

주사 전자 현미경에서 전자빔 프로브 생성

임선종*, 이찬홍[†]

(논문접수일 2008. 3. 14, 심사완료일 2008. 8. 18)

Creation of Electron Beam Probe in Scanning Electron Microscopy

Sun Jong Lim*, Chan Hong Lee[†]

Abstract

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 lenses and aperture, the probe current becomes smaller than the beam current. It generates various signals(backscattered electron, secondary electron) in an interaction with the specimen atoms. Backscattered electron provides an useful signal for composition and local specimen surface inclination. Secondary electron is used for the formation of surface imagination. The steady electron beam probe is very important for the imagination formation and the brightness. In this paper, we show the results of developed elements that create electron beam probe and the measured beam probe in various acceleration voltages by Faraday cup. These data are used to analyze and improve the performance of the system in the development.

Key Words : 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscopy), 전자빔(Electron beam), 빔 전류(Beam current), 전자빔 프로브(Electron beam probe), 후방산란전자(Back scatter electron), 이차전자(Secondary electron), 집속 렌즈(Condenser lens), 대물 렌즈(Objective lens), 패러데이 컵(Faraday cup), 고전압 발생기(High voltage generator)

1. 서 론

전자총(Electron gun)에서 발생된 전자빔은 대부분 애노드(Anode)를 거쳐 고전압 발생기로 들어가 에미션 전류(Emission current)가 된다. 에미션 전류는 바이어스 전압

(Bias voltage)의 조종을 통해 전자총의 밝기를 조종하기 위해 이용된다. 전자총이 가장 밝은 상태를 유지하는 것은 100 μ A로 알려져 있다. 위와 같이 전자빔의 일부만이 애노드 홀을 통과하게 되는데 이것을 전자빔 전류라 한다^(1~3). 전자빔 전류는 집속 렌즈, 대물 렌즈 그리고 어퍼처(Aperture)가 있는

* 한국기계연구원, 지능형 생산시스템 연구 본부 (sjlim@kimm.re.kr)

주소: 305-343 대전시 유성구 장동 171

+ 한국기계연구원, 지능형 생산시스템 연구 본부

슬리브(Sleeve)를 통과하여 시료에 도달된다. 전자빔 프로브는 시편 위에 초점이 맞추어진 전자빔을 가리킨다. 시편에 도달된 전자빔 프로브는 대부분 외부 다시 나오면서 후방산란전자(Backscattered electron)가 되고 시편과 비탄성 산란으로 이차 전자(Secondary electron)을 발생시킨다. 후방산란전자는 영상 형성, 성분 및 구조 분석에 사용되며 이차전자는 표면 영상을 형성하는데 사용된다. 이와 같이 전자빔 프로브는 관찰하기 위한 시편과의 상호 작용을 통해 유용한 신호를 발생시킨다. 발생되는 유용한 신호는 시편에 도달되는 전자빔 프로브의 양에 의해 결정된다. 전자빔 프로브의 양이 일정하지 않는 경우 발생되는 신호도 일정하지 않게 되며 영상도 밝음과 어두워짐을 반복하게 되어 좋은 영상을 얻을 수 없게 된다. 따라서 좋은 영상을 얻기 위해서는 안정된 전자빔 프로브의 생성과 확인이 기본적인 작업이다.

본 연구는 개발 중인 주사 전자 현미경에서 전자빔 프로브 생성에 관련된 요소들의 제작을 보인다. 또한 가속 전압에 따른 전자빔 전류와 프로브 전류를 측정·분석하여 시스템 성능 향상과 개선에 사용되는 모델 데이터를 확보하였다.

