

## 초정밀 스테이지 설계 및 제어에 관한 연구

박종성\*, 정규원<sup>+</sup>

(논문접수일 2006. 3. 7, 심사완료일 2006. 3. 30)

### A Study on the Design and Control of a Ultra-precision Stage

Jongsung Park\*, Kyuwon Jeong<sup>+</sup>

#### Abstract

The ultra-precision stage is demanded for some industrial fields such as semiconductor lithography, ultra-precision machining, and fabrication of nano structure. A new stage was developed for those applications in order to obtain nano meter resolution. This stage consists of symmetric double parallelogram mechanism using flexure hinges. The mechanical properties such as strength of the flexures and deformations along the applied force were analyzed using FEM. The stage is actuated by a piezoelectric actuator and its movement was measured by a ultra-precision linear encoder. In order to improve positioning performance, a PID controller was designed based on the identified second order transfer function. Experimental results showed that this stage could be positioned within below 5 nm resolution irrespective of hysteresis and creep by the controller.

**Key Words :** Atomic Force Microscope(원자간력 현미경), Scanning Tunneling Microscope(주사형터널 현미경), Ultra-precision stage(초정밀 스테이지), Flexure hinge(탄성 힌지), PID controller(PID 제어기), FEM(Finite Element Method)(유한 요소 해석), Piezoelectric actuator(압전소자 구동기), Ultra-precision linear encoder(초정밀 리니어 엔코더)

## 1. 서론

산업계에서는 초정밀 측정, 반도체 제작 공정, AFM, STM 등 제품의 고정밀화 및 대형화 추세에 따라 나노미터 (nm)급의 정밀도를 유지하면서 수백 mm의 긴 스트로크를 갖는 초정밀 위치 결정 기술을 요구하고 있으며, 그 중 산업

계에 적용하기 좋은 형태는 마이크로 스테이지와 글로벌 스테이지를 결합한 이중 서보 기구를 이용하는 방법이다. 초정밀 마이크로 스테이지는 높은 정밀도 및 반복성을 유지하기 위해 오차가 최소화되도록 구성하여야 하며, 높은 이송 분해능을 가져야 한다. 이러한 초정밀 스테이지의 구성 조건을 만족하기 위하여 여러 가지 조합을 사용하는데, 최근에는

\* 충북대학교 기계공학과 (jspark-21@hanmail.net)  
<sup>+</sup> 교신저자, 충북대학교 기계공학부  
주소: 361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 12번지

이동 가이드(guide mechanism)로 탄성 변형을 이용하여 부드럽고 연속적인 운동을 제공하며 나노미터의 분해능을 가지는 탄성 힌지(flexure hinge)와 빠른 응답성과 높은 분해능을 가지고 있는 압전소자 구동기(piezoelectric actuator)의 조합으로 이루어진다. 그리고 압전소자 구동기의 히스테리시스 성분을 보상하기 위해 입력 전압과 변위의 관계를 이용하여 역 히스테리시스 모델링하고, 이 관계로부터 히스테리시스를 보상하여 분해능을 향상시키고 있다<sup>(10)</sup>.

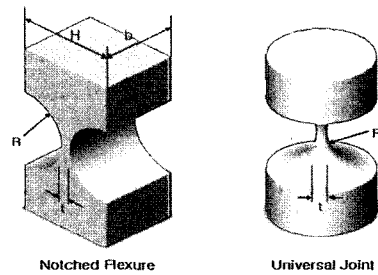
본 연구에서는 탄성 힌지와 압전 소자 구동기를 사용하여 초정밀 스테이지를 설계 및 제작하였으며, 1nm 분해능의 초정밀 리니어 엔코더를 사용하여 피드백 변위를 측정하였다. 제작된 초정밀 스테이지에 대해 유한 요소 해석을 통하여 스테이지의 탄성 힌지가 탄성 영역 안에서 구동되는지 알아보기 위하여 항복 변위를 조사하였다. 그리고 제작된 초정밀 스테이지의 정밀한 위치 결정을 위하여 피드백 제어기를 고안하였다. 계단 입력(step input) 응답을 이용하여 제작된 초정밀 스테이지의 전달함수를 2차 시스템으로 모델링하였고, 이 시스템에 대해 PID 게인을 선정하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 선정된 게인에 대하여 계단 입력 응답 실험과 연속 계단 응답 실험을 수행하여 설계된 제어기의 제어 성능을 검증하였다.

