

# Focal length에 의한 전자 렌즈의 제어 신호 생성을 위한 하드웨어 설계

임선종\*, 이찬홍<sup>+</sup>

(논문접수일 2007. 5. 4, 심사완료일 2007. 7. 11)

## Hardware Design for the Control Signal Generation of Electron Optic by Focal Length

Sun Jong Lim\*, Chan Hong Lee<sup>+</sup>

### Abstract

Condenser lens and objective lens are used to demagnify the image of the crossover to the final spot size. In lens, electrons are focused by magnetic fields. This fields is fringing field. It is important in electron focusing. Electron focusing occurs the radial component field and axial component field. Radial component produces rotational force and axial component produces radial force. Radial force causes the electron's trajectory to curve toward the optic axis and corss it. Focal length decreases as the current of lens increases. In this paper, we use the focal length for desiging the hardware of lens current control and present the results.

**Key Words** : 전자빔(Electron beam), 전자 현미경(Scanning electron microscope), 전자 렌즈(Electron optic), 집속 렌즈(Condenser lens), 대물 렌즈(Objective lens), Focal distance, 전자 렌즈 제어(Electron lens control), 프링징 자장(Fringing field), 반배율(Demagnification), 배율(Magnification)

## 1. 서론

진공 상태에서 이동하는 전자빔은 정전기(Electrostatic)와 자장(Magnetic fields)에 의해 초점이 맞춰진다. 전자 현미경에서 정전기에 의한 초점은 전자총(Electron gun)에서 이루어 지며 이때 빔 크로스 오버(The Image of The

Crossover)가 만들어 진다. 전자장에 의한 초점은 전자 렌즈에서 일어난다. 전자 렌즈와 폴피스(Polepiece)에 의한 프링징 자장(Fringing field)과 전자 렌즈를 통과하는 전자빔의 속도에 대한 벡터 크로스곱 계산된 힘이 전자빔에 작용한다<sup>(1,2)</sup>. 이 힘은 렌즈 축을 중심으로 전자빔을 나선으로 회전하게 하여 특정한 곳에서 렌즈의 중심축을 가로지르게 한

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

+ 한국기계연구원, 지능기계연구센터

다. 이 위치를 Focal length라 한다. 이것은 렌즈의 특성을 나타내는 가장 중요한 변수로 렌즈 방정식에서 배율(Magnification) 혹은 반배율(Demagnification)을 결정한다. Focal length는 가속 전압에 비례하고 렌즈 전류와 권선수의 제곱에 반비례한다.

본 연구는 2개의 집속 렌즈와 하나의 대물 렌즈로 구성된 전자 현미경의 전자 렌즈 시스템에서 전자빔 이동 경로에 대한 기하학적인 분석과 Focal length의 설계를 기본으로 하여 전자 렌즈를 제어하기 위해 필요한 하드웨어 사양의 설계와 검증을 목적으로 하고 있다.

## 2. 렌즈 시스템 구성과 분석

캐소드(Cathode)에서 발생한 전자는 그리드 갭(Grid gap)에 적용된 바이어스 전압에 의해 모여져서 크로스오버(Crossover)가 생성되고 애노드(Anode)에 인가된 가속 전압에 의해 가속되어 슬리브(Sleeve)로 들어가게 된다. 슬리브로 들어간 전자빔은 집속 렌즈(Condenser lens)와 대물 렌즈(Objective lens)에 의한 프린징 자장과 어퍼처(Aperture)를 통과해 시료에 도달한다<sup>(3)</sup>. 각 요소를 통과하는데 있어서 전자빔 경로에 대한 분석과 Focal length는 다음과 같다.

