

## 유한요소법을 사용한 주사전자 현미경의 전자렌즈 설계 및 해석에 관한 연구

박 근<sup>#</sup>, 정현우<sup>\*</sup>, 박만진<sup>\*\*</sup>, 김동환<sup>\*\*\*</sup>, 장동영<sup>\*\*\*</sup>

### A Study on Design and Analysis for Magnetic Lenses of a Scanning Electron Microscope using Finite Element Method

Keun Park<sup>#</sup>, Hyunwoo Jung<sup>\*</sup>, Manjin Park<sup>\*\*</sup>, Donghwan Kim<sup>\*\*\*</sup> and Dongyoung Jang<sup>\*\*\*</sup>

#### ABSTRACT

The scanning electron microscope (SEM) is one of the most popular instruments available for the measurement and analysis of the micro/nano structures. It is equipped with an electron optical system that consists of an electron beam source, magnetic lenses, apertures, deflection coils, and a detector. The magnetic lenses play a role in refracting electron beams to obtain a focused spot using the magnetic field driven by an electric current from a coil. A SEM column 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 work concerns finite element analysis for the electron magnetic lenses so as to analyze their magnetic characteristics. To improve the performance of the magnetic lenses, the effect of the excitation current and pole-piece design on the amount of resulting magnetic fields and their peak locations are analyzed through the finite element analysis.

**Key Words** : Scanning Electron Microscope (주사전자현미경), Finite Element Analysis (유한요소해석), Electro-magnetic Lens (전자렌즈), Electron optical system (전자광학계)

#### 1. 서론

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 측

정장비로 생물학, 의학 및 다양한 공학 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 최근 나노기술의 발전 및 신기술 개발에 힘입어 점차적으로 활용 범위가 넓어지고 있다. 그러나 현재 전자현미경은 일본과 독일이 거의 독점하고 있으며, 아직까지 국산화되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 수 나노

☛ 접수일: 2006년 11월 23일; 게재승인일: 2007년 7월 2일

# 교신저자: 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

E-mail: kpark@snut.ac.kr Tel. (02) 970-6358

\* 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\*\* 서울산업대학교 나노생산기술연구소

미터 스케일의 분해능을 갖는 전자현미경의 개발을 최종 목표로 주사전자 현미경의 전자광학계를 분석하고 설계하기 위한 기초연구를 수행하고자 한다.

주사전자 현미경의 전자광학계는 크게 전자빔원(electron beam source), 전자기렌즈(electro-magnetic lens), 검출기(detector) 등으로 이루어져 있다.<sup>1,2</sup> 이중 전자 렌즈는 일반 광학계에서의 광학 렌즈와 마찬가지로 전자광학계에서도 원하는 위치에 전자빔의 초점을 맞추기 위해 사용된다. 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 설계 과정에서 적절한 극편의 구조 및 치수의 선정이 매우 중요하며, 이러한 목적으로 유한요소해석을 사용하여 전자렌즈의 집속특성을 예측하기 위한 연구가 진행되어 왔다.<sup>5-8</sup>

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS™를 사용하여 전자렌즈의 기본 특성에 관해 고찰하고 실험결과와의 비교를 통해 해석의 신뢰성을 검증하도록 하겠다. 또한 열전자형 주사전자현미경용 전자렌즈계에 대한 해석을 수행하여 각각의 렌즈의 특성 및 전체 렌즈계의 특성을 분석하고, 이를 통해 전자광학계의 설계를 위한 기반을 확립하고자 한다.

## 2. 주사전자현미경의 전자광학계

### 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. 열전자 방사형 전자빔원은 직경 150 $\mu$ m의 텅스텐 필라멘트를 'V'자 형태로 구부려서 사용하며, 양단에 고전압을 인가함으로써 온도를 2700K 이상으로 증가시켜 전자를 방출시키는 역할을 한다.

