

3% 에너지 변환효율을 가진 양성자 발생

Proton Generation with 3-% Energy Conversion Efficiency

최일우, 김철민, 정태문, 유태준, 성재희, 이성구, N. Hafz, 배기홍, 노영철, 고도경, 이종민,
M. Nishiuchi*, H. Daido*, A. Yogo*, S. Orimo*, K. Ogura*, J. Ma*, A. Sagisaka*, M. Mori*,
A. S. Pirozhkov*, H. Kiriyama*, S. V. Bulanov*, T. Zh. Esirkepov*, Y. Oishi**, K. Nemoto**,
H. Nagatomo***, K. Nagai***

광주과학기술원 고등광기술연구소

*Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Japan

**Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan

***Institute of Laser Engineering, Osaka University, Japan

iwchoi@gist.ac.kr

극초단 고출력 레이저빔을 10^{18} W/cm² 이상의 집속강도로 표적에 집속하면, 강한 레이저빔이 가진 전자기장과 표적에서 생성된 플라즈마의 상호작용에 의해, MeV급의 에너지를 가진 고에너지 전자가 발생한다. 고에너지 전자는 빛의 속도에 가까운 속도로 표적을 통과해 나가는 반면, 상대적으로 질량이 큰 원자나 이온은 표적에 정지해 있으므로 전자가 표적을 빠져나간 이후에는, 빠르게 움직이는 전자와 정지해 있는 이온 사이에 강한 정전기장이 형성된다. 이렇게 형성된 정전기장은 그 세기가 MV/ μ m에 이르므로 표적의 뒷면에 있는 원자를 이온화시킬 수 있을 정도로 강하다. 일반적인 표적의 표면에는 물이나 탄화수소의 불순물이 함유되어 있는데, 이러한 강한 정전기장이 불순물도 이온화시킬 수 있다. 극초단 고출력 레이저로 유도된 양성자의 원천은 이 강한 정전기장에 의해 이온화된 수소, 즉 양성자가 다시 정전기장에 의해 가속되어 발생하는 것이다.

레이저로 유도된 양성자는 피코초 정도의 짧은 펄스폭과 수십 마이크로미터 정도의 작은 크기를 가지고 있는 선원(source)이다. 이러한 고유한 특성을 활용하여, 기존 입자가속기의 injector로 사용, 소형의 탁상형 입자가속기 개발, 시공간 고분해능을 갖는 proton radiography, 의학과 산업 분야에 사용되는 단수명 방사성 동위원소 생산, 양성자 암치료 시스템 개발 등의 응용이 시도되고 있다⁽¹⁾. 특정 분야의 응용에 맞는 양성자빔을 개발하려면, 양성자의 에너지를 높여야 하고, 에너지 선폼를 좁혀야 하며, 레이저 에너지가 양성자의 운동 에너지로 변환되는 에너지 변환효율을 높여야 한다.

본 연구에서는 고등광기술연구소에 구축되어 있는 극초단 고출력 티타늄 사파이어 레이저를 표적에 집속하여, 3% 정도의 에너지 변환효율이 얻어졌다. 표적으로는 두께가 7.5, 12.5, 25 μ m인 Polyimide가 사용되었다. 표적에 도착하는 레이저의 펄스폭은 34 fs, 펄스당 에너지는 1.7 J, 집속된 레이저빔의 강도는 3×10^{19} W/cm² 정도이다⁽²⁾. 양성자의 에너지 스펙트럼과 최대 에너지는 두 대의 양성자 비행시간 분석기(proton time-of-flight spectrometer)⁽³⁾를 사용하여 실시간으로 분석되었다. 한 대는 표적면에 수직인 법선 방향(0°)으로, 다른 한 대는 이 법선에 대해 22.5°를 이루는 방향으로 설치되었다. 양성자빔은 표적에 수직인 방향으로 일정한 각도를 가지고 방출되므로, 0° 방향에 설치된 양성자 비행시간 분석기에서 항상 높은 에너지를 가진 양성자가 검출되었다. 레이저 펄스의 특성과 표적의 위치 등을 조절하여 얻은 최적 발생 조건에서 양성자의 최대 에너지는 그림 1 (a)와 같이 4 MeV 정도이다.

