

레이저 유도 양성자 및 이온의 특성 분석을 위한 복합 이온 분석기 개발

Development of Composite Ion Analyzer for the Characterization of Laser-Driven Proton and Ion

최일우,* 김철민, 성재희, 유태준, 이성구, 김이중, 정태문, N. Hafz, 배기홍, 이종민
광주과학기술원 고등광기술연구소 및 펄스과학교육연구센터

*iwchoi@gist.ac.kr

고강도 레이저빔을 표적에 집속하여 발생시키는 레이저 유도 이온 선원은 향후 소형 입자가속기를 구현할 수 있다는 희망에 따라 활발히 연구되고 있다. 레이저 유도 양성자는 ps 정도의 짧은 펄스폭, kA 영역의 높은 전류, 작은 transverse emittance, 우수한 laminarity를 가지고 있다.⁽¹⁾ 고출력 레이저빔을 얇은 금속에 집속하면, 강도가 강한 레이저빔과 표적의 상호작용에 의해, 에너지가 수 MeV에 이르는 고에너지 전자가 발생한다. 양성자는 이와 같이 빠르게 움직이는 전자와 질량이 커서 거의 정지해 있는 표적의 이온 사이에 발생하는 강한 정전기장에 의해 가속된다. 레이저 유도 양성자와 관련된 연구는 크게, 양성자의 에너지 증대,⁽²⁾ 에너지 선폭의 최소화,⁽³⁾ 에너지 변환효율의 증대⁽⁴⁾ 방향으로 활발히 연구되고 있다. 이와 같은 방향으로 양성자의 특성을 최적화하려면, 레이저와 표적의 조건을 변화시키면서 발생하는 양성자의 에너지 스펙트럼을 분석하는 장비가 필수적으로 사용된다.

이온(양성자 포함)이 전기장과 자기장을 통과할 때 일어나는 편향을 측정하여, 이온의 에너지를 측정하는 방법과 이온이 일정한 거리를 진행하는 데 소요되는 비행시간을 측정하여 이온의 에너지를 측정하는 방법이 널리 사용되고 있다. 전기장과 자기장에 의한 편향을 이용하는 방법으로 가장 널리 사용되고 있는 이온 분석기는 톰슨포물선 이온 분석기⁽⁵⁾이다. 톰슨포물선 이온 분석기는 전기장과 자기장을 평행하게 인가하고, 이 전자기장에 수직인 방향으로 이온을 입사시키는 구조로 제작된다. 이온은 전기장에 평행한 방향으로 편향되면서 동시에 자기장에 수직인 방향으로도 편향된다. 전자기장으로부터 일정한 거리에 위치한 검출기로 이온을 검출하면, 이온이 가진 전하와 질량의 비율에 따라 분리되어 검출되는 포물선들이 얻어진다. 이 포물선을 톰슨포물선이라 하며, 포물선들의 위치를 측정하면 이온의 종류와 에너지를 분석할 수 있다.

고강도 레이저빔을 표적에 집속하면 다양한 에너지를 가진 양성자와 이온이 레이저 초점의 위치에 서 동시에 순간적으로 발생한다. 만일 양성자 선원으로부터 일정한 거리가 떨어진 위치에 검출기를 설치하고, 각각의 양성자가 검출되는 시간, 즉 비행시간을 측정하면 양성자의 속도와 에너지를 측정할 수 있다. 이와 같은 원리를 이용하여 최근 양성자 비행시간 분석기⁽⁶⁾가 개발되었다. 이 비행시간 분석기는 양성자 검출기로 플라스틱 신틸레이터를 사용하였다. 양성자가 플라스틱 신틸레이터에 부딪히면 형광이 발생하고, 발생된 형광을 광전자 증배관과 오실로스코프를 사용하여 비행시간을 측정하였다. 이와 같은 원리로 작동하는 비행시간 분석기는 실시간으로 양성자의 에너지를 분석할 수 있어서, 레이저빔을 표적에 집속한 직후에 양성자의 에너지 스펙트럼이 얻어진다. 그러나 플라스틱 신틸레이터는 양성자뿐만 아니라 다양한 종류의 이온에도 반응하므로, 이 비행시간 분석기는 이온의 종류를 판별할 수 없는 단점을 가진다. 한편 실시간 측정을 위해 톰슨포물선 이온 분석기에 microchannel plate와 형광관으로 구성된 검출기를 사용하기도 한다. 이 경우에는 제작비용이 많이 들고, 이온 분석기의 내부가 고진공으로 유지되어야 하는 단점이 있다.

