

## 주사 전자 현미경에서 영상 획득에 필요한 구성 요소 구현

임선중, 이찬홍

한국기계연구원 지능형생산시스템본부

### Realization for Each Element for capturing image in Scanning Electron Microscopy

Sun Jong Lim, Chan Hong Lee

Intelligent Manufacturing Systems Research Division, KIMM

#### ABSTRACT

Scanning Electron Microscopy (SEM) includes high voltage generator, electron gun, column, secondary electron detector, scan coil system and image grabber. Column includes electron lenses (condenser lens and objective lens). Condenser lens generates fringe field, makes focal length and control spot size. Focal length represents property of lens. Objective lens control focus. Most of the electrons emitted from the filament, are captured by the anode. The portion of the electron current that leaves the gun through the hole in the anode is called the beam current. Electron beam probe is called the focused beam on the specimen. Because of the lens and aperture, the probe current becomes smaller than the beam current. It generate various signals(backscattered electron, secondary electron) in an interaction with the specimen atoms. In this paper, we describe the result of research to develop the core elements for low-resolution SEM.

**Key Words:** Scanning electron microscopy, electron lenses, scan coil

#### 1. 서론

주사 전자 현미경에서 영상을 획득하기 위해 필요한 구성 요소는 크게 고전압 발생기, filament 와 wehnelt을 포함하는 electron gun, anode, sleeve, pole-piece, aperture, electron lenses, scan coil 및 진공 chamber 등이다. 필라멘트에서 발생된 전자 빔은 바이어스 전압에 의해 모아지고 가속 전압에 의해 시편 방향을 향해 이동하게 된다. 이동 중에 anode 기능을 하는 sleeve에서 대부분의 전자 빔 흡수되어 emission 전류로 나타나며 일부만이 sleeve hole을 통과한다. Sleeve를 통과하면서 우선 집속 렌즈와 pole piece에 의해 형성된 fringe field를 통과하게 된다. 이후 전자빔은 대물 렌즈와 scan coil을 포함하는 유닛을 통과하고 aperture를 지난 후 시편에 도달하게 된다.<sup>1,2</sup>

본 논문은 저해상도 주사 전자 현미경과 각 요

소들의 구현에 대해 기술하고 있다. 또한 구현된 주사 전자 현미경의 보완 및 향후 연구 방향에 대해 기술하고 있다.

#### 2. 저해상도 주사 전자 현미경 구성

구현된 주사 전자 현미경의 기본 구성은 Fig. 1과 같다.<sup>3,4</sup> 제어기는 고전압 발생 제어기, 렌즈 제어기, scan 제어기 그리고 main 제어기로 구성된다. 고전압 발생 제어기(High voltage control)은 필라멘트, 바이어스 및 가속 전압의 제어 신호를 발생하고 고전압 발생기로부터 emission 전류를 받는다. 렌즈 제어기(Lens control)은 두 개의 집속 렌즈 제어 신호(CL\_1, CL\_2), 대물 렌즈 신호(OL) 그리고 gun alignment(GA) 제어 신호를 발생한다. Scan 제어기는 전자빔의 scan 신호(SC)와

stigmator 제어 신호(ST)를 발생하고, 2차 전자 검출기 신호를 수신하도록 되어 있다. Main 제어기는 chamber의 진공을 생성하며 주변 기기 제어 신호인 모터 브레이크(Mo\_Break), 밸브 제어 신호(Valve\_con), 공기 주입 신호(Air\_con), Panel에 대한 진공도 표시 신호(Panel)를 발생한다. 또한 초기화 작업을 실행한 후 시스템의 준비 상태를 운영 프로그램에 전달하게 된다. 고전압 발생기는 전자빔 발생에 필요한 고전압(필라멘트, 바이어스, 가속 전압)을 발생하고 상태 감시 전류로 emission 전류를 발생한다. 컬럼은 2개의 집속 렌즈와 하나의 대물 렌즈, scan coil, stigmator coil, alignment coil, sleeve 및 aperture를 포함하고 있다. Chamber 내의 진공을 생성하기 위해 rotary pump와 diffusion pump를 사용하고 있으며 진공도는  $10^{-4}$  torr 이상을 유지하고 있다. 주사 전자 현미경의 운영은 PC의 사용자 프로그램을 통해 실행된다. 운영 프로그램은 가속 전압, 바이어스 전압, 필라멘트 전압, spot size, brightness, contrast, alignment, stigmator, working distance 를 제어할 수 있으며 emission 전류를 감시할 수 있도록 구성되어 있다. 시편의 영상은  $640 \times 480$  pixel의 해상도를 갖는다.<sup>3,4</sup>

