

초정밀 스테이지 설계 및 제어 시스템에 관한 연구

박종성*, 정규원†

A study of the design and control system for the ultra-precision stage

Park Jongsung*, Jeong Kyuwon†

Abstract

Recently, the ultra-precision stage is widely used in the fields of the nano-technology, specially in AFMs(Atomic Force Microscope) and STMs(Scanning Tunneling Microscope). In this paper, the ultra-precision stage which consists of flexure hinges, piezoelectric actuator, and ultra-precision linear encoder, is designed and developed. The guide mechanism which consisted of flexure hinges is analyzed by Finite Element Method. And we derived the transfer function of the system in 1st order system from step responses according to the magnitude. We performed simulation for the model to tune the control gain and applied the gains to the developed system. Experimental results found that the stage can be controlled in 5 nm resolution by PID controller.

Key Words : AFM(Atomic Force Microscope), STM(Scanning Tunneling Microscope), Ultra-precision stage, Flexure hinge, PID controller, FEM(Finite Element Method), Piezoelectric actuator, Ultra-precision linear encoder

1. 서론

최근 초정밀 위치 결정 기구는 반도체 제작 공정, AFM, STM 등 제품의 소형화, 경량화, 첨단화에 따라 요구가 급격히 증가하고 있으며, 미세한 부위의 고정밀도 작업에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이러한 초정밀 스테이지의 구성 조건을 만족하기 위하여 여러 가지 조합을 사용하는데, 최근에는 이동 가이드(guide mechanism)로 탄성 변형을 이용하여 부드럽고 연속적인 운동을 제공하며 나노미터

(nm)의 분해능을 가지는 탄성 힌지(flexure hinge)와 빠른 응답성과 높은 분해능을 가지고 있는 압전 소자 구동기(piezoelectric actuator)의 조합이 탁월한 장점으로 인해 적용 범위가 넓어지고 있다.^[1]

본 연구에서는 탄성 힌지와 압전 소자 구동기를 사용하여 초정밀 스테이지를 설계하고 제작하였으며, 1 nm 분해능의 초정밀 리니어 엔코더(Ultra precision linear encoder)를 사용하여 피드백 변위를 측정하였다. 제작된 초정밀 스테이지에 유한 요소 해석(Finite Element

* 발표자, 충북대학교 기계공학과 (jspark-21@hanmail.net)

주소: 361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 12번지

† 충북대학교 기계공학부

Method)을 통하여 고유 주파수를 예측해 보았으며, 스테이지의 탄성 힌지가 탄성 영역 안에서 구동되는지 알아보기 위하여 항복 변위를 조사하였다. 그리고, 제작된 초정밀 스테이지의 정밀한 위치 결정을 위하여 PID 제어를 이용한 피드백 제어(Feedback control)를 수행하였다. 이를 위하여 크기에 따른 계단 입력(Step input) 응답으로부터 제작된 초정밀 스테이지의 시스템 전달 함수(Transfer function)를 1차 시스템으로 모델링하였고, 상용 프로그램인 Matlab의 simulink를 이용하여 PID 제어 계인을 선정하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 선정된 계인에 대하여 계단 응답과 구형파에 대한 응답 실험을 수행하여 제어기의 성능을 평가하였다.

2. 초정밀 스테이지 설계 및 해석

2.1 초정밀 스테이지 설계

초정밀 스테이지에 가장 효율적인 방법 중 하나는 탄성 힌지를 이용하는 방법이다. 탄성 힌지는 외부 프레임과 스테이지의 이동 부분의 조합에서 발생하는 오차를 제거하기 위하여 단일 구조체로 구성되며, 상대적으로 높은 강성을 가질 수 있는 장점이 있다. 탄성 힌지를 이용한 메커니즘의 초정밀 스테이지의 거동은 탄성 변위에 의하여 구동하므로 탄성 재료의 내부 마찰을 제외하면 마찰이 없어 윤활이 필요하지 않고 높은 분해능, 반복능 및 정확도를 가질 수 있다.^{[2][3]} Fig. 1에 굽힘 힌지 모델을 기초로 본 연구에서 설계, 제작된 초정밀 스테이지를 나타냈다. 굽힘 힌지의 강성과 운동의 정확도는 제거된 부분의 중심의 정확도에 크게 영향을 받으므로 초정밀 스테이지를 대칭으로 설계하여 간섭 운동을 줄이고 가공 상의 오차를 보상하였다.

