3세대 포항 방사광(PLS-II, Pohang Light Source II)의 현황

DOI: 10.3938/PhiT.26.023

이현휘·Manish Kumar·신현준

Current Status of the 3rd Generation Korean Synchrotron Light Source, PLS-II

Hyun Hwi LEE, Manish KUMAR and Hyun-Joon SHIN

The 3rd generation synchrotron light source, or synchrotron radiation facility, provides very intense and bright x-rays. In addition, it provides x-rays with wide spectral range, easy control of polarization (linear, circular, and elliptical polarization), and pulse trains (~30 ps wide pulses, 2 ns pulse-to-pulse separation). By utilizing such properties, both cutting-edge instrumentation and techniques have been developed and are under development competitively in order to unveil new science and technology. The 3rd generation Korean synchrotron light source, PLS-II (Pohang light source II), is a national facility, being utilized by ~5,000 users per year. It opened in 1995 with 2 bending magnet beamlines (BLs). In 2011, the

light source was upgraded from PLS to PLS-II in order to offer more intense and bright x-rays having 20 insertion device ports. Now, 34 BLs are operational at 3 GeV, 400 mA top-up mode, and various kinds of probing techniques have been equipped along with the 34 BLs for competitive investigation of various kinds of materials system. Recently, we have installed micro-MX (macro-molecular or protein crystallography) and IRS (infrared spectroscopy) BLs, have started construction of ambient-pressure x-ray photoelectron spectroscopy (AP-XPS) and time-resolved x-ray science (TR-XRS) BLs. Status of the PLS-II BLs and current issues (having BLs for fragment-based drug design and high-energy x-ray science) are addressed in the manuscript, followed by a brief summary of Asian synchrotron radiation facilities.

포항에 3세대 방사광가속기가 건설되어 한국 최초의 방사광(synchrotron)을 만들어내고, 1995년 첫 이용자가 2기의 빔라인으로 방사광을 활용한 이래, 22년이 지난 2017년 지금은 34기의 방사광 빔라인 시설이 구축되었다. 외국의 3세대 방사광 시설들과 대비하여 각 분야에서 경쟁력 있는 기법들을 발굴/구축하기 위한 노력들이 지속적으로 이루어져 왔으며, 그동안 국내 현실에 필요하다고 판단되는 기법들은 현재 34기의 빔라인에 적절히 갖추어졌다. 그동안 방사광을 활용하는 다양한 기법을 구현시키는 실험장치들과 빔라인들이 구비되었고 이들을 활용하는 이용분야도 따라서 넓어졌다. 이러한 방사광 시설을 연평균 5,000여 명의 국내의 이용자가 사용하고 있으며, 이는 포항 방사광 시설이 명실 공히 국내 최고의 국가 거대 과학시설임을 의미한다. 한편으로, 다른 분야에서와 마찬가지로 방사광 활용 분야에서도 전 세계적으로 경쟁력을 유지해 나가야 하는데, 이를 위해 2009년에서 2011년에 걸쳐 약 3년간 PLS 성능향상 사업이 성공적으로 마무리되어 PLS-II의 이름으로 2012년부터 전자빔 에너지 3.0 GeV, 400 mA(최대)의 top-up 운영모드로 정상 가동 중에 있다. 이후에도 기존의 연구기법, 연구장치, 빔라인들의 지속적인 업그레이드와 함께, 새로운 기법 적용

저자약력

이현휘 박사는 2003년 광주과학기술원에서 공학박사학위를 받고, LG 이노텍을 거쳐 2005년부터 포항가속기연구소에서 재직하고 있다. X-선 산란 고휘도 소재과학 빔라인(high flux x-ray scattering beamline)과 고압 X-선 회절 장비를 구축하였다. 현재 5A 소재과학 빔라인을 맡고 있으며, 유기전자 박막과 다양한 실시간 X-선 산란 연구 분야를 수행하고 있다. (hhleec@postech.ac.kr)

Dr. Manish Kumar completed his Ph.D in 2015 from UGC-DAE Consortium for Scientific Research, Indore, India. During his Ph.D, he contributed in the installation of Soft X-ray absorption spectroscopy (SXAS) beamline (BL-1) on Indus-2 synchrotron source in India. Since 2015, he is a Post-Doctoral fellow at Pohang Accelerator Laboratory, South Korea. (manish@postech.ac.kr)

신현준 박사는 1995년 포항공과대학교에서 '연 X-선 레이징 및 플라즈마분광' 분야로 물리학박사 학위를 받고 미국 버클리대학의 ALS에서 박사후연구원을 거쳐 1996년부터 포항가속기연구소에서 근무하고 있다. 광전자분광현미경(scanning photoelectron microscopy: SPEM)과 광투수분광현미경(scanning transmission x-ray microscopy: STXM) 장비를 구축하였으며, 국내에서 분광현미경학(spectro-nanoscopia/microscopy) 분야를 개척해 나가고 있다. (shj001@postech.ac.kr)

Fig. 1. A schematic showing different kinds of techniques developed in the synchrotron radiation facility and user community to probe materials system, based on light-matter interaction. Abbreviations of the techniques are summarized on the right side.

및 활용을 위한 빔라인 구축이 진행되고 있다. 현 빔라인들의 상황과 건설 중이거나 1-2년 내 중점을 두고 있는 빔라인들에 대한 간략한 소개를 하고, 마지막으로 선진국에 비해 상대적으로 덜 관심을 받고 있으나 향후 발전 가능성이 높은 아시아 지역의 3세대 방사광 현황도 간략히 살펴보고자 한다.

방사광의 특성

방사광 시설은 고휘도의 X-선을 발생시키는 데 주목적이 있다. 빛과 물질의 상호작용(light-matter interaction)은 방사광 x-선을 이용한 물질 이해의 기본 원리로서, 파장이 짧은 x-선을 사용하게 되면 원자, 분자 간의 간격을 들여다 볼 수 있으며, 에너지 영역은 물질의 화학상태, 결합상태에 따라 변화하는 에너지 준위를 적절히 구분해 낼 수 있다. 방사광은 양질의 x-선을 제공하여 매우 다양하고 정밀하게 시료를 분석할 수 있게 할 수 있으므로, 전 세계적으로 방사광의 장점을 극대화시키는 시료분석 기법 기술들이 경쟁적으로 개발되어 왔다.

그림 1에는 방사광이 시료에 입사 후 나타나는 대표적인 현상들을 나타내고 있다. 감마선이나 중성자를 만드는 것을 제외하면, 입사하는 x-선은 물질을 구성하는 전자와의 interaction으로 산란되거나 전자를 높은 에너지로 천이시킨다. 이들 현상이 그림에 나타난 다양한 기법들로 관측되어질 수 있으며, 상응하여 다양한 기법들의 개발이 이루어져 왔다. X-ray diffraction(XRD)(다른 용어로 x-ray scattering: XRS), x-ray photoelectron spectroscopy(XPS), x-ray absorption spectroscopy(XAS), 등 잘 알려진 기법들을 포함하여, 이들 기법들을 연구하는 물질 시스템에 잘 적용하기 위해 전용으로 개발된 small angle x-ray scattering(SAXS), wide angle x-ray scattering(WAXS), grazing incidence small/wide angle x-ray scattering(GISAXS/GIWAXS), x-ray absorption fine structure(XAFS), near edge x-ray absorption fine structure(NEXAFS), extended x-ray absorption fine structure(EXAFS), x-ray photoelectron diffraction(XPD), angle resolved x-ray photoelectron spectro-

Compared to other x-ray sources;

- Intense and bright.
- Wide spectral range: tunable...
- Stable
- Pulsed x-rays:
 - ~ 30 ps (single pulse)
 - ~ 2 ns (pulse-to-pulse)
 - (1 bunch ~ 500 MHz, 1 turn ~ 1 MHz)
- Small source size: coherent...
- Polarized x-rays: linear, circular

Fig. 2. A schematic illustrating feature of x-rays generated from the synchrotron radiation facility (right) and a brief summary of x-rays generated at the PLS-II (left). In the storage ring, practically, electrons are not stored uniformly but stored as bunches (normally 300-400 bunches; 500 bunches are maximum in number). The electron bunches are running near the speed of light. Each electron bunch generates x-ray pulse, with ~30 ps pulse width, and the separation between the nearby pulses is ~2 ns. Compared to laboratory scale x-ray sources, synchrotron based x-rays are very intense, stable, and coherent. Further advantages are that synchrotron radiation has wide energy range and provides easier control of polarization (linear, circular, and elliptical polarization).

scopy(AR-PES), spin-resolved x-ray photoelectron spectroscopy(SR-XPS) 등 다양한 기법들이 개발되었으며, 실질적으로 많은 응용 범위를 가지고 있다. 이 기법들은 또한 다양한 방법으로 분류될 수 있는데, 예를 들어 scattering과 spectroscopy로 구분하지만, 각 기법들은 이미 충분히 많은 응용 분야들을 가지고 있기 때문에 각각 독립적인 기법으로써 자리매김하고 또한 빔라인의 주요 장치로 구축되어 있다.

