

## 후집속 방법을 이용한 에어로졸 TOF 질량분석기의 질량분해능 향상 연구

김덕현\* · 양기호 · 차형기 · 김도훈<sup>1</sup> · 이상천<sup>1</sup>

한국원자력연구소 양자광학부, <sup>1</sup>경남대학교 화학과  
(2005. 8. 26 접수, 2005. 11. 8. 승인)

### Study on increasing the mass resolution in aerosol TOF mass spectrometer by using post focusing method

Dukhyeon Kim\*, Kiho Yang, Hyunki Cha, Dohoon Kim<sup>1</sup> and Sang Chun Lee<sup>1</sup>

Lab. for Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute, Yuseong and Daejeon, Korea

<sup>1</sup>Department of Chemistry, Kyungnam University, Woolyongdong, Masan, Korea

(Received August 26, 2005, Accepted November 8, 2005)

**요 약** : TOF 비행시간을 이용한 에어로졸 질량분석기에서 질량분석기의 분해능은 발생하는 이온의 초기 에너지와 이온이 움직이는 진행방향에 따라 달라진다. 고출력 펄스형 레이저에 의하여 에어로졸로부터 용발되어 이온화된 원소들은 다른 속도로 사방으로 퍼져 나가게 되어 분해능 저하를 초래하는데 이를 방지하기 위해서 1차 가속된 이온들을 서로 다른 에너지로 후집속하여 같은 시간에 이온센서에 도달하도록 하는 장치에 대하여 연구를 수행하였다. 후집속 전위를 90° 방향으로 진행하는 이온을 중심으로 서로 다른 방향으로 걸어 줌으로써 TOF 영역을 지나 센서로 도입되는 이온의 도착 시간이 크게 개선되었음을 알 수 있었으며, 이를 실증하기 위하여 레이저 유도 이온을 만들고 후집속 장치를 구성하여 최적의 시간지연시간 및 전압 조건을 도출하여 그 성능을 증가시켰다.

**Abstract** : Mass resolution of the time of flight aerosol mass spectrometer for an aerosol component analysis depends on the initial direction and the initial energy of the ions. We have found that the shape of the optimum post focusing electric field is not linear. The maximum electric potential should be applied to the ions whose initial direction is 90 degree. To check on the post focusing effects, we have installed a laser ablation mass spectrometer. By using this LA-MS, we have found that the average energy distribution of the laser ablated ions is 8 eV. To establish the optimum mass resolution, a time delay and a high voltage are needed, and the results of the study show that 1500 nsec, and 3.7 kV are the optimum parameters for our system respectively. The isotope mass signals of copper show a good resolution.

**Key words** : TOF-MS, aerosol, post focusing, mass resolution

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)42-868-8925 Fax : +82-(0)42-868-8230

E-mail: dhkim3@kaeri.re.kr

## 1. 서 론

대기 중의 부유 입자를 측정하는 기술 중에서 입자의 물리 화학적 특성을 실시간으로 측정 하는 것은 다른 어떤 물리량을 측정하는 것보다 중요하다. 특히 실시간으로 에어로졸 성분을 분석하는 것은 오염원의 발생원을 규명하여 유해 물질의 경보 체계를 구축하거나, 입자의 깊이에 따른 성분을 밝히는 것은 오염원의 발생과정을 역으로 추적하는 데도 매우 중요한 단서를 제공한다.<sup>1</sup> 에어로졸 질량분석기는 에어로졸의 크기를 측정할 수 있는 거의 여부에 따라 두 가지 부류가 있는데<sup>2</sup> 본 연구에서는 입자 크기를 측정할 수 있는 장치를 개발하는데 그 초점을 두고 있다. 이 방법은 입자 크기가 비교적 큰 0.3  $\mu\text{m}$ 에서 수  $\mu\text{m}$ 인 입자를 대상으로 하는데, 본 장치는 실시간으로 입자의 성분뿐만 아니라 크기도 동시에 측정할 수 있기 때문에, 환경 분야에서 많이 사용된다.

에어로졸 질량 분석에 사용되는 레이저의 파워 밀도는 입자의 종류와 레이저의 파장에 따라 다양한 최적 출력밀도가 정해진다.<sup>3</sup> 다양한 종류의 에어로졸을 동시에 분석하기 위하여 일반적으로 수백  $\text{MW}/\text{cm}^2$  이상의 파워로 조사해야 한다. 그러나 파워밀도가 증가하면 어쩔 수 없이 레이저 유도 플라즈마가 발생하고 또한 플라즈마가 발생하면 용발된 입자는 플라즈마입자 상호작용에 의하여 이온화가 유도되기 때문에<sup>4</sup> 이온의 발생 시간 및 발생 위치가 달라지게 된다. 이렇게 생성된 이온의 운동에너지는 발생한 플라즈마의 온도 특성과 이온의 질량 등에 따라서 매우 복잡한 양상을 띠게 된다.<sup>5-7</sup> 또한 에어로졸 질량분석기에 도입되는 입자의 속도는 TOF(Time Of Flight) 챔버의 방향과 직각방향으로 200-400  $\text{m}/\text{sec}$ 로 움직이기 때문에 이온도 역시 같은 크기로 일정방향으로 움직인다. 그러나 이온의 경우 TOF 채널로 도입하는 단계에서 속도 보상이 가능하다.

