극초단 펄스 레이저의 발전

DOI: 10.3938/PhiT.19.014

유 태 준 · 남 창 희 · 이 종 민

Progress of Ultrashort Pulse Lasers

Tae Jun YU, Chang Hee NAM and Jongmin LEE

Progress of ultrashort pulse generation has been rapidly made with the advancement of ultrashort laser technology, and our knowledge on ultrafast phenomena has been extended as well. The recent development of femtosecond lasers, especially Ti:Sapphire lasers, significantly reduced achievable pulse duration and stable laser pulses with duration of 20–30 fs can be obtained without much difficulty. Such ultrashort lasers have revolutionized many scientific and technological area, including basic science, medicine and engineering. Here we describe why ultrashort pulses are important and how they can be produced and temporally characterized. In addition, with shorter and shorter pulses available with technological progress, it is discussed how future science and technology will evolve beyond the present cutting-edge technology.

서론: 왜 짧은 펄스여야 하는가?

1980년도 후반 미국은 다음 세대를 위한 미래과학 기술로서 나노 기술(NT)을 선정하였으며, 국가전략 과학 기술로서의

저자약력

유태준 박사는 KAIST 이학박사(2002)로서 현재 고등광기술연구소의 레이저 연구실에서 선임 연구원으로 재직 중이며, 펄스 레이저 발생과 제어 및 초고출력 레이저 개발 연구를 수행하고 있다. (tjyu@gist.ac.kr)

남창희 교수는 미국 프린스턴대 이학박사(1988)로서 프린스턴 플라스마 물리연구소 연구원(1989)을 거쳐 KAIST 물리학과 교수로 재직 중이며(1989–현재), 결맞는 X-선 연구단 단장(1999–현재)으로 고출력 펄스 레이저와 결맞는 X-선 광원 개발 및 아토초 물리 연구를 수행하고 있다. (chnam@kaist.ac.kr)

이종민 교수는 고려대 이학박사(1980)로서 국방과학연구소 전자광학부 실장(1973–86), 한국원자력연구소 기초연구부 부장(1986–95), 기반연구그룹 본부장(1995–98), 기반기술개발단 단장(1997–98), 부소장(1999–2001), 고등광기술연구소 소장(2001–2008)을 거쳐 GIST 석좌 교수로 재직 중이다. (leejm@gist.ac.kr)

전폭적인 지원을 아끼지 않아 왔다. 최근 나노기술은 채 한 세대가 지나지 않았음에도 불구하고 우리 일상에 깊숙이 들어와 있는 것을 알 수 있다. 특히 정보 기술(IT)과 생명 기술(BT)분야와 맞물린 융합기술로 산업경제적 효과가 클 것으로 예상되고 있다.

이러한 문명의 편리함은 많은 부분 나노 기술의 발전과 무관하지 않다. 또한 이런 나노 기술의 발전은 나노미터란 작은 공간을 인간이 이해하는 데에서 출발한다. 그러나 나노미터 공간에서 일어나는 많은 자연 현상을 실상 우리는 제대로 파악하지 못하고 있는 형편이다. 게다가 우리는 나노 공간을 정적인 곳으로 이해하지만 실상은 그렇지 않다.

원자가 10개 정도 겨우 채울 수 있는 나노미터란 공간속에 존재하는 물질들은 어마어마한 속도로 서로 간에 충돌한다. 또한 상상할 수 없는 짧은 시간에 에너지를 주고받으며 변하고 있다. 마치 비가 오는 날 창밖에 있는 호수의 표면은 고요해 보이지만 호수 표면 가까이 가면 빗방울과 호수 표면간에 상당히 격정적인 요동과 파격한 충돌로 가득 차 있다. 실은 이 작은 나노 공간속의 물질들의 요동과 충돌은 이러한 비유로도 충분치 않다.

