

# 원자현미경에 의한 나노측정

· 박 상 일 | PSIA, 대표이사  
e-mail : park@psia.co.kr

대해 소개한다

나노테크놀로지(NT)는 원자나 분자 크기의 극미세 세계에서 물질의 구조와 특성을 규명하고 이를 조작, 제어하는 기술로서 IT, BT와 더불어 21세기 핵심기술로 주목 받고 있다. 산업의 발전은 기술의 발전과 밀접한 관계가 있어 왔는데, 과거에 기계공학, 전기·전자공학 등이 산업발전을 주도했듯이 앞으로는 NT가 산업발전의 견인차 역할을 할 중요한 기술이기 때문이다.

얼마 전까지만 해도 원자나 분자단위의 나노세계는 너무나 미세하여 아무리 좋은 현미경으로도 볼 수 없는 미지의 영역이었다. 이러한 나노세계를 열 수 있는 열쇠가 1980년대에 발명된 원자현미경(SPM : Scanning Probe Microscope)[1]이다. 원자현미경의 효시는 STM(Scanning Tunneling Microscope)[2]이며, 가장 널리 쓰이는 원자현미경은 AFM(Atomic Force Microscope)[3]으로서 STM을 발명한 IBM의 비너히(G. Binnig)와 로

러(H. Rohrer)는 1986년도 노벨 물리학상을, AFM을 비너히와 공동 발명한 스탠포드 대학의 퀘이트(C. Quate) 교수는 1992년도 미국 국가과학메달을 각각 수상한 바 있다.

'원자는 너무 작아서 (0.1~0.5nm) 아무리 좋은 현미경으로도 볼 수 없다'는 기존의 통념을 깨뜨린 원자현미경은 제1세대인 광학현미경과 제2세대인 전자현미경 다음의 제3세대 현미경으로 자리 잡아가고 있다. 광학현미경의 배율이 최고 수천 배, 전자현미경의 배율이 최고 수십만 배인데 비해서 원자현미경의 배율은 최고 수

천만 배로서, 개개의 원자를 관찰할 수 있는 분해능을 가지고 있다. 투과식 전자현미경인 TEM도 수평방향의 분해능은 원자단위이나 수직방향의 분해능은 훨씬 떨어져 개개의 원자를 관찰할 수는 없다. 원자현미경의 경우 수직방향 분해능은 수평방향보다 더욱 좋아서 원자 지름의 수십분

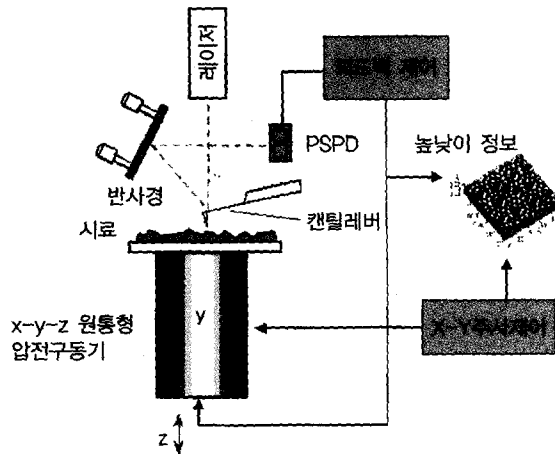


그림 1 AFM의 구조도 : 캔틸레버라고 불리는 작은 막대 끝부분에 달려있는 탐침과 시료표면의 원자 사이의 힘에 의해 캔틸레버가 아래위로 휘게 되는데, 이때 레이저 광선이 캔틸레버 뒷면에서 반사되는 각도를 포토다이오드(PSPD)로 측정함으로써 표면의 굴곡을 알아낸다.

의 일(0.01nm)까지도 측정할 수 있다. 이와 같이 경이적인 분해능으로 나노 세계를 직접 관찰함으로써 이제까지 알 수 없었던 여러 가지 극 미세 세계에 대한 의문을 해결하는 것은 물론 원자 하나 하나를 움직이거나 물질 표면을 원자단위로 변형시켜서 글자를 쓰는 등 이전에는 상상하기 힘든 일들을 해내고 있다.