공간상에 존재하는 입자를 타겟팅하여 발생하는 이온의 경우, MALDI(Matrix Assisted Laser Desorption ionization) 나 LA-MS(Laser Ablation Mass Spectrometer)와 달리 사방으로 다양한 에너지를 가지고 다양한 속도로 그 이온이 진행하기 때문에 초기 에너지 차이를 보정하는 반사형 TOF 질량분석기로는 불가능하다.<sup>8</sup> 즉 일반적으로 금속판에 조사하여 얻을 수 있는 이온은 한 방향으로(180도) 운동하나 공간에서 발생한 이온은 360도 방향으로 이동하기 때문에 TOF 챔버 방향으로 움직이는 이온과 반대 방향으로 움직이는 이온은 시간차이를(식 2) 가지게 되기 때문에 같은 질량의 같은 전하를

띠 각각의 이온들이 동시에 TOF 센서로 도달하게 하는 특별한 방법을 요구한다.

TOF 질량분석기의 분해능을 결정하는 3가지 요소로, 이온원의 크기 및 분포, 이온원의 에너지 분포, 그리고 이온원의 발생시간으로 생각할 수 있다. 레이저를 에어로졸에 조사하여 플라즈마를 만드는 경우 이온원의 크기는 에어로졸의 크기보다 훨씬 크나,<sup>4</sup> 에어로졸을 VUV 레이저를 사용하여 열적효과를 극소화 시키거나, 펄스초 레이저와 같이 열적인 효과가 나타나기 어려운 짧은 펄스폭을 지닌 레이저로 가능한 적은 플라즈마를 발생시킬 경우 이온원의 크기가 입자의 크기 정도로 작게 하는 방법이 있다,<sup>9</sup> 혹은 두 개의 레이저를 이용하여 에어로졸로부터 분자상태로 용발하는 과정과 이온화 과정을 분리하여 이온의 초기 운동에너지 분산과 분자 구조의 파괴를 방지하는 방법들이 제시되고 있다.<sup>10</sup> 그러나 이러한 방법은 레이저를 두 개 혹은 VUV의 사용 그리고 극초단 레이저의 상용에 따른 비용과 상용 장비로의 안정성 등의 문제가 야기된다. 본 연구에서는 일반 레이저를 이용하고도 충분히 좋은 분해능을 얻는 장치를 개발하는 방법을 모색한다.

이온의 초기 에너지에 따른 질량분석기의 분해능 저하를 개선하기 위한 노력은 몇 가지 방법이 제시되었는데, 첫째로, 반사형 이온거울을 사용하는 제시되어 대중화 되어있고 많이 사용되고 있는 방법이나 앞서서도 언급되었듯이 질량에 따라 다른 전압으로 이온을 반사시켜야하는 문제 때문에 에어로졸 질량분석기로 사용하기엔 단점이 있다. 둘째로는, 입자가 에너지 크기에 따라 이온의 위치 정렬이 이루어진 후에 다시 후집속을 하는 방법이 제시되었는데,<sup>11</sup> 이 방법은 같은 질량의 이온에서 운동 에너지 차이가 나는 경우와 다른 질량의 경우 모두 같은 전압으로 적용하여도 분해능 향상을 얻을 수 있다. 그러나 4 $\Pi$  방향으로 퍼져 나오는 이온의 경우, 첫 번째 가속기를 통과하면서 그 에너지 크기에 따라 정렬되지 않기 때문에 일정한 전압으로 후집속하는 것은 한계가 있다.<sup>8</sup> 다음으로 시간적으로 변하는 전기장을 이용하여 가속하는 방법이 있다.<sup>12</sup> 이 방법은 고전압을 nsec의 속도로 고속 스위칭 해야 하는 것뿐만 아니라, 이 방법 역시 이온의 배열이 이온의 초기 에너지에 따라 정렬되지 않기 때문에, 에어로졸 질량분석기에 적용하긴 곤란하다.

