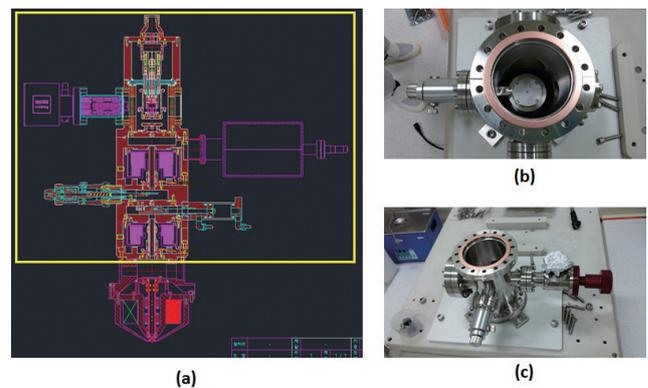


# 연강 전자총을 탑재한 FE-SEM

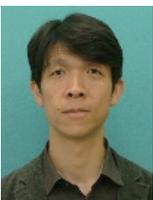
조복래 | 한국표준과학연구원

전자는 로렌츠 힘 공식에 의해서 전기장과 자기장의 힘을 동시에 받게 되는데, 전기장과 자기장을 적절하게 잘 조절하여 고분해능의 이미지를 얻게 된다. 반대로 생각하면 의도치 않은, 즉, 외부에서 전자현미경에 영향을 주는 노이즈의 전기장과 자기장을 잘 차폐하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 초고진공구현을 위해서 스테인리스 철이 많이 사용되지만 자기장 차폐가 잘 되지 않아서, 내부에 강자성의 고가 퍼멀로이를 경통에 둘러서 차폐를 하게 된다. 하지만 구조가 이중이 되므로 복잡해지고, 생산원가가 올라가는 단점이 있다. 그래서 본고에서는 가격이 저렴하면서도 자기장 차폐가 가능한 연강 재료인 연강을 전자원 생성 챔버에 적용하고자 한다. 일반적으로 연강은 진공특성이 좋지 않아서 초고진공에 사용되지 않았는데, 실험결과 연강챔버가 같은 규격으로 제작한 스테인리스 진공챔버보다 우수한 진공도를 보였다. 도달압력은 스테인레스 챔버가  $1.8 \times 10^{-10}$  mbar, 연강 챔버가  $2.8 \times 10^{-11}$  mbar로 그림처럼 연강 챔버가 더 낮은 압력을 기록하였다. 가스방출률 측정 결과도 연강이 스테인레스에 비해 약 100배 이상 가스 방출률이 낮음을 보여주어, 연강 챔버로 제작을 하여도 FE-SEM에 적용이 가능함을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 특성을 이용하여 지금부터는 연강으로 제작한 FE 전자총 및 이를 탑재한 FE-SEM 개발과정에 대해서 설명하고자 한다.

그림 1은 본 실험실에서 설계한 FE-SEM의 설계도이다. 대물렌즈 윗 부분의 경통부까지만 제작 및 조립하여 연강재료의 전자총 특성 분석하였다. 저자가 속한 한국표준과학연구원은 국내 전자현미경회사에 전자현미경 기술을 이전할 정도의 기반 기술이 있어, 전자, 전기 및 소프트웨어의 관련기술이 상당 수준에 이르고 있다. 따라서 그림 1의 (b, c)와 같이 형광판이 있는 단순한 진공 챔버에서 전자원과 총을 실험하고 연구원 기반기술을 적용하여 차차 완성도 있는 FE-SEM 개발을 할 것이다. 그림의 노란색 부분이 조립을 완료한 부분으로 대물렌즈 외의 일반적인 FE-SEM의 경통을 포함하고 있다. 조립