이 작은 영역에서 원자와 분자들은 1 km/s 이상의 속도로 초당 백억 번 이상 충돌하고 있다. 이러한 현상을 이해하기 위해서는 1조분의 1초(피코초; 10^{-12} sec)라는 아주 짧은 시간영역을 제어하고 분석할 수 있어야 한다. 또한 분자들 간의 화학 반응은 이보다 더 극적으로 요동하며 변하고 있다. 예를 들어 광합성을 하는 복잡한 유기 분자 내부에서 어떻게 빛을 흡수해 포도당으로 합성하는지 이 과정을 이해하기 위해서는 1000조분의 1초(펨토초; 10^{-15} sec)란 극히 짧은 시간영역을 제어하고 분석할 수 있어야 한다.

여기서 그치는 것이 아니다. 분자를 구성하는 원자내부로 들어가면 약 1옹스트롬 직경을 가진 원자주위를 약 1000 km/sec로 돌고 있는 전자의 공전 주기는 아토초(10^{-18} sec) 영역이다. 이러한 어마하게 짧은 시간 안에 회전하는 전자가 원자내부에서 아인슈타인이 발표한 광전효과에 의해 전자가 빠져나가는 과정과 이를 회복하는 과정이 얼마이며, 외부충격에 의해 전자의 궤도가 변하는 과정을 동적으로 이해하기 위해서는 100경분의 1초(아토초; 10^{-18} sec)란 찰나의 시간 영역을 제어하고 분석할 수 있어야 한다.

Fig. 1. Ultrafast phenomena occurring in nature shown with different time scales. For the analysis of ultrafast events light pulses with duration shorter than event duration can be used.

Fig. 2. Filming chemical reactions with an ultrashort pulse laser flash.

즉 얼마나 짧은 시간흐름을 볼 수 있는냐에 따라 인간이 자연을 이해할 수 있는 시간 영역이 확장되며, 이 영역을 지배 또는 이용할 수 있게 된다. 그림 1은 이러한 과학 기술발전의 패러다임을 표현한 것이다. 마치 사진을 찍을 때 노출 시간이 짧을수록 고속의 물체를 보다 선명하게 또는 보다 빠른 물체를 볼 수 있듯이, 노출시간을 정하는 펄스를 얼마나 짧게 만드느냐가 얼마나 짧은 시간흐름을 볼 수 있는냐를 결정한다. 그러면 여기서 분자 또는 원자영역에서 발생하는 초고속 동역학 현상을 계측하기 위해 레이저 펄스를 반드시 사용해야 하는가? 즉 극초단 입자빔 같은 것을 사용해도 되지 않을까란 생각이 들 수 있다.

레이저만이 짧은 펄스를 만드는가?

짧은 현상을 계측하기 위해 왜 극초단 레이저 펄스이어야만 하는가? 예를 들어 레이저 대신 일반적인 빛을 아주 짧은 시간만 발생시킬 수가 없는지, 그리고 빛 대신 전자나 양성자 같은 입자빔을 아주 짧은 시간에 발생시킬 수는 없는지……. 이에 대한 대답은 ‘보고자 하는 대상에 따라 꼭 레이저일 필요는 없으며 오히려 입자빔이 더 나을 수도 있다’이다.

하지만 지금 현재 주어진 최신 기술로 제일 짧은 시간 현상을 보고 싶다면, 입자빔으로 레이저 펄스만큼 매우 짧은 펄스를 만들 수 없어서 적어도 지금까지는 항상 극초단 레이저 펄스가 필요했다. 그림 3은^[1] 그 당시 레이저 기술을 통해 얻을 수 있는 짧은 펄스폭이 얼마인가를 보여주며, 이때 각 시대의 기록이 바

Fig. 3. Progress in ultrashort pulse generation since laser invention in 1960.

로 인간이 얻을 수 있는 가장 짧은 펄스이다. 물론 현재 최신 기술인 피코초(10^{-12} sec) 시간 분해능을 가지는 전자빔과 양성자빔 진단 기술이 있으며 같은 피코초 시간 분해능을 극초단 레이저로는 볼 수 없는 영역을 보게 해줌에도 불구하고, 동시대에 존재하는 극초단 레이저 펄스는 그보다 백만 배 더 빠른 현상을 탐구하고 있다. 이러한 최첨단 레이저 기술이 차세대에서 추구하는 새로운 분해능의 전자빔과 양성자빔 기술을 이끌게 된다.

