

PSD를 이용한 AFM용 미세 탐촉자의 변위측정장치

김홍준*, 장경영

Cantilever deflection measurement system for AFM with PSD

Hong-jun Kim, Kyung-Young Jhang

Abstract

A cantilever deflection measurement system for AFM(atomic force microscope) was constructed by the laser deflection method using LEP type PSD. Design process including sensitivity analysis was presented and the performance of the system was demonstrated by several experiments using a sample specimen with 50nm-step on the surface. The measured displacement-amplification-factor showed good agreement with the expected one with about 8% deviation. The step height measurement data were compared to what were acquired by commercial AFM, and the result showed that there were about 5nm-deviation between the two data. These results satisfies our expectation in the stage of system design.

Key words : Laser deflection method(레이저 반사법), Lateral-effect photodiode(레이터럴 이펙트 포토다이오드), Position Sensitive Dectector(포지션 센시티브 디텍터), Atomic Force Microscope(원자 현미경)

1. 서론

기술이 발전함에 따라 학계, 산업계의 각 분야에서 아주 미세한 형상이나 표면에 작용하는 힘을 연구하기 위한 계측장비의 필요성이 대두되고 있다 이러한 목적으로 널리 이용되고 있는 장비로는 STM(Scanning Tunneling Microscope), AFM(Atomic Force Microscope), FFM(Friction Force Microscope)등이 있다 이 중, Binnig등에 의해 개발된 AFM⁽¹⁾⁽²⁾은 샘플과 캔틸레버팁 사이에 작용하는 아주 미세한 힘에 의한 캔틸레버의 변형을 측정함으로써 표면의 형상정보를 얻어내는 계측장비로, 샘플의 표면이 전도체이어야 하는 STM과는 달리 샘플의 전기전도성에 상관없이 표면형상을 원자 수준으로 측정 가능하다. 현재, Digital Instrument, PSI등의 회사에서 상용화 되어있고 성능을 개선하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 국내에서도 이에 대한 연구가 진행되고 있다⁽³⁾⁽⁴⁾ 그러나 국내에서 이루어지는 연구의 대부분은 상용화된 장비를 이용해 얻어진 데이터를 어떻게 해석할 것인가에 대한 연구이거나 측정시스템의 위치제어에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며 데이터를 얻기 위한 측정시스템 자체에 대한 연구는 거의 이루어지지 않

고 있다.

본 논문은 이러한 AFM의 핵심이 되는 계측시스템을 자체적으로 설계 구현하고 그 성능을 평가하고자 한 것으로, AFM을 개발하기 위한 기초 연구로서만이 아니라 다른 용도의 정밀계측장치나 초정밀 가공기술의 개발 등에 응용할 수 있다.

2. 레이저 반사법

2-1 기본원리

AFM은 수백마이크로미터 이하의 미세한 탐촉용 캔틸레버가 표면을 따라 이동하면 표면의 높낮이(또는 표면에서 작용하는 힘)에 의해 변형을 일으키게 되는데, 이러한 캔틸레버의 변위를 측정함으로써 표면형상에 대한 정보를 얻는 기술로서, 캔틸레버 변위의 측정에는, 레이저 반사법을 많이 이용한다 레이저 반사법에서는 캔틸레버에서 반사되는 laser beam은 변형 전후에 다른 경로로 반사된다 이러한 경로의 차이를 PSD(Position Sensitive Detector⁽⁵⁾⁽⁶⁾)를 이용하여 측정함으로써 캔틸레버의 변위의 각도변화를 알 수 있다.[7]

2-2 캔틸레버 변위의 증폭비

Fig.1은 두께 t , 길이 L , 폭 w 인 캔틸레버에 수직방향 하중 F_n 이 가해져 수직방향의 변위가 생기는 것을 나타내고 있다 수직방향의 변위 δ_z 와 수직방향 굽힘 각 α 는 각각 다음과 같다.

$$\delta_z = \frac{4}{Ewt} \left(\frac{L}{t}\right)^3 F_n \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{6}{Ewt} \left(\frac{L}{t}\right)^2 F_n \quad (2)$$

