

# SPM을 이용한 나노입자의 나노조작

## (Nanomanipulation of nanoparticles using scanning probe microscope)

한 재 량  
전북대학교 화학과

### 1. 들어가면서

나노과학기술(nanotechnology)이 지금처럼 중요한 연구영역으로 자리잡은 지 그리 오래되지는 않다. 그럼에도 불구하고 많은 과학기술자들이 나노 분야로 연구주제를 바꾸며, 심지어 나도 나노냐 하며 나노 과학기술이라고 하는 우스개 소리가 있을 정도다. 나노 연구가 이렇게 관심을 얻는 이유는 선진국과 우리나라의 정책적인 이유도 있겠지만, 나노과학기술을 통해 인류가 얻을 수 있는 혜택이 예측할 수 없을 정도로 다양하며, 기존의 과학기술과는 차원이 다른 새로운 개념의 학문이 될 수 있는 가능성이 있기 때문이다. 나노과학기술이 실생활에 주는 혜택은 정말 많다. 예를 들면, 손바닥이나 손톱에 붙이고 다닐 수 있는 초소형 컴퓨터나 사람 혈관 속을 돌아다니면서 질병을 진단하고 치료한 의료를 로봇을 나노기술로 만들 수 있다. 따라서 대부분의 질병 치료가 가능해지며 인간의 수명이 두 배로 된 다든지 또는 소고기와 같은 음식물을 소를 키워야만 얻는 것이 아니라 원자/분자 조작으로 쉽게 만들어 기아와 궁핍이 없어지는 기대를 할 수 있다. 이런 가능성들, 어찌 보면 과거 공상과학 소설에서나 볼 수 있었던 이야기들이지만 나노과학기술로는 일단 원리적으로 가능하다. 바로 이런 기대들이 가능한 이유는 단일 원자(분자)나 그 원자(분자)들의 모임인 작은 크기의 나노입자(nanoparticle)들을 하나하나 다룰 수 있는 나노조작기술(nanomanipulation)이 가능해지기 때문이다.

그러면 먼저, 나노과학기술의 정의는 무엇일까? 나노과학기술이란 100 nm 이하 정도로 작은 크기의 소자를 만들고 제어하는 기술이며 분자와 원자의 양자역학적 원리를 이용하는 것이다. 여기서 일단은 다루는 물질의 크기가 나노 미터 수준이어야 한다. 마이크로미터 시대에서 다루었던 물질의 크기가 약 100 nm 까지 하나까 그 이하, 즉 원자 크기부터 100 nm크기까지의 물질을 다루는 것이 나노연구 영역이라고 할 수 있겠다. 크기만이라도 작아진다면 재료공학, 전자전기공학, 컴퓨터공학, 기계공학 등의 응용학문 분야에서 아주 놀라운 결과들을 낼 수 있을 것이다. 하지만 다루는 물질의 크기 외에 한 가지 더 중요한 것이 있다. 바로 새로운 특성, 물리화

학적 성질을 찾는 것이다. 하나의 원자 그 자체나 100 nm 이상 크기의 물질에서 그 동안 발견할 수 없었던 성질을 나노입자로부터 찾고 이용하는 것이다. 아마도 나노과학기술을 연구하는 독특한 재미가 이 후자의 성격 때문일 것이다. 왜냐하면 100 nm 크기 이상의 입자를 다룰 때에는 전혀 상상조차 할 수 없었던, 전혀 기대하지 못했던 놀라운 성질들이 발견되기 때문이다. 입자의 크기가 작기 때문에 나타나는 성질들, 그것들을 찾고 응용하여 새로운 개념의 재료 또는 소자 등을 개발하는 것 이것이 나노과학기술의 정의다.

Microscope Properties	AFM	STM	SEM	OM
Visible Object Size	> 0.1 nm	> 0.1 nm	> 5 nm	> 100 nm
Visible Object Type	all	conductors, 1/2conductors	conductors, 1/2conductors	all
Imaging Type	near-field	near-field	far-field	far-field
Interaction with Object	contact or non-contact	non-contact	non-contact	non-contact
Imaging Environment	all	vacuum or air	vacuum	air or liquid
Imaging Principle	interatomic forces	tunneling current	electron emission	light-matter interaction
Imaging Dimension	3-D	3-D	2-D	2-D

