

원자현미경(AFM)의 진동해석

°정 희원*, 김 수경*, 박 건순*, 오형렬*, 김 진용*

심 종엽**, 권 대갑***

Vibration analysis of Atomic Force Microscopy

Hewon Jung*, Sookyung Kim*, Gunsoon Park*, Hyeong-Ryeol Oh*, Jin-Yong Kim*

Jongyoun Shim**, Daegab Gweon***

ABSTRACT

The AFM is an imaging tool or a profiler with unprecedented 3-D resolution for various surface types. The AFM technology, however, leaves a lot of room for improvement due to its delicate and fragile probing mechanism. The distance between probe tip and sample surface must be maintained in below the nano meter level in order to measure the sample surface in Angstrom resolution. In this paper, the mode analysis of AFM system, modification based on the mode analysis are performed and finally the sample surface is measured by the home-built AFM.

1. 서론

반도체 산업, 생명공학 등이 발달함에 따라 미세 표면의 측정에 대한 요구는 이미 수년 전부터 대두되었다. 미세표면의 측정장비로는 PSI(Phase Shift Interferometer), SEM(Scanning Electron Microscope), STM(Scanning Tunneling Microscope), AFM(Atomic Force Microscopy) 등이 있다. PSI는 레이저의 일정한 파장의 간섭현상에 의해 비접촉으로 표면의 높낮이를 재는 장점이 있지만 레이저의 파장의 1/4(약 160nm정도)이상의 높이의 측정이 불가능한 단점이 있다. SEM은 미세표면의 시각적인 효과는 가장 좋은 장점이 있으나 높이정보의 정량적인 수치를 알 수 없고 측정 전에 표면처리를 해야하는 단점이 있다. 이러한 단점들을 극복하고 나온 것이 STM⁽¹⁾으로 이는 도체 표면과 뾰족한 팁끝간에 전기장을 가하면 비접촉 상태에서 터널링 전류(Tunneling Current)가 흐르는 원리를 이용해서 Å(0.1nm)이하의 분해능으로 표면의 높이를 측정할 수 있는 방법으로 프로브(Probe)를 이용한 표면측정의 새로운 장을 열었다

고 할 수 있다. 그러나 STM은 측정표면이 도체이어야 한다는 한계를 갖는 단점을 갖는다. 이를 극복할 수 있는 대안으로써 AFM이 출현하였다. AFM(1,2)은 프로브를 이용한 Å(0.1nm)이하의 분해능의 획득이라는 STM의 장점을 갖으면서 외팔보를 이용한 원자간 힘의 측정이라는 원리로 인해 측정표면이 도체이어야 한다는 한계를 극복하였다. AFM은 도체 또는 부도체의 표면을 Å단위 이하로 측정할 수 있을 뿐 만 아니라 표면의 전기적, 기계적 특성까지 측정이 가능하여 그 응용범위가 날로 확대되고 있는 추세이다. AFM은 수십µm의 외팔보 끝에 미세한 팁(tip)을 달아 표면에 가까이 하면 팁끝과 표면간에 원자간 힘에 의해 외팔보가 휘어지게 된다. 이때 표면의 형상에 의해 이 힘이 차이가 생기고 이를 여러가지 방법에 의해 측정하면 표면의 높이를 Å단위까지 측정할 수 있게 된다. 원자단위의 표면측정을 위해 AFM은 그 보다 더 정밀하게 위치제어가 이루어져야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 자체 제작한 AFM의 진동특성 해석을 통한 시스템 개선 보완점을 찾고 최종적으로 이를 이용하여 일정한 형태를 갖는 샘플의 표면을 측정하였다.

