

전자현미경 개발

오현주*, 장동영+, 양희남+, 김동환++, 박만진+++, 심치형+++, 김충수+++

The development of scanning electron microscopy

H. J. Oh*, D. Y. Chang+, H. N. Yang++, D. H. Kim++, M. J. Park+++, C. H. Shim+++, C. S. Kim+++

Abstract

We have designed and fabricated a thermal scanning electron microscopy. It includes an electron source, two condenser lenses, one objective lens, a scanning coil and a stigmator coil for focusing in column and also have a secondary electron detector for constructing the image in chamber with a high vacuum condition and control part for operating the SEM. Especially, in order for us to find out the optical characteristics, our attention and studies have been concentrated on the effects of two condenser lenses and one objective lens for high resolution with SEM. Finally, we developed a high resolution thermal scanning electron microscopy.

Key Words : scanning electron microscopy, condenser and objective lenses, focusing, high resolution

1. 서론

나노과학기술의 발전은 20세기 후반부터 본격적으로 진행되어 21세기에 급속도의 성장을 보여주고 있다. 현대의 과학은 분야를 막론하고 소형화 및 미세화의 경쟁을 하고 있으며 이로 인하여 나노디바이스의 개발 및 나노 현상들에 대한 규명은 매우 중요한 관심의 대상이 되었다. 이러한 나노현상에 대한 연구가 가능해진 것은 SEM(scanning electron microscopy)을 시작으로 FIB(focused ion beam system), TEM(tunneling electron microscopy), STM(scanning tunneling microscopy), AFM(atomic

force microscopy) 등의 개발로 나노크기 및 원자크기까지의 관찰이 가능해졌으며 또한 단순한 관찰이 아닌 나노구조의 실험이 가능해졌기 때문이다. 본 논문에서는 나노크기의 시편을 관찰하고 실험하는데 가장 많이 사용되고 있는 전자현미경에 대한 연구 및 본 연구실에서 개발 제작한 열전자 방출형 전자현미경에 관하여 언급하고자 한다.

* 서울산업대학교 나노생산기술연구소 (wlrqrns@hanmail.net)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172
+ 서울산업대학교 산업정보시스템공학과
++ 서울산업대학교 기계설계자동화공학과
+++ 서울대학교 기계항공공학부

2. 전자현미경의 구조

전자현미경은 크게 전자를 방출시키는 역할을 담당하는 전자총(electron gun)과 전자빔을 집속시키는 렌즈 및 편향기와 비점수차 보정기로 이루어진 경통부 그리고 시편을 넣어 관찰하는 시료부로 나눌 수 있다.

2. 1 전자총(electron gun)

전자총은 일반적으로 열전자 방출형(thermionic emission)과 전계 방출형(field emission)으로 나눌 수 있다. 열전자 방출형은 텅스텐 필라멘트에 전류를 흘려주어 열에너지에 의해 전자가 방출되도록 하는 방식이다. 전계 방출형은 강한 전기장을 가한 후 전위장벽의 변화에 의한 터널링(tunneling) 현상을 이용하여 전자를 방출시키는 방식이다. 열전자 방출형은 설계가 용이한 장점이 있으나 작동 온도가 높고 빔의 직경이 커져 높은 해상도를 얻기 힘들다는 단점이 있다. 전계 방출형은 열전자 방출형의 낮은 휘도를 개선하고 빔직경을 줄여 높은 해상도를 얻는데 용이한 장점이 있다. 그러나 날카로운 tip 끝을 유지하기 위해서는 초고진공(UHV : ultra high vacuum)을 요구한다.

2. 2 경통부

경통부는 방출된 전자를 집속시키기 위한 집속렌즈(condenser lens), 대물렌즈(objective lens) 및 집속된 전자빔을 편향시켜 시료에 주사시키도록 하는 편향코일(scanning coil) 그리고 빔의 찌그러짐을 방지하는 비점수차 보정코일(stigmator coil)로 이루어져 있다.

집속렌즈는 전자총 하단에 위치하고 있으며 방출된 전자빔을 집속시켜줌으로써 시료에 도달하는 전자빔의 양과 직경을 조절해주는 역할을 한다. 따라서 집속렌즈를 통해 조절된 전자의 양은 얻어진 상의 밝기와 선명도에 영향을 미친다.

대물렌즈는 측정하고자 하는 시료의 상단에 위치하고 있으며, 입사된 전자빔을 적절히 조절하여 상의 초점을 맞추어 주는 역할을 한다. 따라서 대물렌즈의 집속도가 분해능을 결정하는 중요한 요인으로서 작용하게 된다. 또한 대물렌즈 내에는 일반적으로 가동 조리개(variable aperture)가 위치하여 전자빔의 직경을 조절하는데 사용된다. 전자빔의 직경을 적절히 조절하여 줌으로써 수차를 최소화하여 결과적으로 높

은 해상도를 얻을 수 있다.

