상대론적 레이저-물질 상호작용 연구를 위한 초고출력 레이저

DOI: 10.3938/PhiT.19.017

정태문·성재희·이성구·유태준·이종민

Development of Ultrahigh-power Laser System for Relativistic Laser-Matter Interactions

Tae Moon JEONG, Jae Hee SUNG, Seong Ku LEE, Tae Jun YU and Jongmin LEE

Stable solid-state femtosecond laser and Chirped-Pulse Amplification (CPA) technique have enabled one to build a petawatt (PW, 10^{15} W)-class laser system with a relatively small amount of energy. A PW-class laser system can directly accelerate particle (electron, proton, and ion) beam, generate X-ray laser beam, produce electron-positron pair, and so on. In this article, we introduce several applications using ultrahigh-power laser systems and explain key technologies to build an ultrahigh-power laser system. Finally, the current PW-class laser systems around the world are reviewed.

들어가는 글

1960년 미국의 Maiman이 루비를 이용하여 레이저 발진을 처음 증명한 이후로 50년간 고체 액체 기체 반도체 광섬유 등을 이용한 다양한 종류의 레이저가 개발되었고, DVD 재생기부터 의료, 국방, 및 기초 학문연구까지 다양한 분야에서 레이저가 활용되고 있다. 레이저의 중요 파라미터 중 레이저

저자약력

정태문 박사는 한국과학기술원 이학박사(1999)로서 한국원자력연구소(1998~2000), 삼성전자(2000~2002), 로체스터 대학교(2002~2005)를 거쳐 2005년부터 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 재직 중이며 레이저 연구실장으로 펄스초 페타와트 레이저 개발에 참여하고 있다. (jeongtm@gist.ac.kr)

성재희 박사는 한국과학기술원 이학박사(2005)로서 2005년부터 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 재직 중으로 극초단 페타와트 레이저 개발에 참여하고 있다. (sungjh@gist.ac.kr)

이성구 박사는 한국과학기술원 이학박사(2005)로서 2005년부터 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 재직 중으로 펄스초 페타와트 레이저 개발에 참여하고 있다. (lsk@gist.ac.kr)

유태준 박사 약력은 2쪽 참조.

이종민 교수 약력은 2쪽 참조.

Fig. 1. Laser intensity over the year and the dramatic increase of the intensity after CPA technique. Courtesy of G. Mourou.

의 출력은 단위 시간당 레이저 빔의 에너지로 정의되는 양으로 레이저 빔과 물질의 상호작용 형태를 결정하는 중요한 요인이기 때문에, 레이저가 개발된 이후로 레이저의 출력을 증가시키는 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. (그림 1 참조)

레이저 개발 초기에는 레이저의 출력을 증가시키기 위해서 레이저 빔을 단순히 증폭 매질을 통과시켜 레이저 빔의 에너지를 직접적으로 증가시키는 방법을 주로 사용하였다. 따라서, 이 시기에는 에너지 저장 효율이 높고 대구경으로 제작이 가능한 Nd:glass 레이저(파장 $1 \mu\text{m}$ 영역) 시스템을 주로 개발하였다. 하지만, Nd:glass 이득 매질을 이용하는 테라와트(TW, 10^{12} W)급의 고출력 레이저 시스템은 크기가 대형이고 유지 보수비가 많이 드는 단점이 있다.

1985년 Mourou 교수에 의해 개발된 Chirped-Pulse Amplification(CPA) 기술^[1]과 1991년 고체 Ti:sapphire 크리스탈을 이용하여 처음으로 카-렌즈 모드잠김 기술^[2]이 개발되어 안정적인 펄스초 레이저 공진기 제작 기술이 확립됨에 따라, 고출력 레이저 제작 기술이 비약적으로 발전하여 짧은 펄스폭

REFERENCES

- [1] D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. **56**, 219 (1985).
- [2] D. E. Spence, P. N. Kean and W. Sibbet, Opt. Lett. **16**, 42 (1991).

