



# 나노계측기술

김수길 (호서대학교 정보제어공학과 부교수)

## 1 서론

나노 계측 기술은 나노 기술의 기반이 되는 핵심 기술로 나노미터 수준의 물성·구조 및 성분을 계측하고 분석해내는 기술이라 정의할 수 있다. 나노 계측 기술은 최근의 나노 연구의 폭발적인 계기가 된 SPM 기술을 중심으로 입사원의 종류에 따라 X-선 기술, 전자/이온빔 기술, 적/자/가시광선 기술로 구분할 수 있다. 나노 계측 기술은 그 기술의 범위가 실로 방대하기 때문에, 이를 총망라하여 검색, 분류하는 것은 현실적으로 지극히 어려운 일이다. 따라서 본 해설에서는 나노 계측 기술의 대표주자라고 할 수 있는 SPM 기술을 중심으로, 현재 한국이 다른 국가에 비해 강점을 보이고 있는 반도체 산업과 관련하여 여러 가지 박막들의 표면형상, 구조, 물리적/화학적 특성 등을 계측, 분석해 내는 박막분석용 계측 기술 중, 현재 많이 사용되고 있거나 미래에 그 수요가 증가될 것으로 예상되는 몇몇 나노 계측 기술에 국한하였다.

## 2. 기술발전동향

1982년 세계 최초로 개발된 STM에 의해 표면을 원자나 분자 단위로 직접 관찰하게 된 이후 표면의 여러 가지 물성을 측정하기 위한 다양한 계측원리가 계속해서 개발되어 AFM, MFM, EFM, NSOM,

SThM, STS 등 수 많은 SPM이 개발되었다. 현재 SPM 장치의 경우 정도 향상 및 고속화를 위한 연구 개발이 계속되고 있으며, SPM 기술의 경우는 새로운 원리에 입각한 계측 기술 그 자체의 개발뿐만 아니라, SPM 기술을 정보저장기기, 나노리소그래피, 입자조작 등 타 분야에 적용하고자 하는 응용 연구가 활발히 진행 중에 있다.

최근 들어 바이오 분야에 있어서의 나노 계측 기술에 대한 발전이 두드러지며, Metrology AFM, X-선 간섭계, 나노튜브의 응용, 3차원 나노 형상을 측정하기 위한 Molecular Measuring Machine 등에 관한 연구개발이 활발해지고 있다. 또한 나노 계측 기술의 측정표준화 및 표준물질에 대한 연구개발도 세계 각국에서 이루어지고 있다. 미국 등 선진국은 1950년대에 이미 나노 기술에 대한 개념이 시작되고, 1980년대 이후 관련 장비 등의 개발로 기술이 크게 발전한데 비해, 한국은 1990년대 들어 대학, 연구소 위주로 개념 해석 정도의 단편적 나노 기술 연구가 추진되어 왔다. 나노 기술은 타 분야보다 기초 연구가 필수적인데 비해, 국내의 경우 기초과학 기술의 발전 기반이 취약하고 R&D 프로그램도 비체계적이고 산발적으로 이루어졌으며, 나노 기술 연구에 필수적인 학제적 연구가 불충분하고 나노 기술 연구 장비 및 실질적인 나노 연구를 수행할 수 있는 연구 인력도 크게 부족한 상태이다.

### 3. 나노계측기술

주사탐침현미경(SPM, Scanning Probe Microscope)은 그 영문 이름으로부터 알 수 있듯이, 탐침을 이용하여 시료표면을 주사(scan)함으로써 물질의 여러 가지 표면특성을 원자단위로 측정할 수 있는 새로운 개념의 현미경을 총칭하는 말이다. 통상 원자현미경이라고도 불리우고 있다. 그림 1은 주사탐침현미경의 일반적인 구조도이다. 주사탐침현미경은, 끝이 매우 뾰족한 탐침을(probe : 통상, 선단부의 반경은 수 [Å]~수십[nm]임) 시료위에 매우 근접시킨 상태에서 미세 위치결정 기구를(통상, 압전소자를 이용함) 이용하여 시료 표면을 주사하면서 탐침과 표면과의 상호작용을 영상화 하는 것으로 그 작동원리는 비교적 간단하다. 주사탐침현미경은 1981년 이후 다양한 분야로 발전하였는데 측정하려는 시료의 특징에 따라 작동하는 원리도 조금씩 달라 탐침과 시료 사이에 걸린 전압차로 인해 흐르는 전류를 이용한 STM, 탐침과 시료 사이의 여러 가지 원자적 힘을 이용한 AFM, 시료의 자기장이 탐침에 주는 영향을 이용한 MFM, 또한 시료에 따른 탐침의 종류와 제작상의 정밀도에도 많은 발전이 있었다.

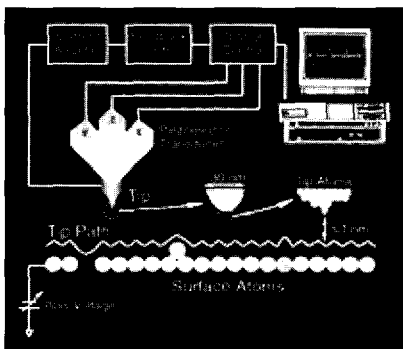


그림 1. 주사탐침현미경(SPM)의 구조

#### 3.1 STM(Scanning Tunneling Microscope)

주사탐침현미경 계열의 현미경 중 처음으로 등장한

주사터널링현미경(STM)의 기본 원리는 아주 간단하다. 가느다란 텅스텐 선을 전기 화학적으로 식각시키면 그 끝이 아주 뾰족하게 되어 맨 끝에는 원자 몇 개만이 있게 된다. 이처럼 예리한 바늘을 고온에서 강한 전기장으로 더욱 예민하게 하고 부식 중에 생긴 산화막을 없애면 그림 2와 같은 STM 탐침이 된다.

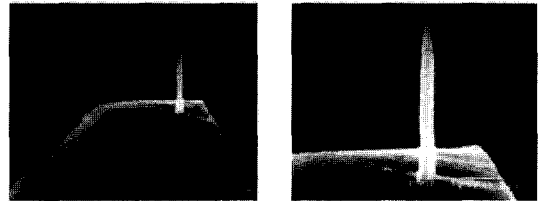


그림 2. 주사터널링 현미경용 탐침 사진

이러한 탐침을 전도체인 시료 표면에 원자 한 두 개의 간격( $\sim 0.5\text{nm}$ )으로 가까이 접근시키면 비록 두 개의 도체가 떨어져 있지만 그 간격이 아주 작아서 양단간에 적당한 전압([mV]~수[V])을 걸어주면 그림 3과 같이 전자가 에너지 벽을 뚫고 지나가 전류가 흐르는 양자역학적 터널링(tunneling) 현상이 일어난다.