2. 전자빔 발생과 프로브 생성을 위한 구성 요소

개발 중인 전자 현미경의 경우 전자빔 발생에서 프로브 생성까지 직접적으로 관련되는 요소들은 고전압 발생기, 슬리브, 어퍼체, 2개의 집속 렌즈 및 대물 렌즈 등이 있다⁽⁴⁾. 전자총의 필라멘트 가열을 통해 발생된 전자빔은 바이어스 전압에 의해 크로스오버(Crossover)가 생긴다. 크로스오버에서 한 곳에 모인 전자빔은 가속 전압에 의해 애노드를 향해 이동하게 된다. 대부분의 전자빔이 애노드에 흡수되고 일부분이 슬리브 훌을 통과한다. 전자빔은 집속 렌즈와 폴피스(Polepiece)에 의해 발생된 플린징 자장(Fringing field)으로 초점 거리(Focal length)가 형성된다. 집속 렌즈의 초점 거리는 스팟 사이즈(Spot size)를 조종하게 된다. 집속 렌즈를 통과하면서 전자빔 전류의 양은 줄어들게 된다. 대물 렌즈에 의해 전자빔은 시편에 초점이 맞추어지고 전자빔 프로브를 형성하게 된다. 대물 렌즈를 통과하면서 전자빔의 양은 더욱 줄어들게 된다. Fig. 1은 개발 중인 주사 전자 현미경에서 전자빔 프로브 생성에 관련된 요소들의 구성을 보이고 있다. 진공은 로타리 펌프와 디퓨전 펌프를 이용해 생성하고 있다.

3. 구성 요소 제작

3.1 고전압 발생기 및 전자총

고전압 발생기는 필라멘트를 가열하기 위한 필라멘트 선

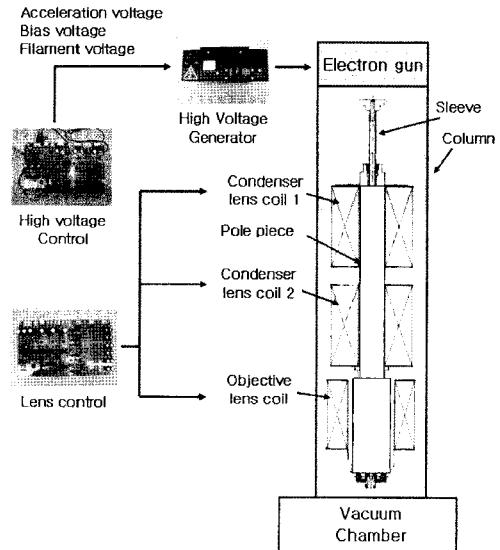


Fig. 1 System configuration

압, 크로스오버를 만들기 위한 바이어스 전압 그리고 전자빔을 애노드 방향으로 가속시키기 위한 가속 전압을 만든다. 에미션 전류는 0 - 7.65V의 전압으로 출력되며 이것은 전류로 환산하는 경우 0 - 255μA에 해당된다⁽⁵⁾. Table 1은 고전압 발생기의 제어 및 출력 전압의 범위를 보이고 있다.

전자총은 웨닐넷과 필라멘트에 바이어스 전압이 인가되고 애노드 플레이트와 웨닐넷에 가속 전압이 인가되는 구조를 가지고 있다. 전자빔 소스는 텅스텐 필라멘트를 사용하고 있다. Fig. 2는 사용 중인 필라멘트와 제작된 전자총을 보이고 있다.

고전압 발생기의 제어는 운영 프로그램에서 가속 전압, 필라멘트 및 바이어스 전압을 각각 제어할 수 있도록 되어 있다. 전자빔을 발생시키기 위해 가속 전압을 선택하고 전자빔이 충분히 발생하도록 필라멘트 전압을 인가한다. 이후 에미션 전류가 100μA가 될 수 있도록 바이어스 전압을 조종한다. 운영 프로그램에서 설정된 각 값은 고전압 제어기에 전

Table 1 The range of output voltage and control input voltage

Voltage	Output voltage range	Control input range
Acceleration	0 - 30kV	0 - 7.32V
Bias	0 - 6kV	0 - 10V
Filament	0 - 14W	0 - 10V

