AFM
(Atomic Force Microscopy)

Atomic Force Microscopy or Scanning Force Microscopy

AFM is one of many techniques which fall under the Scanned Probe Microscopy (SPM) family of instruments. In all of these SPM techniques a small probe (10 - 100 nm radius of curvature) is scanned by a piezoelectric device over a sample to produce an image of the sample surface.

The first of the SPM techniques was the Scanning Tunneling Microscope (STM), developed by Binnig &Rohrer, which got them the Nobel prize for Physics in 1986. The contrast mechanism in the STM is based on the tunneling of electrons from a sharp metal probe tip to a conductive sample.

A simple schematic of an AFM instrument is given in Fig.1.

In this instrument the probe tip is mounted on the end of a triangular cantilever arm.

A piezoelectric device scans the sample beneath the probe tip.

As the probe tip undergoes attractive or repulsive forces, the cantilever will bend. This bending of the cantilever can be monitored by bouncing a laser beam off of the cantilever onto a 2 element photodiode (Position Sensitive Photo Diode).

In normal operation the tip-sample force is held constant by a computer controlled feedback loop that examines the force and tells the piezoelectric device whether to move the sample closer or farther away in order to maintain the set force value.

The AFM image produced is a measure of the topography of the sample.

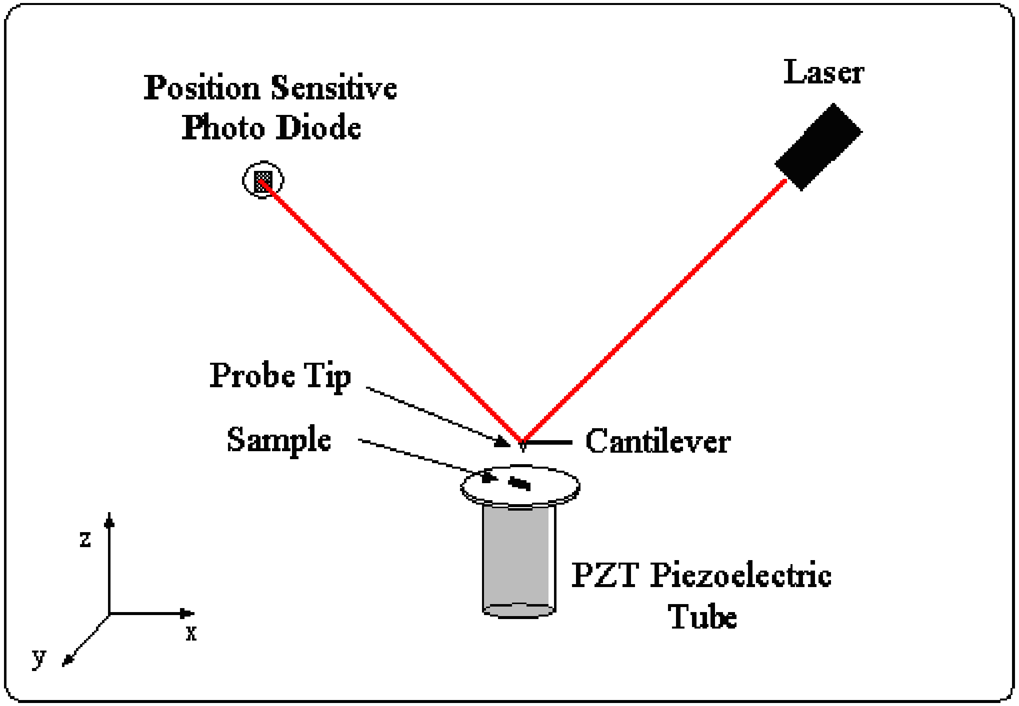

Fig.1. Schematic diagram of AFM.

The AFM uses the attractive or repulsive forces encountered by a probe tip when it is in close proximity to a sample surface (<200 nm).