본 연구에서는 에어로졸 질량분석기와 같이 서로 다른 에너지를 가진 이온들이 1차 가속기를 지나도 초기 에너지에 비례하게 선형적인 배열을 하지 않는 경우 이를 비선형 전기장으로 후집속하는 방법을 이론적으로

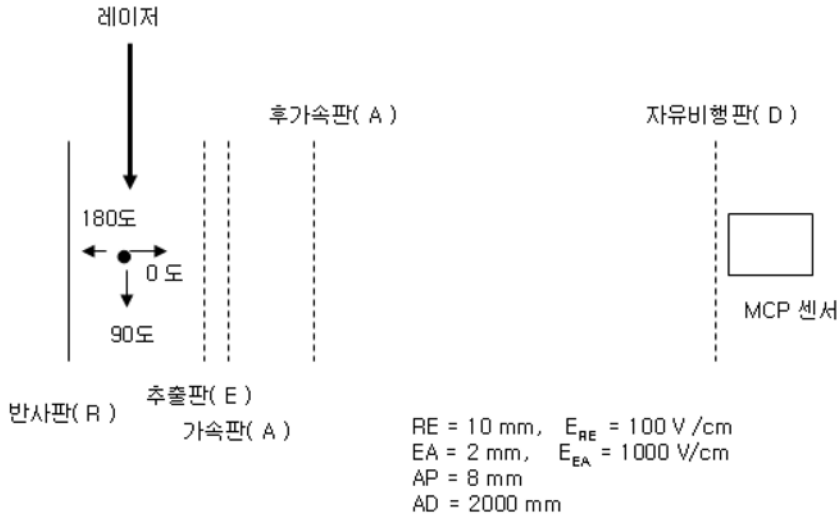


Fig. 1. Schematic diagram for introducing laser induced ions.

제시하고, 실험적으로는 질량 분석기의 분해능을 증가시키는 방법의 일환으로 금속판에 레이저를 조사하여 시스템의 분해능이 후집속 전압과 시간 지연 등에 의존함을 관측하여 에어로졸 질량분석기의 핵심 부품인 질량분석기의 성능을 향상시켰다.

## 2. 선행연구 및 이론적 고찰

에어로졸 질량분석기는 크게 입자를 도입하는 부분, 이온을 생성시키고 가속시키는 부분, 그리고 TOF 자유 전기장 영역과 센서로 구성된다. 질량분석기의 분해능은 주로 입자를 이온화시키는 장치의 특성과 이온을 TOF 자유 전기장으로 유도/가속하는 부분과 자유 전기장의 길이 등에 의존한다. 이온들을 유도하고 가속하는 부분은 다시 3가지 전압을 걸어서 이온들을 유도 및 가속하게 되는데 후집속은 각 이온들이 가속되고 난 후 TOF 비행 영역으로 들어가기 직전에 존재하는 두개의 전위판으로 구성된다. 즉 후집속 장치는 1 차 가속장치에서 벗어난 이온들의 공간적 분포와 그때의 운동에너지에 의존하여 다시 전기적 에너지를 가하여 동일한 시간에 센서로 입력하도록 한다. 본 연구에서 시도하는 후집속 장치는 다른 초기 조건에서 출발한 이온이 1 차 가속판을 언제 지나는지 그리고 어떤 에너지 분포를 가지게 되는지 매우 중요하다. 이를 위하여 1 차 가속장치를 벗어난 이온의 공간적 분포와 그때의 운동에너지에 대해 계산하였다.

사용된 장치의 크기와 전압을 Fig. 1에 나타내었다.

반사판과 추출판은 약 100 V/cm의 전기장이 걸리도록 되어있고, 추출판과 반사판 사이로 레이저가 도입되어야 하기 때문에 1.0 cm 정도의 간격을 유지하도록 하였으며, 입자는 두 판 사이의 중간에(0.5 cm) 위치하도록 하고 계산하였다. 가속판과 후가속판 사이의 거리는 초기 이온의 운동에너지 분포에 의하여 좌우되는데, 그 분포가 넓을수록 간격을 크게 하여야 한다. 본 연구에선 다른 초기 에너지 및 방향을 지닌 각 이온이 반사판과 추출판에 의하여 가속판과 후 가속판에서 어떤 분포를 하는지 계산하고 이를 고려하여 거리를 정하였다. 그림에서 레이저에 의하여 생성된 이온의 방향 중에서 추출판 쪽으로 향한 것은 0° 방향이고, 반사판 방향으로 향하는 이온은 180° 방향이라 정의 하였다. 먼저 펄스형 레이저에 의하여 공간상에 존재하는 입자는 고회력 펄스형 레이저에 의하여 이온화가 이루어지고 반사판과 추출판에 사이에 걸린 전위차에 의하여 추출판 방향으로 추출된다. 생성된 이온이 반사판과 추출판에 사이에 걸리는 전위차에 의하여 두 판 사이를 지나오는데 걸리는 시간은 식 1과 같다.<sup>12</sup>

$$T_s = 1.02 \frac{(2m)^{\frac{1}{2}}}{qE_{RE}} = \left[ (U_0 + qsE_{RE}) \pm (U_0)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1)$$

여기서  $q$ 는 이온의 전하,  $U_0$ 는 이온의 초기 에너지,  $s$ 는 이온이 생긴 위치와 추출판 사이의 거리,  $m$ 은 이온의 질량,  $E_{RE}$ 는 추출판과 반사판 사이의 전기장의 크기 (V/cm)를 각각 나타낸다.  $\pm$ 에서 +는 이온의 초기 이동

