

100 TW급 극초단 고출력 티타늄 사파이어 레이저 시스템을 이용한 4 MeV급 고에너지 양성자 발생

4 MeV High-Energy Proton Generation Using 100 TW Ultrashort High-Power Ti:Sapphire Laser System

최일우¹, 김철민¹, 정태문¹, 유태준¹, N. Hafz¹, 성재희¹, 김형택¹, 홍경한¹, 노영철¹, 고도경¹, 이종민¹,
Satoshi Orimo², Akifumi Yogo², Koichi Ogura², Akito Sagisaka², Jinglong Ma², Michiaki Mori²,
Zhong Li², Alexander Pirozhkov², Hiroyuki Daido², Yuji Oishi³, Koshichi Nemoto³

¹광주과학기술원 고등광기술연구소 펨토과학연구소

²Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Japan

³Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan

iwchoi@apri.gist.ac.kr

고출력 레이저빔을 얇은 두께의 고체표적에 집속할 때 발생하는 플라즈마를 기반으로 양성자빔 및 이온빔을 발생시키는 개념은 새로운 차세대 입자가속기⁽¹⁾의 개념으로 각광받고 있다. 레이저 플라즈마를 기반으로 한 입자가속기는 시설규모와 비용을 획기적으로 줄여서, 실험실 규모 안에 설치할 수 있는 탁상형(tabletop) 가속기의 출현을 가능하게 할 것이다. 고출력 레이저빔으로 발생된 양성자빔과 이온빔은 시간폭이 매우 짧고 전하밀도가 높으므로, 실제의 응용에서 매우 중요하게 이용될 수 있다. 고밀도 플라즈마의 진단, 재료의 표면처리, 양성자 및 이온 치료, 양전자 단층촬영(positron emission tomography)용 단수명 방사선 물질의 생성⁽²⁾ 등의 다양한 응용이 시도되고 있다. PW급 레이저를 사용하여 최대 58 MeV 에너지를 가진 양성자를 관측하고, 10 MeV 이상의 에너지를 가진 양성자를 10^{13} 개 이상을 얻은 실험이 보고되었다.⁽³⁾

고출력 레이저빔을 표적에 집속하면, 다양한 메커니즘⁽⁴⁾에 의해 레이저 에너지가 플라즈마에 흡수되고, 플라즈마 안에는 고속전자가 발생한다. 고온으로 가열되고 고속으로 가속된 전자는 질량이 작으므로, 플라즈마 안의 이온과 분리되어 빠른 속도로 진행한다. 고에너지 양성자 및 이온은 고속전자가 이보다 질량이 무거운 이온보다 먼저 플라즈마 안을 통과해 나갈 때 형성되는 전하의 분리에 의해 가속된다. 즉, 빠르게 이동하는 전자와 상대적으로 매우 느리게 이동하는 이온 사이에 형성되는 정전기장에 의해 양성자 및 이온이 다시 가속되는 것이다. 고속전자가 얇은 고체표적을 통과해 나가면서 생성되는 강한 전기장은 경우에 따라 10^{12} V/m 정도에 이를 수 있으므로, 고체 안의 중성원자도 순식간에 이온화시킬 수 있다. 고에너지 양성자는 표적의 표면에 묻어있는 탄화수소나 물의 분순물에 포함된 수소원자가 이온화되면서 생긴 수소이온, 즉 양성자가 가속되는 것이다.

본 논문에서는 광주과학기술원 고등광기술연구소에 구축되어 있는 100 TW급 극초단 고출력 티타늄 사파이어 레이저를 이용한 고에너지 양성자 발생 실험을 보고한다. 레이저빔은 그림 1 (a)와 같이 비축포물거울을 사용하여 표적에 집속하였다. 비축 포물거울의 유효 초점거리는 238.07 mm이고, 비축각은 45°이다. 표적은 5 μ m 두께의 구리와 각각 7.5, 12.5, 25 μ m 두께의 polyimide가 사용되었는데, 다수의 양성자 발생을 반복적으로 수행하기 위해 테이블표적 시스템에 장착되었다. 레이저빔의 중심파장은 800

nm이고, 표적에 수직인 방향에 대해 45°로 집속되었다. 레이저빔의 에너지는 극초단 고출력 티타늄 사파이어 레이저 시스템의 마지막 증폭단의 사용여부에 따라 다른 데, 마지막 증폭단을 사용하지 않을 경우 표적에 도달하는 최대 에너지는 0.7 J이고, 최종 증폭단을 사용할 경우에는 1.8 J 정도이다. 레이저빔의 최소 펄스폭은 34 fs이고, 최종 증폭단을 사용하지 않았을 때 표적 위에서 집속강도는 4×10^{18} W/cm² 정도이다. 최종 증폭단을 사용할 경우에는 적응광학계(adaptive optics system)를 사용해 레이저 초점의 크기를 줄여서 집속강도를 3×10^{19} W/cm² 정도로 향상시켰다.