발생된 양성자의 입자수와 에너지 변환효율을 추산하기 위해, 양성자빔의 공간분포를 측정하였다. 입자비적 검출기(particle track detector)인 CR-39를 적절한 두께의 비정필터(range filter)로 덮어서 양성자 선원으로로부터 일정한 거리에 설치한다. 비정필터의 종류와 두께가 정해지면, 이 필터를 통과할 수

있는 양성자의 최소 에너지가 정해진다. 양성자의 최대 에너지는 CR-39의 현상조건에 의해 결정된다. 7N NaOH 수용액 안에서 CR-39를 2시간 동안 에칭하여, CR-39에 형성된 홈(pit)을 광학현미경으로 관찰할 경우, 측정할 수 있는 양성자의 에너지 영역은 0.1-1 MeV 정도이다. 비정필터를 통과한 후의 양성자 에너지가 E_p' (= 0.1-1 MeV), 통과하면서 잃은 에너지가 δE_p 일 때, $E_p = E_p' + \delta E_p$ 의 관계로부터 통과하기 전의 에너지 E_p 를 계산할 수 있다. CR-39에 형성된 홈의 숫자(양성자의 입자수)를 측정하고, 각도에 따른 양성자 입자수의 분포를 가우스 함수로 가정하여 발산각을 측정하였다. 양성자 에너지에 따른 발산각이 그림 1 (b)에 있다.

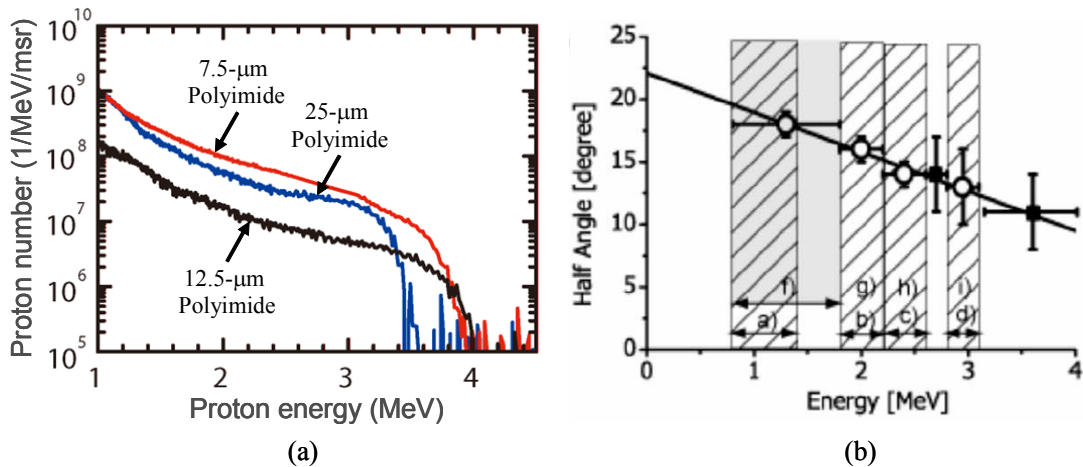


그림 1. (a) 양성자빔의 에너지 스펙트럼, (b) 양성자빔의 발산각.

절대 교정된 양성자 비행시간 분석기⁽⁴⁾로 얻은 양성자의 에너지 스펙트럼과 CR-39로 얻은 발산각을 조합하여, 발생한 양성자의 입자수와 에너지 변환 효율을 추산하였다. 일반적으로 7.5 μm 두께의 Polyimide 표적을 사용할 때, 가장 에너지가 높고 변환효율이 좋은 양성자빔이 발생되었다. 에너지가 0.8 MeV 이상인 양성자에 대해, 발생한 양성자의 입자수는 $(2.5 \pm 0.3) \times 10^{11}$ 개, 에너지 변환 효율은 $(2.8 \pm 0.3)\%$ 에 달하였다.

양성자의 최대 에너지와 에너지 변환효율은 레이저 및 표적의 특성과 밀접한 관계를 가지고 있다. 일반적인 극초단 고출력 레이저빔은 출력이 강한 주펄스(main pulse)이외에도 선행펄스(prepulse)를 포함하고 있다. 선행펄스의 세기를 줄여 양성자 에너지를 높이기 위해 플라즈마 거울⁽⁵⁾ 등이 사용되지만, 본 연구에서는 이와 같은 특별한 장치를 사용하지 않고서도, 고에너지 고효율 양성자가 발생하였다.

1. M. Borghesi *et al.*, "Fast ion generation by high-intensity laser irradiation of solid targets and applications," *Fusion Sci. Technol.* **49**, 412 (2006).
2. M. Nishiuchi *et al.*, "Efficient production of a collimated MeV proton beam from a polyimide target driven by an intense femtosecond laser pulse," *Phys. Plasmas* **15**, 053104 (2008).
3. S. Nakamura *et al.*, "Real-time optimization of proton production by intense short-pulse laser with time-of-flight measurement," *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, L913 (2006).
4. A. Yogo *et al.*, "Laser prepulse dependency of proton-energy distributions in ultraintense laser-foil interactions with an online time-of-flight technique," *Phys. Plasmas* **14**, 043104 (2007).
5. D. Neely *et al.*, "Enhanced proton beams from ultrathin targets driven by high contrast laser pulses," *Appl. Phys. Lett.* **89**, 021502 (2006).