### 2.1 설계된 전자 렌즈와 어퍼처의 구성

렌즈의 위치는 전자총으로부터 두 개의 집속 렌즈와 대물 렌즈가 순서대로 위치한다. 렌즈 내부를 슬리브가 관통하며 어퍼처는 슬리브 내에 위치하지만 최종 어퍼처는 경통의 마지막 하단에 위치한다. Fig. 1은 각 요소의 위치를 나타내고 있다. 첫 번째 집속 렌즈는 크로스오버를 줄여 스팟 사이즈를 결정한다. 두 번째 집속 렌즈는 스팟 사이즈가 사용되는 환경에 따라 종속적으로 결정된다. 집속 렌즈에 흐르는 전류가 많을 수록 시료에 도달된 프르브(Probe)와 전류의 크기가 작아진다. 대물 렌즈는 렌즈 축을 따라 크로스오버의 움직임을 제어하여 이미지의 초점을 맞춘다.

어퍼처는 전자빔의 발산 각도를 줄이며 특히 대물 렌즈와 시료 사이에 놓인 어퍼처는 최종 프르브에서 수차(Aberration)의 영향을 줄이며 시료에 도달되는 전류의 양을 줄인다.

### 2.2 전자빔 이동 경로의 기하학적 분석과 Focal length

슬리브 내에서 렌즈 시스템의 영향에 의한 빔의 이동 경로를 분석하면 Fig. 2와 같으며 각 변수는 다음과 같다.

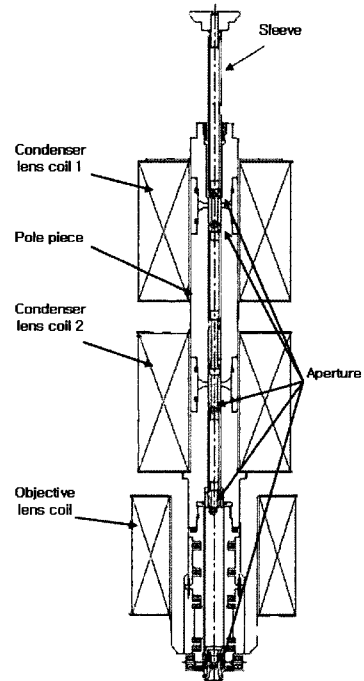


Fig. 1 Configuration of lenses and aperture

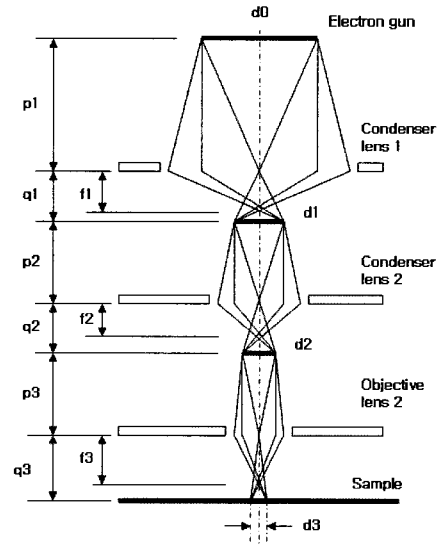


Fig. 2 Geometrical analysis of electron beam path

- $p1$  : 전자총의 크로스오버에서 집속 렌즈 1까지의 거리
- $q1$  : 집속 렌즈 1에서 크로스오버  $d1$ 까지의 거리
- $f1$  : 집속 렌즈에 의한 focal length

- p2 : 크로스오버 d1에서 집속 렌즈 2까지의 거리
- q2 : 집속 렌즈 2에서 크로스오버 d2까지의 거리
- f2 : 집속 렌즈 2에 의한 focal length
- p3 : 크로스오버 d2에서 대물 렌즈까지의 거리
- q3 : 대물 렌즈에서 시료까지의 거리
- f3 : 대물 렌즈에 의한 focal length

실제 렌즈를 통과한 후 전자빔의 수렴각과 그로스오버 후 발산각은 매우 적으며 표기를 위해 확대한 것이다(전자 현미경의 경우 0.05° - 1°). 그림에서는 수차로 인한 영향은 무시하고 있다. 또한 어퍼처로 인한 전자빔의 감소를 표시하고 있지 않다.

