

## 펨토초 레이저에서 자기위상변조와 분산의 불연속 분포에 의한 펄스 확대 효과

### Pulse broadening by discrete distribution of self-phase modulation and dispersion in a femtosecond laser

차용호, 박현민, 한재민, 이용주  
한국원자력연구소 양자광학기술개발팀  
yhcha@kaeri.re.kr

티타늄 사파이어 등의 고체 매질을 사용하는 펨토초 레이저는 지난 십년 동안 급속도로 발전하여 최근에는 5 fs 영역의 펄스 생성에 성공하고 있다<sup>(1, 2)</sup>. 이러한 펨토초 레이저는 모드록킹을 위해 커 렌즈 모드록킹이나 반도체 포화 흡수체를 사용하며, 공진기 내의 군속도 분산을 보상하기 위하여 프리즘 쌍이나 분산 조정 거울을 사용한다. 펨토초 레이저 펄스가 생성되는 원리를 설명하기 위해 많은 연구가 이루어 졌으며, 자기위상변조와 음의 군속도 분산의 상호작용에 의한 솔리톤 생성이 펨토초 레이저 펄스가 형성되는 기본 원리로 밝혀졌다. 그러나, 광섬유 등에서 생성되는 이상적인 솔리톤은 매질 내에 균일하게 분포되어 있는 자기위상변조와 군속도 분산에 의해 형성되지만, 일반적인 펨토초 레이저 공진기 내에서는 자기위상변조와 군속도 분산이 불연속적으로 분포한다. 따라서, 펨토초 레이저에서 생성되는 펄스와 이상적인 솔리톤과는 상당히 다른 특성을 보인다.

본 연구에서는 실제 펨토초 레이저에서 나타나는 불연속적인 자기위상변조와 군속도 분산 분포를 고려하여 펨토초 펄스 형성을 전산시뮬레이션하였다. 레이저 공진기는 실제로 많이 쓰이는 선형 공진기를 가정하였으며, 이득 매질로는 중심 이득 파장 790 nm, 선폭 123 THz의 티타늄 사파이어를 사용하였다. 이득 매질에서 발생하는 양의 군속도 분산을 보상하기 위해서 음의 군속도 분산을 생성하는 광학계를 분리하여 설정하였고, 모드록킹을 위한 자기진폭변조 방법으로는 공진기 끝에 위치한 무한히 빠른 반응 시간을 갖는 포화 흡수체를 사용하였다. 이득 매질에서 발생하는 자기위상변조, 양의 군속도 분산, 이득 분산 등을 전산시뮬레이션하기 위해 split-step Fourier-transform 방법을 사용하였으며<sup>(3, 4)</sup>, 공진기 내에서 펄스가 왕복하는 순서에 따라 펄스 형성을 계산하였다.

실제 레이저 공진기 내에서 형성되는 펄스와 이상적인 솔리톤 형태의 펄스를 비교하기 위해서 두께 2 mm, 4 mm 티타늄 사파이어 매질에서 발생하는 양의 군속도 분산을 별도의 음의 군속도 분산으로 보상한 경우와 티타늄 사파이어 매질 자체가 음의 군속도 분산을 가진다고 가정하였을 경우를 전산시뮬레이션하였다 (그림 1). 이 때, 이상적인 솔리톤을 고려하기 위해 3차 이상의 고차 군속도 분산은 없다고 가정하였으며 펄스 에너지는 약 100 nJ, 자기위상변조 계수는 0.1로 일정하게 하였다. 이상적인 솔리톤 형태의 경우에는 공진기 내부의 분산이 작아질수록 더 짧은 펄스가 형성되며 분산이 0에 수렴하면 펄스폭도 0에 선형적으로 접근한다. 전산시뮬레이션결과 얻어진 펄스폭과 이상적인 솔리톤이 가지는  $\text{sech}^2$  형태의 펄스폭이 거의 일치하는 것도 확인할 수 있었다. 한편, 실제 레이저 공진기에서 형성되는 펄스의 경우에는 같은 군속도 분산에서 훨씬 넓은 펄스폭이 형성되었으며 분산이 0으로 수렴해도 펄스폭이 유한한 값으로 남는 것을 볼 수 있다. 이득 매질의 두께가 두꺼울 수록 이러한 현상이 심해지며, 형성된 펄스의 모양도 이상적인  $\text{sech}^2$  형태와 많이 다른 것을 확인하였다. 따라서, 실제 레이저 공진기의 경우에는 펄스폭이 궁극적으로 이득 매질의 두께에 의해 제한된다는 것을 알 수 있다.