2. 초정밀 스테이지 유한 요소 해석

제작된 초정밀 스테이지의 구동 영역이 탄성 영역 내에 존재하는지 여부를 검증하기 위해 유한 요소 해석을 실시하였다. 상용 프로그램인 ANSYS 툴을 이용하여 모델링하고, 컴플라이언스(Compliance) 해석과 모드 해석을 하였다.^[4] 초정밀 스테이지의 탄성 힌지 부분과 그 몸체의 재질은 알루미늄 6061-T6 합금을 사용하였다. Table 1에 설계된 초정밀 스테이지의 기본 사양을 정리하였다.

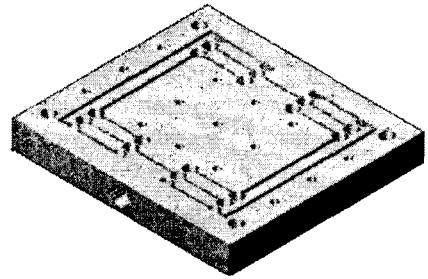


Fig. 1 Designed ultra-precision stage

Table 1 Specification of the system

Category	Item	Data
Stage	Material	Al 6061-T6
	Density	2700 kg/m ³
	Young's modules	68.9 GPa
PZT actuator	Maker Model	SONOX P53
	Compliance	15.8×10 ⁻¹² m ² /N
		22.9×10 ⁻¹² m ² /N
	Stiffness	15.2×10 ¹⁰ m ² /N
6.1×10 ¹⁰ m ² /N		
Density	7830 kg/m ³	

Fig. 2와 Fig.3은 각각 변위(strain) 해석과 응력(stress) 해석 결과를 나타낸 그림이다. 각각의 그림에서 보는 바와 같이 최대 변위는 탄성 힌지부에서 발생하는 것을 알 수 있다. 실제로 스테이지의 외곽 부분은 고정되는 부분이고, 탄성 힌지는 스테이지 부분의 이동을 위한 가이드 역할을 하는 것으로 탄성 힌지의 미세한 거동이 전체 스테이지의 거동을 결정한다고 해석할 수 있다. 모드 해석에서는 지그를 이용하여 엔코더를 고정하지 않은 상태의 초정밀 스테이지만의 고유 주파수를 예측하였으며 그 값은 약 551 Hz 근방으로 나타났다. 컴플라이언스 해석에서는 압전 소자 구동기에서 초정밀 스테이지로 작용하는 최대 압력 40 MPa을 작용 하중으로 해석하였다. Fig. 2에 나타난 결과에서 최대 응력 값은 인장 약 68.3 MPa, 압축 약 23 MPa로 재질인 알루미늄 6061-T6 합금의 항복 인장 응력 276 MPa, 항복 압축 응력 386 MPa에 이르지 못하는 탄성 영역 거동을 예상하였다. 본

실험에서 사용된 압전소자 구동기에 걸리는 최대 전압에서의 힘의 크기는 1500 N 정도이므로 완전한 탄성 영역에서만 작동할 것으로 판단할 수 있다. 해석 결과 최대 변위의 크기도 약 $50 \mu m$ 정도로 나타났으나, 허용 전압 아래에서의 압전소자 구동기의 최대 허용 이송 거리는 $15 \mu m$ 정도이다.

