

얇은 렌즈 조합을 이용한 집속 렌즈 시스템 설계

임선종*, 최지연⁺

(논문접수일 2011. 08. 19, 수정일 2011. 10. 04, 심사완료일 2011. 10. 07)

Design of a Condenser Lens System using a Thin Lens Combination

Sun-Jong Lim*, Ji-Yeon Choi⁺

Abstract

Most of SEM is double condenser lens system. Two condenser lenses are required to provide the high demagnification ratios necessary for forming nanometer probes). The thin lens concept provides a highly useful basis for preliminary calculations in a broad range of situations. It is an easy way to understand the electron beam paths in column. Demagnification is easily calculated by this method). In this paper, we present design processes for condenser lens's demagnification by using thin lens combination model. Also, we verify the reliability of our design processes by comparing the modeled demagnification with these of corrected condenser lens.

Key Words : 집속 렌즈(Condenser lens), 반배율(Demagnification), 초점 거리(Focal length), 얇은 렌즈(Thin lens), 빔 소스(Beam source)

1. 서론

전자 현미경에서 하나의 집속 렌즈 시스템은 반배율(빔 사이즈) 조절의 선형성이 낮고 수차의 영향을 많이 받게 된다. 반면에 두 개의 집속 렌즈 시스템은 반배율 조절의 선형성이 증가하고 수차의 영향을 줄어줄게 한다. 따라서 현재 대부분의 전자 현미경에서 집속 렌즈 시스템은 두 개의 렌즈로 구성되어 있다. 전자빔 소스에 인접한 집속 렌즈는 빔 소스(Beam source)의 이미지를 축소하며 다음 집속 렌즈는 빔 소스의 이미지(Image)를 대물 렌즈에 투영하는 기능을 하게 된다⁽¹⁾. 집속 렌즈 시스템을 설계하는 것은 원하는 크기로 집속된 전자빔을 얻기 위한 자속 분포, 컬럼(Column)의 형상 그리고 렌즈 전류를 결정하는 것이다. 따라서 렌즈 시스템 내부의 정확한 자속 분포와 전자빔 경로를 예측하는 것이 집속 렌즈 시스템 설계의 핵심이다.

실제의 렌즈 시스템 설계는 쉽게 계산되지 않는 다양한 수차를 가지고 있기 때문에 컴퓨터를 이용해 설계되고 있으며 모델링을 위한 코드를 구현하는데 많은 시간이 필요하게 된다⁽²⁻⁵⁾. 만일 간단한 수치 해석을 통해 전자빔 경로를 예측할 수 있다면 설계 과정에서 집속 렌즈 시스템의 성능을 이해하고 컬럼 형상을 설계하는데 대단히 유용하며 설계 시간을 단축할 수 있게 된다⁽³⁾. 기하광학적 모델인 두 개의 얇은 렌즈 조합을 이용한 렌즈 시스템 설계는 간단하면서도 효과적으로 근축 광선 추적을 할 수 있어 렌즈 시스템을 보다 직관적으로 이해할 수 있도록 도와준다.

본 연구는 기하광학적 모델인 얇은 렌즈 조합 모델링을 이용한 주사 전자 현미경의 집속 렌즈 시스템 설계 과정을 보이고 있다. 이를 위해 모델링을 기반으로 제작된 집속 렌즈 시스템을 영상을 이용한 교정 작업을 거친 후 렌즈의 초점과 반배율을

* 한국기계연구원, 나노융합시스템본부, 광응용기계연구실 (sjlim@kimm.re.kr)
주소: 305-343 대전시 유성구 장동 171

+ 한국기계연구원, 나노융합시스템본부, 광응용기계연구실

계산하였다. 또한 모델링 값과 교정값을 비교하여 집속 렌즈 시스템 설계에서 얇은 렌즈 조합 모델링의 유용성을 보일 것이다.

2. 얇은 렌즈 조합에 의한 집속 렌즈 시스템의 모델링

렌즈의 두께가 0이라고 가정하면 렌즈의 주요점들은 렌즈가 놓인 위치와 동일한 곳에 놓이게 된다. 이러한 렌즈를 얇은 렌즈라고 한다. 이것은 대략적인 광선 추적을 위한 효과적인 개념이다^(6,7).

