



1. 서론

1960년대 레이저가 처음 등장한 이후 Q-스위칭과 모드록킹 기술의 발전에 힘입어 펄스형 레이저의 개발이 급속히 진행되었다. 펄스형 레이저는 짧은 시간폭으로 인하여 작은 에너지로도 큰 침투출력을 낼 수 있어 고출력 레이저로 적합하며, 물리, 화학 등의 기초과학 분야에 활용될 뿐만 아니라, 용접, 절단 등의 공학 분야, 레이저 수술의 의료 분야, 거리측정기와 같은 국방 분야에서 폭넓게 이용되고 있다. 현재 가장 짧은 레이저 펄스의 시간폭은 수 펨토초(femtosecond: $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) 수준에 이르고 있고, 고출력 펨토초 레이저는 20 펨토초에서 100 테라와트(terawatt: $1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$) 이상의 출력을 내는 레이저가 개발되어 활용되고 있다. 본 글에서는 펨토초

2. 펨토초 레이저 공진기

펨토초 레이저의 개발에 가장 결정적인 영향을 미친 요소는 커렌즈 모드록킹(Kerr-lens mode-locking: KLM) 기술과 티타늄사파이어 이득매질의 등장이다. 수동형 모드록킹 방식의 하나로서 1980년대에 등장한 KLM 기술은 강한 빛이 고체매질을 지나갈 때 비선형적인 굴절을 경험하면서 생기는 자체집속효과를 이용한 것으로 이전에 사용하던 색소 포화흡수체를 이용한 모드록킹 방식보다 안정성이 뛰어나고 수명에 제한이 없다는 장점을 가지고 있다. 강한 빛은 자체집속이 더 잘되기 때문에 매질 중앙을 통하여 진행하고 약한 빛은 매질 중앙에서 약간 벗어난 곳을 통하여 진행하는데, 이 때 조리개를 사용하여 약한 빛을 걸러주면, 강한 부분은 이득매질에서 증폭되면서 더

특집 | 펨토 과학 |

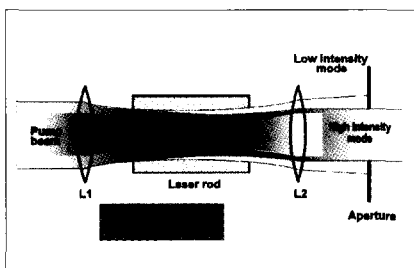
고출력 펨토초 레이저 기술 (High-power Femtosecond Laser Technologies)

홍경한, 남창희*

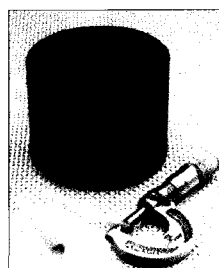
광원으로 주류를 이루고 있는 티타늄사파이어(Ti:sapphire) 레이저의 발전과정과 동작원리, 그리고 처프펄스증폭(chirped pulse amplification: CPA) 방식을 이용한 고출력 펨토초 레이저의 개발에 관하여 기술하고, 이렇게 개발된 고출력 펨토초 레이저의 응용분야들을 개괄적으로 소개하고자 한다.

강해지나 약한 부분은 걸러져서 매우 짧은 펨토초 레이저 펄스가 형성된다. (그림 1 (a) 참조.)

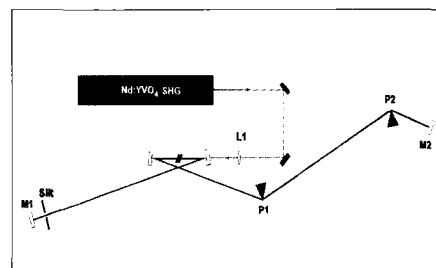
1985년 미국의 Moulton에 의하여 개발된 티타늄사파이어 결정²⁾(그림 1b)은 형광수명이 $3 \mu\text{s}$ 정도로 짧다는 단점을 제외하고는 펨토초 레이저의 이득매질로서 매우 중요한 몇가지 장점을 가지고 있다. 첫째는 레이저가 발진될



