

방사광의 원리와 지구환경과학에의 응용

김영호

경상대학교 자연과학대학 기초과학부 지구환경과학 전공

Earth and Environmental Sciences with Synchrotron Radiation

Young-Ho Kim

Department of Earth and Environment Science, Gyeongsang National University,
Gazwa-dong, 900, Jinju 660-701, Korea

요약: 방사광의 특성과 방사광의 발생원리에 대한 소개를 하였다. 매우 높은 스펙트럼 휘도와 매우 넓은 영역의 스펙트럼 범위, X선 파장 조절 가능성과 고도의 지향성 및 집속성, 그리고 시간에 따른 순간과동 구조를 갖는 방사광을 이용하여 지질학 및 지구환경과학에 적용할 수 있는 실험기법을 기술하였다. 이에는 X선 토모그래피, XRF, XANES, EXAFS, 다이아몬드 앤빌 기기 및 라지 발륨 프레스를 이용한 고온-고압 연구와 에너지문제와 관련하여 원자력발전과 핵폐기물처리에 대한 것이 포함되어 있다. 이러한 실험기법은 광물 및 암석에 대한 화학성분, 결정구조 및 결합상태 분석이 가능하며, 광상학과 고생물학 및 환경학 분야에 적용할 수 있다. 또한 이 연구방법을 이용하면 지구내부물질의 거동에 관한 정보를 얻을 수 있다.

핵심어: 방사광, 토모그래피, XRF, XANES, EXAFS, 다이아몬드 앤빌 기기, 라지 발륨 프레스, 원자력발전, 핵폐기물처리

Abstract: This paper introduces the characteristics and generation of the synchrotron radiation (SR). SR has the very high spectral brilliance, broad spectral range, X-ray wavelength tunability, high degree of polarization and collimation, and pulsed time structure. Also describes the technologies to apply in the fields of geology and environmental sciences. These include X-ray tomography, XRF, EXAFS, XANES, DAC, LVP experiments. Further, nuclear power generation and nuclear waste disposal methods are mentioned relating to energy. Using these, analyses of the chemistry, crystal structure and chemical combining states of minerals and rocks can be carried out. Applications in the fields of the economic geology, paleontology and environmental sciences are open too. Informations of the Earth interior materials' behavior under high pressure-temperature can be acquired.

Key words: synchrotron radiation, tomography, XRF, XANES, EXAFS, DAC, LVP, nuclear power generation, nuclear waste disposal

서 언

방사광을 이용한 연구는 전세계적으로 보편화되고 있는 추세이다. 현재, 세계 여러 나라에서 가동중인 방사광 및 가속기연구소 현황은 Table 1과 같다. 여기서는 방사광의 발생원리, 방사광 발생장치 및 방사광을 이용한 연구분야에 대한 소개와, 방사광을 물질 및 환경과학 기초분야 중의 하나인 지구환경과학의 다양한 분야에서 이용될 수 있는 것을 소개하려 한다.

우리 나라에는 포항 방사광가속기연구소(Pohang Light Source, PLS)가 1994년부터 가동 중에 있다. PLS는 소위 제3세대 방사광가속기로서 기초과학 분야뿐만 아니라 산업계와 의료계에서도 이용이 가능한 양질의 방사광을 제공하고 있으며 보다 폭넓은 영역에 걸친 파장의 전자파를 방출하는 다목적 방사광가속기이다. PLS와 같은 최첨단형 가속기에서 발생하는 방사광을 이용하여 물질과학 특히 지구환경과학에 많은 이용이 기대된다.

*Corresponding author: Tel. 82-55-751-6002, E-mail. yhkim@nongae.gsnu.ac.kr

Table 1. World's accelerators and synchrotron radiation sources (year of 2001)

USA	Advanced Light Source (ALS)
	Argonne National Laboratory (ANL)
	Advanced Photon Source (APS)
	Brookhaven National Laboratory (BNL)
	National Synchrotron Light Source (NSLS)
	Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL)
	National Synchrotron Light Laboratory (NSLL)
	Cornell High Energy Synchrotron Source (CHESS)
	Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)
	Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL)
Synchrotron Radiation Center (SRC)	
	Center for Advanced Microstructures and Devices (CAMD)
Germany	Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY)
	Dortmund ELelectron Test Accelerator (DELTA)
	Berliner Elektronenspecherring-Gesellschaft for Synchrotronstrahlung (BESSY)
UK	Daresbury Synchrotron Light Source (DSLS)
Switzerland	Swiss Synchrotron Light Source (SLS)
Italy	Elettra in Trieste (ELETTRA)
France	European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)
India	(Center of Advanced Technology) (INDUS)
Brazil	Laboratorio Nacional de Luz Sincrotron (LNLS)
Sweden	MAX-Lab (ML)
Korea	Pohang Light Source (PLS)
China	Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF)
Taiwan	Synchrotron Radiation Research Center (SRRC)
Canada	Saskatchewan Accelerator Laboratory (SAL)
Denmark	Institute for Storage Ring Facility (ISRF)
Russia	Siberian Synchrotron Radiation Center (SSRC)
Spain	Synchrotron Laboratory at Barcelona (LSB)
Japan	Institute of Physical and Chemical Research (SPRING-8)
	National Laboratory for High Energy Physics (KEK)
	Photon Factory (PF)

방사광

방사광은 기존의 진공관식 X-선 발생장치에서 얻을 수 있는 X-선보다 강도 (intensity)가 매우 높은 것이 제일 큰 특징이다. 방사광을 효과적으로 이용하기 위해서는 우선 방사광을 발생시키는 가속기의 원리와 특성, 그리고 방사광의 성질 등을 이해하는 것이 중요하다. 이에 대한 이해를 돕기 위해 필요한 경우 PLS의 현황을 부연하여 설명한다.