방사광가속기에서 발생하는 광원은 실험실 규모에서 얻을 수 있는 것 대비 매우 다양하고 좋은 장점을 가지고 있다. 그림 2의 왼쪽에는 포항 방사광가속기의 광원의 특성을 정리해 보여주고 있다. 저장링에서 전자가 빛과 거의 같은 속도로 진행하면서 전자석(bending magnet: BM)에 의해 전자궤도가 바뀌면서/휘면서 BM 광원을 만들어 내거나, 직진 구간에서 삽입장

치인 언듈레이터, 위글러에서 전자가 undulation 형태 혹은 wiggling 형태로 진행하면서 매번 휘는 공간들을 통해 매우 강한 광원을 발생한다. 저장링 내의 전자는 실제로 저장링 내에 균일한 형태로 저장되어 진행되는 것이 아니고 전자뭉치(electron bunch) 형태로 저장되어 움직인다. 이 전자뭉치는 저장링을 1 MHz의 주기로 돌며, 포항의 경우 500 MHz로 운전할 수 있어서, 이론적으로는 저장링 내에는 500개의 전자 뭉치가 만들어져 돌 수 있는 구조이다. 실질적으로는 300 ~ 400개의 전자뭉치가 채워져 돌아가고 있는데(이때 200~100개의 전자뭉치에 해당하는 구간은 비어 있거나 빈 곳의 가운데 부위에 몇 배 큰 전자뭉치를 돌 수 있다), 이들 모여져 있는 전자뭉치들은 ~ 2 ns의 시간 간격을 가지며, 각 전자뭉치에서 나오는 방사광은 30 ps($1\sigma \sim 13$ ps) 정도의 시간 폭(pulse width)을 가진다. 즉, 발생하는 방사광은 반복된 펄스의 형태로 나온다. 그런데 현재까지의 국내 연구자들이 수행한 대부분의 실험에서 x-선은 CW처럼 시료에 입사하는 것과 같아 왔다. 그 이유는, 시간분해능이 필요하지 않았거나, 관측하는 detector가 충분히 빠르지 않았기 때문이다. 한편, 이런 펄스 형태의 방사광원은 시분해(time-resolved) 실험에 적용될 수 있는데, 미국의 ALS, APS, 프랑스의 ESRF, 독일의 Bessy II 등에서는 이들을 활용한 연구가 활발하다. 국내(포항)에서는 4세대 방사광가속기인 PAL X-FEL의 구축과 함께 또한 시간 분해에 대한 연구 분야에 관심들이 증가되면서 이 펄스형태의 방사광원을 이용하고자 하는 중요성이 높아지고 있다.

한편, 방사광원은 실험실 규모의 x-선 발생장치(solid target x-선 광원)에 비해 매우 강하며, 또한 연속적인 넓은 에너지 영역(wide spectral range)을 가지고 있어 광원의 에너지를 변화시키며 시료에서의 반응을 보는 분광학(spectroscopy)을 경쟁력 있게 할 수 있다. 광원의 세기가 강하다는 것은 시료에 입사하는 광원의 단색성 즉 에너지 분해능을 매우 좋게 할 수 있음을 의미하며, 이를 활용하는 흡수 분광학의 경우 전자현미경의 EELS 대비 강점과 상호보완의 기능을 가지고 있어 많은 기법들이 개발되어 왔다. 예를 들어, soft x-ray absorption spectroscopy의 경우 total electron yield 대비 partial electron yield 기법으로 분광을 함으로써, 전자의 운동에너지에 따른 mean free path 차이를 이용하여 시료에 대한 화학상태, 구조, 산화상태 등에 대한 정보를 시료 표면으로부터 깊이에 대한 정보를 제공할 수 있다. 한편, 방사광에서 발생하는 x-선의 편광을 원형, 선형 등으로 변화시킬 수 있는데, 입사하는 광원의 편광에 따른 시료의 반응을 이용하여 전자의 스핀, 오비탈 회전 방향 등에 기인하는 자성체 시료의 연구를 정확하게 할 수 있다. 입사하는 광원의 에너지를 바꾸어 가면서 시료의 반응을 보는 absorption spectroscopy뿐만 아니라, 입사한

광원에 의해 발생한 전자의 운동에너지의 위치와 분포를 분석함으로써 시료의 전자 구조를 규명하는 광전자분광학(XPS)의 경우에도, 전자분석기의 에너지 분해능이 갈수록 좋아지고 있으며, 좋은 에너지 분해능의 광원을 사용함으로써 시료의 연구 특히 표면에 대한 전자구조, 화학결합 상태, 산화상태 등의 연구를 경쟁력 있게 할 수 있다. 한편, 입사한 광원에 의해 발생하는 형광(fluorescence)을 측정하는 x-선 형광 분석(x-ray fluorescence, XRF) 기법의 경우에도, 입사하는 광원의 에너지를 변화시킴으로써 주어진 원소 혹은 화학결합 상태에 대한 탐구 효율을 바꿀 수 있어 이들 연구에 있어 경쟁력 있는 정보를 제공할 수 있다.

시료의 미세구조, 결정학적 구조를 연구하는 x-선 산란(x-ray scattering) 분야의 경우 고휘도의 방사선을 활용하여 극박막, 표면, 계면, 나노구조, 유기물, 생체시료 그리고 비정질 시료와 같이 산란강도가 약한 시료에 대해서도 경쟁력 있는 연구가 가능하다. 잘 알려진 고분해능 분말회절(powder diffraction)의 경우 방사광원을 활용하면 시료 내에 포함된 결정상(phase)에 대한 미량/정량 분석이 더욱 정교해지며, 고분해능의 정밀한 회절패턴으로부터 평균 변형률, 적층결함 등의 결정 결함에 대한 정보도 얻을 수 있다.^[1] 한편 광원의 세기가 높고 잘 집속된 방사광원의 x-선 투과성을 잘 활용하면, 진공, 상압, 고압뿐만 아니라 가스분위기, 액체 분위기 등 시료주변의 환경적 제약이 거의 없이 다양한 실시간 연구가 가능하다. 이와 같은 x-선 산란 기법에 분광학적 기법을 결합하면 에너지 분해 x-선 산란(anomalous x-ray scattering), 공명 x-선 산란(resonant x-ray scattering), x-선 라만 분광(XRS, x-ray Raman spectroscopy), 공명 비탄성 산란(RIXS, resonant inelastic x-ray scattering) 등과 같은 새로운 연구기법도 활용이 가능하다. 이 중 공명 x-선 산란의 경우 단결정시료의 전하, 오비탈, 스핀 등의 장거리규칙성(long range order)에 의한 x-선 회절 피크에서 시료 내 특정원자의 흡수 에너지(absorption edge) 근방의 x-선 에너지와 시료의 방위각 함수로 x-선 편광상태에 따라서 살펴보는 방법으로 일반적인 산란기법으로는 관측이 어려운 최외각전자와 관련된 복잡 물질의 특성 등을 연구할 수 있다.^[2]

방사광원은 강할 뿐 아니라, 그 크기 또한 작다. 예를 들어 광원의 크기는 수십~수백 μm 으로 작아 spectral brightness가 크며, 이는 광원을 x-선 렌즈를 이용하여 매우 작게 집속하여 기존의 기법들을 적용해 시료를 연구하더라도 충분한 세기의

REFERENCES

- [1] Website: <http://pal.postech.ac.kr/bl/9B/>.
- [2] Website: <http://pal.postech.ac.kr/bl/3A/>.

