

< 논문 >

## 전계방출 주사전자 현미경의 전자광학계 유한요소해석

박근† · 박만진\* · 김동환\*\* · 장동영\*\*\*

(2006년 4월 26일 접수, 2006년 9월 30일 심사완료)

### Finite Element Analysis for Electron Optical System of a Field Emission SEM

Keun Park, Man-Jin Park, Dong-Hwan Kim and Dong-Young Jang

**Key Words :** Scanning Electron Microscope(주사전자현미경), Field Emission(전계방출), Electromagnetic Lens(전자렌즈), Finite Element Analysis(유한요소해석)

#### Abstract

A scanning electron microscope (SEM) is well known as a measurement and analysis equipment in nano technology, being widely used as a crucial one in measuring objects or analyzing chemical components. It is equipped with an electron optical system that consists of an electron beam source, electromagnetic lenses, and a detector. The present work concerns numerical analysis for the electron optical system so as to facilitate design of each component. Through the numerical analysis, we investigate trajectories of electron beams emitted from a nano-scale field emission tip, and compare the result with that of experimental observations. Effects of various components such as electromagnetic lenses and an aperture are also discussed.

#### 1. 서론

최근 나노기술의 발전 및 신기술 개발로 여러가지 새로운 분석 대상물이 나타나게 되었고, 이러한 대상물은 기존의 분석장비로는 분석이 불가능한 영역까지 확대해 가고 있다. 특히 나노기술 분야에서는 대상물의 분석가능 여부에 따라 연구의 성패가 좌우될 정도로 분석장비에 대한 의존도가 매우 높는데, 이에 따라서 분석장비의 성능을 획기적으로 향상시켜 관련기술을 보유하려는 연구가 세계적으로 활발히 진행중이다.

주사전자 현미경(Scanning Electron Microscope; SEM)은 광학현미경에서 빛의 파장(300~700nm)에 인한 분해능의 한계를 극복하기 위해 전자빔(파장 1nm 이하)을 사용함으로써 분해능을 향상시킨 측정

장비로 생물학, 의학 및 다양한 공학 분야에서 널리 사용되고 있다. 주사전자 현미경의 전자광학계는 크게 전자빔원(electron beam source), 전자기렌즈(electromagnetic lens), 검출기(detector)로 이루어져 있다. 이중 전자빔원은 전자빔을 발생하는 방식에 따라 열전자 방사형(thermionic electron emission)과 전계 방사형(field emission)으로 구분할 수 있는데, 전자현미경의 분해능을 높이기 위해서는 전자빔원의 크기 및 에너지 분산값(energy spread) 등을 가능한 한 줄여야 한다. 열전자 방사형의 경우 필라멘트를 가열해서 발생하는 전자를 빔의 형태로 인출하는 방식으로 현재 전자현미경에서 가장 많이 사용되고 있으나, 인출 전류밀도가 제한되고 발생된 열전자들의 에너지 분산값이 커서 일반적으로 분해능이 3.5nm 가 한계인 것으로 알려져있다. 반면에 전계방사형의 경우 뾰족한 전자방출원 팁에 고전압(1.5~3.0kV)을 인가함으로써 전자빔을 방출하므로 전자빔의 휘도가 높으며 에너지 분산이 작아 분해능이 nm 이하로 낮출 수 있어 최근들어 활발히 연구되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

그러나 전계방사형 전자빔원의 경우 진공상태나 전극간 구조 등에 예민하여 방출되는 전자빔 전류가

† 책임저자, 회원, 서울산업대학교 기계설계-자동화공학부  
E-mail : kpark@snut.ac.kr  
TEL : (02)970-6358 FAX : (02)974-8270

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

\*\* 회원, 서울산업대학교 기계설계-자동화공학부

\*\*\* 회원, 서울산업대학교 산업정보시스템공학과

불안정해질 가능성이 높다. 전자빔을 안정화하고 휘도 및 분해능을 높이기 위해서는 팁의 형상 및 치수, 전자렌즈 및 각종 요소들의 설계 및 배치를 위한 체계적인 분석이 필수적이다.<sup>(3-5)</sup> 본 연구에서는 유한요소법을 사용하여 찬음극 전계방사형 전자빔원의 전자방출특성을 분석하고, 전자기렌즈와 조리개(aperture) 등의 전자광학계 요소들이 방출된 전자빔의 이동경로에 미치는 영향을 분석하도록 하겠다.