* : LG전자 DM 연구소

** : 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

*** : 한국과학기술원 기계공학과 교수

2. 기본원리

AFM(atomic Force Microscopy)은 1986년에 Bin nig⁽²⁾ 등에 의해 만들어졌으며 기본적인 구성은 Fig. 1과 같다.^(3,4)

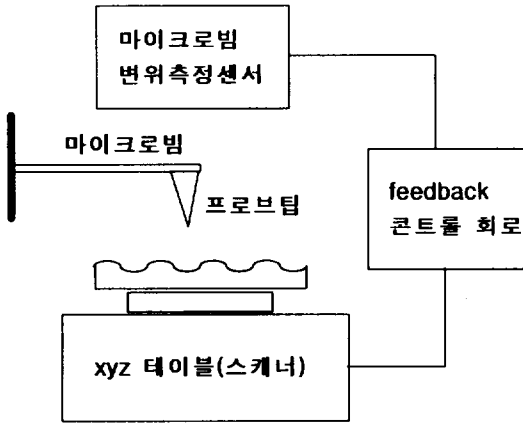


Fig. 1 Schematic of AFM

프로브 팁을 측정표면에 가까이 가져가면 프로브 팁 끝단의 원자와 측정표면의 원자 사이에 힘이 작용하게 되고 측정 표면의 높이에 따라 이 힘은 마이크로빔을 휘어지게 하며 이 휘어짐을 측정하여 표면의 형상을 알게 된다. 즉, 일정한 스프링 상수를 갖는 마이크로빔은 힘에 비례하여 휘어지게 되고 이 휘어짐을 측정하게 되면 프로브 팁과 표면 사이에 작용하는 힘을 측정할 수 있게 된다. 이때 팁과 표면 사이에 작용하는 힘의 종류로는 Van der Waals Force, Capillary force, Magnetic force, Electrostatic force, Short-Range force 등이 있으며 이 힘들은 팁과 표면사이의 거리, 표면의 전기 자기적 특성, 표면의 불순물함유정도 등에 따라 달라지게 된다.⁽⁵⁾ 이 때 표면의 전자기적 특성, 불순물함유 정도 등 표면이 일정한 성분으로 돼있다면 팁과 표면 사이에 작용하는 힘은 표면의 높이에 의한 함수가 되며 마이크로빔의 휘어짐은 곧 높이 정보가 된다. 이것이 AFM의 측정원리가 된다.

3. 시스템 구성

본 연구에서 개발한 AFM에서 마이크로빔과 프로브팁은 monolithic으로 제조된 PSI사의

Ultralever series를 사용하였다. Ultralever의 사양은 table. 1과 같다.

Table. 1 Micro cantilever spec.

마이크로빔 길이	180 μ m
팁 길이	4 μ m
radius of curvature for tip	100 \AA
스프링상수	0.24N/m

프로브 팁과 표면의 원자간 힘을 직접적으로 측정할 수 있는 방법은 없으므로 마이크로빔을 사용하여 그 변위를 측정함으로써 간접적으로 원자간 힘을 측정한다. 본 연구에서는 마이크로빔 힘 측정 방법으로 레이저반사법(laser beam deflection)을 사용하였다. 이 방법은 다른 방법들에 비해 비교적 간단한 구조에 비해 정확한 측정을 보여주며 상대적으로 큰 S/N 특성을 갖는다.

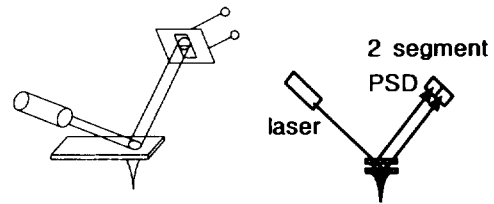


Fig. 2 laser beam deflection

Fig. 2와 같이 레이저 빔을 마이크로빔의 끝단에 포커싱 하고 그 반사되는 빛을 2분할 PSD(Photo Sensitive Device)에 입사시킨다. 2분할 PSD는 두 개의 포토다이오드(Photo Diode)를 연결한 것으로 각각의 포토다이오드에서는 입사하는 광량에 비례하여 전류가 발생하게 된다. 이를 전압으로 전환하여 그 차를 구하게 되면 두개의 포토다이오드에 입사하는 빛의 위치를 알 수 있게 된다. 이 방법은 세팅이 쉽고 높은 분해능을 갖는 장점으로 인해 상용 AFM에서는 대부분 이 방법을 채용하고 있고 본 연구에서 사용한 AFM도 이와 같은 측정방식을 채택했다.

