소형주사전자현미경용 전자광학계의 개발

박만진*, 김일해+, 김동환++, 장동영+++, 한동철++++

(논문접수일 2007. 6. 22, 심사완료일 2007. 8. 21)

A Development of Electron Optics System of Mini-Sized SEM

Man-Jin Park*, Il-Hae Kim+, Dong Hwan Kim++, Dong Young Jang+++, Dong Chul Han++++

Abstract

As an electron scanning microscopes has traditionally required a considerably large room equipped with several service and pipe lines due to its inherent size. As an alternative, a small sized SEM, simply called a mini-SEM, is introduced even if the performance in terms of magnification and resolution is a little inferior to a classical thermal SEM. However, the size and fabrication cost is dramatically reduced, dedicating to opening a new market. The optical system in the mini-SEM is redesigned and specimen stage is quitely reduced and vertical axis is excluded. The design tools and calibration techniques to develope the mini-SEM are introduced and its performance is verified through numerical analysis experiments.

Key Words : Scanning Electron Microscope(주사전자현미경), Thermionic Emission(열전자방사), Electro-magnetic Lens(전자렌즈), Electromagnetic analysis(전자기장 해석)

1. 서 론

근래의 디지털화된 SEM들은 brightness, contrast, focus 및 수차 보정 등 최적의 조건을 빠른 컴퓨터에서 처리하게 되어, 사용자들이 최적의 사용조건을 빠르게 사용할 수 있게 되었다[1]. 사용상의 편리성을 추구하며, 장비의 소형화 및 적용성이 용이한 소형주사전자현미경은 일반 광학현미경의 크기를 가지며, 미세분야의 계측장비로 개발되고 있다.

일반적으로 전자현미경이나 전자빔을 이용하는 장비들에 이용되는 전자총은 헤어핀 타입의 필라멘트 캐소드, 웨넬트

* 서울대학교 기계항공공학부 (jinman@amed.snu.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172
+ CAMSYS(주)
++ 서울산업대학교 기계설계자동화 공학부
+++ 서울산업대학교 산업정보시스템 공학과
++++ 서울대학교 기계항공공학부

실린더 그리고 애노드로 구성되어 3극 진공관의 구조와 비슷하여 전자빔을 만드는 전자총을 3극 진공관 타입전자총(triode-type electron gun)이라고 부른다[2].

전자빔을 만들기 위해 여러 가지 방식의 전자총(Electorn Gun)이 설계, 제작되었다. 이들 전자총에서 전자빔의 파라미터인 전자빔 직경, 전류, 에너지 등은 특정한 실험적인 요건에 맞게 조정된다[3].

전자현미경에 이용되는 전자총에서 고려되어야 하는 중요한 요소는 빔의 전류, brightness 및 빔 직경이다. 여기서 전자빔의 전류는 웨넬트 실린더의 전압에 의해서, 빔의 직경은 웨넬트 실린더에 공급되는 바이어스 전압에 의해 결정된다.

전자빔 렌즈의 설계는 컴퓨터를 이용한 Laplace 방정식과 파향선식(Ray Equation)의 수치해와 경험에 의해서 제작되어진다. 고해상도의 이미지 관찰을 위해서는 전자 광학계의 변수인 focal length, 구면수차와 색수차 등의 정확한 측정이 중요하다[4].

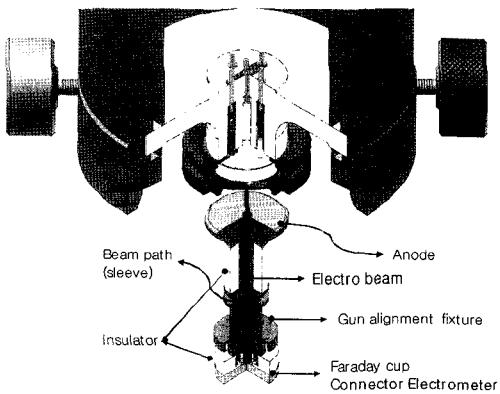
본 논문에서는 전자광학계를 이루는 전자빔원과 렌즈 system에 관하여 분석하였다. 전자빔원에서 만들어지는 전자빔의 전류량을 각 가속고압(5~25kV)에서 방출빔의 포화가 일어나는 필라멘트 가열 전류치를 측정하였고, 바이어스 전압의 변화에 따른 방출빔의 양을 측정하였다. 렌즈 system에서는 전자빔원에서 만들어진 전자들을 집속시키는 전자기장의 분포를 예측하기 위해 폴피스 주위에서의 자속밀도를 측정하여 실제 렌즈계에서는 측정하기 어려운 자기장의 분포의 해석 결과값과 비교하여 해석값의 신뢰성을 검증하였다.

