

저진공 주사전자현미경의 개발

조복래

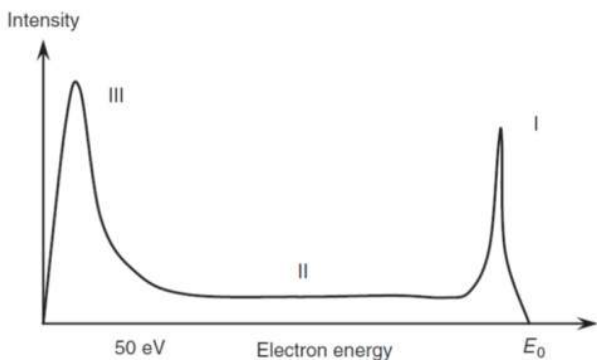
저진공 주사전자현미경의 필요성

주사전자현미경은 전기 또는 자기 렌즈로 전자빔을 집속하여 나노스케일의 전자빔 스폿(프로브라고도 불림)을 만든 후, 스폿을 편향기를 이용하여 시료위에 주사하고, 입사된 전자빔에 의해 여기되어 시료로부터 방출되는 신호 전자를 검출하여 컴퓨터 모니터상에 시료의 확대된 표면형상을 맵핑한다. 방출되는 전자빔은 다양한 에너지 분포를 가지며 일반적으로 그림 1과 같은 에너지 분포를 가진다. 그림에서 낮은 에너지영역Ⅲ에 해당하는 신호전자를 2차전자 (secondary electron: SE)라하고 높은 에너지영역 I에 해당하는 신호전자를 반사전자 (backscattered electron: BSE)라 한다.

2차 전자는 에너지가 낮기 때문에 고체시료 속을 통과할 수 있는 거리가 짧다. 2차 전자는 시료 표면으로부터

금속의 경우 2nm 이내에서, 부도체의 경우 20nm 이내에서 방출된다. 반사전자는 에너지가 높아 보다 깊은 곳에서 방출될 수 있으며, 10 kV에서 표면으로부터 수백 nm에 깊이에 걸쳐 방출된다.

입사된 수 kV 이상의 전자빔은 수백nm 깊이까지 침투하며 입사빔에 비해 반사전자의 방출량이 상대적으로 적기 때문에 수백nm 깊이에서는 -전하가 축적된다. 한편 표면 근처에서는 2차 전자가 방출되나 입사 전자빔은 통과하기 때문에 +전하가 축적된다. 따라서 그림 2처럼 시료 표면 근처에는 dipole layer가 형성되며, 이로부터 전기장이 발생하여 입사하는 전자빔 궤도와 2차 전자 등의 방출을 교란시키고, 이미지의 왜곡이 발생하며 특히 전기전도도가 나쁜 부도체의 경우 왜곡이 심해진다. 생물시료, 종이, 세라믹 등의 부도체 시료를 주사전자현미경으



[Fig. 1] 시료 방출 전자빔의 에너지 분포

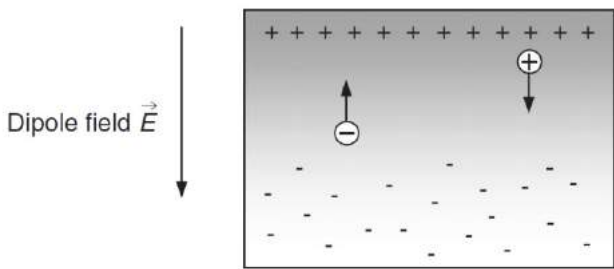
[Table.1] 진공 중 10kV 전자의 mean free path (mm)

mbar	mm
0.1	5
0.05	12.6
0.01	52
5x10 ⁻³	100.3
1x10 ⁻³	520
1x10 ⁻⁴	5170



<저자 약력>

조복래 박사는 2000년 포항공과대학교에서 박사학위를 받았으며 와세다 대학 조수, 일본과학기술진흥기구 창의연구원, 히타치 하이테크놀로지를 거쳐 2012년부터 한국표준과학연구원에 책임연구원으로 재직중이다.