방향과 전기력의 방향이 반대일 경우이고 -는 같은 경우이다. 그러므로 같은 에너지를 가진 반대방향으로 진행되는 이온은 전기장의 방향이 반사/추출판에 걸린 전기력과 반대 방향이고 추출판으로 진행한 그것은 전기력과 같은 방향이갈기 때문에 식 2과 같은 시간 차이를 가져온다.

$$\Delta T = 1.02 \frac{2v_0m}{qE_{RE}} = 1.02 \frac{2(2mU_0)^{\frac{1}{2}}}{qE_{RE}} \quad (2)$$

마찬가지로 추출판과 1차 가속판 사이를 통과하는 이온의 시간도 계산이 식 3과 같이 가능하다.

$$T_d = 1.02 \frac{(2m)^{\frac{1}{2}}}{qE_d} \left[ (U) - (U_0 + qsE_{RE})^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

여기서  $U$ 는 추출판을 지난 입자의 총에너지를 나타낸 것으로 식 4와 같다.

$$U = U_0 + qsE_{RE} + qdE_{EA} \quad (4)$$

여기서  $d$ 는 1차 가속판 사이의 거리를 나타낸다. 1차 가속판을 통과한 이온의 공간적 분포를 알아보기 위하여 초기 에너지 0-20 eV를 지닌 이온들이 0-180° 방향으로 진행할 때,  $E_{RE}=100$  V/cm,  $E_{EA}=100$  V/cm  $d=2$  mm,  $s=10$  mm에서 최종이온이 도착하는 시간을 중심으로 각 이온의 1차 추출판 통과 시간을 계산하였다.

Fig. 2는 그 계산 결과를 보여준다. 90° 방향으로 진행한 이온의 경우 에너지에 관계없이 같은 시간에 도착하고 반대방향(180°)으로 진행한 이온의 경우 초기에너지가 클수록 늦게 도착한다. 마지막으로 도착한 이온이

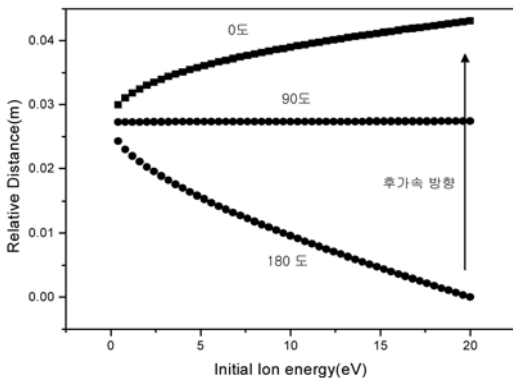


Fig. 2. Ion position depend on the initial energy and direction at the post focusing plate.

후집속 영역에 도착할 때까지 먼저 도착한 이온은 등속 운동으로 진행하게 되므로 마지막 이온이 가속관을 통과 했을 때 각 이온의 운동에너지는 초기에 이온들이 가진 운동방향 및 전위차에 의한 전위에너지에 의한 것만으로 결정된다. 전위에너지는 일정하므로 운동에너지 중에서 TOF 방향으로 진행되는 운동에너지만 고려하면 되므로 0°와 180° 방향의 입자들은 같은 에너지를 가지고 90° 방향은 전위차에 의한 위치에너지만 가지게 된다. 이러한 상태에서 전기장을 걸지 않으면 180° 방향의 이온은 거리가 멀어짐에 따라 0° 방향의 입자와 가까워지나, 90° 방향의 입자와 0° 방향의 이온은 그 간격이 줄어들지 않는다. 그러므로 0°와 90° 사이의 도착 시간 간격을 줄이기 위하여 전기장을 진행방향에 대하여 가속하는 방향으로 가해야 하고 90°와 180° 방향의 이온 사이엔 반대 방향의 전압을 가하여야한다. 보다 정확한 계산을 위하여 본 연구에서는 모든 입자가 동시에 도달할 수 있는 전기장의 분포를 계산하였다. 가장 빨리 도착한 이온을 후집속 부분에서 가속이 이루어지지 않도록 후집속장치의 경계면에 위치하도록 후집속장치의 범위를 정하고 그 시간을 정한 다음 두 번째 이온이 존재하는 위치에서 첫 번째 이온이 있었던 경계면까지 가속되는 에너지는 첫 번째 이온과 같은 시간에 TOF자유 비향영역을 지나에 입력되도록 그 가속 크기를 정하였다. 세 번째 이온도 같은 방법으로 두 번째 이온이 있었던 위치까지 새로운 에너지로 가속되고 두 번째에서 경계면까지는 두 번째 이온이 가속되는 양을 정하면서 구한 값만큼 가속되도록 하여 순차적으로 모든 이온이 같은 시간에 센서에 도착하도록 전기장의 크기 즉 후집속장치의 전압을 순차적으로 모든 후가속 영역에서 정하였다.

