

# 유한요소해석과 광선추적을 연계한 주사전자 현미경 대물렌즈의 설계 및 해석

## Design and Analysis of an Objective Lens for a Scanning Electron Microscope by Coupling FE Analysis and Ray Tracing

박근<sup>1,✉</sup>, 이재진<sup>2</sup>, 박만진<sup>3</sup>, 김동환<sup>1</sup>, 장동영<sup>4</sup>  
 Keun Park<sup>1,✉</sup>, Jae-Jin Lee<sup>2</sup>, Man-Jin Park<sup>3</sup>, Dong-Hwan Kim<sup>1</sup> and Dong-Young Jang<sup>4</sup>

1 서울산업대학교 기계설계-자동화공학부 (Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National Univ. of Technology)

2 서울산업대학교 기계설계-자동화공학부 원 (Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National Univ. of Technology)

3 서울대학교 기계항공공학부 원 (Graduate School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)

4 서울산업대학교 산업정보시스템공학과 (Industrial Information and System Engineering, Seoul National Univ. of Technology)

✉ Corresponding author: kpark@snut.ac.kr, Tel: 02-970-6358

Manuscript received: 2008.12.1 / Accepted: 2009.7.21

*The scanning electron microscope (SEM) contains an electron optical system in which electrons are emitted and moved to form a focused beam, and generates secondary electrons from the specimen surfaces, eventually making an image. The electron optical system usually contains two condenser lenses and an objective lens. The condenser lenses generate a magnetic field that forces the electron beams to form crossovers at desired locations. The objective lens then focuses the electron beams on the specimen. The present study covers the design and analysis of an objective lens for a thermionic SEM. A finite element (FE) analysis for the objective lens is performed to analyze its magnetic characteristics for various lens designs. Relevant beam trajectories are also investigated by tracing the ray path of the electron beams under the magnetic fields inside the objective lens.*

Key Words: Scanning Electron Microscope (주사전자현미경), Electron Optical System (전자광학계), Objective Lens (대물렌즈), Finite Element Analysis (유한요소해석), Ray Tracing (광선추적)

### 1. 서론

주사전자 현미경(Scanning Electron Microscope; SEM)은 광학현미경에서 빛의 파장(300~700nm)에 의한 분해능의 한계를 극복하기 위해 파장 1nm 이하인 전자빔을 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) 등으

로 이루어져 있다.<sup>1,2</sup> 이중 전자 렌즈는 원하는 위치에 전자빔의 초점을 맞추기 위해 사용되며 집속 렌즈와 대물렌즈로 구성되어 있다. 전자 렌즈는 일반적으로 원통형으로 권선된 코일에 전류를 인가하여 자기장을 형성시킴으로써 전자빔의 방향을 제어해주는 역할을 수행하는데, 전자빔의 집속도를 높이기 위해 투자율이 높은 순철로 제작된 극편(pole piece) 주변에 구리선 코일이 감겨지는 구조로 되어 있다.<sup>3,4</sup> 따라서 전자 렌즈의 설계시 적절한 극편의 구조 및 치수의 선정이 매우 중요하

며, 이러한 목적으로 유한요소해석을 사용하여 전자렌즈의 설계에 따른 집속특성<sup>5-8</sup> 및 그에 따른 전자빔의 결상특성<sup>9-11</sup>을 예측하기 위한 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS<sup>TM</sup>를 사용하여 열전자형 주사전자현미경의 대물렌즈에 대한 해석을 수행하고 렌즈의 형상설계에 따른 자기장 집속효과의 차이를 분석하고자 한다. 또한 상기 해석결과를 토대로 전자광학계 전용 해석 프로그램인 OPTICS를 사용하여 광선추적을 수행함으로써 대물렌즈의 형상에 따른 결상특성을 예측함으로써 최적의 렌즈형상설계에 반영하고자 한다.

