극한 물리 환경 구현을 위한 펨토초 초강력 레이저

DOI: 10.3938/PhiT.22.042

정태문·성재희·이성구

Femtosecond Super-intense Laser for Realizing Extreme Physical Conditions

Tae Moon JEONG, Jae Hee SUNG and Seong Ku LEE

The high-power femtosecond laser has become an important scientific tool for the study on not only relativistic laser-matter interactions but also practical applications. A 30-fs PW CPA Ti:sapphire laser has been constructed at the Advanced Photonics Research Institute and has been used to accelerate charged particles and to generate ultra-short high-energy photon sources. The Center for Relativistic Laser Science (CoReLS) using a 30-fs PW Ti:sapphire laser has recently been launched for research on fundamental physics in the relativistic and the ultra-

relativistic laser intensity regimes. In this article, we introduce worldwide research activities on the development of a high-power femtosecond laser and its applications. The upgrade of the laser to 4 PW and higher power through research at the CoReLS is briefly described as well. The femtosecond high-power laser will allow us to enrich our understandings of fundamental physics and to open new horizons on ultrasmall and ultrafast spacetime scales.

서론

1960년 미국 휴즈 연구소의 T. Maiman에 의해 가시광선 영역에서 레이저 발진이 처음 시연^[1]된 이후로 레이저 제작 및 활용 기술 분야에서 비약적인 발전이 있었다. 레이저는 개발 초기부터 큐-스위칭 방법으로 얻어진 나노초 레이저 펄스를 고출력으로 증폭하여 이를 레이저 핵융합 연구에 활용하는 것이 제안되었고 많은 관련 연구가 수행되었다. 1974년 Ippen 등은 세계 최초로 색소(dye) 레이저로부터 펨토초 레이저 펄스의 발생을 시연하였다.^[2] 펨토초 레이저 펄스 발생은 작은 공간에서 적은 비용으로 손쉽게 고출력 레이저를 개발할 수 있는 장점으로 인하여, 많은 연구자들이 펨토초 레이저 펄스의 에너지를 증폭하기 위해서 많은 노력을 기울였다. 하지만, 에너지 증폭 효율이 낮음에도 높은 첨두 출력으로 인한 비선형 현상에 의해 광학소자의 광 손상이 일어나는 문제로 펨토초 레이저 펄스의 에너지 증폭은 성공적이지 못하였다.

세계 최초로 극초단(피코초 혹은 펨토초) 레이저 펄스의 에너지를 획기적으로 증폭하는데 성공한 사람은 Strickland와 Mourou였다.^[3] 이들은 극초단 레이저 펄스의 에너지 증폭 전 후에 레이저 펄스를 시간적으로 확대하고 압축하는 과정을 도

저자약력

정태문 박사는 1999년 한국과학기술원 물리학과에서 박사학위를 취득한 후, 한국원자력연구원, 삼성전자, 로체스터 대학교를 거쳐 2005년부터 고등광기술연구소에서 근무하고 있다. 고등광기술연구소에서는 레이저 연구실장, 초강력레이저 연구실장으로 재직하면서 “극초단 광양자빔 연구시설 설치운영 사업”의 실무책임자로 1 페타와트, 1.5 페타와트 레이저의 건설과 이를 이용한 응용연구를 총괄하여 수행하였다. 초강력 레이저과학 연구단에서는 4 페타와트와 10 페타와트 레이저 개발 및 이를 이용한 상대론적/초상대론적 연구를 수행할 예정이다. (jeongtm@gist.ac.kr)

성재희 박사는 2005년 한국과학기술원 물리학과에서 박사학위를 취득한 후, 2005년부터 고등광기술연구소에서 근무하고 있다. 고등광기술연구소에서는 초강력 레이저 연구실의 선임연구원으로 재직하면서 1 페타와트, 1.5 페타와트 펨토초 레이저 개발 연구에 주도적으로 참여하였다. 초강력 레이저과학 연구단에서는 4 페타와트와 10 페타와트 레이저 개발 및 레이저 시/공간 성능 향상 연구를 수행할 예정이다. (sungjh@gist.ac.kr)

