

강한 펨토초 레이저에 의해 아르곤 송이에서
발생한 연엑스선
Soft X-ray emission from Ar clusters
irradiated by an intense femtosecond laser

김철민*, T. Mocek, 신현준, 차용호, 홍경한, 남창희
한국과학기술원 물리학과/극초단 레이저 연구실
kcm@kaist.ac.kr*

강한 레이저 펄스에 의해 만들어진 플라즈마를 사용하여 연엑스선(soft X-ray, 10-300 Å) 광원을 얻으려는 노력은 주로 고체나 기체 표적에 대한 것이었다. 최근에 이르러 기체의 단열 팽창에서 생기는 원자 송이(atomic cluster)를 표적으로 하는 연구 결과들이 발표되었다.^{(1), (2)} 원자 송이는 국소적으로는 고체에 가까운 밀도를 가지고 있어서 효율적으로 레이저 에너지를 흡수하는 반면, 전체적으로는 기체 상태에 있기 때문에 파편이 적고, 기체의 압력과 온도를 변화시킴으로써 송이의 크기를 조절할 수 있다.

본 연구에서는 아르곤 원자 송이에 강한 레이저 펄스(최대 세기 $\sim 6 \times 10^{16} \text{W/cm}^2$)를 집속시켜 발생된 연엑스선 영역(40-180 Å)의 스펙트럼을 관찰하였다. 첫째, 송이가 형성되었을 때와 송이가 형성되지 않았을 때의 스펙트럼을 비교 분석하였고, 둘째, 송이 생성 전의 온도를 변화시킴으로써 송이의 크기를 바꾸어 가면서 연엑스선의 발생 양상을 관측하였다. 셋째, 레이저 펄스의 펄스폭을 변화시키면서 연엑스선의 발생 양상을 관측하였다. 아울러 Rayleigh 산란을 이용하여 원자 송이의 크기를 측정하였다.⁽³⁾

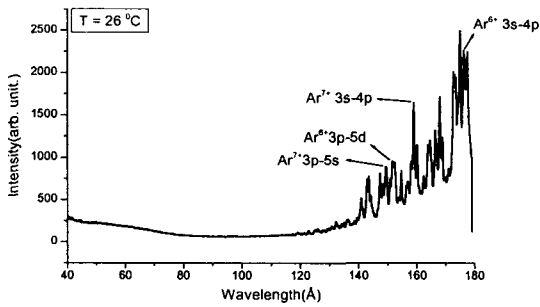
20 fs 3 TW Ti:Sapphire 레이저(810 nm)⁽⁴⁾에서 발생된 레이저 펄스는 기체 분사기 위 0.7 mm 높이에 초점을 맺게 된다. 기체 분사기는 펄스 동작하는 밸브(General Valve)와 액체 질소가 든 상자로 이루어져 있다. 기체가 든 관을 액체 질소가 든 상자를 통과하게 함으로써 기체를 냉각시킬 수 있는데, 액체 질소의 양을 조절함으로써 기체의 온도를 조절할 수 있다. (-120~+26°C) 표적에서 나온 빛은 연엑스선용 CCD(Princeton Instruments)가 부착된 평면결상형 극자외선 분광기⁽⁵⁾를 사용하여 시간 적분된 스펙트럼을 얻었다. 원자 송이의 크기는 10 ns Nd:YAG 레이저(532 nm)를 표적에 집속시킨 후 산란되는 빛을 광증배관으로 관측하였다. 광증배관에서 나온 신호는 디지털 오실로스코프를 사용하여 기록했다.

그림 1과 그림 2는 원자 송이가 생겼을 때와 원자 송이가 생기지 않았을 때의 스펙트럼이다. 원자 송이가 생겼을 때 기체 밀도는 단지 2배 증가하나 전체적으로 신호가 40배 이상 증가하고, 주어진 레이저 세기($6 \times 10^{16} \text{W/cm}^2$)에서는 나올 수 없는 Ar^9 , Ar^{10} 의 분광선이 나오는 것을 알 수 있다.(이 이온화 상태들은 OFI(optical field ionization)에서 10^{18}W/cm^2 이상의 세기를 필요로 한다.) 즉, 송이 형성에 의해 밀도가 높아지고 충돌 횟수가 빈번해지면서 플라즈마가 효과적으로 가열되어 고온의 플라즈마가 만들어짐을 알 수 있다.