방사광의 발생원리

대전된 입자인 음전자(electron)나 양전자(positron)가

가속되어 빛의 속도(즉, 300,000 km/초)로 곡선운동을 하면, 운동궤도의 접선 방향으로 고도의 지향성을 갖는 전자기파가 발생된다. 이 때 발생하는 전자기파가 방사광이다. 방사광이 최초로 검출된 것은 1947년 미국 제너럴 일렉트릭(General Electric)회사의 입자가속기인 70 MeV 전자싱크로트론이었다. 따라서, 싱크로트론 레디에이션(synchrotron radiation, 방사광)이란 용어가 여기서 유래되었다. 당시 입자가속기의 연구목적은 소립자 물리실험을 하기 위한 것이었으며, 방사광을 이용하기 위한 시설은 아니었다. 이러한 가속기를 제1세대 방사광 가속기로 분류하고 있다. 이후, 1970년대에 들어 방사광 실험만을 하기 위한 목적으로 입자물리 실험용 고에너지 저장링(high energy storage ring) 내부를 선회하

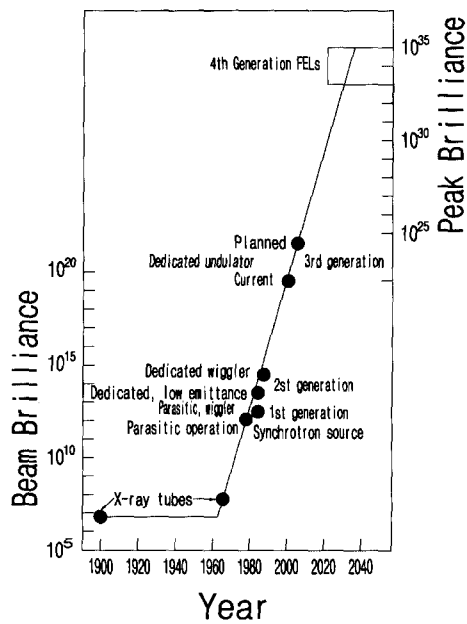


Fig. 1. History of X-ray sources, beam brilliance versus time. Extrapolated line based on the first X-ray discovery and generations of 1st, 2nd and 3rd, respectively predicts the birth of the 4th generation free electron lasers (FELs) in 20 years.

는 전자빔의 크기 (beam emittance)를 줄인 방사광 전용 저장링을 제2세대 방사광가속기라 한다. 일반적으로 제2세대 가속기에서 전자빔의 크기가 1×10^{-7} meter-radian으로 1세대의 1×10^{-6} meter-radian보다 작다. 이후, 1990년대에는 전자빔의 크기가 매우 작은(즉, 1×10^{-8} meter-radian) 제3세대 방사광가속기가 건설되어 이용되고 있는데, 3세대의 가장 큰 특징은 삽입장치(insertion device)를 이용한 것이다. 삽입장치는 일련의 자석들이 교대로 극이 바뀌면서 주기적으로 배열되어 방사광의 휘도(brilliance)를 높이는 장치로 위글러(wiggler)와 언둘레이터(undulator)가 이러한 삽입장치이다. PLS는 제3세대 방사광가속기에 해당된다(윤무현, 1995a). 제4세대 가속기는 1989년이래 이론적인 연구가 진행되고 있는 미래형 방사광가속기로서 X-선 빔의 성질이 레이저(laser)와 같은 전자기파를 발생시키는 것을 목표로 하고 있다(Moncton, 1999). 이럴 경우의 휘도는 제3세대에 비해 10^{10} 정도 증가하게 된다(Fig. 1).

방사광의 특징을 요약하면 다음과 같다: 첫째, 매우 높은 스펙트럼의 휘도(high spectral brilliance)이다. 둘째, 스펙트럼의 범위가 매우 넓다(broad spectral range). 셋째, X-선 파장을 조절(wavelength tunability)할 수 있

으며, 넷째, 고도의 지향성 및 집속성(high degree of polarization and collimation)이다. 다섯째, 방사광은 시간에 따른 순간파동 구조(pulsed time structure)를 갖고 있다. 이러한 방사광의 특성은 연구목표로 하고 있는 물질의 궁극적인 정보를 밝히는데 나름대로 이용되고 있다.

방사광가속기의 원리

방사광가속기는 크게 세부분으로 구성되어 있다: 전자를 일정한 에너지(PLS의 경우 2.0 GeV-2.5 GeV)까지 가속시키는 선형가속기와 가속된 전자를 원형궤도속에서 회전시켜 방사광을 발생시키는 저장링(storage ring). 저장링에서 발생한 방사광을 실험장치가 있는 곳 (beam hutch)까지 이끌어 내는 방사광관이다.

선형가속기

선형가속기 안에는 전자를 얻기 위한 전자발생장치가 있는데, 보통 열전자총(thermionic electron gun)이 많이 이용되고 있다. PLS의 경우는 스탠포드 선형가속기 연구소(Stanford Linear Acceleration Center, SLAC)에서 2 마일 선형가속기용으로 개발한 쿤즈 전자총(Kunz gun)을 이용하고 있다. 전자총은 마치 진공관처럼 음전극-그리드-양전극(cathode-grid-anode)으로 구성되어 있어, 음전극 안에 있는 필라멘트가 가열되어 발생하는 전자를 양전극과 음전극 사이에 걸리는 전위차에 의해 전자를 방출하게 된다.

