

초정밀 3 축 이송 스테이지의 개발 : 2. 동특성 실험 및 성능 평가

강중욱*, 김만달(금오공대 원), 백석, 한창수(한국기계연구원), 홍성욱(금오공대)

Development of a 3-axis fine positioning stage : Part 2. Experiments and performance evaluation

J. O. Kang*, M.D. Kim(Graduate Sch. of KIT), S. Baek, C. S. Han(KIMM), S. W. Hong(KIT)

ABSTRACT

This paper deals with experiments for dynamic characteristics and performance evaluation of the 3-axis fine positioning stage developed in [1]. The features of the developed fine positioning stage are the 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. The dynamic characteristics of the actuator and the stage are tested with the preload changed in order to validate the actuator and the stage design. Performance evaluation is also made for the PZT actuators as well as the stage positioning accuracy. Experimental results show that the developed stage is accurate enough to be used for nanometer positioning.

Key Words: Multi-axis nano positioning stage(다축나노 이송스테이지), PZT actuator(압전소자 구동기), Magnetically preload(자기력 예압), Flexure hinge(유연 힌지)

1. 서론

본 논문에서는 초정밀 3 축 이송계의 설계 및 제작에 관해 논의한 참고문헌^[1,2]의 연구 결과로 제작된 스테이지에 대해 그 동특성 및 성능을 평가하였다. 스테이지에 대한 동특성 실험으로 스테이지 자체에 대한 모드 해석과 압전 소자 구동기 및 부속품을 부착한 스테이지 전체에 대한 모드 해석 등이 수행되었다. 또한 개발된 스테이지에서 채용한 자기력 방식의 예압에 따른 특성변화를 평가하기 위해 자기력에 의한 예압의 양에 따라 변화되는 동특성을 평가하였으며 이를 기초로 등가의 강성량을 계산하였다. 한편, 개발된 스테이지의 성능 평가를 위하여 압전 구동기 자체에 대한 성능과 스테이지의 성능을 평가하였다. 이를 위해 예압량에 따른 구동기 특성변화 및 되먹임 제어에 의한 보상시의 특성을 측정하였다. 또한 스테이지의 특성평가를 위해 구동거리, 분해능 및 제어 응답에 대한 실험도 수행하였다.

이와 같은 동특성 실험과 성능 평가 실험을 통하여 개발된 스테이지가 당초 제시하였던 동특성 및 성능에 관한 설계 기준을 만족한다는 것을 확인

하였다.

2. 초정밀 스테이지 구성

참고 문헌^[1,2]에서 소개한 기본 설계 및 제작과정을 거쳐 만들어진 실제 스테이지는 Fig. 1 과 같고 그 구성은 Fig. 2 와 같이 X, Y 및 θ 방향의 구동에 있어 나노미터의 정밀도를 가질 수 있도록 하기 위하여 유연 힌지를 이용한 이동부의 지지 형태를 이용하였으며 볼을 이용, 점 접촉(point contact)을 통한 압전 소자 구동방식을 이용하였다. 그리고 변위 측정 및 되먹임 제어를 위하여 압전 소자 구동기 반대편에 용량형 센서를 설치하였다.^[3]

스테이지의 기본 제원은 참고문헌^[1]에 자세히 정리되어 있으며 Table 1 에서는 스테이지 설계 목표로 정한 수치들을 정리하였다.

3. 동특성 실험

3.1 예압에 따른 동특성 실험

스테이지 이동부에 대한 유한 요소 해석 과정에 대한 검증 실험으로 앞선 문헌에서 제시한 모델링

과정이 충분한 타당성을 갖는다는 것을 확인하였다.^[1] 본 논문에서는 실제 조건에서의 스테이지, 즉 이동부 포함된 여러 부속품이 부착된 경우에 대한 동특성 실험을 실시하였으며 설계검증을 위해 모델링에 의한 계산도 수행하였다.

실험은 먼저 압전 소자 구동기와 스테이지의 이동부가 접촉되지 않은 상태에서 충격 가진 실험을 하였으며, 볼에 의해서 접촉된 순간부터는 충격 가진 실험과 랜덤 가진 실험을 병행하였다.

Fig. 3 은 스테이지 이동부와 구동기가 접촉하지 않은 상태에서 X, Y 방향에 대하여 측정된 주파수 응답에 유한요소해석에 의하여 구한 고유 진동수를 같이 표시하여 나타낸 그림이다. 그림에서 측정되어진 고유 진동수가 X, Y 방향에 대해서 서로 다른 것은 실제 제작에 의한 오차에 의한 강성의 차이에 기인한 것이며, 유한 요소 해석은 X, Y 방향에 모두 완전 대칭이라는 조건으로 계산되어진 값이다. 실험 결과를 통해서 부속품을 모두 설치한 경우에 모델링 과정과 실제 측정값과의 차이는 약 0.1%의.

