Command compensation filter를 이용한 scanning probe microscopy용 PZT구동 2축 나노 스캐너의 진동제어

Vibration reduction control of 2-D nano scanner with displacement amplifier mechanism driven by PZT for scanning probe microscopy (SPM)

*정종규[1], 염우섭[1], #박기환[1]
*J. K. Jung[1], Y. S. Yuem[1], #K. H. Park (khpark@gist.ac.kr)[1]
[1] 광주과학기술원 기전공학과

Key words : nano scanner, displacement amplifier, PZT actuator, command compensation filter

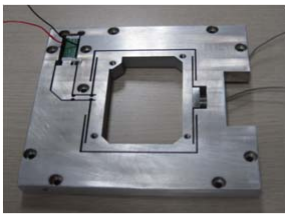
1. 서론

최근 초정밀 스캐너는 반도체 제작 및 검증공정, atomic force mocroscopy(AFM), scanning tunneling microscopy(STM) 및 lithography등 많은 분야에서 사용되어지고 있다. 특히 AFM과 nano-lithography와 같은 연구 분야에서 나노급 이하의 고성능 수평분해능을 갖는 스캐너가 필수적이다. 또한 최근 산업현장에서는 극 미세가공, 초정밀 측정에서점차 반도체 웨이퍼 및 LCD 패널 검사, 프린트 기판의 선폭 검사 등 고정밀 및 광범위 검사의 필요성이 증가됨에 따라 nm급의 정밀도를 갖으며, 수백 um의 작동영역을 갖는 나노스캐너를 요구하고 있다. 이러한 나노스캐너의 액츄에이터로는 PZT와 voice coil motor(VCM)등이 사용되어 왔으며, 특히 PZT는 무한대의 분해능과 높은 반복성을 가지고 있고, VCM과는 달리 열 발산이 없으며, flow source이기 때문에 빠른 응답속도와 큰 힘을 낼 수 있으며, 무엇보다 접촉식 구동이기 때문에 진동특성에 강하다는 장점을 가지고 있어서 초정밀 위치결정을 위한 나노스캐너의 구동기로 많이 쓰이고 있다 [3, 4]. 그러나 PZT의 작동 영역은 수 십 um급에 지나지 않아 이를 극복하고 광범위 작동을 구현하기위해 레버타입의 변위증폭기구조를 갖는 PZT 나노 스캐너에 대한 연구가 진행되어 왔다 [5, 6, 7]. 그러나 이러한 구조는 변위 증폭기와 이송스테이지 사이의 레버가 스프링으로 작용을 함으로써 나노 스캐너의 고차모드를 유발한다. 이러한 고차모드는 히스테리시스 및 creep현상으로 인해 발생하는 변위오차를 보정하기 위해 수행하는 피이드백 제어를 어렵게 하여, 나노 형상을 측정하는 scanning probe microscopy과 같은 정밀 측정 시스템에서 수평 및 수직방향의 나노미터 레벨의 정밀도 확보에 악영향을 끼치게 된다.

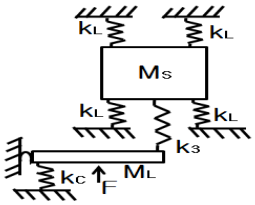
레버타입 변위 증폭구조를 갖는 PZT 나노 스캐너의 부 공진으로 기인된 진동문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 loop shaping 기법을 이용한 command compensation filter를 제안하여 부 공진 주파수 대역에서의 댐핑을 전기적으로 확보함으로써 부 공진을 제거 하였다. 제안된 Command compensation filter의 효과는 Open loop frequency response와 피이드 백 제어시스템을 구성 후 step input에 대한 time domain response를 통해 확인하였다.

2. 나노 스캐너의 설계 및 동특성 분석

정밀 위치 결정이 요구 되어지는 나노 스캐너는 주로 PZT 구동기와 유연 힌지로 구성된다. PZT 구동기는 높은 정밀도를 확보할 수 있으며, 유연 힌지가 적용된 나노 스캐너는 스틱-스립과 백래시 현상이 없고 연속적인 변위를 가지며 윤활이 필요 없다는 장점을 가지고 있지만, 적층된 PZT 구동기는 15 ~ 20㎛의 구동범위 한계를 가지고 있어 이러한 한계를 극복하면서 높은 정밀도를 확보하기위해 변위 확대 기구를 사용한다. 그림 1 (a)는 레버타입 변위확대 기구를 갖도록 개발된 PZT 나노 스캐너를 보여주며, 그림 1(b)는 schematic model을 보여준다.



