

## 고차조화파의 단원자 및 진행효과의 이론적 분석

### Theoretical analysis on single-atom and propagation effects of high order harmonics

김이중, 김정훈, 남창희

한국과학기술원 물리학과 결맞는 X선 연구단

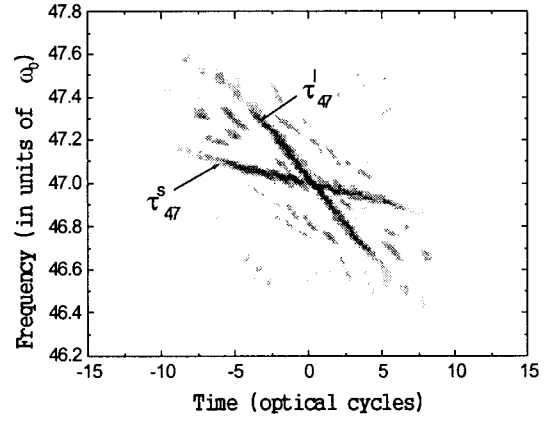
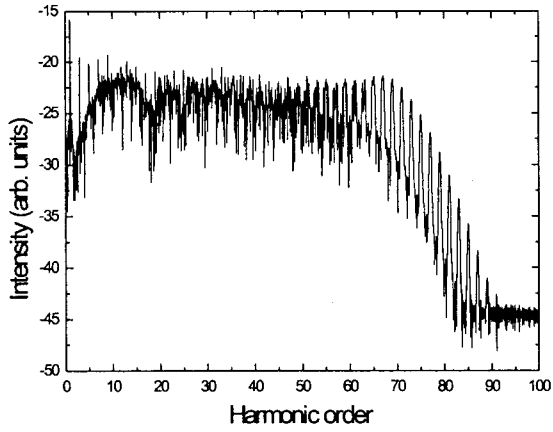
ijkim@mail.kaist.ac.kr

고차조화파(high-order harmonics)는 강한 펄스 레이저와 원자간의 상호작용에 의해서 발생하는 비선형 현상으로, 레이저에 의한 전기장의 세기가 원자에 의해 가해지는 전기장의 세기와 비슷하거나 더 강해서, 이전의 비선형 현상을 설명하던 섭동이론(perturbation theory)으로는 설명이 불가능하다. 이러한 고차조화파를 이론적으로 설명하려는 시도들이 있어 왔고, 비교적 성공적으로 실험에서 나타나는 여러 현상들을 설명할 수 있게 되었다. 초기에 Kulander등은 시간-의존 슈뢰딩거방정식(time-dependent Schrodinger equation, TDSE)을 전산 시뮬을 통해 수치적으로 계산하여 고차조화파의 이론적 분석을 수행하여 단일원자(single atom)에서 발생하는 고차조화파의 많은 특성을 설명하였으며, 실험결과에서 관측된 평탄영역(plateau region)과 잘림(cut off)현상 등을 이론적으로 재현하였다. 한편 Corkum등은 준고전적(semiclassical) 원자모델을 사용한 물리적 모형을 제안하여 이 때 계산된 고차조화파가 실험결과 및 완전한 양자역학적 결과와 유사하게 나타남을 보였다. 또한 Lewenstein등은 strong field approximation(SFA)모형을 제시하여 고차조화파의 발생구조를 설명하고 고차조화파의 고유위상(intrinsic phase)을 도입하여 고차조화파 진행효과 등의 연구에 대한 기초를 마련하였다. 그렇지만 보다 완전한 고차조화파의 구현을 위해서는 단일원자에 대한 TDSE와 기체매질 속에서 발생한 고차조화파의 진행을 설명하는 파동 방정식을 함께 고려해야 한다.

