

## 초정밀 3 축 이송 스테이지의 개발 : 2. 제작 및 성능 평가

강중옥\*, 백석\*\*, 한창수\*\*, 홍성욱#

### Development of 3-axis Fine Positioning Stage : Part 2. Fabrication and Performance Evaluation

Joong-Ok Kang\*, Suk Baek\*\*, Chang-Soo Han\*\*, Seong-Wook Hong#

#### ABSTRACT

This paper presents the fabrication procedure and the experiments for the 3-axis fine positioning stage proposed in [1]. First, the dynamic characteristics of the actuator and the stage are tested with the preload changed in order to validate the stage design specifications. Secondly, the performance of the stage is also evaluated on the accuracy associated with linear positioning, angular error, and straightness error. Experimental results show that the developed stage is accurate enough to be used for nanometer positioning. Through the analysis and experiment, the developed fine positioning stage are found to have a long stroke due to the magnetically preloaded PZT actuators, the minimum motion crosstalk due to the use of a ball contact mechanism and the compact design.

**Key Words** : Fine stage(초정밀 스테이지), Flexure hinge(유연 힌지), Piezoelectric actuator(압전 소자 구동기), Point contact(점접촉), Magnetic preload(자기력 예압), Natural frequency(고유진동수), Hertzian contact(헤르쯔 접촉), Hysterisis(히스테리시스), Straightness (진직도), Angular error(각오차)

#### 1. 서론

초정밀 다축 위치 제어 시스템의 설계에서 높은 분해능과 반복 정밀도를 구현하기 위하여 여러 가지의 조합을 사용하게 된다. 먼저, 스테이지의 정밀 다축 구동을 위한 시스템을 구성해야 하는데, 이동 가이드와 구동기 및 측정·보상을 위한 센서 등이 중요한 구성 요소이므로 사양을 선택할 때 충분한 고려를 하여야 한다. 정밀 다축 구동을 위한 스테이지의 형태를 살펴보면 한 축을 구동하는 단일 스테이지(single stage)를 여러 개 쌓아서 조립

하는 적층형 스테이지와 단일 스테이지에서 다축 운동을 가능하게 만들었지만 구동축이 서로 분리되어 있는 형태, 그리고 하나의 모듈에 다축 구동이 가능하게 구동축이 서로 병렬로 만들어진 스테이지 등이 사용되어지고 있다.<sup>[2,3]</sup>

최근에는 스테이지의 형태로 단일 스테이지 상에서 다축 구동을 하는 메커니즘을 많이 사용하고, 이동 가이드로는 재료 변형을 이용하여 나노미터의 분해능을 가지는 유연 힌지 메커니즘을, 구동기는 빠른 응답성과 높은 정밀도를 가지는 압전 소자 구동기의 조합이 그 탁월한 장점으로 인

접수일: 2003년 8월 18일; 게재승인일: 2004년 1월 9일

\* 금오공과대학교 대학원 기전공학과

\*\* 한국기계연구원

# 교신저자. 금오공과대학교 기계공학부

E-mail : [swhong@kumoh.ac.kr](mailto:swhong@kumoh.ac.kr)

Tel : 054)467-4214, Fax : 054)467-4472

해 적용 범위가 넓어지고 있다.<sup>[1-8]</sup>

본 연구에서는 단일 모듈에 다축 구동이 가능하도록 하는 스테이지를 개발하였다. 참고 문헌<sup>[1]</sup>의 해석 결과를 기초로 스테이지를 제작하고, 동특성 실험 및 성능 평가를 실시하였다. 개발된 스테이지는 적층형 스테이지가 가지는 큰 부피와 관성, 그리고 응답속도 저하 등의 단점을 배제하기 위하여 하나의 모듈에 다축 운동을 가능하도록 스테이지에 X, Y 방향에 대한 병렬 구동 메커니즘을 구현하였다. 이러한 스테이지는 X 축과 Y 축에 대하여 동일한 낮은 관성을 가져 높은 응답성을 가지면서도 서로의 축에 대하여 독립적인 운동을 가능하게 한다. 또한, 구동 방향의 측면 방향에 설치된 센서에 의해 구동 방향의 런아웃(runout)을 측정·보상할 수 있다. 그리고 Y 축 방향에 대하여 2 개의 구동기를 설치하여 회전 각 발생을 가능하게 하였다.