(a) 커렌즈 모드록킹



(b) 티타늄사파이어 결정



(c) 커렌즈 모드록킹된 펨토초 티타늄사파이어 레이저의 개략도

그림 1. 펨토초 레이저 발생 광원

* 과학기술원 물리학과/결맞는엑스선연구단

고출력 펄토초 레이저 기술

수 있는 이득선폭이 650-1100 nm로 매우 넓어서 매우 짧은 레이저 펄스를 생성할 수 있다는 점이다. 둘째는, 티타늄사파이어 결정이 고체매질이므로 기존의 펄토초 레이저로 사용되었던 액체인 색소매질에 비해 안정성이 매우 뛰어나고 수명은 반영구적이라는 점이다. 마지막으로, 티타늄사파이어 결정 자체가 커(Kerr) 매질로 사용될 수 있기 때문에 KLM을 이용할 경우 레이저의 구조가 매우 간단해진다는 점이다. 그림 1c는 전형적인 X자형 KLM 티타늄사파이어 레이저를 보여주는데, 모드록킹을 위한 특별한 장치가 없는 것처럼 보일 정도로 구조가 간단한 것을 볼 수 있다. KLM은 공진기 내에 슬릿을 넣는 단단한 조리개(hard aperture) 방법과 펄핑 광원의 집속 크기를 줄여 이득 길잡이(gain guiding) 효과를 이용하는 부드러운 조리개(soft aperture) 방법이 있고, 두 경우 모두 프리즘을 흔들어서 거울을 쳐주는 방법 등으로 요동을 줌으로써 모드록킹을 시작시킨다. 1991년 미국의 Spence가 처음으로 그림 1c와 같은 KLM 티타늄사파이어 레이저에서 60

fs의 펄스 생성에 성공하였고³ 그 이후에 펄스폭과 에너지에서 비약적인 발전을 이루었다.

펄토초 레이저에서 펄스폭을 줄이는 데에 가장 중요한 요소는 바로 공진기 내부의 군지연 분산(group-delay dispersion; GDD)을 제어하는 일이다. 일반적으로 광학 매질들은 가시광선이나 근적외선 영역에서 양의 분산을 갖는데, 넓은 광학적 스펙트럼을 갖는 펄스가 이러한 매질들을 지나면 분산 효과에 의하여 장파장 쪽은 펄스 앞단으로 오고 단파장 쪽은 펄스 뒷단으로 가는 양의 주파수 처프(frequency chirp) 현상이 발생하여 펄스폭이 늘어나게 된다. (그림 2 참조) 공진기 내부에서 펄스폭이 늘어나지 않도록 하여 커 효과를 극대화하기 위해서는 티타늄사파이어 매질에서 생기는 양의 분산을 보상해주어야 한다. 그림 1c에서 볼 수 있는 프리즘 쌍은 바로 공진기 내부에 음의 분산을 주어 분산을 보상하여 짧은 펄스폭을 얻기 위한 것이다. 또한, 공진기 내부의 전체 분산이 음이 되도록 하면 솔리톤 효과에서 의해서 더욱 짧은 펄스를 얻을 수 있다. 커 효과에 의하여 강한 빛은 자체집속될 뿐만 아니라 자체위상변조(self-phase modulation)가 일어나는데, 이 경우 레이저 펄스의 광학 스펙트럼이 늘어나면서 펄스의 침두 부분에서 양의 처프와 같은 위상변조가 생긴다. 변조된 위상이 음의 분산을 겪게 되면 위상변조가 보상되어 펄스폭이 감소하는데, 이와 같이 자체위상변조와 음의 분산으로 짧은 펄스가 형성되어 계속 유지되는 현상을 솔리톤 효과라고 하며 광섬유 광학에서 널리 알려진 현상이다. 실제로 자체집속에 의한 커 효과만으로는 100 fs 미만의 펄스를 발생시킬 수 없다.

