

# 집속이온빔을 가공 시스템 설계 및 제작

박철우\*, 이종항<sup>+</sup>, 최진형<sup>++</sup>, 유성만<sup>++</sup>

## Design and Manufacturing of Focused Ion Beam Machining System

C.W. Park\*, J.H. Lee<sup>+</sup>, J.H. Choi<sup>++</sup>, S.M. Yu<sup>++</sup>

### Abstract

This paper describes the design and manufacturing of a focused-ion-beam machining system which can make small features of nano size. We use a SIMION simulator in order to obtain the design data of an ion column. The simulation result shows that the focal length of ion beam decreases as the applied voltage of object lens increases. Finally, we obtained the good images of a mesh of 50 micrometers by using the adjustment of applied voltage, acceleration power, and dimension of each elements.

**Key Words :** Focused ion beam, Machine design, Liquid Metal Ion Source, Electrostatic lens, SIMION simulator, Image.

## 1. 서론

집속이온빔을 이용한 가공장치는 1970년대 초에 시카고 대학과 오레곤대학에서 개발되었으며, 특히 1975년 Clampitt에 의해서 액체금속 이온원이 최초로 고안되었고, Swanson 및 Orloff에 의해서 이를 개선하여 집속도가 수십나노급인 집속이온빔 가공장치를 개발하였다.

집속이온빔장치는 이온주입(ion implantation), 스퍼터링(sputtering), 증착(deposition), 재료화적인 분석이 가능하여 반도체 산업을 비롯한 나노 산업에서 널리 사용되고 있다. 이러한 집속이온빔 장치는 스퍼터링 기능과 측정기능을 활용하여 나노급 가공이 가능하기 때문에 세계 각국의 기업들이 경쟁적으로 개발하고 있다.

최근 Seiko사에서는 세계 최고의 집속도인 5nm급의 집속이온빔 장치를 이용하여 증착의 정밀도와 증착높이를 향상시킴으로서 나노급의 정밀도를 갖는 3차원 구조물을 제작하기도 하였다.

본 논문에서는 이러한 나노급 가공이 가능한 집속이온빔 장치의 국산화를 목적으로 연구개발을 시도한 일부 결과들을 보고한다. 또한, 본 연구에서 시도한 집속이온빔 기구는 높은 빔 차단능력과 가변 빔 전류능력을 갖고 있는 Einzel 렌즈기구를 적용하였으며, 이를 적용한 집속이온빔 장치를 설계 및 제작하였다.

그리고 SIMION 시뮬레이터를 활용하여 이온빔 집속기구의 설계에 필요한 각종 설계 데이터를 얻어 시스템에 적용함으로써 가공장치의 최적화를 도모하고자 한다.

\* 한국산업기술대학교 기계공학과(cwpark@kpu.ac.kr)

주소: 경기도 시흥시 정왕동 2121번지

+ 한국산업기술대학교 기계공학과

++ 한국산업기술대학교 지식/기반 에너지대학원

## 2. 집속이온빔 가공장치의 설계 및 조립

### 2.1 액체금속 이온원

이온빔을 나노급으로 집속시키기 위해서는 이온원의 선택이 중요하다. 선택기준은 첫째, 이온빔의 발생영역이 매우 작아야 하며, 둘째, 장시간의 동작에서 안정적인 성능을 유지해야 한다. 셋째, 높은 에너지로 가속시킬 수 있어야 하며, 이때 에너지 퍼짐 특성이 매우 작아야 하고, 넷째, 이온빔의 세기가 커야 한다는 것이다. 이와 같은 특성을 가지고 있는 이온빔으로서 가장 적합한 이온원이 갈륨을 이용한 액체금속 이온원(LMIS, liquid metal ion source)이다.

Fig. 1은 액체금속 이온원을 나타낸 사진이므로 가열을 위한 텅스텐 필라멘트, 갈륨이온원, 높은 전기장을 만들기 위한 텅스텐 바늘로 구성되어 있다. 홀더의 선단에 고전계강도( $\sim 10^{10}$ V/m)를 인가하면 전계전리에 의하여 금속이온들이 방출된다.

