극초단 고출력 레이저를 이용한 엑스선 레이저 개발과 응용

DOI: 10.3938/PhiT.19.018

김형택·이종민

Development of X-ray Lasers Using Ultrashort Intense Lasers and Their Applications

Hyung Taek KIM and Jongmin LEE

X-ray laser is a short wavelength coherent radiation within extreme ultraviolet and soft x-rays obtained by population inversion of highly charged ions. Development of x-ray lasers had been a dream of laser technology from the beginning of laser history. The first x-ray laser was developed by research teams of Lawrence Livermore National Laboratory and Princeton University in 1984. Recent progresses of x-ray laser technologies have realized table-top high-repetition x-ray lasers using transient collisional excitation scheme. The first x-ray laser in Korea using intense laser system was developed by a research team at Advanced Photonics Research Institute (APRI) in 2006. The APRI team developed a Ni-like Ag x-ray laser using 100 TW laser system of ultrashort quantum beam facility. In this article, a brief history and current status of x-ray laser development and applications are summarized.

서론

엑스선은 1895년 독일의 물리학자 뢰트겐에 의해 처음 발견되어, 그 후 물리학, 의학, 생물학, 재료공학 등의 영역에서 눈부신 과학 기술의 발전을 견인하였다. 자외선보다 짧은 파장을 가진 엑스선은 거의 모든 물질이 흡수를 하는 연엑스선(30~0.2 nm 파장 영역)과, 연엑스선보다 파장이 짧고 모든

물질에서 투과성을 가지는 경엑스선(0.2 nm 이하 파장영역)으로 나뉜다. 1960년 레이저가 개발된 이후 이와 같이 짧은 파장을 가진 엑스선 레이저를 개발하려는 시도가 시작되었다. 그러나 그 당시로는 막대한 펌핑 에너지가 필요한 엑스선 레이저의 개발은 요원한 것이었다. 엑스선 레이저는 레이저 광학 기술의 발전과 플라스마 물리의 발전에 힘입어 1984년 미국의 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL)의 연구진^[1]과 Princeton 대학의 Suckewer 교수 연구진^[2]에 의해 처음으로 개발되었다.

지난 2009년은 엑스선 레이저가 개발된 지 사반세기가 지난 해였고, 올해는 레이저가 개발된 지 50년이 되는 뜻 깊은 해이다. 레이저의 개발이 50년이 지난 현재, 레이저는 광통신으로부터 영상매체까지 실생활뿐 아니라 과학기술 전반에 엄청난 파급 효과를 나타내고 있다. 이는 레이저의 높은 결맞음성(Coherence)과 작은 퍼짐각 등의 우수한 광학적 성질로 인해 정밀한 광 제어가 가능하기 때문에 이루어진 성과들이다. 레이저와 같은 성질을 가지고 있으며, 엑스선 영역의 짧은 파장을 가진 광원은 향후 나노 기술 및 바이오 기술 개발의 첨병이 될 것으로 기대되고 있다. 이에 과학 선진국들은 막대한 예산을 들여 엑스선 자유전자레이저(X-ray Free Electron Laser)를 개발하고 있다. 그러나 이런 엑스선 자유전자레이저는 수조원에 달하는 예산과 거대한 가속장치가 필요하다. 이에 비해 극초단 고출력 레이저 시스템을 이용한 엑스선 레이저는 실험실 규모의 작은 규모와 예산으로 결맞는 연엑스선 광원을 얻을 수 있는 방법이다. 여기에서는 이와 같은 극초단 고출력 레이저 시스템을 이용한 엑스선 레이저의 개발 현황 및 응용 연구 현황에 대해 정리해 보고자 한다.

REFERENCES

- [1] D. L. Matthews, P. L. Hagelstein, M. D. Rosen, M. J. Eckart, N. M. Ceglio, A. U. Hazi, H. Medeck, B. J. MacGowan, J. E. Trebes, B. L. Whitten, E. M. Campbell, C. W. Hatcher, A. M. Hawryluk, R. L. Kauffman, L. D. Pleasance, G. Rambach, J. H. Scofield, G. Stone and T. A. Weaver, Phys. Rev. Lett. **54**, 110 (1985).
- [2] S. Suckewer, C. H. Skinner, M. Milchberg, C. Keane and D. Voorhees, Phys. Rev. Lett. **55**, 1753 (1985).

