

초정밀 탄소나노튜브

원자힘 현미경 탐침 개발

글 | 안상정 _ 한국표준과학연구원 선임연구원 sjahn@kriss.re.kr

현재 우리 나라의 국부를 창출하고 있는 반도체 기술과 미래의 삶의 질 향상 및 국가산업에 크게 기여할 것으로 기대되어 차세대 핵심 기술로 주목받고 있는 나노 및 바이오 기술은, 국내 뿐만 아니라 전세계적으로 과학기술 기반을 확립하기 위하여 엄청난 투자가 이루어지고 있다. 이러한 산업 및 과학기술에 중요한 기반이 되는 것은 나노 영역에서의 형상과 물성을 측정할 수 있는 나노측정과학과 관련 장비 산업이라 할 수 있다.

극도로 미세한 나노 크기의 형상을 측정하고 물리적, 화학적 특성을 규명할 수 있는 나노 측정 장비로서는 전자주사현미경(SEM), 전자투과현미경(TEM)과 같이 전자를 이용하는 전자현미경과, 주사투과현미경(STM) 및 원자힘현미경(AFM)과 같이 근접나노탐침을 이용한 주사탐침현미경(SPM)으로 대별될 수 있다. 그 중에서도 특히 주사탐침현미경은 최근 20여 년간 비약적 발전을 이루었다. 진공, 공기, 액체 등 다양한 측정 환경에서 적용 가능하고, 역학적 특성, 전·자기적 특성, 화학적 활성 등 나노 영역에서 밝혀져야만

하는 물성의 대부분이 이 장비를 통하여 구현될 수 있기 때문에 이 장비의 동작원리 및 탐침, 스캐너, 검출기 등 각 주요 부품들이 앞다투어 개발되고 있다.

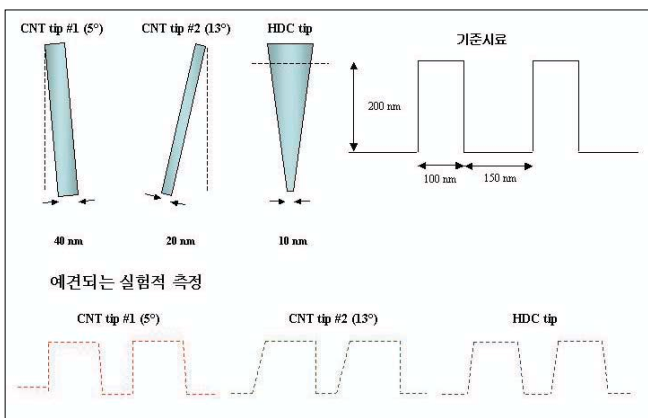
한편, 원자힘현미경(AFM)은 미세구조, 미세형상을 측정할 수 있는 연구장비로, 특히 나노영역의 연구에서 필수불가결한 연구장비이자 동시에 나노구조 제작도구로서 이용되고 있다. 기본적으로 원자간의 척력을 바탕으로 하여 그 측정이 이루어지며 그 밖에 인력, 마찰력, 정전기력, 자기력 등에 바탕을 둔 측정방법도 있다.

3차원 공간에서 탄소나노튜브를 자유자재로

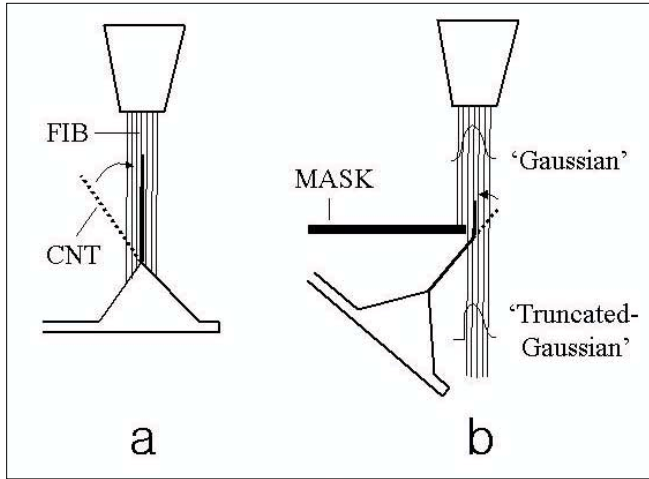
최근 한국표준과학연구원의 길이/시간 그룹의 나노탐침연구팀이 개발한 '집속이온빔(FIB)을 이용한 초정밀 탄소나노튜브 원자힘현미경 탐침 개발'은 이러한 요구사항에 부합되는 기술개발이자 동시에 개발된 나노탐침을 이용한 새로운 나노과학기술을 보장하는 신기술로서 현재 산업적 응용연구와 원리적 요소기술개발연구를 동시에 진행하고 있다.

