

## 방사광가속기

손영욱  
포항가속기연구소

### 1. 서 론

1911년 러더포드(Rutherford)가 알루미늄 박막으로부터 알파입자( $\alpha$ -particle)가 산란되는 것에서 원자핵을 발견한 이후로 입자가속기(particle accelerator)의 개발이 시작되어 가속기물리와 관련 기술이 고도로 발전되어 전자기, 재료물성, 원자핵물리, 초전도체, 비선형 이론, 스핀 dynamics, 플라즈마, 양자역학 등등과 같은 아주 다양한 분야의 과학발전에 기여해오고 있다.

다양한 응용분야에서 입자가속기를 이용하여 기술의 진보와 응용역역 확대가 비약적으로 진행되어 왔고 여전히 진행형이다. 예컨대, 핵물리와 입자물리연구에서 수많은 새로운 발견으로 과학발전이 이바지하고 있고 근래에 힉스(Higgs) 입자를 찾아내는 등의 성과를 올리고 있다. 반도체 소재분야의 이온주입기법이나 리소그래피와 같은 산업분야, 방사광가속기를 이용한 생명과학 및 신약 연구, 중성자원을 이용한 물질분야 및 의료분야 연구를 통하여 혁명에 가까운 연구 성과들이 속출하고 있다.

입자가속기의 주요 목적은 핵물리 및 입자물리에서 실험적 연구가 주류를 이루었고, 여전히 중요하게 여겨지고 있다. 최근에는 사회적으로 과학기술의 다양화와 발전이 이루어지면서 지적 호기심을 충족하기 위한 순수연구보다 실용성이 중시 되면서 비중적인 측면에서 신물질연구 분야, 생명의료연구, 산업응용 연구 등의 타 응용 분야가 더 커지고, 투입되는 연구비 또한, 상대적으로 확대되고 있다. 그러나 여전히 입자가속기 본연의 연구분야에 대량의 연구비 투자가 이루어 지고 있다.

한편 과학기술의 발전으로 가속기분야에서는 기초분야의 연구를 위해서 입자의 에너지와 휘도(luminosity 또는 brightness)가 획기적으로 높아지고 있고, 뉴트리노(neutrino)나 힉스의 물성연구를 위해서 한

단계 더 높은 에너지와 휘도를 가지는 가속기 개발을 진행하고 있으며 멀지 않은 장래에 실현되고 이를 통해서 암흑물질과 대칭이론 등이 규명 될 것으로 기대된다. 1930년대에 입자의 에너지가 수 MeV급 가속기가 가동되었으나 1990년대에 TeV급 가속기가 실현되었고, 입자빔 세기 측면에서 1950년대  $10^9$  PPP(particle per pulse)에서 1990년대  $10^{14}$  PPP를 현재에 약  $10^{34}$  PPP를 기록하고 있다. 이와 같이 휘도가 폭발적으로 증가됨에 따라서 물리학자들은 좀 더 물질의 깊숙한 곳까지 들여다 볼 수 있게 되어 앞서 언급한 뉴트리노, 힉스, 암흑물질, 대칭이론 등에 대하여 새로운 발견으로 이어져 물리학분야의 새로운 이정표가 예견되고 있다. 또한, 고강도의 이온빔이나 강력한 양성자빔에서 추출되는 고강도의 중성자원 등을 이용하면 내부 핵융합연구를 할 수 있게되어 미래의 인류에너지원 개발에 신기원을 이룩할 수 있을 것으로 기대된다.

1990년대 초반에 방사광가속기 개발붐이 일어나 입자가속기의 응용분야 확대와 진보가 비약적으로 증대되었고 새로운 세기에 들어와 고 휘도(brightness) 저장링의 실현으로 생명의료와 응집물리 분야의 연구에 새로운 전기가 되었다. 1990-2000년대에 양적, 질적인 방사광 가속기의 성장으로 저장링 형태의 방사광가속기가 전 세계적으로 약 30여기가 운용 중에 있으며 수기가 건설 중이거나 계획하고 있을만큼 수요도 폭발적으로 성장하고 있다. 이와 같은 배경에서 기존 저장링에서 실현 불가능한 고휘도의 방사광을 생산할 수 있는 4세대 방사광가속기<sup>1)</sup>가 미국 스탠포드대학에서 최초로 건설되었고(LCLS), 일본의 문부성산하 RIKEN 이화학연구소의 SACLA에 이어 포항가속기연구소의

1) 3세대 방사광가속기와 비교하여 평균적으로 휘도(Brightness)는 order of 8 이상 더 밝고, 시간특성은 order of 3 이상 짧아짐.

PAL-XFEL이 완공되었으며, 2017년에 독일의 EURO-XFEL이 가동될 예정이다. 이와 같이 4세대 방사광가속기가 본격적으로 이용되면 현재 치료가 불가능한 질병에 대한 규명과 치료신약을 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 학술적인 내용을 완전히 배제하여 자연과학이나 공학에 약간의 지식만 있으면 누구나 이해하기 쉽게 쓰려고 노력하였으며 본 자료를 통하여 가속기분야나 방사광 응용분야의 관심을 유도하고자 의도하였다.

제 2장에서 방사광가속기의 원리에 대하여 쉽게 이해할 수 있게 기술하였다. 또한 방사광가속기 발전단계에 대하여 기술함으로써 오늘날의 타분야의 입자가속기와 비교가 될 수 있게 하였다. 제 3장에서는 방사광의 이용 원리와 다양한 응용분야를 소개하여 응용분야와 이용자의 저변확대를 의도한다. 끝으로 제 4장에서 방사광가속기의 현황을 소개하여 세계 속에서 한국 방사광가속기의 위상을 가늠할 수 있게 하였다.

