

열전자형 주사전자현미경 결상특성의 수치해석

정현우⁺, 박만진⁺, 박 균*, 김동환⁺⁺, 장동영⁺⁺⁺

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 8. 23)

Numerical Analysis for the Image Evaluation of a Thermionic SEM

H. U. Jung⁺, M. J. Park⁺, K. Park*, D. H. Kim⁺⁺, D. Y. Jang⁺⁺⁺

Abstract

The present study covers numerical analysis of a thermionic scanning electron microscope(SEM) column. The SEM column contains an electron optical system in which electrons are emitted and moved to form a focused beam, and this generates secondary electrons from the specimen surfaces, eventually making an image. The electron optical system mainly consists of a thermionic electron gun as the beam source, the lens system, the electron control unit, and the vacuum unit. For a systematic design of the electron optical system, the beam trajectories are investigated through numerical analyses by tracing the ray path of the electron beams, and the quality of resulting image is evaluated from the analysis results.

Key Words : Scanning Electron Microscope, Thermionic Emission, Electro-Magnetic Lens, Numerical Analysis, Ray Tracing

1. 서 론

주사전자 현미경(Scanning Electron Microscope; SEM)은 광학현미경에서 빛의 파장(300~700nm)으로 인한 분해능의 한계를 극복하기 위해 전자빔(파장 1nm 이하)을 사용함으로써 분해능을 향상시킨 측정장비로 생물학, 의학 및 다양한 공학 분야에서 널리 사용되고 있다. 주사전자 현미경은 크게 전자총에서 나온 전자선을 집속하여 시료 표면에 주사

하는 전자 광학계와 시료가 위치하는 시료 스테이지, 시료 표면에서 나오는 신호를 검출하는 검출기, 본체 내부의 진공을 유지시키는 배기계로 구성되어 있다. 이중 본 논문에서 다루게 될 전자광학계는 크게 전자빔원(electron beam source), 전자기렌즈(electro-magnetic lens), 검출기(detector) 등으로 이루어져 있다.

이중 전자빔은 전자빔을 발생하는 방식에 따라 열전자방사형(thermionic electron emission)과 전계 방사형(field

* 서울산업대학교 나노생산기술연구소

교신저자, 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부 (kpark@snut.ac.kr)

주소: 139-743 서울특별시 노원구 공릉2동 172

** 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

*** 서울산업대학교 산업정보시스템공학과

emission)으로 구분할 수 있다^(1,2).

전체방사형 전자빔원의 경우 뾰족한 전자방출원 텁에 고전압(1.5~3.0kV)을 인가함으로써 전자빔을 방출하므로 전자빔의 휘도가 높으며 에너지 분산이 작아 분해능을 nm 이하로 낮출 수 있는 반면 10⁻⁸Pa 이상의 진공상태가 요구되어 개발 및 유지를 위해 많은 비용이 소요된다. 반면 열전자 방사형의 경우 'V'자 형태의 필라멘트를 가열해서 발생되는 전자를 빔의 형태로 인출하는 방식으로 발생된 열전자들의 에너지 분산값이 커서 일반적으로 분해능이 3.5nm 가 한계인 것으로 알려져 있다. 그러나 요구되는 진공상태가 10⁻⁵Pa 정도로 상대적으로 개발 및 유지가 용이하여 현재 전자현미경에서 가장 많이 사용되고 있다.

전자현미경에서 전자빔을 안정화하고 휘도 및 분해능을 높이기 위해서는 필라멘트의 형상 및 치수, 전자렌즈 및 각종 요소들의 설계 및 배치를 위한 체계적인 분석이 필수적이다⁽³⁻⁶⁾. 본 연구에서는 이를 위해 수치해석을 사용하여 자기렌즈 및 편향장치의 특성을 분석함으로써 설계의 타당성을 확보하고자 한다. 또한 상기 해석결과를 바탕으로 방출된 전자빔의 궤적을 예측하여 상면에서의 광선 분포 및 수차특성, 상면위치에 따른 초점반경의 변화 등을 예측함으로써 전자광학계의 결상특성을 평가하기 위한 광선추적 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 전자기 렌즈에 의한 전자기장 분포