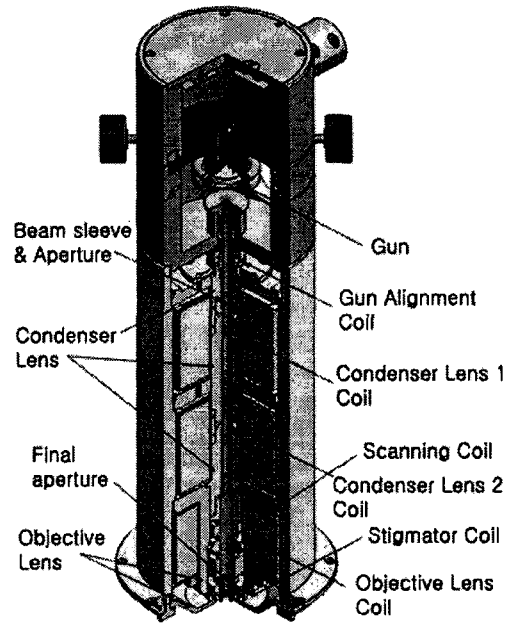


Fig. 1 Overview of the developed SEM column unit

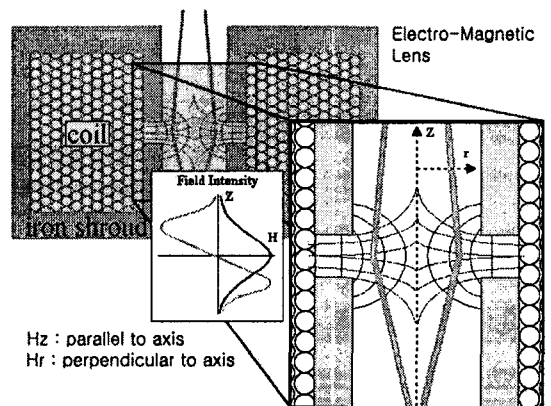


Fig. 2 Basic structure of an electromagnetic lens

### 2.2 전자 렌즈

전자 렌즈는 일반적으로 원통형으로 권선된 코일에 전류를 부과하여 자기장을 형성시킴으로써 전자빔의 방향을 제어해주는 역할을 수행한다. Fig. 2에 전자 렌즈의 기본 구성 및 원리를 도시하였다. 주사전자현미경의 전자광학계는 일반적으로 집속렌즈(Condenser Lens; CL)와 대물렌즈(Objective Lens; OL)로 구성되어 있다. Fig. 1에 도시된 바와 같이 전자총 하단에 2개의 집속렌즈가 위치하고

있으며, 그 하단에 대물렌즈가 위치하고 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.

### 3. 유한요소법을 이용한 자기장 해석

#### 3.1 전자기장 해석의 이론적 배경

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

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

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

식 (7)과 같은 오옴의 법칙을 식 (3)에 대입하여 정리하면 식 (8)와 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 포텐

셜  $V$ 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 식 (11)과 같이 자기 벡터 포텐셜  $\mathbf{A}$ 에 대한 수식으로 정리되며, 식 (11)을 유한요소 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 전자렌즈의 자기장분포 해석 및 검증

본 절에서는 주사전자현미경 전자광학계의 주요 부품인 전자 렌즈의 특성을 유한요소해석을 통해 예측하고, 실험을 통해 해석 결과를 검증하고자 한다. 렌즈는 전자빔의 집속도를 높이기 위해 순철로 제작된 극편 주변에 구리선 코일이 감겨지는 구조로 되어 있다. 일반적으로 렌즈의 집속도를 높이기 위해 극편간의 간극을 최대한 좁게 설계해주는데, 이로 인해 실제 렌즈 내부에서의 자기장 측정이 용이하지 않은 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 자기장의 측정이 용이하도록 실험용 렌즈를 설계/제작하였다. Table 1에 실험용 렌즈의 주요 치수를 요약하였으며, 극편간의 간격은 12mm로 설정하였다. 인가전류는 각각 1.0, 1.5, 2.0A로 변화시켜가며 결과를 관찰하였다. Fig. 3에 렌즈의 해석 영역을 도시하였는데 렌즈의 형상이 축대칭인 점을 감안하여 2차원 축대칭 형태로 해석 영역을 정의하였다. Fig. 4에 해석 결과로부터 얻어진 자속선(flux line)의 분포를 도시하였는데, 코일에서 발생된 자기장이 상대적으로 투자율이 높은 순철과 탄소강 부위를 투과하지 못함으로 인해 극편 주변에서 집중됨을 알 수 있다.

