자유전자레이저의 발전

DOI: 10.3938/PhiT.19.019

이병철·정영욱·박성희

Development of Free-electron Lasers

Byung Cheol LEE, Young Uk JEONG and Seong Hee PARK

Laser, invented in early 1960's, has played a major role in the advance of science and technology. Especially, free-electron lasers have some prominent features compared to conventional quantum lasers. One of them is that it can generate any color as you need. Free-electron lasers, in deed, have a preference for coherent light sources in the extreme ranges, like terahertz and X-ray, over conventional ones. In this paper, we review the main characteristics and principles of the free-electron lasers. And, we introduce the status of the terahertz free-electron lasers which are used for various advanced applications.

들어가는 글

1960년대 초에 처음 개발된 레이저는 그 짧은 기간 동안 인류의 과학 기술 발전에 가히 혁명적인 기여를 하였다. 레이저는 과학과 기술의 첨단분야뿐만 아니라, 우리가 느끼지 못

저자약력

이병철 박사는 카이스트 이학박사(1990)로서 한국전자통신연구원 선임연구원을 거쳐 1991년부터 한국원자력연구원에서 근무하고 있으며, 현재 동원구소 양자광학연구부 책임연구원과 UST 겸임교수로 재직 중이다. 국내 최초로 밀리미터파 대역 자유전자레이저 개발(1994) 및 테라헤르츠 대역 자유전자레이저 개발(1999)에 성공하였으며, 현재 초전도 가속기 전자빔 조사시설을 구축하여 운영하고 있다. (bcle4@kaeri.re.kr)

정영욱 박사는 카이스트 이학박사(1993)로서 1993년부터 한국원자력연구원에서 근무하고 있으며, 현재 동원구소 양자광학연구부 책임연구원과 UST 겸임교수로 재직 중이다. 보안 검색용 탁상형 고출력 테라헤르츠 자유전자레이저 개발을 수행하고 있다. (yujueng@kaeri.re.kr)

박성희 박사는 미국 듀크대학교 이학박사(1999)로서 2000년부터 한국원자력연구원에서 근무하고 있으며, 현재 동원구소 양자광학연구부 선임연구원과 UST 겸임교수로 재직 중이다. 세계 최 단파장 저장링 자유전자레이저 개발에 주도적으로 참여하였으며, 현재, 레이저 가속 전자빔 및 고에너지 방사선 발생·응용 기술 개발을 수행하고 있다. (shpark@kaeri.re.kr)

Fig. 1. Spectral band of electromagnetic wave and free-electron lasers.

하는 사이 매일 만지고 접하는 일상 속에도 스며들어와 있다. 이러한 놀라운 사실은 인간이 빛으로 사물의 많은 부분을 인식하듯이, 새로운 빛, 레이저가 새로운 인식을 가능케 했다는 단순한 인과관계로도 설명될 수 있다.

레이저에서 나오는 빛의 색은 하나이고 퍼지지 않는다. 그리고, 다른 광원과 비교해서 훨씬 강하다. 그러나, 일반적으로 레이저는 모든 색을 마음대로 골라서 발생시킬 수는 없다. 그래서 레이저는 종류마다 고유한 색이나 색의 영역을 가지게 된다. 지금까지 이름도 일일이 기억하기 힘든 수많은 종류의 레이저가 개발되었고, 현재도 개발되고 있다.

자유전자레이저(free-electron laser)는 이제까지의 레이저와 구별되는 새로운 특성이 있다. 그것은 어떠한 색의 빛도 마음대로 선택할 수 있다는 점이다. 특히, 이제까지의 레이저가 빛을 내기 어려웠던 적외선~원적외선과 자외선~엑스선

REFERENCES

- [1] H. P. Freund and T. M. Antonsen, *Principles of Free Electron Lasers* (Chapman & Hall, London, 1992).
- [2] C. A. Brau, *Free Electron Lasers* (Academic Press Inc., New York, 1990).
- [3] The Institute of Electrical Engineering of Japan, *Free Electron Laser and Its Application* (Corona, Tokyo, 1990).
- [4] P. Luchini and H. Motz, "Undulators and Free-Electron Lasers", ISBN 0-19-852019-0 (Clarendon Press, London, 1990).
- [5] T. C. Marshall, *Free Electron Lasers* (Macmillan, New York, 1985).

Fig. 2. Schematic view and basic principle of free-electron laser.

Fig. 3. Illustration for bunching mechanism of free electrons interacting with periodic magnetic field and synchrotron radiation.

은 자유전자레이저가 가장 제격인 파장 영역이다.^[1-5] 자유전자레이저는 전자가속기에서 빛의 속도에 가깝게 가속된 전자빔을 교번자장기(undulator)라는 주기적인 자기장구조에 진행시킴으로써 운동에너지를 빛에너지로 전환하여 고효율, 고효율의 결맞는 빛(coherent light)을 발생시키는 장치이다. 자유전자레이저가 기존의 다른 레이저와 구별되는 가장 큰 차이점은 그림 1에서 나타난 바와 같이 테라헤르츠파에서부터 적외선, 가시광선, 자외선, X선 영역에 이르는 광범위한 파장 영역에서 광역을 제공할 수 있다는 점이다. 특히, 기존의 마이크로파 튜브나 레이저 기술로 얻기 힘든 테라헤르츠파(THz)나 X선 영역에서는 자유전자레이저가 가장 강력한 광원으로 꼽히고 있다.