이성구 박사는 2005년 한국과학기술원 물리학과에서 박사학위를 취득한 후, 오사카 대학 레이저 공학 연구소 박사후 연구원을 거쳐 2005년부터 고등광기술연구소에서 근무하고 있다. 고등광기술연구소에서는 초강력 레이저 연구실의 선임연구원으로 재직하면서 1 페타와트, 1.5 페타와트 펨토초 레이저 개발 연구에 주도적으로 참여하였다. 초강력 레이저과학 연구단에서는 4 페타와트와 10 페타와트 레이저 및 OPCPA 레이저 개발 연구를 수행할 예정이다. (lsk@gist.ac.kr)

REFERENCES

- [1] T. H. Maiman, Nature **187**, 493 (1960).
- [2] C. V. Shank and E. P. Ippen, Appl. Phys. Lett. **24**, 373 (1974).
- [3] D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. **6**, 219 (1985).

Table 1. Worldwide femtosecond super-intense laser facility.

레이저 시스템 (보유기관, 국가)	최소 펄스폭	최대 에너지	첨두 출력	반복률	완성 연도	응용분야	비고
J-KAREN (APRC, 일본)	33 fs	28.4 J	0.85 PW	single shot	2003	입자가속 상대론적 레이저 플라즈마	세계 최초 펨토초 페타와트급 레이저
Petawatt laser (SIOM, 중국)	29 fs	25.8 J	0.89 PW	single shot	2007	상대론적 레이저 플라즈마 입자가속 극초단 X-선 발생	
PEARL (IAP, 러시아)	43 fs	24 J	0.55 PW	single shot	2007	전자가속	OPCPA 시스템
Astra Gemini (RAL, 영국)	30 fs	15 J	0.5 PW	0.05 Hz	2008	입자가속 coherent X-선 발생 우주물리	
PULSER (APRI, 한국)	30 fs	33 J 44.5 J	1.1 PW 1.5 PW	0.1 Hz	2010 2012	입자가속 상대론적 레이저 플라즈마 극초단 X-선 발생	세계 최고 첨두출력
XL-III (IOP, 중국)	28 fs	32.3 J	1.16 PW	single shot	2011	입자가속 상대론적 레이저 플라즈마	Doubled CPA
BELLA (LBNL, 미국)	40 fs	42.4 J	1.06 PW	1 Hz	2012	전자가속	1 Hz 시스템 (상용 레이저)

입함으로써, 에너지 증폭 효율을 향상시키고 비선형 현상에 의한 광학소자의 손상을 방지하였다. 이 기술은 chirped pulse amplification (CPA) 기술로 알려져 있으며, 현재 대다수의 펨토초 초강력 레이저 제작에 적용되고 있다. 또한, 1989년에 티타늄 사파이어(Ti:sapphire) 결정을 이용하는 카-렌즈 모드잠김(Kerr-lens mode-locking) 기술이 개발된 이후,^[4] 현재는 10 펨토초 이하의 펄스폭을 갖는 레이저 펄스를 안정적으로 생성하는 것이 가능하게 되었다. 카-렌즈 모드잠김 티타늄 사파이어 레이저는 펨토초 초강력 레이저에서 극초단 펄스 발생기로 활용되고 있다.

CPA 기술과 카-렌즈 모드잠김 티타늄 사파이어 레이저가 초강력 레이저 제작에 적용되면서, 펨토초 초강력 레이저 제작 기술이 비약적으로 발전하였다. 1999년에는 미국의 로렌스 리버모어 국립연구소가 CPA 기술을 적용하여 세계 최초로 Ti:sapphire/Nd:glass 혼합형 페타와트(PW, 10^{15} W) 레이저 개발에 성공한 바 있다.^[5] 이후에 일본, 중국, 러시아, 영국 등에서 CPA 기술을 적용한 수백 테라와트(TW, 10^{12} W) 수준의 출력력을 갖는 펨토초 레이저 개발에 성공하였다.^[6-9] 2010년과 2012년에는 국내의 고등광기술연구소 연구진이 세계 최초로 30 펨토초 1 페타와트 및 1.5 페타와트 티타늄 사파이어 레이저 개발에 연속적으로 성공하였다.^[10,11] 이러한 펨토초 초강력 레이저는 국소적인 영역에 강한 전기장의 세기($\sim 10^{11}$ V/cm)를 구현할 수 있어서 레이저 기반 하전입자 가속,^[12,13] 극초단 X-선 발생,^[14] 상대론적 영역(relativistic regime)에서의 레이저 플라즈마 연구,^[15] 실험실 내에서 우주물리 현상 연구^[16] 등에 활용이 가능하다. 현재는 초강력 레이저 제작기술의 발달로 인하여 페타와트의 첨두출력을 갖는 상용 레이저 시스템이 있다.

