

본 연구는 한국과학재단 산학협력연구비(962-0901-01-3)지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

## 접촉모드 AFM의 시스템 분석 및 제어

정희원\*, 심종엽\*, 권대갑\*\*

### Analysis and Control of Contact Mode AFM

H.W.Jung\*, J.Y.Shim\*, D.G.Gweon\*\*

#### ABSTRACT

Recently, scientists introduced a new type of microscope capable of investigating nonconducting surfaces in an atomic scale, which is called AFM (Atomic Force Microscope). It was an innovative attempt to overcome the limitation of STM (Scanning Tunnelling Microscope) which has been able to obtain the image of conducting surfaces. Surfaces of samples are imaged with atomic resolution. 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. One of the room for improvements is gap control between probe tip and sample surface. Distance between probe tip and sample surface must be kept in below one Angstrom in order to measure the sample surface in Angstrom resolution. In this paper, AFM system modeling, experimental system identification and control scheme based on system identification are performed and finally sample surface is measured by home-built AFM with such a control scheme.

**Key Words** : AFM(Atomic Force Microscopy : 원자간력 현미경), tube scanner(튜브 스캐너), laser deflection method (레이저빔 반사법), system identification(시스템 특성확인), Equi-force control(동력유지제어),

#### 1. 서론

반도체 산업, 생명공학 등이 발달함에 따라 미세표면의 측정에 대한 요구는 이미 수년 전부터 대두되었다. 미세표면의 측정장비로는 PSI(Phase Shift Interferometer), SEM(Scanning Electron Microscope), STM(Scannig Tunnelling 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 해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점들을 극복하고 나온 것이 STM<sup>(1)</sup>으로 이는 도체표면과 뾰족한 팁끝간에 전기장을 가하면 비접촉상태에서 터널링 전류(Tunelling Cur-

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원  
 \*\* 한국과학기술원 기계공학과(정희원)

rent)가 흐르는 원리를 이용해서 (0.1nm)이하의 분해능으로 표면의 높이를 측정할 수 있는 방법으로 프로브(Probe)를 이용한 표면측정의 새로운 장을 열었다고 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 외팔보끝에 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 모델링과 동특성 실험을 통한 시스템분석과 이에 바탕을 둔 피드백 제어 계인을 설정한다. 최종적으로 이를 이용하여 일정한 형태를 갖는 샘플의 표면을 측정하였다.

## 2. 기본 원리

### 2.1 표면측정원리

AFM(atomic Force Microscopy)은 1986년에 Binnig<sup>(2)</sup> 등에 의해 만들어졌으며 기본적인 구성은 Fig. 1과 같다.<sup>(3,4)</sup>

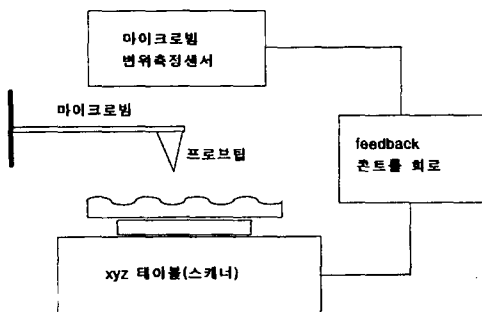


Fig. 1 AFM의 기본 구성요소

프로브 팁을 측정표면에 가까이 가져가면 프로브 팁 끝단의 원자와 측정표면의 원자사이에 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 표면사이에 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 전자기적 특성, 표면의 불순물함유정도 등에 따라 달라지게 된다.<sup>(5)</sup> 이 때 표면의 전자기적 특성, 불순물함유정도등 표면이 일정한 성분으로 돼있다면 팁과 표면사이에 작용하는 힘은 표면의 높이에 의한 함수가 되며 마이크로빔의 휘어짐은 곧 높이 정보가 된다. 이것이 AFM의 측정원리가 된다. 물론 높이가 일정하다면 마이크로빔의 휘어짐은 표면의 다른 여러 가지 성질(표면의 전자기적 특성, 불순물함유정도)을 반영하게 되며 AFM을 이용한 표면의 여러 가지 성질의 측정을 가능하게 한다.

AFM의 표면측정의 분해능은 프로브 팁 끝단의 면적과 표면의 원자사이에 작용하는 힘에 의해 좌우되므로 프로브 끝단의 면적이 얼마나 좁느냐에 달려 있다. 또, 마이크로빔의 스프링 상수, 마이크로빔의 휘어짐을 측정하는 센서의 감도, 샘플의 스캐닝(scanning)을 담당하는 xyz 테이블의 분해능에 달려있다고 할 수 있다.

