

나노기술을 선도하는 고분해능 전자현미경

이 글에서는 나노기술에서 가장 중요하게 활용되고 있는 현미경의 기술적 원리, 현미경의 종류 및 현재의 연구동향에 대하여 설명한다.

김 호 섭 / 선문대학교 신소재과학과, 교수

e-mail : hskim3@sunmoon.ac.kr

현미경은 ‘물체의 미세한 부분을 확대하여 관찰하는 도구 또는 장치’를 말한다. 우리 주변에서 물체를 보다 자세히 관찰하기 위하여 손쉽게 구할 수 있는 것은 확대경이다. 따라서 확대경은 가장 간단한 현미경인 셈이다.

인류역사에서 현미경의 기원을 찾는다면 확대경의 재료인 유리를 사용한 기원전 4,500년 이전부터라고 할 수 있다. 유리를 사용하여온 인류는 11세기경 렌즈를 제작하였고 나아가서 망원경 개발로 이어져 인간에게 더 먼 시야를 제공하였다. 이후 현미경의 개발로 미시세계에 눈을 뜨게 된 인류는 물리, 화학, 생물, 재료 분야뿐만 아니라 의학 분야 발전에 큰 변화를 가져오게 되었다. 현재 현미경은 물체를 구성하는 원자를 볼 수 있을 정도로 발전하였고, 이로 인해 나노 시대에 가장 중요한 도구로 활용되고 있다.

현미경은 가장 간단한 구조의 확대경에서 광학현미경, 전자현미경, 원자현미경 등으로 발전되어 왔다. 또한 사용 목적 및 방법에 따라 다양한 종류의 현미경, 즉 금속현미경, 편광현미경, 형광현미경, 위상차현미경, 자외선현미경, 이온현미경 등이 개발되어 왔다.

광학현미경

광학현미경은 일반적으로 가장 많이 쓰이는 현미경으로 정밀하게 구성된 기계부와 광학부로 이루어져 있다. 기계부는 현미경 전체를 받치는 다리와 뒤쪽에 손잡이가 있으며, 경통 재물대 조명장치 등이 손잡이에 의하여 지지되어 있다.

광학부는 대물렌즈와 접안렌즈, 그리고 조명장치로 이루어져 있다. 대물렌즈는 경통의 하단에 붙여 시료의 일차상을 맺게 하는 렌즈로서 현미경의 성능을 결정하는 가장 중요한 부분이다. 접안렌즈는 대물렌즈에 의해 상을 다시 확대한 상으로 만들어 눈에 보내는 렌즈이다. 조명장치는 보통 반사경, 조리개, 집광기 등으로 구성되어 있다.

현미경이 물체의 상을 확대하는 원리는 초점거리가 짧은 대물렌즈에 의하여 얻어지는 상을 접안렌즈로 다시 확대하는 것이다. 관찰하려는 시료의 확대 정도를 배율로 나타내는데, 이러한 배율은 대물렌즈와 접안렌즈에서 확대되는 크기에 따라 결정된다. 일반적으로 접안렌즈는 10배의 배율을 갖고, 대물렌즈는 4에서 100배 정도의 배율을 갖는다. 예를 들어 접안렌즈가 대개 10배의 배율을 갖고, 대물렌즈가 10배의 배율을 갖는다면 시료는 100배 더 큰 크기로 관찰 될 것이다.

이처럼 광학현미경의 경우 렌즈의 구성만으로 확대된 상을 만들 수 있지만 확대가 되었다고 해서 모두 잘 보이는 것은 아니다. 그것은 분해능에서 차이가 나기 때문이다.

분해능은 ‘서로 근접한 두 개의 물체를 분별할 수 있는 능력’ 나타내는 말로 현미경

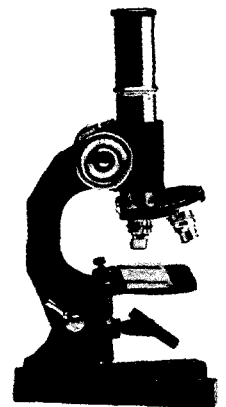


그림 1 광학현미경



에서 성능을 평가하는 중요한 척도가 되고 있다. 예를 들어 두 물체가 $1\mu\text{m}$ 의 간격을 가지고 있을 때, 이 물체가 뚜렷이 두 개로 보이기 위해서는 분해능이 $1\mu\text{m}$ 이하를 가진 현미경을 사용하여야 한다. 하지만, 분해능이 $1\mu\text{m}$ 이상일 경우 두 물체는 한 개의 물체처럼 보일 것이다.