이동가이드로는 유연 힌지 메커니즘을 사용하였으며, 구동기는 압전 소자 구동기를 사용하였다. 유연 힌지 메커니즘에 대한 내용은 참고 문헌<sup>[1]</sup>에서 자세히 소개하였다. 한편, 스테이지의 구동을 위한 압전 소자 구동기에 필요한 예압을 인가하기 위해 자기 예압 방식을 사용하였다.<sup>[9]</sup> 또한 이동축과 고정축 사이의 운동 연성을 최소화하기 위해 이동부와 고정기 사이에 불을 두어 불을 매개로 접촉이 이루어지도록 하였다.

설계 과정 및 목표에 대한 검증을 위해 스테이지에 대한 동특성 실험을 실시하였다. 이를 위해 스테이지에 대한 모드 해석, 압전 소자 구동기 및 부속품을 부착한 경우에 대한 모드 해석 등이 수행되었다. 또한, 자기력 예압량에 따른 스테이

지의 동특성 변화를 평가하고 이를 기초로 등가의 강성량을 계산하였다. 실제 스테이지의 성능 평가를 위하여 구동거리 및 분해능을 측정하였으며 제어 응답에 대한 검증 실험도 수행하였다. 이와 같은 동특성 실험과 성능 평가 실험을 통하여 개발된 스테이지가 매우 우수한 성능을 보이고 있음을 확인하였다.

## 2. 초정밀 스테이지 제작

### 2.1 스테이지 특징

참고문헌<sup>[1]</sup>에서의 설계를 기초로 스테이지의 유연 힌지를 설계, 제작하였다. 특히, 스테이지 동특성 및 제작상의 편의를 고려하여 유연 힌지의 형태를 개선하였으며, 스테이지 이동부의 질량을 줄이기 위하여 특성에 영향을 주지 않는 부분을 제거하였다. Fig.1 은 제작된 스테이지를 보여주고 있다.

구동기로는 압전 소자를 이용하였는데 압전 소자의 인장에 취약한 단점을 보완하기 위하여 자기력 방식의 예압 장치를 사용하였다. 예압은 압전 소자가 인장력을 견디도록 압력을 가하는 역할과 스테이지를 구동할 수 있도록 스테이지 이동부와 구동기를 밀착시켜주는 역할을 동시에 하게 된다. 자기력 예압을 사용할 경우, 전체 구동거리가 감소하는 단점을 보완할 수 있고, 간격 변화로 쉽게 예압량을 조절할 수 있으며 운전 조건에 상관없이 항상 일정한 예압량을 유지할 수 있는 장점을 가진다.<sup>[9]</sup>

구동기의 결합에서 스테이지 이동부와 구동기 사이에 불을 넣어 불을 매개로 한 접촉이 이루어지도록 설계 하였다. 이는 불 접촉 메커니즘이 이동축과 고정축 사이의 운동 연성을 최소화하면 접촉 메커니즘에서 나타나는 마찰력을 제거할 수 있으며 기존의 스테이지보다 훨씬 간단한 형태를 갖는 등의 다축 이송계의 적용에 있어 여러 장점을 가지기 때문이다.

### 2.2 스테이지 제작

실제 제작된 스테이지는 Fig.1 과 같은 형태이며, 그 구성은 X 방향에 대해서 압전 소자 구동기와 변위 측정을 위한 용량형 센서가 1 개씩 설치되며, Y 축에 대해서는 Y 축 구동과  $\theta$  방향의 각 변위 발생을 위하여 구동기와 센서를 각각 두 개

