

# 비접촉 원자간력 현미경의 탐침 캔틸레버 진동 특성 및 측정 성능 평가

## Vibration Characteristics and Performance of Cantilever for Non-contact Atomic Force Microscopy

박준기\* · 권현규\*\* · 홍성욱†

June-Ki Park, Hyun-Kyu Kwon and Seong-Wook Hong

(2004년 1월 9일 접수 : 2004년 5월 28일 심사완료)

**Key Words** : Atomic Force Microscope(원자간력 현미경), Cantilever(캔틸레버,외팔보), Non-contact Mode(비접촉 모드), Topography(형상), Finite Element Modeling(유한요소모델링), Natural Frequency(고유진동수)

### ABSTRACT

This paper presents the vibration analysis and the performance evaluation of cantilevers with probing tips for non-contact scanning probe microscopy. One of the current issues of the scanning probe microscopy technology is to increase the measurement speed, which is closely tied with the dynamic characteristics of cantilevers. The primary concern in this research is to investigate the relation between the maximum possible speed of non-contact scanning probe microscopy and the dynamic characteristics of cantilevers. First, the finite element analysis is made for the vibration characteristics of various cantilevers in use. The computed natural frequencies of the cantilevers are in good agreement with measured ones. Then, each cantilever is tested with topographic measurement for a standard sample with the scanning speed changed. The performances of cantilevers are analyzed along with the natural frequencies of cantilevers. Experiments are also performed to test the effects of how to attach cantilevers in the piezo-electric actuator. Finally, measurement sensitivity has been analyzed to enhance the performance of scanning probe microscopy.

### 1. 서론

시료와 팁사이의 원자력을 이용하여 시료의 표면형을 측정하는 것을 원자간력 현미경(atomic force microscope, AFM)이라 한다. 원자간력 현미경에서는

측정을 위해 캔틸레버(cantilever)라고 불리는 작은 막대가 시료의 표면에 접근하게 된다. 이 때 캔틸레버 끝에 붙어있는 탐침 끝의 원자와 시료표면의 원자 사이에 서로의 간격에 따른 인력이나 척력의 원자력이 작용하게 된다. 이 힘에 의해 캔틸레버가 아래 위로 휘어지게 되며, 이 휘는 정도를 측정하여 표면형을 만들게 된다.<sup>(1~4)</sup> 원자간력 현미경은 반도체 제조 공정에서 웨이퍼 표면의 흠을 찾는 등의 마이크로 크기에서 나노 단위의 형상을 얻기 위해 응용된다. 앞으로 나노기술의 발전이 빨라질수록 원자간력 현미

† 책임저자 : 정회원, 금오공과대학교 기계공학부

E-mail : swhong@kumoh.ac.kr

Tel : (054)467-4214, Fax : (054)467-4472

\* 금오공과대학교 대학원 기전공학과

\*\* 금오공과대학교 기계공학부

경의 응용을 더욱 확대될 것으로 기대된다.<sup>(3-5)</sup>

원자간력 현미경의 캔틸레버는 시료 표면에 가해지는 힘을 결정해주는 요소로 시스템 전체의 분해능을 결정하는 중요한 요소이다.<sup>(1)</sup> 캔틸레버와 여기에 붙어있는 탐침은 포토리소그래피 기술을 이용하여 실리콘이나 실리콘 나이트라이드로 만들어지며 이렇게 만들어진 마이크로 단위의 캔틸레버의 특성은 표준 기계 시험에 의해서 쉽게 결정될 수 없다. 또한 몇 마이크로 두께의 캔틸레버는 외부적 요인에 크게 영향을 받을 수 있어 그 특성치들이 불확실한 경우가 많다.<sup>(1-4)</sup>

본 연구에서는 비접촉 원자간력 현미경에서 사용되는 캔틸레버의 동적 특성을 모델링하고 해석하였으며 이를 기초로 실제 측정에 미치는 영향을 분석하였다. 특히 캔틸레버 제작업체에서 제공하는 데이터와 실제 캔틸레버의 차이를 고려하여 캔틸레버 형상을 실측하여 모델링 및 해석을 실시함으로써 해석의 신뢰성을 높였다. 한편 최근 원자간력 현미경이 생산공정 등에 적용되면서 측정의 고속화가 중요한 현안으로 인식되고 있다. 그러나 캔틸레버의 특성과 측정 고속화에 관련성에 대한 실험적 연구는 거의 찾을 수 없다. 따라서 실제 사용되는 대표적인 형식의 캔틸레버를 중심으로 측정 속도 측면의 성능을 분석함으로써 캔틸레버의 고유진동수가 비접촉 측정에서의 측정속도에 미치는 영향을 확인하였다. 또한 캔틸레버의 측정 민감도를 새롭게 정의하였으며 캔틸레버의 특성에 따른 민감도를 실험적으로 비교 분석하여 캔틸레버의 특성을 향상시키기 위한 방안을 검토하였다.

