

고에너지밀도 물리학과 X-선 자유전자 레이저

조 병 익 (광주과학기술원)

1. 머릿말

활동은하핵(active galactic nuclei, AGN), 별의 탄생지역 등에서 방출되는 강력한 플라즈마 제트, 초신성의 잔해 등에서 관측되는 복잡한 구조는 어떻게 생성되는가? 토성의 열원과 목성의 강력한 자기장의 근원은 무엇인가? 항성 내부의 핵융합 반응을 미래 에너지 개발에 응용할 수 있을까? 고온 - 고압 상태의 화학반응에서 원자의 내각 전자들은 외각 전자나 다른 원자의 전자들과 어떻게 반응할까? 고밀도 상태에서 이온, 전자, 광자의 에너지가 원자간 결합 에너지와 비슷하다면 어떤 현상이 일어날까?

이러한 일련의 질문들은 고에너지밀도(High Energy Density, HED) 상태에 대한 정량적 이해를 필요로 한다. 일반적으로 고에너지밀도는 1 cm³의 부피에 100,000 J 이상의 에너지가 집중되어 있는(> 10¹¹ J/m³) 상태로 정의된다. 이러한 환경에서는 1 Mbar 이상의 압력이 물질에

가해지게 된다. [그림 1]에서 볼 수 있듯이 고에너지밀도 상태는 온도 - 밀도 위상공간의 광범위한 영역을 커버하며, 온도 - 밀도 조건에 따라 warm dense matter (WDM, 1 ~ 100 eV, 1 ~ 10 g/cm³), hot dense matter (HDM, > 100 eV, 1 ~ 10 g/cm³), high density matter (> 100 g/cm³) 등으로 구분된다. 고에너지밀도 상태에서는 고온에 의해 전자들이 이온화되어 플라즈마의 성질을 갖는 동시에 고압에 의해 광자, 전자, 이온이 압축되고 축퇴되어 응집물질의 특성을 나타내는 등, 평범한 물질도 알려진 바와 매우 다른 성질을 띠게 된다. 이런 특수 환경에서 물질의 다중 규모 반응(multi-scale response)에 대한 이해는 고체 - 플라즈마, 액체 - 플라즈마 사이의 상전이, 비선형 X-선 광학, 내각전자의 화학반응 등 물리, 화학의 기초 연구 뿐 아니라, 고에너지 천문학, 지구과학, 핵융합, 초강력 레이저 과학, 고온 - 고압 물성 등 다양한 연구 분야와 밀접한 관련을 가지고 있다.

고에너지밀도 물질에 대한 정량적인 연구는 엄밀하게 통제된 고온 - 고압 상태를 발생시키고 진단할 수 있는 능력을 필요로 한다. 일반적으로 극한의 온도 - 압력 조건은 고출력 -고에너지의 레이저나 입자빔을 샘플에 집중하여 얻을 수 있다. 이 때 발생한 높은 압력은 펨토초에서 나노초 정도의 짧은 시간동안 빠른 속도로 고에너지 밀도 물질을 저밀도 플라즈마로 변화시킨다. 이런 비평형 동적상태에 대한 진단은 많은 경우 단일 상태(single-state)가 아닌 복합 상태(multi-stages)에 대하여 이루어진다. 펨토초 레이저를 활용한 광학진단은 현재 가장 빠른 진단법이나, 고밀도 물질의 표면 및 외각 전자에 대한 제한적인 정보만을 얻을 수 있어, HED 물질의 벌크 특성 및 내각 전자에 대해서는 불완전한 이론과 가정에 의존해 간접적