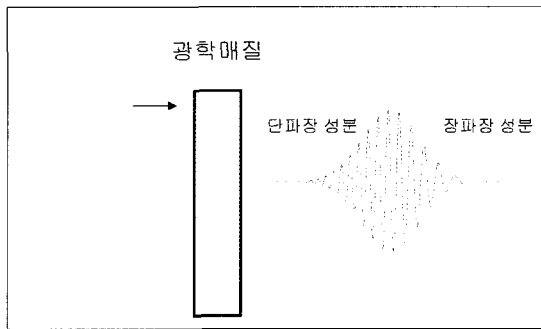
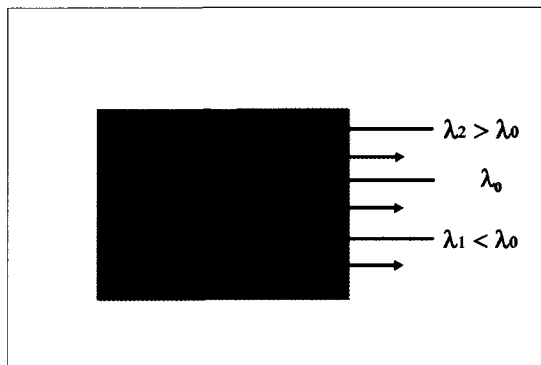
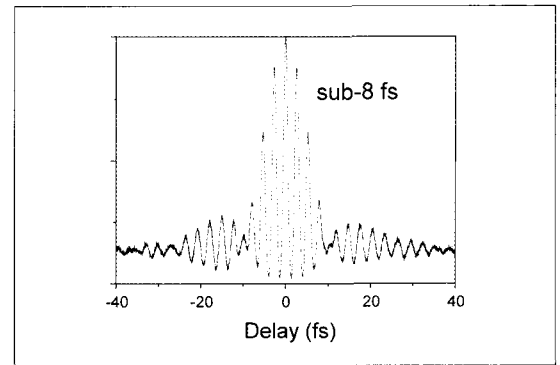


그림 2. 광학 매질을 통과하면서 생성된 양의 처프를 갖는 펄스.



(a) 음의 분산을 주는 처프거울



(b) 처프거울을 이용하여 발생시킨 7.8 펨토초의 레이저 펄스.

그림 3. 10 펨토초 미만의 펄스 발생

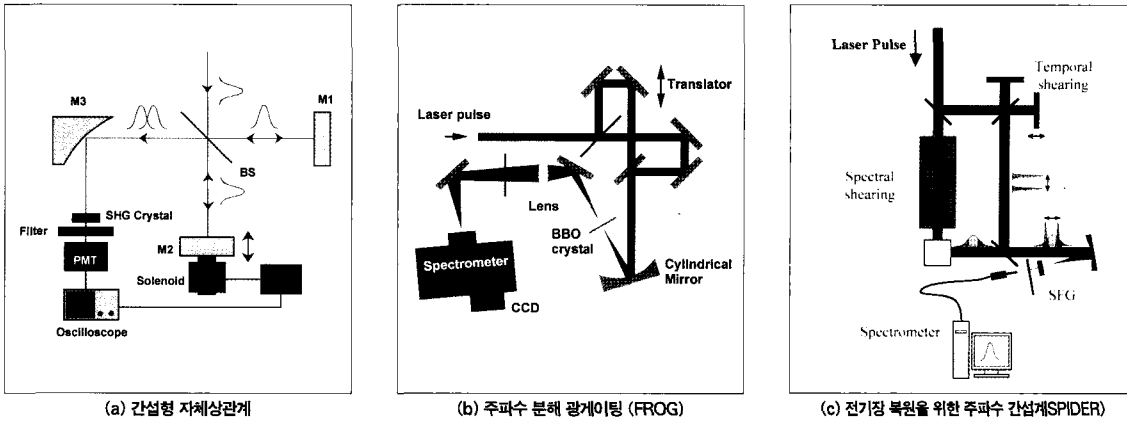
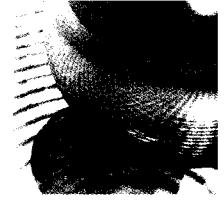


그림 4. 펄스 진단 기술의 광학적 장치도.