전자렌즈에 의한 전자기장 분포를 예측하기 위해서는 전자기장 해석(electromagnetic field analysis)을 수행해야 한다. 전자기장 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다⁽⁷⁾.

$$F = \iiint_{\Omega} \left(\frac{1}{2\mu} (\nabla \times A) \cdot (\nabla \times A) - J \cdot A \right) d\Omega \quad (1)$$

여기서 μ 는 투자율을 의미한다. 그리고 A 는 자기 포텐셜, J 는 전류 밀도, $d\Omega$ 는 요소 체적을 의미한다. 식 (1)은 렌즈가 축대칭 형상임을 감안하여 A_θ 에 관한 식으로 다음과 같이 정리된다.

$$F = \iiint_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial r} + \frac{A_\theta}{r} \right)^2 \right] - J_\theta A_\theta \right\} d\Omega \quad (2)$$

한편 자속밀도 B 는 자기포텐셜 A 의 분포를 사용하여 식 (3)과 같이 표현되며, 원통형 좌표계에서 각각의 성분은 식

(4), (5)와 같다⁽⁷⁾.

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

$$B_z = \frac{\partial A_\theta}{\partial r} + \frac{A_\theta}{r} \quad (4)$$

$$B_r = -\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \quad (5)$$

여기서 B_z 는 축방향의 자속 밀도, B_r 는 반경방향의 자기 밀도를 의미한다. 상기 유한요소방정식을 풀어 자기렌즈에 인가된 코일의 전류에 따른 렌즈 내부의 자속밀도 분포를 계산할 수 있다.

2.2 자기 편향 장치

자기 편향 장치가 코일에 의해서만 작동한다면, 자기장 H 는 Biot-Savart의 법칙에 따라 다음과 같이 표현된다⁽⁸⁾.

$$H = \frac{I}{4\pi} \oint \frac{dl \times \hat{r}}{r^2} \quad (6)$$

여기서 dl 은 전류 방향의 길이 요소이고, \hat{r} 은 자기장이 계산될 곳을 향하는 단위 벡터이다. 자기장 H 는 $H = \nabla \Phi_m$ 에 의해 구해지는데, Φ_m 은 축방향의 자기 포텐셜로 다음의 식으로 구해진다.

$$\Phi_m(r, \theta, z) = \left[d_1(z) r - \frac{1}{8} d_1''(z) r^3 \right] \cos\theta + \dots \quad (7)$$

여기서 $d_1(z)$ 은 축방향의 자기 포텐셜로, 식 (8)과 같이 표현된다.

$$d_1(z) = \frac{\mu_0 N I \sin\theta}{\pi} \left[\frac{H(H^2 + 2R^2)}{R(H^2 + R^2)^{3/2}} - \frac{h(h^2 + 2R^2)}{R(h^2 + R^2)^{3/2}} \right] \quad (8)$$

여기서 θ 는 코일의 반각이고, r 은 코일의 내측 반경, R 은 코일의 외측 반경, H 와 h 는 해석될 범위에 해당한다.

2.3 광선 추적 (Ray tracing)

앞절에서 얻어진 전자기장 분포를 바탕으로 전자의 운동방정식을 계산하면 식 (9)와 같은 근축 광선 방정식이 구해진다⁽⁸⁾.

$$w'' + \frac{\phi'}{2\phi} w' + \frac{\phi''}{4\phi} w - i\sqrt{\frac{e}{2m\phi}} \left(Bw' + \frac{B'w}{2} \right) \\ = -\frac{VF_1}{2\phi} + \sqrt{\frac{e}{2m\phi}} ID_1 \quad (9)$$