## 2. 초정밀 스테이지 설계 및 해석

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<sup>(2,3)</sup>. 탄성 힌지는 힌지의 형상에 따라 노치 힌지(notched flexure)와 원형 힌지(universal joint) 등으로 구분할 수 있고<sup>(1)</sup>, Fig. 1은 기본적인 탄성 힌지의 형상과 설계 변수값을 나타내며, Fig. 2는 노치 힌지 모델을 기초로 본 연구에서 설계 및 제작된 초정밀 스테이지를 보여준다. 그림은 상하좌우 대칭의 형태로서, 중앙의 가동부분은 외곽의 프레임 부분에 이중 평행 사변형 링크로 연결되어 있다. 이것은 제작과정 또는 구동기의 설치 등에서 발생할 수 있는 불균형에 따른 오차를 줄이고자 함이다. 제작된 초정밀 스테이지에 대해 상용 프로그램인 ANSYS 툴을 이용하여 초정밀 스테이지를 모델링하고,

컴플라이언스 해석을 수행하였다. 초정밀 스테이지의 탄성 힌지 부분과 그 몸체의 재질은 알루미늄 6061-T6 합금을 사용하였다. Table 1에 설계된 초정밀 스테이지의 기본 사양을 정리하였다.

Fig. 3은 ANSYS 툴에서 초정밀 스테이지를 모델링한 후, 모델에 대해 메쉬(mesh) 작업을 수행하고, 구속 조건과 작용 하중을 나타낸 것이다. 각 모서리에 대해 “ㄱ”자 모양의 구속 조건을 부여하였고, 그 절점들에 대하여 모든 병진운동의 자유도를 구속하였다. 중앙 하단부에 피에조 구동기로 하중을 주고 있다. 스테이지의 구동부에 작용 하중으로 10 N의 집중 하중을, 그리고 스테이지의 고정부에 반력으로 -10 N의 집중 하중을 절점에 적용하였다. 실제로 스테이지의 외곽 부분은 고정되는 부분이고, 탄성 힌지는 스테이지 부분의



Parameter	Data
R	3.7mm
b	18mm
H	6.5mm
t	0.6mm

Fig. 1 Typical flexure hinge and design parameters of the ultra-precision stage

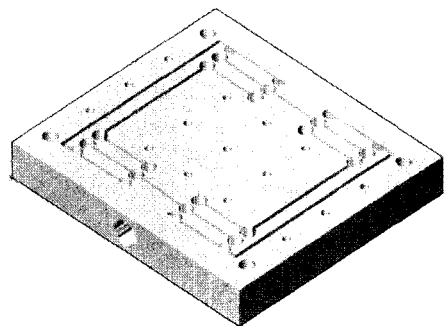
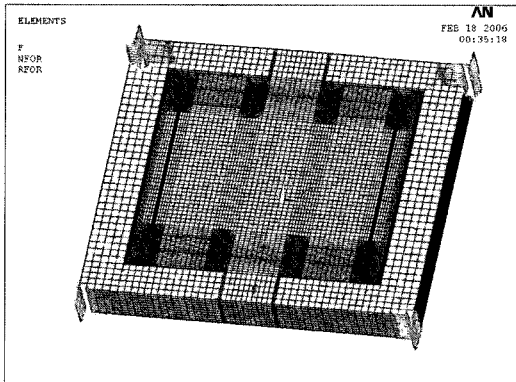


Fig. 2 Designed ultra-precision stage

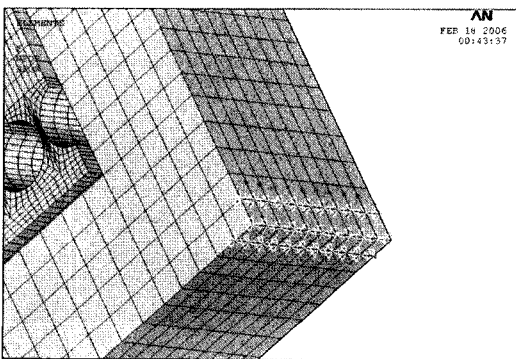
이동을 위한 가이드 역할을 하는 것으로 탄성 힌지의 미세한 거동이 전체 스테이지의 거동을 결정한다고 해석할 수 있다. Fig. 4에 구속 조건을 확대하여 나타냈다.