원자현미경은 영어의 직역에 충실하게 '주사탐침현미경' 또는 '원자간력현미경' 등으로 불리기도 한다.

### 원자현미경의 개요

원자현미경은 미세한 탐침을 시료에 근접시켜 시료와 탐침 끝 사이의 상호 작용을 이용하여 표면 형상을 비롯한 다양한 특성을 알아내는 장치이다. 가장 보편적인 원자현미경인 AFM의 구조도가 그림 1에 나타나 있다.

캔틸레버라고 불리는 작은 막대 끝부분에 달려있는 탐침과 시료표면의 원자 사이의 힘에 의해 캔틸레버가 아래위로 휘게 되는데, 이때 레이저 광선이 캔틸레버 윗면에서 반사되는 각도를 포토다이오드(PSPD)로 측정함으로써 표면의 굴곡을 알아낸다.

원자현미경의 탐침은 캔틸레버(cantilever)[4]라고 불리는 작은 막대(100 $\mu\text{m}$  × 10 $\mu\text{m}$  × 1 $\mu\text{m}$ ) 끝에 달려 있으며, 이들은 마이크로머시닝(micro-machining)으로 만들어진다. 탐침을 시료표면에 근접시키면 탐침끝의 원자와 시료표면의 원자들 사이에 상호작용

용력이 생긴다. 이 상호작용력은 주로 Van der Waals force이며, 그 크기는 nano Newton( $10^9\text{N}$ ) 이하로 미약하다. 하지만 이렇게 미약한 힘에 의해서도 캔틸레버의 공명진동수가 변화하며, 캔틸레버의 휘는 정도나 공명진동수 변화는 레이저와 포토다이오드로 측정된다. 이렇게 감지된 원자 사이의 힘이 일정하게 유지되도록 피드백제어를 하면서 탐침을 x-y 방향으로 움직이면 탐침은 시료 표면의 높낮이를 따라가게 되며, 이때 기록된 각 위치의 높낮이가 바로 시료의 형상을 나타내는 사진이 된다.

원자현미경은 시료의 형상뿐 아니라 시료의 기계적 성질, 전기적 성질, 광학적 성질 등 다양한 물리적 특성을 알아낼 수 있는 기법이 개발되었는데 이들을 체계적으로 나타낸 것이 그림 2이다. 원자현미경의 큰 줄기는 STM과 AFM으로 나뉘며, AFM은 다시 접촉식(C-AFM)과 비접촉식(NC-AFM)으로 나뉜다.

STM은 시료와 탐침 간에 접압을 걸어주고 근접시켰을 때 생기는 양자역학적 터널링현상을 이용한 것으로서의 이의 파생 기법으로 STS(Scanning Tunneling Spectroscopy)[5]가 있다. STS는 전자의 상태 밀도(density of states)와 같은 국소전자구조(local electronic structure)를 알아내는데 쓰인다.

접촉식 AFM의 파생 기법으로는 시료표면의 마찰계수를 측정하는 LFM(Lateral Force Micro-scopy)[6]이 있으며, 접촉식 AFM에 온도센서, 정기용량센서를 부착시키면 각각 SThM (Scanning Thermal Micro-scope)[7], SCM(Scanning Capacitance Micro-scopy)[8]이 된다.

비접촉식 AFM은 캔틸레버를 일정한 주파수로 진동 시키되 탐침이 시료를 전혀 접촉하지 않으면서 측정하는 진정한 의미에서의 non-contact mode뿐만 아니라 탐침이 시료표면을 가볍게 톡 톡 찌는 tapping mode, 그리고 아예 탐침이 시료표면에 접촉한 상태에서 탐침 또는 시료를 진동시키는 dynamic-contact mode를 망라하기 때문에 근래에는 비접촉식 AFM이라고 하기보다 포괄적 의미를 갖는 DFM(Dynamic Force Microscopy)이라고 부른다. DFM의 파생기법으로 자기력을 이용하여 자기적 특성을

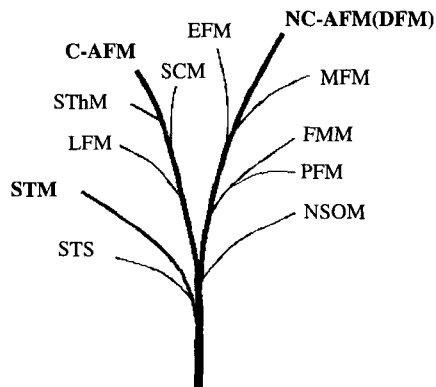


그림 2 원자현미경의 계보 : STM, 접촉식 AFM, DFM이 큰 줄기를 이루며, 이로부터 각각 파생된 기법들이 있다.