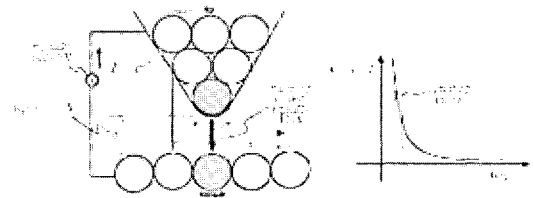


그림 3. 주사터널링 현미경의 원리도

이는 마치 우리가 땅바닥의 작은 틈새를 뛰어넘을 수 있는 것과 비슷한 이치이다. 이 틈새가 점점 멀어지면 뛰어넘을 수 있는 확률이 급격히 낮아지는 것과 마찬가지로 STM의 탐침과 시료 간격이 멀어지면 전자의 터널링 확률이 급격히 낮아져 전류가 급격히 줄어든다. 이와 같이 터널링 전류가 탐침과 시료 간 간격에 따라 변화하므로 이를 이용하면 시료의 표면 형상을 측정

해 낼 수 있다. STM의 측정모드에는 그림 4에 나타낸 바와 같이 크게 일정전류모드(constant current mode)와 일정높이모드(constant height mode)가 있다. 일정전류모드에 있어서, STM 탐침은 압전소자(피에조 세라믹)로 만들어진 구동기(scanner)에 의해 상하, 좌우, 전후로 움직이게 되며, 이 구동장치는 0.01(nm) 이상의 정밀도를 가지고 있다. 탐침을 통해 흐르는 전류가 일정한 값이 되도록 탐침의 높이를 조정하면서 좌우, 전후로 주사(走査)해 가면 탐침이 시료 위를 저공비행하듯이 따라가게 된다. 이 때 각 지점에서 탐침을 상하로 움직여준 값을 기록하여 얻어진 수치를 컴퓨터 화면에 밝기로 나타내면 시료의 지형을 나타내는 사진이 된다. 일단 이 사진이 얻어지면 위에서 본 형상뿐만 아니라 각 부분의 굴곡도는 물론 단면도, 입체도 및 각종 통계자료를 얻을 수 있다. 일정전류모드는 굴곡이 심한 넓은 시료 표면의 측정이 적합하다. 일정높이모드는 탐침을 시료위의 일정한 높이에서 스캐닝하면서 탐침과 시료 사이에 흐르는 전류의 변화를 측정하는 방법이다. 이 전류의 변화는 탐침과 시료 간 간격과 관계가 있으므로 이 상관관계만 보정하면 전류 변화로부터 시료 표면의 형상을 알아낼 수 있다. 이 모드의 경우, 피드백 장치가 필요 없으므로 장치가 매우 간단하며 일정전류모드보다 측정 속도가 빠르고 분해능이 우수한 장점을 갖는다.

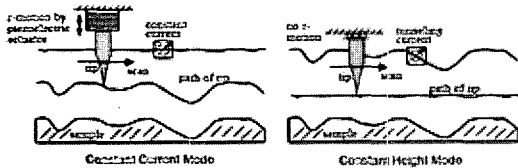


그림 4. 주사터널링 현미경의 측정모드

그림 5는 전술한 원리를 이용하여 제작한 STM의 사진을 보여주고 있으며, STM에 의한 시료 표면의 형상계측은, 전류의 변화량이 시료와 탐침 간 간격의 변화량에 매우 민감하게(지수적으로) 변화하고, 거의

90(%)의 전류가 탐침선단의 원자와 바로 밑의 시료 표면 원자 간에 흐르므로 여타의 SPM보다 수직 및 수평방향 분해능이 우수한 장점을 갖는다.

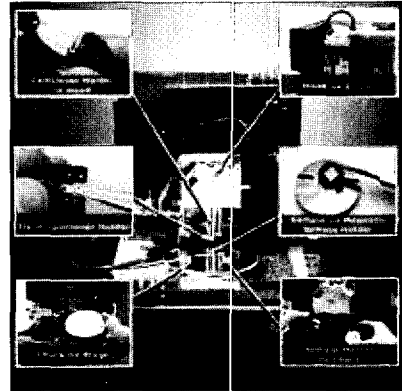


그림 5. 주사터널링 현미경 사진

그러나 STM의 경우 탐침과 시료는 반드시 도전체이어야 하므로 일반적으로 부도체 시료의 측정에는 사용할 수 없고, 고진공 초초정의 측정환경이 요구되는 단점을 갖는다. STM의 시료로는 전자의 터널링이 가능한 도전체-예를 들어 액정(liquid crystal)과 같은 Ordered Monolayer, Polypeptides, 도전성 폴리머(conduction polymer) 등이 많이 사용된다. 그러나 근래 들어 벌크절연체(bulk insulator)인 유기물질도 박막 형태로 도체 기판 위에 시료로 준비할 경우 측정이 가능하게 되어 STM을 이용한 여러 생물학적 물질의 특성연구가 활발해지고 있다. STM의 기판으로는 흑연이, 탐침의 재료로는 W, Ni, Au 등이 이용되고 있다. 대표적으로는 자기정보를 검출하는 스핀편극 STM, 전위정보를 얻을 수 있는 Scanning Tunneling Potentiometry, 광전상호작용에 관련된 광여기 STM이나 발광 STM 등이 있다.

STM은 일차적으로 원자 수준의 표면 영상을 얻는 수단으로 활용되는 것 이외에도, 나노 수준에서 직접 원자 및 분자입자의 위치를 제어하거나, 나노리소그래피 및 정보저장기술로도 활발히 응용되고 있다.

STM을 이용하여 나노 입자를 직접적으로 조작한 대표적인 예는 1990년 IBM의 Eigler 등이 수행한 그림 6과 같은 니켈 표면위에서의 크세논 원자의 조작이다. 이 실험은 시료의 오염 및 상온의 열적 오동 때문에 초고진공, 극저온 등에서 가능하지만 인류 역사상 원자 하나씩을 직접 제어하는 기술이 현실화되었다는 의미에서 나노기술의 한 획을 그은 사건이었다.

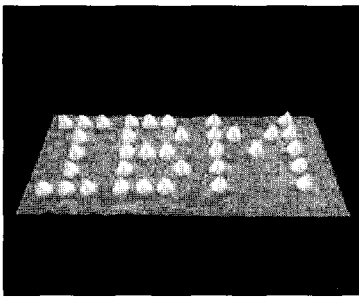


그림 6. 니켈표면위에 정렬된 크세논 원자

이후의 연구결과에서는 그림 7과 같은 철원자배열에 대한 조작을 구현하였다.

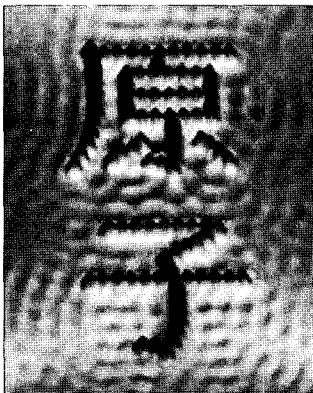


그림 7. 구리표면상에 철원자를 정렬시켜 만든 原子 (STM 이미지)

STM을 이용한 나노리소그래피 기술로는 저전압 전자빔기술과 나노산화막기술(AFM을 이용한 기술이라고도 할 수 있다) 등이 있다. 시료에 근접시킨

STM 탐침에 인가한 전압에 의해 탐침으로부터 흐르는 전계 방출 전류는 시료 표면에 있는 유기분자 또는 금속의 구조를 화학적 또는 물리적으로 변화시켜 나노 스케일의 화학구성 변화나 표면 형상 변화를 유도하게 된다. 특히 유기분자가 이러한 전류에 의해 그 반응성이 변화하면 나중에 특수한 성질을 갖는 현상 용액에 의해 전자빔에 노출된 부분이 제거되어 30(nm) 이하의 나노 패턴을 제작할 수 있다.

