

## 저전압 초소형 전자 칼럼에서 이중 편향기의 효과

장원권<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한서대학교 전자컴퓨터통신학부

### Double-deflector effects on a low voltage microcolumn

Won Kweon Jang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Electron, Computer and Communication Engineering, Hanseo University

**요약** 초소형 전자 칼럼에서 이중 편향기는 칼럼의 왜곡 수차의 최소화 및 FOV(field of view)의 극대화 효과를 위하여 사용하고 있다. 이러한 효과를 관찰하기 위하여 이중 편향기에 서로 반대로 전압을 인가한 상태에서 FOV와 주사 폭의 변화에 대한 실험을 진행하였으며, 최대 FOV와 주사 폭에 대한 적정 조건을 얻기 위한 각 편향기의 인가 전압과 전자 방출 팁 전압의 관계를 조사하였다. 또한 전자 방출 팁 전압에 의한 줌 기능의 선형성과 줌 한계를 측정하여 분석하였다.

**Abstract** In a double deflector employed microcolumn, the variation of FOV and scan field width was investigated in mode of conversely biased double deflector to eliminate barrel distortion caused by aberration. The relationship between biased voltage of each deflector and electron emission tip voltage was studied for the maximum FOV and scan field width. The limitation and the linearity of zooming current image are also estimated as a function of electron emission tip voltage.

**Key Words** : Double deflector, Microcolumn, FOV, Scan field width

### 1. 서론

광자에 비해 매우 짧은 파장을 발생시키는 전자빔 기술은 반도체 산업에서 전자빔 리소그래피를 비롯한 전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope) 등의 다양한 영역에서 그 효용성이 매우 크다. 10여 년 전 IBM에서 최초로 개발된 초소형 전자빔 칼럼(microcolumn)은 기존의 전자칼럼에 비해 매우 작고, 비교적 낮은 전압에서 구동할 수 있으며, 시스템 구성에 비용이 적게 드는 장점을 가지고 있다 [1-5]. 초소형 전자칼럼의 길이는 기존의 전자칼럼(30 cm ~ 1m)에 비해 10 mm 이하로 매우 짧아서 유효전자빔 효율이 매우 높다. 한 개의 초소형 전자칼럼으로 주사할 수 있는 면적은 그리 넓지 않으나 여러 개의 초소형 전자칼럼으로 구성된 멀티 전자빔 시스템을 구성할 경우 주사 면적에 거의 제한이 없다. 1kV이하의 낮은 전압에서 동작이 가능하여 시료 표면의 손상을 최소화 할 수 있으며, 시스템의 부피가 획기적으로 감

소하며 촘촘한 간격으로 초소형 전자칼럼을 배열하게 되므로 사각지대 없이 양질의 생산성과 함께 단위 시간당 작업량도 기존의 전자칼럼에 비해 증가한다.

초소형 전자칼럼은 전자방출원을 구성하는 전자방출 팁(tip)과 소스렌즈(source lens), 두 개의 편향기(double deflector)와 전자빔을 대상물에 집속하는 대물렌즈의 역할을 하는 아인젤 렌즈(Einzel lens) 등으로 구성된다. 전자방출 팁으로부터 방출되는 전자빔은 3겹으로 구성된 소스렌즈에서 집속된 후 마지막 소스렌즈에 의해 전자빔의 폭이 결정된다. 두 개의 편향기는 전자빔을 대상물에 주사하기 위해 8개의 전극으로 구성되며, 주사 폭을 넓힐 경우 발생하는 수차를 제거하기 위해 서로 다른 방향으로 전압이 인가된다. 마지막으로 아인젤 렌즈는 대상물로부터의 전류영상을 선명하게 하기 위해 전자빔을 대상물에 초점 맞추는 기능을 한다. 대개 텅스텐 팁이 전자방출원으로 이용되며, 소스렌즈와 아인젤 렌즈는 각각 3장의 실리콘 막(membrane)과 절연체인 파이렉스를 교대

\*교신저자 : 장원권(jwk@hanseo.ac.kr)