## 2. 주사전자현미경의 전자렌즈

### 2.1 주사전자현미경의 기본 구조

주사전자현미경의 기본 구조를 살펴보면 전자광학계를 포함하는 경통부(column unit), 측정용 시료가 장착되는 챔버(chamber), 경통 내의 고진공을 유지하기 위한 진공부, 고전압 공급부 및 제어부 등으로 구성된다. Fig. 1에 본 연구를 통해 개발된 열전자형 주사전자현미경 경통부의 내부 구조를 도시하였는데 대표적으로 전자빔원과 전자 렌즈계, 편향 코일, 조리개 등으로 구성되어 있다. 전자빔원은 직경 150 $\mu$ m의 텅스텐 필라멘트에 고전압을 인가함으로써 온도를 2700K 이상으로 증가시켜 전자를 방출시키는 역할을 한다.

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.<sup>8</sup>

### 2.2 대물렌즈의 설계사양 고찰

Fig. 1에 도시된 바와 같이 대물렌즈는 전자광학계 내의 렌즈중 최하단에 위치하며 측정하고자 하는 시편 상단에 위치한다. 따라서 대물렌즈의

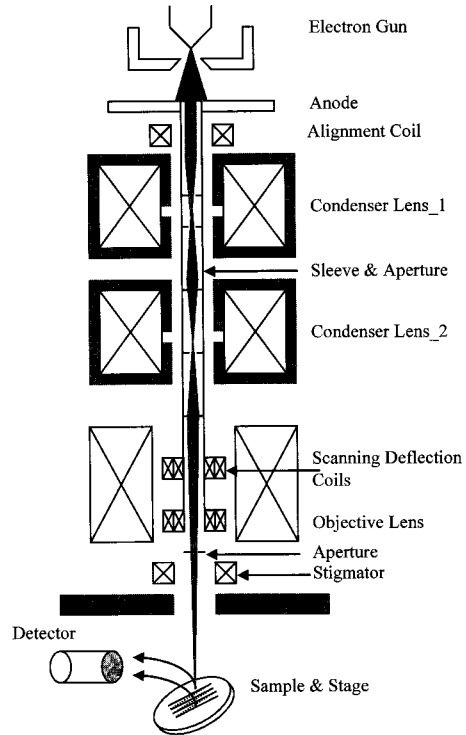


Fig. 1 Configuration of the developed SEM column<sup>11</sup>

결상특성을 향상시키기 위해서는 렌즈 하단에 자기장이 집중될 수 있도록 극편의 형상을 설계해 주어야 하며, 일반적으로 극편의 간격을 좁게 할수록 집속효과가 향상되는 것으로 알려져 있다. 반면에 전자빔의 주사방향 조절을 위한 편향 코일(Deflection coil)을 장착해야 하는 관계로 대물렌즈 내에 적절한 공간을 확보해 주어야 하는데, 이러한 이유로 적절한 공간을 유지하면서도 극편의 간격을 좁힐 수 있는 형상설계가 필요하다.

Fig. 2에 본 연구에서 비교하고자 하는 대물렌즈의 형상을 도시하였다. 여기서 검게 표시한 부분은 순철(상대투자율: 4000)이며, 빗금친 부분은 탄소강(상대투자율: 300)으로 설정하였다. Fig. 2(a)는 본 연구자의 선행연구에서 사용된 모델(Type I)로 극편간의 간격이 넓어 집속효율이 다소 떨어지는 것으로 분석되었다.<sup>8</sup> Fig. 2(b)와 (c)는 기 발표된 렌즈 형태중 렌즈 하단면에서의 집속효과를 높이기 위해 극편설계시 경사를 부여한 모델로서 (b)의 경우는 축방향으로 간극을 배열(Axial gap)하였고,<sup>12</sup> (c)의 경우는 반경방향으로 간극을 배열(Radial gap)하였다.<sup>13</sup> Fig. 2(d)는 집속효과를 더욱 증가시키기 위해 제안된 극편의 경사를 2중으로 부여한 형태

이다. 본 연구에서는 Fig. 2 에서 제시한 4 가지 형태에 대해 수치해석을 통한 집속특성 및 결상특성을 예측하고자 한다.