한편, 공기 중에 존재하는 습기에 의하여 탐침과 시료 사이에 얇은 수막이 형성되고 이 상황에서 탐침에 전압이 인가되면 탐침의 크기에 비례하여 나노 크기의 산화막이 형성되어진다. 이러한 기술을 Nano Anodization 이라고 부르기도 하는데 인가되는 전압, 노출되는 시간, 그리고 공기 중의 습도를 조절함으로써 산화막의 폭 및 두께의 크기를 변화시킬 수 있다. 이 기술은 현재까지 SPM을 이용한 나노리소그래피 기술 중 가장 재현성이 뛰어난 기술로 인식되고 있다. STM을 이용한 기록재생 방식은 전계증발(field evaporation)현상을 이용하는 방법과 터널링 전류를 이용하여 매체의 전기적 특성을 변화시키는 방법 등으로 크게 나눌 수 있다. Hitachi의 Hosaka 등은 MoS<sub>2</sub> 표면위에 0.3(nm)의 간격으로 위치한 텅스텐 탐침을 이용하여 MoS<sub>2</sub>로부터 S원자 하나하나를 전계 증발 현상을 이용하여 떼어내고, 이를 1(nm) 높이에서 읽어내었다. 이 때 기록된 도트(dot)크기는 0.3(nm)이다. Canon에서는 도전성 탐침을 폴리이미드 LB 필름(polyimide Langmuir-Blodgett film)에 접촉시킨 상태에서 탐침과 LB 필름 하부의 금 전극 간에 전압을 인가하여 전압이 인가된 부분의 LB 필름에 물리적 또는 화학적 변화를 발생시켜 국부적으로 도전성이 달라지게 함으로써 10(nm) 크기의 정보를 기록하였다. 이외에도, 중국과학원에서는 유기박막에 국부적인 전계를 인가하여 박막의 전기 전도율을 변화시킴으로써 0.7(nm) 크기의 정보 비트를 기록하고 있으며 NEC에서는 기록매체의 상변화

## 기술개설

(phase transition)에 의한 전도율의 변화를 이용하여 약 10(nm) 크기의 도트를 기록재생하고 있다. STM을 이용한 기록재생 방식은 여타의 SPM을 이용한 방식에 비해 가장 큰 저장밀도를 달성할 수 있으나 터널링 전류의 안정적 제어를 위한 탐침 - 매체 간 간격의 고정밀 제어, 고속 서보 메카니즘, 고진공하에서의 작동 등의 여러 가지 문제점을 안고 있다.

### 3.2 AFM(Atomic Force Microscope)

STM의 가장 큰 결점은 전기적으로 부도체인 시료는 관찰할 수 없다는 것인데, 이를 해결하여 주사탐침현미경을 한층 유용하게 만든 것이 1986년 Binnig, Quate, Gerber에 의해 개발된 원자간력현미경(AFM, Atomic Force Microscope)이다. AFM에서는 텅스텐으로 만든 바늘 대신에 마이크로머시닝으로 제조된 캔틸레버(cantilever)라고 불리는 작은 막대를 사용한다. 캔틸레버는 한 예로 길이가 100( $\mu\text{m}$ ), 폭 10( $\mu\text{m}$ ), 두께 1( $\mu\text{m}$ )로서 아주 작아 미세한 힘에 의해서도 아래 위로 쉽게 휘어지도록 만들어졌다. 또한 캔틸레버 끝 부분에는 뾰족한 바늘이(팁, tip) 달려 있으며, 이 바늘의 끝은 STM의 탐침처럼 원자 몇 개 정도의 크기로 매우 첨예하게 되어있다. 이 탐침을 시료 표면에 접근시키면 그림 8과 같은 탐침 끝의 원자와 시료표면의 원자 사이에 서로의 간격에 따라 끌어당기거나(인력) 밀치는(척력) 반데르발스힘(van der Waals force)이 작용한다.

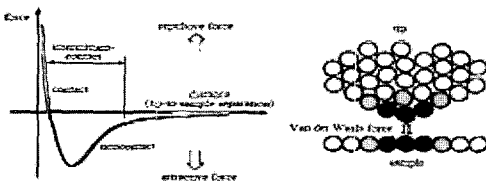


그림 8. 원자간력현미경(AFM)에서 팁과 시료원자간에 작용하는 힘(반데르발스힘)

이 반데르발스힘에 의한 캔틸레버의 휨량은 탐침과

시료 간 간격에 따라 변화하므로 이를 이용하면 시료의 표면 형상을 측정해 낼 수 있다. AFM의 측정모드는 STM의 경우와 유사하게 피드백의 유무에 따라 두 가지로 나누어 진다. 피드백이 있는 경우 시료를(혹은 팁) 움직이는 압전소자는 팁과 시료사이에 작용하는 힘에 따라 변위를 일으킬 수 있으므로 팁과 시료사이의 힘을 계속 일정하게 유지시키면서 이에 따른 둘 사이의 거리 변화를 측정하여 정밀한 표면 형상을 계속하게 되는데 이를 일정 힘 모드(constant force mode)라 한다. 피드백이 없는 경우에는 팁이 시료 위 일정한 높이에서 스캐닝하게 되므로 아주 평평한 시료를 높은 해상도로 관찰하는데 이용되며 이를 일정높이모드(constant height mode)라고 한다. AFM은 반데르발스힘의 사용 영역에 따라 접촉형 AFM(contact AFM), 비접촉형 AFM(non-contact AFM), 간헐접촉형 AFM(intermittent-contact AFM)으로 나누어진다. 그림 9는 시판되고 있는 AFM의 사진이며, 그림 10은 AFM을 이용하여 찍은 운모의 원자모습이다.



그림 9. 원자간력 현미경(AFM)사진

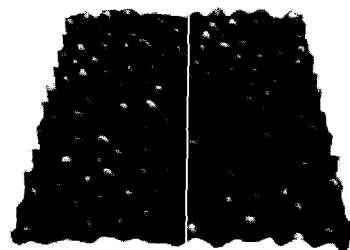


그림 10. 운모의 AFM 이미지

(가) 접촉 모드 AFM(Contact Mode AFM)