**Table 1 Specifications of the system**

Category	Item	Data
Stage	Material	AL 6061-T6
	Density	2700kg/m <sup>3</sup>
	Young's Modulus	72GPa
PZT actuator	Maker Model	SONOX P53
	Dimension	5 × 5 × 5(mm)
	Compliance	22.9 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /N
	Stiffness	15.2 × 10 <sup>10</sup> m <sup>2</sup> /N
	Density	7830kg/m <sup>3</sup>

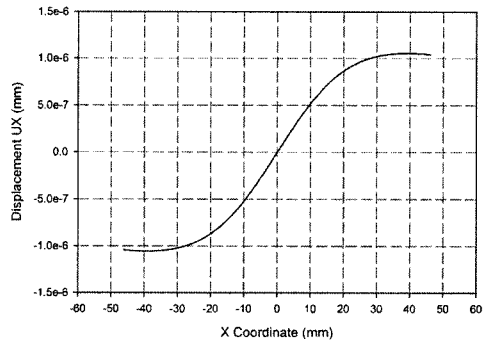


**Fig. 3 Meshing result of the stage and boundary conditions for FEM analysis**

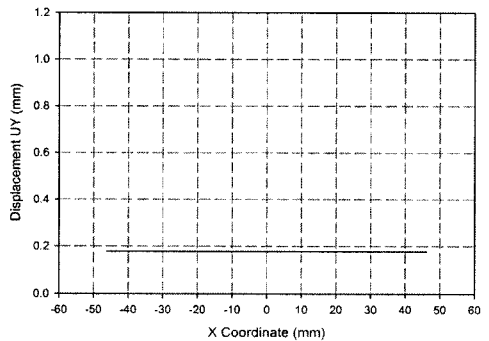


**Fig. 4 Boundary conditions for FEM analysis**

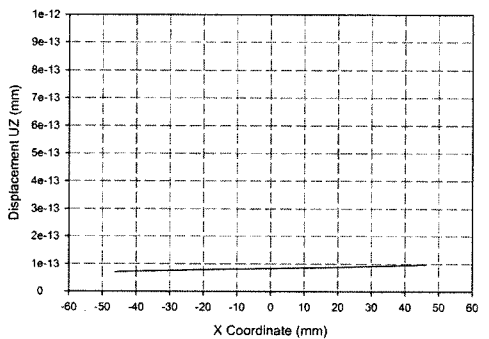
Fig. 5는 가동부분 중앙의 x 좌표축상의 점들에 대해 x, y, z 방향의 변위를 나타냈다. y 방향의 변위는 모든 점들에서 일정하며, x 방향의 변위는 중심을 기준으로 하여 좌우에 대칭으로 발생한다. z 방향으로도 프와송의 비율로 인하여 미세한 변위가 발생하고 있다. 그러나 x, z 방향의 변위는 매우 미소하여 나노미터 정밀도에 큰 영향을 주지 않음을



**(a) Displacement of x direction**



**(b) Displacement of y direction**

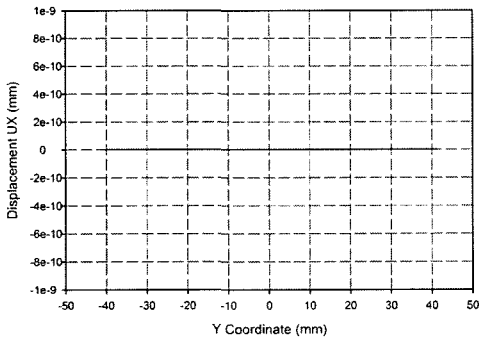


**(c) Displacement of z direction**

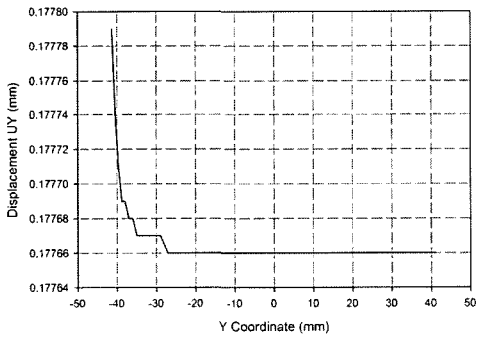
**Fig. 5 Each direction displacements for x coordinate**

알 수 있다. Fig. 6은 y 좌표축상의 점들에 대해 x, y, z 방향의 변위를 나타냈다. 그림에서 x 및 z 방향의 변위는 매우 미소하여 나노 미터급의 정밀도에 영향을 주지 않으며, y 방향의 변위는 압전소자 구동기의 접촉부위에서 발생함을 알 수 있다. 따라서 이 해석으로부터 구동기의 접촉부위를 제외한 범위에서는 연성(coupling)을 무시할 수 있음을 알 수 있

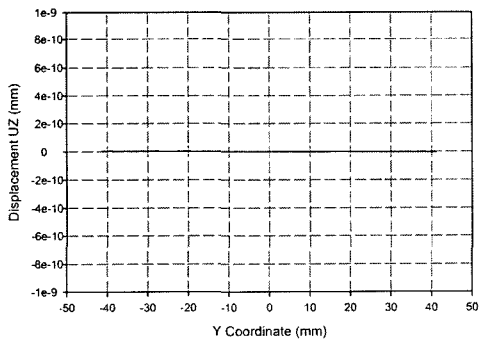
다. 컴플라이언스 해석으로부터 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 응력 해석과 변위 해석 결과를 나타냈다. 응력 해석으로부터 탄성 한계 부분에서 최대 인장 응력은 약 33.75MPa이고, 최대