접수일 09년 09월 14일

수정일 09년 10월 05일

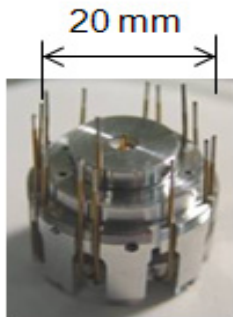
게재확정일 09년 10월 14일

로 적층으로 구성된 것으로 광학적으로 정밀하게 조립되었다. 렌즈를 구성하는 실리콘 막의 두께는  $2\mu\text{m}$  정도이며, 중앙에는 수 ~ 수백  $\mu\text{m}$ 의 원형 개구가 있어 전자빔을 제어하게 되어있다 [6,7].

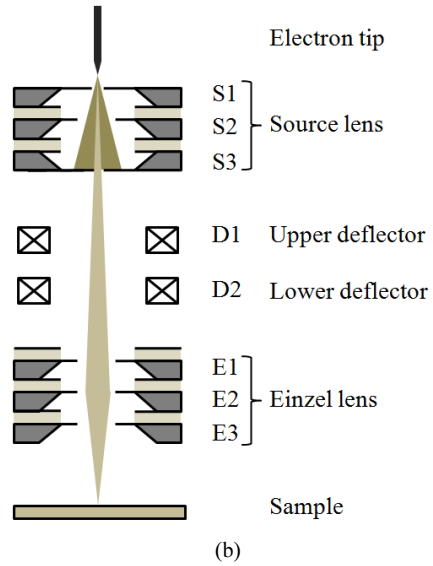
본 연구에서는 두 개의 편향기를 사용하여 전자빔을 주사할 때 왜곡 없이 최상의 선명도(visibility)와 FOV(field of view)를 가지는 적정 조건을 찾기 위한 것으로 이론적인 예측에 대해 실험적으로 주사조건을 조사하였다. 아인젤 렌즈를 제거하면 보다 큰 주사 폭(scan width)을 가질 수 있으나 대상물에 전자빔을 마지막으로 집속하는 과정을 생략하는 것이므로 아인젤 렌즈를 사용할 경우보다 선명도(visibility)가 높은 전류영상을 얻을 수 없으며, 작업거리(working distance)를 크게 할 경우 통 왜곡(barrel distortion)에 의한 찌그러짐이 두드러진다 [8]. 그러므로 본 연구에서는 두 개의 편향기를 사용하고 서로 엇갈리는 전압을 인가하여 왜곡을 제거하고 아인젤 렌즈를 사용하여 선명도를 높일 경우 최적의 동작 조건을 조사하였다.

## 2. 이중 편향기에 의한 주사 폭 계산과 FOV

그림 1은 초소형 전자빔의 구조를 나타낸 것이다. 전자 방출 팁으로부터의 전자 빔을 집속하는 S1, S2와 전자 빔의 폭을 제한하는 S3로 구성된 전자 방출부에 이어 위 편향기와 아래 편향기는 대상물에 전자 빔을 주사하기 위해 전자 빔을 편향시키는 역할을 한다. 대상물에 전자 빔이 도달할 때 아인젤 렌즈는 전자 빔의 초점을 맞춘다. 아인젤 렌즈로부터 대상물까지의 작업거리(working distance)와 전자 방출 팁에 인가되는 전압에 따라 전자빔을 대상물에 집속하는 E2의 전압은 변한다.



(a)



(b)

[그림 1] 초소형 전자칼럼의 (a)외관 및 (b)구조

그림 2는 이중 편향기에 의한 주사 폭을 나타낸 것이다. 극성을 가진 전자빔은 편향기에 인가되는 전압에 따라 전기력을 받아 휘게 되는데 두 개의 편향기의 전극 사이 간격이  $d$ 로 같고, 각각의 폭을  $L_1, L_3$ 라 하며, 두 편향기 사이의 폭을  $L_2$ , 두 번째 편향기를 지난 후 시료까지  $D$ 의 거리를 축 방향으로 진행한다. 전자 팁에서 방출되는 전자의 운동에너지는  $eV_{tip}$ 와 같으므로

위 편향기로 진입하는 전자의 속력은

$$v = \sqrt{\frac{2eV_{tip}}{m}} \quad (1)$$

가 되며,  $V_{tip}$ 는 팁에 인가한 전압,  $m$ 은 전자의 질량,  $e$ 는 전자의 전하량이다.

