

주사전자현미경 렌즈의 해석을 통한 최적의 빔 특성 연구

배진호* · 김동환*†

* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Optimal Electron Beam Characteristics by Lenses Analysis Using Scanning Electron Microscopy

Jinho Bae* and Dong Hwan Kim*†

*Mechanical System Design Engineering Department, Seoul Nat'l Univ. of Science & Technology

(Received April 29, 2014 ; Revised August 30, 2014 ; Accepted October 24, 2014)

Key Words: SEM(주사전자현미경), Optimal Design(최적 설계), Column Design(경통 설계), Ray Tracing(광선 추적), Lens Analysis(렌즈 해석), Sensitivity Analysis(민감도 분석), Design Parameter(설계 인자), Beam Characteristics(빔 특성)

초록: 이 논문은 SEM(Scanning Electron Microscopy) 경통부에서 전자빔의 집속특성을 최적화하기 위한 방법을 다루고 있다. SEM에서 물체 표면을 확대하기 위해서는 경통부를 지나는 전자빔을 효과적으로 집속하여 표면에 충돌하는 프로브 직경을 줄이는 것이 중요하다. 이 전자빔의 집속정도를 나타내는 지표가 반배율이다. 본 연구는 전자빔의 집속특성을 효과적으로 구현하기 위해 그에 영향을 끼치는 경통부의 설계 인자들을 렌즈 해석과 광선 추적을 통해 알아본다. 이 결과를 근거로 민감도 분석을 수행하여 설계 인자들이 빔의 집속에 끼치는 영향의 정도를 정량적으로 비교해 볼 수 있다. 이러한 전자빔의 특성에 따른 설계 인자의 분석은 경통부 설계에 있어 중요한 기초 정보로 활용될 수 있다.

Abstract: This paper presents a design method for optimizing the focused beam characteristics, which are mainly determined by the condenser lenses in a scanning electron microscopy (SEM) design. Sharply reducing the probe diameter of electron beams by focusing the condenser lens (i.e., the rate of condensation) is important because a small probe diameter results in high-performance demagnification. This study explored design parameters that contribute to increasing the SEM resolution efficiently using lens analysis and the ray tracing method. A sensitivity analysis was conducted based on those results to compare the effects of these parameters on beam focusing. The results of this analysis on the design parameters for the beam characteristics can be employed as basic key information for designing a column in SEM.

- 기호설명 -

H : 자기장 세기(A/m)
 μ : 상대 투자율
 ∇ : 그래디언트 연산자
 A : 자기 벡터 포텐셜(Wb/m)
 σ : 전도율
 t : 시간(s)
 r : 경통 축의 수직방향 거리(mm)

z : 경통 축 방향 거리(mm)
 e : 전자의 전하(C)
 m : 전자의 질량(kg)
 V : 빔 전압(V)
 B : 자속 밀도(Tesla)
 $f_i, i=1,2,3$: 렌즈에서 초점까지 거리(mm)
 $p_i, i=1,2,3$: 이미지 평면에서 렌즈까지 거리(mm)
 g : 렌즈의 극편 간격군
 r : 경통 내 반경군
 p : 렌즈간 거리군
 L : 개별 렌즈들의 축방향 길이군
 R : 개별 렌즈들의 축에 수직인 길이(반경)군

† Corresponding Author, dhkim@seoultech.ac.kr
 © 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

SEM(Scanning Electron Microscopy)은 현미경보다 더 작은 미세한 영역을 관찰하기 위해 고안된 측정 장비이다. 이는 최근 나노 과학 및 산업의 발전에 힘입어 그 활용도와 중요도가 더욱 증대되고 있다.

SEM은 크게 5부분으로 구분을 지을 수 있다. 전자총(electron gun)에서는 관찰에 이용되는 매질인 전자를 발생시키며, 경통부(column system)에서는 그 전자들을 시편(Specimen)의 원하는 곳에 주사(scan)시키기 위한 역할, 즉 전자 빔의 집속(condensing) 및 편향(deflection)을 담당한다. 그리고 검출기(detector)는 시편과의 상호작용 후, 발생한 전자를 검출하는 역할을 하며, 영상출력시스템은 그 전자들의 양을 분석하여 시편의 표면을 화면에 출력한다. 마지막으로 진공시스템은 SEM의 내부를 고진공상태(10^{-5} torr 이하)로 유지시키는 역할을 한다.⁽¹⁾

일반적으로 경통부는 3개의 전자기렌즈(electromagnetic lens)와 2쌍의 편향기(deflector)로 구성되어 전자빔을 시편의 원하는 영역에 주사시키는데, 그 영역의 크기 따라 화면에 출력되는 배율이 결정된다. 배율이 높이기 위해서 시편에 충돌하는 전자 빔, 즉 프로브 직경(probe diameter)이 줄어들어야 하는데, 반배율(Demag: Demagnification)로 전자 빔이 줄어든 정도를 파악할 수 있다.

본 연구에서는 이 전자 빔의 집속 특성을 효과적으로 구현하기 위해 경통부의 설계 인자들을 분석하고자 한다. 이를 위해 렌즈 해석, 광선 추적(ray tracing) 그리고 민감도 분석을 이용하며, 상용 전자기장 해석 툴(tool)인 OPTICS를 사용한다.

2. 전자기 렌즈 해석

2.1 이론적 배경

전자들은 전자총에서 발생하여 경통부에 있는 2개의 집속 렌즈(CL: Condenser lens)과 1개의 대물렌즈(OL: Objective lens)를 거쳐 집속이 된다.(Fig.1) 전자 빔이 전자기 렌즈에서 집속되는 원리는 로렌츠 법칙을 따른다.(Fig.2) 렌즈 코일에 흐르는 전류에 의해 극편(pole-piece)에 H 자기장이 형성되고, 이 자기장의 r 방향 성분(H_r)이 전자 빔을 회전시키게 된다. 회전된 전자 빔은 z 방향과 수직으로 전류벡터가 형성되며, 이 벡터성분과 z 방향 자기장 성분(H_z)의 상호작용에 의해 전자가 z 축으로 굴절된다.⁽⁴⁾ z 방향의 원하는 지점으로 전자 빔을 집속시키기 위해서는 렌즈의 z 방향 자속 밀도인 B_z 가 중요한 역할을 하며, 해석의 지배방정식⁽⁵⁾은 다음과 같다.