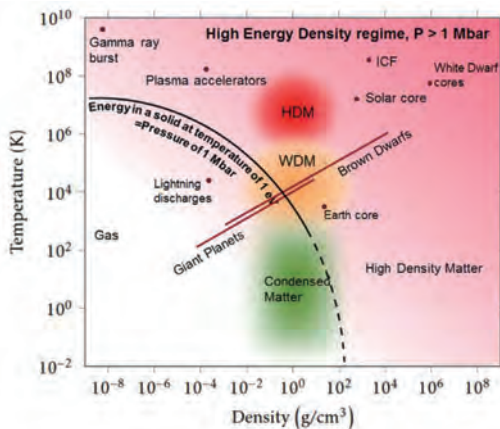


그림 1. P = 1 Mbar 이상의 고에너지밀도 영역을 나타내는 온도 - 밀도 위상공간. 고에너지밀도 상태에 대한 연구는 warm / hot dense matter, 행성내부, 천체물리현상, 상대론적 레이저 플라즈마, 관성 가둠 핵융합 (inertial confinement fusion) 등의 분야들과 밀접한 연관을 가지고 있다. [Bostedt *et al*, Rev. Mod. Phys. 88, 015007 (2016)]

으로 유추할 수밖에 없는 문제점을 가지고 있다. 다양한 온도-밀도 조건에서 균일한 샘플에 대한 실험 데이터의 부족은 HED 상태에서 수소, 탄소, 금과 같은 기본적인 물질조차 그 물성을 정확히 기술하지 못하는 걸림돌로 작용하고 있다.

이런 상황에서 X-선 자유전자 레이저(x-ray free electron laser, XFEL)의 개발은 고에너지밀도 연구에 획기적인 전환점이 되고 있다. 기존의 X-선 광원에 비해 10억 배 이상의 밝기와 펨토초 펄스폭을 갖는 XFEL은 고체 샘플을 수십 ~ 수백만 도의 온도로 가열하여 이전과는 다른 방식으로 HED 물질을 생성할 수 있다. 또한 레이저, 입자빔 등을 이용해 생성시킨 극한 물질에 대해서도 펨토초 X-선 회절, 산란, 이미징, 분광 등의 기법을 이용하여 연구할 수 있는 기회를 제공한다. 이러한 가능성에 주목하여 해외의 주요 XFEL 시설에는 고출력 - 고에너지의 광학레이저와 X-선을 함께 활용하는 HED 연구플랫폼이 구축되고 있으며, 국내에서도 포항가속기연구소의 XFEL과 펨토초 레이저를 활용한 관련연구가 가능할 것으로 예상된다. 본 글에서는 X-선 자유전자 레이저를 활용해 고에너지밀도 물질을 생성하고 진단하기 위해 최근 개발되

고 있는 실험 기법 및 연구 사례를 소개하고자 한다.

2. Warm Dense Matter / Hot Dense Matter의 생성

2.1. XFEL을 이용한 고체샘플의 등적 가열

자유전자 레이저는 펄스당 10^{12} 개 이상의 X-선 광자를 100 펨토초 이내에 발생시키는 고출력 광원으로써, 펄스를 수 마이크로 ~ 수십 나노미터의 크기로 집속하여 $10^{17} \sim 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 에 이르는 빛의 세기를 얻을 수 있다. 비슷한 출력의 광학레이저가 샘플의 표면만을 가열하여 균일하지 않은 온도분포를 생성하는 것에 비해 강력한 FEL을 샘플에 집속하면 X-선의 긴 투과거리로 인해 벌크 샘플을 균일하게 가열할 수 있을 것으로 예측되었다. 또한 100 펨토초 미만의 펄스는 샘플의 온도상승과 팽창에 따른 밀도 변화가 발생하기 전에 가열을 완료함으로써, 잘 정의된 단일 온도 - 단일 밀도의 warm dense matter 및 hot dense matter를 생성할 수 있을 것으로 기대되었다.

