

< 논문 >

초정밀 스테이지의 강인 제어

박종성* · 정규원†
(2006년 2월 3일 접수, 2006년 6월 26일 심사완료)

Robust Control for a Ultra-Precision Stage System

JongSung Park and Kyuwon Jeong

Key Words: Ultra-Precision Stage(초정밀 스테이지), Piezoelectric Actuator(압전소자 구동기), Flexure Hinge(탄성 힌지), Hysteresis(이력현상), Robust Control(강인 제어), Weighting Function(가중치 함수)

Abstract

Recently, a 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 system transfer function of the ultra-precision stage system was derived from the step responses of the system using system identification tool. A H_{∞} controller was designed using loop shaping method to have robustness for the system uncertainty and external disturbances. For the designed controller, simulations were performed and it was applied to the ultra-precision stage system. From the experimental results it was found that this stage could be controlled with less than 5 nm resolution irrespective of hysteresis and creep.

1. 서론

최근 초정밀 위치 결정 기구는 반도체 제작 공정, AFM, STM 등 제품의 소형화, 경량화, 첨단화됨에 따라 요구가 급증하고 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⁾ 그리고 압전소자 구동기의 히스테리시스(hysteresis) 성분을 보상하기 위해 입력 전압과 변위의 관계를 이용하여 역 히스테리시스를 모델링하고, 이 관계로부터 히스테리시스를 보상하여 분해능을 향상시키고 있다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 탄성 힌지와 압전소자 구동기를 사용하여 초정밀 스테이지를 설계, 제작하였다. 제작된 초정밀 스테이지에 대해 정밀한 위치 결정을 위하여 피드백 제어기(feedback controller)를 고안하였다. 계단 입력(step input) 응답을 이용하여 제작된 초정밀 스테이지의 전달 함수(transfer function)를 모델링하였다. 상용의 초정밀 스테이

† 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학과
E-mail : jeong@chungbuk.ac.kr
TEL : (043)261-3222 FAX : (043)263-2448
* 충북대학교 기계공학과

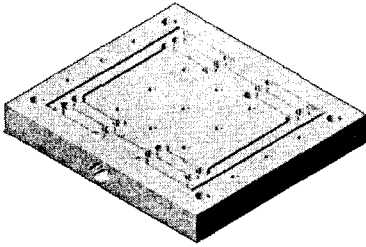


Fig. 1 Designed ultra-precision stage

지는 PID 제어기를 사용하여 피드백 제어를 수행한다. PID 제어기도 만족할 만한 제어 성능을 나타내지만 PID 제어기는 초정밀 스테이지의 특성과 운전 조건에 따라 시행 착오법에 의해 개인 튜닝을 수행해야 하며, 압전소자 구동기의 히스테리시스 특성과 크리프(creep)의 비선형 성분에 의해 위치 추종 성능에 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 실제 환경과 운전 조건의 변화에 견딜 수 있고, 실제 시스템의 모델링 과정 중 무시되는 부분에 대해 강인성을 갖도록 적절한 가중치 함수(weighting function)을 사용한 H_{∞} 제어기를 설계하였다. 그리고 설계된 제어기에 대해 시뮬레이션을 수행하였고, 실제 시스템에 대한 계단 응답 실험과 연속 계단 응답 실험을 통해 제어기의 제어 성능을 검증하였다.

2. 시스템 구성 및 제어

2.1 시스템 구성

초정밀 스테이지의 탄성 한지 부분과 그 몸체의 재질은 알루미늄 6061-T6 합금을 사용하였다. Fig. 1에 굽힘 한지 모델을 기초로 본 연구에서 설계, 제작된 초정밀 스테이지를 나타냈고, Table 1에 제작된 초정밀 스테이지의 기본 사양을 정리하였다. 탄성 한지를 이용하여 대칭형 이중 평행 사변형 구조를 갖도록 설계하였고, 초정밀 스테이지에 대한 유한 요소 해석(Finite Element Method)을 통해서 연성이 매우 적으며, 구동기의 작용력에 따른 변위가 탄성 영역에서 선형적으로 거동함을 알 수 있었다. 허용 전압 아래에서의 압전소자 구동기의 최대 허용 이송 거리는 4.5 μm 이다.⁽¹¹⁾

