열전자방사형 주사전자 현미경 전자광학계의 유한요소해석

박 근† · 정현우* · 김동환** · 장동영***

Finite Element Analysis for Electron Optical System of a Thermionic SEM

Keun Park, Huenu Jung, Dong Hwan Kim, Dong Young Jang

Key Words : Scanning Electron Microscope(주사전자현미경), Thermionic Emission(열전자방사), Electro-magnetic Lens(전자렌즈), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

The present study covers the design and 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. In the design process, the dimension and capacity of the SEM components need to be optimally determined with the aid of finite element analyses. Considering the geometry of the filament, a three-dimensional (3D) finite element analysis is utilized. Through the analysis, the beam emission characteristics and relevant trajectories are predicted from which a systematic design of the electron optical system is enabled. The validity of the proposed 3D analysis is also discussed by comparing the directional beam spot radius. As a result, a prototype of a thermionic SEM is successfully developed with a relatively short time and low investment costs, which proves the adoptability of the proposed 3D analysis.

1. 서 론

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 높은데, 이에 따라서 분석장비의 성능을 획기적으로 향상시켜 관련기술을 보유하려는 연구가 세계적으로 활발히 진행중이다.

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

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 현미경의 전자광학계는 크게 전자빔원(electron beam source), 전자기렌즈(electro-magnetic lens), 검출기(detector)로 이루어져 있다. 이중 전자빔원은 전자빔을 발생하는 방식에 따라 열전자 방사형(thermoionic electron emission)과 전계 방사형(field emission)으로 구분할 수 있다.[1,2]

전계방사형의 경우 뾰족한 전자방출원 팁에 고전압(1.5~3.0kV)을 인가함으로써 전자빔을 방출하므로 전자빔의 휘도가 높으며 에너지 분산이 작아 분해능을 nm 이하로 낮출 수 있는 반면, 10^{-8} Pa 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^{-5} Pa정도로 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 유한요소법을 사용하여 열전자 전계방사형 전자빔원의 전자방출특성을 분석하고, Wehnelt 실린더, 양극판, 전자기렌즈 등의 전자광학계 요소들이 방출된 전자빔의 이동경로에 미치는 영향을 분석하도록 하겠다.

2. 열전자 주사전자현미경의 전자광학계

주사전자현미경의 기본 구조를 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. 1 에 도시한 바와 같이 전자빔원(beam source)과 전자 렌즈계(magnetic lenses), 편향 코일(deflection coil), 조리개(aperture) 등으로 구성되어 있다.

열전자방사형 전자빔원은 일함수 4.5eV, 직경 150μm 텅스텐 필라멘트를 'V'자 형태로 구부려 사용한다. 필라멘트의 양 끝단에 고전압(15kV)을 인가하여 2700K 이상의 고온으로 가열하면 구부러진 필라멘트 끝단에서 전자가 방출된다. 또한 필라멘트 하단에 Wehnelt 실린더 및 양극(anode)을 설치하여 전계를 인가하여 방출된 전자를 가속시켜준다. Fig. 2에 열전자 방사형 전자빔원의 기본 구조를 도시하였는데, 이때 웨넬트 실린더 및 양극의 형상과 간극 등의 변수가 전자의 방출특성에 영향을 미치게 된다.

전자광학계에서는 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.

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.[6,7]