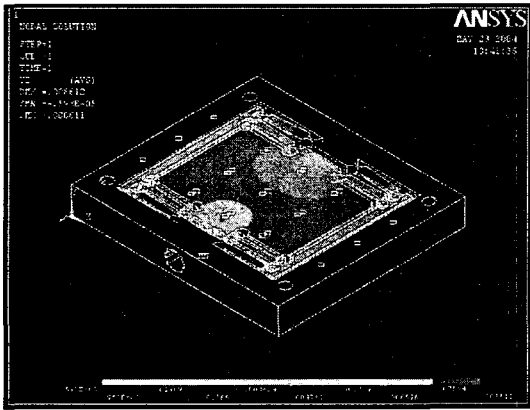


Fig. 2 Strain results for FEM analysis

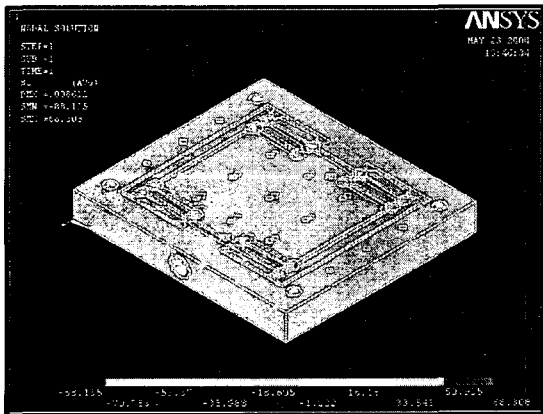


Fig. 3 Stress results for FEM analysis

3. 시스템 구성 및 제어

3.1 시스템 구성

본 연구에서 설계, 제작된 초정밀 스테이지의 미소 변위 측정을 위하여 1 nm 분해능의 초정밀 리니어 엔코더를 사

용하였다. Fig. 4에 사용된 초정밀 리니어 엔코더의 외형을, Table 2에 기본적인 특성을 나타냈다. 그리고 이 엔코더를 설치한 스테이지의 모습을 Fig. 5에 나타냈다. 엔코더는 간단한 지그를 설계하여 초정밀 스테이지의 이송 가이드 역할을 하는 안쪽 부분에 장착을 하였다. 리니어 엔코더의 헤드(Head) 부분과 스케일(Scale) 사이의 허용 최대 거리는 3 mm 이므로 이 간격을 유지하도록 고정하였다. Fig. 6에 본 연구에서 구성된 초정밀 위치 시스템의 구조를 나타냈다.

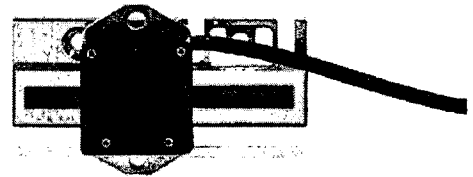


Fig. 4 Ultra-precision linear encoder

Table 2 Specification of the ultra-precision linear encoder(LIP382)

Item	Data
Measuring standard	DIADUR phase grating
Output signals	Sine wave, $1 V_{pp}$
Signal periods	$0.128 \mu m$
Accuracy grades	$\pm 0.5 \mu m$
Recommended measuring steps	$0.001 \mu m$
Measuring lengths	70 mm

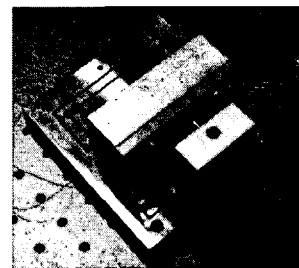


Fig. 5 Structure of the ultra-precision stage

초정밀 리니어 엔코더(Haidenhein, LIP382)로부터의 피드

백 변위는 카운터 보드(Haidenhai, IK220)를 통하여 3 msec의 샘플링 시간(Sampling time)으로 PC로 입력된다. 이 정보를 이용하여 제어기는 제어 입력을 만들고, 이 값은 12 비트 DA변환기(Advantech, PCL-726)를 통해 아날로그 값으로 Dynamic PZT Amplifier(Piezosystem jena, NV 40/3S)에 전달된다. 전달된 값은 -10 V에서 150 V의 전압으로 증폭되어 스테이지에 설치된 압전 소자 구동기를 구동한다.