Table 1 Specification of the ultra-precision stage

Category	Item	Data
Stage	Material	AL 6061-T6
	Density	2,700 kg/m ³
	Young's Modules	68.9 GPa
PZT actuator	Model	SONOX P53
	Dimension	5 × 5 × 5 (mm)
	Compliance	22.9 × 10 ⁻¹² m ² /N
	Stiffness	15.2 × 10 ¹⁰ N/m ²
	Density	7,830 kg/m ³

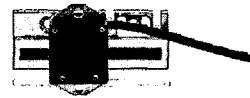


Fig. 2 Ultra-precision linear encoder

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

Item	Data
Measuring standard	DIADUR phase grating
Output signals	Sine wave, 1V _{pp}
Signal periods	0.128 μm
Accuracy grades	± 0.5 μm
Recommended measuring step	0.001 μm
Measuring lengths	70 mm

제작된 초정밀 스테이지의 미소 변위를 측정하기 위해 1 nm 분해능의 초정밀 리니어 엔코더(ultra precision linear encoder)를 사용하였다. 사용된 리니어 엔코더의 외형을 Fig. 2에, 기본적인 특성을 Table 2에 나타냈다. 그리고 이 엔코더를 설치한 스테이지의 모습을 Fig. 3에 나타냈다. 엔코더는 간단한 지그(jig)를 설계하여 초정밀 스테이지의 이송 가이드 역할을 하는 안쪽 부분에 장착을 하였다. 리니어 엔코더의 헤드(head) 부분과 스케일(scale) 사이의 허용 최대 거리는 3 mm이므로 이 간격을 유지하도록 고정하였다.

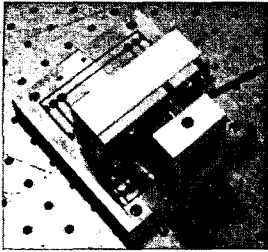


Fig. 3 Overview of the experimental ultra-precision stage

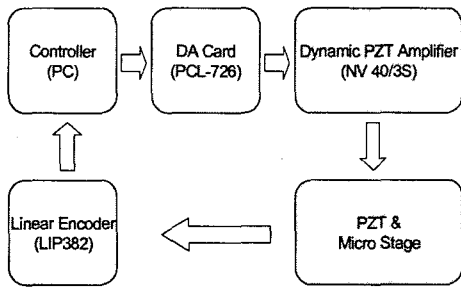


Fig. 4 Configuration of the ultra-precision positioning system

Fig. 4에 본 연구에서 구성된 초정밀 위치 시스템의 구조를 나타냈다. 초정밀 리니어 엔코더(Heidenhain, LIP382)로부터의 피드백 변위는 카운터 보드(Heidenhain, IK220)를 통하여 3 msec의 샘플링 시간(sampling time)으로 제어기인 컴퓨터로 입력된다. 이 피드백 변위 정보를 이용하여 제어기는 제어 입력을 만들고, 이 값은 12 비트 DA 변환기(Advantech, PCL-726)를 통해 0 V에서 10 V의 아날로그 값으로 출력되며 이 값은 Dynamic PZT Amplifier(Piezosystem jena, NV 40/3S)에 전달된다. 전달된 값은 -10 V에서 150 V의 전압으로 증폭되어 스테이지에 설치된 압전소자 구동기를 구동한다.

2.2 시스템 모델링

실제 초정밀 시스템을 정확하게 수식화하여 모델링하는 것은 매우 난해하므로 시스템의 전달 함수를 모델링하기 위한 방법으로 크기 변화에 따른 계단 입력(step input) 응답 특성을 이용하였다. DA 변환기를 이용하여 압전 소자 구동기의 전압 입력을 0 V부터 10 V까지 1 V단위에 대한 응답 실험을 수행하였다. Fig. 5에 크기 변화에