저자약력

김형택 박사는 KAIST 물리학과 이학 박사(2004)로서, KAIST 물리학과 박사 후 연구원(2004~2005)을 거쳐 현재 광주과학기술원 고등광기술 연구소 선임연구원으로 재직 중이다. (htkim@gist.ac.kr)

이종민 교수 약력은 2쪽 참조.

본 론

1. 엑스선 레이저 개발의 역사 및 현황

앞서 언급한 바와 같이 1960년 가시광 영역의 레이저가 개발되면서 연구자들의 관심은 즉각적으로 더 짧은 파장, 특히 엑스선 파장 영역의 레이저를 개발할 수 있는가에 집중되었다. 파장이 짧은 레이저를 개발하기 위해서는 파장의 4승에 반비례하는 양에 해당하는 큰 에너지를 레이저 매질에 주입해 주어야 하기 때문에 발진 레이저의 파장을 짧게 하기 위해서는 막대한 양의 펌핑 에너지가 필요하였다. 엑스선 영역에서 사용할 수 있는 고품질 광학 소자를 제작하는 것 또한 매우 어려운 일이었다. 엑스선 레이저를 개발하기 위한 여러 가지 아이디어가 제시되었지만, 기술적인 한계에 의해 1980년대까지 엑스선 레이저의 개발은 이루어지지 않았다.

레이저가 개발된 이후 레이저의 출력을 높이는 기술은 많은 발전을 이루었다. 1980년대에는 펄스당 kJ 이상의 에너지를 가지는 대형 레이저들이 개발되었다. 이런 레이저 기술의 발전과 플라즈마 물리의 발전에 힘입어 1984년 LLNL의 연구진^[1]과 Princeton의 연구진^[2]은 각기 다른 방식의 엑스선 레이저를 처음으로 개발하여 학계에 보고하였다. LLNL의 연구진은 레이저핵융합을 연구하기 위한 고출력 레이저 시스템을 이용하여 충돌여기 방식의 Ne-like Se(파장 21 nm) 엑스선 레이저를 개발하였으며, Princeton의 Suckewer 교수 연구진은 CO₂ 레이저를 이용하여 재결합 방식의 Hydrogen-like Carbon(18.2 nm, 13.8 nm 파장) 엑스선 레이저를 개발하였다. 초기의 엑스선 레이저 연구는 핵융합용 고출력 레이저와 같은 큰 에너지를 가지는 대형 레이저 시스템을 이용하여 이루어졌다.

레이저가 개발된 이후 출력을 높이는 기술과 함께, 레이저의 펄스폭을 짧게 만드는 기술이 비약적으로 발전하였다. 60년대 말 Q-switching 기술의 개발과 70년대 mode-locking 기술의 개발은 피코초(10^{-12} 초) 및 펨토초(10^{-15} 초) 레이저 펄스를 가능하게 하였다. 그러나 이러한 짧은 펄스를 증폭하게 되면 강한 침투출력에 의해 광학계가 손상을 입는 문제가 발생되었다. 이에 극초단 고출력 레이저의 개발을 하기 위해서는 광학소자의 크기를 확대해야 했으므로, 초기의 극초단 고출력 레이저 시스템을 개발하는 데 상당한 제약이 있었다. 그러나 80년대 중반 처프펄스증폭(Chirped Pulse Amplification) 기술이 개발되면서, 실험실 규모의 극초단 고출력 레이저가 가능하게 되었다.

