ XANES imaging 을 통해 실시간으로 소재의 성분 변화를 추적하는 것이 가능하다. 이러한 기법은 이차전지 소재의 고속 충전, 대용량 소재 개발 및 전고체 배터리 등 차세대 소재 및 소자 개발에 활용이 가능하다.

5.4 고속 X-ray Fluorescence Tomography 기법

5.3 절에서 언급한 것처럼 소재들은 엑스선에 대해 고유한 흡수선을 가지고 있는데, 이와 더불어 고유의 엑스선 형광선을 나타내기도 한다. 이를 활용하면 단 파장의 엑스선을 조사하였을 때 나오는 고유의 fluorescence 특성을 검출하는 것이 가능하며, 이를 활용해 소재의 성분을 수백 나노미터의 공간 분해능으로 영상화하는 XRF tomography 기법 개발을 수행 중이다(그림 14).

이 경우 입사하는 방사광의 엑스선 파장을 가변 하지 않고도 동시 다발적으로 다양한 성분 정보를 영상화 할 수 있는데 생물학, 지질학, 재료 및 환경과학, 의학 및 문화재 분석 등 대단히 다양한 분야에 활용이 가능하다. 최근 호주 CSIRO, 미국 BNL 과의 협업으로 개발 및 도입한 2차원 Maia 검출기를 활용할 경우 기존의 silicon drift detector (SDD) 대비 1,000배 이상 빠른 측정 시간에 대면적의 시료를 화학적으로 분석 및 영상화하는 것이 가능하다.

수백 나노미터 크기의 엑스선을 집속한 후 스캐닝 하는 기법을 활용해 형광 이미지를 얻는 면적을 매우 넓게 확장하

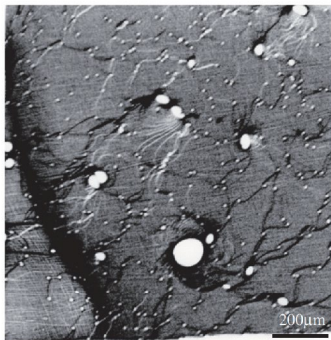


그림 11. SWBXT 기법을 활용해 촬영한 실리콘카바이드 기판 내 결함 검사 (Ref.: Michael Dudley *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, A30 (2003)).

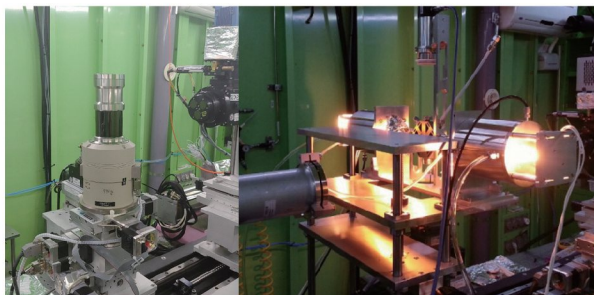


그림 12. 실시간 고속 X-선 영상 빔라인의 in-situ 실험. (좌) 인장기를 사용한 재료 변형 삼차원 관찰, (우) 고온 환경에서 물성 및 구조 변화 관찰(포항 가속기연구소 6C Bio-Medical Imaging 빔라인).

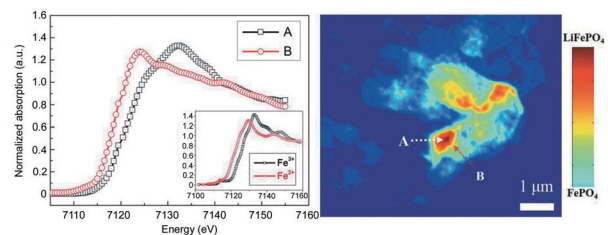


그림 13. 40 nm의 공간 분해능을 가지는 LFP 양극활물질 소재에 대한 XANES spectra 및 성분 분석 XANES mapping 분석 결과(포항가속기연구소 7C X-ray Nano Imaging 빔라인). Ref.: *J. Synchrotron Rad.*, **24** (2017).

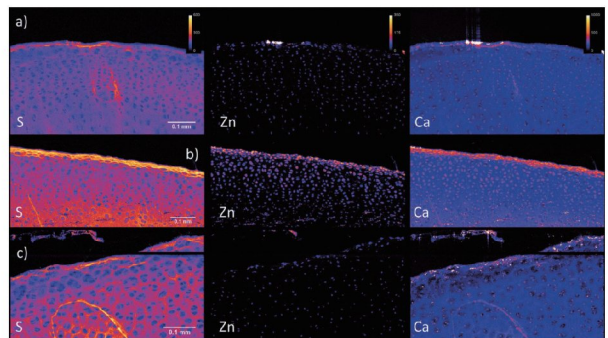


그림 14. 고속 고해상도 XRF imaging 기법을 통해 연골 조직의 다양한 원소를 영상화한 결과 (포항가속기연구소 7C X-ray Nano Imaging 빔라인). (Ref.: U. Boesenberg, *et al.*, *J. Synchrotron Rad.*, **23**, 1550 (2016)).

는 것이 가능하며, 포항가속기연구소의 경우 500 nm 공간 해상도 조건에서 최대 150 mm × 150 mm 의 XRF 2차원 영상을 4시간에 촬영 가능한 고속 고해상도 fly-scan XRFT 기법을 개발하고 있다. 384개의 픽셀로 구성된 대형 Maia 검출기를 활용하여 실시간으로 성분 정보를 처리하며, 1억 픽셀을 초과하는 hyper spectral XRF 이미지를 생성하는 것이 가능하다.