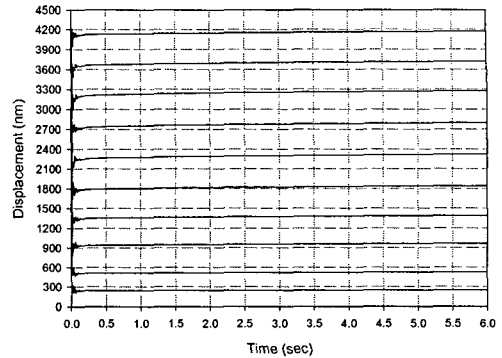


Fig. 5 Step responses for various input voltage

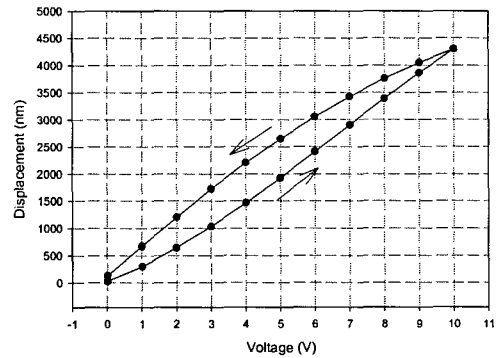


Fig. 6 Hysteresis of the ultra-precision stage system

따른 계단 입력 응답을 나타냈다. 초기에 상당한 큰 오버슈트(overshoot)가 발생하며, 입력 전압과 변위가 비선형임을 알 수 있다. 일반적으로 압전 소자 구동기에는 고유의 강유전성에 기인한 히스테리시스 특성을 포함하며, 또한 입력 전압의 변화없이 시간에 따라 점차 증가하는 크리프 특성을 포함하고 있다. Fig. 5에서 입력 전압에 대한 크리프 특성을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 6에 제작된 초정밀 시스템에 대한 히스테리시스 특성을 나타냈다. Fig. 5와 Fig. 6으로부터 입력 전압과 변위 응답의 관계는 히스테리시스와 크리프에 의한 비선형 시스템으로 볼 수 있다. 그래서 Fig. 5의 입력 전압이 1 V인 계단 응답 결과와 식 (1)의 일반적인 2차 시스템 모델을 이용하여 시스템의 전달 함수를 모델링하였다.⁽⁹⁾

$$G(s) = D \times \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \tag{1}$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2)$$

$$t_s = 4T = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (3)$$

여기서 D, ζ, ω_n 은 각각 DC 게인, 감쇠 계수 그리고 고유 주파수를 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)에서 t_p 와 t_s 는 각각 피크 시간(peak time)과 정착 시간(settling time)을 나타낸다. Fig. 5로부터 피크 시간은 0.02 초이고, 정착 시간은 0.2초이며, 정상 상태에서의 변위는 242 nm로 선정하였다. 그리고 고유 주파수를 209.44 rad/sec로 선정하였다. 이 응답 특성으로부터 식 (4)와 같이 2차 시스템으로 nm/V 단위의 시스템 전달 함수를 모델링하였다.

$$G(s) = \frac{1.0618 \times 10^{-2}}{s^2 + 40s + 43864.89} \quad (4)$$

Fig. 7에 모델링된 전달 함수에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과와 실제 시스템에 대한 계단 응답을 비교하였다. 실제 시스템은 응답 초기에 매우 큰 320 nm의 오버슈트를 발생하며 시간이 경과함에 따라 서서히 증가하는 크리프 경향을 보였다. 그러나 시스템 모델은 초기에 299 nm의 오버슈트를 발생하고 0.12초 이내에 안정한 상태로 수렴한다. 이러한 모델링 과정의 모델링 오차와 실제 환경에서의 노이즈 및 측정 오차 등에 강인한 성능을 만족하도록 하기 위해 H_∞ 제어를 설계하였다.