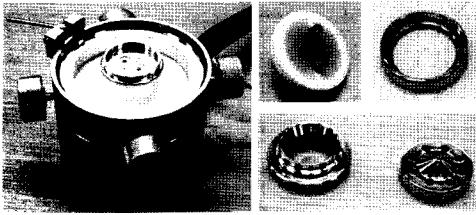


Fig. 2 Filament and electron gun

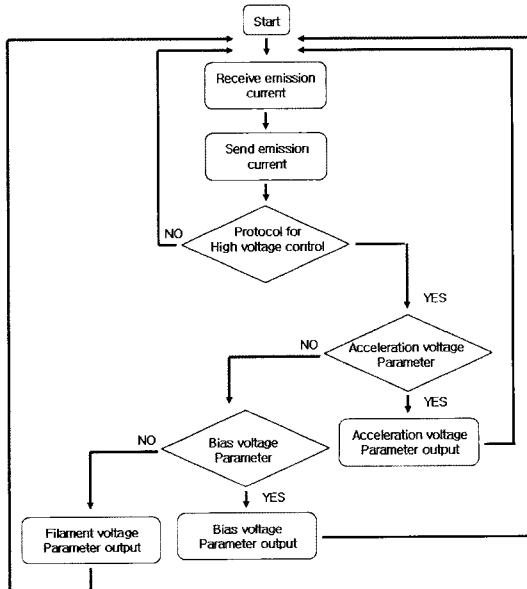


Fig. 3 Software flow chart for high voltage generation control

송된다. 제어기는 전송된 프로토콜을 검색하여 해당되는 값을 D/A 컨버터로 변환하여 고전압 발생기에 입력한다. Fig. 3은 고전압 발생 제어기에 대한 소프트웨어 플로어차트를 보이고 있다.

3.2 전자 렌즈와 제어기

전자 렌즈 제어를 위해 필요한 전류는 초점 거리, 권선수 및 가속 전압의 관계를 나타내는 식 (1)을 사용하고 있다. 이 식에서 초점 거리의 범위는 전자빔 이동 경로의 기하학적인 분석과 슬리브 및 어퍼처의 설계 치수를 기반으로 계산하였으며 자세한 사항은 참고 문헌에 제시되고 있다^(6,7).

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

여기서, I 는 전류, V_0 는 가속 전압, N 은 권선수 및 f 는 초점 거리를 나타낸다.

집속 렌즈는 2개로 구성되어 있으며 편이상 전자총과의 거리에 따라 집속 렌즈 1 및 집속 렌즈 2로 하였다. 집속 렌즈 1은 스팟 사이즈를 조종하며 사용되는 가속 전압의 크기에 따라 제어 전압의 범위가 달라진다. 가속 전압이 클수록 초점 거리가 길어지는데 이것을 일정한 범위내로 유지하도록 하기 위해서이다. 이 범위는 슬리브 내에서 전자빔의 이동 경로에 기반을 하고 있다. 집속 렌즈 2의 제어 전압은 사용되는 가속 전압과 어퍼처의 위치를 고려하여 정해진 값을 사용하도록 되어 있다.

대물 렌즈는 시편위에 초점을 맞추는 기능을 수행한다. 초점 거리는 동작 거리(Working distance)에 따라 달라진다. 현재 시스템의 동작 거리는 8mm로 설계되어 있다. 대물 렌즈의 초점 조종 기능도 초점 거리를 조종하여 실행된다. 가속 전압이 클수록 대물 렌즈를 지나는 전자빔의 초점 거리가 길어지므로 초점 조정 범위를 조종하는 제어 신호도 커지게 된다. 대물 렌즈는 내부에 스캔 코일(Scan coil), 이미지 쉬프트(Image shift) 코일 및 스티그메이터(Stigmator) 코일 등이 장착된다. 스캔 코일은 배율에 따라 전자빔 프로브의 스캔 범위를 조종하게 된다. 이미지 쉬프트 코일은 화면의 영상을 상하 혹은 좌우로 이동하는 기능을 수행한다. 스티그메이터 코일은 전자빔 프로브의 외형이 왜곡되어 있는 경우 이를 보정하기 위해 사용된다. 보정은 영상에 대해 x 혹은 y 방향으로 수행된다. 이것은 고배율에서 보다 정확한 초점이 이루어지도록 하는 중요한 기능이다. Fig. 4는 제작된 집속 렌즈와 대물 렌즈를 보이고 있다.

전자 렌즈 제어기는 또한 건 얼라인먼트(Gun alignment) 제어 모듈을 포함하도록 되어 있다. 건 얼라인먼트는 전자총에서 발생된 전자빔의 중심이 전자 렌즈의 중심축과 일치하지 않는 경우 전자빔의 중심축을 이동시킨다. Fig. 5는 렌즈 제어기의 소프트웨어 플로어차트를 보이고 있다. 사용자 화면에서 스팟 사이즈, 초점, 이미지 이동, 스티그메이터 등에 대한 설정 값을 프로토콜을 통해 보내면 제어기는 프로토콜

