

## 원자현미경의 프레임 강성에 따른 진동 해석

### Vibration Analysis of a Atomic Force Microscope according to the Frame Stiffness

\*김용대, #박기환

\*Y. D. Kim, #K. H. Park(khpark@gist.ac.kr)

광주과학기술원 기전공학과

Key words : precision measurement, frame stiffness, mechanical vibration

#### 1. 서론

가공기술의 발전으로 인해, 나노급 미세공정은 이미 양산화체를 구축하고 있으며, 이제는 나노급 이하의 미세가공 공정을 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나, 미세가공 공정을 이용한 제품은 눈으로 보이지 않기 때문에 이를 검증할 수 있는 미세 정밀 측정 장비 기술이 기반되어야 한다. 이를 위하여, 기존의 광학현미경으로 볼 수 없었던 나노급 분해능을 가지는 계측장비들이 개발되고 있으며, 원자현미경은 수백마이크로 미터의 캔틸레버 끝에 위치한 수십나노의 탐침을 이용하여 시편의 표면형상과 물리적, 화학적, 자기적 특성을 측정하기 위해 널리 사용되고 있는 고분해능 계측 장비 중의 하나이다. 그러나, 센서 분해능의 향상은 외부 환경에 의한 영향에도 민감함을 의미하기 때문에 이를 차단할 수 있는 기술이 필요하다.

정밀 계측 장비에서 진동은 측정 오차를 야기하는 주된 노이즈 원인이 된다. 따라서, 정밀 계측 시스템을 구성할 때에는 센서의 분해능과 함께 반드시 고려되어야 할 사항이다. 정밀 계측 장비의 측정에 영향을 줄 수 있는 진동은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 지면이나 공기를 통해 정밀 계측 장비의 센서부로 전달되는 외부적 진동과 시스템의 구성요소에서 자체적으로 발생하는 내부적 진동이 그것이다. 건물의 흔들림, 사람의 걸음걸이, 실험장비의 내부에서 동작하는 냉각팬, 공기의 흐름, 음성등의 외부적 진동은 지금까지 보고된 가장 주요한 진동원들이다. 지면으로부터 정밀 계측 장비의 베이스로 전달되는 진동을 차단하기 위해, 가장 먼저 시도된 기술은 질량, 스프링, 그리고 댐퍼로 구성되는 수동 방진 시스템이었다.[1][2][3] 그러나, 수동 방진 시스템의 경우, 고주파 성분의 외부 진동을 차단하는데에는 효과적이지만, 지표면으로부터 건물로 전달되는 진동과 같이, 수동 방진 시스템의 차단주파수보다 저주파 성분의 외부 진동은 정밀 계측 장비로 그대로 전달된다. 최근에는 이러한 문제를 해결하기 위해, 능동형 방진 시스템이 활발히 연구되고 있다.[4][5][6] 여기서는, 정밀 계측 장비를 지지하는 베이스의 각 축에 센서를 설치하고, 측정된 진동량을 계산하여 되먹임 제어를 수행함으로써 시스템의 차단주파수보다 저주파 성분을 가진 진동에 대해서도 센서부로 전달되는 진동을 효과적으로 차단할 수 있다. 최근에, 상용으로 제공되는 원자현미경은 음향학적 진동을 차단하기 위해 챔버를 함께 제공하고 있다.[8] 정밀 계측 장비에 영향을 줄 수 있는 두 번째 요인은, 시스템을 구성하는 액츄에이터, 드라이버, 그리고 구동 회로 등의 시스템 내부에서 발생하는 미세진동이다. 이러한 내부적 진동은, 측정을 위해 피할수 없는 경우가 대부분이다.

본 논문에서는, 시스템의 기계적 강성에 따른 내부진동이 미세 측정에 미치는 영향을 고려한다. 원자현미경의 개발 과정에서 발생할 수 있는 내부 진동의 문제점을 파악하고 유한요소 해석법을 이용하여 고려해야 할 진동모드를 조사한다. 가장 큰 영향을 미치는 첫 번째 모드에 대해 진동측정을 수행하고 센서신호에 나타나는 영향을 고찰한다.

