



# AFM을 이용한 기계적 물성 측정

이 글에서는 AFM을 이용한 미소 구조물의 기계적 물성 측정 방법 중 기계적 물성 측정을 위한 대칭형 AFM 캔틸레버의 고안, 제작, 보정 및 측정 방법을 중심으로 기술한다.

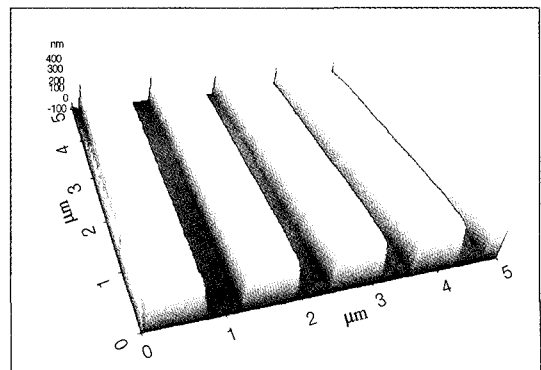
글 · 이 학 주 / 한국기계연구원, 책임연구원  
e-mail · hjlee@kimm.re.kr  
김 재 현 / 한국기계연구원, 선임연구원  
조 기 호 / 한국기계연구원, 연구원

Micro/Nano 단위의 CD(Critical Dimension)을 가지는 미소 구조물들은 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 또는 미소전자소자, 광전자 소자 등에서 매우 중요한 요소이다. 이들 소자들의 설계 및 제작 시에는 미소 구조물의 탄성계수, 항복 강도, 피로 강도, 잔류 응력 등 여러 가지 기계적인 특성들이 요구되지만, 이들을 측정하는 것은 쉽지 않은 일이다. 일반적으로 미소 구조물은 같은 소재의 거대 구조물(bulk structure)과는 다른 기계적인 물성을 지니고, 미소 구조물의 크기 및 미세 조직에 따른 변화가 심하다. 따라서 실제 소자에서 사용되는 미소 구조물과 같은 형상, 크기, 제작 공정으로 시편을 만들고, 그 기계적 물성을 측정해야 하는 난제를 지닌다.

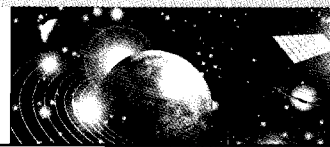
거대 시편에 대한 기계적 물성 시험 방법 및 절차는 ASTM, KS 등 각종 시험 규격을 통하여 잘 정립되어 있다. 그러나 미소 시편에 대한 기계적 물성 시험은 세계적으로 아직 완전히 정립되지 못한 상태에 있으며, 나노압입 시험과 같은 몇몇 분야에서 표준화 작업이 이루어지고 있는 중이다. 미소 구조물의 기계적 거동을 측정하기 위해서는 여러 가지 문제들을 해결하여야 한다. 미소 구조물에 하중을 가할 수 있는 미소 구동기, 매우 높은 분해능 및 민감도를 가지는 하중/변위 센서, 미소 구조물을 조작하고 정렬하는 장치, 미소 구조물을 고정하는 방법 등이 해결하여야 할

주요 문제점이다. 여러 연구자들이 미소 구조물의 기계적 거동을 측정하는 기술들을 연구하고 있으며, 이들 중 몇몇 기술은 가까운 장래에 표준화되어 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

AFM(Atomic Force Microscope)은 본래 시편의 3차원적인 표면형상을 정확하게 측정하기 위하여 고안되었으며, 현재 시편 표면의 원자구조까지 관찰할 수 있는 AFM이 상용화되어 있다. AFM의 기본적인 원리는 시편과 AFM 팁(tip) 사이의 원자스케일 상호작용력을 측정하는 것으로서 매우 민감한 하중 센서 및 구동기로 이루어진 시스템으로 이해할 수 있다. 미소 구조물의 기계적인 거동을 측정하는 데에 필수적인 요소 중 하나는 바로 미소 하중을 고 분해능으로 정확하게 측정하는 것이며, 이런 면에서 AFM은 매우 유



AFM으로 측정된 Quartz 미소 구조물의 형상



용한 미소 구조물 기계적 물성 측정 장치로서의 가능성을 가지고 있다.