### 2.2 AFM 접촉모드 측정방식

AFM의 접촉식 표면형상 측정방식은 크게 마이크로빔의 굽힘변위를 직접 측정하는 방식과 마이크로빔의 굽힘변위는 일정하게 하고 스캐너의 z축을 움직이는 두 가지가 있다. 프로파일러미터(profilometer)의 원리처럼 프로브 팁을 표면에 접촉한채 스캐닝을 하며 마이크로빔의 변위를 직접 측정하는 방식은 마이크로빔의 굽힘변위의 비선형성과 표면의 경사가 조금만 급격해도 팁이 부러지게 되는 단점 때문에 이 방법은 원자단위이하의 형상을 갖는 표면이 아니면 잘 사용되어지지 않는다. 따라서 일반적으로는 Fig. 2와 같은 피드백 루프를 갖는 등력유지 제어(Equi-force control)<sup>(6,7)</sup>라는 측정방식을 주로 사용한다. 등력유지제어 측정방식은 표면의 높이 정보 hs가 마이크로빔의 굽힘변위로 치환되고 다시 굽힘센서를 거쳐 스캐너의 z축을 마이크로빔의 굽힘방향의 반대방향으

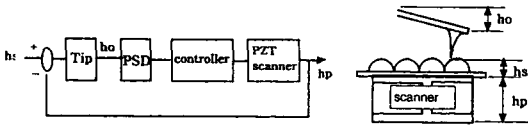


Fig. 2 등력유지 제어 블록선도

로 움직이게 되면 마이크로빔은 원래 위치로 돌아오고 Fig. 2와 같이 스캐너의 z축 변위  $h_p$ 가 샘플의 높이정보  $h_s$ 를 반영하게 된다. 여기서 콘트롤러는  $h_p$ 와  $h_s$ 가 오차가 없도록 regulation해 주는 역할을 한다. 본 연구에서도 이 방식을 사용한 측정이 이루어 진다.

### 3. 시스템 구성

#### 3.1 마이크로빔 & 프로브팁

본 연구에서 개발한 AFM에서 마이크로빔과 프로브팁은 monolithic으로 제조된 PSI사의 Ultralever series를 사용하였다. Ultralever의 사양은 table. 1과 같다.

Table 1 microcantilever spec.

마이크로빔 길이	180 $\mu$ m
팁 길이	4 $\mu$ m
radius of curvature for tip	100 $\text{\AA}$
스프링상수	0.24N/m

#### 3.2 마이크로빔의 휨 측정(laser beam deflection method)

프로브 팁과 표면의 원자간 힘을 직접적으로 측정할 수 있는 방법은 없으므로 마이크로빔을 사용하여 그 변위를 측정함으로써 간접적으로 원자간 힘을 측정한다. 가장 많이 사용되고 있는 방법으로는 마이크로빔에 반도체 리소그래피(lithography)에 의해 스트레인 게이지(strain gage)를 부착하는 방법과 레이저빔반사법(laser beam deflection)을 들 수 있다. 이 중 스트레인 게이지를 이용하는 방법은 구조가 간단해지는 장점이 있으나 스트레인 게이지의 민감도에 따른 노이즈문제가 크며 각 프로브 팁마다 스트레인 게이지가 부착되어 실험시 마다 발생하는 팁의 마모로 인한 잦은 팁의 교환에 의한 단가 상승 등의 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 마이크로빔 휨 측정 방법으로 레이저빔반사법(laser beam deflection)을 사용

하였다. 이 방법은 다른 방법들에 비해 비교적 간단한 구조에 비해 정확한 측정을 보여주며 상대적으로 큰 S/N 특성을 갖는다.

Fig. 3과 같이 레이저 빔을 마이크로빔의 끝단에 포커싱 하고 그 반사되는 빛을 2분할 PSD(Photo Sensitive Device)에 입사시킨다. 2분할 PSD는 두개의 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.

#### 3.3 초정밀 xyz 스캐너

현재 상용 AFM에서는 초정밀 3축 테이블(AFM에서는 이를 스캐너(Scanner)로 통칭한다.)로써 Fig. 4와 같은 튜브 스캐너(tube scanner)<sup>(8)</sup>를 사용한다.