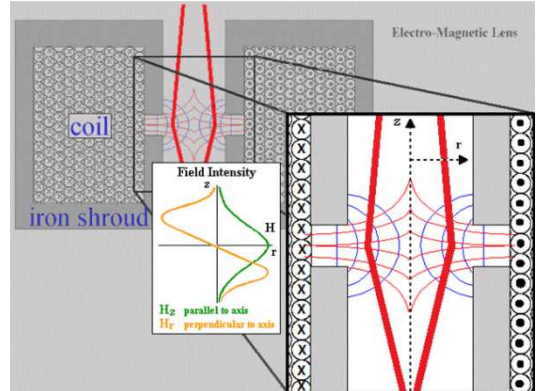


Fig. 1 Basic structure of an electro-magnetic lens⁽³⁾

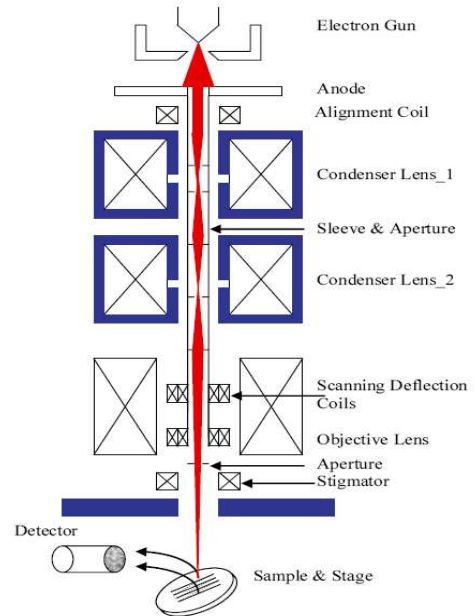


Fig. 2 Schematic structure of the thermionic SEM⁽²⁾

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \tag{1}$$

여기서 μ 는 상대투자율, \mathbf{A} 는 자기 벡터 포텐셜 (Wb/m), σ 는 전도율(S) 그리고 t 는 시간(s)이다.

2.2 수치해석의 의의

시스템을 제작하기 전, 그 성능을 정량적인 수치로 파악할 수 있고 그를 제작에 적용하여 원하는 성능을 구현하는데 지침이 된다는 측면에서 수치해석이 의의를 가진다.

본 연구에서 렌즈해석 목적은 전자 빔의 경로를 제어하는 요소인 B_z 를 파악하기 위함이고, 그를 통해 광선 추적을 하는 목적은 빔의 집속을 통해 상이 맺히는 지점(image plane), 집속 길이(focal length), 그리고 반배율을 파악하는 데 있다.

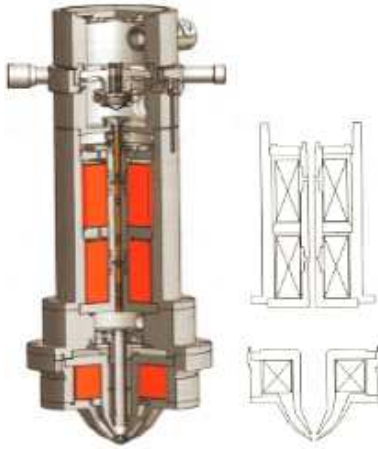


Fig. 3 Simplification of a real column system⁽⁶⁾

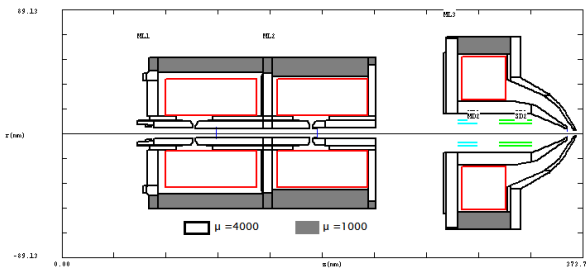


Fig. 4 Relative permeability of lenses

2.3 전자기 렌즈 해석

OPTICS의 전자기장, 광선추적의 해석 신뢰성은 실험을 통해 타당하다는 결론 내릴 수 있다.⁽⁷⁾

Fig. 3은 경통부의 해석을 위해 원통형인 SEM 경통 단면을 단순화한 모습이다. OPTICS에서는 개별렌즈들의 전자기장 해석결과를 바탕으로 광선추적을 수행하기 때문에 광선추적 결과를 위해서는 단일 렌즈들의 해석이 선행되어야 한다.⁽⁸⁾

렌즈를 구성하는 각 부분의 물성치인 μ (상대투자율)와 해석 초기조건(input data)이 각각 Fig. 4와 Table 1에 나타나있다. OPTICS에서는 해석을 위한 초기조건으로 렌즈 형상정보(메쉬 격자 설정), 물성치(상대투자율), 그리고 전류 밀도를 필요로 한다. 렌즈 속의 붉은 색 사각형은 구리 코일이 감겨져 있는 부분을 의미한다.