재는 MFM(Magnetic Force Microscopy)[9]과 정전기력을 이용하는 전기적 특성을 재는 EFM(Electrostatic Force Microscopy)[10-12]이 있으며, 탐침과 시료를 접촉한 상태에서 측정하는 DC-EFM(Dynamic Contact EFM)[13]도 있다. PFM(Pulsed Force Mode)[14]은 FMM(Force Modulation Microscopy)[15]의 파생기법으로 시료의 경도와 점착성(adhesion)을 모두 측정할 수 있다.

NSOM(Nearfield Scanning Optical Microscope)[16]은 주로 광섬유(optical fiber)를 뾰족하게 만든 탐침을 사용하는데 시료의 광학적 특성을 빛의 파장보다 훨씬 작은 분해능(~50nm)으로 알아낼 수 있다.

### 원자현미경의 발전

원자현미경은 위에서 언급한 바와 같이 다양한 기능과 장점을 가지고 있지만 다음과 같은 몇 가지 문제점도 있다. 1) 탐침이 기계적으로 시료표면을 따라가야 하므로 광학현미경이나 전자현미

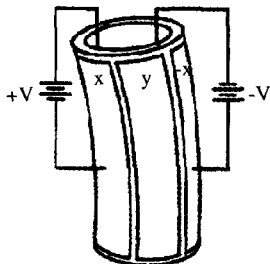


그림 3 원통형 압전 세라믹 구동기 : 바깥쪽 전극을 4등분하고 마주보는 전극에 대칭되는 전압을 걸어주면 원통이 한 쪽으로 휘게 된다.

경에 비해 영상을 얻는 속도가 느리다. 2) 일반적으로 원자현미경에 사용되는 구동기(scanner)는 그림 3에서와 같은 원통형 압전 세라믹(piezoelectric ceramic)을 사용하는데, 압전세라믹 자체의 비선형성, 이력현상(hysteresis) 등에 의해 오차가 생기며, 튜브의 비틀림에 의존하여 스캔하기 때문에 x-y-z축 움직임의 직교성과 독립성이 떨어진다. 3) 탐침이 유한한 크기를 가지고 있어 좁고 깊은 계곡과 같이 경사가 심한 부위의 측정이 불가능하거나 어렵다. 4) 측정 가능한 부위에서도 탐침의 모양새에 의한 왜곡현상(convolution effect) 때문에 측정오차가 생긴다. 이외에 조작의 용이성에도 개선의 여지가 많다고 할 수 있으나 이는 시간에 따라 점진적으로 개선되고 있으므로 여기에는 논외로 하고 위에 열거한 1)~4)에 대한 개선책을 살펴보기로 한다.

### 원자현미경의 고속화

원자현미경의 속도를 제한하고 있는 것은 z 축 구동기(scanner)의 응답 속도와 캔틸레버의 공명진동수 변화를 검출하는 회로의 응답 속도이다. 원통형 구동기는 공명진동수가 수백 Hz로서 256 x 256 pixel 영상을 얻는 경우 초당 한 줄 정도의 데이터를 얻을 수 있으며, 영상 한 장을 얻기까지는 4분 정도가 소요된다. 이를 개선하기 위해 압전세라믹 구동기를 캔틸레버에 탑재시키는 방법이 있다.[17] ZnO나 PZT박막 구동기로 캔틸레버만 상하운

동을 하게 하고 원통형 scanner는 x-y 방향으로만 스캔하면 z 축 응답대역이 수십 kHz까지 넓어져 초당 한 장 정도의 영상을 얻을 수 있을 만큼 속도를 개선할 수 있다. 그러나 이 방법은 탑재된 자체구동기 때문에 캔틸레버의 크기가 커져서 캔틸레버의 공명진동수가 낮아진다. 따라서 높은 공명진동수를 필요로 하는 비접촉 모드(non-contact mode)로 사용하기에 부적합하여 그 응용 범위가 제한적이다.