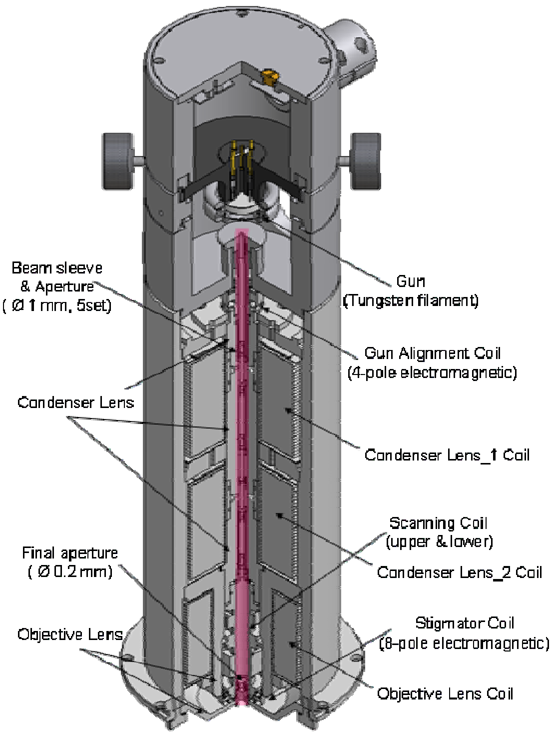


Fig. 1 3-D model of the thermionic SEM column

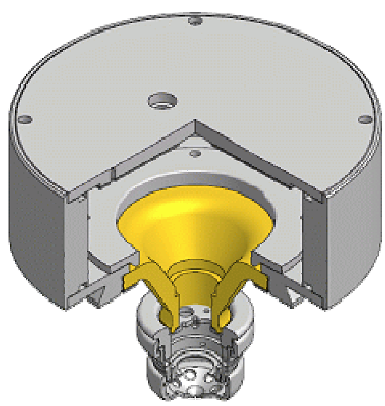


Fig. 2 Perspective view of a thermionic gun assembly

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.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \tag{2}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = J \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{4}$$

여기서 **E**는 전기장의 세기(Electric filed intensity), **H**는 자기장의 세기(Magnetic filed intensity), **D**는 전속밀도(Electric flux density), ρ는 전하 밀도(Charge density), **B**는 자속 밀도(Magnetic flux density), J는 전류 밀도(Current density)이다. 전기장의 세기와 전속 밀도, 자기장의 세기와 자속 밀도와의 관계는 각각 유전율 ε와 투자율 μ를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \tag{5}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \tag{6}$$

상기 Maxwell 방정식을 사용하여 전자총에서 형성된 전계 및 전자렌즈에 의해 인가된 자계의 분포를 계산해줄 수 있다.

3.2 입자 방출 해석(Particle emission analysis)

공간전하 해석을 위해서는 전자총 팁(Tip)에서의 입자 방출 현상을 적절하게 묘사해주어야 한다. 열전자 방사형에 대한 대표적인 해석 모델은 열적 포화한계(Thermal saturation limit)모델로 다음과 같이 Tip의 온도(T)의 함수로서 표현된다.

$$J_0 = AT^2 e^{-\frac{q\phi_w}{KT}} \tag{7}$$

여기서 J_0는 팁 표면에서 방출되는 전류 밀도, A는 팁 표면의 방출 계수, ϕ_w는 재료의 일함수, k는 볼쯔만 상수를 의미한다. 윗 식은 가장 간단한 형태의 방출모델이나, 온도의 함수로 주어지는 만큼 적용 측면에서 다소 어려운 측면이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 Child's Law를 사용하여 가속 전압의 크기에 대한 열전자 방출 현상을 다음과 같이 묘사할 수 있다.

$$J_0 = \frac{4\varepsilon_0}{9}\sqrt{\frac{2q}{m_0}}\frac{V_0^{3/2}}{d^2} \tag{8}$$

여기서 V_0는 가속 전압, d는 전극과의 간격, ε_0는 자유 공간에서의 유전율을 의미한다.

3.3 공간전하 해석(Space charge analysis)

주사전자 현미경에의 전자광학계에서는 전자총에서 방출된 대전입자(charged particle)가 상호간의 전하분포와 광학계 내부의 전자기장에 의해 이동하게 된다. 2 장에서 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 Lorenz 힘은 식 (9)와 같이 표현되며, 결과적으로 전자에 작용하는 모멘텀은 식 (10)과 같이 표현된다[7].

$$F = -q\left(\mathbf{E} + v \times \mathbf{B}\right) \tag{9}$$

$$\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} = -q\left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{P}\times\mathbf{B}}{\gamma m_0}\right) \tag{10}$$

여기서 m_0는 전자의 질량을 의미하며, γ는 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma = \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right]^{\left(-\frac{1}{2}\right)} \tag{11}$$

여기서 c는 광속을 의미한다. 식 (10)으로부터 얻어지는 모멘텀 **P**를 사용하면 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t} = \frac{\mathbf{P}}{\gamma m_0} \tag{13}$$

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 열전자 방사형 전자빔 방출특성 해석

본 절에서는 텅스텐 필라멘트를 음극으로 사용한 열전자 방사과정의 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 영역은 텅스텐 필라멘트, Wehnelt 실린더, 양극판(Anode plate) 및 주변 진공영역으로 구성하였다. 필라멘트에는 -15kV를 인가하였고, Wehnelt 실린더에 -15.5kV를 인가함으로써 -500V의 바이어스 전압을 인가해주었다. 필라멘트 끝단 10.2mm에 양극판을 위치시켰으며, 양극판에는 접지 조건을 설정하였다. 해석은 대칭성을 고려하여 1/4에 대해서 수행하였으며, OPERA3D/ SCALA[(8)]를 사용하여 3차원 공간전하 해석을 수행하였다.