Fig. 3. (Upper) An example of nano-scale x-ray image combined with XANES technique. (7C beamline)^[3] The scale bar is 1 μm . (Lower) (a) SEM image of multi-particle Au specimen. (b) Its CDI pattern and (c) reconstructed CDI image using HIO algorithm. The scale bars are 300 nm. (d) The estimated resolution is about 27 nm. (9C beamline and Prof. Noh's group at GIST)^[4]

신호를 얻을 수 있게 해 준다. 예를 들어, 포항에서는 soft x-ray 흡수분광학의 경우 30 nm 정도 혹은 더 작은 크기로 집중하여 연구할 수 있게 한다. XPS의 경우는, 300 nm의 크기의 공간분해능으로 연구할 수 있게 하는데, 전 세계적으로 최고 수준은 50-100 nm의 공간분해능이다. 경 x-선의 경우 집속 거울(KB mirror)을 사용하면 수십 nm ~ 수 μm 의 크기로, x-선 렌즈를 사용하면 수십 nm의 크기로 집중이 가능하다. 이러한 공간분해능을 가진 분광학 혹은 광산란 기법은 현실적으로 매우 유용하다. 그 이유는 제작하는 시료의 많은 경우 균일하지 아니하며 이 균일성의 연구를 통해 보다 좋은 시료의 제작을 할 수 있게 하고, 나노 혹은 마이크론 물질 개발의 경우 물질 내 특정 위치에서의 물성 특성을 규명해야 할 필요가 있고, 신소재 개발 후 구동하였을 때 불량 발생하는 경우, 고장 난 부위는 물리화학적으로 위상변화를 가져오는데, 각 부위에서의 분광 및 광산란 정보를 통하여 고장나는 원인을 규명하여 보다 경쟁력 있는 소자를 제작할 수 있는 정보를 제공하기도 한다. 또한 자연에서 얻어지는 대부분의 물질들은 균질하지 아니하며 이러한 비균질성에 대한 이해는 매우 흥미롭기 때문이다. 분광학 부분에서는 공간분해능이 강조되면서 분광현미경학(spectro-microscopy, spectro-nanoscopia, micro-spectroscopy, nano-spectroscopy 등의 이름)이란 커다란 분야를 가져왔다. 예를 들어 scanning transmission x-ray microscopy(STXM), scanning photoelectron microscopy(SPEM), photoemission electron microscopy(PEEM) 등의 분광현미경학은 현재 많이 응용되는 기법들이다. 이와 함께 micro-diffraction, nano-, micro-x-ray fluorescence 등의 공간분해기능을 강조한 기법들이 급속하게 발전되어 많은 응용분야가 발생되고 있다.

방사광원은 크기가 작아 projection imaging을 하더라도 영상의 이미지에 대한 해상도를 매우 좋게 할 수 있다. 실제 식물, 동물 등의 생체 혹은 지구과학 소재에 대한 이미징을 1 μm 정도의 공간분해능으로 영상화할 수 있고, 더 나아가 나노 스케일의 이미징(그림 3) 및 CT(computed tomography)도 가능하여 이들 분야뿐만 아니라 의료분야에서 매우 활발한 응용 연구가 이루어지고 있다. 최근에는 광원이 작을수록 좋아지는 결맞음성(coherency) 성질을 이용하여 시료로부터 산란되어 진행한 광원의 간섭무늬로부터 시료의 공간 정보를 얻는 coherence diffraction imaging(CDI) 혹은 coherence x-ray diffraction imaging(CXI), 및 STXM 기능과 접목시킨 ptychography 기법으로 고 공간분해능의 영상을 얻는 기술이 발전되고 있다. 이들 기법으로 수 ~ 수십 nm의 공간분해능을 구현할 수 있다. 이 중 CDI 기법은 시료에 결맞는 x-선을 입사시켜 시료로부터 발생하는 산란 신호를 2차원 검출기로 측정 후, 컴퓨터 알고리즘을 통해 위상을 복원하여 시료의 2차원 또는 3차원 이미지를 비파괴적으로 얻는다. 금속/세라믹 나노 구조체, 생체 소재의 이미지를 10 나노미터급 분해능으로 얻을 수 있으며, 시료 내 격자 변형 등을 측정할 수 있다. (그림 3) 또한 이러한 이미징 기법에 x-선 에너지 분해능을 결합하면 그림 3 처럼 시료의 화학적 상태 등의 정보를 2차원/3차원 영상과 함께 얻을 수도 있다.

이처럼 다양한 기법의 개발은 광원 특성 활용의 최적화, 그리고 검출기 개발에 힘입어 경쟁력이 고취되고 있다. 한편, 기법 개념의 개발 및 발전 외에도 실질적으로 실험장치의 효율성 및 우월성 고취에 많은 노력이 경주되고 있다. 예를 들어 STXM, SPEM의 경우에 scanning speed를 높임으로써 많은 시료 혹은 한 시료에 대한 다양한 환경변화를 주면서 여러 가지 연구를 가능하게 함으로써 보다 종합적인 결과를 도출하게 할 수 있으며, imaging 및 산란실험을 위해 2D-검출기를 사용하는 분야의 경우 대용량 데이터를 얻게 되는데 이를 high speed로 얻고 또한 처리하는 big data 처리 기술을 개발함으로써 빔라인의 경쟁력을 향상시키는 노력을 하고 있다.

포항가속기연구소의 빔라인들의 현황

그림 4는 포항가속기연구소의 2017년 현재 빔라인 맵을 나타내고 있다. 저장링에는 현재 33개의 빔라인이 운영되고 있

REFERENCES

- [3] Website: <http://pal.postech.ac.kr/bl/7C/>.
- [4] Y. Kim *et al.*, Journal of the Korean Physical Society **70**, 849 (2017).

Table 1. List of beamlines at the PLS-II.

구분	빔 라 인	이 용 분 야	착공	완공	포트 No.		비고
					PLS	PLS-II	
1	엑스선 산란 (XRS)	박막, 분말시료 구조분석	'92	'94	3C2	3D	BM
2	고분해능 광전자분광 II (HR-PES II)	반도체, 금속재료 전자구조 분석	'90	'94	8A2	8A2	ID
3	엑스선 나노영상 (XNI)	X-선 영상, 극미량 원소 분석	'95	'96	1B2	7C	ID
4	나노 엑스선흡수분광 (Nano XAFS)	촉매, 비정질재료	'95	'96	3C1	8C	ID
5	소각엑스선산란 I (SAXS I)	고분자화합물, 금속재료의 상분리	'96	'97	4C1	3C	ID
6	엑스선산란 GIST (XRS GIST)*	박막 및 표면연구용 X-선 회절	'96	'97	5C2	5D	BM
7	분광현미경 (SPEM)	표면박막재료의 고분해능 분광학	'96	'98	8A1	8A1	ID
8	광전자분광 (PES)	표면, 계면 전자구조, 표면 동역학	'97	'98	4B	4D	BM
9	단백질결정학 I (SB I)	구조생물학 연구	'97	'99	6B	7A	ID
10	엑스선나노마이크로머싱 (XNMM)	극미세기계 제작	'98	'99	9C	9D	BM
11	엑스선 흡수분광 (XAFS)	화합물질 결합상태 분석	'98	'99	7C	7D	BM
12	엑스선산란/흡수분광POSCO (XRS/XAFS POSCO)*	철강재료 내 구조동적연구 고부가가치강 표면분석	'99	'00	8C1	8D	BM
13	자성분광 (MS)	자성재료 연구	'97	'01	2A	2A	ID
14	소각엑스선산란 II (SAXS II)	고분자화합물연구 생체세포막 구조 연구	'00	'01	4C2	4C	ID
15	고분해능분말회절 (HRPD)	복합분자형 결정구조 분석 고분해능 실험	'00	'01	8C2	9B	BM
16	마이크로빔광전자분광 (μ -ARPES)	초전도체 및 자성체의 전자구조연구	'98	'02	3A1	4A1	ID
17	엑스선 미세회절 (XMD)	표면 및 계면연구	'99	'02	5C1	4B	BM
18	결정학 및 산란 (C&S UNIST)	생명·재료분야 X-선 현미경	'13	'14	7B2	6D	BM
19	고분해능광전자분광 I / 엑스선흡수분광 KIST (HR-PES I / XAS KIST)	복합다체계 및 표면/계면 물성연구	'00	'03	7B1	10D	BM
20	단백질결정학 II (SB II)	단백질결정 구조분석	'01	'03	4A	5C	ID
21	결맞은엑스선산란 (CXs)	단결정 및 박막의 결정구조분석	'02	'03	10C	9C	ID
22	엑스선 소재과학 (MS-XRS)	NT 및 소재분야 연구	'02	'04	5A	5A	ID
23	물질물리엑스선산란 (MP-XRS)	물질구조분석 및 결정의 분석	'03	'05	11A	3A	ID
24	스핀편광각분해 광전자분광 (SP-ARPES)	나노구조물 물성분석	'13	'15	3A2	4A	ID
25	초분자결정학 (SMC)	초분자의 구조분석	'03	'05	6C	2D	BM
26	엑스선산란/흡수분광 KIST-PAL (XRS KIST-PAL)	결정의 구조분석	'06	'08	10B	1D	BM
27	극소각엑스선산란 (U-SAXS)	구조변이의 실시간 측정	'05	'09	9A	9A	ID
28	고선속 엑스선흡수분광(Wide XAFS)	흡수 및 형광 스펙트럼 측정	'05	'09	10A	10C	ID
29	펨토초테라헤르츠분광 (fs-THz)	물질의 구조 동역학 연구	'05	'09	-	-	-
30	연 엑스선 나노현미경(SXN) (STXM)	나노소재, 나노패터닝 기술 연구	'10	'12	-	10A	ID
31	생명의학영상 (BMI)	생체조직, 재료, 소자 결합 규명	'10	'12	-	6C	ID
32	중에너지 엑스선 분광학 (MPK)	자성 특성, 전하, 오비탈, 스핀 배열 연구	'12	'16	-	6A	ID
33	적외선 분광학 (IRS)	화학, 재료, 생체 구조 연구	'13	'16	-	12D	BM
34	마이크로 단백질결정학 (μ -MX)	막단백질 및 복합체 구조 연구	'13	'16	-	11C	ID

* 표는 외부기관 전용 빔라인

※ BM: 휨자석(Bending Magnet) 빔라인, ID: 삽입장치(Insertion Device) 빔라인

※ 극자외선선회전빔(11B EUVL)은 운영 종료, 엑스선 영상 (6D XMI)은 UNIST-PAL 포트로 변경

Fig. 4. Beamline map installed at the PLS-II. Each beamline has a number and a character 'A', 'B', 'C', or 'D'. The number represents a sector in the storage ring. The character 'A' or 'C' indicates a beamline equipped with an insertion device, undulator or wiggler, and the character 'B' or 'D' indicates a beamline constructed on a bending magnet port. Color in the beamline name is added in simple version in order to categorize probing techniques.