전자빔이 전자 렌즈를 통과할 때 광학계와 비슷한 현상을 가진다. 따라서 광학계에서 Object 거리(p), 이미지 거리(q) 그리고 Focal length에 대한 식 (1)이 전자 렌즈 시스템에도 적용된다<sup>(1,2)</sup>.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (1)$$

식 (1)을 설계된 각 렌즈 시스템에 적용하기 위해 변수 q에 대해 정리하고 반확대(Demagnification)를 각각 m1, m2 그리고 m3로 하면 다음과 같이 계산된다.

$$m1 = \frac{p1}{q1} = \frac{p1 - f1}{f1} \quad (2-1)$$

$$m2 = \frac{p2}{q2} = \frac{p2 - f2}{f2} \quad (2-2)$$

$$m3 = \frac{p3}{q3} = \frac{p3 - f3}{f3} \quad (2-3)$$

식 (2)에 의해 Gaussian probe size는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$d3 = \frac{d0}{m1 \cdot m2 \cdot m3} = \frac{d0 \cdot f1 \cdot f2 \cdot f3}{(p1 - f1) \cdot (p2 - f2) \cdot (p3 - f3)} \quad (3)$$

p1은 시스템에 따라 결정되는 상수이며 q1은 Focal length가 줄어들면 줄어들게 된다. 식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 Focal length는 반확대를 결정하는 중요 변수이다.

### 2.3 렌즈 전류와 Focal length의 관계

자속 밀도(Magnetic flux density) B와 속도(Velocity) v

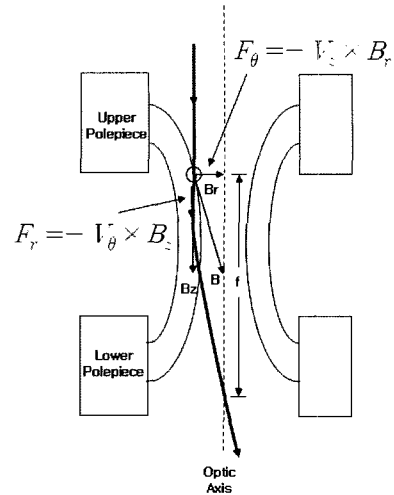


Fig. 3 The force on an electron

를 가진 전자 상에 미치는 힘(Force) F의 관계는 식 (4)와 같다. 자속 밀도는 방사성 방향 Br(Radial direction)과 렌즈 축(Optic axis) 방향 Bz로 나누어 지며 이것에 의해 힘 또한 회전(Rotational) 방향 힘 F<sub>θ</sub>와 F<sub>r</sub>로 분리되며 식 (5)와 식 (6)과 같다. 결국 두 힘의 작용으로 전자는 나선형의 회전 운동을 하면서 이동하고 렌즈 축을 지나게 된다. Fig. 3은 전자에 미치는 힘과 이동에 의한 Focal length 발생에 대해 보이고 있다.

$$F = -e(V \times B) \quad (4)$$

$$F_{\theta} = -v_z \times B_r \quad (5)$$

$$F_r = -v_{\theta} \times B_z \quad (6)$$

대부분의 전자 렌즈에 있어서 Focal length는 렌즈 코일의 권선 수와 흐르는 전류의 제곱에 반비례하며 전자총에 공급된 가속 전압에 비례한다. 이것에 대한 수식은 식 (7)과 같다. 가속 전압은 전자를 시료로 가속 시키는 역할을 한다.

$$f = V_0 / (NI)^2 \quad (7)$$

여기서 N은 권선수이며 f는 Focal length이고 I는 전류 및 V<sub>0</sub> 맞는 전자총에 인가된 고전압의 크기를 의미한다.

## 3. 렌즈 제어 신호를 위한 하드웨어 사양 설계

### 3.1 렌즈 제작

집속 렌즈 1은 시료에 도달되는 빔의 사이즈(Spot size)를



Fig. 4 The structure of condenser lenses and object lens

결정하는 기능을 수행하며 집속 렌즈 2는 전자총에 인가되는 고전압의 크기에 따라 일정한 전류를 갖도록 설계되었다. 대물 렌즈는 시료에 대한 전자빔의 초점(Focus)을 맞추는 기능을 수행한다. 위의 기능은 PC 기반의 운영 프로그램에서 사용자가 조종할 수 있도록 하고 있다<sup>(4)</sup>.