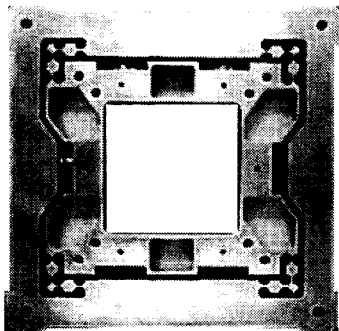


Fig. 1 The developed fine stage

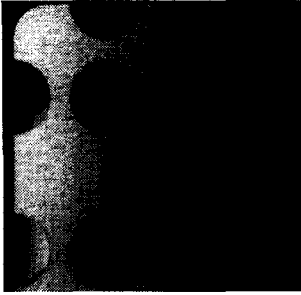
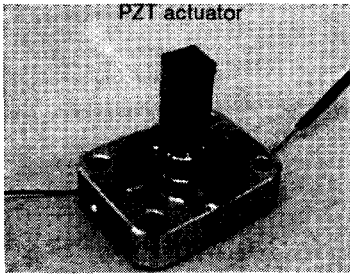
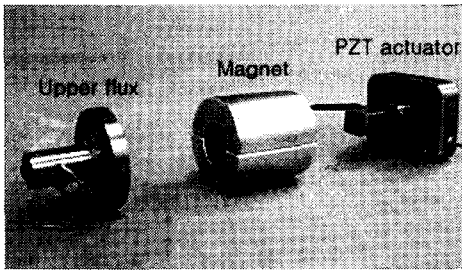


Fig. 2 The flexure hinge

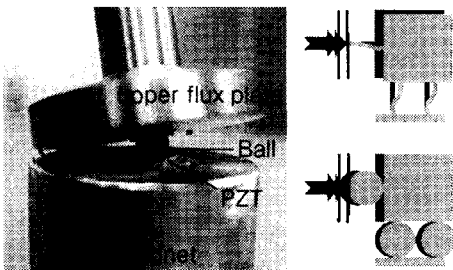


(a) PZT actuator



(b) Actuator assembly

Fig. 3 Actual PZT actuator assembly



(a)

(b)

Fig. 4 Point contact with  $\phi$  2 mm ball: (a) ball contact assembly, (b) effect of surface or point contact

씩 설치하였다. Fig. 2 는 제작된 스테이지의 유연 힌지 부분을 정밀 촬영한 사진이다. 스테이지 이동부의 네 모서리에 Fig. 2 와 같은 “ $\neg$ ”자 형태의 유연 힌지를 설치하여, 이동부의 지지와 XY 축에 대해서 동시에 이동 가이드 역할을 할 수 있도록 제작되었다.

Fig. 3 은 스테이지를 구동하기 위하여 사용된 압전 소자 구동기 조합이다. Fig. 3(a)는 압전 소자를 보여주고 있으며, Fig. 3(b)에서 압전 구동부 조합을 보여주고 있다. 자속상판(upper flux plate)은 스테이지 이동부에 설치되며, 영구 자석(permanent magnet)은 자기력 예압을 주기 위하여 사용하였다. 원통형 영구 자석의 내부로 압전 소자가 관통하여 설치되며 PZT 구동기부에 강력접착제(epoxy)로 접착된다. 또한 PZT 와 영구자석 사이는 실리콘으로 채워져 있다. 한편, 자속상판은 이동부에 만들어진 탭을 통해 볼트로 체결하여 고정된다. Fig. 4(a)와 같이 자속상판과 압전 구동기가 접촉하게 된다. 압전 구동부 조합체는 매우 정교한 가공을 하여 뒤틀어짐을 최소화 하였다.

한편 Fig. 4(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 Fig. 3(b)에서의 자속상판과 압전 소자 사이에는 직경 2 mm 의 볼을 두어 스테이지 이동부와 구동기가 점 접촉을 하도록 설계하였다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 면 접촉을 한 경우 마찰력과 구동축 간의 상호 간섭의 영향을 받게 된다. 그러나 점 접촉을 한 경우 한 방향으로 구동을 할 때 측면 방향으로의 연성(cross talk)을 최대한 배제하여 의도한 방향에 대한 운동이 인가되게 한다. 본 연구에서 채용한 볼 접촉에 의한 구동에서는 이동부를 끌어 당기는 기능이 없으므로 운동 제어를 위해 이를 보완하여야 한다. 따라서 압전 소자 구동기에 자기력 예압을 사용하여 자석이 스테이지를 당기는 기능을 함으로서 XY $\theta$  방향으로의 운동을 모두 제어할 수 있게 된다.