고 fs-THz 빔라인은 별도의 건물에 설치되어 운영되고 있다. 그림에는 각 빔라인의 주요 명칭이 나타나 있다. 앞의 숫자는 방사광을 만들어내는 저장링의 구간을 숫자화한 것이며, A, C의 기호는 발생하는 x-선이 삽입장치(undulator 또는 wiggler)에서 나오는 것을 의미하며, B, D 기호는 발생하는 x-선이 휩자석(bending magnet)으로부터 나오는 것을 의미한다. 그림에 보면 공용 빔라인은 22개가 있으며, 분홍색 배경의 협약 빔라인은 9개, 연파랑색 배경의 전용빔라인은 2개이다. 각 빔라인은 가운데에 표기한 것과 같이 빨강, 분홍 등의 색으로 주요 기법을 구별해 놓았지만, 위에서 설명한 바와 같이 실제 각 빔라인은 다양한 기법들을 갖추고 있으므로, 각 빔라인의 주요 장비의 구성과 특성은 각 빔라인 홈페이지 및 빔라인 담당자로부터 확인할 필요가 있다. 각 빔라인의 착공, 완공 시기 및 포트 번호는 표 1에 나타나 있다. 참고할 것은 2009-2011년에 포항가속기연구소는 2.5 GeV, 200 mA의 저장링 성능(PLS)에서 3.0 GeV, 400 mA의 저장링 성능(PLS-II)으로 개선되었다. 이 성능 향상으로 연구 경쟁력 있는 포트를 확장하였다. PLS의 경우 BM 빔라인 20개, ID 빔라인 10개 포트였는데, PLS-II의 경우 BM 빔라인 10개, ID 빔라인 20개의 포트가 있다.

이들 빔라인을 사용하는 이용자의 수, 실험 수, 매년 발표되는 논문 수, 및 논문 평균 impact factor(IF) 값은 그림 5에 나타나 있다. 이 결과는 고무적이지만, 외국 유수의 방사광 시설 대비 지속적 경쟁력 유지 및 향상이 필요하다. 특히, 각 빔

Fig. 5. (Upper) Annual numbers of beamtime proposals (blue bar) and users (gray bar). In the graph, sudden decrease happened in 2011/2012 years due to storage ring shutdown for the upgrade from PLS to PLS-II. (Lower) Annually published papers (blue bar) and average impact factor of the publications (orange line).

라인의 중장기적 경쟁력 확보를 위하여 빔라인 장치, 프로그램 및 연구 인력에 대한 지속적이고 일관적인 투자가 되어야 한다.

기존 빔라인들에 더해, 연구소 내외의 환경, 국내 이용자의 연구분야 관심도의 변화 추이 등을 고려하여 2017년도에는 2기의 빔라인이 건설되고 있다. 상압 광전자 분광학(AP-XPS, ambient pressure x-ray photoelectron spectroscopy) 빔라인이 기초과학지원연구원(KBSI)과의 협약 빔라인으로 건설되고 있으며, 시간분해 x-선 연구(TR-XRS, time-resolved x-ray scattering & science) 빔라인이 한국표준과학연구원(KRISS)과의 협약 빔라인으로 건설되고 있다. 한편, 단백질 결정을 연구하는 단백질 결정학(protein crystallography) 빔라인의 경우 현재는 하루 최대 20개의 시료 연구가 가능한데, 이를 하루 최대 400여 개의 시료를 연구할 수 있게 하는 고속 대량(high throughput) 분석이 가능한 빔라인으로 만드는 계획을 하고 있다. 뒤에 설명하겠지만, 이를 활용하게 되면 프래그먼트 기반 신약 설계(FBDD, fragment based drug design, 혹은 structure based drug design) 측면에서 크게 도움이 되어 신약개발에 실질적인 도움이 될 것으로 기대하고 있다. 한편, 0.5 GPa 이상 고압상태에서의 시료의 구조적 화학적 특성을 연구하는 고압 물질 연구(high pressure science) 이용자 그룹의 요구가 점차 커지고 있으며, 이를 포함하는 고에너지 x-선 연구(high energy x-ray science)를 위한 빔라인 건설에 관한

Fig. 6. Microscope images of protein crystals in various size. Crystals smaller than $10\mu\text{m}$ need an intense micro x-ray beam to resolve their structure.

Fig. 7. Photograph of the experimental hutch at the 11C micro-MX beamline.

중장기적인 설계를 하고 있다. 이들 추가되는 빔라인들에 대한 내용을 간략하게 소개하고자 한다.

포항가속기연구소 PLS-II의 신규 및 향후 건설 빔라인들

1. 마이크로 단백질 결정학 빔라인; 11C Micro-MX

PLS-II에는 단백질 결정학을 위한 2기의 빔라인이(5C, 7A) 있다. 단백질 결정학을 수행하는 방법은, 일반적으로 시료에 대해서 회절 패턴(diffraction pattern)을 CCD 혹은 2차원 검출기로 얻게 되며(5C, 7A 두 경우 모두 CCD임), 시료를 1도 정도의 각도 단위로 360도 회전시키면서 얻은 회절 데이터를 실공간으로 재구성하여, 단백질 구조를 분석하게 된다. 5C 빔라인에서는 단백질 크기가 $50\sim 100\mu\text{m}$ 정도인 시료를, 7A에서는 $100\mu\text{m}$ 보다 큰 크기의 시료 분석이 가능하다. 최근, 세포 외부 신호를 세포 안으로 전달하는 역할을 하는 막 단백질의 중요성이 점점 높아지고 있으며, 그 이유 중 하나는 시판되는 약물의 절반 이상이 막 단백질을 통하여 작용하기 때문이다. 이 막단백질은 수용성 단백질 대비 큰 결정을 만들기 어렵고 상대적으로 회절 강도가 약해서, 미세 집속 빔(마이크로 빔)

Fig. 8. (Upper) A photograph of 12D IRS beamline hutch. (Bottom left) Experimental stations in far-IR branch and (bottom right) in mid-IR branch.

을 사용해야 구조 규명이 가능하다. 미세 집속 빔은 결정의 크기를 크게 할 수 없는 일반 단백질 결정학에서도 유용하며, 이러한 마이크로 빔을 이용한 구조연구의 수요가 지속적으로 증가하는 추세로 전 세계적으로 30여 곳에 마이크로 단백질 결정 분석 시설이 있다. 국내에서도 학문적·산업적 수요가 높아져 $50\mu\text{m}$ 이하의 결정에서도 실험이 가능한 연구시설의 필요성이 꾸준히 제기되어 2013년에 11C 마이크로 MX 빔라인 건설이 시작되었으며, 2016년에 완공이 되었다. 집속된 빔의 크기는 $10\times 10\mu\text{m}^2$ 이하이며, 시료를 회전시키면서도 x-선이 시료의 위치로부터 벗어나지 않게 하는 자동 정렬 기능, 미세 시료를 시료 홀더에 올려놓을(mounting) 수 있는 기능 및 시료 자동교환 기능을 구현하고 있다. 또한 국제적 경쟁력 확보를 위하여 고속대용량분석(high throughput) 환경을 구축하고 아울러 원격으로 실험이 가능한 환경도 구현할 예정이다.

그림 6은 단백질 결정 크기가 다른 종류들의 사진으로 막단백질 등 $50\mu\text{m}$ 보다 작은 크기의 단백질 결정 연구의 필요성을 보여준다. 그림 7은 11C 빔라인 실험허치 내부 사진으로 시료 자동 장착을 위한 로봇, 정밀 정렬이 가능한 시료 회전장치(MD2S diffractometer), 고효율/대면적의 이차원 검출기가(Pilatus3 6M) 구축되어 있다. X-선은 $5\sim 10\mu\text{m}$ 의 크기로 집속이 되며, 시료에서의 x-선의 위치 변화를 최소화시키는 방안(위치 변화 관찰 및 피드백 기능, 위치 변화 유발하는 진동원 차단 등)을 계속 찾아가고 있는 중이다. 2017년 상반기에 시운전(commissioning) 중이며, 6월 말부터 이용자 지원 중으로 국내 단백질 연구자들의 숙원인 세계적 수준의 단백질 연구 환경이 제공되고 이용자층의 저변 확대가 이뤄질 것으로 전망하고 있다.