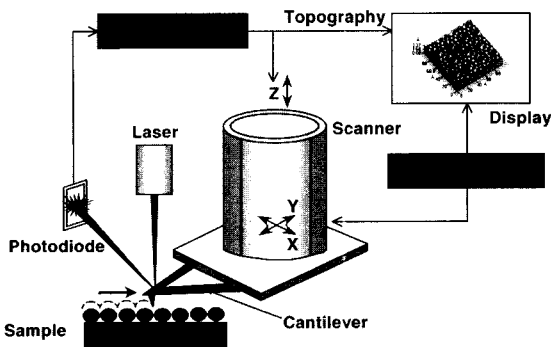


Fig. 1 Schematic diagram for the atomic force microscopy<sup>(5)</sup>

## 2. 원자간력 현미경의 탐침 외팔보 모델링

### 2.1 원자간력 현미경

원자간력 현미경에서는 마이크로머시닝에 의해 제조된 캔틸레버(cantilever)라고 불리는 작은 막대가 사용된다. 캔틸레버 끝 부분에는 뾰족한 탐침이 달려 있으며, 이 탐침의 끝은 원자 몇 개 정도의 크기로 매우 첨예하다. 이 탐침을 시료 표면에 접근시키면 탐침 끝의 원자와 시료표면의 원자간의 간격에 따라 반 데르발스력이라 불리는 원자간 인력 혹은 척력이 작용한다. 여기서 표면 형상 측정을 위해 원자 사이의 척력을 사용하는 측정 방법을 접촉식 방법(contact mode)이라 하고, 인력을 사용하는 측정 방법을 비접촉식 방법(non-contact mode)이라고 한다. 원자간에 상호 작용하는 힘은 시료의 전기적 성질에 관계없이 항상 존재하므로 원자간력 현미경을 이용하더라도 체나 부도체 모두를 높은 분해능으로 표면을 관찰할 수 있다.<sup>(1,2,5)</sup>

접촉식 방법의 원자간력 현미경에서는 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 Fig. 1에서 보여지는 것처럼 레이저 광선을 캔틸레버에 비추고 캔틸레버 윗면에서 반사된 광선의 각도를 포토다이오드(photodiode)를 사용하여 측정한다. 이렇게 하면 바늘 끝이 0.01 nm 정도로 미세하게 움직이는 것까지 측정해낼 수 있다.<sup>(2)</sup> 이 때 바늘 끝의 움직임을 압전구동기(piezoelectric actuator)에 되먹임(feedback)하여 캔틸레버가 일정하게 휘도록 유지시키면서 시료의 표면을 주사(scanning)하면 탐침 끝과 시료 사이의 간격도 일정해지므로 시료의 형상을 측정해낼 수 있다. 이 방법에서는 캔틸레버의 강성만이 측정에 영향을 주게 된다.<sup>(6-9)</sup>

반면 비접촉식 방법의 원자간력 현미경에서도 Fig. 1과 마찬가지로 형식의 측정시스템을 이용하게 되지만 원자 사이의 인력의 크기가 0.1- 0.01 nN 정도로 너무 작아서 접촉식과 같은 방법으로는 캔틸레버가 휘는 각도를 잴 수가 없다. 때문에 접촉식 방법과는 다르게 캔틸레버의 고유진동수 변화를 이용하여 측정한다. 따라서 캔틸레버의 고유진동수가 측정에 직접적

인 영향을 미치게 된다.<sup>(9)</sup>

## 2.2 비접촉 원자간력 현미경 측정 방법

앞서 기술한 바와 같이 비접촉 방법에서는 원자 사이의 인력을 사용하는데 그 힘의 크기는 0.1~0.01 nN 정도로서 시료에 인가하는 힘이 접촉 방법에 비해 훨씬 작아 손상되기 쉬운 부드러운 시료를 측정하는데 유리하고 탐침의 수명도 높일 수 있다. 그러나 원자간 인력의 크기가 너무 작아 캔틸레버가 휘는 각도를 직접 측정하는 방식이 아니라 원자간 인력의 구배에 의한 캔틸레버 고유진동수 변화를 측정하는 방식으로 사용하게 된다. 즉, 순수한 인력에 의한 탐침과 시료의 상호 작용만을 고려한다면 비접촉 원자간력 현미경 측정법에서는 힘 구배(force gradient,  $dF/dz$ )를 이용하여 표면형상을 얻을 수 있다.