접촉모드의 AFM에서는 척력을 사용하는데 그 힘의 크기는 1~10(nN) 정도로 아주 미세하지만 캔틸레버 역시 아주 민감하므로 그 힘에 의해 휘어지게 된다. 이 캔틸레버가 아래위로 휘는 것을 측정하기 위하여 레이저 광선을 캔틸레버에 비추고 캔틸레버 윗면에서 반사된 광선의 각도를 포토다이오드(photodiode)를 사용하여 측정한다(그림 11). 이렇게 하면 바늘 끝이 0.01(nm) 정도로 미세하게 움직이는 것까지 측정해 낼 수 있다. 일정 힘 모드의 경우 바늘 끝의 움직임을 구동기에 피드백하여 AFM의 캔틸레버가 일정하게 휘도록 유지시키면 탐침 끝과 시료사이의 간격도 일정해지므로 STM의 경우에서와 같이 시료의 형상을 측정해낼 수 있다. 전술한 바와 같이 탐침이 시료의 표면과 접촉했을 때 캔틸레버는 시료의 표면에 수직인 반발력을 받는다. 이러한 반발력은 시료와 탐침 끝에 있는 원자 사이의 거리가 매우 가까울 때에만 작용하며, 거리에 따라 그 힘의 크기가 변하게 된다. 따라서 AFM이 접촉모드에서 작동할 때에는 탐침과 시료의 거리가 매우 가깝기 때문에 타 방식에 비해 수평분해능(lateral resolution: 탐침과 시료 사이의 거리와 탐침의 유효반경에 의해 결정)이 매우 좋다. 하지만 접촉모드에서는 탐침이 시료 표면에 누르는 힘을 인가하므로 만약 탐침이 시료 표면에 인가하는 힘이 시료표면의 원자 또는 분자들의 결합을 파괴할 수 있을 정도라면 측정하는 동안 시료가 손상될 수 있으며, 시료 표면의 형상을 계속 변화시키므로 원래 표면 형상을 측정하기는 어렵다. 따라서 캔틸레버의 스프링상수를 매우 작은 값을 선택한다면, 탐침이 시료 표면을 지나갈 때 탐침이 받는 힘의 대부분이 캔틸레버의 휘어짐으로 나타나며 시료의 변형을 상대적으로 줄일 수 있다. 그러면 캔틸레버의 휘어지는 정도의 변화는 전적으로 표면의 굴곡 변화에 기인한다고 볼 수 있다. 또한 접촉모드에서 무시할 수 없는 힘은 탐침이 시료에 인가하는 수직력과 탐침이 스캔하는 속도에 관계된다. 즉 캔틸레버에 인가한 수직력(set-point or set force)이 크

면 클수록, 스캔 속도가 증가하면 할수록 수평력은 증가한다. 따라서 시료가 받는 수직 및 수평력은 접촉모드 AFM의 측정 결과에 직접적인 영향을 준다고 할 수 있다. 따라서 가능한 한 시료가 받는 힘을 줄이기 위해 접촉모드에서는 캔틸레버의 스프링 상수를 1(N/m) 이하로 하는 것이 좋다. 물론 큰 구조를 갖고 딱딱한 시료인 경우에는 1(N/m) 이상의 캔틸레버를 선택하여도 쉽게 형상화할 수 있다. 하지만 그 경우에도 미세한 구조가 변형 없이 형상화되었다고 말하기는 어렵다. 일반적으로 접촉형 AFM에서 원자단위의 미세한 구조를 형상화할 때에는 microlever(스프링상수(k)=0.01~0.05(N/m))가 적당하다. 그러나 캔틸레버에 인가하는 힘을 낮추고 이미지를 형상화하기에는 기술적인 한계가 있기 때문에 부드러운 시료인 경우에는 비접촉 모드 AFM이 적합하다.

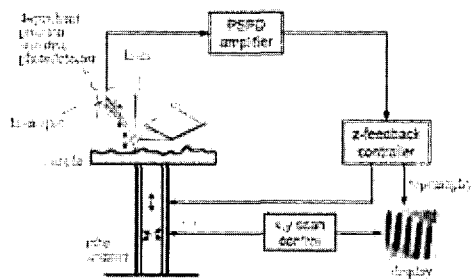


그림 11. 일정힘 모드의 접촉형 AFM(contact AFM) 구성도

(나) 비접촉 모드 AFM(Non-Contact Mode AFM)

비접촉 모드의 AFM에서는 원자사이의 인력을 사용하는데 그 힘의 크기는 0.1~0.01(nN) 정도로 시료에 인가하는 힘이 접촉모드에 비해 훨씬 작아 손상되기 쉬운 부드러운 시료를 측정하는데 적합하고 탐침의 수명도 늘릴 수 있다. 비접촉형 AFM에서는 원자간 인력의 크기가 너무 작아 캔틸레버를 고유진동수 부근에서 기계적으로 진동시킨다. 탐침이 시료표면에 다가가면 그림 12처럼 원자 간의 인력에 의해

## 기술래설

캔틸레버의 고유진동수가 변하게 되어 진폭과 위상이 변화가 생기고, 그 변화를 그림 13과 같이 록인증폭기(lock-in amplifier)로 측정한다.

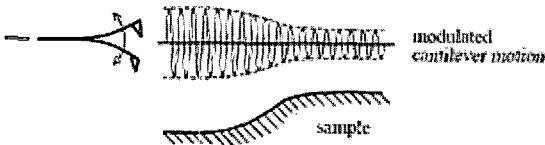


그림 12. 비접촉 AFM(non-contact AFM)에서의 진폭변조

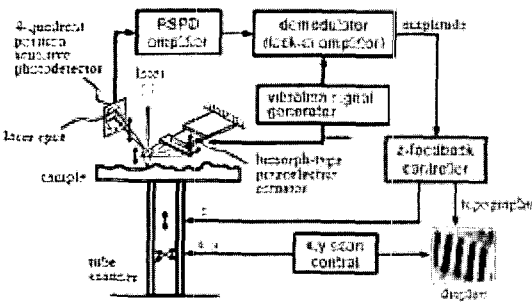


그림 13. 일정힘 모드의 비접촉 AFM의(non-contact AFM) 구성도

비접촉 모드에서 시료표면의 형상 측정은 엄밀하게 말해서 탐침과 시료 사이에 작용하는 힘의 형상화라기보다는 힘의 구배(force gradient)라고 말할 수 있다. 하지만 힘이 반데르발스의 힘과 같이 순수하게 거리에만 의존한다면 힘의 구배를 이용한 이미지 또한 표면 형상화에 대응된다고 말할 수 있다. 비접촉 모드에 있어서 시료에 정전기력이나 전위, Ferroelectric Domain, 자기도메인(magnetic domain)이 있을 경우 시료에서 발생하는 전기장이나 자기장이 탐침에 정전기력이나 자기력을 발생시키고, 이 전기력이나 자기력이 원자사이의 인력보다 강하면 순수하게 표면의 형상만을 구별해내기 어려우므로 주의를 요한다.

## (다) 간헐접촉 모드 AFM(Intermittent-Contact Mode AFM)

간헐접촉형 AFM은(IC-AFM) 비접촉형 AFM과 비슷하지만 IC-AFM의 경우 진동하는 캔틸레버의 탐침이 시료 표면에 거의 닿을 수 있도록 시료에 접근한다. 그림 8의 원자간력과 거리와의 관계도는 IC-AFM이 작용하는 반데르발스힘의 영역을 보여준다. IC-AFM에 있어서도 비접촉형 AFM의 경우처럼 시료와 탐침의 거리에 따라서 캔틸레버의 진동하는 진폭이 변하는 것을 측정하여 시료의 형상을 얻는다. 일면 탭핑모드(tapping mode) AFM이라고도 불리우는 IC-AFM은 측정 시 팁과 시료의 접촉이 아주 짧은 시간동안만 지속되므로, 접촉모드 AFM에서 문제시되는 수평력을 현저하게 감소시킬 수 있다. 그러나, IC-AFM의 경우에도 비접촉형 AFM과는 달리 탐침의 진동 중 일부 구간에서는 탐침이 시료에 닿으므로 시료의 표면에 손상을 줄 수 있어 매우 손상되기 쉬운 시료를 측정하는 데에는 비접촉형 AFM을 이용하는 것이 바람직하다. IC-AFM에서 그림 14와 같은 Phase Imaging 방법을 시료의 여러 가지 물성에 따라 캔틸레버의 고유진동수가 미세하게 변화하는 것을 측정하는 것으로 시료의 표면형상 뿐만 아니라 시료의 구성요소, 접착력, 마찰, 점탄성(viscoelasticity) 등을 측정할 수 있다.

