

# 특집 ■ 최근 레이저 개발동향

## 초고출력 4 페타와트 레이저 개발

이성구 · 성재희 · 이황운 · 윤진우 · 유제윤 · 남창희\*

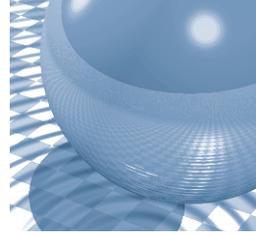
고출력을 넘어선 초고출력은 다소 생소한 단어이지만 이제 세계 주요 연구소에서 초고출력 레이저가 개발되고 있으며 그 활용 분야도 기초연구에서 점차 응용 및 산업화로 진행되고 있다. 초고출력 레이저와 고출력 레이저를 단순 구분하기는 어렵다. 레이저와 물질의 상호작용 시에 레이저 출력이 증가함에 물리적 현상은 변화하게 된다. 고출력 레이저와 물질의 상호작용 시에는 비선형 광학현상이 주로 관측되거나 속박된 전자가 자유전자가 될 수 있으나 그 에너지가 크지 않다. 초고출력 레이저와 물질의 상호작용 시에는 핵과 전자가 분리되어 플라즈마 상태가 되며 전자의 속도 또한 빛의 속도에 근접하여 상대론적 물리 현상들이 관측된다. 따라서 기존의 레이저로 구현할 수 없는 극한의 물리 환경이 조성되어 새로운 물리 현상 연구가 가능하다. 한국은 과거 초고출력 레이저의 불모지에 가까웠으나 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 진행한 초고출력 레이저 구축사업으로 선진 연구그룹을 넘어서는 초고출력 페타와트(PW,  $10^{15}$  W) 레이저 시설을 보유하게 됐다.[1, 2] 그리고 초강력레이저과학 연구단의 레이저 연구진들은 기존의 구축된 레이저 출력을 향상시켜 4 페타와트 레이저 개발에 성공하였다.[3]

4 페타와트 레이저는 처프펄스증폭(Chirped Pulse Amplification; CPA) 기술을 이용하여 증폭하고 이득 매질은 타타늄사파이어 결정을 사용한다.[4] 레이저의 펄스폭은 19.6 fs이며 0.1 Hz로 동작한다. 현재까지 개발된 페타와트 레이저 중에서 최초로 20 펨토초 이하에서 동작하는 레이저이며 이는 레이저의 스펙트럼을 광대역으로 최종 증폭 시까지 유지시킬 수 있어서 가능하다. 레이저 출력 또한 현재 운영 가능한 레이저 중에서 세계 최고 출력을 자랑한다. 중국이 2년 전 5 페타와트 출력에 해당하는 에너지를 얻었으나 펄스 압축 등 현재까지 운영을 위한 환경이



그림 1. 페타와트 레이저 실험실 전경. 4 페타와트 레이저(좌) 및 1 페타와트 레이저(우).

\*기초과학연구원 초강력 레이저과학 연구단



조성되어 있지 않다. 더불어 반복률도 0.1 Hz로 레이저 중에서 출력을 고려 시 가장 빠르게 동작하는 레이저이며 이는 다수의 응용 실험 진행을 가능케 한다.

4 페타와트 레이저는 기존의 페타와트 빔라인을 진단부부터 최종 증폭단까지 상당 부분 개선하여 구축한 것이다. 4 페타와트 레이저는 1.5 페타와트 빔라인을 활용한 것으로 그림 1과 같이 에너지 향상을 위해 대형 레이저 증폭기가 추가되었고 기존의 1.5 페타와트 레이저와 차별되는 몇 가지 특징을 가지고 있다. 우선 시간대조비 향상 및 광대역 스펙트럼 발생을 위한 Cross-Polarized Wave (XPW) 발생 기술이 도입되었고, 광대역 스펙트럼의 증폭 및 스펙트럼 변조를 위한 Optical Parametric Chirped Pulse Amplification (OPCPA) 증폭기가 진단부에 설치되었다.[5, 6] 더불어 XPW와 OPCPA 기술 효과를 극대화하기 위해 진단부의 1 kHz, 1 mJ 레이저를 1 kHz, 3 mJ 레이저로 교체하였다. 개선 작업을 보다 자세히 설명을 위해 위의 새로 도입된 기술 및 레이저 증폭기 그리고 4 페타와트 레이저의 전반적인 특성에 대해 다음에서 기술하고자 한다.

