

## 상호 간섭이 최소화된 고속 원자현미경용 XY 스캐너 제작

박종규(포항공대 대학원 기계공학과), 문원규(포항공대 기계공학과)

### An XY scanner with minimized coupling motions for the high speed AFM

J. Park(Mecha. Eng. Dept., Postech), W. Moon(Mecha. Eng. Dept., Postech)

#### ABSTRACT

This paper introduces design, fabrication and experiment process of a novel scanner for the high speed AFM(Atomic Force Microscope). A proper design modification is proposed through analyses on the dynamic characteristics of the existing linear motion stages using a dynamic analysis program, Recurdyn. Since the scanning speed of each direction is allowed to be different, the linear motion stage for the high-speed scanner of AFM can be so designed to have different resonance frequencies for the modes with one dominant displacement in the desired directions. One way to achieve this objective is to use one-direction flexure mechanism for each direction and to mount one stage for fast motion on the other stage for slow motion. This unsymmetrical configuration separates the frequencies of the two vibration modes with one dominant displacement in each desired direction, hence, the coupling between the motions in the two directions. In addition, a pair of actuators is used for each axis to decrease the cross talks in the two motions and gives a force large enough to actuate the slow motion stage, which carries the fast motion stage. After these design modifications, a novel scanner with scanning speed higher than 10 Hz can be achieved to realize undistorted images in the high speed AFM.

**Key Words** : Scanner(스캐너), High Speed AFM(고속 원자현미경), Flexure mechanism(유연 메커니즘)

#### 1. 서론

20 세기말 기존의 광학을 이용한 센서 기술과 압전 구동기를 이용한 초정밀 위치 구동기술을 결합하여 상온에서 분자를 볼 수 있는 원자 현미경(AFM, Atomic Force Microscopy)이 개발되었다<sup>[1]</sup>. 이러한 기술은 기존의 어떠한 측정 기술 보다 뛰어난 분해능을 가지고 있으며 나노 기술 발전에 초석 역할을 하였다. 그러나 원자현미경은 기존 광학 현미경이 실시간으로 형상을 관측할 수 있음에 반해 프로브로 시편을 스캔하는 원리를 이용하기 때문에 최소 수분 이상의 측정시간이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 따라서 보다 빠르고 정확한 이미지를 측정하기 위한 노력이 주요 쟁점으로 떠올랐다<sup>[2]</sup>.

일반적으로 원자현미경의 측정 시간은 XYZ 스캐너의 스캐닝 속도에 의해 결정된다. 기존에 이용된 스캐너는 대부분 XYZ 구동이 하나의 구동기로 가능한 압전 튜브 스캐너 (Piezoelectric Tube Scanner)를 이용하였다. 그러나 이러한 압전 튜브 스캐너는 공진주파수가 낮고 XYZ 간 상호간섭(Crosstalk)으로 인하여 수 Hz 이상으로는 스캐닝 하는 것이 불가

능하다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해 XY 스캐너와 Z 스캐너를 분리하여 각 특성에 맞게끔 다른 설계 인자에 의해 설계하고자 하는 노력이 있었다<sup>[2]</sup>. 즉 XY 스캐너와 Z 스캐너로 오랫동안 연구되어 왔던 유연 시스템 (Flexure System)과 압전 스택 구동기(Piezoelectric Stack Actuator)를 결합하여 이용함으로써 스캔 속도를 획기적으로 향상시킬 수 있었다. 본 연구에서는 이 중 XY 스캐너에서 압전 스택 구동기가 가지고 있는 원하지 않는 모션을 억제해 주는 유연한 시스템의 설계 변경을 통하여 개루프 특성을 극대화함으로써 기존 XY 스캐너 보다 10 배이상 빠르게 이미지를 추출할 수 있는 시스템을 구축하고자 한다.