(a)



(b)

그림 1 (a) 레버타입 변위확대 기구를 갖는 PZT 나노스캐너, (b) schematic diagram

나노 스캐너의 leaf type hinge와 notch type hinge는 각각 K_L로 K_N spring으로 모델링 할 수 있고, M_S는 이송스테이지의 mass를 M_L는 증폭lever의 mass로 모델링 될 수 있다. 나노 스캐너의 동특성 $G_{scanner}(S)$ 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_L & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} K_C+K_3 & -K_3 \\ -K_3 & 4K_L+K_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G_{scanenr}(S) = \frac{1.795\times10^{13}}{S^4+2430S^3+3.11\times10^7S^2+6.078\times10^{10}S+6.41\times10^{13}} \quad (1)$$

schematic model에서 확인 할 수 있듯이, 변위 증폭을 위한 lever와 이송스테이지 사이는 스프링(K_3)으로 연결되어져 있으며, 이는 부 공진을 유발 하는 원인된다. 그림 2는 나노 스캐너의 open loop frequency response를 보여주며, 붉은색은 magnitude를 파란색은 phase를 나타낸다..

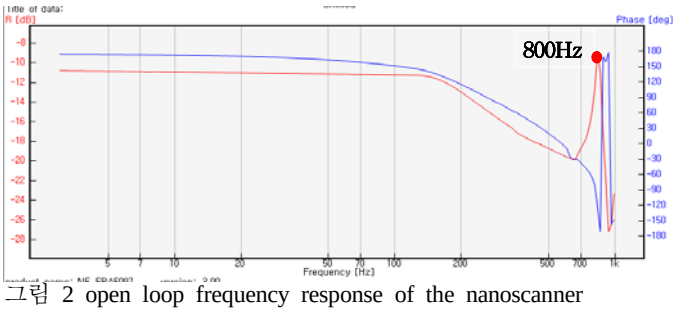


그림 2 open loop frequency response of the nanoscanner

개발된 나노스캐너는 약 255Hz에서 첫 번째 공진모드를, 약 800Hz에서 두 번째 공진모드인 부 공진을 가지고 있다. Rigid body motion을 하는 첫 번째 공진과 가까이에 존재하는 부 공진은 180° 이상의 phase delay를 일으키며, 피이드 백 시스템 구성 시 충분한 phase margin확보에 악영향을 주어 나노 스캐너의 정밀 위치제어를 불가능하게 하며, 원자현미경과 같은 정밀 측정 시스템에 적용 시 나노미터 레벨의 정밀도 확보에 어려움을 준다.

3. Command compensation filter 설계

피이드백 제어 시 phase margin확보에 악영향을 주는 부공진

대역의 주파수 응답 특성을 개선하기 위해 command compensation filter를 설계하여 적용하였다. Command compensation filter는 bandstop filter의 한 종류로 low pass filter와 high pass filter 그리고 band pass filter의 조합으로 구성되어 있으며, 제어기의 출력신호에서 나노 스캐너의 부공진에 해당되는 주파수 대역에서의 응답을 감쇠시켜 phase margin을 확보하는 역할을 한다. Command compensation filter는 나노 스캐너의 측정된 open loop frequency response를 기반으로 하여 설계 되어 졌으며, 전달함수 $G_{comp}(s)$는 수식 (2)와 같다.

$$G_{comp}(S)=\frac{n_1S^2+n_2S+n_3}{S^2+d_1S+d_2}=\frac{S^2+318.6S+2.82\times10^7}{S^2+7508S+2.82\times10^7} \qquad (2)$$

그림 3은 MATLAB을 이용한 시뮬레이션 결과로써 측정된 나노 스캐너의 주파수응답을 통해 구해진 전달함수의 주파수 응답과 command compensation filter 그리고 보상된 나노 스캐너의 주파수 응답을 보여주며, 보상된 나노 스캐너 $G_{CSCANNER}(S)$의 전달함수는 수식 (3)과 같다.

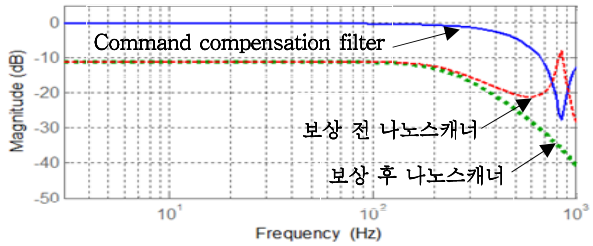


그림3 Command conpensation filter및 보상된 나노스캐너의 주파수 응답 시뮬레이션 결과

$$G_{CSCANNER}(S)=\frac{1.795\times10^{13}S^2+5.719\times10^{15}S+5.061\times10^{20}}{S^6+9938S^5+7.754\times10^7S^4+3.628\times10^{11}S^3+1.397\times10^{15}S^2+2.195\times10^{18}S+1.807\times10^{21}} \qquad (3)$$

Command compesration filter를 나노스캐너에 적용하여 나노스캐너의 800Hz 대역의 부공진이 제거되었으며, 전달함수로부터 부공진영역의 댐핑상수가 0.028에서 0.72로 증가했음을 확인 할 수 있었다.