선형가속기에서 전자빔을 발생시켜 요구되는 에너지까지 가속시키는 원리는 다음과 같은 두 가지 경우이다: 첫째는 일반적인 입사용 선형가속기(50~100 MeV 정도)에서 부스터 싱크로트론(booster synchrotron)을 거쳐 주 저장링으로 가속시키는 방법이다. 둘째는, 풀 에너지(full energy) 선형가속기에서 직접 주 저장링으로 입사시키는 방법이다. PLS는 후자의 방법을 선택하고 있다. 선형가속기 끝에서부터 저장링 입구까지를 빔 전송선이라 하는데, 빔 전송선에는 4극 자석을 적절히 배치하여 빔을 집속시킨다. PLS의 경우, 선형가속기 끝 부분에 있는 빔 전송선에서 저장링쪽으로 빔을 보내기 위해서 각각 10° 씩 꺾는 2개의 수평 2극 자석이 놓여 있다. 따라서 저장링에 빔을 입사시킬 때는 이 두 개의 2극 자석을 작동시켜서 빔을 저장링으로 보내고, 입사가 완료되면 이들의 작동을 중단시켜 선형가속기 끝에 있는 덤퍼(dumper)로 전자를 보내 소멸시킨다.

선형가속기에서 일정한 에너지로 가속된 전자빔은

빔 전송선을 타고 저장링으로 일정한 각도를 유지하며 입사된다. 이 빔은 저장링에서 제일 먼저 입사용 전자석을 통과하게 되는데 이 전자석의 역할은 일정한 각도로 올라오는 전자빔을 적절히 조절하여 전자빔이 저장링의 평면상에 놓이도록 만드는 것이다(윤무현, 1995b).

저장링

방사광가속기의 저장링은 전자빔이 원형궤도를 따라 일정한 에너지를 유지하며 돌게 하면서 오랜 시간동안 저장하여 방사광을 발생하게 하는 가속장치이다. 저장링에서 방사광관을 따라 저장링 밖으로 방출되는 방사광은 전자로부터 에너지를 추출하기 때문에 그대로 두면 저장링 안의 전자빔 에너지는 점점 감소하게 되어 전자의 회전반경이 줄어들게 되며 일정시간이 지나면 진공상태인 저장링 내부의 벽에 충돌하여 사라지게 된다. PLS의 경우 에너지가 2 GeV일 때 전자가 저장링을 한바퀴 돌 때마다 복사에 의해 잃는 에너지는 225 keV(0.011%)이다. 전자가 저장링을 도는 속도는 빛의 속도이다. 따라서 일정한 시간이 지나면 손실되는 에너지는 매우 크게 되어 전자는 사라지게 된다. 따라서 방사광 복사에 의해 손실되는 에너지만큼을 전기장을 이용하여 보충시켜 주어야 하는데, 이 역할을 하는 것이 고주파 가속장치(즉, RF장치)이다. RF장치는 보통 500 MHz로 공명되는 RF 공동(RF cavity)과 이에 전력(power)을 공급하는 클라이스트론(klystron) 및 부대장치로 구성되어 있다(윤무현, 1995c)

방사광가속기의 전자석은 2극, 4극 및 6극의 세 가지로 구성되어 있는데, 2극 전자석은 가장 단순한 형태이며 전자빔의 경로를 바꾸는 역할을 한다. 4극 전자석은 전자빔의 크기를 조절하고, 6극 전자석은 색수차라고 불리는 에너지차이로부터 야기되는 집속정도의 변화를 교정하는 역할을 한다. PLS 저장링은 2극 전자석이 36개, 4극 전자석은 144개이다. 저장링의 크기는 전자에 에너지에 영향을 미치게 되는데, 예를 들면 PLS의 경우는 원형궤도가 280 m(2 GeV)이며, 일본의 SPring-8은 1,436 m(8 GeV), 미국 알곤연구소(Argonne National Lab.)의 APS는 1,104 m(7 GeV) 등이다.

방사광관

방사광관은 저장링의 진공상태유지와 방사광의 안전관리 그리고 X-선 빔을 모니터(monitor)하는 역할을 하며, 저장링과 빔라인의 진공을 연결해주는 장치이다. 저장링에서 방사광관으로 가는 부분을 프론트 엔드(front end)라고 하는데, 저장링에 삽입장치가 있는 경

우와 그렇지 않은 경우에 프론트 엔드에 배치되는 부품에는 차이가 있게 된다. 삽입장치가 있는 경우에 장착되는 부품은 전금속 수동게이트 밸브, 고정 마스크(fixed mask), 광자셔터(photon shutter), 전금속 공압게이트 밸브, 고속잠금셔터, 납 콜리메이터(lead collimator), 안전셔터(safety shutter)등이다. 휨 자석의 경우는 고정 마스크, 전금속 수동게이트 밸브, 광자셔터, 전금속 공압게이트, 베릴리움 창(Be-window), 빔 위치 모니터, 가변간극 및 안전셔터 등이다(나영균, 1998).

방사광과 지구환경과학

지구의 구성물질과 지구환경은 지질학의 연구대상 중의 하나이다. 지구진화에 따른 지표 및 지하물질의 변화와 판구조 운동을 가능하게 하는 지구내부물질의 거동은 지구를 이해하는데 요구되는 기초지식이다. 지구환경은 광물 및 에너지자원의 이용에 따라 기권, 수권 및 암권이 오염되어 생물권역에 나쁜 영향을 주고 있다. 따라서, 지구환경오염에 관한 실태를 파악하기 위해서는 관계되는 오염물질에 대한 풍부하고 정확한 지식이 우선 요구된다. 이에 더불어 오염물질은 농도는 매우 낮기 때문에 이를 측정하기 위한 고도의 장비와 기술이 필요하다.

상기한 방사광의 특성을 지질학 및 지구환경 분야와 연계하여 연구할 수 있는 분야에 대해 알아보기로 한다. 방사광의 특성 상 저장링에서 방사광관을 따라 이용자의 실험대까지 전달되는 X-선은 백색광(white radiation)이다. 즉 모든 파장의 X-선이 뒤섞여 있는 것이다. 이러한 백색광을 직접 이용하기도 하고, 이를 특정 파장을 갖는 단색광(monochromatic radiation)으로 변환하여 이용할 수 있다.