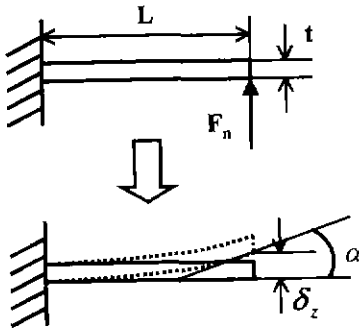


Fig. 1 Deflection of cantilever bended by a normal force, F_n

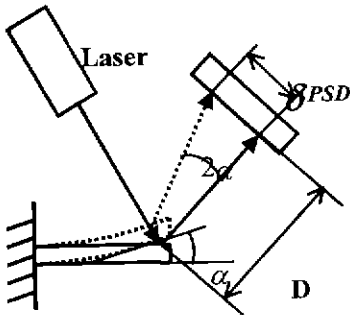


Fig. 2 The change of incident spot position δ_{PSD} due to the change of cantilever deflection angle α

(1), (2)로부터 δ_z 와 α 의 관계는 다음과 같이 L 에 대한 함수로 나타낼 수 있다

$$\frac{\alpha}{\delta_z} = \frac{3}{2L} \quad (3)$$

Fig.2는 캔틸레버의 굽힘각 α 에 대한 PSD에서의 레이저 스폿의 위치변화 δ_{PSD} 의 관계를 나타낸 그림이다.

캔틸레버에서 PSD까지의 거리를 D 라고 하고, α 와 δ_{PSD} 의 관계식을 구하면.

$$\frac{\delta_{PSD}}{D} = \tan 2\alpha \approx 2\alpha \quad (4)$$

여기서 (3),(4)로부터, δ_z 와 δ_{PSD} 와 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_z = \frac{2L}{3} \alpha \Rightarrow \delta_{PSD} = \frac{3D}{L} \delta_z \quad (5)$$

위의 관계로부터, PSD에서 스폿 위치변화 δ_{PSD} 로부터, 캔틸레버의 수직방향 변위 δ_z 를 구할 수 있다.

한편, 본 연구에서 사용한 캔틸레버는 직사각형이 아닌 Fig.3에서와 같은(위에서 내려다 본 모습) 모양의 V자형이다. 따라서, 식 (3)의 굽힘과 굽힘각의 관계식은

$$\alpha_z = \frac{234}{139L} \delta_z = 1.683 \frac{\delta_z}{L} \quad (6)$$

이 되며, 식 (5)가

$$\delta_{PSD} = 2\alpha D = 3.37 \frac{D}{L} \delta_z \quad (7)$$

로 된다⁽⁸⁾

결과적으로 캔틸레버의 변위에 대한 PSD상에서의 레이저 스폿의 위치변화율, 즉 캔틸레버 변위 증폭비 (DAF)는 다음과 같이 정의된다.

$$DAF = \frac{\delta_{PSD}}{\delta_z} = 3.37 \frac{D}{L} \quad (8)$$

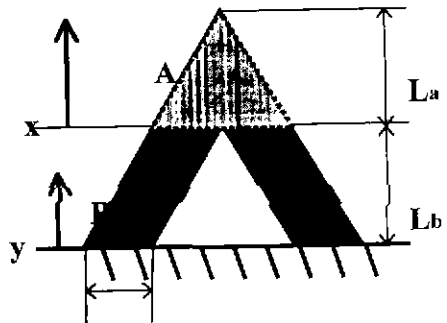


Fig. 3 The shape of V-cantilever

3. 측정시스템의 구성

3-1 광학계의 설계

캔틸레버의 변위를 측정하기 위한 광학계를 구성하는데 있어서 회절에 의한 영향을 피하기 위해 고려해야 할 조건들로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) 캔틸레버에서의 스폿 사이즈는 캔틸레버의 폭보다 작아야 한다.
- 2) PSD에서의 스폿 사이즈는 PSD의 크기보다 작아야 한다

그런데, 레이저빔의 확산조건에 의해 PSD에서의 스폿 사이즈와 캔틸레버상의 스폿 사이즈사이에는

$$w_{PSD} = \frac{2\lambda D}{\pi w_C} \quad (9)$$

의 관계가 성립한다⁹⁾

w_{PSD} , w_C , D , λ 는 각각 PSD상에서의 스폿 사이즈, 캔틸레버상에서의 스폿 사이즈, PSD에서 캔틸레버까지의 거리, 레이저의 파장이다.