이와 같은 레이저 기술의 발전에 힘입어 90년대 후반에는 피코초 영역의 짧은 펄스를 이용하여 엑스선 레이저 발진에 필요한 에너지를 획기적으로 낮추는 순간충돌여기방식(Transient

Fig. 1. Scheme of transient collisional x-ray laser.

collisional pumping scheme)이 개발되었다.^[3,4] 기존의 거대한 레이저 시스템이 필요했던 엑스선 레이저는 실험실 규모의 시설로도 연구할 수 있는 기술이 개발되었다. 그림 1은 순간충돌여기방식의 엑스선 레이저의 원리를 보여준다. 순간충돌여기방식은 나노초 영역의 전단 펄스(Pre-pulse)를 매질에 입사시켜 플라즈마 매질을 발생시키고, 피코초 영역의 고출력 펄스를 플라즈마 매질에 주입하여 고가의 이온(Ni-like 또는 Ne-like 이온)에서 밀도반전을 일으켜 엑스선 레이저를 발진시키는 방식이다. 순간충돌여기방식은 수 J의 레이저 에너지 만으로도 엑스선 레이저를 발진시킬 수 있어, 실험실 규모의 펌핑 레이저를 이용하여 엑스선 레이저 개발을 가능하게 하였다.

이후 순간충돌여기방식을 기본으로 하여 여러 가지 엑스선 레이저 기술이 개발되어 실험실 수준의 응용연구가 활발히 진행되고 있다. 기체 매질을 이용한 광학장이온화(Optical field ionization) 엑스선 레이저 방식이 새롭게 개발되었으며,^[5] 순간충돌여기방식에서 플라즈마 매질의 에너지 흡수를 최대화한 빗감각 입사 펌핑방식(Grazing Incidence Pumping Scheme) 엑스선 레이저 등의 개발^[6]이 잇따랐다. 그러나 엑스선 레이저는 기본적으로 자가증폭발진(Amplified Spontaneous

REFERENCES

- [3] P. V. Nickles, V. N. Shlyaptsev, M. Kalachnikov, M. Schnürer, I. Will and W. Sandner, Phys. Rev. Lett. **78**, 2748 (1997).
- [4] J. Dunn, A. L. Osterheld, R. Shepherd, W. E. White, V. N. Shlyaptsev and R. E. Stewart, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80**, 2825 (1998).
- [5] S. Sebban, R. Haroutunian, Ph. Balcou, G. Grillon, A. Rousse, S. Kazamias, T. Marin, J. P. Rousseau, L. Notebaert, M. Pittman, J. P. Chambaret, A. Antonetti, D. Hulin, D. Ros, A. Klisnick, A. Carillon, P. Jaeglé, G. Jamelot and J. F. Wyart, Phys. Rev. Lett. **86**, 3004 (2001).
- [6] R. Keenan, J. Dunn, P. K. Patel, D. F. Price, R. F. Smith and V. N. Shlyaptsev, Phys. Rev. Lett. **94**, 103901 (2005).

Emission)에 의해 발생하므로, 빔이 균일하지 않고, 결맞음성이 제한되는 특성을 가지고 있다. 이를 개선하기 위해 공진기-증폭기 방식으로 2개의 레이저 매질을 사용하거나, 결맞음성이 우수한 연엑스선을 주입빔으로 활용하는 방식이 연구되고 있다.