[Fig. 2] 전자빔에 의한 dipole layer 형성

로 관찰할 때는, 위와 같은 대전현상에 의한 이미지 왜곡을 방지하기 위해 일반적으로 시료 표면을 스퍼터링 방법으로 금속 코팅한 후 관찰한다. 그러나 금속 코팅 장비가 고가이며, 시료 금속 코팅에는 시간과 경비가 소요된다. 특히 산업체에서의 공정 검사 등에서는 시료의 코팅이 허용되지 않고, 신속성이 요구되므로 금속 코팅 없이 PCB, 액정, 마스크 등을 관찰하고자 하는 수요가 꾸준히 증가하고 있다.

전자빔은 공기중에서는 기체분자와 충돌 등으로 인해 평균 수 μm 이하만 진행할 수 있다. 따라서 전자현미경 경통안의 전자원에서 시료까지 전자원의 통로는 진공상태를 유지해야 하며, 통로의 길이가 통상 수백 mm 이상이므로 mean free path를 (표1 참조) 수백 mm 이상으로 유지하기 위해, 10-3 mbar 이하의 고진공 상태를 유지한다.

시료가 위치하는 진공챔버를 일반적으로 시료실이라 부른다. 시료실과 전자현미경 경통 사이에 내경 1mm 이하의 애퍼처를 삽입한 후 시료실의 압력을 0.1 mbar 이상의 저진공으로 유지하면서 시료를 관찰하는 저진공 SEM 기법이 많은 분야에서 적용되고 있다. 이때 애퍼처는 시료실의 가스 분자가 경통으로 유입되는 것을 방지한다. 저진공 상태에서 전자빔을 조사하면 전자빔에 의해 가스 분자가 여기되어 다량의 이온과 전자가 발생하며, 이 전하들이 시료표면의 대전을 중화시키는 역할을 한다. 따라서 저진공에서는 코팅을 하지 않고도 아래 그림 3처럼 선명한 주사전자 현미경 영상을 얻을 수 있어 고진공 환경에서와 비교해 사용자 편의성이 획기적으로 증대된다. 현재 미국, 일본의 대부분의 소형 주사전자현미경 (mini-SEM)은 저진공 환경에서 시료를 관찰할 수 있게 설계되어있으며, 국내 전자현미경 업체도 저진공 전자현미경 기술을 확립하는 것이 경쟁력 향상을 위한 시급한 과제였다.