캔틸레버의 스프링 상수(spring constant)가  $k_0$ 일 경우, 탐침이 시료표면 가까이 접근했을 때 탐침에 반 데르 발스력이 작용하기 때문에 캔틸레버의 스프링 상수는 원래의 값( $k_0$ )에서 새로운 스프링 상수  $k_{eff}$ 로 변화되며, 다음과 같이 표현된다.

$$k_{eff} = k_0 - \frac{dF}{dz} \quad (1)$$

여기서는  $z$ 는 탐침과 표면간의 거리이며, 탐침과 표면간의 반 데르발스력  $F$ 는 척력일 때를 양의 값으로 하였다. 인력이 작용할 경우 반 데르발스력의 특성에 의해  $dF/dz > 0$ 가 되므로,  $k_{eff}$ 는  $k_0$ 보다 작아진다. 이처럼 탐침과 시료 사이에 상호 작용에 의한 스프링 상수의 변화를 측정할 수 있다면 표면형상을 얻을 수 있게 된다. 비접촉 원자간력 현미경에서는 이와 같은 변화를 간접적으로 알아내기 위해 캔틸레버의 고유진동수변화를 측정하는 방법을 활용하고 있다.

원자간력 현미경에서 사용되는 캔틸레버의 고유주파수는 근사적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eff}}{m}} \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 캔틸레버의 등가질량이다. 탐침과 시료 사이의 거리가 가까워지면 원자간력의 특성에 의해  $dF/dz$ 가 증가하게 된다. 따라서 인력이 작용되는 구간에서는  $k_{eff}$ 가 줄어들어 캔틸레버의 고유진동수는 감소한다. 이와 같은 변화를 측정하기 위해 고유진동수의 변화를 진폭 변화에 대응시켜 측정하는 방법이 많이 사용되고 있다.

비접촉 원자간력 현미경에 의한 측정을 하기 위해서는 먼저 캔틸레버 자체의 주파수 응답을 측정하게 된다. 캔틸레버의 고정단을 압전구동기로 가진시키면서 캔틸레버의 진폭을 측정(lock-in amp사용)하여 Fig. 2와 같이 주파수 응답을 측정한다. 실제 탐침을 시료의 표면에 근접시키게 되면 Fig. 3에 볼 수 있는 바와 같이 고유진동수가 변하게 되고 전체적으로 진폭의 변화가 발생하게 된다.

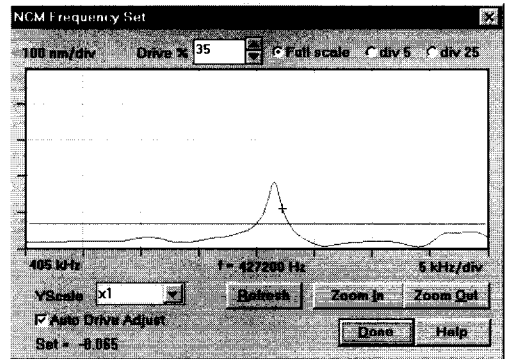


Fig. 2 A typical example of measured frequency response function of a cantilever

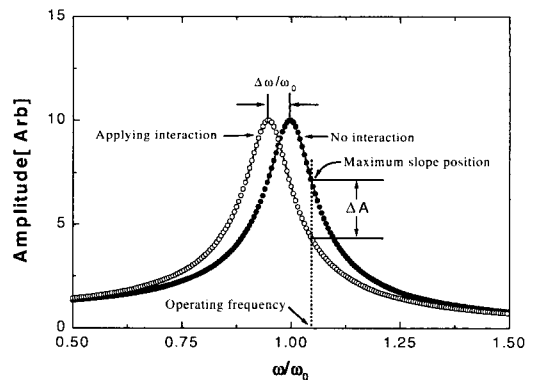


Fig. 3 Conceptual plot for the indirect measurement of natural frequency change using amplitude change<sup>(5)</sup>