결맞음성이 우수한 고차조화파(High-order harmonics)를 엑스선 레이저 매질에 주입하여 이를 증폭하면, 엑스선 레이저의 공간적 특성을 매우 개선할 수 있다. 고차조화파는 강력한 레이저의 전기장에 의해서 원자내의 전자가 이온화되어 가속되었다가 원자와 다시 충돌하는 과정을 반복하면서 발생하는 고차의 조화파를 말한다. 고차조화파는 구동 레이저장에 의한 전자의 규칙적인 움직임에 의해 발생하고, 위상정합을 충족하는 조건에서 발생하므로, 레이저와 매우 유사한 우수한 결맞음성과 낮은 퍼짐각을 가지게 된다. 그러나 고차조화파는 20 nm 이하의 파장에서 pJ 정도의 낮은 에너지를 가지고 있다. 엑스선 레이저는 20 nm 이하의 파장에서 μJ 정도의 높은 에너지를 가지고 있으므로, 엑스선 레이저를 이용하여 고차조화파를 증폭하면 우수한 광학적 성질을 가지는 고에너지 연엑스선 광원을 얻을 수 있다. 고차조화파 주입 엑스선 레이저(Harmonic seeded x-ray laser) 실험은 미국의 T. Ditmire 연구진에 의해 처음 시도되었으나, 고차조화파를 엑스선 레이저 매질을 이용하여 3배 증폭하는 데에 그쳤다.^[7] 2000년 일본의 오사카 연구진은 2개의 매질을 사용하여 첫 매질에서 발진된 엑스선 레이저 펄스를 다시 엑스선 레이저 매질에 주입하여 엑스선 레이저의 퍼짐각을 줄이는 결과를 발표하였다.^[8] 2004년 프랑스 LOA의 Ph. Zeitoun 연구진은 32.8 nm 파장의 크립톤(Kr) 엑스선 레이저에 고차조화파를 주입하여 고차조화파를 600배 증폭하는 데에 성공하여, 고차조화파 주입 엑스선 레이저 개발의 가능성을 열었다.^[9] 최근에는 미국 콜로라도 대학의 J. J. Rocca 교수의 연구진에서 GRIP 방식을 이용한 18.9 nm 폴리브렌 엑스선 레이저와 13.9 nm 엑스선 레이저에 고차조화파를 성공적으로 주입하여 400배 이상 증폭하였다.^[10] 그림 2에서 보는 바와 같이 Rocca 교수의 연구진은 13.9 nm 파장의 엑스선 레이저 (a)에 네온에서 발생한 고차조화파 (b)를 주입하여 수백 배 증폭된 신호 (c)를 얻었다. 또한 고차조화파 주입에 의해 엑스선 레이저의 퍼짐각이 고차조화파의 퍼짐각과 같이 매우 작게 되었으며, 증폭된 엑스선 광원의 결맞음성이 개선된 것을 실험적으로 확인하였다.

극초단 고출력 레이저를 이용한 엑스선 레이저 개발은 1980년대 후반 및 1990년대 초기의 새로운 엑스선 레이저 물질과 파장을 찾아가는 단계에서 1990년대 후반부터 엑스선 레이저의 실험 장치 규모를 줄이는 과정을 넘어 2000년

Fig. 2. Harmonic seeded Ni-like x-ray laser developed by Colorado State University group (a) x-ray laser spectrum (b) high-order harmonic spectrum (c) harmonic seeded x-ray laser spectrum.^[10]

대 중반부터는 광학적 성질을 개선하는 연구가 주를 이루고 있다. 또한 최근에는 엑스선 레이저를 이용한 나노 영상 촬영 등의 응용기술을 개발하는 연구가 활발히 진행 중에 있다.

2. 국내 엑스선 레이저 개발 연구 현황

1990년대부터 국내에서 엑스선 레이저에 대한 이론적 접근이 시작되었으나,^[11] 본격적인 엑스선 레이저 개발 연구는 비교적 최근에 시작되었다고 할 수 있다. 국내에서는 엑스선 레이저를 개발할 만한 펌핑 레이저 시스템이 구축되지 않아 엑스선 레이저 연구가 진행되지 못했었으나, 광주과학기술원 고

REFERENCES

- [7] Y. Wang, M. A. Larotonda, B. M. Luther, D. Alessi, M. Berrill, V. N. Shlyaptsev and J. J. Rocca, *Phys. Rev. A* **72**, 053807 (2005).
- [8] S. Sebban, H. Daido, N. Sakaya, Y. Kato, K. Murai, H. Tang, Y. Gu, G. Huang, S. Wang, A. Klisnick, Ph. Zeitoun, K. Koike and H. Takenaka, *Phys. Rev. A* **61**, 043801 (2000).
- [9] Ph. Zeitoun, G. Faivre, S. Sebban, T. Mocek, A. Hallou, M. Fajardo, D. Aubert, Ph. Balcou, F. Burgy, D. Douillet, S. Kazamias, G. de Lachèze-Murel, T. Lefrou, S. le Pape, P. Mercère, H. Merdji, A. S. Morlens, J. P. Rousseau and C. Valentin, *Nature* **431**, 426 (2004).
- [10] Y. Wang, E. Granados, F. Pedaci, D. Alessi, B. Luther, M. Berrill and J. J. Rocca, *Nature Photonics* **2**, 94 (2008).
- [11] D. Kim, C. Tóth and C. P. J. Barty, *Phys. Rev. A Rap. Comm.* **59**, R4129 (1999).