과 상대적으로 작은 에너지를 갖는 극초단 고출력 레이저를 제작할 수 있게 되었다. 따라서, 과거에는 대형 연구소에서나 보유했던 테라와트 이상의 출력을 갖는 레이저 시스템을 현재는 소규모 대학 연구실 수준에서도 보유할 수 있을 정도로 보급되어 기초 및 각종 응용 연구에 활발히 이용되고 있다.

이에 따라, 선진국의 대형 레이저 연구소들은 상대론적(relativistic) 레이저-물질 상호작용 연구를 위해 페타와트(PW, 10^{15} W) 이상의 초고출력 레이저 개발에 경쟁적으로 참여하고 있으며, 유럽 연합에서는 현재 200페타와트 정도의 침투 출력을 갖는 레이저를 개발하기 위한 European Extreme Light Infrastructure(ELI) 프로젝트를 준비하고 있다. 우리나라에서도 2003년부터 극초단 광양자빔 설치운영 사업을 통해서 2012년 완성을 목표로 페타와트의 높은 침투 출력을 갖는 레이저를 제작하고 있다. 이 글에서는 초고출력 레이저의 활용 분야, 초고출력 레이저 제작 기술 및 국내외 초고출력 레이저 개발 현황에 대해서 소개하고자 한다.

초고출력 레이저의 활용 분야

고출력 레이저 펄스를 대략 10^{18} W/cm² 정도(레이저 출력으로 수 테라와트에서 수십 테라와트 정도)까지 집속시켜 가스 매질에 조사하면, 레이저 빔의 전기장이 플라즈마를 형성시키고 동시에 플라즈마 내의 전자를 직접적으로 가속시킬 수 있는 상태까지 도달하게 된다. 레이저 빔의 세기를 10^{20} – 10^{21} W/cm² 이상(레이저 출력으로 수백 테라와트 이상)으로 증가시키면 전자를 비롯한 입자들의 속도가 빛 속도에 거의 근접하게 가속되어 상대론적 레이저-물질 상호작용 현상을 관측할 수 있다. 상대론적 레이저-물질 상호작용 현상을 본격적으로 관측할 수 있는 수백 테라와트 이상의 출력을 갖는 레이저 시스템을 초고출력 레이저 시스템이라고 할 수 있으며, 현재는 주로 CPA 기술을 이용하여 펨토초 초고출력 레이저 시스템을 제작하고 있다. 펨토초 초고출력 레이저 펄스를 기체나 고체 매질과 상호작용을 시키면 입자빔(전자, 양성자, 및 이온)의 발생 및 가속, 소형 X-선 레이저 개발, 전자-반전자 쌍 생성, 및 초기 우주 상태 연구와 같은 분야에 활용될 수 있다. 다음에 극초단 초고출

Fig. 2. Generation of high energy electron beams by laser wakefield acceleration. Courtesy of V. Malka.

Fig. 3. Proton beam acceleration by ultrahigh-power laser pulse. Courtesy of H. Schwöerer.

력 레이저 펄스를 이용한 응용 분야가 간단히 설명되어 있다

1. 입자(전자, 양성자, 이온 등) 가속기 개발

초고출력 레이저가 가장 크게 활용될 수 있는 분야는 전자, 양성자 및 이온을 포함한 입자빔 가속 분야이다. 과거에는 입자빔을 가속시키기 위해서 거대한 입자가속기가 필요하였으나, 초고출력 레이저를 이용하면 실험실 환경에서 전기장의 세기를 10^{20} V/m 이상으로 강하게 형성할 수 있어서, 작은 크기로 효율적인 입자 가속기를 제작할 수 있다. 전자빔과 양성자빔은 서로 다른 가속 기전을 가지고 가속되며 그림 2와 3에 laser wakefield 가속에 의한 전자 가속 기전과 고체 표적의 법선방향으로 형성된 sheath 포텐셜에 의한 양성자빔의 가속이 설명되어 있다.