2. 열전자 방사형 전자총

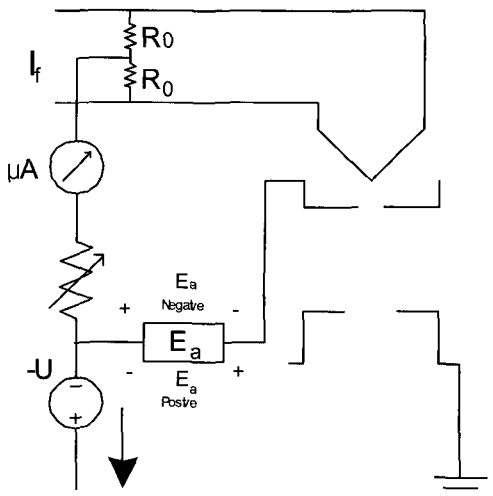
Fig. 1 (a)는 열전자 방사형 전자총 단면도이다. 텅스텐 필라멘트 캐소드는 1~25,000volts의 높은 음의 전압을 공급받게 되며, 금속판의 그라운드 전위를 갖는 애노드는 상대적으로 양의 값을 갖게 되어 이 전위차에 의해서 필라멘트에서 만들어진 전자들은 가속되게 된다. 캐소드에서부터 애노드로 전자들이 이동하면서 더 낮은 음의 전압을 갖는 웨넬트 실린더의 바이어스전압에 의해 corss-over가 되어 전자현미경의 광원으로 사용되게 된다.

높은 안정도와 큰 빔 전류를 얻기 위해 전자총의 고전압 발생장치는 hal-fixed 방식의 바이어스 방식을 채택하였다[2].

열전자 방출 실험은 실제 Column에 결합된 상태에서는 할 수 없기 때문에 별도의 진공 챔버에서 실시하였다. 전자현미경에서 빔을 발생하기 위해 진공도 10^{-5}[torr] 이상에서 실험을 수행하였다. 전자총에서 만들어진 전자빔들은 애노드를 거쳐 전자빔들이 통과하는 슬리브(sleeve) 속으로 들어가게 된다. 경통(column) 내에 있는 슬리브(sleeve)는 빔이 통과하는 wave guide 역할을 하며, 재질은 인청동으로 되어 전기장을 만들지 않고, 렌즈의 극편(pole piece)에서 생긴 자기장에 영향을 주지 않으며, 전자빔의 크기를 줄이는 조리개(aperture)들이 고정되는 역할을 한다. 방출 전자빔의 측정은 슬리브를 지나 직경 5[mm] 의 hole 속을 통과하여 faraday cup에서 전자빔량을 외부의 electrometer (keithley 6517)와 결선하여 측정하였다. 전자총의 축과 애노드 경축의 조정을 위해 일정량의 전자가 방출 되는 조건에서 기계적으로 x, y 방향으로 이동하면서 빔 전류가 가장 많이 측정되는 곳에 위치시켜 측정을 하였다.