또한 일반적인 빛으로 시간적으로는 아주 짧은 펄스를 발생한다 하더라도, 관측하는 공간적 영역이 나노미터 이하인 경우 이를 아주 작은 공간에 집속할 수 없다. 빛을 얼마나 작게 집속할 수 있는냐가 중요한 관건이며, 공간적인 결맞음성 (Coherence)이 좋은 빛을 사용해야 작은 공간에 집속할 수 있다. 그렇기에 극초단 레이저 펄스가 필요한 것이다.

극초단 레이저 발전의 역사

1954년 Townes가^[2] 레이저의 기원이라 할 수 있는 메이저 (MASER: **M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation)를 발명한 후, 1960년 Maiman이^[3] 처음으로 가시광영역에서 유도발진을 성공해 오늘날 우리가 보는 레이저(LASER: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation)가 나왔다. 그 후 레이저의 발전 속도와 발전 방향은 급속하게, 군사분야, 산업분야, 기초과학기술분야, 예술분야, 경제 사회분야 등 전 분야에 걸쳐 다방면으로 진행되어 왔다.

레이저 발전의 역사는 레이저가 발전하는 공간적 크기에 따라 단일 원자 수준까지 얼마나 작게 만들 수 있는가에서 레이저 핵융합 시설같이 얼마나 크게 만들 수 있는가로 서술할 수

REFERENCES

- [1] P. B. Corkum, Nature Phys. **3**, 381 (2007).
- [2] J. P. Gordon, Phys. Rev. **95**, 282 (1954).
- [3] T. H. Maiman, Nature **187**, 493 (1960).

있으며 또한 레이저 발전 역사를 발전 과정을 얼마나 짧게 발생할 수 있는가? 또는 얼마나 안정한 레이저로 만들 수 있는가 등등 어떤 관점에서 기술하느냐에 따라 완전히 다르게 기술될 수 있다. 이뿐 아니라 레이저가 발전하는 출력 세기에 따라 페타와트 수준까지 어떻게 발전하여 왔는지 기술할 수 있으며, 레이저 출력 발전 역사도 순간 출력이나 평균 출력이나에 따라 다르게 기술된다. 그중에서 레이저에서 발생하는 펄스가 얼마나 짧게 만들 수 있는가에 대해서 기술하고자 한다.

그 이유에 대해서는 서론과 그림 1에서 기술한 것과 같이, 더 짧은 시간영역 안에서 일어나는 현상을 관측할수록 빠르게 일어나는 자연 현상에 대한 이해와 통찰력의 폭을 넓혀줌으로, 극초단 레이저 펄스 발생 기술의 관점에서 레이저 발전의 역사를 서술하고자 한다. 극초단 레이저 펄스를 얼마큼 짧게 만들 수 있는가에 대한 시대적 흐름을 살펴보면 그림 3과 같다.

레이저를 짧은 펄스형태로 발전하는 방식은 크게 두 가지 방식으로 분류된다. Q-스위칭(Q-switching) 방식과 모드 잠금(mode-locking) 방식으로 나뉜다. 이 방식들을 구현하기 위한 여러 방법들이 개발되었다. 공진기내부에 능동 진폭 또는 주파수 전기 광학 변조(active amplitude or frequency modulation) 방법, 포화 흡수체(saturable absorber)를 통한 수동 변조방법, 동기 이득 변조(synchronous gain modulation) 방법 등이 있다. 이 방법들은 필요한 목적에 따라 Q-스위칭 방식에, 때로는 모드 잠금 방식에 사용된다. 일반적으로 Q-스위칭 방식은 펄스 당 높은 에너지를 얻기 위해 유리하며, 모드 잠금 방식은 짧은 펄스를 얻기에 유리하다. 그래서 극초단 레이저 펄스의 발전 역사는 바로 이 모드 잠금 방식의 발전과 일치한다.