광학현미경에서 분해능은 물체의 확대된 상이 통과하는 개구수(numerical aperture)와 광원의 파장에 의하여 결정된다. 즉, 분해능은 개구수의 크기에 반비례, 광원의 파장에 비례하는 값을 갖는다. 따라서 낮은 분해능 또는 고배율 현미경을 만들기 위해서는 개구수를 증가시키는 방법과 광원의 파장을 감소시키는 방법을 생각할 수 있다. 일반적으로 사용하는 광학현미경은 우리가 눈으로 확인 가능한 가시광선 사용하고 있어 가시광선 파장 영역에서 분해능이 제한되게 된다.

전자현미경

전자현미경은 광학현미경에서 사용되는 광원인 가시광선보다 매우 짧은 파장을 사용하여 분해능을 향상시킨 현미경이다. 광학현미경에서 사용되는 광원인 가시광선은 $300\sim 700\text{nm}$ 의 파장 영역을 가지고 있으나 전자의 경우 1nm 이하의 파장을 가지고 있다. 전자의 파장은 가해지는 에너지 증가에 따라 매우 빠르게 감소하므로 고에너지를 가진 전자는 고

분해능을 가질 수 있다. 하지만 전자는 진공 속에서 소멸되지 않고 운동하므로 현미경의 구조가 진공 속에서만 구성되어야 한다.

전자현미경은 광학현미경에서 사용되는 빛(광선)을 대신하여 전자빔을 사용하고 있으며, 기본적인 원리는 광학현미경과 유사한 구

조와 기능을 가지고 있다. 광학현미경에서는 광원은 유리로 된 렌즈를 통과하면서 빛이 집속되거나 발산하게 된다. 하지만, 전자현미경에서 전자는 유리를 통과할 수 없으며, 이를 대신하여 전자를 집속하거나 발산하기 위한 렌즈가 필요하다. 이러한 기능은 전자렌즈가 대신한다. 전자렌즈는 여러 겹의 전극판에 전압을 가하면 나타나는 전기장현상과 자성을 발생시켜 나타나는 자기장현상을 조절하여 전자들이 한 곳으로 집속 또는 발산하게 한다. 전자들이 여러 개의 전자렌즈를 통과하며 시료의 형상을 확대하게 된다.

투과전자현미경

전자현미경은 투과전자현미경(TEM : Transmission Electron Microscope)과 주사전자현미경(SEM : Scanning Electron Microscope)으로 구분된다.

투과전자현미경은 일반광학 현미경의 원리와 유사하며, 1931년 독일의 언스트 루스카에 의해 발명되었다. 루스카는 최초로 전자현미경 발명의 업적을 인정받아 1986년에 노벨 물리학상을 수상하였다. TEM은 고에너지의 전자빔이 전자기렌즈들을 거쳐 시료를 투과하여 확대된 시료의 형상이 형광판에 나타나게 된다. 이때 시료는 전자빔이 투과되어야 하므로 얇게 만들어야 한다. 투과전자 현미경의 경우 시료의 밀도와 두께 등의 차이에 따른 명암(contrast) 상을 얻을 수 있고, 시료에 도달하는 전자선을 회절시켜 회절상을 얻을 수 있으므로 시료를 구성하는 원소 내부의 정보도 얻을 수 있다. 일반적으로 전자빔의 물질에 대한 투과 능력은 $1,000\text{\AA}$ 정도로 작기 때문에 시료에 따라 적절한 시료관찰 기술이 요구된다. 박테리아나 바이러스 등은 미세하여 전자빔에 대해 투명한 유기박막(두께 100\AA 정도)이나 카본박막 위에 얹어 놓고 직접투과법으로 관찰한다. 또한 상을 보기 관찰하기 위하여 중금속을 진공증착해서 음영을 주어 입체감을 내거나, 시료자체에 중금속을 주입(염색)하여 콘트라스트를 주는 방법도 있다. 금속과 같이 고체표면을 관찰하는 경우에는 레플리카(replica)법을 사용한다. 이는 플라스틱으로 고체 표면의 주형을 뜨고 여기에 음영법으로 요철에 음영

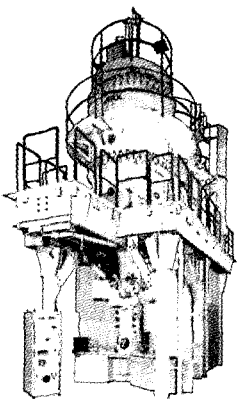


그림 2 한국기초과학연구원 보유하고 있는 초고압 투과전자현미경(TEM)

을 주어 관찰하며, 금속의 내부는 시료를 전해연마로 1,000Å 정도 얇게 만들어 관찰한다. 전자빔의 투과능력은 가속전압에 따라 증가하므로 초고압을 가진 초고압전자현미경을 사용하기도 한다. 국내에도 현재 한국기초과학지원연구원(KBSI)에서는 세계 최고급 투과전자현미경을 보유하고 있다. 이 투과 전자현미경은 1,300kV 고전압을 사용하여 최고 0.12nm의 분해능을 가지고 있다.

