

< 기술논문 >

## 집속이온빔장치에서의 이온빔축 얼라인먼트

박철우\* · 이종항\* · 강승언\*\*

(2006년 3월 6일 접수, 2006년 6월 14일 심사완료)

### Alignment Method of Ion Beam Axis in Focused Ion Beam System

Cheol Woo Park, Jong Hang Lee and Seung Oun Kang

**Key Words:** Focused Ion Beam(집속이온빔), Ion Column(경통), Condenser Lens(집속렌즈), Objective Lens(대물렌즈), Alignment(얼라인먼트), Performance Test(성능시험)

#### Abstract

This paper describes an alignment method of the ion column which is used for a focused-ion-beam machining system. The alignment parameters for mechanical and electrical components are introduced, and also sample images are used for evaluating the experiments. The experimental results show that geometrical positions of mechanical components have an influence on the quality of emitted ion beam. In addition, we can successfully align the traveling axis of ions by using mechanical and electrical methods.

#### 1. 서 론

집속이온빔을 이용한 가공장치는 1970년대 초에 시카고 대학과 오래곤대학에서 개발되었으며, 특히 액체금속이온원은 1975년 Clampitt에 의해서 고안되어졌고, Swanson과 Orloff에 의해서 이를 개선하여 집속도가 수십나노급인 집속이온빔 가공장치를 개발<sup>(1)</sup>하였다.

집속이온빔장치는 이온주입(ion implantation), 스퍼터링(sputtering), 증착(deposition), 재료분석<sup>(2)</sup>이 가능하여 반도체 산업을 비롯한 나노 산업에서 널리 사용되고 있다. 이러한 집속이온빔 장치는 스퍼터링 기능과 측정기능을 활용하여 나노급 가공이 가능하기 때문에 FEI, 세이코, 히타치 등 많은 기업들이 경쟁적으로 개발하고 있다.

최근 세이코사는 세계 최고의 집속도인 5nm급의 집속이온빔장치를 개발하였으며, S. Matsui<sup>(3)</sup>는 이를 활용하여 나노급의 정밀도를 갖는 3차원 구조물들을 제작하기도 하였다.

집속이온빔장치의 핵심인 경통(ion column)은 여러 가지 부품들로 구성되어 있기 때문에 정밀하게 조립되었다더라도 기계가공에 의한 각종 요소 부품들의 오차누적으로 최종 조립오차는 증가할 수밖에 없다.

이러한 경통내의 기하학적 오차누적은 이온빔이 이동하는 경로를 왜곡시켜 시료대에 조사(emission)되는 이온빔의 품질에 큰 영향을 준다. 따라서 초미세가공 및 고해상도의 확보를 위해서는 무엇보다도 이 기하학적인 오차들을 최소화시킬 필요가 있다. 그러나 이 기하학적 오차는 제조공정에서 이론적으로 완벽하게 제거할 수 없으므로 특정 요소부품들의 기계적인 조정 및 집속렌즈 등의 전기적 조정에 의하여 이온빔축을 얼라인 할 필요가 있다.

미세한 집속이온빔을 얻기 위한 이온빔축의 얼라인먼트에 대한 연구들은 그다지 많지 않다. 일

† 책임저자, 회원, 한국산업기술대학교 기계공학과  
E-mail : cwpark@kpu.ac.kr  
TEL : (031)4968-207 FAX : (031)4968-219

\* 회원, 한국산업기술대학교 기계공학과

\*\* 광운대학교 전자물리학과

반적으로 이들 연구는 제조업체에서 기업의 노하우로 수행되는 경우가 많으며, 논문으로 발표되는 경우는 극소수에 불과하다. T. Morita et al<sup>(4)</sup>은 집속이온빔장치의 이론적인 얼라인먼트의 한계에 대하여 연구를 수행하였다. 그는 얼라인먼트 마크를 검출하여 분해능을 계산함으로써, 얼라인먼트 분해능은 신호대 잡음비에 따라 변하며, 가장 우수한 분해능을 주는 최적의 전류영역이 존재함을 보여 주었다.

