

변위 증폭 메커니즘을 이용한 scanning probe microscopy용 PZT구동 2축 나노 스캐너 설계

Design of 2-D nano scanner with displacement amplifier mechanism which is driven by PZT for application to scanning probe microscopy (SPM)

*정종규¹, 염우섭², #박기환³

*J. K. Jung¹, Y. S. Yuem², #K. H. Park (khpark@gist.ac.kr)³

¹ 광주과학기술원 기전공학과

Key words : nano scanner, displacement amplifier, PZT actuator

1. 서론

최근 초정밀 스캐너는 반도체 제작 및 검증공정, atomic force microscopy(AFM), scanning tunneling microscopy(STM) 및 lithography 등 많은 분야에서 사용되어지고 있다. 특히, AFM과 lithography는 연구가 시작된 지 10여년 정도밖에 되지 않은 최신의 기술로서, 나노급 이하의 고성능 수평분해능을 갖는 스캐너를 필요로 하는 기술이며, 산업현장에서 극 미세가공, 초정밀 측정에서 점차 반도체 웨이퍼 및 LCD 패널 검사, 프린트 기판의 선폭 검사 등 고정밀화 및 광범위 검사의 추세에 따라 nm급의 정밀도를 갖으며, 수백 nm의 작동영역을 갖는 나노스캐너를 요구하고 있다. 이러한 나노스캐너의 액츄에이터로 PZT와 voice coil motor(VCM)이 사용되어 왔으며, 특히 선형적 작동 특성과 광대역 작동이라는 장점을 지닌 VCM이 앞선 언급되었던 광대역 나노스캐너를 위한 액츄에이터로 주로 사용되어 왔다 [1]. 그러나, VCM을 액츄에이터가 갖는 작은 댐핑상수에서 기인된 공진주파수가 나노스캐너의 진동을 발생시켜 AFM과 같은 정밀 측정시스템의 정밀도에 치명적 영향을 끼치며, 열에 의해 드리프트가 발생하는 문제를 가지고 있다 [2]. 이와는 상대적으로, PZT는 무한대의 분해능을 가지고 있고, VCM과는 달리 flow source이기 때문에 열 발산이 없으며, 빠른 응답속도와 큰 힘을 낼 수 있으며, 무엇보다 큰 댐핑상수를 가지고 있어 진동특성에 강하다는 장점을 가지고 있어서 초정밀 위치결정을 위한 나노스캐너의 구동기로 많이 쓰이고 있다 [3, 4]. 그러나 PZT의 작동 영역은 수 십 um급에 지나지 않는다는 작동한계를 가지고 있어 광범위 작동을 위해 변위증폭기를 사용해야 하지만, 설계된 변위증폭기 때문에 진동에 강인하다는 PZT의 장점을 살리지 못하고 높은 공진피크를 발생시키기도 한다.

본 논문에서는 500Hz의 bandwidth 및 10dB 이하의 공진피크를 갖으며 100um의 작동영역을 갖는 나노스캐너를 설계하기 위한 방향으로 광범위 작동을 할 수 있는 변위 증폭기를 정적 특성 분석 및 동적특성 분석과 스캐너의 작동을 위해 필요로 하는 힘의 분석을 통해 설계하였으며, 이를 나노스캐너의 각각의 축에 적용하여 주파수 도메인을 통해 그 성능을 확인 하였다. 또한 VCM을 사용한 나노스캐너의 주파수 특성과 비교 하였으며, 최종적으로 atomic force microscopy (AFM)에 적용하여 추출한 이미지를 통해 그 성능을 확인하였다.