Table 1 Basic specifications of the test magnetic lens

Dimensions	Coil	Case
Inner radius (mm)	21.75	14.5
Outer radius (mm)	30.5	45.0
Height (mm)	20.0	57.0

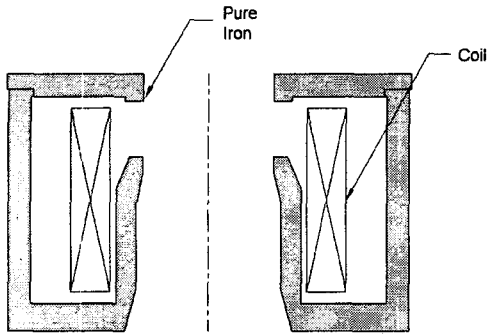


Fig. 3 Analysis domain for the test magnetic lens

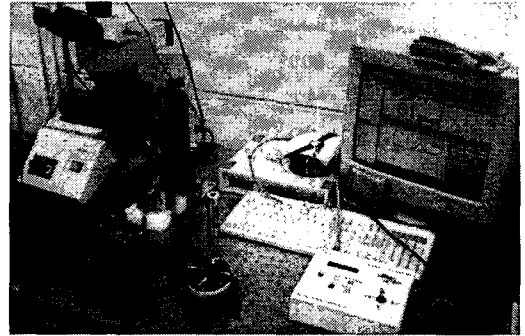


Fig. 5 Experimental setup to measure magnetic flux

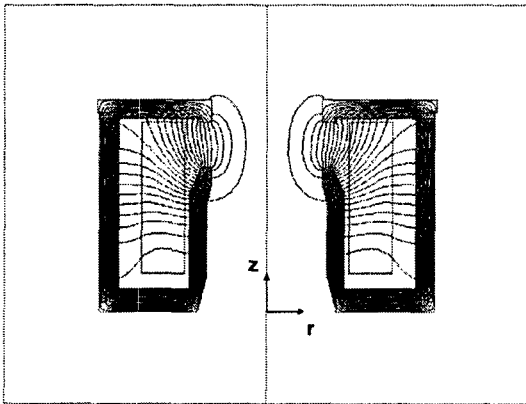


Fig. 4 Distribution of the magnetic flux lines

이러한 현상을 정량적으로 관찰하기 위해 렌즈의 바닥면으로부터의 중심축 거리( $z$ )에 따른 자속밀도( $B_z$ )의 변화를 측정하여 해석 결과와 비교하였다. Fig. 5 에 렌즈의 자속밀도 측정을 위한 실험장치 구성을 도시하였다. 자속밀도는 Pasco 社의 CI-6520A 장비를 사용하여 측정하였으며, 자기센서를 렌즈 내부로 이송시키며 발생하는 신호를 컴퓨터로 전송하여 자속밀도의 변화를 측정하였다.

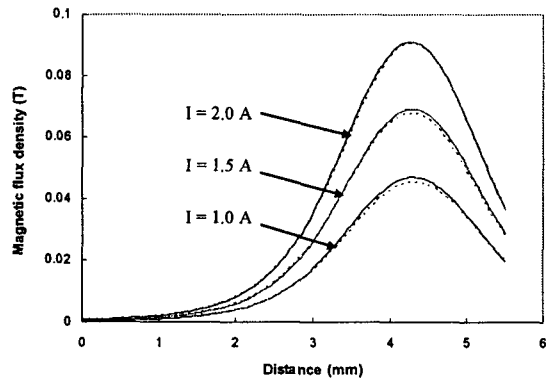


Fig. 6 Comparison of the magnetic flux distributions

Fig. 6 에 렌즈의 중심축 거리 및 인가 전류에 따른 자속밀도의 변화를 그래프로 비교하였으며, 여기서 실선은 실험결과, 점선은 해석결과에 해당한다. 그림에서 확인할 수 있듯이 해석으로부터 얻어진 자속밀도의 변화 경향이 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. Table 2 에 인가전류에 따른 최대 자속밀도의 값을 정량적으로 비교하였다. 전류의 크기가 감소할수록 실험치와의 오차가 소폭 증가함을 알 수 있는데, 이는 재료의 상대투자율을 상수로 가정한 점에서 기인한 것으로 판단된다.