## 2. 주사전자현미경의 전자광학계

### 2.1 주사전자현미경의 기본 구조

Fig. 1 에 전계방사형 주사전자현미경의 기본 구조를 도시하였다. 대표적인 요소를 살펴보면 전자광학계를 포함하는 경통부(column unit), 측정용 시료가 장착되는 챔버(chamber), 경통 내의 고진공을 유지하기 위한 진공부, 고전압 공급부 및 제어부로 구성된다. 경통부의 내부 구조를 살펴보면 Fig. 2 에 도시한 바와 같이 전자빔원과 전자 렌즈계, 편향 코일, 조리개 등으로 구성되어 있다.

### 2.2 전계방사형 전자빔원

전계 방사형 전자빔원은 열전자 방사형의 단점인 낮은 휘도 및 큰 빔의 직경을 개선하고자 개발되었다. 전자빔원으로 끝이 매우 날카롭게 가공된 텅스텐 팁(tip)을 머리핀 형태로 구부린 텅스텐 필라멘트에 장착하여 사용한다. 여기서 팁에 걸리는 전계는 곡률반경에 반비례하여 증가하기 때문에 에칭 등의 방법을 사용하여 팁의 끝단을 뾰족하게 가공해주어야 하며, 일반적으로 끝단의 곡률반경이 수십 나노미터 정도의 범위를 가져야 한다. 팁 하단에 2 단계의 양극(anode)을 설치하여 전계를 인가하여준다. Fig. 3 전계방사형 전자빔원의 기본 구조를 도시하였는데, 이때 양극의 형상과 간극 등의 변수가 전계방출 특성에 영향을 미치게 된다.

### 2.3 전자 렌즈

일반 광학계에서와 마찬가지로 전자광학계에서도 원하는 위치에 전자빔의 초점을 맞추기 위해 전자 렌즈를 사용한다. 전자 렌즈는 일반적으로 원통형으로 권선된 코일에 전류를 부과하여 자기장을 형성시킴으로써 전자빔의 방향을 제어해주는 역할을 수행한다. 주사전자현미경의 전자광학계는 일반적으로 집속렌즈(condenser lens)와 대물렌즈(objective lens)로 구성되어 있다.

