

X-선 자유전자 레이저를 위한 새로운 과학

구태영*

포항가속기연구소, 경북 포항시 남구 효자동 산31번지, 790-784

(2011년 11월 28일 받음, 2011년 12월 21일 최종수정본 받음, 2011년 12월 21일 게재확정)

X-선 자유전자레이저(XFEL)는 펨토초의 펄스형태, 완벽한 결맞음 및 고휘도 특성으로 X-선 실험과학분야의 새로운 시대를 예고하는 꿈의 X-선 광원장치로 언급되고있다. XFEL에 관한 간략한 소개와 현재 세계적으로 진행되고 있는 XFEL 시설현황을 살펴보고, 대표적인 실험장치를 개념적으로 분류해서 정리해 보고자 한다. 특히 자성연구분야와 관련된 제안 및 연구사례를 간략하게 언급하고, 지금 현재 진행 중인 포항가속기연구소의 XFEL 프로젝트의 개요와 XFEL 활용을 위해서 제안된 대표적인 과학프로그램을 살펴보고자 한다.

주제어 : X-선 자유전자 레이저, 펨토초 펄스, 결맞음 특성, 고휘도, 초고속 자성동역학

I. 서 론

제4세대 방사광원으로도 언급되는 X-선 자유전자레이저(X-ray Free Electron Laser, XFEL)는 X-선영역의 결맞은 광원을 발생시킬 수 있는 일종의 특수한 진공관 장치(Vacuum-Tube Device)라 할 수 있다[1]. 따라서 우리가 흔히 알고 있는 원자의 양자역학적 에너지 준위를 활용하는 일반적인 LASER와는 전혀 다른 광원발생 원리를 가지고 있다고 하겠다. 이론적인 설명은 이미 1970년대 초에 제시[2]되어져서 가속장치의 눈부신 발전에 힘입어 작동 파장을 계속해서 줄여 오다가, 극히 최근(2009년 4월, 미국 LCLS)에서야 경 X-선 영역($\lambda=0.15$ nm)에 이르기까지 자발 증폭이 가능하다는 것을 확인하였다[3]. 기본적인 원리를 간단하게 정리해 보면, 상대적으로 속도로 가속된 전자빔을 언듈레이터(연구자석을 일정한 간격으로 방향을 주어 배열해서 주기적인 자기장을 발생시키는 장치)에 통과시킨다. 언듈레이터 내에서 가속운동을 겪게 되는 전자빔은 싱크로트론 복사를 방출하고, 100 m에 달하는 긴 언듈레이터를 지나는 동안 단일 뭉치내의 전자빔은 스스로가 방출한 싱크로트론 복사로부터 위상에 따라서 운동에너지를 얻기도 혹은 잃어버리기도 해서 원래는 균일했던 전자빔에 소위 말하는 마이크로 번칭(Microbunching)이 생기게 된다. 이렇게 구조화된 전자빔에서 발생된 자발복사가 특정조건을 만족해서 언듈레이터를 지나는 거리에 따라서 지수함수적으로 증폭되는 과정을 거치게 되면 XFEL이 만들어진 것이다. 이렇게 발생된 X-선 자유전자레이저는 광원특성에서 볼 때 기존의 저장링 형태의 제3세대 방사광원과 비교해서 다음의 세 가지 측면에서 확연히 구분되어진다.

첫째는 XFEL은 선형가속기에 근거한 펨토초 영역(< 100 fs)의 펄스형 X-선 광원이다. 펨토초 영역의 짧은 펄스를 활용하면 제3세대 방사광원에서는 다양한 문제점으로 인해 제한적으로 진행되어왔던 나노초 혹은 피코초 영역의 X-선을 활용한 동역학 연구를 펨토초 시간영역대로까지 확장해서 자연계의 다양한 분자 혹은 응집물질의 극초단 현상을 살펴볼 수 있게 된다. 특히 최근에는 아토초 영역의 광원 발생을 위한 연구도 함께 진행되고 있어, 원자물리학과 같이 펨토초 이하의 극초단 펄스가 요구되는 연구분야에로의 활용도 한층 폭 넓어질 것으로 예상된다.