위 편향기의 폭  $L_1$ 을 통과하는 시간은

$$L_1 = vt_1 \text{으로부터}$$

$$t_1 = \frac{L_1}{\sqrt{\frac{2eV_{tip}}{m}}} \quad (2)$$

가 된다. (2)식에 주어진 시간 동안 전자 빔은 편향기에 인가된 전압에 의해 전기력을 받아 진행 방향의 수직으로 가속도 운동을 하여 편향된다. 위 편향기와 아래 편향기의 전기력에 의해 편향되는 정도를 각각  $y_1, y_3$ 이라 하면

$$y_1 = \frac{1}{2} \frac{eV_{up}}{md} \left( \frac{L_1}{\sqrt{\frac{2eV_{tip}}{m}}} \right)^2 \quad (3)$$

가 되며, 위 편향기를 통과한 후

$$y_2 = \frac{e V_{up}}{md} \frac{L_1 L_2}{\frac{2e V_{tip}}{m}} \quad (4)$$

를 진행하고 다시 아래 편향기를 지나며

$$y_3 = \frac{e V_{up}}{md} \frac{L_1 L_3}{\frac{2e V_{tip}}{m}} + \frac{1}{2} \frac{e V_{low}}{md} \left( \frac{L_3}{\sqrt{\frac{2e V_{tip}}{m}}} \right)^2 \quad (5)$$

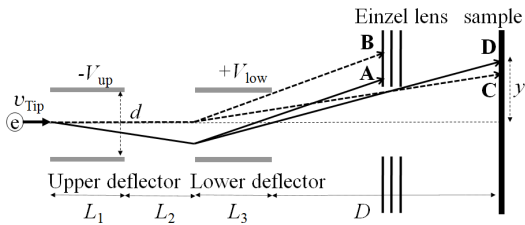
만큼 편향되어

$$y_4 = \left( \frac{e V_{up}}{md} \frac{L_1}{\sqrt{\frac{2e V_{tip}}{m}}} + \frac{e V_{low}}{md} \frac{L_3}{\sqrt{\frac{2e V_{tip}}{m}}} \right) \frac{D}{\sqrt{\frac{2e V_{tip}}{m}}} \quad (6)$$

를 더 진행한 후 대상물에 도달한다. 위의 편향거리를 모두 더하면 전자 빔의 진행 방향 축의 중심으로부터 휘어지는 정도  $y$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$y = \frac{1}{2dV_{tip}} \left[ V_{up} L_1 \left( \frac{L_1}{2} + L_2 + L_3 + D \right) + V_{low} L_3 \left( \frac{L_3}{2} + D \right) \right] \quad (7)$$

$V_{up}$  과  $V_{low}$  는 각각 위 편향기와 아래 편향기에 인가되는 전압이다.



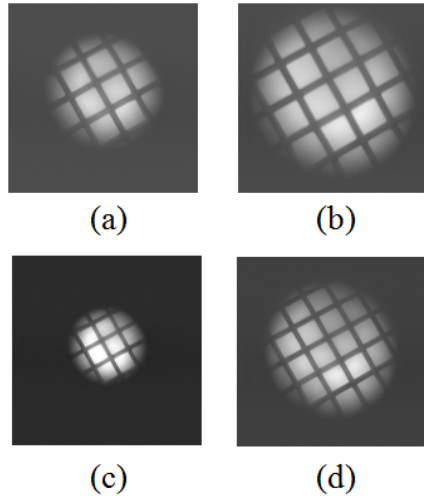
[그림 2] 편향기에 의한 주사 폭

아인젤 렌즈가 없는 경우 주사 폭  $y$ 를 크게 하기 위해서는  $V_{up}$  과  $V_{low}$  의 부호를 같게 하면 되지만, 아인젤 렌즈가 있는 경우에는 렌즈 개구를 통과한 전자빔의 FOV를 최대로 하기 위하여 두 개의 편향기에 인가되는 전압의 부호를 서로 반대로 인가하여야 한다. 또한 구면수차에 의한 왜곡도 동일전압을 두 편향기에 인가한 것보다 왜곡상쇄에 의한 보상이 이루어진다.