집속 렌즈가 두 개인 시스템은 반배율 조절에서 선형성이 높아지며 수차의 영향을 최소화할 수 있으므로 본 연구의 집속 렌즈 시스템도 두 개의 집속 렌즈를 갖도록 설계하였다. 모델링에서 전자빔 소스에 인접한 집속 렌즈를 집속 렌즈 1(CL_1) 그리고 다음을 집속 렌즈 2(CL_2)라고 한다.

본 연구에서 렌즈 시스템의 설계 목표는 대물 렌즈를 포함해 4nm의 프르브 사이즈(Probe size)를 갖도록 한다. 본 시스템은 텅스텐(Tungsten) 필라멘트(Filament)를 빔 소스로 사용하므로 전자빔 소스의 크기를 40 μ m 로 가정한다. 따라서 대물 렌즈를 포함한 반배율은 1/10000이다. 대물 렌즈 설계는 구면 수차와 비점수차를 작게 해야 한다. 구면 수차는 렌즈의 반배율을 크게 함으로 해서 줄일 수 있다. 그러나 대물 렌즈의 반배율이 집속 렌즈의 반배율에 비해 큰 경우 비점수차를 개선하기 어렵게 된다. 따라서 위의 조건을 고려해 대물 렌즈의 반배율을 각 집속 렌즈의 반배율 보다 작은 1/10로 선정하였다.

집속 렌즈 시스템은 전자총에서 발생된 전자빔을 수렴시키고 수렴각을 조절한다. 집속 렌즈 시스템을 통과하여 대물 렌즈에 입사되는 빔 전류의 밀도를 높이기 위해서는 렌즈로 입사하는 전자빔의 발산각을 작게 설계되어야 한다.

가속 전압의 변화에 따른 초점 거리의 변화와 스팟 사이즈(Spot size) 조절을 위한 “CL_1”의 반배율의 변화에 대해서도 대물 렌즈에 입사되는 수렴각을 작게 유지하기 위해서는 “CL_2”의 반배율은 “CL_1”보다 크고 일정해야 한다. 즉 초점 거리가 일정해야 한다. 위의 조건에 의해 “CL_1” 과 “CL_2”의 반배율을 각각 1/20 과 1/50로 하였다. 전체 렌즈 시스템의 크기는 기구적인 안정성을 고려해서 선정하게 된다. Table 1은

Table 1 Design specification of total lens system

Factor	Description
Beam source size	40 μ m (Tungsten filament)
Probe size	4 nm
Demagnification of CL_1	0.05
Demagnification of CL_2	0.02
Demagnification of OL	0.1

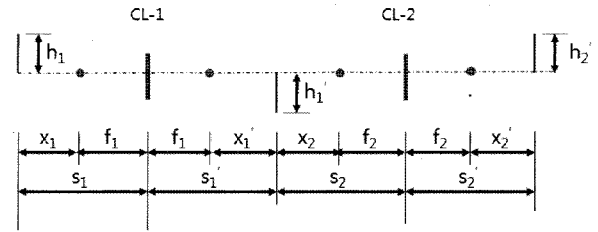


Fig. 1 Design of condenser lenses

Table 2 Design factors

No	Factor	Description
1	x_1	From a beam source to the CL-1's focal length
2	f_1	The CL-1's focal length
3	x_1'	From the CL-1's focal length to the CL-1's image plane
4	x_2	From the CL-1's image plane to the CL-2's focal length
5	f_2	The CL-2's focal length
6	x_2'	From the CL-2's focal length to the CL-2's image plane

전체 렌즈의 반배율과 가정된 빔 소스의 크기를 보이고 있다. Fig. 1은 집속 렌즈 시스템에 대한 설계된 얇은 렌즈 모델링을 보이고 있다. 집속 렌즈 시스템을 통과한 빔 소스는 설계 사양에 의해 40nm의 사이즈가 된다. Table 2는 Fig. 1의 설계 요소를 보이고 있다.

3. 집속 렌즈 시스템의 설계

집속 렌즈 시스템은 기구적으로 폴피스(Pole piece), 슬리브(Sleeve) 및 렌즈 코일(Coil) 등으로 구성된다. 폴피스 설계는 내경, 외경 및 렌즈 간격 등이 중요한 설계 변수가 된다.