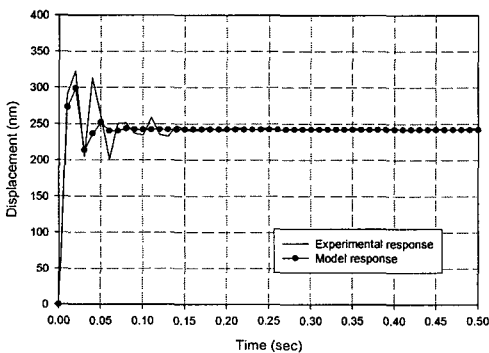


Fig. 7 Comparison of the step responses between the experiment and the designed model

2.3 시스템 제어

일반적인 H_∞ 제어의 블록선도를 Fig. 8에 나타냈다. 그림은 플랜트 $P(s)$ 와 제어기 $K(s)$ 를 포함한다. 플랜트의 입력들은 제어 입력과 외부 입력으로 나눌 수 있다. 제어 입력 u 는 제어기의 출력으로 플랜트를 구동하는 제어 입력이 된다. 외부 입력 w 는 외부 외란, 센서 잡음, 추적 혹은 명령 신호와 같은 입력들의 집합을 나타낸다. 그리고 플랜트의 출력 y 는 측정되고 피드백 되는 신호이고, z 는 오차, 제어 입력 그리고 출력과 같이 조정되어야 할 변수들을 나타낸다. $P(s)$ 는 표준 플랜트를 표현하는 전달함수로서 모델링된 시스템과 더불어 강인성과 성능향상을 위해 사용되는 가중치 함수를 포함하고 있다. 표준 플랜트 $P(s)$ 는 다음 식 (5)와 같이 정의된다. 여기서 $P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$ 는 각 입력에 대한 출력의 전달함수를 나타내고, $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}$, 그리고 D_{22} 는 전달함수 행렬 $P(s)$ 를 상태방정식으로 나타내기 위한 시스템 행렬이다. 시스템의 입·출력 사이의 관계는 식 (6)과 같이 주어진다.⁽⁸⁾

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} y_1 &= P_{11}u_1 + P_{12}u_2 \\ y_2 &= P_{21}u_1 + P_{22}u_2 \\ u_2 &= Ky_2 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)과 (6)으로부터 외부 입력 u_1 에 대한 제어 변수 y_1 의 관계를 구하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} y_1 &= [P_{11} + P_{12}(I - KP_{22})^{-1}KP_{21}]u_1 \\ &= T_{y_1 u_1} u_1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\|T_{y_1 u_1}\|_\infty \leq \gamma \quad (8)$$

식 (7)로부터 H_∞ 제어 문제는 식 (8)과 같이 $\|T_{y_1 u_1}\|_\infty$ 이 주어진 기준 γ (양의 스칼라)보다 작게 유지되도록 플랜트 $P(s)$ 에 대하여 내부적으로 안정화하는 제어기 $K(s)$ 를 찾는 것이다. 최적화 문제를 풀기 위해서 식 (8)을 만족시키는 최소의

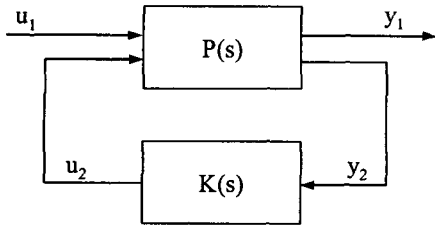


Fig. 8 Block diagram of the H ∞ control

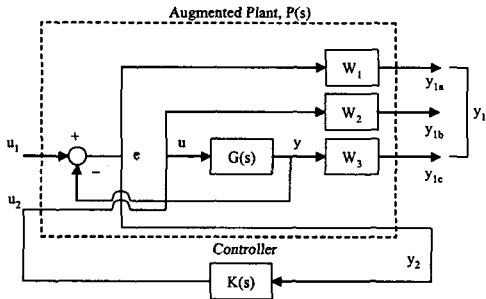


Fig. 9 Block diagram of the H ∞ closed loop control with weighting functions

γ 값을 찾을 때까지 γ 값을 감소시키면서 반복 알고리즘을 사용한다. 일반적인 가중치 함수를 가진 H ∞ 제어기에 대한 구조를 Fig. 9에 나타냈다. 여기서, W_1, W_2, W_3 는 시스템의 성능 향상을 위한 가중치 함수를 나타낸다. 그리고 민감도 함수(sensitivity function), $S(s)$ 와 루프 전달함수(complementary sensitivity function), $T(s)$ 는 식 (9)와 같이 정의된다.