2. 유연 힌지 설계

유연 힌지는 나노스캐너 고정을 담당하는 외부 구조와 시편의 이송을 담당하는 내부구조의 조합에서 발생하는 오차를 제거하기 위하여 단일 구조체로 구성되며, 상대적으로 높은 강성을 가질 수 있는 장점이 있다. 또한 마찰이 없어 윤활이 필요하지 않고, 높은 분해능, 반복도 및 정확도를 갖는다는 특징이 있다. 변위증폭기 및 나노스캐너에서 사용된 유연 힌지는 두 개의 노치구조 힌지(Notch type)와 판 스프링 구조 힌지(leaf spring type)로 구성되었다. Fig. 1은 노치구조 힌지와 판 스프링 구조 힌지를 보여준다.

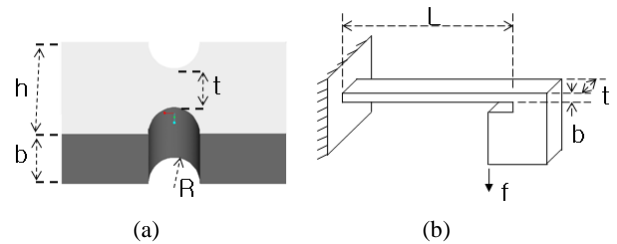


Fig. 1 (a) Notch type hinge, (b) Leaf spring type hinge

Fig. 1 (a)의 형태를 갖는 첫 번째 노치 구조 힌지는 PZT의 변위를 증폭시키는 증폭레버가 요잉(yawing)모션을 할 수 있도록 PZT의 clamping force가 고려되어 설계되어야 하며, 두 번째 노치 구조 힌지는 증폭된 변위의 전달부가 1자유도만을 갖기 위해 증폭레버의 회전으로 인한 요잉(yawing) 모션이 제거되도록 설계되어야 한다. 또한 변위증폭기에서 판 스프링 구조 힌지는 변위증폭기의 공진주파수를 결정하는 요소로써, 변위증폭기의 공진주파수가 나노스캐너의 성능에 영향을 미치지 않도록 나노스캐너의 공진주파수 보다 높은 공진 주파수를 갖도록 설계해야 한다. 판 스프링구조 힌지의 굽힘강성 (K_L)과 노치구조 힌지의 굽힘 강성 (K_N)은 각각 Eq (1)과 같이 계산된다[5].

$$K_L = \frac{E \cdot b \cdot t^3}{L^2 \cdot (L+t)} \quad (1)$$

$$K_N = \frac{2E \cdot b \cdot t^{5/2}}{9\pi R^{1/2}}$$

3. 정적 특성 분석

설계되어진 변위증폭기가 요구되는 변위와 변위증폭기 및 나노스캐너에 전달되는 PZT의 force를 분석하기 위해 기구학적 분석이 요구되어진다. Fig. 2은 변위증폭기의 정적 특성 분석을 위한 모델을 보여준다. 표1은 사용되어진 PZT의 성능을 보여준다.

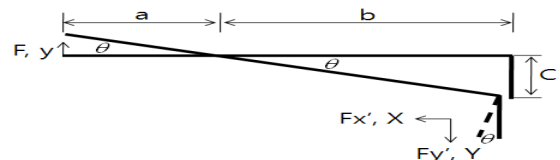


Fig.2 Simplified model of displacement amplifier arm

변위증폭기의 입력단에 최대변위 17um가 입력으로 주어졌을 때, 변위증폭기를 통해 증폭된 변위는 Eq (2)를 통해 구할 수 있다.

$$X = b - \sqrt{b^2 - \left(\frac{b}{a}y\right)^2} + C \cdot \frac{y}{a} \quad (2)$$

$$Y = \frac{b}{a}y + \left(\sqrt{1 - \frac{y^2}{a^2}} - 1\right) \cdot C$$

변위증폭기는 나노스캐너를 동작시킬 수 있는 충분한 힘을 전달하며, 1 자유도 운동을 위해, 두 번째 힌지에서 변위증폭기를 통해 전달되는 수평방향의 힘 성분이 노치 힌지의 굽힘 강성보다

커, 힌지의 굽힘이 원활히 일어날 수 있도록 설계되어야 한다. 변위증폭기를 통해 전달되는 힘은 Eq. 3 을 통해 구할 수 있다.

$$F'_y = -F_2 \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{a^2}} \quad \text{----- (3)}$$

$$F'_x = -F_2 \cdot \frac{y}{a}$$

4. 동적 특성 분석

나노스캐너의 주파수 특성분석을 위한 모델링은 Fig. 3과 같다.