그림 1. 나노입자의 나노조작과 그 성질들을 측정하는데 사용되는 주요 현미경들

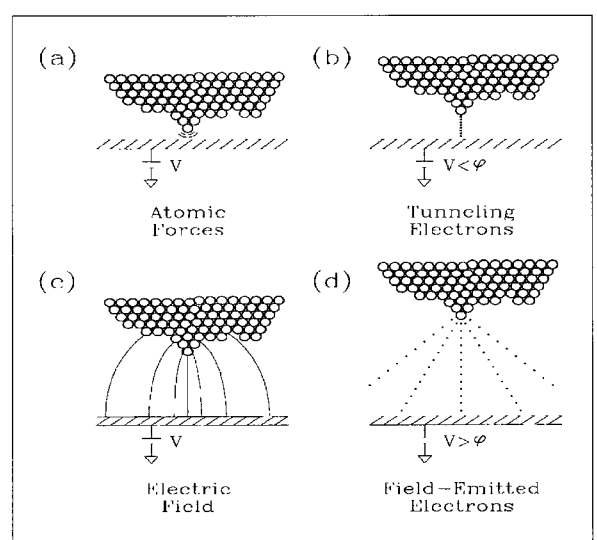


그림 2. STM을 이용한 나노조작의 기본 원리들. V: 탐침과 표면 사이에 가해지는 바이어스 전압,  $\phi$ : 표면의 일함수

나노과학기술의 정의에서도 볼 수 있듯이 나노조작기술 개발은 장래 나노연구의 성공 여부를 가르는 가장 중요한 기술이다. 나노조작기술이라 함은 단일원자(분자)부터 100 nm 이하에 해당하는 크기인 나노입자를 1 nm 이하의 분해능으로 수평/수직으로 조작하는 기술을 의미한다. 여기서 조작이라 함은 단순히 나노입자의 위치를 이동시키는 것만을 의미하는 것이 아니다. 나노입자의 물리화학적 특성도 함께 조작한다는 의미로 해석해야 할 것이다. 크기가 100 nm이하인 나노입자라면 대개 수십 개에서 수백 개의 원자 또는 분자들의 모임이 된다. 따라서 원자나 분자를 또는 수 나노미터 크기에 해당하는 나노입자들을 조작하며 그 특성을 연구하는 것은 나노과학기술의 중요한 기본이 된다. 나노입자의 조작을 연구하는 수단은 여러가지가 있겠지만 [그림 1] 그 중 STM (scanning tunneling microscope)과 AFM (atomic force microscope)은 그 자체의 분해능과 물리화학적 성질을 측정할 수 있는 잇점으로 인해 중요한 도구로 사용되고 있다. 나노입자의 기하학적 구조는 STM, AFM 뿐만 아니라 다른 전자현미경들로도 이미징을 통해 가능하지만 그 나노입자들의 특정한 성질들, 즉 크기가 작기 때문에 나타나는 양자역학적 성질들을 측정하고 조작할 수 있는 것은 현재 STM과 AFM 또는 그 아류라고 할 수 있는 다른 종류의 SPM(scanning probe microscope) 들로만 가능하다.

이 글에서는 SPM을 이용한 나노조작 연구에 대하여 요약하였다. 나노조작의 연구 방향은 아직까지도 실험 장치의 개발에 따라 상당부분 의존되고 있기 때문에 SPM을 이용한 조작방법들을 설명하였다. 또한 단순한 조작 차원을 떠나서 SPM으로 나노입자의 양자역학적 성질 (물리화학적 성질)들을 연구하는 방법을 설명하였다. 현재까지 나노입자의 나노조작에 관한 상당수 연구들중 단순히 일회성 결과에 그치거나 장래 응용가능성이 부족하다고 생각되는 결과들은 언급하지 않았다.

## 2. 나노조작기 (nanomanipulator)

나노입자 (하나의 원자/분자 또는 여러 원자/분자들의 모임)를 인위적으로 조작할 수 있다는 것, 그것은 파급 효과가 매우 크기 때문에 매스컴에서도 그 동안 주요 기사가 되었다. 이런 나노조작에 대한 개념은 아주 오래전부터 시작되었다. 예를 들면 방안의 공기 분자들을 더운 것과 찬 것으로 나누려는 시도가 바로 그것이다. 1870년대에 더운 공기분자와 찬 공기분자를 인위적으로 나누려는 장치를 생각한 적이 있는데 그런 가상장치를 맥스웰 귀신 (Maxwells Demon)이라고 불렀다. 이런 생각은 1959년도 R. P. Feynman에 의해 원자/분자

조작의 개념으로 구체화 되었으며 드디어 1982년 STM 개발되기에 이르렀다[1]. 1990년대에 와서 STM을 이용하여 하나의 원자나 분자를 인위적으로 조작하는 연구결과가 알려지면서 [2,3] 나노과학기술이라는 개념의 학문이 생긴 것이다.

나노입자중 가장 작은 단일 원자(분자)를 조작하는 것은 주로 STM연구로 이루어져 왔는데, 단일 입자의 움직임 형태로 분류한다면 입자의 확산 또는 호핑 (hopping), 회전, 진동, 분해 등을 인위적으로 유도하거나 새로운 나노입자를 만드는 것 등으로 나눌 수 있다. 이러한 나노입자의 조작을 인위적으로 그리고 선택적으로 할 수 있는 것은 STM의 원리상 세 가지 변수들 (탐침과 입자사이 거리, 바이어스 전압, 터널링 전류)을 조절할 수 있기 때문이다. 여기서 바이어스 전압과 터널링 전류의 조절하면 터널링 전자들의 에너지와 유량을 조절할 수 있으며, 탐침 입자 사이의 거리조절은 터널링 전류 크기를 바꾸는 변수가 된다.