(a) Displacement of x direction



(b) Displacement of y direction



(c) Displacement of z direction

Fig. 6 Each direction displacements for y coordinate

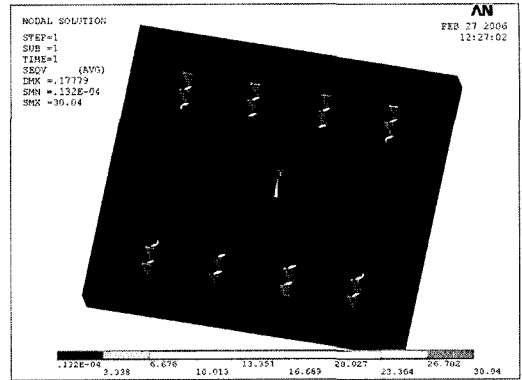


Fig. 7 Stress result for FEM analysis

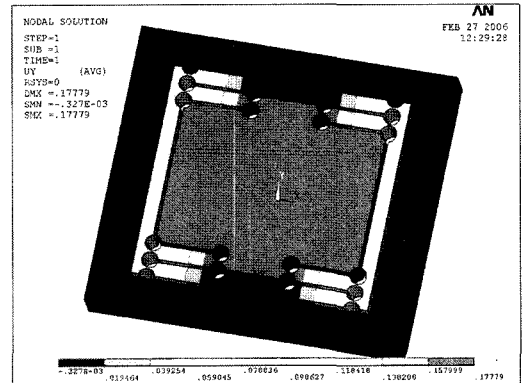


Fig. 8 Strain result for FEM analysis

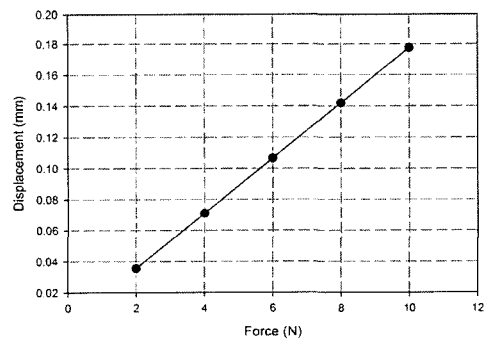


Fig. 9 The relationship of the displacement of y direction and force for ultra-precision stage

압축 응력은 약 33.58MPa으로 나타났다. 제작된 스테이지의 재질인 알루미늄 6061-T6 합금의 항복 인장 응력 276MPa, 항복 압축 응력 386MPa이므로 스테이지는 탄성 영역에서 거동함을 알 수 있다<sup>(8)</sup>. Fig. 9는 제작된 스테이지에 가해지는 힘과 y 방향의 변위를 나타냈다. 힘의 크기를 2 N에서 10 N까지 증가시키면서 해석하였으며 스테이지 중심점의 y 방향 변위를 추출하였다. 그림에서 스테이지는 가해지는 힘이 증가함에 따라 y 방향의 변위가 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

### 3. 시스템 구성 및 제어

#### 3.1 시스템 구성

본 연구에서 설계 및 제작된 초정밀 스테이지의 미소 변위를 측정하기 위해 1nm 분해능의 초정밀 리니어 엔코더를 사용하였다. Table 2에 사용된 초정밀 리니어 엔코더의 기본적인 특성을 나타냈다. 그리고 이 엔코더를 설치한 스테이지의 모습을 Fig. 10에 나타냈다. 엔코더는 간단한 지그를

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

Item	Data
Measuring standard	DIADUR phase grating
Output signals	Sine wave, 1 V <sub>PP</sub>
Signal periods	0.128 μm
Accuracy grades	± 0.5 μm
Recommended measuring steps	0.001 μm
Measuring lengths	70 mm

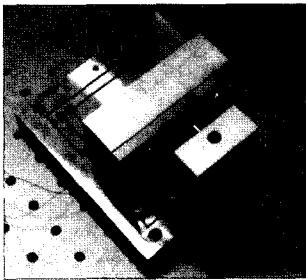


Fig. 10 Overview of the experimental ultra-precision stage

설계하여 초정밀 스테이지의 이송 가이드 역할을 하는 안쪽 부분에 장착하였다. 리니어 엔코더의 헤드 부분과 스케일 사이의 최대 허용 거리는 3mm이므로 이 간격을 유지하도록 고정하였다. Fig. 11에 본 연구에서 구성된 초정밀 위치 시스템의 구조를 나타냈다. 초정밀 리니어 엔코더로부터의 피드백 변위는 카운터 보드를 통하여 3 msec의 샘플링 시간으로 제어기인 컴퓨터로 입력된다. 이 피드백 변위 정보를 이용하여 제어기는 제어 입력을 만들고, 이 값은 12 비트 D/A 변환기를 통해 0 V에서 10 V의 아날로그 값으로 출력되며 이 값은 증폭기에 전달된다. 전달된 값은 -10 V에서 150 V의 전압으로 증폭되어 스테이지에 설치된 압전소자 구동기를 구동한다.