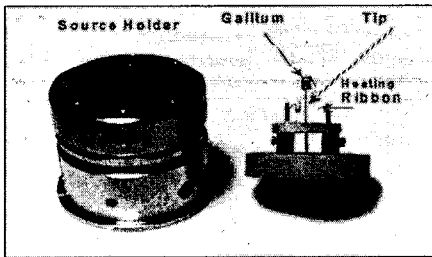


Fig. 1 Photograph of LMIS

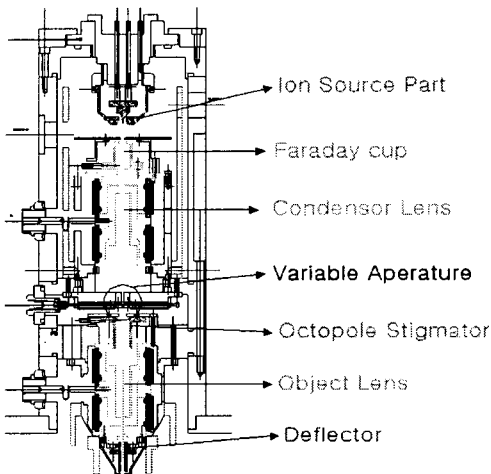
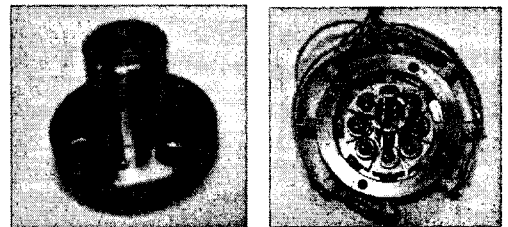


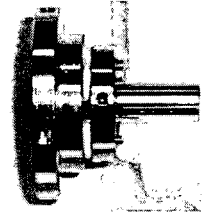
Fig. 2 Schematic diagram of ion column

### 2.2 경통부

Fig. 2는 집속이온빔장치에서 중요한 역할을 하는 경통부(ion column)를 나타낸 것으로서, 이온빔의 집속을 위한 정전렌즈(electrostatic lens), 이온빔이 발생된 빔의 양을 측정하기 위한 Fig. 3(a)의 패러데이컵(faraday cup), 집속효과를 향상시켜 주는 조리개(aperture), 빔의 질을 조정해 주는 Fig. 3(b)의 8극스티그메이터(octopole stigmator), 이온빔의 위치를 제어해 주는 Fig. 3(c)의 디플렉터(deflector)로 구성되어 있다.



(a) Faraday cup (b) Octopole stigmator



(c) Deflector

Fig. 3 Photographs of a faraday cup, an octopole stigmator, and a deflector

이온빔을 집속하기 위한 가장 보편적인 방법으로 3극의 정전렌즈(Einzel lens)가 사용된다. 이 렌즈는 이온원에서 조사된 이온전류의 손실을 최소화시키면서 이온빔을 집속시킬 수 있다. 입사한 이온빔을 집속시키기 위해서는 3개의 전극이 축대칭을 이루어야 한다.

### 2.3 측정부

시료로부터 방출된 2차 입자는 중성원자, 이온, 전자 등이 있다. 이중 이온이나 전자는 Detector 앞단의 Grid에 전기장을 인가하면 전자나 이온들을 용이하게 수집할 수 있으며, 이들은 Scintillator에서 광신호로 변환되고 광전자증배기(PMT, Photo-Multiplication Tube)에서 증폭된다. 이들 신호는 전압으로 변환되며, 이 전압의 세기가 디스플레이에서 명암으로 나타내게 된다.

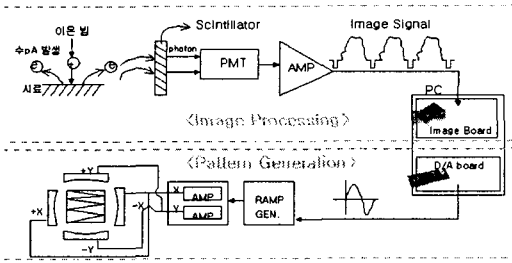


Fig. 4 Schematic diagram of image processing system

이온빔을 시료의 원하는 부분에 입사시켜 주입시키거나 가공할 때 빔을 제어하는 것은 디플렉터에 걸어진 전압신호이며, 이를 조정함으로써 배율조정을 할 수 있다.

### 3. 실험장치 및 실험 방법

경통부 설계에 필요한 데이터들을 얻기 위하여 각종 데이터들을 SIMION 시뮬레이터에 입력한다. SIMION 시뮬레이터에 입력된 데이터는 이온빔의 경로에 기여도가 큰 근축 영역은 좀더 메쉬 크기를 세밀하게 입력하고, 전압이 가해지는 전극부분과 그렇지 않은 곳을 구별하였다. 장치도는 5,000×1,000개의 픽셀을 가지고 실제보다 10배 확대하여 입력하였다.

