

# 마하-젠더 간섭계와 극자외선 분광기를 이용한

## 레이저 발생 플라즈마의 진단

김 재훈, 김 동언  
 포항공과대학교 물리학과  
 jhoonie@postech.ac.kr

원통 대칭을 가지는 레이저 발생 플라즈마를 간섭계나 분광기를 사용하여 분석하는 경우, 그림(1)에서와 같이 결과는 원통의 현을 따라 평균된 값을 얻게 된다. 이 측정값을 Abel inversion<sup>(1)</sup>하면 radial 방향으로의 지역적인 값을 얻을 수 있다. 그 예로 간섭계를 이용하여 플라즈마의 전자의 밀도를 측정하는 경우<sup>(2)</sup>와 플라즈마의 분광선을 이용하여 플라즈마의 균일성을 측정하는 경우<sup>(3)</sup>, 또 분광선을 분석하여 매질의 온도와 물질의 종류를 측정하는 방법 등<sup>(4)</sup> 이 있다. 간섭계의 경우는 일반적으로 Abel inversion이 많이 사용되고 있으나, 극자외선 분광기의 경우, 반사도를 높이기 위해서 grazing incidence의 광학 기기를 사용하므로 상의 왜곡이 심하다. 그러나 toroidal mirror를 사용하는 경우 공간 분해능을 가지는 것이 알려져 있다<sup>(5)</sup>. 이 특성을 이용하여 얻어진 분광 결과로부터 분광선을 내는 이온의 radial 방향의 공간 분포를 얻을 수 있다. 여기서는 Abel inversion의 방법을 마하-젠더 간섭계와 극자외선 분광기의 측정결과에 사용하여 radial 방향으로의 전자 밀도와 분광선의 분포를 얻었다.

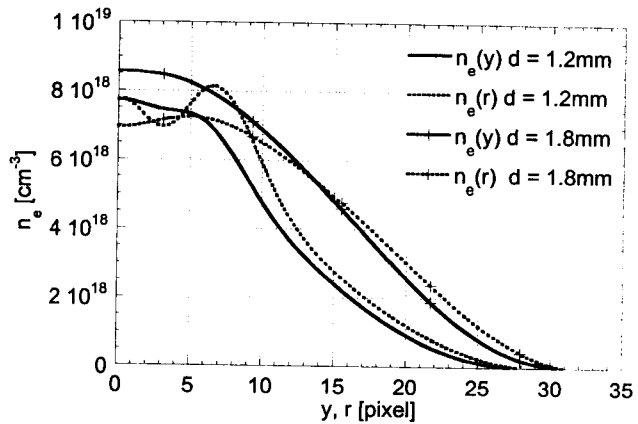
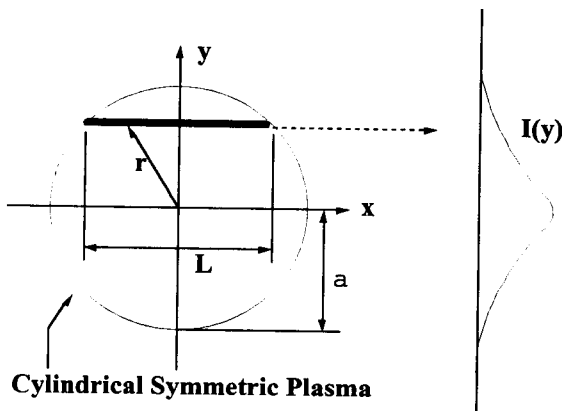
Abel inversion은 실험 결과의 오류를 수정하기 위해서 다항식으로 근사하고, 이것을 Abel inversion의 적분에 넣어 직접 적분했다.<sup>(1)</sup>

간섭계의 실험은 1J, 3nsec 펄스 폭을 가지는 Nd/Glass Laser의 일부분을 플라즈마를 발생하는데 사용하고, 나머지 일부는 120 nsec 정도의 optical delay를 주어서 간섭계에 사용하였다. 이때 간섭무늬의 이동 정도는 자기장이 없고 전자밀도가 레이저 파장에 대한 critical density보다 충분히 작은 경우  $\Delta\phi(y) = \frac{\omega}{c} \int [(1 - \frac{n_e}{n_c})^{1/2} - 1] dl \approx \frac{\omega}{2cn_c} \int n_e dl$  로 주어진다. 그림(2)는 간섭 무늬에서 얻은 간섭계가 보는 플라즈마의 현을 따라 평균된 전자 밀도(그림(1)에서 X축 방향으로 거리 L의 적분)와, 이것을 Abel inversion하여 radial 방향으로의 값으로 바꾼 결과이다. target의 표면에서 1.8mm 떨어진 부분에서 플라즈마의 크기는 1.1mm 정도이고 1.2mm 떨어진 부분에서는 0.7mm 정도이며 밀도는  $6 \sim 8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  정도이다. 대칭축 근처에서는 target 표면에 가까운 부분의 전자 밀도가 높고 멀어질수록 퍼져나가는 모습을 보인다.