Fig. 3은 이렇게 이론적으로 결정한 후집속 장치의 전

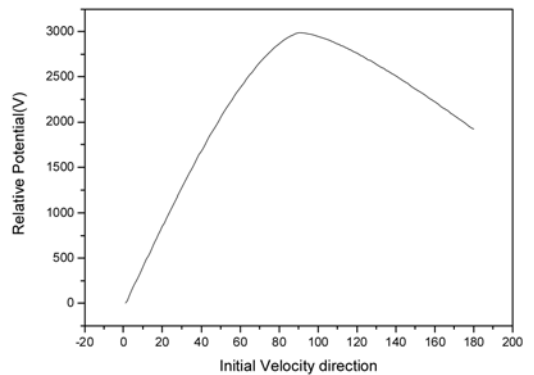


Fig. 3. Post focusing voltage versus the initial ion direction.

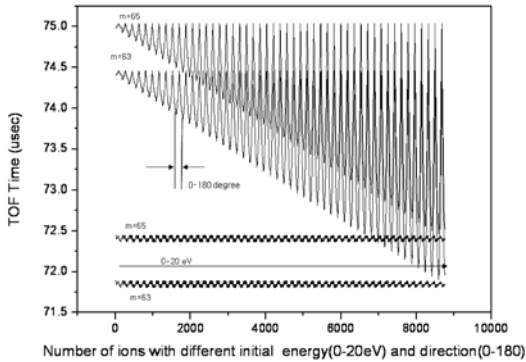


Fig. 4. TOF signals versus the post focusing or not.

압분포를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 90° 방향으로 진행하던 입자를 중심으로 즉 전압이 낮아져야함을 알 수 있다. 결국 입자의 가속력은 전위의 거리에 대한 미분 값 즉 기울기에 관계 되므로 90° 방향으로 진행한 이온을 중심으로 180° 방향의 이온들은 감속의 과정을 거친 후 가속되어야 하고, 0° 방향은 계속 가속되어야 한다. 이 때 각 입자의 위치에서 얻어지는 전기장은 거리로 미분한 값을 나타내며, 90°에서 180° 방향으로 진행하던 이온들은 감속 후 다시 가속된다.

Fig. 4는 질량이 다른 두 이온  $m=63$ ,  $m=65$  인 두 이온이 도달하는 시간을 계산한 것이다. 그림에서 x 축은 이온의 초기 에너지가 0 eV이고 초기 방향이 0°에서 180° 방향으로 퍼지는 경우부터 초기에너지가 20 eV이고 0°에서 180° 방향으로 퍼지는 이온의 각 경우를 순차적으로 나타낸 것이다. y 축의 윗부분에 있는 두개의 그래프는 후집속 전압을 일정하게 할 경우이고, 그림 아랫부분은 후집속 전압을 본 연구에서 계산된 경우와 같이 비선형적으로 가할 경우와 일정한 전압을 걸었을 때 얻어지는 TOF 신호의 시간분포를 나타낸 것이다. 일정한 전압은 초기에너지가 최대인 이온의 경우 가장 빨리 도착하는 이온과 늦게 도착하는 이온의 시간차이가 최소가 되는 후집속 전기장을 구하고 이를 모든 이온에 적용했을 때 얻어지는 TOF 신호이다. x 축은 이온의 초기 에너지가 0에서 20 eV로 변하는 경우, 그리고 각 초기 에너지에서 입자의 운동 방향이 0-180° 인 경우에 해당하는 이온을 나타낸 것이고 y 축은 각각의 경우 센서로 도착하는 시간을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 일정 전압을 걸어주는 경우 초기에너지가 큰 이온들은 서로 이온의 초기 방향에 따라 크게 다른 도착 시간을 가지기 때문에 TOF의 분해능이 떨어짐을 볼 수 있다. 반면에 공간적으로 비선형적인 전압을 가해주는 경우