이 논문에서는 자유전자레이저의 원리와 특징, 그리고 주요 요소기술에 대해 정리한 다음에, 최근 국내외에서 활발하게

개발되고 있는 테라헤르츠파 자유전자레이저를 소개하고자 한다. 이들은 주로 공진기 형태로 동작하는 자유전자레이저이다.

국내외적으로 새로운 과학기술의 도구로 부상하면서 막대한 투자가 이루어지고 있는 X선 자유전자레이저도 또 다른 주요 분야이다. 우수한 성능을 가진 전자총과 수십억 전자볼트의 높은 에너지, 100여 미터에 달하는 초고성능의 교번자장기 그리고 펨토초의 극초단 시간 제어 기술 등 기술적인 차이와 중요도를 고려하여 다음 기회에 다루는 것이 바람직하다고 판단하여 본 논문에서는 다루지 않는다.

자유전자레이저의 원리 및 특성

자유전자레이저는 전자빔의 운동에너지를 빛 에너지로 바꾸는 장치인데, 기본적으로 원하는 파장의 전자기파를 증폭시키기 위해서 전자기파와 나란히 진행되는 전자빔으로부터 에너지를 도출해내도록 고안된 장치라 생각하면 된다. 실제로 에너지가 교환되기 위해서는 전자기파와 전자빔 사이에 매개수단이 필요한데, 이는 횡파인 전자기파의 전기장과 나란하게 전자빔이 속도성분을 갖도록 해줌으로써 가능해진다. 결국 전자빔을 진행방향에 수직하게 조금이라도 움직이도록 만들어 주면 되는데, 이 장치가 바로 교번자장기(undulator)이다.

그림 2에서 보듯이 전자가속기로부터 공급되는 높은 에너지의 전자빔이 자기장의 극성이 교대로 바뀌게 고안된 교번자장기를 통과하게 되면 자기장에 의한 힘에 의해서(Lorentz 힘이라고 부른다) 자기장에 수직한 평면에서 좌우로 진동운동을 하게 된다. 대개의 교번자장기는 수 cm 정도의 주기(λ_w)로 만들어져 전체 길이가 보통 수 m 정도 된다. 교번자장에서 곡선궤적을 따라 운동하는 전자는 빛을 방출하게 되는데, 전자가 빛의 속도에 가깝게 움직이면 이 빛은 거의 전자빔의 진행방향으로만 집중되어 방향성을 가지게 된다. 또한 방출되는 빛의 파장은 도플러효과 때문에 다음 식처럼 교번자장기의 주기에 비해 매우 짧아진다 (이를 자유전자레이저의 공명조건이라고 부른다).

$$\lambda_R = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} (1 + K^2/2), \quad K = 0.935 B_w [T] \lambda_w [cm] \quad (1)$$

여기에서 λ_w 는 교번자장기의 주기이고 B_w 는 교번자장기의 자기장 세기이다. γ 는 전자빔의 에너지[eV]를 전자의 정지질량에너지 0.511 MeV로 나눈 것으로 상대론적 에너지 인자(relativistic energy factor)라고 한다. 예를 들어, 100 MeV의 에너지를 가진 전자빔이라면 γ 는 200 정도 되고 2 cm 정도의 주기를 지닌 교번자장기를 사용할 경우 출력되는 빛

Fig. 4. Synchrotron radiation from relativistic electrons passing through periodic magnetic field.

Fig. 5. (a) Incoherent radiation from randomly distributed electrons and (b) coherent radiation from bunched electrons passing through periodic magnetic field.

의 파장은 약 0.5마이크로미터가 된다. 공명조건에서 알 수 있듯이 전자빔의 에너지가 충분히 높으면 X-선까지 짧은 파장의 빛도 만들어 낼 수 있게 된다.

자유전자레이저 빛의 발생에서 전자빔의 군집(bunching) 개념이 중요하다. 처음에 전자빔이 교번자장기에 입사될 때는 전자빔의 공간적인 분포가 균일하고, 각각의 곡선례적 위의 전자들로부터 방출되는 자발방사광의 위상이 제멋대로이기 때문에, 결국 빛의 세기는 개개의 전자들로부터 방출되는 빛들의 산술적인 합에 비례하는 출력을 내게 된다. 그러나 교번자장기 속을 진행하면서 전자빔과 빛과의 공명적인 상호작용에 의해 전자빔이 주기적으로 군집(bunching)되고, 이에 따라 빛의 세기가 전자의 개수의 제곱에 비례하게 된다. 전자빔의 군집이 일어나는 과정에 대해 자세하게 기술하겠다.