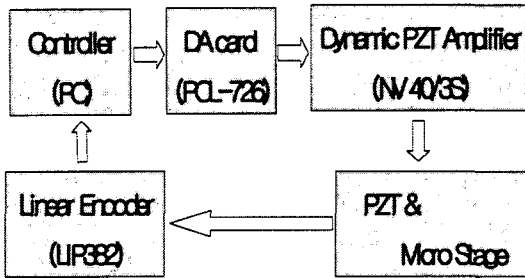


Fig. 6 Block diagram of the closed loop for ultra-precision positioning system

3.2 시스템 모델링

실제 시스템을 정확하게 수식화하여 모델링하는 것은 매우 난해하므로 시스템의 전달 함수를 모델링하기 위해 크기 변화에 따른 계단 입력(Step input) 응답 특성을 이용하였다. 압전 소자 구동기의 전압 입력을 0 V부터 3 V까지 1 V 단위로 응답 특성 실험을 하였다. Fig. 7에 크기 변화에 따른 스텝 응답을 나타냈다. 그림에서 압전 소자 구동기의 입력 전압에 대하여 약 50 nm/V 크기에 비례하여 초정밀 스테이지가 구동함을 알 수 있다. 그리고 상승 시간(Rise time)은 0.5 초이고, 뒤집 시간(Delay time)은 0.0067 초이며, 0.01 초의 시간 지연이 발생함을 볼 수 있다. 또한 시간이 경과함에 따라 입력 전압이 일정함에도 불구하고, 피드백 변위가 서서히 증가함을 알 수 있다. 이 응답으로부터 식(1)과 같이 0.01초의 시간 지연을 가진 1차 시스템으로 시스템 전달 함수를 모델링하였다. 이 모델링된 전달 함수에 대해 simulink를 이용한 계단 응답과 실제 시스템에 대한 계단 응답을 Fig. 8에 나타냈다.

$$G(s) = \frac{0.000005 \cdot e^{-0.01s}}{s + 100} \quad (1)$$

3.3 시스템 제어

본 연구에서 구성된 초정밀 위치 시스템의 히스테리시스 특성 실험을 하였다. Fig. 9에 히스테리시스 특성을 나타냈다. 이 특성은 압전 소자 구동기 고유의 히스테리시스 특성에 의한 것으로 판단된다. 그래서 초정밀 위치 시스템의 히스테리시스를 제거하고, 안정한 위치 결정 시스템을 구현하기 위해 PID 제어기를 이용한 피드백 제어(Feedback control)를 수행하였다. 모델링된 전달 함수에 대해 simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시간 지연을 줄이기 위해 비례 게인을 증가하면 시스템이 불안정해지기 쉬우며, 또한 오버슈트와 진동을 발생하는 것으로 나타났다. 그래서 오버슈트와 진동이 발생하지 않은 최적의 제어기 게인을 시뮬레이션을 통하여 구하고, 이 게인을 실제 시스템에 적용하여 실험적으로 2차 게인 튜닝을 하였다. 선정된 게인은 Table 5와 같다. Fig. 10에 페루프 시스템에 대한 주파수 응답 특성을 보였다. 이득 여유(GM)은 17.8 dB이고, 위상 여유(PM)은 72.8도로 시스템은 상대적으로 안정하다. Fig. 11은 선정된 게인의 계단 응답에 대한 시뮬레이션 결과를 나타냈다. 상당히 큰 적분 게인에 의해 약 0.3 초의 시간 지연이 발생하지만 시스템이 안정함을 알 수 있다. 실제 위치 시스템에 대하여 설계된 PID 제어기의 성능을 평가하기 위해 계단 입력 응답과 구형파에 대한 응답 특성 실험을 수행하였다.