여기서 $w(z) = x(z) + iy(z)$ 는 축방향 좌표 z 의 함수와 복소수로 표현된 일반적인 근축 광선 방정식이다. $\Phi(z)$ 는 축에서 정전기 렌즈의 전위 분포, $B(z)$ 는 축에서 자기렌즈의 자속 밀도 분포, $F_1(z)$ 는 축에서 정전기 편향 장치의 단위 전압당 걸린 힘, V 는 편향 장치의 정전기 전압, $D_1(z)$ 는 자기 편향 장치의 단위 전류 당 자속 밀도, I 는 z 축에 나타나는 첫 번째 편향 장치의 인가 전류이다. 편향 장치의 자기장 $F_1(z)$ 과 $D_1(z)$ 는 복소수 변수이다. 또한 편향 장치의 인가 전압인 V 와 전류인 I 는 편향 신호들을 (x, y) 면에서 어떠한 방향으로든 전자빔을 회전 시킬 수 있다는 사실을 나타내는 복소수의 양이다. 일반적으로 위의 식에서 렌즈와 편향 장치들은 서로 물리적으로 맞물린다. 이 식은 4차 Runge-Kutta 공식을 사용해서 수치 해석적으로 계산된다.

3. 전자광학계의 전자기장 해석

3.1 전자 현미경 전자 광학계의 기본 구성

주사전자현미경의 전자광학계는 일반적으로 집속렌즈(Condenser Lens; CL)와 대물렌즈(Objective Lens; OL)로 구성되어 있다⁽⁹⁾. 전자렌즈는 일반적으로 원통형으로 권선된 코일에 전류를 부과하여 자기장을 형성시킴으로써 전자빔의 방향을 제어해주는 역할을 수행한다. 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 굽혀 시료 상의 초점을 맞추어주는 역할을 한다.

Fig. 1에 전자현미경 전자광학계의 해석 영역을 도시하였다. Fig. 1에 도시된 바와 같이 전자총 하단에 2개의 집속렌즈(CL1, CL2)가 위치하고 있으며, 그 하단에 1개의 대물렌즈(OL)가 위치하고 있다. 또한 대물렌즈 내부에는 2개의 편향코일(Main deflector; MD, Sub deflector; SD)이 위치하여 집속된 전자빔의 주시를 담당하고 있다. Table 1에 3개 렌즈의 주요 사양을 요약하였다.

Fig. 2에 각 렌즈에 대해 해석 결과로부터 얻어진 자속선의 분포를 도시하였다. 코일에서 발생된 자기장이 상대적으로 투자율이 높은 순철과 탄소강 부위를 투과하지 못함으로 인해 극편 주변에서 집중됨을 알 수 있다. 이러한 현상을 정량적으로 관찰하기 위해 Fig. 3에 렌즈의 중심축 거리에 따른 자속밀도의 변화(B_z)를 그래프로 표시하였다. 여기서 렌

3.2 전자기장 해석 결과

Fig. 2에 각 렌즈에 대해 해석 결과로부터 얻어진 자속선의 분포를 도시하였다. 코일에서 발생된 자기장이 상대적으로 투자율이 높은 순철과 탄소강 부위를 투과하지 못함으로 인해 극편 주변에서 집중됨을 알 수 있다. 이러한 현상을 정량적으로 관찰하기 위해 Fig. 3에 렌즈의 중심축 거리에 따른 자속밀도의 변화(B_z)를 그래프로 표시하였다. 여기서 렌

Table 1 Basic specifications of three lenses

Lens	Excitation current(A)	No. of turns	Sectional area(cm ²)	Current density(A/cm ²)
CL1	0.60	920	16.90	33.03
CL2	0.64	920	16.90	34.84
OL	1.59	600	10.45	91.56