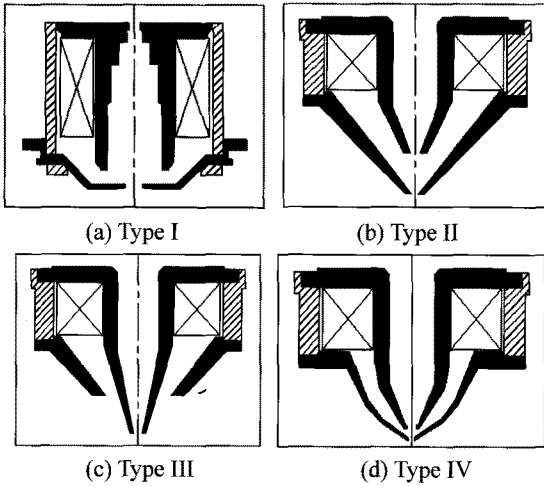


Fig. 2 Types of objective lenses in the SEM column

### 3. 이론적 배경

#### 3.1 전자렌즈의 전자기장 분포 해석

전자렌즈에 의한 전자기장 분포를 예측하기 위해서는 전자기장 해석(electromagnetic field analysis)을 수행해야 한다. 해석을 위한 지배방정식은 Maxwell 방정식을 사용하여 식 (1)~(4)와 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 같

이 나타낼 수 있다.

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

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

식 (7)과 같은 오옴의 법칙을 식 (3)에 대입하여 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \sigma \mathbf{E} = 0 \quad (8)$$

한편 자기 벡터 포텐셜  $\mathbf{A}$  와 전기 스칼라 포텐셜  $V$  를 도입하면 자속밀도와 전기장의 세기는 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (9)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (10)$$

식 (9)와 (10)을 식 (8)에 대입하면 아래와 같이 자기 벡터 포텐셜  $\mathbf{A}$  에 대한 수식으로 정리되며, 식 (11)을 유효요소 수식화하여 전자기장 해석이 수행된다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

#### 3.2 전자빔의 광선 추적

전자의 운동궤적은 식 (12)와 같이 축방향 좌표  $z$  의 함수로 표시된다. 3.1 절에서 계산된 렌즈 주변의 전자기장 분포를 바탕으로 전자의 운동 방정식을 계산하면 식 (13)과 같은 근축 광선 방정식이 구해진다.<sup>9</sup>

$$w(z) = x(z) + iy(z) \quad (12)$$

$$w'' + \frac{\phi'}{2\phi} w' + \frac{\phi'}{2\phi} w' - i \sqrt{\frac{e}{2m\phi}} \left( Bw' + \frac{B'w}{2} \right) = -\frac{VF_1}{2\phi} + \sqrt{\frac{e}{2m\phi}} ID_1 \quad (13)$$

여기서  $\theta(z)$ 는 축에서 정전기 렌즈의 전위 분포,  $B(z)$ 는 축에서 자기 렌즈의 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 전류당 자속 밀도,  $I$ 는  $z$  축에 나타나는 첫번째 편향 장치의 인가 전류이다. 일반적으로 위의 식에서 렌즈와 편향 장치들은 상호간에 복잡한 형태로 전자의 이동방향에 영향을 미친다. 식 (13)은 4 차 Runge-Kutta 공식을 사용해서 수치해석적으로 계산된다.<sup>10</sup>

### 4. 수치해석을 사용한 대물렌즈의 특성평가

#### 4.1 렌즈 형상설계에 따른 자기장특성 비교

Fig. 2 에 도시된 4 가지 형태의 렌즈의 집속특성을 비교하기 위해 유한요소해석을 실시하였다. 해석은 ANSYS<sup>TM</sup>10.0 을 사용하였으며, 렌즈의 형상이 축대칭인 점을 감안하여 2 차원 축대칭 형태로 해석 영역을 정의하였다. 해석을 위해 2 차원 4 절점 사각형 요소를 사용하여 유한요소망을 구성하였고, 특히 극편 주변에서의 자기장의 급격한 변화를 적절히 묘사하기 위해 적응적 요소망 세분화(Adaptive mesh refinement)를 실시하였다. Table 1 에 각각의 렌즈에 대한 경계조건을 비교하였는데, Type II, III, IV 의 경우 코일의 형상이 동일한 관계로 동일한 전류밀도를 부과하였다.