1964년 Hargrove가^[4] 처음으로 He-Ne 기체 레이저를 통해 모드 잠금 방식을 발견하였다. 1970년까지 루비 레이저, Nd: glass, Nd:YAG 등과 같은 고체 레이저를 통하여 레이저 펄스 폭을 100 ps보다 작게 발생할 수 있게 되었다. 이 당시 사용한 모드 잠금 방식은 능동형 모드 잠금과 수동형 모드 잠금이 있었는데, 능동형 모드 잠금으로는 공진기의 반복율과 동기화된 신호를 레이저 공진기 속에 있는 전기 광학 변조기에 걸어 주는 방법을 사용하는 방법이 있었고, 수동형 모드 잠금은 공진기 속에 포화 흡수체를 삽입하는 방법이었다.

하지만 1970년대 초에 이런 방법들에 근본적인 한계가 있어서 100 ps보다 더 짧은 펄스를 만들 수 없었다. 근본적인 한계란 “그 당시의 전기 광학 변조기나 포화 흡수체의 반응 속도가 충분히 빠르지 않다”란 것과, 설령 반응 속도가 빠르다 할지라도, “그 당시에 사용하였던 이득 매질의 선폭이 좁아 더 이상 짧은 레이저 펄스를 얻을 수 없다”란 것이다.

1970년 Peterson이^[5] 처음으로 색소 레이저(Dye laser) 발전을 성공하였는데, 이 색소 레이저가 이러한 근원적인 두 가

지 문제를 해결해 주었다. 색소 레이저에 사용되는 이득 매질은 매우 넓은 이득 선폭을 가져 펄스 발생을 가능케 하였다. 또한 형광 수명(Fluorescent lifetime)이 레이저 빛이 공진기를 한 번 공진하는 시간보다도 짧은 성질이 있다. 이 성질을 이용하여 동기 이득 변조 방법을 통한 모드 잠금을 하여 기존의 근본적인 한계를 돌파하는 중요한 전환점이 되었다.

색소 레이저의 등장으로 피코초(ps)보다 짧은 펨토초(fs) 영역의 펄스가 만들어지는 것이 가능해지면서, 많은 연구자들이 이득 매질과 공진기속에서 어떻게 짧은 펄스를 형성하는가에 대한 원리를 이해하기 시작하였다. 이를 통해 오늘날의 펨토초 레이저 발생원리 및 정밀 제어에 관한 이론적 배경이 완성되었다.

이 시기에 이론적 부분의 발전뿐만 아니라 기술적 부분에서도 발전이 있어 오늘날의 펨토초 레이저 공진기 구조와 같은 모습을 갖추게 되었다. 색소 레이저에 사용되는 이득 매질의 형광 수명은 너무 짧아서 레이저 발전 효율이 떨어지는 문제가 있었다. 이러한 부분을 해결하기 위해 기술적으로 그림 4와 같은 접힌 공진기 구조를 통해 해결하였다. 접힌 공진기 구조는 펌핑 빔을 이득 매질의 아주 작은 영역에 집속가능하게 하여 발전 효율을 올릴 수 있다. 또한 이득 매질 면의 각도를 브루스터(Brewster)각으로 하여 자연스럽게 편광(polarization)도가 우수한 레이저 빔을 얻을 수 있다. 그러나 브루스터 각으로 편향된 이득매질로 인한 비점수차(astigmatism)가 발생하여 레이저 공진 모드와 펌핑 빔의 모드 간에 잘 일치하지 않아 레이저 발전의 효율이 떨어지는 문제가 발생한다. 이를 보상하기 위해서 이득 매질에서 발생하는 비점수차가 접힌 공진기구조와 발생하는 비점수차와 방향이 반대 방향인 점을 이용하여, 접힌 공진기의 접힌 각도와 이득 매질의 두께간의 관계를 잘 해석하여 보상한다. 이러한 구조로 인해 높은 펌핑 빔 에너지 집속 밀도와 아울러 이득 매질에서 높은 레이저 공진기 에너지 밀도를 얻을 수 있어서 높은 효율의 공진기 구조가 나오게 되었다. 그리하여 1980년대 중반까지 색소 레이저를 통한 극초단 레이저 발생 기술이 계속 발전하여 colliding-pulse mode-locking(CPM) 방법으로 27 fs의 펄스 발생까지^[6] 가능하게 되었고, 펨토초 레이저 펄스의 분산을 정밀하게 제어할 수 있는 외부 펄스 압축기를 통해 6 fs까지 펄스를^[7] 발생할 수 있게 되었다.