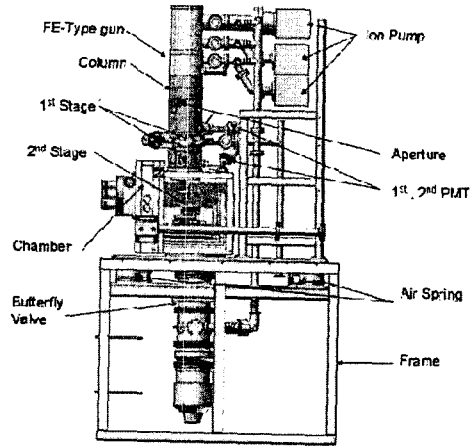


Fig. 1 Overview of a scanning electron microscope

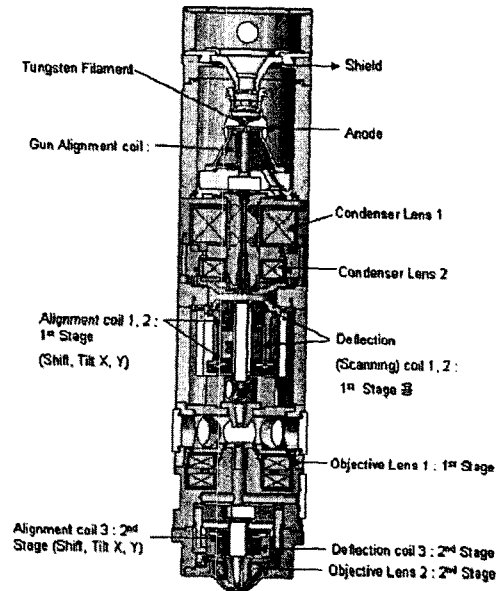


Fig. 2 Sectional view of a column unit

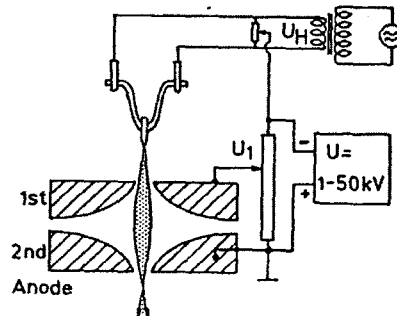


Fig. 3 Schematic view of a field emission source

집속렌즈는 전자총 양극의 하단에 위치하고 있으며, 방사된 전자빔을 집속시켜줌으로써 시료에 도달하는 전자빔의 양과 직경을 조절해주는 역할을 수행한다. 집속렌즈를 통해 조절된 전자의 양은 상의 밝기와 선명도에 영향을 미치게 된다. 대물렌즈는 측정하고자 하는 시료의 상단에 위치하고 있으며, 입사된 전자빔을 적절히 굴절시켜 상의 초점을 맞추어주는 역할을 한다. 따라서 대물렌즈의 성능이 주사전자현미경의 분해능을 결정하는 중요한 요인으로서 작용한다.<sup>(6,7)</sup>

$$J_0 = 6.2 \times 10^2 \left( \frac{E_f}{\phi_w} \right)^{1/2} \frac{E^2}{E_f + \phi_w} e^{-\frac{6.83 \times 10^7 \phi_w^{3/2}}{E}} \quad (7)$$

여기서  $J_0$ 는 팁 표면에서 방출되는 전류 밀도,  $A$ 는 팁 표면의 방출 계수,  $\phi_w$ 는 재료의 일함수,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $E_f$ 는 전자의 페르미 에너지 수준을 의미한다. 위 식에 전자의 손실로 인한 장벽 전압 (Barrier voltage)의 변화를 고려하면 다음과 같이 표현된다.

$$J_0 = A \left( \frac{hqE}{4\pi k} \right)^2 \frac{1}{2qm_0\phi_w} e^{-\frac{4\pi b(2qm_0)^{1/2}\phi_w^{3/2}}{Eh}} \quad (8)$$

### 3. 전자광학계 해석을 위한 이론적 배경

#### 3.1 전자기장 해석(Electromagnetic field analysis)

주사전자현미경 전자광학계의 전자기장 분포에 관한 지배방정식은 Maxwell 방정식을 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{E}$ 는 전기장의 세기(Electric field intensity),  $\mathbf{H}$ 는 자기장의 세기(Magnetic field intensity),  $\mathbf{D}$ 는 전속 밀도(Electric flux density),  $\rho$ 는 전하 밀도(Charge density),  $\mathbf{B}$ 는 자속 밀도(Magnetic flux density),  $\mathbf{J}$ 는 전류 밀도(Current density)이다. 전기장의 세기와 전속 밀도, 자기장의 세기와 자속 밀도와의 관계는 각각 유전율  $\epsilon$ 와 투자율  $\mu$ 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

#### 3.2 입자 방출 해석(Particle emission analysis)

공간전하 해석을 위해서는 전자총 팁(Tip)에서의 입자 방출 현상을 적절하게 묘사해주어야 한다. 전계방출의 경우 Fowler Nordheim의 모델을 사용하여 다음과 같이 묘사할 수 있다.

여기서  $h$ 는 플랑크 상수이며,  $b$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$b = \frac{2 \left[ 1 - \left( \frac{(qE)^{1/2}}{(4\pi\epsilon_0)^{1/2}\phi_w} \right)^{1.69} \right]}{3 \left[ 1 + 0.1107 \left( \frac{(qE)^{1/2}}{(4\pi\epsilon_0)^{1/2}\phi_w} \right)^{1.33} \right]} \quad (9)$$

방출된 전자가 속도  $v$ 로 이동할 때 전자의 전류 밀도는 Maxwell의 분포를 가정하여 다음과 같이 계산된다.

$$J = \sqrt{\frac{2m}{\pi kT}} \left( e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \right) J_0 \quad (10)$$

#### 3.3 공간전하 해석(Space charge analysis)

주사전자 현미경의 전자광학계에서는 전자총에서 방출된 대전입자(charged particle)가 상호간의 전하분포와 광학계 내부의 전자기장에 의해 이동하게 된다. 2장에서 소개한 전자렌즈, 편향코일 등의 요소는 대전입자의 궤적을 적절히 조절하여 원하는 위치에 초점을 맺도록 제어해주는 역할을 수행한다. 따라서 주사전자현미경 전자광학계의 특성을 분석하기 위해서는 대전입자의 이동경로를 예측해주어야 한다. 대전된 입자가 외부의 전자기장 하에서 받게 되는 Lorentz 힘은 식 (11)과 같이 표현되며, 결과적으로 전자에 작용하는 모멘텀은 식 (12)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{F} = -q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} = -q \left( \mathbf{E} + \frac{\mathbf{P} \times \mathbf{B}}{\gamma m_0} \right) \quad (12)$$