개발된 초정밀 탄소나노튜브의 우수성을 확인하려면 기존의 원자힘현미경 탐침의 구조와 재료특성이 파악되어야 한다. 기존의 원자힘현미경 탐침은 실리콘이나 실리콘질화물 등을 이용하여 왔으나, 뿔 모양의 탐침 끝 구조 때문에 생기는 측정의 비정확성과 쉽게 마모되는 단점 때문에 나노크기의 형상측정에 한계를 지니고 있었다. 이러한 구조 및 재료의 한계를 극복하기 위하여 기둥모양으로 생긴 다중벽탄소나노튜브(MWCNT)를 부착시키는 연구개발이 진행되어 왔으나 기존의 제조법으로는 부착각도가 10도 이상이 되어 상용화제품으로는 미흡했다.

이러한 기존의 기술적 한계 때문에 생기는 측정의 비정확성을 예로 든 것이 <그림 1>이다. 그림의 하단에 표시된 측정결과는 표준시료에 대하여 가능한 세 가지 유형의 정밀탐침(5도의 돌출각도로



<그림 1> 표준시료에 대하여 가능한 세 가지 유형의 정밀탐침(5도의 돌출각도로 기울어진 CNT 탐침 #1, 13도의 돌출각도로 기울어진 CNT 탐침 #2, 뿔 모양으로 생긴 고밀도탄소 탐침)으로 측정하였을 경우에 예견되는 실험적 예상결과



〈그림 2〉 집속이온빔과 CNT 탐침과의 상관 모식도

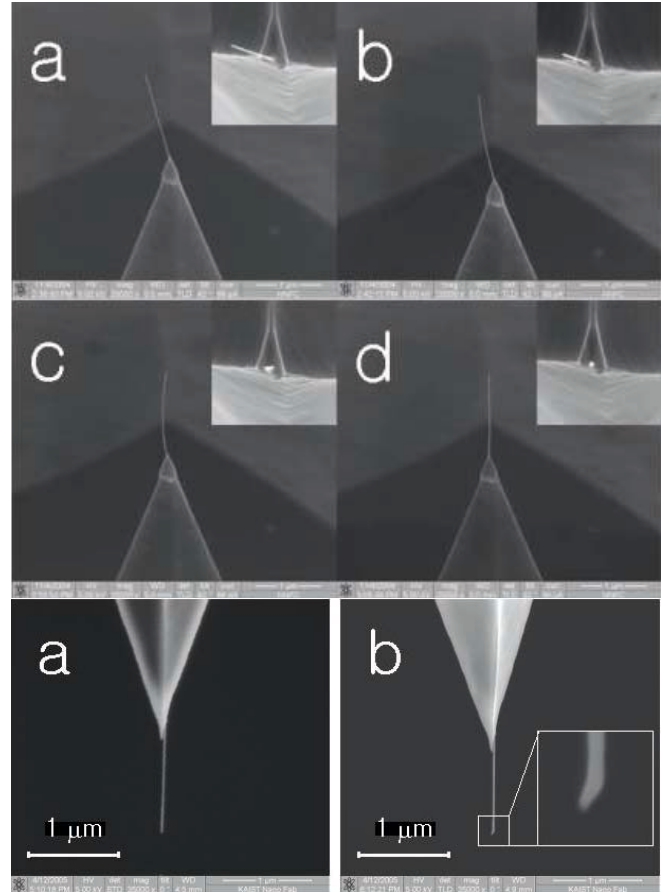
기울어진 CNT 탐침 #1, 13도의 돌출각도로 기울어진 CNT 탐침 #2, 뿔 모양으로 생긴 고밀도탄소 탐침)으로 측정하였을 경우에 예견되는 실험적 예상결과로서 탐침의 구조 및 돌출각도 제어가 얼마나 중요한가는 보여주는 것이다.