현재 펨토초 초고출력 레이저를 이용하여 전자빔과 양성자빔을 발생시키고 가속시키는 연구가 많이 진행되어, 전자빔 가속의 경우에는 1 GeV 이상의 에너지를 갖는 안정적인 전자빔 가속이,^[3] 양성자빔의 경우에는 약 17 MeV의 에너지를 갖는 양성자빔의 발생^[4]이 보고되었다. 이와 같은 고에너지 입자빔은 물질의 구조를 규명하는 데 사용하거나 의료 영상 및 치료용에 큰 활용이 기대되고 있다.

2. 결맞는 X-선원 발생

고출력 레이저를 이용한 결맞는 X-선의 발생은 크게 고차 고조파 발생을 이용하는 방법, 전자와 원자의 재결합을 이용하는 방법, 그리고 레이저를 이용하여 고에너지 전자를 발생시키고 이를

REFERENCES

- [3] N. Hafz, *et al.*, Nat. Photonics **2**, 571 (2008).
- [4] K. Zeil, *et al.*, New J. Phys. **12**, 045015 (2010).

Fig. 4. Coherent X-ray generation using laser-driven high energy electron beam and undulator.^[5]

교변 자장기(undulator)에 입사시켜 X-선을 발생시키는 방법^[5] 등이 있다. 이 중에서 특히 교변 자장기를 이용한 결맞는 X-선 레이저를 발생시키는 장치인 차세대 X-FEL에서 초고출력 레이저를 이용하면, X-FEL의 전체 크기를 소형화할 수 있을 것으로 예상된다. 그림 4는 초고출력 레이저를 이용하여 전자빔을 발생시키고 발생된 전자빔을 교변 자장기에 입사시켜 X-선을 발생시키는 장치도를 보여주고 있다. 고등광기술연구소에서도 레이저에 의해서 가속된 전자빔을 교변 자장기에 입사시켜 결맞는 X-선을 발생시키는 연구를 한국원자력연구원과 함께 수행하고 있다.

3. 반전자 발생

초고출력 레이저를 이용하면 반물질 생성 연구도 가능하다.^[6] 그림 5는 펨토초 초고출력 레이저를 10^{20} W/cm^2 까지 기체 표적에 집속시켜 고에너지 전자빔을 발생시키고, 발생된 전자빔을 High Z 물질에 충돌시켜 Bremsstrahlung에 의한 감마선 발생을 유도하고, 발생된 감마선을 Bethe-Heitler 기전에 의해서 전자와 양전자(positron)로 변환시키기 위한 실험 장치를 보여주고 있다. 이러한 반물질 생성 연구는 양자장(Quantum Field Theory) 이론 및 CPT(Charge, Parity, Time Reversal) 보존 이론을 검증하는 등 거대 입자 가속기(Large Hardron Collider

Fig. 5. Electron-positron pair production by ultrahigh-power laser pulse.^[6]

Fig. 6. Conceptual layout for Chirped-Pulse Amplification.

등)를 통해서나 가능하던 물리학의 기본 이론 등을 검증하는 데 사용될 수 있다.

초고출력 레이저 제작 기술

고출력 레이저 시스템에서는 레이저 펄스의 에너지를 효율적으로 증폭하기 위해서 입사하는 레이저 펄스의 fluence가 충분히 커야 한다. 하지만, 레이저 펄스의 fluence를 증가시키면 증폭 매질 내에서 레이저 펄스의 강한 세기에 의해 유도되는 비선형 굴절률로 인해 자체 집속 현상이 심각하게 발생하여 레이저 증폭 매질의 광 손상을 유발하는 등의 문제가 발생한다. 고출력 레이저 제작시 이와 같은 문제점을 해결하고자 Mourou 박사는 레이저 펄스의 에너지를 증폭하는데 있어서 레이저 펄스의 fluence는 유지시키면서 펄스폭을 확대시켜 낮은 첨두 출력을 유지하기 위한 방법으로 CPA 기술을 도입하였다.