Fig. 3. X-ray lasers pumped by 100 TW Ultrashot Quantum Beam Facility. (a) Schematic experimental setup and spectrum of GRIP x-ray laser. (b) Schematic experimental setup and spectrum of OFI x-ray lasers.

등광기술연구소에 극초단 광양자빔 시설에 100 TW(Terawatt, 10^{12} Watt) 레이저 시스템이 구축되면서 엑스선 레이저를 개발할 수 있는 시스템을 갖추게 되었다. 극초단 광양자빔 시설은 2005년에 100 TW 출력의 레이저 시설을 구축하였고, 2012년까지 1페타와트 출력을 달성하는 것을 목표로 건설되고 있다.

고등광기술연구소의 연구진은 2006년 극초단 광양자빔의 100 TW 빔 라인을 이용하여 빗금각입사 엑스선 레이저를 국내 최초로 개발하는 데에 성공하였다. 그림 3(a)는 빗금각입사 엑스선 레이저의 실험 개략도 및 엑스선 레이저의 분광 이미지를 보여준다. 본 연구에서는 7 mm 길이의 은 매질을 레이저 매질로 사용하였으며, 먼저 0.5 J의 에너지와 300 ps의 펄스폭을 가지는 전단 펄스(Pre-pulse)를 원통 렌즈(Cylindrical lens)를 이용하여 은 매질에 선집속하였다. 1.5 J의 에너지와 8 ps의 펄스폭을 가지는 주 펄스는 75 cm 오목거울을 통해 집속하여 은 매질에 18°의 각도로 비스듬히 입사되었다. 이때 전단펄스와 주펄스는 350 ps의 시간차를 두고 매질에 입사시켰다. 그림 3(a)의 하단 분광 이미지는 위와 같은 조건에서 은 매질로부터 발생된 13.9 nm 파장의 엑스선 레이저의 분광 신호를 보여준다. 이렇게 발진한 빗금각입사 엑스선 레이저의 펄스당 약 1 μJ이었다.

그림 3(b)는 광학장 이온화 엑스선 레이저 실험의 개략도 및 분광이미지를 보여준다. 본 연구에서는 1 J의 에너지와 30 fs의 시간폭을 가지는 원편광된 레이저 펄스를 Kr (32.8 nm), Xe (41.8 nm) 가스 매질에 집속하여 광학장 이온화 엑스선 레이저를 발진시켰다. 이로써 고등광기술연구소의 연구진은 빗금각입사 방식과 광학장 이온화 방식을 이용하여 다

Fig. 4. GRIP X-ray laser pumped by single-profiled pulse. (a) temporal profile of pumping laser (b) x-ray laser spectrum.

양한 파장의 엑스선 레이저를 발진시키는 기술을 갖추게 되었다.

빗금각입사 방식의 엑스선 레이저는 전단 펄스와 주 펄스를 펌핑 레이저 빔을 나누어 각각 광학계를 설치하기 때문에 광학계 구성이 복잡하고, 두 펄스를 시공간적으로 정렬하는 것이 매우 어렵다. 고등광기술연구소의 연구진은 주펄스의 시간적 모양을 변화시켜 전단펄스와 주펄스를 나누지 않고 단일 펄스를 주입하여 엑스선 레이저를 발생시키는 단일펄스주입 빗금각입사 엑스선 레이저 방식을 개발하여 기존 빗금각입사 엑스선 레이저의 문제점들을 상당부분 해결하였다.^[12] 단일펄스주입 빗금각입사 방식에서 전단 펄스를 사용하지 않고, 주펄스의 시간적 모양을 그림 4의 (a)에서 보는 바와 같이 조절해 주어 엑스선 레이저를 발진시킨다. 주펄스의 시간적 모양이 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 시간적으로 앞선 부분의 분포가 늘어남에 따라 엑스선 레이저가 강하게 발진하는 것을 확인할 수 있다 (그림 4(b)). 주펄스의 앞단에 에너지를 높여주면, 펄스 앞단 부분이 전단펄스와 비슷한 역할을 하