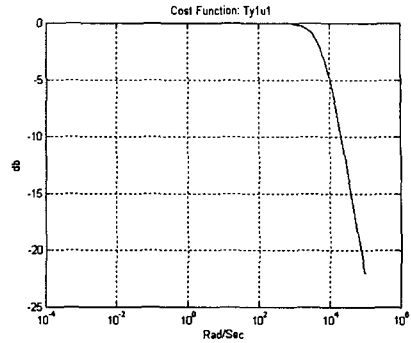
$$S(s) = (I + G(s)K(s))^{-1} \tag{9}$$

$$T(s) = G(s)K(s)(I + G(s)K(s))^{-1}$$

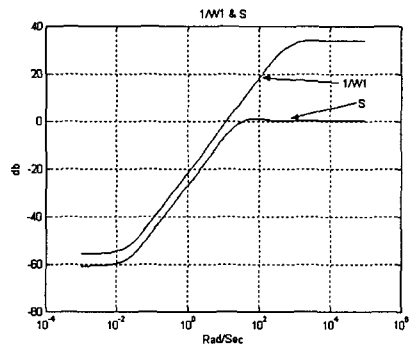
제어기 설계를 위하여 요구되는 제어기 사양을 다음과 같이 결정하였다. 명령 추종 성능 향상과 출력 외란의 영향을 감소시키기 위하여 민감도 전달함수가 저주파수 영역에서 식 (10)의 조건을 만족해야 하며, 고주파수 영역에서의 센서 노이즈 영향을 감소시키기 위해서는 고주파수 영역에서 식 (11)의 조건을 만족해야 한다.

$$|S(s)| \leq W_1^{-1}(s) \tag{10}$$

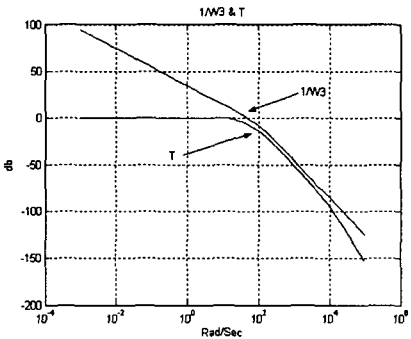
$$|T(s)| \leq W_3^{-1}(s) \tag{11}$$



(a) Cost function, T_{y1u1}



(b) Sensitivity function, $S(s)$ and weighting function, $W_1^{-1}(s)$



(c) Complementary sensitivity function, $T(s)$ and weighting function, $W_3^{-1}(s)$

Fig. 10 Frequency responses of the sensitivity function and weighting function

이와 같은 개루프 전달 함수의 요구 조건을 만족시키기 위하여 식 (12), (13)과 같이 가중치 함수를 설정하였다. 즉, 제어기 설계의 목표는 설계된 개루프 전달 함수의 게인이 저주파수 영역에서는 $W_1^{-1}(s)$ 의 게인보다 커야 하며, 고주파수 영역에서는 $W_3^{-1}(s)$ 의 게인보다 작아야 한다.

$$W_1^{-1}(s) = \frac{50s + 1}{s + 600} \quad (12)$$

$$W_3^{-1}(s) = \frac{5000}{s(s + 100)} \quad (13)$$

제어기는 연속 시간계에서 Matlab을 이용하여 설계하였다. Fig. 10(a)에 제어기 설계 과정의 비용 함수 $T_{y_1 u_1}$ 을, Fig. 10(b)에 감도 함수 $S(s)$ 와 $W_1^{-1}(s)$ 의 주파수 응답 특성을 나타냈고, Fig. 10(c)에 루프 전달함수 $T(s)$ 와 $W_3^{-1}(s)$ 의 주파수 응답 특성을 나타냈다. 설계된 제어기의 전달함수는 식 (14)와 같다. 그리고 제어기를 실제 시스템으로 구현하기 위하여 식 (15)와 같이 바이리니어 변환(bilinear transformation)에 의해 이산 시간 영역의 전달함수로 변환하여 초정밀 스테이지 시스템에 적용하였다.