Fig. 3 에 해석 결과로부터 얻어진 자속선(flux line)의 분포를 도시하였는데, 코일에서 발생된 자기장이 상대적으로 투자율이 높은 순철과 탄소강 부위를 투과하지 못함으로 인해 극편 주변, 즉 렌즈의 하단부에 집중됨을 알 수 있다. 대물렌즈의 경우 측정하고자 하는 시편 상단에 위치하게 되며, 따라서 렌즈의 하단에 자기장이 집중되어야 한다. 해석 결과를 보면 Type III 의 경우 극편을 중심으로 렌즈 바깥쪽 방향으로 자속선이 분포하여 자기장의 손실이 발생함을 알 수 있다. 반면 Type IV 의 경우 자속선의 집중도가 가장 높음을 알 수 있다.

Table 1 Current condition for 4 objective lenses

Lens type	Current (A)	Current density (A/mm <sup>2</sup> )
Type I	1.66	0.9531
Type II	1.59	0.9051
Type III	1.59	0.9051
Type IV	1.59	0.9051

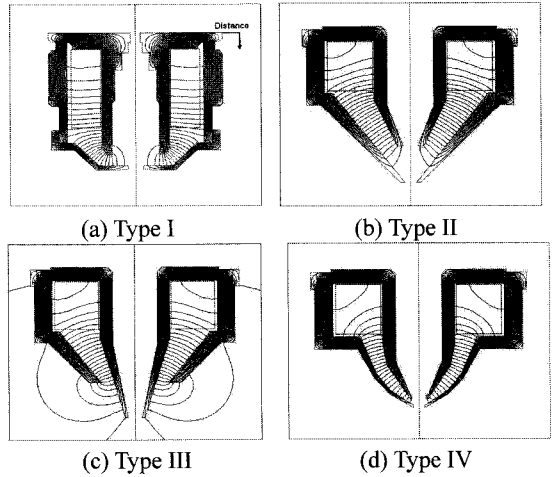


Fig. 3 Magnetic flux distributions for various lenses

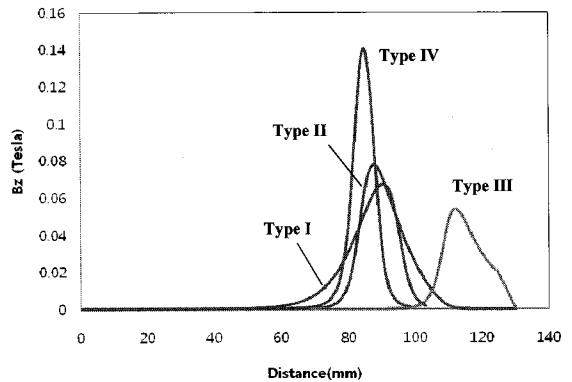


Fig. 4 Comparison of axial flux distributions for the each type of objective lens

Fig. 4 에 4 가지 형태의 렌즈에 대해 렌즈 상면으로부터의 중심축 거리에 따른 자속밀도의 변화를 그래프로 도시하였다. 우선 Type I 과 II 의 경우 그래프의 형태에서 약간의 차이가 있는 점을 제외 하면 최대 자속밀도의 크기, 폭, 발생지점 등이 유사하게 나타나 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다. Type III 의 경우 극편에서 다소 떨어진 지점에서 자속밀도가 증가하는 형태를 보였으며, 크기도 가장 낮게 나타나 상대적으로 집속특성이 가장 낮음을 알 수 있다. 반면에 Type IV 의 경우 타 렌즈에 비해 자속밀도의 집중도가 가장 우수하며, 최대 자속밀도의 크기도 타 렌즈의 2 배에 해당하여 집속성능이 가장 뛰어난 것으로 판단된다. Table 2 에 보다 정량적인 비교를 위해 렌즈별 최대 자속밀도의 발생위치와 크기를 비교하였다.

