

**극초단 고출력 티타늄 사파이어 레이저에 의한  
높은 에너지 변환효율을 가지는 고에너지 양성자 발생**  
**High-Energy Proton Generation with High Energy Conversion  
Efficiency Driven by Ultrashort High-Intensity Ti:Sapphire Laser**

최일우<sup>1</sup>, 유태준<sup>1</sup>, 성재희<sup>1</sup>, 김형택<sup>1</sup>, 정태문<sup>1</sup>, 홍경한<sup>1</sup>, 김정훈<sup>1</sup>, 노영철<sup>1</sup>, 고도경<sup>1</sup>, 이종민<sup>1</sup>, Akito Sagisaka<sup>2</sup>, Akifumi Yogo<sup>2</sup>, Satoshi Orimo<sup>2</sup>, Koichi Ogura<sup>2</sup>, Zhong Li<sup>2</sup>, Alexander Pirozhkov<sup>2</sup>, Hiroyuki Daido<sup>2</sup>, Yuji Oishi<sup>3</sup>, Koshichi Nemoto<sup>3</sup>, Shyu Nakamura<sup>4</sup>, Akira Noda<sup>4</sup>, Yoshihisa Iwashita<sup>4</sup>, Toshiyuki Shirai<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>광주과학기술원 고등광기술연구소 펄스과학연구소

<sup>2</sup>Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Japan

<sup>3</sup>Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan

<sup>4</sup>Institute for Chemical Research, Kyoto University, Japan

iwchoi@apri.gist.ac.kr

첨두 출력이 수십 TW 이상인 레이저 펄스를 작은 초점으로 표적에 집속하면,  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> 이상의 집속 강도를 쉽게 얻을 수 있다. 이때 표적에 형성되는 플라즈마 안에 존재하는 전자는 레이저광의 전자기장을 따라 진동하면서 빛의 속도에 가까운 속도로 운동하게 되므로, 다양한 상대론적 현상이 일어난다<sup>(1)</sup>. 고출력 레이저 펄스가 집속된 표적에서는 엑스선 광원<sup>(2)</sup>, 전자빔<sup>(3)</sup>, 이온 및 양성자빔<sup>(4)</sup>, 중성자빔 등의 다양한 2차 선원(source)이 발생한다. 이러한 2차 선원은 레이저 펄스가 집속되는 시간 동안만 발생하므로, 지속시간이 ps 이하인 극초단 펄스형 선원이다. 또한 레이저 펄스가 집속된 위치에서만 발생되므로,  $\mu\text{m}$  정도의 공간적 크기를 가지는 초소형 선원이다. 이 같은 특성을 지닌 극초단 초소형 2차선원은 물질의 초고속 현상 탐구나 초정밀 영상 및 진단에 활용될 수 있다.

고출력 레이저 펄스를 표적에 집속하면, 다양한 메커니즘<sup>(5)</sup>에 의해 레이저 에너지가 플라즈마에 흡수되고, 플라즈마 안에는 고속 전자가 발생한다. 고온으로 가열되고 고속으로 가속된 전자는 질량이 작으므로, 플라즈마 안의 이온과 분리되어 빠른 속도로 진행한다. 고속 양성자 및 이온은 고속 전자가 이보다 질량이 무거운 이온보다 먼저 플라즈마 안을 이동할 때 형성되는 전하의 분리에 의해 발생한다. 즉, 빠르게 이동하는 전자와 상대적으로 매우 느리게 이동하는 이온 사이에 형성되는 정전기장에 의해 양성자 및 이온이 다시 가속되는 것이다. 고속 전자가 얇은 고체 표적을 통과해 나가면서 생성되는 강한 전기장은 경우에 따라  $10^{12}$  V/m 정도에 이를 수 있으므로, 고체 안의 중성 원자도 순식간에 이온화시킬 수 있다. 표적이 충분히 얇고 전자가 표적을 충분히 통과하면, 이러한 전기장은 표적의 앞면뿐만 아니라 표적의 뒷면에서도 형성될 수 있으므로 표적의 앞뒷면에서 고속 이온이 방출된다. 고속 양성자는 표적의 표면에 있는 탄화수소나 물의 분순물이 이온화되면서 생긴 양성자가 가속되는 것이다.

본 논문에서는 첨두 출력 20 TW인 극초단 고출력 티타늄 사파이어 레이저 펄스를 구리 고체 표적에 집속하여 양성자를 발생시키고, 발생된 양성자의 에너지 스펙트럼, 양성자의 발산각, 양성자의 절대적인 발생량 등의 특성을 분석한 결과가 소개된다. 양성자를 발생시키기 위해, 유효 초점거리 238.07 mm, 비축각 45°인 비축 포물거울(off-axis parabolic mirror)을 사용하여, 레이저 펄스를 표적에 집속하였다. 표적은 5 $\mu\text{m}$  두께의 구리가 사용되었는데, 다수의 실험을 반복적으로 수행하기 위해 테이블 표적 시스템에 장착되었다. 레이저 펄스는 표적에 수직인 방향에 대해 45°로 집속되었다. 표적 위에서 레이저 펄스의 중심 파장은 800 nm, 최대 에너지는 0.7 J, 최소 펄스폭은 36 fs, 최대 집속강도는  $4 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>