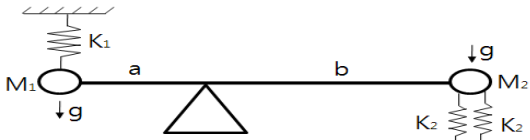


Fig.3 Displacement amplifier model for dynamic analysis

K₁은 첫 번째 노치 구조 힌지의 강성을 모델링 하였으며, K₂는 관 스프링 구조 힌지의 강성을 나타낸다. 변위증폭기의 두번째 노치 구조 힌지의 x방향에만 영향을 주도록 설계가 되었기 때문에 모델링에서 제외하였다. M₁과 M₂는 증폭레버의 중심점을 기준으로 분리된 변위증폭기의 질량을 나타낸다. 변위증폭기의 동특성은 Eq. 4의 수식처럼 구할 수 있다.

$$(M_1 a^2 + M_2 b^2) \ddot{\theta} = (M_1 g a - M_2 g b) - 2K_2 b^2 \theta - C b^2 \dot{\theta} - K_1 a^2 \theta \quad \text{--- (4)}$$

$$\theta = \frac{M_1 g a - M_2 g b}{(M_1 a^2 + M_2 b^2) S^2 + C b^2 S + 2K_2 b^2 + K_1 a^2}$$

나노스캐너의 진동특성을 분석하기 위해 수식 4를 분석해 보면, 나노스캐너가 갖게 되는 공진피크와 관계된 성분은 증폭레버의 길이임을 알 수 있다. 따라서 증폭레버의 길이를 나노스캐너의 100 μ m의 변위증폭 및 10dB이내의 공진피크라는 설계조건을 만족하도록 설정 하여한다.

5. 실험결과

Fig. 4는 설계되어진 나노스캐너의 주파수 응답을 보여준다. 주파수 응답을 위해 센서로써 EM4SYS의 Laser Scanning Vibrometer(LSV)를 사용하였으며, 센서 게인은 20 μ m/V이며, PZT amplifier (thorlab)의 입력 전압은 7V이다.

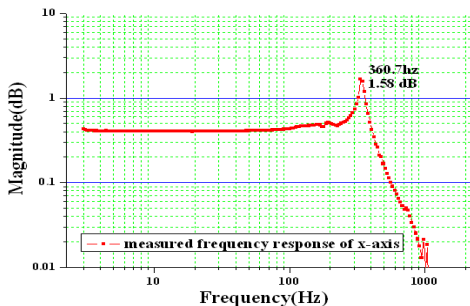


Fig. 4 Frequency response of PZT nano scanner

Fig. 4의 주파수응답으로부터 pass band 이내의 magnitude가 0.4dB이며, 이를 주어진 실험환경을 통해 변위 증폭기의 working range를 산출해보면 약 100 μ m의 변위 증폭이 일어났음을 확인 할 수 있으며, 공진주파수는 360Hz이고 공진피크는 약 10dB임을 확인 할 수 있다. 이때 공진 주파수에서 오차가 발생하였는데 이는 가공 및 후처리를 거치면서 오차가 발생했기 때문이다. Fig. 5는 기존의 VCM 나노스캐너의 주파수 응답이다.