이에 미국 스탠포드 가속기 연구소의 Linac Coherent Light Source(LCLS) 개발 직후 금속 박막에 대한 등적가열(isochoric heating) 실험이 진행되었다. [그림 2]에서와

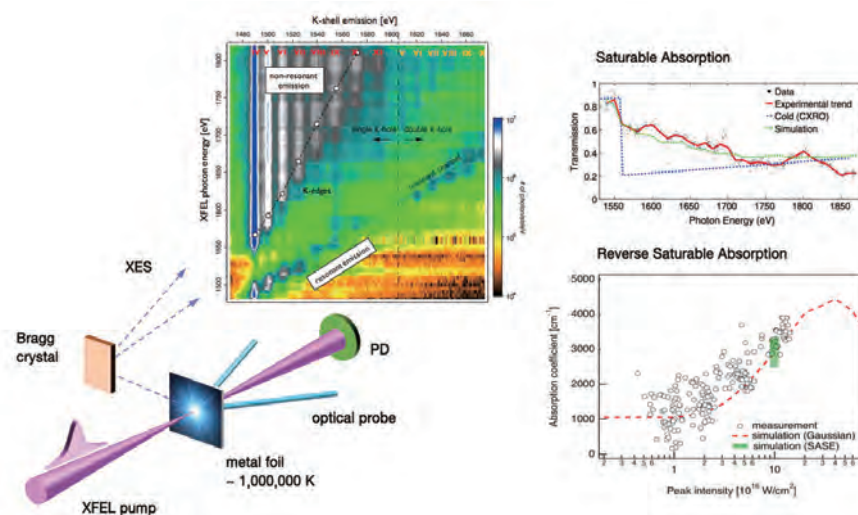


그림 2. (왼쪽) 자유전자 레이저의 집속을 통한 warm (hot) dense matter의 생성 실험의 개요. 샘플의 상태는 X-선 방출 분광, 펨토초 레이저 등을 이용하여 진단된다. (오른쪽) 고에너지밀도의 샘플의 비선형적인 X-선 투과율 측정은 높은 세기의 X-선과 물질의 상호작용에 대한 정보를 제공한다. [Vinko et al. Nature 482, 59 (2012); Cho et al, Phys. Rev. Lett. (2012); Rackstraw, et al. Phys. Rev. Lett, 114, 015003 (2015); Cho, et al, Phys. Rev. Lett, in press (2017)]

같이 K-흡수단 위쪽의 연 X-선 영역에서(1600 - 1800 eV) LCLS 펄스를 알루미늄 박막에 1 ~ 2 μm 의 크기로 집속하여 10^{17} W/cm²의 세기로 1s 전자를 광펄핑하였다. 샘플의 상태는 방출분광(x-ray emission spectroscopy, XES)을 통해 진단되었다. XFEL의 광자 에너지에 따라 변화하는 $K\alpha$ 스펙트럼에 대한 분석은 알루미늄이 초기 밀도(2.7 g/cc)를 유지한 채로 최고 2,000,000 K의 자유전자온도를 갖는 hot dense matter 상태로 등적가열 되었음을 보여주고 있다. [Vinko *et al.* Nature 482, 59 (2012)] 한편 광자 에너지가 K-셸의 결합에너지(1560 eV)보다 낮은 K-흡수단 아래에서도 XFEL의 에너지와 공명하는 $K\alpha$ 선이 관측되었다. 이는 1s 전자에 대한 직접적인 광이온화가 아닌, 여러개의 X-선 광자가 단일 원자에 연속적으로 흡수된 후 1s - 2p 레벨 사이의 공명을 통해 K-홀이 생성되는 새로운 이온화 과정을 보여준 결과이기도 하다. [Cho *et al.*, Phys. Rev. Lett. 109, 245003 (2012)]