주사전자현미경

주사전자현미경(SEM)은 1930년대 중반부터 개발이 시작되어 1960년 초에 영국 캠브리지 대학에서 연구 개발된 SEM이 처음으로 상업화 되었다. SEM은 TEM에서 사용되는 매우 얇은 박막 형태의 시료 제작의 어려움을 극복하고 쉽게 물체의 표면을 관찰하기 위하여 개발되었다. 주사전자현미경은 TEM보다는 간단한 구조의 렌즈 배열 구조를 가지고 있다. 전자빔원으로부터 방출된 전자들은 집광렌즈에 의해 모아지고 전자빔은 deflection coil에 의해 시료를 스캔한다. 이때 시료와 충돌하며 발생하는 이차전자(secondary electron) 또는 반사전자(backscattered electron)를 검출함으로써 상을 얻는다. 이차전자 또는 반사전자의 전류값에 따라 CRT(Chthode Ray Tube)상에 흑백의 강약으로 상을 만든다. 따라서 주사전자현미경에서는 주로 시료표면의 정보를 얻을 수 있고, 투과전자현미경의 경우 시료를 투과한 전자로 상을 얻기 때문에 2차원 상을 얻지만, 주사전자현미경의 경우 시료의 3차원 상을 관찰할 수 있다는 장점이 있다.

이 두 종류의 전자현미경은 각기 다른 목적으로 발전되고 사용되어 왔으나 투과형 전자현미경의 주사형 전자현미경에 비해 그 구조가 복잡하고, 작동이 어려우며, 가격이 비싼 점 등 때문에 주사전자현미경이 그 보급률에서는 앞서가고 있다. 응용에 있어서 투과전자현미경은 금속, 세라믹, 반도체, 고분자합성체 등의 재료분야, 의학 등의 생체시료 조직관찰에 주로 사용되고 주사전자현미경은 거의 모든 분야에

서 광학현미경의 영역에서 물질의 표면을 관찰하는 분석 장비로써 활용되고 있다.

전자현미경의 구조

일반적으로 가장 많이 사용되는 전자현미경(SEM)은 크게 전자빔원, 전자기렌즈, 검출기로 이루어져 있다. 전자현미경에 사용되는 전자빔원은 전자빔을 발생하는 방식에 따라 열전자 방출, 냉전계 방출, 열전계 방출의 세 가지로 구분되고, 전자현미경의 분해능을 높이기 위해서는 전자빔원의 크기 및 에너지 분산값(energy spread) 등을 가능한 한 줄여야 한다. 열전자방출의 경우 필라멘트를 가열해서 발생하는 전자를 빔의 형태로 인출하는 방식으로 현재 전자현미경에 가장 많이 사용되어지고 있다. 그러나 열전자 방출형 전자빔원의 경우 인출 전류밀도가 제한되고 발생된 열전자들의 에너지의 분산값이 커서 SEM의 경우 분해능이 3.5nm가 한계이다.

냉전계 방출형 전자빔원의 경우 뾰족한 전자방출원 팁에 인가한 높은 전압에 의해 전자빔을 인출하므로 방출원을 가열하지 않아도 되고 전자빔의 휘도가

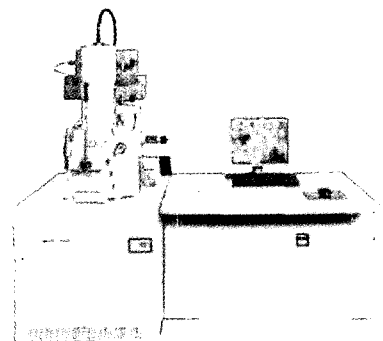


그림 3 전자현미경(FE-SEM)

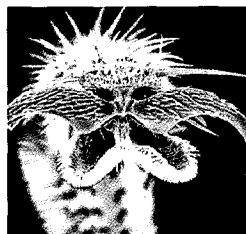


그림 4 전자현미경(SEM)으로 관찰한 파리의 발바닥

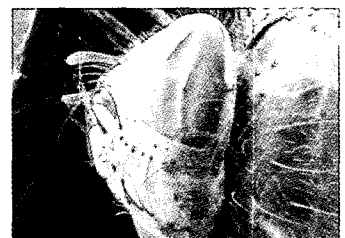


그림 5 전자현미경(SEM)으로 관찰한 파리의 머리

높으며 에너지 분산이 작아, 분해능이 nm 이하인 초고분해능 SEM의 전자빔원으로 사용되고 있다. 그러나 냉전계 방출형 전자빔원은 진공이나 전극간 구조 등에 예민하여 인출되는 전자빔 전류가 불안정하고 사용수명이 짧은 단점이 있으나, 최근에는 이러한 문제를 해결하여 전자현미경에의 사용하고 있다.