REFERENCES

- [12] 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).

Fig. 5. Scheme of harmonic seeded x-ray laser using GRIP x-ray laser pumped by single-profiled pulse and obtained spectral images. From the top of spectra, x-ray laser, high-order harmonic, and harmonic seeded x-ray laser.

게 되어 엑스선 레이저가 발전하게 되는 원리이다. 단일펄스 주입 빔감각입사 방식의 엑스선 레이저도 기존의 빔감각입사 엑스선 레이저와 같이 펄스당 약 1 μ J의 출력 에너지를 가지고 있었다. 이와 같이 단일 펄스 주입 빔감각 엑스선 레이저는 기존의 빔감각 엑스선 레이저의 광학계 구성을 획기적으로 단순화하여, 엑스선 레이저를 매우 쉽고 안정적으로 발전시킬 수 있는 신기술이다.

고등광기술연구소의 연구진은 안정적인 빔감각입사 엑스선 레이저를 개발함에 따라 고차조화파 주입 엑스선 레이저 연구를 진행하였다. 그림 5는 단일펄스주입 빔감각입사 순은 엑스선 레이저를 이용한 고차조화파 주입 엑스선 레이저 개발의 개략도와 분광 신호를 보여준다. 아래의 분광신호는 엑스선 레이저 신호, 고차조화파 신호, 증폭된 분광 신호를 보여준다. 이와 같은 기초적인 연구로 고차조화파를 13.9 nm 파장의 엑스선 레이저 매질을 이용하여 15배 증폭하는 결과를 얻었다.^[13]

고등광기술연구소의 연구진은 빔감각 입사 엑스선 레이저와 광학장 이온화 엑스선 레이저를 개발하는 데에 성공하여, 국내에서는 처음으로 엑스선 레이저 연구를 본격적으로 시작하였다. 단일펄스주입 빔감각입사 엑스선 레이저를 개발함으로써 엑스선 레이저를 쉽고 안정적으로 발전시키는 기술을 확보함으로써, 향후 응용 기술 개발을 수월하게 수행할 수 있게 되었다. 또한 최근에는 고차조화파를 엑스선 레이저 매질을 이용하여 증폭하는 기술 및 엑스선 레이저 응용 기술을 개발하고 있다. 국내의 엑스선 레이저 연구는 미국이나 유럽의 연구진에 비해 시기적으로는 늦었지만, 극초단 광양자빔 시설이 구축되어감에 따라 새로운 기술들을 개발하면서, 빠르게 발전해가고 있다.

3. 엑스선 레이저의 응용

엑스선 레이저는 파장이 짧고 결맞음성을 가지고 있고 펄스당 출력이 높아, 엑스선 간섭계 및 홀로그래피, 분광학 등에 다양하게 응용할 수 있다. 2000년대에 들어오면서 소형 장비로도 반복률이 높은 엑스선 레이저를 발전시킬 수 있게 되어 응용기술 개발이 본격적으로 시도되었다. 특히 이 시기부터 품질이 높은 연엑스선 거울 및 Zone plate 등의 광학소자를 이용할 수 있게 되어, 응용 연구 개발이 활성화될 수 있었다.