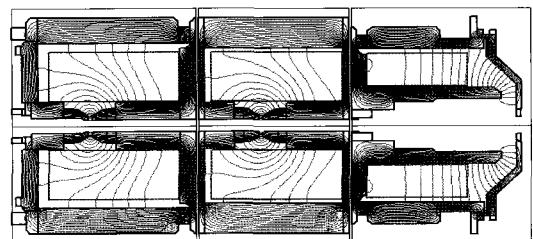


Fig. 2 Distribution of the magnetic flux lines

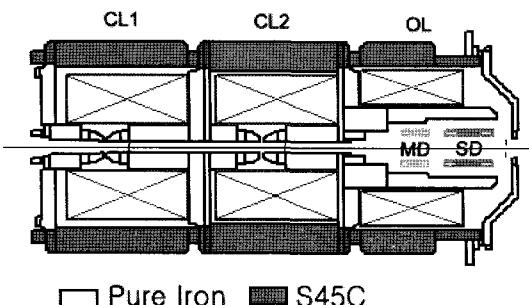


Fig. 1 Analysis domain for the electron-optical column

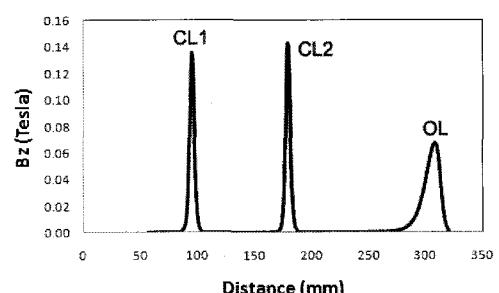


Fig. 3 Axial flux distribution along the centerline

즈의 중심축 거리는 렌즈의 상단부에서부터 하단 방향으로 이동하는 것으로 정의하였다. 자기장이 최대로 나타나는 지점은 각 극면의 정중앙이며, 그 값은 Table 2에 정리한 바와 같다. 대물렌즈의 경우 최대 자속밀도는 전류밀도를 증가시킨 관계로 비교적 높게 나타났으나 그 폭이 집속렌즈보다 상대적으로 넓어 집속효율이 떨어짐을 알 수 있는데, 이는 여타 부품의 장착을 위해 렌즈 극판간의 간격이 상대적으로 넓게 설계되었기 때문으로 분석된다.

4. 전자빔의 결상 특성 해석

4.1 편향장치를 고려한 해석결과

본 연구의 열전자형 주사전자 현미경에 쓰이는 편향장치는 자기 편향 장치로서 높은 편향 감도가 요구될 때 쓰인다. 이 장치는 편향 코일에 전류를 흘려 자기장을 형성하고 이 사이를 지나는 전자빔을 발생한 자기장으로 휘게 하여 시편의 원하는 부분에 주사할 수 있도록 하는 장치이다⁽⁷⁾.

편향장치는 직경 0.2mm의 에나멜 동선을 네모난 모양으로 각 turn 수에 맞게 감은 후, 그것을 정해진 원주 길이에 따라 둥글게 말은 것이다. 각 편향장치는 x축을 담당하는 부분과 y축을 담당하는 2부분으로 되어 있으며, 보통 2세트 이상의 편향 장치로 구성된 경우가 많다. 본 연구에서는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 주편향장치(Main deflector: MD)와 부편향장치(Sub deflector: SD)의 2개의 편향장치를 대물렌즈 내측에 삽입하였다. Fig. 4에 2개의 편향코일이 조립된

Table 2 Summary of the analysis results

	Current density (A/cm ²)	Peak location (mm)	Peak flux (Tesla)
CL1	33.03	95.09	0.1361
CL2	34.84	179.09	0.1427
OL	91.56	309.09	0.0679

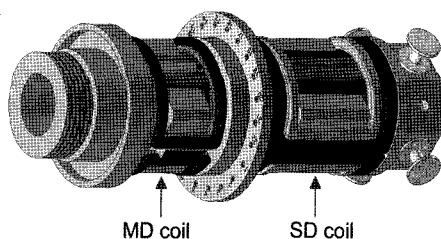


Fig. 4 Deflector unit containing two deflection coils

형상의 편향장치를 도시하였다.

Fig. 5에 각각의 편향장치에 의한 자기장 분포를 도시하였다. 이때 그래프에서의 거리는 대물렌즈 내부에서의 상대거리이고 $d_1(z)$ 은 축방향의 자기 포텐셜을 의미한다. 이때 최대치가 발생한 위치는 각 편향 코일의 중앙부로 분석되었다.

4.2 광선추적 해석 결과

앞절에서 계산된 전자렌즈 및 편향코일에 의한 전자기장 분포정보를 사용하여 전자광학계 내부에서의 전자빔의 궤적을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 상용 전자빔 광선추적 소프트웨어인 OPTICS⁽⁸⁾를 사용하여 해석하였다.