하지만 색소 레이저에서 몇 가지 기술적 문제들이 있었다. 이득 매질로 사용되는 색소는 발암 물질로 알려져 있고, 광분해되기에 일정 주기마다 교체를 해주어야 하는 문제가 있다. 또한 색소를 녹인 용매를 계속 액체 순환시키면서 발생하는

REFERENCES

- [4] L. E. Hargrove, Appl. Phys. Lett. **5**, 4 (1964).
- [5] O. G. Peterson, Appl. Phys. Lett. **17**, 245 (1970).
- [6] J. A. Valdmanis, Opt. Lett. **10**, 131 (1985).
- [7] R. L. Fork, Opt. Lett. **12**, 483 (1987).

Fig. 4. Typical layout of a cw passively mode-locked folded-cavity dye laser.

유체 요동과 진동에 의해 발진 출력의 안정성에 문제가 있다. 또한 펄핑 광원에도 기술적 문제가 있다. 펄핑 광원으로는 크게 두 가지로 사용되는데 그림 4 방법을 위해서는 연속 발진 아르곤(Ar) 레이저를 사용하고, 그림 5 방법을 위해서는 이차 조화파 모드 잠금 Nd:YAG 또는 Nd:YLF 레이저를 사용한다. 아르곤 레이저는 플래시 램프나 아르곤 기체 튜브 교체 주기로 인한 유지 보수문제와 출력이 안정적이지 못하다는 점에서, 그리고 이차 조화파 모드 잠금 펄핑 레이저는 펄핑 광원의 펄스 반복율과 색소 레이저 공진기의 반복율이 정확하게 일치하지 않으면 출력이 안정적이지 못하다는 점에서 문제가 있었다. 이렇게 출력이 안정되며 크기가 작고 다루기 쉬운 새로운 이득 매질과 펄핑 광원의 필요성이 대두되었다.

1980년대 중반부터 액체 방식의 색소 레이저를 대체하기 위한 여러 고체 이득 매질(Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:glass)을 기반으로 한 극초단 레이저들이 나오기 시작하였다. 이 고체 이득 매질의 펄핑 흡수 파장이 다이오드 레이저의 발진 파장과 유사해 펄핑 레이저의 크기와 전체 시스템의 발진 효율과 유지에 상당한 개선을 가져다주었다. 하지만 색소 이득 매질의 특성과 새로운 고체 이득 매질의 특성이 달라서 기존의 수동형 모드 잠금 방식에 사용된 포화 흡수체 방법으로 모드 잠금 구현에 어려움이 있었다. 이를 해결하기 위해 레이저 발진을 위한 주 공진기와 포화 흡수체와 유사한 비선형 효과 발생을 위한 보조 공진기를 결합하여 모드 잠금하였다.

이 방법을 Additive pulse mode-locking(APM)^[8]이라 부르며 1980년 중반부터 1990년대까지 피코초에서 수백펨토초의 펄스를 발생시켰다. 이때 사용한 비선형 효과는 기존의 포화 흡수 방식과는 다른 커효과(Kerr-effect)를 사용하였다. 커 효과란 매질의 굴절률이 매질을 통과하는 빛의 세기에 따라 변하는 현상이다. 고체 이득 매질인 Nd:YLF나 Nd:glass는 이러한 APM 방법을 통해 모드 잠금을 하였다. 하지만 공진기 구조가 복잡해지며, 능동적으로 출력을 안정화하는 전자 회로 구성 등 전체적인 시스템이 간단하지 않았고, 장시간 안정적인 모드 잠금 발진에 어려움이 있었다.

Fig. 5. Typical layout of a synchronously pumped cw mode-locked dye laser.