고밀도 플라즈마의 경우 가시광이 투과하지 않아 플라즈마의 상태를 연구하는 데에 어려움이 있었지만, 엑스선 레이저의 짧은 파장을 이용하면 고밀도 플라즈마의 전자 분포를 얻을 수 있다. 엑스선 레이저를 이용한 고밀도 플라즈마 진단 연구는 LLNL의 연구진에 의해 90년대 중반에 수행되었다. LLNL 연구진은 15.5 nm 파장을 가지는 Yttrium 엑스선 레이저를 이용하여 Mach-Zehnder 간섭계를 구축하고, 이를 이용하여 CH에서 발생하는 플라즈마의 전자밀도를 측정하였다.^[14] 그 이후 2002년에는 R. F. Smith 등의 연구진이 회절격자 쌍을 이용한 엑스선 레이저 간섭계 개발을 보고하였으며,^[15] 비슷한 시기에 일본 Osaka 대학 연구진은 Lloyd 거울을 이용한 간섭계를 개발하였다.^[16]

엑스선 레이저는 10 nm 근처의 짧은 파장을 가지고 있기 때문에, 회절광학소자를 이용하여 엑스선 현미경을 구성하면 100 nm 이하의 분해능을 가지는 나노 현미경을 개발할 수 있다. 미국의 콜로라도 대학의 J. J. Rocca 교수와 그 연구진은 모세관방전 엑스선 레이저(Capillary Discharge X-ray Laser)와 GRIP 엑스선 레이저를 개발하고 응용연구를 활발히 진행하고 있는 연구진이다. 콜로라도의 연구진은 13.2 nm의 Cd 엑스선 레이저와 Zone plate를 이용하여 엑스선 레이저 현미경을 개발하였다.^[17] 그림 6은 콜로라도 연구진이 개발한 엑스선 레이저 현미경의 구성도와 획득 이미지이다. 콜로라도

REFERENCES

- [13] H. T. Kim, C. M. Kim, I. W. Choi, N. Hafz, H. C. Kang, J. H. Sung, T. J. Yu, S. K. Lee, K.-H. Hong, T. M. Jeong, Y.-C. Noh, D.-K. Ko, J. Tümmeler, P. V. Nickles, W. Sandner, K. A. Janulewicz and J. Lee, J. Opt. Soc. Am. B **25**, B76 (2008).
- [14] L. B. Da Silva, T. W. Barbee, Jr., R. Cauble, P. Celliers, D. Ciarlo, S. Libby, R. A. London, D. Matthews, S. Mrowka, J. C. Moreno, D. Ress, J. E. Trebes, A. S. Wan and F. Weber, Phys. Rev. Lett. **74**, 3991 (1995).
- [15] R. F. Smith, J. Dunn, J. Nilsen, V. N. Shlyaptsev, S. Moon, J. Filevich, J. J. Rocca, M. C. Marconi, J. R. Hunter and T. W. Barbee, Jr., Phys. Rev. Lett. **89**, 065004 (2002).
- [16] B. Rus, H. Daido, H. Tang, M. Nishiuchi, M. Kishimoto, M. Tanaka, T. Kawachi, N. Hasegawa, K. Nagashima, T. Arisawa and Y. Kato, Proc. of the 8th Int. Conf. on X-ray Lasers, AIP Conference Proc. **641**, 420 (1999).

Fig. 6. (a) x-ray laser microscopy setup and (b) image by x-ray laser microscope done by Colorado State University.

연구진은 이 엑스선 레이저 현미경을 이용하여 38 nm의 분해능을 얻는 데에 성공하였다. 또한 최근에는 엑스선 레이저를 이용한 엑스선 회절영상 기술까지 실현하여 소형 고반복률 엑스선 레이저를 응용하는 기술개발을 선도하고 있다.

엑스선 간섭계와 이미징 등의 응용 분야 외에도 다양한 응용기술이 개발되고 있다. 일본의 원자력 기구의 연구진은 엑스선 레이저가 자기영역(Magnetic domain)에서 산란되는 현상을 이용하여, 자기영역이 온도에 따라 변화하는 성질을 관측한 바 있다.^[18] 최근에는 엑스선 레이저를 이용한 나노 패턴 제작, 리소그라피, DNA 손상 관측 등의 응용 기술 개발이 활발하게 진행되고 있다.