X-선 분광 스펙트럼 및 이온화 과정에 대한 모델링 연구는 금속의 등적가열 중 자유전자밀도가 증가하고 디바이 길이(Debye length)가 급격히 짧아져, 격자의 전위분포(potential landscape)를 불안정하게 만들고 원자들의 이온화 에너지의 저하(ionization potential depression)를 유도한다는 점을 밝혀내었다. [Circosta *et al.* Phys. Rev. Lett. 109, 065002 (2012)] 이 결과는 1960년대 이후 널리 받아들여지고 있던 기존의 이온화 에너지 모델 [Ecker and Kröll, Phys. Fluids 6, 62 (1963); Stewart and Pyatt, Astrophys. J. 144, 1203 (1966)]에 대한 재검토 및 관련분야 연구의 부활로 이어지고 있다. [Crowley, High Energy Density Phys. 13, 84 (2014); Son *et al.*, Phys. Rev. X 4, 031004 (2014)] 이와 같은 고에너지밀도 상태에서의 에너지 레벨 및 이온화도의 변화에 대한 일련의 연구들은 극한환경에서 원자간 결합, 열전도도, 불투명도, 상태방정식 등을 결정하는데 중요한 정보로 활용될 수 있을 것이다.

2.2. X-선의 비선형 흡수 / 투과

높은 세기의 FEL 펄스의 투과율 측정을 통해 X-선의 영역에서도 빛의 세기에 따라 흡수율 및 투과율이 비선형적으로 변화하는 현상들도 보고되었다. 알루미늄의 K-흡수단 위쪽에서 10^{17} W/cm² 이상의 세기를 갖는 연 X-선 펄스의 투과율이 증가하는 포화 흡수(Saturable absorption) 현상이 관측되었는데, 이는 X-선에 의한 K-셸의 광이온화율(photo-ionization rate)이 L-셸로부터의 오제 감쇠율(Auger decay rate)를 능가함으로써 가능해진 것이다. [Rackstraw, *et al.* Phys. Rev. Lett. 114, 015003 (2015)] 일본 SACLA에서 경 X-선을 10^{19} W/cm² 이상의 세기로 철에 집속한 실험에서도 K-흡수단 주변에서 비슷한 포화 흡수 현상이 발견되었다. [Yoneda *et al.*, Nat. Comm. 5, 5080 (2014)] 이와는 반대로 알루미늄의 K-흡수단 아래에서 연 X-선의 세기가 증가함에 따라($10^{16} \sim 10^{17}$ W/cm²) 빛의 투과율은 감소하고 흡수도가 증가하는 역 포화 흡수(Reverse saturable absorption) 현상도 보고되었다. [Cho, *et al.*, Phys. Rev. Lett. in press (2017)] 이와 같은 일련의 현상들은 강력한 XFEL로 전자를 펄핑하여 코어 레벨 사이의 전이를 변조할 수 있는 능력과 관련이 있으며, 자유전자의 온도상승을 초래하여 샘플을 고에너지밀도 상태로 유도한다. X-선의 비선형적인 흡수 / 투과 현상들은 향후 FEL 펄스의 변조, 회절된 X-선의 위상 결정, 다광자 X-선 현미경 개발 등, X-선 영역에서의 다양한 포토닉스 연구에 응용될 수 있을 것으로 예상된다.

2.3. 펨토초 레이저를 이용한 광학 진단

FEL을 이용한 WDM 및 HDM 생성과 더불어 광학레이저를 이용한 펌프 - 프로브 연구도 함께 진행되고 있다. 8.9 keV, 60 fs의 경 X-선 펄스로 가열된 은 박막에 대하여, 펨토초 레이저를 이용한 시간 - 공간 분해 간섭계 측정은 박막이 대칭적으로 팽창하는 것을 보여주었으며, 이는 자유전자 레이저에 의해 균일한 조건의 warm dense Ag가 생성되었음을 확인할 수 있는 실험이

었다. [Levy *et al*, Phys. Plasmas 22, 030703 (2015)] 그 밖에도 다양한 종류의 샘플과 XFEL 조건에 대하여 펄초 레이저의 반사율, 투과율의 변화를 통해 광학적 전도도(optical conductivity)의 변화를 측정하고 이를 통해 전자구조의 변화를 비롯한 다양한 물성을 이해하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다.