Fig. 3에 해석 영역 및 결과를 도시하였다. 필라멘트에서 방출된 전자는 필라멘트와 양극판 사이에 형성된 전기장에 의해 양극판 방향으로 방사된다. 이때 필라멘트를 둘러싸고 있는 Wehnelt 실린더에 인가된 음의 바이어스 전압에 의해 방사된 전자빔이 내부 방향으로 편향되어 특정 지점에서 교차(crossover)후 다시 퍼져나가게 된다. Fig. 3의 표시부분에 빔의 교차 부분을 확대하여 도시하였다. Fig. 4에 빔의 진행방향(axial distance)에 따른 빔 반경(spot radius)의 변화를 도시하였다. 초기에 250㎛ 이상의 반경으로 방사된 빔이 Wehnelt 실린더의 영향으로 점점 줄어들어 필라멘트 끝단으로부터 0.8mm 위치 부근에서 교차가 발생하며 이후 점차적으로 증가됨을 알 수 있다. 이때 교차점에서의 최소 반경은 141.2㎛로 예측되었다.

4.2 바이어스 전압에 따른 전자빔 특성 고찰

앞절에서 언급한 바와 같이 Wehnelt 실린더에 인가된 음의 바이어스 전압에 의해 방사된 전자빔이 안쪽으로 집속되어 특정 위치에서 교차가 발생하게 된다. 이러한 효과를 자세히 고찰하기 위해 바이어스 전압을 변화시켜 가며 해석을 수행하였다. 우선 바이어스 전압이 0인 경우, 즉 Wehnelt에 인가된 전압이 필라멘트와 같을 경우의 해석을 수행하였다. Fig. 5에 해석결과로부터 얻어진 전자빔의 궤적을 도시하였다. 앞절에서의 해석결과와 비교해볼 때 방출된 전자빔이 상대적으로 넓게 퍼질 뿐 교차 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상은 필라멘트와 Wenhelt간에 전기장이 전혀 존재하지 않기 때문에 전자빔의 이동에 아무런 영향을 미치지 못하는 것으로 분석할 수 있다.

바이어스 전압의 크기에 따른 빔의 방출특성을 비교하기 위해 바이어스 전압의 크기를 변화시켜 가며 해석을 수행하였다. 각각의 경우에 대해 최소 빔 반경 및 검출면에서의 전류의 크기를 Table 1에 비교하였다. 빔 변화의 반경을 살펴보면 바이어스 전압의 절대값이 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 한편 검출면에서의 전류값을 살펴보면 역시 전압의 절대값이 증가함에 따라 감소됨을 알 수 있는데, 이는 방출된 빔이 지나치게 큰 바이어스 전압으로 인해 Wehnelt 실린더를 빠져나가지 못하여 검출면에 도달하지 못했음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 검출면에서의 전류값이 지나치게 저하되지 않으면서도 빔의 유효반경을 감소시키기 위해의 바이어스 전압을 -500V로 설정해주었다.

Table 1 Basic specifications of the test magnetic lens

Bias voltage (V)	Beam radius (㎛)	Emission current (mA)
0	555.18	4.842
-250	357.24	2.978
-500	141.24	0.973
-700	22.92	0.097