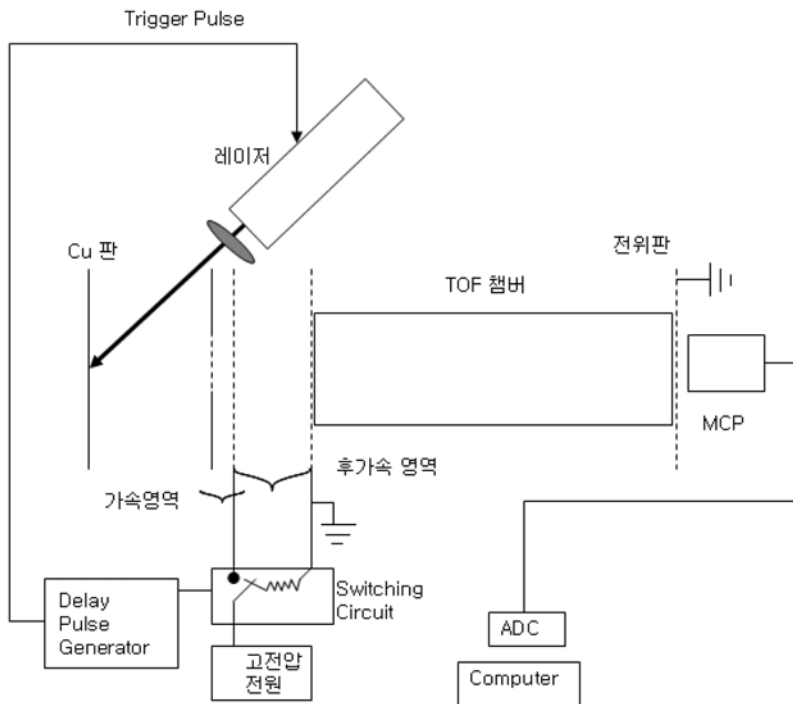


Fig. 5. Schematic diagram of LA-MS.

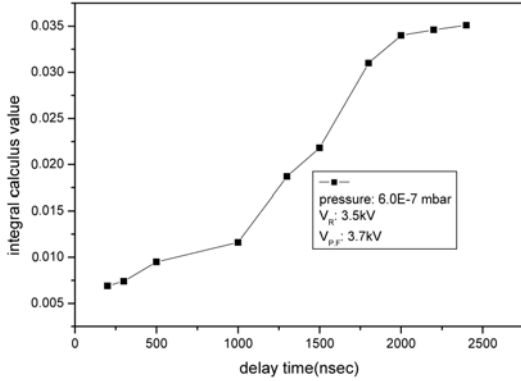


Fig. 6. Total ion density versus post focusing time delay.

이러한 단점을 극복할 수 있다는 것을 보여준다.

### 3. 실험결과 및 결론

후가속 효과를 실험적으로 실증하기 위하여 LA-MS 장치를 구성하였다. Fig. 5는 후가속 효과를 알아보기 위하여 구성된 LA-MS 실험장치의 구성도를 보여준다. 개략적으로는 Fig. 1과 같은 모양을 지니고 있으나, 반사판과 추출판 사이의 거리를 더 두어서 레이저가 금속판에 입사가 가능하도록 구성하고, 시편에 전압을 가하여 시편의 전압이 시편 상부에 발생하는 이온을 추출판 방향으로 밀어두도록 구성하였다. 시편과 추출판 사이의 거리에 비하여 전극판의 크기가 충분히 크지 않기 때문에, 각 전극 사이의 전기장의 왜곡이 발생한다. 전기장의 왜곡 효과에 의한 분해능의 저하를 최소화 하기 위하여 추출판을 통과하는 이온은 3 mm의 작은 금속망으로 이루어진 구멍을 통하여 TOF 비행판으로 입사되도록 구성하였다.

Fig. 6은 구리 금속판에 레이저를 조사하고 임의의 시간만큼 시간지연을 두고 새로운 전기장을 걸어서 이온의 센서 도착한 이온을 적분하여 나타낸 것이다. 초기 에너지가 다른 각각의 이온들이 가속되어 후집속판에 도달하는 시간은 이론적 계산에서 알 수 있듯이 후집속 전압의 크기 및 시간이 적절할 경우 이온이 도달하는 시간은 초기 에너지 상태에 무관하게 같기 때문에 질량 분석기의 분해능이 높아진다. 후집속 전압을 구리판에 가하는 전압보다 크게 하고 시간을 짧게하여 이온이 후집속 영역에 들어오지 않도록하면 낮은 속도의 이온은 후집속 전압 때문에 생기는 전위 장벽 때문에 반사되어 TOF 비행영역으로 들어오지 못한다. 그러므로 후집속 시간 지연 시간을 정밀하게 제어하면 생성된 이온이 후

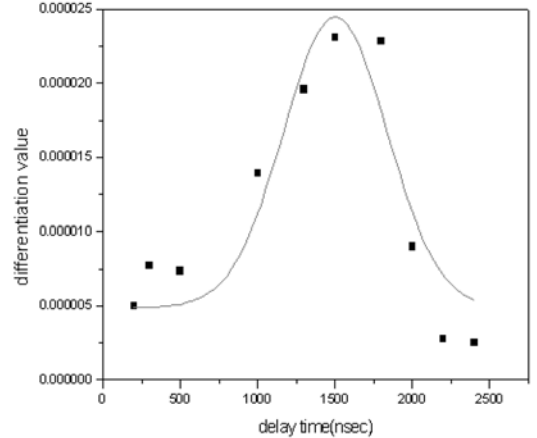


Fig. 7. Relative ion density passing post focusing plate.