2.3.1 집속 렌즈1(condenser lens 1) 해석

렌즈의 형상의 변화가 큰 부분(특히 극편 영역과 물성치가 변하는 부분)에서 메쉬(mesh) 밀도가 높도록 설정하였고, 축 방향 길이(117 mm)에 총 89개, 반경 방향 길이(64.5 mm)에 총 64개 선으로 메쉬 격자를 설정하였다. 그 결과 극편 영역에서 자속 밀도가

Table 1 OPTICS Input data

Lens type	Current [A]	Cross-Section Area of Coil [cm ²]	No. of turn [turns]	Excitation [Ampere turns]	Current Density [Ampereturns /cm ²]
CL1	0.6000	16.9	920	552.0000	32.6627
CL2	1.1000	16.9	920	1012.0000	59.8817
OL	1.1219	9.8374	604	677.6276	- 68.8828

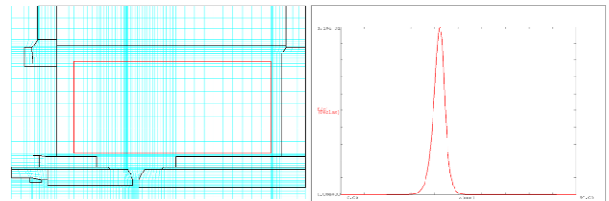


Fig. 5 Meshing & Distribution of B_z in CL 1

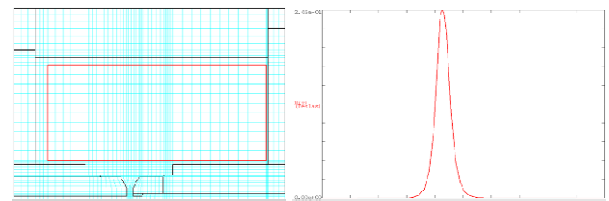


Fig. 6 Meshing & Distribution of B_z in CL 2

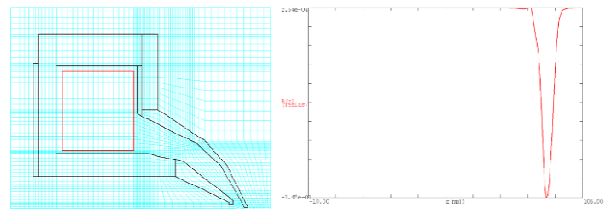


Fig. 7 Meshing & Distribution of B_z in OL

높은 밀도로 형성이 되었으며, 그 최대값은 0.1182 T이다.(Fig. 5)

2.3.2 집속 렌즈 2(condenser lens 2) 해석

렌즈의 형상의 변화가 큰 부분(특히 극편 영역과 물성치가 변하는 부분)에서 메쉬 밀도가 높도록 설정하였고, 축 방향 길이(100.5 mm)에 총 68개, 반경 방향 길이(64.5 mm)에 총 54개의 선으로 메쉬 격자를 설정하였다. 그 결과 극편 영역에서 자속 밀도가 높은 밀도로 형성이 되었으며, 그 최대값은 0.2259 T이다.(Fig. 6)

2.3.3 대물 렌즈(Objective Lens) 해석

렌즈의 형상의 변화가 큰 부분(특히 극편 영역과 물성치가 변하는 부분)에서 메쉬 밀도가

높도록 설정하였고, 축 방향 길이(115 mm)에 총 82개, 반경 방향 길이(80 mm)에 총 71개의 선으로 메쉬 격자를 설정하였다. 그 결과 극편 영역에서 자속 밀도가 높은 밀도로 형성이 되었으며, 그 최대값은 -0.1453 T 이다.(Fig. 7)

3. 최적의 빔 특성연구

3.1 빔의 집속 특성 정의

최적의 빔 집속 특성을 판단하기 위해서는 그 특성을 정량화할 필요가 있다. 이를 위해 반배율(Demag)을 빔의 집속 특성으로 정의한다.⁽¹⁰⁾ 이는 빔 원(source)에서 발생한 빔의 직경이 시편에 다다를 때까지 줄어든 비율로 기하학적인 정의는 Fig. 8과 같고, 그 관계된 식은 다음과 같다.

$$Demag = \frac{f_1 f_2 f_3}{p_1 p_2 p_3} \quad (2)$$

여기서 f_i , $i=1,2,3$ 는 렌즈에서 초점까지의 거리이고 p_i , $i=1,2,3$ 는 이미지 평면(image plane)으로부터 렌즈까지의 거리이다.(단, $n=1, 2, 3$ 으로 그 위치는 Fig. 8에 도시됨)

3.2 광선추적이론

반배율을 알기 위해서는 빔이 한 점으로 모이는 초점의 위치를 알아야 한다. 이는 광선추적을 통해 알 수 있으며, 여기에 관련된 근축광선 방정식⁽¹¹⁾은 다음과 같다.

$$\ddot{r}(z) + \frac{e}{8mV} B^2(z)r(z) = 0 \quad (3)$$

여기서 r 은 경통의 축(z 방향)에 수직인 위치(mm), e 는 전자 전하(C), m 은 전자 질량(kg), V 는 빔 전압(V) 그리고 B 는 자속 밀도(Tesla)이다.

3.3 광선추적에 의한 경통부 해석

렌즈 해석을 통해 경통부의 자기포텐셜(Fig. 9)과

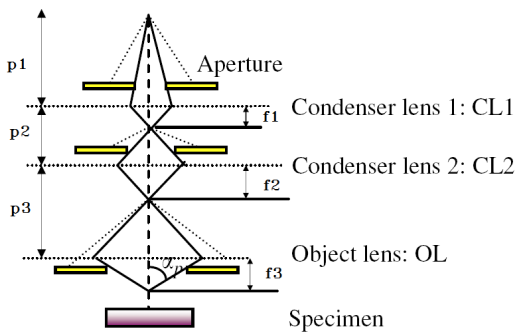


Fig. 8 Schematic diagram for focusing lenses⁽⁹⁾

B_z 의 분포(Fig. 10)를 구할 수 있으며 OPTICS를 사용하여 전자들이 경통부에 입사 하였을 때의 경로를 추적할 수 있다.(Fig. 11) 여기에서 두 개의 녹색 사각형들은 개별렌즈 극편의 양끝이며, 그 중심의 수치가 극편의 중심을 의미한다. 각 렌즈들 오른쪽의 파란색 막대(bar)들은 상이 맺히는 이미지 평면의 위치를 의미하며, 가장 오른쪽에 위치하는 이미지 평면이 바로 전자빔 프로브가 주사되는 위치이다.