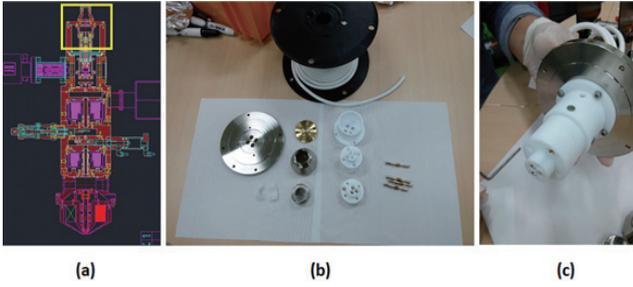


[Fig. 1] 제작중인 FE-SEM의 설계도와 전자빔 생성 실험을 위한 플랫폼: (a) FE-SEM의 설계도, (b) (c) 전자빔 생성 실험을 위한 플랫폼 및 내부에 설치된 형광판

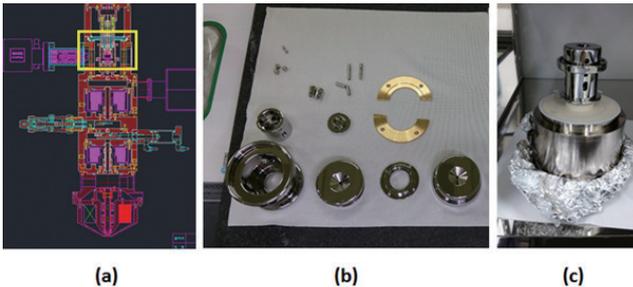


## <저자 약력>

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



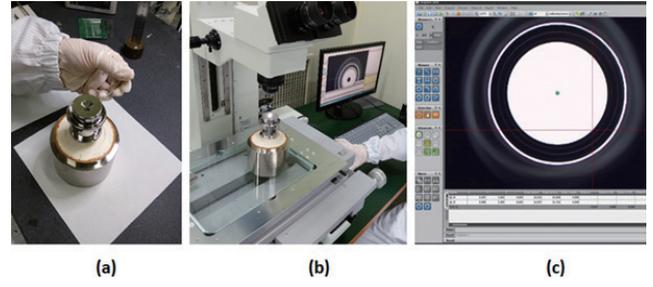
[Fig. 2] 고전압 인가를 위한 고전압 커넥터 제작; (a) 조립품의 설계도 해당 위치, (b) 조립 부품 나열, (c) 조립 완성품



[Fig. 3] 전자총 부분의 조립; (a) 조립품의 설계도 해당위치, (b) 조립 부품 나열, (c) 조립 완성품

중인 FE-SEM의 윗부분부터 아랫방향으로 조립과정을 상세하게 설명하고자 한다. 그림 2는 전자총에 고전압을 인가하기 위한 고전압 연결부 조립이다. 그림과 같이 본 FE-SEM은 고전압 연결부까지 본 연구그룹에서 설계하고 제작하여 진행하고 있다. 이처럼 FE-SEM의 전반적인 기술이 모두 개발이 되고 있으므로 향후 기술이전 시에도 이전 받는 기업의 자체 개발율이 상당히 높을 것으로 기대하고 있다. 현재 조립한 고전압 커넥터는 약 30 kV 급의 커넥터로 목표 가속전압에 맞춰 설계를 하여 조립하였다.

그림 3은 FE-SEM에서 제일 중요한 전자총 부분의 조립이다. 전자총에 있어 제일 중요한 기본 기술이 바로 진공기술이다. 개발중인 FE-SEM에서 우선 실험할 전자원은 열전계 전자원인데 기본 진공이  $10^{-7}$  Pa 이하로 유지가 되어야 안정적인 전자빔을 생성할 수 있다. 챔버의 재료는 앞서 진공실험으로 도달압력이 충분하다는 것을 검증하였다. 하지만 전자총의 모든 부품 조립후에도 진공이 유지 되어야 하므로 부품 조립후에 진공도가 유지 되어야 한다. 조립후의 진공도 실험에 대해서는 뒤에서 다시 설명한다. 그림을 보면 거울면처럼 부품의 표면이 매끄러운 것을 알 수 있는데, 전자총에는 가속전압에 해당