그러면 나노입자가 이 변수들에 의해 어떤 메카니즘으로 움직이는 것인가? 그림 2와 같이 네 가지로 분류할 수 있다. 첫째는 탐침과 표면이 아주 가까울 때 발생하는 원자 힘, 둘째는 바이어스 전압이 탐침/표면의 일함수보다 작을 때 생기는 터널링 전자들, 셋째로 바이어스 전압이 탐침/표면의 일함수보다 클 때 생기는 전자들 (field emitted electrons), 넷째는 바이어스 전압에 의해 형성되는 전기장 (electric field)이다.

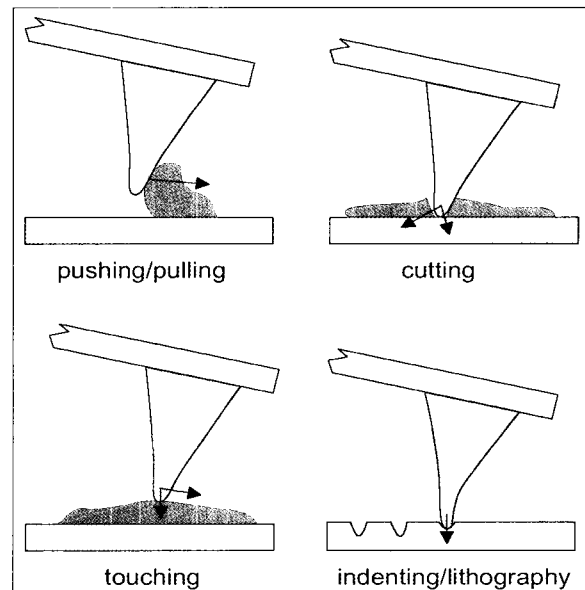


그림 3. AFM을 이용한 나노조작의 기본 원리들

탐침이 표면에 아주 가까이 접근되면 표면과 탐침의 전자파동함수들이 중첩된다. 이 중첩은 원자 힘을 유발하는데 [그림2(a)] 바로 이 힘을 이용하여 크세논 원자

를 움직여 IBM 로고를 쓸 수 있었다 [2]. 그리고 그 후 일산화 탄소 분자나 철 원자를 원자 힘으로 조작하여 사람의 모습이나 글자와 같은 일정한 형태를 만들 수 있었다 [4]. 또한 C60 분자 등 [5] 큰 탄화수소 입자들을 움직이는 것이 가능해졌으며 탐침 표면 간격을 줄여 (즉 원자 힘을 크게 하여) 표면 결합 에너지가 큰 입자들도 움직일 수 있었다. 원자 힘은 탐침과 표면사이의 거리가 커지면 감소하기 때문에 거리가 커지면 이 때부터는 터널링 전자가 나노입자의 조작에 이용된다 [그림 2(b)]. 터널링 전자를 이용하면 입자를 조작할 수 있는 종류가 더 다양해진다. 크세논 원자를 탐침과 표면 사이를 왔다 갔다 하게 하여 소위 원자스위치질을 만들거나 [3] 실리콘 표면에 흡착된 수소를 떼어내는데 터널링 전자들이 사용되었다 [6]. 그 후 산소 분자를 선택적으로 분해하거나 회전, 진동, 확산까지 유도할 수 있었고 [7,8], 심지어 FeCO<sub>2</sub>와 같은 분자를 합성 할 수 있었다 [9]. 한편 바이어스 전압이 일 함수보다 커지면 [그림 2(c)], STM 원리상 터널링 전류를 일정하게 유지하기 위해서 탐침과 표면의 간격이 커진다. 따라서 탐침의 영향이 미치는 공간이 커져서 하나의 분자만을 조작하는 것은 어렵다. 전기 장을 이용한 조작은 [그림 2(d)] 입자의 결합자체에 변화를 초래할 수 있지만 그 전기장이 정확히 어디까지 미치는지 알기가 쉽지 않다. 즉 탐침의 구조에 따라 전기 장의 모양이 달라지기 때문에 크기가 작은 나노입자 연구의 경우 재현성 있는 결과를 얻기 쉽지 않다.

위에서 설명한 나노입자 조작 매커니즘 네 가지 중 입자 하나만을 선택적으로 쉽게 조작할 수 있는 방법은 원자 힘과 터널링 전자에 의한 것이다. 특히 뾰족한 탐침으로 바이어스 전압을 적절히 조절하면 0.1 nm 수평공간 분해능으로 터널링 전자를 입자의 조작에 사용할 수 있다. 다른 두 가지는 경우에 따라서 탐침 위치를 중심으로 수평방향으로 수십 nm까지 영향을 미칠 수 있기 때문에 상당수 입자들이 동시에 움직인다. STM으로 나노입자를 움직이게 하는 방법은 간단해 보이기도 한다. 하지만 그 움직임 중 입자의 결합과 관계된 입자의 움직임, 즉 터널링 전자에 의한 분해, 진동, 합성 등은 아직 설명이 쉽지 않다. 전자가 탐침이나 표면에서 나와서 입자로 가거나 또는 입자에서 나와 탐침으로 갈 때 언제까지 입자나 표면의 전하분포에 변화를 야기할 수 있기 때문이다. 또한 이렇게 재편성된 전하분포는 입자를 구성하는 원자(분자)들의 움직임을 초래하며 이때 전자와 입자 사이에 에너지가 전달되기도 한다. 이와 같이 결합이 끊어지거나 만들어지는 것은 전자 에너지의 전달 경로와 전하분포의 변화와 밀접하게 관련있다. 따라서 입자가 움직이는 과정을 제대로 이해하려면 변수 세 가지를 적절히 조절하여 반응속도와 터널링 전

자유량 등을 측정해야 하고 동력학적 계산 등이 더 요구될 수 있다.