본 연구에서는 경통을 구성하고 있는 각종 부품들의 가공 및 조립 시 발생하는 오차들이 집속이온빔의 성능에 미치는 영향들을 파악하고자한다. 그리고 이들 조립오차를 최소화하기 위한 조정 파라미터로서는 이온원(ion source) 조정, 어퍼처(aperture)의 경사각도 조정, 그리고 집속렌즈(condenser lens, CL) 및 대물렌즈(objective lens, OL)의 전압 조정이 있다. 또한 이러한 조정성능을 파악하기 위하여 매쉬샘플의 이미지를 수집하여 분석함으로써 이온빔축의 얼라인먼트가 이온빔의 품질에 미치는 영향들을 파악하고자한다.

## 2. 기초이론

### 2.1 경통의 구조

Fig. 1은 집속이온빔장치에서 중요한 역할을 하는 경통의 설계도면으로서 이온빔의 집속을 위한 두개의 정전렌즈인 집속렌즈와 대물렌즈, 발생된 이온빔의 양을 측정하기 위한 패러데이컵(faraday cup), 집속도를 향상시켜 주는 가변어퍼처(variable aperture), 이온빔의 질을 조정해 주는 8극 스티그메이터(octopole stigmator), 이온빔의 위치를 제어해 주는 디플렉터(deflector)로 구성되어 있다.

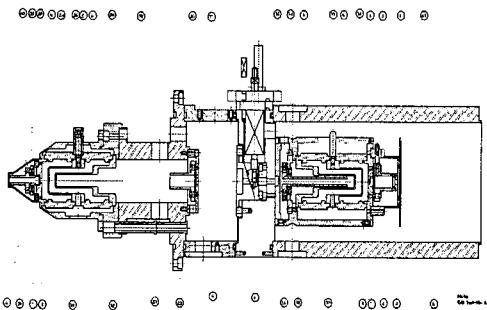


Fig. 1 Schematic diagram of an ion column

이온빔을 집속하기 위한 가장 보편적인 방법은 3극 정전렌즈(Einzel lens)인 집속렌즈와 대물렌즈를 이온원 다음 및 디플렉터 앞의 위치에 설치하여 이온원에서 방출된 이온전류의 손실을 최소화시키면서 이온빔을 집속시킨다. 여기서 입사된 이온빔을 효율적으로 집속시키기 위해서는 3개의 전극이 축대칭이 되어야 한다.

### 2.2 성능평가를 위한 이미지처리 시스템

Fig. 2는 성능평가를 위한 이미지처리 시스템을 보여준다. 시료로부터 방출된 2차입자는 중성원자, 이온, 전자 등이 있다. 이들 중 전자는 검출기 앞단의 그리드에 전압을 인가하면 용이하게 수집될 수 있다. 수집된 전자는 Scintillator에서 광신호로 변환되고 광전자증배기(PMT, Photo - Multiplier Tube)에서 증폭되며, 또한 이들 신호는 전압으로 변환된다. 이 전압의 세기가 디스플레이에서 명암으로 나타나게 된다.

디지털이미지처리는 두 가지 모드에서 실행된다. 첫 번째는 단일신호처리모드(single value mode)로서 컴퓨터에서 발생시킨 경사파로 빔을 주사시키는 방식이고, 두 번째는 DMA모드(Direct Memory Access mode)로서 외부의 경사파 발생기에서 발생된 신호에 동기시켜 전기신호를 이미지신호로 변환시키는 방법이다.

단일신호방식은 컴퓨터에서 디플렉터 전압신호를 한 단계씩 증가시키고 그때마다 이차 전자신호를 하나씩 받아들이면서 이미지를 그리는 방법이다. 그러므로 속도가 느린 반면 정확한 이미지를 얻을 수 있으며, 원하는 위치좌표를 이에 해당하는 전압으로 바꾸어 디플렉터신호를 출력시킬 수 있다.

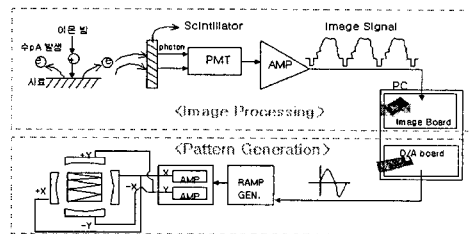


Fig. 2 Schematic diagram of image processing system

DMA모드는 디플렉터신호를 외부 경사과발생기에서 발생시켜 이온빔을 주사하면서 이차입자신호를 계속 받아들이고 한 장의 이미지신호를 모두 받으면 화면상에 표시하는 방법이다.