Fig. 4는 각 기능에 따라 제작된 집속 렌즈와 대물 렌즈를 보이고 있다. 집속 렌즈는 920회의 권선수, 폭 72mm와 높이 70mm 그리고 지름 25mm의 내부 공간을 가진 원통형이다. 대물 렌즈는 600회의 권선수, 폭 85mm와 높이 50mm 그리고 지름 45mm의 내부 공간을 가진 원통형이다.

3.2 렌즈 제어에 필요한 전류의 사양

식 (7)을 렌즈에 필요한 전류의 식으로 정리하면 식 (8)과 같다.

$$I = \sqrt{\frac{V_0}{N^2 f}} \tag{8}$$

또한 Fig. 1의 기구적인 설계를 감안하고 Fig. 3에서 폴피스의 중심을 B<sub>i</sub>이 0이 되는 점으로 가정하면 최소 Focal length가 된다. 식 (8)에 의해 같은 고전압에 대해 렌즈 전류가 커지면 Focal length가 작아지며 하드웨어 설계의 경우 허용 최대 전류 값이 필요하므로 본 연구에서는 최소 Focal length만 의미를 가지게 된다. 이에 따라 집속 렌즈 1과 집속 렌즈 2의 최소 Focal length는 0.86mm로 계산된다. 대물 렌즈는 시료에 초점을 맞추는 기능하여 Focal length가 길어 지므로 하드웨어 설계의 편의를 위해 집속 렌즈의 전류값과 같은 범위를 갖도록 한다. 현재 사용중인 고전압은 0-25kV의 범위를 가지고 있다. Table 1은 집속 렌즈에서 각 고전압에 따른 전류의 크기를 보이고 있다.

Table 1에서 보논바와 같이 렌즈의 최대 전류는 5.86[A]가 흐르므로 이것을 하드웨어 설계를 위한 최소 허용 전류로 정하였다.

Table 1 The current value of condenser lenses for each high voltage

고전압의 크기(kV)	전류의 크기(A)
1	1.17
3	2.02
5	2.62
10	3.70
15	4.53
20	5.24
25	5.86

3.3 전류 제어를 위한 하드웨어 설계

3.2절에서 계산된 최소 허용 전류를 포함하며 렌즈의 전류를 제어하기 위해 N-channel의 MOS FET 2SK1058를 선택하였다.

이것은 7[A]의 드레인 전류(Drain current) 사양을 가지고 있어 본 렌즈 시스템의 전류 제어에 적합하다. 2SK1058의 제어를 위한 게이트(Gate) 제어 신호는 운영 프로그램에서 전송되어 AD7537에서 변환된다. Fig. 5는 집속 렌즈 제어를 위해 설계된 도면이며 Fig. 6은 제작된 보드(Board)와 집속 렌즈에 대한 입력 전압의 파형을 보이고 있다. 제작된 보드는 대물

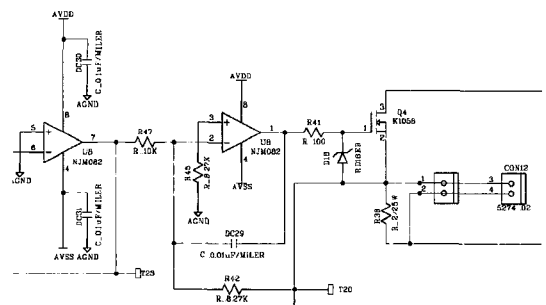


Fig. 5 The circuit diagram for condenser lens control

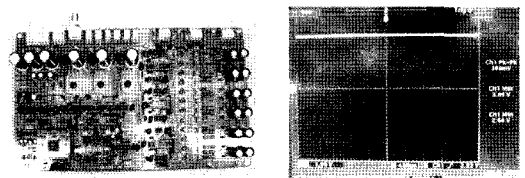


Fig. 6 Optic control board and the signal of condenser lens

렌즈와 집속 렌즈를 제어하며 추가로 이미지 쉬프트(Shift), 건열라인먼트(Gun alignment)의 기능도 수행하도록 설계되었다. 각 렌즈를 제어하는 제어 변수는 사용자 화면으로부터 시리얼 통신을 통해 전달된다.