#### 3.2 시스템 모델링

실제 초정밀 시스템을 정확하게 수식화하여 모델링하는 것은 매우 난해하므로 시스템의 전달함수를 모델링하기 위한 방법으로 크기 변화에 따른 계단 입력 응답 특성을 이용하였다. D/A 변환기를 이용하여 압전소자 구동기의 전압 입력을 0 V부터 10 V까지 1 V단위에 대한 응답실험을 수행하였다. Fig. 12에 크기 변화에 따른 계단 입력 응답을 나타냈다. 초기에 상당히 큰 오버슈트(overshoot)가 발생하며, 입력 전압과 변위가 비선형임을 알 수 있다.

일반적으로 압전소자 구동기에는 고유의 강유전성에 기인한 히스테리시스(hysteresis) 특성을 포함하며, 또한 입력 전압의 변화없이 시간에 따라 점차 변위가 증가하는 크리프(creep) 특성을 포함하고 있다. Fig. 12에 PZT 앰프(NV40S)의 입력전압을 1 V부터 10 V 까지 1 V 간격으로 주었을 때 각각의 경우에 스테이지 가동부의 변위를 리니어 엔코더로 측정한 결과이다. 전체적으로 약 0.2초까지 진동이 있는

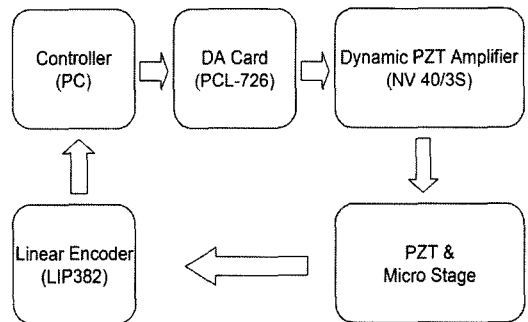


Fig. 11 Configuration of the ultra-precision positioning system

과도응답이 있으며, 그 이후에는 안정되어 있으나 시간이 지남에 따라 변위가 서서히 변하는 크리프 현상이 나타나고 있다. 또한 입력에 따라 대체적으로 비례하나 차이가 많이 있다. 그리고 Fig. 13에는 히스테리시스 특성을 나타냈다. 이들로부터 입력 전압과 변위 응답의 관계는 히스테리시스와 크리프에 의한 비선형 시스템으로 볼 수 있으므로 나노미터급의 정밀도를 얻기 위해서는 피드백제어가 필요함을 알 수 있다. 이를 위하여 Fig. 12의 입력 전압이 1 V인 계단 응답 결과와 일반적인 2차 시스템 모델을 이용하여 시스템의 전달함수를 모델링하였다. 식 (1)에 일반적인 2차 시스템을 나타냈다. 여기서  $D$ ,  $\zeta$ ,  $w_n$ 은 각각 DC 게인, 감쇠계수 그리고 고유 주파수를 나타낸다. 식 (2)와 (3)에서  $t_p$ 와  $t_s$ 는 각각 피크 시간(peak time)과 정착 시간(settling time)을 나타낸다<sup>(9)</sup>.

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

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

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

Fig. 12로부터 피크 시간은 0.02초이고, 정착 시간은 0.2초이며, 정착 상태에서의 변위는 242nm로 선정하였다. 또한 고유 주파수를 209.44 rad/sec로 선정하였다. 이 응답 특성으로부터 식 (4)와 같이 2차 시스템으로 nm/V 단위의 시스템 전달함수를 모델링하였다. Fig. 14에 모델링된 전달함수에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과와 실제 시스템에 대한 계단 응답을 비교하였다. 실제 시스템은 응답 초기에 320nm의 오버슈트를 발생하며 시간이 경과함에 따라 서서히 증가하는 크리프 경향을 보였다. 그리고 시스템 모델은 초기에 299nm의 오버슈트를 발생하며, 0.12초에서 안정한 상태로 수렴한다.