Table 1 에는 스테이지의 목표 사양을 정리하였으며 Table 2 에는 제작된 스테이지의 기본 사양에 대하여 정리하였다. 스테이지의 재질은 알루미늄이며, 압전 소자는 PSt 150/7 $\times$  7/20 을 사용하였다. 스테이지의 이동부의 질량은 0.796 kg 이며, 부속품을 모두 결합한 상태에서의 질량은 0.977 kg 이다. 그리고 스테이지의 동특성에 가장 큰 영향을 주는 유연 힌지 부분의 주요 변수들인 노치 반경(R), 힌지 두께(b) 및 노치 목 두께(t)의 값을 나타내고

Table 1 Design goal of the stage

Category	Item	Data
Freq.	Stage operating	>20 Hz
	Stage Resonance	>200 Hz
Rigidity	Stiffness	Less than 1/10 of that of the Piezo-actuator

Table 2 Specifications of the stage

Category	Item	Data	
Stage	Material	Type	Al 7075-T6
		Density	2810 kg/m <sup>3</sup>
		Young's modulus	72 GPa
	Mass of Moving Part	Without accessories	0.796 kg
		With accessories	0.977 kg
	Hinge	Radius of notch (R)	3.00 mm
		Thickness of notch neck (t)	1.69 mm
		Height of hinge (b)	40 mm
	PZT actuator	Type	PSi 150/7× 7/20
Max. Stroke		30 μm	
Stiffness		120e6 N/m	
Preload		Permanent magnet	

있다. 압전 소자의 최대 이송거리는 30 μm이며, 강성은 약 120e6 N/m이다. 따라서 Table 1의 설계목표로부터 각 유연 힌지의 강성이 3e6 N/m 이하로 제한된다.

### 3. 동특성 실험

동특성 실험은 제안된 설계방법의 검증 및 설계에서 고려하지 않은 예압에 따른 동특성 변화를 파악하기 위해 실행되었다. 먼저, 본 연구에서 제안한 설계방법에 대한 신뢰도를 검증하기 위하여 해석 모델과 동일한 사양으로 제작된 실제 스테이

지에 대한 동특성 실험을 실시하였으며 참고문헌 [1]에 그 내용을 상세히 설명하였다. 이 실험은 부속품을 부착하지 않은 순수 해석적 모델 상태의 스테이지에 대한 실험 결과이다. 여기서는 다음 단계로 스테이지의 구동 및 측정을 위한 여러 부속품이 결합된 상태의 특성을 검토하였다. 실험은 기 실시한 동특성 실험과 동일한 방법으로 실시하였다. 즉, 압전 소자 구동기와 스테이지 이동부가 접촉되지 않은 상태에서의 스테이지에 대한 충격가진 실험을 실시하였다. Fig. 5와 같이 충격가진 실험을 위해 로드셀이 부착된 충격해머와 진동측정용 가속도계가 사용되었고 얻어진 신호를 받아 들여 주파수응답함수를 제공하는 신호처리기를 이용하였다.



