

# 다중 이온빔 장비를 위한 정전 렌즈 집속 광학계 설계 Designing Electrostatic Optics for Multi Ion Beam System

\*김연태, 김태곤, #민병권, 이상조

\*Y. T. Kim, T.-G. Kim, #B.-K. Min(bkmin@yonsei.ac.kr), S. J. Lee  
연세대학교 기계공학부

Key words : electrostatic lens, ion beam optics, multi ion beam optics

## 1. 서론

이온빔 가공 장비는 이온원에서 발생된 이온을 수~수십 킬로 볼트로 가속하고 정전렌즈를 이용하여 집속시킨 후, 빔을 정밀하게 편향시켜 나노 영역을 가공하는 장비로, 측정을 위한 재료 단면 절단, TEM 시편의 제작 등 측정 분야와 마스크 수리, 미세부품이나 미세패턴의 제작 등에 사용되고 있다.<sup>1)</sup> 하지만, 수십~수백 나노 크기의 단일 이온빔을 이용하므로 생산성이 매우 낮다는 한계가 있다. 다중 이온빔 장비는 단일 이온빔 장비가 가진 생산성의 한계를 극복하기 위하여 다수의 빔을 방출시키고, 이를 구분된 상태로 집속시킨 후 넓은 범위를 동시 가공하여 총 가공 에너지를 증가시켜 가공 속도를 높이는 장비이다.

이온빔의 집속에는 정전렌즈를 사용한 광학계가 사용되고 있다. 정전렌즈는 쿨롱 법칙에 따라 서로 다른 두 지점에서의 전위차에 의해 생성되는 정전기력에 의해서 전하를 가지는 입자의 궤도를 변형하여 집속하는 방식이다. 정전렌즈는 구성요소 형상에 따라 개구 렌즈(aperture lens), 원통형 렌즈(cylindrical lens), 4극자 렌즈(quadrupole lens) 등으로 구분되며, 구성요소 개수에 따라 3 요소 렌즈, 4 요소 렌즈 등으로 나뉘어 진다.<sup>2)</sup>

단일 이온빔 집속 광학계는 일반적으로 condensing lens(CL)와 objective lens(OL)로 이루어져 있다. CL 은 이온원에서 퍼져나오는 이온빔을 모아주는 역할을 하며, OL 은 이온빔을 재료 표면에 집속 시켜주는 역할을 한다. 단일 이온빔의 집속은 이온빔이 재료 표면에 조사되었을 때 방출되는 이차전자(secondary electric)를 검출하여 획득된 이미지를 바탕으로 집속 여부를 확인한다.

단일 이온빔 집속 광학계 설계는 빔 집속 시 생성되는 disk of least confusion 을 최소화 시키는 방향으로 설계 된다.<sup>3)</sup> 이온 빔의 disk of least confusion 은 크게 렌즈의 구면수차와 비점수차에 의해 영향을 받는다. 구면수차는 이온빔의 가속전압, 이온빔의 직경, 초점 거리, 렌즈의 구조 등에 의해 영향을 받으며, 비점수차는 stigmatism 을 통하여 보완된다.<sup>1),2)</sup>

다중 이온빔 장비의 광학계는 빔의 집속 뿐 아니라 각각 개별 빔의 구분이 유지되어야 하는 zoom lens 의 특성을 가져야 한다. 또한 재료의 표면에서 방출되는 이차전자의 검출을 통해 이미지를 구성할 수 없으므로 가공 재료 표면에서의 집속 여부를 확인할 수 없기 때문에 기존의 단일 이온빔 광학계와는 다른 집속 확인 방법과 광학계의 설계가 필요하다.

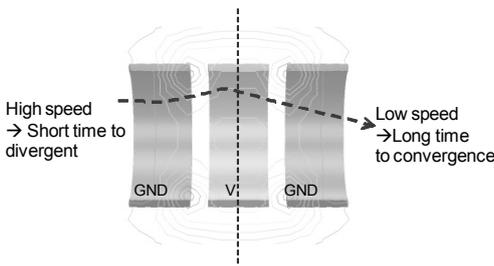


Fig. 1 Focusing schematic of 3 element electrostatic lens

## 2. 이온빔 집속 광학계 설계의 기초<sup>2)</sup>

전하를 가진 입자가 두 개의 서로 다른 전위를 가진 영역을 지나갈 때의 굴절률은 다음과 같다.

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right) = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서  $n_{\#}$ 은 굴절률이며,  $V_{\#}$ 은 전위이다.

하나의 정전렌즈는 항상 수렴렌즈와 발산렌즈를 동시에 가지게 되며, 수렴과 발산의 전체 효과(net effect)에 따라 해당 렌즈의 특성을 결정한다. Fig. 1 은 3 개의 요소를 가진 정전렌즈에서 입자의 집속에 대한 도식도로, 하나의 정전렌즈는 최소 수렴영역, 경계부분, 발산영역의 3 가지 굴절 특성을 가지게 된다. 하지만 수렴영역과 발산영역의 경계 구분이 힘들뿐 아니라 각각의 영역 또한 균일하지 않은 전위의 분포를 가지기 때문에 실제 굴절률을 계산하기가 어렵다.