그림 3에서와 같이 교번자장기를 지나가는 전자빔이 교번자장기의 자기장과 전자기파(빛)의 전기장에 의해 받는 힘은

$$\vec{F} = -e(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}_w) \quad (2)$$

이 되고, 이에 따라 전자빔의 에너지 변화율은

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{V} = -e \vec{E} \cdot \vec{V} = -e E(z,t) V(z,t) \cos(\psi) \quad (3)$$

이 된다. 여기에서 전자의 속도를 나타내는 $V(z,t)$ 는 교번자장기와 같은 주기를 가진 sine함수이고, 전자기파(빛)의 전기장을 나타내는 $E(z,t)$ 는 빛의 파장과 같은 주기를 가진 sine함수이다. $\cos(\psi)$ 는 전자의 속도벡터와 빛의 전기장 벡터의 위상관계를 나타낸다. 어떤 전자는 $\cos(\psi) < 0$ 이기 때문에

에너지를 얻고, 어떤 전자는 $\cos(\psi) > 0$ 이기 때문에 에너지를 잃는다. 결국 그림 4와 같이 전자빔의 공간적인 분포가 빛의 파장과 같은 주기로 변조(modulation)되게 된다.

군집된 전자빔에서 발생하는 빛의 세기는 위상이 제멋대로인 전자빔에서 발생하는 빛의 세기에 비해 훨씬 높다. 하나의 전자가 교번자장기를 지날 때 발생하는 전자기파의 전기장의 세기를 A , 위상을 ψ_i 라 하고 전자의 개수를 N_e 라 하면, 전자빔에서 발생하는 빛의 세기는

$$P = \left| \sum_n A e^{i\psi_i} \right|^2 \quad (4)$$

로 된다. 전자빔이 그림 5(a)와 같이 군집되어 있지 않을 때는 각 전자에서 발생하는 빛의 위상이 각각 제멋대로이므로 빛의 세기는

$$P_{SP} = \left| \sum_n A e^{i\psi_i} \right|^2 = A^2 \left| \sum_n e^{i\psi_i} \right|^2 = A^2 N_e \quad (5)$$

로 되어 전자의 개수에 비례하게 된다. 그러나 전자빔이 그림 5(b)와 같이 군집되어 있으면 각 전자에서 발생하는 빛의 위상(ψ_0)이 모두 같으므로

$$P_{FEL} = \left| \sum_n A e^{i\psi_i} \right|^2 = A^2 \left| \sum_n e^{i\psi_0} \right|^2 = A^2 N_e^2 \quad (6)$$

로 되어 전자빔의 개수의 제곱에 비례하게 된다.

다른 종류의 레이저의 작동원리가 밀도반전(population inversion)과 유도방출(stimulated emission) 등의 양자역학적 개념을 사용하지 않고는 이해되지 않는 반면, 자유전자레이저의 작동원리는 고전 전자기학으로 모두 설명될 수 있다.

자유전자레이저의 가장 큰 장점은 광대역 연속 파장가변성과 임의파장 발진 가능성이다. 다른 종류의 레이저는 원자 또는 분자의 에너지 준위가 변할 때 발생하는 빛을 이용하기 때문에 매질에 따라 고유한 주파수만을 낼 수 있으나 자유전자레이저는 식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 전자빔 에너지나 교번자장기 자장의 세기와 주기를 변화시킴으로써 넓은 영역에서 연속적으로 파장을 변화시킬 수 있다. 전자빔의 에너지에 따라 밀리미터파에서 X선까지 모든 파장영역에서 발진이 가능하기 때문에 다른 종류의 레이저로는 얻을 수 없는 어떠한 파장이라도 얻을 수 있다.

물론, 한 대의 자유전자레이저가 테라헤르츠파에서부터 X선까지 모든 파장 영역을 낼 수 있는 것은 아니고, 사용하는 전자속기의 에너지 범위에 따라 테라헤르츠파, 적외선, 가시광선, 자외선, X선 등의 영역의 레이저 빛을 내게 된다. 이와 같이 자유전자레이저의 파장은 전자빔의 에너지에 따라 크게 달라진다. 자유전자레이저에 사용되는 가속기의 종류는 정전

가속기, 고주파 선형가속기, 마이크로트론, 전자저장링(electron storage ring) 등 다양하며, 가속기의 종류에 따라 전자빔의 에너지 범위가 달라지고 따라서 자유전자레이저의 파장도 달라진다. 자유전자레이저는 또, 종래의 레이저에 비하여 출력을 대단히 크게 할 수 있고 에너지 변환효율이 높은 장점도 있다. 그리고 종래의 레이저에서와 같은 매질의 열화현상이 없어 수명이 길고, 연속운전이 가능하다.

