

# 길게 분출된 가스 표적을 이용한 밝은 저발산 고차 조화파 발생 Generation of bright low-divergence high-order harmonics in a long gas jet

이동근\*, 최일우\*\*, 김형택\*, 홍경한\*, 남창희\*

\*한국과학기술원 물리학과 결맞은 엑스선 연구단, \*\*동신대학교 COMDS

donggun@mail.kaist.ac.kr

최근에 극초단 고출력 레이저가 개발됨에 따라 이에 의한 강한 비선형 현상중의 하나인 고차 조화파 (high-order harmonics)의 발생이 가능하게 되었다. 조사 레이저와 원자 간의 결맞은 과정에 의해서 생성된 고차 조화파<sup>(1)</sup>는 레이저와 같은 좋은 결맞음과 펄스초 이하의 아주 짧은 펄스폭을 가질 수 있기 때문에<sup>(2)</sup> 플라즈마 진단, 극자외선 광원을 이용한 비선형 광학, 아토초 영역의 물리적 현상을 관측하는데 아주 유용한 광원이 될 것으로 여겨져 오고 있다. 그러나 고차 조화파가 결맞은 극초단 엑스선 광원으로써 여러 분야에 폭넓게 활용되기 위해서는 조화파의 발생 효율 향상뿐만 아니라 절대적인 엑스선 광자수의 증가를 통한 밝기의 증대가 이루어 져야 한다. 현재까지 국외의 여러 그룹에서 고차 조화파의 발생효율을 향상시킨 몇몇 실험결과가 발표<sup>(3,4)</sup> 되었으나 절대적인 엑스선 광자의 수를 더욱 증가시키기 위해서는 발생표적 디자인, 조사 레이저와 발생된 엑스선과의 위상정합, 플라즈마 매질 내에서의 조사 레이저 빔의 진행 등의 여러 부분에 대한 연구가 이루어 져야한다.

본 연구에서는 슬릿노즐을 통해서 생성된 긴 기체 매질을 표적으로 이용하여 고차조화파의 발생효율 증대뿐만 아니라 절대적인 엑스선 광자의 수를 증대시키기 위한 실험을 수행하였다. 본 연구에 사용된

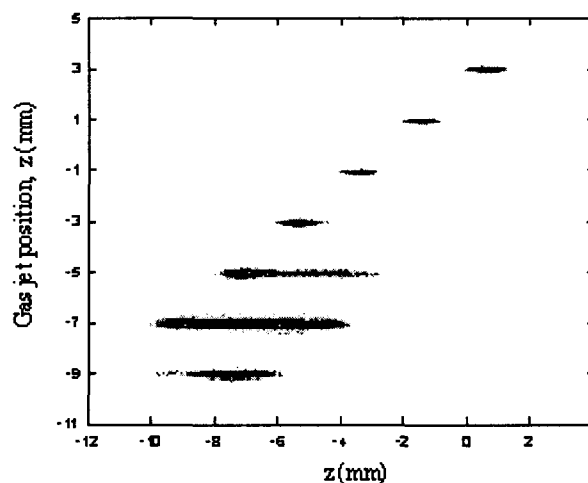
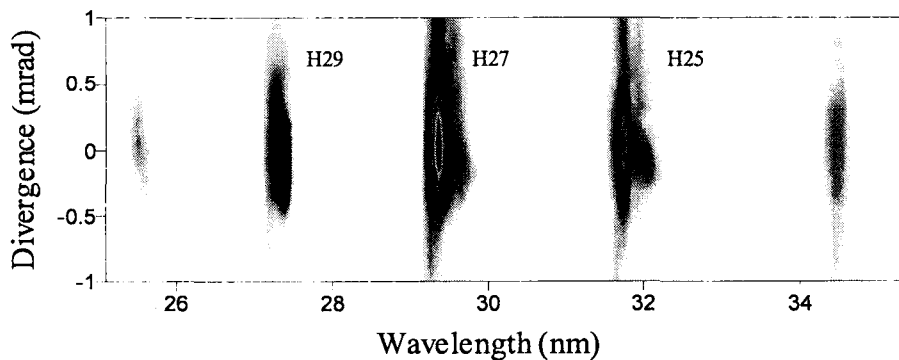


그림 1. 길이 6 mm 기체 매질의 위치에 따른 레이저 빔에 의해서 생성된 아르곤 플라즈마 상. 레이저 빔은 왼쪽에서 오른쪽으로 진행하고 레이저의 집속점의 위치는  $z = 0$  이다.

타이타늄 사파이어 레이저의 펄스폭은 28 fs ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ )이고 집속 점에서의 최대 세기는  $6 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 이다. 고차 조화파는  $6 \times 0.5 \text{ mm}^2$ 의 슬릿노즐에 의해서 생성된 긴 아르곤 젯과 조사빔과의 상호작용을 통해서 생성되었다. 아르곤 젯 중심에서의 최대 밀도는 65 torr이었다. 아래 그림 1에 레이저 빔이 가스 젯에 조사되어 매질과의 상호작용을 통해서 생성된 플라즈마 상을 CCD를 이용하여 관측한 결과를 도시하였다.

그림 1에서 알 수 있듯이 표적의 위치에 따라 플라즈마 상의 길이가 아주 민감하게 변함을 알 수 있다. 그리고 적절한 조건에서는 (그림 1에서  $z = -7 \text{ mm}$ ) 매질의 전 길이(6 mm)에 일정한 플라즈마 상이 관측되어 짐을 알 수 있다. 이는 이온화된 매질에 의한 레이저 빔의 발산(defocusing)이 입사되는 레이저 빔의 집속각과 상호작용하는 매질의 시작점에서의 레이저 세기의 조절을 통해서 매질의 전 길이를 통해서 매질을 이온화시키기에 충분한 세기를 가진 레이저 빔을 매질 끝까지 진행 시킬 수 있음을 확인 할 수 있다. 이러한 조건에서의 고차 조화파의 발생은 고밀도 매질에서 레이저 빔의 발산으로 인한 위상부정합을 최소화하고 충분한 세기의 레이저 빔을 가능한 많은 원자에 조사가 가능함으로써 조화파의 효율 향상과 더불어 절대적인 엑스선 발생량의 증대 또한 기대 할 수 있다.

그림 2에 레이저빔 진행의 최적화된 조건에서 관측된 고차 조화파의 분광선이 도시 되어있다. 가장 강한 분광선은 27차 조화파이고 5 mJ의 단일 펄스에 의해서 생성된 27차 조화파의 에너지는 4 nJ 이다. 조화파의 발산각(divergence)은 이제까지 보고 된 것보다 훨씬 작은 약 0.5 mrad으로 측정되었다.



T  
A

그림 2. 레이저빔의 진행이 최적화된 위치 ( $z = -7 \text{ mm}$ )에서 발생된 고차 조화파 분광선.

1. D. G. Lee, J. -H. Kim, K. H. Hong, and C. H. Nam, Phys. Rev. Lett. **87**, 243902 (2001).
2. D. G. Lee, H. J. Shin, Y. H. Cha, K. H. Hong, J. -H. Kim, and C. H. Nam, Phys. Rev. A **63**, 021801(R) (2001).
3. A. Rundquist, C. G. Durfee III, Z. Chang, C. Herne, S. Backus, M. M. Murnane, H. C. Kateyn, Science, **280**, 1412 (1998).
4. M. Schnurer, Z. Cheng, M. Hentschel, G. Tempea, P. Kalman, T. Bracec, and F. Krausz, Phys. Rev. Lett. **83**, 722 (1999).