3. 고에너지밀도 물질의 초고속 X-선 진단

고에너지의 레이저 펄스가 타겟에 입사할 때 발생하는 충격파를 이용하면 샘플을 동적 압축하여 고체의 밀도의 수 배 이상의 밀도를 갖는 고밀도 물질을 생성할 수 있다. 이때 밀도가 증가함에 따라 샘플의 온도도 함께 상승하게 되어 고에너지밀도 조건을 만족하게 된다. 이런 과정에서 발생하는 물질의 구조 변화(structural transition) [Kalantar *et al*, Phys. Rev. Lett. 95, 075502 (2005)], 변형율(strain rate)[Remington *et al*, Mat. Sci. Tech. 22, 474 (2006)] 및 용융(melting)[Ping *et al*, Phys. Rev. Lett. 111, 065501 (2013)]등에 대한 연구를 통해 고압 상전이 현상 및 외부 자극에 대한 반응 동역학에 대한 이해를 높일 수 있다.

3.1. 시분해 X-선 회절 / 산란

물질의 구조 변화는 기본적으로 X-선의 회절 및 산란을 통해 진단될 수 있다. 그러나 동적 압축시 구조 변화가 발생하는 시간이 매우 짧고 특히 비결정 상태로 변화하는 경우 X-선 회절 신호가 약해지는 문제로 인해 HED 환경에서 기존의 X-선 광원을 이용한 회절 / 산란 연구는 매우 제한적으로 이루어질 수밖에 없었다. 그러나 근래 고출력, 고에너지의 레이저와 XFEL을 함께 활용할 수 있는 실험 플랫폼이 개발되면서 문제점들을 극복하기 위한 시도가 이루어지고 있다.

수 ~ 수십 J의 에너지를 갖는 레이저 펄스에 의해 발생하는 충격파에 의해 압축되고 있는 구리에 대한 펄초 초회절 실험은 HED 환경에서 격자의 반응을 시각화할 수 있음을 보여주었다. 구리 격자들은 73 GPa의 압력이 이르기까지 수 나노초에 걸쳐 탄성 반응을 하는 것으로 관측되었으며, 이후 압력이 해소되는 과정에서 플라스틱 변형과정이 따라오는 것이 관찰되었다. [Milathianaki *et al*, 342, 220 (2013)] 한편, 고압에서의 상전이에 대한 연구도 이루어지고 있는데, 일례로 충격파에 의해 14 GPa 이상의 압력으로 압축된 체심입방구조(body-centered cubic, bcc)