## 2. 방사광가속기의 원리(1)

1946년 GE(General Electric)사의 70 MeV 싱크로트론 가속기<sup>2)</sup>에서 처음으로 전자기 복사선(electromagnetic radiation)의 방출을 확인하였는데, 이 전자기복사선을 “synchrotron radiation”으로 명명하였고, 한국에서 “방사광”으로 통용하고 있다. 1873년에 Maxwell equation으로부터 하전입자의 전하밀도를 변하게 하면 전자기파(electromagnetic wave)가 발생됨이 증명되었고, Hertz가 1887년에 실험적으로 증명하였다. Liénard [2]는 하전입자가 상대성적인 속도로 곡면궤도를 따라서 운동할 때 에너지 손실이 발생함을 수식화하였고, 후에 Schottky는 이 방사선의 각(angular)과 주파수 특성 분포 및 극성특성에 대한 확인함으

로 해서 현대과학에서 방사광의 응용에 대한 단초를 제공하였다. 1940년대 소련 과학자들이 에너지 손실 때문에 베타트론 (betatron)에서 얻을 수 있는 최대 에너지가 제한된다는 것을 밝혀내었는데, 1946년 GE사의 100 MeV 베타트론에서 방사광 방출에 따른 에너지손실을 이론에 근접한 실험결과를 얻었다. 그러나 이 당시도 마이크로웨이브 영역( $10^9 \sim 10^{12}$  Hz,  $10^{-6} \sim 10^{-3}$  eV)에서 방사광을 실증하는데는 실패하였다. 후에 Schwinger는 하전입자의 궤도의 주파수보다 훨씬 더 높은 고차원 주파수(higher harmonic)에서 스펙트럼 피크(spectrum peak)이 나타나고 마이크로웨이브 영역에서 출력은 매우 미미함을 밝혀냈다.

가속기에서 방사광의 방출은 두 갈래로 연구가 진행되었는데, 하나는 가속기 자체의 설계와 성능에 관한 분야이고 방사광을 이용하여 실험을 위한 연구가 또 다른 한 축이었다. 이 양 분야는 1990년대를 기준으로 엄청난 진보하고 있으며 2010년대 후반인 현재는 4세대의 방사광이 첨단에 있으며 이를 이용한 실험이 생명의료 분야의 획기적 성과로 나타날 것으로 기대된다.

방사광의 방출에 따라 전자빔의 운동에 매우 큰 영향을 주는데, “Radiation Damping”이라 불리는 에너지 손실에 따른 에너지 감쇄나 synchrotron oscillation, betatron oscillation 같은 것들이다. 방사광의 방출은 전자 싱크로트론 가속기나 저장링 설계의 주요인자이다. 주어진 가속에너지에서 에너지손실은 가속기의 크기를 결정하는 요소이며, 또한 자석의 배열구조가 radiation damping에 영향을 주고 이에 따른 에너지 손실의 크기가 결정된다. 방사광의 손실량을 기준으로 방사광가속기의 구성품 설계를 하는데, 예를 들면 에너지 보충을 위한 고주파의 설계가 이에 해당된다. 방사광이 진공챔버의 외벽을 조사하는 경우에 발생할 수 있는 손상을 방지하기 위한 설계도 고려되어야 한다. 한편으로 방출되는 방사광을 분석하여 저장링의 운전을 최적화하는데 이용하고 있다.

1950년대는 방사광을 VUV(vacuum ultra-violet) 영역의 검출기 교정이나 흡수선량 측정 등에 제한적으로 이용되었지만 1960년대에 미국 일본 유럽 등지에서 고에너지

2) 가속기의 한 종류로 최초의 주기형 입자가속기인 사이클로트론의 진화한 형태임. 즉 고정된 자기장과 고정된 주파수의 전자기 에너지에 의해서 하전입자가 궤도를 유지하고 가속되는 사이클로트론에 비하여 싱크로트론 가속기는 가변 자기장과 주파수의 전자기 에너지로 입자를 가속하여 상대성 현상 (relativistic mass) 을 보일 수 있을 정도로 가속된 입자빔을 만들 수 있음.

지물리 연구를 위한 전자 가속기들을 건설하였는데, 원치 않게 발생하여 귀찮은 존재였던 방사광을 이용하는 연구가 시작되었다. 이와 같이 당초 개발목적과는 거리가 있지만 부수적으로 방사광을 이용한 실험을 할 수 있게된 가속기를 “2 세대 방사광가속기”라 칭하고 있다. 주로 2극 휨자석에서 방사광을 추출하였지만 일부에서는 고회도의 방사광원을 확보하기 위해서 삽입장치를 설치하기도 하였다. 반면 오로지 방사광을 이용하기 위한 전용가속기를 “3세대 방사광가속기”라 한다. 3세대 광원은 주로 고회도의 방사광 추출을 위하여 삽입장치 광원을 이용하지만 여전히 휨자석의 방사광도 매우 좋은 품질의 실험을 보증하고 있다. 2000년대에 접어들어서 새로운 차원의 방사광원의 필요가 절실하게 대두되어 그 동안의 가속기연구를 바탕으로 차세대 광원개발을 추진하여 2010년에 미국 스탠포드대학의 LCLS가 완공되어 가동됨으로서 최초의 “4세대 방사광가속기”가 탄생하였다. 그 후 2012년에 일본의 SACLA의 가동 그리고 2016년에 포항의 PAL-XFEL을 개발 완료하였고, 2017년에 독일의 EURO-XFEL이 가동되고 또한 스위스의 SwissFEL 이 2019년에 완공되면 전 세계적으로 5기의 4세대 방사광원을 이용하여 다양한 이용분야에서 치열한 경쟁과 획기적인 결과물이 나올 것으로 기대된다. 이들 4세대 가속기 5기 모두 SASE(self-amplified spontaneous emission) free-electron laser 이다. 평균적으로 3세대 광원에 비하여 휘도는  $10^8$  order 더 밝고, 시간특성은  $10^{-3}$  order 정도로 더 짧아(tera → femto second) 방사광 이용실험의 신기원을 이룩할 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다. 또 다른 형태의 4세대 광원인 에너지 회수형 선형가속기(ERL: energy recovery Linac)개발 연구가 진행되어 소형의 Pilot 가속기가 건설되었으나 경쟁관계인 SASE FEL에 비하여 관심이 덜하여 대형 실험장치로 건설이 추진되고 있지는 않다.