집속이온빔 장치에서 전압이 가해지는 부분은 여러 부분이 있지만, 이온빔 집속에 기여도가 큰 부분은 이온빔 소스, 집속렌즈(condenser lens), 대물렌즈(object lens), 블랭커(blanker), 그리고 디플렉터의 5개소이다. 이온빔 발전부의 전압은 이온빔 가속에 기여하는 부분이어서 이온의 입사에너지가 되어 모의실험에서의 초기 에너지로 입력되었다.

모의실험방법은 입력된 장치도에 전압조건을 부여하고, 입사이온빔의 조건을 결정하여 실행했다. 장치의 기하학적 변수는 장치도를 변화시키고, 전기적 변수인 전압은 모의실험 중에서 변화를 주며, 최종적으로 입사이온의 변수인 이온의 종류, 전하량, 질량, 에너지, 입사위치, 입사방법(평행입사와 구면입사)을 이온빔 조건에 입력하여 모의실험을 수행한다.

본 연구에서의 모의실험은 크게 3가지로 구분해서 수행한다. 첫째로, 집속렌즈 부분에서 이온빔을 조리개에 집속시키는 조건을 찾기 위해서 집속렌즈의 3단중 끝단은 GND 전압을 인가하고, 중앙의 한 곳에 전압을 바꾸어 가면서 집속지점을 확인한다. 입사이온빔의 위치는 이온빔 발전부의 끝단을 기준으로 한다. 둘째로, 대물렌즈 부분에서도 집속렌즈와 같은 조건하에서 이온빔의 집속지점을 확인한다. 이때 입사

이온빔의 초기 위치는 조리개로 한다. 셋째로, 장치 전체를 통과하는 이온빔을 고려하여 집속렌즈와 대물렌즈의 전압을 변화시키며, 집속이온빔의 위치를 관찰한다. 또한 디플렉터의 전압을 변화시켜 집속된 이온빔이 중심축에서 떨어지는 거리를 측정한다. 또한 조리개의 크기와 위치의 변화에 따른 집속이온빔의 변화도 관찰한다.

각 실험에 입사되는 이온빔은 중심축에서 평행한 방향으로 상하로 일정한 간격으로 떨어진 입사한 빔과 중심축의 한 점에서 일정한 각의 변화를 가지고 입사한 구면 입사빔으로 구분하고, 입사에너지 변화가 있는 경우와 없는 경우로 구분하여 측정한다.

이온의 에너지는 평행빔은 장치의 중심축에서 떨어진 거리의 변화에 비례하여 변화하고, 구면빔은 각의 변화에 비례하여 변화시킨다. 측정시 집속렌즈실험과 장치전체실험에서의 초점위치는 패러데이컵의 끝단을 기준으로 표시하고, 대물렌즈의 초점위치는 대물렌즈 시작부분의 홀더를 기준으로 표시하였다.

### 4. 실험결과

#### 4.1 모의실험 결과

실제 제작된 이온빔 장치를 이용하여 샘플 이미지를 보기 전에 모의실험한 결과를 바탕으로 집속할 전압과 가속전압 및 이온빔의 궤적을 찾아보았다.

모의실험 결과를 보면 12kV와 15kV를 인가한 실험에서는 초점과 시료대에서 이온빔의 집속을 계산할 수 있다. 그러나 12kV와 15kV에서는 근축상의 데이터와 Y축 상의 데이터가 일치해야만 실질적인 이미지를 볼 수 있다.

이온빔 가속전압이 12kV와 15kV, 일때 집속렌즈에 3kV의 전압을 인가하고, 대물렌즈에 4kV와 6kV로 인가하여 이온빔이 집속되는 좌표를 계산하였다.

Fig. 5는 가속전압을 12kV로 인가할 때의 이온빔의 집속 초점과 시료대에 도달했을 때의 좌표값을 계산할 결과이다. 가속전압 12kV를 인가할 때, 집속렌즈 3kV, 대물렌즈 4kV의 전압을 인가하면, 이온빔은 X축으로부터 19 $\mu$ m를 벗어나며, Y축으로부터는 437.7mm의 위치에 집속되는 결과를 얻을 수 있었다.