그림4는 피이드백 시스템의 block diagrma이며 적용된 command compensation filter의 위치를 보여준다.

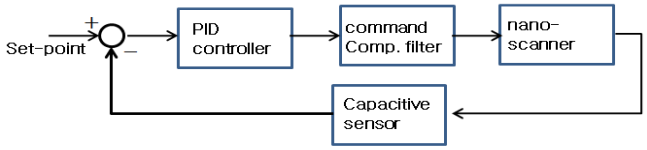


그림4 Feedback system block diagram

4. 실험결과

그림 5는 command compensation filter에 의해 보상된 나노스캐너의 주파수응답을 보여준다. 주파수응답을 측정을 위한 센서와 PZT용 고전압 앰프로써 EM4SYS.Co.,Ltd.의 capacitive와 PZT controller를 사용했으며, 센서의 측정 게인은 12.5um/V이다. 그림 2에서 나노 스캐너가 가지고 있었던 800Hz 대역에서△ magnitude가 약 18dB의 공진피크는 command compensation filter를 통해 제거되었음을 확인 할 수 있으며, 그림 3의 시뮬레이션과 유사한 결과를 보여줌을 확인할 수 있다.

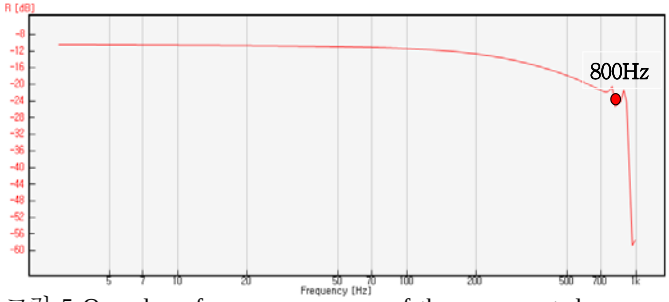


그림 5 Open loop frequency response of the compensated scanner

그림 6은 피이드 백 시스템을 구성한 후 나노 스캐너에 step input을 주었을 때의 응답을 보여준다. 그림 6 (a)는 command compensation filter를 적용하지 않았을 때이며, (b)는 command compensation filter를 적용하였을 때의 결과를 보여준다.

(a) (b)

그림 6 (a) step input response of the scanner without the filter (b) step input response of the scanner with the filter

피이드 백 제어를 위해 PI 제어기를 구성하였으며, 제어 게인의 튜닝은 Ziegler-Nichols방식을 따랐으며 step input의 주기는 10hz 이며 10um 크기이다. Command compensation filter를 적용하지 않았을 때는 부공진의 영향으로 step input 응답에서 200hz의 주기를 갖는 진동이 발생하는 것이 확인 되었으나, command compensation filter의 적용으로 200hz의 진동이 제거 되었으며, 나노 스캐너의 피이드 백 제어의 정밀도가 향상된 것을 확인 할 수 있다.

5. 결론

작동영역에 제약을 받는 PZT 액츄에이터의 한계를 해결하기 위한 레버타입 변위증폭기는 나노스캐너의 부공진을 유발시킨다. 이 부공진을 제거하기 위해 loop shaping 기법의 일종인 command compensation filterm를 적용하였다. Command compensation filter는 무엇보다 부 공진의 대역에서의 전기적으로 댐핑상수를 증가시켜 부공진을 제거 할 수 있다. 이러한 효과를 open loop frequency response와 time domain에서의 step-input response를 통해 확인 할 수 있었다. 이러한 기법은 부공진이 존재하는 시스템에서 쉽게 적용될 수 있다는 장점을 가지고 있는 동시에 정밀도가 높은 제어를 가능하게 함을 확인하였다.

참고문헌

1. Sung-Q Lee, Eun-KyungKim,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. Y. Renyi, J. Musa and and S. Rudolph, Design and characterization of a low-profile micropositioning stage, Precision Eng., Vol. 18, pp. 83-89, 1997.
6. J. Musa and Y. Reny i, Modeling of flexure-hinge type lever mechanisms, Precision Eng., Vol. 27, pp.407-418, 2003.
7. K. S. Min, W. C. Choi, Analysis of Multiple Displacement Magnification Mechanism in Ultraprecision Nano stage, Proc. of KSPE 2005.