AFM에서는 시편이나 탐침을 정밀하게 이동시켜 위치시키는 것이 무엇보다 중요하고 또한 3축의 각각 움직임에 대하여 간섭이 없이 독립적이어야 하며, 탐침이 표면에 무리한 힘을 가하지 않도록

하기 위하여 빠른 응답속도가 요구된다. 따라서 위의 모든 요구들을 만족하는 초정밀 XYZ 스테이지가 필요하게 된다. AFM에서 요구하는 위의 구동조건을 만족하기 위해 본 연구에서는 압전소자와 유연기구(flexure mechanism)⁶를 이용하여 Fig. 3과 같은 3축 스캐너⁷를 제작하여 사용하였다.

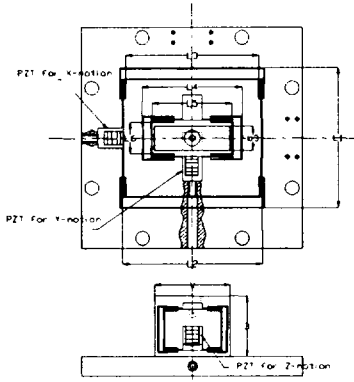


Fig. 3 Monolithic 3-axis flexible hinge stage

위의 구성요소를 조합한 전체 AFM 시스템은 Fig. 4와 같다.

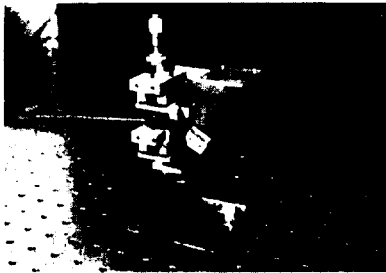


Fig. 4 AFM system

4. AFM의 진동 모드 분석

Fig. 5에서와 같이 AFM의 측정장치는 측정방향으로 Force Loop를 갖게 된다. 여기에는 전체 프레임, 스캐너, 스테이지 등 모든 부분의 기계적 고유진동수가 맞물려서 형성되게 된다. 따라서 이러한 모든 데이터는 PSD 신호를 분석하면서 얻을 수 있다.

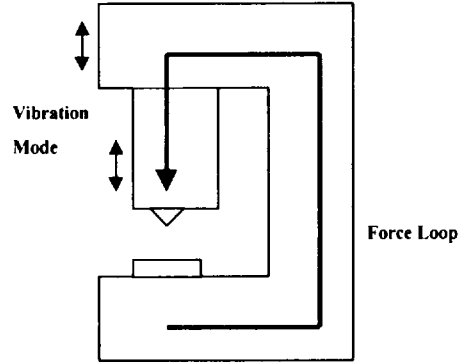


Fig. 5 Force Loop of the AFM System

기계적인 노이즈를 알아보기 위해서 광테이블의 공기를 뺀 상태에서 PSD 신호를 측정하였다. PSD 신호의 분석으로 여러 가지 기계적인 진동모드 뿐만 아니라 또한 소음이라든지 여러 가지의 외란의 영향도 확인할 수 있다. 따라서, 각각의 원인을 찾아내고 제거하는 향후의 일이 필요하다. 또한, AFM의 측정 시에 접촉한 상황에서 높이 방향의 압전소자로 들어가는 신호를 측정하여 분석하였다. Fig. 6은 측정결과는 10 nm정도의 스텝입력을 Z-방향으로 주고 제어가 되는 모습을 측정한 결과이다.