#### 2. 설계 과정

원자현미경에서 스캐너의 역할은 샘플을 원하는 위치까지 이동시키는 것이다. 일반적으로 원자현미경에서 시편을 스캔하는 방법은 탐침은 고정되어 있고 스캐너 위에 올려진 시편을 스캐너가 XY 방향으로 지그재그 형식으로 스캔하게 된다. 이 때

각 축으로의 입력신호는 삼각 파형을 가하게 되고 그러한 입력신호와 같은 형태의 모션이 일어나게 되면 가장 이상적인 스캐너라 하겠다. 따라서 스캐너는 분해능이 좋아야 할 뿐만 아니라 입력신호에 대해 선형화 되어야 하고 각축에 대해 상호간섭이 없어야 한다. 이러한 압전 유연시스템은 압전 스택 구동기를 이용하여 구동되 압전 스택 구동기가 가지고 있는 기생운동을 최소화하기 위해 유연힌지를 이용한 가이드 시스템을 결합한다. 이 시스템은 다양한 설계 변경이 가능하며 증폭 메카니즘을 이용할 수 있다는 이점이 있다. 그러나 이러한 시스템에도 고속으로 스캔하기 위해서는 다음과 같이 몇가지 해결해야할 문제점이 존재한다.

첫번째로 진동 문제를 들 수 있다. 이것은 입력을 고주파수의 삼각파형으로 가했을 때 발생하게 된다. 이 문제는 임의의 구동기에 스택파형을 가했을 때 트랜지션 구간에서 발생하는 작은 감쇄 진동(Underdamped vibration)과 같은 형태로 발생하게 된다.

두번째로 상호간섭(Crosstalk)을 들 수 있다. 상호간섭은 일반적으로 하나의 플랫폼을 두 방향의 구동기로 구동할 때 크게 발생하게 된다. 이러한 상호간섭은 모드 해석에서 알 수 있는데 고주파수로 구동 되면서 기하급수적으로 커지게 된다.

세번째로 직진성(Straightness)이다. 이것은 일반적으로 압전 스택구동기가 가지고 있는 단점인 작은 변위를 보완하기 위하여 증폭메카니즘을 이용할 때 발생하게 된다. 즉 하나의 구동기가 증폭메카니즘을 거치게 되면 플랫폼이 회전운동을 하게 되는데 이러한 문제점도 보완되어야 한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 기본적으로 원자현미경의 스캐너는 각 축에 대한 구동 주파수가 다르다는 원리를 적극 활용하고자 한다. 즉 지그재그형식으로 스캔되기 때문에 하나의 구동 주파수가 다른 하나의 구동 주파수 보다 훨씬 낮다. 따라서 각 축간 공진 주파수를 완전히 다르게 설계할 수 있다는 아이디어가 본 연구의 주안점이 된다. 또한 한 축의 스캐너를 다른 한 축의 스캐너 속에 넣어 상호 간섭에 의한 효과를 줄였으며 특히 진동문제는 과도 감쇄 시스템(Overdamped system)으로 변환하기 위해 그리스(Grease)를 주입하여 강제 댐핑을 주었다. 마지막으로 직진성을 확보하기 위해 각 축당 2 개의 구동기와 증폭메카니즘을 이용함으로써 충분한 힘과 증폭메카니즘에 의한 기생운동을 최소화하였다. Figure 1 은 이러한 아이디어를 이용하여 제작된 스캐너를 보여주고 있다.

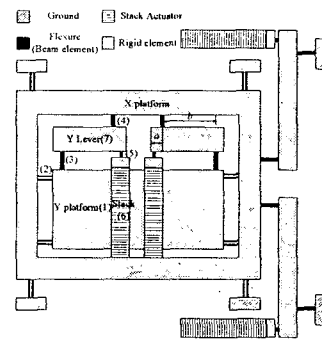
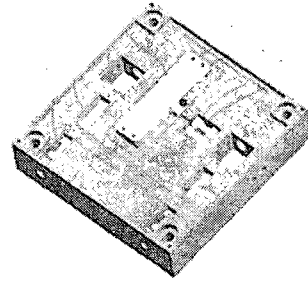