Table 2에서 이 경통부 해석과 광선추적 결과들을 요약하였다. Fig. 11로부터 식 (3)에 의해 부분 반배율(Sub Demag)를 계산하였고, 반배율 0.006은 부분 반배율의 값들의 곱으로 식 (2)에 의한 결과이다.

3.4 민감도 분석

3.4.1 설계인자 분류

시스템의 특성(개별 요소들이 반응값에 끼치는 영향)을 파악하기 위해서는 특정한 기준에 따라 시스템에 변화를 주고 반응을 알아보는 것이 일반적이다. 반배율을 효과적으로 줄이기 위한 설계 인자를 구하기 위해 부피를 그 기준으로 정하고 경통에 부피 변화를 주기로 하였다.

우선 반배율 값에 영향을 주는 경통부의 설계 인자를 선정하기 위해 원기둥인 경통부의 부피를 일정하게 유지시킨 상태에서 경통부의 형상

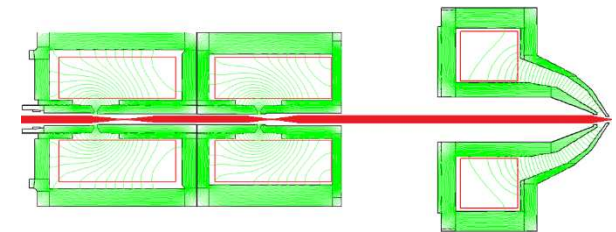


Fig. 9 Distribution of the magnetic potential in the lens

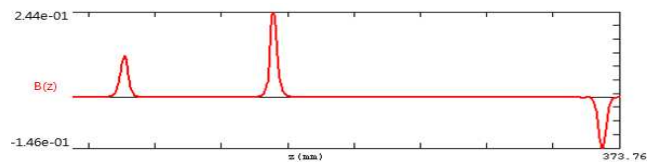


Fig. 10 Variation of the axial magnetic flux (B_z)

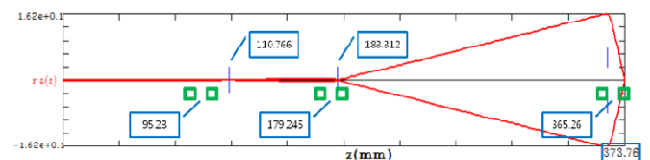


Fig. 11 Ray-tracing in the column system

Table 2 Results by the column system analysis

	CL 1	CL 2	OL	Demag
Excitation [Amperereturns]	552.8595	1009.5304	677.4963	0.0006
Max B_z [T]	0.11841	0.24403	-0.14589	
Peak location [mm]	95.09065	183.312	373.765	
Image Plane [mm]	110.766	183.312	373.765	
Sub Demag	0.1675	0.0653	0.0529	

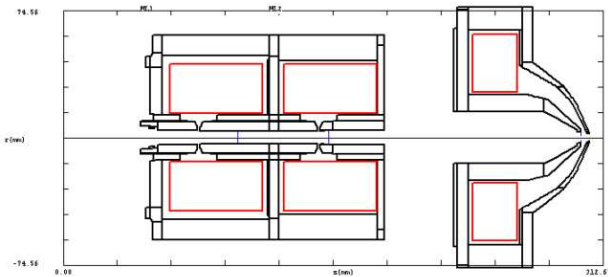


Fig. 12 1.1R & 1/1.21L column condition

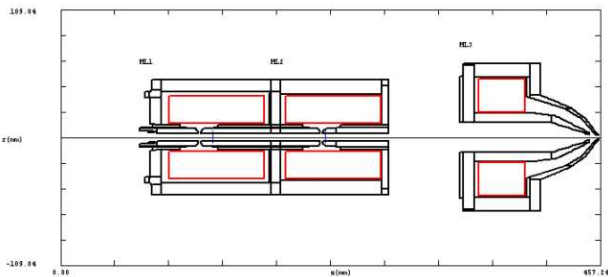


Fig. 13 0.9R & 1/0.81L column condition

변화를 시도하고 반배율을 살펴보았다. 단면을 기준으로 길이 방향(Fig. 4 에서 가로방향)과 반경 방향(Fig. 4 에서 세로방향)의 두 방향으로 나누고, 경통부 반경의 10%만큼의 가감효과를 주었다.

원기둥의 부피($V = \pi R^2L$; R 은 경통부 반경, L 은 경통부 길이)를 감안하면, 두 가지 조건 1.1R & $\frac{1}{1.21}L$ (Fig. 12)과 0.9R & $\frac{1}{0.81}L$ (Fig. 13)이 경통부 반경 R 의 10% 가감 효과에 해당한다. 이 두 조건을 바탕으로 시뮬레이션을 해보면, 설계 인자 군으로 설정하기 위해 변화가 되는 요소들이 눈에 들어나게 된다. 곧, 렌즈 극편 간격들의 변화, 경통내 반경의 변화, 렌즈 사이 거리들의 변화, 그리고 렌즈의 길이(L)나 반경(R)의 변화가 렌즈의 자기 포텐셜(magnetic potential)의 변화를 초래하고 그에 따라 반배율 값의 변화가 유발될 것으로 예상할 수 있다. 두 조건 변화에 따른 반배율은 각각 0.0001 과 0.0029 에 해당한다.

두 번의 예비실험을 통해 알 수 있는 사실은 다음과 같다.

- 설계 인자간의 민감도 차이: 부피를 일정하게 유지시키고 R 과 L 에 일정한 변화를 주었음에도 불구하고, 반배율 값의 차이가 크게 났으며, 또한 그 값의 변화가 비선형적이었다. 이를 통해 경통부의 길이와 반경방향의 비율 변화가 반배율 값에 변화를 준다는 사실과 그 변화된 여러 요소들이 반배율 값에 끼치는 정도에 차이가 있다는 것을 추론 할 수 있다. 즉, 그 요소들을 설계 인자라고 설정하였을 때, 인자들 간의 반배율에 끼치는 민감도에 차이가 있다고 결론 지을 수 있다.