빛에 근접한 속도로 움직이는 하전입자가 2극 자기장에 노출되면 자기장의 세기에 비례하는 각도로 휘면서 전자기적 방사가 발생하는데 이를 방사광이라 한다(그림 1 참조).

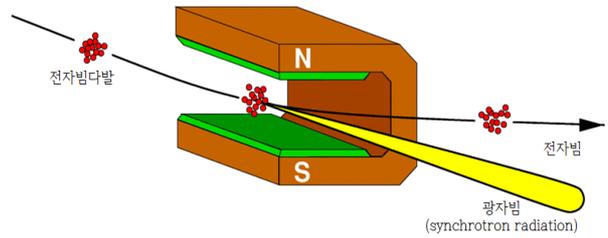


그림 1. 방사광의 생성메커니즘 (사진: DESY Photon Science).

휘는 정도는 전자의 속도와 자기장에 비례하며

$$\text{즉 } \mathbf{F} = q \{ \mathbf{v} \times \mathbf{B} \} \quad (1)$$

으로 표현될 수 있으며 방향은 전자의 운동 ( $\mathbf{v}$ ) 과 자기장 ( $\mathbf{B}$ ) 방향에 수직인 방향으로 힘 ( $\mathbf{F}$ )이 작용한다. 이와 같이 직경방향의 힘힘에 의해서 전자의 방향이 휘고 곡선궤도의 접선방향으로 방사광이 발생한다. 방사광의 순간 출력은 저장링의 에너지의 제공과 2극 자기장의 세기 제공에 각각 비례하고

$$P \propto B^2 \cdot E^2 \quad (2)$$

방사광의 에너지는 자기장의 세기와 에너지 제공에 비례한다.

$$e^c \text{ (keV)} = 0.665 B \text{ (T)} \cdot E^2 \text{ (GeV)} \quad (3)$$

방사광을 발생시키는 장치를 방사광원으로 영어로는 단순히 광원(light source)이라 칭하지만 실제로는 방사광을 발생시키는 전자가속기를 의미한다. 포항방사광가속기는 “Pohang Light Source(PLS-II)”, 캐나다 방사광가속기는 “Canadian Light Source(CLS)” 식으로 명명하는데 주로 3세대 방사광원의 관습 명칭이다. 3세대 방사광가속기는 크게 네 부분으로 구성되어 있다. 즉 전자빔을 선형가속기(PLS-II 방식)이나 booster ring(CLS 방식)에서 거의 빛의 속도로 가속시켜 이것을 저장링으로 입사하는 입사장치 (injector), 입사된 전자빔을 정해진 궤도상에서 장시간 동안 계속 회전시켜 전자빔이 방향을 바꿀 때마다 빛을 방출하는 저장링(storage ring), 그리고 방출된 빛을 실험장치까지 이끌고 기타 필요한 장치들을 갖춘 방사광관(beamline) 등으로 구성되어 있다. 각각의 구성품마다 더 복잡한 여러 가지 부품으로 구성된다. 선형가속기는 전자총, 가속관, 고주파고출력장치, 집속자

석 진공챔버 등으로 구성되며, booster ring 이나 저장링 또한 일종의 가속기로 선형가속기와 유사한 구성으로 이루어져 있다. 다만 저장링의 휨자석에서 발생하는 방사광을 방사광관으로 유도 인출하여 실험에 이용한다. 특히 3세대의 방사광원은 위글러(wiggler)와 언듈레이터(undulator)와 같은 삽입장치의 방사광을 주로 실험에 이용한다.

그림 2 [3]는 3세대 방사광원의 구성으로, full energy linac이나 booster ring에서 저장링에 필요한 에너지로 가속된 전자빔이 입사기(injector ①)를 통하여 저장링에 인가된다. 전자빔이 휨자석(bending magnet, ③)에서 앞서 설명한 메커니즘으로 방사광이 방출되고 방사광관(beamline ④)을 통하여 실험장치(experimental huch ⑤)로 전송된다. 한편 삽입장치(insertion device, undulator-⑦, wiggler-⑥)는 저장링의 직선구간에 설치되는데, 3세대 가속기는 가급적으로 많은 삽입장치 설치공간을 확보하기 위하여 직선구간이 길게 할 수 있는 Lattice 설계를 한다. 방사광 방출에 따른 손실에너지를 보충하기 위하여 마이크로웨이브장치(RF system ②)를 통하여 외부에서 고주파고출력 에너지를 공급한다.

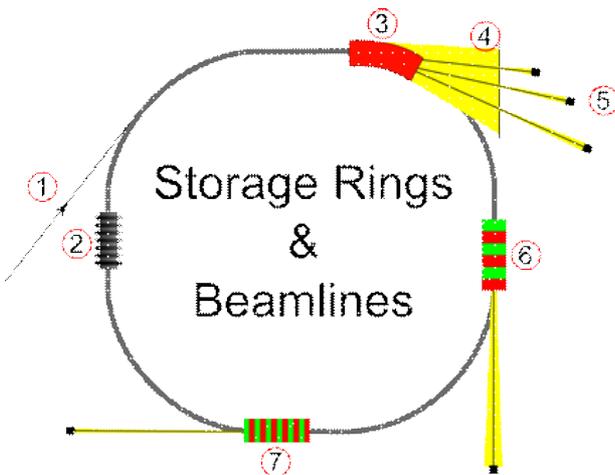


그림 2. 저장링의 구성장치.