계산된 광선추적 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 전자빔원으로부터 방출된 빔이 2개의 집속렌즈를 통과하는 과정에서 굴절되어 교차(cross-over)가 발생하고, 대물렌즈에서 최종적으로 굴절되어 원하는 위치에 상을 맺는 현상을 확인할 수 있었다. 이때 집속렌즈 (1)에 의한 1차 교차점은 전자빔 원 끝단으로부터 108.3mm, 집속렌즈 (2)에 의한 2차 교차점은 191.4mm인 것으로 예측되었다. 또한 대물렌즈에 의해 최종적으로 상을 맺는 지점은 전자빔으로부터 324.2mm에 위치함을 알 수 있었고, 이러한 계산치를 바탕으로 각 렌즈별 조리개 등 주요 부품의 위치를 선정하였다.

4.3 전자빔의 결상특성 해석

본 연구에서는 전술한 전자광학계 내부의 전자기장 분포 및 그에 따른 광선추적 결과로부터 상면에서의 결상특성을 분석하였다. Fig. 7(a)에 주사된 전자빔이 상면, 즉 시료면에 도달했을 때의 분포도(Spot diagram)를 도시하였다. 분포도를 보면 주사된 전자빔이 전반적으로 200nm의 반경 안에 분포하고 있으며, 특히 중앙부에 집중되고 바깥쪽으로 갈수

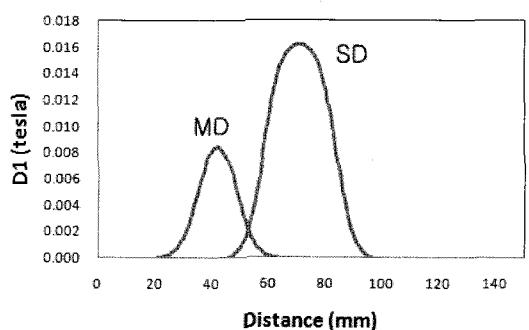


Fig. 5 Deflection field distribution inside the OL

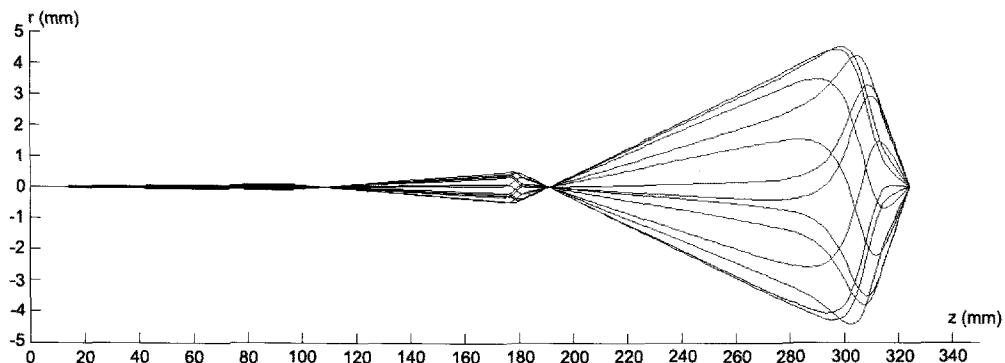
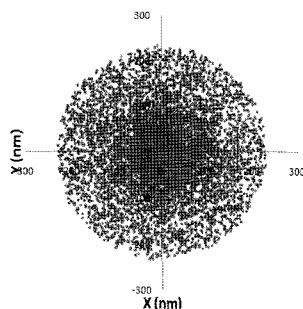
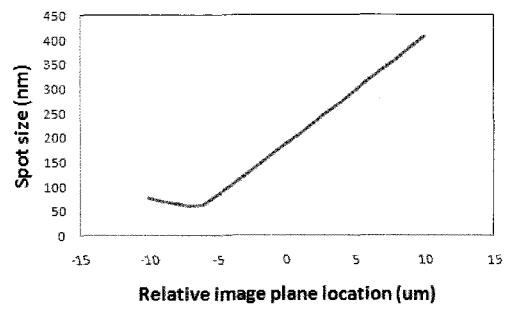