따라서, 캔틸레버상에서의 스폿 사이즈를 줄이는 경우, 확산각이 커지게 되어 PSD상에서의 스폿 사이즈가 커지게 된다는 것을 알 수 있으며, 조건 1), 2)를 함께 만족시키기 위해서는 캔틸레버에서 반사되는 부분에 레이저의 빔 웨이스트(beam waist)가 위치하도록 해야한다 또한, 측정시스템의 감도를 크게 하기 위해서는 캔틸레버에서 PSD까지의 거리 D 를 크게 해야 하는데, 이는 PSD에서의 레이저 스폿 사이즈를 커지게 한다. 이러한 조건들을 고려하여 적절한 D 값을 구해야 한다.

한편 식(7)에서, 캔틸레버의 길이 $L=0.18\text{mm}$ 이므로, PSD에서의 분해능을 약 $1\mu\text{m}$ 라고 하였을 때, 수직방향 분해능이 1nm 가 되기 위한 조건은 다음과 같다.

$$D > \frac{L\delta_{PSD}}{3.37\delta_z} = 53.4\text{mm} \quad (10)$$

레이저의 파장 670nm , 캔틸레버에서의 스폿 사이즈를 $30\mu\text{m}$ 로 하고, PSD에서의 레이저 스폿 사이즈의 허용 최대 값을 2mm 로 하면, 식(9)로부터,

$$w_{PSD} = \frac{2\lambda D}{\pi w_0} < 2 \quad (11)$$

$$\Rightarrow D < \frac{\pi w_0}{\lambda} = 140\text{mm}$$

가 된다

이와 같은 조건으로부터 본 시스템에서는 D 를 60mm 로 하였으며, 이에 대한 DAF 는 식 (8)에 따라 다음과 같이 된다

$$DAF = \frac{3.37D}{L} = 1123.3 \quad (12)$$

3-2 전체 시스템의 구성

위에서 구한 조건들을 만족시키며 레이저 반사법을 이용한 캔틸레버 변위 측정시스템을 구성하였다. 여기서는, 기존 AFM에 사용되던 4Q(four-quadrant)type의 PSD 대신 응답속도가 빠르며, 중심부에서 계측정보의 손실이 없는, LEP(lateral effect photodiode) type의 PSD를 사용하였다

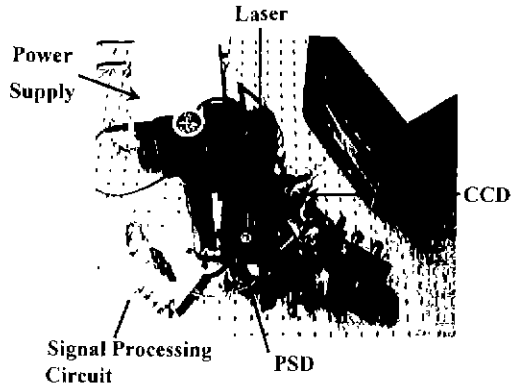


Fig.4 Photograph of the constructed measurement system

4. 변위측정실험

4-1 계측시스템 구성

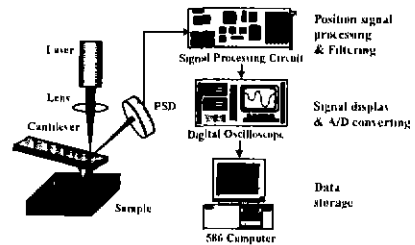


Fig 5 Measurement system.(Max. power of laser is 5mW, and wavelength 670nm)