Fig. 4는 상용 단일 튜브 스캐너(single-tube scanner)로 (a)에서 처럼 결정의 방향이 방사형인 튜브형의 압전(piezoelectric)재료의 바깥부분에 4개의 전극과 안쪽에 한 개의 한개의 전극을 놓는 형태로 (b)와 같은 구성을 갖는다. x 방향으로의 운동은 x-dc전극에 일정전압을 걸고 x-ac전극에 다른 전압을 걸어서 (c)에서 처럼 x 방향으로 스캐너가 팽창하는 성질을 이용한다. y방향도 같은 방식으로 이동시킨 후 z 방향은 z 전극에 전압을 걸

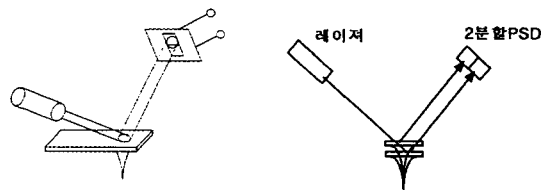


Fig. 3 레이저빔 반사방법(laser beam deflection)

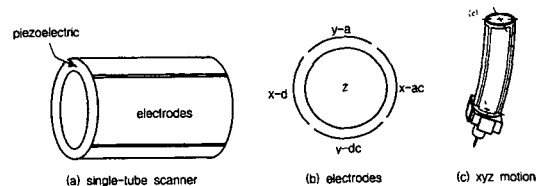


Fig. 4 single tube-scanner

어주어 z 방향으로의 운동을 만들어낸다. x,y 운동시에 bending<sup>(9)</sup>이 이루어짐으로써 z방향으로 커플이 발생하고 스캐너에 위치 센서의 장착이 용이하지 못한 관계로 스캐너의 위치를 개루프로 콘트롤해야 한다는 단점이 있는 반면 하나의 압전재료로 세방향의 운동을 만들어냄으로서 전체 시스템을 작고 단순하게 만들 수 있다는 장점에 의해 본 연구에서도 이를 채택하여 초정밀 xyz 위치결정기 구조써 사용하였다.

Fig. 5는 앞의 측정시스템과 스캐너와 제어회로를 통하여 본 연구에서 사용한 AFM 시스템이다. x,y 스캐닝은 PC에서 직접 개루프로 위치신호만 내어 보내 줌으로써 구현되며 z 방향은 위와 같은 피드백루프에 의해 간접적으로 위치정보를 얻게 된다.

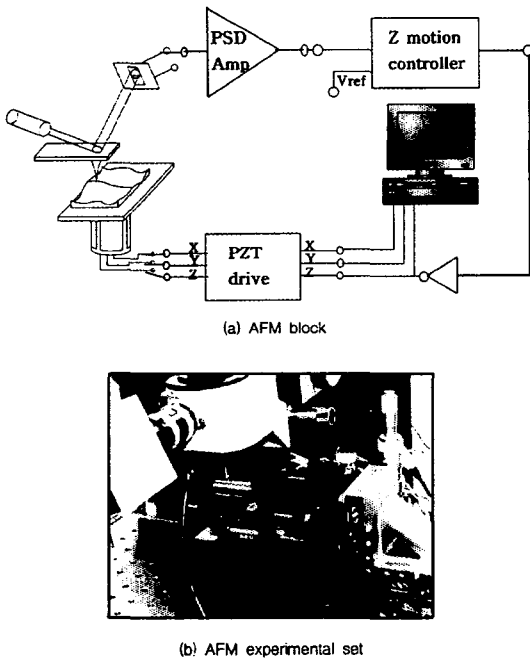


Fig. 5 feedback loop with system components

#### 4. 시스템 분석

AFM이 샘플의 높이를  $\dot{A}$ 이하의 분해능으로 측정하는 것은 Fig. 2에서  $h_p$ 와  $h_o$  사이의 예러가  $\dot{A}$ 이하가 된다는 것을 의미한다. 이를 위해서는 출력의 정상상태에러