집속이온빔을 이용하여 세계 최고 수준의 정밀한 돌출방향을 갖는 다중벽 탄소나노튜브 원자힘현미경 개발 과정을 살펴보면, 나노조작기 개발이 그 근본이다. 이 기술은 전자주사현미경 내부에서 다중벽 탄소나노튜브를 원하는 위치에 부착하고 길이를 조절할 수 있는 세계 최고의 기술로서 수년 전에 이미 달성하였다. 하지만 연구팀은 이 기술 수준에 머무르지 않고, 최근 보다 정밀한 탄소나노튜브를 절단하는 방법을 집속 이온빔을 이용하여 찾던 중 이온빔과 탄소나노튜브의 상호작용에 의하여 탄소나노튜브가 특정방향으로 구부러지는 현상을 발견하게 되었으며, 이 현상을 바탕으로 탄소나노튜브를 3차원 공간에서 원하는 위치에, 원하는 각도로 구부러지거나 펴는 기술을 개발하였다.

고분해능 전자현미경 내부에서 진행되는 이러한 일련의 과정은 마치 자동차 공장에서 로봇이 철판과 철봉을 마음대로 자르고, 구부리고, 움직이고, 용접하여 원하는 모양을 만들어 내는 모습을 그대로 나노크기의 공장에서 나노조작기가 로봇과 같이 작업을 수행한다는 개념이다.

10nm 선폭 AFM 리소그래피 기술 개발에 이용

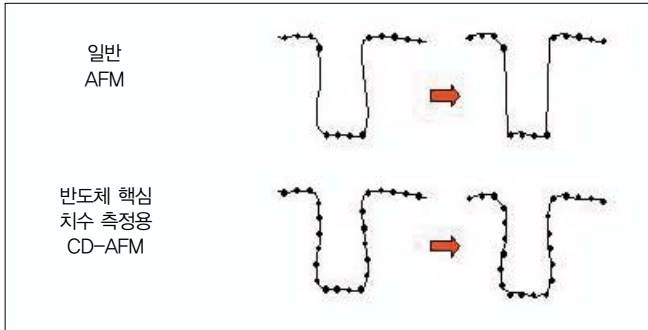
개발된 기술의 구체적인 적용 예로서 초정밀 탄소나노튜브 원자힘현미경 탐침이 제작되는 과정을 나타낸 것이 〈그림 2〉와 〈그림



〈그림 3〉 초정밀 탄소나노튜브 원자힘현미경 탐침 제작 과정

3〉이다. 〈그림 2〉는 집속이온빔과 CNT 탐침과의 상관 모식도를 나타낸 것이다. 〈그림 3-a〉는 CNT 탐침을 앞에서와 위에서 본 전자주사현미경 사진으로 상당한 돌출각도를 확인할 수 있다. 이러한 탐침을 위에서부터 집속이온빔을 일정량씩 주사하게 되면 〈그림 3〉의 b, c, d와 같이 점차적으로 돌출각도가 줄어들어 최종적으로 〈그림 3〉의 d의 내부그림에서와 같이 MWCNT가 점으로 표시되는, 즉 돌출각도 1도 이내로 구현되었음을 보여준다.

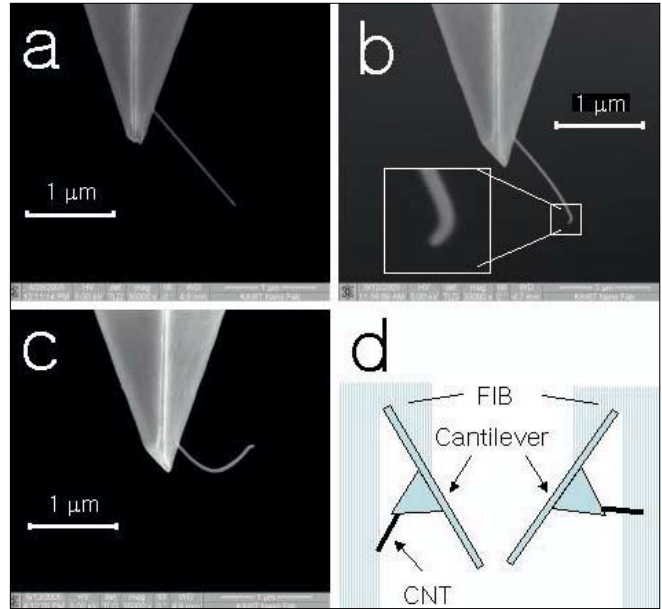
또한, MWCNT의 미세 나노영역에서 일부분만의 구조를 제어하는 기술로서 〈그림 2-a〉의 모식도와 같이 마스크를 이용하면 〈그림 3〉에서와 같이 수 나노미터만을 구부러지게 할 수도 있음을 보여준다. 이러한 미세조작기술은 〈그림 4〉와 같이 나노크기의 홈 속에서 그 측면까지도 정확하게 입어낼 수 있음을 보여주는 것으로써, 현재 반도체 생산라인에서 선폭과 단차 등의 핵심치수(CD)를 측정하는 장비(CD-AFM)의 탐침으로 사용될 수 있다. 이는 기존의 실리콘 탐침을 이용할 경우 가능한 현재의 핵심치수 70nm에서



(그림 4) 나노키기의 홈 속에서 그 측면까지도 정확하게 읽어낼 수 있다.