#### 2. 모델링

그림 1(a)는 일반적인 원자현미경의 구성도를 보여준다. 원자현미경은 측정용 탐침과 이를 고정하는 팁홀더, 광측정을 위한 광학계, 팁 위에 광 스폿이 올라갔는지 확인하기 위한 고배율 CCD와 광학렌즈, x-y축 조동/미동 스테이지, y축 조동/미동 스테

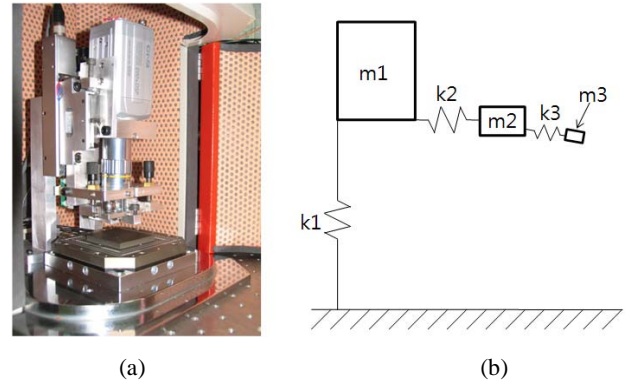


Fig. 1 (a) Real configuration of an AFM (b) schematic diagram of the AFM

이지, 그리고 이들 시스템을 지지하는 프레임과 베이스로 구성된다. 그림 1(b)는 진동해석을 위해 간략화된 모델을 보여준다. y축 조동/미동 스테이지와 광학계, 광학렌즈, 그리고 고배율 CCD 카메라는 강체로 모델링할 수 있을 만큼 강하게 고정되어 있다고 가정하고 하나의 질량, m1으로 모델링하였다. 메인 프레임은 외팔보 형식의 스프링, k1으로 모델링하였다. 이송용 스테이지와 광학계, 고배율 CCD와 광학 렌즈등은 충분히 강하게 조립되었다고 가정하고 강체로 모델링 하였다. 그리고, 측정용 탐침을 부착하기 위한 팁홀더를 m2와 길이로 인해 고려해야 할 스프링, k2로, 그리고 원자현미경에서 강성이 가장 낮은 부분인 측정용 탐침은 m3와 k3로 모델링하여 진동영향을 고려하기로 한다. m1은 여러 부품들을 포함하기 때문에 비교적 질량이 크고, 이로 인해 메인 프레임을 설계할 때, 충분한 강성을 가지도록 유의하여야 한다.

메인 프레임을 외팔보로 가정하여 다음과 같이 모델링할 수 있다.[7]

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI}, k = \frac{P}{\delta} = \frac{3EI}{L^3} \quad (1)$$

여기서, P는 부하 하중, L은 프레임의 유효길이, E는 재질에 따른 Young 수, I는 관성모멘트이다.

#### 3. AFM 기구부의 모드 해석

원자현미경 시스템에서 발생하는 공진주파수를 찾기 위해 유한요소법을 이용하여 해석을 수행한다. 그림 2(a)는 유한요소 해석에 사용된 CAD 모델을 보여준다. 3차원 모델을 구성하였고, 볼트를 이용하여 체결된 부분은 하나의 몸체로 모델링하였다. 방진 시스템과 방음용 챔버를 사용하였을 때에도 발생하는 진동 문제를 보이기 위해, 메인 프레임의 강성을 작게 설정함으로써 낮은 주파수에서 첫 번째 공진이 발생하도록 유도하였다. 또한 탐침을 부착하는 홀더 부분에 광학계가 부착될 경우에 발생하는 문제점을 보이기 위하여 m2에 해당하는 부분을 과장하여 표현하였다. 그림 2(b)는 유한요소 해석을 위해 메시를 나누는 모습이다. 수렴도 테스트를 수행하였고, 해석에 사용된 유한요소의 개수는 27,777개이다.