단색광을 이용하는 방법

적용 실험방법의 원리

단색광을 이용하는 실험에 적용되는 방법은 각분산 X-선 회절법(angular dispersive X-ray diffraction method)인 경우, X-선 파장을 조절하여 특정 단색광을 시료에 조사하여 회절을 통해 시료에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이에는 PLS의 경우, 광각 X-선 회절법(wide angle X-ray scattering method)이나 소각 X-선 회절법(small angle X-ray scattering method)에 의한 실험이 가능하다. 이는 기존의 진공관식 X-선 발생장치를 이용하여 보통 실험실(in-house facility)에서 할 수 있는 실험과 유사하므로 여기서는 설명을 생략한다.

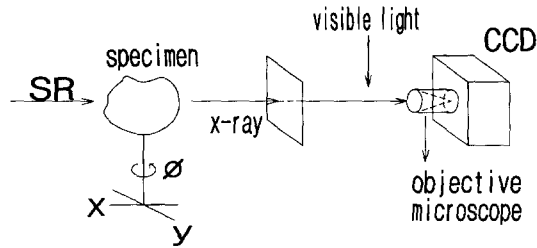


Fig. 2. A schematic configuration of the X-ray radiography. Transmitted X-ray is converted to the visible light through phosphor. Specimen rotates on the rotary stage. X-ray image can be stored at the CCD camera after objective microscope.

마이크로토포그래피

지진파 토모그래피(seismic tomography)는 지구내부에 대한 3차원영상을 제공해준다. 마찬가지로 시료의 크기가 수 cm 정도의 암석이나 광물 또는 광석시료 내부의 포유물(inclusion)과 화석시료 등에 대한 입체적인 정보가 필요한 경우 방사광을 이용하여 X-선 마이크로토포그래피(X-ray computed microtomography, CMT)를 시행할 수 있다. 이 때 이용되는 X-선 광원은 휨자석(bending magnet)에서 얻을 수 있는 에너지준위가 20 KeV에서 100 KeV인 X-선을 이용할 수 있다. 이 X-선은 Si(220)의 모노크로미터(monochrometer)를 이용하여 에너지 범위를 5-35 KeV로 축소시킨 후, 빔의 크기는 시료에 따라 적절하게 조절하여 이용할 수 있다.

시료를 회전스테이지(rotary stage)에서 180° 회전시키면서 투과된 X-선(transmission radiograph)을 포스퍼(phosphor, 즉 YAG 단결정 섬광기(single crystal YAG scintillator))를 통과시켜 가시광선으로 변환시킨 다음, 광학적인 기기를 이용하여 이미지를 시시디(charge coupled device, CCD) 카메라에 저장할 수 있다(Fig. 2). 데이터를 얻는데 걸리는 대체적인 시간은 360개 정도의 조사이미지(projection image)를 얻는데 약 1시간 정도로 매우 짧다. 시료를 일정한 각도로 회전시켜 X-선을 조사하면 3차원적인 영상을 얻을 수 있다.

CMT를 이용한 예는 다음과 같다. 다이아몬드는 투명한 것보다는 불투명한 것(opaque diamond)이 더 많이 발견되고 있는데, 광학적인 연구가 불가능하다. 이러한 불투명 다이아몬드의 포유물에 대한 연구를 하던 다이아몬드가 생성되는 지하 150~200 km 깊이의 맨틀 부위에 대한 지질학적인 정보를 얻을 수 있다. 이러한 다이아몬드를 파괴하지 않고 토모그래피 방법에 의해 내부 포유물에 대한 기하학적인 형태분석과 포유물의



Fig. 3. CMT image of the fossil *Fusinus exilis* at Eocene. Height of this fossil is 20 mm and X-ray beam size of 3 mm was radiated and reconstructed.

상태(기체 또는 액체 등) 및 화학성분에 대한 분석이 가능하다. 일 예로, 카보나도 다이아몬드(Carbonado diamond)는 불투명한 미세결정질 다이아몬드로 내부에는 포유물과 공극(void)이 매우 많이 발달되어 있다. 이러한 공극은 아마 운석의 충돌에 의해 생성된 것으로 추정되는데, 경도가 매우 높아 박편을 만들기가 어렵다. 따라서 CMT를 실시하면 공극이나 포유물에서 X-선의 흡수(X-ray absorption)가 낮은 부분은 밝은 색으로, 높은 경우는 어두운 색으로 이미지가 나타나며, 이러한 공극에 기체가 있는지 또는 원자량이 높은 원소로 채워져 있는지를 알 수 있다.

시료의 크기가 빔(beam) 크기에 비해 매우 큰 경우에는 시료를 회전시키지 않고 시료를 여러 개로 분할하여 방사광을 조사시켜 시료내부에 대한 2차원적 영상을 얻을 수 있다. 이러한 예는 화석에 대한 연구에서 볼 수 있는데, 유기체 부위의 기능과 진화의 방향 및 경향을 밝히기 위해 에오세의 고동 화석인 후시너스 엑실리스(*Fusinus exilis*)에 대한 CMT 결과가 그것이다(Fig. 3). 이는 화석을 파괴하지 않고 길이가 20 mm인 시료를 7개 부위로 나누어 3 mm의 빔으로 X-선을 조사한 뒤 다시 합성하여 완성시킨 것이다.

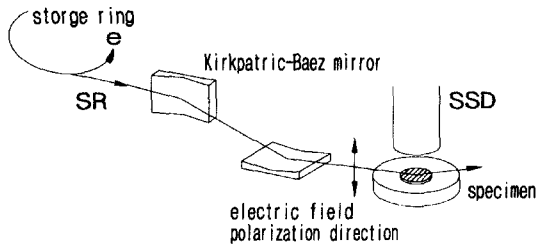


Fig. 4. A schematic configuration of the synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescence spectrometry. Two focussing mirrors of the Kirkpatrick-Baez are used to make the incident beam of $300 \times 300 \mu\text{m}$ to the $1 \times 1 \mu\text{m}$. Si(Li)-solid state detector collects XRF data.