단일원자/분자와 같은 아주 작은 나노입자를 좋은 분해능으로 조작할 때는 STM이 유용한 도구이지만 수 나노미터에서 수 십 나노미터의 큰 크기의 나노입자들을 조작하는 데에는 AFM이 더 유용하게 사용된다. AFM의 특성상 탐침과 입자간에 작용되는 힘이 미치는 공간이 STM보다 상당히 크기 때문이다. AFM에서는 탐침과 입자사이에 가해지는 힘의 종류에 따라 조작 형태가 정해질 수 있다. 그림 3과 같이 힘의 크기를 적당히 조절하면 나노입자를 밀고 당기거나 자를 수 있으며 흡을 내어서 리소그래피의 도구 등으로 다양한 분야로 응용이 가능하다 [10-14]. 그림 4(a), (b)는 242 nm 크기의 라텍스 입자를 AFM 탐침으로 미는 모습을 보여주며 [15] 그림 4(c)는 왁스표면에 AFM탐침으로 흡을 낸 것으로 나노조립에 쓰이는 템플레이트로 사용될 수 있다 [16]. 좀 더 복잡한 나노조작을 위해서는 하나의 탐침보다는 여러 개가 필요한 경우가 있다. 그림 5는 두개의 탐침과 광학 집게를 이용한 다자인으로 나노조작 차원을 3차원으로 확장시킨 예이다 [17]. 장래 등장할 3차원 나노로봇의 가장 간단한 형태라고 할 수 있을 것이다. AFM을 이용한 나노조작 원리는 탐침-입자간의 상호작용 공간이 크기 때문에 아직STM 조작과 같이 이론적으로 자세히 연구되진 않았다.

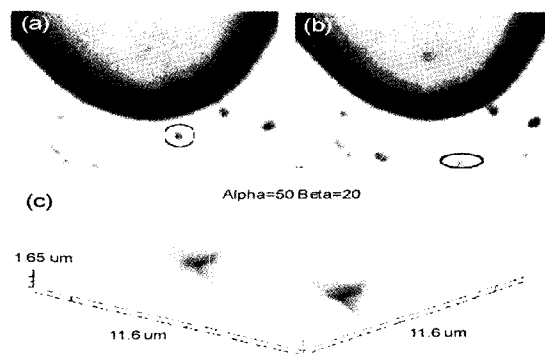


그림 4. AFM을 이용한 나노조작. (a)와 (b) 242 nm 크기의 라텍스 입자를(동그라미로 그림 부분) AFM 탐침으로 미는 현상. (c) AFM 탐침으로 왁스 표면에 힘을 가해 흡을 낸 이미지.

### 3. 나노입자의 특성 연구

나노입자의 연구 중에는 위에서 언급한 나노조작 이외에 중요한 것이 분광학 기능이다. 특히 터널링 전자를 이용한 터널링 분광학은 1960년대 이후 산화합속 등을 연구하는데 중요한 기능으로서 당시는 전체 공간에 대한 평균값만 얻을 수 있었다. 그 후 STM을 개발한

Binning 와 Rohrer 도 당시 본래 목적이 현미경을 개발하려던 것이 아니라 터널링 분광학 정보를 3~4 nm 정도의 수평 분해능으로 얻고자 했던 것으로 알려져 있다. 현재는 STM을 이용한 터널링 분광학으로 단일분자와 같은 작은 나노입자의 독특한 물리화학적 성질 측정이 가능하며 이 기능으로 단순히 나노입자의 정체를 확인하는 도구로서 유용할 뿐 만 아니라 나노입자의 전자구조, 진동특성, 결합구조 등 많은 정보를 얻는데 사용될 수 있다.