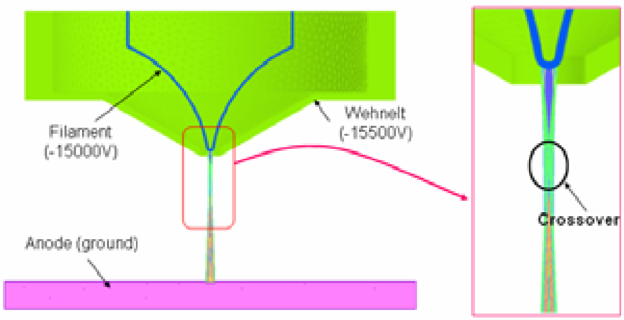


Fig. 3 Analysis domain and calculated beam trajectory

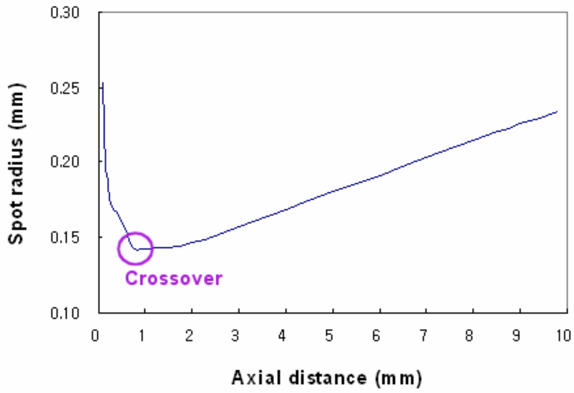


Fig. 4 Variation of the spot radius vs. the axial distance

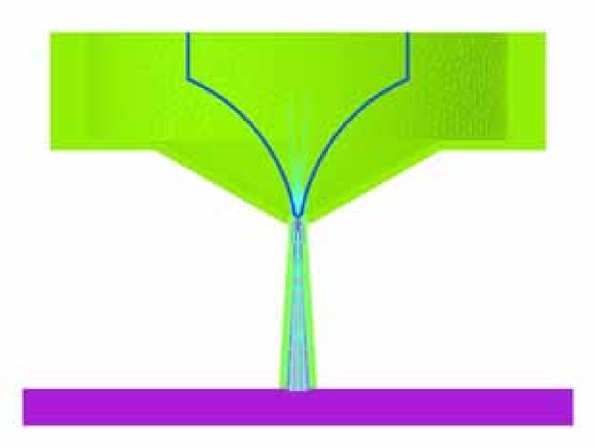


Fig. 5 Beam trajectory in the case of zero bias voltage

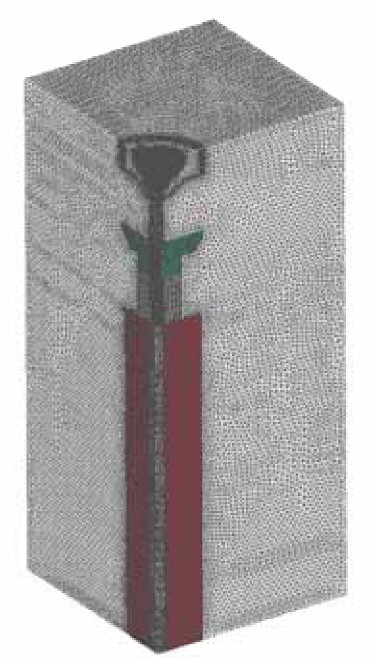
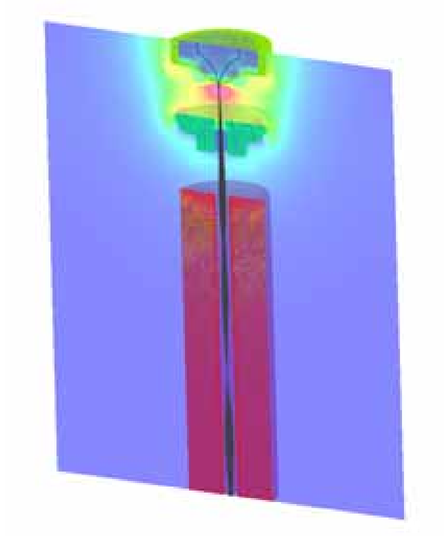
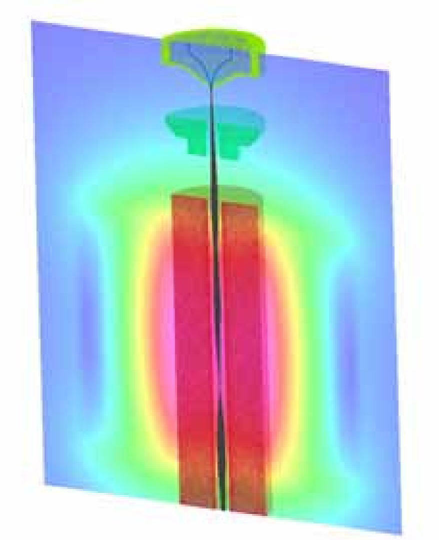


Fig. 6 Finite element model including an magnetic lens



(a)



(b)

Fig. 7 Estimated beam trajectories with (a) the electric field distribution and (b) the magnetic flux distribution

4.3 렌즈의 자기장을 고려한 전자빔 궤적 고찰

주사전자현미경에서는 전자 렌즈를 사용하여 자기장을 형성하고, 이를 통해 전자빔의 경로를 조절하게 된다. 이러한 현상을 해석하기 위해서는 팁과 양극 사이에 걸리는 전기장과 렌즈에 의해 형성되는 자기장을 복합적으로 고려해주어야 한다. Fig. 6에 기존의 해석모델에 1차 집속렌즈를 추가하여 구성한 유한요소 해석모델을 도시하였다. 여기서 전체 해석영역의 길이는 120mm이며, 렌즈의 내경은 26mm, 외경은 78mm, 길이는 65mm, 전류밀도는 1.09A/mm^{2}로 설정하였다. 유한요소 격자는 총 1,877,567개의 절점과 3,730,122개의 사면체 요소로 구성하였다. 특히 직경 150μm인 필라멘트 영역의 격자를 효과적으로 구성하기 위해 격자세분화를 실시하였고, 결과적으로 전체적으로 해석모델의 크기가 급증한 관계로 1번째 집속렌즈 영역까지만을 대상으로 해석을 수행하였다.