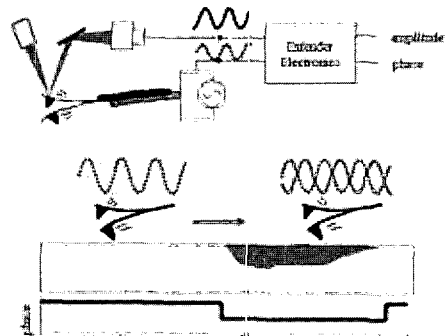


그림 14. 간헐접촉 AFM에 있어서 phase imaging의 개념도

가장 보편적으로 사용되는 팁의 형상은 그림 15(a)에 나타나 있는 원뿔형태이다. 이러한 형태의 팁은 대부분의 시료에 있어서 별 문제없이 사용될 수 있지만 경사각이 60~70도를 넘으면 팁의 옆면이 시료 표면의 경사면에 닿게 되어 측정에 큰 오차가 발생한다. 이 문제를 개선하기 위해 접촉이온빔으로(FIB, Focused Ion Beam) 탐침의 옆면을 깎아내서 종횡비(aspect ratio)를 높인 것이 그림 15(b)이다.

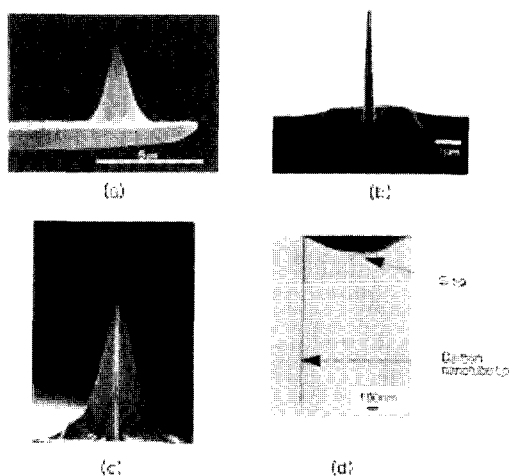


그림 15. 여러 가지 형태의 SPM용 탐침들 (a) 보편적으로 사용되는 원뿔형 실리콘 탐침, (b) FIB 탐침, (c) HDC 탐침, (d) CNT 탐침

이 FIB 탐침은 모양이 훌륭하지만 가격이 비싸고 쉽게 부서지는 단점이 있다. 보편적인 실리콘 탐침 끝에 전자빔으로 탄소를 증착시켜 직경 20[nm] 정도의 가느다란 탄소바늘을 형성한 것이 그림 15(c)이다. 이 탄소 바늘은 HDC(High Density Carbon)로서 어느 정도 휘어져도 부러지지 않고 마모에 잘 견디는 우수한 기계적 성질을 가진다. 이보다 더 예리한 탐침으로 최근 CNT(Carbon Nano Tube)를 실리콘 탐침 끝에 성장시킨 그림 15(d)와 같은 것도 있다. CNT 탐침은 더할 나위 없이 가늘고 긴 이상적인 탐침이지만 대량으로 균일한 길이의 CNT 탐침을 제

작하는 기술이 발달하지 않아서 아직 실용화할 단계는 아니다.

AFM의 경우도, STM과 마찬가지로 표면의 Topology를 측정하는 단순한 측정 장치로써 뿐만 아니라, 입자조작, 리소그래피, 정보저장기술에의 응용성이 기대되고 있다. 미국 USC대학의 Requicha 등은 직경 30[nm] 크기의 금 나노입자를 AFM 탐침을 이용하여 밀어냄으로써 AFM을 이용한 나노입자 조작에의 가능성을 보여 주었다. Requicha 등은 2차원 평면상에서의 입자 조작뿐만 아니라 다른 두 개의 입자위에 나노입자를 밀어 올림으로써 3차원 피라미드 구조를 형성하는 데에도 성공하였다. 한편, AFM을 이용한 나노리소그래피 기술도 여러 선진기관에서 연구되어지고 있다. 그 중 나노펜을 이용한 나노임프린트(nano imprint) 기술은 탐침에 마치 잉크처럼 자기조립박막을 형성할 수 있는 유기분자를 묻히고 이 분자가 잘 달라붙는 금속표면에 접촉시켜 탐침에서 시료 표면에 일정한 단분자 두께의 박막이 나노선폭으로 형성되게 하는 기술이다. 이 기술의 경우, 원하는 유기분자를 탐침의 훼손을 극소화하면서 코팅할 수 있고, 또 계속 탐침에 잉크처럼 유기분자를 묻혀서 사용할 수 있는 장점이 있는 기술로 주목을 받고 있다. AFM을 이용한 정보기록/재생방식에는 기계적 또는 전계증발현상을 이용하여 매체의 표면형상을 변형시키는 방법, 매체의 상변화에 의한 전기 전도도를 변화시키는 방법 등이 있다. 이제까지 개발된 많은 기술 중에서 가장 상용화에 근접한 기술은 IBM의 열기계적(thermomechanical)방식인데, 이는 전기 저항에 의해 가열되는 탐침을 이용하여 PMMA 등의 폴리머에 나노 구멍(pits)을 형성하여 정보를 기록하고 정보를 재생할 때에는 탐침이 나노 구멍의 안 또는 밖에 위치하였을 때 탐침으로부터 외부로 방출되는 열전도도가 달라짐으로 인해 가열된 탐침의 온도 저항이 달라지는 것을 측정하는 방법을 이용한다. IBM에서는 본 방법을 이용하여 크기 30~40[nm]의 정



보 비트를 기록하고 있다. 전계증발을 이용한 기록방법의 경우, 금박막이 입혀져 있는 탐침을 이용하여 SiO<sub>2</sub>나 그래파이트(graphite) 기판 위에 금 피트나 돌기(mound)를 형성하여 기록하는데 Hitachi의 경우 비트 크기 10[nm] 정도를 구현하고 있다. 한편, Matsushita에서는 상변화를 이용한 ODD(Optical Disk Drive)에 현재 주로 사용되고 있는 a-Ge<sub>4</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>를 기록매체로 이용하여 매체의 전기전도도 변화에 의한 정보비트의 기록재생에 대한 연구를 수행한 바 있다.