Fig. 9. (Left-up) Schematic illustration of AP-XPS and (right-up) the AP-XPS experimental station. (Lower) The 8A beamline layout showing a SPEM endstation and the AP-XPS endstation.

2. 적외선 분광학 빔라인; 12D IRS

방사광 x-선 분광학은 주로 원소를 구분하고, 화학결합, 전자 구조를 연구하게 되나, 적외선 분광학(IRS, infrared spectroscopy)은 분자 구조 내의 특정 작용기(functional group)에 대한 정보(시료의 분자 구조, 배향 특성, 상변화, 구조 전이, 분자 간 또는 분자 내 상호 작용 등)를 얻을 수 있다. 방사광 적외선 광원은 현미경 장치를 이용하여 집속할 경우, 상용화된 흑체 복사 광원 대비 100배 이상 밝은 고휘도의 빔을 제공할 수 있어 기존 적외선 현미경 분광법에서 관찰이 어려웠던 단결정 및 생체 시료에 대해서도 관찰이 가능할 뿐만 아니라, 다양한 파장 영역을 사용할 수 있어 대부분의 3세대 방사광 가속기에는 IR 빔라인이 구축되어 있다. 특히, 시료의 가열이나 파괴가 거의 없이 유기 박막 시료 및 생체 시료에 대한 비파괴 분석이 가능하여, 화학, 재료 분야뿐 아니라 생명과학 등에서 새로운 연구 분야를 개척할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 온도, 압력 등 시료의 환경 변화에 따른 변화를 실시간으로 관찰할 수 있어 다양한 분야에서 활용이 가능할 것으로 생각된다.

포항가속기연구소에서도 2013년 적외선 분광학 빔라인 건설이 시작되어 2016년에 완공되었다. 2017년 시운전(commissioning)을 수행 중이며 이용자 지원을 준비하고 있다. 그림 8은 12D IRS 빔라인의 실험장치 사진으로, 원적외선 실험장치(far-IR branch)와 중적외선 실험장치(mid-IR branch)로 구성되어 있으며 각 분야별로 별도의 장비들이 구성되어 있다.

3. 상압 광전자 분광학 빔라인; 8A2 AP-XPS

표면물리는 반도체 분야뿐 아니라 신소재 발전에 있어 매우 중요한 역할을 하고 있다. XPS, AR-PES 등의 광전자분광 실험

결과들은 이들의 이해뿐 아니라 고체, 반도체, 박막 관련 이론 발전에도 많은 기여를 해 왔다. 일반적인 XPS는 초고진공 환경에서 실험이 수행되며, 실제 반응 환경과는 차이가 있는 이상적인 환경에서의 특성분석이라는 장벽이 존재하며, 이러한 제한을 극복하기 위한 노력은 1970년대 초에 상압 광전자 분광학(AP-XPS, ambient pressure XPS) 실험기법의 개발로 시작되었고, 최근의 분광기 기술의 개발 및 고압력을 극복하는 differential pumping 기술 등의 개발은 3세대 방사광과 함께 하여 약 100 torr 영역에서 실험이 가능한 소위 상압 광전자 분광학을 구현하게 되었다. AP-XPS의 고유한 가능성은 최근의 금속, 금속 산화물 표면과 물의 상호작용, 작동하는 고체산화물 연료 셀의 표면 전자구조, 산화-환원 분위기에서 두 가지 금속으로 구성된 금속 나노입자의 조성변화 등 촉매로 활성인 금속 표면의 표면 산화물 성장의 연구 등에 의해 매우 유용할 것이다.

이러한 AP-XPS 장치가 8A 빔라인의 한 branch에 설치 예정으로 진행 중에 있다. 2018년 완공을 목표로 진행되고 있으며, 유사대기압형성을 위한 기술 장벽을 최대한 극복한 최신 실험장치인 AP-XPS end station 구성은 KBSI에서, 방사광 광학계를 포함한 빔라인 구성은(그림 9) 포항가속기연구소에서 전담하여 실현할 예정이다.

4. 시간 분해 X-선 산란 빔라인: 1C TR-XRS

방사광원은 그림 2에 나타난 바와 같이 수십 피코초(ps)의 너비를 가지는 펄스(pulse) 형태로 나온다. 이를 이용한 시간분해(time-resolved) 실험으로 관련 동역학 이해를 추구하는 연구가 미국의 ALS, APS, 프랑스의 ESRF, 독일의 Bessy II 등에서 경쟁적으로 진행되어 왔다. 방사광을 이용한 실시간 측정 기법에서는 펌프-프로브(pump-and-probe)가 기본 개념으로,

Fig. 10. A schematic showing synchronization between the optical laser pulse and the PLS-II x-ray pulse at the 1C TR-XRS beamline. (PAL and Dr. S. Lee at KRISS)^[5]

펌프로써 optical laser 인가, 전압인가, 자기장 인가 등이 있으며, 기술적으로 저장링의 전자 빔 조절하는 기준 시계와의 정확한 동기화 기술 및 시료의 반응을 관측하는 검출기의 속도 개선이 중요하다. 정확한 동기화 기술, 펌핑(pumping) 기술 및 검출기의 속도 개선 범위는 원하는 시간 분해능을 요하는 연구 주제에 따라 달라지지만, 국내에서도 방사광을 이용하는 동력학 연구 필요성이 대두되어 왔다. 시간분해 기법은 연 x-선, 경 x-선 모두 요구되지만, 우선 경 x-선 산란 기법의 적용에 초점을 두고 진행 중이다.

이러한 기술 개발 요구로 시분해 연구 빔라인이, 한국표준과학연구원(KRISS)과의 협약 빔라인으로 2017년부터 건설이 시작되었으며, 2019년 완공을 목표로 건설하고 있다. 포항에서는 빔라인 부분에 대해서, KRISS에서는 실험장치(end station) 부분을 전담하여 개발하고 있다. 한편, 포항에서는 시간분해 흡수분광학 또한 가능한지 검토 중에 있으며, 가능하면 이 부분도 전담할 예정에 있다. 어느 경우이건, 광레이저 펌프-x선 프로브(optical laser pump and x-ray probe)가 기본 개념으로 그림 10은 시간분해 실험을 위한 레이저와 x-선의 동기화 개념도를 나타낸 것이다. 표준과학연구원과 포항가속기연구소의 연구진이 시간분해 기법 및 연구 주제에 대해서도 공동 연구 중이며, 현재 그림과 같은 동기화 기법으로, x-선 시간분해능은 20 ps이며 최대 수 μ s까지 데이터 수집이 가능하도록 구현하였다.

5. 방사광 기반 화합물 탐색 빔라인: 5C X-ray Fragment Screening Beamline

포항가속기연구소는 초고속 단백질 구조분석 기술이 적용된

Fig. 11. Requirement of beamline and facility set up for realizing fragment based drug design (FBDD) based on synchrotron x-ray protein crystallography.

화합물 탐색 빔라인을 구축해서 국내 신약개발의 연구 역량 강화에 기여할 예정이다. 단백질 결정학 빔라인을 활용하는 대부분의 국내 이용자는 신약 개발보다는 단백질의 결정 구조 연구의 비중이 높은 상황이다. 그 이유 중의 하나가 현 수준에서는 하루에 최대 20여 개 정도의 시료를 연구하는데 그치기 때문이다. 신약 개발을 위해서는 단백질에 target 물질을 적용 시키며 이 중에 원하는 단백질과 잘 들어맞는 것을 찾아야 하는데, 구조를 기반으로 하는 프래그먼트 기반 신약 설계(FBDD, structure or fragment based drug design)에 필요한 라이브러리(library)를 대략 1,200개로 가정하면, 이를 실험하기 위해서는 약 60일의 실험기간(빔타임)이 필요하게 되는데 이는 현실적으로 불가능하다. 하지만 하루에 400개의 시료를 연구할 수 있는 환경으로 개선된다면 3일의 빔타임으로도 충분하고, 결과적으로 FBDD를 위한 접근성이 획기적으로 향상되어 응용 측면에서 신약개발을 하고자 하는 이용자들이 많아질 것이다. 즉, 아이디어가 있는 스타트업 기업, 일반 연구소 등의 연구자들은 3일의 빔타임으로 1,200여 개의 라이브러리를 확보하여 신약 개발 가능성을 타진할 수 있게 되어, 신약개발에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 이유로 유럽 공동체 방사광가속기(ESRF), 영국의 DIAMOND 가속기 등에는 FBDD를 현실적으로 가능하게 하는 기능을 구비하고 있다.

