

포항가속기연구소의 방사광가속기와 그 이용

나 승 유

포항가속기연구소 빔라인부 기술실

1. 서 론

포항가속기연구소에 가동되고 있는 가속기는 이른바 제3세대형 방사광가속기이다. 방사광 가속기란 광속에 가까운 속도로 운동하는 하전입자가 가속될 때 방출되는 광을 이용하기 위하여 건설된 가속기를 말하며, 특히 undulator나 wiggler라 불리는 삽입장치를 설치하여 더욱 밝은 방사광을 얻도록 설계 제작된 방사광 가속기를 제3세대형 방사광 가속기라 한다. 따라서 광학적 관점에서 보면 하나의 광원으로 볼 수 있으며, 전세계적으로 3세대 방사광 가속기는 EU에 ESRF, 미국에 ALS와 APS, 그리고 이태리에 Trieste, 대만에 SRRC 등이 있으며, 일본에 Spring 8이 곧 완공될 예정이다.

포항가속기연구소는 1988년 4월 가속기 건설을 위한 건설 추진반이 설치되기 시작되어서 1994년 7월 저장 링의 설치가 완료되었으며, 12월에 준공식을 갖고, 1995년 9월부터는 사용자들이 실험할 수 있도록 개방되기 시작하였다.

방사광 가속기에서 방출되는 방사광은 그 에너지 영역이 적외선으로부터 가시광선, 진공자외선은 물론 X-선 영역에 이르는 넓은 범위에 걸쳐서 강한 세기와 고도의 집속 특성을 지니고 있어서 광의 흡수나 광전자방출, 형광등 광이 물질에 작용하여 일으키는 여러 현상을 이용한 물성의 조사 등 기초과학분야는 물론이고, 고집적 회로의 제작이나 미세기계의 제작 등 여러 응용과학분야에 이용할 수 있다.

현재 포항가속기연구소에는 방사광을 여러 가지 실험에 이용하기 위하여 8개의 빔라인이 설치되어서 사용자에게 제공되고 있으며, 3개의 빔라인이 새로이 건설되고 있으며 향후 매년 약 3개씩의 빔라인이 증설될 예정이다.

이 글에서는 포항가속기의 특성과 설치된 빔라인들의 제원, 그리고 각 빔라인에서 진행되는 실험들에 대해 이야기 하고자 한다.

2. 포항 방사광 가속기의 특성

포항가속기연구소의 방사광 가속기는 전자를 가속해 주는

선형가속기와 가속된 전자를 저장하는 저장링으로 구성되어 있다. 선형가속기에 의한 전자의 입사에너지는 2 GeV로 설계되었으며, 저장 링에 200 mA의 전자를 통상 저장하는데, 저장 링에서 전자의 에너지를 2.5 GeV까지 증가시킬 수도 있다. 저장 링에 저장된 전자의 공간적 분포는 수평 수직방향으로 각각 RMS 수백 μm 의 분포를 갖는다. 저장 링에서 전자는 궤도운동을 하게 된다. 궤도는 선형 궤도와 원형궤도 부분의 조합으로 된 12개의 같은 형태의 구간이 반복되어 이루어져 있다. 저장 링에 저장된 전자는 직선운동을 하다가 휩자석 부위에 이르러서 자장에 의해 원운동을 하면서 자석부위를 통과하고 다시 직선운동을 하게 된다. 전자가 자석부위를 통과할 때, 전자의 운동에너지의 일부를 잃어버리면서 광자 에너지 $h\nu$ 인 광자를 다음 식으로 표현되는 수만급 궤도의 접선방향을 따라서 방출하게 된다.

$$N(h\nu) = 1.256 \times 10^7 \gamma G_1(y) \text{ photons/sec} \cdot \text{mrad} \cdot \text{mA} \quad (1)$$

(0.1% Band width)

여기서 함수 $G_1(y)$ 는

$$G_1(y) = y \int_y^\infty K_{5/3}(t) dt \quad (2)$$

와 같이 표현되고 매개변수 y 는 광자에너지 $h\nu$ 와 저장 링의 critical energy라 불리는 $h\nu_c$ 에 의해 다음 식과 같이 주어진다.

$$y = \frac{h\nu}{h\nu_c} \quad (3)$$

한편, 저장 링의 critical energy $h\nu_c$ 는 Plank 상수 h , 광속도 c , 상대론적 입자의 질량비 γ , 그리고 원형 전자궤도의 궤도반경 ρ 로써 다음과 같이 표현된다.

$$h\nu_c = \frac{3hc\gamma^3}{4\pi\rho} \quad (4)$$

이때, 방사광은 고도로 집속되어 수직방향으로 가우스함수형태의 공간분포를 갖는데, 그 표준편차는 다음 식과 같이 표현된다.

표 1. 포항방사광가속기의 주요 제원

Lattice type	TBA
Nominal energy (GeV)	2 (2.5)
Circumference (m)	280.56
Revolution frequency (MHz)	1.06855
RF frequency (MHz)	500.087
Natural emittance at 2.0 (2.5) GeV (nm, rad)	12.1 (18.9)
Length of insertion straight (m)	6.8
Beta functions (h/v)-Minimum (m)	0.96/3.09
length of the dipole magnet (m)	1.1
Dipole field at 2.0 (2.5) GeV (T)	1.058 (1.32)
Bending radius (m)	6.03

$$\sigma_R \approx \frac{565}{\gamma} \left(\frac{h\nu}{h\nu_c} \right)^{-0.425} \quad (5)$$