## 1. 시간대조비 향상 및 광대역 스펙트럼 발생

초고출력 레이저를 이용한 실험에서 시간대조비는 매우 중요한 변수로 작용한다. 시간대조비는 펨토초의 펄스폭을 갖는 중심 펄스에 대해 선행 펄스나 Amplified Spontaneous Emission (ASE) 펄스 등과의 세기 차이로 정의된다. 시간대조비가 나쁜 경우 레이저의 중심 펄스가 타겟에 도착 전 선행 펄스 등에 의해 타겟이 손상되거나 아예 없어질 수도 있다. 일반적으로 레이저의 세기가  $10^{12} \text{ W/cm}^2$  이상이면, 타겟이 손상되며 일부 고체 타겟의 경우 이보다 낮은  $10^{10} \text{ W/cm}^2$ 에서 타겟이 손상되기 시작한다. 4 페타와트 레이저를 비축포물거울로 집속하는 경우, 레이저의 세기가  $10^{22} \text{ W/cm}^2$  이상이므로 시간대조비는  $10^{12}$  이상이 확보되어야 한다. 4 페타와트 레이저의 시간대조비 향상을 위하여 Cross-Polarized Wave (XPW) 발생 기술이 도입되었다. XPW는 비선형결정을 사용하여 강한 레이저 펄스의 편광이 90도 회전되고 상대적으로 약한

레이저 펄스의 편광은 유지되는 현상을 이용하여 세기가 약한 선행 펄스 등을 걸러내는 기술이다. XPW 발생 기술을 이용하면 시간대조비가 최대  $10^4$ 까지 개선되는 효과를 얻을 수 있다. 그림 2는 XPW로 향상된 레이저의 시간대조비 측정 결과이다. 이 대조비는 100 테라와트(TW,  $10^{12} \text{ W}$ ) 레이저 펄스에 대해 측정했으며 이는 100 테라와트 펄스와 페타와트 펄스의 레이저 출력에 대해 시간대조비 차이가 거의 없기 때문이다. -100 ps 전에 측정된 ASE는  $5 \times 10^{-11}$  이하이며 이는 측정 장비의 노이즈 레벨과 동일하다. 실제 시간대조비는 이보다 10배 더 낮아  $5 \times 10^{-12}$ 에 이를 것으로 예상된다. 또한 -100 ps 전에 세 개의 선행펄스가 존재하나 이는 측정 장비로부터 부가적으로 생성된 것으로 실제 펄스는 아니다. -100 ps 이내 시간대조비는 펄스 압축 후에 플라즈마 거울을 이용하여 개선이 가능하며, 4 페타와트 레이저에도 시간대조비 개선을 위해 플라즈마 거울이 설치되어 있다.

레이저의 출력을 향상시키기 위해서는 레이저의 에너지를 증대시키거나 레이저의 펄스폭을 줄여야 한다. 레이저 에너지 향상은 증폭기의 확장을 의미하여 따라서 비용 및 공간을 많이 필요로 한다. 반면에 레이저 펄스폭을 줄이는 경우는 고도의 기술이 필요하지만 경제적으로 유리하며 공간 절약이 가능하다. 4 페타와트 레이저는 기존 30 fs 펄스를 XPW 기술과 OPCPA 기술을 이용하여 20 fs이하로 줄임으로써 레이저 출력을 150%이상 향상 시켰다. 이는 레이저의 스펙트럼을 기존 1.5 페타와트 레이저보다 20 nm 이상 확장하여 광대역

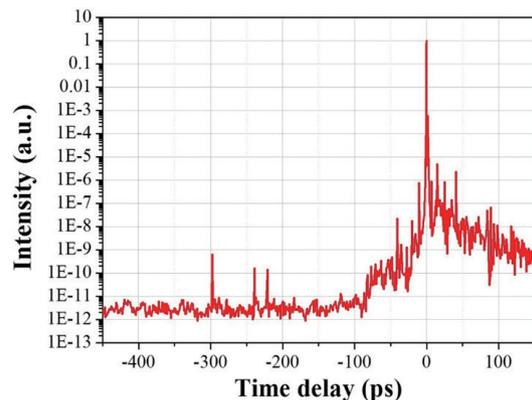


그림 2. 시간대조비 측정 결과 (100 TW 레이저 펄스)