자유전자레이저의 요소 기술

1. 전자총

자유전자레이저 개발에 있어서 중요한 요소 중의 하나는 고품질의 전자빔원을 개발하는 것이다. 전자빔의 품질을 나타내는 척도로서 밝기(brightness)라는 물리량을 사용하는데, 이는 전자빔의 전류값을 에미턴스(emittance)의 제곱으로 나눈 값이다. 즉, 밝기(B)는

$$B = \frac{I}{\epsilon^2} \quad (7)$$

로 정의되는데, 여기에서 I 는 전류를 나타내고, 에미턴스(ϵ)는 전자빔의 위상공간에서의 면적을 나타내는 것으로서, 전자빔의 단면적과 퍼짐각을 곱한 값이다. 밝기가 높다는 것은 전자빔의 전류값이 높고 단면적이 작으며, 퍼짐성이 작다는 것을 의미한다. 자유전자레이저에서 전자빔의 밝기가 중요한 것은, 밝기가 높을수록 이득이 높아지기 때문이다. 그러면 보다 낮은 에너지의 전자빔으로도 짧은 파장의 레이저빔을 만들 수 있고 이에 따라 자유전자레이저 시스템의 크기를 줄일 수 있는 것이다.

전자빔의 품질을 나타내는 또 다른 척도는 에너지분산($\Delta\gamma/\gamma$)인데, 이는 전자빔 다발의 에너지분포 폭을 평균 에너지로 나눈 값이다. 자유전자레이저 동작을 위해 요구되는 에미턴스와 에너지 분산을 정량적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\epsilon < \lambda_R, \quad \frac{\Delta\gamma}{\gamma} < \frac{2}{N_w}, \quad (8)$$

여기에서 λ_R 는 자유전자레이저의 발진 파장이고, N_w 는 교번자장기의 주기 수이다. 이 식에서 알 수 있듯이 짧은 파장의 자유전자레이저일수록 에미턴스와 에너지분산이 더 작은 전자빔을 필요로 한다.

종래에 사용되어 오던 열음극(thermionic cathode) 전자총에서는 전자들의 열운동 때문에 전자빔의 에미턴스가 높아서 고효율 자유전자레이저의 전자빔원으로는 한계가 있는데, 최근 자유전자레이저용 고품질 전자빔원으로 개발된 것이 광전자총이다. 이것은 금속 또는 반도체 광음극에 레이저 펄스를

조사하여 발생하는 광전자빔을 DC 정전기장 또는 고주파로 가속하는 장치이다. 광전자빔의 초기 에너지는 레이저의 에너지와 광음극 재료의 일함수(work function)의 차이에 해당하는 값이므로 초기 에미턴스 값이 거의 0에 가깝다. 또한, 광전자총의 전자빔 파형이 레이저 빔의 파형과 같기 때문에 짧은 펄스의 전자빔을 만들 수 있고, 따라서 종래의 열음극을 사용하는 자유전자레이저에서 전자빔의 펄스를 짧게 만드는 장치가 필요 없어지는 장점도 있다. 광전자총용 광원으로는 모드동기(mode-locked)된 자외선 레이저를 사용하고, 광음극(photo-emitter) 재료로는 Ce_2Te 등 광전자빔 발생 양자효율이 높은 재료를 사용한다.

2. 전자가속기

자유전자레이저는 발진 파장 및 출력에 따라 전자빔의 질, 에너지, 전류 등의 요구 조건이 다르고, 이에 따라 적절한 형태의 가속기가 사용되어 왔다. 테라헤르츠와 영역의 자유전자레이저에는 전자빔의 에너지가 낮은 정전가속기(electrostatic accelerator)나 마이크로트론(microtron)이 사용되고 있고, 적외선보다 짧은 파장의 자유전자레이저에는 고주파 선형가속기(RF linear accelerator)나 저장링(storage ring)이 사용되고 있다. 고주파 선형가속기는 상전도 가속기와 초전도 가속기로 나뉘어진다.

(1) 정전 가속기(Electrostatic Accelerator)

두 도체 사이의 전위차에 의해 형성된 전기장으로 전자빔을 가속시키는 장치를 통칭 정전가속기라고 한다. 정전 가속기는 다른 가속기에 비해 전자빔의 질이 좋고, DC로 동작 가능하다는 장점이 있다. 그러나 전자빔의 전류가 제한되어 있는데, 전자빔 회수 방법으로 이를 극복할 수 있다. 하지만 정전 가속기로는 전자빔의 에너지를 약 5 MeV 이상으로 얻기는 힘들다. 따라서 밀리미터파나 원적외선 영역의 자유전자레이저를 구동하는데 적합하다.

(2) 고주파 선형 가속기(RF Linac)

정전 가속기의 제한된 전자빔의 에너지를 극복하는 방법으로 개발된 가속기로 고주파 선형 가속기가 있다. 이는 직선으로 배열된 가속공동(cavity) 내부에 존재하는 고주파에 의해 전자빔을 가속시키는데, 가속공동의 갯수를 늘림으로써, 원하는 에너지를 가진 전자빔을 얻을 수 있다. 적외선 자유전자레이저용으로는 수십 MeV의 고주파선형가속기가, X선 자유전자레이저용으로는 수 GeV의 고주파선형가속기가 사용된다. 단위길이 당 가속공동에서 얻는 에너지를 가속구배(acceleration gradient)라 하는데, 대개의 상전도 가속기가 약 10 MeV/m

Fig. 6. Schematics of a hybrid electromagnet undulator developed for the KAERI THz FEL.