$$K(s) = \frac{10^9 \times (1.8057648s^2 + 72.23059s + 79209.676)}{s^3 + 7081.49s^2 + 882497.74s + 17647.122} \quad (14)$$

$$K(z) = \frac{10^5 \times (2.30638z^2 - 1.520562z + 2.06752)}{z^3 - 0.855122z^2 - 0.706035z + 0.5612} \quad (15)$$

Fig. 11에 제어기를 포함한 개루프 시스템에 대한 Bode 선도를 나타냈다. 그림에서 이득 여유(GM)는 50.26 dB이고, 위상 여유(PM)은 80.3도로 제어기를 포함한 시스템은 매우 안정함을 알 수 있다. 설계된 H_∞ 제어기에 대하여 100 nm 계단 입력에 대한 시뮬레이션을 수행하여 결과를 Fig. 12에 나타냈다. 그림에서 오버슈트는 발생하지 않으며, 상승 시간과 정착 시간은 0.2초로 나타났다. 그리고 정상 상태 오차는 1 nm 미만으로 진동이 발생하지 않는 안정된 제어기 성능을 볼 수 있다.

Fig. 13은 설계된 제어기에 대해 실제 초정밀 스테이지 시스템의 계단 입력 응답 특성을 나타냈다. 최대 오버슈트가 0.129초에서 5.0 nm이고, 상승 시간은 0.093초이며, 정상 상태 오차는 최대 1.5 nm를 넘지 않음을 볼 수 있다. 동일한 시스템 전달함수에 대해 PID제어를 수행한 결과는 최

대 오버슈트가 0.441초에서 약 3 nm이고, 상승 시간은 0.288초이며, 정착 시간은 0.9초로 나타났다. 그러나 PID제어기는 시뮬레이션에 의한 계인 선정과 실제 실험에 의한 계인 선정에 있어서 많은 차이를 보였다. 비교적 안정된 제어 성능을 보였지만 빠른 응답을 갖도록 계인을 변경하면 매우 민감하게 불안정해짐을 확인할 수 있었다.⁽¹¹⁾ 설계된 H_∞ 제어기에 대해 시스템의 히스테리시스 특성에 대한 응답 특성을 보기 위해 0 nm부터 20 nm까지 5 nm간격으로, 그리고 100 nm부터 120 nm까지 5 nm간격으로 계단 입력을 증가시키면서 실험하였다. Fig. 14(a), (b)에 결과를 나타냈다. 그림에서 정상 상태 오차가 최대 2 nm를 초과하지 않으며, 압전소자 구동기의 입력 전압에 대해 변위가 일정하게 증가하며, 일정한 입력전압에 대해 변위가 일정하게 유지됨을 볼 수 있다.