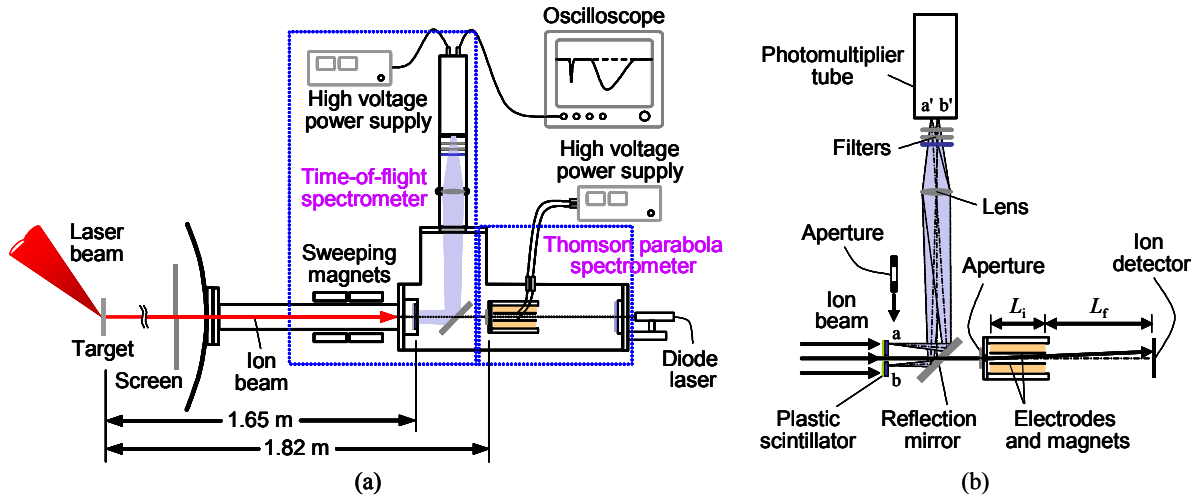


Fig. 1. (a) Schematic diagram of the composite ion spectrometer composed of a time-of-flight spectrometer and a Thomson parabola spectrometer. (b) Detailed configuration of the time-of-flight spectrometer and the Thomson parabola spectrometer.

본 연구에서는 그림 1 (a)와 같이 비행시간 분석기와 톰슨포물선 이온 분석기로 구성된 복합 이온 분석기가 개발되었다. 고강도 레이저빔을 표적에 집속하여 발생된 양성자와 이온은 플라스틱 신틸레이터에 부딪힌다. 플라스틱 신틸레이터에서 발생한 형광은 렌즈에 의해 광전자 증배관에 모아진다. 그림 1 (b)와 같이 렌즈와 광전자 증배관의 위치는 플라스틱 신틸레이터에 형성된 형광의 공간적인 영상이 광전자 증배관의 광전음극에 결상되도록 배열되어 있다. 양성자빔 위의 위치에 따라 양성자의 에너지 스펙트럼이 다른 경우, 적당한 모양의 빛 가리개를 사용하여 검출되는 양성자빔의 위치를 선택하면, 본 연구에서 개발된 비행시간 분석기는 양성자 스펙트럼의 변화를 측정할 수 있다. 비행시간 분석기와 톰슨포물선 이온 분석기를 동시에 사용하기 위하여, 플라스틱 신틸레이터의 가운데에 작은 구멍이 만들어져 있다. 따라서 복합 이온 분석기에 입사한 양성자 및 이온의 일부는 플라스틱 신틸레이터의 구멍을 통과하여 톰슨포물선 이온 분석기로 입사될 수 있다.

복합 이온 분석기를 구성하는 비행시간 분석기와 톰슨포물선 이온 분석기는 동시에 사용될 수 있다. 각각의 분석기가 별도로 측정된 양성자 및 이온의 특성을 분석하면 분석결과 신뢰도를 높일 수 있으며, 각각의 분석기는 다른 분석기가 가진 단점을 보완한다. 따라서 본 연구에서 개발된 복합 이온 분석기는 양성자 및 이온의 에너지 스펙트럼을 실시간으로 측정할 수 있으며, 이온의 종류도 분석할 수 있다.

1. T. E. Cowan *et al.*, "Ultralow emittance, multi-MeV proton beams from a laser virtual-cathode plasma accelerator," *Phys. Rev. Lett.* **92**, 204801 (2004).
2. R. A. Snavely *et al.*, "Intense High-Energy Proton Beams from Petawatt-Laser Irradiation of Solids," *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2945(2000).
3. H. Schwoerer *et al.*, "Laser-plasma acceleration of quasi-monoenergetic protons from microstructured targets," *Nature* **439**, 445 (2006).
4. 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).
5. J. N. Olsen *et al.*, "Ion-expansion energy spectra correlated to laser plasma parameters," *J. Appl. Phys.* **44**, 2275 (1973).
6. S. Nakamura *et al.*, "Real-time optimization of proton production by intense short-pulse laser with time-of-flight measurement," *Jpn. J. App. Phys.* **45**, L913 (2006).