(steady state error)가 제로가 되도록 콘트롤러를 설계해야 하며 이를 위해 정확한 시스템 분석이 이루어져야 한다. 이를 위해 Fig. 5에서 나타난 각각의 요소들 뿐만 아니라 고려하지 않은 요소들, 즉 팁을 움직이기 위한 마이크로 스테이지, 스캐너를 받치고 있는 프레임 등의 기계적인 요소들의 동특성을 모두 포함하여 전체 시스템의 전달함수를 구해내야 한다. 그러나 각각의 요소들은 따로 모델링하여 전체시스템의 전달함수를 얻어낸다는 것은 사실상 불가능하므로 본 연구에서는 AFM시스템을 샘플의 높이정보를 입력으로 하고 스캐너의 Z축의 높이정보를 출력으로 하는 단일입력단일출력(Single Input Single Output)시스템으로 보고 이 시스템의 주파수 응답 특성을 실험적으로 구해냄으로써 전체 시스템의 전달함수를 구하였다. Fig. 6에서와 같이 AFM 시스템을 4개의 블록으로 나눈 후  $G_1$ (팁)의 입력 즉 팁의 높이정보를 입력으로 하고  $G_4$ (스캐너)의 출력 즉 스캐너 z축의 높이 정보를 출력으로 하는 SISO 시스템이 됨을 알 수 있다. 전체 시스템의 주파수응답함수를 알기 위해 FFT analyzer를 이용한 주파수 응답특성실험에서 Fig. 6에서와 같이 입력과 출력단이 각각 높이의 물리량으로 나타나기 때문에 전압정보를 입력과 출력으로 하는 FFT analyzer에 맞추기 위해 입력과 출력단의 높이정보를 전압정보로 환원해주는 부가 센서가 필요하게 된다. 그러나 부가 센서의 사용은 새로운 시스템 블록의 추가로 인해 시스템에 새로운 극점을 추가하거나 노이즈의 원인이 될 수 있다. 이를 방지하기 위해 본 연구에서는 Fig. 7와 같이  $G_3$ (스캐너)의 입력 전압을 입력으로 하고  $G_2$ (PSD 모듈)의 출력 전압을 출력으로 하며  $G_4$ 의 출력을  $G_1$ 의 입력으로 하는 시스템을 구성하여 전체 루프전달함수가 결국은  $G_1G_2G_3G_4$ 가 되게 하였다.  $G_4$ 와  $G_1$ 의 연결은 스캐너 z축의 워단과 마이크로 팁의 끝부분이 접촉되어 있으므로 자연히 기계적으로 연결이 된다. 이와 같은 실험을 통해

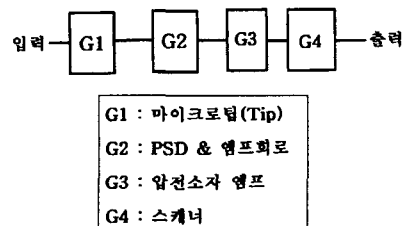


Fig. 6 Block diagram of AFM system

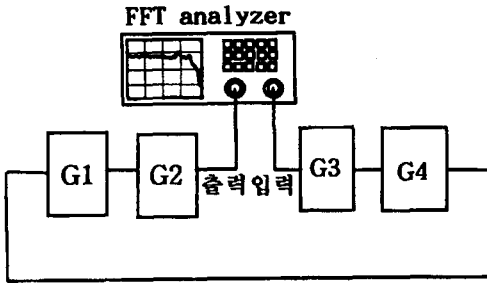


Fig. 7 input & output port for FFT experiment

$G_1, G_2, G_3, G_4$  각각을 수학적으로 또는 실험적으로 모델링하여 통합하는 것보다 전체시스템을 한번에 연결함으로써 시스템을 블록화하면서 생략되어진 성분들(기계적 연결부, 팁을 이동시켜주기 위한 마이크로스테이지 등)의 동특성마저도 포함시킬 수 있는 장점이 있다. 단, 각 요소들은 팁이 샘플에 접촉되어 있고 스캐너가 높이 변화가  $\mu\text{m}$ 이내에서 움직인다고 가정하면 모두 선형적이라고 가정한다.

Fig. 8.은 Fig. 7.와 같은 시스템 주파수 응답 특성 실험에 의해 얻어진 시스템 주파수응답특성곡선이다.