열전계 방출형 전자빔원은 앞서 언급한 두 전자빔원의 장점을 취한 것이라 하겠다. 열전계 방출방식은 냉전계 방출원을 고온으로 가열함으로써 전자방출원 팁의 오염도를 줄일 수 있으므로 인출 전류의 불안정성을 상당히 해소 할 수 있다. 그러나 음극을 가열함으로써 인해 전자빔의 크기, 휘도, 에너지 분산 등이 냉전계 방출방식보다 커지는 단점이 있다.

전자현미경의 전자렌즈는 일반적으로 집광렌즈(condenser lens), 대물렌즈(objective lens), final lens aperture로 이루어져 있는데 집광렌즈는 전자빔원에서 나오는 전자빔을 집속시키는 역할을 한다. 이 때 집광렌즈에 의해 한 곳에 모이는 빔의 spot 크기가 작을수록 좋은 분해능을 얻을 수 있다. 대물렌즈(objective lens)는 시료의 표면에 닿게 되는 전자빔의 초점을 잡는 역할을 하는데 두 개의 deflection coils과 stigmator로 구성되어 있다. Deflection coil은 초점되어진 전자빔을 이동하는 역할을 한다. Final lens aperture는 전자빔의 spot 크기를 결정한다. Final lens aperture가 작을수록 좋은 분해능을 얻을 수 있으나 전자빔양이 줄어들기 때문에 적절한 조절이 필요하다.

검출기는 시료에 발생되는 2차전자 또는 산란전자를 검출하는 데 사용된다. 전자빔이 시료와 충돌 결과 발생하는 신호는 시편에 관한 여러가지 정보를 전달한다. 여기에는 전자빔의 spot과 시료와 충돌한 부분에서 나오는 유용한 정보 외에도 noise라고 불리는 spot 외의 영역으로부터 나오는 정보도 포함된다.

전자현미경의 연구 동향

나노 및 바이오 기술이 점점 발전함에 따라 Hitachi, FEI, LEO, JEOL 등의 전자현미경 업체에서 나노미터 이하의 분해능을 갖는 고분해능

SEM을 차세대 주력상품으로 활발히 개발하고 있다. 현재 전 세계에서 가장 높은 분해능을 가지는 전자현미경(SEM)은 일본 기업이 냉전계 전자방출원을 이용하여 제작한 것으로 30kV의 전자에너지에서 0.5nm의 분해능을 가지고 있다. 현재 전자현미경의 분해능은 이론적으로 가능한 값보다 50배 이상이 크다. 이는 현재 개발되어 있는 SEM용 전자빔원의 virtual source size와 에너지 분산값 및 전자광학렌즈의 수차를 줄이는 데 한계가 있기 때문이다. 따라서 차세대 전자현미경은 고휘도, 저에너지 분산값을 갖는 새로운 전자빔원의 개발과 렌즈의 수차를 줄이거나 수차를 보정하는 새로운 전자광학계에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 전자빔원에서 텅스텐이나 지르코니아 등의 금속팁을 이용한 냉전계 방출형 전자빔원을 이용하면 열전자 방식의 전자빔원보다 휘도를 훨씬 증가할 수 있어 선진국의 전자현미경업체 등에서 이 방식을 채택하고 있으며, 최근에는 단일 탄소나노튜브(CNT)에서 방출하는 고휘도의 전자빔을 이용한 CNT-방출원을 전자빔원으로 하는 전자현미경 연구가 진행 중이다.

전자현미경은 반도체 및 나노기술 분야에서 표면 및 분석 장비로서 사용될 뿐만 아니라 반도체 소자의 미세한 패턴을 그리는 장비(리소그래피 장비)로서 사용되고 있다. 반도체 분야에서 전자현미경의 수요는 점차적으로 증가하고 있다. 지금까지 반도체 소자를 검사는 광학현미경으로 가능하였으나, 소자의 패턴이 100nm 이하로 작게 됨에 따라 분해능이 높은 전자현미경으로 대체되고 있다. 현재 사용되는 전자현미경은 하나의 전자빔으로 시료를 검사하고 있어 검사 시간에 느린 단점이 있어 측정 및 검사 시간을 빠르게 하여 생산성을 높이기 위한 연구들이 진행되고 있다. 이러한 연구 중에는 빠른 검사 속도를 위하여 전자현미경의 전자칼럼(전자방출원에서 마지막 전자렌즈까지 전자빔 통로) 크기를 소형화하여, 소형화된 전자칼럼을 여러 개 배열하여 작동하는 멀티전자빔 현미경과 소형화된 전자칼럼으로 구성된 휴대가 가능한 전자현미경 등이 개발되고 있다.

이러한 차세대 전자현미경은 반도체산업 분야뿐만 아니라 일반산업 분야 및 현대과학의 전 영역에서 중요한 핵심기술로 이용될 것으로 전망된다.