1. Chirped-Pulse Amplification의 개념

그림 6에 펨토초 초고출력 레이저 제작에 사용되는 CPA 기술의 기본 개념도가 설명되어 있다. CPA 기술에서는 극초단 공진기에서 발생한 수에서 수십 펨토초(fs, 10^{-15} 초) 수준의 레이저 펄스를 에너지 증폭 전에 시간적으로 수백 피코초에서 1 나노초(ns, 10^{-9} 초)까지 확대시킨다. 시간적으로 확대된 레이저 펄스는 증폭 매질로 구성된 증폭단을 통과하여 에너지가 증폭된 후, 회절 격자로 구성된 펄스 압축기로 입사하게 된다. 펄스 압축기를 통해서 에너지가 증폭된 레이저 펄스의 펄스폭을 원래의 펨토초 수준으로 압축시키면, 펄스폭은 짧지만 순간 출력

REFERENCES

- [5] M. Fuchs *et al.*, Nat. Physics **5**, 826 (2009).
- [6] C. Gahn *et al.*, Appl. Phys. Lett. **77**, 2662 (2000).

Fig. 7. Gain narrowing and spectral shift observed in amplifying the energy of laser pulse.

은 높은 극초단 초고출력 레이저 펄스를 발생시킬 수 있다. 초기의 CPA 방법에서는 레이저의 펄스폭을 확대하기 위해서 광섬유를 사용하였기 때문에 회절 격자쌍으로 구성된 펄스폭 압축기로는 광섬유에서 유도된 고차 시간 분산을 정확히 보정하지 못하였으나, 추후에 회절 격자쌍만을 이용한 펄스폭 확대^[7] 및 반사면만을 사용하여 수차를 제거하는 Öffner triplet 형태의 펄스 확대^[8]가 개발되면서 시공간적으로 우수한 성능을 갖는 펄스 초고출력 레이저 펄스 발생이 이루어지고 있다.

2. 재생 증폭기와 다중 통과 증폭기

확대된 레이저 펄스의 에너지를 증폭하기 위해서는 재생 증폭기와 다중 통과 증폭기가 사용된다. 재생 증폭기는 공진기 구조를 갖는 증폭기내에 편광을 이용하여 레이저 펄스를 가둔 후 수십 회 왕복시켜 레이저 펄스의 에너지를 증폭하는 방법이다. 재생 증폭기는 극초단 초고출력 레이저 시스템의 앞 단계에 위치한 증폭 시스템에 주로 사용되어 수 nJ 정도의 에너지를 갖는 레이저 펄스를 수 mJ급으로 증폭시키기 위해서 사용한다. 재생 증폭기는 단 하나의 증폭기를 이용하여 효율적으로 증폭할 수 있는 장점이 있으나, 편광 스위치로 이용되는 Pockels cell의 동작시간과 새어나옴 현상으로 인하여 레이저 펄스의 전후에 pedestal 펄스들이 존재하게 된다.

다중 통과 증폭기로는 일반적인 평면거울로 구성된 다중 통과 증폭기, 두 개의 구면경으로 구성된 공초점 구조를 갖는 다중 통과 증폭기 등 여러 가지 구조가 제안되었다. 다중 통과 증폭기는 극초단 초고출력 레이저의 주 증폭기로 사용되어 레이저 펄스의 에너지를 수 J에서 수십 J까지 증가시키는데 사용된다.

확대된 레이저 펄스가 재생증폭기와 다중 통과 증폭기에서 에너지가 증폭되는 경우에 gain narrowing과 spectral shift 현상이 일어난다. 그림 7은 펄스 초고출력 레이저 시스템에

Fig. 8. Temporal characteristics of ideal and realistic ultrahigh-power laser pulses. Courtesy of LOA in France.