2 GeV의 운동에너지를 갖는 전자가 운동할 때, 파장 수 nm의 연 X선에 대해 식 (5)로 주어지는 표준편차는 통상 0.1-0.2 mrad 정도의 값을 갖는다.

전자가 휨자석을 지나면서 곡선궤도를 운동할 때 방사광이 방출되는데, 보다 강한 세기의 방사광이 필요한 경우, 전자의 궤도에 자장의 방향이 교차하는 자석의 열을 만들어서 설치하면 전자는 뱀이 지나가는 모양(蛇行)의 궤도를 따라 움직이게 되며, 개개의 자석에 의한 궤도운동에 따라 방출되는 방사광이 중첩되어서 강한 세기의 광을 얻을 수 있게 된다. 이런 목적으로 만들어진 자석 열을 삽입장치(insertion device)라고 하는데, 삽입장치에 의한 방사광이 간섭성을 가질 때, 이 삽입장치를 undulator라고 하고 간섭성을 갖지 않으면 wiggler라고 한다. 포항가속기에는 저장 링에 전자의 원형운동을 일으키는 휨 자석이 12개 있으며, 주기 7cm의 undulator가 설치되어 있다. 표 1에는 포항가속기의 간략한 제원이 소개되어 있고, 이 제원에 따라 가속기에서 방출되는 광의 휘도를 그림 1에 보였다. 또 그림 2에는 포항가속기연구소에서 제작된 U7 undulator를 보여주고 있다.

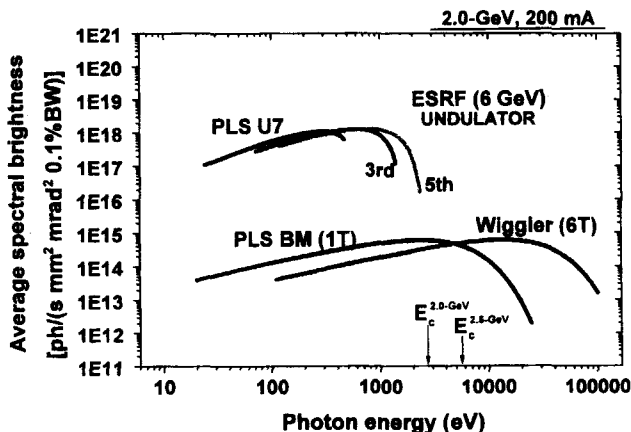


그림 1. 포항가속기에서 방출되는 광의 휘도 분포.



그림 2. 포항가속기연구소에서 제작된 U7 undulator.

3. 완공된 빔라인(Beamline)과 관련실험들

앞 절에서 보듯이 방사광가속기에 의해 얻을 수 있는 방사광은 광원의 크기가 매우 작고 매우 밝으며, 고도로 집속되어 있을 뿐 아니라 파장영역도 매우 넓어서, 위치에 따른 특징적 편광분포를 갖고 있어서, 지금까지 우리가 사용하였던 통상의 광원과 현격한 차이를 갖는다. 특히, 통상적인 광원의 파장영역이 가시광 영역과 특정의 X선 파장에 한정되었던 것에 비하여 방사광이 넓은 영역에 고른 밝기 분포를 갖는다는 점은 하나의 획기적인 변화이다. 이 넓은 파장영역은 물질을 구성하는 여러 가지 원소의 최외각 전자는 물론 내부각에 존재하는 전자와 상호 작용하여 전자방출을 일으킬 수 있는 충분한 광자에너지를 갖고 있어서 방사광의 분광학부분에 대한 활용은 매우 기대되는 부분이다. 이 뿐만 아니라 광과 물질간의 상호 작용과 관련된 실험, 이를테면, 흡수, 광전자 방출, 형광 방출, 회절, 산란, 광화학반응 등과 빛 간섭성 등의 특성은 지금까지 가지고 있던 여러 가지 실험의 범위를 넓혀줄 뿐 아니라, 지금까지 파장의 제한이나, 광원 세기의 제한으로 하지 못하였던 실험을 가능케 해 준다. 방사광이 이용될 수 있는 분야들은 원소 및 물성 분석 등을 통한 물리, 화학 등 기초연구로부터 미량원소 분석을 통한 환경과학, 재료 및 금속 공학, X-선을 이용한 물질의 구조분석과 X선 현미경을 이용한 촉매 및 의약품 개발 등 생명과학과 약학 관련 응용과학분야, 순환기의 X선 조영촬영을 이용한 의학분야의 연구 및 X선 lithography를 이용한 고집적 회로의 개발과 극미세기계의 개발 등 공학분야의 이용 등 방사광의 활용분야는 실로 무궁무진하다.

저장 링 안에서 궤도운동을 하는 전자에 의해 궤도의 접선방향을 따라 방출된 방사광은 파장에 따라 물질과 상호 작용하는 특성이 각각 다르다. 가시광을 제외하고 대종을 이루는 파장

표 2. 1B3 white/x-ray fluorescence microprobe 빔라인의 제원

Monochromator	N/A	Kirkpatrick-Baez optics ¹	multilayer mirror ²	Si(111) crystal ³
Photon energy range	White beam	12.5 keV	4~12 keV	4~12 keV
Energy resolution $\Delta\lambda/\lambda$	N/A	0.1	0.05	1×10^{-4}
Spot size	see below*	$2 \times 2 \mu\text{m}^2$	18 or 35 μm	see below
Photon flux ⁴	4×10^{13} p/s	5×10^{10} p/s		

¹Kirkpatrick-Baez optics consists of a pair of elliptically bent graded multilayer mirrors.

²Ta/Si multilayer mirrors with $2d=60$ or 80 \AA are available.

³This is a channel cut crystal.

⁴photons/sec/mm².

*Spot size can be determined either by user aperture or Ta pinholes of 18 or 35 mm.

200 nm 이하의 진공자외선으로부터 파장 수 Å에 이르는 연 X-선은 대기에 의해 급속히 흡수되므로 이 영역의 광을 이용하기 위해서는 진공이 유지되는 관을 설치하여 광을 이끌어 내야하며, 필요한 경우 광을 집속, 분광, filtering하여 실험장치까지 도출하여야 한다. 이와 같은 진공장치와 광의 가공을 위한 광학장치를 통칭하여 빔라인(beamline)이라 한다. 포항가속기 연구소에는 현재 8개의 빔라인이 설치되어 사용자들에게 제공되고 있으며, 또 다른 3개의 빔라인이 건설되고 있으며, 추후로 매년 3개씩의 빔라인을 증설하여 사용자들에게 제공할 예정이다. 포항방사광가속기에 설치할 수 있는 최대의 빔라인 수는 약 60~70개 정도가 될 것으로 보인다.