There are three main modes of AFM operation:
Contact, Non-Contact and Intermittant Contact (Tapping).

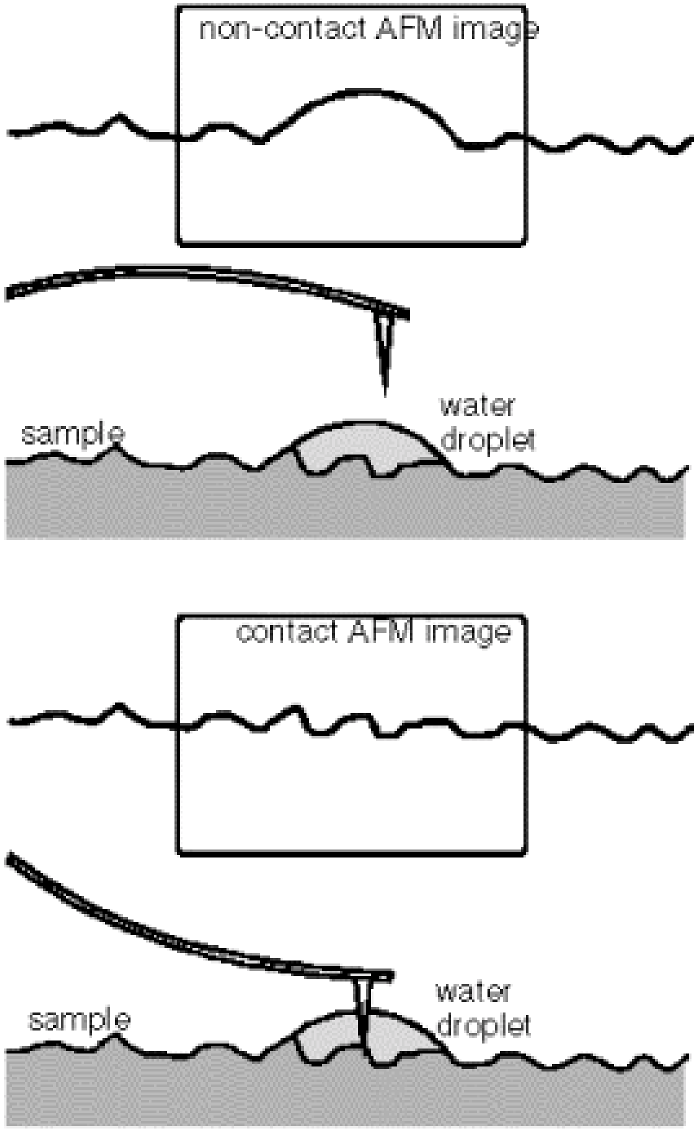

Fig.2. Contact mode and non-contact mode on the water surface.

Contact AFM is done by bringing the tip to a distance at which repulsive forces dominate the tip-sample interaction.

Non-Contact AFM is done such that the tip-sample interaction is in the attractive or van der Waals regime. In order to perform measurements in this attractive force region the cantilever is oscillated with a low amplitude (<5 nm), near its resonant frequency. For Non-Contact AFM the force is measued by comparing the frequency and/or amplitude of the cantilever oscillation relative to the driving signal.

Tapping or Intermittant Contact mode is also done by oscillating the cantilever near its resonant frequency, but the amplitude is significantly higher (~10-50 nm?). This Intermittant contact mode operates in the repulsive force region, but touches the surface only for short periods of time, in order to reduce damage to potentially fragile samples (ie. biological molecules).

Contact AFM

탐침이 시료의 표면과 접촉했을 때 캔틸레버가 받는 힘은 시료의 표면에 수직하게 반발력을 받는다. 이러한 반발력은 시료와 탐침 끝에 있는 원자 사이의 거리가 매우 가까울 때에만 작용하며, 거리에 따라 그 힘의 크기가 변하게된다.