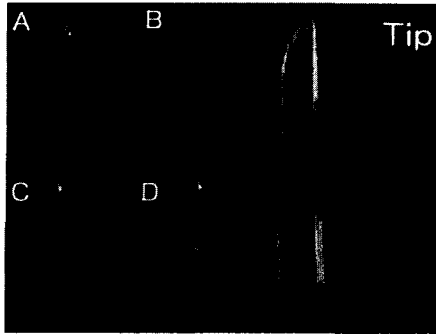


Fig. 4 SEM images of non-contact cantilevers



Fig. 5 3D model for an A-type cantilever

Table 1 Properties of silicon

Density(g/cm <sup>3</sup> )	2.33
Young's mod.(GPa)	112
Poisson' ratio	0.28

Table 2 Comparison of the first natural frequencies from data sheet and computation with given geometry data

A	80	80.6
B	90	93.8
C	280	288.2
D	320	360.7

이 때 특정주파수에서 진폭의 변화를 일정하게 유지할 수 있도록 시료와 탐침 사이의 거리를 유지시키면서 캔틸레버를 주사시키면 표면형상을 측정할 수 있다. 일반적으로 Fig. 2에서 보는 바와 같이 자유상태의 고유진동수 보다 높은 주파수가 선정 된다. 특히 주파수 응답 함수에서 주파수에 따른 변화가 큰

위치, 즉 주파수에 대한 미분치가 큰 위치의 선정이 측정 정밀도를 높이는 데 효과적이다.

### 3. 탐침 외팔보의 모델링 및 동적 해석

#### 3.1 탐침 외팔보의 모델링

비접촉 캔틸레버의 고유진동수는 측정에 큰 영향을 미치므로 정확히 평가되어야 하지만 식 (2)와 같은 형식으로 실제로 사용되고 있는 캔틸레버의 고유진동수를 구할 수 없다. Fig. 4은 SEM으로 찍은 비접촉 캔틸레버이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 사용되고 있는 캔틸레버는 주사방향과 비틀림방향의 강성을 높이기 위해 단순보가 아니라 V자 형태가 일반적이다. 따라서 보다 정교한 해석을 위해서는 형상에 대한 엄밀한 모델링이 필요하다.

본 연구에서는 캔틸레버에 대한 보다 정확한 모델링 및 해석을 위해 CATIA를 사용하였다.<sup>(10)</sup> 대부분의 상용코드는  $\mu\text{m}$  크기의 모델링을 지원하지 않아  $1\ \mu\text{m}$  크기를  $1\ \text{mm}$ 로 대응시켜서 모델링 하였으며, 이때 고유진동수에 대한 변환계수는 1000이 된다. Fig. 5는 비접촉 캔틸레버 A 타입의 모델링 결과이다. 메시는 10 절점 4면체 요소를 사용하였으며 절점수는 6809개, 요소수는 3670개를 이루고 있다.

#### 3.2 탐침 외팔보 동특성 해석 및 검증

탐침 캔틸레버 모델링 및 해석의 타당성을 검증해 보기 위해 캔틸레버 제조사에서 제공하는 비접촉 캔틸레버의 데이터를 근거로 모델링하여 그 사양이 제시하고 있는 특성과 비교하였다. Table 1은 캔틸레버 재료인 실리콘의 물성치를 보여주고 있다. 제조사에서 제공되는 형상에 근거하여 캔틸레버를 모델링 하였으며 고유진동수와 끝 단에서의 강성을 계산하였다. 해석을 위한 경계조건으로는 캔틸레버가 결합되는 끝 단을 고정(clamp)시켰다. 스프링 상수는 모델의 탐침 끝에 단위크기의 힘을 가하여 얻어지는 캔틸레버의 변형량을 역수를 취하는 방식으로 계산되었다. 스프링 상수의 변환계수는 1/1000이다.