Table 2 Peak flux and positions for 4 objective lenses

Lens type	Position (mm)	Peak flux (T)
Type I	90.90	0.0669
Type II	87.36	0.0774
Type III	112.32	0.0539
Type IV	84.87	0.1404

4.2 렌즈 설계변수에 따른 집속특성 비교

4.1 절에의 결과로부터 4 가지 형태의 렌즈중 이중경사 극편(Type IV)의 경우가 자속밀도의 집속도가 가장 우수함을 알 수 있었다. 본 절에서는 이중경사 극편의 설계변수에 따른 렌즈의 집속특성에 대해 고찰하고자 한다.

Fig. 5 에 이중경사 렌즈의 주요 설계사양을 도시하였다. 주요 설계사양으로는 이중극편의 각도( $\theta_1, \theta_2$ ), 극편간의 간격( $d_1$ ) 및 중심거리( $d_2$ ) 등이 있으며, 이중 빔의 집속특성에 영향이 상대적으로 클 것으로 판단되는 이중극편 최하단의 각도( $\theta_1$ ) 및 극편간격( $d_1$ )을 변화시키며 해석을 수행하였다. 이때 중심거리( $d_2$ )와 극편 중단의 각도( $\theta_2$ )는 각각 8.0mm 와 45°로 고정하였으며,  $\theta_1$  을 25°에서 45°까지 5° 간격으로 변화시켜가며 해석을 수행하였다.

Table 3 Comparison of the peak flux according to various design specifications of the objective lens

$\theta_1$ (degree)	$d_1$ (mm)	Peak flux (T)
25.0	3.26	0.1462
30.0	5.04	0.1397
35.0	7.00	0.1268
40.0	9.23	0.1153
45.0	11.80	0.1073

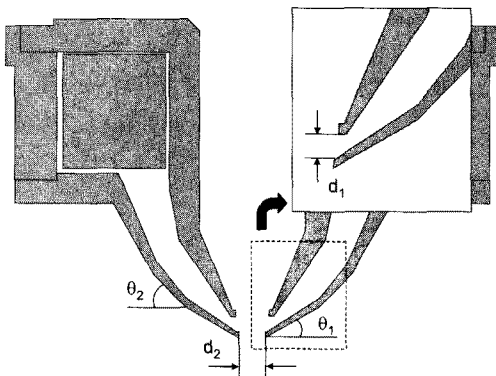


Fig. 5 Design specifications of the objective lens

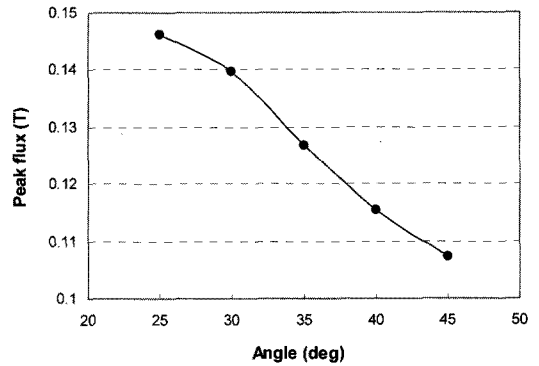


Fig. 6 Variation of the peak flux according to  $\theta_1$

Table 3 에 극편각도( $\theta_1$ )의 변화에 따른 극편간격의 변화 및 최대 자속밀도의 크기를 비교하였다. 극편의 각도가 증가할수록 극편간격이 감소하며 결과적으로 최대자속밀도가 감소하여 집속효과가 떨어짐을 알 수 있다. Fig. 6 에 이러한 경향을 관찰하기 위해 극편각도의 변화에 따른 최대자속밀도의 변화를 그래프로 도시하였다. 전반적으로 각도가 증가함에 따라 최대자속밀도가 감소하는 경향을 보이며, 특히 30~40° 구간에서 기울기가 큼을 알 수 있다. 반면에 25~30° 구간에서는 상대적으로 기울기가 작아 각도 감소에 따른 집속효율 증가 영향이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 특히 각도가 25°일 경우는 극편의 간격이 3.26mm 에 불과하여 부품 조립시 어려움이 수반되는 관계로 본 연구에서는 상기 해석결과를 토대로 극편간격을 5.0mm, 각도를 29.9°로 최종 선정하였다.