만약, 형상변화를 단일 방향(R 방향 혹은 L 방향)으로 일정하게 주고, 반배율 값의 변화 양상을 관찰했을 때, 반배율 값이 일정하게 변하지 않는다면, 설계 인자간의 민감도의 차이가 나지 않는다는 사실이 더욱 명확해진다.

- 설계 인자 군의 분류: 예비 실험을 경통부의 길이방향과 반경 방향으로 수행하였기 때문에, 인자 군들도 크게 두 분류, 즉 길이 방향으로의 변화하는 설계 인자 군과 반경 방향으로 변화하는 설계 인자 군들로 분류를 할 수 있다. 그리고 그 두 인자 군들 중에 전자 빔의 경로에 영향을 주는 B_z 에 영향을 줄만한 요소들을 고려하면, 크게 렌즈 극편 간격들, 경통내 반경(전자 빔의 통로), 렌즈 사이 거리들, 그리고 렌즈의 길이나 반경들 정도로 예상할 수 있다.

이 사실들을 바탕으로 B_z 에 영향을 줄만한 요소들을 하나씩 변화시켜가며 반배율 값을 계산하다 보면, 어떤 요소가 반배율 값에 크게 영향을 끼치는 요소인지를 판단 할 수 있다. 곧, 요소의 변화량에 대한 반배율 값의 변화를 설계 민감도로 정의한다면, 이 값이 큰 요소들이 반배율 값을 좀 더 효율적으로(작은 변화에도 반배율에 큰 영향을 끼침) 높이거나 줄일 수 있는 설계 인자에 해당하게 된다.

$$\text{Sensitivity} = \Delta \text{Demag} / \Delta \text{Parameter} \quad (4)$$

설계 인자 민감도 분석⁽¹²⁾⁽¹³⁾의 또 다른 의미는 반응값(Demag 에 해당)에 끼치는 영향을 의미하는 객관적인 수치로 표현한다는 것이다. 이를 통해 그 인자들 각각을 비교하여 영향의 정도를 객관적으로 판단할 수 있다.

3.4.2 설계 인자 군의 설정

민감도 분석에 이용될 4종류의 인자들은 하나의

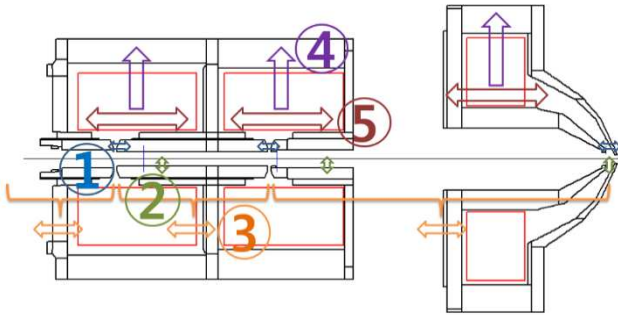


Fig. 14 Schematic diagram for testing design parameters

하나의 경통부 내에 총 16 개(전자 빔이 이동하는 동안 3 개의 렌즈를 거치게 되는데, 그 경로 동안 렌즈 극편 간격 3 개, 경통 내 반경 4 종류, 렌즈 사이 거리 3 개, 렌즈의 길이 3 개, 렌즈의 반경 3 개)가 존재한다. 이는 설계 인자의 개수만 16 개로 만약 DOE(실험계획법)의 수준 수 2 개의 완전 요인 실험을 수행하려 해도 $2^{16}=65536$ 번의 조합에 대해 시뮬레이션을 해야 하고, 반응 표면 법을 사용하기 위해 수준수가 3 인 $3n$ 요인 실험을 하게 된다면, 3^{16} 번의 조합을 처리해야 한다.

이렇게 처리해야 할 변수가 많을 때의 문제점을 극복하기 위해서 군집(grouping) 방법을 이용하여 처리해야 할 인자의 개수를 줄였다. 곧, 반응 값에 끼치는 특징이나 기능이 유사한 인자들끼리 하나의 군으로 묶어서 같은 군 내의 인자들은 일괄적으로 수준수의 변화를 주었다. 구체적으로 총 16 개의 인자를 5 개의 군으로 묶었으며 그 군들을 다음과 같다.

제1군 렌즈 극편(pole-piece) 간격(gap)군(g : 2 ~ 5 mm)의 변화: 3개의 전자기 렌즈의 극편 간격 군에 대해 일괄적인 길이의 비율변화(0.81g, 0.9025g, 1.1025g, 1.21g) 적용.

제2군 경통 내 반경(radius)군(r : 4 ~ 8 mm)의 변화: 경통 내의 반경 군에 대하여 일괄적인 길이의 비율변화(0.9r, 0.95r, 1.05r, 1.1r) 적용.

제3군 렌즈 간 거리군(p_1 : 95.23 mm, p_2 : 84.015 mm, p_3 : 186.015 mm)의 변화: 렌즈 사이의 거리 군에 일괄적인 길이의 비율변화(0.81p, 0.9025p, 1.1025p, 1.21p) 적용.

제4군 개별 렌즈들의 반경군(R : 54.5 ~ 69.5 mm)의 변화: 3개의 렌즈들에 대해 일괄적인 반경(R : 0.9R, 0.95R, 1.05R, 1.1R)의 비율변화 적용.

제5군 개별 렌즈들의 길이군(L : 80.5 ~ 97 mm)의 변화: 3개의 렌즈들에 대해 일괄적인 길이(L : 0.81L, 0.9025L, 1.1025L, 1.21L)의 비율변화 적용.