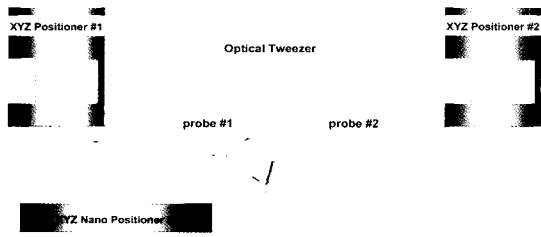


그림 5. 두개의 AFM 탐침과 광학 집계를 이용한 3차원 나노조작기

터널링 분광학의 경우, 탐침 표면 사이에 가해지는 바이어스 전압과 터널링 전류의 관계를 측정하는 것인데 (그림 6), 반도체 표면의 전자구조 연구를 통해 표면 원자의 결합과 에너지 등을 연구 할 수 있었으며 나아가 산화된 반도체 표면의 센서 응용까지 이해하는데 사용되었다 [18]. 반면에 금속 표면의 경우는 보통 특별한 형태의 전자 구조가 존재하지 않기 때문에 그리 많이 연구되진 않았지만 표면 전자 밀도의 차이를 통해 철과 크롬 입자들을 구별하는데 이용되었다 [19]. 게다가 최근에는 금속 표면의 경우 단일분자 연구에 중요한 단일분자 진동 스펙트럼을 얻을 수 있었다 [20]. 현재까지 알려진 예로는 그림 6와 같이 바이어스 전압-전류의 곡선의 일차미분으로부터 나노입자의 전자구조 또는 자성 성질들을 연구할 수 있으며 이차미분으로는 단일분자의 진동 구조를 알 수 있다.

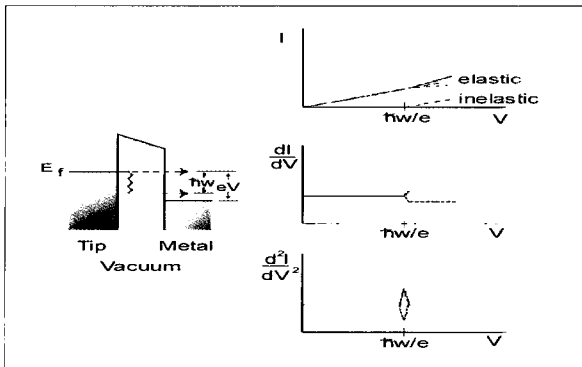


그림 6. STM을 이용한 터널링 분광학

그림 7은 벤젠 [21], 아세틸렌 [20], 파이롤리딘 (pyrrolidine) [22] 그리고 산소 분자의 [8] 진동 스펙트럼들을 보여주고 있다. 벤젠의 경우는 관측되는 진동 모드가 없으나 아세틸렌은 358 meV (1 eV = 8066 cm<sup>-1</sup>) 에서 C H 스트레칭 진동 모드가 나타났다. 파이롤리딘 분자에서는 369 meV 와 409 meV에서 두 진동 모드가 관측되는데 각각 CH<sub>2</sub>, NH 스트레칭 진동이다. 여기서 특이한 것은 369에서 진동모드가 피크가 아니라 딥 형태로 나타나는 데 이것은 진동이 발생 되면서 흐르는 터널링 전자의 전체 개수가 감소한 것을 의미한다. 산소 분자의 경우는 두 가지 진동 모드 모두 딥 모양으로 관찰되었다 (79 meV: O O 스트레칭, 35 meV: Ag O<sub>2</sub> 스트레칭). 파이롤리딘의 369 meV 딥은 다른 진동 모드에 비해 상당히 크게 나타나는데 이 결과는 negative differential resistance (NDR) 현상이 진동의 발생과 밀접한 관련이 있음을 보여준다 [22].

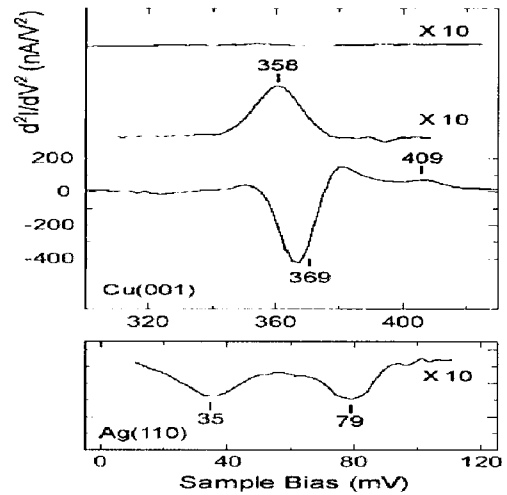


그림 7. STM터널링 분광학의 이차미분 곡선으로 얻은 분자 진동 스펙트럼들. 위로부터 벤젠, 아세틸렌, 파이롤리딘, 그리고 산소 분자의 스펙트럼들이다.

나노입자들 사이의 힘에 대한 연구는 입자-입자의 상호작용을 이해하는데 매우 중요한 분야이다. 이런 힘에 대한 연구는 AFM으로 가능한데, 탐침-표면 사이의 거리와 탐침을 지지하는 캔틸레버에 작용되는 힘의 관계로부터 입자-입자 상호작용 또는 화학 결합들을 이해할 수 있다 [23]. 즉 특정한 입자로 코팅된 AFM 탐침과 역시 특정한 입자로 입혀진 표면 사이의 거리를 변화 시키며 캔틸레버에 작용되는 힘을 측정하면 탐침과 표면에 붙어있는 입자들 사이에 생기는 힘, 즉 결합의 종류에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이 힘들에 대한 정보가 다양한 입자들에 적용되면 결합 본질을 이해할 수 있고 또 그 입자의 지분역할도 가능할 것이다. 그림 8은 카르복실기와 카르복실기, 카르복실기와 메틸기, 메틸기와