(a) thermionic electron gun



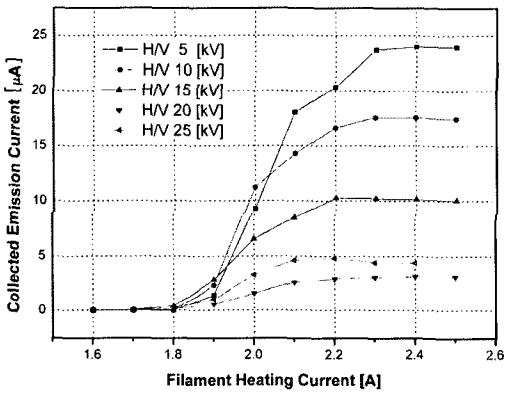
(b) half-fixed gun[2]

Fig. 1 Configuration of a thermionic emission gun

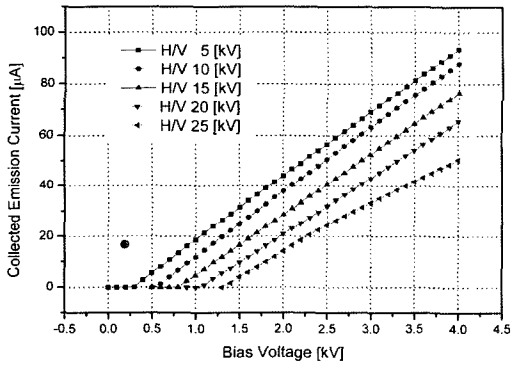
먼저 필라멘트의 heating 전류를 0.1[A] 씩 변경하여 인가되는 전류에 따른 방출 전류량을 Fig. 2 (a)에 도시하였다. 결과 2.3[A] 근처에서 방출되는 전자들이 더 이상 증가하지 않는 포화점에 도달하였다.

Fig. 2 (b)는 heating current의 변화 실험에서 구해진 포화 전류값을 설정하고 바이어스 전압을 변화시키면서 통과하는 전자빔을 측정하였다. 높은 고압을 가질수록 많은 바이어스가 인가되어야 방출 전자량이 증가함을 알 수 있다.

바이어스 변화에 따른 전자빔량은 선형적인 관계를 가지므로 많은 전자빔을 얻기 위해서는 적정한 바이어스를 인가하여야 한다. 반면 높은 바이어스를 가지게 되면 공간전하(space charge)현상이 나타나 인출되는 전자량이 줄어들게 된다.



(a) emission beam current change graph which it follows in filament heating current changes



(b) emission beam current change graph which it follows in bias voltage changes

Fig. 2 Relationship between the emission current of the elctron beam and filament heating current & bias voltage

3. 전자광학계의 설계 및 해석

자기 렌즈의 특성을 유한요소해석을 통해 예측하고, 실험을 통해 해석 결과를 검증하였다. 렌즈는 전자빔의 집속도를 높이기 위해 순철로 제작된 극편(Pole piece) 주변에 구리선 코일이 감겨지는 구조로 되어 있다. 일반적으로 렌즈의 집속도를 높이기 위해 극편간의 간극을 최대한 좁게 설계해주는데, 이로 인해 실제 렌즈 내부에서의 자기장 측정이 용이하지 않은 단점이 있다.

자기장의 측정이 용이하도록 실험용 렌즈를 설계/제작하였다. Fig. 3에 실험용 렌즈의 주요 형상을 도시하였으며, 렌즈의 형상이 축대칭인 점을 감안 하여 3차원 축대칭 형태로 해석 영역을 정의하였다. 해석은 OPERA 3D의 전자기장 해석 기능을 사용하여 수행하였다. 코일에서 발생된 자기장이 상대적으로 투자율이 높은 순철부위를 투과하지 못함으로 인해 극편(Pole Piece) 주변에서 집중됨을 알 수 있다. 이러한 현상을 정량적으로 관찰하기 위해 렌즈의 중심축 거리에 따른 자속밀도의 변화(Bz)를 측정하여 해석 결과와 비교하였다. 여기서 해석의 정확성을 높이기 위해 렌즈로 사용된 순철의 B-H 곡선 데이터 중, 투자율값을 4,000[H/m]으로 선형 구간에서의 값으로 해석을 수행하였다.

Fig. 3은 렌즈의 중심축 거리, 반경방향의 거리 및 인가전류에 따른 자속밀도의 변화를 그래프로 비교하였으며, 여기서 실험 및 해석결과에 해당한다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 해석으로부터 얻어진 자속밀도의 변화 경향은 물론 그 절대값에서도 실험결과와 잘 일치하여 해석의 신뢰성이 입증되었다.