(특집기사의 타 분야에서 가속기 일반에 대하여 잘 기술하고 있음으로 본 논문에서 지면을 절약하기 위하여 상세하게 다루지 않음. 추가적인 관심이 있으면 [4], [5]를 참고)

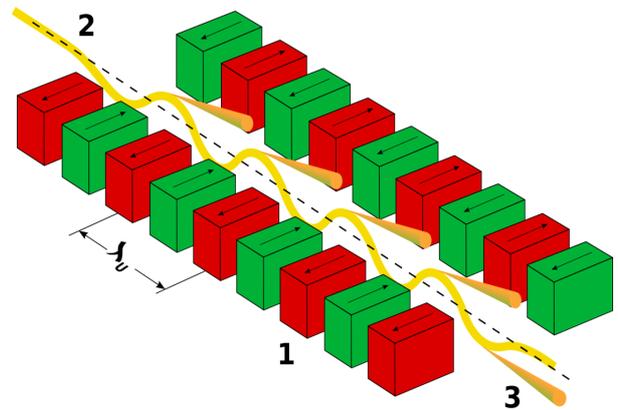


그림 3. 언듈레이터의 개념: 1 - 자석배열, 2 - 전자빔궤도, 3 - 방사광의 방출. (사진:wikipedia Undulator)

위글러나 언듈레이터는 모두 그림 3과 같은 2극 자석의 연속배열로 휨자석에서 발생하는 광자(photon) 개수가 n개이면 자석배열수(주기)가 M개인 위글러의 경우 photon 수는 2nM 개이며 주기가 L개인 언듈레이터의 경우 photon 수는 nL<sup>2</sup> 개로 광원의 휘도(brightness)는 휨자석 < 위글러 < 언듈레이터로 월등히 차이가 난다. 위글러와 언듈레이터의 외견상 모양은 비슷하지만 변형계수(deflection parameter)

$$K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi m_0 c} \quad (4)$$

값에 따라서 구별된다. 여기서  $\lambda_u$ 는 자석배열 주기의 길이이고,  $B_0$ 는 자기장의 세기이다.  $K \gg 1$ 인 삽입장치는 위글러이고,  $K \leq 1$ 이면 언듈레이터에 속한다.

언듈레이터는 식 (4)에서  $K \leq 1$  이고 약한 2극 자석의 연속 배열을 쓰기 때문에 전자들의 궤도가 완만하여 매우 미세한(수 마이크로미터 내외) 흔들림을 보이고, 자석들의 각 주기에서 방출되는 방사광은 결맞는 더하기(coherent addition)를 하여 이들이 간섭에 의하여 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 기본(fundamental)과 몇 개의 어울림(harmonics)에 해당하는 뾰족한 봉우리들로 되어 있는 스펙트럼을 보인다. 특히  $K \ll 1$ 일 때는 대부분의 광자에너지가 기본 봉우리(fundamental peak)에 담겨 있다. 따라서 실험의 특성에 맞는 방사광을 K값을 조절하여 harmonics를 선택하면 된다. 즉 언

들레이터의 자극의 간격 조절로 전자빔에 인가되는 자장의 세기를 조정할 수 있음으로 가능하다. 역시 K 값의 조절로 광자의 에너지와 파장을 선택적으로 이용할 수 있다. 언들레이터 전자빔의 궤도축으로 부터 방출되는 중심 원뿔 퍼짐각(central cone angle)은 자석 주기수를 N이라 할 때 다음과 같다.

$$\theta_c \approx \frac{1}{\gamma\sqrt{N}} \quad (5)$$

이 식으로부터 자석 주기수가 증가하면 퍼짐각이 작아지고 광자들의 집속도가 더 좋아져 휘도가 획기적으로 증가할 수 있음을 알 수 있다. 한편 자석(주기)간 거리를 통상  $\lambda$ 로 표시하는데 언들레이터의 총길이가 L 이고 주기수가 N이면 주기거리  $\lambda=L/N$ 로 언들레이터를 명명할 때 통상 주기를 cm 단위로 하여 7 cm, 5 cm 이면 각각 U7, U5 로 한다. 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 작은 K 값, 그리고 큰 값의 주기의 총 수 N을 갖는 언들레이터로 부터 방출되는 빛의 에너지는 몇 개의 harmonic peak에 집중되어 있다. 이때의 harmonic number가 n인 방사광의 빛띠너비  $\Delta\lambda/\lambda$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\text{Bandwidth} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim \frac{1}{KN} \quad (6)$$

고도의 빛띠밝기(spectral brightness)를 얻기 위해서는 bandwidth가 작아야 하며 따라서 주기의 총 수가 큰 언들레이터가 필요하며 높은 차수의 어울림 방사광을 이용하는 것이 유리하다. K값이 커짐에 따라 많은 harmonic peak이 나타나 그들 사이의 간격이 점점 좁아져서 언들레이터 영역에서 위글러 영역으로 넘어가게 된다. K값이 1보다 커지면 그림 4(b) 에서 보는 바와 같이 가장 강한 빛의 세기는 fundamental harmonics에서 점점 차수가 높은 어울림 쪽으로 이동하게 되고 더욱 큰 K값에서는 각 어울림의 봉우리들이 융합하여 하나의 연속 peak을 형성한다.