유럽 각국은 아원자 물질의 동역학 및 우주의 기원 등 초상대론적(ultra-relativistic) 영역에서 새로운 물리현상에 대한 탐

구를 목표로 펨토초 초강력 레이저 개발에 매진하고 있으며, Extreme Light Infrastructure(ELI) 프로젝트를 통해서 10 페

REFERENCES

- [4] D. E. Spence, D. E. Kean and W. Sibbet, Opt. Lett. **16**, 42 (1991).
- [5] M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart, G. Tietbohl, J. A. Britten, C. Brown, S. Herman, B. Golick, M. Kartz, J. Miller, H. T. Powell, M. Vergino and V. Yanovsky, Opt. Lett. **24**, 160 (1999).
- [6] M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane, J. Ma, N. Inoue, H. Ueda and H. Kiriama, Opt. Lett. **28**, 1594 (2003).
- [7] X. Liang, Y. Leng, C. Wang, C. Li, L. Lin, B. Zhao, Y. Jiang, X. Lu, M. Hu, C. Zhang, H. Lu, D. Yin, Y. Jiang, X. Lu, H. Wei, J. Zhu, R. Li and Z. Xu, Opt. Express **15**, 15335 (2007).
- [8] F. Ple, M. Pittman, G. Jamelot and J.-P. Chambaret, Opt. Lett. **32**, 238 (2007).
- [9] V. V. Lozhkarev, G. I. Freidman, V. N. Ginzburg, E. V. Katin, E. A. Khazanov, A. V. Kirsanov, G. A. Luchinin, A. N. Mal'shakov, M. A. Martyanov, O. V. Palashov, A. K. Poteomkin, A. M. Sergeev, A. A. Shaykin and I. V. Yakovlev, Laser Phys. Lett. **4**, 421 (2007).
- [10] J. H. Sung, S. K. Lee, T. J. Yu, T. M. Jeong and J. Lee, Opt. Lett. **32**, 3021 (2010).
- [11] T. J. Yu, S. K. Lee, J. H. Sung, J. W. Yoon, T. M. Jeong and J. Lee, Opt. Express **20**, 10807 (2012).
- [12] T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. **43**, 267 (1979).
- [13] S. P. Hatchett, C. G. Brown, T. E. Cowan, E. A. Henry, J. S. Johnson, M. H. Key, J. A. Koch, A. B. Langdon, B. F. Lasinski, R. W. Lee, A. J. Mackinnon, D. M. Pennington, M. D. Perry, T. W. Phillips, M. Roth, T. C. Sangster, M. S. Singh, R. A. Snavely, M. A. Stoyer, S. C. Wilks and K. Yasuike, Phys. Plasma **7**, 2076 (2000).
- [14] G. Tsakiris, K. Eidmann, J. Meyer-ter-Vehn and F. Krausz, New J. Phys. **8**, 19 (2006).
- [15] G. Mourou, T. Tajima and S. Bulanov, Rev. Mod. Phys. **78**, 309 (2006).
- [16] A. Di Piazza, C. Muller, K. Z. Hatsagortsyan and C. H. Keitel, Rev. Mod. Phys. **84**, 1177 (2012).

Fig. 1. 30 fs, petawatt Ti:sapphire laser system at Center for Relativistic Laser Science (CoReLS).

타와트 레이저 개발을 추진하고 있다.^[17] 기존의 기술로는 실현하기 어려운 극한의 물리 환경을 실험실 수준에서 구현할 수 있는 장점을 고려할 때, 앞으로도 극초단 초강력 레이저 개발은 지속적으로 이루어질 것이다. 본 논문에서는 펨토초 초강력 레이저의 중요성 및 응용분야와 초강력 레이저과학 연구단의 초강력 레이저 개발 방향을 기술하고자 한다.