메틸기 사이의 비공유 결합 차이에 따라 변화되는 힘의 크기들을 보여주는 그림이다 [23]. 카르복실기나 메틸기가 있는 입자들을 탐침이나 표면에 코팅한 후 탐침을 표면으로 접근시켰다가 후퇴하면서 힘을 측정하였다. 후퇴하는 동안 어느 순간 캔틸레버에 작용되는 힘이 갑자기 변하는 것을 볼 수 있는데 바로 이 때가 작용기 사이의 결합력과 관련 있다. 그림 3은 그 결합력의 차이를 명확히 보여주는 실험 결과이다. 이 기술은 특히 바이오펜자, 즉 리간드-받개의 상호작용이나 [24] 단백질 접힘 [25] 등의 연구에 중요할 것으로 기대된다.

#### 4. 나노입자의 이미지

SPM이미지는 원자 하나하나를 구별할 수 있는 분해능을 지니기 때문에 과거 20여 년간 나노 과학기술 연구에 없어서는 안될 중요한 도구로 사용되어왔다. 또 최근에는 국내 대학, 연구소, 산업체 등에서 주로 시료의 형상을 관찰하는 보편화된 장비로 사용되고 있다. 그러나 SPM 이미지는 탐침과 표면 사이에 흐르는 터널링 전류 (STM), 또는 탐침 표면의 척력과 인력 등의 힘을 (AFM) 반영하기 때문에 실제의 구조와는 조금 다르게 나타날 수 있다. STM은 전자 구조 (전자 밀도 분포)와 기하학적 구조가 혼합되어 이미지에 반영되고, AFM은 탐침이나 표면에 특이한 작용기가 있는 경우 그 사이에서 생기는 화학 힘 (chemical force) 때문에 실험적으로 얻어지는 이미지가 실제 기하학적 구조와는 약간 다를 수 있다. 따라서 실제구조를 확인하기 위해서는 이론 계산이나 다른 분석장치를 함께 사용할 필요가 있다.

단일 나노입자 구조를 SPM 이미지로 확인하는 데에는 몇 가지 더 세심한 주의가 필요하다. 여기서 단일나노입자라 함은 표면에 홀로 존재하는 입자를 말하는 것인데, 그 이미지를 얻는 것은 잘 배열된 입자구조를 보는 것과 약간의 차이가 있다. 먼저 단일입자는 탐침 바로 밑에 존재할 때 전기장, 척력 또는 인력에 의해 구조가 변할 수 있다. 잘 배열된 구조에서는 주변 입자들과 일정한 힘을 이루며 안정하게 유지될 수 있지만 홀로 존재하는 경우는 탐침의 영향을 그대로 모두 받기 때문이다. 즉 탐침이 분자와 수평으로 멀리 떨어진 곳에 있을 때와, 바로 입자 위에 존재할 때의 입자 구조가 다를 수 있다는 것이다. 또한 탐침이 입자 위에 있을 때 입자와 탐침 사이의 수직 거리에 따라 작용하는 힘의 크기가 변한다. 따라서 이 때도 그 수직 거리에 따라 분자의 구조가 여러가지로 나타날 수 있다. 즉 입자는 탐침으로부터 받는 영향 때문에 많이 달라지는데, 심지어는 표면에 수평으로 (옆으로) 움직이거나 표면에서 떨어져 나가거나, 떨어진 다음 탐침에 가서 붙을 수도 있다. 이미지 해석 상 중요하

게 고려해야 할 것이 하나 더 있는데 바로 탐침의 구조이다. 크기가 수 나노미터에 해당하는 단일입자의 크기는 탐침 끝의 크기와 비슷하기 때문에 탐침의 구조나 크기에 따라 이미지가 많이 달라진다. 이러한 현상은 일정하게 잘 배열된 표면과 같은 이미지는 큰 영향을 미치지 않는다. 탐침이 아주 큰 다중탐침 (이중탐침 또는 삼중탐침 등)이 아닌 이상 배열 간격이나 높이 등이 크게 달라지는 것이 아니기 때문이다. 따라서 크기가 작은 단일입자를 연구하기 위해서는 구조상 대칭성 있고 뾰족한 탐침을 만드는 것이 매우 중요한 일 중의 하나이다. 좋은 탐침을 만드는 것은 일반적인 화학에칭 등으로는 아직 가능해보이지 않는다. 탐침을 표면에 살짝 반복해서 부딪혀주거나 가까운 탐침-표면 거리에서 바이어스 전압, 터널링 전류 또는 힘 등을 적절히 조절해서 탐침 끝을 바꿔주어야 할 것이다.