의 가속구배를 갖고 있다. 이런 가속기로 1 GeV의 에너지를 얻으려면 약 100 m의 가속관이 필요하게 된다. 전자가속기 시스템의 규모를 작게 하기 위해 높은 가속구배를 가진 가속관 기술개발이 매우 중요한데, 가속관의 크기를 줄이거나 (즉, 공진주파수를 높임) 효율이 좋은 초전도 가속관 개발이 활발히 진행되고 있다.

(3) 저장링(Storage Ring)

저장링에서는 여러 개의 전자빔 펄스가 링을 연속적으로 순환하고 있다. 전자빔의 질이 좋고 에너지가 높기 때문에 가시광선에서 UV까지의 짧은 파장의 자유전자레이저를 구동시키는데 적합하다. 전자빔이 저장링을 안정적으로 순환하기 위해서는 전자빔의 에너지 분산이 작아야 한다. 자유전자레이저에서 전자빔과 전자기파간의 상호 작용이 클수록 전자빔의 에너지 분산은 커지는데, 에너지 차이는 곧 속도차이로 전자빔의 시간 폭 혹은 전자빔 길이(bunch length)가 길어진다. 길게 늘어난 전자빔의 첨두전류(peak current)는 FEL 상호작용이 일어나기 이전보다 낮아지면서 FEL 이득 또한 줄어들게 되고 결국 증폭 효과는 포화 상태에 다다른다. 이러한 메카니즘 때문에 저장링으로 구동되는 자유전자레이저는 높은 출력을 얻을 수 없다는 단점이 있다.

3. 교번자장기(Undulator)

교번자장기는 주기적으로 방향이 바뀌는 자기장을 발생하여 전자빔이 사행운동을 하게 하는 장치인데, 자기장 발생 방법에 따라 크게 전자석형과 영구자석형이 있다. 전자석형은 세기를 쉽게 변화시킬 수 있고 균일한 자기장을 얻을 수 있는 장점이 있으나 필요한 자기장을 발생시키기 위해서는 높은 전류(수 kA)가 필요하다. 전자석형 교번자장기 중에는 자

기장 강도를 높이기 위해 초전도 코일을 사용하는 것도 있다. 영구자석형은 크기에 비해서 비교적 센 자기장을 발생시킬 수 있으나 자기장 강도를 변화시키는 별도의 기계구조가 필요하다. 그리고, 자석 제조 및 배열상의 오차에 따라 자기장 강도의 불균일성을 해소하기 위한 복잡하고 세심한 방법이나 절차가 추가적으로 필요하다. 자기장 분포를 균일하게 만들기 위해 영구자석과 함께 상자성체 pole을 사용하여 자석의 가공 및 자화오차를 상쇄시키는데, 이를 혼합형 전자석 교번자장기(hybrid electromagnet undulator)라고 한다. 그림 6은 한국원자력연구원에서 개발한 혼합형 교번자장기의 구조를 나타내는데, 이 교번자장기는 구조가 간단하고 소형이면서도 균일하고 높은 자기장을 발생시킨다.

자유전자레이저의 탄생

보통의 광학레이저에서 전자들이 원자나 분자에 속박되어 있는 것과는 다르게 자기장에 의해 유도되는 일정한 공간에서 자유롭게 움직인다는 의미에서 자유전자레이저라는 이름이 붙게 되었다. 전자빔을 이용하여 결맞는 빛을 만드는 연구는 1920년대 초에 전자빔에 의해 전자기파가 발생한다는 사실로부터 출발하였는데, 속도변조와 이에 따른 전자들의 군집화(bunching)의 개념이 정립되면서 1930년대 후반에 클라이스트론과 마그네트론 등의 마이크로파를 발생시키는 장치들이 개발되었다. 이후 2차 세계대전 중에 군사목적의 레이더가 필요해지면서 진행파관(traveling wave tube; TWT) 등 보다 개선된 장치가 개발되었고, 1950년대에는 자이로트론(Gyrotron)도 개발되었다.

1960-70년대에 다양한 종류의 레이저들이 개발되어 가시광선 영역에까지 결맞는 빛을 얻기에 충분하게 되면서 전자빔을 이용한 광원의 개발이 주춤해지다가, 기존의 레이저가 담당할 수 없는 원적외선(far infrared) 영역의 광원이 필요해지면서 자유전자레이저가 개발되었다.

자유전자레이저의 개념은 1951년에 H. Motz가 전자빔을 주기적인 자기장 구조를 통과하면 전자기파가 발생할 수 있다고 제안한 데에서 출발하였다.^[6] 곧이어 필립스 사가 “ubitron”이라는 개량된 원시 자유전자레이저의 최초발전에 성공하였는데, 당시의 진행파관(TWT)에 비해 출력이 낮아서 주목을 받지 못하였다. 그러다가 1971년에 스탠퍼드 대학의 Madey가 가시광선영역에 이르기까지 발전이 가능한 현재의 자유전

REFERENCES

- [6] H. Motz, J. Appl. Phys. **22**, 527 (1951).
- [7] J. M. J. Madey, J. Appl. Phys. **42**, 1906 (1971).