아래 편향기만 사용할 경우 전자 빔의 경로를 B와 C로, 두 개의 편향기를 모두 사용할 경우 전자 빔의 경로를 A, D로 나타내었다. 아래 편향기만 사용할 경우 최대 주사 폭은 B와 같으나 아인젤 렌즈에 의해 전자 빔이 차단되므로 대상물로 도달하는 전자빔은 C와 같은 경로를

따라가게 된다. 그러나 두 개의 편향기를 모두 사용하고 편향기에 인가되는 전압의 방향을 서로 엇갈리게 할 경우 주사 폭은 A와 같이 다소 감소할 수 있으나 오히려 대상물에 도달하는 전자 빔의 위치는 D와 같이 되어 FOV는 증가하는 효과가 있다. 그림에서 알 수 있듯이 두 개의 편향기를 사용할 경우 주사 폭에 있어서 이론상 A의 위치를 B보다 더 크게 할 수 있으나 그럴 경우 아래 편향기의 전압을 크게 하며 수차에 의한 왜곡이 심화되는 경향이 있다.

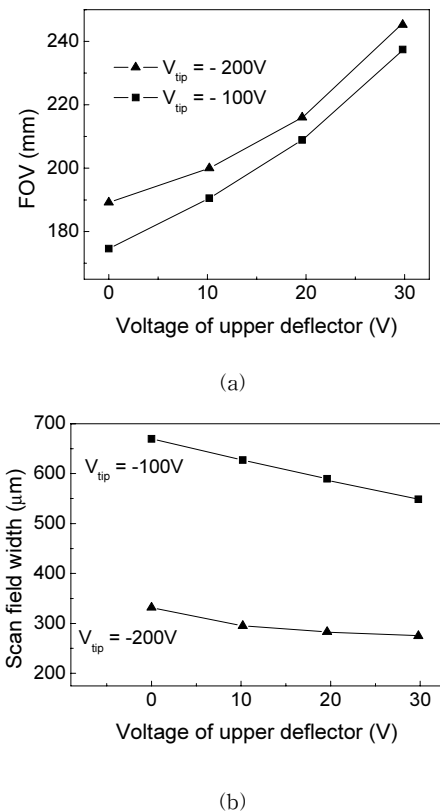
### 3. 편향기의 전압 변화에 따른 FOV 및 주사 폭 측정



[그림 3] 전자방출 팁 전압은 -200V일 때 위 편향기의 전압 변화에 따른 FOV 및 주사 폭의 변화. (a), (b)는 아래 편향기의 전압이 ±100V이고 위 편향기의 인가전압이 각각 0V, ±30V 일 때이며, (c), (d)는 아래 편향기의 전압이 ±150V이고 위 편향기의 전압이 각각 0V, ±50V일 때.

그림 3은 전자 방출 팁의 전압이 -200V일 때 위 편향기의 전압을 변화시켜가며 격자 간격이 50 $\mu$ m인 대상물의 전류영상을 측정한 것으로 (a)와 (b)는 아래 편향기의 전압을 ±100V로 하였을 때의 전류 영상이며, (c)와 (d)는 아래 편향기의 전압을 ±150V로 하였을 때의 전류영상이다. (a)와 (c)는 위 편향기의 전압이 0V일 때이고 (b)는 위 편향기의 전압이 ±30V, (d)는 위 편향기의 전압이 ±50V일 때의 전류 영상으로 위 편향기의 전압이 아래 편향기의 전압에 대해 1/3정도의 비를 가질 측정된 결과이다. 아래 편향기의 전압을 ±100V로 하였을 때 (a) 위 편