각 인자군들의 비율변화는 경통부 부피변화에 해당하는 변화를 의미한다. 즉, 부피 V 가 0.81V, 0.9025V, 1.1025V, 1.21V 로 변할 때, 렌즈 극편 간격 군 g 는 0.81g, 0.9025g, 1.1025g, 1.21g 로 변하고, 경통 내 반경 군 r 은 0.9r, 0.95r, 1.05r, 1.1r 로 변하는 것이다. 이를 통해 경통부 부피 변화에 따라 각각의 설계 인자 군들이 얼마나 반배율에 영향을 끼치는 지를 파악할 수 있다.

시뮬레이션의 수준의 처리를 단순 길이 변화가 아닌 비율변화로 한 것에는 형상 간 혹은 인자 간의 상호 영향을 배제하기 위한 이유 때문이다. 예를 들어 CL1 의 길이(L_1)에 대해 단순 길이 변화로 수준처리를 하게 된다면, 렌즈 극편(g_1)과 렌즈 사이의 상호 위치에 차이가 나게 된다.

만약, 렌즈 극편이 렌즈의 길이의 1/3 지점에 위치해 있다고 가정하면, 비율변화로 렌즈의 길이 변화를 주게 되었을 때, 극편의 위치는 변한 렌즈 길이의 1/3 지점에 위치하게 됨으로 두 인자 간의 상호 위치에는 차이가 없게 된다. 그 차이가 발생한다면, 나온 반응 값이 상호위치의 차이에 의한 것인지, 렌즈의 길이변화에 의한 것인지를 명확히 알 수 없기 때문에 인자 간의 상호영향은 꼭 배제시켜줘야 한다.

3.4.3 설계 인자 군의 변경에 따른 고려사항

제1군 렌즈 극편 간격의 크기를 변형할 때 유의할 점은 크기의 변화가 렌즈간 거리에 영향을 주어서는 안 된다는 점이다. 예를 들어 CL1 극편 간격이 Fig. 14 에서 왼쪽으로 늘어나게 되고, CL2 극편 간격이 오른쪽으로 늘어나게 되면 CL1 과 CL2 사이의 거리(p_2)가 변하게 된다. 곧, 다른 인자가 변하게 됨으로, 나온 결과는 오직 극편에 의한 영향이라고 볼 수 없게 된다. 이를 방지하기 위해, 간격의 길이 변형은 바로 간격의 중심을 기준으로 좌우로 변형시키는 것이다. 예를 들어 2 mm 를 기준 길이보다 더 증가시켜야 한다면, 간격 중심을 기준으로 좌, 우 1mm 씩을 증가시켜준다.

제2군 렌즈의 반경을 인자로 설정하였기 때문에 경통부 내경 인자의 수준 변경 시에는 렌즈의 반경, 좀 더 구체적으로는 코일의 위치를 변형시켜서는 안 된다. 코일의 위치를 고정시키면서 경통부 내경(코일 단면의 경통부 회전축으로부터 거리)의 인자를 변형하려면 경통부 내경 쪽의 렌즈 두께를 변형시켜야 한다. 곧, Fig. 15 의 회색으로 색칠한 부분의 두께만을 변화시키게 된다. 단, 이때에도, 코일과 렌즈 벽면(회색 부분)의 거리가 고정

되어야 함으로 경통의 내경과 맞닿아 있는 부분의 두께만을 변화시켜줘야 한다.

제3군 렌즈 간의 거리는 렌즈의 극편 중심 사이의 거리로 정의한다. OPTICS 에서 경통부 해석 시 단일 렌즈의 국부 기준(local origin)을 경통부의 전체 좌표계(global coordinates)에 위치시킴으로 렌즈 사이 거리 균의 변화를 줄 수 있다. 따라서 단일 렌즈의 국부 기준으로부터 극편 위치까지의 거리 정보를 정확하게 파악하고 있어야 원하는 인자의 수준으로 변화가 가능하다.

제4군 렌즈의 반경(R: 54.5 ~ 69.5 mm) 및 제5군 렌즈의 길이(L: 80.5 ~ 97 mm)균 변화 시 코일의 단면 변화에 따른 여자(excitation)의 변화를 주의해야 한다. 렌즈의 형상(길이방향, 반경방향 모두에 해당)이 변하게 되면, 코일 단면이 변하게 되고, 단일 코일의 단면적이 일정하다고 가정하였을 때, 코일의 감은 수가 변하게 된다. 본 연구에서 알아보고자 하는 것은 설계 인자에 관련된 민감도이므로, 작업자(operator)가 조작을 하게 되는 전류는 초기 전류 값으로 일정하게 유지 시켜야 한다. 그 말은 곧, 코일의 감은 수의 변화에 따라 렌즈에 인가되는 여자가 변함을 의미한다. 정리하면, 코일의 형상변화에 따라 여자의 변화가 생기게 되어 이를 시뮬레이션에 반영시켜야 하는데, 그 여자의 변화를 줄 수 있는 것은 렌즈 해석단계에서 전류 밀도의 변화를 통해서이다. 따라서 체계적으로 입력할 정보를 정리해서 시뮬레이션에 이용할 필요가 있는 것이다.

- 렌즈의 길이균(L) 관련 추가 고려사항: 경통부 내의 렌즈간 거리균(p)을 설계 인자로 지정하였기 때문에 기존의 경통부 내에서 렌즈들의 극편 중심(pole-piece center)의 위치를 유지시켜줘야 한다.(CL1: 95.23, CL2: 179.245, OL: 364.44 를 유지) 렌즈들의 길이변화에 따라 렌즈 국부 좌표계 원점에서 극편 중심의 위치가 변하기 때문에 경통부 전체 좌표계에서 국부 좌표계 원점들을 조정해 기존 극편 중심의 위치를 유지하도록 한다.