반면 적층형 압전(stacked piezo) 구동기는 응답대역이 수 kHz정도로 원통형 구동기에 비해 빠르므로 이를 별도의 z 축 구동기로 사용하는 방법이 있다. 그러나 이 경우 z 축 구동기의 무게가 x-y 구동기의 무게에 비해 무시될 정도로 작지 않기 때문에 z 축 구동기의 움직임이 x-y 구동기에 전달되어 문제를 일으킬 수 있다. X-y 구동기는 원통형이나 적층형 모두 그 구조상 공명진동수가 수백 Hz 정도에 불과하기 때문이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 x-y 구동기와 z 축 구동기를 분리 장착하여 서로 영향을 주지 않도록 하는 것이 바람직하는데 이에 대한 설명은 다음 절에 이어진다.

### 도량형 원자현미경

원자현미경이 단순히 시료의 형상을 가지적으로 나타내는 정도에 그치는 것이 아니라 시료 표면 각 부위의 치수를 정량적으로 측정하고자 할 경우 기존의 상용화된 원자현미경보다 훨씬 더 높

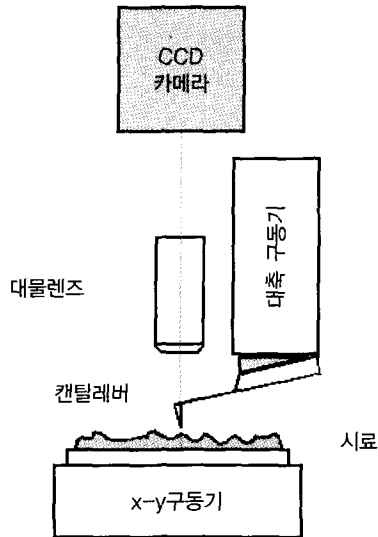


그림 4 도량형 원자현미경의 구조 : x-y 구동기는 시료를 수평방향으로만 움직이고 z 축 구동기는 탐침을 수직방향으로만 움직인다

은 정확도가 요구된다. 최소 선폭이  $0.1\mu\text{m}$ 인 반도체 소자의 경우 허용오차는 대개 최소 선폭의 10%인 10nm이고 이를 계측하는 장비 자체의 정확도는 허용 오차의 1/10인 1nm 정도가 되어야 한다.

이렇게 높은 정확도를 얻기 위해서는 매우 정밀하고 정확한 구동기가 필요하다. 이를 위해서 그림 4와 같이 적층형 평면 구동기와 정밀 위치 센서를 사용하고 x-y와 z를 서로 분리하는 것이 바람직하다. 이 경우 x-y 구동기는 시료를 움직이게 되는데 시료의 무게와 크기가 제한되는 단점이 있다. 그러나 최대 2kg 정도의 시료를 스캔할 수 있으므로 심각한 제약은 아니다. 각 구동기의 좌표는 위치 센서를 써서 보정하여  $10\mu\text{m}$ 당 오차가 1nm 이내로 되게 할 수 있다. 이와 같은 구조는

기존의 방식에 비해 높은 정확도를 제공해 줄 뿐 아니라 z축 구동기의 응답대역이 10배 정도 빠르므로 영상을 얻는 속도도 대폭 향상되고 광학현미경의 시야도 크게 개선되는 잇점이 있다.[18]

이와 같은 도량형 원자현미경으로 측정된 포토마스크(photo mask)의 형상이 그림 5에 나타나 있다. 시료의 위층과 아래층이 모두 왜곡 현상 없이 반듯한 모양으로 이미지되어 있으며, 높이나 폭의 측정치도 높은 신뢰도를 가진다.