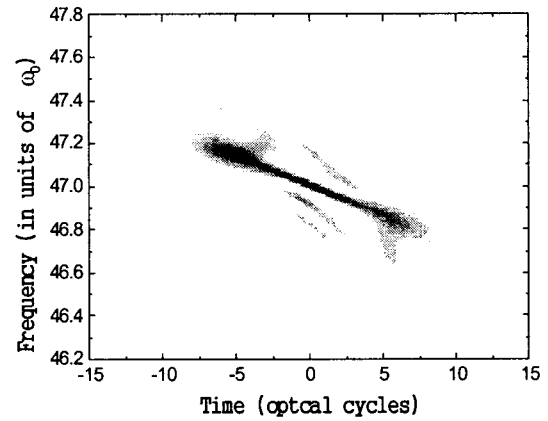
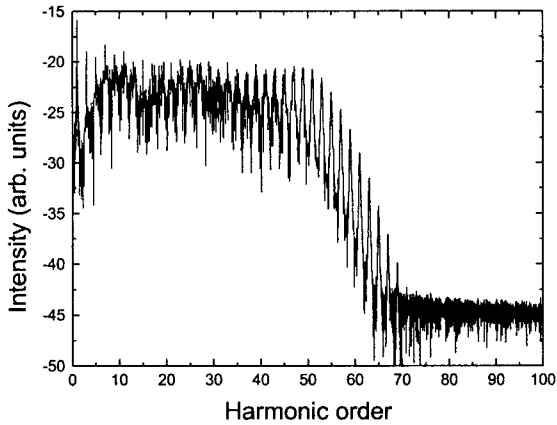
본 연구에서는 단일 원자와 진행효과(propagation effect)를 고려한 경우에 있어서의 고차조화파에 대한 분석을 수행하였다. 특히 시간 주파수 분석(time-frequency analysis)에 널리 쓰이고 있는 Wigner distribution(WD)<sup>(1)</sup>을 통해서 레이저 펄스와 특정 고차조화파의 차수를 분석해 보는데 중점을 두었다. 실제 실험시에 변화시킬 수 있는 변수들, 이를테면 펄스폭, 레이저 세기, 원소의 종류, 파장 등에 따른 변화 양상을 분석해 보았다.

단일 원자의 경우 고차조화파의 평탄 영역이 확대되기 위해서는 레이저의 세기가 강해야 하고, 펄스폭은 짧고 중심파장은 클수록 좋으며 이온화 퍼텐셜은 높은 원소를 선택해야 함을 알 수 있었다. 특히 시간 주파수 특성함수인 WD를 통해서 고차조화파의 스펙트럼을 주로 구성하는 짧은 궤도와 긴 궤도에 의한 chirp(시간의 따른 주파수의 변화)특성을 해석할 수 있었다. [그림]은 파장의 변화에 따른 WD로, 고차조화파는 dipole의 coherent sum<sup>(2)</sup>을 통해 multiple recollision 성분들을 제거해 WD의 분해능을 높였다. 진행효과를 고려한 경우 또한 레이저와 고차조화파의 특성을 WD를 통해 알아보았다. 레이저 스펙트럼의 경우 레이저 세기가 강할수록, 기체의 밀도가 높을수록 청색편이와 스펙트럼의 퍼짐 정도가 증가함을 알 수 있었고, 이 때 WD에서 보여지는 chirp의 양상도 다양하게 변화함을 볼 수 있었다. 고차조화파의 경우는 특정 레이저의 세기에서 단원자 효과에 의해 유도된 음의 chirp과 플라즈마에 의해 유도된 양의 chirp의 영향이 각각 나타남을 알 수 있었고, 각각의 경우 chirp특성을 해석할 수 있었다.

(a)  $\lambda = 850\text{nm}$ 인 경우



(b)  $\lambda = 750\text{nm}$ 인 경우



[그림]  $I = 3.6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ,  $\Delta t = 80\text{fs}$ , Ne인 경우 고차 조화파 스펙트럼과 WD

참고문헌

- [1] J. H. Kim, D. G. Lee, H. J. Shin, and C. H. Nam, Phys. Rev. A **63**, 063403 (2001).
- [2] J. H. Kim, H. J. Shin, D. G. Lee, and C. H. Nam, Phys. Rev. A **62**, 055402 (2000).