5C 빔라인에서 하루 약 400여 개의 화합물을 탐색할 수 있도록 하여 FBDD를 현실화시킬 수 있는 기능을 갖추고자 준비하고 있다. 이를 위해 시간 당 약 20개 정도의 시료에 대한 실험이 가능하도록 할 예정이다. 시료의 교체, 데이터 수집, 분석에 이르는 전 과정을 자동화하여, 단백질 구조 분석 및 화합물 탐색에 소요되는 노력과 비용을 획기적으로 절감시킬 수

REFERENCES

- [5] S. Lee *et al.*, Synchrotron Radiation Science & Technology 23, 16 (2016)

Table 2. List of 3rd generation synchrotrons in Asian Continent and their characteristics. *Two well-known Japanese synchrotrons are chosen. Other Japanese synchrotrons are summarized in table 3.^[6-15]

Country	Synchrotron Source	E (GeV)	I (mA)	Circumference (m)	RF freq. (MHz)	Operational beamlines	Open Year
Japan*	SPring-8	8.0	100	1436	508.5	54	1997
	PF	2.5	450	187	500.1	37	1982
India	Indus-1	0.45	100	18.9	31.6	6	1999
	Indus-2	2.50	200	172.4	505.8	11	2005
China	NSRL	0.80	300	66.1	204	10	1991
	BSRF	2.50	250	240	500	14	1991
	SSRF	3.50	300	432	499.6	8	2009
Taiwan	TLS	1.50	500	120	499.6	32	1993
	TPS	3.00	500	518.4	499.6	7	2015
Thailand	SPS	1.20	150	81.4	118	10	2004
Singapore	SSLS	0.70	500/350	10.8	55.52	5	1999
Jordan	SESAME	2.50	400	133.2	500	2	2016
Armenia	CANDLE	3.00	350	216	499.6		Planning
Iran	ILSF	3.00	400	528	100		Design

있다. 세부적으로는 시료를 1도 단위로 360도 고속 회전시키면서 데이터 수집이 가능한 고속 2차원 검출기(기존의 CCD가 아닌 pixel array detector로써 가능)를 구비하고, 자동 시료 교환 장치, 다량의 2차원 데이터를 고속 처리하는 기술 등을 구현할 것이다. 이에 따라서 FBDD 기법이 국내 제약 업체 및 공공연구소에 확산될 수 있는 모멘텀을 마련할 것으로 기대되며, 단백질 구조 정보가 신약개발에 활용됨으로써 신약개발의 성공확률도 높일 수 있다. 빔라인의 자동화 개발과 화합물 관련 실험실 구축에는 2년 정도가 소요될 것으로 예상하며, 2020년 하반기부터 이용자 서비스를 개시할 예정이다.

그림 11은 FBDD를 가능하게 하는 시료 준비 시설 구성 및 초고속-대용량 자동화 실험장치(fully automated high-throughput end station) 구성의 개념을 나타내는 사진을 보여주고 있다.

아시아 지역의 3세대 방사광 시설들* Synchrotron light sources in Asia

아시아 지역의 3세대 방사광 시설 및 이용자 커뮤니티는 놀라울 정도로 빠르게 성장하고 있다. 이들 방사광의 특성(스토리지 링 특성)을 표 2와 그림 12에 정리하였으며 한국의 PLS-II, 미국의 NSLS-II, 일본의 SPring-8을 각각 파란색, 빨간색 및 보라색 점으로 함께 표시하였다. 표 2에 정리된 각국 방사광 시설의 횡자석과 삽입광원 빔라인의 수 및 연 x-선과 경 x-선 빔라인 수를 그림 13에 나타내었다. 아시아 지역의 방사광 시설은 동쪽 일본에

서 서쪽 요르단까지 매우 넓게 분포하고 있으며, 아시아 국가들의 방사광 시설의 현황을 간단히 살펴보고자 한다.

일본 일본은 아시아 지역에서 가장 많은 방사광 시설을 보유하고 있으며 시설 목록을 표 3에 나타내었다. 4세대 첨단

REFERENCES

- [6] R. V. Nandedkar, Radiation Physics and Chemistry **70**, 587 (2004); (India) <http://www.cat.ernet.in>.
- [7] X. Jiang *et al.*, Review of Scientific Instruments **66**, 2343 (1995); (China) <http://en.nslr.ustc.edu.cn>, <http://english.bsrp.ihep.cas.cn/>, <http://ssrf.sinap.ac.cn/english/3/Introduction.htm>.
- [8] G. H. Luo *et al.*, AIP Conference Proceedings **879**, 13 (2007); (Taiwan) <http://www.nsrrc.org.tw/>, <http://tpsbl.nsrrc.org.tw>.
- [9] P. Songsiririthigul *et al.*, AIP Conference Proceedings **1234**, 289 (2010); (Thailand) <http://www.slri.or.th/en/>.
- [10] H. O. Moser *et al.*, Academia Sinica, Beijing (China). Inst. of High Energy Physics; **194**, 27 (2001); 2. Asian particle accelerator conference; Beijing (China); 17-21 Sep 2001; (Singapore) <http://ssls.nus.edu.sg/>.
- [11] H. Schopper, RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO **40**, 199-239 (2017); (Jordan) <http://www.sesame.org.jo>.
- [12] M. Aghasyan *et al.*, AIP Conference Proceedings **705**, 494 (2004); (Armenia) <http://candle.am/>.
- [13] J. Rahighi, *et al.*, Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2014 Dresden, Germany, Page 240-242 (2014); (Iran) <http://ilsf.ipm.ac.ir/>.
- [14] K. Tsuchiya *et al.*, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, 136 (2013); (Japan) http://www.spring8.or.jp/en/links/sr_facilities/.
- [15] H. Tanaka *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, 2867 (2016); (Japan) http://www.spring8.or.jp/en/links/sr_facilities/.

Fig. 12. Emittance vs electron energy graph of Asian Synchrotron Light sources.

방사광 시설과는 별개로, 현재 운영 중인 9기의 방사광 시설이 있으며 추가 3기가 설계 또는 건설 중이다. 이 시설들의 주요 성능을 표 3에 요약하였다. 일본의 방사광 시설 중에서, SPring-8 (Super Photon Ring-8)과 Photon Factory(PF)는 많은 수의 빔라인과 우수한 빔 성능으로 가장 광범위하게 사용되는 3세대 방사광 시설이다. 이중 PF는 1982년에 건설된 일본 최초의 방사광원으로, 쓰쿠바(Tsukuba)의 고에너지연구소(KEK, High Energy Accelerator Research Organization)에 있으며 2.5 GeV, 450 mA의 저장링과 약 50개의 빔라인 시설을 보유하고 있다. PF-AR(PF-Advanced Ring)은 PF와 같은 위치에 있으며, 효과적인 시간분해 실험을 위한 고휘도 펄스 형태의 광원이다. SPring-8은 효고현 하리마 사이언스 파크(Harima Science Park) 내에 위치하고 있는 세계 3대 대형 방사광 시설로 8 GeV, 100 mA의 저장링을 보유하고 있으며, 54개의 빔라인을 운용하고 있다.

인도 인도에는 2기의 방사광 시설이 있으며, 모두 인도 북부지역인 Indore의 Raja Ramanna Center for Advanced Technology(RRCAT)에 위치하고 있다. 그중 하나는 450 MeV 저장링을 가진 Indus-1이며 다른 하나는 2.5 GeV 저장링의 Indus-2이다. 인도의 첫 번째 방사광 시설은 Indus-1으로 1999년에 처음 시운전을 시작하였으며, 18.96 미터의 원주를 가진 소형 저장링에서 100 mA의 전자빔으로 운전하고 있다. Indus-1의 방사광 스펙트럼은 3 ~ 200 nm 범위를 가지고 있으며, 현재 6개의 운용 빔라인을 보유하고 있다. 높은 에너지의 경 x-선 영역의 실험을 위하여 3세대 방사광 시설인 Indus-2가 추가로 건설되었으며 2005년에 처음 시운전을 하였다. Indus-2는 둘레 172.4미터의 저장링을 전자빔 200 mA, 2.5 GeV에서 운영하고 있으며, 최대 27개의 빔라인 구성이 가능하도록 설계되었다. 현재 11개의 빔라인이 운용 중으로 x

Fig. 13. (Left) Number of ID & BM beamlines in Asian Synchrotron facilities including the PLS-II and (right) number of soft and hard x-ray beamlines of them.

선 산란, 반사율, 광전자흡수분광, 리소그래피 등과 같은 실험이 가능하며, 나머지 16개의 빔라인들은 개발 중에 있다.