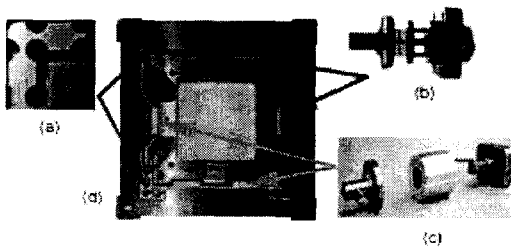


Fig. 1 Actual Fine stage; (a) flexure hinge, (b) capacitive sensor, (c) PZT actuator assembly, (d) fine stage

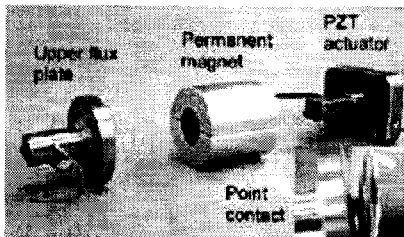


Fig. 2 PZT actuator assembly; upper flux plate, preload magnet, PZT actuator and point contact

Table I Design specifications of the stage

Category	Item	Data
Frequency	Resonance	Greater than 200 Hz
Rigidity	Stiffness	Less than 1/10 of that of the Piezo-actuator
Stress	Max. Stress	Less than 505/3 MPa
Performance	Max. Stroke	20 μm
	Resolution	10 nm

오차를 가지는 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있었다 따라서, 모델링 과정이 스테이지에 대한 해석 뿐만 아니라 여러 부속품을 설치한 경우의 해석에서도 충분히 적용 가능하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4 에서는 압전 소자 구동기를 스테이지 이동부와 점 접촉시켰을 경우 예압 크기에 따른 스테이지의 고유 진동수 변화를 나타내었다. 이 실험은 랜덤 가진 신호를 압전 소자 구동기를 이용하여 스테이지에 가한 경우에 측정된 고유 진동수이며, 예압이 가해지지 않은 경우의 고유 진동수(553 Hz)에 비해 압전 소자가 부착된 경우의 고유 진동수가 상당히 높은 것을 알 수 있다. 이것은 유연 힌지 강성 외에 예압을 받는 압전 소자 및 볼 접촉부가 전체 시스템 강성을 증가시키는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 5 (a)는 X, Y 방향 모두 예압을 준 상태에서의 X, Y 방향의 고유 진동수 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 두개의 구동기가 부착되는 Y 방향의 고유 진동수가 30 μm 이상의 예압에서 두 개의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 Y 방향으로 부착된 두 개의 구동기의 같은 예압을 주는 상황에서 각 압전 소자의 강성이 차이를 갖는 것을 확인하였으며, 예압에 따라 증가되는 강성값을 Fig. 5 (b)에 나타내었다.

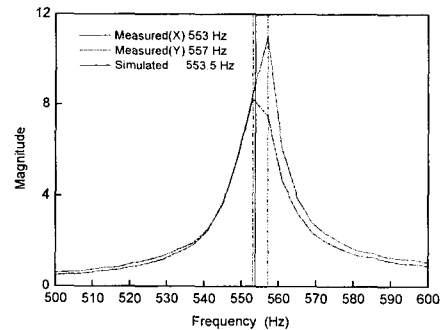


Fig. 3 Comparisons of measured and simulated 1st natural frequencies of the stage with accessories

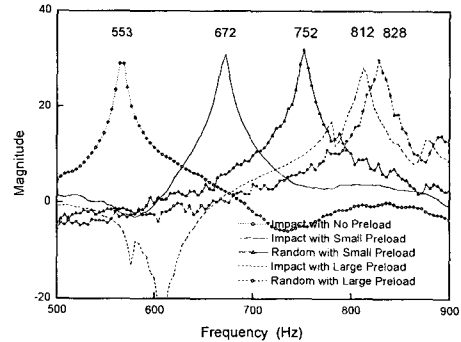


Fig. 4 Change of the 1st natural frequencies of the stage with the preload increased

이와 같은 검증실험을 통하여 제안된 모델링 및 유한요소 상용코드 해석이 충분히 신뢰성을 가진다는 것을 알 수 있었다.