Table 2 Comparison of the peak flux with experiments

Excitation current (A)		1.0	1.5	2.0
Peak flux	Simulation (T)	0.0453	0.0679	0.0906
	Experiment (T)	0.0479	0.0694	0.0911
	Error (%)	4.12	2.08	0.62

#### 4. 전자렌즈계의 자기장특성 해석

##### 4.1 해석의 개요

전술한 바와 같이 주사전자현미경의 전자광학계는 2개의 집속렌즈(CL)와 1개의 대물렌즈(OL)로 구성되어 있다. Table 3에 각각의 렌즈에 대한 주요 사양을 비교하였다. 렌즈는 전자빔의 집속도를 높

이기 위해 순철(상대투자율 4000)로 제작된 극편 주변에 구리선 코일이 감겨지고, 탄소강(상대투자율 300)으로 제작된 경통이 주변에 위치하는 구조로 되어 있다. 집속렌즈를 포함한 경통 내부는 해석의 단순화를 위해 2차원 축대칭 형상으로 가정할 수 있으며, Fig. 7에 해석 영역을 도시하였다.

을 위해 2차원 4절점 사각형 요소를 사용하여 유한요소망을 구성하였고, 특히 극편 주변에서의 자기장의 급격한 변화를 적절히 묘사하기 위해 적응적 요소망 세분화(Adaptive mesh refinement)를 실시하였다.

Table 3 Basic specifications of three magnetic lenses

Lens	CL (1)	CL (2)	OL
Current (A)	0.57	0.50	1.66
No. of turns	920	920	600
Area (mm <sup>2</sup> )	1690	1690	1045
Current density (A/mm <sup>2</sup> )	0.3103	0.2722	0.9531

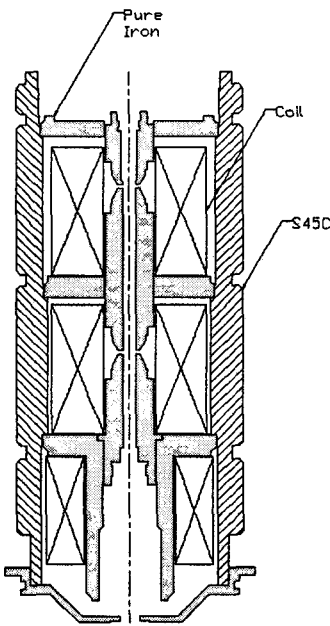


Fig. 7 Analysis domain for the electromagnetic lens system of a SEM column

#### 4.2 집속렌즈의 자기장특성 해석

Fig. 7 에 도시된 바와 같이 주사전자현미경의 경통 내부에는 전자총(상측)으로부터 시편(하측)에 이르기까지 2 개의 집속렌즈와 1 개의 대물렌즈 순서로 구성되어 있으며, 편의상 상측 집속렌즈를 CL (1), 하측 집속렌즈를 CL (2)로 명명하였다. 해석