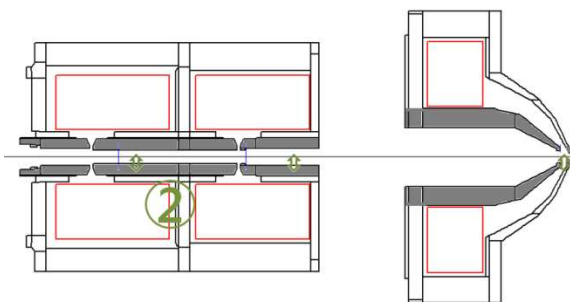


Fig. 15 Schematic of column radius

그렇게 되면 예상할 수 있는 문제가 하나 발생하는 데, 렌즈의 길이가 길어지는 경우 렌즈간의 겹침 현상이 발생한다는 것이다. 이 때문에 해석에 있어 충돌이 발생한다는 문제점을 생각할 수 있지만, OPTICS 에서는 형상적으로 렌즈 모델이 겹치는 것은 해석에 포함되지 않음을 추가 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다. 곧, 두 개의 렌즈를 떨어뜨린 상태와 겹쳤을 때의 상태를 해석한 결과, 경통부의 B_z 의 분포에 아무런 차이가 없었다.(두 렌즈의 위치에 따른 B_z 의 분포의 위치만 차이가 존재)

- 경통부 내의 반경균(r)을 설계 인자로 설정하였기 때문에, 렌즈 반경균의 수준을 변화시킬 때, 경통부 내의 반경은 기존의 크기로 고정을 시킬 필요가 있다. 이때도, 경통부 내의 반경을 변화시켰을 때처럼, 렌즈와 경통부 내경이 맞닿아있는 두께를 변화 시킴으로 경통부 내의 반경균을 일정하게 유지시키며 렌즈의 반경균을 변화시킬 수가 있다.

- 렌즈의 길이방향과 반경 방향의 변화에 대한 반배율 민감도 분석: 만약 코일의 감은 수(Turns)를 렌즈의 길이방향으로 감는 것이 반배율 값을 줄이는 데 좋은지, 반경방향으로 감는 것이 좋은지를 확인하고자 한다면, 수준의 변화를 코일 감은 수의 변화에 초점을 맞추어 시뮬레이션을 진행해야 한다. 그럼 그에 따라 발생하는 B_z 의 값의 상대비교가 가능하며, 그 결과에 따른 반배율의 비교도 가능하게 된다. 이번 시뮬레이션의 수준변화의 초점은 부피를 일정하게 변화시킬 때의 인자균의 민감도 분석으로, 경통의 부피에 따라 수준의 변화를 주게 되었다.

3.5 결과

각각의 조건에 의한 광선 추적의 결과는 Fig. 16, Fig. 17과 같다. 이들 그래프는 경통부 부피V의 변화에 해당하는 설계 인자균의 변화와 같다. 실제 경통부 부피를 변화시키는 것이 아니라 각각의 인자 균들만 그 조건에 맞게 변화를 주는 것이기 때문에, 이는 경통부 부피가 변할 때의 반배율에 영향을 끼치는 설계 인자 균들이 반배율로 볼 수 있다. 예를 들어 Fig. 16에서 1.21V일 때, 극편 간격균(g)의 변화는 1.21g, 경통내 반경균(r)의 변화는 1.1r이고 그에 따른 반배율은 각각 0.0007, 0.0008이다.

이 결과들을 통해 극편 간격균(g), 경통내 반경균(r)은 길이가 줄어들수록, 그리고 렌즈간 간격균(p), 렌즈 반경균(R), 렌즈 길이균(L)은 길이가 길수록 반배율이 작아지는 경향성을 보인다. 빔의 집속 특성에 기인한 설계를 할 때에는 이와 같은 경향성을 따르는 것이 유리하다.

Table 3 Results of the mean sensitivity

g_{avg} (Demag/mm)	r_{avg} (Demag/mm)	p_{avg} (Demag/mm)	R_{avg} (Demag/mm)	L_{avg} (Demag/mm)
166.6×10^{-6}	653.1×10^{-6}	10.27×10^{-6}	50.42×10^{-6}	41.28×10^{-6}

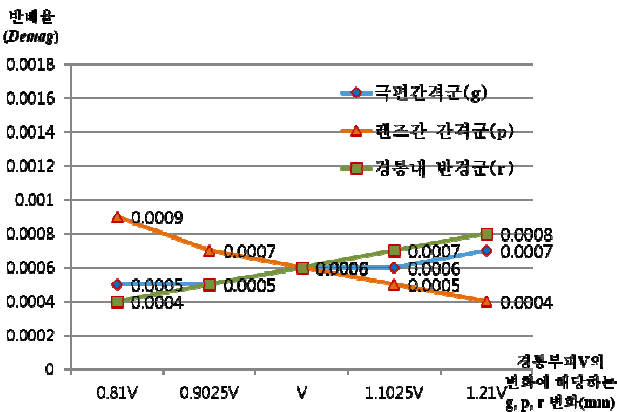


Fig. 16 Results on g, p, r by ray-tracing

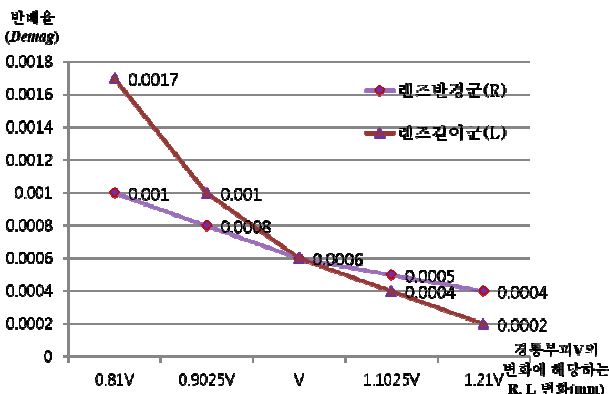


Fig. 17 Results on R, L by ray-tracing

또한 각각의 설계 인자 군들이 빔의 집속에 영향을 끼치는 정도가 각기 차이를 나타내는 데, 이는 평균민감도의 계산으로 판단이 가능하다.(Table 3) 평균민감도는 설계 인자 군의 변화량에 대한 그의 반배율 변화량의 비로 극편 간격균(g), 경통내 반경균(r)이 다른 인자 군들에 비해 상대적으로 높은 설계민감도를 가지는 것을 알 수 있다. 곧, 상대적으로 그 길이를 조금 변경함에도 반배율의 변화에 큰 영향을 끼칠 수 있다는 것을 의미한다.