위글러에서 발생하는 방사광은 K 값에서 알 수 있듯이 자지장이 쉐 2극 자석의 배열로 광자수 뿐만 아니라 높은 광자에너지의 방사광원을 만들 수 있다. 즉 위글러는 주기수를 줄이고 강한 자기장으로 K 값을 높여서 강한 빛다발(photon beam)을 얻고 또 짧은 파장의 방사광을 얻는 데 이용된다. 특

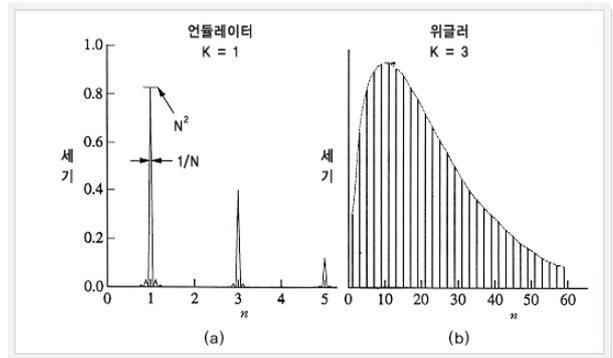


그림 4. a) 언들레이터의 방사 스펙트럼, (b) 위글러의 방사 스펙트럼.

히 매우 강한 자장의 소수 자석(예를 들면 초전도 자석) 주기를 갖는 위글러를 “wavelength shifter”라고 부르며 강한 경 X-선을 얻는 데 이용된다. Wavelength shifter와 위글러를 구별하기 위하여 여러 개의 주기를 갖는 위글러를 다극 위글러(multipole wiggler)라고 부른다. 위글러가 언들레이터와 다른 점은 각 주기의 자극에서 방출되는 빛이 서로 간섭을 하지 않는다는 것이다. 위글러의 주기 수를 M이라고 하면 위글러 X-선의 세기는 단지 각 자극에서 방출되는 방사광의 2M배 (2M번의 구부러짐이 있기 때문)가 되고 자장의 세기는 휩자석 X-선 세기보다 훨씬 강한 경X-선을 방출한다 [4].

3세대 방사광의 특징은 삼입장치인 언들레이터와 위글러를 주로 방사광원으로 이용하는데, 일반적으로 영구자석을 이용하고 특수한 경우 초전도 자석을 이용한다. 초전도 위글러의 경우 극단적으로 높은 자기장으로 광자에너지를 100 keV이상까지 얻을 수 있다. 또 초전도 언들레이터도 마찬가지로 높은 광자에너지(20~80 keV)의 초고휘도 실험을 가능하게 한다. 초전도 언들레이터의 제작 운영비가 높아서 일반화 되기 어려운데 이를 어느 정도 보완하기 위해서 빔이 지나가는 통로와 자석을 같은 진공 챔버에 넣은 In-vacuum undulator(IVU)를 개발하여 오늘날 일반적으로 이용하고 있다. 이 경우 자석간의 간격(N-S 극 간격)을 극단적으로 좁혀서 높은 자기장으로 high harmonic 광자를 획득하게 한다. 포항의 PLS-II에는 현재 14대의 삼입장치 중 IVU가 8대이다. 그림 5에는 방사광원별 방사광의 휘도

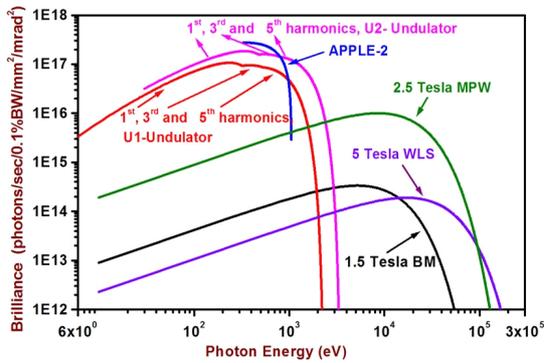


그림 5. 방사광원 별 방사광의 휘도 (Brilliance): MPW - Multi-pole wiggler, WLS - wavelength shifter, BM - bending magnet, U1 - undulator with 1 cm period.

(Brilliance)와 광자의 임계에너지를 보여주는데, 횡자석의 방사광을 표준(8 keV, 1.5E14 photons/sec/0.1도/0.1% BW/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>)으로 삼으면 5 Tesla WLS는 초전도 wavelength shifter로서 밝기는 미소하게 낮아졌으나 광자의 임계에너지가 약 30 keV로 높아졌음을 알 수 있다. 반면 2.5 Tesla multi-pole 위글러는 광자의 에너지는 약 20 keV로 높아지고 밝기도 약 order of 2가 강해 졌음을 보여준다. 한편 언듈레이터의 광자 에너지는 동일 장치에서 harmonics에 따라서 명확히 차이가 나고 밝기는 자석광원 보다도 order of 3-3.5 더 강렬함을 알 수 있다. 만약 이 언듈레이터의 자석 간극을 가변할 수 있는 설계이면 실험대상물에 최적화된 harmonic radiation을 찾아 매우 효율적인 실험을 가능하게 한다.

### 3. 방사광의 응용(6)

방사광의 응용은 방사광의 특성에 그 바탕을 두고 있음으로 해서 방사광원의 특성을 잘 이해하여야 기존의 응용분야를 더 효율성 있게 이용함은 물론 새로운 응용분야를 개척하는 데도 도움이 된다.