현재 운영중인 빔라인의 사양과 실험들에 대하여 요약하면 다음과 같다.

3.1 1B3 백색광/ X-선 형광미세탐침 빔라인

1B3 빔라인은 다용도 빔라인으로 X-선 형광미세탐침(X-ray Fluorescence Microprobe)에 의한 미량원소의 분석이나 LIGA 공정, 그리고 광학소자의 calibration용으로 사용하고자 한다. 빔라인의 끝에 진공과 대기사이의 경계는 Be창으로 이루어져 있어서 4 keV 이하의 광은 거의 투과되지 않는다. 이 빔라인은 Be창 뒤에 장치되는 광학계에 따라 광학계를 사용하지 않고 Be창을 통해 나오는 백색광을 사용하거나 단결정 mono-

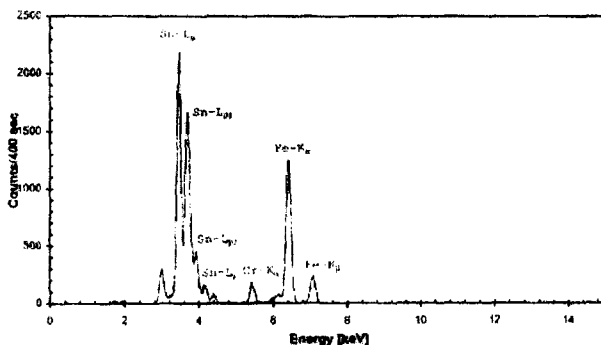


그림 3. 주석이 증착된 철 표면의 형광 spectrum 특성.

chromator를 이용한 단색광을 사용할 수 있다. 현재는 타원형 Kirkpatrick-Baez 집속 광학계와 다층박막거울도 이용할 수 있는데, 두 경우 모두 다층박막에 의한 filtering으로 단색광을 사용한다. 이 빔라인에는 시료의 조작과 신호의 검출을 위해서 Si(Li) detector, Ion chambers, XYZ θ sample position stages, Optical table, Video-microscope 등의 장치가 있다.

표 2에는 이 빔라인의 주요 제원 및 성능이 열거되어 있으며, 그림 3에는 이 빔라인을 이용하여 산업과학기술연구소(RIST)에서 제작된 주석이 증착된 철 표면의 형광 spectrum 특성을 보여주고 있다.

이 빔라인을 이용한 LIGA 공정결과도 있으나, 이 결과는 현재 건설되고 있는 LIGA 빔라인의 설명부분에 포함할 것이다.

3.2 2B1 진공자외선 광전자분광학 빔라인 (VUV Photoelectron Spectroscopy)

이 빔라인은 가속기 건설과 함께 건설이 진행되어, 가속기가 일반사용자들에게 개방되기 시작할 때부터 운영되었다. 이 빔라인은 광자에너지가 12~1230 eV에 이르는 진공자외선영역의 광을 이용하는 빔라인이며, 구성 광학계는 광원 뒤에 광 집속을 위해 두 조의 구면거울로 구성되는 Kirkpatrick-Baez형 집속 광학계와 입사실통, 구면회절격자 monochromator, 출사실통, 그리고 재집속거울로 구성되어있다. 목표로 하는 실험은 표 3에 나열된 바와 같이 여러 종류의 광전자 분광학실험이다. 진공자외선은 물질과 상호 작용하여 쉽게 흡수되므로 주로 시료 표면의 성질을 규명하는데 주로 쓰인다.

앞에 설명되지 않았으나 방사광은 광속의 중심에서는 수평 방향의 선형편광을 갖고 중심으로부터 위나 아래로 이동함에 따라 수직방향으로 편광된 성분의 방사광도 함께 방출되는데 이를 이용하기 위해 광경로 상에 chopper를 달아서 적절히 조절하면 좌선편광과 우선편광을 원하는 대로 얻을 수 있다. 광전자 분광학 빔라인에는 chopper가 장치되어 있어서, 자성물질의 자기 원형 이색성(Magnetic Circular Dichroism)실험에도

표 3. 2B1 광전자분광학 빔라인에 설치된 monochromator와 빔라인의 제원

Monochromator	Spherical grating monochromator
Photon energy range	12~1230 eV
Energy resolution ($\lambda/\Delta\lambda$)	2000~5000
Beam size	1.5 × 1.8 mm ²
Photon flux	1 × 10 ¹¹ photons/sec
Experiments	ESCA, XPS, UPS, ARUPS (EDC, CIS, CFS mode support)
Equipment	100 mm electron energy analyzer (main chamber), Auger electron spectroscopy, LEED, Inert gas sputtering, Thickness monitor, etc. (prep. chamber)

사용할 수 있다.

Monochromator에는 5개의 구면 회절격자가 설치되어 있으며 파장에 따라 선택된 하나의 회절격자가 분광한다. 시료준비와 실험자료의 수집을 위해 실험 chamber에는 100 mm electron energy analyzer(주 chamber), Auger Electron Spectroscopy, LEED, Inert gas sputtering, Thickness monitor, 등(시료준비용 chamber)의 설비가 장치되어 있다. 표 3에는 이 빔라인의 주요 제원이 나열되어 있고 그림 4에는 CoPt/Si(100) 표면의 Co 2p → 3d core excitation 영역 근처에서의 total yield와 MCD 결과를 보여주고 있다.