레이저 펄스폭을 10 fs 이하로 줄이기 위해서는 공진기 내부의 균지면 분산 뿐만 아니라 고차항의 분산까지 보상하여 충분히 넓은 스펙트럼을 발생시켜야 한다. 도핑율이 높고 얇은 티타늄사파이어 결정을 사용하면 프리즘 쌍을 이용한 균지면 분산의 보상을 통해서 10 fs 수준의 짧은 펄스를 발생시킬 수 있으나, 스펙트럼이 넓어질수록 중요하게 작용하는 고차분산의 효과를 프리즘 쌍만으로 보상하기에는 한계가 있기 때문에 프리즘으로 분산 제어된 (prism-dispersion-controlled) 티타늄사파이어 레이저의 한계 펄스폭은 10 fs 정도이다. 그런데, 1990년대 중반에 프리즘보다 넓은 스펙트럼 영역에서 분산을 제어할 수 있는 처프거울(chirped mirror)⁴이 등장하면서 10 fs에 머물던 KLM 티타늄사파이어 레이저의 펄스폭은 10 fs 미만으로 줄어들기 시작했다. 처프거울은 유전체 (dielectric) 코팅시에 층의 두께를 점차적으로 늘이면서 쌓아 파장에 따른 브래그 (Bragg) 반사 지점의 깊이가 파장에 따라 달라지도록 하는 것이다. (그림 3a) 즉, 장파장 성분의 빛이 더

깊은 곳에서 반사되도록 하면 매질을 더 많이 지나가게 되어 단파장 성분에 비하여 시간지연이 일어나므로 음의 분산을 줄 수 있다. 현재 처프거울은 보통 650 - 1000 nm에 이르는 넓은 영역에서 99 % 이상의 반사율과 함께 일정한 음의 분산값을 줄 수 있고 650 - 1200 nm에 이르는 더 넓은 영역에서 음의 분산을 주는 특수하게 제작된 처프거울도 보고되었다. 2001년에는 티타늄사파이어 결정의 이득 선폭보다 넓은 스펙트럼을 갖는 KLM 티타늄사파이어 레이저도 등장하여 5 fs의 펄스를 발생시켰다.⁵ 그림 3b는 KAIST에서 상용 처프거울로 분산 제어하여 (mirror-dispersion-controlled) 제작한 티타늄사파이어 레이저와 여기서 발생된 펄스의 분산을 보상함으로써 얻어진 8 fs 펄스를 보여준다.

펨토초 펄스의 발생 기술과 함께 펄스폭을 측정하는 방법도 많은 발전을 이루었다. 전통적인 극초단 레이저 펄스폭 측정 방법인 2차조화파를 이용한 자체상관 (autocorrelation) 방법은 펨토초 펄스 측정에도 널리 사용되고 있다. 그러나, 자체상관 방법이 펄스의 모양과 위상 정보를 정확히 주지 못하기 때문에 주파수분해 광게이팅 (frequency-resolved optical gating: FROG) 방법⁶과 전기장복원을 위한 주파수간섭계 (spectral-phase interferometry for direct electric-field reconstruction: SPIDER) 방법⁷ 등이 개발되어 보다 정확한 펄스의 진단이 가능하게 되었다. 자체상관, FROG, SPIDER 방법의 광학적 실험 장치는 그림 4의 a, b, c에서 각각 볼 수 있다. 현재는 FROG와 SPIDER 방법이 펨토초 레이저 펄스의 계측에 주로 이용되고 있으나, 최근 들어 사용이 손쉬운

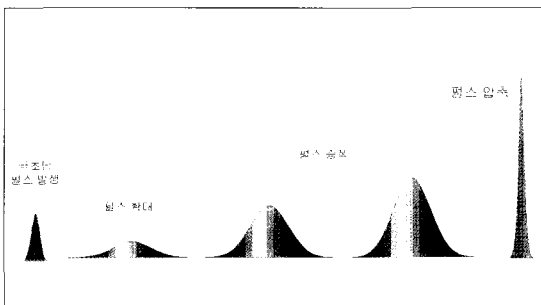


그림 5. 처프펄스증폭 (CPA) 기술의 개요.

