

## 다중펄스 주파수분해 광게이팅을 이용한 10 펨토초 미만의 레이저 펄스의 시간특성 측정

### Temporal characterization of sub-10-fs laser pulses using multi-shot frequency-resolved optical gating technique

이용수\*, 홍경한, 성재희, 남창희  
한국과학기술원 물리학과 및 결맞는 X선 연구단  
wave94@mail.kaist.ac.kr

극초단 레이저는 주로 모드록킹(mode-locking) 방법을 이용해서 생성된다. 특히 자체집속(self-focusing)을 이용한 커렌즈 모드록킹(Kerr-lens mode-locking; KLM) 방법<sup>(1)</sup>을 이용하면 간단한 구조를 갖는 공진기로 100 펨토초(femto=10<sup>-15</sup>) 미만의 레이저 펄스를 생성할 수 있다. KLM 티타늄사파이어(Ti:sapphire) 레이저의 발달로 10 펨토초 영역의 레이저 펄스를 간단하게 생성할 수 있게 되었으며 특히, 넓은 스펙트럼 폭을 가지는 처프거울(chirped mirror)<sup>(2)</sup>의 사용과 정확한 분산의 보정을 통한 5 펨토초(800 nm 파장의 두 주기에 해당) 영역의 레이저 펄스 생성도 보고되고 있다.<sup>(3)</sup> 이렇게 매우 짧은 시간폭을 갖는 레이저 펄스는 초고속 시간분해 분광학을 가능하게 하여 화학, 생물학, 물리, 반도체공학 등의 분야에 널리 사용되기 시작했으며 그 응용분야가 점점 더 넓어지고 있다. 극초단 레이저 펄스를 이용한 연구에서는 펄스의 시간폭, 스펙트럼, 첨두 출력과 같은 레이저 펄스의 특성을 정확하게 파악하는 것이 필수적이며, 특히 펄스의 시간적인 세기와 위상은 펄스의 특징을 규정하는 가장 중요한 요소이다.

1993년에 개발된 주파수분해 광게이팅(frequency-resolved optical gating; FROG)<sup>(4)</sup> 방법은 알고리즘을 통해서 정확하게 펄스의 세기와 위상을 복원할 수 있다. FROG는 여러 가지 기하학적 구조가 가능하고 이중 이차 비선형성을 이용하는 이차 조화파 생성(second harmonic generation; SHG) FROG는 펄스 에너지에 대해서 가장 민감하게 반응한다. 그리고 다중펄스(multi-shot) SHG FROG<sup>(5)</sup>의 경우 pJ(10<sup>-12</sup> J) 영역에서도 사용이 가능해서 세기가 약한 공진기 펄스 진단에 용이하다. 본 연구에서는 multi-shot FROG를 직접 제작하였고 이를 이용해서 KLM 티타늄사파이어 레이저 펄스를 진단하였다. 10 펨토초 미만의 레이저 펄스를 진단하는 데는 많은 어려움이 따른다. 10 펨토초 미만의 레이저 펄스는 300 nm 이상의 넓은 스펙트럼 영역을 가지고 있으므로 넓은 스펙트럼 영역을 담당할 수 있도록 거울, 비선형 매질과 같은 실험 장비의 선택에 신중을 기해야 하며 정확하게 분산을 보정해야 한다. 그리고 장비들의 변환효율을 고려해서 데이터를 교정해야만 정확한 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서 사용되어진 KLM 티타늄사파이어 레이저는 푸리에 변환한계(Fourier transform limit) 펄스폭이 7.9 펨토초에 이르는 넓은 스펙트럼 폭을 가지고 있으며 공진기 내부의 프리즘 삽입량을 조절함으로써 스펙트럼 모양을 조절할 수 있다. 넓은 스펙트럼을 담당하기 위해서 공진기 내부에 처프거울이 사용되었고 multi-shot FROG에서는 비선형 매질로 BBO 10 um가 사용되었다. 10 펨토초 미만의 레이저 펄스를 진단하기에 앞서 비교적 모양이 간단하고 폭이 좁은 가우스 모양의 스펙트럼에 대해서 제작된 multi-shot FROG의 성능을 확인했다. 이때 측정된 스펙트럼의 푸리에 변환한계 펄스의 폭은 15.5 펨토초