이하에서는 AFM의 동작 원리와 AFM을 이용하여 기계적인 물성을 측정할 때에 발생하는 문제점을 간단하게 설명하고, 이를 해결하기 위한 방안으로 대칭형 AFM 캔틸레버의 고안, 제작, 보정 및 측정 방법 및 측정 결과를 기술한다.

### AFM 동작 원리

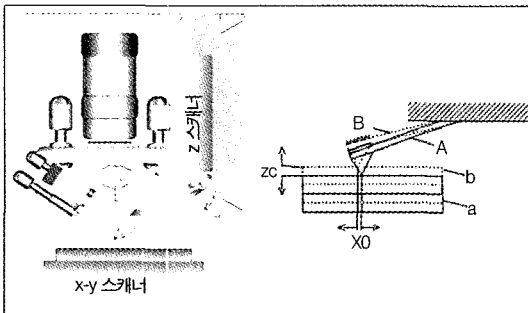
AFM은 크게 스캐너(scanner), 탐침(probe), 변위관측장치(detector)의 세 부분으로 구성되어 있다. 측정하고자 하는 시편은 압전형(piezoelectric type)으로 구동되는 XY-스캐너 위에 고정되며, Z-스캐너에 고정된 탐침은 시편 표면에서의 미세한 상호작용력을 측정한다. 탐침은 수 나노미터 직경의 미세한 팁이 강성이 매우 작은 캔틸레버의 끝단에 부착되어 있는 형태이다. 팁에 작용하는 원자스케일의 힘은 AFM 캔틸레버의 변형을 유발하며, 이 변형은 레이저와 PSPD(Position Sensitive Photo Diode)로 구성된 변위 관측장치를 이용하여 측정된다. 시편의 표면 형상을 측정하기 위해서는, AFM

캔틸레버가 일정량만큼 변형되도록 Z-스캐너를 피드백(feedback) 제어하고, 피드백량을 기록하여 시편의 3차원 표면 형상 정보로 이용한다.

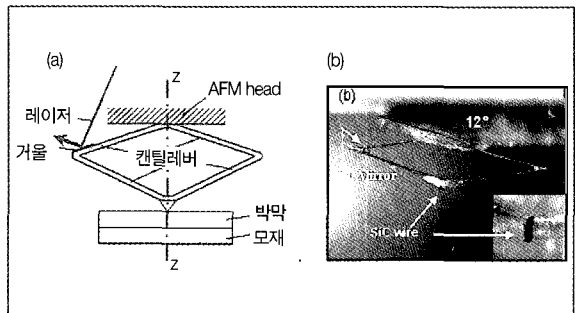
AFM은 본래 표면 형상 측정을 위하여 개발되었기에 때문에, 측정되는 하중의 정량화에는 약간의 문제를 가질 수도 있다. 또한 일반적인 AFM 캔틸레버는 비대칭적인 구조를 지니고 있으므로, 물성시험을 위해 하중을 부가하면 캔틸레버의 변형에 의해 탐침이 Z축으로만 이동하지 않고, X축 또는 Y축으로 이동하는 현상이 발생한다(탐침의 수평 운동). 이외에도 AFM으로 기계적인 물성을 측정하는 데에는 몇 가지 문제들이 있으며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 하중 부가 시 AFM 캔틸레버의 수평 운동 문제
- 2) AFM 캔틸레버의 강성(stiffness) 보정 문제
- 3) PSPD와 압전 스캐너의 비선형성과 이력(hysteresis) 보정 문제

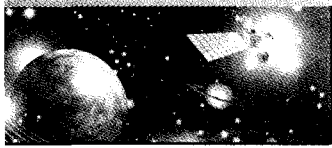
여기서는 AFM 캔틸레버의 수평 운동 제거 방법을 중심으로 새로운 AFM 캔틸레버 설계 및 제작, 강성 보정 방법에 대하여 기술한다.