집속판을 지나는 시간과 그 이온의 밀도를 알 수 있고 또한 초기에 생성된 이온의 운동에너지 분포를 알 수 있다. 이것은 시간 지연 시간이 짧을 경우 이온들이 아직 후집속 영역으로 들어오기 전이기 때문에 대부분의 이온들은 반사되어 구리판 쪽으로 돌아간다. 시간 지연을 늘이면, 점점 이온들은 후집속 영역으로 들어오게 되어서 그 이온의 양이 증가되나, 지연시간이 길어지면 대부분의 이온들이 후집속 영역으로 들어오기 때문에 더 이상 이온의 양이 증가되지 않는다. 그러므로 Fig. 6은 전형적인 S 자 곡선을 그리게 되고 이 곡선의 미분 값은 각 시간지연에서 후집속 영역에 도달하는 이온의 갯수에 해당한다. 이처럼 후집속 영역에 들어오는 이온의 분포가 일정하지 못하고 Fig. 6에서처럼 넓게 퍼져 있는 것은 레이저에 의하여 발생하는 이온의 속도가 일정치 않고 가우시안 분포를 하기 때문이다. S 자 모양의 적분된 이온분포로부터 시간에 따라 후집속판에 도달하는 이온을 계산한 것이 Fig. 7이다. 그림에서 알 수 있듯이 1500 nsec 근처에서 후집속판에 도달하는 이온이 가장 많은 가우시안 분포를 함을 알 수 있다. 후집속판과의 거리와 Fig. 7에서 측정된 시간을 바탕으로 속도 분포를 계산하면 그 분포가 초기 이온의 속도 분포와 직접적인 관련이 있기 때문에 이로부터 초기 에너지 분포를 알 수 있다. 가우시안 분포를 하고 있는 입자들의 FWHM(Full Width Half Maximum) 위치에 있는 두 입자의 속도 차이는 약 14 km/sec 정도 된다. 이는 구리 원자의 경우 약 8 eV 정도에 해당한다. 이러한 초기 에너지 분포를 하고 있는 반사판에 걸어주는 전압을 달리 하면서 이론적인 값과 비교하여 얻을 수도 있다. TOF에서 얻어지는 신호는 초기에너지(E<sub>0</sub>)와 반사판의 전기

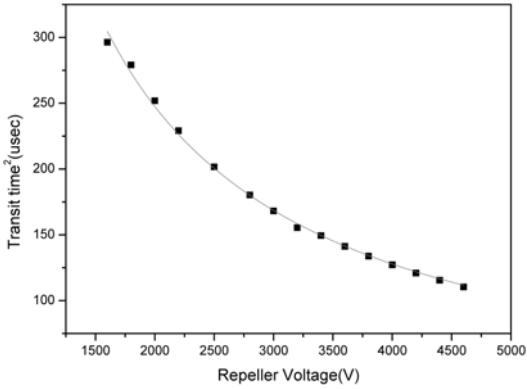


Fig. 8. Transient time of ion versus reflector voltage.

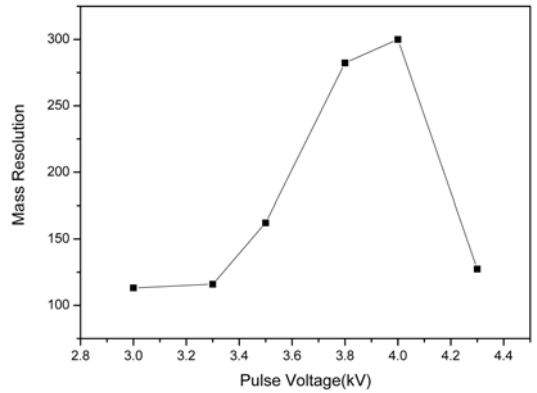


Fig. 10. Mass resolution versus post focusing voltage.

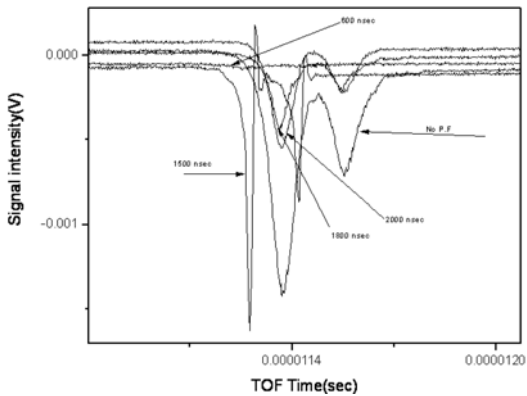


Fig. 9. Ion mass spectrum versus time delay of post focusing voltage.

적 위치에너지( $E_v$ )에 그리고 비행거리(D), 질량(m), 전하(e) 등에 의존한다.

$$T_D = 1.02(2m)^{1/2}D/(2E_i + E_v)^{1/2} \quad (5)$$

식에서 알 수 있듯이 시간의 제곱은 가한 전압에 반 비례하게 된다. Fig. 8은 여러 가지 전압(V)에서 시간 TD를 구한 것이다. Fig. 8과 식 (5)를 이용하여 비선형 피팅함수를 구하고 반사판의 전압  $V=0$ 에서의 즉  $E_v=0$ 에서 속도를 구하면 전압이 인가되지 않았을 때의 에너지  $E_i$  즉 초기 속도를 산출할 수 있다. 그림에서 실선은 피팅 함수를 나타내는데 그 결과 20 km/sec 정도의 초기 속도를 얻을 수 있었는데 Fig. 7의 방법으로 구한 14 km/sec와 약간의 차이는 있지만 유사한 결과를 보여준다.