종전의 X-선이나 진공자외선의 광원으로는 X-선관(X-ray tube)장치, 각종의 전기 방전(즉 플라즈마) 광원, 레이저, 레이저-플라즈마 광원 등을 들 수 있지만 모두 쓸 수 있는 파장대역이 좁아서 파장가변성의 여지

가 크지 않거나 광원의 세기가 약해서 이러한 종전의 광원으로는 실험수행에 큰 어려움이 있는 경우가 많았다. 그림 5에서 보는 것과 같이 방사광가속기에서 생산되는 방사광은 X-선 영역에서뿐만 아니라 현존하는 실험실 방사광원이 망라되는 대단히 넓은 파장범위를 가진 백색광원이다. 방사광원의 에너지 스펙트럼은 원적외선으로부터 경X-선에 이르기까지 연속적이므로 파장가변성을 이용한 수많은 종류의 실험이 가능하다. 원하는 특성(특정 광자에너지 또는 파장)의 광자빔을 선택하기 위해서는 적절한 단색화 장치(monochrometer)<sup>3)</sup>를 이용하여 선택적으로 이용한다. 이와 같은 넓은 파장영역 방사광은 방사광가속기 광원의 큰 장점 중의 하나이다.

방사광원의 밝기는 재래식 광원인 X-선 장치에 비해 최소 수천만 배에 달한다. 제 3세대 방사광가속기는 제 2세대 방사광가속기보다 밝기를 한 차원 높이기 위하여 특별히 설계되었다. 빛의 밝기(brightness)란 빛의 집중정도(주어진 공간상에서)를 의미하는 것으로 광원의 크기가 작을수록 집중도가 향상된다. 방사광가속기의 입자 집중도는 타 광원과 비교가 안될 정도로 작기 때문이다. 즉 high brightness 역시 가속기광원의 특징이다.

X-선 영역에서 산란, 회절실험과 홀로그래피 등 간섭효과를 이용하는 모든 실험에서는 부분적 결맞음(partial coherence)을 갖는 빛을 필요로 하는데, 가속기광원은

$$d \cdot \theta = \lambda/2\pi \tag{7}$$

를 만족하는 즉 공간 결맞음(spatial coherence) 특성을 가지고 있다. 여기서 d는 광원의 크기,  $\theta$ 는 퍼짐각 이고  $\lambda$ 는 빛의 파장이다.

또한, 방사광은 그 빛을 내는 전자들이 다발로 뭉쳐 다니기 때문에 기본적으로 펄스의 특성을 가지고 있다. 펄스의 시간간격은 저장링에 하나 또는 몇 개의 전자 다발들을 선택적으로 주입함으로써 변화시킬 수 있다. 빛의 펄스적 특성과 고밀도 선속 그리고 시

3) 백색광을 인가하여 단일 파장의 빛만 추출하는 장치. 나머지 스펙트럼의 광자들은 광자흡수체(photon absorber)를 통하여 열 형태로 외부에 배출함.

간 간격을 조절할 수 있는 능력으로 인해 시간 분해된 연구를 수행할 수가 있는데, 예를 들자면 화학반응의 동역학이나 원자나 분자들의 여기상태들의 수명에 대한 연구 등이 있다.

방사광은 또한 자연적인 편광의 유용한 특성을 가지고 있다. 언들레이터는 직선적으로 편광된 방사광을 만들어 내는데, 일반적인 빛의 전기장 성분이 빛이 나아가는 방향에 대하여 모든 방향으로 진동하는 것과 달리 이 빛은 그 방향에 수직인 평면에서 한 방향으로만 진동한다. 직선 편광된 빛은 과학적 연구에서 많은 용도로 사용되는데, 일례로 표면에 흡수된 분자들의 방위를 결정하는데 이용하기도 한다. 또한 횡전자석이나 타원형 언들레이터로부터 원형으로 편광된 빛을 만들어 낼 수 있는데, 이 빛은 오른쪽 나사 방향성이나 혹은 왼쪽 나사방향성을 갖도록 할 수 있어 이색성(결정체가 보는 각도에 따라, 또는 액체가 농도에 따라 색이 다르게 보이는 성질)을 가진 물질들을 연구하는데 이상적인 수단이 된다.

위에서 언급한 방사광의 특징인 파장의 가변성(백색광에서 필요한 단색광선택 가능), 고휘도, 펄스적 성질 그리고 편광성을 적절히 이용하여 응용한다. 방사광을 이용한 응용분야는 방사광을 직접 이용하여 신물질을 합성한다든지 새로운 생산을 하는 것이 아니라 여러 분야에서 특유의 방법이나 기법/기술 등을 이용하여 획득된 결과물을 방사광을 조사하여 들여다보고 시각화나 데이터화 등의 방법으로 분석하여 결과물이 의도하는 대로 만들어졌는지 또는 결함이 있는지를 밝혀내어 결과물 개발에 feedback 할 수 있게 하는 분야이다<sup>4)</sup>.

오늘날 과학기술 분야의 필수 부품인 반도체는 기존의 제조기법으로 생산, 이용되고 있지만 재료의 특성적 성능 한계로 전혀 다른 신소재를 이용한 반도체나 초전도체의 개발 등이 진행되고 있는데, 원하는 특성을 가지는 신소재 및 새로운 반도체 전자제품을 만들기 위한 연구개발을 추진하기 위해서는 관련된 물질의 원자배열, 화학결합상태 등의 미세 구조를 정확히 알고 이것과 그 물질의

특성과의 관계를 파악, 이해하는 것이 필요하다. 우리가 원하는 특성의 신소재가 어떠한 원자배열 혹은 어떠한 미세구조를 가져야 한다는 것을 근본적으로 파악할 수가 있고 이러한 미세구조를 가지는 물질을 체계적으로 개발해 낼 수 있기 때문이다. 이러한 분야에 방사광을 이용하여 위에서 기술한 사항들을 분석하여 제조공정의 적절성을 확보할 수 있다.