AFM을 Contact Mode에서 작동 시에 탐침과 시료의 거리가 매우 작기 때문에 수평분해능(lateral resolution) 이 매우 좋다.

하지만 contact mode에서 탐침이 시료 표면에 positive force를 가한다. 만약 탐침이 시료 표면에 가하는 힘이 시료표면의 원자 또는 분자들의 결합을 파괴할 수 있을 정도라면 측정하는 동안 시료가 손상될 수 있으며, 표면의 형상을 계속 변화 시키므로 원래 표면 형상을 측정하기는 어렵다.

따라서 캔틸레버의 spring constant (k)를 매우 작은 값을 선택한다면, 탐침이 시료 표면을 지나갈 때 탐침이 받는 힘의 대부분이 캔틸레버가 휘어짐으로 나타나며 시료의 변형을 상대적으로 줄일 수 있다.

또한 contact mode에서 무시할 수 없는 힘은 탐침이 시료에 인가하는 lateral force 이다. 이러한 lateral force는 탐침이 시료에 가하는 vertical force와 탐침이 scan 하는 속도에 관계된다. 즉, 캔틸레버에 인가한 힘(set-point or set force)이 크면 클수록 lateral force 는 증가하며, scan 속도가 증가하면 커진다.

따라서 가능한 시료가 받는 힘을 줄이기 위해 contact mode에서는 cantilever spring constant를 1 N/m 이하로 하는 것이 좋다. 큰 구조를 갖고 딱딱한 시료인 경우에 1 N/m 이상의 캔틸레버를 선택하여도 큰 구조는 쉽게 형상화할 수 있다.

하지만 미세한 구조가 변형 없이 형상화 되었다고 말하기는 어렵다. 일반적으로 contact AFM에서 원자단위의 미세한 구조를 형상화할 때는 Micro-lever ($k=0.01 \sim 0.05$ N/m)이 적당하다.

Non-contact(NC) AFM

Non-contact mode의 AFM에서는 원자사이의 인력을 사용하는데 그 힘의 크기는 0.1~0.01 nN 정도로 시료에 인가하는 힘이 contact mode에 비해 훨씬 작아 손상되기 쉬운 부드러운 시료를 측정하는데 적합하고 탐침의 수명도 높일 수 있다.

원자간 인력의 크기가 너무 작아 캔틸레버가 휘는 각도를 직접 잴 수가 없기 때문에 non-contact mode에서는 캔틸레버를 고유진동수 부근에서 기계적으로 진동 시킨다. 시료표면에 다가가면 원자간의 인력에 의해 고유진동수가 변하게 되어 진폭과 위상에 변화가 생기고 그 변화를 lock-in amp로 측정한다.

Non-contact mode에서 시료표면의 형상의 측정은 엄밀하게 말해서 탐침과 시료 사이에 작용하는 힘(F)의 형상화라기 보다는 force gradient (dF/dz)라고 말할 수 있다. 하지만 힘 (F)이 반 데르 발스의 힘과 같이 순수하게 거리에만 의존한다면 force gradient image또한 표면 형상화에 대응된다고 말할 수 있다.

하지만 시료에 electrostatic force이나 potential, ferroelectric domain, magnetic domain이 있을 경우 시료에서 발생하는 전기장이나 자기장이 탐침에 정전기력이나 자기력을 발생시킬 수 있다.

전기력이나 자기력은 시료에 형상에 관계없이 발생하는 힘이므로, 전기력이나 자기력이 원자사이의 인력보다 강하면 순수하게 표면의 형상만을 구별해내기 어렵다.

여기서는 시료에 정전기력 이나 자기력을 발생시키는 다른 힘이 없다고 가정하고 순수한 인력에 의해 탐침과 시료의 상호 작용만을 고려한다면 non-contact AFM은 force gradient로 표면형상을 얻을 수 있다.