단일신호처리방식에 비하여 정확하지 않으나 실시간으로 이미지 변화를 관찰할 수 있는 모드로서 대부분의 시스템에서는 이 두 가지 방식이 모두 사용되고 있다.

집속이온빔으로 가공할 때 빔을 제어하는 것은 디플렉터로 보내어지는 전압신호이다. 이 신호를 제어하기 위해서 패턴생성기(pattern generator) 프로그램은 스캔된 이미지를 화면상에 원하는 패턴을 오버랩하여 그린 후 그 좌표를 전압으로 환산하여 디플렉터 신호증폭기를 통하여 증폭한다. 집속된 이온빔은 디플렉터에 가해진 전압 즉, 화면상에 그려진 모양을 따라 움직이며 그 부분의 시료와 반응함으로써 시료가 가공하게 된다.

### 2.3 이온빔축의 얼라인먼트

집속이온빔장치에서 집속성능에 크게 영향을 미치는 요인들은 다음과 같다.

(1) 이온원의 니들(needle) 끝단의 중심위치와 집속렌즈의 전기적 중심축의 불일치

(2) 가변어퍼처 구멍의 진원도 및 기하학적 설치각도 불량

(3) 집속렌즈와 대물렌즈의 전기적 중심축의 불일치 등

이와 같은 요인들을 최소화시키기 위하여 다음과 같은 몇 가지 사항을 고려한다. 첫째, 이온원의 니들 끝단의 중심위치를 기계적으로 조정할 수 있도록 설계하여 이온원과 집속렌즈 중심축을 조정할 수 있도록 한다. 둘째, 가변어퍼처를 통과하는 이온빔의 진원도를 개선하기 위해서는 가변어퍼처의 경사각도를 조정할 수 있도록 설계한다. 셋째, 집속렌즈와 대물렌즈의 중심축은 기계적으로 정렬할 수 없으므로 집속렌즈의 전압을 제어하여 이온빔의 교차점(cross point) 위치를 대물렌즈의 적절한 위치로 제어할 수 있도록 한다.

본 연구에서는 다음과 같은 기계적 및 전기적인 얼라인먼트를 수행한다.

(1) 집속렌즈와 이온원의 중심축을 얼라인한 후 메쉬(mesh)샘플의 이미지 상태 분석

(2) 집속렌즈와 대물렌즈의 중심축을 얼라인한 후 메쉬샘플의 이미지 상태 분석

(3) 가변어퍼처의 설치각도에 따른 메쉬샘플의 이미지 상태 분석

## 3. 실험장치 및 실험방법

이온빔축의 얼라인먼트를 위해 제작된 실험장치는 Fig. 3과 같다. 좌측은 이미지처리시스템이고, 중간은 집속이온빔장치를 제어해 주는 고전압전원장치이며, 우측은 집속이온빔장치의 본체이다. 실험에서 사용된 가변어퍼처는  $\varnothing 30 \mu\text{m}$ 의 크기이다.

이미지처리시스템은 Windows XP 운영체제하에서 이미지의 수집과 처리에 사용되는 프레임 그래픽러로서 MeteorII-Multichannel Board(Matrox사)를 사용하였고 동일 회사의 이미지처리라이브러리인 MIL(Matrox Image Library)를 사용하였다. 패턴형성을 위한 D/A보드는 DT9834(Data Translation사)를 사용하였다.

프레임 그래픽러로 부터 입력되는 이미지는 필드(field) 구분이 없고, 한 프레임에 Odd line과 Even line이 동시에 입력되는 Non-interlaced 방식으로 Interlaced 방식과 마찬가지로 F-porch와 B-porch사이에 수평동기신호가 발생되고, 한 프레임이 끝나면 수직동기신호가 발생된다. 집속이온빔장치에서 만들어지는 픽셀 클럭은 20 MHz에서 19.03 kHz까지 7가지로 되어있다. 이미지 프레임 모양은 Fig. 4와 같고, 카메라와 보드의 연결은 Fig. 5와 같다.