두 번째는 대략 100 마이크로미터보다 작은 XFEL 광원 크기 전 영역에서 완벽한 결맞음성을 가지게 된다. 이는 현재 개발되어있는 X-선 나노집속기술과 접목했을 경우, 나노스케일의 X-선 회절 이미징 연구분야의 획기적인 발전을 가져올 것으로 기대한다. 또한 결맞음 특성을 활용하는 X-선 광자상관 분광학과 같은 동역학 연구분야에도 활용될 수 있어 많은 새로운 응용분야가 탄생할 것으로 본다.

마지막으로 단일 펄스에 들어가는 광자수가 제3세대 방사광원에서 1초 동안 누적했을 경우에 관측되는 정도로 최대 10^{12} 광자/펄스가 되어 단일 펄스로도 일반적인 X-선 실험이 가능하게 된다. X-선 집속기술을 통해서 더욱 높은 광밀도를 만들 수 있게 되면 X-선 영역에서의 물질의 비선형적 반응에 관한 연구도 가능하게 한다. 이는 X-선과 물질의 상호작용에 관한 근본적 이해를 한층 심화시키는 계기가 될 것이다.

앞에서 언급한 XFEL의 세가지 대표적인 특성, 즉 펨토초 펄스, 완벽한 결맞음 특성, 그리고 초고휘도를 활용해서 나노스케일 영역을 펨토초 시분해능으로 실험과학의 풀리지 않은 다양한 문제들을 살펴보고자 하는 것이 XFEL 프로젝트의 주요 목표라 할 것이다.

*Tel: (054) 279-1566, E-mail: ktypmk@postech.ac.kr

II. 현재 진행 중인 대표적인 XFEL 시설

현재의 가속기 기술로 경 X-선 영역까지 SASE(Self-Amplified Spontaneous Emission) FEL 발생이 가능하다는 것이 이미 알려져 있기 때문에, 세계의 많은 가속기 연구소들은 엄청난 과학기술적인 가능성을 간파하고 앞 다투어 제 4세대 방사광 가속기건설을 추진하고 있다[4]. 가장 앞선 위치에 있는, 현재 운영 중이거나 혹은 건설이 진행 중에 있는, 대표적인 몇 가지 XFEL 시설을 선택해서 살펴보고자 한다.

LCLS(LINAC Coherent Light Source)[5]는 한 시대를 풍미했던 미국 SLAC의 고에너지물리학 연구용 가속기의 마지막 1/3에 해당되는 부분을 개조해서 최초로 XFEL 광원발생을 확인하였다. 아마도 “최초”라는 것이 이 시설의 주요 의미가 되지 않을까 생각한다. LCLS는 2009년 10월부터 이용자를 받아서 지금까지는 주로 앞부분에 설치된 두개의 연 X-선 실험장치(AMO: Atomic, Molecular & Optical Science, SXR: Soft X-ray Materials Science Instrumentation)로 연구를 진행해서 새로운 광원을 위해 초기에 제안된 다양한 가능성을 실제로 구현할 수 있음을 보여주었다[6]. 또한 펩토초 단백질 나노결정학을 Photosystem I에 적용해서 관련연구 최초의 XFEL 결과를 발표하기도 하였다[7]. 앞으로 경 X-선 전용 실험장치(X-ray Pump Probe, X-ray Correlation Spectroscopy, Coherent X-ray Imaging, Matter in Extreme Conditions)들이 본격적으로 가동되면 다양한 분야의 흥미로운 또 다른 최초의 실험결과들이 계속 발표될 것으로 기대하고 있다. XFEL시설의 과학연구를 위한 미래가능성에 관한 긍정적인 평가의 단적인 예로서 LCLS가 이미 LCLS-III[8]라는 성능향상 프로그램을 2017년 완공을 목표로 진행 중에 있다는 사실을 들 수 있다. 이를 통해서 이용자들이 동시에 다양한 실험을 할 수 있게끔 만들고, X-선 광원의 편광제어도 가능하게 해서 실험의 폭을 넓히고, 또한 제공되는 X-선의

과장영역대도 확장해 나갈 계획이라고 한다. LCLS가 개념의 구현가능성을 타진하는 최초의 도전적 시도였다면, LCLS-II는 새로운 첨단시설의 활용성 극대화의 본격적인 단계라 할 수 있을 것이다.