#### 5. 나노입자의 응용

나노 소자 개발의 가장 큰 이슈중의 두 가지는 얼마나 작게 (고집적화) 그리고 얼마나 빠른 속도로 처리가 가능한 소자를 만들 수 있는 가이다. 따라서 나노입자를 이용한 소자 개발이 관심을 끄는데 그 이유는 나노입자가 크기가 작을 뿐만 아니라 다양한 성질이 소자의 여러 기능에 적합하며 양자역학적 성질로 처리속도를 상당히 높일 수 있기 때문이다. 물론 원리적으로는 하나의 나노입자를 소자로 만들 수도 있지만 현재는 소자에 적합한 나노입자를 찾는 것과 그 입자들을 어떻게 배열하고 또 어떻게 테스트하고 응용하는 것이 주된 관심사다. 전자 소자의 가장 핵심 부품은 아마 메모리나 로직에 사용되는 스위치일 것이다. SPM연구는 스위치 역할을 오랜 시간동안 할 수 있는 나노입자를 찾는 것과 스위칭 메커니즘을 밝히는 것 [26, 27], 그리고 소자 형태를 조립하고 [28] 시험하는 데 있다. 단일나노입자의 경우는 현재까지 그 입자의 전자 구조에 의한 것 보다는, 기하학적 구조의 변화, 즉 포피린 계열의 분자나 페닐 등이 포함된 올리고머 분자와 같은 입자들이 지닌 두 세가지 안정한 기하학 구조를 분자스위치에 이용하려는 시도가 있다. 또한 소자 성능 중 중요한 것이 입자와 입자 또는 입자와 금속의 연결에 관한 것이다. 어떻게 연결하고 또 입자를 통하여 전류가 흐를 때 컨덕턴스가 얼마인지 측정하는 것이 필요하다 [29].

#### 6. 요약 및 전망

SPM은 나노과학, 나노기술의 문을 여는 가장 중요한

역할을 하였을 뿐만 아니라 나노입자의 나노조작 연구에 반드시 필요한 연구 수단이다. 개발된 지 약 20여년이 지났지만 계속 장치가 발전되고 있으며 더불어 나노 과학 기술의 발전을 선도하고 있다. SPM을 이용한 나노조작 연구는 최근 시작되었으며 앞으로도 실험장치의 개발과 맞물려 전혀 예상하지 못했던 나노입자들의 성질들을 밝힐 수 있을 것이다. SPM은 더 이상 이미지만을 보는 수동적인 연구수단이 아니라 분광학과 나노조작기술의 개발로 능동적으로 나노입자의 움직임은 유도하고 그 특성들을 연구하는 수단이 되었다. 특히 SPM을 이용한 분광학은 현재 물질의 물리화학적 성질을 나노입자 크기의 수준에서 밝힐 수 있는 유일한 수단으로 나노입자의 물성을 밝히는데 매우 중요하게 사용될 것이다. 또한 단일 나노입자를 이용한 전자 소자 개발 및 바이오 센서 등으로 분야가 확대될 것으로 기대된다. SPM을 이용한 소자 개발의 단점인 제작 효율성을 해결하기 위해서는 다중 탐침을 이용하거나 주사 속도 등 제작 속도를 빠르게 하는 방법으로 해결될 것으로 기대한다. 한편 현재는 대부분 표면과 같은 2차원에서 나노조작을 연구하지만 장래 3차원에서 가능한 나노조작기술들이 개발되어야 할 것이다. 즉 나노로봇과 같은 나노조작기들이 개발되어야 하고 그 로봇을 이용하여 우리가 기대해 해왔던 나노시대의 제품들을 만들 수 있을 것이다.

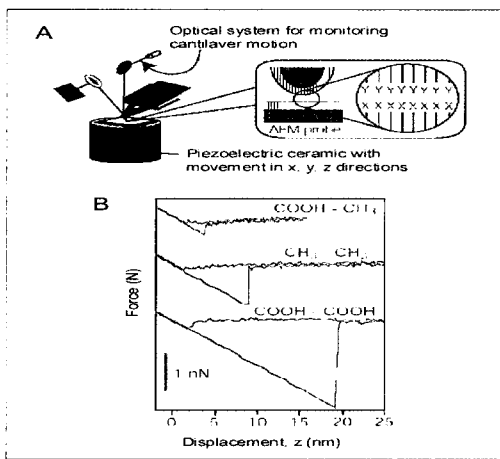


그림 8. AFM탐침과 표면에 카르복실기나 메틸기가 있는 나노입자를 붙여 카르복실기 메틸기, 메틸기 메틸기, 카르복실기 카르복실기 사이에 작용하는 힘을 탐침과 표면 간격에 따라 측정할 것.

참고문헌

1. Binnig, G.; Rohrer, H.; Gerber, Ch.; Weibel, E. *Phys. Rev. Lett.* 1982, 49, 57  
 2. Eigler, D. M.; Schweizer, E. K. *Nature* 1990, 344, 524.