Matrox보드는 이미지신호의 타이밍과 스캔방식 등의 값을 DCF(Digitizer Configuration Format) 파일을 이용하여 세팅한다.

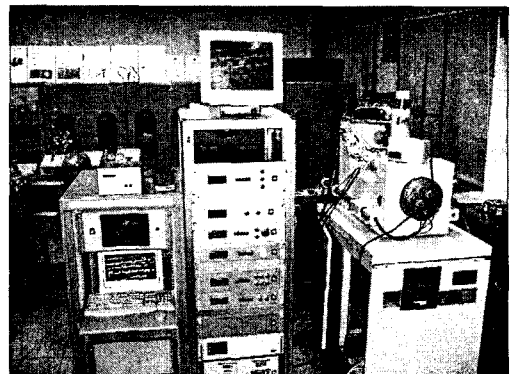


Fig. 3 Experimental apparatus

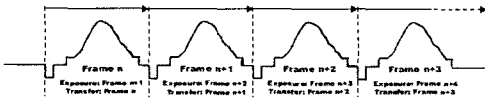


Fig. 4 Image frame signal

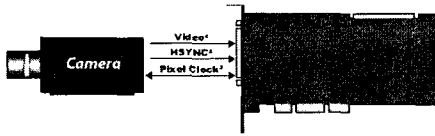


Fig. 5 Schematic diagram of electrical connection between the camera and the image board

Matrox보드에서 허용되는 최대 샘플링타입은 30 MHz이다. 이미지의 크기를 1024\*1024로 하였으며, 시스템의 픽셀 클럭이 20 MHz이면 Non-interlaced 이미지 신호의 수평주파수와 수직주파수를 계산하여 1 Line과 1 Pixel당 점유시간을 다음과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} \text{수평주파수} &= 20 \text{ MHz}/1024 \text{ pixels} = 19.53 \text{ kHz} \\ \text{수직주파수} &= 19.53 \text{ kHz}/1024 \text{ lines} = 19.07 \text{ Hz} \\ \text{Line duration} &= 1/19.53 = 51.20 \mu\text{s} \\ \text{Pixel duration} &= 0.05 \mu\text{s} \end{aligned}$$

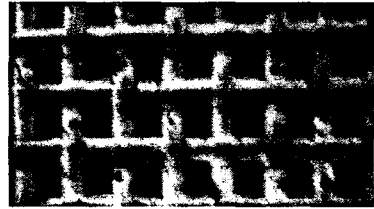
#### 4. 실험결과

##### 4.1 이온원 위치조정

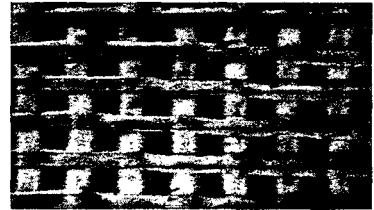
이온원의 위치가 미세하게 조정될 수 있도록 세 지점의 위치에 조정나사를 설치하였다. 실험은 메쉬샘플(50 μm) 이미지들의 비교분석을 위하여, 이온원 니들의 위치를 세 지점의 조정나사를 이용하여 가장 좋은 이미지 품질을 얻을 수 있도록 반복적으로 조정하였다. 이때 조정나사의 피치는 1 mm이었으며, 최대이동거리는 2 mm이다.

Fig. 6은 이온원의 위치를 미세조정나사로 조정 한 결과로서 초기 최적으로 정렬했을 때와 그렇지 않을 때의 이미지 품질차이를 알 수 있다. 이러한 이온원의 정렬위치를 좌표상에 표시하면 Fig. 7과 같다.

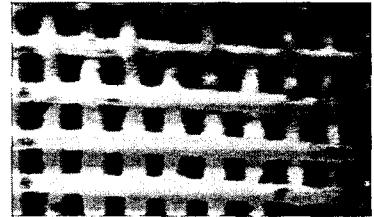
이온원의 중심위치가 최적으로 조정된 A지점으로부터 (651, -376)μm 정도를 벗어나면 Fig. 6(d)와 같이 메쉬 샘플을 알아볼 수 없을 정도의 이미지가 수집된다.