Fig. 8에서 보이는 시스템의 특징은 2 kHz와 10 kHz 사이에 공진모드를 갖는 것을 볼 있다. 3 kHz부근에서의 Cut-off 주파수 특성은 전체시스템에서 가장 느린 동특성을 갖는 스캐너에 삽입된 압전소자를 움직이기 위한 앰프회로의 동특성이며 10 kHz에서의 공진은 끝단에 마이크로팁을 가지고 있는 마이크로빔의 공진주파수에 해당한다. 그 외 2 kHz~10 kHz 사이에 있는 여러 부차공진 성분은 마이크로 스테이지에 있는 스프링과 스캐너를 지지하고 있는 지그의 동특성으로 예상된다. PSD 앰프의 Cut-off 주파수는 측정가능영역을 훨씬 지난 영역(약 1MHz 부근)에 존재하므로 본 실험에 의한 주파수응답특성곡선에는 나타나지 않았다. 또, Fig. 8에서는 명확하게 나타나지 않은 작은 공진 peak들은 신호분석기(35670A : HP dynamic signal analyzer)의 공진점을 찾는 기능을 통해 구해냈다. 실험으로 구한 bode선도를 근거로 하여 시스템의 전달함수를 구하면 다음과 같다. 먼저, 3.27kHz와 4.84kHz에서 각각 영점(zero)이 없고 2차 극점(pole)을 갖는 2차 시스템으로 모델링을 하고 2 kHz~10 kHz 사이에 있는 부가 공진주파수 (3.41kHz, 4.05kHz, 8.09kHz, 9.55kHz, 10.35kHz)는 각각을 2개의 극점(pole)과 2개의 영점(zero)으로 모델

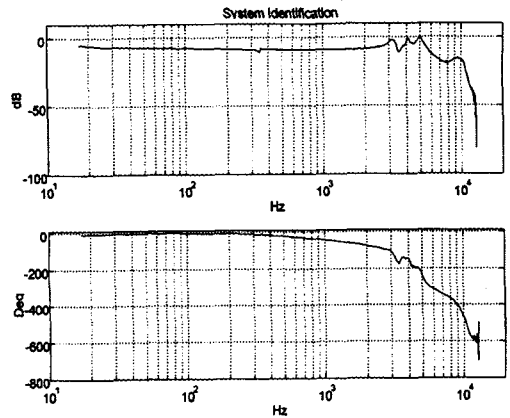


Fig. 8 AFM system experimental bode plot

링하여 앞에서 구한 4차 모델과 직렬연결하여 전체 시스템을 모델링하였다. 이 때 모델링을 통해 구한 전달함수의 계수 중 수치해석적으로 무시할 수 있는 분모의 14차항의 계수와 분자의 6~10차항의 계수를 생략하면 다음과 같이 13개의 극점과 5개의 영점을 갖는 전달함수를 구할 수 있다.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_1s^5 + b_2s^4 + \dots + b_5s + b_6}{a_1s^{13} + a_2s^{12} + \dots + a_{13}s + a_{14}}$$

$a_1 = 5.77 \times 10^{55}$	$b_1 = 7.45 \times 10^{-19}$
$a_2 = 3.83 \times 10^{50}$	$b_2 = 5.05 \times 10^{-15}$
$a_3 = 6.79 \times 10^{45}$	$b_3 = 1.04 \times 10^{-9}$
$a_4 = 3.38 \times 10^{40}$	$b_4 = 2.76 \times 10^{-6}$
$a_5 = 2.67 \times 10^{35}$	$b_5 = 3.16 \times 10^{-1}$
$a_6 = 9.85 \times 10^{31}$	
$a_7 = 4.28 \times 10^{26}$	
$a_8 = 1.16 \times 10^{21}$	
$a_9 = 3.09 \times 10^{17}$	
$a_{10} = 5.75 \times 10^{13}$	
$a_{11} = 9.62 \times 10^9$	
$a_{12} = 9.90 \times 10^5$	
$a_{13} = 1.00$	

이와 같이 하여 얻은 시스템 전달함수의 보드선도와 실제 주파수응답특성을 비교한 것이 Fig. 9이고 시스템의 스텝입력을 통한 과도응답특성을 나타낸 것이 Fig. 10이다.