펨토초 초강력 레이저의 중요성 및 응용분야

레이저와 물질과의 상호작용은 레이저의 세기에 의해서 결정된다. 레이저의 세기가 10^9 W/cm^2 에 훨씬 못 미치는 경우에는 물질의 광학적 반응(optical response)이 선형적이거나, 레이저의 세기가 10^9 W/cm^2 에 근접하거나 큰 경우에는 광학적 반응에 비선형성이 나타나기 시작한다. 레이저의 세기가 대략 10^{13} W/cm^2 정도로 증가하면 레이저에 의한 전기장의 세기가 원자핵과 전자 사이의 전기장 세기를 극복하여 물질이 원자핵과 자유전자로 구성된 플라스마 상태가 되기 시작하며, 10^{16} W/cm^2 이상으로 더욱 증가하면 레이저에 의해서 모든 물질이 플라스마 상태가 된다. 1990년대까지는 레이저의 세기가 $10^{16} \sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 수준에 머물렀으나 2000년대 들어오면서 100 테라와트 이상의 펨토초 초강력 레이저의 등장으로 10^{20} W/cm^2 이상의 레이저 세기를 얻는 것이 가능해졌다. 레이저의 세기가 10^{18} W/cm^2 이상으로 증가하면, 레이저 장에 의한 전자의 속도가 빛 속도에 근접해서 전자의 움직임에 상대론적 현상을 고려하여야 한다. 레이저의 세기가 10^{24} W/cm^2 이상으로 더욱 증가하면, 양성자조차도 레이저 장에 의해서 빛 속도에 근접하게 움직이게 된다. 레이저의 세기가 10^{18} W/cm^2 이상일 때를 상대론적 영역(relativistic regime), 10^{24} W/cm^2 이상일 때를 초상대론적 영역(ultra-relativistic regime)이라고도 한다. 현재는 상대론적 현상이 중요해지는 10^{19} W/cm^2 이상의 첨두 세기를 갖는 레이저를 초강력 레이저(ultra-high intensity la-

Fig. 2. Target chambers for laser-matter interactions in the relativistic regime. Extreme physical conditions are generated in the target chambers, and charged particle acceleration, ultrashort high-energy photon, and other interesting relativistic phenomena are investigated under the super-intense conditions.

ser 혹은 super-intense laser)라고 정의하기도 한다. 특히, 10^{22} W/cm^2 이상의 레이저 세기는 인류가 현재까지 도달하여 보지 못한 미개척 영역으로 이러한 영역에서는 복사 반작용(radiation reaction), 핵자 내 동역학, 광압에 의한 양성자 가속, 광자를 이용한 진공 찢음(vacuum breakdown)과 쌍생성(pair production) 등을 연구할 수 있다. 이러한 연구를 통해서 새로운 학문 분야를 개척하고, 인류 지식의 지평을 넓혀줄 수 있을 것으로 기대한다.

현재, 10^{19} W/cm^2 (혹은 전기장의 세기: 약 $8.7 \times 10^{10} \text{ V/cm}$) 이상의 세기를 갖는 펨토초 초강력 레이저의 주요 응용분야는 전자 및 양성자와 같은 하전 입자(charged particle) 가속과 극초단 고에너지 광자 발생이다. 초강력 레이저를 활용하여 전자를 가속할 경우에는 높은 전기장의 세기로 인하여 수 mm 혹은 cm 정도의 짧은 가속거리로 전자를 GeV 이상의 고에너지로 가속할 수 있는 장점이 있다. 이는 10 GeV 혹은 100 GeV급의 소형 전자가속기 개발의 토대를 마련해줄 수 있다. 또한, 극초단 고에너지 전자빔을 교번자장기(undulator)에 통과시킬 경우 수십 나노미터에서 수 나노미터의 파장을 갖는 극초단 방사광 가속기를 개발할 수 있다. 초강력 레이저를 이용하여 전자를 가속하는 방법으로 laser wakefield acceleration (LWFA)이 많이 연구되었고, 비선형 영역(정규화된 벡터 포텐셜, $a_0 = eA/mc^2 > 3.5$)에서 플라스마 공동(plasma cavity)을 이용하여 수백 MeV에서 GeV 수준의 에너지를 갖는 전자빔을 손쉽게 얻을 수 있다. 전자의 에너지를 향상시키기 위해서 injector/accelerator 구조가 많이 연구되고 있으며, 최근에 본 연구단의 연구팀이 페타와트 레이저 펄스를 in-

REFERENCES

[17] <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/>.