향기의 전압이 0V일 때는 주사폭이 330 $\mu\text{m}$ 이고 FOV가 190 $\mu\text{m}$ 이었으나 같은 조건에서 위 편향기의 전압을  $\pm 30\text{V}$ 로 하였을 때 주사폭은 275 $\mu\text{m}$ 로 감소하였고, FOV는 240 $\mu\text{m}$ 로 증가하였다. 이것은 식(7)에 나타난 것과 같이 위 편향기의 전압을 아래 편향기와 반대로 주기 때문에 주사 폭  $y$ 는 감소하나 그림 2에 나타난 바와 같이 경로 C에 비해 경로 D의 FOV가 크게 나타나기 때문이다. 그림 3(c)와 (d)는 아래 편향기의 전압을  $\pm 150\text{V}$ 로 고정하고 위 편향기의 전압을 각각 0V와  $\pm 50\text{V}$ 로 하였을 경우의 전류영상으로 위 편향기의 전압과 아래 편향기의 전압의 비가 비슷한 상황에서의 비교를 통해 주사 폭은 그림 3(c)가 (a)보다 FOV는 (d)가 (b)보다 증가한 것을 알 수 있다.

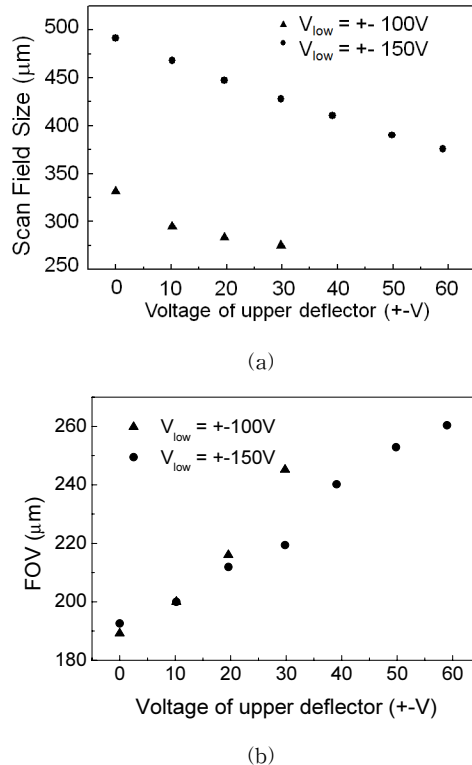


[그림 4] 아래 편향기의 전압을  $\pm 100\text{V}$ 로 고정하고 위 편향기 전압의 변화시킬 때 전자방출 팁의 전압이 -100~300V일 경우 (a) FOV의 변화와 (b) 주사 폭의 변화.

그림 4(a)는 전자 방출 팁의 전압이 -100~300V로 증가시켜가며 아래 편향기의 전압을  $\pm 100\text{V}$ 로 고정하고 위 편향기의 전압을 변화시켜가며 FOV와 주사 폭을 측정하

는 것이다. 식(7)에 나타난 바와 같이 전자방출 팁의 전압  $V_{tip}$ 가 증가함에 따라 주사 폭은 감소하므로 FOV는 증가하였다.

그림 4(b)는 같은 조건에서 주사 폭을 측정하는 것으로 전자방출 팁 전압의 증가에 따라 전체적으로 주사 폭이 감소하고, 위 편향기에 인가하는 전압에 따라 주사 폭이 감소하였다.



[그림 5] 전자 방출 팁의 전압이 200V이고 아래 편향기의 전압이  $\pm 100\text{V}$ 일 때와  $\pm 150\text{V}$ 일 때, 위 편향기의 전압 변화에 따른 (a) FOV 및 (b) 주사 폭의 변화.

그림 5는 전자 방출 팁의 전압이 -200V일 때 아래 편향기의 전압을  $\pm 100\text{V}$ 로 하였을 경우와  $\pm 150\text{V}$ 로 하였을 경우 (a) FOV와 (b) 주사 폭의 변화를 측정하는 것이다. 그림 5(a)에 나타난 주사 폭은 식 (7)에 나타난 바와 같이 위 편향기와 아래 편향기의 전압을 반대로 인가할 경우 주사 폭은 전압의 절대 값이 큰 아래 편향기의 전압에 의존한다. 위 편향기의 전압을 아래 편향기와 반대로 증가시킬 경우 주사 폭은 감소하였다. 아래 편향기의 전압을  $\pm 100\text{V}$ 로 하였을 경우에 비해  $\pm 150\text{V}$ 로 하였을 때 주사 폭은 모두 크게 나타났다.