(a) Mesh image of A(0,0) position



(b) Mesh image of B(220,-127) position



(c) Mesh image of C(436,-252) position



(d) Mesh image of D(-651,376) position

Fig. 6 Mesh image by adjusting ion source (unit: micrometer)

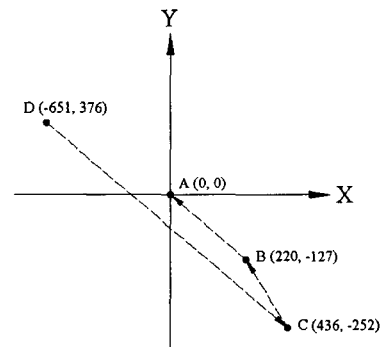
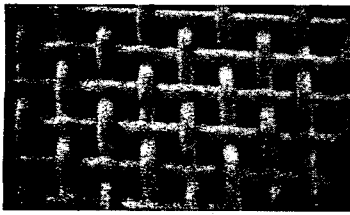
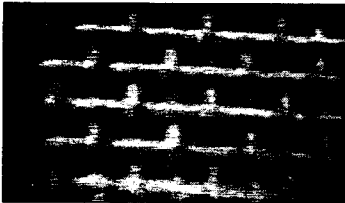


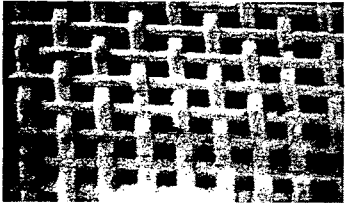
Fig. 7 Position variation of beam center by adjusting ion source(unit: micrometer)



(a) Mesh image of A(0,0) position



(b) Mesh image of B(-500,500) position



(c) Mesh image of C(500,-500) position

Fig. 8 Mesh image by adjusting condenser lens  
(unit: micrometer)

이러한 결과는 이온원 중심축이 경통내의 집속렌즈 등 다른 요소부품들의 중심축과 맞지 않아서 대부분의 이온들이 이동경로로부터 벗어나므로 시료에 조사되는 이온들의 수가 적어진다. 따라서 메쉬샘플을 맞고 튀어나온 전자들의 수가 적어지므로 샘플의 이미지는 어둡게 나타난다.

#### 4.2 집속렌즈의 위치조정

Fig. 9와 같은 집속렌즈의 위치에서 샘플의 이미지를 측정하는 것이 Fig. 8이다. Fig. 8(a)와 같이 집속렌즈의 전압조정결과도 최적으로 조정된 것이 이미지의 품질이 우수함을 볼 수 있다. 이 실험에서는 최적의 지점에서 배율을 축소시켜서 집속렌즈의 위치를 조정하여 보았다. 집속렌즈는 이온이 발생되어 처음으로 집속시켜 주는 부분이므로 미세한 조절에도 영향을 받을 수 있다. 따라서 조정 시 이미지의 스캔폭(scan width)을 넓게 하여 이미지를 수집하였다. 집속렌즈를 조정 후의 이미지를 보면 이온원 조절과는 다른 양상의 이미지가 수집될 수 있음을 알 수 있다.

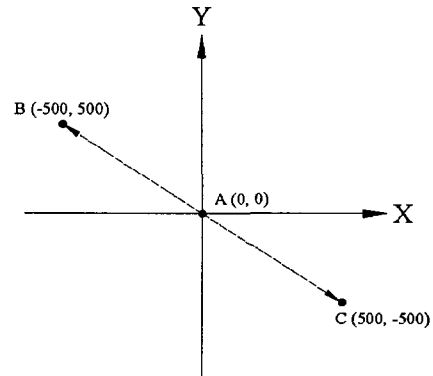


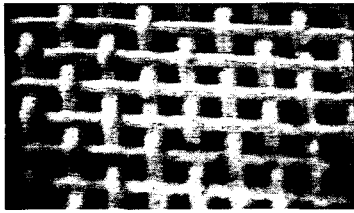
Fig. 9 Position variation of beam center by adjusting condenser lens(unit: micrometer)

이온들이 집속되어야 하는 최적의 위치를 벗어나면 이온들이 시료에 입사되는 각도가 달라지므로 시료와의 이온과의 반응도 달라진다. 이온빔이 시료와 충돌하여 발생하는 2차 전자의 양이 많고 적음은 이미지의 밝기를 나타내는 그레이레벨(gray level)과 관계됨을 알 수 있다.