### 탐침의 개선

가장 보편적으로 쓰이는 탐침은 Si으로 제작된 원뿔형으로서 그림 6 (a)에 나타나 있다. 이러한 탐침은 대부분의 시료에 별 문제 없이 사용될 수 있지만, 경사각이  $60\sim 70$ 도를 넘으면 탐침의 옆면이 시료 표면의 경사면에 닿게 되어 측정에 큰 오차가 생긴다. 이 문제를 개선하기 위해 FIB (Focused Ion Beam)로 탐침의 옆면을 깎아내서 종횡비를 높인 것이 그림 6(b) [19]

이다. 이 FIB 탐침은 모양이 훌륭하지만 가격이 비싸고 쉽게 부서지는 단점이 있다. 보편적인 Si 탐침끝에 전자빔(e-beam)으로 탄소를 증착시켜 직경 20nm 정도의 가느다란 탄소 바늘을 형성시킨 것이 그림 6 (c) [20]이다. 이 탄소 바늘은 HDC(High Density Carbon)로서 어느 정도 휘어져도 부러지지않고 마모에 잘 견디는 우수한 기계적 성질을 가지고 있다. 이보다 더 예리한 탐침으로 CNT(Carbon Nano Tube)를 Si 탐침 끝에 자라게 한 것이 있다. (그림 6(d)[21]) 물론 CNT는 더 할 나위 없이 가늘고 긴 이상적인

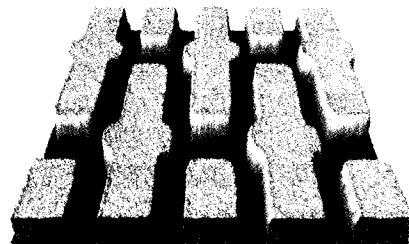


그림 5 도량형 원자현미경으로 찍은 포토마스크의 형상( $6\times 6\mu\text{m}$ )

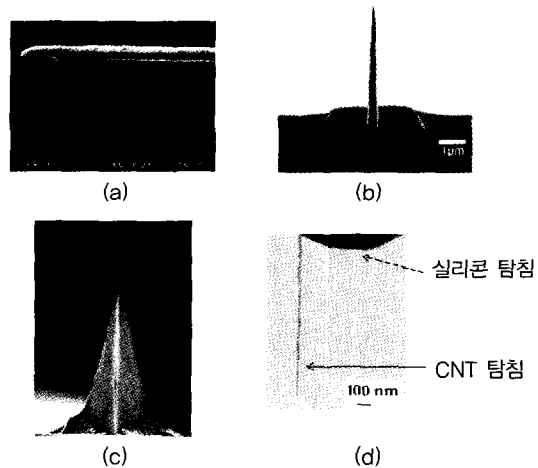


그림 6 보편적으로 사용되는 원뿔형 Si 탐침(a)과 이를 개량한 FIB 탐침(b), HDC 탐침(c), 그리고 CNT 탐침(d)

탐침이지만 아직은 대량으로 균 일한 길이의 CNT 탐침을 제작하는 기술이 발달 되지 않아 실용화 단계는 아니다.

탐침 모양에 의한 왜곡의 교정 위 절에서 살펴본 바와 같이 탐침의 모양새가 많이 개선되어 이전에는 측정하기 어려웠던 좁은 골짜기 등도 원자현미경으로 그 형상을 알아낼 수 있게 되었다. 그러나 아무리 뾰족한 탐침이라 하더라도 유한한 직경을 가진 물체이므로 탐침의 종류나 상태에 따라 측정된 형상과 치수가 달라지게 된다. 이러한 현상을 tip convolution effect라 부르는데 이 과정과 deconvolution 방법을 그림 7을 통해 간략히 알아보

자.[22]

그림 7에서 굵은 실선이 실제의 시료 형상이고 탐침의 모양이 가는 실선으로 중첩되어 표시되어 있다. 이런 모양의 탐침을 가지고 굵은 실선의 시료표면을 따라 이동해 가면 탐침의 가장 바깥쪽 부분과 시료표면 중 먼저 닿는 점에 의해 측정된 형상이 결정된다. 이 형상은 다음과 같은 방법으로 쉽게 구해질 수 있다. 그림 7 (a)에서와 같이 탐침의 모양을 탐침의 꼭지점을 기준으로 180(회전시키고 탐침의 꼭지점을 굵은 실선을 따라 움직일 때 생기는 탐침의 최외각선들을 모은 선이 바로 측정된 형상으로서 점선으로 표시되어 있다. 측정된 image에서 실제 시