흑연을 1500°C에서 약 6000 기압으로 압축하면 다이아몬드로 변환되는데 이 과정은 매우 흥미롭기도 하고 진행과정을 알 수 있으면 더 개선된 공정으로 품질이 우수한 다이아몬드를 합성할 수 있다. 이러한 실험은 밀폐된 매우 작은 용기 속에서 고온 고압을 유지하는 것이 필수적이므로 실험하는 도중에 시료의 구조를 파악한다는 것은 종전에는 거의 불가능했으나 방사광을 사용한 X선 회절 시험은 고압에서의 시료의 구조를 측정 가능하게 해주기 때문에 다이아몬드 생성공정 중의 시료구조의 변화를 파악할 수 있게 되었다. 이와 같은 고압하에서의 물질구조에 관한 연구는 다이아몬드 형성 과정에 대한 이해뿐만 아니라 다른 신소재의 형성이라든지 지구 맨틀의 광물 형성 과정 등을 이해하는데도 큰 도움이 되는 것이다.

생물체의 소위 거대분자(macromolecule)는 지구상의 생태계에는 그 기능별로 구분해서 약 10만 가지의 단백질 종류가 있다. 이중에는 우리가 이용할 수 있는 우수한 기능을 갖고 있는 것들이 많이 있는데, 이러한 단백질 분자의 배열 등과 같은 미세구조를 규명하고 그 기능과의 상관관계 규명에 방사광이 이용되고 있다. 이와 더불어 세포핵 내의 중요 부분인 세포분열 증식, 유전을 조정하는 핵산(RNA, DNA)의 구조라든지 바이러스의 구조 등도 방사광을 이용한 연구에 의해서 정확하게 밝혀지기 시작하였다. 또한 효소는 생물체내에 필요한 물질을 만드는 것을 돕는 단백질의 일종인데, 이 효소의 원자나 분자구조, 촉매작용을 하는 부분, 즉 활성중심의 역할 등 매우 중요한 사실들을 방사광 분석을 통하여 규명되고 있다. 효소의 구조결정 및 활성중심의 역할을 규명하게 되면 생물학의 발전은 물론, 뛰어난 효력의 신약품, 세제, 식품 등과 같은 여러 제품의 개발에 공헌하게 될 것이다.

4) MEMS나 Lithography 와 같이 방사광을 직접 이용하여 생산 개발에 쓰이는 분야도 있음.

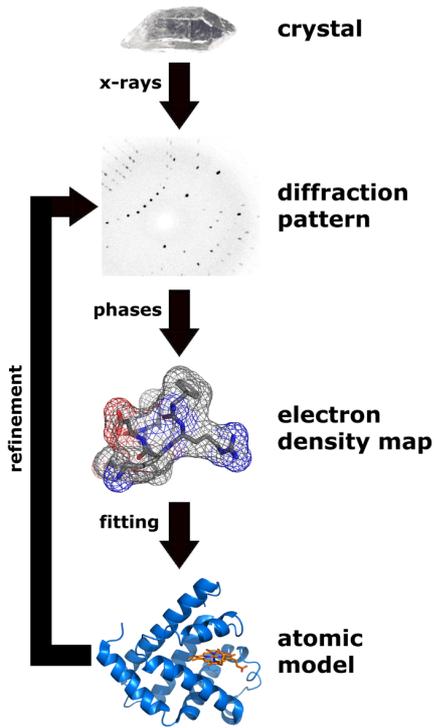


그림 6 방사광 X선결정학에 의한 단백질 구조의 형상화. (사진: Wikipedia, xrd-analizi)

방사광을 이용한 X선 리소그래피 (lithography) 기법으로 초고집적회로나 미세 구조물을 생산하는데도 이용되는데 이는 아직도 종전의 기술 유사한 방식으로 3차원 적층구조 등으로 집적도의 비약을 대응하고 있으나 이러한 기술이 한계에 이르러 대안으로 방사광 X선 리소그래피가 주목을 받고 있다. 초고집적 회로보다는 스케일이 큰 편이지만 경X선의 투과력을 이용해서 좀 더 입체적인 정밀 미세 구조물을 만들 수 있다. 100미크론 정도(머리카락 굵기정도)의 정밀기계, 예를 들면, 응력(stress), 진동, 빛 등의 감지장치(sensor)라든지 구동장치(actuator), 전자회로, 미세 로봇, 합성섬유의 실을 뽑는 다양한 단면적을 가지는 방직 노즐, 광학 미세부품, 미세필터, 동위원소 분리장치 등 소위 미소기계(micro electro mechanical system, MEMS)를 방사광을 이용해서 대량 생산할 수 있는 연구를 진행하고 있다. 방사광을 이용한 경X선 엔지오그피 (angiography)라는 진단법을 이용하여 관상동맥의 촬영하면 환자에게 큰 위협과 고통을 줄여주면서 더 선명한 결과물을 얻을 수 있다.

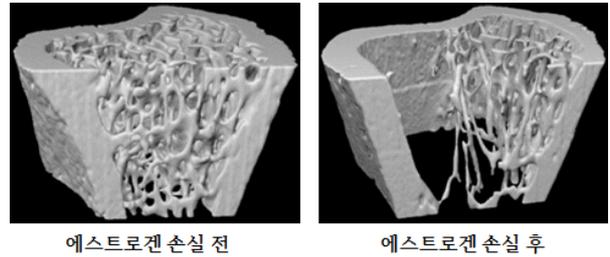


그림 7. 방사광을 이용한 골다공증 뼈의 형상화. (사진: SSRL)

방사광을 이용하면 적은 X선량과 단시간의 노출로 선명한 투과사진을 얻을 수 있는데 인체에 거의 해가 되지 않는 양의 옥소 (iodine)를 혈관에 주사하여 X선 투과 영상을 얻음으로써 심장의 여러 혈관 하나하나를 선명하게 볼 수 있는 것으로 심장병 수술 전후의 뛰어난 진단 방법으로 부각되었다. 이 방법은 의학계에서 임상응용에 큰 기대를 걸고 있다.