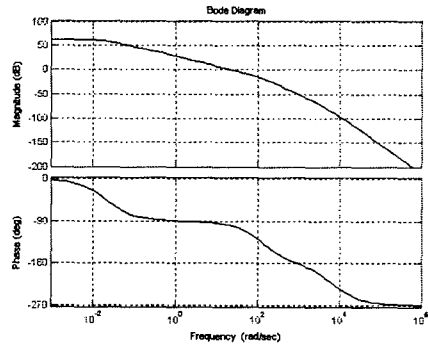


Fig. 11 Bode diagram of the open loop transfer function for the system

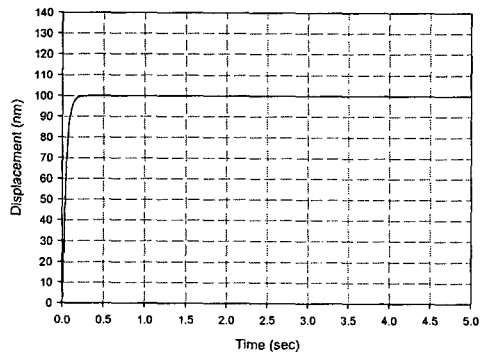


Fig. 12 Simulation result of the step response for the H_∞ controller

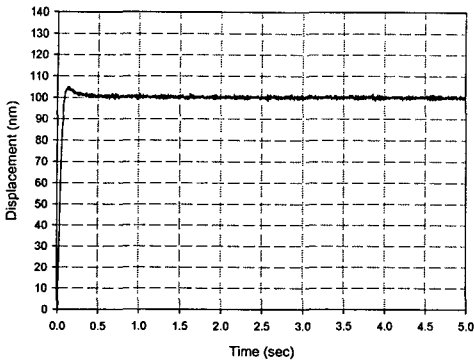
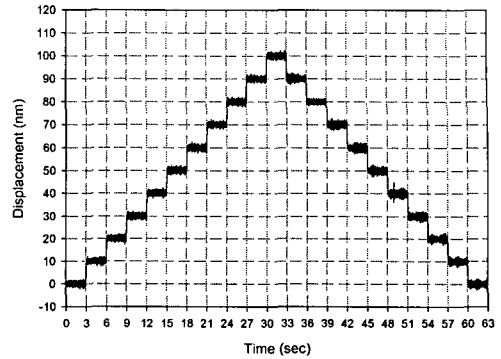
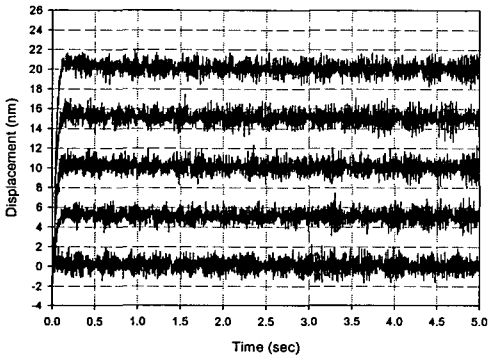


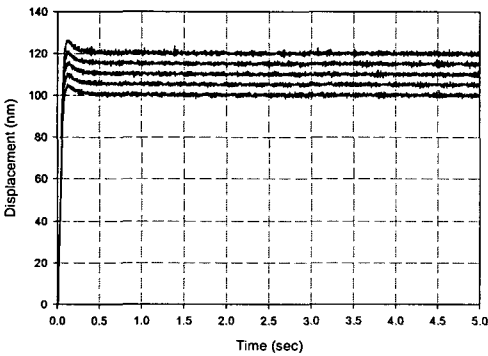
Fig. 13 Experimental result of the step response for the H_{∞} controller



(a) 10 nm resolution



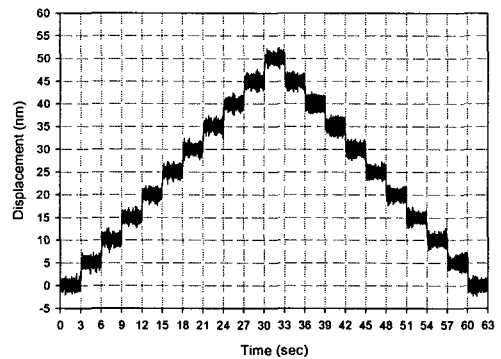
(a) 0 nm to 20 nm (5 nm step)



(b) 100 nm to 120 nm (5 nm step)

Fig. 14 Experimental results of the step responses for the H_{∞} controller

이것으로부터 압전소자 구동기의 히스테리시스와 크리프 특성에 대해 매우 우수한 제어 성능을 나타냄을 알 수 있다. 제어기의 연속 계단 입력에



(b) 5 nm resolution

Fig. 15 Experimental results of the continuous step responses for the H_{∞} controller

대한 응답 특성을 알아보기 위해 0 nm에서 100 nm까지 10 nm간격으로 계단 입력을 증가하면서 실험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 15(a)에 나타냈다. 그림에서 설계된 H_{∞} 제어기를 가진 초정밀 스테이지는 최대 요동 범위가 3 nm이하이고, 충분히 10 nm의 분해능을 만족함을 알 수 있다. Fig. 15(a)의 결과로부터 5 nm이하로 분해능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단하여 0 nm에서 50 nm까지 5 nm간격으로 계단 입력을 증가하면서 실험을 수행하여 Fig. 15(b)의 결과를 얻었다. 그림에서 설계, 제작된 초정밀 스테이지와 강인성을 갖도록 설계된 H_{∞} 제어기는 5 nm이하의 분해능을 만족함을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 탄성 힌지를 이용하여 설계, 제작