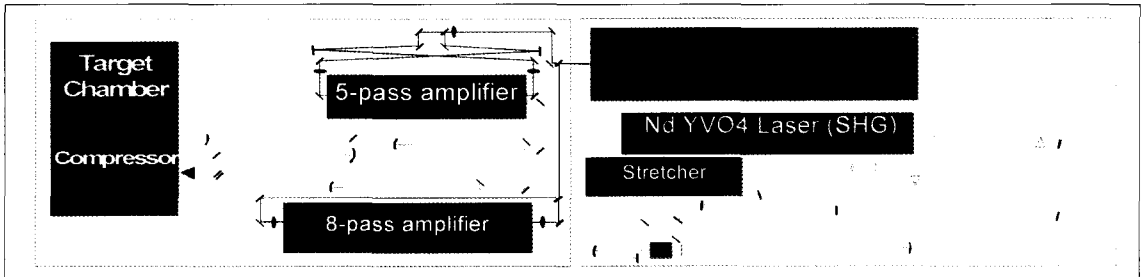
고출력 펨토초 레이저 기술

자체상관신호에서도 전기장을 복원해내는 방법들이 연구되어 실제로 응용됨으로써 펨토초 펄스의 진단을 위한 선택의 폭을 넓히고 있다. <그림 4 삽입>

한편, 펄스폭이 10 fs 미만에 이르면 펄스의 반치폭이 단지 2-3 개의 광주기에 해당하는데, 이렇게 짧은 펄스에서는 펄스싸개(envelope)의 봉우리와 광운반자(carrier)의 봉우리가 일치하느냐의 여부에 따라 펄스의 모양이 바뀐다. 이러한 싸개와 운반자 간의 위상 차이를 절대위상 혹은 싸개 운반자 위상(carrier-envelope phase; CEP)이라고 한다. 2-3 주기 펄스의 엄밀한 진단에는 CEP의 측정도 포함되어야 하므로, 최근 들어 CEP의 측정과 제어가 활발하게 연구되고 있다.⁸ 모드록킹된 레이저의 펄스 간 CEP 차이를 주파수 영역에서 안정화함으로써 각 펄스들 간에 광운반자의 모양이 일정한 10 fs 미만의 펄스열을 생성할 수 있는 가능성이 열렸으며, 이러한 안정화 기술은 펨토초 레이저가 간단하면서도 엄청난 정확도를 갖는 주파수 표준기로 사용될 수 있음을 보여주었다.

3. 펨토초 테라와트 레이저

1980년대까지 테라와트 이상의 고출력 레이저의 개발을 위하여 네오디뮴글라스(Nd:glass)와 같이 비교적 큰 부피로 제작이 가능하고 큰 에너지를 저장할 수 있는 매질을 사용하였으나, 이는 레이저 장치가 크고 펄핑에너지를 높이기 위하여 대규모의 전기장치도 필요하였기 때문에 전체적인 레이저 시설의 규모가 커지고 개발비용도 많이 들었다. 또한 생성되는 펄스의 에너지가 크므로 매질에서 생기는 열문제가 심각해서 펄스의 반복률도 매우 낮았다. 반면, 티타늄사파이어 레이저를 기반으로 한 펨토초 레이저를 증폭하면 수십 mJ의 작은 에너지로도 테라와트의 고출력을 낼 수 있어 소규모의 대학 연구실에서도 고출력 레이저를 제작할 수 있고 에너지가 작으므로 반복율도 높일 수 있다는 장점이 있다. 극초단 레이저 펄스를 증폭할 때 레이저 세기가 문턱값 이상에 도달하면 자체집속 현상으로 증폭매질이 쉽게 손상을 입는 문제가 있다. 이를 방지하기 위한 전통적인 방법으로 증폭 매질의 크기를 증가시

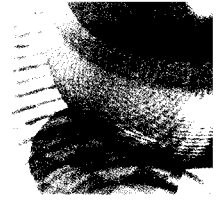


(a) 광학적 개략도



(b) 레이저 시스템 사진 (진공용기 내에 설치된 펄스 압축기 부분은 나타나 있지 않음).

그림 6. KAIST에서 개발한 펨토초 테라와트 레이저



켜 단위 면적당 레이저 출력을 손상 문턱값 이하로 제한하는 방법이 이용되었으나, 이는 레이저 시스템의 크기를 크게 만들어야 하는 단점이 있다.