Fig. 5 Experimental setup for modal test

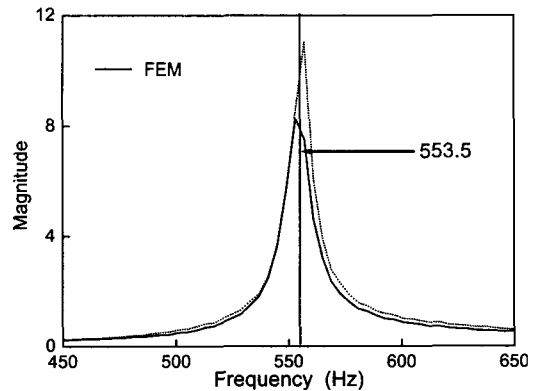


Fig. 6 Comparisons of measured and simulated 1<sup>st</sup> natural frequencies

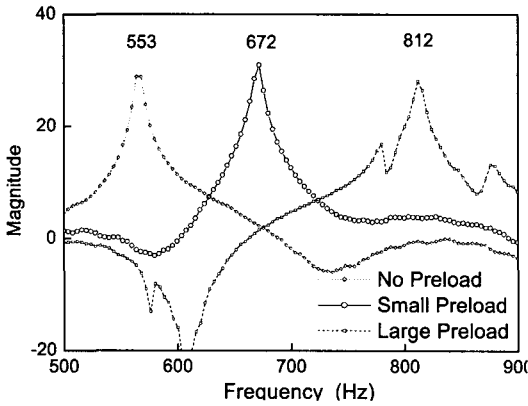


Fig. 7 Changes of frequency responses with preload

Fig. 6 에는 충격가진 실험을 통해 얻은 스테이지에 대한 주파수 응답과 계산을 통해 얻은 고유진동수를 같이 표현하였다. 유연 힌지가 완전 대칭이라는 조건으로 모델링한 유한 요소 해석은 553.5 Hz 의 1 차 고유 진동수를 얻었으며 실험적으로는 553~557 Hz 의 고유 진동수를 얻었다. 스테이지 동특성 실험 결과와 해석 결과를 비교해 보면 제안된 단순화된 모델링 및 해석 과정이 매우 높은 정확성을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

다음으로 예압에 의하여 구동기가 이동부에 불접촉된 상태에서의 주파수 응답 측정 실험을 수행하였다. 이 실험은 예압의 양에 따른 스테이지의 동특성 변화를 분석하기 위해 실시하였다. 실험은 구동기를 부착하지 않은 상태에서 센서에서 스테이지 이동부와의 거리를 일정하게 정한 다음 예압을 두 가지로 주고 충격 가진 실험을 실시하였다.

Fig. 7 에서는 압전 소자 구동기를 스테이지 이동부와 점 접촉시켰을 경우 예압 크기에 따른 스테이지의 주파수 응답 함수 변화를 나타내었다. 실험 결과를 보면 예압이 가해지지 않은 경우의 고유 진동수(553Hz)에 비해 예압이 가해지면 고유진동수가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 유연 힌지 강성 외에 예압을 받는 압전 소자 및 불접촉부가 추가적인 스프링 역할을 하게 되어 전체 시스템 강성을 증가시키는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 8 은 이와 같은 동특성 변화를 개념적으로 설명하고 있다. 한편, 예압이 증가하게 되면 고유진동수가 더욱 증가하게 되는데 이 현상은 불 접

촉부가 Hertzian 접촉을 하게 되므로, 예압의 증가에 의해 접촉 면적이 커지게 되어 강성이 증가하는 것으로 사료된다.<sup>[10]</sup>

예압에 의한 동특성 변화를 보다 정확하게 분석하기 위해 예압 변위를 정확히 설정하여 고유진동수 변화를 측정하였다. Fig. 9(a)는 각 구동축에 예압을 인가하였을 경우, 예압량에 따른 스테이지의 고유진동수 변화를 나타내고 있다. 예압이 증가하면서 스테이지의 고유진동수가 일관되게 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 9(b)에서는 예압량의 증가에 따른 압전 소자 구동기의 등가 강성( $k_0$ )을 구한 것이다. 구동기가 2 개 설치된 Y 방향의 강성이 X 방향에 비해 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 구동기의 접촉으로 인한 강성 증가량은 예압량이 10  $\mu$ m일 때 X, Y 축에 대해 각각 1.14e6 N/m, 1.63e6 N/m 의 증가를 보였다.

예압의 증가에 따른 이와 같은 강성 증가는 스테이지 전체의 고유진동수를 증가시키므로 동특성을 좋게 하는 장점이 있으나 강성이 과도하게 커지면 압전 구동기의 변위나 유연 힌지의 성능을 제한하는 문제점이 있을 수 있으므로 유연 힌지의 강성 특성과 압전 구동부의 강성 특성에 대해 모두 사전 분석이 필요하다.

#### 4. 스테이지 성능 평가

개발된 스테이지의 성능 평가를 위하여 입력 전압에 대한 전체 구동거리(stroke), 분해능(resolution) 및 운동정도(motion accuracy)를 측정하였다.