반면에 그림 5(b)에서 FOV는 아래 편향기의 전압에 상관없이 모두 위 편향기의 전압을 증가시킴에 따라 증가하였는데 이것은 그림 2에 나타난 바와 같이 C의 경로를 따르는 것보다 D의 경로를 따르는 것이 더 큰 FOV를 갖기 때문이다. 그러나 위 편향기의 전압에 따라 FOV가 증가하는 경향은 아래 편향기의 전압이  $\pm 100$ 일 때가  $\pm 150$ V일 때에 비해 더 가파르게 증가하였는데 이것은 아래 편향기의 전압에 대한 위 편향기의 전압의 변화가 더 크게 영향을 미치기 때문이다.

아래 편향기의 전압이  $\pm 100$ V일 경우 위 편향기의 전압이  $\mp 30$ V이상일 경우는 아인젤 렌즈에 의한 전자빔의 초점이 잘 안 맞았으나 아래 편향기의 전압이  $\pm 150$ V일 때는 위 편향기의 전압이  $\mp 60.0$ V까지 아인젤 렌즈에 의해 초점이 가능하였다.

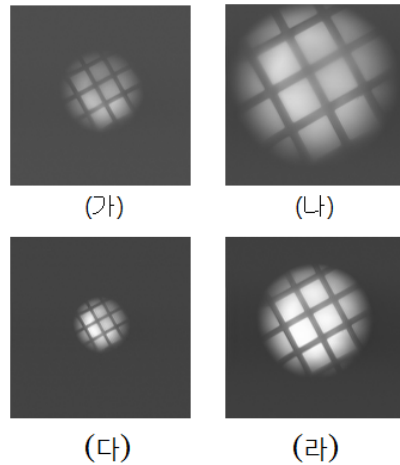
즉, 가능한 FOV의 확보는 위 편향기와 아래 편향기의 전압의 절대값 비에 의해 결정되었는데 모두 아래 편향기의 전압에 비해 위 편향기의 전압이 30.0% 까지 초점 조절에 의한 영상확대율이 가능하였다.

#### 4. 전자 방출 팁 전압에 따른 영상 확대율

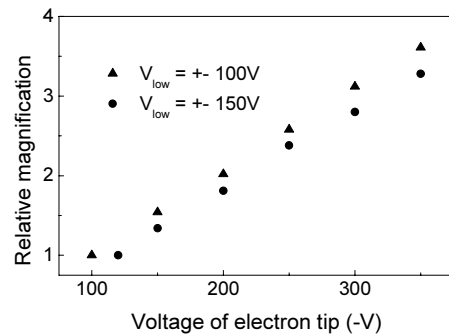
그림 6(a)는 아래 편향기의 전압을  $\pm 100$ V로 고정하고 위 편향기의 전압을 0으로 하여 사용하고 있지 않을 때 전자 방출 팁의 전압이 (가) -150V일 경우와 (나) -300V일 경우의 전류영상이고, 아래 편향기의 전압을  $\pm 150$ V로 고정하고 위 편향기의 전압을 0으로 사용하지 않을 때 전자 방출 팁의 전압이 (다) -150V일 경우와 (라) -300V일 때의 전류영상이다.

FOV는 모두 같게 나타났으나 전체적으로 영상이 확대된 것을 알 수 있다. 식(7)에 나타난 바와 같이  $V_{tip}$ 가 증가함에 따라 주사 폭  $y$ 는 감소하나 FOV는 위와 아래 편향기의 전압에 상관없이 그림 2에서의 C 경로를 따라가기 때문이다. 이것은 마치 현미경에서 대상물의 영상이 확대되는 것과 같은 효과를 가지므로 그림 6(b)에서 아래 편향기의 전압이  $\pm 100$ V일 때와  $\pm 150$ V일 경우의 영상 확대율을 나타내었다. 아래 편향기의 전압이  $\pm 100$ V일 경우는 전자방출 팁의 전압이 -100V일 때의 영상 크기를 기준으로 계산하였으며, 아래 편향기의 전압이  $\pm 150$ V일 경우는 전자 방출 팁의 전압이 -120V일 때의 영상 크기를 기준으로 계산하였다. 모두 전자 방출 팁의 전압에 비례하여 영상의 크기가 확대되는 것을 알 수 있다. 즉, 전자 방출 팁 전압을 조정하여 줌 기능이 있는 SEM의 성능

을 가지는 것이다.