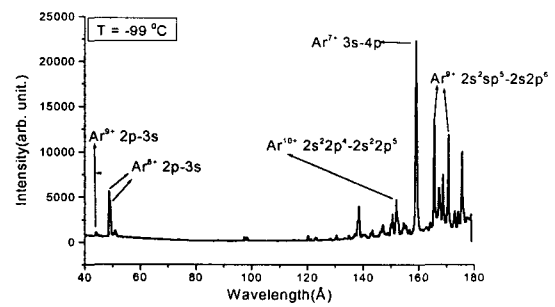
그림 3은 온도를 바꾸어 원자 송이의 크기를 변화시켜 가면서 각 분광선을 세기를 측정한 것이다. 맨 처음에는 Ar^6 , Ar^7 의 분광선이 있고, 온도를 내려감에 따라 Ar^8 , Ar^9 , Ar^{10} 의 분광선이 순차적으로 나오는 것을 볼 수 있다. 전체적인 양상은 송이가 형성되면서 분광선의 세기가 급격히 증가하다가 포화

양상을 보인다. Rayleigh 산란 실험 결과 온도가 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일 때의 송이의 크기가 대략 $30\text{ }\mu\text{m}$ 이므로, 송이 형성 효과는 $30\text{ }\mu\text{m}$ 미만의 작은 송이들에 의해 나타난다는 것을 알 수 있다.

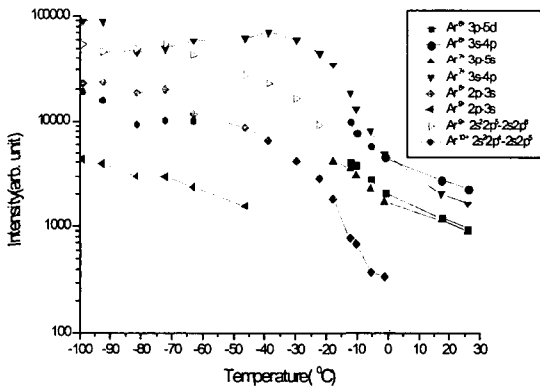
그림 4는 레이저 펄스폭을 달리해 가면서 각 분광선의 세기를 측정해본 것이다. 이 때 레이저 펄스의 전체 에너지는 펄스폭에 관계없이 일정하다. 기체 송이 형성 조건에서는 최대 세기가 낮아짐에도 불구하고 분광선의 세기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 플라즈마가 팽창하면서 플라즈마의 밀도가 공명 흡수 조건($n_e = 3n_c$, $n_c = m_e \omega^2 / 4\pi e^2$)에 가까운 상태로 가기 때문에, 공명 흡수에 의한 가열이 증가하기 때문으로 생각한다.⁽²⁾ 위의 결과들은 원자 송이 표적이 효율적인 X-선 광원 개발을 위한 우수한 특성을 지니고 있음을 보여주고 있으므로, 앞으로 원자 송이를 이용한 X-선 광원은 실용적인 레이저-플라즈마 X-선 광원으로 큰 가능성을 지니고 있다고 할 수 있다.



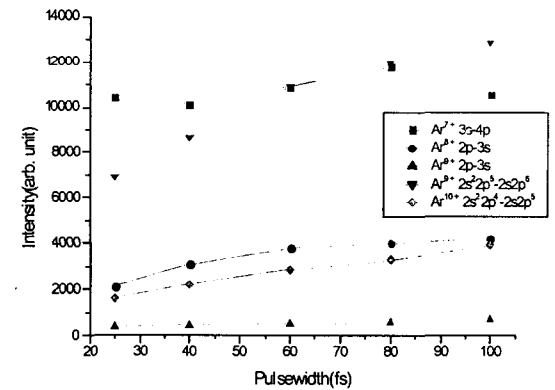
[그림 1] 송이가 없을 때의 스펙트럼(25 shot)



[그림 2] 송이가 생겼을 때의 스펙트럼(100 shot)



[그림 3] 온도에 따른 분광선의 세기



[그림 4] 펄스폭에 따른 분광선의 세기

참고문헌

1. A. Mcpherson, T. S. Luk, B. D. Thompson, K. Boyer, C. K. Rhodes, Appl. Phys. B **57**, 337 (1993)
2. T. Ditmire, T. Donnelly, A. M. Rubenchik, R. W. Falcone, M. D. Perry, Phys. Rev. A **53**, 3379 (1996)
3. R. A. Smith, T. Ditmire and J. W. G. Tisch, Rev. Sci. Instrum. **69**, 3798 (1998)
4. Y. H. Cha, Y. I. Kang and C. H. Nam, J. Opt. Soc. Am. B **16**, 1220 (1999)
5. Il Woo Choi, Chang Hee Nam and Jong Ung Lee, Appl. Opt. **36**, 1457 (1996)