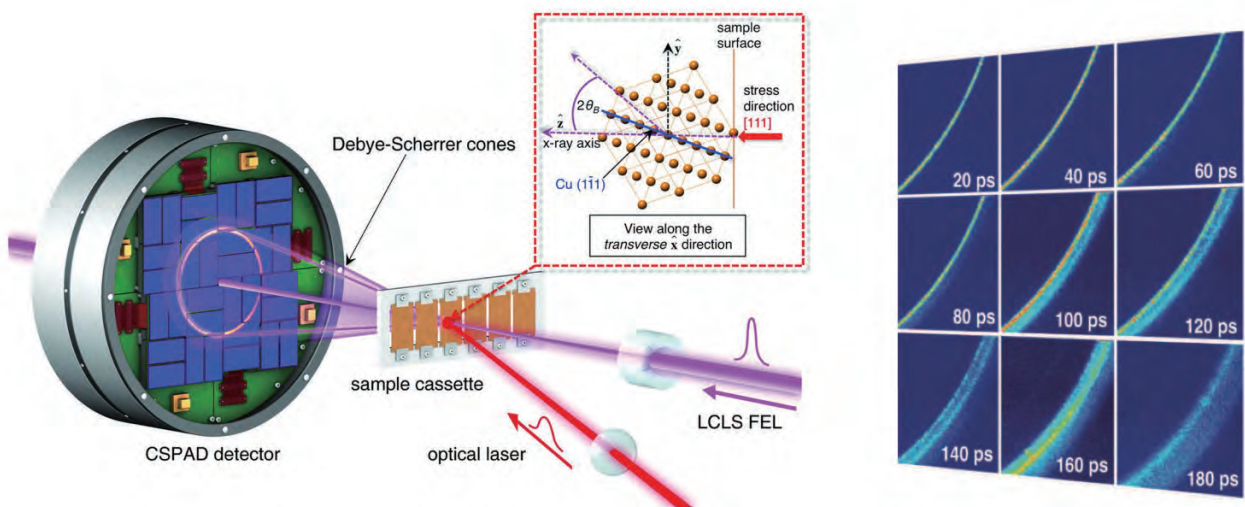


그림 3. (왼쪽) 나노초 레이저 충격파에 의해 수십 GPa의 압력으로 동적 압축되고 있는 구리에 대한 시분해 X-선 회절 실험. (오른쪽) 20 피코초의 간격으로 디바이 - 셰러 링의 변화가 측정되었다. [Milathianaki *et al*, 342, 220 (2013)]

의 비스무스 V 결정이 수 나노초에 걸쳐 액체로 상전이 되는 현상이 발견되었다. [Gorman *et al.*, Phys. Rev. Lett., 115, 095701 (2015)] 이와는 반대로 18 GPa 이상의 압력에서 비정질 이산화규소 (fused silica)에서는 수 나노초에 걸쳐 핵생성(nucleation) 및 스티쇼바이트(stishovite) 결정 성장이 관측되기도 하였다. [Gleason *et al.*, Nat. Comm. 6, 8191, (2015)] 자연계에서 이와 같은 물질들은 과거 거대한 운석들이 지구에 충돌 했을 때와 같은 극한 환경에서 발생했을 것으로 예상되는바, 극한 환경에서 원자들이 재배열되는 비평형 동역학에 대한 측정은 극한상태 지구과학 및 물질의 압축, 이완을 통한 상전이 과정의 조작, 이를 통한 신물질의 개발 연구 등에서도 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

3.2. X-선 위상 대비 이미징

한편, 자유전자 레이저를 이용한 X-선 위상 대비 이미징(x-ray phase contrast imaging)을 통해 광학적으로

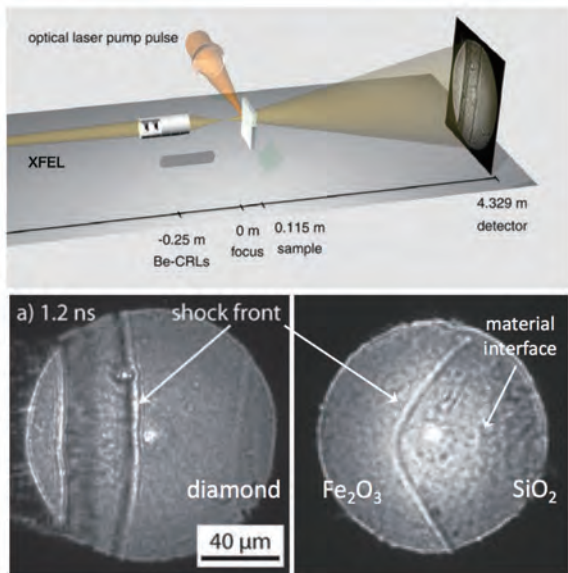


그림 4. 시분해 X-선 위상 대비 이미징 셋업의 개요 (위), 나노초 펄스레이저에 의해 압축된 다이아몬드 (왼쪽 아래)와 산화철 / 석영 (오른쪽 아래)에서 충격파의 진행에 따라 밀도가 변화하는 것이 포착되었다. [Schropp, *et al.*, Sci. Rep. 5, 11089 (2015), Beckwith, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 88, 053501 (2017)]