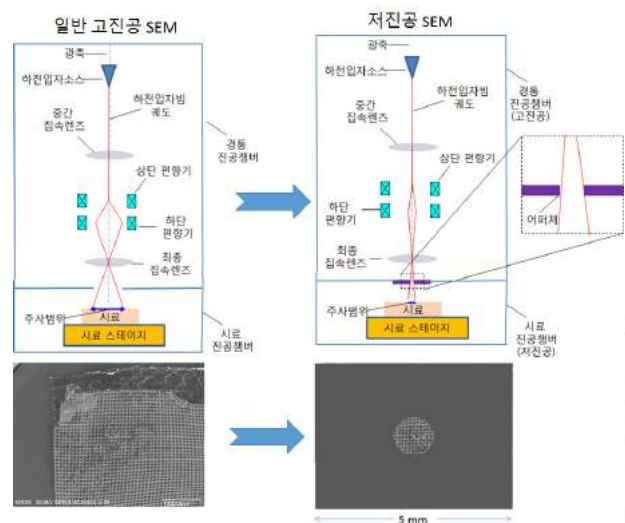


[Fig. 3] 저진공 주사전자현미경에 의한 무코팅 이미지

저진공 주사전자현미경의 구조

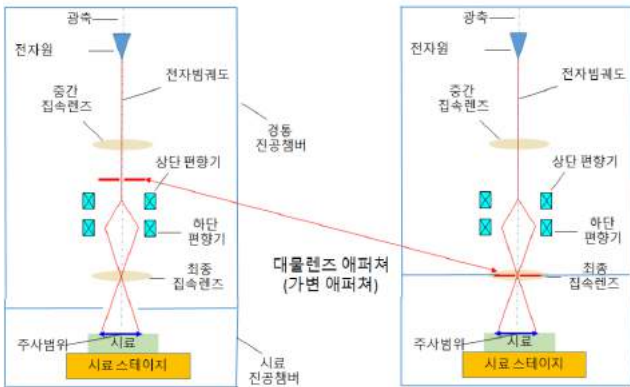
- 광학계

저진공 SEM은 시료실의 가스 분자가 경통으로 유입되는 것을 방지하기 위하여 시료실과 전자현미경 경통 사이에 내경 1mm 이하의 애퍼처를 삽입한 후 시료실의 압력을 0.1 mbar 이상의 저진공으로 유지한 상태에서 시료를 관찰한다. SEM은 전자빔을 편향기를 이용하여 시료위에 주사하여 이미지를 형성시키는데, 애퍼처에 의해 아래 그림 4처럼 빔 주사 범위가 좁아져 결과적으로 시료를 관찰하는 시야가 좁아지는 현상이 발생한다. 좁은 시야는 사용자가 보고자하는 시료 위치를 찾기 어렵게 만들어 SEM의 상품성을 떨어뜨리기 때문에, 선진국 업체는 넓은 시야를 확보하면서 저진공을 유지하는 저진공SEM을 상품화하며 판매하고 있으나, 국내 업체는 기술력 부족으로



[Fig. 4] 고진공 SEM 과 저진공 SEM의 전자빔 광학 다이어그램 및 SEM 이미지 비교

2015 구축 저진공 SEM



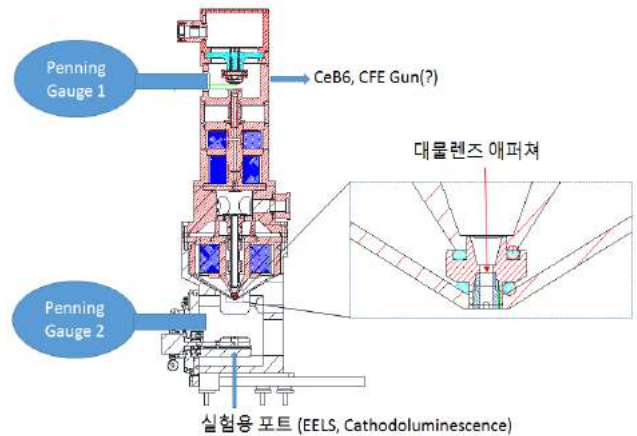
[Fig. 5] (a) 고진공 (b) 저진공SEM의 빔궤도 다이어그램

좁은 시야와 안정적 저진공 유지문제를 해결하지 못하고 있는 상태였다.

SEM에서 전자빔의 중심 궤도가 대물렌즈의 중심에서 벗어나면, 다양한 수차가 발생하여 빔이 퍼지게 되며, 결과적으로 이미지 분해능이 나빠진다. 따라서 전자빔을 편향기를 이용하여 그림 5처럼 빔의 중심 궤도가 대물렌즈(최종집속렌즈)의 중심을 지나도록 주사시키며, SEM 사용시 wobbler를 사용하여 이미지가 흔들리지 않게 하는 것은 바로 빔의 중심 궤도를 대물렌즈의 중심에 일치시키는 행위이다.

그림 5는 저진공 SEM의 광학계와 기존 고진공 SEM 광학계와의 차이점을 보여준다. SEM에서는 대물렌즈의 초점거리를 바꾸는 동작인 wobbling을 하면서 빔의 중심 궤도를 대물렌즈의 중심에 맞추며, 따라서 시료 위에 전자빔을 주사할 때 위 그림처럼 중심 궤도가 대물렌즈의 중심에 고정된다. 따라서 시료에 집속되는 빔 전류량과 개구각을 결정하는 가장 중요한 광학 요소 중의 하나인 대물렌즈 애퍼처를, 가변 애퍼처라고도 불림, 최종 집속렌즈의 중심 위치에 위치시키면 시료실에서의 공기 유입도 방지하면서 개구각과 전류량을 설계 목표로 설정할 수 있다. 또한 가변 애퍼처는 복잡한 구조로 생산 단가가 높기에, 대물렌즈에 고정 애퍼처를 장착시켜 가변 애퍼처를 대신시키면 생산 원가가 낮아지는 효과도 생긴다.