4.3 렌즈 형상설계에 따른 결상특성 비교

4.1 절에서 계산된 전자렌즈에 의한 자기장 분포해석결과를 사용하여 식 (13)으로부터 전자광학계 내부에서의 전자빔의 궤적을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 상용 전자빔 광선추적 소프트웨어인 OPTICS 를 사용하여 4 가지 형태의 대물렌즈 내부에서의 전자빔의 궤적을 계산하였다. 특히 Type IV 의 경우에는 4.2 절에서 기술된 최적설계 사양을 반영하여 해석을 진행하였다.

대물렌즈의 형태에 따른 결상특성의 비교를 위해 2 개의 집속렌즈는 배제한 상태에서 대물렌즈에 의한 자기장 변화만을 고려하여 광선추적을 수행하였다. 이때 2 개의 집속렌즈의 영향을 고려하기 위해 선행연구 결과<sup>10</sup>로부터 계산된 집속렌즈(2)에 의한 2 차교차점(대물렌즈 상면 기준 63mm

상측)에 광원이 존재하는 것으로 가정하여 광선추적을 수행하였다. Fig. 7에 4가지 형태의 대물렌즈에 대한 전자빔의 궤적을 도시하였다. 전자빔원에서 방출된 전자빔은 Fig. 4에 도시된 렌즈별 집속특성의 차이에 의해 굴절위치와 굴절각이 달라지고 결과적으로 서로 다른 위치에 상을 맺게 되어 초점거리에 차이가 발생한다.

Table 4에 렌즈별 광원에서부터의 초점면의 위치 및 초점거리를 비교하였다. 이때 초점거리가 짧을수록 대물렌즈의 배율이 높아져 주사전자현미경의 결상특성을 향상시킬 수 있다. 우선 Type I과 II를 비교하면 Type II의 경우 최대 자속밀도가 0.01T 정도 크게 나타나(Table 2 참조) 전자빔의 굴절각이 상대적으로 증가하게 되고 결과적으로 초점거리가 Type I에 비해 5mm 정도 짧아짐을 알 수 있다. 반면 Type III의 경우 최대 자속밀도가 가장 낮고 발생 위치도 4개의 렌즈중 가장 후편에 위치한 관계로 초점거리가 Type I에 비해 10mm 이상 증가되었다. 한편 최대 자속밀도가 4개의 렌즈중 가장 크게 나타난 Type IV의 경우 초점거리가 가장 짧게 나타나(11.63mm) 가장 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

상기 결과로부터 4가지 종류의 렌즈중 이중극편 렌즈(Type IV)의 경우가 자기장의 집속특성 및 전자빔 굴절능이 가장 뛰어난 것으로 예측되었으며, 해당 설계사양을 적용하여 향후 주사전자현미경의 개발 과정에서 결상특성을 향상시킬 수 있을 것으로 전망된다.

Table 4 Comparison of the image positions and focal lengths for 4 objective lenses

Lens type	Image position(mm)	Focal length(mm)
Type I	178.67	24.77
Type II	172.52	19.98
Type III	197.27	35.18
Type IV	170.80	11.63

### 5. 결론

이상으로 본 연구에서는 주사전자 현미경의 특성향상을 위해 유한요소법과 광선추적기법을 연계하여 대물렌즈의 집속특성 및 결상특성을 분석하였다. 이러한 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 열전자형 주사전자현미경의 대물렌즈에 대해 유한요소해석을 실시하였고 해석 결과로부터 렌즈의 형상설계에 따른 대물렌즈의 집속특성을 고찰하였다.
- (2) 상기 해석결과를 토대로 극편의 경사를 2중으로 부여한 Type IV의 경우가 가장 우수한 자속밀도의 집속특성을 보임을 확인하였다.
- (3) 렌즈별 자속밀도 집속특성을 반영한 광선추적 해석을 실시하였고, 해석 결과로부터 Type IV의 경우가 기존 렌즈(Type I) 대비 초점거리를 절반 이상으로 감소시킴으로써 결상특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