특히 시료대에서는 X축(근축)으로부터 26 $\mu$ m, Y축상에서 440mm의 위치에 이온빔이 집속된다. 결국, 이온들은 시료대로부터 2.29mm 벗어난 위치에 집속 되는 것을 알 수 있다.

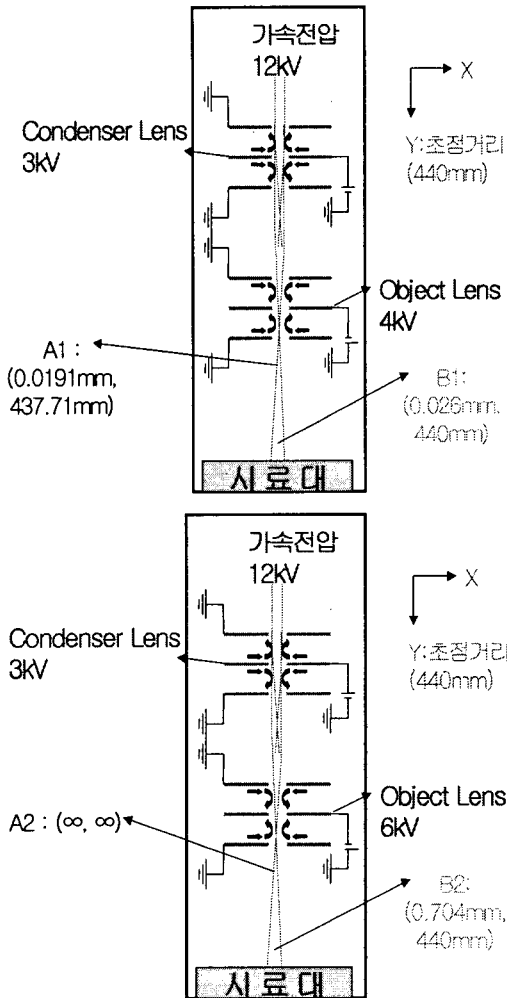


Fig. 5 Results of design parameters at 12kV  
(A1,A2:대물렌즈에서 이온빔이 센터로부터 벗어난 거리)  
(B1,B2:시료대 에서 이온빔이 센터로부터 벗어난 거리)

Fig. 6는 15kV의 가속전압하에서 집속렌즈에 3kV, 대물 렌즈에 6kV의 전압을 인가할 때, X축상으로부터 8.1 $\mu$ m, Y축으로부터 416.96mm 위치에 이온들이 집속되고, 시료대 위치에서는 X축으로부터 46.6 $\mu$ m, Y축 위치는 시료대로 부터 23.04mm떨어진 위치에 이온들이 집속된다.

따라서 대물렌즈에 인가하는 전압을 증가시키면 이온빔의 초점거리가 짧아지는 것을 알 수 있었다.

또한, 12kV의 가속전압에서 대물렌즈에 6kV의 전압을 인가하면 이온빔이 경통 내부에 집속되는 것을 알 수 있다.그리고 가속전압을 15kV로 인가할 경우 대물렌즈에 4kV