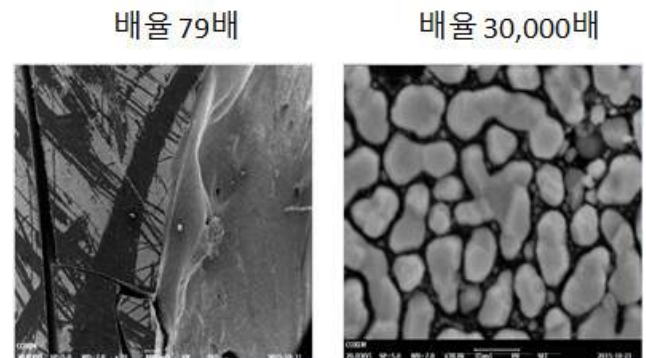
그림 6은 구축한 실제 SEM의 구조를 보여주며, 대물렌즈의 중심부에 애퍼처를 장착하는 기구부를 확대시켜 보여주고 있다. 기존의 대물렌즈 애퍼처 직경은 30 μm 이었으며, 이를 렌즈중심부의 애퍼처로 대신시키기 위해 시물



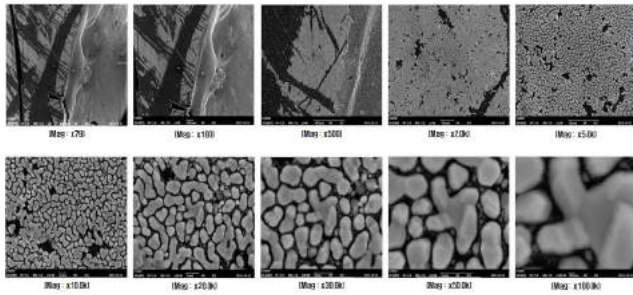
[Fig. 6] 대물렌즈 애퍼처의 장착 구조. 렌즈 중심에 애퍼처를 위치

레이터를 사용하여 계산하여, 동일한 빔전류와 개구각을 얻을 수 있는 내경 150 μm 이 애퍼처를 렌즈 중심에 삽입하였다. 또한 빔 궤도 중심이 애퍼처 중심과 일치하지 않는 경우를 대비하여 대물렌즈 상단에 빔 얼라인먼트용 편향기를 추가 설치하였다. 편향기 구조는 전자총 얼라인먼트 평향기와 동일하며, 기존 전기 계통과 별도로 외부 전원을 사용하여 편향기를 제어하는 방식을 채택하였다.

위와 같은 애퍼처를 삽입한 후 저배율에서 시야가 좁아지는 문제의 발생 여부를 확인하기 위해 저배율에서 SEM을 테스트하였으며, 그림 8은 그 이미지를 보여준다. 이미지는 기대대로 저배율에서의 시야 제한 현상이 없음을 보여주었다. SEM 이미지는 1 mm 애퍼처를 설치함으로써 이미지가 번지는 현상이 사라져 고분해능 획득에 문제가 없음을 보여준다.



[Fig. 7] 150 μm 애퍼처 삽입 후 얻은 저배율(x79), 고배율 (30k) SEM 이미지



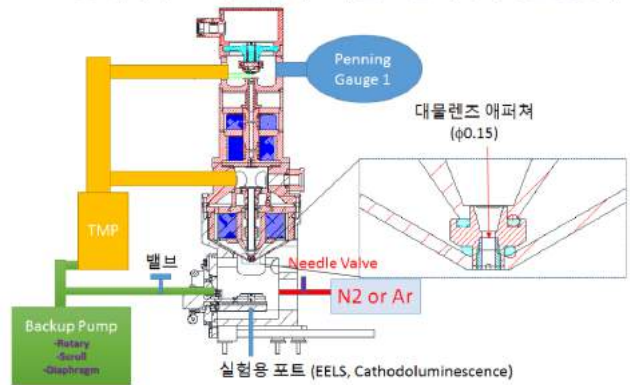
[Fig. 8] 150 μm 애퍼쳐 삽입 후 얻은 저배율(x79)~고배율 (100k) SEM 이미지

