

주사탐침현미경(SPM)의 소개와 전자현미경(EM)과의 Image 비교

남효관

영남대학교 중앙기기센터 전자현미경실

과학은 광학현미경으로 관찰할 수 있는 한계(μm)를 극복하기 위하여 전자현미경을 발명하였다. 현대의 전자현미경을 이용하면 수 nm 크기의 물질을 관찰할 수 있으며, 이러한 전자현미경의 분해능은 현대과학이 누리고 있는 급속한 발전을 가능하게 되었다. 그러나 과학자들은 이에 만족하지 않고 전자현미경보다 분해능이 더욱 우수한 현미경, 즉 주사탐침현미경(Scanning Probe Microscope, SPM)을 스위스 취리히의 IBM 연구원인 Binnig, Rohrer, Gerber와 Weibel에 의해 1982년에 먼저 주사터널링 현미경(Scanning Tunneling Microscope, STM)이 개발되었고, Binnig, Rohrer는 이 공로로 1986년 노벨 물리학상을 수상하였다. 그 후 이 두 사람에게 의해 1986년 IBM 주도하에서 원자 힘 현미경(Atomic Force Microscope, AFM)이 개발되었다.

주사탐침현미경은 탐침과 물체 사이에 존재하는 물리적 상호작용을 관찰하고, 그 상호작용을 조합하여 표면의 형태(topography)를 형상화하는 일련의 기술군을 의미한다. 물리적 상호작용의 종류에 따라 각각의 기술은 명명되며, 가장 대표적인 기술이 AFM(Atomic Force Microscope)과 STM(Scanning Tunneling Microscope)이다.

이와 같이 과학의 추구 방향이 원자 크기대의 극소형의 것을 대상으로 하게 됨에 따라 관찰, 조작하고 또 그 성질과 양을 이해하기 위해서는 나노테크놀로지를 필요로 하게 된다. 이러한 Nano-Technology의 기술은 전자현미경과 더불어 지난 80년대 개발된 STM(Scanning Tunneling Microscope)과 AFM(Atomic Force Microscope)을 포함하는 SPM(Scanning Probe Microscope)이다.

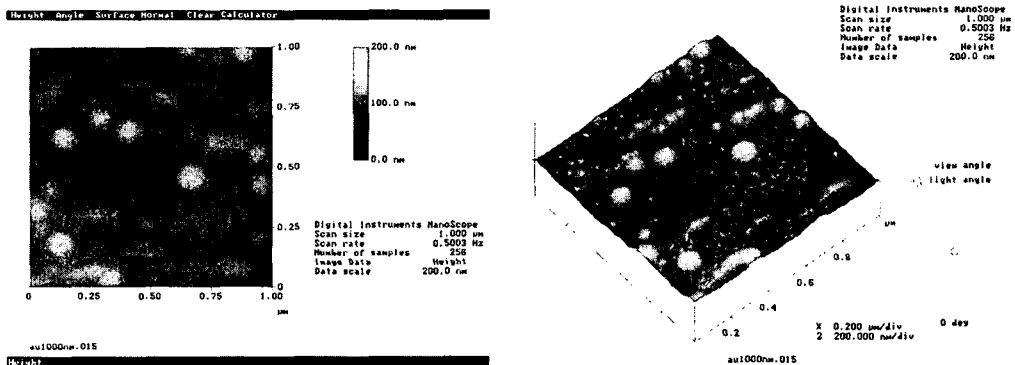


Fig. 1. AFM Images of gold particle 2D(left) and 3D(right)