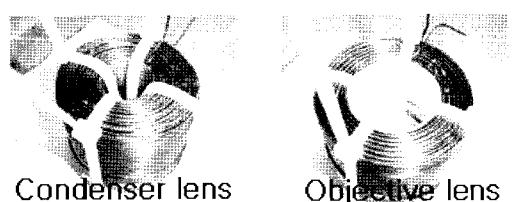


Fig. 4 Condenser lens and objective lens

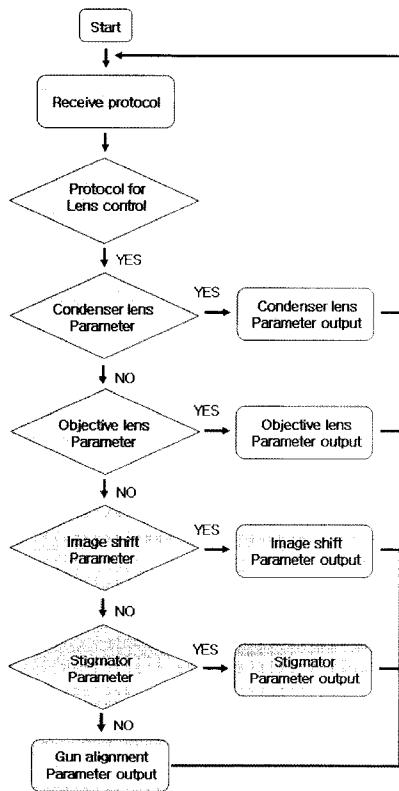


Fig. 5 Software flow chart for lens control

을 검색하여 해당되는 값을 D/A 컨버터로 변환하여 동작시킨다. 전자 렌즈 제어기의 외형이 Fig. 1에 있다.

4. 프로브 전류 측정 및 분석

전자총 및 컬럼의 성능을 확인하고 영상 개선을 위한 모델 데이터로 활용하기 위해서 전자빔 전류와 프로브 전류를 측정하였다. 전자빔 전류 측정을 통해 고전압 발생기의 동작 여부, 필라멘트의 상태 및 전자총의 얼라인먼트 등을 확인하게 된다. 운영 프로그램에서 설정된 각 가속 전압에 대해 전자빔 전류의 값과 변화 상태를 점검하고 에미션 전류의 상태를 점검하게 된다. 가속 전압과 바이어스 값에 의해 전자빔 전류가 변하게 된다. 가속 전압과 바이어스 전압이 크면 전자총에서 발생되는 전자빔이 커지게 되고 결국 슬리브 훌을 통과하는 전자빔 전류도 커지게 된다. 일반적으로 시편 관찰 시, 에미션 전류가 $100\mu\text{A}$ 되도록 필라멘트, 바이어스 전압을 조종하게 된다.

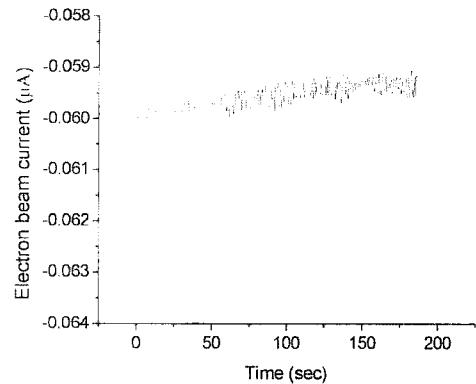


Fig. 6 Electron beam current in 3kV

필라멘트가 끊어진 경우 전자빔이 방출되지 않아 전자빔 전류가 측정되지 않는다. 필라멘트의 수명은 필라멘트에 흐르는 전류에 반비례하므로 필라멘트 및 바이어스 전압 등을 적합하게 설정한다. 전자총의 얼라인먼트가 맞지 않는 경우 전자빔 전류가 작거나 심한 경우 흐르지 않게 되어 영상이 어둡거나 생성되지 않는다. 이 경우, 전자총의 얼라인먼트를 조종하여 많은 전자빔 전류가 측정되는 위치를 찾게 된다.

프로브 전류의 측정을 통해 스팟 사이즈, 어퍼처 상태 및 슬리브의 얼라인먼트 상태를 확인하기 위한 모델 데이터를 얻게 된다. 프로브 전류의 크기는 스팟 사이즈에 직접적으로 관계된다. 스팟 사이즈는 분해능을 결정하게 된다. 스팟 사이즈를 작게 하면 분해능은 높아지지만 영상은 어둡게 된다. 스팟 사이즈를 크게 하면 분해능은 낮아지지만 영상은 밝게 된다. 따라서 관찰하는 시편과 밝기에 따라 스팟 사이즈는 다르게 된다. 어퍼처는 수차의 영향을 줄이지만 프로브 전류의 크기에 직접적으로 영향을 미친다. 어퍼처의 크기는 수차의 영향, 프로브 전류 및 분해능을 고려하여 결정하게 된다.