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

### 3.3 시스템 제어

초정밀 위치 시스템의 히스테리시스를 제거하고 크리프에 대해 안정한 위치 결정 시스템을 구현하기 위해 PID 제어를 이용한 피드백 제어를 수행하였다. 식 (5)에 일반적인 PID 제어기  $K(s)$ 를 나타냈다.  $K_p$ ,  $K_i$  및  $K_d$ 는 각각 비례 게인, 적분 게인 그리고 미분 게인이다<sup>(9)</sup>. 모델링된 전달함수

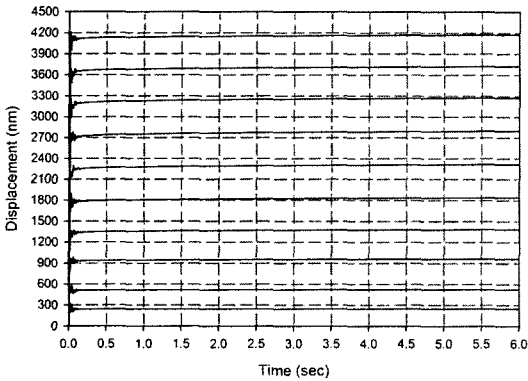


Fig. 12 Step responses for various input voltages

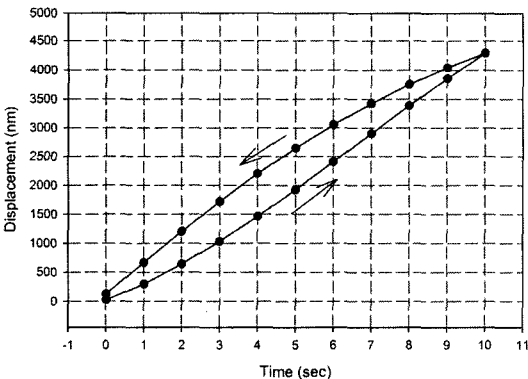


Fig. 13 Hysteresis of the ultra-precision stage system

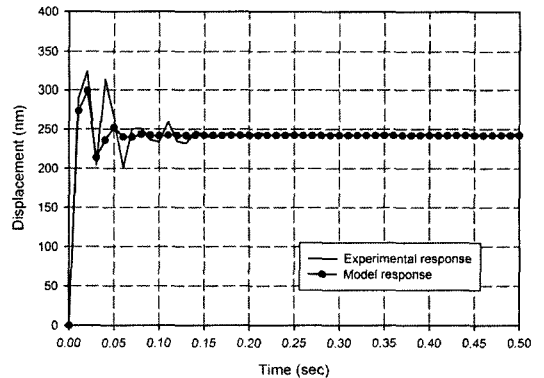


Fig. 14 Comparison of the step responses obtained from the experiment and the identified model

에 대해 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 빠른 응답 특성을 위해 비례 게인을 증가시키면 시스템이 불안정해지기 쉬우며, 또한 초기에 진동을 발생하는 것으로 나타났다. 그래서 오버슈트와 진동이 발생하지 않으며 적당한 응답 특성을 갖는 최적의 제어기 게인을 시뮬레이션을 통하여 선정하였다. 그리고 선정된 게인을 실제 시스템에 적용하여 실험적으로 2차 게인 튜닝을 수행하였다. Table 3에 선정된 제어기 게인을 나타냈다.

$$K(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (5)$$

Fig. 15에 PID 제어기를 포함한 개루프 시스템에 대한 Bode 선도를 나타냈다. 그림에서 이득 여유(GM)는 무한대이고, 위상 여유(PM)은 89.6도이므로 제어기를 포함한 시스템은 상대적으로 안정함을 알 수 있다. 설계된 PID 제어기에 대하여 100nm 계단 입력에 대한 시뮬레이션을 수행하여 결과를 Fig. 16에 나타냈다. 그림에서 오버슈트는 발생하지 않으며, 상승 시간과 정착 시간은 0.702초이다. 그리고 정상 상태 오차가 없으며, 진동이 발생하지 않는 안정된 제어기 성능을 볼 수 있다. Fig. 17은 설계된 제어기에 대해 실제 초정밀 스테이지 시스템의 계단 입력 응답 특성을 나타냈다.