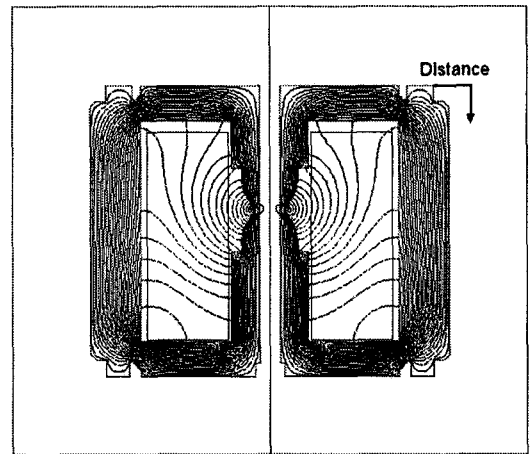


Fig. 8(a) Magnetic flux lines for the 1<sup>st</sup> condenser lens

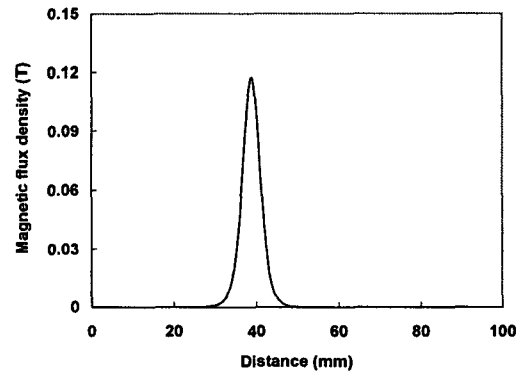


Fig. 8(b) Axial flux distribution for the 1<sup>st</sup> condenser lens

Fig. 8(a)에 CL (1)에 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 정상적으로 관찰하기 위해 Fig. 8(b)에 렌즈의 중심축 거리에 따른 자속밀도( $B_z$ )의 변화를 그래프로 표시하였다. 여기서 렌즈의 중심축 거리는 렌즈의 상단

부에서부터 하단 방향으로 이동하는 것으로 정의하였다. 자기장이 최대인 지점은 렌즈의 상면에서부터 38.62mm에 해당하며, 이때의 최대 자속밀도는 0.1188T로 예측되었다.

마찬가지 방법으로 CL (2)에 대한 자기장특성 해석을 실시하였다. Fig. 7에 도시된 바와 같이 CL (2)의 코일 치수가 CL (1)과 동일하고 극편 및 경통부의 형상도 CL (1)과 유사한 관계로 자속선 및 자속밀도의 분포는 Fig. 8의 경향과 유사하게 나타났다. 정량적인 측면에서 비교하면 자기장이 최대인 지점은 렌즈의 상면에서부터 30.56mm에 해당하며, 이때의 최대 자속밀도는 0.1079T로 예측되었다.

### 4.3 대물렌즈의 자기장특성 해석

Fig. 9(a)에 대물렌즈의 자속선의 분포를 도시하였다. 대물렌즈의 경우 측정하고자 하는 시편 상단에 위치하게 되며, 따라서 렌즈의 하단에 자기장이 집중되도록 극편의 형상을 설계하였다. 해석 결과를 보면 집속렌즈의 경우와 마찬가지로 자기장이 극편 주변에서 집중됨을 알 수 있다. Fig. 9(b)에 렌즈의 중심축 거리에 따른 자속밀도의 변화를 그래프로 표시하였다. 자기장이 최대인 지점은 렌즈 상면에서부터 85.88mm에 해당하며, 이때의 최대 자속밀도는 0.0705T로 예측되었다. 대물렌즈의 경우 최대 자속밀도의 폭이 집속렌즈에 비해 상대적으로 넓어 집속효율이 떨어짐을 알 수 있는데, 이는 여타 부품의 장착을 위해 렌즈 극편간의 간격이 상대적으로 넓게 설계되었기 때문으로 분석된다.

### 4.4 전체 시스템의 자기장특성 해석

본 절에서는 전체 렌즈계에 대한 자기장특성 해석을 수행하였다. 해석은 Fig. 7에 도시된 경통 내부 전자렌즈계에 대해 수행하였다. Fig. 10(a)에 해석을 통해 얻어진 전체 시스템의 자속선의 분포를 도시하였다. 전술한 바와 같이 2개의 집속렌즈에 비해 대물렌즈에서의 전류밀도가 상대적으로 큰 관계로(Table 3 참조) 자속선이 대물렌즈에 집중됨을 알 수 있다.