Fig. 3. 10 PW-class laser facilities planned in the world.

jector/accelerator 구조에 조사하였을 때 전자빔의 에너지를 수 GeV까지 가속할 수 있음을 세계 최초로 증명하는 바 있다.^[18]

초강력 레이저를 이용한 양성자 가속은 2000년 로렌스 리버모어 연구소 연구진에 의해서 처음 보고된 후, 저피폭 양성자 암치료기 개발 가능성 때문에 활발하게 연구되고 있는 분야이다. 레이저 펄스에 의한 양성자 가속 메커니즘은 사용하는 레이저 빔의 세기 및 표적 조건과 양성자 가속에 참여하는 전자의 특성에 따라 크게 TNSA(Target Normal Sheath Acceleration), RPA(Radiation Pressure Acceleration), BOA(Break-Out Afterburner), CE(Coulomb Explosion) 등으로 나뉜다. 현재 양성자 가속에서 중요한 연구 주제들 중의 하나는 초박막 표적에 초강력 레이저 펄스를 조사하여 광압(radiation pressure)으로 초박막 표적 내의 전자층을 가속시키고 이 전자층과 양성자 사이의 쿨롱 힘을 이용하여 양성자를 가속시키는 light sail-RPA 방법의 실험적 구현이다. 본 연구단의 연구팀에서는 페타와트 수준의 초강력 레이저 펄스를 두께가 10~30 nm 정도인 polymer(F8ST) 표적에 조사하여 수십 MeV 이상의 에너지를 갖는 양성자를 발생시킨 바 있다.^[19] 양성자를 고에너지 영역까지 가속하기 위해서는 레이저의 세기 및 시공간적 특성이 아주 우수해야 하는 것으로 알려져 있다. 이를 위해서 본 연구단에서는 플라스마 거울 시스템을 비롯하여 초강력 레이저 펄스의 대조비를 향상시킬 수 있는 각종 기술들을 개발하였으며, 레이저 펄스의 집속 세기 향상 등 추가적인 연구를 통하여 수백 MeV의 에너지를 갖는 양성자 빔 발생을 목표로 연구하고 있다.

극초단 고에너지 광자(엑스선 및 감마선)는 원자나 분자 내 구조 및 동역학 연구, 나노 및 바이오 물질의 구조 및 동역학 연구 등에 큰 역할이 기대되는 차세대 광원이다. 극초단 고에너지 광자는 초강력 레이저를 기체나 고체 표적에 조사했을 때 발생하는 고차조화파, 전자의 속도 변화에서 발생하는 방사광, 고에너지 전자와 광자와의 산란에 의해 발생하는 광자의 Doppler upshift 등의 작용기전에 의해서 발생된다. 일반적으로 대형 연구시설들은 고에너지 광자 발생을 위하여 하나 혹은

일부의 작용기전만을 사용하므로 이로부터 발생된 고에너지 광자는 특성 변화에 대한 자유도가 떨어지는 단점이 있다. 반면에, 초강력 레이저를 활용할 경우에는 초강력 레이저와 표적사이에 서로 다른 상호작용을 이용함으로써 손쉽게 다양한 종류의 극초단 고에너지 광자를 생성할 수 있는 장점이 있다. 본 연구단의 연구팀에서는 재결합 X-선 레이저, 고체 표적에서의 고차조화파 발생 등을 통해 극초단 X-선원을 발생한 바 있다.^[20,21] 향후에는 고에너지 전자와 광자의 산란(inverse Compton scattering)을 통한 극초단 감마선원을 개발하여 핵자 내 동역학을 연구할 계획에 있다. 이를 통해서 원자력 에너지의 안정적인 사용에 크게 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

연구단의 초강력 레이저 개발 방향

전 세계적으로 펨토초 초강력 레이저 개발은 한국, 유럽, 미국, 중국, 일본 등이 주도하고 있다. 이 중에서 유럽은 초강력 레이저 개발에 가장 적극적이다. 앞서 언급한 ELI 프로젝트를 통해서 체코(ELI-beamlines), 루마니아(ELI-NP), 헝가리(ELI-ALPS)에 2010년대 중후반을 목표로 10 페타와트급 레이저 건설을 진행 중에 있다. 세계 각국의 10 페타와트 레이저 개발 계획은 표 2에 정리되어 있다. 초강력 레이저과학 연구단은 현재 보유하고 있는 1.5 페타와트 레이저 빔라인을 2015년까지 4 페타와트 이상의 첨두출력을 갖도록 성능향상(upgrade)하는 것을 일차적인 목표로 하고 있다. 장기적으로는 전 세계 초강력 레이저 개발 그룹들과 경쟁하기 위해서 10 페타와트 수준의 첨두 출력을 갖는 레이저 개발 및 운영기술 확보를 목표로 하고 있다.