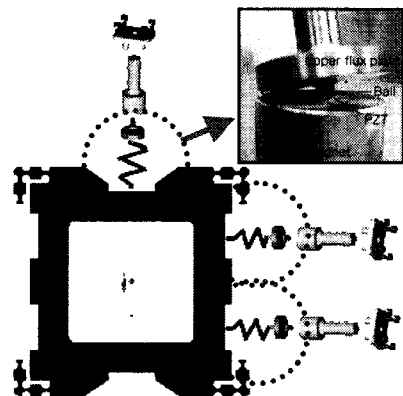


Fig. 8 Added stiffness by ball contact

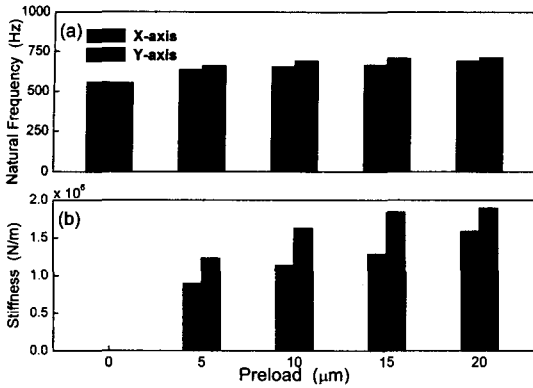


Fig. 9 Changes of (a) the 1<sup>st</sup> natural frequency and (b) added stiffness with each directional preload varied

스테이지 구동조건은 스테이지의 이동부가 압전 소자 구동기에 의해 10 nm의 분해능으로 전체 입력 전압 0~120 V에 대해서 약 10 μm의 구동거리를 갖도록 설정하였다.

#### 4.1 압전 구동기 특성

전체 스테이지의 성능 평가를 하기 전에 자기력 예압을 사용한 경우의 전체 구동거리 감소량 측정과 압전 소자가 가지는 가장 큰 단점인 이력(hysteresis) 현상의 제어에 대한 실험을 실시하였다. 예압의 형태에 따른 전체 구동거리의 측정은 이력 현상을 제거하기 위한 되먹임 제어를 하지 않은 상태(open-loop)이며, 예압을 주지 않은 상태에서 입력 전압에 대한 전체 구동거리를 측정한 후,

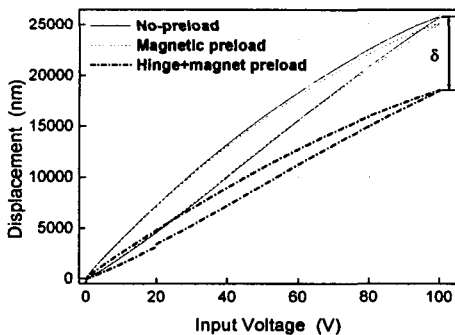


Fig. 10 Comparison of hysteresis loops with no-preloaded and preloaded PZT actuator

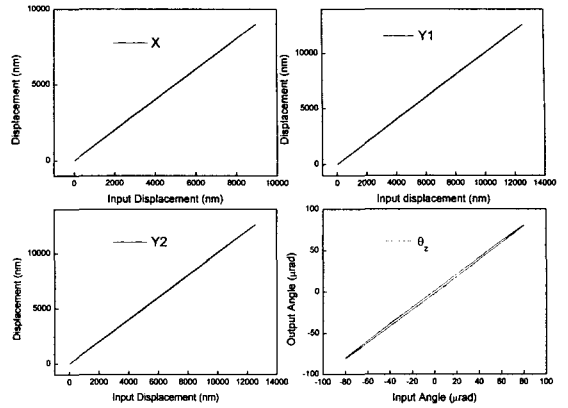


Fig. 11 Hysteresis loops of the magnetically-preloaded PZT actuator compensated with PID controller

자기력 예압을 준 경우의 전체 구동거리와 자기력 예압과 스프링력을 이용한 기계적 예압을 동시에 준 경우의 구동 거리 변화를 측정하였다.

측정을 위해 스테이지에서 변위 측정을 위해 사용되는 용량형 변위센서를 사용하였다.

Fig. 10은 측정된 구동 거리를 비교하여 나타내고 있으며, 자기력 예압 만을 사용할 경우 구동거리 감소가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 구동거리 감소량( $\delta$ )은 예압을 주지 않은 상태에서의 구동거리와 스프링 및 자기력 예압을 인가한 경우의 구동거리와의 차를 나타내고 있다. 이 감소량은 구동기를 설치할 경우 자기력 예압 외에 구동기와 스테이지 사이의 접촉량에 따라 강성을 가지는 유연 힌지 스프링력이 압전 소자 구동기에 기계적 스프링 예압을 가하게 되어 발생하게 된다.