Fig. 9는 최적의 후집속 지연 시간을 알아보기 위하여 다양한 시간지연에서 얻은 구리 이온의 질량신호를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 1500 nsec에서 가장 좋은 분해능을 얻을 수 있고, 시간이 너무 빠른 경

우 혹은 늦은 경우 오히려 분해능이 떨어짐을 알 수 있다. 시간이 너무 늦은 경우는 늦게 후집속판을 지난 입자가 충분히 가속되지 않은 경우이고 지연 시간이 너무 빠른 경우는 뒤에 도착한 입자가 오히려 더 가속되어 결국 TOF 비행 챔버를 지나는 시간이 더 짧아진 것으로 예상된다. 본 구조에서는 15000 nsec에서 최적 후집속 속이 이루어지면 이때 하나의 질량 신호는 20 nsec 정도의 선폭을 지닐 수 있다. 그러나 후집속 전압의 시간 지연이 최적이지 아니더라도 즉 조금 늦은 경우 후집속 전압을 높이면 분해능이 좋아지고, 반대로 너무 빠르더라도 후집속 전압을 낮추면 분해능을 올릴 수 있다. 최적의 시간 지연은 반사판에 가하는 전압과 반사판과 후집속판의 거리에 의하여 결정된다.

Fig. 10은 최적의 후집속 시간지연 시간에서 전압의 크기에 따른 분해능을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 최적의 후집속 전압이 존재하며 이는 전압이 너무 크면 후집속판에 늦게 도착한 이온이 더 가속되어 최종적으로 센서에 도달하는 이온의 시간이 빨라진다는 것을 의미한다. 그림에서 분해능은 두 질량  $m=65$ 와 63 도착 시간을 각 질량의 시간 폭의 2 배로 나눈 값을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 후집속 방법을 이용한 질량신호 분해능 향상에 대해서 연구하였다. 이론적 고찰을 바탕으로 후집속 전압의 지연시간과 그 크기가 중요함을 밝혔으며, 특히 초기 이온의 방향이 180°의 모든 방향으로 진행할 경우 가해주는 후집속 전압이 비선형적이어야 함을 알 수 있었다. 이러한 경우는 공간상에 존재하는 에어로졸 입자를 레이저로 이온화 시켜야 하는 경우와 같은 경우에 적용되며 차후 에어로졸 질량분석기에 유용하게 사용될 예정이다. 금속표면에 레이저를 조사하는

경우 일반적으로 초기에너지는 레이저의 출력조건에 따라 다양하게 존재하나 일반적으로 시료와 반사판의 역할을 동시에 하는 금속판에 직각방향으로 이온이 진행하기 때문에 선형적 가속만으로도 충분히 좋은 분해능을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이론 및 실험적으로 후집속 장치의 특성을 연구하였고 이러한 연구는 앞으로 구축될 에어로졸 질량분석기를 구성하는데 매우 중요한 변수에 대한 특징을 구한 것으로 평가된다.

### 참고문헌

1. E. Woods III, G. D. Smith, R. E. Miller and Tomas Baer, *Anal. Chem.*, **74**, 1642(2002).
2. A. M. Middlebrook, etc., *J. Geophysical Researcher*, **108**, D7, 8424(2003).
3. D. S. Thomson, A. M. Middlebrook, and D. M. Murphy, *Aerosol Science and Technology*, **26**, 544(1997).
4. J. E. Carranza and D. W. Hanh, *Anal. Chem.*, **74**, 5450(2002).
5. S. I. Anismov, N. A. Inogamov, A. M. Oparin, B. Rethfeld, T. Yabe, M. Ogawa and V. E. Fortov, *Appl. Phys. A*, **69**, 617(1999).
6. L. V. Zhigilei and B. J. Garrison, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 551(1997).
7. M. Gluckmann and M. Karas, *J. Mass Spectroscopy*, **34**, 467(1999).
8. D. M. Murphy and D. S. Thomson, *Aerosol Science and Technology*, **22**, 237(1995).
9. F. Poitrasson, X. Mao, S. S. Mao, R. Freydier and R. E. Russo, *Anal. Chem.*, **75**, 6184(2003).
10. Zenobi. R, *International J. Mass Spectrometry and Ion processes*, **145**, 51(1995).
11. W. C. Wiley and I. H. McLaren, *The review of the scientific instrument*, **26**, 1150(1955).
12. J. A. Browder, R. L. Miller, W. A. Thomas and G. Sanzone, *Int. J. Mass Spect. and Ion Phy.*, **37**, 99(1981).