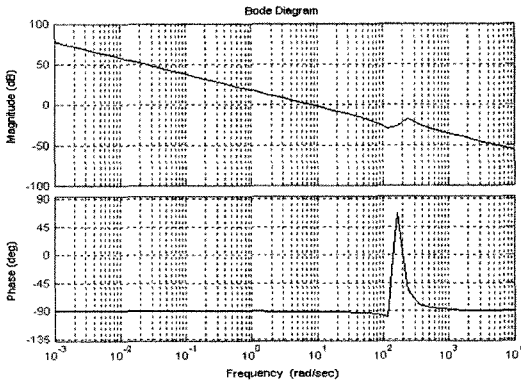


Fig. 15 Bode diagram of the open loop transfer function for the system

Table 3 Control gains for the PID controller

Item	Gain value
P-gain ( $K_p$ )	0.002 (V/nm)
I-gain ( $K_i$ )	30449000 (V/nm·sec)
D-gain ( $K_d$ )	1500 (V·sec/nm)

최대 오버슈트가 0.441초에서 약 3nm이고, 상승 시간은 0.288초이며, 정착시간은 0.9초이다. 그리고 정상 상태 오차는 최대 1nm를 넘지 않아 100nm에 대해 1%의 오차를 나타냈다. 이 제어기에 대해 시스템의 히스테리시스 특성에 대한 응답 특성을 보기 위해 5nm부터 20nm까지 5nm 간격으로, 그리고 105nm부터 120nm까지 5nm 간격으로 계단 입력을 증가시키면서 실험하였으며, Fig. 18 (a)와 (b)에 결과를 나타냈다. Fig. 18 (a)에서 최대 오버슈트가 2nm를 초과하지 않으며 상승 시간은 0.24초이고 정착 시간은 0.61초이다. 그리고 정상 상태 오차가 최대 2nm를 초과하지 않음을 볼 수 있다. Fig. 18 (b)에서 최대 오버슈트가 4nm이고 상승 시간과 정착 시간은 각각 0.282초, 0.96초로 나타났다. 그림으로부터 압전소자 구동기의 히스테리시스와 크리프 특성에 대

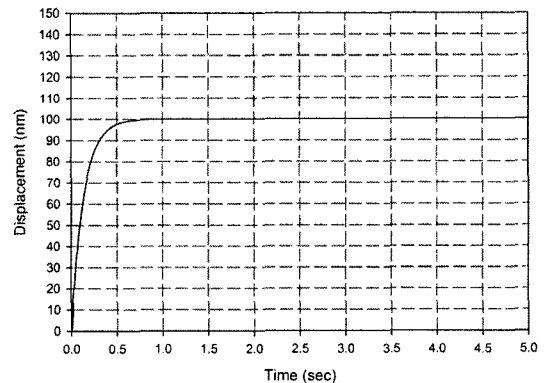


Fig. 16 Simulation result of the step response for the PID controller

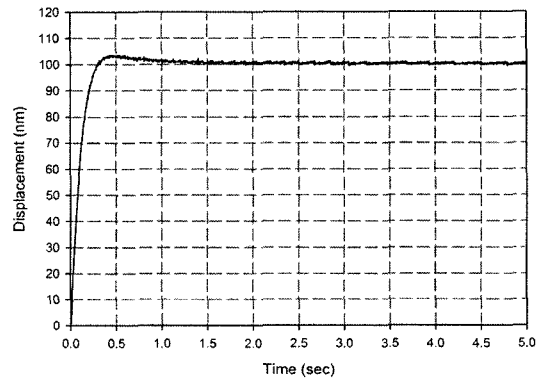
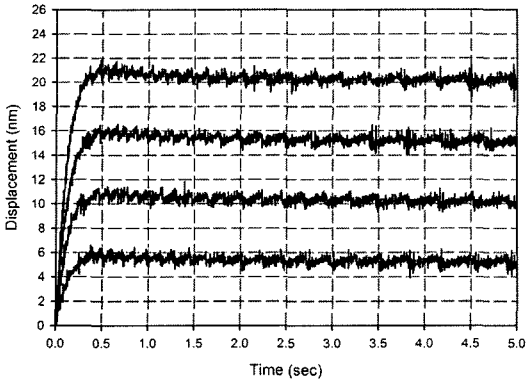
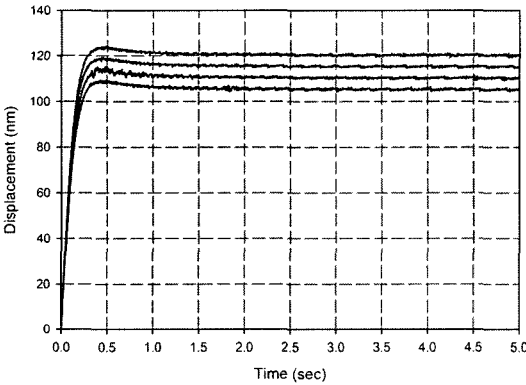