펨토초 초강력 레이저 기술은 20 펨토초 이하의 펄스폭을 갖

REFERENCES

- [18] H. T. Kim, K. H. Pae, H. J. Cha, I. J. Kim, T. J. Yu, J. H. Sung, S. K. Lee, T. M. Jeong and J. Lee, "Enhancement of electron energy to multi-GeV regime by a dual-stage laser-wakefield accelerator pumped by petawatt laser pulses," arXiv: 1307.4159.
- [19] I. J. Kim, K. H. Pae, C. M. Kim, H. T. Kim, J. H. Sung, S. K. Lee, T. J. Yu, I. W. Choi, C.-L. Lee, K. H. Nam, P. V. Nickles, T. M. Jeong and J. Lee, "Towards radiation pressure acceleration of protons using linearly polarized ultra-short petawatt laser pulses," arXiv: 1304.0333.
- [20] H. T. Kim, I. W. Choi, N. Hafz, J. H. Sung, T. J. Yu, K.-H. Hong, T. M. Jeong, Y.-C. Noh, D.-K. Ko, K. A. Janulewicz, J. Tümmeler, P. V. Nickles, W. Sandner and J. Lee, Phys. Rev. A **77**, 023807 (2008).
- [21] I. J. Kim, K. H. Pae, C. M. Kim, H. T. Kim, H. Yun, S. J. Yun, J. H. Sung, S. K. Lee, J. W. Yoon, T. J. Yu, T. M. Jeong, C. H. Nam and J. Lee, Nature. Commun. **3**:1231 doi: 10.1038/ncomms2245 (2012).

Table 2. Worldwide plans for 10 PW-class laser facility.

초강력 레이저 개발 기관 (국가)	최소 펄스폭	최대 에너지	첨두 출력	반복율	완성 연도 (예상)	응용분야
CoReLS (한국)	20 fs 15 fs	80 J 150 J	4 PW 10 PW	0.1 Hz	2015 2018	상대론적 광학, 초상대론적 광학, 실험실 우주물리
ELI-beamlines (체코)	20 - 30 fs	200 - 300 J	10 PW	0.1 Hz	2015 (계획)	X-선 발생, 입자가속, WDM 물리, 상대론적 광학
ELI-NP (루마니아)	<30 fs	>300 J	~10 PW	0.1 Hz	2015 (계획)	고강도 감마선 발생, 레이저 핵물리
ELI-ALPS (헝가리)	<10 fs	40 J	>4 PW	5 Hz	2020 (계획)	아토초 물리, 바이오/의료 분야 응용

는 수 페타와트급 펄스 발생, 10^{13} 이상의 시간 대조비 확보, 수 마이크로 이하의 회절 한계 집속 달성을 위한 방향으로 나아가고 있다. 본 연구단에서는 이를 위해서 OPCPA(optical parametric chirped pulse amplification) 방법^[22]과 XPW(cross polarized wave generation) 방법^[23]이 적용된 증폭기를 개발할 예정이며 10^{13} 이상의 고 시간대조비를 갖는 20 펨토초, 80 J, 4 페타와트 레이저를 개발할 계획이다. 또한, 20 펨토초 이하의 초강력 레이저 펄스 전송에 적합한 고임계손상 광대역(~ 200 nm) 반사경 개발에 대한 이론적 연구도 수행할 예정에 있다. 아울러, 10 페타와트 레이저 개발에 필요한 15 펨토초 레이저 증폭, 기생발전 억제와 MLD(Multi-layer dielectric) 회절격자 설계 및 제작, 고효율 시간 대조비 개선 등을 연구할 예정이다.