AFM은 물 속과 같은 생리학적 환경에서도 시료의 다른 준비 없이 이미지를 얻을 수 있어 SPM 중 가장 성공적인 생물학적 도구로 여겨지고 있는데, 이러한 AFM을 이용함으로써 생물체 내의 미소구조와 그 안에서 일어나는 화학적인 현상을 분자 수준에서 높은 해상도로 관찰할 수 있게 되었다. AFM은 생리학적 조건 하에서 단백질, 바이러스 및 DNA 등을 관찰하는데 처음으로 적용되었으며, 대표적인 예로서 메신저 RNA 전사과정을 포착한 AFM 영상화를 들 수 있다. 생명체의 유전자 정보는 DNA에 들어 있으며 모든 종류의 단백질을 만들어 내는 첫 번째 단계가 DNA 원형(template)으로부터 메신저 RNA를 만들어내는 전사(transcription)이다. 이 전사를 수행하는 효소인(enzyme) RNA 중합효소(RNA polymerase)를 운모위에(mica) 고정시킨 후 DNA 원형이 이를 거쳐가는 것을 AFM으로 연속적인 이미지를 포착할 수 있다. 또한 AFM은 단순히 시료표면의 3차원 이미지를 형성할 수 있는 것 뿐만 아니라 시료에서 얻을 수 있는 다른 요소들을 영상화하는 도구로서도 많이 사용되고 있다. 대표적인 경우가 힘 곡선을 통해서 개개의 생분자들 간의 상호 작용하는 힘(biotin-streptavidin, P-selectin complexes, between oligonucleotides 그리고 antigen-antibody pairs 등)을 연구하는 것이다. 한 예로 스위스 Paul Scherrer Institute의 Ros 박사 연구팀에서는 세포

표면에서 작용하는 아주 미세한 Antigen-antibody 간의 결합력을(~50[pN]) 측정하기 위해 Antibody를 표면에 고정시킨 후 그와 결합하는 Antigen을 탐침에 달고 결합력 측정실험을 수행하였다. 이는 생물체의 근본적인 현상을 이해하는데 커다란 도움을 주고 있다.

### 3.3 NSOM(Near-field Scanning Optical Microscope)

광학현미경의 한계는 광회절현상(the effects of far-field diffraction)에 의해 제한되는 배율과 해상력에 있다. 이러한 한계는 이론적으로 200[nm]이며 현실적으로 500[nm] 이상이다. 그러므로 반도체 디바이스의 선폭이 마이크로 단위 이하로 작아지고 있고, 분자 생물학이나 세포학에 있어서도 마이크로 단위 이하이므로 이러한 경우의 관찰은 광학현미경으로는 한계가 있다. 1928년 E. H. Synge는 그림 16처럼 빛의 파장보다도 작은 광 나노 구멍(optical aperture)을 만듦으로서 기존의 광회절현상의 한계를 극복할 수 있다는 이론을 제안했다. 광원으로서 나노 구멍(aperture)을 이용함으로써 이미지 해상력은 빛의 파장에 의해 제한되는 것이 아니라 나노 구멍의 크기에 의해 제한되어진다. 이러한 이론은 1982년 Rohrer와 Binnig에게 노벨 물리학상을 안겨준 STM의 원리가 발견되어진 이후에야 비로소 기술적으로 실현 가능하게 되었다. 나노 구멍은 NSOM(Near-field Scanning Optical Microscope)에서 중요한 요소로서 끝부분의 크기가 200~300[nm]가 되어야 하며 제조 방법은 광섬유의 끝을 잡아당기거나 식각하여 뾰족하게 만든 뒤, Al 또는 Au/Cr 등으로 코팅하여 나노 구멍을 제작하는 방법과 AFM 캔틸레버 형태에 피라미드형으로 미세가공기술을 이용하여 나노 구멍을 제작하는 방법 등이 있다. NSOM에 있어서 시료와 나노 구멍의 간격은 15[nm] 정도가 되도록 피드백 시스템

템을 이용하여 유지되며, 이 때 빛의 방출 속도는 나노 구멍의 크기가 작을수록 빨라진다. Collection 렌즈는 시료 아래로 투과되는 이미지와 시료위로 반사되는 빛을 수집한다. NSOM은 나노 구멍을 통해 투과할 수 있는 빛의 세기가 제한되므로 시료에 제한을 받을 수 있으나 수용액 상태로의 작동이 가능하다. 아직까지 NSOM의 응용이 초기 단계에 있으나, 생물학, 유전학, 반도체 분야, 정보저장 물질 등의 연구 분야에서 응용이 활발하다. 한 예로, 유전학 분야에 있어서 NSOM을 이용함으로써 Polytene Chromosome의 이미지를 얻어내고 있다. 이는 AFM으로는 얻어 낼 수 없었던 것으로 아르곤 이온 레이저로부터의 488(nm) 빛을 이용함으로써 Chromosome 내부 구조의 이미지를 얻어내고 있다.

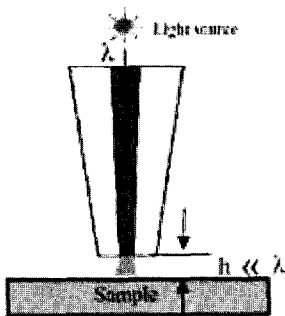


그림 16. Near Field Imaging

NSOM을 이용한 단순한 측정기능이 아닌 여타의 응용예로는 정보저장 기술에의 응용을 들 수 있다. NSOM의 정보저장 기술에의 응용은 Bell Lab의 Betzig 등에 의한 광자기를 이용한 60(nm) 비트 사이즈 광 정보 기록/재생 기술이 최초이고, 그 이후 일본의 Hitachi 등에서 CD-RW 매체인 상변화 미디어를 이용한 기록기술 등이 시도되었다. 최근에는 나노 구멍에서의(aperture) 광 투과율의 증대를 위한 공정기술 연구와 함께 어레이형 다중 개구열 등을 이용한 고속 기록/재생 방식에 대한 연구가 활발히 진행

되고 있다. 그림 17은 NOSM 시스템에 대한 사진을 보여주며, 그림 18은 NOSM을 이용하여 찍은 DNA의 모습을 보여주고 있다.



그림 17. NSOM 사진

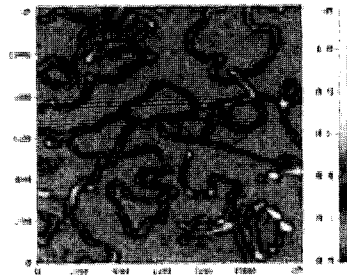


그림 18. DNA의 NSOM 이미지

## 4. 나노계측기술의 분해능

### 4.1 수직분해능

신호 잡음비(ratio of signal and noise)를  $S/N=k$ 라고 정의하면,  $k=B/\delta B$ 를 되는 측정량 B의 변화  $\delta B=B/k$ 를 검출할 수 있다.  $\delta B$ 는 최소 검출량, 즉 노이즈레벨이다. 다음에 SPM의 측정량 B가  $B \propto \exp(-Z/L)$ 인 것과 탐침과 샘플 표면간의 수직거리 Z에 지수 함수적으로 의존하는 경우를 생각한다. 여기서 L은 측정량 B의 감쇠거리이다. 이 경우, 미소 변화  $\delta B$ 에 대응하는 거리 Z의 변화  $\delta Z$ 은,  $(B-\delta B)/B = \exp(-\delta Z/L) \approx 1-\delta Z/L$  ( $\delta Z/L \ll 1$ )이 된다. 따라서,  $\delta B/B = \delta Z/L \approx 1/k$ 로부터,  $\delta Z \approx L/k$ 가 된

다. 결국 피드백 회로를 사용해서 SPM의 탐침을 상하로 움직임으로써, 측정량 B의 변화를  $\delta B$  이내로 제어할 수 있고, 그 경우 거리 Z의 변화는  $\delta$ 이하가 된다. 따라서 수직분해능을 정의하면, 수직분해능은  $\delta Z \approx L/k$ 가 되는 것을 알 수 있다.