서 레이저 펄스의 에너지를 증폭할 때 나타나는 gain narrowing과 spectral shift 현상을 보여주고 있다. 이러한, gain narrowing과 spectral shift 현상이 나타나는 이유는 레이저 이득의 포화 현상과 파장에 따른 이득 계수의 변화 때문이다. 에너지 증폭시 gain narrowing에 의한 선폭 축소를 최소화하기 위해서 AOPDF를 사용하기도 한다.^[9]

3. 초고출력 레이저의 시간적 특성

초고출력 레이저 펄스를 10^{20} W/cm² 이상의 세기를 갖도록 집속하는 경우, 증폭된 레이저 펄스의 시간적인 특성이 중요하다. 증폭된 레이저 펄스의 시간적인 특성은 고차 분산에 의한 불완전한 펄스 압축, 에너지 증폭 매질에서 발생된 증폭된 자발 방출(ASE), 레이저 시스템내의 스위칭 소자인 Pockels cell의 동작 속도 및 편광기에서 빛의 leak 등에 의해서 결정된다. 그림 8은 이러한 현상들이 발생하였을 때, 압축된 레이저 펄스의 시간적인 특성을 보여주고 있다. 이러한 원치않는 레이저 펄스들은 극초단 초고출력 레이저 펄스가 표적에 도달하기 전에 표적과 상호 작용을 일으켜 레이저-물질의 상호 작용 효율을 저하시킬 뿐만 아니라, 극초단 초고출력 레이저 펄스가 표적에 도달하기 전에 표적의 조건을 바꾸기도 한다.

극초단 초고출력 레이저 펄스의 시간적인 특성을 향상시키기 위해서 frequency doubling, 포화 흡수체나, plasma mirror를 이용하기도 한다. 하지만, 위와 같은 방식을 이용하면 기본

REFERENCES

- [7] O. E. Martinez, IEEE J. Quantum Electron. **23**, 1385 (1987).
- [8] G. Cheriaux, *et al.*, Opt. Lett. **21**, 414 (1996).
- [9] F. Verluise *et al.*, Opt. Lett. **25**, 575 (2000).

Fig. 9. Optical layout for the adaptive optics system.

적으로 레이저 펄스의 에너지 손실이 불가피하며, 경우에 따라서는 레이저 펄스의 공간적인 세기 분포를 변형시키기도 한다. 초고출력 레이저 펄스의 시간적 특성을 개선시키기 위한 또 다른 방법으로 OPCPA(Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification) 방법이 있다.^[10] OPCPA 방법은 초고출력 레이저의 시간 특성을 향상시키는 점 외에 수 펨토초 레이저 펄스를 증폭할 수 있는 넓은 이득 선폭, 증폭 매질에서 빛에너지의 흡수가 적으므로 증폭 매질에서 열적 문제가 적은 점, 증폭 매질 내에서 횡방향 자발 방출 증폭(Transverse ASE)이 존재하지 않는 점과 같은 장점들도 갖는다. 이와 같은 특성 때문에 유럽에서 준비 중인 ELI 프로젝트에서는 수십 페타와트 급 이상의 레이저 구축에 OPCPA 증폭 방식을 채택하고 있다.

4. 초고출력 레이저의 공간적 특성

초고출력 레이저 펄스는 시간적 특성뿐만 아니라 공간적인 특성도 매우 중요하다. 초고출력 레이저 펄스는 기본적으로 대구경 광학 거울을 비롯한 여러 가지 광학 소자를 통과하기 때문에 레이저 펄스에 파면 왜곡(wavefront aberration)이 발생할 수 있다. 발생한 파면 왜곡은 레이저 펄스를 회절 한계(diffraction limit)까지 집속하는 것을 방해하여 레이저-물질 상호작용 효율을 저하시키므로, 발생한 파면 왜곡은 반드시 보정되어야 한다. 레이저 펄스의 파면 왜곡을 보정하기 위해서 일반적으로 적응 광학계를 사용한다. 적응 광학계는 파면수차 측정기, 변형가능 거울, 및 전자 장치로 구성된다. (그림 9 참조) 적응 광학계를 이용할 경우 초고출력 레이저 펄스를 회절 한계에 가깝게 집속할 수 있다.^[11]

또한, 펨토초 초고출력 레이저 펄스가 갖는 넓은 선폭에 의해서 색수차가 유도될 수도 있다. 펨토초 초고출력 레이저 펄스에 색수차가 유도되면 레이저 빔 집속시 시공간적 특성 저하가 일어나므로 레이저 펄스에 색수차가 발생하지 않도록 하여야 한다. 펨토초 초고출력 레이저내에 일반 단일 렌즈를 이용한 빔 확대기를 설치할 경우 색수차는 발생하며, 색수차

Fig. 10. 10 PW laser Facility that will be built in Czech Republic.