## 초고출력 4 페타와트 레이저 개발

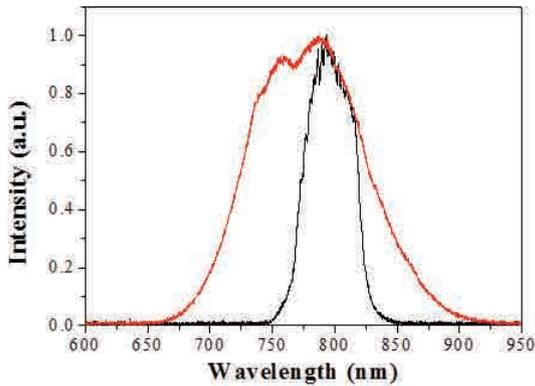


그림 3. Cross-polarized Wave Generation (XPW)에 의한 스펙트럼 확장

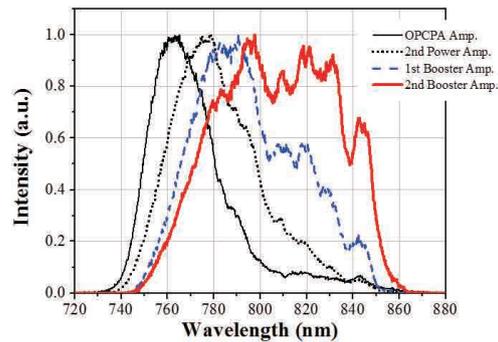
스펙트럼을 발생시킴으로써 가능해졌다. XPW는 레이저 씨앗빔의 스펙트럼을 광대역으로 확장하기 위해 사용되었으며 그림 3은 XPW에 의한 레이저 스펙트럼 확장 효과를 보여주고 있다. 실제 씨앗빔의 스펙트럼은 100 nm 이하이나 비선형 결정을 이용한 XPW에 의해 레이저 스펙트럼이 250 nm로 크게 확장됐음을 볼 수 있다. 확장된 레이저 스펙트럼은 펄스 확장기와 반사 거울들을 통과하며 스펙트럼 폭이 감소하게 되고 특히 반사거울의 제한적인 반사 대역에 의해 120 nm 스펙트럼 폭을 유지하게 된다.

## 2. 광대역 스펙트럼 증폭을 통한 < 20 fs 펄스 발생

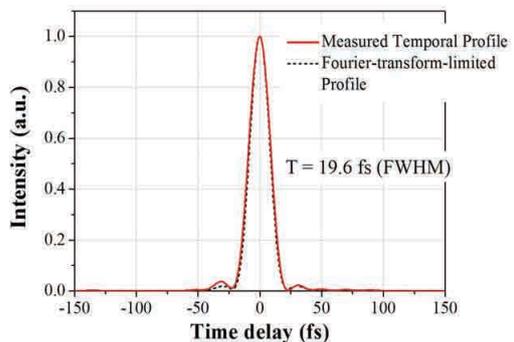
4 페타와트 레이저를 제외한 기존의 레이저들은 스펙트럼이 폭이 100 nm 이하이며 이는 증폭 중에 발생하는 스펙트럼 감소 효과 때문이다. 초고출력 레이저의 증폭기들은 거의가 이득 포화(gain saturation) 상태에서 동작하며 이는 이득 매질에 저장된 에너지를 가능한 모두 레이저광으로 전환시켜 레이저 증폭 효율을 극대화시키기 위해서다. 이는 필연적으로 레이저펄스의 전단부가 강하게 증폭되고 꼬리부분은 약하게 증폭되는 효과를 동반한다. 특히 초펄스증폭 기술이 적용되어 스펙트럼이 시간적으로 늘어서 있는 본 레이저에서는 이러한 포화증폭효과가 스펙트럼 폭 감소를 가져오며 증폭기들을 통과하면서 스펙트럼 폭 감소효과는 누적되게 된다. 4 페타와트 레이저는 이러한 스펙트럼

감소효과를 상쇄하기 위하여 광대역 증폭이 가능하고 스펙트럼 변조가 가능한 OPCPA 기술을 레이저 전단부에 활용하였다. 그림 4(a)는 4 페타와트 레이저 각 증폭기에서 증폭된 스펙트럼을 나타내고 있으며 OPCPA의 증폭 스펙트럼은 그림 3의 XPW 스펙트럼과 달리 800 nm 이상 스펙트럼 영역이 많이 약화되어 있음을 알 수 있다. 이는 증폭 중에 발생하는 이득 포화 효과에 의한 전단부(800 nm 이상 영역)의 강한 증폭 현상을 미리 상쇄함으로써 최종 증폭 후에 스펙트럼 폭을 최대한 넓히게 한다.