5.5 철강 소재용 고온 X-선 산란/회절 기법

고품질의 철강 재료 생산 및 비용 절감을 위하여 철강 산업군에서는 개재물 분석, 철강 재료의 결정 구조 분석, 합금화 현상 연구 및 소결 재료의 반응성 등 다양한 연구를 시도하고 있다. 하지만 이러한 철강 소재 연구를 위해서는 온도 및 주변 대기 환경 제어를 통한 극한 환경에서의 연구가 필수적이다. 이러한 철강 산업군에서의 분석 이슈에 대응하기 위해서 산업기술융합센터에서는 철강 소재용 고온 실험 장치를 구현하였다(그림 15).

철강 소재에서 요구되는 2,000도 이하의 고온 환경을 구현할 수 있는 특수 챔버를 구축하였으며 다양한 빔라인 측정 기법과의 조합을 통해 상온부터 최대 2,300도까지 온도 환경의 제어가 가능하면 동시에 X-선 회절 및 산란 기법의 측

정이 가능하다. 또한 실제 철강 재료의 생산 공정을 모사하기 위하여 최대 승온 속도를 분당 400도까지 제어 가능하다. X-선 회절 및 산란 기법과 결합된 고온 챔버를 이용하여 합금화 현상 또는 소결 반응에 따른 결정상 변화에 대한 실시간 관찰이 가능하다.

5.5 유변 물성 소각 X-선 산란 기법

액체 및 겔(gel) 형태 시료의 점도 및 모듈러스와 같은 유변 물성은 나노 크기에서의 미세 구조와 큰 상관 관계를 가진다. 유변 물성과 미세 구조간의 상관관계를 평가하기 위하여 산업기술융합센터는 2016년에 유변 물성과 X-선 산란을 동시에 측정할 수 있는 유변 물성 소각 X-선 산란 기법(Rheo-SAXS)을 도입하였다(그림 16). 이러한 측정 기법을 통해 전단응력(shear stress)에 따른 미세 구조의 배향 및 분산도의 변화에 대한 평가가 가능하다. 동시에 사출 공정 및 유동 공정과 같은 분야에서 공정 모사에 의한 용액 및 gel 제품의 미세 구조 변화를 확인할 수 있기 때문에 이차전지 전해질, 액정 및 화장품과 같은 산업군에서 활용되고 있다.

5.6 고분해능 적외선 이미징 기법

적외선 현미경 분광법은 재료의 화학적 특성을 분석할 수 있는 유용한 분석방법이나, 회절한계에 의한 공간 분해능의 제약으로 인해 나노미터 수준의 미세 구조 분석에는 한계를 가지고 있다. 그러나, 최근 나노미터 수준의 분해능을 가지는 적외선 분광 분석이 가능하게 되면서 적외선 분광법의 공간 분해능이 마이크로미터 수준에서 나노미터 수준까지 확장되었다.

적외선 현미경 분광법의 공간 분해능을 확장하기 위해 산업기술융합센터는 2017년 산란 형태의 주사 근접장 광학 현미경(scattering-type scanning near-field optical microscopy, s-SNOM) 방식의 적외선 나노 이미징 및 분광분석이 가능한 장치를 도입하였다(그림 17). 이 장치는 나노미터 수준의 재료의 화학적 특성 분석이 가능한 것으로, 현재는 나노미터 수준의 적외선 이미징이 가능하나, 향후에는 방사광 적외선 광원과 나노 적외선 분광 분석 장치를 결합하여 나노미터 수준의 적외선 분광 분석이 가능할 것으로 기대한다.

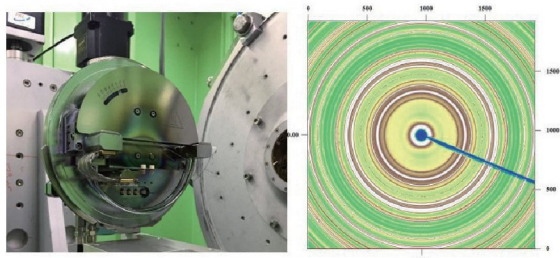


그림 15. X-선 산란 및 회절용 고온 실험 장치(포항가속기연구소 9A U-SAXS 빔라인).

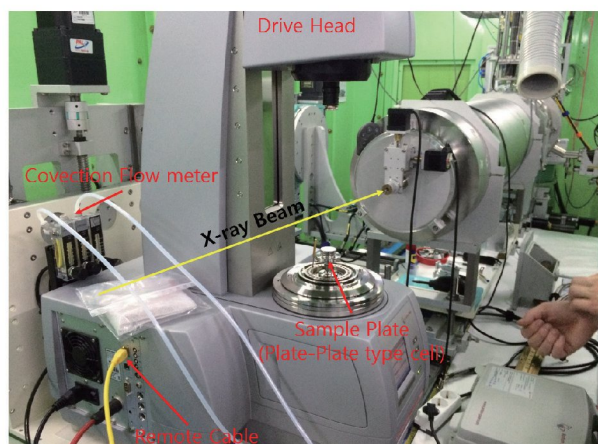


그림 16. 유변 물성 소각 X-선 산란 실험 장치(포항가속기연구소 9A U-SAXS 빔라인).

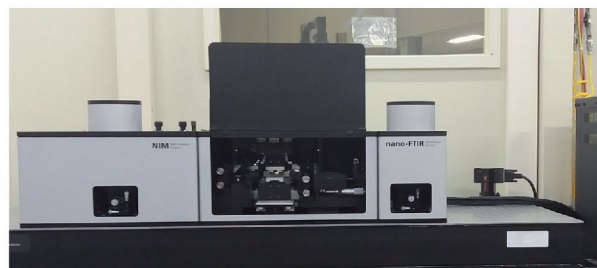


그림 17. 적외선 나노 이미징 & 분광 분석 장치(포항가속기연구소 12D 적외선 분광 분석 빔라인).