캔틸레버의 spring constant 가 k0 일 경우를 생각하자. 탐침이 시료표면 가까이 접근 했을 때 탐침에 반 데르 발스의 인력이 작용하기 때문에 캔틸레버의 spring constant는 원래의 값(k0)에서 새로운 spring constant keff=k0-dF/dz로 변화게 된다. 인력이 작용할 경우, dF/dz >0 이므로, keff는 k0 보다 작아 진다.

이처럼 탐침과 시료 사이에 상호 작용에 의해 spring constant의 변화가 non-contact mode 작동에 어떤 관계가 있는지 알아 보자(Fig.3). 모든 물체는 고유한 공진주파수(resonance frequency :f0)를 가지고 있다. 즉, 외부의 진동자 (여기서는 bimorph: ac 전압을 인가하여 인가된 전압의 주파수로 기계적으로 진동을 발생시키는 진동자 역할을 함)로 캔틸레버를 진동시킬 때, 진동자의 흔드는 주파수가 특정한 진동주파수(f0) 근처에서 캔틸레버에 전달 되는 진동이 상당히 커진다.

따라서 bimorph에 인가하는 전압의 주파수를 낮은 값에서 높은 쪽으로 변화 시키면서 각각의 주파수에서 캔틸레버가 진동하는 진폭을(lock-in으로 측정) 측정하고 이를 기록 한다면 캔틸레버의 공진 주파수와 주파수에 따르는 특성을 알 수 있다. PSI software에서는 "NCM-Sweep" 메뉴에서 이러한 작업을 수행한다.