중국 중국에는 3기의 대표적인 방사광 시설이 있으며 4세대 방사광 시설인 Shanghai X-ray Free Electron Laser는 아직 건설 및 시험 단계이다. 3기의 시설 중 2기의 방사광 시설이 1991년에 가동을 시작하였으며, 이 중 하나는 National Synchrotron Radiation Laboratory(NSRL)이고 다른 하나는 Beijing Synchrotron Radiation Facility(BSRF)이다. NSRL은 중국 최초의 방사광 시설로 허페이(合肥)의 University of Science and Technology of China 캠퍼스(USTC)에 위치하고 있다. NSRL은 원주 66.1 m의 저장링을 전자빔 800 MeV, 300 mA에서 운전 중이며, 10개의 빔라인을 보유하고 있다. BSRF는 둘레 500미터의 저장링이 있으며 2.5 GeV, 250 mA의 전자빔으로 운전하고 있는 3세대 방사광원이다. BSRF의 방사광은 자외선에서부터 경 x-선 영역을 아우르며, 현재 14개의 빔라인을 보유하고 있다.

2009년에 중국 최대의 Shanghai Synchrotron Radiation Facility(SSRF)가 가동을 시작하였으며, SSRF는 상하이 푸둥(Pudong) 지역에 위치한 3세대 방사광 시설이다. 저장링의 에너지는 3.5 GeV이며 최대 300 mA 전류까지 운전이 가능하다. SSRF 저장링의 둘레는 432미터이며, 현재 8개의 빔라인을 운영하고 있다.

대만 Taiwan light source(TLS)와 Taiwan photon source(TPS)는 대만의 방사광 시설이다. TLS는 대만 최초의 방사광으로 Hsinchu Science Park의 National Synchrotron Radiation Research Center(NSRRC)에 위치하고 있다. TLS는 3세대 방사광 시설로 1.3 GeV의 전자빔 에너지로 1993년에 가동을 시작하였으며, 이후 2007년부터 1.5 GeV로 운전하고 있다. TLS의 저장링은 120 m의 둘레를 가지고 있으며, top-up 모드로 최대 500 mA에서 운전이 가능하다. TLS는 32개의 운용 빔라

Table 3. List of 3rd generation synchrotron facilities in Japan.^[16-27]

Synchrotron Source	E (GeV)	I (mA)	Emitt. (nm-rad)	RF (MHz)	Circumf. (m)	Open Year
AURORA	0.57	300	1600	190.8	3.14	1996
Aichi Synchrotron Radiation Center	1.2	300	53	499.6	72	2012
Hiroshima Synchrotron Radiation Center (HISOR)	0.7	350	400	191.2	22	1997
Photon Factory (PF) at KEK	2.5	450	34.6	500.1	187	1982
Photon Factory (PF-AR)	6.5	35	293	508.6	377	1986
SPring-8	8	100	2.4	508.5	1436	1997
SAGA-LS (Saga Light Source)	1.4	300	25.1	499.8	75.6	2006
UVSOR (Ultraviolet Synchrotron Orbital Radiation Facility)	0.75	300	17.5	90.1	53.2	1983
NewSUBARU	1.5	350	38	499.9	118.7	1999
SPring-8-II	6.0	100	0.149	508.7	1436	design
Super-SOR	1.8	500	7.26	500	280.5	design
SLIT-J (Synchrotron Light in Tohoku)	3.0	300	0.9	508	340	design

인을 보유하고 있으며 IR, VUV 및 연 x-선 영역에서 최적의 광원을 제공하는 대표적인 저/중 에너지의 3세대 방사광이다. TLS에서는 제공하기 어려운 경 x-선 에너지 영역의 방사광 활용을 위하여 NSRRC는 2010년에 TPS의 건설을 시작하여 2015년에 초기 운전을 시작하였다. TPS는 전자빔 3 GeV, 500 mA로 운전되는 방사광 시설로 현재 빔라인 7개를 운용 중이며, 최대 25개의 빔라인이 2020년까지 건설될 것으로 예상하고 있다.

태국 National Synchrotron Research Center(NSRC)가 운영하는 전자빔 1.2 GeV의 방사광 시설인 Siam Photon Source (SPS)는 2014년에 시운전을 시작하였으며, Nakhon Ratchasima에 위치하고 있다. SPS 저장링의 둘레는 81.4미터이며 100 mA 빔 전류로 운전하고 있다. SPS에는 10개의 빔라인이 12개의 실험 시설을 갖추고 있으며 3개의 빔라인이 추가로 건설 중에 있다.

싱가포르 National University of Singapore의 Kent Ridge 캠퍼스에 위치한 Singapore Synchrotron Light Source(SSLS)는 1999년에 시운전을 시작하였다. SSLR은 둘레 55.52미터의 소형 초전도 저장링을 가지고 있으며, 전자빔 700 MeV, 350 mA에서 운전하고 있다. 최대 20개의 빔라인 포트가 가능하며 현재 6개 포트가 빔라인으로 활용 중이다. SSLS의 방사광 스펙트럼은 원적외선부터 약 10 keV까지 가능하며 현재 5개의 운용 빔라인에서 활용하고 있다.

아르메니아 3세대 방사광인 CANDLE(Center for the Advancement of Natural Discoveries using Light Emission)은

현재 계획 및 건설 단계에 있는 아르메니아의 방사광 시설이다. CANDLE 저장링은 216미터의 둘레를 가지며 전자빔 3 GeV, 350 mA에서 운전할 예정으로, VUV에서 경 x-선 영역까지의 넓은 스펙트럼 범위의 방사광 사용이 가능하며, 50개 이상의 빔라인에 건설될 것으로 예상된다.

이란 ILSF(Iranian Light Source Facility)는 Qazvin에 위치한 이맘 호메이니 국제 대학(Imam Khomeini International University)에 건설할 예정인 방사광 시설로, 전자빔 3 GeV, 350 mA에서 운전되도록 설계되어 있다.

REFERENCES

- [16] (Japan) Aurora <http://www.ritsumei.ac.jp/acd/re/src/aurora.html>.
- [17] (Japan) Aichi Synchrotron Radiation Center: <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/en/>.
- [18] (Japan) Hiroshima Synchrotron Radiation Center: <http://www.hsrb.hiroshima-u.ac.jp/english/index.html>.
- [19] (Japan) Photon Factory: <http://www2.kek.jp/imss/pf/eng/>.
- [20] (Japan) PF-AR: <https://www.kek.jp/en/Facility/IMSS/PF/PFAR/>.
- [21] (Japan) SPring-8: <http://www.spring8.or.jp/en/>.
- [22] (Japan) SAGA-LS: <http://www.saga-ls.jp/>.
- [23] (Japan) UVSOR: <https://www.uvsor.ims.ac.jp/eng/index.html>.
- [24] (Japan) Newsbaru: <http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS-en/>.
- [25] (Japan) SPring-8-II: <http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>.
- [26] (Japan) Super-SOR: <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/e04/PAPERS/THPKF035.PDF>.
- [27] (Japan) SLIT-J: <http://www.slitj.tagen.tohoku.ac.jp/oldHP/abouut.html>.

요르단 SESAME(Synchrotron-light for Experimental Science and Applications in the Middle East)는 앨런(Allan)에 위치한 중동의 첫 번째 방사광 시설로 UNESCO의 후원으로 시작되었다. SESAME는 전자빔 2.5 GeV의 3세대 방사광 시설로 주변국의 과학자들과 정부들이 공동으로 투자하고 있다. 현재 회원국은 키프로스, 이집트, 이란, 이스라엘, 요르단, 파키스탄, 팔레스타인 및 터키이다. SESAME 저장링의 둘레는 133.2미터이고 빔 전류는 400 mA이다. 현재 방사광 실험이 가능한 2개의 빔라인이 운용되고 있으며 다른 7개의 빔라인은 개발 중이다.

The growth of 3rd gen. synchrotron facilities as well as its communities in Asian region is amazingly fast. Table 2 and figure 12 show storage ring characteristics of them. Korean PLS-II, Japanese SPring-8, and NSLS-II in the USA are represented together with blue dot, red dot, and violet dot, respectively. In table 2, their characteristics are briefly summarized and figure 13 depicts their soft x-ray & hard x-ray beamline numbers.