상용 AFM의 구조(<http://www.psia.co.kr>)와 물성 시험시 발생하는 캔틸레버의 수평운동



(a) Z축에 대칭적인 AFM 캔틸레버, (b) 제작된 AFM 캔틸레버



## 대칭형 캔틸레버

AFM 캔틸레버의 수평 방향 운동은 기존의 캔틸레버가 대칭적인 형상이 아닌 점에 기인한다. 따라서 그림과 같이 Z-축 방향에 대하여 대칭 구조인 AFM 캔틸레버를 고안할 수 있다. 기존의 상용 AFM에 장착될 수 있도록 캔틸레버의 치수, 레이저 반사 거울의 위치 등을 선정하여 설계하였다. 이러한 AFM 캔틸레버는 일반적인 기계 가공으로 제작하기가 까다로운 치수 및 형상을 지닌다. 그림에 나타난 캔틸레버는 두께가  $100\mu\text{m}$ 인 스테인리스강(stainless steel) 판을 Nd-Yag 레이저로 절단하는 방식으로 제작되었다. 제작된 AFM 캔틸레버의 한 쪽 끝단에는 거울면을 지닌 구리 박막을 접착시켜서 변위 측정용 레이저 광에 대한 반사경 역할을 하도록 하였다. 제작된 AFM 캔틸레버에는 압입시험 용 다이아몬드 팁, 형상 측정용 실리콘 팁, 선형 접촉 하중을 가하기 위한 와이어 팁 등 여러 종류의 팁을 부착할 수 있다. 여기서는 AFM

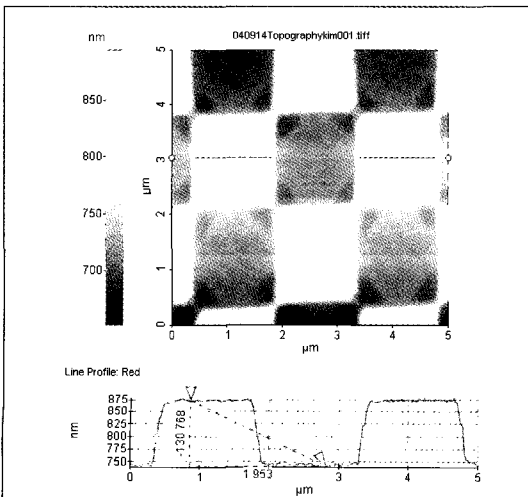
으로 띠 굽힘 시험(strip bending test)를 수행할 목적으로 와이어 팁을 장착하였다.  $70\mu\text{m}$  지름의 SiC 와이어를  $100\mu\text{m}$  길이로 절단하여 캔틸레버의 끝 모서리에 순간접착제로 부착하였다. 최종적으로 완성된 AFM 캔틸레버는 AFM 헤드에 갖고 있는 자체의 경사각을 보상하기 위하여, 12도의 경사각을 가지는 강철판(steel plate)에 부착되었다. 새로 제작된 AFM 캔틸레버는 Z축에 대하여 대칭적인 형상을 가지므로, Z축 방향으로 하중을 가하는 동안 X 축 또는 Y축 방향으로 이동하는 기존 AFM 캔틸레버의 수평 운동 문제를 근본적으로 해결할 수 있다.

## AFM 보정 절차

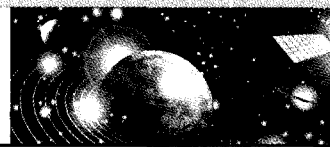
앞서 설명되었듯이 상용 AFM에서 얻어지는 하중은 정량적으로 의미 있는 값을 얻기가 매우 어렵다. 기계적인 물성 측정을 위해서는 AFM에서 정량적인 하중 및 변위를 측정할 필요가 있으므로 몇 가지 AFM 보정 절차가 요구된다.

먼저, 캔틸레버를 Z-방향 구동하는 Z-스캐너의 변위 보정이다. 이러한 보정은 기존의 상용 AFM에서도 널리 이용되는 것으로서, 알려진 형상을 지닌 표준 격자 시편의 형상을 측정하는 방식이다. 한 예로, 여기서는 높이가  $130\text{nm}$ 이고 주기가  $3\mu\text{m}$ 인 사각 표준 격자를 이용하였다. 그림에는 AFM으로 측정된 표준 격자 시편의 형상 이미지와 적색선 위에서의 Z-방향 높이 변화가 나타나 있다. 이 격자 시편의 형상 측정 결과가 이미 알려진 형상 정보와 일치하도록, Z-스캐너의 변위를 보정한다.