3. Eigler, D. M.; Lutz, C. P.; Rudge, W. E. *Nature* 1991, 352, 600.  
 4. Heller, E. J.; Crommie, M. F.; Lutz, C. P.; Eigler, D. M. *Nature* 1994, 369, 464.  
 5. Cuberes, M. T.; Schlittler, R. R.; Gimzewski, J. K. *Appl. Phys. Lett.* 1996, 69, 3016.  
 6. Shen, T. C. *et al. Science* 1995, 268, 1590.  
 7. Stipe, B. C. *et al. Phys. Rev. Lett.* 1997, 78, 4410; Stipe, B. C.; Rezaei, M. A.; Ho, W. *Science* 1998, 279, 1907.  
 8. Hahn, J. R.; Lee, H. J.; Ho, W. *Phys. Rev. Lett.* 2000, 85, 1914.  
 9. Lee, H. J.; Ho, W. *Science* 1999, 286, 1719.  
 10. Schafer, D.; Reifengerger, R.; Patil, A.; Andres, R. *Appl. Phys. Lett.* 1995, 66, 1012.  
 11. Junno, T.; Deppert, K.; Montelius, L.; Samuelson, L. *Appl. Phys. Lett.* 1995, 66, 3627.  
 12. Hansen, L. T. *et al. Nanotechnology* 1998, 9, 337.  
 13. Resch, R. *et al. Appl. Phys. A* 1998, 67, 337.  
 14. Martin, M. *et al. Appl. Phys. Lett.* 1998, 73, 1505.  
 15. Sitti, M.; Hashimoto, H. *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics* 2000, 5, 199  
 16. Autumn et al. *Nature* 2001.  
 17. Sitti, M.; Atuk, B.; Shintani, K.; Hashimoto, H. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* 2001, 860  
 18. Hamers, R. J.; Demuth, J. E.; Tromp, R. M. *Phys. Rev. Lett.* 1986, 56, 1972.  
 19. Davies, A.; Stroschio, J. A.; Pierce, D. T.; Celotta, R. J. *Phys. Rev. Lett.* 1996, 76, 4175.  
 20. Stipe, B. C.; Rezaei, M. A.; Ho, W. *Science* 1998, 280, 1732.  
 21. Lauhon, L. J.; Ho, W. *J. Phys. Chem. A* 2000, 104, 2463.  
 22. Gaudioso, J.; Lauhon, L. J.; Ho, W. *Phys. Rev. Lett.* 2000, 85, 1918.  
 23. Frisbie, C. D. *et al. Science* 1994, 265, 2071.  
 24. Florin, E. L.; Moy, V. T.; Gaub, H. E. *Science* 1994, 264, 415.  
 25. Oberhauser, A. F.; Marszalek, P. E.; Erickson, H. P.; Fernandez, J. M. *Nature* 1998, 393, 181.  
 26. Donhauser, Z. J. *et al. Science* 2001, 292, 2303.  
 27. Moresco, F. *et al. Phys. Rev. Lett.* 2001, 86, 672.  
 28. Okawa, Y.; Aono, M. *Nature* 2001, 409, 684.  
 29. Cui, X. D. *et al. Science* 2001, 294, 571.

## 저자 소개



### 《한재경》

- 2002년 10월 ~ 현재 전북대학교 화학과 조교수
- 2001년 4월 ~ 2002년 9월 서울대학교 화학부 BK 계약 조교수/박사후 연구원
- 2000년 10월 ~ 2001년 4월 포항공과대학교 화학과 박사후 연구원

- 1999년 5월 ~ 2000년 10월 Cornell University, University of California (Irvine) 박사후 연구원
- 1998년 9월 ~ 1999년 4월 포항공과대학교 화학과 박사후 연구원
- 1992년 3월 ~ 1998년 8월 포항공과대학교 화학과 석사, 박사 졸업
- 1988년 3월 ~ 1992년 2월 포항공과대학교 화학과 학부 졸업



### ◎ 개인신상 정보 갱신 요망

- 회원님의 개인신상정보는 우리학회 홈페이지(<http://icase.or.kr>)의 인물D/B 중 본인정보수정 에서 개별 신상정보 수정이 가능하오니 홈페이지를 직접 방문하시어 수정 및 교정하여 주시기 바랍니다.

추후 우리학회에서는 홈페이지에 수록된 정보를 근거로 하여 각종 정보의 송부와 우편 등을 발송할 예정이오니 본인의 정보관리를 철저히 수행하여 불이익을 받지 않도록 하여 주시기 바랍니다.

### ◎ 평생회원 회비 및 납부방법

구분	자격	회비	지로/온라인납부	예금주
평생회원	정회원에 한함	500,000	신용카드 전자결재 온라인구좌	사)제어자동화시스템공학회

- 평생회원 회비는 당해년도 정회원 연회비의 15배를 기준으로 산출하고 있으며, 2002년도에는 평생회원 회비의 일부 금액이 할인되고 있으니 참고하여 주시기 바랍니다.
- 평생회원 회비는 3회 분납 가능합니다.

### ◎ 회비 및 논문구독비 납부 여부는 우리 학회 홈페이지에서 확인 가능합니다.

- 연회비 및 논문구독비 납부 후 홈페이지의 연회비납부자 구독비납부자 란에서 본인의 회비 납부여부가 가능하며, 만약 납부 후 일정기간 경과 후에도 계속 누락이 된 경우에는 본 학회로 연락하여 주시면 신속하게 해당 사실을 즉시 알려 드리도록 하겠습니다.