Table 2와 3은 제조사에서 제공하는 고유진동수, 강성과 모델을 통해 계산한 결과를 비교해서 보여주고 있다. 4가지 모델에 대해 계산해본 결과 고유진동수 및 스프링상수 모두 계산결과와 제공된 데이터가 상당히 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 캔틸레버의 동특성에 따른 성능 평가

##### 4.1 고유진동수 측정 및 해석

앞서 논의한 방식으로 실험에 사용된 캔틸레버의 고유진동수 해석을 실시하였다. 고유진동수는 모두 6차 모드까지 구하였다. 대표적으로 A타입의 6차까지 고유진동수 및 고유 모드 계산 결과를 Fig. 6에서 확인 할 수 있다. B, C, D타입의 고유진동수 해석 결과에서도 6차까지의 모드형상이 A타입과 유사한 특성을 보이는 것으로 확인되었다. 이상의 결과에서 1차 모드는 캔틸레버가 상하의 굽힘변형만이 관측되고 있으며 2차이상의 모드에 비해 월등히 낮은 진동수를 가지고 있음을 볼 수 있다.

캔틸레버의 고유진동수를 실험적으로도 측정하였다. 이미 앞 절에서 설명한 바와 같이 비접촉 방식의 측정에서는 반드시 장착된 캔틸레버의 주파수 응답을 먼저 측정하도록 되어있다. 따라서 이 주파수 응답을 통해 캔틸레버만의 고유진동수를 측정할 수 있다. Table 4에는 측정된 고유진동수와 모델링을 통해 계산한 고유진동수를 비교해서 보여주고 있다. 보다 정확한 모델링을 위해 실제 사용된 캔틸레버를 SEM (scanning electron microscope)을 이용하여 그 형상을 측정함으로써 정확한 치수의 모델링을 하였다. 실험값은 각 타입의 캔틸레버를 임의로 5개를 선택하여 얻은 값들의 평균을 취하였다. Table 4에서 확인할 수 있듯이, C, D 타입의 경우 실험값과 해석 값이 매우 잘 일치함을 알 수 있으나 A와 B의 경우는 15% 정도의 차이를 보이고 있다.

한편 미탑재(unmounted) 캔틸레버와는 달리 사용의 편의를 위해 플라스틱 캐리어(carrier)에 캔틸레버가 장착되어 나오는 탑재(mounted)형 캔틸레버를 비교해보았다. Fig. 7에서 두가지 방식을 비교해서 보여주고 있다. 탑재형의 경우 흰색 플라스틱 캐리어에 흑색으로 보이는 캔틸레버 세트가 접촉제로 부착된 상태이며 미탑재형의 경우는 클램프 장치를 이용하여 캔틸레버 세트의 탈착이 가능하도록 구성되어 있다. 동일한 캔틸레버를 포함하고 있는 미탑재 캔틸레버와 탑재 캔틸레버의 C, D 타입의 고유진동수를 측정하였다. 각 열 개의 캔틸레버의 고유진동수를 측정하여 평균을 취한 값을 보면 미탑재 캔틸레버의 경우 C, D 타입이 435.7 kHz와 449.4 kHz 의 높은 고유진동

수를 가지는 반면에 탑재의 경우는 284.8 kHz와 344.8 kHz의 상대적으로 낮은 값을 가졌다. 미탑재와 탑재의 차이에 의해 동일한 캔틸레버에 대해서도 고유진동수에 큰 차이를 보이고 있다. 이는 캐리어의 접합부에서의 강성이 영향을 미친 것으로 추정된다.

##### 4.2 Topography 측정에 의한 평가

캔틸레버의 고유진동수에 따른 측정속도 성능의 변화를 관찰하기 위해 실험을 실시하였다. 비슷한 영역

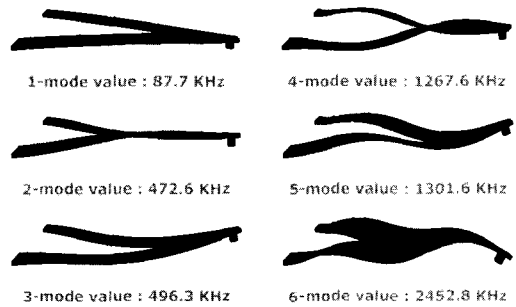


Fig. 6 The first 6 natural frequencies and mode shapes of a non-contact A-type cantilever

Table 4 Comparison of measured and computed natural frequencies with measured geometry data for non-contact cantilevers (1st mode only)

Cantilever Type	Natural frequency, kHz	
	Experiment	Computation
A	103.5	87.7
B	116.6	98.1
C	452.3	426.9
D	416.4	427.4