여기서  $m_0$  는 전자의 질량을 의미하며,  $\gamma$  는 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma = \left[ 1 - \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

여기서  $c$  는 광속을 의미한다. 식 (12)로부터 얻어지는 모멘텀  $\mathbf{P}$  를 사용하면 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t} = \frac{\mathbf{P}}{\gamma m_0} \quad (14)$$

위 식을 풀면 임의의 전자기장 분포에 대한 대전입자의 위치가 계산된다. 이때 대전된 입자간의 상호작용을 고려하기 위해 반복계산을 수행하여 최종적으로 전자빔의 궤적 변화를 계산해준다.

#### 4. 전자광학계의 유한요소 해석

##### 4.1 전계방사형 전자빔 방출특성 해석

전계방출 팁의 전자방출 효과를 분석하기 위해 Fig. 4에 도시된 찬음극 전계방출 전자원의 특성실험장치<sup>(8,9)</sup>에 대한 해석을 수행하였다. 그림에 도시된 바와 같이 텅스텐 팁(Fig. 5 참조)에 음의 전압(-1.5kV)을 걸어주고 양극(Anode)과 검출판(Detector)은 접지를 시킨 상태에서 방출되는 전자빔의 특성을 해석하였다. 여기서 양극과 검출판의 간격은 10mm, 검출판의 길이와 폭은 모두 10mm로 설정하였다. 팁의 끝단의 곡률반경은 200nm, 일함수는 4.5eV로 설정하였고, OPERA3D/ SCALA<sup>(10)</sup>를 사용하여 3차원 공간전하 해석을 수행하였다.

해석은 대칭성을 고려하여 1/4에 대해서만 수행하였으며, Fig. 6에 격자 구조를 확대하여 도시하였다. 전체 해석 영역이 10mm 이상인 점에 반해 팁 끝단의 곡률반경이 200nm 인 점을 감안하여 단계별 격자세분화를 실시하여 유한요소 격자 구조를 형성하였다. Fig. 7에 유한요소해석결과로부터 얻어진 전자총에서 방출된 전자빔의 이동경로를 도시하였다. Fig. 8(a)에 검출면에서의 전류밀도 분포를

히스토그램 형태로 표시하였다. Fig. 8(b)에 도시된 실험결과<sup>(8)</sup>와 비교하면 점선으로 표시한 부분이 해석 영역에 해당되는 점을 감안할 때 해석결과와 유사한 분포를 보임을 확인할 수 있었다. 한편 계산결과로부터 얻어진 전류의 양은 80.9nA 로 실험결과(약 110nA)에 비해 26% 정도의 오차를 보였는데, 이는 팁 끝단의 형상 및 곡률반경의 정확한 측정이 어려웠고 팁 부근에서의 나노미터 크기의 유한요소 격자 구성이 제한적이었던 점이 주요한 원인으로 판단된다.