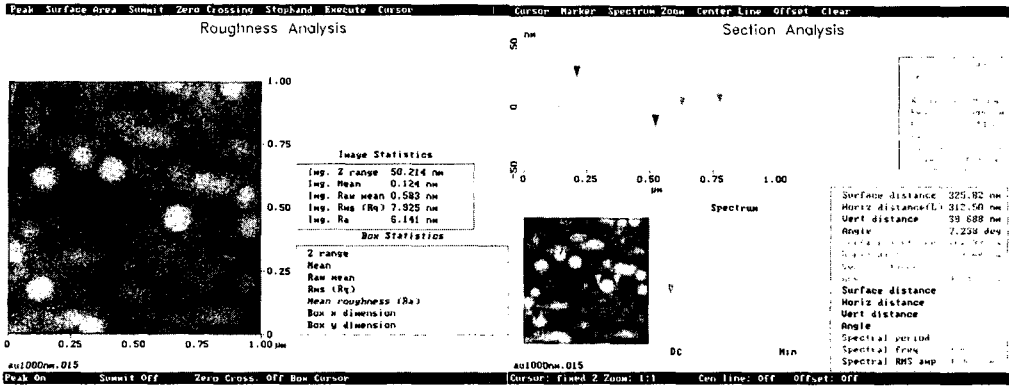


Fig. 2. AFM Images of gold particle roughness(left) and section analysis(right)

주사탐침현미경(SPM)은 기존의 광학현미경(Light Microscope, LM)이나 전자현미경(EM)을 앞질러 분자 세계는 물론 원자 세계를 열어가고 있으며, 그 배율은 수천만 배까지 관찰이 가능하다. 또한 감지하기 어려운 수직방향(z축)에 대하여는 다른 어떠한 현미경보다 분해능이 더욱 뛰어나 0.01nm 까지도 가능하여, Fig. 1, 2와 같이 2차원 image, 3차원 Image, 표면 거칠기(roughness) 및 형상의 수직방향의 높이(section analysis) 등의 분석에 매우 유용하게 사용되는 현미경이다.



Fig. 3. TEM Image of gold particle(standard sample, 120kV HR mode)

디지털 기술의 발달로 저전압 투과전자현미경에도 Slow Scan CCD Camera를 이용하면 Fig. 3과 같이 수 Å의 분해능을 쉽게 얻을 수 있다. 고전압 투과전자현미경(TEM)은 분해능이 대단히 우수하여 수평방향(x, y축)은 원자단위의 분해능이 가능하나, 수직방향(z축)의 분해능은 매우 떨어져서 개개의 원자를 측정할 수 없다. 또한 지금까지 투과전자현미경은 미세한 시료를 3차원으로 볼 수 없었으나, 앞으로는 Tomography 프로그램을 이용하여, 시료를 Tilting 하면서 여러 장의 Image를 얻어 합성하면 Fig. 4와 같이 3차원의 Image를 얻을 수 있다.

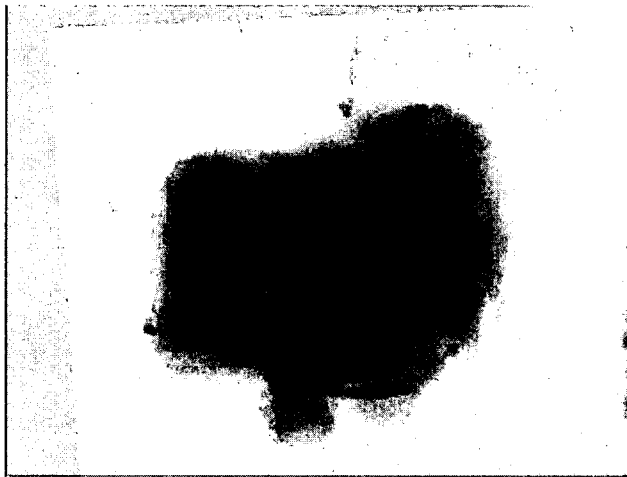


Fig. 4. TEM Image of Ag clusters on and within zeolite

SPM은 STM과 AFM을 수년 전부터 세계적으로 통칭하여 부르는 용어이며, 그 원리는 각각 다르다. STM의 원리는 시료와 탐침(probe)과의 거리가 매우 근접되었을 때 시료와 탐침사이에 흐르는 터널(tunnel) 전류를 이용하여 시료표면의 궤적을 주사하여 형상화하는 현미경이다. 도전체 표면에 가느다란 텅스텐이나 백금선을 부식시켜 그 끝에 원자 몇 개만 있게 한 탐침(STM tip)을 원자 한두 개 크기의 정도의 거리 이내로 접근시키고, 양단간에 약간의 전압을 걸면 터널링 현상에 의한 전류가 발생한다. STM은 바로 이러한 도전성 Tip과 도체 또는 반도체인 시료 사이의 터널링 전류가 이들 사이의 거리와 지수적인 관계 즉, $I \sim Ve^{-Cd}$ 라는 사실에 원리의 근거를 둔다. 여기서 I = 터널링 전류, V = Tip과 시료간의 전압편차, C = 상수, d = Tip과 시료와의 거리이다.