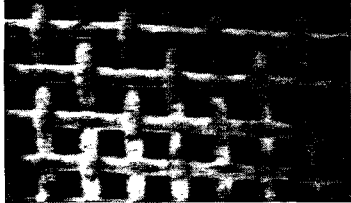
#### 4.3 가변어퍼처의 각도조정

가변어퍼처는 크기가 매우 작기 때문에 이온빔이 최적으로 정렬되어 있지 않으면 이온빔을 시료대까지 수송을 할 수 없거나 수송되는 이온의 양이 적어진다. 또한 이온빔의 중심축과 가변어퍼처 구멍 사이의 각도가 수직으로 설치되어 있지 않으면 통과된 이온빔의 형태가 타원이 된다. 이것은 수차가 증가함을 의미할 뿐만 아니라 이미지도 심하게 왜곡될 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 가변어퍼처의 설치각도 변화에 대한 이미지의 품질을 파악하였다. 이것은 향후 가변어퍼처 및 기타 어퍼처들의 조립정밀도와 진원도(circularity) 공차(tolerance)범위를 정의할 수 있는 중요한 정보가 된다.

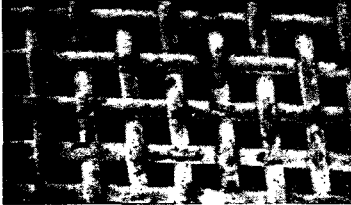
Fig. 10은 가변어퍼처의 하우징을 0°, 2°, 9°, -3°로 회전시키면서 메쉬샘플의 이미지를 수집한 결과들이다. Fig. 10(a)는 가변어퍼처를 초기에 설치된 상태에서의 이미지로서 메쉬들의 이미지가 깨끗하지 않음을 알 수 있다. 정량적인 각도나 위치를 사용하지 않고 상대적인 양을 정의하여 실험한 것은 이온빔축의 입사각도(incident angle)를 이론적으로 측정하거나 정의할 수 없었기 때문이었다.



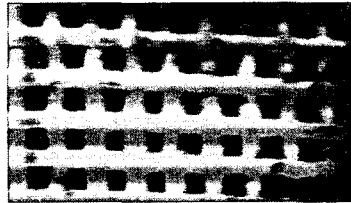
(a) Mesh image of initial position



(b) Mesh image of 2° rotation(clockwise)



(c) Mesh image of 9° rotation(clockwise)

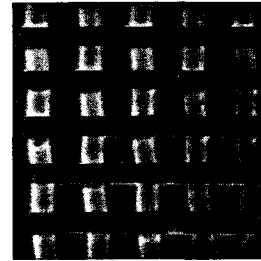


(d) Mesh image of -3° rotation(counterclockwise)

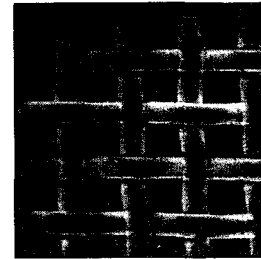
**Fig. 10** Mesh image by adjusting of angle between variable aperture and ion beam center

실험결과들에서 알 수 있드시 Fig. 10(c)의 경우가 가장 우수한 이미지임을 알 수 있다. 이것은 현재 설치된 각도로부터 9° 위치에 빔축이 지나가며, 이온들의 평면적 분포가 정확한 원에 가까움을 의미한다. 이 실험에서 어퍼쳐 구멍의 직원도는 0°일 경우가 193 nm이며, 2°일 경우가 24 nm, -3°일 경우가 11 nm, 9°일 경우가 0 nm이다.

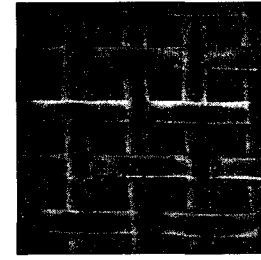
한편, 이미지들을 비교한 결과 설치각도에 따라 샘플 이미지의 Y축 방향의 길이가 감소되는 것을 볼 수 있었다. 이것은 설치각도에 따라 스캔되는 영역이 변화됨을 의미한다.