EXFEL(European XFEL)[9]은 독일 DESY에 건설되고 있는 시설로 2014년 완공을 계획하고 있다. 이를 위한 가속기기술은 TELSA(TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator) 프로젝트의 일부로 고에너지 전자-양전자 충돌용 가속기를 위한 초전도 선형가속장치 기술에 근거하고 있다[10]. 진행과정에서 전자가속장치가 XFEL광원에 적합함이 밝혀져 별도의 독립적인 제4세대 방사광원 장치개발로 진행되게 된 것이다. 따라서 어떤 의미에서 보면 이들이 사용하고 있는 비교적 높은 전자에너지는 충분히 이해가 되는 부분이기도 하다. 이용자의 관점에서 보면 EXFEL은 새로운 XFEL 광원을 이용해서 해결할 수 있을 것으로 생각되는 다양한 과학실험을 구현하기 위한 각기 다른 특성을 가진 5개의 언듀레이터로 이루어진 빔라인과 이에 딸린 10개 정도의 실험장치를 구축해서 매우 체계적이고 폭넓게 XFEL 관련연구를 시도하고 있다고 하겠다. 특히 초전도 가속장치의 이점에서 오는 멀티번칭(Multibunching) 운영모드는 광프릭스가 이슈가 되는 특정실험의 효율성을 극대화시켜 다른 시설과는 확연히 구분되는 경쟁력을 가질 것으로 기대한다.

SCSS(SPring-8 Compact SASE Source)[11]는 일본의 SPring-8에 건설되고 있는 시설로 진공밀폐형 언듀레이터 기술을 앞세워 그야말로 “컴팩트”한 비교적 낮은 에너지의 전자 가속기구현이 그 특징이라 할 수 있다. 최근에는 명칭을 SACLA(SPring-8 Angstrom Compact free-electron LAsEr)로 바꾸어 부르고 있는데, 5개의 언듀레이터가 설치될 공간을 마련하고, 실험지역에서는 펌프-프로버, 이미징, 그리고 연구용 실험장치를 설치하는 것으로 계획되어있다[12]. 지난 3월 말에 설계치까지 전자빔의 에너지를 가속시켜 가속기 장

Table I. World's leading XFEL projects

Projects	Operation startsin	Electron beam energy (Gev)	Minimum photon wavelength (nm)	Peak brilliance (10 ³³ ph/sec/mm ² /mrad ² /0.1 %B)	Repetition rate (pulses/sec)	Number of bunches per pulse
LCLS 2002.04 CDR	2009	13.6	0.15	1	120	1
SCSS 2005.05 CDR 2010.02 TDR	2010	8	0.10	0.5	60	1
EXFEL 2007.07 TDR PAL XFEL	2014	17.5	0.10	5	10	3250
2009.01 CDR 2010.10 TDR	2014	10	0.06	0.1	120	1
Swiss XFEL 2010.07 CDR	2016	5.8	0.10	0.1-1	100	2

치작동을 확인하였고, 6월 초에는 10 keV에서 X-선 레이저 발생에 성공해서 미국 LCLS에 이어 세계에서 두 번째로 경 X-선 자유전자레이저를 가지게 되었다[13]. 2012년 3월부터 이용자 실험지원을 시작하는 것으로 계획되어있다.

Table I에 현재 진행 중에 있는 대표적인 경 X-선 영역의 XFEL 장치들을 다양한 특성비교와 함께 정리하였다. 한편 연 X-선 FEL 장치는 이미 독일 DESY의 FLASH(TESLA Testing Facility Phase II)[14]에서 2002년부터 최단 파장 4.45 nm까지 지원을 해 오고 있고, 새로운 Seeding 기법을 도입하고 연두레이터 및 실험지역도 추가한 FLASH-II 프로젝트도 현재 진행 중에 있는 상황이다. 자유전자레이저 개발이 동작과 장을 계속 줄이는 방향으로 발전해온 점을 생각해 보면 연 X-선 FEL에서 얻은 과학기술적인 성과가 바로 경 X-선 FEL 개발의 밑거름이 되었다고 할 수 있을 것이다.