3.3 2B2 수직입사(Normal Incident Monochromator) 빔라인

이 빔라인은 광화학반응 등의 연구를 위한 빔라인이다. 이 빔라인에서 사용되는 광의 광자에너지는 5~35 eV영역이며, 진공외선 영역이지만 파장이 상대적으로 길고 광학 면에서의 반사율이 높아서 광속은 광학 면에 수직에 가까운 각도로 입사

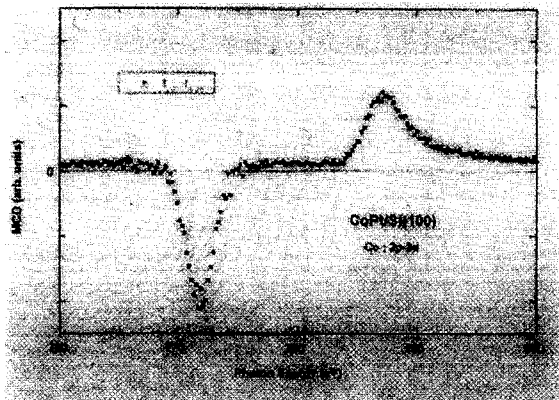


그림 4. CoPt/Si(100) 표면의 Co 2p → 3d core excitation 영역 근처에서의 total yield와 MCD 결과.

Ion mass spectrum of HCFC-123

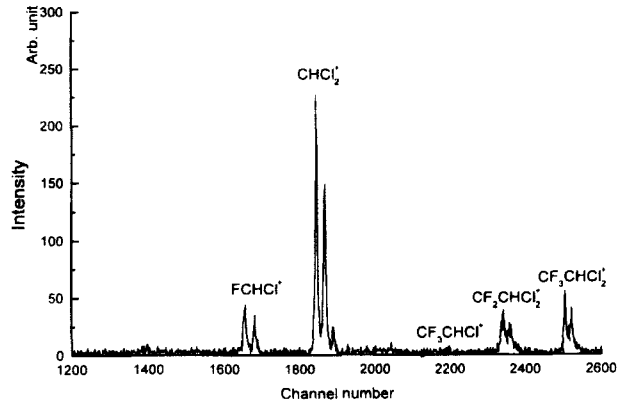
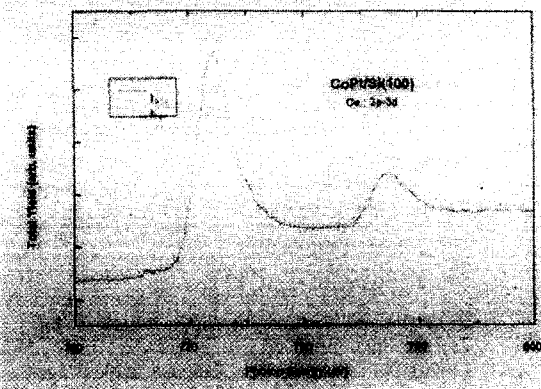


그림 5. Normal incident monochromator를 이용하여 측정된 광분해 HCFC-123의 생성물들에 대한 mass spectrum.

표 4. 2B2 수직입사 빔라인에 설치된 monochromator와 빔라인의 제원

Monochromator	3 m Normal incidence monochromator
Photon energy range	15~20 eV, blazed at 10 eV 12~30 eV, blazed at 20 eV
Energy resolution ($\lambda/\Delta\lambda$)	HEG 0.08 Å with 15 μm slit at zeroth order LEG 0.12 Å with 15 μm slit at zeroth order
Beam size	4 mm (H) × 1 mm (V)
Experiments	ARUPS, UPS
Equipment	ARUPS goniometer and analyzer (VG), Auger electron spectroscopy and LEED (OMICRON), Ion sputtering gun, Mass spectrometer

한다. 이 때문에 이 빔라인은 수직입사 빔라인이라 불린다. 빔라인은 집속 광학계와 입사실통, 3 m 수직입사 monochromator 및 출사실통, 그리고 실험장치로 구성된다. 수직입사 monochromator에는 두 개의 구면회절격자가 있으며, 사용되는 파장에 따라 하나의 선택된 회절격자가 분광을 한다. 실험장치에는 비행시간 질량 분석기(time of flight mass spectrometer)가 설치되어서 광화학 반응에서 발생하는 이온들을 연구하는데 사용



된다. 이 빔라인은 원자 및 분자과학의 연구를 위한 빔라인이지만 광전자분광학 장비를 달아서 각도분해광전자분광학에도 이용된다. 표 4는 2B2 수직입사 빔라인에 설치된 monochromator와 빔라인의 제원을 열거한 것이며, 그림 5는 이 빔라인을 이용하여 HCFC-123이 광분해될 때 생성되는 중간 화합물의 mass spectrum을 보인 것으로 이로부터 HCFC-123로부터 오존층을 파괴하는 중성염소원자의 생성과정을 설명할 수 있다.

3.4 3C1 XAFS 빔라인

이 빔라인은 1996년 10월부터 이용자들에게 제공되어온 빔라인으로서 2B1 광전자분광학 빔라인이 12~1230 eV 영역의 진공자외선을 이용하는 빔라인인데 비하여, 3C1 XAFS(X-ray Absorption Fine Spectroscopy) 빔라인은 X-선 영역의 광을 이용하여 분석대상원소의 흡수 spectrum을 측정하는 방법으로 운용하는 빔라인으로서 비정질 및 미소결정물질, 그리고 희석 함유량 물질 등 통상적인 X-선 회절실험에 의해 조사하기 힘든 물질의 화학적 결합상태나 특정구성원자 주변의 원자배치구조 등을 조사하는데 사용되며, 표면화학, 전기촉매, 광촉매 등의 화학기술분야를 비롯하여 재료물리 및 생체 연구분야에 널리 쓰인다.