Fig. 10(b)에 경통 상부로부터의 렌즈의 중심축 거리에 따른 자속밀도의 변화를 그래프로 표시하였으며 역시 각각의 렌즈 극편 부위에서 자기장이 집중됨을 확인할 수 있었다. 한편 대물렌즈의 경우

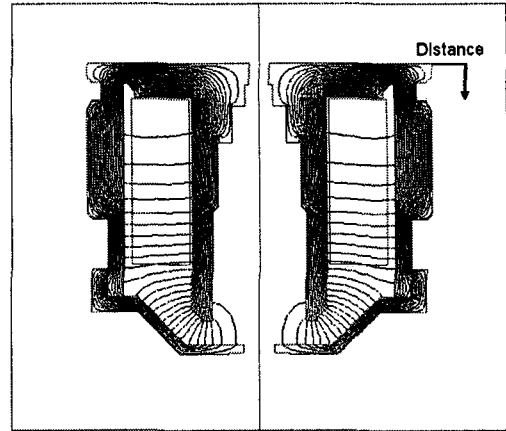


Fig. 9(a) Magnetic flux lines for the objective lens

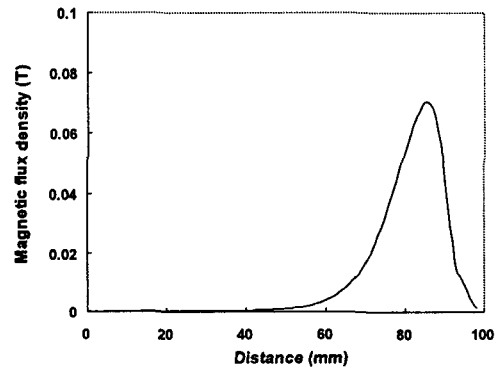


Fig. 9(b) Axial flux distribution for the objective lens

최대 자속밀도가 2개의 집속렌즈에 비해 적게 나타났다. 이는 Fig. 10(a)의 자속선 분포에서 대물렌즈에 자속선이 집중되는 현상과 대조적임을 알 수 있다. 상기 결과는 렌즈 극편간의 간격이 상대적으로 넓어 집속효율이 떨어지기 때문으로 분석된다. 따라서 현재 설계사양에서 대물렌즈에서의 집속효과를 제고하기 위해서는 대물렌즈에 인가되는 전류의 크기를 상대적으로 높게 설정해야 함을 알 수 있다.

또한 전체 시스템에서 렌즈 상호간의 간섭효과를 고찰하기 위해 전체 시스템에서의 렌즈별 최대 자속밀도값을 Table 4에 요약하였다. 전체 시스템에서의 최대 자속밀도값을 렌즈별 독립적인 해석모델에서의 결과와 비교해보면 1% 내외의 오차를 보여 렌즈 상호간에 자기장의 간섭이 존재함을 알 수 있다. 특히 집속렌즈 (2)의 경우에 오차가