렌즈에 의해 전자빔을 집속하는 과정에서 집속도를 떨어뜨려 빔의 직경을 크게 만드는 수차현상이 발생된다. 수차는 크게 구면수차와 색수차로 나누어지며 이는 각각 렌즈의 구조적 결함과 전자빔의 에너지에 의한 현상이다.⁽¹⁾ 따라서 수차를 최소화 하는 것이 전자빔의 직경을 최소로 줄이는 방법이며 결과적으로 분해능을 높이는 방법이다.

편향코일은 마주보는 두 쌍의 코일로 이루어져 있다. 편향코일은 시료에 전자빔을 X, Y 방향으로 주사시켜 시료의 상을 얻을 수 있도록 하는 역할을 담당한다. 편향코일에 가해주는 전류의 크기에 따라 전자빔이 주사되는 영역이 변하게 되고 이에 따라 얻어지는 상의 배율이 결정된다.

비점수차 보정코일은 마주보는 네 쌍의 대칭형 코일로 이루어져 있다. 비점수차 보정코일은 입사된 전자빔이 서로 다른 지점에서 모임으로써 발생하는 수차로 인하여 상이 일그러져 원형이 아닌 타원형으로 나타날 때 이를 보정하여 전자빔을 원형으로 유지하도록 해주는 역할을 담당한다. 각각의 코일에 서로 다른 전류가 흐르며, 전류의 세기를 조절하여 상의 찌그러짐을 보정하여 주는 역할을 한다.

2. 3 시료부

시료부는 진공챔버(vacuum chamber)내에 시료를 올려놓는 시료대(stage)와 전자빔을 맞고 튀어나온 이차전자를 수집하는 이차전자 수집기(secondary electron detector)로 이루어져있다. 일반적으로 시료대는 5축으로 이루어져있어 상·하·좌·우로 움직임과 동시에 360° 회전 및 시료를 기울일 수 있다. 이차전자 수집기는 신타레이터(scintillator), light guide, PMT(photo multiplier tube)로 이루어져 있다. 전자빔이 시료에 주사되게 되면 시료 표면으로부터 이차전자가 방출된다. 방출된 이차전자는 이차전자 수집기 앞부분에 걸어주는 전기장에 의하여 끌려가며 신타레이터에 의해 전자가 광자(photon)로 바뀌게 된다. 광자는 light guide를 통해 PMT에 도달하게 되며 PMT를 통과하면서 다시 전자로 바뀌게 된다. 이 때 광자가 PMT 내부에 도포된 물질에 충돌하면서 입사된 광자의 개수 보다 더 많은 개수의 전자가 증폭되어 발생되게 된다. PMT 맨 끝부분에서는 증폭된 전자의 신호를 수집하여 화면상에 시료의 이미지를 구현하는데 사용되게 된다.

2. 4 고전압 및 전장부

전자빔을 발생시키고 시료에 주사하여 이차전자를 수집하여 이미지를 구현하기 위해서는 높은 에너지의 가속전압이 요구된다. 또한 가속전압의 안정도는 전자 하나하나의 에너지와 관련되어 결국 색수차에 영향을 주므로 결과적으로 해상도에 영향을 미치게 된다. 따라서 안정된 가속전압을 공급할 수 있는 고전압원이 필요하다.

각각의 렌즈와 편향코일, 비점수차 코일, 이차전자 검출기를 제어하고 이미지를 구현하기 위해서는 적절한 전기적 장치가 필요하며 안정되고 유기적인 관계가 요구된다.

3. 결과

3. 1 전자총

텅스텐 필라멘트를 사용한 열전자 방출형(thermionic emission) 전자총을 사용하였다. 웰벳실린더(whenelt cylinder)를 사용하여 적절한 바이어스 전압을 가해 약 10 μA 의 방출전류를 유지하도록 하였다. 가속전압은 15 kV ~ 20 kV를 유지하도록 하였다.

3. 2 경통부

두 개의 집속렌즈(condenser lens)와 한 개의 대물렌즈(objective)를 이용하여 전자빔을 집속하였다. 렌즈 슬리브(lens sleeve)는 자력밀도를 높이기 위하여 순철 99.99%의 재질을 사용하였다. 전자빔의 최적 집속을 위한 렌즈코일의 직경, 권 수 및 배치는 opera 3D를 이용하여 전산모사를 통해 결과를 얻었다.