폴피스 내경 및 외경의 설계에서 고려된 사항은 다음과 같다. 텅스텐 필라멘트에서 발생해서 원뿔 모양으로 퍼진 전자빔은 바이어스(Bias) 전압에 의해 가상 빔 영상(virtual beam image)이 된다. 이 가상 빔 영상의 각도는 작게 유지되어야 수차의 영향이 작고 안정된 전류 밀도를 얻을 수 있게 된다. 이를 위해 전자빔이 통과하는 전체 경로에 자장이 형성되도록 폴피스를 설계한다. 폴피스 내경의 설계는 애퍼처(Aperture)의 크기와 슬리브 등을 고려해 선정된다. 폴피스 내경이 큰 경우 중심부에서 자력이 작아져 가상 빔 영상의 각이 커지게 되어 구면 수차가 증가한다. 폴피스 두께는 렌즈의 초점 거리 및 기구적인 크기 등을 고려하여 설계된다. 폴피스의 외경이 작은 경우 자속의 포화점이 낮아져서 초점 거리 조절 범위가 짧게 된다. 따라서 반배율에 의해 계산된 초점 거리를 고려해 충분한 자속의 세기

가 얻어지도록 두께가 설계되었다.

집속 렌즈 시스템의 “CL_1”과 “CL_2”의 간격은 다음과 같이 설계되었다. “CL_1”은 가상 영상 빔의 반배율된 이미지를 만든다. “CL_2”는 대물 렌즈와 “CL_1” 사이에 동작 거리 (working distance)를 만든다. 대물 렌즈를 포함한 전체 렌즈 시스템의 길이는 기구적인 안정성을 고려하여 설계된다. 집속 렌즈 시스템의 반배율, 가상 빔 영상, “CL_2”의 거리 및 물체면(object plane)이 정해지면 “CL_1”은 최대 배율을 얻을 수 있는 위치에 놓이게 된다. 렌즈간의 위치는 식 (1)에 의해 설계된다.

$$M = \frac{\left(\frac{1}{4}l_1^2\right)}{f_1 l_2} \quad (1)$$

여기서, M 은 배율, f_1 은 CL_1의 초점 거리, l_1 은 가상 빔 영상에서 CL_2까지의 거리이며 l_2 는 CL_2에서 CL_2의 물체면까지 거리이다. Fig. 2는 설계된 집속 렌즈 시스템을 보이고 있다. Table 3은 설계된 폴피스 사양을 보이고 있다.

렌즈의 초점 거리는 렌즈를 통과하는 전자의 이동 경로를 나타내는 PRE(Paraxial Ray Equation)를 이용해 설계되었다. PRE는 전계와 자계가 존재하는 영역에서 축과 인접하고 작은 각도를 이루면서 이동하는 전자의 경로를 묘사한다. 원통 좌표계(r, θ, z)를 사용하고, θ 는 z 축 방향에서 시계 방향의 회전을 (+)로 한다. PRE는 식 (2)와 같다. 여기서 m_e 는 전자의 질량, e 는 전자의 전하량, V 는 가속 전압, B_z 는 z 축 방향의 자속 밀도를 나타낸다^(5,6). 여기서 z 는 자장계의 거리를 나타낸다.

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{1}{2V} \frac{dV}{dz} \frac{dr}{dz} + \left(\frac{1}{4V} \frac{d^2 V}{dz^2} + \frac{e}{8m_e V} B_z^2 \right) r = 0 \quad (2)$$

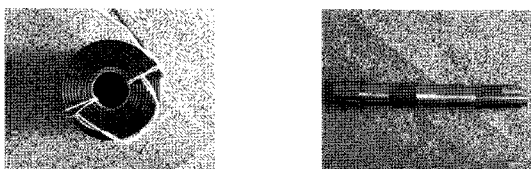


Fig. 2 Condenser lenses and condenser lens coil

Table 3 Design specification of condenser lenses

Factor	Specification [mm]
Inner diameter of pole piece	6.5 <
Outer diameter of pole piece	24 <
Distance between beam source and “CL_2”	172
Distance between beam source and “CL_1”	88

마그네틱(Magnetic) 렌즈는 자계만 존재하고 V 가 상수이므로 식 (2)는 식 (3)과 같이 정리 된다.