그림 1의 결과에 따르면 두께 4 mm의 티타늄 사파이어를 사용한 레이저에서는 16 fs 이하의 레이저 펄스를 생성할 수 없음을 알 수 있으나, 실험적으로는 이미 4-5 mm의 티타늄 사파이어 매질을 사용하여 약 10 fs의 펄스 생성이 보고되었다. 이것은 그림 1에서 고려하지 않았던 고차의 군속도 분산으로부터 설명 될 수 있다. 그림 2는 두께 4 mm의 티타늄 사파이어를 사용하고 공진기 내부의 분산을 4차 분산까지 고려하였을 때, 공진기 내부의 균지연 분산과 생성된 펄스의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 고차의

군속도 분산에 의해 균지연 곡선이 850 nm 부근에서 왜곡됨을 알 수 있으며 이러한 고차 분산효과에 의해 더 넓은 스펙트럼이 형성되었다. 스펙트럼을 Fourier 변환하여 얻을 수 있는 최소의 펄스폭은 약 7.5 fs였다. 그러나, 고차의 분산에 의해 펄스의 반치폭은 감소하지만, 펄스 주위에 노이즈가 생성되고 contrast가 떨어지는 단점이 있음을 확인하였다.

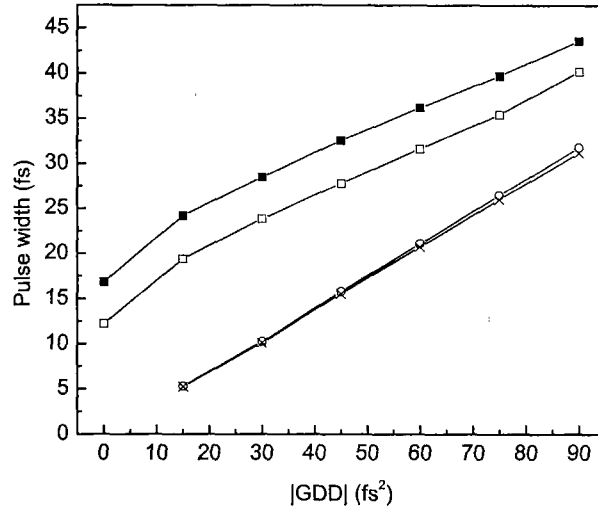


그림 1. 공진기 내의 군속도 분산에 따른 펄스폭. ×: 이상적인 솔리톤 형태로 전산시뮬한 펄스, ○: 이상적인 솔리톤의 펄스폭, □: 두께 2 mm의 티타늄 사파이어, ■: 두께 4 mm의 티타늄 사파이어.

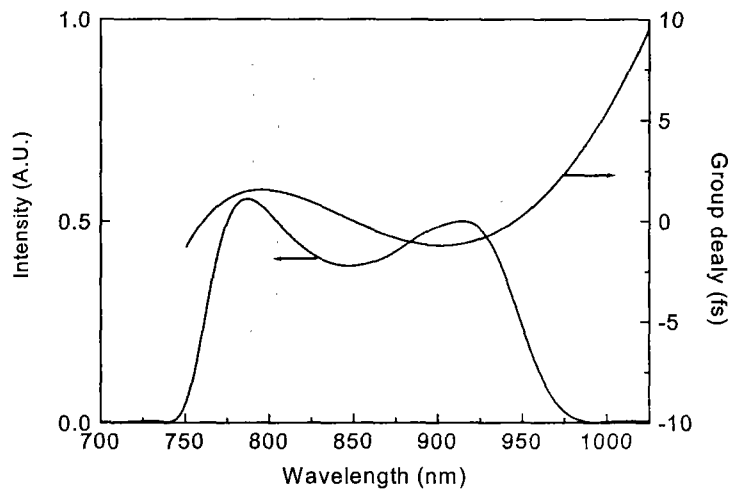


그림 2. 고차 분산을 고려하여 전산시뮬한 레이저 펄스의 스펙트럼. 고차 분산에 의해 넓은 스펙트럼이 형성된 것을 알 수 있다. 고차 분산에 의해 왜곡된 공진기 내의 균지연 분산도 함께 나타내었다.

참고문헌

1. U. Morgner, F. X. Kartner, S. H. Cho, Y. Chen, H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, Opt. Lett. 24, 411 (1999).
2. D. H. Sutter, G. Steinmeyer, L. Gallmann, N. Matuschek, F. Morier-Genoud, U. Keller, V. Scheuer, G. Angelow, and T. Tschudi, Opt. Lett. 24, 631 (1999).
3. G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, New York, Academic Press 1989.
4. F. X. Kartner, J. A. Au, U. Keller, IEEE J. Quantum Electron. 4, 159 (1998).