III. XFEL을 위한 새로운 과학

XFEL 광특성을 활용해서 해결할 수 있을 것으로 생각되는 과학기술분야의 다양한 주요 쟁점들이 제안되고 논의되어왔다. 물리, 화학, 생물, 지구과학, 재료, 의학, 환경등과 같은 다양한 개별 학문분야 뿐만 아니라, 상호 연관된 융합학문분야도 언급되고 있고, 또한 나노기술과 같은 다양한 기술분야의 연구도 함께 가능성과 파급효과에 관해 심도있게 논의되고 있다. 이 모든 것들은 앞에서 언급한 XFEL의 세 가지 주요 특성(펄스초 펄스, 결맞음성, 고휘도)에 의해 가능해진 X-선과 물질과의 상호작용의 확장된 연구영역에 기인하고 있다. 구체적인 연구사례를 위에서 언급한 각 분야별로 살펴보는 것은 지나치게 특정 전문분야의 연구에 국한될 수도 있고, 또한 종류도 매우 다양해서 이 좁은 지면에서 다루기에는 적합하지 않을 것이라 생각한다. 무엇보다도 전체적인 맥락을 이해하려고 한다든지 혹은 구체적인 실험을 구현하기 위한 비슷한 실험군으로 분류하는 과정에서 특히 효율적이지 않을 것으로 판단된다. 따라서 여기에서 선택한 접근법은 XFEL 광특성을 적극적으로 활용할 수 있게끔 구성된 “대표적인 개념적 실험장치”를 통해서 다양하고 광범위한 연구분야를 크게 분류해서 살펴보고자 한다.

첫 번째 특성인 펄스초 영역의 X-선 펄스특성은 지금까지 주로 일반 광학레이저를 통해서 연구해 왔던 동역학적인 문제를 X-선 영역으로까지 확장시키는 계기가 된다. 먼저 광학레이저를 이용해서 물질에 섭동을 가한 다음, 시간에 따른 물질의 상태변화를 XFEL을 통해서 살펴보는 방식의 펌프-프로브(X-ray Pump-Probe) 실험장치가 대표적인 실험기법이 될 것이다. 사용하는 파장이나 분석장치에 따라서 원자수준의 구조와 전자구조의 변화를 시간의 함수로 펄스초의 분해능을 가

지고 분석할 수 있게 된다.

두 번째 주요 특성인 X-선 결맞음 특성을 이용하는 대표적인 연구가 결맞은 X-선 이미징(Coherent X-ray Imaging) 실험기법이다. XFEL의 완벽한 결맞음 특성으로 인해 X-선 회절과 X-선 이미징 사이에 놓여있던 벽을 허물어 버리는 계기가 되었다. 특히 결맞은 X-선 나노빔 집속장치를 활용하는 이미징 기법은 다양한 나노 결정의 구조분석과 나노 단입자 이미징, 그리고 나아가서 생명물질을 이루는 단일 단백질 구조분석에 이르기까지 매우 기대되는 대표적인 XFEL 실험기법으로 알려져 있다. X-선에 의한 시료의 손상이 주요 문제로 언급되고 있지만, 적합한 펄스초 펄스폭 제어와 X-선 에너지 선택과 같은 여러 가지 방법을 통해 해결하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. X-선 결맞음 특성을 활용하는 또 다른 대표적인 실험방법으로 시료에 의해 형성되는 간섭 스펙클(speckle)을 넓은 범위의 운동량 전이 공간영역에서 관측하고, 시간에 따른 상관함수측정을 통해 광범위한 시간영역대의 동역학적인 정보를 분석해내는 X-선 광자상관분광학(X-ray Photon Correlation Spectroscopy)을 들 수 있다. 이는 시간에 따른 요동 및 이완정보를 통해서 복잡계 응집물질의 평형 및 비평형 동역학 연구의 새로운 실험기법으로서 기존의 비탄성 X-선 및 중성자 산란실험기법을 통한 에너지 축에서의 동역학연구에 상호보완적으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