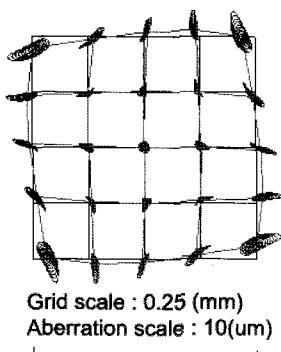
Fig. 6 Ray tracing results from the beam source to the image plane



(a) spot diagram at the image plane



(c) Spot size w.r.t. the image plane location



(b) Aberration plot on the image plane

록 밀도가 떨어지는 정규분포 형태의 분포를 보임을 알 수 있다. Fig. 7(b)에 상면에서 발생되는 수차를 도시하였는데, 구면수차, 비점수차, 왜곡수차 등이 복합적으로 작용하였을 경우 일정한 간격의 그리드(Grid)에서의 상이 어떻게 왜곡되는지를 나타내고 있다.

또한 Fig. 7(c)에 상면의 위치, 즉 시료의 z축 위치에 따른

초점반경(Spot radius)을 도시하였다. 여기서 상대적 상면위치는 현재 설정된 상면의 위치에 대한 상대위치를 의미한다. 그래프를 보면 현재의 상면 위치보다 5mm 정도 앞에서 초점반경이 최소로 감소하여 최적의 결상특성을 보임을 예측할 수 있다.

5. 결 론

이상으로 본 연구에서는 수치해석을 사용하여 열전자방사형 주사전자현미경의 전자광학계를 분석하였고, 이를 바탕으로 전자빔의 결상특성을 해석하였다. 이러한 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 주사전자현미경 전자광학계의 자기렌즈에 의한 자기장 분포를 수치해석을 통해 계산하였고, 계산결과를 활용하여 전자빔의 접속특성을 예측할 수 있었다.
- (2) 전자렌즈에 의한 전자빔의 초점위치를 예측하고, 예측된

위치를 토대로 조리개 등 주요 부품의 위치를 결정할 수 있었다.

- (3) 광선추적 시뮬레이션을 통해 주사전자현미경 전자광학계에서 전자빔의 집속특성, 수차특성, 초점위치 등의 결상특성을 예측할 수 있었다.

상기 해석결과로부터 주사전자 현미경의 설계과정에서 각종 부품의 사양선정에 효과적으로 활용할 수 있었다. 이러한 해석 결과는 향후 열전자형 주사전자현미경 장비의 성능을 증가시키는데 활용할 것으로 기대할 수 있다.

후기

본 연구는 서울시에서 지원하는 ‘나노 공정기술 및 장비 개발 산학연 혁신 클러스터’ 사업의 지원으로 진행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (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) Juma, S. M. and Mulvey, T., 1978, “Miniature rotation-free magnetic electron lenses for the electron microscope,” *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 11, pp. 759~764.
- (4) Zhu, X. and Munro, E., 1989, “A computer program for electron gun design using second-order finite elements,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 7, pp. 1862~1869.
- (5) Park, K., Park, M. J., Kim, D. H., and Jang, D. Y., 2006, “Numerical analysis for electron optical system of a field emission SEM,” *Trans. Kor. Soc. Mech. Engr. (A)*, Vol. 30, pp. 1577~1583.
- (6) Park, K., Jung, H. W., Park, M. J., Kim, D. H., and Jang, D. Y., 2007, “A study on design and analysis for magnetic lenses of a scanning electron microscope using finite element method,” *J. Kor. Soc. Prec. Engr.*, Vol. 24, pp. 95~102.
- (7) Orloff, Jon., 2004, *Handbook of Charged Particle Optics*, CRC Press, New York.
- (8) Munro, E., 2005, *OPTICS - Software for Electron and Ion Beam Column Design*, MEBS Ltd., London.
- (9) Lim, S. J. and Lyou, J., 2006, “Development of intelligent remote beam control function in E-beam manufacturing system,” *Trans. Kor. Soc. Mach. Tool Engr.*, Vol. 15, pp. 24~29.