양성자 발생의 최적조건을 조사하기 위해 레이저빔의 펄스폭, 선행펄스(prepulse)의 대조비(contrast ratio), 레이저 초점에 대한 표적의 상대적인 위치를 변화시켰다. 펄스압축기 안에 있는 회절격자 쌍의 상대적인 거리를 변화시켜 레이저 펄스폭을 변화시켰고, 선행펄스의 대조비는 재생증폭기에 설치된 포켈스셀(Pockels cell)과 증폭기용 펌프 레이저의 시간지연을 변화시키면서 조절하였다. 레이저빔과 표적의 조건을 변화시키면서 실시간으로 양성자빔의 에너지 스펙트럼을 측정하기 위하여, 양성자 비행시간 분석기(proton time-of-flight spectrometer)⁽⁵⁾가 사용되었다. 그림 1 (b)와 같이 펄스폭 34 fs, 펄스당 에너지가 1.6 J 정도인 레이저빔을 7.5 μm 두께의 polyimide 표적에 집속하여, 최대 에너지가 4 MeV인 양성자빔을 발생시키는데 성공하였다.

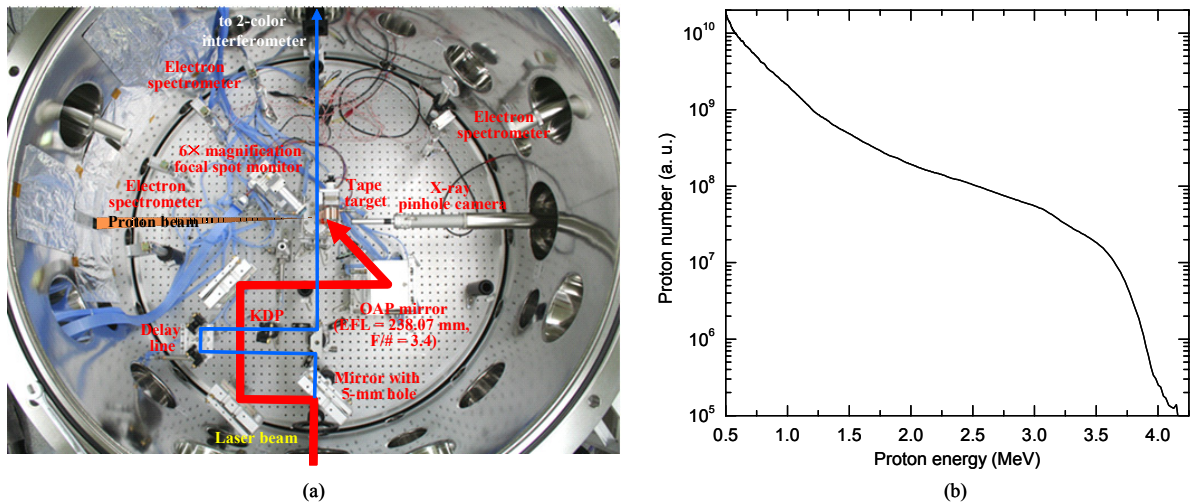


그림 1. (a) 양성자 발생 실험의 장치도, (b) 양성자 비행시간 분석기로 측정한 양성자 스펙트럼.

참고문헌

1. M. Dunne, Science **312**, 374 (2006).
2. K. W. D. Ledingham *et al.*, J. Phys. D **37**, 2341 (2004).
3. R. A. Snavely *et al.*, Phys. Rev. Lett **85**, 2945 (2000).
4. S. C. Wilks and W. L. Kruer, IEEE J. Quantum Electron. **33**, 1954 (1997).
5. S. Nakamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, L913 (2006).
6. A. Yogo *et al.*, Phys. Plasmas **14**, 043104 (2007).