캔틸레버 변위측정 시스템의 성능평가를 위하여 Fig 5와 같이 레이저 (He-Ne), PSD 신호처리장치, 오실로스코프 등으로 계측시스템을 구성하였다

4-2 PSD의 감도 측정

PSD의 감도를 알아보기 위해 캔틸레버에서 반사되어 나온 레이저빔을 PSD의 중심에 입사시킨 다음, PSD의 위치를 $20\mu\text{m}$ 씩 변화시키며 PSD의 출력신호의 변화를 기록하였다

실험 결과, 레이저 스폿이 $1\mu\text{m}$ 이동함에 따라 출력

전압은 0.9697mV의 변화를 보이는 것으로 나타났다. 즉

$$S_{PSD} = \frac{V_{PSD}}{\delta_{PSD}} = 0.9697 mV/\mu m \quad (13)$$

이러한 관계를 비교적 정확하게 나타내는 범위 (range)는 중심으로부터 반경 1.5mm 정도이며 이 범위를 넘어가는 경우 감도에 급격한 변화가 생긴다 Fig 6은 100μm까지의 중심부근에 대한 실험결과를 보여 준다.

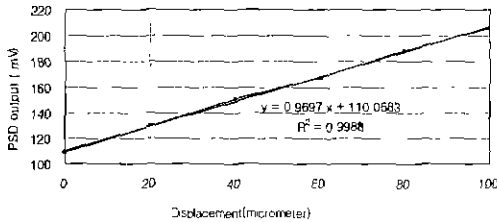


Fig 6 Experimental result: Output of PSD vs shift of incident spot

4-3 캔틸레버 변위 증폭비 (DAF)의 측정

먼저 캔틸레버에서 반사되어 나오는 레이저빔을 PSD의 중앙에 입사하도록 위치를 조정한다 다음 캔틸레버를 마이크로미터를 이용하여 0.5μm 단위로 이동시키면서 PSD의 출력신호를 기록하였다 Fig.7은 그 결과를 나타낸 것으로 1μm의 변위(X)에 대하여 약 PSD의 출력(Y)에 1V 정도의 변화가 있는 것으로 나타났다. 이는 캔틸레버에 1nm의 변위에 대한 PSD 출력신호의 변화가 1mV임을 나타낸다 즉,

$$S_{CDS} = \frac{V_{PSD}}{\delta_z} \approx 1 mV/nm \quad (14)$$

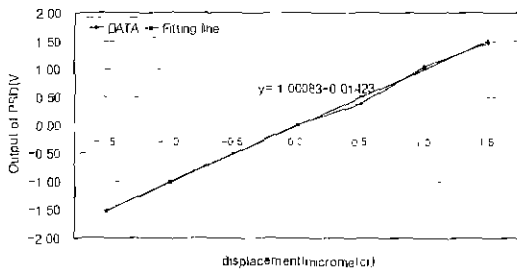


Fig. 7 Experimental result Output of PSD vs displacement of cantilever

따라서, 식 (13)과 (14)의 결과로부터 DAF는

다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$DAF = \frac{\delta_{PSD}}{\delta_z} = \frac{S_{CDS}}{S_{PSD}} = 1032.1 \quad (15)$$

4-4 단차(step) 측정

제안하는 시스템의 전체적인 성능을 시험하기 위해 단차가 50nm인 시편을 가공하여 단차를 측정하고 AFM으로 측정된 결과와 비교하였다

Fig 8은 본 시스템으로 측정된 결과를 보여주고 있으며, Fig. 9는 상용AFM에 의한 3차원 측정결과를 보여준다. 측정된 단차의 단면 형상이 서로 유사함을 알 수 있다.