자레이저에 해당되는 새로운 광원의 이론을 제시하고,^[7] 1975년에 10마이크로미터의 빛을 증폭시키는 데 성공하면서 오늘에 이르게 되었다.

테라헤르츠파 자유전자레이저

테라헤르츠파는 가시광선과 전자파의 중간에 해당하는 빛으로, 주파수로는 10^{12} 헤르츠(hertz, Hz)이고, 파장으로는 수백 마이크로미터 영역이다. 보통 가시광선의 파장이 0.3–0.7 마이크로미터 정도이므로 테라헤르츠파의 파장은 이보다 수백 배 더 길다. 흔히 알려져 있는 원적외선 중에서도 파장이 아주 긴 영역이다. 테라헤르츠파 광자 하나의 에너지는 수십 밀리전자볼트(meV)이다.

테라헤르츠파는 가시광선이나 X선과는 다른 전파 특성을 가지고 있다. 예를 들면, 가시광이나 적외선은 투과하지 못하는 종이, 나무, 옷감, 플라스틱 등의 물질들을 잘 투과하는가 하면, 금속에서는 반사되고 물에서는 잘 흡수된다. 자연계를 구성하는 수많은 분자들의 운동에너지나 결합에너지가 수십 meV이기 때문에, 테라헤르츠파로 이들 분자의 구조나 특성을 분석할 수 있다. 반도체나 초전도체의 경우도 내부 미세 에너지 밴드가 대개 위의 에너지 영역을 지닌다. 즉, 테라헤르츠파는 우리를 둘러싸고 있는 많은 물질과 생명체를 탐구하는데 가장 유용한 도구가 될 수 있다.

테라헤르츠파 영역이 오랫동안 불모지로 남아있었던 주된 이유는 높은 출력이면서 넓은 대역의 테라헤르츠파를 발생시키는 쓸 만한 광원을 개발하기가 힘들었기 때문이다. 즉, 마이크로파 영역과 광학 파장 영역의 중간에 있는 이 대역에서는 강한 빛을 발생시키는 좋은 방법을 찾지 못했었다. 그러나, 최근 약 10년 동안에 다양한 테라헤르츠파 광원이 개발되었고, 이에 따라 테라헤르츠파 응용연구도 활발해지고 있다.

자유전자레이저는 일찍부터 테라헤르츠파 대역의 가장 이상적인 광원으로 인정받고 있는데, 그 이유는 다른 광원에 비하여 출력 강도가 최소 수백 배에서 수만 배에 이를 정도로 강하고, 분광 특성이 우수하며 자유롭게 파장을 선택할 수 있다는 점 등 때문이다. 하지만 자유전자레이저는 개발비용과 기술의 난이도가 높고 장치의 크기가 거대하여 많이 개발되지 못한 단점이 있었다. 현재 전 세계적으로 미국, 유럽(네덜란드, 독일, 프랑스, 이탈리아), 러시아, 일본, 중국, 그리고 우리나라 등에서 약 10여 개의 테라헤르츠 자유전자레이저 장치가 가동되고 있다.

전 세계적으로 몇 가지 유형의 테라헤르츠 자유전자레이저가 개발되었거나 개발되고 있다. 가장 먼저 개발된 것은 다양한 이용자들에게 강력하고 우수한 특성의 테라헤르츠 빔을

Fig. 7. Photograph of a THz free-electron laser at UCSB, which has operating wavelength range of 63–2500 μm .

Fig. 8. Photograph of a THz free-electron laser at FELIX of Netherlands, which has operating wavelength range of 4–250 μm .

제공하는 이용자 시설(user facility)이다. 그리고, 테라헤르츠 영역의 광화학반응, 새로운 물질의 생산, 고부가가치 재료 처리 등의 역할을 담당할 평균출력이 400 W에 이르는 고출력 테라헤르츠 자유전자레이저가 개발 실증되었다. 그 대표적인 것이 러시아 부드케핵물리연구소의 NovoFEL이다. 마지막으로 최근 개발이 활성화되고 있는 소형 테라헤르츠 자유전자레이저이다. 보안검색 및 의료 현장에서 사용이 가능한 수 W 급 이상의 평균출력을 가지면서도 장치의 크기가 탁상형 수준인 장치이다. 현재에는 미국을 중심으로 비밀리에 군사용으로 개발되고 있다. 한국원자력연구원에서도 소형 테라헤르츠 자유전자레이저 분야에서는 약 10여 년 전부터 연구개발에 착수하여 기반기술을 확보하였고 최근 공항 등에서 사용될 수 있는 전신검색기용 탁상형 테라헤르츠 자유전자레이저를 개발하고 있다.

가장 먼저 개발된 테라헤르츠파 자유전자레이저 이용자 시설은 1980년대 후반에 구축된 UCSB의 테라헤르츠 과학센터이다. 정전형 가속기를 사용하는 이 시스템은 원적외선에서 밀리미터파에 이르는 테라헤르츠 전 영역에서 동작한다. 특히, 테라헤르츠와 펄초 레이저 등을 결합하여 물질 및 생명

Fig. 9. Photograph of a high-power THz free-electron laser at the Budker Institute of Nuclear Physics in Russia.