세 번째 특성인 X-선의 높은 휘도는 앞에서 언급한 두 가지 주요 특성에 근거한 실험을 가능하게끔 높은 광자수를 제공하고 있다. 특히 나노 X-선 집속장치로 집속했을 경우에는 대부분의 응집물질들이 플라즈마 상태로 되어버리게 된다. 이는 펄스초의 시분해 특성과 결합해서 아주 짧은 시간대에서 준안정상상태로만 존재할 수 있는 다양한 새로운 물질 상태를 발견하고 연구하는 분야, 혹은 비선형적인 X-선과 물질의 상호작용을 연구하는 분야를 위한 강력한 도구로 활용될 수 있다. 그리고 다양한 방식으로 만들어진 순간적인 극한조건의 상태연구에도 적용되어 물질상 연구의 새로운 지평을 열 수 있을 것으로 본다. 다른 외국의 XFEL 연구과제와 비교해 볼 때 국내 관련분야 연구자들의 적극적인 참여가 절실히 요구되는 분야이기도 하다.

외국의 XFEL 시설에서 추진하려는 과학 연구 프로그램을 한 눈에 알아볼 수 있는 가장 쉬운 방법은 건설된 혹은 건설하려고 하는 구체적 실험장치를 전체적으로 살펴보는 것이다. 참고로 Table II에 앞에서 언급한 대표적인 XFEL 시설에서 진행되고 있는 실험장치의 종류를 나타내었다.

다음으로 자성관련 연구의 구체적인 예에 초점을 맞추어서, XFEL 활용을 위해 제안된 관련연구를 크게 두 분야로 구분해서 간략하게 살펴보고자 한다. 자성은 짝을 이루지 않은 전

Table II. Experimental Instrumentations in the worldwide XFEL Facilities

	Instrumentations
LCLS	1. AMO (Atomic, Molecular & Optical Science) 2. SXR (Soft X-ray Materials Science) 3. XPP (X-ray Pump Probe) 4. CXI (Coherent X-ray Imaging) 5. XCS (X-ray Correlation Spectroscopy) 6. MEC (Matter in Extreme Conditions)
EXFEL	1. SPB (Single Particles, Clusters, and Biomolecules) 2. MID (Materials Imaging and Dynamics) 3. FDE (Femtosecond Diffraction Experiments) 4. HED (High-Energy Density Matter Experiments) 5. SQS (Small Quantum Systems) 6. SCS (Soft X-ray Coherent Scattering)
SCSS	1. R&D 2. Pump & Probe 3. Imaging

자에 기인하는 특성이긴 하지만 현대 응집물질연구에서 언급되고 있는 대부분의 복잡계 물질의 이해를 위한 근간이 되는 매우 중요한 분야이기도 하다.

첫 번째로 언급되고 있는 분야가 나노스케일에서 일어나는 극초단 자기동역학 연구이다. 자성물질은 현대 과학기술응용 분야의 대표적인 예인 정보처리 및 저장분야에서 매우 중요한 역할을 해왔다. 나노스케일 영역의 고집적화 및 피코초이하의 초고속 스위칭에 관한 연구가 현재 활발히 진행되어지고 있는 상황에서 XFEL의 역할은 매우 기대된다. 특히 펨토초 광학레이저에 의해 아주 짧은 시간동안에 발생하는 시료 내 전자가열 효과가 자성배열에 미치는 영향에 관한 연구는 순간적인 자성방향 전환 및 새로운 자성배열로의 전이에 관한 연구[15]로 초점이 맞추어지고 있다. 또한 펨프-프로버 실험기법을 활용한 X-선 자기원형이색분광학(X-ray Magnetic Circular Dichroism: XMCD)을 통해서 스핀과 오비탈의 결합관계가 펨토초의 시분해능을 가지고 어떻게 변화되어지는가에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다[16]. 그리고 XFEL의 결맞음 특성을 적극 활용하고 XMCD에서 나타나는 강한 공명자성산란의 대비를 통해 가능해지는 시분해 자성 이

미징분야도 활발하게 연구가 진행되고 있는 상황이다[17].