로 불투명한 고에너지밀도 샘플 내부의 밀도 변화를 측정할 수 있는 방법도 연구되고 있다. 샘플 내부에서의 충격파의 진행에 따른 물질의 압축과 이완, 또는 레이저에 의해 가열된 물질 내부의 밀도 변화를 수십 펨토초 및 수백 나노미터의 분해능으로 시각화하는 것이다. [그림 4]에서는 초고속 X-선 위상 대비 이미징 셋업의 개요를 보여주고 있다. 다수의 베릴륨 렌즈 조합을 이용하여 수십 ~ 수백 나노미터의 크기로 집속된 XFEL 빔은 펨토초 점광원(point source)으로 활용되어, 이에 투사된 다이아몬드 및 산화철/석영 샘플 내부에서 충격파면의 전파를 이미징 할 수 있음을 보여주었다. [Schropp, *et al.*, Sci. Rep. 5, 11089 (2015); Beckwith, *et al.*, Rev. Sci. Instr. 88, 053501 (2017)]

3.3. 초고속 X-선 흡수 분광

마지막으로, XFEL을 이용한 초고속 X-선 흡수 분광 측정을 통해, 광학 레이저에 의해 생성된 warm dense matter 또는 고압에서 고체 - 액체, 비금속 - 금속 전이 과정에서, 전자 구조(electronic structure) 및 격자의 단거리 질서(short-range order)의 변화에 대한 정보를 얻을 수 있다. 경 X-선 영역에서 핑크빔 SASE 펄스를 이용한 흡수 분광 기법의 연구는 약 20여개의 펄스만을 이용해 WDM 상태의 몰리브덴 L-흡수단의 변화를 진단하는 것이 가능하다는 점을 보여주었다. [Gaudin *et al.*, Sci. Rep. 4, 2724 (2014)] 한편 130 GPa으로 압축되는 철의 K-흡수단 아래쪽 스펙트럼의 측정을 통해 육방조밀구조(hexagonal-closed-packed, hcp)에서 3d - 4p 밴드의 하이브리드화에 의해 유도되는 변화도 발견되었다. 이와 같은 흡수 스펙트럼의 변화는 철의 위상공간에서 휴고니오(Hugoniot) 곡선을 따라 발생하는 압축 과정과, 이후 따라오는 단열 팽창(adiabatic release) 과정에서 발생하는 전자의 상태밀도(density of state)의 변화와 관련되어 있으며, 휴고니오 곡선을 따라 압축시 약 260 GPa, 5680 K 이상에서 응용됨을 시사한다. [Raji and Scandolo, High

Pressure Res. 34, 250 (2014)]

4. 맺음말

본 글에서는 자유전자레이저를 이용한 고에너지밀도 물리학의 최근 연구동향에 대해 살펴보았다. 고에너지밀도 물리는 응집물질, 플라즈마, 지구-천체물리, 고압, 핵융합 등 다양한 분야들과 연관되어 있으며, 고출력, 초고속의 레이저 및 방사광에 대한 복합적 활용이 필요한 연구이기도 하다. XFEL은 기존의 HED 물질 연구에 있어 커다란 걸림돌이었던 다양한 조건에서의 정량적인 실험 데이터 부족이라는 문제를 극복할 수 있는 도구로써, 관련분야 연구에 혁신을 불러일으키고 있다. 세계적으로도 미국의 LCLS, 일본의 SACLA, 독일의 Euro-XFEL 시설에 고출력 고에너지의 레이저와 연동된 고에너지밀도 연구 플랫폼들이 건설되고 있으며 다양한 실험 기법

들이 속속 개발되고 있는 중이다. 국내에도 포항가속기 연구소의 자유전자 레이저와 펨토초 레이저 시스템을 활용하여 관련연구가 가능할 것으로 예상된다. 특히 PAL-XFEL의 정밀한 시간동기화 능력, 동기화된 초고속 극자외선(extreme ultraviolet, EUV) 광원 등의 특화된 장점들이 향후 고에너지밀도 연구에서 적극적으로 활용할 수 있게 되기를 기대한다.

저 자 약 력

조병익 교수는 2008년 University of Texas at Austin에서 물리학 박사박위를 받고, 이후 Lawrence Berkeley Lab, Advanced Light Source의 박사후 연구원을 거쳐 2012년부터 광주과학기술원 물리광과학과에 재직중이다. bicho@gist.ac.kr