Fig. 11은 개루프 제어 상태에서 발생하는 이력 현상을 제거하기 위하여 압전 구동기에 대한 PID 제어를 실행한 결과이다. 각 압전 소자의 이력 특성 제어 결과를 살펴보면 약 1% 이내로 줄어들었으며, 회전 변위  $\theta_z$  축은 약 3.5% 미만으로 이력 특성이 줄어든 것을 볼 수 있다.

#### 4.2 응답 특성

Fig. 12는 계단 입력(step input)에 대한 응답 실험 결과이며, 각 축의 정착 시간(settling time)은 약 30 ms이며, 시간 지연(time delay)이 거의 발생하지 않음을 볼 수 있다. 특히 자기력 예압의 특성상 오버슈트(overshoot)가 발생하게 되면 소음이 발생

하게 되므로 이득튜닝(gain tuning)을 하였다.  
 분해능 측정을 위해 구동 방향에 따라 10 nm 크기의 연속 계단 응답 측정을 실시하였다.

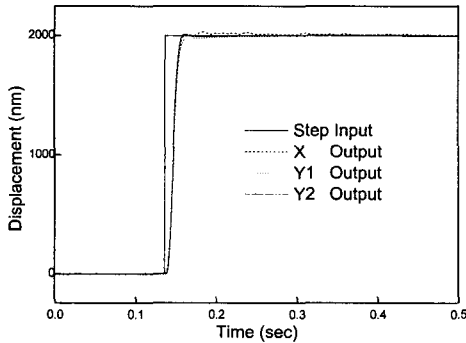


Fig. 12 Comparison of step responses of the actuators

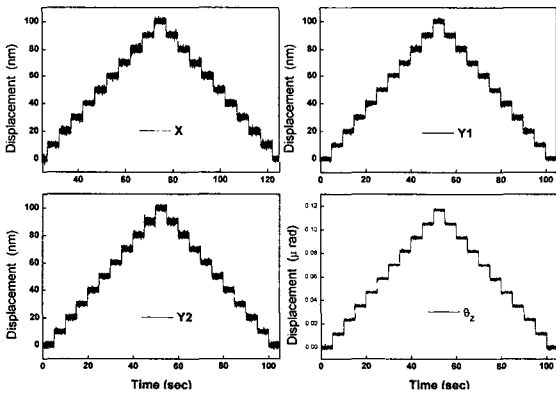


Fig. 13 Step test for the actuators with 10 nm resolution

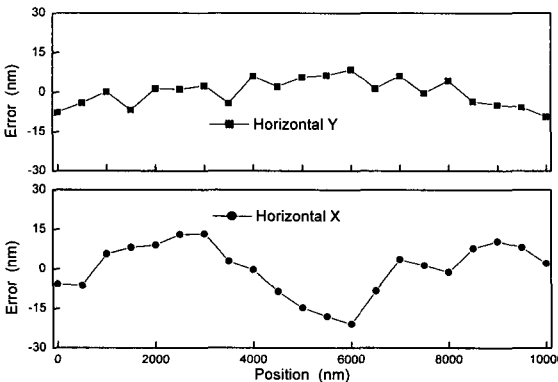


Fig. 14 Straightness errors

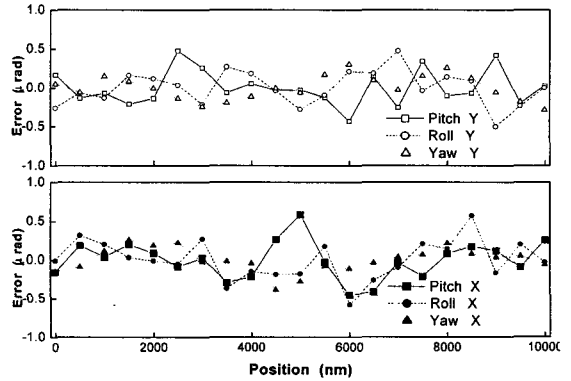


Fig. 15 Angular error of each axis

그 결과, Fig. 13 과 같이 10 nm 이하의 충분한 분해능을 가진다는 것을 확인하였다. X, Y 축을 구동하는 구동기 모두 10 nm의 분해능을 가지며,  $\theta_z$ 는 약  $0.012 \mu\text{rad}$  값을 가짐을 확인할 수 있다.