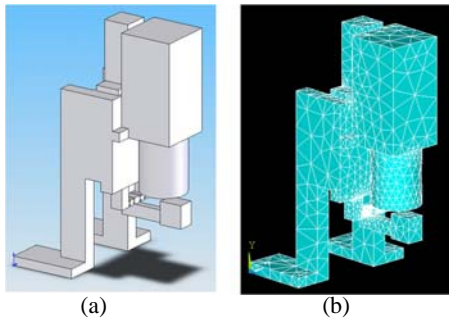


Fig. 2 (a) CAD model of an AFM (b) meshed model

그림 3은 위에서 생성된 모델을 이용하여 수행한 유한요소 해석의 결과를 보여준다. 시스템을 구성하는 질량에 비해 메인 프레임의 강성이 낮기 때문에 첫 번째 공진모드는 160Hz 근처에서 발생한다. 그리고, 팁홀더 부분에 탐침만 존재할 때에는 1.2kHz의 2차공진점이 발생하지만, 광학부품 등이 추가될 경우, 두 번째 공진 모드는 팁홀더 부분에서 376Hz의 주파수를 가진다.

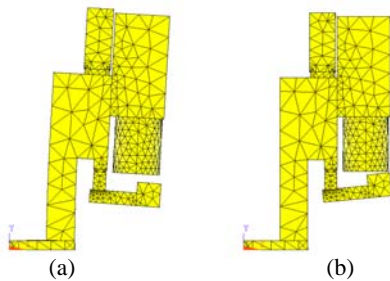


Fig. 3 Modal analysis of the AFM (a) 1st mode (b) 2nd mode

이를 실험적으로 검증하기 위해 그림 4와 같은 실험을 수행하였다. 레이저 간섭계를 이용한 진동측정장치를 이용하여 메인 프레임의 최상단에 초점을 맞추어 진동을 측정하였다. 그림에서 보는 것과 같이 측정시에는 원자현미경을 구성하는 전자장치의 모든 전원이 켜져 있는 상태이고, 바닥을 통해 전달되는 진동을 차단하기 위해 능동형 방진 정반위에서 실험을 수행하였고, 소음의 영향을 차단하기 위해 방음용 챔버를 덮은 상태에서 측정하였다. 간섭계는 엠포시스에서 제공하는 V100 모델을 이용하였으며, 20um/s/V의 게인으로 측정되었다. 그림 4의 우측 그림은 메인 프레임의 진동에 해당하는 속도 신호를 나타낸다. 4um/s의 속도를 가지고 있으며 이를 변위로 환산하면 20nm에 해당한다.

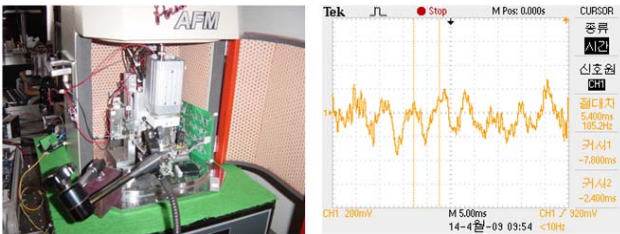


Fig. 4 Measurement of vibration of the frame

#### 4. 내부 진동에 의한 신호 왜곡

앞에서 강성이 충분하지 못할 경우, 프레임의 진동으로 나타남을 보였다. 그림 5는 이러한 진동이 센서에서는 어떻게 측정되는지 보인 것이다. 그림 5(a)는 측정용 탐침이 시편에 닿지 않고 공중에 떠있는 상태이다. 여기서는, 센서에 인가되는 직류 전원의 고주파 노이즈성분만 존재할 뿐, 저주파 진동이 측정되지 않는다. 그 이유는, 그림 1의 모델에서 설명될 수 있다. 여기서, m3, k3은 각각 측정용 탐침의 질량과 강성이고 이로 인해 결정되는 탐침의 공진주파수는 수 kHz이다. 따라서, 프레임으로부터 전달되는 저주파수 진동에 대해 이송용 스테이지 위에 있는 광학계와 탐침의