(a)



(b)

[그림 6] 위 편향기의 전압이 0V일 때 전자방출 팁 전압의 변화에 따른 (a) 전류영상과 (b) 영상 확대율 변화. (a)에서 (가), (나)는 아래 편향기의 전압이  $\pm 100$ V 이고 전자방출 팁 전압이 (가) -150V, (나) -300일 때이고, (다), (라)는 아래 편향기의 전압이  $\pm 150$ V이고 전자 방출 팁 전압이 (다) -150V, (라) -300V일 때.

#### 5. 결론

주사 폭을 단순히 넓히는 것만 아니라 수차를 개선한 양질의 영상을 획득하고 FOV를 확대하는 것은 초소형 전자칼럼이 기존의 전자 칼럼을 대신하는데 있어서 매우 중요하다. 본 연구에서는 이중 편향기를 사용하여 통 왜곡이 서로 상쇄되어 개선되는 효과를 이용하여 선명도가 높은 전류영상을 얻었으며, 이를 이론적인 검증과 검토를 통해 측정된 실험결과와 비교하였다. 초소형 전자 칼럼의

생산수율을 증대시키고 산업적 응용도를 증가시키는데 중요한 실험적 결과를 제시한 것으로 판단되며, 다양한 실물에 대한 적용에 유용할 것으로 기대된다.

이 논문은 전자빔기술센터(주)의 UV-SEM 장비를 이용하여 실험결과를 얻은 결과입니다. 장비를 사용할 수 있도록 도움을 준 전자빔기술센터(주)에 감사드립니다.

### 참고문헌

[1] E. Kraschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Roshton, M. L. Yu and T. H. P. Chang, "Sub-40nm resolution 1keV scanning tunneling microscope field-emission Microcolumn" *J. Vac. Sci. Technol.* B12(6), pp3413-3417, 1994.

[2] E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu, and T. H. P. Chang, "An electron-beam microcolumn with improved resolution, beam current, and stability", *J. Vac. Sci. & Technol.* B 13, pp 2498-2503, 1995.

[3] E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu, S. Zolgharnain, B. W. Hussey, and T. H. P. Changet al., "Experimental evaluation of a 20x20 mm footprint microcolumn", *J. Vac. Sci. Technol.* B14, pp 3792-3796, 1996.

[4] 안승준, 안성준, 김호섭 "Monte Carlo 수치해석법을 이용한 PMMA resist에서의 저 에너지 전자빔투과 깊이에 관한 연구" 한국산학기술학회논문지, 8, pp 734-747, 2007.

[5] 김영철, 안성준, 김호섭, 김대욱, 안승준, "초소형 자유 전자 모듈에 대한 특성 연구", 한국산학기술학회지, 9, pp 1607-1613, 2008.

[6] 박종선, 장원권, 김호섭, "마이크로 전자렌즈의 광학적 정렬과 조립", 한국광학회지, 17, pp 216-220, 2006.

[7] 박성순, 김호섭, 장원권, "초소형 전자칼럼의 대면적 주사조건", 전기전자재료학회논문지, 20, pp 481-486, 2007.

[8] 이치무라 노리유키, 김영철, 김호섭, 장원권, "저전압 초소형 전자칼럼의 주사면적 크기 및 전류영상 특성 연구", 한국광학회지, vol. 19, pp 365-369, 2008.

장 원 권(Won Kweon Jang)

[정회원]



- 1994년 8월 : 인하대학교 (이학 박사)
- 1997년 8월 ~ 1998년 8월 : 미국 CREOL/UCF Research Scientist
- 2001년 6월 ~ 2002년 2월 : 일본 분자과학연구소 초빙교수
- 1995년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 전자컴퓨터통신학부 교수

<관심분야>

응용광학, 레이저광학, 전자광학