발생을 억제하기 위해서 반사형 빔 확대기를 사용하거나 색지움 렌즈로 구성된 빔 확대기를 사용한다.

세계의 초고출력 레이저 개발 현황

세계적으로 초고출력 레이저 시스템을 보유하고 있거나 건설 중에 있는 나라는 미국과 유럽연합의 일부 선진국, 아시아에서는 한국, 일본 그리고 중국이다. 그 중에서도 유럽연합은 Mourou 박사의 주도로 200페타와트급 레이저 건설을 목표로 하는 ELI 프로그램을 준비하는 등 펨토초 초고출력 레이저 개발에 박차를 가하고 있다. 그림 10은 ELI 프로그램의 일환으로 체코에 건설될 예정인 10페타와트급 레이저 시설을 보여주고 있다. 체코 외에도 영국의 Rutherford Appleton Laboratory에서 10페타와트급의 레이저 건설을 추진하고 있으며, 그 외에 독일, 프랑스 등에서도 수백 테라와트 이상의 순간 출력을 갖는 초고출력 레이저를 제작 중에 있다.

미국은 일찍부터 Lawrence Livermore National Lab.(LLNL)을 중심으로 초고출력 레이저 개발에 참여하여 왔으며 1999년 세계 최초로 1페타와트 레이저 제작에 성공하였다.^[12] 미국의 LLNL에서는 주로 레이저 핵융합, 핵관련 기술 개발 및 핵물리 현상을 연구하기 위해서 초고출력 레이저를 개발하여 왔다. LLNL 이외에도 로체스터 대학교, 미시간 대학교 및 네브라스카 대학교에서 이미 백 테라와트 이상의 출력을 보유하고 있거나 수백 테라와트 이상의 출력을 갖는 레이저를 제작 중에 있다.

일본은 오사카 대학 산하 Institute of Laser Engineering에서 Nd:glass 레이저를 기반으로 하는 Gekko 초고출력 레이저들을 제작하여 레이저 핵융합 및 관련 핵기술 연구를 진행하여 왔다. 현재 펨토초 초고출력 레이저 기술이 발전하면서

REFERENCES

- [10] I. N. Ross, *et al.*, Appl. Opt. **39**, 2422 (2000).
- [11] S.-W. Bahk, *et al.*, Opt. Lett. **29**, 2837 (2004).
- [12] M. Perry, *et al.*, Opt. Lett. **24**, 160 (1999).

Fig. 11. Photo of Advanced Photon Research Center.

일본 원자력기구 산하 Advanced Photon Research Center에서 0.87 PW의 첨두 출력을 갖는 CPA Ti:sapphire 레이저를 세계 최초로 제작한 바 있다.^[13] 일본은 초고출력 레이저를 의료용 양성자빔 개발이나 X-선원 발생 장치로 이용하고 있는 중이다. 또한, 중국도 중국과학원 산하 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics에서 수백 테라와트급의 레이저를 제작하고 있는 등 펨토초 초고출력 레이저 개발에 매진하고 있다.