공학 연구에 있어서 새로운 지평을 열었다.

이후 유럽연합은 네덜란드에 FELIX 자유전자레이저 연구 시설을 구축하여 최근까지 우수한 성과를 얻고 있다. FELIX 역시 물성, 생명공학 분야에 있어서 우수한 연구 결과를 생산하고 있다. 이들 시스템은 높은 출력밀도를 이용하여 다른 테라헤르츠 광원이 보여주지 못하는 우수한 결과를 많이 양산하고 있다. 그 대표적인 것으로 1.5 THz에서 마이오글로빈의 광반응을 처음으로 측정한 UCSB의 결과^[8]와 3.45 THz의 박테리오텍신 진동모드를 이용한 구조변환 측정을 관측한 FELIX의 결과^[9] 등이 있다.

이들은 단순히 주요 생체조직에 대한 분광학 수준을 넘어서서 자유전자레이저의 높은 출력밀도를 이용한 구조 변화와 광반응을 유도할 수 있었다는 면에서 주목을 받았었다. 이렇듯 자유전자레이저는 테라헤르츠 영역에서 새로운 물질의 합성 및 생산 등의 역할을 담당할 수 있는 유일한 고출력 광원이다.

고출력 테라헤르츠 광원의 새로운 가능성을 보인 러시아 부드커핵물리연구소의 NovoFEL은 1~3 THz 영역에서 평균출력 400 W를 달성하였다.^[10] 상전도 가속기를 사용하는 에너지회수형 시스템으로 1단계에서 테라헤르츠의 고출력 자유전자레이저빔을 발생하고 2단계에서는 에너지를 높여서 적외선 영역으로 파장을 확장한다. 이 강력한 발생장치는 테라헤르츠 분광학 등 탐구의 도구에서 벗어나 단백질 분석, 광반응이나 물질개질, 새로운 재료 생산 등 에너지를 직접 이용하는 적극적인 활용이 가능함을 보여주었다. 그리고, 최근에는 상온에서 동작하는 마이크로볼로미터 평면 어레이를 사용하여 초당 90프레임의 테라헤르츠 실시간 영상을 실현하기도 하였다.

국내 테라헤르츠 자유전자레이저 개발 현황

현재 보안검색이나 의료 현장에서 실시간 검색이나 영상에

필요한 테라헤르츠 평균 출력은 약 1 W 이상으로 추정된다. 현재의 기술로 테라헤르츠 전 영역에서 이러한 세기의 출력을 발생시킬 수 있는 유일한 광원이 자유전자레이저이다. 하지만 현장에서 사용할 수 있는 수준의 탁상형 크기와 높지 않은 개발비를 실현하는 문제는 여전히 숙제로 남아 있었다. 한국원자력연구원에서는 이러한 문제점에 주목하여, 그림 10과 같이 소형 마이크로트론 가속기를 이용하여 기존 장치보다 크기를 대폭 줄인 소형 테라헤르츠와 자유전자레이저 개발에 성공하였다.^[11] 한국원자력연구원에서는 소형인 마이크로트론 가속기를 선택하였다. 그리고, 가속기의 크기와 가격에 큰 영향을 미치는 고주파발생장치에 있어서는 저가이며 소형인 마그네트론을 사용하였다. 이 자유전자레이저는 그 크기가 $2 \times 3 \text{ m}^2$ 정도이며, 100~300마이크로미터의 파장대역에서 레이저를 발생시킬 수 있다.

한국원자력연구원에서는 강력한 테라헤르츠를 이용하여 다양한 응용 연구를 수행하였다. 테라헤르츠 대역에서 물성 분석, 분광학연구, 표면물리, 이미징 연구 등을 수행하였다.^[12] 그리고, 고출력 테라헤르츠와 자유전자레이저를 활용하여 다른 저출력의 광원이 접근하지 못하는 새로운 응용분야를 개척하였다. 예를 들면 특정 효소의 경우 테라헤르츠빔을 조사하면 광화학반응으로 합성될 수 있음을 확인하였다.

한국원자력연구원에서는 최근 개발된 기술을 바탕으로 공항, 항만, 병원 등에서 사용할 수 있는 소형의 탁상형 자유전자레이저 개발을 수행하고 있다. 이러한 장치는 미국 등에서 국방용으로 개발되고 있으며, 러시아, 일본 등에서도 최근 기술개발이 이루어지고 있다. 테라헤르츠 산업 분야의 성장과 함께 이러한 소형 고출력 테라헤르츠 발생장치의 수요가 점차 높아질 것으로 기대를 모으고 있다.