(a) Condenser lens: 5.0 kV



(b) Condenser lens: 5.6 kV



(c) Condenser lens: 6.0 kV

**Fig. 11** Mesh image by adjusting condenser lens voltage(Objective lens: 4.9 kV)

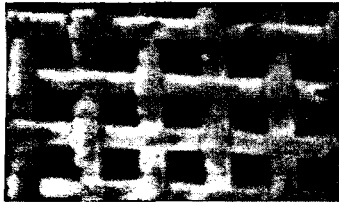
#### 4.4 집속렌즈의 전압조정

Fig. 11은 집속렌즈의 전압변화에 따라 이미지를 관찰한 것이다. 이 실험은 집속렌즈의 전압을 조정하여 이온들의 교차점을 대물렌즈의 적절한 지점으로 조정함을 의미한다.

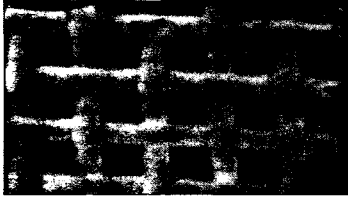
Fig. 11과 같이 집속렌즈에서의 이온들의 교차점 위치에 따라 2차 전자의 발생량과 관련된 이미지의 명암상태를 보여준다.

#### 4.5 대물렌즈의 전압조정

Fig. 12는 대물렌즈의 전압변화에 따른 이미지의 품질을 관찰한 것으로, 매쉬샘플의 이미지 품질이 달라지는 것을 볼 수 있다. 이것은 대물렌즈를 통과한 이온들의 교차점이 이온빔축 상의 특정위치에 따라 이미지 품질에 영향을 준다는 것을 의미한다.



(a) Objective lens: 4.7 kV



(b) Objective lens: 4.9 kV



(c) Objective lens: 5.3 kV

Fig. 12 Mesh image by adjusting objective lens voltage(Condenser lens: 5.6 kV)

따라서 집속렌즈와 동일하게 대물렌즈의 전압 변화에 따라 이미지 품질을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

이상의 연구결과와 같이 경통내의 주요부품들을 기계적으로 또는 전기적으로 조정하여 이온빔축을 적절한 이동경로로 보내줌으로서 이미지 품질을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 이러한 연구는 고배율 초미세가공을 가능하게 할 수 있는 집속이온빔장치의 개발에 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

경통내의 요소부품들의 조립오차들에 의한 이미지 품질을 개선하기 위하여 각종 영향 파라미터들을 조정하여 이온빔축을 얼라인한 결과, 다

음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

기계적으로 이온원과 집속렌즈의 중심축을 최적으로 조정한 결과 선명한 샘플 이미지를 수집할 수 있었다. 특히, 본 논문의 경우, 가변어퍼처의 회전각도를 9도(진원도 0 nm)로 조정하고, 집속렌즈와 대물렌즈의 가속전압을 각각 5.6 kV, 4.9 kV로 인가할 때 깨끗한 영상을 얻을 수 있었다.

따라서 이온빔축이 경통의 기하학적인 중심축 선상에 있도록 이온원과 집속렌즈를 위치시키고, 이온빔축에 수직으로 설치된 가변어퍼처의 진원도가 최적으로 얼라인된 후, 집속렌즈와 대물렌즈의 인가전압을 최적으로 인가하면 샘플 이미지의 품질을 향상시킬 수 있다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) Orloff J., Utlaut M. and Swanson L., 2003, High Resolution Focused Ion Beams: FIB and its Applications, *Kluwer Academic/Plenum Publisher*, pp. 5~11.
- (2) Prewett P. D. and Mair G. L. R., 1991, Focused Ion Beam from Liquid Metal Ion Sources, *Research studies press Ltd.*, pp. 151~175.
- (3) Matsui S., Kaito T., Fujita J., Komuro M., Kanda K. and Haruyama Y., 2000, “Three-dimensional Nanostructure Fabrication by Focused-ion-beam Chemical Vapor Deposition,” *J. Vac. Sci. Technol.(B)*, Vol. 18, No. 6, pp. 3181~3184.
- (4) Morita T., Arimoto H., Miyauchi E., and Hashimoto H., 1987, “Alignment Accuracy of Focused Ion Beam Implantation,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 26, No. 6, pp. 955~958.