위와에 열거한 것들은 대표적인 몇 가지의 응용 예를 기술한 것으로 신소재, 화학, 환경, 의료생명과학, 반도체, MEMS, 고공학 등에 활발하게 이용되고 있으며 이용기법 또한 자체의 연구 분야가 되어 향후 인류의 과학기술에 엄청난 기여를 할 것으로 기대된다. 예를 들어 본 기고에서 지면문제로 언급하지 않은 4세대 방사광을 이용하는 연구가 아직도 초기 단계에 있지만 향후 몇 년 내에 신약이나 생명과학분야에 획기적인 결과물이 개발될 것으로 기대를 모으고 있다.

#### 4. 세계의 방사광가속기 현황

제 3장에서 기술한 것처럼 방사광가속기로부터 생산되는 방사광의 이용은 거의 무궁무진하다고 할 정도로 각종 과학기술분야에 다양하게 이용할 수 있어서 후방의 연관분야의 발전에 엄청난 기여를 할 수 있다<sup>5)</sup>. 이와 같은 배경 하에서 각국에서 1990년대부터 앞 다투어 개발 건설을 추진하였고 아직도 여전히 진행형이다. 현재의 대표적인 3세대 가속기를 표1에 열거하였는데, 비교적 성능이 우수한 것을 목록화하였다.

5) 방사광 이용 상세정보 정보 “lightsource.org” (<http://www.lightsources.org/>)

표 2. 대표적인 3세대 방사광가속기 현황.

가속기명	에너지 (GeV)	빔전류 (mA)	원주길이 (m)	국가
Spring-8	8	100	1436	일본
ESRF(European Synchrotron Radiation Facility)	6	200	844	프랑스
APS(Advance Photon Source)	7	100	1104	미국
PETRA	6	100	2340	독일
NLS-II(National Synchrotron Light Source II)	3	500	792	미국
TPS(Taiwan Photon Source)	3	240	518	대만
ALBA	3	400	268	스페인
DIAMOND	3	300	565	영국
PLS-II(Pohang Light Source - II)	3	400	281	한국
SOLEIL	2.75	500	354	프랑스
SSRF(Shanghai Synchrotron Radiation Facility)	3.5	300	432	중국
SLS(Swiss Light Source)	2.7	400	288	스위스
CLS(Cadian Light Source)	2.9	500	171	캐나다
BESSY-II	1.7	200	240	독일
Australian Synchrotron	3	200	216	호주
ALS(Advanced Light Source)	1.9	400	197	미국
MAX IV Laboratory	3	500	528	스웨덴
TLS(Taiwan Light Source)	1.5	300	120	타이완
SPEAR-3(SSRL, Stanford University)	2.5	500	234	미국
ELETTRA	2.4	300	259	이탈리아

표 3. 대표적인 4세대 방사광가속기 현황.(3 대 가동, 1대 시운전, 1대 건설)

가속기명	에너지 (GeV)	빔펄스폭 (A)	가속기길이 (m)	국가
LCLS(Linac Coherent Light Source)	9.5	1.3	2000	미국
SACLA(SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)	8.5	0.6	700	일본
PAL-XFEL	10	1	1100	한국
European X-FEL(시운전 중)	20	1	3400	독일
Swiss FEL(건설중)	5.8	1	720	스위스

이 목록에 포함된 것 외에도 약 30여기가 세계 곳곳에 분포되어 있다. 표1을 자세히 보면 비교적 선진국가들에서 운용됨을 알 수 있는데, 방사광가속기를 건설하고 운용 및 이용하는데 적정규모 이상의 R&D 능력이 필요함을 의미한다고 할 수 있다. 한편 표2는 현재 가동 중이거나 운전하고 있는 4세대 방사광가속기들의 목록이다.

4세대 방사광가속기는 현재 (2017. 1월) 미국의 LCLS와 일본의 SACLA가 유저빔을 제공하고 있으며 포항의 PAL-XFEL은 2016년 시운전을 거쳐서 2017년 3월부터

유저빔을 제공할 예정이다. 최고 성능의 독일의 European X-FEL과 Swiss FEL은 2017년에 시운전을 계획하고 있다. 이들이 모두 가동되면 4세대 방사광을 이용하여 특히 생명과학과 신약개발 분야에 치열한 경쟁과 과학적 성과가 얻어질 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1]R.P. Walker, SYNCHROTRON RADIATION, CERN

ACCELERATOR SCHOOL (CAS),  
22-27 April 1966

[2] A. Liénard, L'Éclairage Électrique  
16 (1898) 5

[3] Storage Rings as Synchrotron  
Radiation Sources,  
[http://photon-science.desy.de/research/studentsteaching/primers/storage\\_rings\\_beamlines/index\\_eng.html](http://photon-science.desy.de/research/studentsteaching/primers/storage_rings_beamlines/index_eng.html)

[4] 가속기의 원리.

<http://pal.postech.ac.kr/Menu.pal?method=menuView&pageMode=pal&top=1&sub=3&sub2=1&sub3=2>

[5] wikipedia, Particle accelerator,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Particle\\_accelerator](https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_accelerator)

[6] 빛의 이용,

<http://pal.postech.ac.kr/Menu.pal?method=menuView&pageMode=pal&top=1&sub=3&sub2=1&sub3=2>

## 저자이력

손영욱(孫永旭)

1981-1988년 경북대학교 기계공학과, 1988-1990년 한국과학기술원 원자력공학과, 1996-2002년 포항공대 기계과, 1990-1991년, 한국전력고리원자력본부 근무, 1991-현재 포항가속기연구소 책임연구원