X-선 형광분석법

방사광을 이용한 X-선 형광분석(X-ray fluorescence, XRF)은 기존의 진공관형 X-선 발생장치에 비해 10,000 배 이상의 X-선 유속을 얻을 수 있고, 선형으로 편광되어 있어 검출기에 입사하는 X-선에 수직하면서 편광방향에 위치시키면 산란강도를 최소화할 수 있다. 방사광을 이용한 XRF 장점은 첫째, 입사하는 X-선의 에너지를 분석하고자 하는 원소의 흡수단(absorption edge) 보다 조금 높은 에너지로 조정하면 민감도(sensitivity)를 최대로 높일 수 있다. 따라서 신호 대 잡음비(signal/noise ratio)를 최대로 할 수 있다. 둘째, 중첩된 형광스펙트럼에서 구분하고자 하는 원소들의 흡수단 사이로 입사에너지를 조절하면 원하지 않는 스펙트럼을 제거할 수 있다. 셋째, 기지의 흡수단보다 낮은 에너지를 선택함으로써 기지효과를 줄일 수 있다. 넷째, 정량분석을 할 경우 정확도를 높일 수 있다.

방사광을 이용한 전반사 형광 X-선 분석법(synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescence spectrometry, SR-TXRF)은 두 가지로 구분되는데, 하나는 측정하려고 하는 물질의 형광 X-선과 간섭을 일으키지 않는 물질들을 기판으로 사용하여 그 위에 측정하고자 하는 물질의 용액을 떨어뜨린 후 증발시켜 잔류하는 물질을 측정하는 방법과, 다른 하나는 측정하고자 하는 물질을 포함한 시편자체가 광학적으로 평평할 경우 시편을 직접 측정하는 방법이다. 따라서, 이러한 방법은 진공관 X-선원으로는 부족하여, 방사광을 이용하지 않으면 안 된다.

방사광을 이용한 빔라인에서 실험장비의 배열이 Fig. 4에 있다. 방사광을 집적시키기 위해서 초점거울(focusing mirror, Kirkpatrick-Baez)을 이용하여 $300 \times 300 \mu\text{m}$ 의 입사빔을 $1 \times 1 \mu\text{m}$ 로 만들 수 있다. 이렇게 집적된 빔을 이용하여 시료를 움직일 수 있는 거리(work-

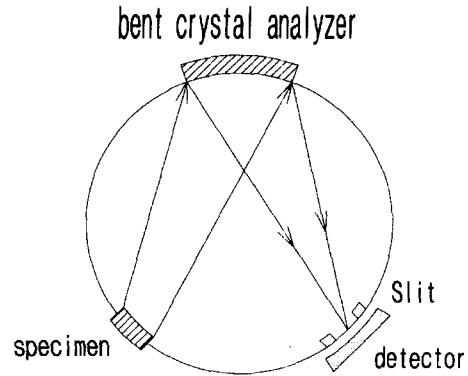


Fig. 5. Johansson geometry Rowland circle in the micro X-ray fluorescence analysis. Bent crystal analyzer focuses X-radiation to the detector. Detector is the Tandem proportional counter.

ing distance)는 $100 \mu\text{m}$ 이다. 이러한 초점거울을 이용하여 얻을 수 있는 장점은 빔이 매우 안정적이며, 빔의 에너지와 상관없이 빔의 초점(energy-independent focal point)과 크기(spot size)를 조절할 수 있다는 것이다.

미세 X-선 형광분석법(micro X-ray fluorescence analysis, mXRF)은 삼입장치(예, 언듈레이터)가 설치된 빔을 이용하는 것이 훨씬 자석으로부터 얻을 수 있는 X-선 광원보다 매우 유리하다. 이것은 보다 높은 강도의 X-선을 얻을 수 있기 때문이다. 이용하는 원리는 파장 분산 분광법(wavelength dispersive spectrometry, WDS)을 이용한다. WDS에 사용하는 검출기(detector)는 탠덤 비례 계수기(Tandem proportional counter)로써, 형광 X-선을 분석하기 위하여 조헨슨 기하원(Johansson geometry Rowland circle)에 근거하고 있다(Fig. 5).

확장 X-선흡수미세구조

X-선은 물질내부를 통과하는 동안 물질과 상호작용에 의해 X-선의 일부가 흡수된다. 흡수계수(μ)는 다음 관계식과 같다: $I(t) = I_0 e^{-\mu t}$ 여기서, I_0 는 입사 X-선 강도, $I(t)$ 는 투과 X-선 강도, t 는 시료의 두께이다. 예를 들면 코발트 박판(Co thin film)의 경우, Fig. 6과 같이 흡수계수가 흡수단(absorption edge) 이후에 미세구조(fine structure)를 갖는다. 이러한 미세구조는 두 부분으로 구분되는데 흡수단 이후 약 40 eV까지를 X-선흡수단근구조(X-ray absorption near edge structure, XANES, 제인즈)라고 하는데, 흡수원자 주변구조와 함께 전자상태에 대한 정보를 제공해 준다. XANES 이후부터 약 1000 eV까지를 확장 X-선흡수미세구조