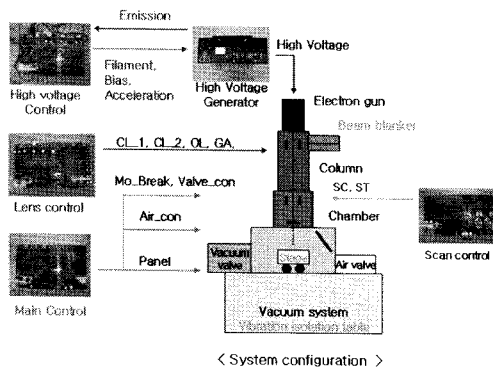


Fig. 1 Each unit and controller of SEM.

### 2.1 전자빔 발생 요소 구현

전자빔을 발생하기 위한 요소로는 고전압 발생기와 제어기 그리고 전자총이 있다. 고전압 발생을 위해 Spellman 사의 고전압 발생기를 사용했으며 Table 1의 제어 전압과 출력 전압의 사양을 갖는다.<sup>5</sup>

Fig. 1에 보여진 고전압 발생 제어기는 운영 프로그램에서 전달된 각 전압(가속, 바이어스 및 필라멘트)의 값을 D/A 컨버터로 변환 후 고전압 발

생기에 전달한다. Emission 전류는 고전압 발생기의 feedback 저항의 값을 고려해 계산된 값이 운영 프로그램에 나타나도록 분압 회로를 사용하였다. 에미션 전류의 값은 필라멘트의 수명과 영상을 밝기 등을 고려해 대부분 100  $\mu$ A를 사용한다.

약 2,500°C로 가열된 필라멘트에서 방출된 전자는 wehnelt cap의 바이어스 전압에 의해 모여지고 가속 전압에 의해 가속된 후 anode 홀을 통과한다. Wehnelt과 anode는 스테인레스 강으로 제작하였다. 전자총 헤드 유닛은 고전압을 다루게 되므로 고치밀도형 알루미늄 세라믹 절연판과 내고압 절연 오일을 사용하였다. Fig. 2는 전자총과 헤드 유닛을 보이고 있다.

Table 1 Specification of high voltage generator

전압	제어 전압 [V]	출력 전압 [V]
가속 전압	0 - 7.32	0 - 30 kV
바이어스 전압	0 - 10	0 - 6 kV
필라멘트 전압	0 - 10	0 - 14 W

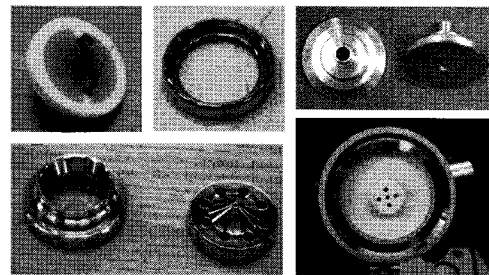


Fig. 2 Elements of electron gun.

### 2.2 전자빔 제어 요소 구현

전자빔을 영상을 획득할 수 있도록 제어하기 위한 요소들로는 집속 렌즈, 대물 렌즈, pole piece, aperture, sleeve, scan coil, stigmator, alignment coil 등이며 컬럼내에 위치하고 있다. Fig. 3은 전자빔 제어 요소들의 구성을 보이고 있다.

대부분의 전자 렌즈에서 초점 거리는 렌즈 코일의 권선수와 흐르는 전류의 제곱에 반비례하며 전자총에 공급된 가속 전압에 비례한다. 이것을 전류의 식으로 정리하면 식 (1)과 같이 표시된다.<sup>6</sup>

$$I = \sqrt{\frac{V_0}{N^2 f}} \quad (1)$$

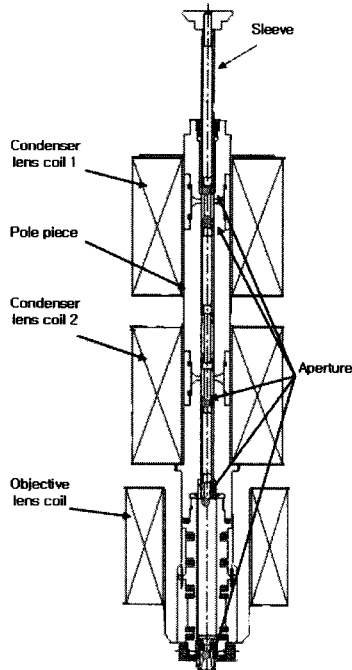


Fig. 3 Electron beam control parts.

여기서  $N$ 은 권선수이며  $f$ 은 초점 거리이고  $I$ 는 전류,  $V_0$ 는 가속 전압이다.