된 초정밀 스테이지와 압전소자 구동기, 그리고 피드백 변위 측정을 위한 초정밀 리니어 엔코더를 이용하여 초정밀 위치 시스템을 구성하였다. 그리고 계단 입력 응답 특성을 이용하여 시스템의 전달 함수를 모델링하고, 이 시스템의 위치 추종 성능을 향상시키기 위해 강인 제어인 H_∞ 제어기를 이용한 피드백 제어를 하였다.

(1) 입력전압에 대한 계단 응답 특성으로부터 피크시간과 정착시간, 그리고 정상 상태 변위를 구하였다. 또한 고유 주파수를 산출하였으며, 이 값들을 DC 계인을 가진 일반적인 2차 시스템에 적용하여 초정밀 스테이지 시스템을 2차 시스템으로 모델링하였다.

(2) PID 제어기를 사용하는 상용의 초정밀 스테이지는 조건 변화에 따라 시행 오차에 의한 계인 선정 방법의 문제점을 가지고 있다. 따라서 이 문제를 보완하고, 시스템의 모델링 과정 중의 무시되는 부분에 대한 모델링 오차와 피드백 변위 측정의 측정 오차, 그리고 운전 조건의 변화에 대하여 안정성과 강인성을 부여하기 위해 적절한 가중치 함수들을 선정하여 H_∞ 제어기를 설계하였다.

(3) 초정밀 스테이지 시스템에 대한 개루프 제어 특성에서 나타난 압전소자 구동기의 히스테리시스와 크리프 특성을 극복하기 위해 설계된 H_∞ 제어기는 히스테리시스 특성과 크리프 특성에 관계없이 빠른 응답 특성과 뛰어난 위치 추종 성능을 가질 수 있으며, 최소 5 nm의 분해능을 구현할 수 있음을 검증하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2003-000-11690) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Parao, J. M. and Weisbold L., 1965, "How to Design Flexure HingesNo." *Machine Design*.
- (2) Smith, S. T. and Chetwynd, D. G., 1994, "Foundation of Ultraprecision Mechanism DesignNo."

Gordon and Breach Science Publisher, pp. 99~100.

- (3) Lee, D. S., Park, J. H. and Park, H. J., 1999, "Ultraprecision Positioning System for Servo Motor-Piezo Actuator Using the Dual Servo Loop and Digital Filter ImplementationNo." *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 Ultraprecision Plane X-Y StageNo." *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, pp. 342~347.
- (5) Kim, J. Y., Lee, B. R., Yang, S. Y. and Ahn, K. K., 2003, "Precision Position Control of Piezoactuator Using Inverse Hysteresis Model and Neuro-PID ControllerNo." *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 22~29.
- (6) Kang, J. O., Seo, M. H., Han, C. S. and Hong, S. W., 2004, "Development of 3-axis Fine Positioning Stage : Analysis and DesignNo." *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 21, pp. 147~154.
- (7) Kang, J. O., Back, S., Han, C. S. and Hong, S. W., 2004, "Development of 3-axis Fine Positioning Stage : Fabrication and Performance EvaluationNo." *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 21, pp. 155~162.
- (8) Hwang, W. H. and Ahn, S. M., 2004, Control system Design using MATLAB, *Daewan-Serlim publisher*, pp. 521~598.
- (9) Ogata, K., 1997, Modern Control Engineering, *Prentice-Hall*, 3rd Edition, pp. 134~155.
- (10) Jeong, S. H., Kim, G. H., Char, K. R., Lee, K. H. and Song, S., 2006, "A Study on the Motion Mechanism of Multi-Axis Ultra Precision Stage for Optical Element AlignmentNo." *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 1, pp. 8~16.
- (11) Park, J. S., Jeong, K. W., 2006, "A Study on the Design and Control of a Ultra-Precision StageNo." *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 3, pp. 111~119.