Fig. 1 Shape and Structure of the designed scanner

### 3. 분석 및 해석

본 스캐너는 크게 구동기와 유연힌지로 구분할 수 있기 때문에 각각에 대해 질량 스프링 댐퍼 모델로 단순화시킬 수 있다. 본 연구에서 설계된 스캐너는 고체의 연속적 움직임을 이용하는 유연힌지를 사용하기 때문에 매우 작은 분해능을 가지고 있으며 기존 고체 역학과 동역학을 이용하여 고유진동수를 예측할 수 있다. 이러한 수학적 모델링의 과정은 Smits et al. 논문<sup>[3]</sup>에서 유도되어 있는 방법과 그 과정이 유사하므로 결과식만을 제시한다. 식 (1)은 시스템 고유진동수를 나타내는 식이다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\left(\frac{k_v}{2} + \frac{k_p}{n^2} + \frac{k_R}{b^2}\right)}{\left(\frac{I_v}{b^2} + \frac{m_p}{n^2} + \frac{m_v}{2}\right)}} \quad (1)$$

where

- $k_p$  is the stiffness of piezoelectric actuators
- $k_v$  is sum of the stiffness of the flexure hinge guide
- $k_R$  is sum of the rotational stiffness of each hinge
- $n$  is the amplification ratio(=b/a)
- $b$  is the lever length
- $m_p$  is the mass of the piezoelectric actuator
- $m_v$  is the mass of the moving platform

이러한 이론적 분석과 더불어 보다 정확한 정적 동적 특성을 파악하기 위하여 유한요소 프로그램 코스모스 워크스(Cosmosworks)와 동적 해석 프로그램인 리커다인(Recurdyne)을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 먼저 코스모스 워크스를 이용하여 해석하였다. 유연한지 부분과 압전 스택 구동기를 조립한 후 각각에 맞는 물성치를 넣어주었다. 경계조건은 4 모서리를 고정시켰으며 메시(mesh)타입은 삼각형을 이용하였다. 이 때의 최종 결과는 Fig. 2 에서 보여주는 것과 같이 Y 축에 대해 333hz 이고 X 축에 대해 571 Hz 이다. 이러한 결과는 나중에 실험결과와 매우 일치하는 것을 확인할 수 있다. 여기에 더불어 동적 시뮬레이션 프로그램인 리커다인을 이용하여 스캐너의 플랫폼(Platform)을 강체(rigid body)로 모델링하고 유연 한지 부분을 빔(Beam)으로 모델링하여 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 여기에서 압전 구동기도 또한 강체-빔으로 모델링하고 외부에서 가하는 전압을 외부에서 주는 사인파, 삼각형의 힘으로 모사하였다. 이러한 방법을 통해 각 플랫폼과 빔에 걸리는 힘과 변위 데이터를 구할 수 있다. Figure 3 에서 보여주는 시뮬레이션을 통해 X 축에 대해 약 30 마이크로 Y 축에 대해 약 50 마이크로 의 변위를 발생시킴을 확인할 수 있었다.

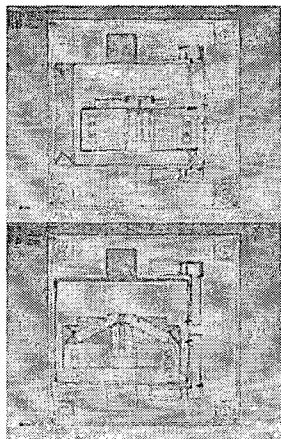


Fig. 2 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> mode of the scanner