#### 4. 결과

본 연구에서 제작된 전자 렌즈와 하드웨어를 이용해 이미지 획득을 위한 실험을 시행하였다. 실험에서 사용된 고전압 제어기(High voltage controller), 스캔 제어기(Scan controller) 그리고 공정 제어(Process controller)는 현재 개발중인 시제품을 사용하였다<sup>(5)</sup>.

집속 렌즈 1을 이용해 스팟 사이즈(Spot size)를 조종하였으며 대물 렌즈를 이용해 시료에 대한 초점을 조종하였다. 스팟 사이즈는 사용되는 고전압의 크기에 따라 최소와 최대 허용 전류를 다르게 사용하고 있다. 대물 렌즈에 의한 초점 기능은 시료와 대물 렌 하단의 어퍼처 사이의 워킹 디스턴스(Working distance)에 따라 최소 및 최대 허용 전류를 다르게 선정하였다. 집속 렌즈 2의 값은 고전압과 스팟 사이즈에 따라 전류를 제어하였다. 위에서 각 렌즈에 대한 전류값은 실험적인 방법을 통해 결정하였다. Fig. 7은 제작된 렌즈 시스템을 이용하여 표준 시편에 대해 라인 스캔으로 얻어진 이미지를 보이고 있다. 사용된 고전압은 20kV이며 에미션 전류(Emission current)는 100 $\mu$ A이다.

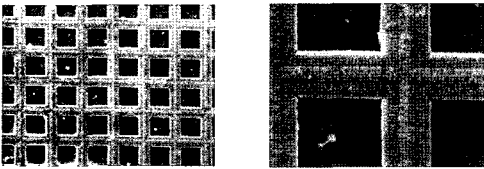


Fig. 7 Captured image using developed lenses

#### 5. 결론

본 연구는 개발중인 전자 현미경에서 Focal length를 이용해 전자 렌즈의 전류 제어에 필요한 하드웨어 사양을 설계하고 제작하여 영상을 통해 검증하는 것을 목적으로 하고 있다. 연구 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전자 현미경의 집속 렌즈와 대물 렌즈를 제어하기 위해 전자빔의 특성인 Focal length를 이용하는 방법은 하드웨어 설계 및 제작에 적합한 방법임을 영상을 통해 확인하였다.
- (2) 전자 렌즈의 보다 정밀한 제어를 위해서는 각종 수차 등을 고려해야 하지만 이것은 많은 계산량을 필요로 한다. 그러나 제시된 Focal length 만을 이용한 방법은 렌즈 제어에 필요한 최대 전류 값을 계산하여 하드웨어 사양 결정을 빠르게 할 수 있다.

#### 참고 문헌

- (1) Joseph, I., Dale, E., Patrick., E. and David. C., 1992, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, PLENUM PRESS, pp. 43~57.
- (2) John, T. L., 1993, *ELECTRON BEAM TESTING TECHNOLOGY*, Plenum Press, pp. 129~147.
- (3) Lim, S. J. and Lee, C. H., 2006, "Design of Control Signal Systemization for SEM," *KSMTE autumn conference*, pp. 97~100.
- (4) Lim, S. J., Lee, C. H. and Song, J. H., 2007, "Agent Application for E-Beam Manufacturing System," *KSMTE*, Vol. 16, No. 2, pp. 44~49.
- (5) Lim, S. J., and Lyou, J., 2006, "Development of Intelligent Remote Beam Control Function in E-Beam Manufacturing System," *KSMTE*, Vol. 15, No. 2, pp. 24~29.