In Asian continent, the synchrotron source facilities are widely spread from Japan (east part of Asia) to Jordan (west part of Asia). A brief scenario of contemporary synchrotron sources in Asian countries is as follows:

Japan: Japan possesses the largest number of synchrotron sources in Asian region and the list is summarized in table 3. Apart from the advanced 4th generation synchrotron source, Japan owns 9 operational synchrotron light sources while the 3 others are in designing/construction phase. Main parameters of these synchrotron sources are tabulated in Table. 3. Among these operational synchrotron sources in Japan, SPring-8 and Photon Factory (PF) are the most extensively used synchrotron sources because of their large number of beamlines and the superior beam parameters. PF is the first dedicated synchrotron light source in Japan which started working in 1982. It has 2.5 GeV (450 mA) storage ring which is situated at KEK (High Energy Accelerator Research Organization), in Tsukuba. Another advanced ring (PF-AR) was also developed later at PF site as a high-intensity pulsed synchrotron source effective for time resolved experiments. Photon factory facility combines around 50 experimental stations. Spring-8 is an 8 GeV (100 mA) storage ring which is located at Harima Science Park City, Hyogo Prefecture, Japan. It has 54 operational beamlines.

India: At present, there are two operational synchrotron radiation sources in India. Both of these are located at the Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (RRCAT), Indore. These sources are Indus-1, a 450 MeV electron storage ring and Indus-2, a storage ring of 2.5 GeV. In 1999, first Indian synchrotron radiation source Indus-1 was commissioned. It is a small ring having a circumference of 18.96 meter whose operational beam current is 100 mA. It has six operative beamlines to work with synchrotron radiation ranging 30–2000 Å. In order to cover the high X-ray energy, 3rd generation synchrotron radiation source Indus-2 was commissioned in 2005. With the circumference of 172.4 meter, Indus-2 operates at 200 mA and 2.5 GeV. It consists of 27 beamline ports. Currently, there are 11 active beamlines on Indus-2 while the rest are in development stage. These beamlines are dedicated for X-ray based measurements technique like diffraction, reflectivity, photoemission, absorption, lithography *etc.*

China: There are three well functional synchrotron radiation sources in China while the latest 4th generation synchrotron radiation source named as Shanghai X-ray Free Electron Laser is still in the construction and testing phase. In the year 1991, two synchrotrons radiation sources become operational in China. Among these, one was the National Synchrotron Radiation Laboratory (NSRL) while the other was Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF). NSRL was the first dedicated synchrotron radiation facility in China. It is located on the Campus of the University of Science and Technology of China (USTC), in Hefei, Anhui Province. With 66.1 meter circumference, the storage ring of NSRL operates at 800 MeV and 300 mA. It has 10 active beamlines. With 2.5 GeV and 250 mA beam current, BSRF belongs to the family of 3rd generation synchrotron radiation sources. Its perimeter is 500 meter. The energy of the synchrotron radiation light of BSRF spans from vacuum ultra-violet to hard X-ray. There are 14 active beamlines on BSRF.

In 2009, China's biggest light facility named as Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) became operational. SSRF is the 3rd generation synchrotron radiation source located in the Pudong district, Shanghai. The energy of storage ring is 3.5 GeV and it operates at 300 mA beam current with the top-up facility. The perimeter of SSRF storage ring is 432 meter. Currently it has 8 active beamlines.

Taiwan: Taiwan light source (TLS) and the Taiwan photon source (TPS) are the two synchrotron radiation sources in Taiwan. TLS is Taiwan's first synchrotron which is located at the National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) in Hsinchu Science Park. It was opened in 1993 as a 3rd generation synchrotron with beam energy of 1.3 GeV. Later in 2007, it was upgraded to 1.5 GeV. The storage ring has a perimeter of 120 meter which can operate at 500 mA in the top-up mode. TLS is a 3rd generation storage ring with low- & medium-energy that provides optimum sources of photons in the IR, VUV and soft X-ray region for its 32 operational beamlines. To meet the hard X-ray energy range synchrotron radiation light, NSRRC has started the construction of TPS in 2010 which went into pilot operation in 2015. TPS is a 3 GeV synchrotron radiation source with 500 mA beam current. On this synchrotron source, 25 beamlines are expected to be operational until 2020. By this time, 7 beamlines of first phase are opened for experiments.

Thailand: The Siam Photon Source (SPS), a dedicated 1.2 GeV synchrotron light source operated by the National Synchrotron Research Center (NSRC) was commissioned in 2014, and is located in Nakhon Ratchasima. The circumference of SPS storage ring is 81.4 meter and it runs on 100 mA beam current. Currently, SPS has 10 active beamlines with 12 experimental stations while 3 more beamlines are under construction.

Singapore: Singapore Synchrotron Light Source (SSLS) was commissioned in year 1999 at Kent Ridge campus of the National University of Singapore. It comprises a compact superconducting storage ring with perimeter 55.52 meter which operates on 700 MeV and 350 mA beam current. In SSLS, up to 20 ports are provided for beam lines and six of these ports are represented with beam lines attached. The useful X-ray spectrum of SSLS extending from about 10 keV down to the far infrared is currently used by 5 actively running beamlines.

Armenia: Center for the Advancement of Natural Discoveries using Light Emission (CANDLE) is a 3 GeV 3rd generation synchrotron light source facility in Armenia, which is currently under planning and construction phase. With the circumference of 216 meter the CANDLE storage ring will operate

on 350 mA beam current. More than 50 beamlines are planned on CANDLE light source to cover the wide spectrum range of emitted photons from VUV to the hard X-ray region.

Iran: The synchrotron light source named as Iranian Light Source Facility (ILSF) is designed to be constructed at Imam Khomeini International University in Qazvin, Iran. It is designed to operate at 3 GeV and 350 mA beam current.

Jordan: Synchrotron-light for Experimental Science and Applications in the Middle East (SESAME) is the first light source in the Middle East created under the auspices of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) which is located at Allan in the Balqa governorate of Jordan. SESAME is a 2.5 GeV, 3rd generation synchrotron radiation source which is joint venture by scientists and governments of the region. Its current members are Cyprus, Egypt, Iran, Israel, Jordan, Pakistan, Palestinian, and Turkey. The circumference of SESAME storage ring is 133.2 meter and the beam current is 400 mA. At present, 2 beamlines are open for experiments while the 7 other beamlines are in development stage.

맺음말

방사광 시설은 국가 기초과학 시설인 동시에 한 나라의 과학기술 수준을 가늠하는 척도로, 미국, 유럽, 아시아 등 전 세계에서 경쟁적으로 구축하고 있는 상황이다. 한국 최초의 국가 거대 과학시설인 포항방사광가속기는 대한민국 대표적인 기초과학의 상징이며 산실로서, 광복 70년 7대 과학기술과 과학기술 40년 최고의 뉴스에 선정된 것들이 이를 방증한다. 이러한 평가는 포항가속기연구소의 몫이기 보다는 지속적인 관심을 보여주시는 국민들과 구슬땀을 흘리며 이용한 연구자들의 몫이라고 할 수 있다. 포항방사광가속기 건설 이전에는 방사광시설을 경험해 본 국내 연구자가 채 10명이 안되었었는데 이제는 연간 5,000여 명의 연구자들이 활용을 하는 첨단 과학 장터가 되었다. 국가의 입장에서는 기초과학의 척도로, 과학기술계에서는 첨단 거대과학시설로, 연구자 입장에서는 여러 방법의 연구소통의 장소이자 공동 활용기기로, 국민의 입장에서는 기초과학의 상징으로서 자리매김한 포항방사광가속기이지만, 가장 중요한 밑거름은 연구소 직원들의 사기와 함께 이를 활용할 학문적 후속 세대, 즉, 학생들일 것이다. 앞서 서술한 역할들에 더하여 교육적인 역할과 기능을 지속적으로 수행하여 국가의 앞날을 밝힐 미래의 빛이 되도록 노력을 더해야 할 것이다.

마지막으로, 그동안 상대적으로 관심이 적었던 아시아 지역의 방사광 연구시설과 해당 연구자들이 빠르게 성장하고 있으며 포항 4세대 방사광가속기(PAL-XFEL)가 가동되는 이 즈음 아시아 국가 간 연구교류 및 공동 활용에 대한 커다란 밑그림도 그려 보아야 할 시점이 아닌가 생각해 본다.

감사의 글

이 기고를 작성하는 데 도움을 주신 마이크로 단백질 결정학 빔라인의 박석열 박사님(navypsy@postech.ac.kr), 적외선 분광학 빔라인의 채복남 박사님(cbn@postech.ac.kr), 상압 광

전자 분광학 빔라인의 김기정 박사님(kjkim@postech.ac.kr), 시간 분해 X-선 산란 빔라인의 김용삼 박사님(yongsam_kim@postech.ac.kr), 방사광 기반 화합물 탐색 빔라인의 김연길 박사님(ygkim76@postech.ac.kr), 그리고 결맞음 X-선 산란 빔라인의 이수용 박사님(dsleesy@postech.ac.kr), 표준과학연구원의 이수형 박사님(sooheyong@gmail.com)과 조원혁 연구원님(Wins1119@gmail.com)께 감사의 말씀을 드립니다.

* ‘아시아 지역의 3세대 방사광 시설들(Synchrotron light sources in Asia)’의 영문 버전은 온라인에서만 보실 수 있습니다.