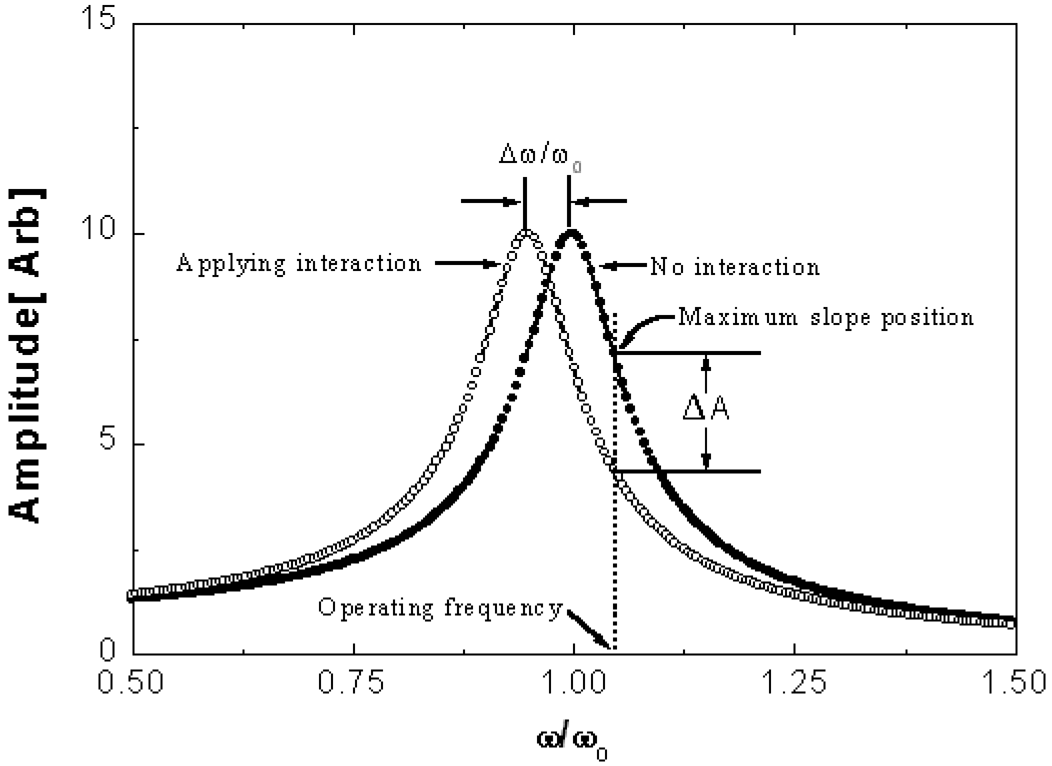

Fig.3. 탐침과 시료 사이의 거리가 가까워지면 dF/dz가 증가하며, keff는 줄어들어 캔틸레버의 공진주파수는 f0는 감소한다

Intermittent-contact AFM

Intermittent-contact(IC) AFM은 NC-AFM과 비슷하지만 IC-AFM의 경우 진동하는 캔틸레버의 탐침이 시료 표면에 거의 닿을 수 있도록 시료에 접근한다.

IC-AFM에 있어서도 NC-AFM의 경우처럼 시료와 탐침의 거리에 따라서 캔틸레버의 진동하는 진폭이 변하는 것을 측정하여 시료의 형상을 얻는다. 일반적으로 IC-AFM은 크게 영상화한다.

IC-AFM의 경우는 NC-AFM과는 달리 탐침이 시료에 닿으므로 시료의 표면에 손상을 줄 수 있기 때문에 NC-AFM.을 이용하는 것이 바람직하다.(Fig.4)

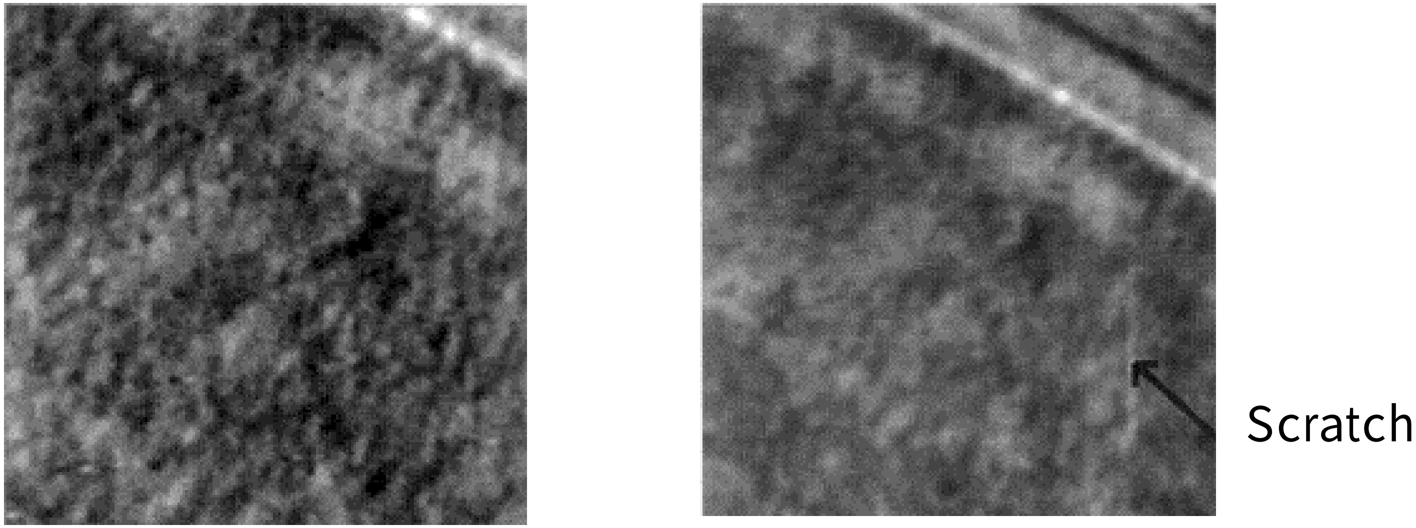

Fig. 4. IC-AFM의 시료형상인 오름쪽 그림에서 왼쪽사진(NC-AFM)에서는 볼 수 없었던 탐침이 시료를 긁은 자리를 볼 수 있다.