

# 입자 시뮬레이션을 이용한 고강도 레이저-박막 상호작용을 통한 고에너지 양성자 발생을 위한 표적 설계

## Target Design Study by PIC Simulations for Energetic Proton Generation through Intense Laser–Thin Foil Interactions

배기홍, 최일우, 고도경, 한상준\*, 이종민  
광주과학기술원 고등광기술연구소, \*중앙대학교 물리학과  
khpae@gist.ac.kr

레이저-표적 상호작용에 의해 가속된 고에너지 양성자는 짧은 펄스폭, 높은 침투 전류 등 기존의 입자 가속 기와는 다른 특성을 지니고 있다. 이러한 특성을 이용하여 탁상형 입자가속기 개발, 시공간 고분해능을 갖는 proton radiography, 방사성 동위원소 생산, 양성자 암치료 시스템 개발 등에 응용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 지난 10여 년 간 여러 연구 그룹들에서 고에너지<sup>(1)</sup>, 준단일 에너지<sup>(2,3)</sup>, 저 emittance<sup>(4)</sup>를 가지는 양성자 빔을 얻기 위한 연구가 진행되고 있으며, 1) 정전기장에 의한 표적 뒷면<sup>(5)</sup> 또는 앞면<sup>(6)</sup>으로부터의 가속(target-normal-sheath-acceleration, TNSA), 2) collisionless electrostatic shock (CES)에 의한 가속<sup>(7)</sup>, 3) radiation pressure dominated acceleration (RPDA)<sup>(8)</sup>, 4) laser breakout afterburner(BOA)<sup>(9)</sup>에 의한 가속 등의 메커니즘이 연구되고 있다.

본 연구에서는 레이저-박막 표적 상호작용을 통한 고에너지 양성자 발생을 위한 표적 설계를 제시하고자 한다. 고강도 레이저 펄스가 표적에 있는 작은 구멍(직경 < laser spot size)을 통과할 때, 레이저의 강력한 전기장에 의해 구멍 내부 벽으로부터 전자들이 끌려나오게 된다. 이 전자들은 p-편광면에서 진동하는 레이저 전기장에 따라 진동하게 되는데, 양쪽 벽에서는 각각 레이저 전기장 주기의 반주기에 따라 서로 반대 방향으로 교차 진동한다. 고체 표적의 경우 전자 밀도가 높기 때문에 전기장은 표적 내부로 진행할 수 없으므로 전자들은 기본적으로 진공 가열(vacuum heating) 메커니즘에 의해 에너지를 얻는다. 이러한 전자들의 주기적인 운동은 구멍 내에서 레이저 펄스 진행 방향의 정전기장을 형성하게 되고, 이 정전기장은 레이저 펄스가 진행함에 따라 그 위상속도가 레이저 펄스의 진동 속도와 일치하게 된다. 이렇게 형성된 정전기장은 역으로 그 내부에 있는 전자들을 레이저 진행 방향으로 가속시킨다. 가속된 전자들이 표적 뒷면을 빠져나갈 때 표적 뒷면과 전자들 사이에 매우 강력한 sheath field가 형성되며 표적 뒷면의 불순물에 포함되어 있는 양성자들은 이 sheath field에 의해 고에너지로 가속된다. 이 아이디어를 시험하기 위하여 입자 시뮬레이션을 실시하였다.

2차원 입자 시뮬레이션은 상대론적 전자기 입자 코드인 VORPAL<sup>(10)</sup>을 이용하여 수행되었다. 그림 1(a)는 입자 시뮬레이션을 수행한 대상 시스템 개요도이다.  $5\mu\text{m}$  두께의 구리 표적의 가운데에 직경  $2\mu\text{m}$ 의 구멍이 뚫려 있다. 시뮬레이션 시스템 왼쪽에서 p-편광 고강도( $I = 1 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ ), 극초단(34fs) 레이저 펄스가 표적에 수직으로 입사한다. 레이저 펄스의 파장은  $0.8\mu\text{m}$ 이고, spot size는