Fig. 17 Experimental result of the step response for the PID controller



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

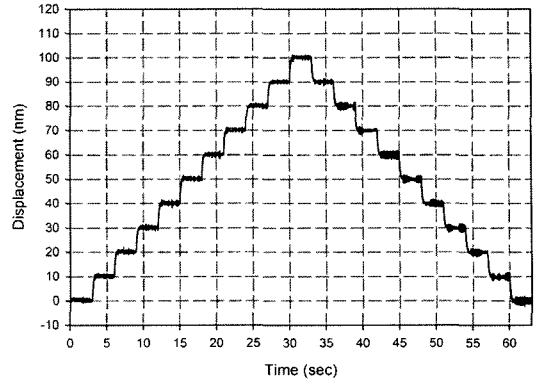


(b) 105nm to 120nm(5nm step)

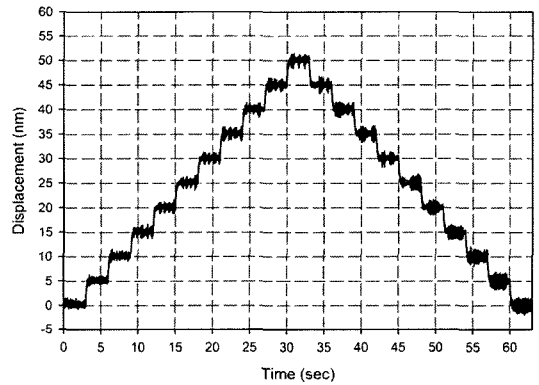
Fig. 18 Experimental results of the step responses for the PID controller

해 매우 우수한 제어 성능을 나타냄을 알 수 있다.

제어기의 연속 계단 입력에 대한 응답 특성을 검증하기 위해 0nm에서 100nm까지 10nm간격으로 계단 입력을 증가하면서 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 19 (a)에 나타냈다. 그림에서 설계된 PID 제어기를 가진 초정밀 스테이지는 최대 요동 범위가 3nm 이하이므로 충분히 10nm의 분해능을 만족함을 알 수 있다. Fig. 19 (a)로부터 최대 요동 범위가 3nm이므로 최소 분해능을 5nm 이하로 향상시킬 수 있을 것으로 판단하여 0nm에서 50nm까지 5nm 간격으로 계단 입력을 증가하면서 실험을 수행하여 Fig. 19 (b)의 결과를 얻었다. 그림에서 최대 요동 범위가 3nm 이하이므로 설계 및 제작된 초정밀 스테이지와 PID 제어기는 5nm이하의 분해능을 만족함을 알 수 있다.



(a) 10nm resolution



(b) 5nm resolution

Fig. 19 Experimental results of the continuous step responses for the PID controller

#### 4. 결론

본 연구에서는 탄성 힌지를 이용하여 대칭형 이중 평행사 변형 구조를 갖는 초정밀 스테이지를 설계 및 제작하였다. 그리고 압전소자 구동기와 초정밀 리니어 엔코더를 이용하여 초정밀 위치 시스템을 구성하였으며 계단 응답 특성을 이용하여 시스템의 전달 함수를 모델링 하였다. 또한 시스템의 위치 추종 성능을 향상시키기 위해 PID 제어기를 이용한 피드백 제어를 수행하였다.

- (1) 유한 요소 해석을 통하여 제작된 초정밀 스테이지에 대한 응력과 변위를 해석하였다. 본 논문에서 제안된 구조를 갖는 초정밀 스테이지는 연성이 매우 적으며, 구동기



의 작용력에 따른 변위가 매우 선형적으로 거동됨을 알 수 있었다.

- (2) 입력 전압에 대한 계단 응답 특성을 이용하여 제작된 스테이지의 구동 시스템을 2차 시스템으로 모델링 하였으며, 이 모델링된 시스템에 대해 피드백 제어를 수행하였다. 이로써 압전소자 구동기의 히스테리시스와 크리프 등의 비선형성에 대해 정상 상태 오차가 2nm이하로 정밀한 제어를 할 수 있었다.
- (3) 본 논문에서 제안된 기구와 PID 제어를 이용하여 피드백 제어를 수행하여 최소 5nm 이하의 분해능을 갖는 초정밀 위치 시스템을 구현할 수 있음을 검증하였다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- (1) Parao, J. M. and Weisbold, L., 1965, "How to design Flexure Hinges," *Machine Design*.
- (2) Smith, S. T. and Chetwynd, D. G., 1994, *Foundation of Ultraprecision Mechanism Design*, 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 implementation," *Journal of the Korean 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 Stage," *Journal of the Korean 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 Controller," *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 Design," *Journal of the Korean 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 Evaluation," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, pp. 155~162.
- (8) Park, J. S. and Jeong, K. W., 2005, "A study of the Design and Control System for the Ultra-precision Stage," *Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Spring Conference*, pp. 54~59.
- (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 Alignment," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 1, pp. 8~16.