4 페타와트 이상의 첨두출력을 갖는 초강력 레이저 펄스를 10^{22} W/cm² 이상의 세기를 갖도록 집속하는 것은 중요한 연구주제이다. 4 페타와트 레이저 펄스를 약 2.7 μ m의 크기로 집속할 경우 집속된 레이저 펄스의 세기는 약 3×10^{22} W/cm²에 다다른다. 이와 같은 세기영역에서는 전자 운동 시 복사 마찰을 고려해야 하며, 복사 마찰이 고려된 전자의 운동에 대한 기술을 통해서 극한 환경에서의 물리 현상을 좀 더 정확하게 이해할 수 있다. 10 페타와트 레이저 펄스를 집속할 경우, 기하광학적으로는 약 1.5 μ m의 spot size를 갖도록 집속할 수 있어서 약 1.3×10^{23} W/cm² 정도의 집속세기를 얻을 수 있을 것으로 예측되며, 이 영역에서는 레이저 집속시 레이저 펄스의 편광을 고려하여야 한다. 따라서 레이저의 편광이 고려된 집속 레이저 펄스의 시공간적 세기 분포에 대한 정확한 계산 방법에 대한 연구도 반드시 필요하다.

광학 매질의 임계손상세기는 대략 10^{12} W/cm² 정도로 알려져 있다. 이와 같은 임계손상세기는 초강력 레이저 시스템의 크기를 결정하는 주요 요인으로 작용한다. 최근에 연구되기 시작한 플라즈마 매질에서 라만 증폭^[24]이나 플라즈마 집속경^[25] 등은 임계손상에 의한 제약을 크게 완화시켜줄 수 있다. 이러한 플라즈마 광학소자는 향후에 10 페타와트 혹은 그 이상의 첨두출력을 갖는 레이저 개발에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 현재, 러시아와 유럽의 일부 국가에서는 100 페타와트

급 레이저 개발에 대한 논의가 시작되고 있다. 현재 수준에서는 100 페타와트 레이저 제작에 필요한 기술들이 확보되지 못했고, 설령 제작한다 하더라도 천문학적인 비용이 필요할 것으로 예측된다. 하지만, 레이저 기술에 대한 지속적인 연구개발이 이루어진다면 100 페타와트 레이저 개발도 멀지 않은 미래에 달성될 것으로 기대된다.

맺음말

인류가 서기 21세기까지 오면서 많은 분야에서 엄청난 과학 기술적 진보가 이루어져 왔다. 이제는 사람이 실생활에서 인지하고 인식할 수 있는 영역에 대한 이해를 벗어나, 우리가 존재하고 있는 우주의 기원과 구성에 대한 아주 근본적인 물음에 대한 대답을 얻기 위해서 노력하고 있다. 그만큼 어렵고 시간과 노력이 많이 들지만, 한편으로는 새로운 도전과 기회를 맞게 되었다. 본 논문에서 기술한 바와 같이 레이저는 개발된 지가 이제 겨우 50여 년이 지났지만, 그동안 인류에 미친 영향은 실로 방대하여, 새로운 발견과 기술 발전이 레이저 이용과 밀접한 경우가 많다. 이제는 레이저의 출력이 비약적으로 증가하면서 우주의 기원과 우주를 구성하는 기본 물질의 성질을 연구할 수 있는 도구가 되어가고 있는 듯하다. 이러한 중요한 시기에 기초과학연구단의 전폭적인 지원을 받게 된 것을 감사하게 생각하고 많은 책임감을 느낀다. 기초과학연구원 초강력 레이저과학 연구단의 연구 성과가 한국의 과학기술 나아가 인류의 과학기술 발전에 기여할 수 있도록 노력해야겠다고 마음속 깊이 다짐하여 본다.

REFERENCES

- [22] A. Dubietis, G. Jonusauskas and A. Piskarskas, Opt. Commun. **88**, 437 (1992).
- [23] A. Jullien, O. Albert, F. Burgy, G. Hamoniaux, J.-P. Rousseau, J.-P. Chambaret, F. Augé-Rochereau, G. Chériaux, J. Etchepare, N. Minkovski and S. M. Saltiel, Opt. Lett. **30**, 920 (2005).
- [24] J. Ren, W. Cheng, S. Li and S. Suckewer, Nat. Phys. **3**, 732 (2007).
- [25] M. Nakatsutsumi, A. Kon, S. Buffechoux, P. Audebert, J. Fuchs and R. Kodama, Opt. Lett. **35**, 2314 (2010).