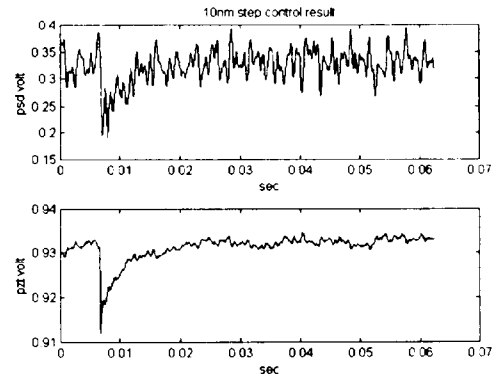


Fig. 6 10nm step control result

이러한 결과를 FFT해석을 하면 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있어서 이러한 기계적 전기적 노이즈

즈들을 제거하려면, 고유진동수가 낮은 기계부분을 제거하고 전기적 노이즈는 여러 가지 회로기술로 제거되어져야한다.

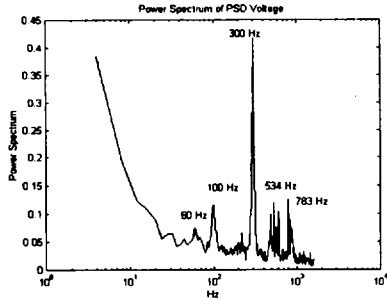


Fig. 7 Power Spectrum of the PSD

위의 실험들로부터 우선 가장 고유진동수가 낮은 것으로 예상되는 3축 마이크로미터 스테이지와 헤드부분 그리고 스캐너의 모드를 해석하였다. 이의 실험은 Vibrometer를 설치하고 충격망치로 측정부위에 임팩트를 가하여 고유진동수를 측정하는 방식으로 하였다. 해석에 의하면 헤드부분은 500Hz 이상의 고유진동수를 가졌다. 문제가 되는 150Hz 근방의 모드가 3축 스테이지에서 발견되었다. 따라서 앞으로 이 스테이지는 제거되어야하며 따로 지그를 설치하여 헤드를 셋팅하여야한다. 또한 48Hz의 모드는 측정기(Vibrometer)를 지지한 지그의 모드임이 확인되었다.