Fig. 7 (a)와 (b)에 각각 해석 영역에서의 전기장 및 자기장 분포를 도시하였으며, 렌즈 주변에서 발생된 자기장에 의해 전자빔이 굴절되어 초점을 맺게 되는 현상을 확인할 수 있었다. Fig. 8 에 렌즈의 자기장 효과를 고려한 전자빔의 궤적 변화를 도시하였다. 필라멘트에서 방출된 전자빔이 Wehnelt 의 영향으로 집속되어 슬리브 내부로 통과하게 되며, 집속렌즈의 자기장으로 인해 굴절되

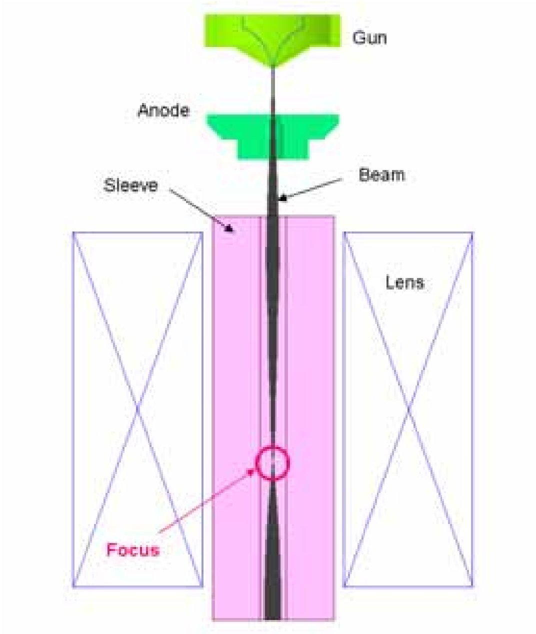


Fig. 8 Beam trajectory with the magnetic lens

어 특정 위치에서 초점을 맺고 다시 발산함을 알 수 있다. 이때 전자빔은 88.69mm 지점에서 최소의 직경(55.44μm)을 보임을 확인할 수 있었는데, 이는 4.1 절에서 계산한 필라멘트와 양극판 사이 지점에서의 최소직경(141.2μm)의 39%에 해당하며, 그만큼 집속렌즈의 효과에 의해 빔의 집속특성이 향상되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

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

(1) 열전자방사형 필라멘트에서의 전자방출 현상에 대한 유한요소해석을 수행하였고, Wehnelt 실린더에 의해 빔의 교차현상이 발생됨을 확인하였다.

(2) Wehnelt 실린더에 인가된 바이어스 전압의 변화에 따른 빔의 방사특성을 고찰하여 최적의 조건을 선정하였다.

(3) 전자렌즈에 의한 자기장 효과를 고려한 빔의 집속특성을 해석하였고, 결과적으로 전자빔의 초점반경이 감소됨으로써 결상성능이 향상됨을 확인하였다.

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

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발사업(과제명: 전자빔 기반 복합 나노형상 측정기술 개발) 및 서울시에서 지원하는 '나노 공정기술 및 장비개발 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) Munro, E., 1973, "Computer-aided design of electron lenses by the finite element method," in *Image Processing and Computer Aided Design in Electron Optics*, P. W. Hawkes, Ed., Academic Press, London.

(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) Mook, H. W. and Kruit, P., 1999, "Optics and design of the fringe field monochromator for a schottky field emission gun," *Nucl. Instr. and Meth. Phy. Res. A* Vol. 427, pp. 109-120.

(6) Grella, L., Lorusso, G., Niemi, T., Adler, D. L., 2004, "Simulation of SEM imaging and charging," *Nucl. Instr. and Meth. Phy. Res. A*, Vol. 519, pp. 242-250.

(7) Park, K. Park, M. J., Kim, D. H., and Jang, D. Y. Jang, 2006, "Numerical analysis for electron optical system of a field emission SEM," *Trans. Kor. Soc. Mech. Engr. (A)*, Vol. 30, pp. 1577-1583.

(8) Vector Fields Ltd., 2004, *OPERA-3D/SCALA: Reference Manual*.