최종 증폭기에 의해 증폭된 레이저 펄스는 이후 대구경 펄스 압축기에 입사되어 펄스폭 펄스로 시간적으로 압축된다. 펄스 압축기는 펄스 확장기의 분산 및 투과형 광학 소자의 물질분산을 보상하도록 설계됐으며 추가적으로 분산의 정밀 보상을 위한 feedback 시스템을 갖추고 있다. 그림 4(b)는 4 페타와트 레이저의 펄스 모양을 보여주고 있다. 분산 보상을 위한 feedback 시스템을 이용하여 고차분산까지 보상한 결과 19.6 fs의 펄스폭을 획득하였으며 이론적인 변환 한계

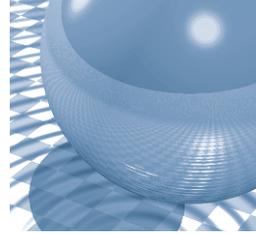


(a)



(b)

그림 4. (a) 4 페타와트 레이저에 설치된 증폭기들의 증폭 스펙트럼. (b) 레이저 펄스폭



펄스 형태와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 19.6 fs의 펄스폭은 현존하는 페타와트 레이저 중에서 가장 짧은 펄스폭으로 앞으로 10 fs 초고속 레이저 개발 전망을 밝게 하고 있다.

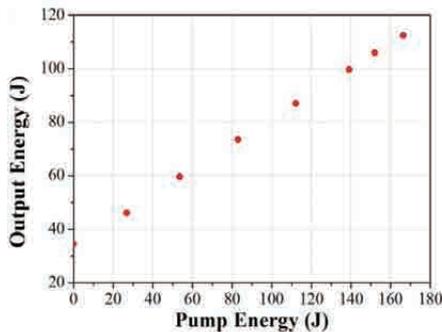
### 3. 4 페타와트 에너지 증폭

4 페타와트 레이저는 기존의 1.5 페타와트 증폭기 다음에 대형 증폭기를 추가적으로 구축하여 레이저 에너지를 향상시켰다. 펌프 레이저는 0.1 Hz로 동작하며 30 J 녹색광 레이저 6대로 구성되어 최대 180 J의 펌프광이 레이저 결정에 입사될 수 있다. 대구경 티타늄사파이어 결정을 사용함으로써 발생하는 기생발진을 억제하기 위해 흡수색소가 함유되어 있는 클래딩을 사용하였고 입사펄스와 펌프 펄스 사이의 시간을 조절하였다.[1-3] 그림 5(a)는 4 페타와트 레이저 최종 증폭기에서 펌프 에너지에 따른 증폭에너지를 보여주고 있다. 레이저 증폭에너지는 펌프에너지 증가에 따라 선형적으로 증가하며 170 J 펌프 에너지에서 112 J의 레이저 증폭

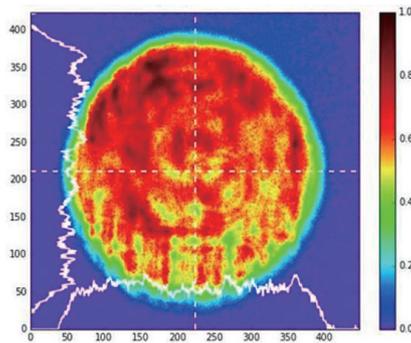
에너지를 얻었다. 그림 5(b)는 최종 증폭된 레이저빔의 공간분포를 보여주고 있다. 최종 증폭된 레이저는 펄스 압축기의 손상을 방지하기 위하여 28 cm 직경으로 확대되어 펄스 압축기에 입사되며, 펄스 압축기의 투과율 74%를 고려하면 83 J의 펄스 압축된 레이저 펄스가 발생된다. 따라서 레이저 펄스폭이 19.6 fs이므로 레이저의 최종 출력은 4.2 페타와트에 이르게 된다.