Fig. 6에서 Fig. 8은 측정된 전자빔 전류를 보이고 있다. 측정 시간은 180초이며 샘플링 수는 5/sec이다. Fig. 6은 3 kV의 가속 전압에서 측정된 전자빔 전류를 보이고 있다.

Peak-to-peak는 0.5nA 이며 로타리 펌프의 진동으로 50 sec에서 150sec 동안에 변화폭이 크게 나타난다. Fig. 7은 15kV의 가속 전압에서 측정된 전자빔 전류를 보이고 있다. Peak-to-peak는 약 0.4nA 이다. Fig. 8은 20kV의 가속 전압에서 측정된 전자빔 전류를 보이고 있다. Peak-to-peak는 약 0.8nA 이다.

Fig. 9에서 Fig. 11은 프로브 전류의 측정 결과를 보이고 있다. Fig. 9는 3kV의 가속 전압에서 측정된 프로브 전류이다.

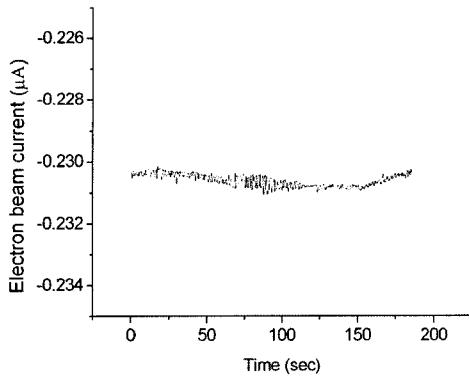


Fig. 7 Electron beam current in 15kV

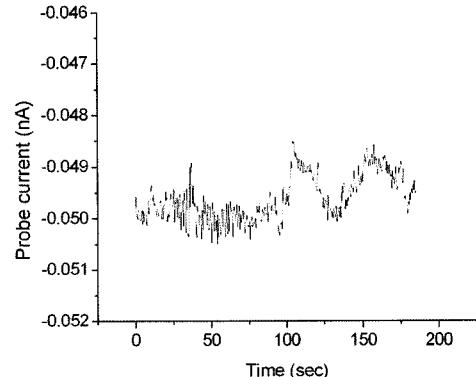


Fig. 10 Probe current in 15kV

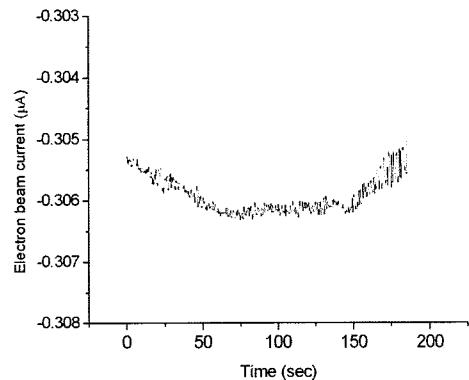


Fig. 8 Electron beam current in 20kV

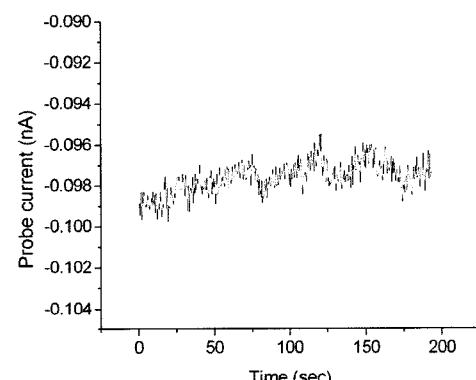


Fig. 11 Probe current in 20kV

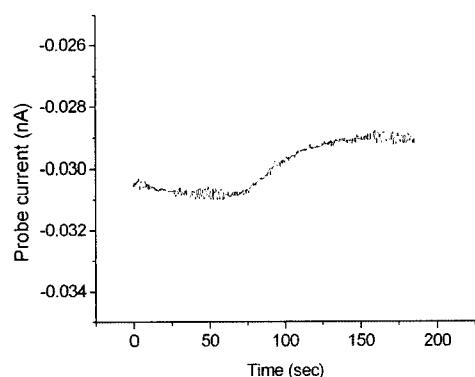


Fig. 9 Probe current in 3kV

Peak-to-peak는 약 2pA이다. Fig. 10과 Fig. 11은 15kV와 20kV의 가속 전압에서 측정된 프로브 전류이며 peak-to-peak의 전류 값이 약 3pA이다.