국내 초고출력 레이저 개발 현황

테라와트 이상의 출력을 갖는 고출력 레이저의 국내 개발 역사는 1990년대 초 한국과학기술원 이상수, 공홍진 교수의 주도로 제작한 Nd:glass 이득 매질 기반 테라와트급 신명 레이저 시스템으로 거슬러 올라간다. 1990년대 말에는 CPA 기술을 이용한 3 테라와트 Ti:sapphire 레이저 시스템이 남창희 교수 연구실에서 개발되었다. 2000년대 들어서면서 국내 펨토초 고출력 레이저 기술이 비약적으로 발전하여 2003년도에는 광주과학기술원 이종민 교수가 주도하여 2012년 완성을 목표로 1페타와트급 첨두 출력을 갖는 Ti:sapphire 레이저 시스템과 응용 연구 시설을 구축하는 극초단 광양자빔 사업이 시작되었다. 2008년에는 극초단 광양자빔 사업을 통해서 페타와트급 레이저와 응용 실험을 위한 극초단 광양자빔 특수 연구동이 완공되었으며, 특수 연구동에서 페타와트 레이저와 응용 실험 장치가 구축되고 있는 중이다. 2010년 현재 특수 연구동내에서는 100테라와트 레이저 시스템을 운영 중이며, 자체 및 공동연구를 통해서 100테라와트 레이저 빔을 이용한 입자빔(전자 및 양성자빔) 발생, X-선 레이저 발진 및 이를 이용한 응용 실험을 수행 중에 있다.

그림 12는 펨토초 페타와트급 레이저 시스템이 설치된 극초단 광양자빔 특수 연구동의 전경을 보여주고 있다. 펨토초 페타와트급 레이저 시스템은 15펨토초의 레이저 펄스열을 발생시키는 레이저 공진기, 공진기에서 발생된 극초단 펄스를 1 mJ 영역까지 증폭하기 위한 다중통과 증폭기, 펄스폭을 1 나노초까지 늘리

Fig. 12. Photo of Ultrashort Quantum Beam Facility.

기 위한 펄스폭 확대기, 레이저 펄스의 에너지를 증폭하기 위한 전치, 1단 및 2단 증폭기, 페타와트 레이저 펄스를 발생시키기 위한 영역까지 레이저 펄스의 에너지를 증폭하기 위한 booster 증폭기, 및 펄스폭을 30펨토초까지 압축시키기 위한 펄스 압축기로 구성되어 있다. 본 레이저 시스템은 2010년 6월 현재 Ti:sapphire 이득 매질 기반으로는 세계 최초로 1페타와트 이상의 첨두 출력을 달성하였고, 상세한 성능은 펄스폭 30펨토초, 최종 에너지 33 J, 반복율 0.1 Hz (1 shot/10초)이다. 현재 페타와트 레이저 시스템은 시험 운전 중이며 시험 운전이 끝난 후, 국내외 외부 이용자에게도 개방되어 초고출력 레이저 펄스를 이용한 각종 연구에 활용될 것이다.

나오는 글

최근 전 세계적으로 페타와트 이상의 첨두출력을 갖는 펨토초 초고출력 레이저 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 펨토초 초고출력 레이저는 앞으로 소형 입자가속기 개발부터 전자-반전자 생성 연구 등 기초 과학 연구 전반에 걸쳐서 활발히 사용될 것이다. 필자들은 과거에 외국이 보유한 고출력 레이저 연구 시설에 대한 사진이나 일부 자료만을 접하면서 마음속으로 부러워한 경험이 한두 번이 아니다. 하지만, 우리나라의 과학기술이 눈부시게 발전하면서 우리나라에서도 페타와트의 첨두출력을 갖는 펨토초 초고출력 레이저 시설 및 응용 연구 시설 보유를 눈앞에 두고 있다. 이러한 페타와트 초고출력 레이저 구축은 과거에 일부 선진국에서만 수행할 수 있었던 최신 연구를 국내 연구진이 국내의 연구 시설로 수행할 수 있는 계기가 마련된다는 점에서 아주 큰 의의가 있다. 마지막으로 순수 국내 연구진이 학문 발전에 크게 이바지할 수 있는 중요한 발견이나 연구를 이룩하는데 극초단 광양자빔 연구시설이 큰 기여를 할 수 있기를 기대하면서 이 글을 마친다.

REFERENCES

- [13] M. Aoyama, *et al.*, Opt. Lett. **28**, 1594 (2003).