국내에서도 극초단 광양자빔 시설의 구축에 따라 엑스선 레이저의 이용이 가능해지면서 고등광기술연구소의 연구진은 응용기술 개발을 진행하고 있다. 먼저 엑스선 레이저의 짧은 파장과 결맞음성을 이용한 회절 이미징 기술 개발을 수행하고 있다. 회절 이미징은 결맞음성을 가진 광원이 샘플에 의해 회절되는 영상을 관측하여, 이를 컴퓨터 알고리즘으로 재구성하는 이미징 기술이다. 회절 이미징 기술은 특별한 집속 광학계를 사용하지 않고 샘플에서 회절되는 영상만을 이용하기 때문에, 집속 광학계의 영향을 받지 않아, 고품질의 집속 광학계를 구성하기 힘든 엑스선 영역의 광원을 적용하기에 적

합하다. 고등광기술연구소의 연구진은 단일펄스주입 빔검각입사 방식의 엑스선 레이저를 이용하여 엑스선 회절 이미징을 시도하였다. 본 연구에서 단 1회 엑스선 레이저 펄스를 조사하여 얻은 회절이미지의 분해능은 약 190 nm였고, 여러 펄스를 조사하여 얻은 회절이미지의 분해능은 약 65 nm였다. 본 연구를 통해 엑스선 레이저를 이용하면 나노 영상 기술이 가능하다는 것을 확인하였다. 최근 고등광기술연구소의 연구진은 엑스선 홀로그래프 기술을 개발하는 등 엑스선 레이저 응용기술 개발을 활발히 진행하고 있다.

결론

이상으로 극초단 고출력 레이저를 이용한 엑스선 레이저 개발의 현황과 응용기술들에 대하여 살펴보았다. 초창기의 엑스선 레이저는 초대형 레이저 시설을 이용하여 개발하였으나, GRIP 및 OFI 엑스선 레이저 발전 기술 개발에 힘입어 탁상형 엑스선 레이저가 가능하게 되었다. 탁상형 엑스선 레이저들이 개발되면서 엑스선 레이저를 이용한 응용기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 국내의 고등광기술연구소 연구진은 단일 펄스 주입 빔검각 입사 엑스선 레이저 방식을 새롭게 개발하고, 고차조화와 주입 엑스선 레이저 개발 및 나노 이미징 기술 개발 등의 연구를 활발히 진행하고 있다. 올해로 레이저가 개발된 지 50년이 된 해이다. 50년 전 레이저가 처음 개발되었을 때는 지금처럼 집에 레이저를 이용한 장비를 가지고 있게 될지는 예상하지 못했을 것이다. 엑스선 레이저가 개발된 지는 올해로 26년째 되었다. 아직 엑스선 레이저는 광원 개발 기술에서 응용 기술 분야로 발전하고 있는 새로운 레이저 기술이다. 최근에는 나노 기술, 에너지 기술, 바이오 기술 등에 폭넓게 사용될 수 있는 중요한 광원으로 자리매김하고 있다. 엑스선 레이저 응용 기술이 점차 개발되면서, 25년 후 쯤에는 수많은 사람들이 엑스선 레이저를 이용하는 날이 올 것을 기대한다.

REFERENCES

- [17] G. Vaschenko, C. Brewer, F. Brizuela, Y. Wang, M. A. Larotonda, B. M. Luther, M. C. Marconi, J. J. Rocca, C. S. Menoni, E. H. Anderson, W. Chao, B. D. Harteneck, J. A. Little, Y. Liu and D. T. Attwood, Opt. Lett. **31**, 1214 (2006).
- [18] R. Z. Tai, K. Namikawa, M. Kishimoto, M. Tanaka, K. Sukegawa, N. Hasegawa, T. Kawachi, M. Kado, P. Lu, K. Nagashima, H. Daido, H. Maruyama, A. Sawada, M. Ando and Y. Kato, Phys. Rev. Lett. **89**, 257602 (2002).