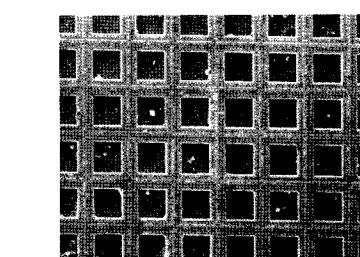


Fig. 12 The image of grid at 20kV acceleration voltage

전자빔 전류 혹은 프로브 전류가 불안정한 경우 영상은 밝고 어두움을 반복하고 초점이 맞지 않게 된다. 불안정한 원인으로는 필라멘트 전류가 포화점에 도달하지 않은 경우, 필라멘트와 웨일넷 사이의 거리 그리고 렌즈 제어 전류의 불안정 등이 있다. 이것은 분해능과 초점 등에 영향을 미치게 된다. Fig. 12는 20kV의 가속 전압에서 영상을 보이고 있다.

5. 결 론

주사 전자 현미경의 전자총과 컬럼의 성능을 확인하기 위한 실험적인 방법으로 전자빔 전류와 프로브 전류를 측정 및 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전자총의 얼라인먼트가 잘 맞는 위치에서 가장 많은 전자빔이 흐르므로 전자빔 전류의 측정은 전자총의 최적 위치를 찾기 위한 방법으로 사용된다. 또한 측정된 데이터는 전자총의 최적 위치를 찾기 위한 기준 데이터로 활용된다.
- (2) 어퍼처의 크기와 스팟 사이즈는 프로브 전류의 크기에 직접적으로 영향을 미친다. 그러므로 측정된 프로브 전류는 전자빔 이동 경로의 환경(풀피스의 모양, 어퍼처 크기 및 위치)을 고려한 모델 데이터로 활용된다.
- (3) 컬럼 및 전체 시스템의 성능을 검증하기 위해서는 영상을 이용하는 방법이 사용되고 있다. 영상을 이용하면 집 속 렌즈 및 대물 렌즈의 상태, 스캔 동작에 의한 노이즈, 시편위의 대전 상태, 수차의 영향 및 프로브 형상의 왜곡 등을 확인할 수 있다⁽⁸⁾. 이와 같이 영상을 이용하면 시스템의 상태에 많은 것을 알게 되지만 판단을 위해서는 기준 데이터 혹은 모델 데이터가 필요하게 된다. 따라서 본 논문에서 측정된 전자빔 전류와 프로브 전류는 시스템 개발 단계에서 상태 점검을 위한 데이터로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Joseph, I. G., Dale, E. N., Patrick, E., David. C. J., Roming. A. D., Charles. E. L., Charles, F., and Eric. L., 1992, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Plenum Press, USA, pp. 21~272.
- (2) John, T. L., 1993, *ELECTRON BEAM TESTING TECHNOLOGY*, Plenum Press, USA, pp. 129~147.
- (3) Fritz, J. H., 1986, "Background and application of electron beam test techniques," Vol. 4, pp. 139~157.
- (4) Sunjong, L. and Chanpong, L., 2006, "Design of Control Signal Systemization for SEM," *KSMTE*, pp. 97~100.
- (5) 2006, *Design Specification for a 30 kV Electron Gun Power Supply*, Spellman, UK.
- (6) Sunjong, L. and Chanpong, L., 2007, "Hardware Design for the Control Signal Generation of Electron Optic by Focal Length," *KSMTE*, Vol. 16, No. 5, pp. 96~100.
- (7) Hawkes, P. W. and Kasper, E., 1989, *Principles of Electron Optics*, Academic press, UK.
- (8) Mariusz, P., Andrzej, C., Jacek, R., Jerzy, K., Lukasz, O., and Remigusz, R., 2008, "Separation of image-distortion sources and magnetic-field measurement in scanning electron microscope(SEM)," *Micron*, pp. 1~5.