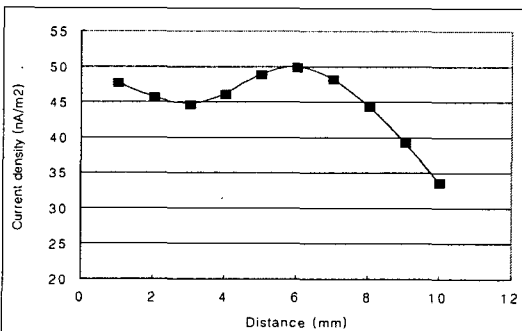


Fig. 1. 거리에 따른 전류밀도

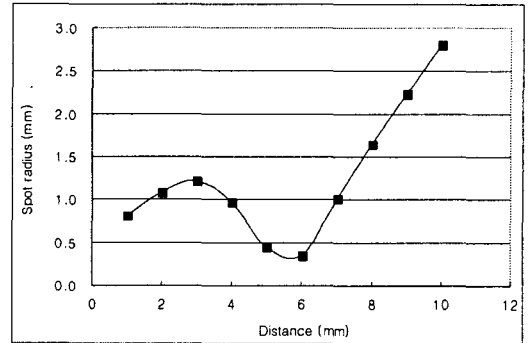


Fig. 2 거리에 따른 빔 직경

그림 1과 2는 전산모사를 통해 렌즈를 통과한 전자빔의 거리에 따른 전류밀도와 빔 직경을 표시한 그래프이다. 전자빔의 전류밀도가 가장 높은 곳과 빔 직경이 가장 작은 곳이 일치함을 볼 수 있다. 빔의 집속정도를 전류밀도의 변화를 통해 관찰할 수 있음을 나타내고 있다. 렌즈 코일에 흐르는 전류는 각각의 렌즈에 따라 적절한 값을 취하도록 하였으며 최대 범위는 3 A 이다.

렌즈의 구면수차(spherical aberration)를 줄이고 빔의 집속도를 향상시키기 위하여 렌즈 앞에 조리개를 부착하였다. 조리개는 몰리브덴을 이용하여 제작하였다. 구면수차를 줄이기 위한 또 다른 방법으로 렌즈의 전류를 증가시켜 강한 자기장(magnetic field)을 형성하여 초점거리를 줄임으로써 수차를 최소화 하는 방법을 병행하였다.

보빈을 이용하여 편향코일 및 비점수차 보정코일을 제작하였다. 내열이 뛰어나고 내화학성, 전기적 안정성이 우수하며 진공유지를 위해 적은 기체를 방출하는 재질을 사용하였다.

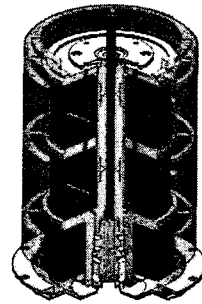


Fig. 3 경통부

그림 3은 조립된 경통부를 나타내었다.

3. 3 시료부

시료부 및 경통부의 진공도는 10^{-6} torr 를 유지하도록 하였다. 시료대는 5축을 이용하여 원하는 방향과 각도에서 시료를 관찰 할 수 있도록 하였다.

이차전자 수집기는 신틸레이터(scintillator)와 light guide 및 PMT(photo multiplier tube)를 연결하여 제작하였다. 이차전자 수집기에 필요한 회로는 PMT를 구동하기 위한 고전압 인가회로와 PMT에서 증폭된 전류 신호를 전압으로 변환해서 증폭하는 두 가지로 나누어 제작되었다. 최종 출력단에 도달한 전류신호를 전압신호로 변환하기 위하여 I/V 회로로 입력하였다.

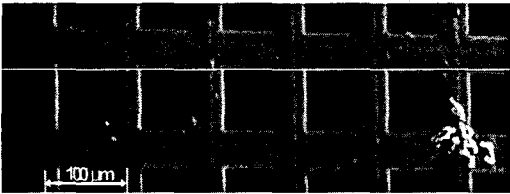


Fig. 4 mesh image

그림 4는 제작된 전자현미경을 이용하여 얻은 화상이다.

3. 4 고전압 및 전장부

안정된 전자빔 방출을 위하여 펄림(ripple)이 10^{-5} 이하의 안정된 고전압 전원을 제작하였다.

전자현미경의 정상적인 동작을 위해서는 전자총에 가해지는 고전압 이외에도 여러 가지 전기적 제어장치가 필요하며 이미지를 얻기 위해서는 제어 회로가 필요하다.

컴퓨터에서 받은 video XY 동기신호를 받은 주사신호발생기(scan generator)는 실제 모니터에 표시되는 영상의 이미지 위치를 동기화시키기 위하여 렌즈전류조절기(lens controller) 및 편향증폭기(deflection amplifier)에 명령을 내려 임의의 배율을 설정하기 위해서 렌즈 및 편향코일을 구동시켜 원하는 위치와 배율에 맞도록 전자빔을 주사시킨다. 발생한 이차전자는 이차전자 수집기를 통과하여 다시 한 번 신호가 증폭되어 아날로그/디지털 변환을 통하여 모니터 상에 화상으로 나타나게 된다.

4. 결론

열전자 방출형 전자현미경을 제작하였다. 안정된 전자빔의 방출을 위하여 펄림이 적은 고전압 공급기를 제작하였다. 방출된 전자빔의 집속을 위하여 두 개의 집속렌즈와 한 개의 대물렌즈 및 조리개를 사용하였으며 최적의 빔 집속을 위한 렌즈의 위치 및 전류밀도 등은 전산모사를 통하여 적절한 값을 취하였다. 전자빔을 시료에 주사시키기 위하여 편향코일을 제작하였고 전자빔의 찌그러짐 현상을 보정하기 위하여 비점수차보정기를 제작하였다. 전자빔을 주사하면서 이차전자 수집기를 통하여 시료로부터 발생한 이차전자를 이용하여 화상을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업 “이온빔 이용 나노가공용 장비 개발” 과제의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Robert Edward Lee, 1993, Scanning electron microscopy and X-ray analysis, PTR Prentice-Hall, Inc. pp. 75 ~ 87