료 모양을 알아내기 위해서는 탐침의 모양새를 알고 있어야 한다. 탐침의 모양새를 알아내는 가장 기본적인 방법은 날카로운 칼날들의 배열로 이루어진 tip characterizer의 이미지를 얻어 이로부터 탐침의 모양을 추출하는 것이다. 더 진보된 방법으로, 측정된 시료 형상 자체에서 탐침의 모양을 역추적하는 방법이 있으나 여기서 구체적 방법을 설명하는 것은 부적절 하므로 생략한다. 일단 탐침 모양을 알아내면 그림 7 (b)에서와 같이 탐침의 꼭지점을 점선(측정된 표면)을 따라 이동시키고 이때 얻어지는 탐침의 최외각선들을 모으면 교정된 시료형상이 된다. 중간 굵기의

실선으로 표시된 이 형상은 본래의 굵은 실선과 완전히 일치하지는 않지만 점선으로 표시된 측정치보다는 훨씬 더 실제 모습에 가까워진 것을 볼 수 있다. 특히 불룩한 부분은 거의 완벽하게 원래 모습을 회복하게 되어 골짜기나 둔덕의 윗부

분 쪽은 아주 정확한 값으로 구할 수 있다.

지금까지 설명된 방법을 사용한 예가 그림 8에 나타나 있다. 그림 8 (a)는 메모리소자(DRAM) 공정의 첫 단계인 STI(Shallow Trench Isolation) 공정을 마친 시료를 HDC 탐침을 써서 얻어진 원자현미경 사진이고 그림 8 (b)는 탐침에 의한 왜곡을 교정한 사

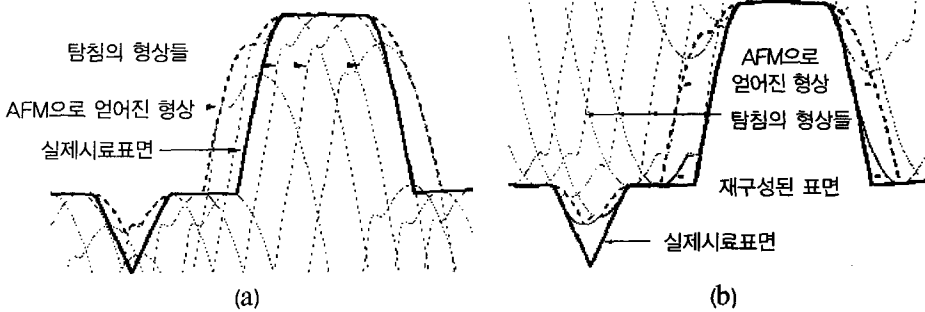


그림 7 탐침의 모양새에 의한 시료형상의 왜곡현상(convolution effect)

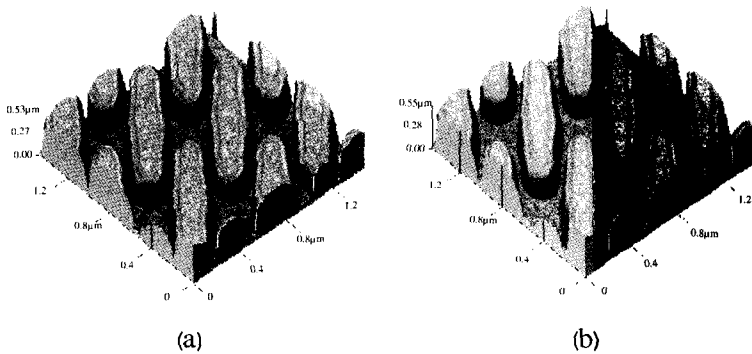


그림 8 STI 형상을 찍은 원자현미경 사진(a)과 탐침에 의한 왜곡현상을 교정한 사진(b)

진이다. 가장 좁은 계곡의 폭은 0.1 $\mu\text{m}$ , 깊이는 0.4 $\mu\text{m}$  정도로서 원자현미경이 이렇게 높은纵横비를 가진 시료까지 측정할 수 있다는 것을 보여주는 좋은 예이다.