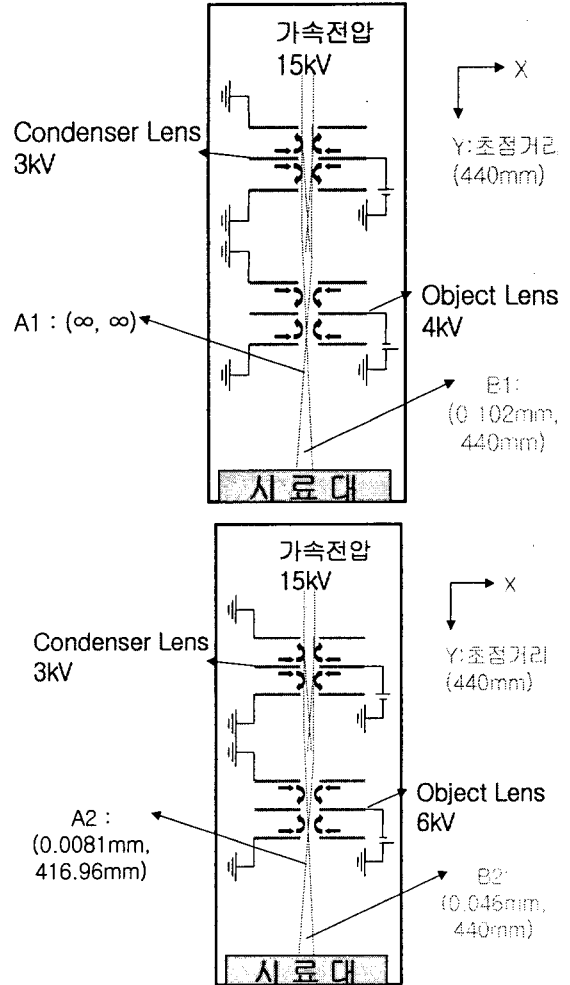


Fig. 6 Results of design parameters at 15kV  
(A1,A2:대물렌즈에서 이온빔이 센터로부터 벗어난 거리)  
(B1,B2:시료대 에서 이온빔이 센터로부터 벗어난 거리)

를 인가하면 이온빔이 집속되지 않음을 알 수 있었다. 즉, 이와 같은 데이터로 경통을 설계하면 시료대 위치에서 이온을 검출할 수 없음을 의미한다.

#### 4.2 실제 이미지 측정결과

상기의 설계데이터를 자체 제작한 집속이온빔 장치에 적용하여 Fig. 7과 같은 선폭 50 $\mu$ m 크기의 메쉬를 측정한 결과가 Fig. 8과 Fig. 9이다.

Fig. 8은 가속전압 12kV하에서 집속렌즈에 3kV, 대물렌즈에 4kV의 전압을 인가하여 측정한 결과이며, Fig. 9는 가

속전압 15kV하에서 집속렌즈에 3kV, 대물렌즈에 6kV의 전압을 인가하여 측정된 결과이다.

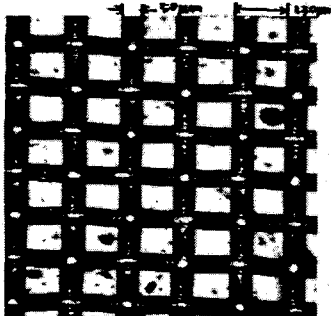


Fig. 7 Photograph of a mesh sample



Fig. 8 Photograph of a mesh image at 12kV  
(Condenser lens 3kV, Object lens 4kV)

결국 이온빔의 집속에 영향을 미치는 것은 대물렌즈의 인가전압이 높을수록 이온들이 근축(X축)으로부터 이탈된 거리가 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 8의 이미지는 이온빔의 집속점과 시료대 사이의 거리가 2.29mm일 경우이며, Fig. 9의 이미지는 23.04mm의 위치에서 측정된 이미지이므로 Fig. 8쪽이 확대된 이미지임을 알 수 있다.

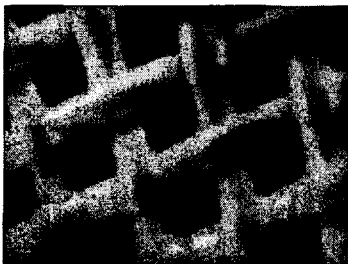


Fig. 9 Photograph of a mesh image at 15kV  
(Condenser lens 3kV, Object lens 6kV)

## 5. 결론

수십 나노급의 형상을 가공할 수 있는 집속이온빔가공장치의 설계에 필요한 데이터를 얻기 위하여 SIMION 시뮬레이터를 이용하였다.

시뮬레이션결과, 대물렌즈에 인가하는 전압을 증가시키면 이온빔의 초점거리가 감소하였으며, 이 결과들을 적용하여 50마이크로미터 크기의 메쉬 샘플을 측정된 결과 선명한 이미지를 얻을 수 있었다.

## 후기

본 연구는 “마이크로-나노 점선가공 기반구축센터”사업과 차세대신기술개발사업인 “이온빔이용 나노가공용 장비개발”로부터 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- (1) S.M. Kim, 1998, "The Measurements of Energy Characteristics of Liquid Metal Ion Source for Focused Ion Beam System," M.Sc., pp.3-5.
- (2) S.O. Kang, 1993, "Application and Development of Focused Ion Beam," Journal of the Korean Vacuum Society Vol.2, No.3, pp.304-313.
- (3) Y.M Lee, 1996, "Characteristics of Liquid Ion Source for Focused Ion Beam System," Ph.D, pp.8-22.
- (4) P.D. Prewett and G.L.R. Mair, 1991, Focused Ion Beam from Liquid Metal Ion Sources, Research studies press Ltd., pp.151-175.