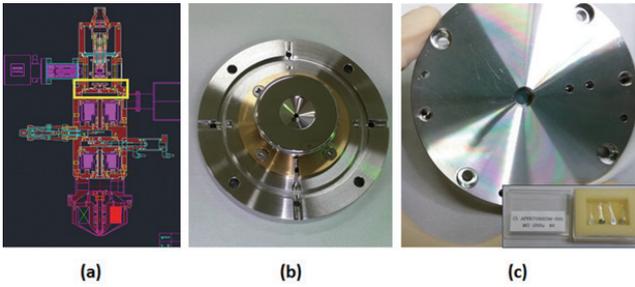


[Fig. 4] Schottky emitter와 건렌즈 간의 정밀 부품 정렬; (a) 측정렬 나사를 위한 축 조정, (b) 정밀 측정 현미경을 이용한 측정, (c) Schottky emitter tip과 렌즈간 정렬도 측정 이미지

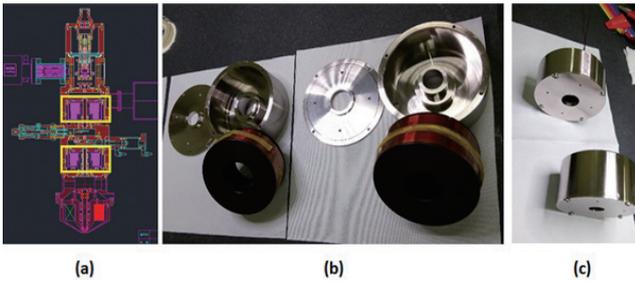
하는 높은 전압이 인가되므로 방전에 매우 주의를 기울여야 한다. 방전방지에 있어 가장 중요한 것이 표면의 정밀도인데, 본 과제에서는 lapping 공정을 통하여 표면 처리를 하였다. 그림 4는 전자총을 구성하고 있는 렌즈와 조립한 팁의 동축정렬 측정과정이다. 고분해능의 이미지를 얻기 위해서는 전자원부터 아래에 조립되는 부품들의 동축정렬이 매우 중요하다. 그렇지 않으면 수차가 발생하여 고분해능 이미지를 얻을 수 없다. 물론 전자빔의 정렬을 aligner와 같은 전기/자기적인 힘으로 조정이 가능하지만 기본적으로 기계적인 부품간의 오차를 최소화하는 것이 매우 중요하다. 본 그룹에서 개발하고 있는 전자총의 경우 팁부터 전자총 부품들의 동축오차를  $15 \mu\text{m}$  이내로 맞췄다. 이를 위해서 그림 4와 같이 정밀측정현미경을 이용하여 조립시에 수시로 오차를 측정하고 조정하였다.

그림 5는 전자총 부분의 접지렌즈와 함께 차동배기를 위한 aperture의 조립을 보여준다. 앞서 설명했듯이 열전계 전자원의 경우 진공도  $10^{-7}$  Pa 이하로 유지가 되어야 한다. 그러므로 시료실의 진공도보다 좋은 진공도로 유지가 되어야 하므로 차동배기구조가 매우 중요하다. 차동배기에 있어 기본은 챔버간을 작은 구멍으로 연결하고 각각의 챔버를 따로 펌핑해주는 것이다. 여기서는 전자총 챔버부분을 이온펌프와 NEG(Non-Evaporable Getter) 펌프로 구성하였다. 그리고 경통과 연결되는 부분을 물리브덴 소재의 직경 0.5 mm로 조립하여 차동배기 시스템을 구성하였다. 물론 더 작은 직경의 구멍을 사용하면 좋으나, 이때는 광학계의 특성 및 조립수준을 고려하여 결정하여야 한다.