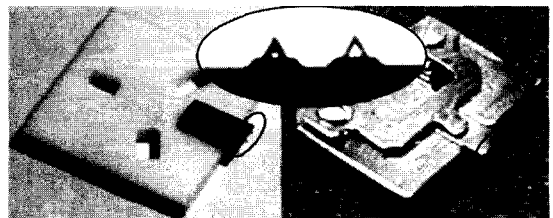


Fig. 7 Mounted cantilever carrier(left) and unmounted cantilever carrier(right)

의 고유진동수를 가지는 A, B 타입과 또 다른 주파수대의 C, D타입이 서로 유사한 특성이 관찰되므로 B 타입과 C 타입을 선정하여 비교하였다. 실험에 사용된 시편은 원자간력 현미경을 보정하거나 상태를 알아볼 때 사용하는 표준시편이다.

Fig. 8은 0.5 LPS의 속도에서 측정된 B, C타입의 이미지를 보여주고 있다. 여기서 주사속도 단위인 LPS(line/s)는 단위시간당 주사 회수를 나타낸다. 이 두 이미지를 비교해 보면 특별히 다른 점을 보이고 있지 않다. 각 타입의 측정속도 변화에 따른 성능비교를 위해 측정속도를 0.5 LPS부터 시작하여 0.5씩 증가시켜서 25 LPS까지 증가시키면서 표면형상을 측정하였다. Fig. 9는 측정속도 5.0 LPS에서의 표면 이미지를 보여준다. Fig. 8과 비교하여 볼 때 측정된 고유진동수가 높은 C타입 이 더 안정적인 이미지를 보이고 있다. 또한 이 실험에서 측정속도가 5.0 LPS를 넘기게 되면 이미지 왜곡현상이 커져서 더 이상 표면형상의 의미를 가지지 못하게 됨을 확인할 수 있었다. 이상의 결과를 비교해 보면 특성이 다른 각각의 캔틸레버들은 측정속도에 대한 반응이 각기 다르다는 것을 확인할 수 있다.

캔틸레버가 가지는 고유진동수의 주파수 영역이 스캔속도 증가에 대한 측정 특성의 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 특히, 고유진동수가 높은 캔틸레버

일수록 더 빠른 스캔속도까지 안정된 프로파일을 보여주고 있음을 확인할 수 있었다.

### 4.3 캔틸레버의 부착방식에 따른 변화

이 실험에서는 상대적으로 양호한 속도특성을 보이는 C타입의 캔틸레버만을 고려하였다. 앞에서 미탑재 캔틸레버가 탑재 캔틸레버보다 높은 고유진동수를 가지고 있음을 확인하였다. 이 두 형태의 캔틸레버 측정성능을 비교하기 위해 미탑재 C 타입 캔틸레버와 탑재 C 타입 캔틸레버의 측정이미지를 앞 실험과 유사한 방법으로 비교하였다. 실험에 사용된 미탑재 캔틸레버와 탑재 캔틸레버의 고유진동수는 각각 424.9 kHz와 292.2 kHz이다. Figs. 10, 11의 측정속도 0.5 LPS와 10.0 LPS에서의 미탑재와 탑재 캔틸레버의 측정 이미지를 비교하여 확인해 볼 수 있다. 이 실험에서도 역시 고유진동수가 높은 미탑재 캔틸레버로부터 더 안정적인 측정이미지를 얻을 수 있었다.

### 4.4 측정 감도 평가 및 성능 개선 방법 검토

이상의 실험결과로부터 고유진동수가 높은 미탑재 타입의 캔틸레버가 비접촉 방식 측정에서 더 좋은 측정 속도 성능을 보여주고 있음을 보이고 있다. 따라서 측정 속도를 향상시키기 위해서 캔틸레버가 가지는 고유진동수는 높은 대역의 값을 가지는 것이 바람직하다. 그러나 고유진동수를 높이기 위해 캔틸레버

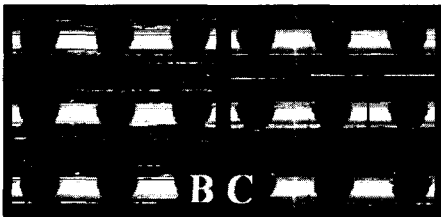


Fig. 8 3D topographic views for the standard sample with different cantilevers: scan rate = 0.5 LPS