- 진공 실험

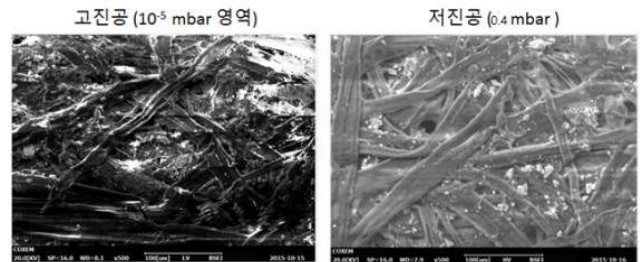
저진공 SEM을 구축하기 위한 진공실험은 먼저 고진공 SEM용 펌프 시스템의 사용 절차를 개량하는 것에서 시작하였다. 고진공 SEM은 전자총, 경통, 시료실을 모두 터보펌프로 배기하는 방식이다. 기존 전자현미경 업체의 전자현미경은 시스템을 우선 로터리펌프로 배기하여 배기 라인의 압력이 0.1 mbar 이하가 되면 터보펌프의 가동을 시작하는 방식을 사용하여, 시료 투입 후 5분이 이상이 경과되어야 전자총의 압력이 2×10^{-4} mbar에 도달하여 텅스텐 필라멘트 전자를 가동시킬 수 있었다. 최근 터보 펌프는 백업 라인의 압력이 10mbar 이하가 되면 가동이 가능한 turbo-drag 하이브리드 타입으로 개량되어, 배기 라인의 압력이 10 mbar만 되어도 터보펌프를 가동시킬 수 있다. 따라서 진공 제어보드를 교체하여 로터리펌프 가동 후 배기 라인의 압력이 10 mbar가 되면 터보펌프를 가동시킬 수 있도록 하였다. 시료실은 배기속도가 큰 로터리 펌프로 배기하고 다시 needle밸브 등으로 공기량을 조절하면서 다량 투입하면 원하는 저진공 상태를 빨리 얻을 수 있었다.

아래 그림 10은 고진공 상태와 저진공 상태에서 동일한 시료(종이)를 관찰한 SEM 이미지이다. 고진공 상태에서 SEM이미지는 시료의 대전(charging)에 의해 이미지의 왜곡이 심하나, 저진공 상태에서는 금속 코팅을 한 시료처럼 부도체 시료인 종이의 표면이 선명하게 이미징 되는 것을 알 수 있다. 검출기로는 반도체 타입의 BSE (backscattered electron) 검출기를 사용하였으며, 그 기본 구조는 photodiode와 동일하다. 고전압을 가해주는 2차전자 (SE) 검출기는 저진공에서 방전이 발생하여 사용이 불가능하다.

큰 배기속도 + 다량의 가스 주입 => 압력치의 빠른 안정화



[Fig. 9] 진공 시스템 개조: Needle 밸브추가 및 배기 라인 개조



[Fig. 10] 고진공과 저진공 SEM 이미지 비교

원고 및 의견 모집

편집위원회로부터

우리 진공학회에서는 지난 2년 동안, 홍보잡지 <진공 이야기>를 총 8회 발행했습니다. 편집위원 그리고 많은 저자들의 수고에 의해 '특집', '첨단기술', 그리고 'Vacuum Square' 등이 내실 있게 꾸며지고 있습니다.

앞으로는 이러한 코너들을 진공학회 회원들에게 활짝 열려 고 합니다. 각 코너에 적합한 원고나 제언, 그리고 <진공 이야기> 발전 방향에 관한 여러 가지 의견을 편집위원회로 보내주십시오. 반영하여 더 나은 <진공 이야기>가 되도록 힘 쓸 것입니다.

편집위원회 ; paper@kvs.or.kr