그림 6은 경통에 사용된 2단의 코일이다. 전자현미경의 배율은 전자원의 크기를 얼마나 작게 축소하여 시료표

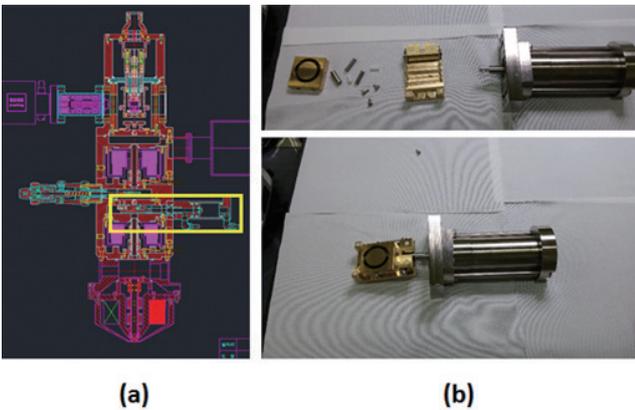


[Fig. 5] 차동배기를 위한 어퍼쳐 삽입: (a) 조립품의 설계도 해당위치, (b) 전자총의 겹지 렌즈부, (c)몰리브덴 어퍼쳐의 조립



[Fig. 6] 2단의 코일 조립: (a) 조립품의 설계도 해당위치, (b) 코일부품, (c) 코일의 조립 완성품

면에서 스캐닝을 하느냐에 달려 있다. 그러므로 전자원의 크기를 줄이는 것이 중요한데, 일반적으로 알려져 있는 열전계 전자원의 크기는 15 nm 이므로 1/20 로 전자원의 크기를 줄여야 sub-nm 의 분해능 구현이 가능하다. 하지만 구면수차나 색수차 그리고 조립 및 제작 오차에 의하여 백배 이상으로 집중해야 하는데 이와 같은 집중렌즈를 위해서 다단의 코일렌즈를 이용하게 된다. 물리적인 한계로 인하여 한단의 코일로는 1/100 이하로 줄일 수 있으므로, 높은 분해능을 얻기 위해서는 2단 이상이 사용되



[Fig. 7] 경통 밸브 조립: (a) 조립품의 설계도 해당위치, (b) 경통 밸브의 조립

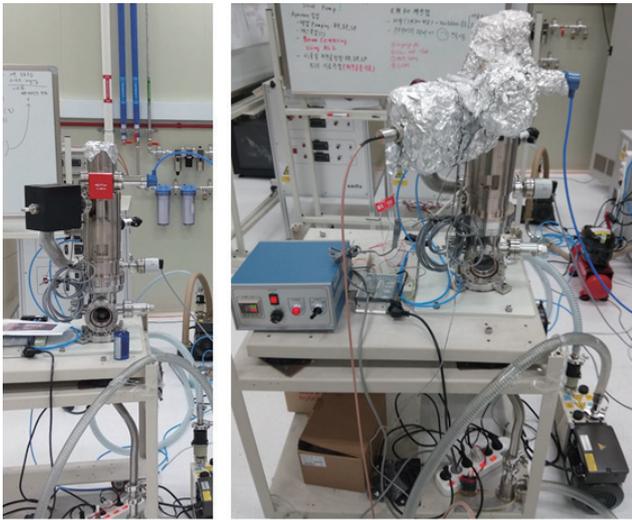
게 된다.

그림 7은 경통밸브 조립결과이다. 실제 전자현미경을 사용할 때는 시료의 교체를 위하여 챔버실의 경우 수시로 대기에 노출되게 된다. 따라서 전자총 부분을  $10^{-7}$  Pa 로 유지하려면 시료실이 개방되었을 경우에 진공도 유지를 위하여 밸브가 필요하다. 이를 위해서 1단과 2단 코일 사이에 공압으로 개폐가 가능한 밸브를 조립하여 넣었다. 밸브의 경우 기계적으로 작동되는 것으로 동작시에 진공 밀폐가 가능하도록 기구적인 설계와 함께 제작의 정확도 그리고 조립기술이 필요하다. 본 과제에서 제작한 밸브는 본 센터에서 개발 중인 다른 하전입자장비에도 적용하여 사용하고 있는데, 정상적으로 작동하여 시료실이 대기중에 노출이 되어도 총부분의 진공도는 정상적으로 유지가 되는 것을 확인하였다.