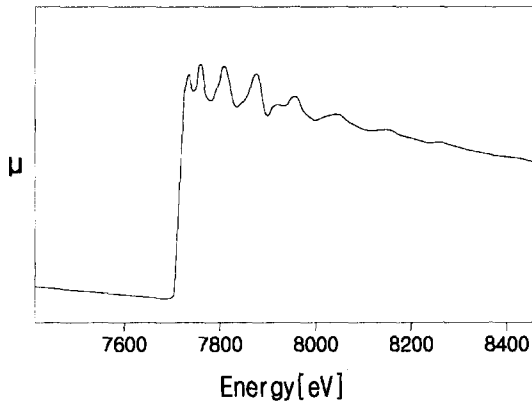


Fig. 6. Co thin film K absorption edge spectrum

(extended X-ray absorption fine structure, EXAFS, 엑셉스)라 하며, EXAFS는 흡수원자 주위의 구조에 관한 많은 정보를 주고있기 때문에 X-선회절분석(X-ray diffraction, XRD)과는 다른 특성을 갖고 있다. 첫째, 장거리질서도(long range order)의 유무에 관계없이 고체, 액체 등 무질서한 시료에 대한 분석을 할 수 있다. 따라서, 근거리질서도(short range order)에 대한 구조분석만 가능하다. 둘째, 여러 종류의 원자에 대한 구조분석은 입사 X-선의 에너지를 각각의 원자 흡수단으로 조절함으로써 원하는 원자의 주위환경을 분석할 수 있다. 셋째, EXAFS 분석을 통해 원자의 근접원자들의 종류와 결합거리에 대한 정보를 얻을 수 있다. 넷째, 원자의 화학적상태에 대한 분석도 흡수단 근구조(near edge structure)를 분석함으로써 가능하다(구양모, 신남수, 2000).

EXAFS 실험은 방사광원이 이상적인데, 이는 넓은 파장에 걸친 X-선이 요구되기 때문이다. EXAFS를 이용한 구조분석은 먼저 분석하고자하는 재료와 유사한 표준시편이 필요하다. 표준시편은 가능한한 분석하고자하는 시료와 구조적으로 유사해야하며 분석하려는 물질의 구조가 복잡할수록 다양한 표준시편과 비교분석이 필요하다. EXAFS에 대한 이론적분석법이 발전은 하고 있지만 표준시편과 비교분석이 가장 기본적인 방법이다. 실험 데이터에 대한 분석방법은 매우 다양하고 복잡하므로 여기서는 생략하기로 한다.

EXAFS 실험은 투과실험과 형광측정실험 두 가지가 있다. 시료에 대한 투과실험을 하면, 비정질물질의 국부적인 구조에 대한 해석과 화학결합에 대한 연구가 가능하다. 이는 XRD가 갖고 있는 한계를 뛰어 넘는 것이다. 불균질한 물질의 구조변화추적이 가능하며, 초

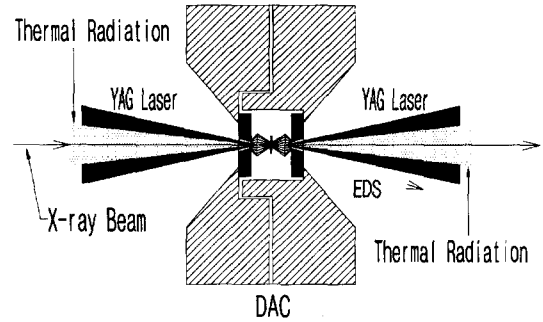


Fig. 7. A cross section of the diamond anvil cell. Combined with YAG laser, sample can be heated up to 7,000 K. Gasket between two diamonds holds sample. EDS stands for energy dispersive spectrum.

미립자 구조와 열적 성질을 분석할 수 있다. 형광측정 실험을 시료의 표면에 적용시키면, 표면에 있는 흡수원자의 배위수와 기관과의 결합거리에 대한 정보를 얻을 수 있다. 특히, 금속표면에 흡착한 원자구조와 흡착분자의 구조를 알 수 있고, 표면에 대한 XANES로는 분자의 배위수, 결합거리의 변화 등을 알 수 있다(Margaritondo, 1988). 따라서 지질학 및 지구환경문제와 이러한 분석 특성을 적절히 연계시키면, 오염물질이나 지하수 시료, 비정질 시료, 광물, 암석 및 광석 등 시료에 대한 구조해석과 화학분석을 시행할 수 있다.

EXAFS 및 XANES 실험은 상온-상압 뿐만 아니라 고온-고압상태에서도 시행할 수 있다(Shimomura and Kawamura, 1987). 따라서, 고압에서 지질학적으로 중요한 특정원자의 구조와 특히 전자상태를 연구하는데 긴요하게 이용되어 지구내부에 대한 이해의 도를 넓힐 수 있다.

백색광을 이용하는 방법

적용 실험방법의 원리

백색광을 이용하는 실험에 적용되는 방법은 에너지 분산회절법(energy dispersive X-ray diffraction method, 이하 EDXRD)이다. EDXRD의 원리는 브래그 방정식(Bragg equation, $\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta$)과 광자에너지 식(photon energy equation, $E = hc/\lambda$, h 는 Planck 상수, c 는 빛의 속도, λ 는 파장)으로부터 다음과 같은 관계가 유도된다: $E \cdot d = E_0 \cdot d_0 =$ 상수, 여기서 E 는 광자에너지이고 d 는 밀러 면(Miller plane)의 거리이다. c 는 온도와 압력 또는 온도-압력조건의 상태를 나타낸다.

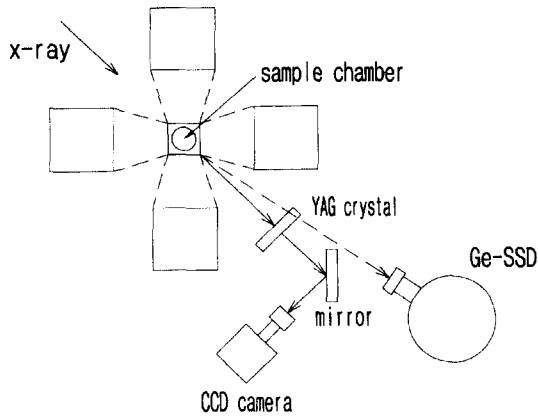


Fig. 8. A cross section of the large volume press. X-ray penetrates between anvils. Ge-solid state detector detects the diffracted X-radiations. Sample chamber can be monitored using phosphor (i.e., YAG crystal) with CCD camera.