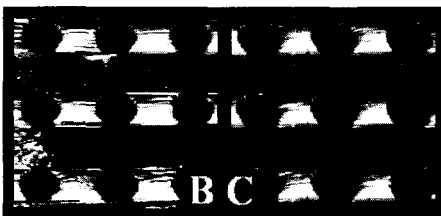


Fig. 9 3D topographic views for the standard sample with different cantilevers: scan rate = 5.0 LPS

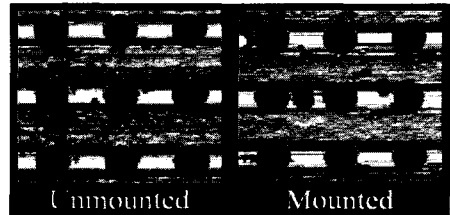


Fig. 10 3D topographic views for the standard sample with mounted and unmounted cantilevers: scan rate = 0.5 LPS

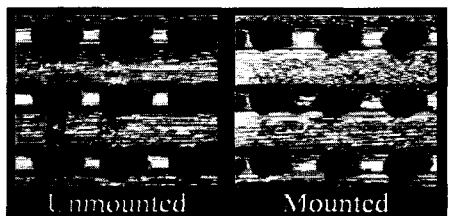


Fig. 11 3D topographic views for the standard sample with mounted and unmounted cantilevers: scan rate = 10.0 LPS

의 강성을 높힌다면 힘구배(force gradient)에 따른 강성변화가 상대적으로 감소하여 측정감도가 떨어질 가능성이 있다.

원자간력 현미경의 측정은 팁과 표면과의 거리가 일정범위를 벗어나지 않게 하는 보상신호에 대한 압전구동기 변화량과 캔틸레버의 변화량과의 연산으로 표면형상을 읽어 들인다. 압전구동기의 변화량은 보통 표면의 큰 변화에 대한 신호를 받아들이게 된다. 이는 캔틸레버의 변화로 측정될 수 있는 범위를 넘어선 표면 형상의 단차에 대한 신호이다. 캔틸레버의 변화량으로는 표면형상의 큰 단차를 측정할 수 없다는 단점을 압전구동기를 사용함으로써 높은 단차에 대한 측정이 가능하게 되었다. 그런 반면에 측정 속도가 압전구동기의 응답속도에 의해 영향을 받는다는 단점을 가지게 된다. 그러므로 측정의 표면형상 특성을 고려하여 적당한 관계를 선정해야 한다.

캔틸레버의 감도를 평가하기 위해서 측정조건에서의 고유진동수 ( $\omega_n$ ) 변화량을 간접적으로 평가하고 이를 근거로 힘구배에 의한 강성을 계산하였다. 고유진동수 ( $\omega'_n$ )의 변화를 직접 측정할 수 없기 때문에 캔틸레버 끝단의 진폭을 측정하여 이 변화로부터 고유진동수의 변화를 평가하였다. 이렇게 측정된 각 단계의 진폭으로부터 초기 상태의 주파수 응답을 이용, 캔틸레버의 변화된 고유진동수를 알아낼 수 있었다. 이로부터 얻어진 캔틸레버의 고유진동수와 측정 시 변화된 고유진동수의 실험 결과와 식 (1), (2)를 활용하여 인력구간의 높이에 따르는 힘구배를 아래 식 (3)과 같이 계산 할 수 있었다.

$$\frac{dF}{dz} = k_0 \left[ 1 - \left( \frac{\omega'_n}{\omega_n} \right)^2 \right] \quad (3)$$

그리고 식 (3)으로부터 최종적인 측정감도 식 (4)를 정의하였다.

$$\frac{1}{k_0} \frac{dF}{dz} = 1 - \left( \frac{\omega'_n}{\omega_n} \right)^2 \quad (4)$$

이상의 결과를 종합하여 힘구배와 감도를 계산하여 Table 5에 정리하였다. 여기서 사용한 각 타입 캔틸레버의 스프링상수는 유한요소법으로 계산한 값이다.

두 방식의 힘구배의 값을 비교해 보면 C 타입이 B 타입에 비해 약 1.6배 정도 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 C타입이 표면 신호를 받기 위해서는 B타입에 비해 더 큰 힘구배가 필요하다는 것을 의미한다. 따라서 C 타입의 캔틸레버를 이용한 측정을 위해서는 시료에 더 근접해야 함을 의미한다. 이 경우 측정속도를 높이면 탐침이 소재에 충돌하여 망실되는 등의 문제점이 발생하므로 큰 단점이 된다.