두 번째는 PSPD의 감도(sensitivity) 보정이다. 시편과 AFM 캔틸레버 팁 사이의 상



표준 격자 시편의 표면 형상과 단면 분석 데이터



호작용력은 캔틸레버의 Z-방향 변위로부터 측정된다. 캔틸레버의 Z-방향 변위는 캔틸레버 끝단에서 반사된 레이저 광의 위치를 PSPD를 통하여 검출함으로써 알아낸다. 상용 AFM에서는 네 개의 구역으로 나누어진 PSPD를 자주 이용하며, PSPD에서 얻어진 전압 차 신호로부터 캔틸레버의 변위를 결정한다. 따라서 새로운 캔틸레버가 장착될 때에는 반사된 레이저 광의 위치와 비례하는 PSPD의 전압 신호와 캔틸레버의 변위 사이의 보정이 필요하며, 이를 PSPD의 감도 보정이라 한다.

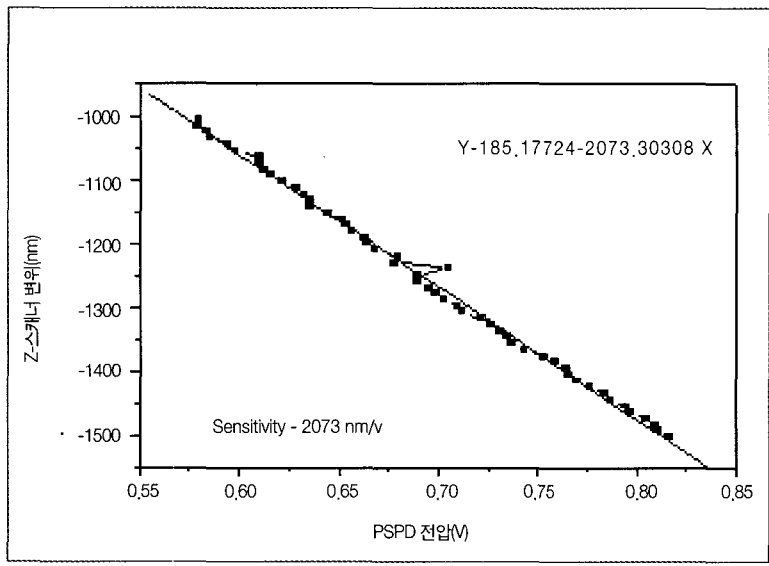
장착된 AFM 캔틸레버를 매우 경도가 높은 시편 표면에 누르면, AFM 캔틸레버의 변위 변화량과 Z-스캐너의 변위 변화량은 정확하게 일치한다. 따라서 경도가 높은 시편 표면에 AFM 캔틸레버를 누르면서, Z-스캐너 변위와 PSPD 전압 신호를 측정하면, AFM 캔틸레버와 PSPD 전압 신호 사이의 관계를 얻을 수 있다. 그림에서 그래프의 기울기 2073

nm/V가 제작된 AFM 캔틸레버에 대한 PSPD의 감도이다.

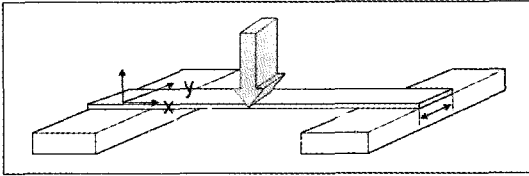
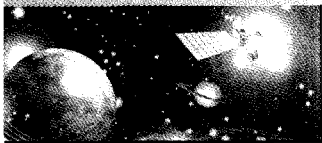
세 번째는 제작된 AFM 캔틸레버의 강성 보정 (stiffness calibration)이다. micro/nano 또는 pico-스케일의 기계적 물성 측정 실험을 위해서는 가능한 한 작은 캔틸레버 강성을 요구하며, 이러한 작은 강성은 일반적인 방법으로 보정하기가 쉽지 않다. 참고로, 시편의 표면 형상을 접촉 또는 비접촉식으로 측정하는 데에 이용되는 상용 AFM 캔틸레버의 강성 상수(또는 스프링 상수)는 대략 0.2~40N/m 범위를 갖는다.