다이아몬드 앤빌 기기

다이아몬드 앤빌 기기(diamond anvil cell, DAC)는 매우 적은 시료를 이용하여 높은 압력(예, 560 GPa)을 발생할 수 있는 장치이다. 또한 YAG 레이저와 조합시키면 시료의 온도를 최대 7000 K까지 가열할 수 있다(Fig. 7). 따라서 물질에 대한 고온-고압연구 조건은 지구중심의 한계를 넘어서고 있다. 이러한 온도-압력 범위에서 지구구성물질에 대한 상태방정식(equation of state)과 상변이(phase transformation)에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이는 다이아몬드가 높은 경도를 유지하며 전자기파(X-선 및 가시광선)를 잘 통과시키고 열전도율이 매우 높은 성질을 이용한 것이다.

다양한 DAC이 고안 및 제작되어 이용되고 있으나 기본적인 원리는 같다. DAC은 두 개의 고품질(gem quality) 다이아몬드 사이에 시료방(sample chamber)이 있는 개스킷(gasket)을 장착하여 기계적인 조작을 통해 시료방을 압축하는 것이다. 다른 고압발생기에 비해 경제적이고 용이하게 고압값을 얻을 수 있는 장점이 있는 반면, 1축 방향으로 전달되는 응력(uniaxial stress)이 너무 과다하여 XRD실험을 할 경우 선호방향성(preferred orientation)에 의한 회절패턴에 문제가 있는 것이 단점이다. 회절패턴은 반도체 계수기(solid state detector(SSD)), 주로 Ge이나 Si(Li) SSD를 이용하여 수집된 후, 분석을 하게 된다. 자세한 실험방법은 여러 곳에 나타나 있다(Manghnani *et al.*, 1984; Kim and Na, 1994)

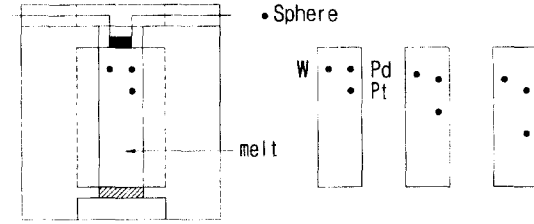


Fig. 9. A cross sectional view of the apparatus to measure the viscosity of melt at left hand side. For example, three metal spheres of tungsten (W), palladium (Pd) and platinum (Pt) are shown for measurement of drop velocities. Viscosity of melt can be derived from the terminal velocity relation due to the density difference of metal spheres.

라지 볼륨 프레스

라지 볼륨 프레스(large volume press, LVP)는 DAC이 갖는 단점을 보완하기 위해 고안된 것으로 이용되는 시료가 DAC에 비해 매우 많기 때문에 라지 볼륨이란 용어가 사용되었다(Fig. 8). LVP는 DAC과 마찬가지로 상태방정식과 상변이에 대한 연구를 할 수 있을 뿐만 아니라 용융체(melt)의 점성도나 물질의 유동성(rheology) 및 변형(deformation)에 대한 연구도 할 수 있다. 현재까지 개발되어 방사광연구소에서 이용되고 있는 LVP는 유압전달능력의 차이에 의해 250톤급과 1,000톤급이 있는데, 전자는 입력을 24 GPa, 온도는 2000°C까지 범위에서 실험이 가능하며, 후자는 각각 30 GPa 및 3000°C까지 범위에서 실험을 시행할 수 있다.

LVP는 지구내부의 액상부위(예, 마그마방, 외핵 등)의 점성도를 측정하는데 이용되는데 밀도가 다른 금속공을 용융체에 넣어 낙하속도를 방사광을 이용하여 측정한다(Fig. 9). 이 때 낙하속도를 터미널 속도(terminal velocity)라 하며, 다음과 같은 관계가 있다: $V_t = (2\Delta\rho r^2 g) / 9\eta$, 여기서 V_t 는 터미널 속도, $\Delta\rho = \rho_{\text{sphere}} - \rho_{\text{melt}}$, r 은 금속공의 반경, g 는 중력가속도, η 는 점성도이다. 이는 압축 가능한 시료방의 공간이 넓은 LVP의 특성을 이용한 것이다.

LVP를 이용하여 특정광물의 유동성을 측정할 수 있다. 골드 그리드(gold grid) 안에 시료(예를 들면, MgO 나 페롭스카이트 분말 등)를 넣고, 실린더 형태로 만들어 하중을 가하게 되면 시료와 골드 그리드가 변형되어 나타나는 X-선 이미지를 얻을 수 있다. 또한 시료에 일정한 압력을 주고 시간에 따른 편 응력(differential stress)을 측정하여 회절 프로파일 분석(diffraction profile analysis)을 하면 시료의 지지강도(yield strength)

와 강도(strength)에 대한 시간 함수를 측정할 수 있다.

에너지 분야

원자력발전용 및 핵연료 소멸처리용 가속기는 양성자가속기로 전자가속기와는 다른 형태이다. 양성자가속기의 제원은 10억 전자볼트(10 GeV)급 선형가속기로 100 mA의 평균전류를 갖는 시설로써, 약 1 km 정도이다. 양성자가속기는 양성자를 직접 시료에 이용하는 것으로 방사광 발생원리나 이용방법이 서로 크게 다르나 에너지 및 환경문제와 연계하여 여기서 소개하기로 한다.

원자력발전

청정에너지인 전기에너지를 얻기 위해 사용되었던 화력발전소는 화석연료를 연소함으로써 지구대기환경에 막대한 영향을 주었다. 이에 대한 대체에너지로써 핵분열을 이용한 원자력발전소가 건설되어 이용되고 있으나 핵폐기물처리나 사용 후 핵연료의 재처리 같은 문제가 발생하였다. 폐기물처리를 위한 처리장 부지 확보문제는 초미의 관심사가 되고 있으며, 사용 후 핵연료에서 재처리를 하게되면 연계되는 우라늄과 플루토늄은 국가간 분쟁의 초점이 되고 있다. 양성자가속기를 이용하면 이러한 문제와 관계없이 전기에너지를 얻을 수 있다.