## 4.2 수평분해능

탐침 선단의 곡률 반경 R이 탐침 선단과 샘플 표면의 거리 Z보다도 충분히 큰 ( $R \gg Z$ ) 그림 19(a)의 1차원 모델의 경우, 탐침으로 측정하는 샘플 표면의 수평 위치의 흐릿함의 정도로써 수평분해능  $\delta X$ 를 근사적으로 정의할 수 있다. 이 경우 최대의 위치 차이  $\delta X$ 는 탐침과 샘플 표면의 거리 오차 즉,  $g = Z + \delta Z$ 을 부여하는 수직분해능  $\delta Z$ 에 의해서 근사적으로 결정되므로,  $\delta X = R \sin \theta$  와  $\delta Z = R(1 - \cos \theta)$ 에 따라 수평분해능은  $\delta X \approx [2R \times \delta Z]^{1/2}$ 이 된다. 결국 선단의 곡률 반경  $R = 0.1[\mu\text{m}]$ 로 측정하여 수직분해능이  $\delta Z = 0.1[\text{nm}]$ 라고 한다면, SPM의 수평분해능은  $\delta X \approx 4.5[\text{nm}]$ 가 된다. 이 값은 STM을 개발한 스위스 IBM연구소의 Binnig박사나 Rohrer박사가 개발 전에 예측했던 STM의 공간분해능  $4[\text{nm}]$ 와 거의 일치한다.

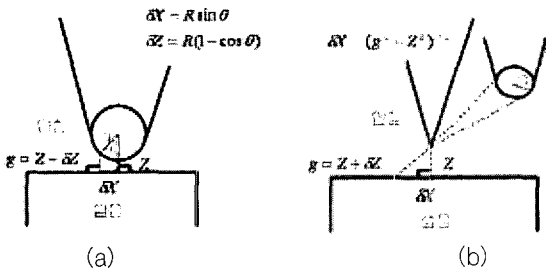


그림 19. 주사형탐침현미경(SPM)의 수직분해능과 수평분해능의 관계. (a) 탐침 선단곡률 반경 R이 탐침-샘플간 거리 Z보다 매우 큰 경우와, (b) 탐침선단 곡률 반경 R이 탐침-샘플간 거리 Z보다 매우 작은 경우

한편 탐침 선단의 곡률반경 R이 탐침 선단과 샘플 표면의 거리 Z보다도 충분히 작은 ( $R \ll Z$ ) 그림 19(b)의 일차원 모델의 경우도, 탐침으로 측정하는 샘플표면의 수평 위치의 흐릿함의 정도로써 수평분해능  $\delta X$ 를 근사적으로 정의할 수 있다.

이 경우의 최대 위치 차이  $\delta X$ 는 탐침과 샘플 표면의 거리 오차, 즉  $g = Z + \delta Z$ 을 부여하는 수직분해능  $\delta Z$ 로 근사적으로 결정되므로,  $\delta X = [g^2 - Z^2]^{1/2}$  따라, 수평분해능은  $\delta X \approx [2Z \times \delta Z]^{1/2}$ 이 된다. 결국 거리  $Z = 1[\text{nm}]$ 의 측정에서 수직분해능  $\delta Z = 0.01[\text{nm}]$ 가 실현되면, SPM의 수평분해능은  $\delta X \approx 0.14[\text{nm}]$ 가 되고, SPM의 종류에 의하지 않고 언제나 원자분해능을 얻을 수 있다. 다만  $R \ll Z = 1[\text{nm}]$ 의 조건에 따라, 탐침 선단은 원자 1개이며, 곡률 반경은 원자의 반경  $R \approx 0.1[\text{nm}]$  정도(단원자 관찰)이어야 할 필요가 있다. 즉 탐침 선단의 평균적 곡률 반경이  $R = 0.01[\mu\text{m}]$ 라도, 탐침 선단은 매끄럽지 않으며 크고 작은 다양한 돌기가 있기 때문에, 가장 선단의 원자 1개가 터널전류에 기여할 수 있으므로, 실효적 곡률 반경은 원자의 반경  $R \approx 0.01[\text{nm}]$  정도가 되어, STM으로 원자분해능을 얻을 수 있게 된다. 단지 평균적 곡률반경 R이 작은 편이, 탐침 선단에 1개의 원자가 튀어나와 있을 가능성이 높아지며, 또한 백그라운드 원자에 따른 기여도 줄어들기 때문에, 원자분해능을 얻을 수 있는 가능성이 커지게 된다.

따라서 수평(면내) 방향으로 원자분해능을 달성하는 데는, 수직분해능  $\delta Z = 0.01[\text{nm}]$ 가 조건이다. 이 경우 원자분해능 관찰을 달성하는 데는 (1) 작은 곡률반경 (R)의 실현, (2) 작은 측정 거리 (Z)의 실현과, (3)  $\delta Z \approx L/k$ 로부터 짧은 감쇠거리 L의 실현, (4) 큰 SN비 (k)의 실현이 필요조건이다.

따라서 감쇠거리가 짧아지면, 자연히 탐침 선단의 원자 1개에 따른 관찰(단원자 관찰)이 가능하게 된다. 최소의 탐침은 1개의 원자로 이루어진 탐침이며, 1개의 원자에 의한 단원자 관찰이 참다운 원자분해능을 갖는 극한 분해능을 갖는 SPM을 실현한다. 따라

서, (1)~(4)가 SPM으로 원자분해능을 얻기 위한 조건(단원자 관찰 조건)이다.

### 4.3 감쇠거리

STM에서는 터널전류는 거리  $Z$ 에 지수 함수적으로 의존하여 감소하기 때문에, 감쇠거리는 측정거리  $Z$ 에 의존하지 않는 상수가 된다. 이 경우 감쇠거리는 일함수  $\phi$ , 플랑크정수  $\hbar$ 와 전자의 질량  $m$ 을 사용하여  $L = \hbar / [2(2m\phi)^{1/2}]$ 로 나타내므로, 일함수  $\phi = 4\text{eV}$ 에 의해, 감쇠거리  $L = 0.05[\text{nm}]$ 라는 매우 작은 값이 얻어진다. 따라서 SN비  $k = 5$ 이고 수직분해능  $\delta Z = 0.01[\text{nm}]$ 가 실현되어, 그 결과 수평분해능  $\delta X = 0.14[\text{nm}]$ 가 얻어져 원자분해능도 실현한다. STM의 경우,  $L = 0.05[\text{nm}]$ 로 감쇠거리는 매우 작고, 더욱이 거리에 의존하지 않는 상수이기 때문에, 원자 1층 정도( $0.2[\text{nm}]$  정도)의 거리  $Z$ 의 변화로 터널확률은 50분의 1 정도 작아지게 된다. 따라서 탐침 선단의 원자만으로부터 터널전류가 흘러, 단원자 관찰이 자연스럽게 성립하게 된다.