미래에 요구되는 30nm급의 핵심치수에 필요한 요소기술이 개발되었음을 보여주는 것이다.

더 나아가 나노구조물의 전·자기적, 물리·화학적, 역학적 물성을 측정하기 위한 다양한 구조의 탐침개발에 필요한 기술로서, 낫시 바늘 구조 또는 용수철 구조의 탐침이 제작될 수 있는 탄소나노튜브의 구조제어 기술의 일례를 (그림 5)에서 나타내고 있다. CNT 끝단을 일정한 방향으로 구부리고, 다른 특정 지점을 공간상의 또 다른 방향으로 제어함으로써 구현된 탐침을 (그림 5)의 c에



(그림 5) 낫시 바늘 구조 또는 용수철 구조의 탐침이 제작될 수 있는 탄소나노튜브의 구조제어 기술의 일례

서 볼 수 있다.

꿈의 소재라 불리는 탄소나노튜브는 최근 다양한 분야에서 응용 연구가 진행되고 있다. 예를 들면 작은 크기에도 불구하고 전류를 잘 통하게 할 수 있고 또한 증폭기나 스위치의 역할을 하는 반도체로 사용될 수 있으므로 첨단 전자제품에서의 집적된 전자소자로 사용하기 위한 미세소자의 재료, 현저히 높은 열적 안정성과 빛 효율을 가지기 때문에 꺼지지 않는 빛으로서의 광원 또는 광소자, 열적 기계적 안정성 때문에 험악한 환경에서 사용될 수 있는 미세 기계재료 등 특히 나노테크놀로지 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 탄소나노튜브의 재료적 우수성과 나노조작기를 이용하여 구현된 나노구조 제어기술들은 테라급 나노소자개발사업단의 '고속 AFM 리소그래피용 나노탐침개발 및 나노스캐너 평가 기술 개발' 과제에서 현재 추진하고 있는 10nm 선폭의 AFM 리소그래피 기술개발에 이용되고 있으며, 반도체 공정에서 나노소자의 핵심치수를 측정하기 위한 탐침개발, 그리고 SEM, TEM, FIB를 비롯한 각종 고분해능 장비의 시료를 나노영역에서 조절할 수 있는 새로운 나노조작기 개발 등에 이용되고 있다. ㉔



글쓴이는 서울대학교 화학과 졸업 후 동대학원에서 석사 및 박사학위를 받았다. 한양대학교 자연과학종합연구소 전임연구원, 미국 듀크대학교 기계재료과/컴퓨터학과 방문연구원을 지냈다.

용어설명

■ 나노탐침(Nanoprobe)

나노구조물의 형상을 측정하거나 또는 전도성, 전자기적 성질, 마찰력 등 나노구조물이 가진 특성을 측정하는데 사용되며, 나노키기의 접점을 갖는 창이나 칼, 또는 갈고리 같은 모양을 가진다. 측정하려는 대상의 특성에 따라 나노탐침의 특성이 부합되어야 한다.

■ 나노조작기(Nanomanipulator)

나노키기의 물체를 나노미터 영역에서 이동시키거나 회전시키고, 필요에 따라 그 물성을 측정하기 위하여 개발된 장치로서 대상물질 및 환경에 따라 여러 가지 종류가 있을 수 있다. 전자현미경내에서 탄소나노튜브를 원자현미경 탐침에 부착시키기 위하여 기본적으로 전자현미경에 존재하는 X, Y, Z, rotation, tilt가 가능한 스테이지에 두 개의 기둥을 세우고 각각의 병진이동을 위하여 각각 X, Y, Z 방향의 이동축, 그리고 회전이동을 위하여 각각 Rz, Rx 회전축을 부가하여 총 14축으로 이루어진 나노조작기가 개발되어 이용되고 있다.

■ 집속이온빔(Focused ion beam)

특정방법으로 발생된 원자 또는 분자들의 이온들을 전압 및 자장을 가하여 특정한 속도 및 방향으로 진행하는 이온들의 흐름이다. 이온빔이 물질과 만나면 상호작용을 통한 에너지 전달과정이 일어나며 형상변화를 일으킨다. 이번 연구에서는 갈륨(Ga) 이온을 이용하였다.