이 빔라인에 사용되는 monochromator는 Si(111) 면의 회절광을 이용하는 double-crystal monochromator를 사용하며, 동작영역은 현재 4 keV~14 keV이지만 저에너지 대역을 위해 베릴륨 창을 개량함으로써 동작영역을 2 keV~14 keV가 되도록 개량하는 작업이 진행중이다. 이 빔라인에서 하고자 하는 실험들은 X-선 검출기를 이용한 투과 및 형광 EXAFS와 전자검출기를 이용한 total electron yield EXAFS 등이다. 이 빔라인의 사양은 표 5와 같다. 또 이 monochromator를 이용하여 측정된 구리 foil의 흡수 spectrum을 그림 6에 보였는데, 그림 중간 부분에 따로 표시된 $E_0=8979$ eV 근처의 흡수 spectrum을 보면

표 5. 3C1 XAFS 빔라인의 사양과 실험장치

Monochromator	Si(111) Double Flat Crystal, Fixed Exit Bragg angle 8 to 80 degrees
Photon energy range	4~14 keV
Energy resolution	2×10^{-4} at 10 keV
Beam size	10×1 mm ² (unfocused)
Photon flux	1×10^9 photons/sec at 12 keV
Equipment	Horizontal and vertical adjustable sample stand, Fluorescence filter set, Liquid N ₂ dewar 80 K, Glancing angle stages, Step motor controller

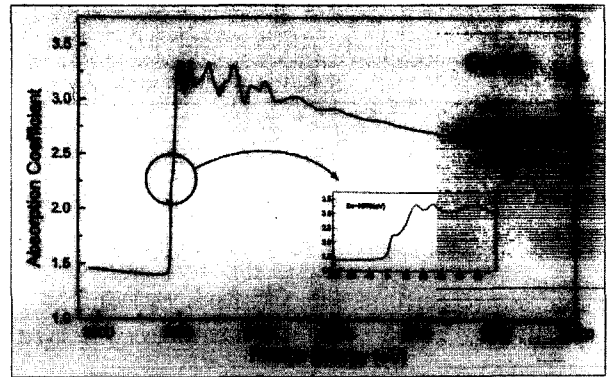


그림 6. 구리 박편으로부터 측정된 Cu K-edge의 EXAFS data. 도표 중간에 표시된 예리한 흡수곡선은 monochromator의 에너지 분해능을 보여주며 이 값은 $E_0=8979$ eV 근처에서 $\delta E/E=2 \times 10^{-4}$ 정도의 값을 갖는다.

이 빔라인의 에너지 분해능이 EXAFS 측정에 요구되는 $\delta E/E=2 \times 10^{-4}$ 정도의 값을 가짐을 보여준다.

3.5 3C2 X-선 산란 빔라인(X-ray Scattering Beamline)

이 빔라인은 X-선을 이용한 회절실험을 통하여 단결정 물질이나 막막 그리고 중합체 등의 물질 연구에 사용되는 빔라인이다. 이 빔라인도 역시 Si(111)면을 이용하는 double crystal monochromator를 채용하고 있으며 사용 가능한 광자에너지 범위는 4~12 keV이다. 최근에는 다이아몬드 박편을 $\lambda/4$ plate로 사용하여 타원편광도 이용할 수 있도록 빔라인의 성능이 개선되었다. 이 빔라인에서는 분말 결정을 이용한 통상적인 X-선 산란실험 이외에도 여러 종류의 막막계에 대한 X-선 영역의 반사율 측정 등에 널리 사용된다.

표 6은 이 빔라인의 주요 사양들을 나타내며 그림 7에는 이

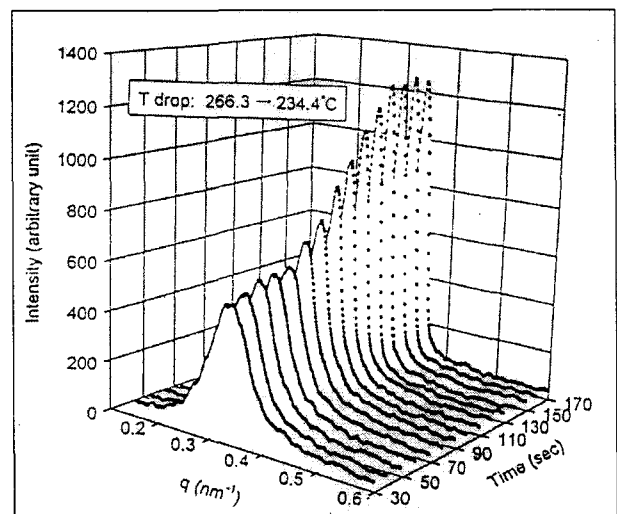


그림 7. SEBS/H1149 혼합물의 시간에 대한 order-disorder 변이.

표 6. 빔라인 3C2의 주요 사양과 실험장치

Mirror	Toroidal mirror for horizontal & vertical focusing
Monochromator	Si(111) double crystal monochromator bragg angle 8 to 80 degrees
Photon energy range	4~12 keV
Energy resolution ($\lambda/\Delta\lambda$)	3×10^4
Beam size	$1 \times 1 \text{ mm}^2$ at focal point
Photon flux	1×10^{11} photons/sec
Experiments	Powder X-ray diffractometry, Double crystal X-ray diffraction for semiconductor, High-resolution X-ray diffraction by triple-axis diffractometry, X-ray reflectometry for polymers, Thin films surfaces
Equipment	Hube 4-circle goniometer with analyzer crystal, SPEC data acquisition S/W for scattering exp., Closed-cycle Helium refrigerator (down to 15 K), 1-d position sensitive detector (EG & G 1612 XR w/OMA) EDR (Enhanced dynamic range) scintillator detector RY2048XR diode array detector Image plate (will be available in '98)

빔라인을 이용하여 측정된 SEBS/H1149 혼합물의 시간에 대한 order-disorder 변이를 보여준다.

3.6 4C2 SAXS(Small-Angle X-ray Scattering) 빔라인

1997년 11월 4C2 X-선 소각 산란 빔라인이 완공되기 이전까지 많은 수의 SAXS 실험들이 3C2 빔라인을 이용하여 이루어져 왔다. 그러나, 3C2 빔라인의 폭주하는 이용신청을 감당하기 위하여 SAXS 관련 실험 전용으로 지어진 빔라인이 이 빔라인이다. 따라서 4C2 빔라인의 사양도 3C2 빔라인의 사양과 크게 다르지 않다. 이 빔라인은 당분간의 시운전작업을 마친 후 일반 이용자에게 공개될 것이다. 표 7은 4C2 빔라인의 주요 사양과 이용할 수 있는 실험장치를 열거한 것이다.