Pole piece의 중심에서 방사선 방향의 자속 밀도가 0이 된다고 하면 최소 초점 거리가 된다. 식 (1)에 의해 가속 전압에 대해 렌 전류가 커지면 초점 거리가 작아지며 하드웨어 설계의 경우 허용 최대 전류값이 된다. 집속 렌즈 최소 허용 전류는 aperture의 위치를 고려하여 정하게 된다. 대물 렌즈는 초점을 맞추는 기능을 수행하며 초점 거리와 working distance를 고려하여 최대 및 최소 허용 전류를 구하게 된다. Fig. 4는 pole piece와 대물 렌즈를 보이고 있다.

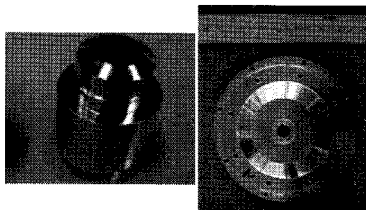


Fig. 4 Pole piece and objective lens.

Table 2는 가속 전압에서 집속 렌즈의 최대 전류의 크기를 보이고 있다. Table 2에서와 같이 최대 허용 전류 5.86 A를 고려하여 렌즈 전류 제어 회로를 설계하였다.

Table 2 The current of condenser lens

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

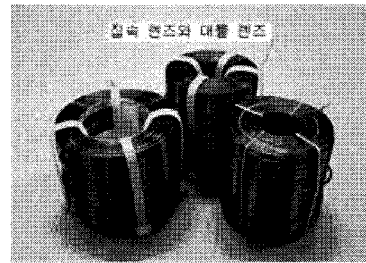


Fig. 5 Condenser lens and objective lens coil.

위에서 계산된 최대 허용 전류를 제어하기 위해 N-channel의 MOS FET 2SK1058를 선택하였다. 이것은 7 A의 드레인 전류(Drain current) 사양을 가진다.

Fig. 5는 제작된 집속 렌즈와 대물 렌즈를 보이고 있다. 집속 렌즈는 권선수 920회, 폭 72 mm, 높이 70 mm의 사양을 가진다. 대물 렌즈는 권선수 600회, 폭 85 mm, 높이 50 mm 그리고 지름 45 mm의 내부 공간을 가진 원통형이다.

빔 scan, image shift, stigmator용 코일은 Fig. 6과 같은 보빈에 의해 구성된다. Image shift는 영상을 이동하는 기능이며 stigmator는 전자빔의 왜곡을 보정하는 기능을 수행한다.<sup>7</sup>

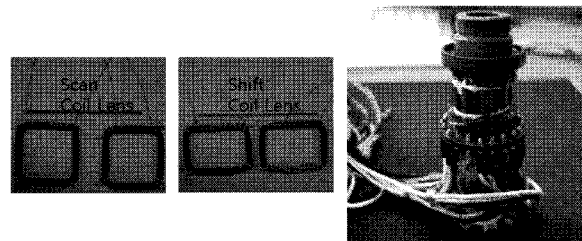


Fig. 6 Scan, shift coil and bobbin.

영상 검출을 위한 2차 전자 검출기는 scintillator, light guide, photomultiplier 와 amplifier로 구성되며 Fig. 7은 제작된 2차 전자 검출기를 보이고 있다.

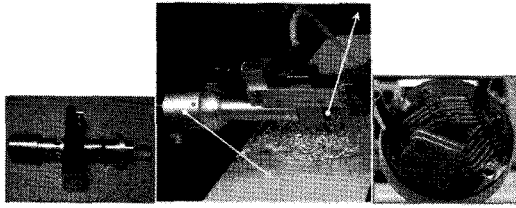


Fig. 7 Secondary electron detector.

### 3. 영상 획득

전자총에서 발생된 전자빔의 대부분은 anode에 흡수되면 일부만이 anode의 hole을 통과하게 된다. 이것은 빔 전류라고 한다. 빔 전류는 렌즈의 초점 거리 조종 기능으로 많은 양이 aperture에 흡수되고 일부만이 시편에 도달하게 된다. 이것을 probe 전류라고 한다. Emission 전류의 크기는 가속 전압을 고전압 발생기의 feedback 저항 (500 MΩ) 값으로 나눈 값이 된다. Probe 전류는 spot size에 따라 다르며 이것은 시스템 조립에서 alignment를 확인하기 위한 중요한 수단이 된다. Probe 전류가 크면 영상은 밝아지나 분해능은 떨어지게 된다. 한편 probe 전류가 작으면 영상은 어두워지나 분해능은 향상된다. Probe 전류의 선택은 관찰 대상에 따라 사용자가 정하게 된다.