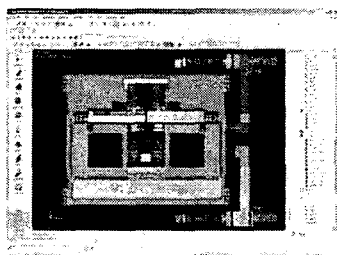


Fig. 3 Dynamic analysis using Recurdyne

#### 4. 실험

본 실험에서는 기본적으로 스캐너의 시간과 주파수 도메인 상에서의 특성을 분석하는 것을 목적으로 하였다. 이러한 특성 분석을 통하여 각 주파수에 대한 각 축의 변위를 측정할 수 있으며 공진 주파수를 알 수 있다. 더불어 각 축간의 상호 간섭 효과(Crosstalk)도 측정할 수 있다. Fig. 4 는 실험 셋업을 보여주고 있으며 측정 장비로는 2nm 의 분해능을 가진 레이저 바이브로미터(Laser Doppler Vibrometer)를 이용하였다. 압전 구동기에 들어가는 입력으로는 파형 발생기(Function Generator)를 이용하였고 이러한 시그널을 증폭하기 위하여 증폭기(Amplifier)를 통해 각 축의 압전 구동기에 50V 오프셋(Offset) 의 100Vpp 의 사인파와 삼각파를 가하였다. 이러한 입력에 대해 X 축의 경우 대략 50 micron 의 변위를 Y 축의 경우 약 30 마이크로톤의 변위를 발생시킴을 알 수 있었다. 주파수 특성에서 사인파의 경우는 약 100hz 까지 문제없이 따라감을 알 수 있었으나 삼각파에서는 Y 축의 경우 약 10hz 미만에서 이미 진동에 의한 문제점이 발생한다. 이것은 작은 감쇄 시스템(Underdamped system)의 전형적인 결과로서 트랜지션 영역에서 발생하는 진동의 영향임을 알 수 있다. 이러한 진동 문제는 그리스를 이용한 댐핑을 주었을 때 충분히 진동 감쇄가 일어남을 확인할 수 있었다. 더불어 정밀 구동에서 압전 구동기를 이용하였을 때 항상 중요한 문제로 대두되는 히스테리시스를 시간 도메인 결과에서 확인할 수 있었다. 이 결과에서 약 10% 정도의 히스테리시스가 발생함을 확인할 수 있었다. Figure 5 는 강제 댐핑을 준 후의 결과 변위와 상호 간섭 결과를 보여주고 있다.

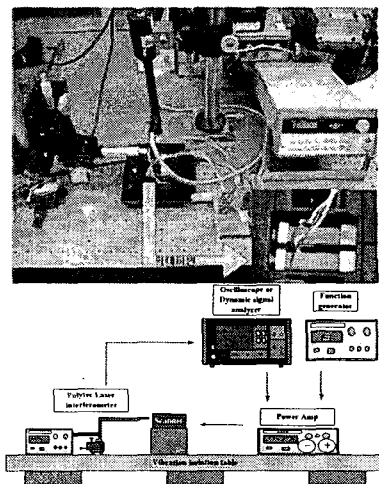
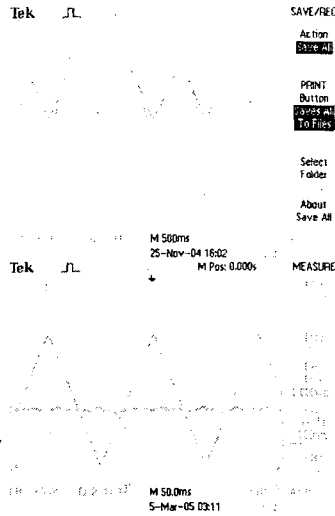
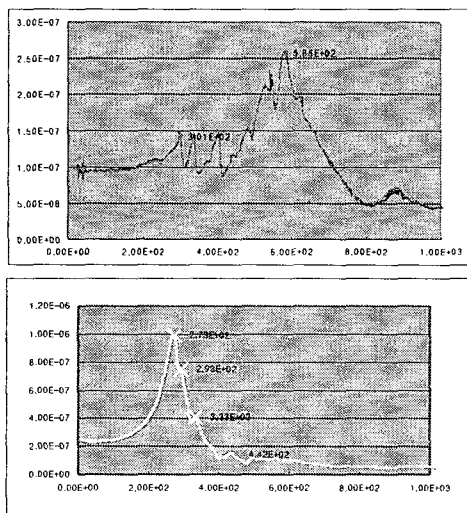