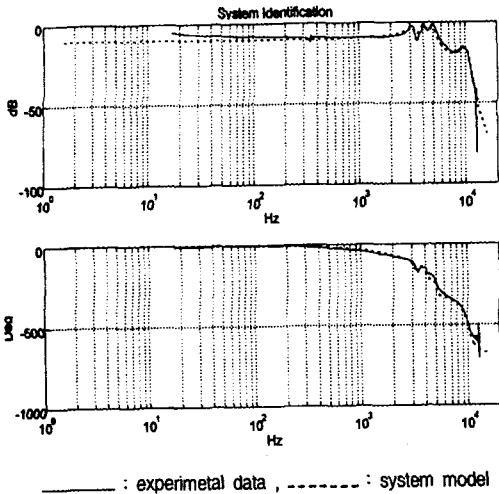


Fig. 9 bode plot & system model

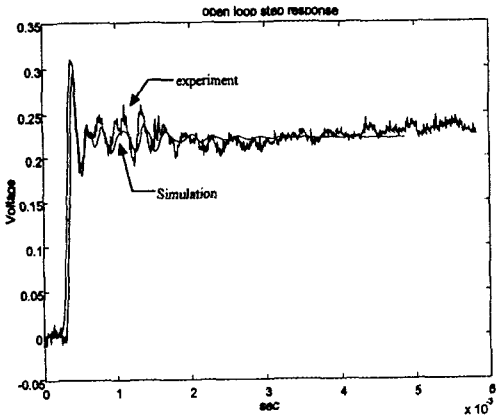


Fig. 10 open loop step response

### 5. 시스템 제어

AFM의 표면측정방법은 Fig. 4와 같이 스캐너의 z축의 출력을 모니터링함으로써 이루어진다. 따라서 AFM의 분해능을 결정하는 것은 스캐너의 높이정보가 샘플의 높이정보와 얼마나 정확하게 일치하느냐에 달려 있다고 할 수 있다. 따라서 입력과 출력사이의 정상상태에러를 제로로 만들어 주기 위해 AFM의 피드백 루프에는 적분 기능을 하는 PI 컨트롤러를 사용한다. 본 연구에서도 컨트롤러로 적분기를 사용할 경우 타입 1 시스템이 되기 때

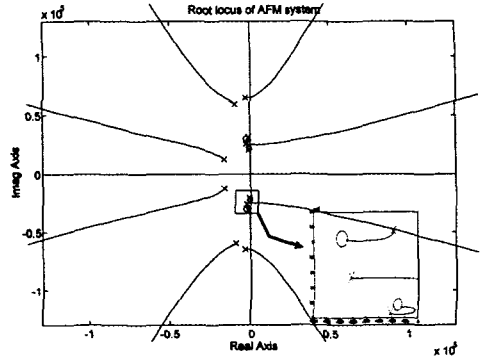


Fig. 11 Root locus of AFM system

문에 정상상태에러가 제로가 되게 된다. 본 AFM 시스템은 Fig. 11에서 보이는 근궤적(Root locus)에서 볼 수 있듯이 허수축에 가까이 붙은 극점에 의해 P게인이 조금만 커져도 불안정해지는 특성이 있다. 조금만 불안해져도 팁끝이 부러지거나 마이크로빔이 부러져 버리는 특성에 의해 AFM의 제어루프에서는 시스템의 안정성을 콘트롤 게인 튜닝에서 최우선으로 고려된다. 따라서 P게인은 가능한 줄이고 I게인을 증가시켜서 정상상태의 에러가 zero가 되도록 튜닝하였다. STM의 게인튜닝<sup>(10)</sup>을 결정하는 것과는 달리 AFM의 콘트롤 게인 튜닝은 실험적인 튜닝이 불가능하므로 앞서 제시한 시스템 전달함수를 이용하여 시뮬레이션을 통해 P게인과 I게인을 결정하였다. AFM 피드백 시스템에서 게인튜닝의 목적은 2가지로 들 수 있는데 첫 번째는 정상상태에서 출력이 입력과 오차없이 같아야 하며 두 번째는 정착시간(settling time)이 AFM의 x,y 스캐닝 주기보다 빨라야 한다는 것이다. 일반적인 AFM은 마이크로팁의 보호를 위해 보통 3Hz 정도의 주파수로 스캐닝을 한다. 즉, 약 0.3초에 1개의 데이터를 얻는다고 볼 수 있으므로 정착시간은 이 시간보다 빨라야 한다. 또, 높이 정보 데이터에 들어있는 랜덤 노이즈를 제거하기 위해 같은 위치에서 10회 연속으로 값을 읽어 그 평균을 취하는 방법을 쓰는데 이를 위해 이보다 10배 빠른 30 msec이하이어야 한다. Fig. 12는 위의 목적을 만족시키도록 튜닝된 AFM 피드백 시스템의 스텝입력에 대한 응답을 본 것이다. Fig. 12에서 보듯이 정착시간이 약 20 msec정도이며 정상상태에러는 zero가 됨을 볼 수 있다. 이 때의 PI컨트롤러의 게인은  $1 + \frac{1000}{s}$ 로 하였으며 이는 2단의 Op amp회로를 이용하여 구현