여기서는 일관된 강성을 가지는 금 표준 구조물을 MEMS 공정으로 제작하고, 하중이 정확하게 보정된 상용 나노인덴터를 사용하여 표준 구조물의 강성을 측정하였다. 그리고 상용 나노인덴터에서 측정된 표준 구조물의 강성과 제작된 AFM 캔틸레버를 이용하여 AFM에서 측정된 표준 구조물 하중-변위 관계를 비교하였다. AFM에서 측정된 표준 구

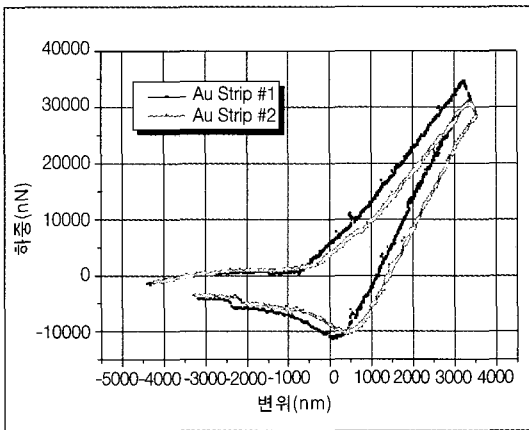
조물의 하중-변위 관계는 AFM 캔틸레버의 강성과 표준 구조물의 강성이 중첩된 결과이다. 표준 구조물의 강성은 이미 상용 나노인덴터에서 측정되어 있기 때문에, 이를 고려하여 AFM에서 측정된 표준 구조물의 하중-변위 관계에서 AFM 캔틸레버의 강성을 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 측정된 대형 AFM 캔틸레버의 강



PSPD 전압과 Z-스캐너 변위 곡선



(a) 띠 굽힘 시험의 개략도



(b) 힘보정 AFM을 이용한 자유지지 금 박막 구조물의 띠굽힘시험 결과

성은 19.7N/m였다.

### 띠 굽힘 시험

앞서 기술한 과정을 통하여 보정된 AFM을 힘 보정 AFM(force calibrated AFM)이라 부르며, 이를 이용하여 금 박막의 띠 굽힘 시험을 수행하였다. 띠 굽힘 시험의 개념은 그림과 같다. 모재위에 박막을 증착하고, 모재의 일부와 박막의 일부를 식각함으로써 그림과 같은 자유지지(free-standing) 박막 구조물을 얻는다. 이 박막 구조물에 하중을 가하고, 그에 따른 변위를 측정함으로써 박막 구조물의 기계적인 물성을 측정할 수 있다. 이러한 자유지지 박막 구조물은 그 두께와 폭이 작아질수록 더 작은 하중 및 변위가 발생하게 되며, 기존의 기계적 측정 장비로는 물

성을 측정하기가 쉽지 않다.

여기서는 앞서 제시한 대칭적 AFM 캔틸레버와 보정 절차를 통하여 힘 보정 AFM 시스템을 구성하고, 이를 이용하여 두께 0.1 $\mu\text{m}$ , 폭 10 $\mu\text{m}$ , 길이 400 $\mu\text{m}$ 인 자유지지 금 박막 구조물의 물성을 측정하였다. 측정된 금 박막 구조물의 하중-변위 관계는 몇 가지 가정을 통하여 응력-변형률 관계로 변환할 수 있으며, 이로부터 탄성계수, 강도 등의 기계적인 물성을 얻게 된다.

이제까지 AFM을 사용하여 micro/ nano 스케일의 기계적 물성을 측정하는 것과 관련된 몇 가지 난제들을 설명하고, 대칭형 AFM 캔틸레버와 AFM 보정 절차를 통한 힘 보정 AFM을 구성 하는 방법에 대하여 기술하였다. 그리고 한 가지 예로서, 구성된 힘 보정 AFM을 이용하여 자유지지 금 박막 미소 구조물에 대한 하중-변위 관계를 측정하였다. 측정된 하중-변위 관계는 적절한 데이터 처리 절차를 거치면 기계적인 물성으로 변환될 수 있다. AFM은 매우 우수한 하중 및 변위 측정 기능이 있으므로, 미소 구조물의 기계적 물성 측정에 널리 활용될 가능성이 있다. 그러나 앞서 언급한 압전형 스캐너의 비선형성과 이력성(hysteresis), PSPD의 비선형성 등의 해결해야 할 문제들이 여전히 남아 있는 상태이다. 만일 이러한 문제들이 해결된다면, AFM을 이용한 기계적 물성 측정 기술은 미소 구조물의 물성 측정뿐만 아니라, 나노 구조물, 생체 분자 등 다양한 대상의 물성 측정에 응용될 수 있을 것으로 전망된다.