$$r'' = -\frac{eB_z^2}{8m_e V} r \quad (3)$$

여기서, B_z 는 상수이다. $z=0$ 에서 $r=r_0$ 그리고 $r'=0$ 의 초기 조건을 사용하면 식 (3)은 식 (4)와 같이 된다.

$$r = r_0 \cos\left(z \sqrt{\frac{eB_z^2}{8m_e V}}\right) \quad (4)$$

여기서 r_0 는 초기값이다. 이때 경로는 Fig. 3과 같이 된다. 렌즈를 통과한 전자빔의 반경 r_2 와 기울기 r_2' 는 식 (5)과 식 (6)과 같이 된다.

$$r_2 = r_0 \cos\left(z \sqrt{\frac{eB_z^2}{8m_e V}}\right) \quad (5)$$

$$r_2' = -\left(\frac{r_0}{z}\right) \left(z \sqrt{\frac{eB_z^2}{8m_e V}}\right) \sin\left(z \sqrt{\frac{eB_z^2}{8m_e V}}\right) \quad (6)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{r_2'}{r_0} = \frac{\left(z \sqrt{\frac{eB_z^2}{8m_e V}}\right) \sin\left(z \sqrt{\frac{eB_z^2}{8m_e V}}\right)}{z} \quad (7)$$

얇은 렌즈 모델링의 경우 초점 거리, 전자의 초기 위치 및 기울기의 관계는 식 (7)과 같다. Fig. 3은 자기장, 주요면(PP: Principal Plane) 및 초점 거리의 관계를 보이고 있다. z 는 자기

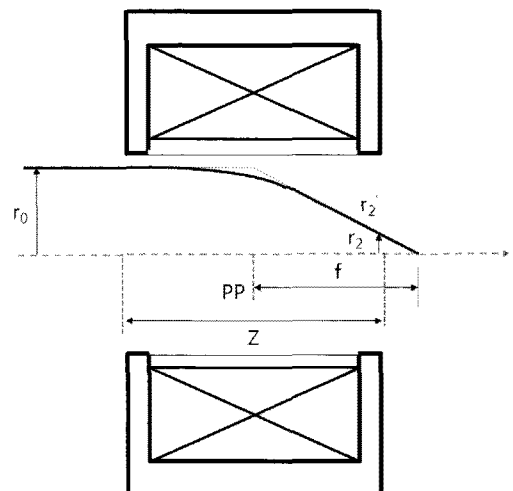


Fig. 3 Relation between lens field, principal plane(PP), and f_2

장계의 거리를 나타내고 f 는 얇은 렌즈에 의한 뒤초점 거리 (Back focal length)이다.

4. 집속 렌즈 시스템의 반배율 측정

제작된 집속 렌즈 시스템의 적합성을 확인하기 위해 설계된 반배율을 갖는데 필요한 초점 거리 및 렌즈 전류값을 모델링에 의한 계산값과 제작후의 교정값을 비교하였다. Fig. 1에서와 같이 “CL_1” 및 “CL_2”의 초점 거리와 반배율의 관계는 식 (8)과 식 (9)로 표현된다.

$$m_1 = \frac{f_1}{-x_1} \quad (8)$$

$$m_2 = \frac{f_2}{x_2} \quad (9)$$

여기서 m_1 과 m_2 는 “CL_1”과 “CL_2”의 반배율을 나타낸다. 또한 렌즈 전류값은 식 (7)을 이용하며 전류에 의한 자속 밀도 값으로 표현하면 식 (10)과 같다. 전류값은 수치 대입법으로 계산되었다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

$$f = \frac{z}{z \left(\frac{eB_z^2}{8m_e V} \right)^{\frac{1}{2}} \sin \left(z \left(\frac{eB_z^2}{8m_e V} \right)^{\frac{1}{2}} \right)} \quad (10)$$

Table 4 및 5는 모델링에 의해 계산된 “CL_1”과 “CL_2”의 초점 거리 및 렌즈 전류값을 보이고 있다. 주사 현미경에서 시편 관찰을 위해 많이 사용되는 가속 전압인 10 ~ 30[kV] 범위 안에서 측정치를 비교하였다.