두 번째로 강상전자계(Strongly Correlated Electronic System)의 이해를 위해서 XFEL의 활용에 관한 연구도 언급되고 있는데, 복잡하게 얽혀있는 다양한 자유도(전하/오비탈/격자) 사이의 에너지관계를 규명하는 연구에 XFEL을 적용하려는 시도라 할 수 있다. 이는 다양한 형태로 나타나는 전자 상태(금속/비금속, 전하/오비탈 배열, 초전도, 다강체 등)와 이들간의 전이에 관한 동역학을 살피는데 초점을 맞추고 있다. 전하 배열상(Charge Ordered Phase)에 의한 절연체의 전자구조가 외부의 펨토초 광학레이저의 영향 하에서 어떻게 붕괴되는가를 보여주는 시분해 광전자분광학의 예도 제시되어지고 있다[18]. 그리고 전자와 격자간의 결합에 관한 연구를 위한 펨프-프로버의 실험에서도 여러 가지 가능한 조합, 예를 들어 전자 펨프 - 격자 프로버(광학 레이저로 전자를 여기시킨 후에 시분해 X-선 회절을 통해서 격자의 시간에 따른 변화를 추적[19]), 격자 펨프 - 전자 프로버(특정 격자모드를 여기시킨 후에 전자 구조에 기인하는 특성을 추적[20]) 등의 조건에서 진행되는 실험이 제안되고 있다. 이를 이용하면 끊임 없이 변화하는 거대자기효과 물질의 Dynamic Jahn-Teller 및 고온 초전도체의 Dynamic Stripe의 역할을 규명해낼 수 있는 실마리를 찾을 수도 있을 것으로 기대한다. 또한 시간영역에서 접근해서 동역학적 산란함수를 추정해내는 공명 비탄성 X-선 산란법도 X-선 광자상관분광법과 함께 고려되어지고 있다[21].

IV. PAL-XFEL의 개요

PAL-XFEL은 이용자들의 다양한 실험을 통한 과학 기술적인 활용 폭을 더욱 넓히기 위해서 연 X-선과 경 X-선 자유전자 레이저광원 개발을 동시에 추진하고 있다. 설계에 따르면 모든 인두레이터 홀에 삽입장치가 전부 설치되었을 경우, 연 X-선의 경우는 2기까지, 경 X-선의 경우는 최대 3기까지의 인두레이터 설치가 가능하게끔 되어있다(Fig. 1). 기술적으로 최대한 넓은 스펙트럼 영역대(Fig. 2)를 고려해서 설계되지만, 대다수의 이용자 실험의 성격에 맞게 특정 광자 에너

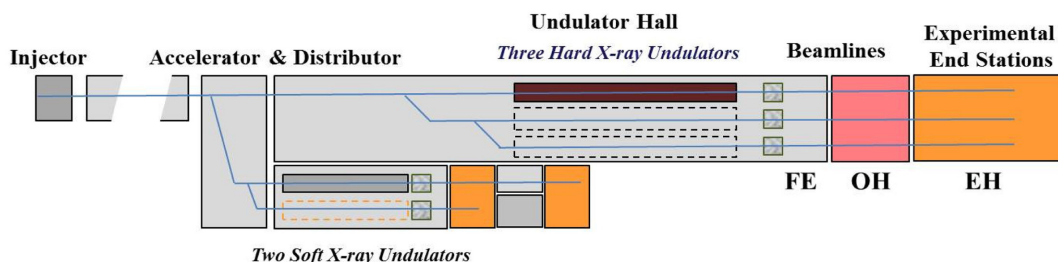


Fig. 1. (Color online) Schematic of the PAL-XFEL facility.