3.7 KJIST(광주과학기술원) 빔라인

포항가속기연구소에 설치된 대부분의 빔라인은 포항가속기

표 7. 4C2 빔라인의 주요 사양과 이용할 수 있는 실험장치

Mirror	Bent mirror for meridional focus
Monochromator	Si(111) double crystal monochromator Bragg angle 7.1 to 19.2 degrees
Photon energy range	6~16 keV
Energy resolution ($\lambda/\Delta\lambda$)	5×10^4
Beam size	$1 \times 1 \text{ mm}^2$
Photon flux	1×10^{11} photons/sec
Equipment	1-d position sensitive detector (EG & G 1412XR w/OMA), 2-d position sensitive detector, Jumping hotstage

연구소에 의해 건설되고 운영된다. 그러나, 빔라인의 이용이 외부 이용자에게 허용되듯이, 빔라인 자체의 건설과 운영자체도 외부기관에 허용되고 있다. KJIST 빔라인은 다음에 설명된 lithography 빔라인과 함께 외부기관에 의해 건설되거나 운영되는 빔라인이다. KJIST 빔라인은 금호 그룹의 지원으로 광주과학기술원에 의해 건설된 빔라인으로서 1997년 11월에 SAXS 빔라인과 함께 완공되었다. 이 빔라인은 X-선 회절실험을 위한 빔라인으로 그 사양은 4C2 빔라인과 유사하다. 다만 사용된 monochromator가 double-crystal을 사용하지만 통상 두 개의 goniometer에 의해 구동되는 다른 빔라인의 경우와 달리 이 빔라인에서는 CAM을 사용하여 구동한다. 이 빔라인의 전체 운영 시간중 70%는 광주과학기술원의 자체연구를 위해 사용되며, 나머지 30%의 운영시간은 희망하는 이용자의 실험을 위하여 제공될 것이다.

3.8 X-선 노광(X-ray Lithography) 빔라인

이 빔라인은 X-선 투사노광에 의한 미세집적회로의 제작기술 개발을 위하여 LG 반도체가 건설비용을 부담하고 포항가속기연구소에서 건설하였으며, LG 반도체가 포항공과대학교 전자과의 차세대 노광기술센터에 위탁하여 운영하는 빔라인이다. 지금까지 통상 사용하였던 노광기술이 사용하는 광파장의 회절효과 때문에 소자의 선 폭을 줄이는데 거의 한계에 이르게 되었으며, 이를 해결하기 위하여 제안된 방법 중 하나가 X-선 투사에 의한 노광기술로서 미국의 IBM과 일본 등지에서 방사광을 이용하는 연구가 오래 전부터 진행되어 왔으며, 국내에서는 1995년초부터 빔라인 건설이 시작되어서 1996년 하반기부

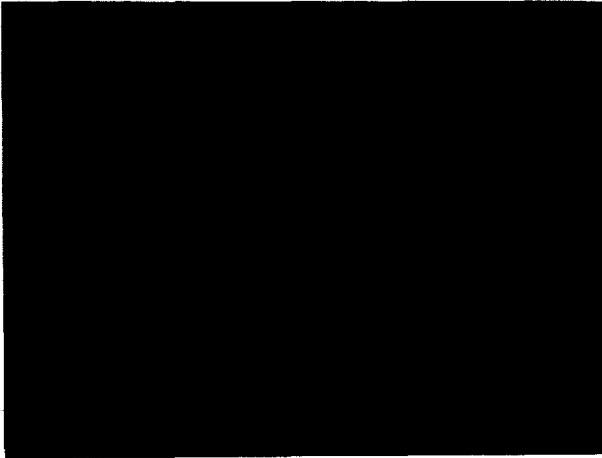


그림 8. 11B1 X-선 노광빔라인에 의해 제작된 폭 70 nm, 주기 210 nm의 선형 pattern(이 pattern에 관련된 자료는 LG 반도체의 소유임).

터 시험운전이 시작되었다. 이 빔라인은 1~2 keV 영역의 에너지를 갖는 광을 이용한다. Stepper는 일본의 SUMITO에서 제작된 SATELITE가 사용되고 있는데, mask와 wafer는 함께 stepper에 고정되고, 광원으로부터 오는 광속을 scanning mirror를 사용하여 수직방향으로 scanning하여 공간적으로 균일한 세기분포를 갖도록 mask면을 노광한다. 이 빔라인은 한꺼번에 최대 5 cm×2.5 cm의 면적을 노광할 수 있도록 설계되었으며, 진공부위와 stepper 사이의 경계는 25 μm 두께의 Be창을 사용하여 필요한 파장영역의 광흡수를 최소화하도록 하였다. 조사광의 세기를 강하게 하기 위하여 scanning mirror 외에 따로 하나의 집속거울을 더 두었다. 이 빔라인은 산업체의 연구개발을 위하여 일반사용자에게 개방되지 않는다.

이 빔라인을 이용하여 진행된 노광기술개발과제를 위하여 여러 가지 형상의 구조를 갖는 test pattern을 노광하였으며, 그림 8에 보이는 바와 같이 아직은 불완전하지만 선폭 70 nm, 주기 210 nm의 반복되는 line형상을 제작하는데 성공하였다.

4. 건설중인 빔라인과 관련 실험들

포항공속기연구소에는 현재 3개의 빔라인이 건설 중에 있다. 2B1 광전자분광학 빔라인의 넘치는 수요를 분산하고 광전자를 이용한 분광현미경실험을 추가로 할 수 있도록 하는 무슬틈 빔라인(Slit-less beamline)이 건설되고 있다. 또, undulator광을 이용하여 분광학과 역시 광전자분광현미경실험을 할 수 있도록 하는 U7 undulator 빔라인과 X-선을 이용하여 극미세기계장치를 제작하기 위한 LIGA 빔라인도 건설되고 있다.