제작된 집속 렌즈 시스템에 대해 영상 교정 작업을 거친 후 “CL_1”과 “CL_2”의 전류 범위를 측정하였다. Table 6은 측정 결과를 보이고 있다. 또한 측정된 전류값을 Fig. 1의 모델링에 적용해서 집속 렌즈 시스템의 초점 거리와 반배율을 계산하였다. Table 7~11은 계산된 결과를 보이고 있다.

식 (8)에서 보는 바와 같이 일정한 자속 밀도를 가진 전자 렌즈를 통과하는 전자빔은 가속 전압이 클수록 초점 거리가 길어지게 된다. 따라서 일정한 초점 거리를 유지하기 위해서는 렌즈 전류를 증가시켜 자속의 세기를 크게 해야 한다. 이것은 모델링과 교정후 전류값의 변화에서도 알 수 있다. “CL_1”의 모델링 전류값과 교정후 전류값을 비교한 결과는 Fig. 4에서 보여 지듯이 교정후 전류값의 최소치와 최대치 사이에 모델링 전류값을 포함하고 있음을 확인하였다. 교정후 전류값의 최대 및 최소는 스팟 사이즈의 범위를 나타낸다.

Table 4 Parameter values of “CL_1” by modeling

Acceleration voltage[kV]	CL_1 (Demagnification rate : 0.05) (Focal length : 4.19)
10	0.422
15	0.517
20	0.597
25	0.667
30	0.731

Table 5 Parameter values of “CL_2” by modeling

Acceleration voltage[kV]	CL_2 (Demagnification rate : 0.02) (Focal length : 1.56)
10	0.773
15	0.947
20	1.093
25	1.222
30	1.339

Table 6 Current range of condenser lenses

Acceleration voltage[kV]	Current range[A]	
	CL_1	CL_2
10	0.3 ~ 1.25	1.05 ~ 1.075
15	0.375 ~ 1.55	1.275 ~ 1.3
20	0.45 ~ 1.775	1.475 ~ 1.5
25	0.5 ~ 2.0	1.65
30	0.55 ~ 2.2	1.8 ~ 1.85

Table 7 Parameter value (acceleration voltage : 10[kV]), [mm]

f_1	s_1	s_1'	m_1	h_1'
7.943	88.7	8.725	-0.098	-0.001967
5.203	88.7	5.527	-0.062	-0.001246
1.109	88.7	1.123	-0.002	-0.000039
f_2	s_2	s_2'	m_2	h_2'
1.142	75.276	1.16	0.015	-0.000030
1.142	78.473	1.159	0.015	-0.014768
1.128	82.877	1.144	0.014	-0.013798

Table 8 Parameter value (acceleration voltage : 15[kV]), [mm]

f_1	s_1	s_1'	m_1	h_1'
7.628	88.7	8.346	-0.094	-0.001882
2.203	88.7	2.259	-0.025	-0.000509
1.115	88.7	1.129	-0.001	-0.000038
f_2	s_2	s_2'	m_2	h_2'
1.148	75.654	1.166	0.015	-0.000029
1.124	81.741	1.140	0.014	-0.000007
1.135	82.871	1.151	0.014	-0.000001

Table 9 Parameter value
(acceleration voltage : 20[kV]), [mm]

f_1	s_1	s_1'	m_1	h_1'
7.079	88.7	7.693	-0.087	-0.001735
5.812	88.7	6.220	-0.070	-0.070119
1.111	'88.7	1.125	-0.001	-0.000035
f_2	s_2	s_2'	m_2	h_2'
1.147	82.874	1.165	0.015	-0.000026
1.189	77.780	1.207	0.015	-0.000022
1.189	82.875	1.206	0.014	-0.000001

Table 10 Parameter value
(acceleration voltage : 25[kV]), [mm]

f_1	s_1	s_1'	m_1	h_1'
7.178	88.7	7.810	-0.088	-0.001761
7.178	88.7	6.810	-0.088	-0.001761
1.115	'88.7	1.129	-0.002	-0.000035
f_2	s_2	s_2'	m_2	h_2'
1.146	76.190	1.164	0.015	-0.000027
1.146	76.190	1.164	0.015	-0.000027
1.146	82.871	1.162	0.014	-0.000000