따라서 정전렌즈에서의 입자의 거동을 보다 정확하게 예측하기 위해 라플라스 방정식을 이용한다. 원통 좌표계에서 전하를 가진 입자의 운동방정식은

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \quad (2)$$

이며, 이때  $z$ 는 축 방향이며,  $r$ 은 원통방향이다.

여기서 전위( $V$ )를  $\sum A_n r^{2n}$  로 구성된 함수로 가정하여 이를 급수 전개 하고, 운동에너지 보존식과, 반경방향의 운동 방정식을 대입하고,  $rV^{1/2}$  을  $R$  (reduced radius)로 치환한 후,  $V'$ 은 반경 방향의 미분 값으로 정의하여 정리하면

$$\frac{d^2 R}{dz^2} = -\frac{3}{16} R \left( \frac{V'}{V} \right)^2 \quad (3)$$

이 되며 이를 Picht's equation 이라 한다.

식(2)와 식(3)를 사용하면 특정한 전위 분포를 가진 공간에서 수학적이거나 수치적인 풀이를 이용하여 공간에서 전하를 가진 입자의 운동을 계산할 수 있다.

## 3. 다중빔 집속 광학계 설계 및 시뮬레이션 결과

다중빔 집속 광학계는 Fig. 2 와 같이 크게 평행빔 생성부와 다중빔 집속부로 이루어진다.

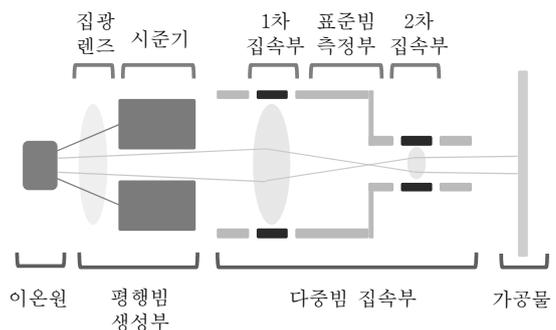


Fig. 2 Schematic of multi ion beam optics

평행빔 생성부는 평행면과 일정 이하의 각도를 가지는 이온빔만을 통과시켜 주는 시준기(collimator)와 효율을 높여주기 위한 CL로 이루어져 있으며 다중빔 집속부에 평행빔만을 통과시켜주는 역할을 한다.

다중빔 집속부는 입사된 평행빔을 표준빔 측정부로 집속시키는 1차 집속부, 이미지를 획득하여 표준 다중빔을 생성하는 표준빔 측정부, 표준빔 측정부를 통과하여 발산되는 표준 다중빔을 평행하게 집속하는 2차 집속부로 이루어져 있다. 1차 집속부와 2차 집속부에 쓰여진 렌즈는 원통형 정전렌즈로 Fig. 3은 다중빔 집속부의 광학계를 구성하는 구조와 이에 따른 입자의 궤적의 거동을 나타내며, Table 1은 다중빔 집속부 구성요소의 크기 비율을 나타낸다.

1차 집속부와 2차 집속부를 구성하는 정전렌즈의 내경 비율은 식(1)과 식(3), 그리고  $L_3$  과  $L_4$  에 따라 결정되는 선형 집속 배율 (linear magnification)에 따라 결정된다. 1차 집속부는 입사된 평행빔을 표준빔 측정부의 한 점으로 집속시키며, 표준빔 측정부에서는 집속된 다중빔을 편향시켜 이미지를 획득하고, 이를 이용하여 표준 다중빔을 생성한다. 2차 집속부에서는 표준빔 측정부를 통과한 후 발산하는 다중빔을 다시 평행하게 집속시켜 각각의 빔이 분리된 채로 집속된 다중빔을 생성한다.

Fig. 4는 상용 입자 거동 해석 프로그램(SIMION)을 이용하여 시뮬레이션 한 결과이다. 5kV로 가속된 지름 10mm의 평행한 이온빔이 4kV의 전압을 가진 이온빔 집속부를 통과하면, 각각의 빔이 분리를 유지한 채 약 3.3배 집속되었으며 이는 linear magnification과 같은 값을 가진다.

또한 Fig. 5는 같은 조건에서 다중빔 집속부를 2개로 배열 하였을 경우 시뮬레이션 결과로, 약 10배의 집속 배율을 보였다. 이는 다중빔 집속부의 중첩 사용이 가능하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

다중 이온빔 장비는 다수의 이온빔을 사용하여 대면적에 동시 가공함으로써 총 가공에너지를 증가시켜 가공 속도를 증가시켜 기존 단일 이온빔 장비가 가진 낮은 생산성의 한계를 극복하는 장비이다. 단일 이온빔 장비의 광학계는 disk of least confusion을 최소화 하는 방향으로 설계되는 반면, 다중 이온빔 장비의 광학계는 다수의 빔을 분리된 채로 집속시켜야 하므로 기존 단일 이온빔 장비와는 다른 집속 확인 방법과 광학계 구성이 필요하다. 이에 다중 이온빔 장비를 위한 다중빔 집속 광학계를 개발하였다.