상대변위없이 동일하게 저주파수로 진동하게 되고, 탐침의 변형없이 일정 각도를 유지하게 된다. 그림 5(b)는 탐침이 바닥면의 시편에 닿았을 때의 센서 신호이다. 프레임의 공진주파수인 180Hz의 진동이 그대로 측정되는 것을 알 수 있으며, 이보다 더 큰 주파수의 2차공진을 포함하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 프레임 위에 있는 탐침은 180Hz로 진동하고 있지만, 시편은 바닥면에 고정되어 있기 때문에, 상대변위가 존재하기 때문이다. 팁홀더는 메인 프레임보다 모멘트 암이 짧기 때문에 3nm의 진동으로 나타난다.

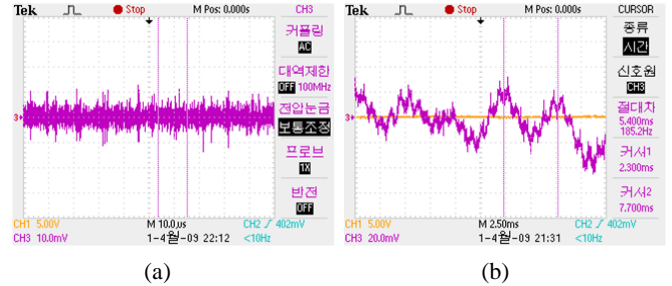


Fig. 5 Sensor signals when the tip is (a) non-contacted and (b) contacted

#### 4. 결론

본 논문에서는, 정밀 계측 장비의 구성에 있어서, 프레임 강성에 따른 내부 진동문제를 고려하였다. 유한요소해석을 이용하여 공진주파수와 모드를 조사하였고, 진동측정기를 이용하여 이를 확인하였다. 광학 방식의 센서 신호를 통해, 피측정체에 접근했을 때와 접근하지 않았을 때의 특성을 보였다. 나노급 정밀 계측 시스템에서는 외부 진동과 내부 진동을 최대한 차단해 주어야 하고, 특히 내부 프레임 설계시 주의를 기울여야 한다. 시스템 내부의 프레임은 충분한 강성을 가지도록 설계되어야 하며, 1차 공진 주파수는 센서부의 차단주파수보다 높게 유지하는 것이 바람직하다.

#### 후기

본 연구는 광주과학기술원의 생체적용나노기초기술 연구센터와 한국학술진흥재단에서 주관하는 기초연구지원사업에 의해 지원되었습니다.(과제번호 D00028)

#### 참고문헌

1. E. I. Rivin, "Passive Vibration Isolation," ASME, New York, 2003.
2. S. I. Park and C. F. Quate, "Theories of the feedback and vibration isolation system for the scanning tunneling microscope," Rev. Sci. Instrum., Vol. 58, No. 11, 2004~2009, 1987.
3. M. Okano, K. Kajimura, S. Wakiyama, F. Sakai, W. Mizutani, and M. Ono, "Vibration isolation for scanning tunneling microscopy," J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 5, No. 6, 3313~3320, 1987.
4. A. I. Oliva, V. Sosa, R. Coss, R. Sosa, N. L. Salazar, and J. L. Pena, "Vibration isolation analysis for a scanning tunneling microscope," Rev. Sci. Instrum., Vol. 63, No. 6, 3326~3329, 1992.
5. R. G. Cobb, J. M. Sullivan, A. Das, L. P. Davis, T. T. Hyde, T. Davis, Z. H. Rahman, and J. T. Spanos, "Vibration isolation and suppression system for precision payloads in space," Smart materials and Structures, Vol. 8, 798~812, 1999.
6. K. Park, D. Choi, A. Ozer, S. Kim, Y. Lee, and D. Joo, "A voice coil actuator driven active vibration isolation system with the consideration of flexible mods," Rev. Sci. Instrum., Vol. 79, No. 6, 065106, 2008.
7. James M. Gere, "Mechanics of Materials", 5th Ed., Brooks/Cole, 2000.
8. [www.em4sys.com](http://www.em4sys.com)