였다. 출력거울에 의한 분산을 최적화 시킨 후 측정된 결과에서 복원된 위상은 거의 평평했고 스펙트럼 끝 부분에서 약간의 고차 분산이 남아 있음을 보여줬다. FROG 알고리즘으로 복원된 펄스의 폭은 16.6 펨토초로 고차 분산의 영향으로 변환한계보다 폭이 약간 늘어났음을 확인할 수 있었고 FROG의 자체검증 과정을 통해서 결과가 정확하다는 것을 확인할 수 있었다. 용융 실리카(fused silica)를 투과시켜 양의 군지연 분산(group delay dispersion; GDD)을 가해준 레이저 펄스의 경우 복원된 위상은 아래로 볼록한 포물선 모양을 나타냈고 fitting을 통해서 구해진 GDD 값은 용융 실리카의 GDD와 일치함을 확인했다. 그리고 복원된 펄스의 폭은 양의 군지연 분산으로 인해 16.6에서 30.2 펨토초로 늘어났다. 다음으로 공진기 내부의 분산을 최적화 시킨 후 multi-shot FROG를 이용해서 10 펨토초 미만의 레이저 펄스를 진단하였다. multi-shot FROG를 통해서 측정된 레이저 펄스의 폭은 변환한계에 가까운 8.6 펨토초였다. 그림 1은 측정된 스펙트럼, 변환한계 펄스 그리고 FROG 알고리즘을 통해서 복원된 스펙트럼, 위상, 펄스의 세기를 보여주고 있다. FROG 알고리즘을 통해 복원된 위상에서 고차분산 특히, 4차 분산이 남아 있으며 이로 인해 두 펄스의 모양이 양옆에서 약간의 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 복원된 스펙트럼과 측정된 스펙트럼의 세기가 장파장 쪽에서 약간의 차이를 나타내고 있으며 자체검증 과정에서 약간의 오차가 있음을 확인할 수 있었다. 오차 원인을 분석한 결과 분광기의 CCD 반응율이 오차의 원인인 것으로 확인되었고, CCD의 반응율을 이용해서 측정된 스펙트럼을 교정하였으며 단파장 영역에서는 반응율을 알 수 없어서 측정된 FROG trace를 교정하지 못했다. 이러한 이유로 두 스펙트럼과 자체검증 과정에서 약간의 차이가 나타났다. 보다 정밀한 측정이 이루어지도록 CCD 반응율을 고려한 실험을 준비하고 있다.

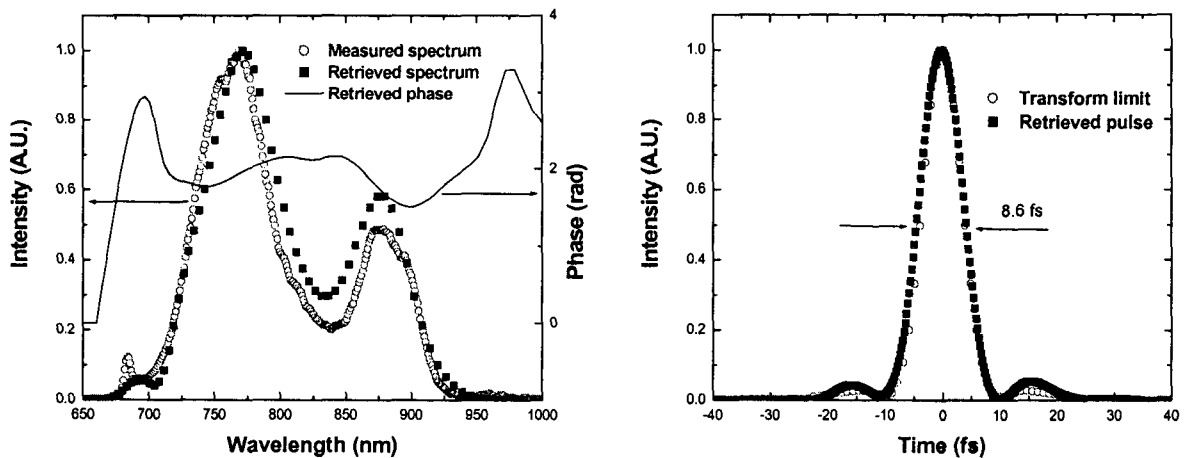


그림 1. 측정된 스펙트럼과 복원된 스펙트럼, 위상 그리고 변환한계와 복원된 펄스

참고문헌

1. P. M. W. French, S. M. J. Kelly, and J. R. Taylor, Opt. Lett. 15, 668 (1990).
2. R. Szipocs, K. Ferencz, Christian Spielmann, Ferenc Krausz, Opt. Lett. 19, 201 (1994).
3. J. D. Jung, F. X. Kartner, N. Matuschek, D. H. Sutter, F. Morier-Genoud, G. Zhang, U. Keller, Opt. Lett. 22, 1009 (1997).
4. D. J. Kane and R. Trebino, Opt. Lett. 18, 823 (1993).
5. R. Trebino and D. J. Kane, Opt. Soc. Am. A 10, 1101 (1993).