### 4. 4 페타와트 레이저를 이용한 레이저-물질 상호작용 연구

4 페타와트 레이저는 현재 레이저-물질 상호작용 실험을 위해 막바지 작업을 진행 중이다. 레이저의 파면을 제어하기 위한 변형거울의 설치가 진행 중이며, 이후 레이저 에너지를 증가시키며 각 광학계의 성능 및 안정성을 평가할 예정이다. 4 페타와트 레이저와 물질의 상호작용을 통해 10 GeV 이상의 전자 가속, 200 MeV 이상의 양성자 가속이 이론적으로 예측되고 있으며, 강한 레이저장에 의한 양자전기역학 현상 관측, 천체현상의 실험실 재현도 가능할 것으로 예상된다. 4 페타와트 레이저는 현재 전세계적으로 운영되고 있는 레이저 중에서 가장 강력한 레이저 펄스를 발생시킬 수 있다. 따라서 4 페타와트 레이저와 물질의 상호작용을 통해 극한 물리환경의 조성이 가능할 것이며, 인류가 미처 탐험하지 못한 미지의 세계를 탐구하는 기회를 제공할 것으로 기대된다.



(a)



(b)

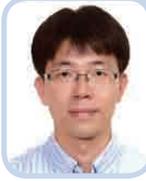
그림 5. (a) 4 페타와트 레이저 증폭에너지. (b) 레이저빔 공간분포

### 참고문헌

[1] J. H. Sung, S. K. Lee, T. J. Yu, T. M. Jeong and J. Lee, Opt. Lett. 32, 3021 (2010).  
 [2] T. J. Yu, S. K. Lee, J. H. Sung, J. W. Yoon, T. M. Jeong and J. Lee, Opt. Express 20, 10807 (2012).  
 [3] J. H. Sung, S. K. Lee, H. W. Lee, J. Y. Yoo, and C. H. Nam, in Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (2016) (Optical Society of America, 2016), paper SM1M.3.  
 [4] D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. 6, 219 (1985).  
 [5] A. Jullien et al., Opt. Lett. 30, 920 (2005).  
 [6] J.W. Yoon, S.K. Lee, T.J. Yu, J.H. Sung, T.M. Jeong, and J. Lee, Curr. Appl. Phys. 12, 648 (2012).

초고출력 4 페타와트 레이저 개발

약 력



**이성구**

이성구 박사는 2005년 한국과학기술원에서 박사 학위 취득 후 오사카대학 레이저공학연구소 연구원을 거쳐 현재 기초과학연구원 초강력 레이저과학 연구단 초빙연구위원, 고등광기술연구소 초강력레이저연구실 실장을 맡고 있다.

lsk@gist.ac.kr



**윤진우**

윤진우 박사는 2009년 한국과학기술원에서 박사 학위 취득 후 고등광기술연구소 박사후연구원, 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단 연구위원을 거쳐 현재 기초과학연구원 초강력 레이저과학 연구단 초빙연구위원과 광주과학기술원 고등광기술연구소 선임연구원으로 재직하고 있다.

yoonjw@gist.ac.kr



**성재희**

성재희 박사는 2005년 한국과학기술원에서 박사 학위 취득 후 현재 기초과학연구원 초강력 레이저과학 연구단 초빙연구위원과 광주과학기술원 고등광기술연구소 책임연구원으로 재직하고 있다.

sungjh@gist.ac.kr



**유제윤**

유제윤 박사는 2014년 도쿄대학에서 박사학위 취득 후 현재 기초과학연구원 초강력 레이저과학 연구단 연구위원으로 재직하고 있다.

jyoo@ibs.re.kr



**이황운**

이황운 박사는 2011년 아주대학교에서 박사학위 취득 후 한국전자통신연구원 연구원을 거쳐 현재 기초과학연구원 초강력 레이저과학 연구단에서 연구위원으로 재직하고 있다.

hwoonlee@ibs.re.kr



**남창희**

남창희 교수는 1988년 프린스턴 대학에서 박사학위 취득 후 한국과학기술원 물리학과 교수, 결맞는 X-선 연구단(창의연구단) 단장을 역임하였고, 현재 기초과학연구원 초강력 레이저과학 연구단 연구단장을 맡고 있으며, 광주과학기술원 물리·광과학과 교수로 재직하고 있다.

chnam@gist.ac.kr