Table 11 Parameter value
(acceleration voltage : 30[kV]), [mm]

f_1	s_1	s_1'	m_1	h_1'
7.128	88.7	7.751	-0.087	-0.001748
5.203	88.7	5.527	-0.062	-0.001246
1.117	'88.7	1.131	-0.002	-0.000035
f_2	s_2	s_2'	m_2	h_2'
1.104	76.249	1.120	0.015	-0.000026
1.100	78.472	1.115	0.014	-0.000018
1.100	82.868	1.115	0.013	-0.000000

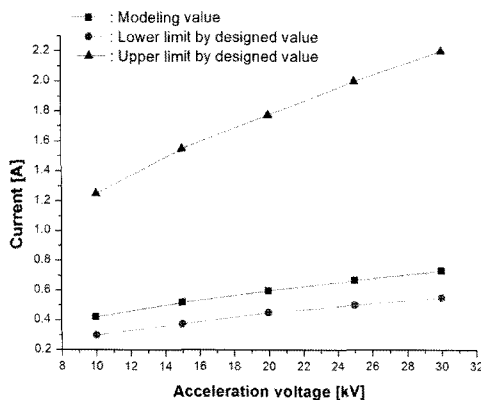


Fig. 4 Comparison of modeling value to designed value in "CL_1"

“CL_2”는 일정한 위치에 초점 거리를 유지해야 하므로 전류 값도 일정하게 유지되어야 한다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 교정 후 전류값의 최소치와 최대치가 차이가 없으며 모델링 전류값을 포함하고 있음을 확인하였다. 이로써 두 개의 얇은 렌즈 조합을 이용한 직관적인 모델링이 렌즈의 설계와 제작 과정에 유용함을 알 수 있다.

“CL_1”의 초점 거리는 교정값 범위가 모델링에 의한 초점 거리를 포함하고 있다. “CL_2”의 초점 거리는 가속 전압과 “CL_1”의 초점 거리의 변화에 대해서도 일정한 위치에 초점 거리를 유지하고 있다. 교정값과 모델링 값은 최고 30% 범위 내에 놓여 있다. 따라서 두 얇은 렌즈 조합에 의한 직관적인 모델링에 의한 전류값이 집속 렌즈 시스템의 초기값 설정에 사용될 수 있는 값을 확인하였다. Table 12와 13은 초점 거리

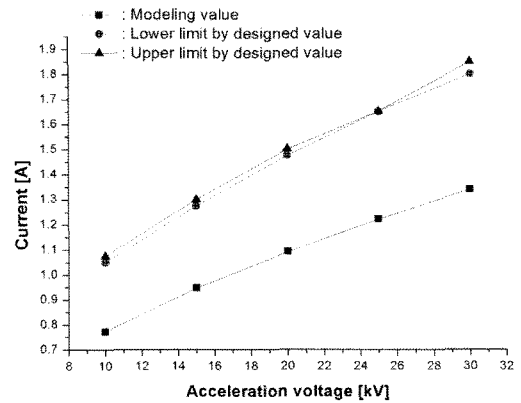


Fig. 5 Comparison of modeling value to designed value in "CL_2"

Table 12 Modeling value and designed value in "CL_1"

Acceleration voltage[kV]	Focus length of "CL_1" [mm]	
	Modeling value	Designed value
10	4.19	1.109 ~ 7.943
15		1.115 ~ 7.628
20		1.111 ~ 7.079
25		1.115 ~ 7.178
30		1.117 ~ 7.128

Table 13 Modeling value and designed value in "CL_2"

Acceleration voltage[kV]	Focus length of "CL_2" [mm]	
	Modeling value	Designed value
10	1.56	1.128 ~ 1.142
15		1.135 ~ 1.148
20		1.147 ~ 1.189
25		1.146
30		1.1 ~ 1.104

Table 14 Comparison of demagnification rate in “CL_1”

Acceleration voltage[kV]	Focus length of “CL_1” [mm]	
	Modeling value	Designed value
10	0.05	-0.002 ~ -0.098
15		-0.001 ~ -0.094
20		-0.001 ~ -0.087
25		-0.002 ~ -0.088
30		-0.002 ~ -0.087

Fig. 15 Comparison of demagnification rate in “CL_2”

Acceleration voltage[kV]	Focus length of “CL_2” [mm]	
	Modeling value	Designed value
10	0.02	0.014 ~ 0.015
15		0.014 ~ 0.015
20		0.014 ~ 0.015
25		0.014 ~ 0.015
30		0.013 ~ 0.015

에 대해 모델링에 의해 얻어진 값과 교정값의 비교 결과를 보이고 있다.