지 영역대에 각각 최적화된 설계값을 초기 운영변수로 삼을 예정이다. 먼저 건설이 진행되는 2011~2014년의 초기 사업기간에는 연 X-선 언듀레이터 1기와 경 X-선 언듀레이터 1기를 건설해서, 각각 관련된 실험지역에 대표적인 실험 장치로서 연 X-선에 1기(Soft X-ray Pump-Probe), 경 X-선에는 2기(Hard X-ray Pump-Probe, Coherent X-ray Imaging)가 설치될 예정이다. 이는 국내 XFEL 과학연구회에서 여러 번의 토의를 거쳐서 결정된 실험장치의 우선순위에 대한 의견수렴의 결과이기도 하다[22]. 구체적인 세부사항 결정과 뒤따르는 기술적인 문제해결은 국내외의 관련 과학자 및 기술자들로 구성된 전문가들과의 지속적인 토의 및 공동연구를 통해서 진행되고 있다. 참고로 국내 XFEL 과학연구회 구성원들의 토의를 거쳐 제안된 대표적인 XFEL 관련 연구분야와

실험장치를 Table III에 정리해서 나타내었다.

V. 결 론

처음으로 General Electric에서 싱크로트론 복사를 관측한 것이 1947년이었고, 그 이후에 세 번의 세대교체를 거치면서 현재 매우 안정되고 완숙한 기술적 단계에 있는 제3세대 방사광원을 우리는 거의 모든 과학기술분야에 적극적으로 활용하고 있다. 다른 한편으로는 1960년대에 Maiman에 의해 최초로 발진에 성공한 광학 레이저의 발명 이후, 역시 이 분야에서도 비약적인 발전을 해서 광 펄스폭으로는 펨토초 혹은 더 나아가서 아토초를, 파워에서도 TW를 넘어 PW를 언급하고 있는 상황이다. 20세기 과학기술 연구분야의 가장 비약적인 발전을 이룩한 이 두 과학연구공동체가 XFEL이라는 하나의 키워드로 묶여서 새로운 융합과학기술 분야를 이룩해 내려는 매우 중요하고도 획기적인 시점에 우리는 놓여있다. 지난 1세기 가량 진행되어온 X-선 과학에 새로운 실험기법을 도입해서 지금까지는 경험해 보지 못했던 새로운 과학탐구의 영역에 발을 들여놓을 수 있는 시기가 되었다. 처음으로 시도해 본다는 점에서 수많은 시행착오가 예상되고, 또한 이를 해결하기 위해서 서로 다른 연구분야의 많은 연구자들의 의견을 수렴해서 진행되는 학문간 공동연구가 절실히 요구되는 시점이기도 하다. 포항가속기연구소의 제4세대 방사광원 XFEL이 국내연구자들과 해외공동연구자들에게 현대과학의 당면과제를 풀 수 있는 최적의 장이 되었으면 하는 바람이다.

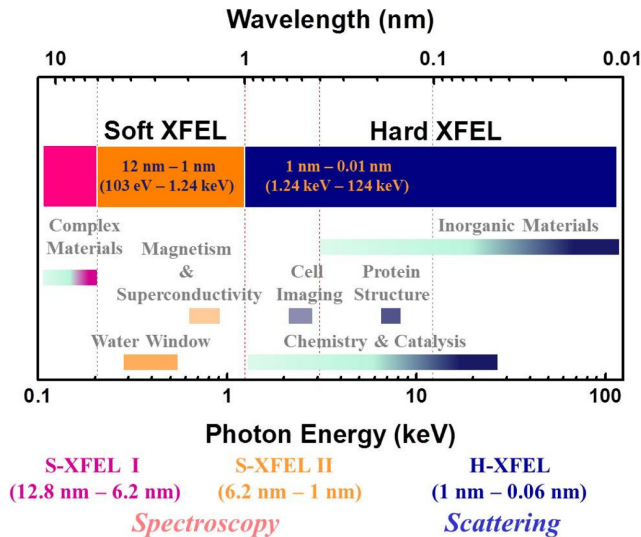


Fig. 2. (Color online) The range of XFEL spectrum and scientific applications.