한국원자력연구원에서 처음 개발된 소형 마이크로트론 테라헤르츠 자유전자레이저는 다른 자유전자레이저에 비해서 소형화에 유리한 기술이다. 테라헤르츠 자유전자레이저를 소형화하는 데 있어서 가장 어려운 점은 소형 가속기를 이용해서 소형의 교변자장기와 공진기에서 레이저 발진을 얻어야 한다는 점이다. 테라헤르츠의 긴 파장으로 인한 회절은 공진기 내에서의 손실과 함께 전자빔과의 효과적인 상호작용을 방해한다. 이러한 이유들로 인해서 일반적으로는 소형 가속기와 소형 공진기의 조합은 어렵다는 것이 잘 알려진 사실이다. 한국원자력연

REFERENCES

- [8] R. H. Austin, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **62**, 1912 (1989).
- [9] A. Xie, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 018102 (2002).
- [10] N. A. Gavrilov, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **575**, 54 (2007).
- [11] Y. U. Jeong *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **475**, 47 (2001).
- [12] Y. U. Jeong *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **575**, 58 (2007).

Fig. 10. Photograph of the KAERI THz free-electron laser (left) and experimental stations for THz security inspection.

구원은 최근 이러한 어려움을 극복하는 방안을 집중 개발하고 있다. 50 cm의 소형 가속기와 60 cm의 교변자장기와 공진기를 이용해서도 충분한 세기의 레이저 발진이 가능하다는 점을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 이 경우 전체 자유전자레이저 시스템의 크기는 길이 2 m 이내가 되며, 폭과 높이가 작아서 전체적으로 탁상 형태나 이동형 선반 형태로 제작이 가능할 것으로 기대된다. 이러한 소형 시스템은 공항, 항만, 주요 건물이나 시설에서 현장 설치나 이동이 가능하므로 테라헤르츠 보안검색 기술을 실용화하는 데 활용될 수 있다.

나오는 글

자유전자레이저는 가속기와 레이저 기술의 결합으로 약 30년 전 세상에 처음으로 선을 보였다. 1970년대 후반 미국 스탠퍼드 대학에서 존 매디 교수 (현재 하와이대 교수, 당시에는 대학원생)에 의해서 처음 개발된 이후 자유전자레이저는 기존의 레이저와는 달리 어떠한 파장의 빛도 자유롭게 발생시킬 수 있고, 고출력이 가능하다는 장점 때문에 선진국을 중심으로 활발히 개발되어 왔었다. 1980년대 냉전 말기에는 대륙간 탄도탄이나 인공위성을 요격하는 초고출력 레이저 무기로 적합하다고 판단하여, 미국과 구 소련이 경쟁적으로 막대한 예산을 투입하여 초고출력 시스템을 개발하기도 하였었다. 점차 1990년대에 들어서면서 반도체, 재료, 의료, 물리, 생물, 환경 분야의 기초 및 첨단 응용 연구를 목표로 한 시스템의 개발이 두드러졌다. 특히, 최근 들어서 장치 및 응용 분야에서 괄목할 만한 기술적인 발전이 이루어지면서 기존 레이저의 한계를 극복하는 새로운 광원으로 주목을 받고 있다.

자유전자레이저 개발과 관련하여 현재 활발히 연구개발이

이루어지고 있는 분야는 크게 X-선과 테라헤르츠 분야로 압축될 수 있다. 최근, 현재의 방사광 가속기를 잇는 차세대(제4세대) X-선 광원으로 과학자들의 많은 관심 속에 개발되고 있다. 기존 방사광 가속기보다 백만 배 이상 강력한, 그리고 펨토초의 극초단 X-선 광원은 미래의 과학과 기술 개발을 주도할 가장 강력한 도구의 하나로 인식되어 미국, 일본, 독일, 영국, 이탈리아, 프랑스, 스위스, 중국 등 선진국들은 또 다시 막대한 예산을 투입하고 있다. 특히, 2009년도에 미국 LCLS에서는 초강력/고성능 레이저 전자총을 이용하여 극초단 전자빔의 발생과 가속을 무난히 이루어 불과 1.5 Å의 파장에서 수 펨토초의 극초단 초강력 X-선 발생에 성공하였다. 원래 예상은 약 100펨토초의 펄스 X-선을 얻을 것으로 생각하였었다. 수많은 어려움을 예상하던 많은 전문가들과 함께 심지어 당사자들까지도 이 놀라운 결과에 흥분하였었다. 지난 한 세대 동안 FEL 분야에서는 이렇듯 많은 변화가 있었다.

국내에서는 1990년대 초반 밀리미터파 자유전자레이저 개발을 시작으로 소형 테라헤르츠 자유전자레이저 개발 등의 성과가 있었다. 그리고, 최근에는 포항가속기연구소를 중심으로 4세대 X-선 자유전자레이저 개발을 추진하고 있다. 우리나라도 이제 가속기 기술의 결정체인 X-선 자유전자레이저 개발을 수행할 수 있게 되었다는 것은 그간 이루어온 기술적인 진보가 무척 크다는 점을 시사한다.

자유전자레이저는 기존 광원으로는 발생이 어려운 극한 광대역에서 고유의 역할을 수행하고 있다. 앞으로, 원자력분야 숙원기술인 사용후 핵연료 처리 등 후행 핵주기 기술의 혁신적인 발전에 기여할 고휘도 단색 감마선 발생 등에서도 자유전자레이저의 다음 활약을 기대하며 본 논문을 마무리한다.