

## 고차조화파를 이용한 아토초 발생에 관한 이론적 연구

### Theoretical analysis of the attosecond pulse generation using high-order harmonics

김경택, 김철민, 남창희  
한국과학기술원  
kyungtaec@mail.kaist.ac.kr

고차조화파를 이용해 아토초 펄스를 생성시킬 수 있음은 최근 여러 연구자들에 의해 이론적으로 제시되어 왔다. 아토초 펄스의 생성은 기본적으로 고차조화파 발생을 이용하여 생성되므로 고차조화파의 연구가 선행되어야 하며, 이에 대한 연구는 이미 많은 연구자들에 의해 이루어 졌다.

초기에 Kulander<sup>(1)</sup> 등은 Time dependent Schrödinger equation (TDSE) 을 사용하여 수치적으로 계산하여 고차조화파의 이론적 분석을 수행하여 단일원자(single atom)에서 발생하는 고차 조화파의 평탄영역(plateau)과 잘림영역(cutoff) 등을 설명하였고, Corkum<sup>(2)</sup> 등은 준고전적 (semiclassical) 원자 모델을 사용하는 물리적 모형을 제안하여 이 때 계산된 고차조화파가 실험결과 및 완전한 양자역학적 결과와 유사하게 나타남을 보였다. 또한 Lewenstein<sup>(3)</sup> 등은 Corkum 등이 제안한 물리적 모형에 바탕을 둔 양자역학적 고차조화파 모형을 제시하여 고차조화파의 발생구조를 설명하고 고차조화파의 고유위상 (intrinsic phase)을 도입하여 고차조화파 진행효과 등의 연구에 대한 기초를 마련하였다.

아토초 발생 연구에 있어서는 Antoine<sup>(4)</sup>는 의해 고차조화파를 이용해 아토초 펄스열을 얻을 수 있음을 제안했다. 실제의 응용에서 중요한 하나의 아토초 펄스를 얻는 방법 또한 크게 두 가지로 제시되고 있으며, 그 중 하나는 부분적으로 편광된 빛에 의해 하나의 아토초 펄스가 선택 가능함을 보인 것이고, 다른 방법으로는 짧은 펄스열에서 나타나는 잘림 영역의 차이를 이용한 방법이다. 실험에서는 최근에 들어 아토초 펄스의 측정이 부분적으로 가능하게 되었고<sup>(5)</sup>, 그 응용분야의 하나로 광전자 시간분해 분광학(time-resolved photo- electron/photoion spectroscopy)<sup>(6)</sup> 등에 많은 연구가 수행되고 있다. 특히, 이러한 응용분야의 연구에 있어 더 짧은 펄스는 더 좋은 분광한계를 제공하므로, 보다 좋은 성질의 아토초 펄스를 얻는 것이 중요하다고 할 수 있다.

이 논문에서는 고전적 방법을 통하여 원자와 전자의 충돌시간을 계산하고, 그 위상관계를 논하며, 시간의존 슈뢰딩거 방정식을 통해 얻은 고차조화파 계산결과에 대해 스펙트로그램을 이용하여 시간 주파수 분석을 행했다. 스펙트로그램을 통해 푸리에 트랜스폼보다 많은 정보를 얻을 수 있었으며, 특히, 여러 이론에서 제시되었던 고차조화파의 짧은 궤적에 의한 영향과 긴 궤적에 의한 영향을 직관적으로 보여줄 수 있었다. 이러한 방법을 통해 고차조화파는 레이저의 반주기에 해당하는 시간 동안에 짧은 궤적의 영향으로 양의 처프를 가지게 되고, 긴 궤적의 영향으로 음의 처프를 가지게 됨을 보였다. 스펙트로그램을 통해 고차조화파의 순간 주파수를 정의할 수 있고, 이러한 순간 주파수는 아토초 펄스 최적화조건을 계산하는데에 중요한 역할을 한다.

아토초 펄스의 생성에서 아토초 펄스의 폭은 시간분해 분광학에서 분해능과 직접적인 관련이 있으므로, 더욱 짧은 펄스를 얻는 것은 중요하다. 짧은 펄스를 만들기 위해서는 각 주파수 성분들의 위상관계

를 명확히 알아야 한다. 각 주파수 성분들의 위상관계는 앞서의 논의에서 정의된 순간주파수를 이용해 결정될 수 있으며, 이들 주파수 성분들의 위상차이가  $2\pi$ 안에 있는 성분들을 선택했을 때에 가장 짧으면서 피크의 세기가 큰 펄스를 얻을 수 있음을 보였다. 이러한 결과는 그림 1에 잘 나타나 있다. 여기서는 펄스폭 80fs, 세기  $I=1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 의 레이저와 네온원자의 상호작용으로 얻어진 고차조화파를  $20\omega_0$  부터  $80\omega_0$ 까지 선택한 경우이고, 이 경우 위상차이가  $2n\pi$ 에 해당하는 지점에서 상쇄간섭이 생겨 아토초 펄스의 피크 세기는 더 이상 커지지 않고 펄스폭만 늘어남을 알 수 있다. 따라서 이러한 경우에 주파수 선택 영역은  $20\omega_0 - 39.5\omega_0$ 임을 알 수 있다.

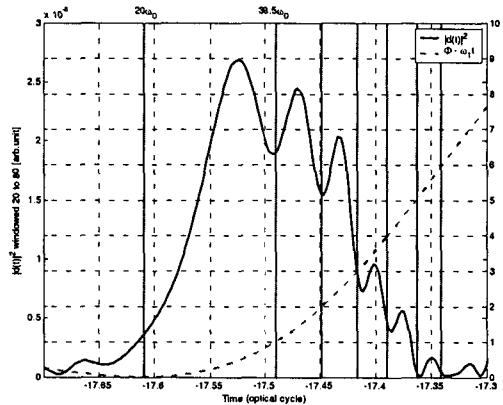


그림 1. Neon,  $I=1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ , 80fs(FWHM of laser)  
고차조화파의 주파수 성분의 위상차이와 아토초 펄스의 포락선

고차조화파의 각 시간별 주파수 특성은 레이저의 조건에 따라 달라지지만, 보편적인 경향을 가지고 있으며, 위에서 정의한 고차조화파의 순간주파수를 이용하면 최적화된 아토초 펄스의 중심주파수와 선택되어야 할 주파수 폭은 다음과 같이 결정된다.

$$\omega_{opt} = \alpha U_p e^{-1/2} + I_p, \quad \Delta\omega = \sqrt{\frac{2\alpha U_p}{\beta}} e^{-1/4}$$

여기서,  $\alpha, \beta$  는 상수로서 각각 3.17, 0.134로서 레이저의 조건에 따라 조금씩 변한다. 이렇게 정의된 최적화 조건은 아토초 펄스생성에서 보편적으로 사용될 수 있다.

- (1) K. C. Kulander, Phys. Rev. A 35. 445 (1987)
- (2) P. B. Corkum, Phys. Rev. Lett. 71 (1994)
- (3) M. Lewenstein et al., Phys. Rev. A 49, 2117 (1994)
- (4) P. Antoine et al., Phys. Rev. Lett. 77, 1234-1237 (1996)
- (5) M. Hentschel et al., Nature, 509 (2001)
- (6) H. Niikura et al., Nature, 917 (2002)