Table 5 Control gains for the PID controller

Item	Gain value
P-gain	0.002
I-gain	30449000
D-gain	1500

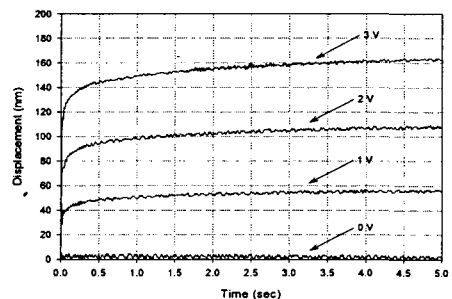


Fig. 7 Step responses for the magnitude variation

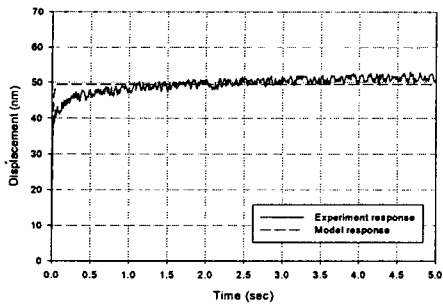


Fig. 8 Step responses for the experiment and model

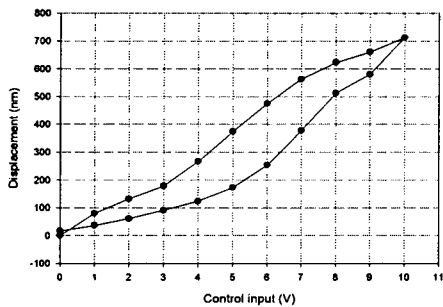


Fig. 9 Characteristic of hysteresis for the ultra-precision positioning system

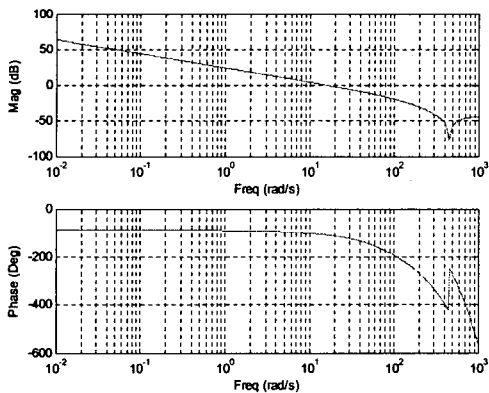


Fig. 10 Bode diagram for closed loop system

Fig. 12에 50 nm에 대한 계단 응답을, 그리고, 연속적인 응답 특성을 알아보기 위해 0 nm에서 100 nm까지 각각 10 nm와 5 nm간격의 연속적인 계단 응답 특성을 Fig. 13에 나타냈다. 그림에서 뒤짐 시간은 0.11초이고, 상승 시간은 0.67 초로 나타났으며, 정착 시간은 0.75초이다. 이 응답으로부터 오버슈트가 거의 발생하지 않으며, 정상 상태 오차

는 최대 2 nm 이하임을 알 수 있다.

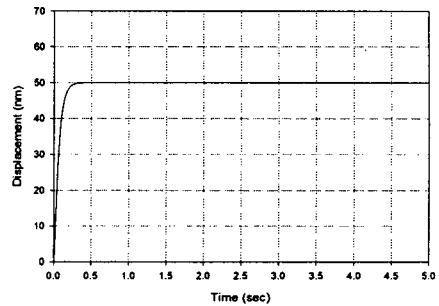


Fig. 11 Simulation result for the PID control

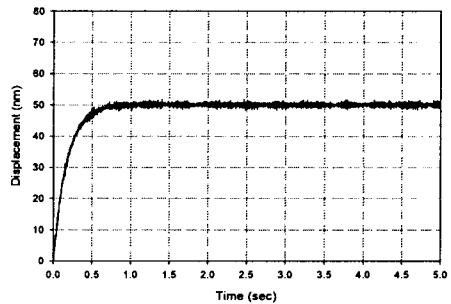
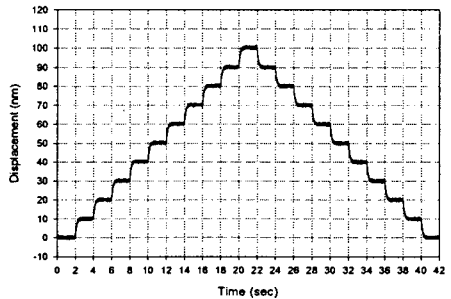
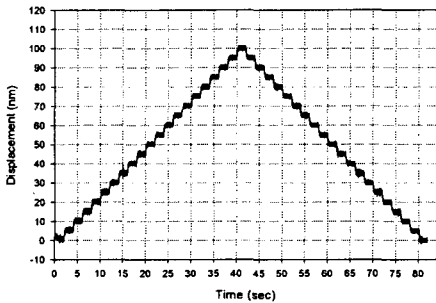