극초단 펄스의 증폭시에 발생하는 매질 손상 문제를 해결하기 위하여 1985년 Mourou 교수는 처프펄스증폭(CPA) 방법을 제안하였다.⁹ CPA 기술은 극초단 레이저 펄스를 증폭하기 전에 강한 주파수 처프를 주어 펄스폭을 수천 배 혹은 수만 배로 확대함으로써 레이저 세기를 그만큼 낮추어서 증폭단의 손상이 레이저 펄스를 증폭한 다음, 증폭된 레이저 펄스를 원래의 펄스폭에 가깝게 압축하여 고출력의 레이저 펄스를 효율적으로 생성하는 기술이다. (그림 5 참조.) CPA 기술을 이용함으로써 레이저 펄스의 첨두출력은 기존에 비해 수백 배 이상 증가하였고 레이저의 규모도 크게 줄어들어 티타늄사파이어 레이저를 기반으로 한 소규모의 펄토초 테라와트급 레이저가 실현되기 시작하였다.

1990년대 초에 미국의 미시건 대학을 선두로 테라와트급의 CPA 티타늄사파이어 레이저가 계속 개발되었으며, 현재 미국, 프랑스, 독일, 영국, 일본 등지에 30대 이상의 테라와트급 CPA 티타늄사파이어 레이저가 개발되어 운영되고 있다. 특히, 1998년에는 일본 원자력연구소에서 100 테라와트급 CPA 티타늄사파이어 레이저를 개발하였으며, 1999년에는 미국의 로렌스 리버모어 국립연구소에서 KLM 티타늄사파이어 레이저 공진기와 Nd:glass 증폭단을 결합한 페타와트(petawatt; 10^{15} W)급의 CPA 레이저도 개발된 바 있다. 국내에서는 1998년 한국과학기술원의 결맞은 X선 연구단에서 20 펄토초 3 테라와트의 티타늄 사파이어 레이저를 개발하여 현재 운영 중이며, 포항공대와 원자력연구소 등에서도 개발 중에 있다. 그림 6은 한국과학기술원에서 개발한 CPA 티타늄사파이어 레이저의 개략도와 사진이다. 레이저 공진기에서 발생된 nJ 수준의 펄토초 레이저 펄스는 에돌이발을 이용한 펄스확대기에서 200 ps으로 확대되고 두 번의 증폭단을 지나면서 최대 130 mJ까지 증폭된 후 펄스압축기에서 펄스확대기와의 반대 과정을 거쳐 원래 펄스폭으로 압축된다. 증폭과정 동안 레이저 스펙트럼이 좁아지는 것을 최소화하기 위하여 장파장 주입법¹⁰을 사용하였고 그 결과 20 fs의 짧은 펄스폭을 얻을 수 있다. 펄스 압축시의 에너지 손실로 최대 60 mJ의 에너지를 최종적으로 얻을 수 있으며 광학테이블 2개 위에서 3 테라와트의 고출력 레이

저를 구현할 수 있음을 보여주었다.

4. 응용분야 개괄

펄토초 티타늄사파이어 레이저 공진기는 1990년대 후반부터 상용화되기 시작하였고 현재는 증폭단이 포함된 CPA 티타늄사파이어 레이저도 시판되고 있어 물리와 화학분야 뿐만 아니라 산업과 의료분야에서도 응용범위가 급속도로 확산되고 있다. KLM 티타늄사파이어 레이저는 시간분해 분광학, THz 방사, 비선형 광학, 펄토 화학, 광학단층촬영 등의 연구에 이상적인 광원이며, 최근에는 주파수 표준기로서도 사용됨으로써 주파수 안정화와 극고분해 분광학에서 엄청난 파급효과를 거두고 있다. CPA 방식을 이용한 고출력 펄토초 티타늄사파이어 레이저는 초강력장 물리학을 위한 광원으로서 매우 중요한 역할을 하고 있으며, 레이저플라즈마 상호작용, X선 생성,¹¹ 고에너지 전자나 양성자 빔 발생, 레이저 가속기 등에 활발히 사용되고 있다. 그리고 짧은 펄스폭으로 인하여 미세레이저가 공이나 각막이식과 라식수술과 같은 안과용 등에도 매우 유리한 광원임이 증명되고 있다.