스테이지의 진직도 및 각오차 측정을 위해 두 개의 용량형 변위센서를 사용하였다. Fig. 14는 두 개의 용량형 변위센서의 결과의 차이를 구하여 평가한 각 구동 방향의 수평 방향에 대한 진직도(straightness) 측정 결과이다. X 방향의 진직도 측정에서 전체 구동거리 10  $\mu\text{m}$ 에서 좌우 방향 10 nm, Y 축 실험에서는 전체 구동거리 10  $\mu\text{m}$ 에서 좌우 방향 20 nm의 최대 오차를 갖는다는 것을 알 수 있었다. Fig. 15는 두 개의 용량형 변위센서를 이송방향에 수직인 두 축 방향에서 각각 설치, 얻어진 두 센서의 값 차이를 센서간 거리로 나누어 구동 중 구동 방향에 상대적인 각오차를 측정된 그림으로 XY 방향의 롤(Roll) 및 피치(Pitch) 각오차가 상대적으로 큰 값을 가지며 요(Yaw) 각오차는 상대적으로 적은 오차 값을 갖는 것으로 측정되었으며, 각 방향의 최대 각오차 값은 약  $0.5 \mu\text{rad}$ 의 매우 적은 오차 값을 갖는 것으로 측정되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 높은 분해능을 가지는 초정밀 3 축 이송 스테이지에 대한 제작, 동특성 실험 및 성능 평가를 수행하였다. 제작 이전에 선행되어진 해석 결과에서 설계 목표를 만족하는 최적 변수 선정 및 제작의 편의를 고려한 최종 설계를 통하여 스테이지를 제작하였으며, 동특성 실험을 통

하여 해석 과정의 높은 신뢰도를 확인하였다. 또한, 회전 방향에 대한 제어와 구동 거리에 영향을 주는 예압량의 변화에 따른 계의 동특성을 파악하였다. 그리고, 제작된 스테이지의 3 축 이송 구동 거리, 분해능 및 운동오차를 평가하였다. 제작된 스테이지는 볼 접촉 방식을 사용함으로써 XY 축의 상호 간섭을 제거하였으며 압전 구동기에 의한 높은 분해능을 달성하였으며, 자기력 예압의 사용으로 전체 구동거리의 감소를 줄일 수 있다는 것을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 “첨단기계류 부품” 사업 중 “광모듈 접합 시스템의 핵심부품설계기술개발” 과제로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 강중욱, 서문훈, 한창수, 홍성욱, “초정밀 2 축 이송 스테이지의 개발 : 1. 해석 및 설계,” 한국정밀공학회지 Vol.21, No.3, 2004 .
2. Smith, S. T., Flexures, Gordon and Breach Science Publishers, 2000.
3. Physik Instrumente, Tutorial: Piezoelectrics in Positioning, <http://www.physikinstrumente.com>.
4. Li, X., Jia, Z. and Liu, J., “A combined electrical machining process for the production of a flexure hinge,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 71, pp. 373-376. 1997.
5. 한창수, 김경호, 이찬홍, “초정밀 마이크로 위치 결정 스테이지의 설계,” 한국정밀공학회 추계 학술대회논문집, pp. 300 - 304, 2001.
6. Ryu, J. W., Gweon, D. G. and Moon, K. S., “Optimal design of a flexure hinge based XYθ wafer stage,” Journal of the American Society for Precision Engineering, Vol. 21, pp.18-28, 1997.
7. Yang, R., Jouaneh, M. and Schweizer, R., “Design and characterization of a low-profile micro positioning stage,” Journal of the American Society for Precision Engineering , Vol. 18, pp.20-29, 1996.
8. Jänker, P., et. al, "Mechatronics using piezoelectric actuators," Journal of the European Ceramic Society, Vol. 19, pp.1127-1131, 1999.
9. Baek, S., Han, C. S. and Noh, M. G., “Design of a preload device for PZT actuator using permanent magnet,” INTERMAG 2003 IEEE Transactions on Magnetics (accepted)
10. Harris, T.A., Rolling Bearing Analysis, 4<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., 2001.