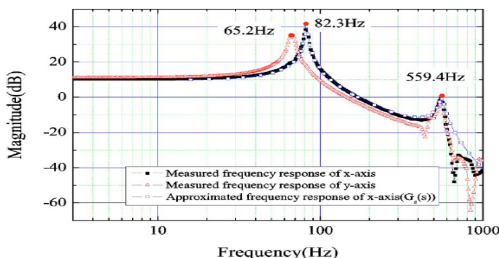


Fig. 5 frequency response of nano scanner

VCM 나노스캐너와 PZT 나노스캐너의 주파수 응답을 서로 비교 했을 때, PZT 나노스캐너의 bandwidth는 82.3Hz에서 360 Hz로 증가 하였으며, 공진피크 역시 38dB에서 약10dB 이하로 감소하였음을 확인 할 수 있다.

Fig. 6 (a) PZT 나노스캐너를 장착한 AFM을 통해 이미징을 한 결과이며, (b)는 VCM 나노스캐너를 장착한 AFM을 이용하여 이미징을 추출한 결과이다. 측정시편으로는 깊이 118nm, 주기가 3 μ m인 표준시편을 사용하였으며, 스캔속도와 스캔영역은 각각 500ms/line, 10 μ m x 10 μ m이다.

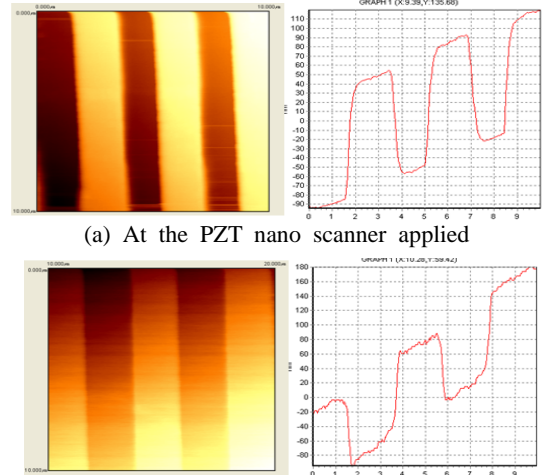


Fig. 6 Measured images by AFM

이 두 경우 모두 Active Vibration Isolation System(AVIS)을 통해 외부의 진동을 사전에 차단하였다. Fig. 6 (b)의 이미지의 단면정보를 통해 VCM 나노스캐너를 장착한 AFM에서 측정된 이미지는 2~3nm의 VCM에서 기인된 진동성분이 포함되어 있지만, PZT 나노스캐너의 경우 그런 성분들이 전혀 없음을 확인 할 수 있다.

6. 결론

작동영역에 제약을 받는 PZT 액추에이터의 한계를 해결하기 위한 변위증폭기는 변위 및 변위를 통해 전달되는 힘 그리고 동적특성 분석이 종합적으로 고려되어 설계가 되었을 때, 주파수 응답을 통해 설계 목표치를 만족함을 확인 하였으며, 원자현미경을 통한 이미징 결과에서 동일 이미징 조건 하, VCM 나노스캐너에서 발생하였던 진동문제가 발생하기 않고 요구되어지는 성능을 만족함을 확인하였다.

참고문헌

1. Sung-Q Lee, Eun-Kyung Kim, Woo-Sub Youm, Kyi-Hwan Park, and Kang-Ho Park, "Bi-direction controllable AFM head driven by VCM with flexure hinge", Proc. Of 4th euspen. 2004.
2. Woosub Youm, Jongkyu Jung, SungQ Lee, and Kyihwan Park, "Control of voice coil motor nanoscanners for an atomic force microscopy system using a loop shaping technique", Rev. Sci. Instrum. 79, 013707, 2008.
3. Peng Gao, Shan-Min Swei and Zhejun Yuan, "A new piezodriven precision micropositioning stage utilizing flexure hinges", Nanotechnology 10, 394-398, 1999.
4. Chih-Liang Chu, Sheng-Hao Fan, "A novel long-travel piezo-electric-driven linear nanopositioning stage", Precision Engineering, 30, 85-95, 2006.
5. Dong-Yeon Lee, Dae-Gab Gweon, "Pseudo-Resonant Effect on a Flexure-Guided Nano-Positioning system", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 48, No. 3, 363~370, 2006.