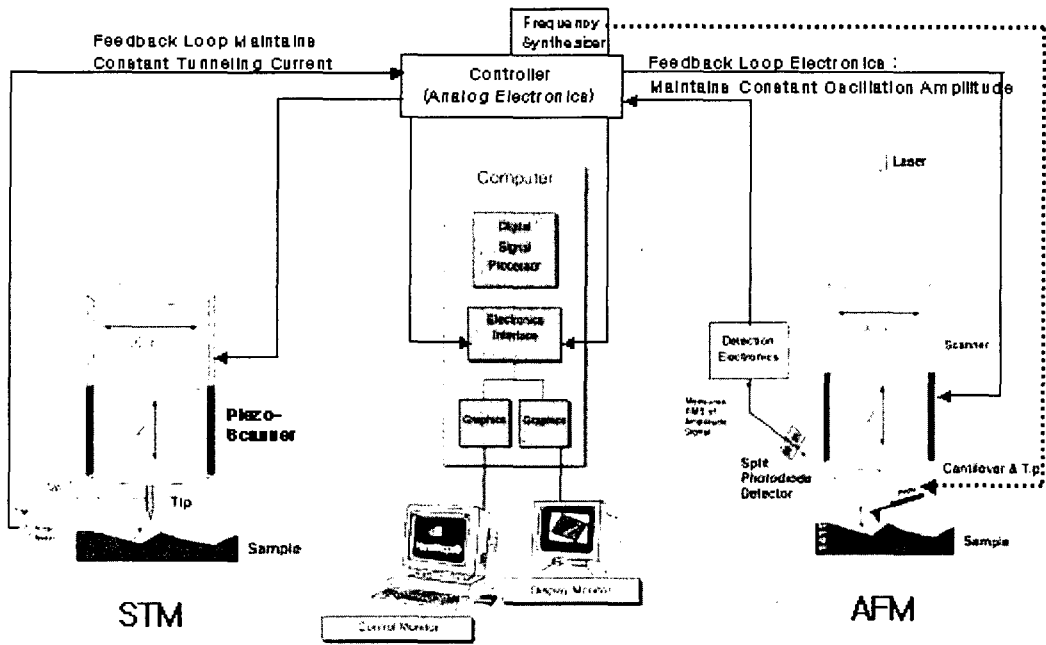


Fig. 5. Basic principle of SPM

Tip이 시료 표면을 주사할 때 Tip은 다른 높이의 형상을 만나는데, 이러한 다른 형상이 터널링 전류에 지수적인 변화를 준다. 귀환회로에 의해 이 높이의 변화는 초기에 설정한 전류 값이 초기에 설정한 Tip과 시료의 떨어진 거리에 도달할 때까지 각(x, y) 데이터 지점에서 Scanner를 수직방향으로 움직여 일정한 터널링 전류가 되게 하면서, 각(x, y) 데이터 지점에서의 Scanner의 수직위치를 컴퓨터에 저장한다. 이렇게 하여 시료 표면의 3차원 Image를 얻는 원리인데, 이 기술은 도체나 반도체에 제한된다. 이러한 시료의 제한을 극복하기 위해 개발한 AFM은 부도체인 시료를 볼 수 있게 하여 생명공학, 물리학, 광학, 화학공학, 재료공학, 금속공학, 섬유공학 및 고분자공학 등 거의 모든 분야에서 사용할 수 있게 하였다.

AFM의 원리는 잘 휘는 지렛대(cantilever) 끝에 달려 있는 뾰족한 Tip과 시료표면에 작용하는 원자반발력 즉 인력 및 척력이 작용하고, 이러한 상호작용 때문에 Cantilever가 휘게 되고, 그 휘는 정도를 레이저 광의 굴절을 통해서 표면정보를 얻는 현미경이다. AFM은 STM과 달리 텅스텐 도는 백금으로 된 탐침 대신에 나노기술로 제조된 Probe를 사용한다. 이 Probe는 모판(substrate) 끝에 아주 미세한 힘(나노뉴톤 : 원자간력)에 휘어지는 Cantilever 끝에 수직방향으로 원자 몇 개 정도의 크기로 끝이 가공된 탐침(tip)을 붙였다. 이 Probe Tip의 끝을 시료표면에 근접시키면 끌어당기는 또는 밀어내는