이러한 복잡함을 일거에 해결하는 방법이 나왔는데, 바로 Ti:sapphire 이득 매질을 이용한 Kerr lens mode-locking(KLM) 방법이다. Ti:sapphire 이득 매질은 상당히 넓은 이득 선포를 가져 짧은 펄스를 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라, 높은 3차 비선형 계수를 가지고 있어서 이득 매질에서 동시에 비선형 효과를 발생시킬 수 있는 장점이 있고, 열전도도가 좋아 고출력 펄핑 빔을 입사할 수 있어, 이득 매질에 높은 광집속 밀도를 형성시킬 수 있다. 그리고 넓은 흡수 파장 영역이 존재해 이차 조화파 다이오드 여기 방식의 펄핑 광원을 사용할 수 있다. 최근에는 직접 다이오드 여기 Ti:sapphire 레이저 발진도 발표되고 있다.^[9] 그로 인해 레이저 시스템이 보다 간편하고 보편적인 연구 장비로 사용할 수 있게 하는 장점이 있다.

1991년 Spence가^[10] 처음으로 KLM Ti:sapphire 펄스 레이저 발진을 성공하였다. 커 렌즈 모드 잠금(KLM) 방법은 근본적으로 APM과 같이 커 효과를 기반으로 한다. APM은 주 공진기에서 시간과 주파수 영역에서의 위상 왜곡을 발생시켜 주공진기와 간섭을 일으켜 모드 잠금을 하는데 비해, KLM은 주 공진기에서 공간 영역에서의 레이저 빔 크기 변화를 발생시켜 모드 잠금을 한다. 이로 인해 부공진기가 필요 없게 되어 그림 6A와 같이 레이저 공진기 구조를 혁신적으로 단순하게 하였다. 이러한 혁신이 가능하게 하기 위해서는 이득 매질에 높은 광집속 밀도가 생성되는 구조가 필요하다. 이러한 구조는 자연적으로 높은 이득 효율과 높은 커 효과를 동시에 얻을 수 있다. 20년 전 색소 레이저 초창기 연구에서 이득 매질이 가지고 있는 문제를 해결하기 위해 개발된 구조가 바로 이러한 구조였으며 오늘날의 펄스 레이저 근간을 이루는 KLM Ti:sapphire 펄스 레이저가 발명되는데 결정적인 기여를 하였다.

또한 색소 레이저 시대에 이미 6 fs 펄스를 발생하기 위해 레이저의 분산을 어떻게 정밀하게 제어하는지에 대한 연구 방식을 그대로 Ti:sapphire 레이저 기술에 접목하여 1990년

REFERENCES

- [8] J. Mark, Opt. Lett. **14**, 48 (1989).
- [9] P. W. Roth, Opt. Lett. **34**, 3334 (2009).
- [10] D. E. Spence, Opt. Lett. **16**, 42 (1991).

Fig. 6. Typical layout of (A) a Kerr lens mode-locked Ti:sapphire laser and (B) a chirped mirror dispersion-compensated Ti:sapphire laser.

중반에 이미 10 fs 미만의 펄스를 발생시킬 수 있었다.

여기까지는 극초단 펄스 레이저의 발전 패턴은 이득 매질의 새로운 발견과 이러한 이득 매질에 맞는 레이저 공진기의 발전과 맞물렸다면, 1990년 중반부터 2000년도까지의 발전 패턴은 다소 엉뚱하며, 2000년도부터 지금까지의 발전 패턴은 새로운 혁명이다.

먼저 1990년 중반에 일어난 엉뚱한 발전 패턴은 이득 매질의 새로운 발견도 아니며 새로운 공진기 구조의 발전이 아니라, 바로 처프 거울(Chirped mirror)이란^[11] 새로운 방식의 반사경 발명이다. 1990년 중반까지는 짧은 펄스초 펄스를 얻기 위해 이득 매질에서 발생하는 분산을 보상하기 위해 이득 매질에서 발생하는 분산을 그림 6A와 같이 역으로 발생시키는 프리즘 분산 보정기를 공진기에 삽입하여 10 fs 영역의 펄스를 발생시킬 수 있었다.