가속기를 이용한 원자력발전 원리는 다음과 같다: 가속기에 이용되는 핵연료는 원자로의 중성자에 의해 핵분열이 일어난다. 이 때, 원자로 내부의 연료에 의한 자체 임계조건이 1보다 작다. 따라서, 이에 필요한 중성자를 외부가속기에서 생성시킨다. 사용되는 연료는 토륨이나 용융상태의 염류 등 액체형 핵연료이다. 이러한 액체형 연료는 비임계원자이므로 필요한 안전장치가 줄어든다. 왜냐하면, 노심 냉각수의 공급이 중단 되어도 노심의 온도는 1100°C를 넘지 않기 때문이다. 이는 대류에 의해 노심이 자연 냉각되는 것으로 액체형 연료를 이용할 때의 장점이다. 토륨을 원료로 이용할 경우 연료인 토륨은 완전 연소하게 된다. 또한 핵분열 시 수명이 긴 반감기를 갖는 핵종이 생기지 않는다. 따라서 사용 후 핵연료의 보관이 필요없으며, 근본적으로 원자폭탄을 만들 수 있는 연료가 생겨나지 않게 된다.

핵폐기물 소멸처리

핵폐기물은 방사능 및 열발생 정도에 따라 중-저준위폐기물과 고준위폐기물로 구분할 수 있다. 중-저준

위폐기물은 반감기가 30년 이하의 방사성 핵종에 의해 오염된 것으로, 반감기의 반복경과로 자연상태에서 자연소멸시켜 처리하는데 약 300여 년이 소요된다. 그러나 고준위폐기물은 사용 후 핵연료를 재처리하여 남은 폐기물로써 반감기가 긴 핵종이 대부분이므로 방사능이 매우 강한 폐기물이다. 고준위폐기물은 처리장에 보관할 경우 10,000년 이상의 긴 시간이 필요하다. 핵폐기물 처리장 건립은 사회적으로 매우 민감한 문제이므로, 단기간에 처리할 수 있는 방법이 개발되면 많은 노력과 재원을 아낄 수 있는데 상기한 양성자가속기를 이용하면 처리하는데 많은 시간을 단축할 수 있다. 양성자가속기를 이용하여 다량의 중성자를 생성한 후, 사용 후 핵연료에서 수명이 긴 핵종을 균 분리한 폐기물 시료에 중성자를 조사하여 수명이 긴 핵종을 파쇄한다. 이 과정에서 생성되는 핵종은 안정적이거나 수명이 짧은 반감기를 갖는 핵종으로 핵폐기물처리장에 보관하면 이렇게 처리한 고준위폐기물을 수백년 정도의 시간 안에 소멸처리 할 수 있다.

결 론

방사광은 매우 높은 스펙트럼의 휘도와 X-선 스펙트럼의 범위가 매우 넓으며 파장을 조절할 수 있다. 또한 방사광은 고도의 지향성과 집속성을 갖고 있으며, 시간에 따른 순간파동구조를 갖고 있다. 이러한 방사광의 특성을 이용하여 지구구성물질에 대한 연구, 지구내부물질의 거동에 대한 연구와 더불어 지구환경학적으로 중요한 미세원소의 분석이 가능하다.

또한 전자가속기 이외의 양성자가속기를 이용하면 원자력발전이 가능하여 에너지문제에 보다 고무적인 접근을 할 수 있으며, 고준위핵폐기물에 대한 중간처리를 하여 반감기수명을 단축시켜 보관하면 관리 및 처리에 유리한 입장을 견지하게 해줄 수 있다.

사 사

이 연구는 포항가속기연구소(PLS)의 윤화식 박사, 최재영 박사의 도움이 있었다. 또한 SPring-8의 T. Utsumi와 APS의 T. Uchida, 하와이대학의 L. C. Ming과 J. Balogh의 도움을 받았다. 여기에 실린 그림은 경상대학교 지구환경과학과 강무환이 그린 것이다. 그들에게 감사의 마음을 전한다. 이 연구는 학술진흥재단 '금속 실리사이드와 거대고리착물의 특성과 응용 및 입자 상호작용 연구(99-005-D00004)'의 지원을 받았다.

참고문헌

- 구양모, 신남수, 2000, X-선 과학과 응용, 도서출판 아진, 119-155
- 나영균, 1998, 방사광 가속기 기술 IX, 밝은빛 소식, 8(1), 8-15
- 윤무현, 1995a, 포항방사광가속기의 원리와 특성(I), 밝은빛 회보, 2(1), 4-7
- 윤무현, 1995b, 포항방사광가속기의 원리와 특성(II), 밝은빛 회보, 2(2), 4-10
- 윤무현, 1995c, 포항방사광가속기의 원리와 특성(III), 밝은빛 회보, 2(3), 4-8
- Kim, Y. H. and Na, K. C., 1994, High pressure X-ray diffraction studies on a graphite using Synchrotron Radiation, J. Petrol. Soc. Korea, 3, 34-40
- Manghnani, M. H., Ming, L. C., Balogh, J., Skelton, E. F., Qadri, S. B. and Schiferl, D., 1984, Use of internal pressure calibrants in-situ in X-ray diffraction measurements at high pressure and temperature: review and recent results, High Temperatures-High Pressures, 16, 563-571
- Margaritondo G., 1988, Introduction to Synchrotron Radiation, Oxford University Press, 118-138
- Moncton D.E., 1999, Toward a fourth-generation X-ray source, APS Research, 2(2), 22-27
- Shimomura O. and Kawamura T., 1987, EXAFS and XANES study under pressure, High-Pressure Research in Mineral Physics, (ed) M.H. Manghnani and Y. Shyono, Geophysical Monograph 39, Mineral Physics 2, 187-193

(2001년 9월 17일 접수, 2001년 12월 4일 채택)