여러 가지 힘이 시료 시료표면의 원자와 탐침 끝의 원자사이에 작용하여, 이 작용하는 힘에 의해 Cantilever의 휨이 발생한다. 이 힘이 일정하게 유지되도록 하면서 귀환회로에 의해 Scanner의 Z축을 정밀 제어하여, 각 지점(x, y)에서 Scanner의 수직 위치를 저장하며, 시료표면의 3차원 Image를 얻을 수 있는 원리로서 몇 가지 다른 Mode가 있다.

AFM의 Mode에는 Contact Mode와 Non Contact Mode가 있으며, Tip에 일정한 진동을 주어 시료를 손상시키지 않으면서 시료표면의 높이의 차가 큰 시료나 손상되기 쉬운 시료 등에서 Contact Mode와 같은 분해능을 주는 Tapping Mode가 있다. 그 외의 SPM 측정 기능으로 액중 Contact AFM(Fluid Contact), 액중 Tapping Mode(대기 중 Tapping Mode AFM보다 더 약한 힘으로 형상을 측정한다. 생물 시료의 측정에 최적), Interleave mode, Lift Mode, 자기력 현미경(MFM), 전계력 현미경(EFM), 표면전위현미경(SPOM), 마찰력 현미경(LFM), Phase Image, Force Modulation 등 이외에도 많은 종류의 SPM이 있다.

SPM은 2차원 Image를 먼저 얻어 여러 분석 기법을 이용하여, 고 분해능의 3차원 Image, 표면 거칠기(roughness) 및 형상의 수직방향의 높이(section analysis) 등 다양한 정보를 얻을 수 있는 획기적인 분석기일뿐 아니라 시료준비가 거의 필요 없는 현미경이다. 또한 AFM의 경우는 부도체 시료도 분석이 가능하므로 Coating이 필요 없어 시료의 파괴나 손실이 없는 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 시료의 관찰 범위의 한계가 다른 종류의 현미경에서와 같이 크지 않고, 기종과 Scanner에 따라 다르나 최대 크기가 대략 수평방향(x, y축)은 150~200 μm 정도이고, 수직방향(z축)은 5~10 μm 정도로 제한되어 있고, 또한 시료가 평면성을 가지고 있어야 된다는 단점을 가지고 있다. 여기서는 동일한 시료를 비슷한 배율로 AFM과 SEM의 Image를 얻어 분석 능력이 어떠한가를 비교해 보고자 한다.

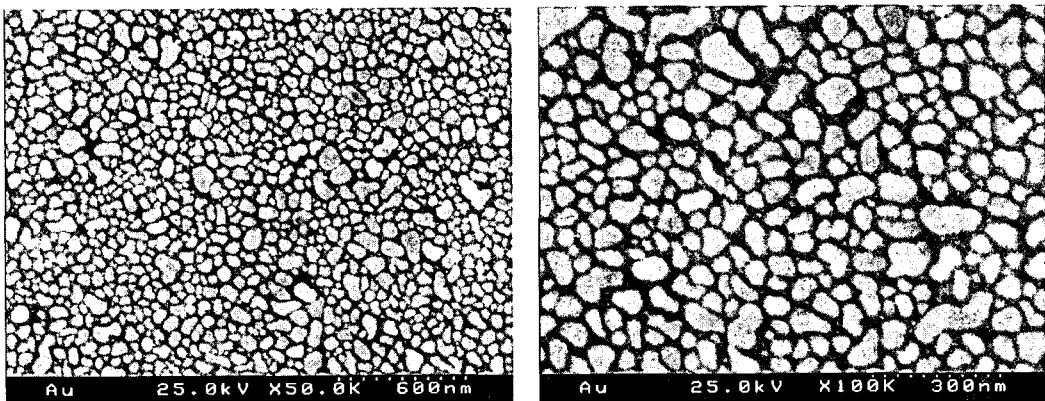


Fig. 6. SEM images of gold particle 50,000 \times (left) and 100,000 \times (right)