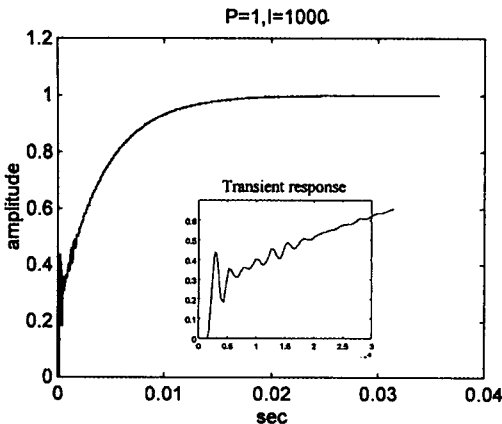


Fig. 12 closed loop step response of AFM system

하였다. PI 컨트롤러는 전체시스템에서 가장 느린 극점의 동특성만을 제어하므로 빠른 극점의 동특성에 의해 초기의 과도응답특성은 개루프에서의 응답특성과 같음을 볼 수 있다.

6. AFM을 이용한 표면 측정 실험

Fig. 13은 본 연구에서 개발한 AFM을 이용하여 1 $\mu$ m 간격으로 30mm높이의 정현파무늬의 격자가 존재하는 실리콘 표준시편을 접촉모드로 측정 한 그림이다. x,y 스캐닝 주파수는 3Hz로 하였으며 5 $\mu$ m $\times$ 5 $\mu$ m의 면적을 50 $\times$ 50으로 총 2500개의 데이터를 얻었다.

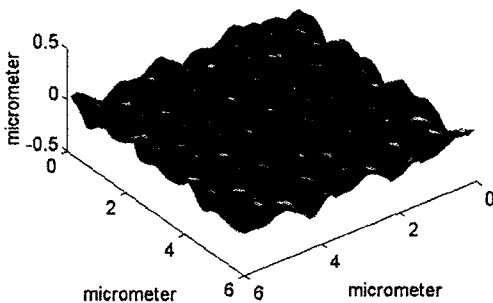


Fig. 13 1 $\mu$ m pitch standard sample

7. 결 론

본 연구는 초정밀표면검사, 반도체의 선폭검사, 분자생

물학에서의 세포형상측정 등 그 응용범위가 날로 늘고 있는 AFM의 개발에 관한 것이다. 특히, 반도체의 선폭검사 등에 흔히 사용되는 접촉모드측정방식에 대한 체계적인 분석이 이루어 졌으며 이를 바탕으로 AFM 시스템에서 요구하는 사양을 만족하는 PI 컨트롤러의 계인을 결정하여 표준샘플의 표면을 성공적으로 측정하였다.

본 연구에서 개발한 AFM시스템은 전체의 강성이 약해 부차공진이 많아 이에 따른 시스템 안정성저하를 가져왔다. 이를 보완하기 위해 시스템 프레임의 강성을 높이는 설계가 되어야 하며, 스캐너에 사용되는 압전소자의 비선형성에 의해 발생하는 측정결과와 왜곡을 보정하는 연구 등 좀더 많은 차 후 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

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. D.P. Dilella, J.H.Wandass, 'Control systems for scanning tunneling microscopes with tube scanners', Rev.Sci.Instrum. 60(6) June, pp.997~1002, 1989.
7. Sang-il Park, C.F. Quate, 'Theories of the feedback and vibration isolation systems for the scanning tunneling microscope', Rev.Sci.Instrum.58(11) November, pp. 2004~2009, 1987.

8. G. Binnig and D.P.E. Smith, 'Single three-dimensional scanner for scanning tunneling microscopy', Rev.Sci.Instrum. 57(8), August, pp.1688~1689, 1986.
9. M. locatelli and G. Lambolely, 'Easy method to characterize a piezoelectric ceramic tube as a displacer', Rev.Sci.Instrum. 59., pp.661~663, 1988.
10. Guoliang Ping, Michael A Player, 'Control system analysis of a scannig tunnelling microscope', Meas. Sci. Technol. 4, pp.677~681, 1993.