Fig. 8, 9는 20 kV의 가속 전압에서 beam 전류와 probe 전류를 측정한 것을 보인다. Beam 전류는 약 306 nA의 크기를 보인다. Probe 전류는 약 98 pA의 크기를 보인다. Beam 전류와 probe 전류가 안정된 상태를 보임에 따라 시스템의 alignment가 적합한 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 조립된 저해상도 주사 전자 현미경을 보이며 Fig. 11은 획득된 영상을 보이고 있다.

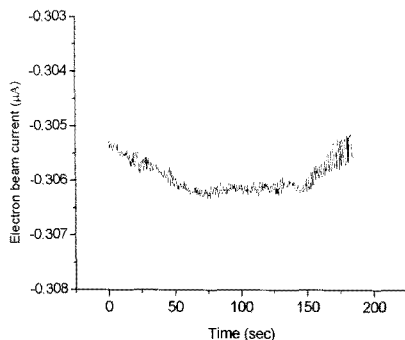


Fig. 8 Beam current at 20 kV acceleration voltage.

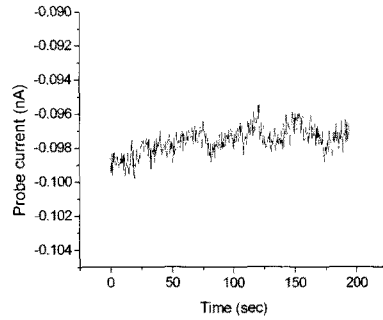


Fig. 9 Probe current at 20 kV acceleration voltage.

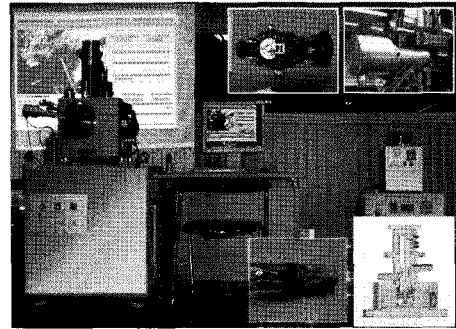


Fig. 10 Developed SEM.

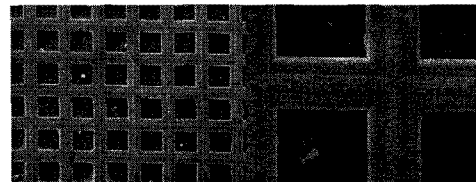


Fig. 11 Captured images by a developed SEM.

### 4. 결론

본 논문은 저해상도 주사 전자 현미경의 구성 요소들의 구현과 영상 획득에 대해 기술하였다. 세부적인 결론과 향후 연구 계획은 다음과 같다.

- (1) 저해상도 전자 현미경의 각 요소의 구현으로 향후 해상도 향상위한 설계, 가공 및 조립 기술의 기반이 확보되었다. 특히, 획득된 영상의 분석을 통해 시스템의 개선 부분을 파악하는 기술이 획득되었다.
- (2) 향후 연구는 고해상도 전자 현미경 개발을 위해 전자 렌즈내의 전자빔 경로 설계와 전자빔 편향 시스템 설계를 진행하고 있다. 또한 본 시스템은 전자빔 직접 가공기에 활용하기 위한 계획도 진행하고 있다.

## 참고문헌

- 1) John, T. L., "ELECTRON BEAM TESTING TECHNOLOGY," Plenum Press, USA, pp. 35-125, 1993.
- 2) Joseph, I. G., Dale, E. N., Patrick, E., David. C. J., Roming. A. D., Charles. E. L., Charles, F. and Eric. L., "Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis," *Plenum Press*, USA, pp. 21-68, 1992.
- 3) Sunjong, L. and Chanhong, L., "Design of Control Signal Systemization for SEM," KSMTE, pp. 97-100. 2006.
- 4) Sunjong, L. and Chanhong, L., "Hardware Design for the Control Signal Generation of Electron Optic by Focal Length," KSMTE, Vol. 16, No. 5, pp. 96-100, 2007.
- 5) Design Specification for a 30 kV Electron Gun Power Supply, Spellman.
- 6) Hawkes, P. W. and Kasper, E. "*Principles of Electron Optics*," Academic press, UK., 1989.
- 7) Mariusz, P., Andrzej, C., Jacek, R., Jerzy, K., Lukasz, O. and Remigusz, R., "Seperation of image-distortion sources and magnetic-field measurement in scanning electron microscope(SEM)," *micron*, pp. 1-5, 2008.