5. 맺음말

지난 10년간 눈부신 발전을 이룬 펄토초 티타늄사파이어 레이저 기술은 현재 레이저 펄스의 제어와 응용에 초점이 맞추어지고 있으며 레이저 미세가공기, 의료기기 등을 통하여 일상생활과도 밀접한 관련을 맺게 되었다. 국내에서도 테라와트급 펄토초 레이저의 개발 뿐만 아니라 대학과 연구소에서 펄토초 레이저를 이용한 반도체 분광학, 화학반응 분석, 기계가공, 비선형광학, 스펙트럼학 등의 응용분야 연구가 활발하게 진행 중이며, 최근에는 광주과학기술원에서 대형 고출력 펄토초 레이저 개발 계획이 수립된 바 있다. 따라서 앞으로 펄토초 레이저를 이용한 보다 국제 경쟁력 있는 연구와 응용기술 개발을 위해서는 국내 사용자들 간의 활발한 정보 교환과 효율적인 기술 투자 등이 이루어져야 할 것이다.

고출력 펄스 레이저 기술

1. O. E. Martinez, R. F. Fork, and J. P. Gordon, *Opt. Lett.* 9, 156 (1984).
2. P. F. Moulton, *J. Opt. Soc. Am B* 3, 125 (1986).
3. D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, *Opt. Lett.* 16, 42 (1991).
4. R. Szipocs, K. Ferencz, C. Spielmann, and F. Krausz, *Opt. Lett.* 19, 201 (1994).
5. R. Ell et al., *Opt. Lett.* 26, 373 (2001).
6. R. Trebino and D. J. Kane, *J. Opt. Soc. Am A* 10, 1101 (1993).

7. I. A. Walmsley and V. Wong, *J. Opt. Soc. Am B* 13, 2453 (1996).
8. A. Apolonski et al., *Phys. Rev. Lett* 85, 740 (2000); D. J. Jones et al., *Science* 288, 635 (2000); K.-H. Hong, T. J. Yu, Y. S. Lee, and C. H. Nam, *J. Korean Phys. Soc.* (to be published).
9. D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.* 56, 219 (1985).
10. Y. H. Cha, Y. I. Kang, and C. H. Nam, *J. Opt. Soc. Am B* 16, 1220 (1999).
11. H. J. Shin, D. G. Lee, Y. H. Cha, K. H. Hong, and C. H. Nam, *Phys. Rev. Lett.* 83, 2544 (1999); D. G. Lee, J.-H. Kim, K.-H. Hong, and C. H. Nam, *Phys. Rev. Lett.* 87, 243902 (2001).



현재 근무처: KAIST 물리학과 결맞는 X선 연구단에서 연구원으로 재직 중
 최종학력:
 2003. 2 KAIST 물리학과 (박사)
 1998. 2 KAIST 물리학과 (석사)
 1996. 2 KAIST 물리학과 (학사)
 Email: pman@bomun.kaist.ac.kr
 관심분야: 펄스 레이저 개발/진단/제어, 고차조화파 발생, 진화 알고리즘



현재근무처: 한국과학기술원 물리학과 교수로 재직중이며 1999년부터 과기부의 창의연구단인 결맞는 X선 연구단을 맡고 있음.
 최종학력:
 1983- 1988, 프린스턴 대학교 박사(플라즈마 물리학)
 1977- 1979, 한국과학기술원 물리학과 석사
 1973- 1977, 서울대학교 원자핵공학과 학사
 주요경력:
 1998-현재, 한국과학기술원 교수
 1992-1998, 한국과학기술원 부교수
 1989-1992, 한국과학기술원 조교수
 1988-1989, 프린스턴 플라즈마 물리연구소 연구원
 1979-1982, 부산대학교 전임강사
 주관심분야:
 초강력 레이저장 물리, 고차조화파 엑스선 발생과 응용, 펄스초 테라와트 레이저 개발, 레이저-플라즈마의 분광학적 연구, 레이저-플라즈마에서 발생된 엑스선 응용, 엑스선 레이저 개발