4. 결론

이상으로 SEM에서 전자 빔의 집속 특성을 최적화하기 위하여, 빔의 굴절에 영향을 끼치는 인자들의 설계 민감도에 대해 알아보았다. 이

연구의 내용과 그를 통해 내릴 수 있는 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 전자 빔의 집속 특성을 향상시키기 위한 설계 요소(design parameter)를 전자기 렌즈 해석과 광선 추적을 통하여 분석하였다. 또한 분석해야 할 많은 설계 인자들의 수를 줄이기 위해 그 특징과 기능이 유사한 요소들을 군으로 묶어서 분석하였다. 그 결과 설계 요소마다 빔의 집속에 끼치는 특정한 경향성을 나타내었는데, 극편 간격균(g), 경통내 반경균(r)은 길이가 줄어들수록 빔을 잘 집속시킬 수 있는 반면, 렌즈간 간격균(p), 렌즈 반경균(R), 렌즈 길이균(L)은 그 반대의 경우에 해당한다.

(2) 빔을 잘 집속시킨다는 의미는 자속밀도(B_z)가 높다는 의미이다. 곧, 빔을 잘 집속시키는 인자들의 형상들은 자속밀도(B_z)를 높인다고 결론 지을 수 있다. 예를 들어 상기 극편 간격균(g)의 길이가 줄어들수록 빔을 잘 집속시키는 것은 자속 밀도(B_z)를 높이는 형상이라는 의미이다.

(3) 광선 추적의 결과를 바탕으로 민감도 해석을 실시하였으며 설계 요소들이 빔의 집속에 끼치는 영향의 정도를 비교해 볼 수 있었다. 본 연구에서는 경통내 반경균(r)이 가장 높은 설계 민감도를 가지고 있다고 결론 내릴 수 있으며, 이는 경통부 설계 시작은 변화에도 자속 밀도(B_z)가 크게 변화하여 빔의 집속 정도에 큰 영향을 끼칠 수 있음을 의미한다.

(4) 렌즈 사이 거리(p)보다 초점 거리(f)를 변화시키는 인자들(g_i, r_i)의 민감도가 높은 것으로 보아 빔을 집속하기 위한 설계에는 초점거리(f)를 줄이는 것이 더 유리함을 알 수 있다(단, $i=1, 2, 3$).

(5) Fig. 17의 반배율-R,L변화량 결과 그래프를 통해 경통부의 부피를 증가시킬 때는 반경이 긴 형태보다 길이가 긴 것이 효과적으로 빔을 집속시킬 수 있는 구조이고, 부피를 감소시킬 때는 반경이 짧은 형태가 그러한 구조에 해당한다고 결론지을 수 있다.

(6) 이상의 인자 군들의 경향성과 민감도 분석을 통해 주어진 조건(경통부 부피의 범위: 0.81V ~ 1.21V) 내에서 빔의 집속을 최적화할 수 있는 설계는 렌즈의 길이균(L)과 렌즈간 간격균(p)을 1.21 배로 증가시켜 경통부의 길이를 증가시키고, 극편의 간격균(g)과 경통의 내부 반경균(r)은 각각 0.81g, 0.9r 로 줄인 경우에 해당한다.

**참고문헌
(References)**

(1) Reimer, L., 1998, "Scanning Electron Microscopy,"

- 2nd Ed., Springer, Berlin, pp. 1~3.
- (2) Park, M. J., Kim, D. H., Park, K., Jang, D. Y. and Han, D. C., 2008, "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.
- (3) <http://advressys.com/analytic/sem.htm>
- (4) Lee, R. E., 1993, "Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis," P T R prentice Hall, pp. 68~69.
- (5) Park, K., Lee, J. J., Park, M. J., Kim, D. H. and Jang, D. Y., 2009, "Design and Analysis of an Objective Lens for a Scanning Electron Microscope by Coupling FE Analysis and Ray Tracing," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 11, p. 94.
- (6) Kim, S. J., Joo, W. and Kim, D. H., 2013, "Raster Scan Waveform Compensation Control for Enhancing the Orthogonality of Images in SEM," *Microscopy*, Vol. 62, No. 4, p. 476.
- (7) Jung, H. W., 2008, "Finite Element Analysis for Electron Optical System of a Scanning Electron Microscope," M.S. Dissertation, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, pp. 22~46.
- (8) Munro, E., 2005, "OPTICS – Software for Electron and Ion Beam Column Design," MEBS Ltd., London, p.112.
- (9) Kim, D. H., Park, k., Park, M. J., Jung, H. W. and Jang, D. Y., 2010, " Numerical Analysis for Verifying the Performance of Lens System in a Scanning Electron Microscope," *Optik, in press*, Vol. 121, p. 334.
- (10) Reimer, L., 1998, "Scanning Electron Microscopy," 2nd Ed., Springer, Berlin, pp. 30~31.
- (11) Kim, D. H., Park, k., Park, M. J., Jung, H. W. and Jang, D. Y., 2010, " Numerical Analysis for Verifying the Performance of Lens System in a Scanning Electron Microscope," *Optik*, Vol. 121, pp. 330~338.
- (12) Murray-Smith, D. J., 2013, "The Application of Parameter Sensitivity Analysis Methods to Inverse Simulation Models," *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, Vol. 19, No.1, p. 69.
- (13) Tohsato, Y., Ikuta, K., Shionoya, A., Mazaki, A. and Ito, M., 2013, "Parameter Optimization and Sensitivity Analysis for Large Kinetic Models Using a Real-Coded Genetic Algorithm," *Gene*, Vol. 518, No.1, p. 86.