광학계는 크게 평행빔을 생성부와 다중빔 집속부로 이루어진다. 평행빔 생성부는 시준기를 통해 일정 각도 이하의 빔을 통과시켜 주며, 이 때, CL은 소스에서 방출된 이온빔의 사용 효율을 높인다. 다중빔 집속부는 1차 집속부와 표준빔 측정부, 2차 집속부로 이루어져 있다. 1차 집속부는 입사된 평행빔을 표준빔 측정부의 한 점으로 집속시키며, 표준빔 측정부에서는 집속된 다중빔을 편향시켜 이미지를 획득하고, 이를 이용하여 표준 다중빔을 생성한다. 2차 집속부에서는 표준빔 측정부를 통과한 후 발산하는 다중빔을 다시 평행하게 집속시킨다.

설계된 광학계는 상용 입자 거동 해석 프로그램(SIMION) 시뮬레이션 결과 빔 분리를 유지한 채 약 3.3배 집속된 결과를 보였으며, 또한 다중빔 집속부를 2개로 배열했을 경우에 약 10배의 집속 배율을 보여 다중빔 집속부의 중첩 사용이 가능한 것을 알 수 있었다.

하지만 아직 최적 설계가 이루어지지 않아 다중빔 집속부의 길이가 집속 배율에 비하여 낮은 점은 한계로 남아있다. 앞으로 형상 최적화를 통해 다중빔 집속부의 길이를 줄이고 집속 배율을 높일 예정이다.

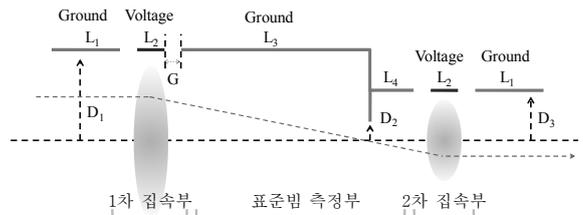


Fig. 3 Schematic of zoom-focusing optics and beam trajectory

Table 1 Geometrical relation of zoom-focusing optics

Variables	Relation	Description
$L_1$	$1.25 D_1$	-
$L_2$	$0.5 D_1$	-
$L_3$	$3.25 D_1$	Linear magnification
$L_4$	$D_1$	-
G	$0.1 D_1$	-
$D_2$	$0.1 D_1$	표준빔 측정
$D_3$	$0.564 D_1$	$(1 / \text{Linear magnification})^{0.5} \times D_1$

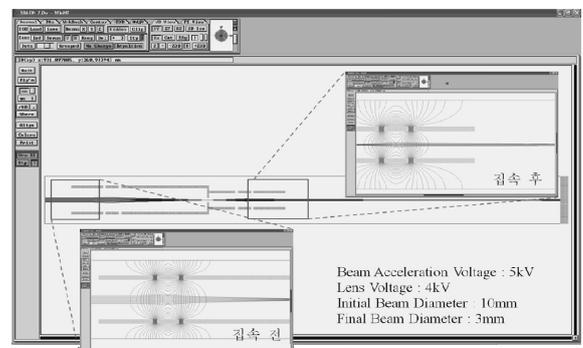


Fig. 4 Simulation result of zoom-focusing optics (SIMION)

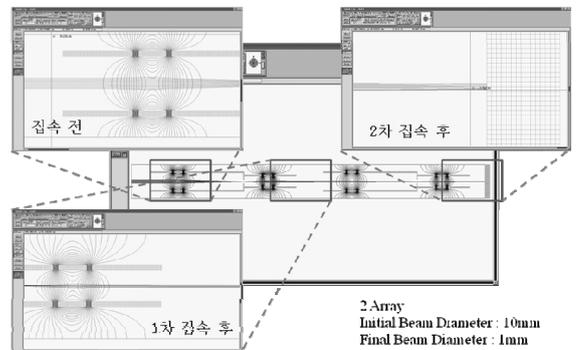


Fig. 5 Simulation result of arranged zoom-focusing optics (SIMION)

후기

본 연구는 지식경제부 산업기술개발사업인 “고효율 에너지빔 응용 초미세 부품 제조용 In-line 시스템 개발” 연구비 지원으로 이루어 졌습니다.

참고문헌

1. Lucille A. Giannuzzi, Fred A. Stevie, "INTRODUCTION TO FOCUSED ION BEAMS," Springer, 2005
2. D.W.O heddle, "Electrostatic Lens Systems 2<sup>nd</sup> edition," Institute of Physics Publishing, 2000.
3. Omer Sise, Melike Ulu, Mevlut Dogan, "Aberration coefficients of multi-element cylindrical electrostatic lens systems for charged particle beam applications," Radiation Physics and Chemistry, **76**, 593-598, 2007