4.1 무슬틈 빔라인 (Slit-less Beamline)

방사광은 고도로 집속되어서 궤도 운동하는 하전입자로부터 방출되는 광이므로 광원의 크기가 매우 작다. 또한, 운동하는 하전입자의 궤도 역시 매우 안정되어서 슬틈 slit을 사용하지 않고서도 광원자체가 슬틈을 통과한 것처럼 안정되어서 고른 출력특성을 얻을 수 있다. 이런 개념의 monochromator가 무슬틈 monochromator이다. 이와 같은 개념을 사용하면 광의 집속과 공간적인 filtering에 의해 발생하는 광손실을 막을 수 있어서 실험장치에서 높은 신호를 얻을 수 있다. 이 빔라인은 에너지 분해능 $E/\Delta E=1000$ 정도의 저 분해능으로 설계하여 슬틈을 없애는 대신 높은 광투과특성을 갖도록 설계되었다. 이 빔라인은 통상의 광전자 분광학실험과 MCD실험을 할 수 있으며 실험장치에 전자현미경광학계를 설치하여서 시료 평면상에서 특정물질의 흡수단 근처 파장의 광을 조사하면서 이에 따라 방출되는 광전자의 공간분포를 측정함으로써 물질의 분포를 연구하는 광전자분광현미경실험(PEEM; Photo Emission Electron Microscopy)을 하도록 할 예정이다.

이 빔라인의 사양은 다음 표 8과 같다.

4.2 U7 undulator 빔라인

지금까지 언급된 빔라인들은 하전입자가 저장일 궤도상의 휨자석 부분을 지날 때 방출되는 방사광을 이용한 빔라인들이었다. 방사광을 이용하는 실험 중 특히 강한 강도의 빛이 요구될 때 삽입장치(insertion device)라고 궤도를 따라 궤도면에 수직인 자장의 방향이 서로 교차하는 자석의 열을 설치하면 하전입자는 물결모양의 궤도운동을 하게 되고 여기서 방출되는 방사광이 서로 중첩되어 강한 강도를 갖게 된다. 이 때, 방사광이 간섭성을 가지는 경우 파장에 따라 아주 강한 세기를 갖는데 이런 특성을 갖는 삽입장치를 undulator라고 하고, 방사광이 간섭성을 가지지 않을 경우의 삽입장치를 wiggler라고 한다.

표 8. 무슬틈 빔라인의 설계사양

Energy range	200~1000 eV
Resolving power	≥1000
Flux	≥10 ¹² photons/sec
Beam size	1 mm (H)×0.5 mm (V)
Stability	Beam 위치 ≤0.05 mm, Photon energy ≤0.1 eV
Gratings	1st grating for 200~1000 eV range, 2nd grating is optional for different energy range
Scan mode	XAS mode (photon energy 연속 변환)
Control	Feedback to source instability

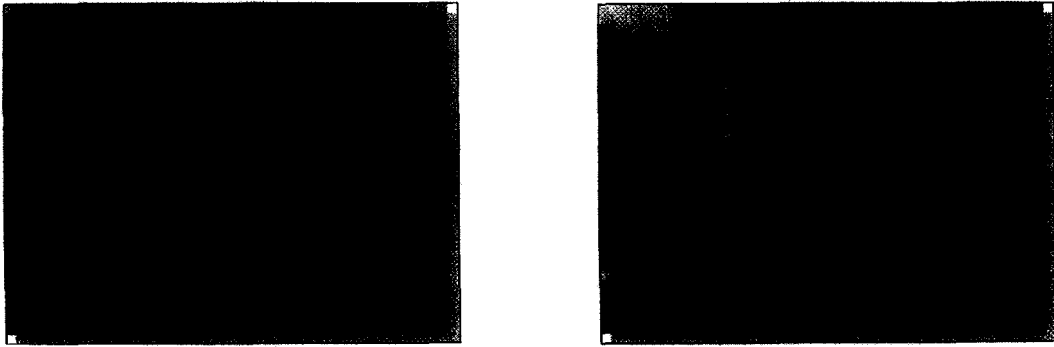


그림 9. 1B3 빔라인에서 제작된 pattern. 좌측 그림은 현상 작업 후 남은 PMMA층이며 두께가 약 100 μm 정도이다. 우측의 그림은 형상에 도금작업을 한 후 PMMA층을 제거한 뒤에 남은 금속구조물이며 두께가 약 140 μm 이다.

그림 2에는 포항가속기연구소에서 제작된 주기 7 cm의 U7 undulator를 보인 것이며, 이 장치가 궤도상에 설치되어서 내는 방사광의 세기를 그림 1에 보였는데, 휨자석에 의한 방사광에 비하여 1000배 이상의 밝기를 갖는다. 이 삽입장치는 현재 저장 링에 설치되어있다.

U7 undulator로부터 나오는 방사광을 이용할 목적으로 건설되는 빔라인은 고분해 분광학과 분광 광전자 현미경 실험을 위하여 건설되고 있다. 이 빔라인에 설치될 monochromator는 평면회절격자를 사용하며 20~2000 eV 에너지영역에 대하여 에너지에 따라 4000~10000 정도의 분해능($E/\delta E$)을 얻고자 목표로 하고 있다. 또, 분광학 실험의 경우에 목표로 하는 광량은 시료 면에서 약 10^{12} (photons/sec/0.1% band width) 정도이다.

이 빔라인에는 Fresnel Zone plate를 이용하여 단색광을 직경 0.1 μm 의 크기로 집속하여 시료를 조사하면서 시료의 위치와 파장에 따라 발생하는 광전자의 양을 측정하는 방법으로 분광 광전자 현미경 실험을 할 수 있도록 설계되었다.

4.3 LIGA 빔라인

LIGA는 Lithography 기술을 이용하여 극미세 기계부품이나 극소형 전동기 등의 전기기계, 또는 소형 센서를 제작하는 것을 말한다. LIGA공정은 X-선 투사사진방식에 의해 고집적 반도체소자를 제작하듯이 PMMA 등 photo-resist에 X-선을 조사하여 원하는 pattern의 사진을 찍어서 현상과 도금, 그리고 식각 작업을 거쳐서 소자를 만드는 작업이다. LIGA공정 중 방사광을 이용하여 이루어지는 작업은 노광(Exposure)작업이다. lithography에 비하여 제작되는 시료는 높은 기계적 강도가 요구됨에 따라 그 두께가 수백 μm ~수 mm 정도로 두꺼워야 한다. 이 작업에 강한 X-선 광원이 요구되는 이유는 두꺼운 소자의 제작을 위해서 광선이 photo-resist층을 깊이까지 투과할 수 있어야 하기 때문이다.