이었다. 양성자 발생의 최적 조건을 조사하기 위해, 레이저 펄스의 펄스폭, 선행 펄스(prepulse)의 대조비(contrast ratio), 레이저 초점에 대한 표적의 상대적인 위치를 변화시켰다. 레이저 펄스와 표적의 조건을 변화시키면서 실시간으로 양성자빔의 에너지 스펙트럼을 측정하기 위하여, 양성자 비행시간 분석기(proton time-of-flight spectrometer)가 사용되었다. 양성자의 발생량과 에너지 스펙트럼을 측정하기 위하여, 톰슨 포물선 이온 분석기(Thomson parabola ion analyzer)에 입자 비적 검출기(particle track detector)인 CR-39를 장착해 사용하였다. 한편, 양성자빔의 발산각을 측정할 때는 CR-39와 비정필터(range filter)를 겹쳐서 표적으로 일정한 거리에 설치하고 양성자빔에 노출하였다.

그림 1 (a)는 레이저 펄스폭이 103 fs, 표적 위에서 레이저 에너지가 0.62 J일 때 관측된 양성자의 에너지 스펙트럼을 보여주고 있다. 발생된 양성자의 최대 에너지는 2.37 MeV 정도이었다. 그림 1 (b)는 펄스폭 103 fs, 펄스당 평균 에너지 0.62 J인 레이저 펄스를 표적에 집속할 때 발생하는 양성자의 발생량을 톰슨 포물선 이온 분석기와 CR-39로 측정한 결과이다. 0.5 MeV에서 양성자의 발생량은 레이저 펄스당  $4 \times 10^{10}$  protons/sr/100 keV 정도이었고, 0.9 MeV 이상이 되면 수량이 급격히 감소하다가 2.3 MeV 이상이 되면 거의 검출되지 않았다. 양성자의 발산각을 측정한 결과를 이용하여 양성자의 총 발생량을 추산하면, 0.42 MeV 이상에서  $8 \times 10^{10}$ 개 이상이었고, 입사 레이저 에너지가 양성자의 에너지로 변환된 에너지 변환효율은 1.2% 이상 이었다.

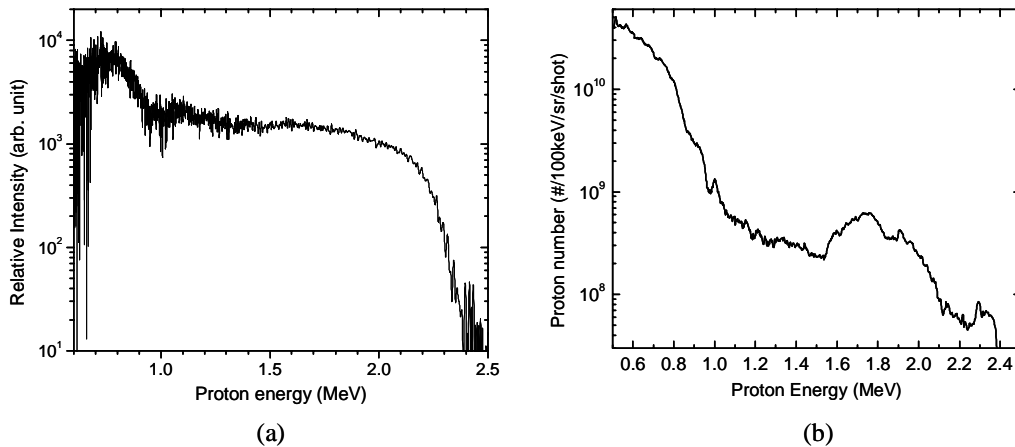


그림 1. 양성자의 에너지 스펙트럼. (a) 양성자 비행시간 분석기로 측정한 스펙트럼, (b) 톰슨 포물선 이온 분석기와 CR-39로 측정한 스펙트럼.

결론으로, 본 연구에서는 첨두 출력 20 TW인 극초단 고출력 티타늄 사파이어 레이저 펄스를 5  $\mu$ m 두께의 구리 표적에 최대 집속 강도  $4 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>로 집속하여 양성자를 발생시켰다. 최대 에너지의 양성자를 발생시키기 위해, 레이저의 펄스폭, 선행 펄스의 대조비, 레이저 초점에 대한 표적의 상대적인 위치를 변화시키면서, 최대 에너지의 양성자가 발생하는 조건을 조사하였다. 최적의 조건에서 얻어진 양성자의 최대 에너지는 2.37 MeV이었으며, 0.42-2.3 MeV 영역에서 양성자의 총 발생량이  $8 \times 10^{10}$ 개 이상, 에너지 변환효율이 1.2% 이상인 결과를 얻었다. 이러한 양성자의 총 발생량과 에너지 변환효율은 기존에 보고된 결과보다 10배 이상 우수한 결과이다.

참고문헌

1. 최일우, 김정훈, 고도경, 물리학과 첨단기술 November 2005, 29 (2005).
2. J. D. Kmetec et al., Phy. Rev. Lett. 68, 1527 (1992).
3. S. P. D. Mangles et al., Nature 431, 535 (2004).
4. K. Matsukado et al, Phy. Rev. Lett. 91, 215001 (2003).
5. S. C. Wilks and W. L. Krueer, IEEE J. Quantum Electron. 33, 1954 (1997).