하지만 프리즘 분산 보정기만으로는 이득 매질에서 발생하는 분산을 아주 정확히 제거할 수 없기에 10 fs 미만의 펄스를 발생시키기 어려웠다. 이러한 미세한 분산 오차(즉 고차 분산) 효과를 정밀하게 제거할 수 있게 한 것이 바로 처프 거울이다. 처프 거울을 통해 프리즘 분산 보정기가 필요 없어지게 되면서 프리즘 분산 보정기 자체에서 발생하는 고차 분산도 자연적으로 제거되었으며, 이로 인해 그림 6B와 같이 프리즘이 필요 없게 되어 공진기의 구조는 더욱 간결하게 되었다. 아울러 처프 거울은 기존의 광학 거울보다 반사 선평이 넓어 보다 짧은 펄스 발생에 유리하다. 이러한 기술적인 도움에 힘입어 Ti:sapphire 레이저 공진기에서 직접적으로 5 fs 미만의 펄스를 발생시킬 수 있게 되었다.

2000년도 들어서 극초단 펄스 레이저 발생 기술에 있어서 중대한 기술적 도약이 있었다. 레이저 펄스가 극단적으로 짧은 5 fs 미만에 도달하면서 물리학자들은 레이저 펄스의 시간적 모양에 대한 기존의 개념을 버리고 새로운 방식으로 이해를 하기 시작하였다. 그림 8의 B와 같이 3.7 fs인 상황에서 펄스의 시간 구조(검은 점선)는^[12] 변하지 않음에도 불구하고, 그림에서 보여주는 것과 같이 레이저 펄스의 절대 위상만 변해도 내부의 전자기파의 시간적 진동 패턴이 달라진다. 이렇

Fig. 7. Sub-10 fs Ti:Sapphire laser oscillator (APRI/GIST).

Fig. 8. (A) Measured spectrum and spectral phase of 1.5-cycle Ti:Sapphire laser, and (B) temporal profile of the laser pulse(dotted black) measured using the SHG FROG method. The temporal profiles, given in two different colors (B; red, dotted blue), show the change of electric field profiles with different CEP values (A; red, dotted blue). (KAIST^[12])

게 극단적으로 짧은 레이저 펄스를 원자나 분자와 상호작용시키면, 절대위상에 따른 효과를 관측할 수 있다.

이때 발생하는 아토초 펄스의 시점과 횡수는 기체에 집속하는 레이저의 절대 위상에 따라 달라진다. 만약 절대 위상을 정밀하게 제어하여 아토초 펄스의 발생 시점과 발생 횡수를 일정하게 할 수 있다면, 아토초란 아주 짧은 시간 안에 발생하는 초고속 현상을 관측할 수 있는 아토초 섬광을 만들 수 있음을 의미한다. 이를 통해 아토 물리학이란 새로운 학문 분야를 개척할 수 있다. 그래서 레이저의 절대 위상을 제어하는 기술이 중요하다. 이뿐만 아니라 레이저 펄스의 위상을 아토초 정밀도로 제어하는 기술은 현재 최고의 시간 정밀도를 가진 세슘 원자시계보다 백배 더 정밀하게 할 수 있는 방법을 제공한다. 이러한 여러

REFERENCES

- [11] R. Szipocs, Opt. Lett. **19**, 201 (1994).
- [12] J. Park, Opt. Lett. **34**, 2342 (2009).

Fig. 9. (a) Experimental setup for measuring and controlling the absolute phase of femtosecond laser pulses, and its experimental results (Pol.; polarizer, BPF; band pass filter, HWP; half wave plate, PBS; polarized beam splitter). (b) Experimental result showing long term CEP stabilization. (KAIST^[13,14])

물리 분야에 끼칠 중요한 파급효과로 인해 2005년 노벨 물리학 상 수여에는 이 기술을 개발한 두 물리학자가 포함되어 있다.

그림 3에서 펨토초 시대에서 아토초 시대로 넘어가는데 오랜 시간이 걸린 이유가 있다. 레이저를 발진시키는 방식으로는 레이저 매질의 가능한 이득 선폭 때문에 직접 수 펨토초 이하의 짧은 펄스를 발진시킬 수 없다. 펨토초보다 더 짧은 펄스인 아토초 펄스를 얻기 위해서는 다른 개념으로 광펄스를 생성해야 한다. 가장 많이 사용되는 방법은 고차조화파 발생을 이용하는 방식이다. 기체 원자를 강한 펨토초 레이저장으로 구동하면, 전자가 이온화되어 레이저장에 의해 가속되고 다시 원자와 재결합하면서 그 운동에너지가 빛에너지로 변환된다. 이러한 과정이 규칙적으로 되풀이되면서 매우 높은 차수까지 조화파가 발생한다. 이 고차조화파는 넓은 스펙트럼과 다른 차수의 조화파 간에 규칙적인 위상 관계가 형성되어 아토초 펄스를 생성한다.