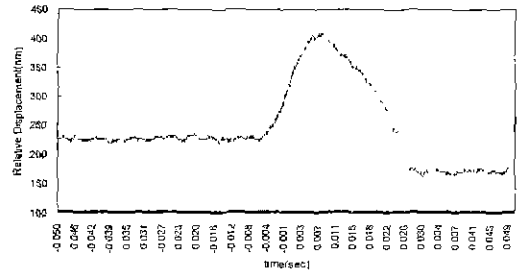


Fig. 8 Profile of 50-nm step on the surface of specimen measured by scanning across the step

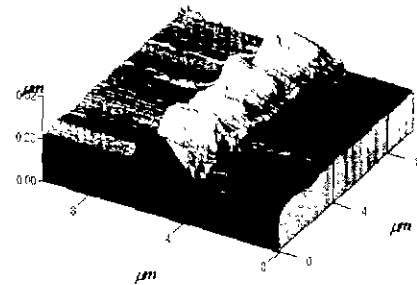


Fig 9 3-D image of the sample surface acquired by AFM

한편 단차를 따라 여러 지점에서 측정된 단차높이의 평균을 비교하여 나타낸 것이다 본 시스템에 의한 경우가 5nm 정도 크게 나타남을 보여주고 있는데 이는 PSD 신호처리 회로에서의 전기 잡음과 시편설치대의 외부진동에 기인하는 것으로 사료된다

Table 1 Comparison of step height measurement by cantilever deflection measurement system(CDS) and AFM

| | average(unit:nm) |
|-----|------------------|
| AFM | 54.6 |
| CDS | 59.9 |

5. 결론

본 논문에서는 AFM의 핵심이 되는 계측시스템을 자체적으로 구현하고자, 캔틸레버의 변위를 레이저반사법을 이용하여 측정하는 시스템을 구성하였으며, 이 시스템을 이용하여 수십 나노미터 단위의 미소변위를 측정하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 직사각형과 V형의 캔틸레버의 변위-처짐각 관계를 유도하고 이를 바탕으로 캔틸레버의 변위를 검출하기 위한 광학계를 설계하였으며, LEP 방식 PSD를 사용하여 측정시스템을 구성하였다

2) 변위측정 시스템의 캔틸레버 변위 증폭비를 측정하여 이론값과 비교한 결과, 이론값 1123.3에 대하여 실험값 1032.1로 잘 일치함을 알 수 있었다.

3) 캔틸레버 변위측정 시스템을 이용하여 50nm의 표면 단차를 측정하고 AFM으로부터 얻어진 결과와 비교한 결과 5nm정도의 차이를 보였으나 이는 PSD 신호처리 회로에서의 전기 잡음과 시편설치대의 위부진동에 기인하는 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) G Binnig and C F Quate and Ch. Gerber. "Atomic Force Microscopy", PHYSICAL REVIEW LETTERS. Vol. 56 pp. 930-933. 3. March 1986.
- (2) Meyer. E and Amer. N. M. "Novel Optical Approach to Atomic Force Microscopy", Appl. phys. Lett., Vol. 53, pp 1045-1047. 1988
- (3) H. W. Jung. J. Y. Shim, D. G. Gweon, "Analysis and Control of Contact Mode AFM", Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 15. No.3 pp. 99-106, March. 1998
- (4) Sung-Chang Lee, Koo-Hyun Chung, Dae-Eun Kim, "A Study on the Surface Damage between Hard/Disk Interfaces by Using AFM", Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol.15. No 9 pp.167-174, September 1998.
- (5) J. T. Wallmark. "A New Semiconductor Photocell Using Latrcal Photocffect", Proc. IRE. Vol 45. pp. 474-483. 1957.
- (6) A J Makynen. I J. Kastamovaara. R. A Myllyla. " Displacement Sensing Resolution of Position-Sensitive Detector in Atmospheric Turblence Using Retroreflected Beam". IEEE Translations on Instrument and Measurement Vol. 46. pp. 1133-1136. Num. 5 Oct. 1997
- (7) Meyer. E. and Amer. N M "Optical-Beam-Deflection Atomic Force Microscopy: The NaCl(001) Surface". Appl phys. Lett Vol. 56. pp 2100-2101. 1990
- (8) Egor P. Popov "Engineering Mechanics of

Solids", Prentice-Hall. 1992.

(9) Frank L.Pedrotti.S.J. Leno S. Pedrotti "Introduction to Optics 2nd Edition", Prentice-Hall, 1993