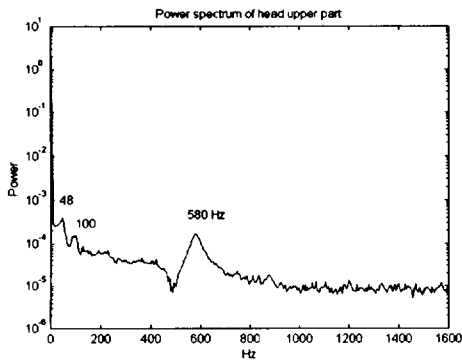


Fig. 8 Head Upper Part modes

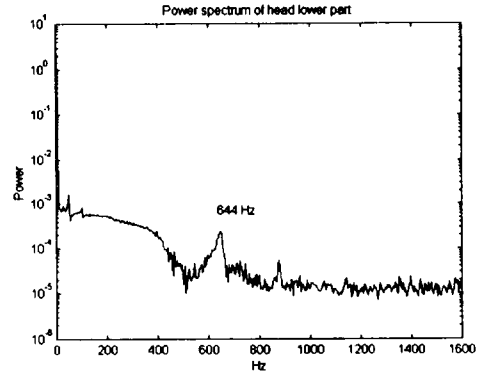


Fig. 9 Head Lower Part modes

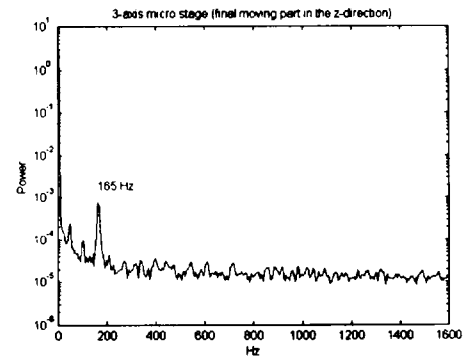


Fig. 10 3-axis Micro Stage modes

기계적 모드의 제거를 위해 시스템의 구성을 다음과 같이 보완하였다. 3축 스테이지는 사용하지 않고, 헤드부분은 강인한 angle bracket에 고정되었다. 그리고 3축 스캐너는 Fig. 11과 같은 Tube PZT로 대체되었다. 스캐너로서 Tube PZT를 사용한 이유는 전기 노이즈에 비해서 감도가 작아서 그것이 스캐닝할 때 노이즈로 들어가는 양이 작아진다. 따라서, 원자간격 측정시에는 Tube PZT가 옳다고 할 수 있다. 또한, 고유진동수가 10kHz정도를 각 축방향으로 가짐으로써 3축 스캐너가 가진 고유진동수보다 10배의 강인성을 갖는다.

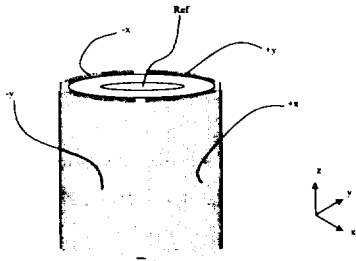


Fig. 11 Schematic of Tube PZT

Fig. 12는 진동 해석을 바탕으로 시스템 보정을 거쳐 제작된 최종적인 AFM 시스템이다.

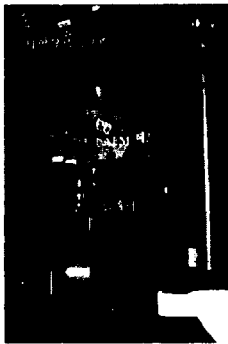


Fig. 12 Modified AFM system

5. 전기적 노이즈의 제거

우선, 높은 고유진동수의 노이즈는 거의 대부분 전기적 노이즈이므로 Low Pass Filtering해도 상관 없다. 따라서, 20Khz에 Cut-off을 갖는 Butter-Worth Filter를 아날로그회로로 구성하여 PSD 신호다음에 설치하였다. 또한, 60Hz등의 Power Source 노이즈를 없애기 위해서 Notch Filter를 설치하였다.

6. 시스템 보완 결과 분석

Fig. 12는 셋팅이 바뀌기 전의 PSD 스펙트럼을 보이고 있다. 또한, Fig. 13와 14는 모드 해석을 통한 시스템 보완 후의 전기적 필터가 없을 때와 있을 때의 스펙트럼을 보여준다.