고차조화파로서 매우 짧은 아토초 펄스를 형성하기 위해서는 레이저의 펄스폭을 수 펨토초로 발생해야 한다. 그리고 수 펨토초 레이저 펄스 안에 진동하는 전자기장의 절대 위상 (absolute phase 또는 carrier-envelope phase; CEP)을 아토초 정밀도로 제어해야 한다. 게다가 이런 상태를 수 시간 이상 안정적으로 유지해야 안정적인 아토초 분해능을 가진 실험을 할 수 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 여러 세계 그룹에서 노력을 하였고, 국내 KAIST 연구팀에서 독자적인 기술로 최장시간(24시간) 절대 위상 제어 기술과^[14] 고출력에서 최단 펄스(3.7 fs) 발생 기술을^[12] 가지고 있다.

Fig. 10. The distance traveled by light in each time scale.

그림 9는 KAIST 연구팀에서 개발한 절대 위상 제어 장치 개념도와 실험 결과이다.^[13,14] 이러한 펨토 레이저 발생 및 제어 기술을 기반으로 2000년도 초반에야 비로소 아토초 발생과 계측을 하기 시작하였으며, 최근에는 이러한 아토초를 이용하여 원자 내에서 발생하는 초고속 미세 현상들을 관측하는 새로운 물리분야인 아토초 물리가 태동되고 있다.

마치면서

여기까지 극초단 레이저 펄스 발생 기술에 대한 필요성과 현재까지의 기술 발전이 어디에까지 이르렀는지 간략하게 소개하였다. 펨토초나 아토초가 얼마나 짧은 시간인지에 대해 음미할 시간을 주지 않고 지금까지 극초단 레이저 펄스의 기술 발전에 대하여 기술하여 왔는데, 그림 10을 보면서 다시 한 번 천천히 생각해 보자. 빛이 1초 동안 진행하는 거리는 지구 7바퀴 반인데 비해, 빛이 아토초 동안 진행하는 거리는 물 분자 하나를 진행하는 거리이다. 그리고 그림 8과 같이 레이저의 절대 위상을 아토초 정밀도로 수 시간 이상 유지하는 기술은 레이저의 주파수 정밀도를 10^{-18} 이상 향상시킴을 의미하며, 이 정도의 정밀도는 우주나이 동안 1초 정도의 오차를 의미한다.

레이저가 처음 나온 지 불과 한 세대가 지나가기 전에 이런 상상을 초월하는 극히 짧은 펄스와 초정밀 레이저 기술이 완성되었다. 2000년 초반 펄스가 펨토초 레이저의 절대 위상 제어 연구를 시작하면서 이제 아토초의 시대가 곧 도래함을 확신하였는데, 2010년인 지금은 아토초 영역을 넘어 켈토초 영역의 자연 현상에 대한 새로운 인식이 꿈틀대고 있다.^[15]

특히 이 분야에서의 최신 과학 기술 진보는 일반인들의 감각 영역과 상상을 넘어 있어서 수학적 언어를 배제하고 알기 쉬운 일상적인 언어로 이를 표현하기에는 한계가 있다. 하물며 아직 일반인들에게 펨토와 아토도 낯선 영역인데 그 다음 미지의 영역인 켈토를 이야기한다는 것은 우리 과학자들에게 주어진 참으로 어려운 숙제가 아닌가 생각된다.

REFERENCES

- [13] T. J. Yu, Opt. Exp. **15**, 8203 (2007).
- [14] J. Lee, Opt. Exp. **16**, 12624 (2008).
- [15] C. Golabek, Phys. Rev. Lett. **103**, 042701 (2009).