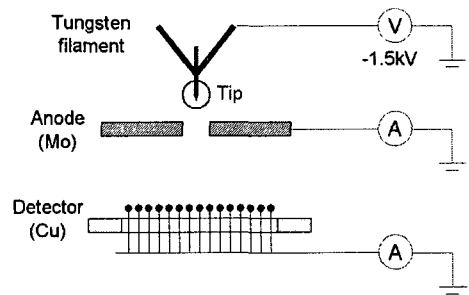


Fig. 4 Schematic setup of the beam emission equipment

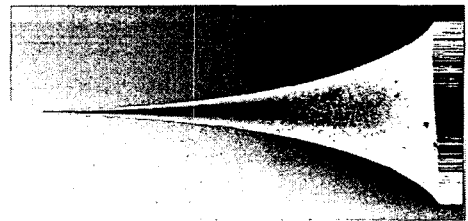


Fig. 5 Image of a field-emission tungsten tip<sup>(9)</sup>

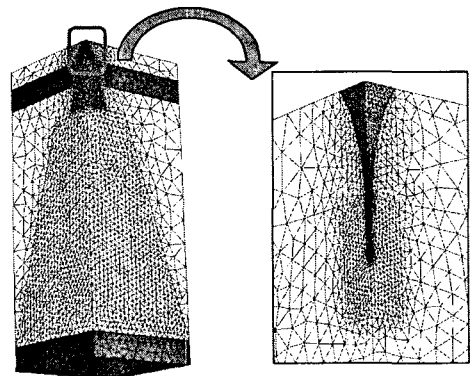


Fig. 6 3d mesh structure for finite element analysis

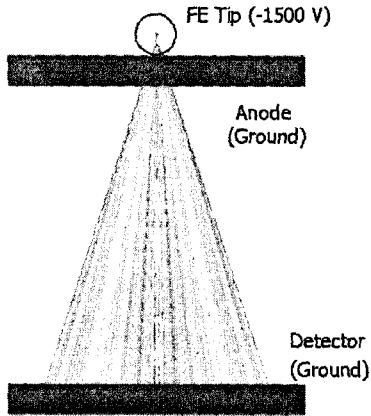
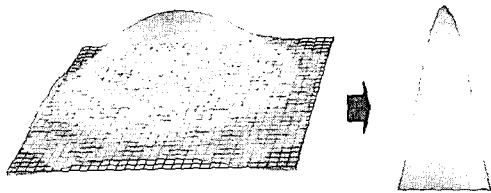
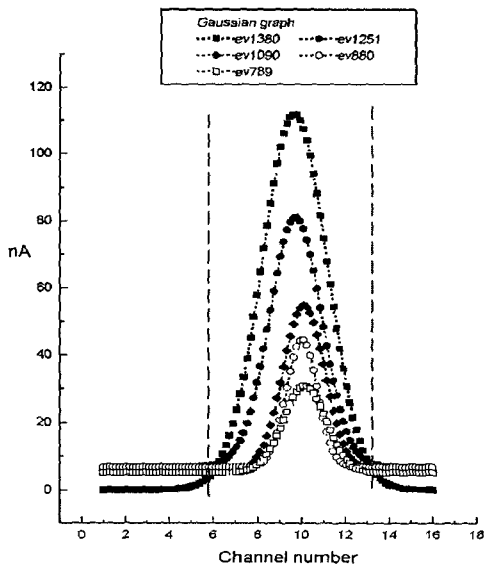


Fig. 7 Beam trajectory calculated by FE analysis



(a) Histogram of the current density on the detector

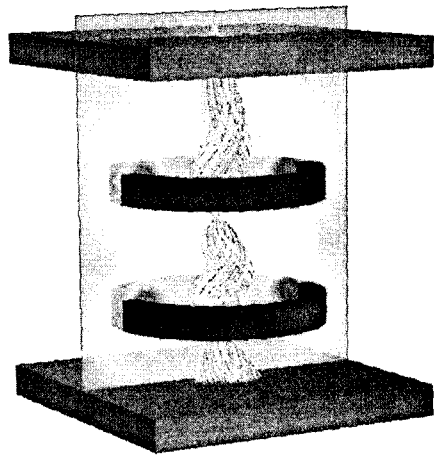


(b) Experimental measurement of the current density

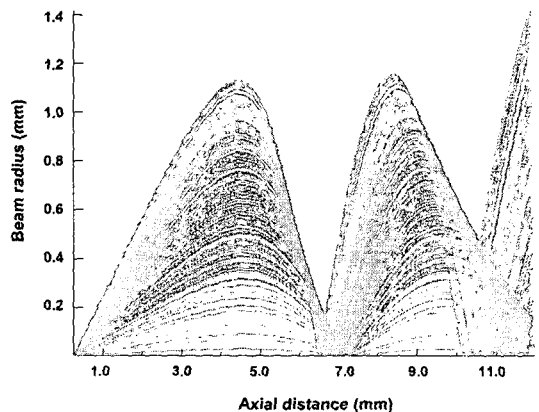
Fig. 8 Comparison of the beam emission characteristics