그림(3)은 극자외선 분광기의 분광선이다. 분광기는 광집속을 위한 toroidal mirror를 사용한 flat-field spectrometer에 MCP를 광 검출기로 사용하였다. 이 MCP에 10 nsec의 gating pulse를 가하여 시간 분해된 분광선을 얻었다. 그림(3)의 분광선은 laser 입사 후 40nsec 정도 뒤의 target 표면에서의 분광선이다. 그림(4)는 그림(3)에 표시된 세 분광선의 공간(그림(1)에서 y 축 방향과, r축 방향)에 대한 분포이다. CVI 이온의 분광선은 서로 비슷한 공간 영역에 분포하고 그 영역은 축 방향으로 0.6mm 영역이며, CV 이온은 이보다 더 넓은 공간에 걸쳐 분포하고 그 영역은 1.1mm 정도인 것을 알 수 있다. 더 정밀한 실험을 위해서는 분광기 전체의 공간 분해능에 대한 연구가 필요하다.

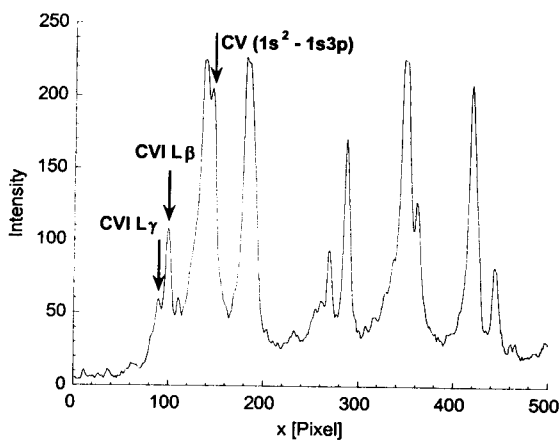
1. C. Fleurier and J. Chapelle, "Inversion of Abel's integral equation - application to plasma

- spectroscopy", *Comp. Phys. Com.* Vol 7, 200-206 (1974)
- J. A. Stamper, E. A. McLean, S. P. Obenshain and B. H. Ripin, "Concepts and Illustrations of optical diagnostics for laser-produced plasmas", *Fast Electrical and Optical Measurements*, Volume II, 691-728,
  - M. J. Buie, J. T. P. Pender, J. P. Holloway, T. Vincent, P. L. G. Ventek and M. L. Brake, "Abel's inversion applied to experimental spectroscopic data with off axes peaks", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, Vol 55, No 2, 231-243 (1996)
  - F. Yousefian and M. Lallemand, "Inverse radiative analysis of high resolution infrared emission data for temperature and species profiles recoveries in axisymmetric semi-transparent media", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, Vol 60, No 6, 921-931 (1998)
  - H. J. Shin, Dong-Eon Kim, and Tong-Nyung Lee, "Space-resolved extreme ultraviolet(XUV) spectroscopy using toroidal mirror", *Rev. Sci. Inst.*, Vol 66, No. 8, 4222-4226 (1995)

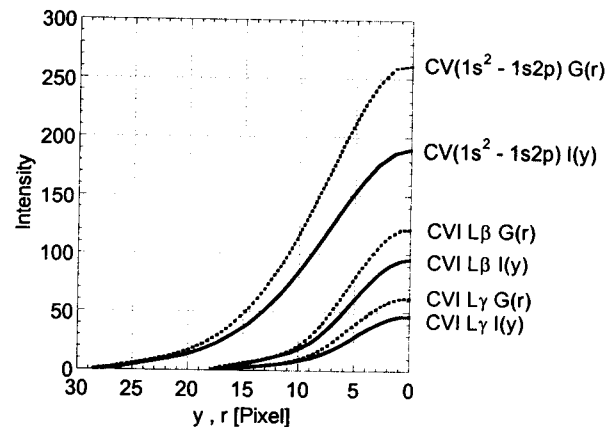


그림(1) 원통 대칭을 가지는 확장 광원 좌표계

그림(2) 마하-젠더 간섭계를 이용한 전자 밀도 측정 실험 결과는 다항식으로 근사.



그림(3) 레이저 발생 탄소 플라즈마의 2nm ~ 10nm 영역의 분광선



그림(4) 탄소 분광선의 공간 분해 결과 실험결과를 다항식으로 근사 후 계산. I(y)는 y 축 방향에 대한 공간 분포. G(r)은 radial 방향에 대한 inversion한 결과