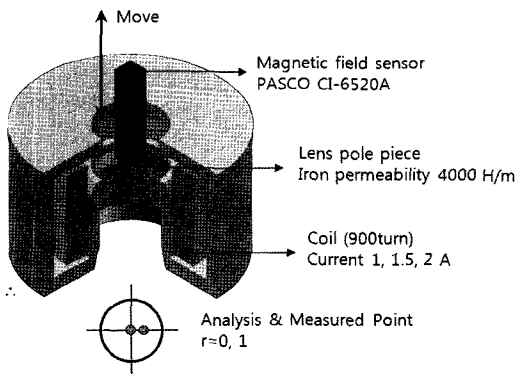
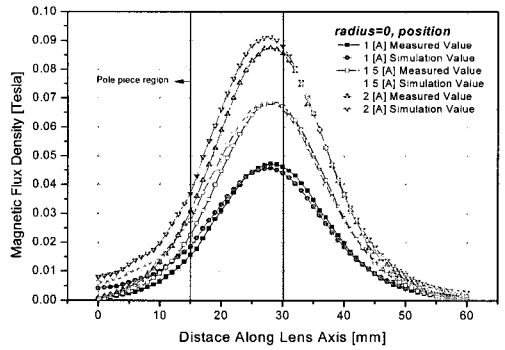
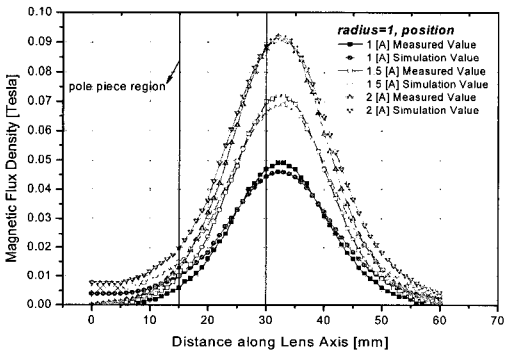


Fig. 3 The experiment system for the magnetic field measurement of lens circumference

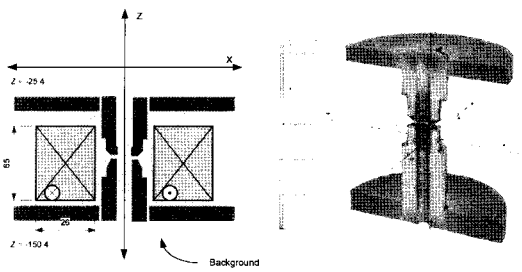


(a) radius r=0

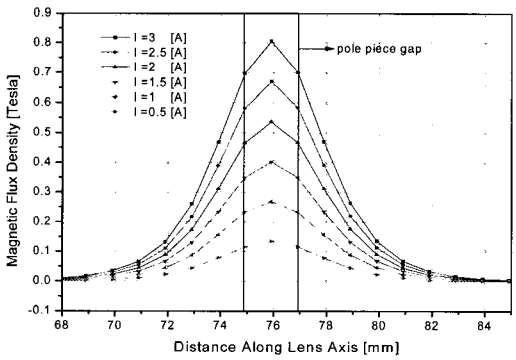


(b) radius r=1

Fig. 4 Magnetic flux density comparison from experiment and analysis



(a) Lens schematic (b) distribution of flux line



(c) axial flux distribution

Fig. 5 Axial flux density of condenser lens

소형전자현미경에는 전자총에서 방출 된 빔의 전류는 대략 수십 [μA] 정도였으며, 이들 빔이 두 개의 condenser lens와 objective lens를 거치면서 시료와 반응하여 2차 전자를 만들어 이미지화하기 위해서는 수십 [pA]~수 [nA] 정도로 축소해야한다.