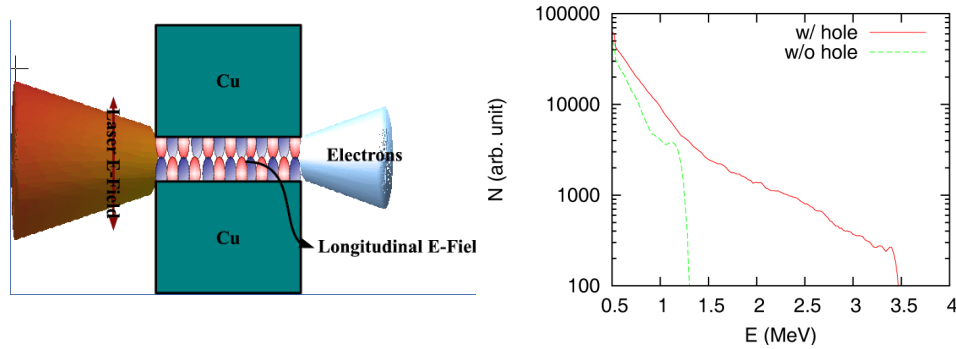


그림 2 시뮬레이션 개요 및 양성자 가속 효과. (a) 시뮬레이션에 사용된 대상 시스템의 개요도, (b) 레이저-표적 상호작용 후 370 fs 지났을 때 구멍이 있는 경우와 없는 경우에 대한 고에너지 양성자의 에너지 스펙트럼 비교.

FWHM  $6\mu\text{m}$  이다. 레이저 펄스는 시공간적으로 가우시안 형태를 가정하였다.

그림 1 b)는 전형적인 시뮬레이션 결과로 나타나는 양성자 에너지 스펙트럼을 보여준다. 이 그림에서 구멍이 있는 경우에 양성자의 최대 에너지가 3배 정도로 향상됨을 분명히 볼 수 있다.

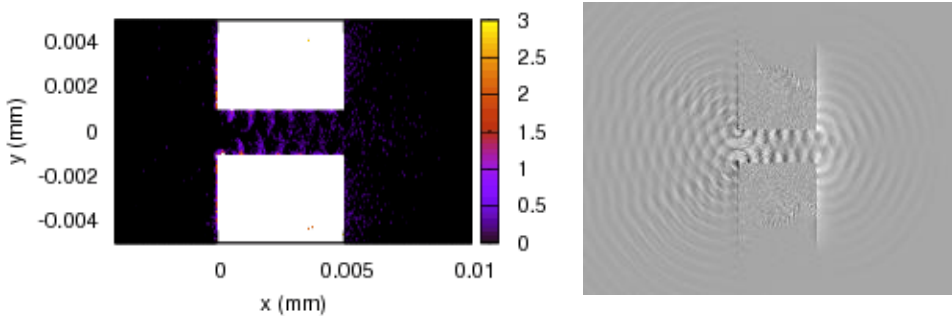


그림 1 (a) 레이저 펄스가 표적에 있는 구멍을 지나갔을 때 내부의 전자 분포, (b) 표적 주위에 형성되는 전기장의 진행방향 성분(grey scale).

그림 2에서 보듯이 레이저 펄스가 표적을 통과하면서 표적 양쪽 벽의 전자들이 레이저 전기장에 의해 운동하면서 주기적인 분포를 이루어 구멍 내부에 강력한 전기장을 형성하게 된다. 결과적으로 이 정전기장에 의해 가속된 전자는 sheath field를 만들어 표적 뒷면의 양성자를 가속시킨다.

### 참고문헌

1. J. Fuchs et. al., Nature Physics **2**, 48 (2006).
2. B. M. Helgelich et. al., Nature **439**, 441 (2006).
3. H. Schworer et. al., Nature **439**, 445 (2006).
4. T. E. Cowan et. al., Phys. Rev. Lett. **92**, 204801 (2004).
5. S. P. Hatchett et. al., Phys. Plasmas **7**, 2076 (2000).
6. A. Macchi et. al., Phys. Rev. Lett. **94**, 165003 (2005).
7. M. S. Wei et. al., Phys. Rev. Lett. **93**, 155003 (2004).
8. T. Esirkepov et. al., Phys. Rev. Lett. **92**, 175003 (2004).
9. L. Yin et. al., Phys. Plasmas **14**, 056706 (2007).
10. C. Nieter et. al., Comput. Phys. **196**, 448 (2004).