한편 힘과 힘의 미분을 측정하는 AFM에서는, 측정량은 일반적으로  $1/Z^n$ 에 비례한다고 생각할 수 있다. 따라서 측정점  $Z_0$ 의 주변에서 측정량  $B(\propto 1/Z^n)$ 를  $\exp(-Z_0/L)$ 에 근사시켜 감쇠거리  $L$ 을 구할 필요가 있다. 이 경우 감쇠거리  $L$ 은 측정점  $Z_0$  주변의 평균값으로  $\delta Z$ 정도의 미소한 변화로는 변하지 않는다고 생각할 수 있다.  $Z$ 가  $Z_0$ 부터  $Z_0 + \delta Z$ 로 변화할 때 측정량  $B$ 는  $B_0$ 부터  $B_0 - \delta B$ 로 변화한다면,  $(B_0 - \delta B) / B_0 = Z_0^n / (Z_0 + \delta Z)^n \approx 1 - n\delta Z / Z_0$  ( $n\delta Z / Z_0 \ll 1$ )과  $(B_0 - \delta B) / B_0 = \exp(-\delta Z / L) \approx 1 - \delta Z / L$  ( $\delta Z / L \ll 1$ )로부터  $\delta Z / L \approx n\delta Z / Z_0$ 이 되고, 감쇠거리  $L = Z_0 / n$ 이 얻어진다. 또한 감쇠거리  $L$ 은 측정점  $Z_0$ 값에 의존하지만, 측정점  $Z_0$  주변의 평균적인 양이기 때문에  $L = \langle (Z_0 \pm \delta Z) / n \rangle \approx Z_0 / n$ 이 되어,  $\delta Z$ 정도의 미소한 변화에는 상수로써 취급한다.

이 결과에 따라 짧은 감쇠거리  $L$ 의 실현은, (1)  $Z$ 미분에 의한 측정량  $B(\propto 1/Z^n)$ 의  $n$ 을 크게 하거나, (2) 측정점의 거리  $Z_0$ 를 작게 하는 것이 유효하다는 것을 알 수 있다. 또한, 실험적으로는, STM의 감쇠거리와 마찬가지로 (3) 지레와 샘플표면의 청정화도 매우 유효한데 그 원인은 명확하지 않다. 단지 STM과 같이 측정량  $B$ 가 최초부터 거리  $Z$ 에 지수 함수적으로 의존하는 경우는 감쇠거리  $L$ 은 상수이기 때문에 (1)이나 (2)의 효과는 없다는 것에 주의할 필요가 있다.

단원자 관찰을 가정하면, 반데르발스·퍼텐셜 ( $n=6$ )에 의한 힘의 측정은  $n=7$ 이므로 측정점  $Z_0 = 1[\text{nm}]$ 에서  $L = 0.14[\text{nm}]$ 이지만, 힘의 미분의 측정이라면  $n=8$ 이므로 측정점  $Z_0 = 1[\text{nm}]$ 에서  $L = 0.13[\text{nm}]$ 으로 좀 짧아진다. 또한 측정점을  $1[\text{nm}]$ 부터  $0.5[\text{nm}]$ 로 접근시키면 힘의 경우  $L = 0.07[\text{nm}]$ 로, 미분하면  $L = 0.06[\text{nm}]$ 로 더욱 짧아진다. 한편 반데르발스력보다도 장거리력인 쿨롱력의 경우  $n=2$ 이므로 측정점  $Z_0 = 1[\text{nm}]$ 인 경우는  $L = 0.5[\text{nm}]$ , 미분해도  $n=3$ 이므로  $L = 0.33[\text{nm}]$ 로 되어 감쇠거리는 반데르발스력보다도 매우 길어진다. 비접촉 AFM에 의한 주파수시프트의 측정에서는, 큰 진폭 효과에 따라, 실제로는 퍼텐셜과 힘의 중간적인 양을 측정하므로, 반데르발스·퍼텐셜( $n=6$ )의 경우,  $n=6.5$ 이므로 측정점  $Z_0 = 0.5[\text{nm}]$ 에서는  $L = 0.07[\text{nm}]$ 로, 장거리력의 쿨롱력인 경우  $n=1.5$ 이므로 측정점  $Z_0 = 0.5[\text{nm}]$ 의 경우는  $L = 0.33[\text{nm}]$ 가 된다.

## 5. 나노계측기술의 미래

작은 탐침을 샘플 표면에 접근시켜 주사하는 주사형탐침현미경(SPM)의 역사를 살펴보면, 다양한 정보를 측정하고, 다양한 자극이나 탐침을 사용하는 현미경의 개발이 진행되어 왔다. 그 중에서도 SPM은 원자나 분자를 관찰하고, 측정하고, 제어하고, 움직이는 일이 가능한 기술이다. 그리고 AFM도 원

자·분자를 관찰하고, 측정하고, 제어할 수 있는 장치이며, 이를 이용하여 원자나 분자를 움직여서 조립하는 기술이 개발되리라 생각한다.

작은 탐침을 샘플 표면에 접근시켜 주사하는 SPM은, 원자·분자의 과학과 기술의 시대의 기반 기술로서 미세 조립이나 원자·분자 어셈블리나 나노머신을 가능하게 할 꿈의 기술이다.

표 1에 SPM과 관련된 주요한 개발 과제와, 그것이 실현되는 예상 시기를 열거하였다.

표 1. 주요한 SPM 개발 과제와 예상되는 실현 시기

장치 또는 응용분야	실현목표	실현시기	비고
주사터널 현미경(STM)	고속 원자분해능 STM/AFM	2020-2027년	
원자간력현미경(AFM)	원자분자 조작 원소분자종의 식별 CT법에 따른 내부구조관찰	2007-2013년 2002-2007년 2012-2017년	
근접장광학현미경	원자분해능	?	가능
교환력현미경(스핀계측)	원자분해능 원소식별	2005년 전후 2015년 전후	
자기공명력현미경	원자분해능 전자스핀의 검출 원자분해능 핵스핀의 검출	2008년 전후 2015년 전후	
주사형원자프로브현미경	3차원 조성분포 고속표시	2003-2005년	
STM진동분광법	표면 이등분자의 고속계측	2010년 이후	
SPM생체응용	DNA 염기해석기술 확립 유전자배열의 해독 유전자조작수술	2005년 이후 2010년 2030년	

## 참 고 문 헌

- [1] 이인식, 나노기술이 미래를 바꾼다, 김영사, 2002.
- [2] 이인숙 역, 알기 쉬운 나노기술(나노 프로브 기술), 교보문고, 2002.
- [3] M. Ohtsu, Near-Field Nano/Atom Optics and Technology, Springer, 1998.
- [4] 이영희, 나노(미시세계가 거시세계를 바꾼다.), (주)살림출판사, 2004.

## ◇ 저 자 소 개 ◇



### 김수길(金秀吉)

1965년 8월 2일생. 1988년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과(석사). 1997년 서울대학교 대학원 전기공학과(박사). 1997년~현재 호서대학교 정보 제어공학과 부교수. 본 학회 조사이사.