이를 위해 각 렌즈에서의 축소율 및 초점거리의 계산은 매우 중요하다. 이를 계산하기 위해 실제 각 렌즈 극편(pole piece) 주위에서의 인가 전류에 대한 자속밀도의 분포를 OPERA 3D를 이용하여 1번째 condenser lens에서의 자속밀도의 분포를 Fig. 5에서 구하였다. 결과 인가전류의 증가에 따라 축방향의 자속밀도가 상승하였으며, 이는 초점거리가 짧아질 것으로 예상되고 각 고압에 따라 전자의 운동속도들이 변하기 때문에 인가 전류 또한 변하게 될 것이다.

이를 위해 각 렌즈에서의 축소율 및 초점거리의 계산은 매우 중요하다. 이를 계산하기 위해 실제 각 렌즈 극편(pole piece) 주위에서의 인가 전류에 대한 자속밀도의 분포를 OPERA 3D를 이용하여 1번째 condenser lens에서의 자속밀도의 분포를 Fig. 5에서 구하였다. 결과 인가전류의 증가에 따라 축방향의 자속밀도가 상승하였으며, 이는 초점거리가 짧아질 것으로 예상되고 각 고압에 따라 전자의 운동속도들이 변하기 때문에 인가 전류 또한 변하게 될 것이다.

렌즈에서의 자기장분포를 이와 같은 방법으로 해석을 수행하고, 각 인가전류에 대한 분포 자기장과 전자빔의 궤적을 수치적인 방법으로 풀어 각 렌즈에서의 초점거리 및 수차 등을 계산하여 최종 이미지를 얻기 위한 렌즈의 인가전류를 유추한다.

4. 결 론

상용화된 전자현미경에서는 각 고압에 따른 필라멘트에 인가하는 전류와 바이어스 전압의 설정을 정확히 알 수 없으며, 어느 정도의 빔이 만들어져서 샘플에 도달하는 전자량이 얼마인지 알 수 없다. 이미지를 관찰하기 전 전자를 만들어 주는 전자총에서 어느 정도의 빔을 만들 것 인지, 어느 정도의 축소율로 시편에 도달하게 하는지 실험적으로 측정을 하였다. 렌즈 앞 단 부위에서 전자빔량을 측정하기 위해 제어

인자 중 필라멘트 인가 전류와 바이어스를 변화시키면서 전자빔 에미션 실험을 수행하였다. 측정결과 2.3[A] 부근에서 포화된 전자빔을 얻을 수 있었으며, 포화된 지점에서의 전류값에 대해서 바이어스 전압을 조정했을 경우 선형적으로 전자빔량이 증가하였다. 그리고, 전체 전자빔량은 가속적압이 낮을 수록 상대적인 전자의 속도가 느려서 측정량은 증가하였다.

렌즈 영역에서 축소율 및 초점거리 등의 계산을 위해 렌즈 극편(pole piece) 주위에서의 자속밀도 값을 해석을 통해 구하였고, 해석적인 방법에서 구한 값은 실제 실험에서 구한 값과 비교한 결과 신뢰성 있는 값으로 확인하여 광학계의 변수들을 제어할 수 있게 되었다.

논문에서의 결과는 주사전자현미경을 이루는 기본특성에 관한 것으로 각 설정고압에 맞게 렌즈부위에 인가되는 전류치와 설정고압에 따른 전자빔원에서의 전류량을 예측하여 전자현미경의 전자광학계 설계 및 제작에 활용한다.

후 기

본 연구는 서울시에서 지원하는 '나노 공정기술 및 장비개발 산학연 혁신 클러스터' 사업 (과제번호: 10583)과 산업자원부 차세대 신기술개발사업 (이온빔 이용 나노가공용 장비개발)의 지원으로 진행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Orloff Jon., 2004, *Handbook of Charged Particle Optics*, CRC Press, New York.

(2) Munakata, C. and Watanabe, H., 1962, "A New Bias Methode of an Electron Gun," *Journal of Electron Microscopy*, Vol. 11, No. 1, pp. 47~51.

(3) Mahapatra, S., K., Dhole, S. D. and Bhoraskar, V. N., 2005, "*A 20 keV electron gun system for the electron irradiation experiments*," Nucl. Instr. and Meth. A 536 222~225.

(4) John, C. H. S., 2003, *High-Resolution Electron Microscopy*, Oxford Science Publications, pp. 15~16.