Fig. 4 Experimental Setup



**Fig. 5** Output with respect to the triangular wave input and Crosstalk after injecting grease(damping)

이러한 각 축의 시간도메인 결과와 더불어 한 축은 압전구동기에 입력을 가하고 다른 한 축은 측정함으로써 상호간섭을 측정할 수 있다. Figure 5는 상호 간섭 결과를 보여 주고 있으며 이러한 상호 간섭은 기존의 하나의 플랫폼을 외곽에서 두개의 구동기로 밀어주는 구조에서 나타나는 것 보다 줄어듦을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 더불어 Figure 6은 각 축에 대한 FRF를 보여 주고 있다. 이러한 FRF에서 공진주파수는 시뮬레이션 결과와 매우 유사하여 X축에 대해서는 약 273Hz, Y축에 대해서는 약 580Hz 결과가 나옴을 알 수 있었다.



**Fig. 6** Frequency response function of each axis

## 5. 요약 및 결론

본 연구는 기존 원자 현미경에서 주로 이용하던 압전 튜브 구동기가 가지고 있는 낮은 공진 주파수와 큰 상호 간섭으로 인해 수 Hz 정도에서만 스캐닝이 가능하던 문제를 극복하기 위하여 기존의 고체 유연 시스템과 압전 스택 구동기를 결합한 나노 위치 결정 시스템의 설계 변경을 통하여 보다 뛰어난 성능의 스캐너를 개발하였다.

기존의 압전 나노 위치 결정 시스템의 경우 주로 정적 운동에 주안점을 두었기 때문에 높은 주파수에서는 상호 간섭이 크게 일어나는 문제점을 지니고 있었다. 더불어 하나의 플랫폼을 외곽에서 밀어주는 방식을 취하고 있었기 때문에 정확한 선형운동이 일어나지 않고 회전 기생 운동이 존재하는 단점을 지니고 있었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 비대칭적 구조로 설계하고 하나의 축을 다른 하나의 축 내부에 뒹으로써, 상호 간섭을 최소화할 수 있었다. 더불어 진동문제를 최소화하기 위해 강제 댐핑을 가함으로써 높은 주파수에서 생기던 진동문제를 완화하는데 성공하였다.

## 후기

본 연구는 과기부의 나노 핵심 기반 기술 사업의 “고성능 SPM 측정 및 시스템 기술 개발” 과제의 위탁과제인 고성능 스캐너 개발” 과제 (M10213350002-04M0335-00211)를 통해 수행되었다.

## 참고문헌

1. G. Binnig, C. Quate, and C. Gerber, Phys. Rev. Lett. 56, pp 930-933
2. Joonhyung Kwon, Jaewan Hong, Yong-Seok Kim, Dong-Youn Lee, Kyumin Lee, Sang-min Lee, and Sang-il Park, Rev. Sci. Ins., Vol 74, 10, pp 4378-4383, 2003.
3. S. T. Smith, Flexures: Elements of Elastic Mechanism Design (2002) Gordon and Breach
4. Shane C. Woody and Stuart T. Smith, Rev. Sci. Ins. 75, 4, pp 842-848, 2004.
5. Shuo Hung Chang; Chung Kai Tseng; Hon Chan Chien, IEEE Transactions on UFFC 46, 4, pp 897-905, 1999.
6. Shuo Hung Chang; Chung Kai Tseng; Hon Chan Chien, IEEE Transactions on UFFC 46, 4, pp 906-912, 1999
7. Y. Ando, Sensors and Actuators 114, pp 285-291, 2004
8. Oden, J. T., and E. A. Ripperger, Mechanics of Elastic Structures, Second Edition, McGraw-Hill Press, 1968