### 맺음말

나노미터 단위의 극미세 세계를 가시화하여 NT시대를 여는데 크게 기여한 원자현미경 기술은 지속적으로 발전되어 왔다. 초기에는 원자의 배열 등을 보여주는 연구용 장비로 주로 사용되었지만, 점차 시료의 여러가지 특성을 알아내는 분석장비로 발전하였고 이제 정확도가 대폭 개선되어 반도체, 평판 디스플레이 제조 공정용 정밀 계측장비로 사용되기에 이르렀다. 원자현미경은 진공 상태나 대기중뿐 아니라 액체 내에서도 작동하므로 살아있는 세포내의 구조나 세포 분열 등을 관찰할 수 있다. 전자현미경이 진공 상태에서만 가능하다는 것을 감안하면 원자현미경의 응용범위가 대단히 넓다고 할 수 있다. 원자현미경은 관찰, 측정에 그치지 않고 나노리소그라피(nanolithography ; 사진묘사), 나노머시닝(nano-machining ; 절삭), 또 나노로봇(nano-robot)으로도 사용될 수 있어 원자, 분자 단위의 물질 조작이 가능하다. 지금도 원자현미경은 발전 도상에 있으며, 앞으로 더욱 발전하여 나노 세계에서의 눈과 귀와 손의 역할을 감당해 나아갈 것으로 예상된다.

### [참고문헌]

- [1] For comprehensive reference see 1994, "Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy" by R. Wiesendanger, Cambridge University Press.
- [2] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, 1982, Phys. Rev. Lett. 49, 57.
- [3] G. Binnig, C. F. Quate, and Ch. Gerber, 1986, Phys. Rev. Lett. 56, 930.
- [4] T. R. Albrecht, S. Akamine, T. E. Carver, and C. F. Quate, 1990, J. Vac. Sci. Technol, A 8, 3386.
- [5] R. J. Hamers, R. M. Tromp, J. E. Demuth, 1986, Phys. Rev. Lett. 56, 1972.
- [6] G. Meyer and N. M. Amer, 1990, Appl. Phys. Lett. 57, 2089.
- [7] C. C. Williams and H. K. Wickramasinghe, 1986, Appl. Phys. Lett. 49, 1587.
- [8] C.C. Williams, W.P. Hough, and S.A. Rishton, 1989, Appl. Phys. Lett. 55, 203.
- [9] D. Rugar, H. J. Mamin, P. Guethner, S. E. Lambert, J. E. Stern, I. McFadyen, and T. Yogi, 1990, J. Appl. Phys. 68, 1169.
- [10] J. M. R. Weaver and D. W. Abraham, 1991, J. Vac. Sci. Technol. B 9, 1559.
- [11] J. E. Stern, B. D. Terris, H. J. Mamin, and D. Rugar, 1988, Appl. Phys. Lett. 53, 2717.
- [12] Y. Martin, D. W. Abraham, and H. K. Wickramasinghe, 1988, Appl. Phys. Lett., 52, 1103.
- [13] J. W. Hong, Sang-il Park, and Z. G. Khim, 1999, Rev. Sci. Instrum. 70, 1735.
- [14] <http://www.witec.de/pfm.html/>.
- [15] P. Maivald, H. J. Butt, S. A. C. Gould, C. B. Prater, B. Drake, J. A. Gurley, V. B. Elings, P. K. Hansma, 1991, Nanotechnology 2, 103.
- [16] E. Betzig, M. Isaacson, and A. Lewis, 1987, Appl. Phys. Lett. 51, 2088.
- [17] S. R. Manalis, S. C. Minne, and C. F. Quate, 1995, Appl. Phys. Lett. 68, 871.
- [18] PSIA, XE scanning system, to be published. <http://psia.co.kr/>.
- [19] Park Scientific Instruments, Sunnyvale, California. <http://www.park.com/>.
- [20] Nano Tools, Lenting, Germany. <http://www.nano-tools.com/>
- [21] Piezomax Technologies Inc., Middleton, Wisconsin. <http://www.piezomax.com/>.
- [22] J.S. Villarrubia, 1997, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 102, 425.