#### 4.2 렌즈효과를 고려한 공간전하 해석

주사전자 현미경에서는 전자 렌즈를 사용하여 자기장을 형성하고, 이를 통해 전자빔의 경로를 조절하게 된다. 이러한 현상을 해석하기 위해서는 텅과 양극 사이에 걸리는 전기장과 렌즈에 의해 형성되는 자기장을 복합적으로 고려해주어야 한다. 이를 위해 기존의 해석모델에 2개의 전자렌즈, 즉 집속렌즈와 대물렌즈를 각 1개씩 추가하여 유한요소 해석을 수행하였다. 이때 각 렌즈의 전류밀도는  $1000\text{A}/\text{mm}^2$ 로 설정하였다. Fig. 9에 렌즈의 자기장 효과를 고려한 전자빔의 궤적 변화를 도시하였는데, Fig. 7과 비교할 때 렌즈 주변에서 발생된 자기장에 의해 전자빔이 굴절되어 초점을 맺게 되는 현상을 확인할 수 있었다.



(a) Beam trajectory with the magnetic filed distribution



(b) Sectional view of beam trajectory

Fig. 9 Beam trajectory with two magnetic lenses

4.3 조리개를 고려한 결상특성 개선

일반적으로 광학계의 결상특성 및 초점심도를 향상시키기 위해 조리개를 사용한다. 주사전자현미경의 전자광학계에서도 얇은 폴리브덴이나 플래티늄/이리듐 금속판에 미세 구멍을 가공하여 조리개로서 사용해주고 있다. 본 절에서는 조리개를 추가하였을 경우 구면수차의 감소효과를 검증하기 위해 집속렌즈와 대물렌즈 중간지점에 직경 0.5mm, 두께 0.5mm 인 조리개를 추가하여 유한요소 해석 모델을 구성하였다(Fig. 10 참조).

Fig. 11(a)에 조리개를 추가하였을 경우 전자빔의 궤적 변화를 도시하였는데, 집속렌즈를 통해 집속된 전자빔중 발산각도가 큰 경우는 조리개에 막혀 차단되어 결과적으로 결상특성이 향상됨을 확인할 수 있었다. Fig. 11(b)에 단면에서의 전자빔의 궤적 변화를 그래프 형태로 도시하였다. 우선 집속렌즈에 의해 1차 초점을 맺는 과정까지는 앞절의 결과 [Fig. 9(b)]와 유사하나, 이후 발산된 빔은 조리개에 의해 차단되고 상대적으로 발산각이 작은 전자들만이 대물렌즈를 통과하여 검출면에서 2차적으로 초점을 맺게 되어 결상특성이 향상됨을 알 수 있다.

보다 정량적인 비교를 위해 Fig. 12에 팁으로부터의 거리에 따른 전자빔의 초점반경(Spot radius) 변화를 비교하였다. 여기서 초점반경은 빔 궤적의 좌표치로부터 계산해주었다. 조리개를 사용한 경우 검출면에서의 최소 반경이 0.187mm로 계산되었고, 조리개를 사용하지 않은 경우(1.368mm)에 비해 전자광학계의 결상성능이 대폭 향상됨을 확인할 수 있었다.

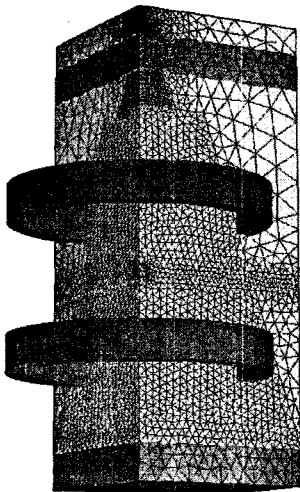
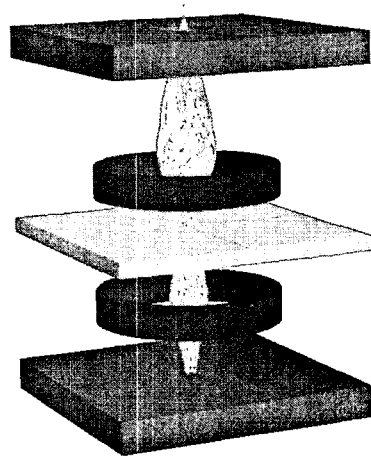
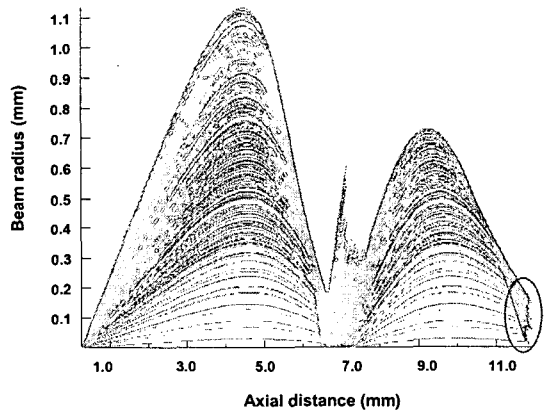