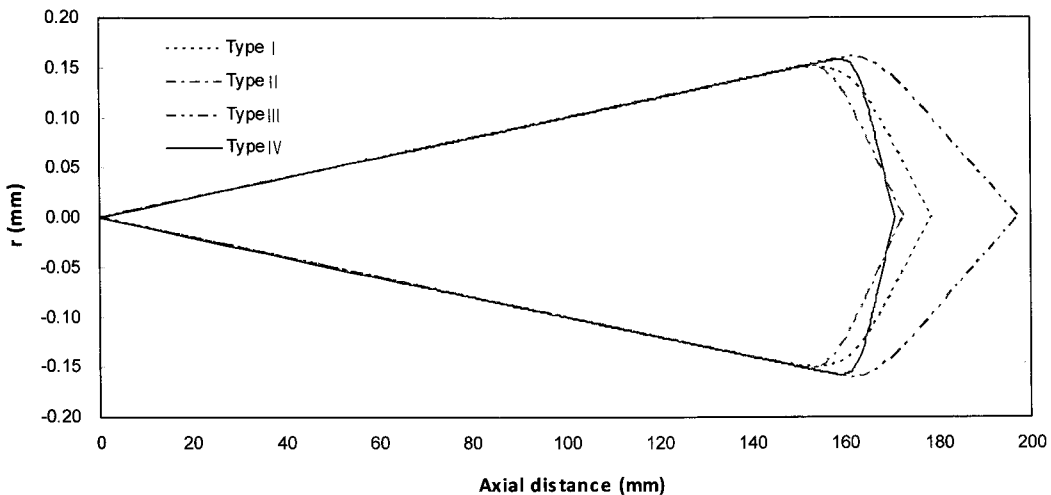


Fig. 7 Ray tracing results from the beam source to the image plane for 4 objective lenses

## 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

- Lee, R. E., "Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis," Prentice Hall, 1993.
- Reimer, L., "Scanning Electron Microscopy -Physics of Image Formation and Microanalysis," Springer, 1998.
- Hawkes, P. W., "Magnetic Electron Lenses," Springer, 1982.
- Orloff, J., "Handbook of Charged Particle Optics," CRC Press, 2004.
- Juma, S. M. and Mulvey, T., "Miniature rotation-free magnetic electron lenses for the electron microscope," J. of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 11, No. 8, pp. 759-764, 1978.
- Lencova, B. and Lenc, M., "Program AMAG for the computation of vector potential distribution in rotationally asymmetric magnetic electron lenses by the finite element method," SEM'86, Vol. 3, pp. 879-915, 1986.
- Alamir, A. S. A., "A study on effect of current density on magnetic lenses," Optik-International Journal for Light and Electron Optics, Vol. 114, No. 2, pp. 85-88, 2003.
- Park, K., Jung, H. W., Park, M. J., Kim, D. H. and Jang, D. Y., "A study on design and analysis for magnetic lenses of a scanning electron microscope using finite element method," J. of KSPE, Vol. 24, No. 9, pp. 95-102, 2007.
- Zhu, X. and Munro, E., "A computer program for electron gun design using second-order finite elements," Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, Vol. 7, No. 6, pp. 1862-1869, 1989.
- Jung, H. W., Park, M. J., Park, K., Kim, D. H. and Jang, D. Y., "Numerical analysis for the image evaluation of a thermionic SEM," Trans. of the Korean Society Machine Tool Engineers, Vol. 16, No. 6, pp. 153-158, 2007.
- Park, M. J., Kim, D. H., Park, K., Jang, D. Y. and Han, D. C., "Design and fabrication of a scanning electron microscope using a finite element analysis for electron optical system," J. of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, No. 9, pp. 1734-1746, 2008.
- Nakagawa, S., Shibuki, Y., Sahara, K. and Norioka, S., "A novel high-resolution scanning electron microscope provided with C-F mini lens and zoom condenser lens system," Proc. Eur. Reg. Conf. Electron Microscopy I, pp. 389-390, 1982.
- Tang, T. T. and Song, J. P., "Side pole-gap magnetic electron lenses," Optik, Vol. 84, No. 3, pp. 108-112, 1991.