그림 8은 연장재질에 이어 두 번째로 본 과제에서 제작하고 있는 FE-SEM 이 갖는 기존 전자현미경과의 차별점을 보여준다. 고분해능의 전자현미경 이미지를 얻기 위해서는 각 부품간의 동축 정렬의 정확도가 매우 중요한데, 이는 다시 설명하면 얼마나 생성된 전자빔이 각 부품의 중심을 지나가도록 조정할 수 있느냐이다. 아무리 부품이 정밀하게 제작이 되고 조립이 되어도 최종적으로는 각 부품간의 재정렬 과정이 반드시 필요하다. 이 때 여러 기술이 있지만 전자총의 기계적인 정렬을 위해서 일반적으로 진공을 유지하면서 조정이 가능한 금속벨로우즈가 사용된다. 하지만 금속벨로우즈를 이용하게 되면 가격이

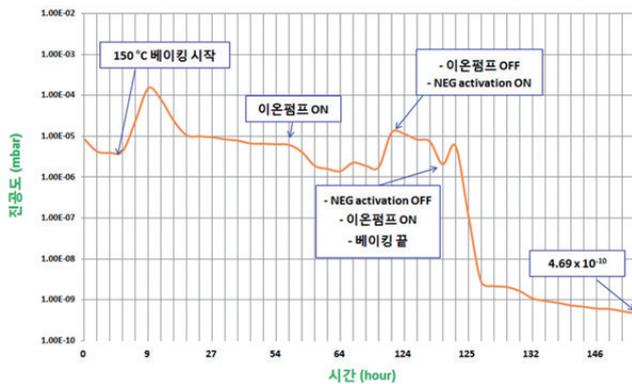


[Fig. 8] Double O-ring 방식의 전자총 기계식 정렬



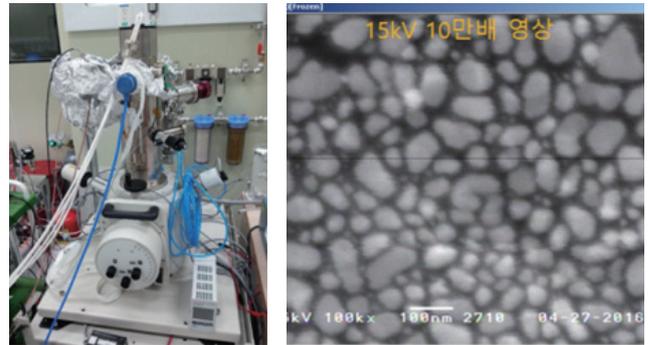
(a) (b)

[Fig. 9] Double O-ring을 채용한 FE-SEM의 진공도 실험; (a) 베이킹 전의 조립된 FE-SEM, (b) 초고진공 달성을 위한 베이킹 모습



[Fig. 10] Double O-ring을 채용한 FE-SEM의 진공도 실험그래프

비싸면서도 분해 조립이 쉽지 않은 단점이 있다. 이에 비해 고무재질은 저가에 분해와 조립이 쉽지만 초고진공이 안 되는 단점이 있었다. 하지만 본 과제에서는 두 겹의 오링, 즉 double O-ring으로 초고진공을 유지하면서도 전자총 정렬이 가능한 새로운 방법을 제안하고 실험하고 있다. O-ring 사이로 추가적인 펌핑을 하여 O-ring의 단점이 기체 투과효과를 상쇄하여 초고진공이 유지가 가능한지를 실험하였는데 그림 9와 같이 열선을 이용하여 베이킹을 하였다. 베이킹의 온도는 150도 하였으며, 베이킹 전후의 진공도 실험결과를 그림 10이 보여준다. 실험결과 두 겹의 O-ring을 사용하여도  $\sim 10^{-10}$  mbar 대역을 얻을 수 있었다. 이 정도 진공이면 schottky emitter를 충분히



[Fig. 11] FE-SEM의 조립 사진 및 이를 이용한 이미지 획득

사용할 수 있는 진공도로서, 향후에는 실제 전자빔을 발생시켜 전자빔의 안정도를 측정할 계획이다.

마지막으로 그림 11은 FE-SEM의 전제 조립 사진 및 이를 이용하여 얻은 10만배 영상을 보여준다. 빔전류는 200  $\mu$ A 이상 얻는 것이 가능하였고, 이미지 획득시에는 100  $\mu$ A 정도의 빔전류가 FE 전자총에서 방출되었다.