Fig. 10 Finite element model including the aperture



(a) Three-dimensional view of beam



(b) Sectional view of beam trajectory

Fig. 11 Beam trajectory through the aperture

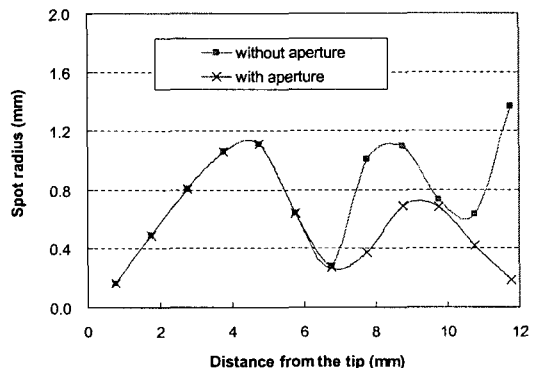


Fig. 12 Comparison of the beam spot radius

## 5. 결 론

## 참고문헌

이상으로 본 연구에서는 전계방사형 주사전자 현미경의 기본 특성에 대해 고찰하고, 체계적인 분석을 위해 유한요소법을 사용하여 주사전자 현미경의 전자광학계를 해석하였다. 이러한 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 찬음극 전계방사형 팁에서의 전자방출 현상에 대한 유한요소해석을 수행하였고, 해석결과를 실험결과와 비교함으로써 해석의 신뢰도를 검증하였다.

(2) 집속렌즈와 대물렌즈를 추가하였을 경우 렌즈의 자기장에 의한 전자빔이 굴절되는 현상을 수치적으로 예측하였다.

(3) 발산각도가 큰 빔을 차단시키기 위해 조리개를 추가하여 해석을 수행하였고, 결과적으로 전자빔의 초점반경이 감소됨으로써 결상성능이 향상됨을 확인하였다.

이러한 연구결과는 주사전자 현미경의 설계과정에서 각종 부품의 사양선정 및 최적 설계조건 도출에 효과적으로 적용이 가능하다. 향후에는 실제 모델의 제작과정에서 제안된 해석기법을 활용함으로써 개발과정의 최적화 및 효율화를 추구할 전망이다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발사업(과제명: 전자빔 기반 복합 나노형상 측정기술 개발)의 지원으로 진행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

- (1) Lee, R. E., 1993, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Prentice Hall.
- (2) Reimer, L., 1998, *Scanning Electron Microscopy - Physics of Image Formation and Microanalysis*, Springer, Berlin.
- (3) Balasubramanyam, M., Munro, E. and Taylor, J., 1993, "Simulation and Interpretation of Scanning Electron Microscope Images," *Proc. SPIE*, Vol. 2014, pp. 104~111.
- (4) Chisholm, T., Wallman, B. A., Liu, H., Munro, E., Rouse, J. and Zhu, X., 1996, "Improved Resolution in Field-Emission Lithography Machines," *Proc. SPIE*, Vol. 2858, pp. 146~155.
- (5) Mook, H.W. and Kruit, P., 1999, "Optics and Design of the Fringe Field Monochromator for a Schottky Field Emission Gun," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* Vol. 427, pp. 109-120.
- (6) Hawkes, P. W., 1982, *Magnetic Electron Lenses*, Springer, Berlin.
- (7) Orloff, Jon. 2004, *Handbook of Charged Particle Optics*, CRC Press, New York.
- (8) Kim, Y. G., Choi, E. H., Kang, S. U., and Cho, G., 1998, "Computer-Controlled Fabrication of Ultra-Sharp Tungsten Tips," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 16, pp. 2079~2081
- (9) Choi, B. K. 1997, "Fabrication and Characteristics of Cold Cathode Field Emission Electron Source," *Master's Thesis*, Kwangun University.
- (10) Vector Fields Ltd., 2004, *OPERA-3D/SCALA: Reference Manual*.