Fig. 12 Experimental result of the step response for the PID control

제작된 초정밀 위치 시스템은 10 nm이하의 분해능을 갖는 시스템으로 구현될 수 있다. 또한 Fig. 14에는 크기가 100 nm이고, 주파수 0.1 Hz의 구형파에 대한 응답을 나타냈다. 그림에서 응답은 약 0.15 초의 시간 지연이 발생하지만, 충분히 동적인 추종 특성을 만족함을 볼 수 있다.



(a) 10 nm resolution



(b) 5 nm resolution

Fig. 13 Experimental result of the continuous step responses for the PID control

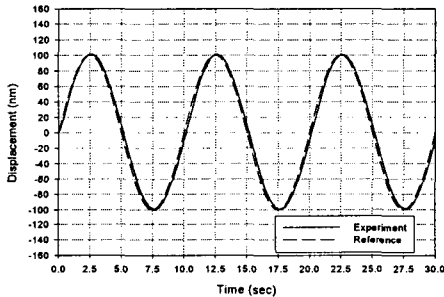


Fig. 14 Experimental result of the sine function response for the PID control

4. 결론

본 연구에서는 탄성 힌지를 이용한 초정밀 스테이지를 설계, 제작하였다. 그리고, 압전 소자 구동기와 초정밀 리니어 엔코더를 이용하여 초정밀 위치 시스템을 구성하였으며, 계단 응답 특성을 이용하여 시스템의 전달 함수를 모델링하고, 이 시스템의 성능을 향상하기 위해 PID 제어를 이용한 피드백 제어를 하였다.

(1) 유한 요소 해석을 통하여 초정밀 스테이지가 갖는 고유주파수 및 항복 변위를 알아보고, 허용 범위 내에서 실험을 진행하였다..

(2) 계단 응답 특성을 이용하여 초정밀 위치 시스템을 시간 지연을 갖는 1차 시스템으로 모델링하였다. 그리고 PID 제어를 이용한 피드백 제어는 적분 계인에 의해 시간 지연이 발생하지만, 5 nm 이하의 분해능을 갖는 초정밀 위치 시

스템을 구현할 수 있으며, 또한 동적인 성능에 대한 빠른 응답 특성을 보인다.

(3) 1차 시스템 모델과 PID 제어기에 대한 시뮬레이션 결과는 실제 시스템의 결과와 불일치함을 볼 수 있다. 이는 시스템의 불확실성에 대한 모델링 오차와 측정 오차 및 기준 전원의 오차에 의한 것으로 판단되며, 이러한 변수에 대한 시스템 특성을 고려하는 강인 제어와 안정한 전원 공급으로 성능 향상을 꾀할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- (1) J. M. Parao and L. Weisbold, 1965, "How to design Flexure Hinges.", Machine Design.
- (2) S. T. Smith and D. G. Chetwynd, 1994, "Foundation of ultraprecision mechanism design", Gordon and Breach Science Publisher, pp. 99~100.
- (3) Lee, D. S., Park, J. H., Park H. J., 1999, "Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation", Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol 16, pp. 154~163.
- (4) Kwac, L. K., Kim, J. Y., Yang, D. J., Ko, M. S., You, S. and Kim, K. T., 2002, "Optimal Design of Controller for Ultra Precision Plane X-Y Stage", Journal of the Korea Society of Precision Engineering, pp. 342~347.
- (5) Kang, J. O., Seo, M. H., Han, C. S., and Hong, S. W., 2004, "Development of 3-axis Fine Positioning Stage : Analysis and Design", Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 21, pp. 147~154.
- (6) K. Ogata, 2002, "Modern Control Engineering", 4th edition, pp. 681~749.