이상의 결과들로부터 높은 측정속도를 위해서는 높은 고유진동수를 가지는 C타입 형태의 캔틸레버가 유리하지만 감도의 측면에서 보면 B타입의 형태가 유리하다는 것이 확인되었다. 따라서 비접촉 원자간력 현미경의 캔틸레버는 빠른 측정을 위해서 높은 고유진동수가 필요하나 측정감도를 높이기 위해서는 강성이 낮을 필요가 있다. 이와 같은 조건을 만족시키기 위해서는 형상을 개선함과 아울러 캔틸레버를 작게 만드는 것이 유리하다. 제작과 취급에 따른 문제점을 극복할 수 있다면 원자간력 현미경에 사용되는 캔틸레버는 더욱 소형화가 되는 것이 바람직하다.

Table 5 Comparison of data for B-type and C-type

Cantilever Type	Unmounted B	Unmounted C
$k_0$ (N.m)	3.38	14.43
$dF/dz$ (N/m)	0.027	0.043
Sensitivity	0.009	0.003

### 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 원자간력 현미경의 핵심부품인 캔틸레버의 진동 특성에 따른 측정성능평가를 수행하였다. 캔틸레버의 진동 특성과 측정 속도와의 관련성을 연구의 결과를 토대로 측정속도의 향상을 위한 캔틸레버 설계 방향을 검토하였다. 캔틸레버의 형상에 따른 특성파악을 위해 모델링과 해석을 실시 하였다. 모델링 및 해석 결과는 실제 데이터에 거의 일치하는 결과를 보였다. 따라서 캔틸레버의 여러 형상에 대한 특성 파악을 위해 직접 제작하지 않고 모델링과 해석을 통해 알 수 있음을 확인하였다. 다음으로 진동 특성에 따르는 측정 속도와 관계를 파악하기 위한 실험에서 측정 속도의 변화에 따른 측정 이미지의

변화를 관찰한 결과 고유진동수가 높은 캔틸레버 일수록 높은 속도에서 더 안정적인 이미지 측정을 보였다. 한편, 비접촉 원자간력 현미경에서 측정시의 캔틸레버 고유진동수 변화를 파악하기 위해 측정 단계에 따른 캔틸레버 끝단의 진폭변화를 측정하였고, 측정된 진폭으로부터 측정진동수와 측정 한계 진동수를 알아낼 수 있었다. 실험결과로부터 높은 고유진동수를 갖는 것이 유리하나 강성이 높아지면 측정감도가 낮아질 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교 고가기자재 지원사업에 의해 지원된 기자재에 의해 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Sarid, D., 1991, Scanning Force Microscopy: with applications to electric, Magnetic, and Atomic forces, New York Oxford University Press.
- (2) 2000, User's Guide to Autoprobe M5, TM Microscopes
- (3) Park, S. K., Kim, Y. H. and Ha, S. K., 2002, "Analysis of Dynamic Behavior of Piezoelectric Atomic Force Microscope Cantilever," Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 187~194.
- (4) Chang, W. S., Shin, B. S. and Whang, K. H., 2003, "Nanoprobe Application Technologies," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 5~14.
- (5) Park, S., Hong, I. J. and Nho, Y., 2003, "Scanning probe microscopy," <http://www.psia.co.kr>.
- (6) Binning, G. and Quate, C. F., 1986, "Atomic Force Microscope," Phys. Rev. Lett., Vol. 56(9), pp. 930~933.
- (7) Lee, D., Ono, W. T. and Esashi, M., 2000, "Cantilever with Integrated Resonator for Application of Scanning Probe Microscope," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 83, pp. 11~16.
- (8) Hazel, J. L. and Tsukruk, V. V., 1999, "Spring Constants of Composite Ceramic/gold Cantilevers for Scanning Probe Microscopy," Thin Solid Films Vol. 339, pp. 249~257.
- (9) Lee, M., McDaniel, E. B. and J. W. P. Hsu, 1996, "An Impedance Based Non-contact Feedback Control System for Scanning Probe Microscopes," American Institute of Physics, Rev. Sci. Instrum. 67.
- (10) Cozzens, R., 2002, CATIA Version 5: Release 8 & 9, Schroff Development Co.