Table III. Scientific applications and experimental instrumentations proposed by PAL-XFEL science study group

PAL-XFEL	
대표적인 연구분야	<ol style="list-style-type: none"> 1. 원자관련 연구분야 2. 나노 및 분자 거동 연구분야 3. 강상 전자계 및 복잡계 물질 연구분야 4. 나노 및 표면 연구분야 5. 극고속 화학 동역학 연구분야 6. 극미세 화학현상관련 연구분야 7. 극고속 생명현상 연구분야 8. 생체분자 3차원 구조 연구분야
제안된 실험장치	<ol style="list-style-type: none"> 1. Har X-ray Pump-Probe Experiment 2. Soft X-ray Pump-Probe Experiment 3. Hard X-ray Coherent Diffraction Imaging Experiment 4. Hard X-ray Correlation Spectroscopy Experiment 5. Soft X-ray Coherent Imaging Experiment 6. Hard X-ray Absorption Spectroscopy Experiment

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부 4세대 방사광가속기 구축사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller, and M. V. YurKov, The Physics of Free Electron Lasers, Springer, New York (1999).
- [2] J. M. J. Madey, J. Appl. Phys. **42**, 1906 (1971).
- [3] LCLS News, New Era of Research Begins as World's First Hard X-ray Laser Achieves "First Light", <http://home.slac.stanford.edu/pressrelease/2009/20090421.htm>, April 21 (2009).
- [4] B. W. J. McNeil and N. R. Thompson, Nature Photonics **4**, 814 (2010).
- [5] Linac Coherent Light Source (LCLS) Conceptual Design Report (2002).
- [6] L. Young et al., Nature **466**, 56 (2010).
- [7] H. N. Chapman et al., Nature **470**, 73 (2011).
- [8] Linac Coherent Light Source (LCLS) -II Conceptual Design

- Review (2011).
- [9] The European X-Ray Free-Electron Laser (XFEL) Technical Design Report (2007).
- [10] R. Brinkmann, G. Materlik, J. Rossbach, J. R. Schneider, and B.-H. Wiik, Nucl. Instr. and Meth. A **393**, 86 (1997).
- [11] SCSS X-FEL Conceptual Design Report (2005).
- [12] XFEL/SPring-8 Beamline Technical Design Report Ver. 2.0 (2010).
- [13] Current Events, J. Synchrotron Rad. **18**, 686 (2011).
- [14] The TESLA Test Facility FEL Team, SASE FEL at the TESLA Facility, Phase 2, TESLA-FEL (2002).
- [15] I. Radu et al., Nature **472**, 205 (2011).
- [16] C. Boeglin et al., Nature **465**, 458 (2010).
- [17] S. Elsebitt et al., Nature **432**, 885 (2004).
- [18] T. Rohwer et al., Nature **471**, 490 (2011).
- [19] S. L. Johnson et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 155501 (2008).
- [20] M. Rini et al., Nature **449**, 72 (2007).
- [21] T. Sekikawa et al., Nature **432**, 605 (2004).
- [22] 한국 방사광이용자협회 4세대 방사광 Science 연구회, 위탁연구과제보고서, 과학기술 분야에서 4세대 방사광 활용에 대한 조사 보고서 (2011).

New Science Opportunities with X-Ray Free Electron Laser

Tae Yeong Koo*

Pohang Accelerator Laboratory, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea

(Received 28 November 2011, Received in final form 21 December 2011, Accepted 21 December 2011)

X-ray Free Electron Laser (XFEL) has been known to be a dream X-ray source opening an epoch in X-ray science with the characteristics of femtosecond pulse, perfect transverse coherence, and ultra-high brightness. Here we introduce the XFEL source shortly and report the status of the worldwide XFEL facilities, and then the experimental instrumentations for XFEL are reviewed in their conceptual classification scheme. Scientific examples and applications proposed in the research area of magnetism for XFEL are briefly mentioned. Finally are summarized the facility overview and the scientific proposals for PAL-XFEL project.

Keywords : X-ray free electron laser, femtosecond pulsed X-ray source, coherent X-ray source, ultra-brilliant X-ray source, ultrafast magnetization dynamics