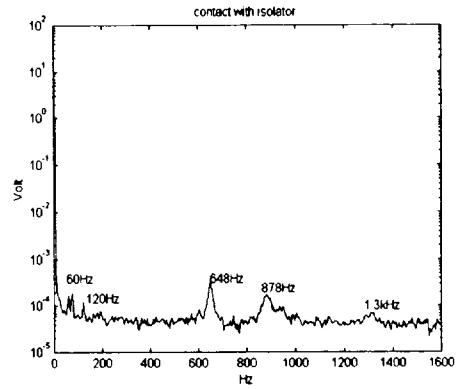


Fig. 13 Previous Mode Spectrum

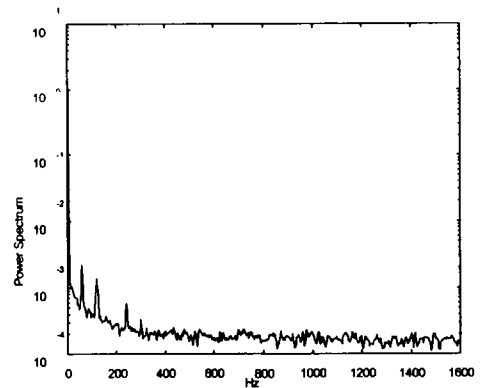


Fig. 14 New AFM Spectrum without filter

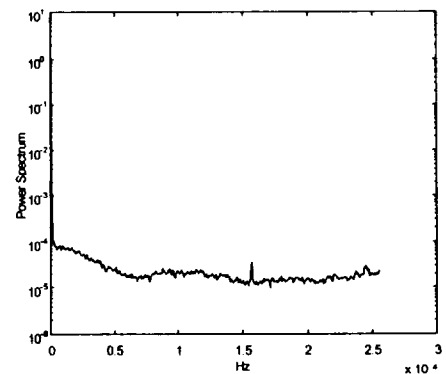


Fig. 15 New AFM mode Spectrum with filter

결과에서 알 수 있듯이, 그림 12의 모든 기계적 모드들이 사라진 것을 알 수 있다. 또한 전기적 필터가 없을 때는 60Hz, 120Hz, 240Hz의 성분이 보이는데 보상을 해주면 Fig. 14와 같이 사라지게 된다. Fig. 14에서 보이는 모드는 40kHz가 보이는데, 이것은 아주 높은 진동수이어서 원자간격측정 스캐닝 시에 영향을 주지 못하게 된다.

7. 실험 결과

원자 레벨의 표면 측정물로 Mica의 표면을 선정하였다. Mica 샘플은 1 nm 이하의 간격으로 격자들이 배열되어 있고 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. 실험 결과는 Fig. 16과 같으며 0.5~0.8 nm 간격의 명확한 격자 구조를 관찰할 수 있다. PSD Drift를 고려하여 빠른 속도로 스캐닝하였으며 (point to point speed : 1msec) 최적의 scanning contact point를 실험적으로 구하여 측정이 이루어졌다.

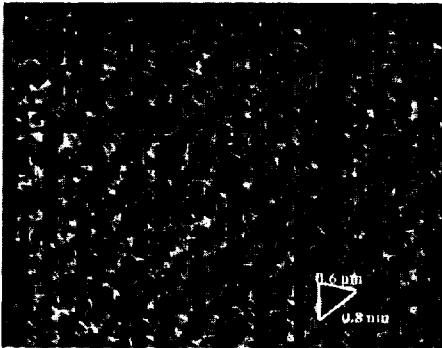


Fig. 16 AFM measurement Mica surface

8. 결론

나노미터 이하의 측정 성능을 요구하는 기계적 시스템인 AFM의 PSD 신호에 대한 모드 분석을 통해 외란에 민감한 영향을 주는 낮은 기계적 고유진동수의 원인을 규명하여 이를 이용해 AFM 시스템을 보완하였다. 또한 위에서 얻은 스펙트럼에서 전기적인 노이즈의 원인을 규명하여 원자 레벨의 측정을 위한 깨끗한 신호를 위해 이를 제거하였다. 모드 해석을 통해 보완된 AFM 시스템을 이

용하여 Mica 샘플의 표면의 격자 구조 측정 실험에 성공하였다.

참고문헌

- 1 Dror Sarid and Virgil Elings, 'Review of scanning force microscopy', J.vac.Sci.Technol.B 9(2), Mar/Apr , pp.431~437 , 1991
- 2 G.Binnig, C.F.Quate, Ch.Gerber, 'Atomic Force Microscope', Phys.Rev.Lett. 56, pp. 930~933 , 1986
- 3 H.-J. Guntherodt and R.Wiesendanger, Scanning Tunneling Microscopy II, Springer Series in Surface Sciences, 1992
- 4 J. Schneir and T.H.McWaid, 'Design of an atomic force microscope with interferometric position control', J.Vac.Sci.Technol. B 12(6), Nov/Dec, pp.3561~3566, 1994
- 5 Jan H Hoh and Jean-Paul Revel etc., 'Tip-sample interactions in atomic force microscopy: I. Modulating adhesion between nitride and glass', Nanotechnology 2, pp.119~122, 1991
- 6 J.M. Paros and L. Weisbord, 1965, "How to design flexure hinge," Machine Design, Vol. 37, pp. 151~157.
- 7 Jong Y Shim, Hewon Chung and DaeGab Gweon, "Design and Control of a Precision Three-axis Stage for AFM Scanner", Proceedings from ASPE 1998 Annual Meeting, 1998, vol. 18, pp. 457~461