빔라인이 건설되기 전에 1B3 빔라인을 이용하여 소자를 제작하는 실험을 하여서 그림 9와 같은 모양의 소자를 제작하였다. 그림에 소개된 구조의 두께는 약 140 μm 인데 제작된 소자 중 가장 두꺼운 것은 약 300 μm 정도였다.

LIGA 공정을 위하여 고에너지 방사광을 얻을 수 있는 LIGA 전용 빔라인이 현재 건설중이며 이 빔라인을 이용하면 약 1 cm 정도 두께의 소자까지 제작이 가능하게 된다.

5. 방사광과 관련 광학

앞 절들에서 언급된 실험들 이외에도 우리의 관심을 끌 수 있는 부분이 아마 X-선을 이용한 간섭계실험일 것이다. X-선은 가시광에 비하여 파장이 매우 짧기 때문에 간섭계기술을 X-선 영역에 적용할 수 있다면 좀 더 작은 변위의 측정도 가능하게 될 것이며, 미국을 비롯한 선진국에서는 이러한 실험에 어느 정도 성과를 얻고 있는 것으로 알려져 있다.

서론에서 언급한 바와 같이 방사광가속기는 하나의 광원이며 이 광원과 광을 이용하는 실험장치, 그리고 광원으로부터 실험장치까지 광을 도출하고 용도에 맞게 가공하여 주는 빔라인에는 많은 광학기술과 광학부품이 내재되어 있다. 우선 빔라인은 광원으로부터 발산하면서 방출되는 광을 집속하거나 filtering, 분광, 혹은 경로의 변경을 위하여 회절격자, 거울, Fresnel zone plate, crystal, Be window 등이 사용되는데 X-선 영역의 빛이 짧은 파장을 가지고 있을 뿐 아니라, 광학부품에 빛이 수직 입사할 경우 반사율이 매우 낮기 때문에 사용되는 거울이나 회절격자 등은 광선이 소자의 표면에 거의 90도에 가까운 입사각을 갖고 빗겨 입사(grazing incidence)함으로써 필요한 반사율을 얻고 있다. 이런 이유들 때문에 방사광에 사용되는 광학소자는 astigmatism의 영향을 매우 크게 받고 있으며, 광속의 단면크기에 비하여 수십 배~수백 배의 크기에 해당하는 광학소자가 소요된다. 또, 방사광의 강한 세기는 광학소

자에 흡수된 광에너지가 충분히 사용되는 소자의 변형을 일으킨다. 이러한 이유들은 방사광 응용에 사용되는 광학소자가 가시광 영역에 비하여 얼마나 잘 가공되고 설치와 유지보수 그리고 냉각에 심혈을 기울여야 하는지 잘 대변해 준다.

현재 빔라인에 사용되는 광학소자는 면의 거칠기가 크게 문제되지 않는 일부 crystal을 제외하고 모두 수입되고 있다. 지금까지 회절격자와 반사거울은 대부분 가공이 쉽고 표면상태가 좋은 평면이나 구면형상이 많이 사용되었으며, 정밀한 집속이 필요하지 않은 경우에 토러스형상의 거울(toroidal mirror)이 사용되어 왔다. 그러나, 방사광을 이용하는 현미경실험을 위해서는 수 μm 이하의 작은 집속 광축이 요구되며 이를 위해서는 구면보다는 타원형 등 비구면이 요구되며, 연마에 의한 비구면 가공으로 X-선 영역에서 요구되는 크기의 광축을 얻기는 거의 불가능하다. 이를 해결하기 위해 선진국들에서 행하는 방법이 평면거울을 가공하여서 적절히 휨으로써 1차원적 비구면 형상을 얻는 방법이다. 이것은 평면의 가공이 비교적 용이하고, 물체의 탄성 휨(elastic bending)이 오랫동안 잘 축적되어 온 기술이라는 점이다. 오늘 갑자기 방사광에 사용될 광학소자를 국내에서 개발하기는 불가능한 일일 것이다. 그러나, 휨 기술의 개발 등은 충분히 이루어질 수 있을 것이다. 이 기술에는 물질의 기계적 특성 연구도 필요하지만 무엇보다 얻어지는 광

학 면이 요구되는 형상인지를 판정할 수 있는 검사기술이 먼저 요구될 것이다. 또, 광학소자의 유지 보수를 위해서도 광학 면의 변형을 측정할 수 있는 검사기술은 필수적이다. 현재, 포항가속기연구소에는 광학소자의 변형을 검사하기 위한 시설이 없어서 어려움이 따르고 있지만 점차 필요한 시설을 갖춰서 각 빔라인을 최상의 상태로 유지할 것이다.

6. 결 론

포항가속기연구소는 1995년 9월부터 일반 이용자들에게 시설이 공개되었다. 초기에 가동되던 2개의 빔라인이 이제는 8개로 증설되어 이를 이용한 물리, 화학, 재료, 전자, 생명공학 등 여러 방면의 연구가 활발히 진행 중이다. 이 글에서는 현재 가동중인 빔라인들의 특성과 이를 이용하여 진행된 일부 연구결과를 소개하였다. 또한 현재 건설중인 빔라인에 대해서도 간략히 소개하였다. 여기에 소개된 실험 결과들은 포항가속기연구소에서 수행된 실험의 극히 일부분에 불과하다. 포항가속기 연구소는 이용자들의 요구에 부응하기 위해서 매년 3개 정도의 빔라인을 건설하여 사용자들에게 제공할 예정이며, 기존시설의 제공과 새로운 시설의 건설에 이용자의 많은 요구를 폭넓게 수용하려고 노력한다.