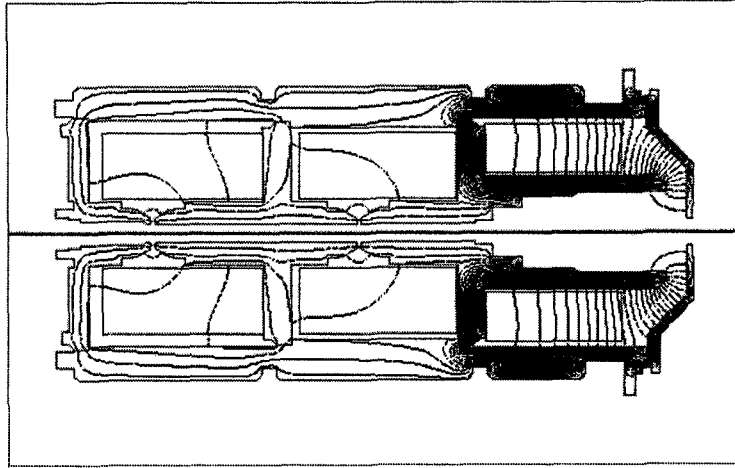


Fig. 10(a) Magnetic flux lines for the electromagnetic lens system

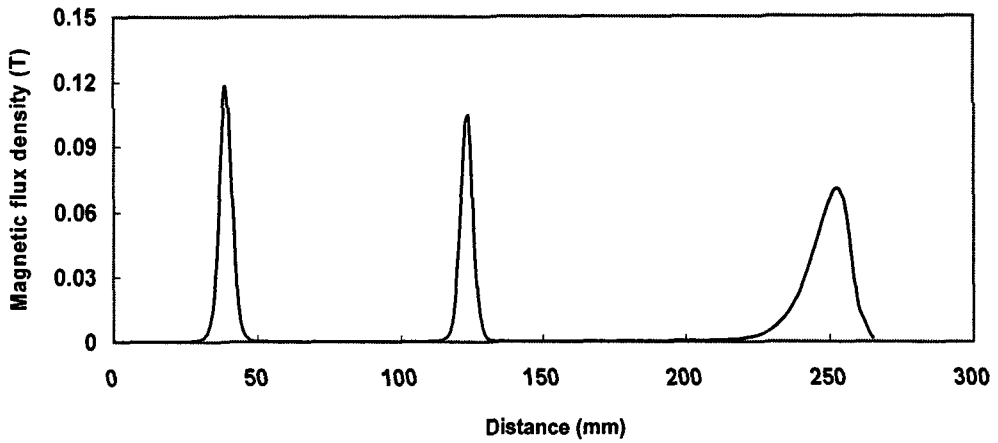


Fig. 10(b) Axial flux distribution for the electromagnetic lens system

Table 4 Comparison of the peak magnetic densities for various analysis models

Lens type		CL (1)	CL (2)	OL
Peak location (mm)		38.62	123.10	252.12
Peak density (T)	Separated model	0.1188	0.1079	0.0705
	Entire model	0.1198	0.1093	0.0707
	Error (%)	0.44	1.29	0.19

1.29%로 가장 크게 나타났는데, 이는 중간지점에 위치한 집속렌즈 (2)가 집속렌즈 (1) 및 대물렌즈 모두의 영향을 받는 관계로 단일 렌즈에 대한 해

석결과보다 최대 자속밀도의 증가폭이 큰 것으로 분석된다. 이러한 결과로부터 렌즈간 간섭을 효과적으로 고려하기 위해서는 해석 모델을 전체 영역

으로 확장하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

## 5. 결론

이상으로 본 연구에서는 열전자형 주사전자 현미경의 기본 특성에 대해 고찰하고, 보다 체계적인 분석을 위해 유한요소법을 사용하여 주사전자 현미경의 전자렌즈 특성을 분석하였다. 이러한 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 주사전자 현미경의 기본 구조를 고찰하였고, 2 개의 집속렌즈와 1 개의 대물렌즈로 구성된 전자렌즈계의 설계특성에 대해 분석하였다.
- (2) 유한요소법을 사용하여 전자렌즈 주변의 자기장 특성을 해석하고, 이를 검증하기 위해 별도의 실험을 수행하였다. 또한 해석결과를 실험결과와 비교함으로써 해석의 신뢰도를 검증하였다.
- (3) 열전자형 주사전자 현미경의 집속렌즈와 대물렌즈에 대해 유한요소해석을 실시하였고, 해석 결과로부터 렌즈의 형상설계에 따른 전자렌즈의 집속특성을 고찰하였다.
- (4) 주사전자현미경 전자렌즈계 전체 영역에 대한 해석을 실시하였고 렌즈별 해석결과와 비교하여 렌즈 상호간의 자기장 간섭특성을 고찰하였다.

이러한 연구결과는 향후 주사전자 현미경의 설계과정에서 최적의 집속특성을 갖는 렌즈계의 설계에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 제안된 해석기법을 전자빔의 궤적 예측기법과 연계함으로써 제품 개발과정에서 활용할 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., "Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis," Prentice Hall, 1993.
2. Reimer, L., "Scanning Electron Microscopy -Physics

of Image Formation and Microanalysis," Springer-Berlin, 1998.

3. Hawkes, P. W., "Magnetic Electron Lenses," Springer-Berlin, 1982.
4. Orloff, J., "Handbook of Charged Particle Optics," CRC Press, 2004.
5. Juma, S. M. and Mulvey, T., "Miniature rotation-free magnetic electron lenses for the electron microscope," J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 11, pp. 759-764, 1978.
6. 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," Proc. SEM'86, pp. 879-915, 1986.
7. Zhu, X. and Munro, E., "A computer program for electron gun design using second-order finite elements," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 7, No. 6, pp. 1862-1869, 1989.
8. Alamir, A. S. A., "A study on effect of current density on magnetic lenses," Optik, Vol. 114, No. 2, pp. 85-88, 2003.