집속 렌즈 시스템은 전자빔의 스팟 사이즈를 조절하게 되는데 이것은 “CL_1”의 반배율을 조절함으로써 구현된다. 이때 “CL_2”의 반배율은 일정한 초점 거리를 유지하기 위해 일정하게 유지된다. 비교에 의하면 “CL_1”의 모델링 반배율 값이 교정값 반배율의 범위에 포함되어 있으므로 모델링 값이 초기 설계 과정에 유용하게 활용될 수 있음을 확인할 수 있다. “CL_2”의 반배율 비교 결과에서는 교정값이 보다 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 전체 반배율이 실제 측정에서 작아진 것을 의미한다. 오차의 원인은 폴피스스의 가공 오차와 그에 따른 자속 밀도 및 전류 오차에 의한 것으로 예상된다. Table 14와 15는 비교 결과를 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 반배율의 선형성 개선 및 수차 교정이 용이하도록 두 개의 집속렌즈를 사용한 전자빔 집속 렌즈 시스템을 설계하였다. 집속 렌즈 시스템의 설계는 원하는 집속빔 사이즈를 얻기 위한 시스템의 구조, 반배율, 렌즈 코일의 권선수 및 렌즈 전류를 결정하는 것이다. 효율적인 설계를 위해서 제시된 변수들의 초기 근사치를 얻는 것이 필요하다. 이때 집속 렌즈 시스템 내에서 전자의 개별적인 경로를 이해하기 보다는 전체적인 경로를 직관적으로 이해하는 것이 효과적이다.

따라서 본 논문에서는 전자빔의 경로를 직관적으로 이해하기 쉬운 두 개의 얇은 렌즈 조합 모델링을 이용하여 집속 렌즈 시

스템의 모델링과 설계 과정을 보였다. 또한 모델링 결과와 제작된 시스템의 교정값을 비교하여 얇은 렌즈 조합 모델링의 유용성을 확인하였으며 아래의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 집속 렌즈 시스템에서 렌즈 간격, 길이 및 렌즈 코일 권선수 및 전류의 초기값을 결정하는데 얇은 렌즈 이론이 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.
- (2) 모델링 결과는 렌즈 제어기의 하드웨어 사양과 기구적인 초기 설계값을 결정하는데 활용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 “정밀기계부품 가공용 고밀도 전자빔의 고속 청정 Finishing 공정 기술 개발” 과제에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Joseph, I. Goldstein., Roring, A. D., Newbury, D. E., Charles, E. L., Patrick, E., Charles, F., David, C. J., and Eric, L., 1992, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Plenum press, New York and London, pp. 1~272.
- (2) John, L, T., 1993, *Electron beam testing technology*, Plenum press, New York, pp. 35~173.
- (3) Ludwig, R., 1998, *Scanning Electron Microscopy*, Springer, New York, pp. 13~56.
- (4) Pierce, J. R., 1954, *Theory and design of electron beams*, D. Van nostrand company, Toronto, pp. 72~114.
- (5) Klemperer, O., 1971, *Electron optics*, Cambridge press, London, pp. 20~131.
- (6) Eugene, H., 2002, *Optics*, Addison wesley, San Francisco, pp. 149~170.
- (7) Smith, W. J., 2000, *Modern Optical Engineering*, McGraw Hill, New York, pp. 21~58.
- (8) Lim, S. J., 2010, “Simple Analysis of the Properties of Condenser Lens 1 in SEM,” *Journal of the KSMTE*, Vol. 19, No. 5, pp. 705~709.
- (9) Lim, S. J., Choi, J. Y., and Kang, J. H., 2011, “Demagnification Design of Two Condenser Lenses in SEM,” *Proc. of KSMTE Spring Conference 2011*, pp. 232~233.
- (10) William H, H., 1989, *Engineering Electromagnetics*, McGraw-Hill, New York, pp. 224~264.