4. 스테이지 성능 평가

4.1 압전 구동기 특성

압전 소자 구동기를 설치한 스테이지 구동 거리 (Stroke) 측정, 분해능(Resolution) 등의 성능 평가 실험을 수행하였다. Table 1의 설계 목표에서 전체 스테이지가 압전 소자에 0~100V의 구동 전압이 인가하게 되면 10 mm의 분해능으로 약 20 μm 의 변위를 가지도록 정하였다. 따라서, 먼저 압전 소자 구동기 성능을 파악하기 위하여 개루프(Open-loop) 제어 상태에서 각각의 압전 소자 구동기에 전압을 인가하고 스테이지의 변위를 측정하였다. 압전 소자에 예압을 가하지 않은 상태에서의 변위와, 구동기를 스테이지에 접촉시켜 예압을 받는 상태에서의 변위를 측정, 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 개루프 제어를 한 경우 압전 소자의 특성인 이력(Hysteresis) 곡선이 나타나게 되며 이력특성을 제거하기 위해서는 피드백 제어를 사용할 필요가 있다.

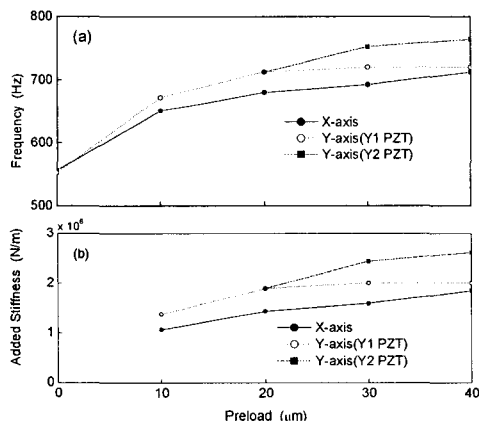


Fig. 5 Changes of 1st natural frequency and added stiffness with all the preloads varied

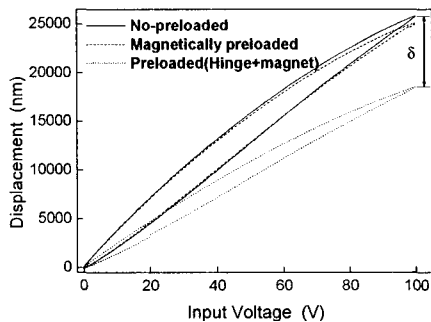


Fig. 6 Comparison of hysteresis loops with no-preloaded and preloaded PZT actuator

한편, Fig. 6에 의하면 자기력을 이용하여 예압을 인가한 경우 전체 구동 거리가 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다. 또, 시스템에 압전 구동기가 설치되면, 자기력 예압 외에 구동기와 스테이지 사이의 접촉량에 따라 강성을 가지는 유연 힌지 스프링력이 압전 소자 구동기에 기계적 스프링 예압을 가하게 되어 그림에서 나타난 δ 값만큼 구동거리가 감소하게 된다. 즉, 구동거리 감소량(δ)은 설치 시 접촉량에 의하여 결정되는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 7은 개루프 제어 상태에서 발생한 이력특성을 없애기 위하여 PID 제어를 통해 압전 소자의 이력 특성을 제어한 결과이다. 전체 입력 전압에 대하여 설계 목표인 20 μm 의 구동거리가 나오도록 구동기를 설치한 후 피드백 제어 실험을 하였다. 각각의 결과는 이력 현상이 X·Y 축은 약 1% 이내로 줄어들음을 알 수 있고 회전 변위 θ_z 축은 약 3.5% 미만인 것을 알 수 있다.

4.2 응답 특성

Fig. 8은 계단 응답 실험 결과이다. 각 축의 정착 시간(Settling time)은 약 30 ms이며 시간 지연(Delay time)이 거의 발생하지 않음을 볼 수 있고, 특별히 자기력 예압의 특성상 오버슈트(Overshoot)가 발생하게 되면 소음이 발생하게 되므로 제어게인을 튜닝(Tuning) 하였다. 분해능 측정을 위하여 구동 방향에 따라 10 mm 크기의 연속 계단응답 측정을 실시하였으며, Fig. 9와 같이 10 mm 미만의 분해능을 가진다는 것을 알 수 있다. 전체적으로 X 및 Y 축 구동기 모두 10 mm 미만의 분해능을 가지며, θ_z 축은 약 0.012 μrad 값을 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 성능 평가 실험을 통하여 기본적인 설계 목표인 전체 구동거리와 분해능에 대해서 성능목표치를 만족한다는 것을 검증하였다.

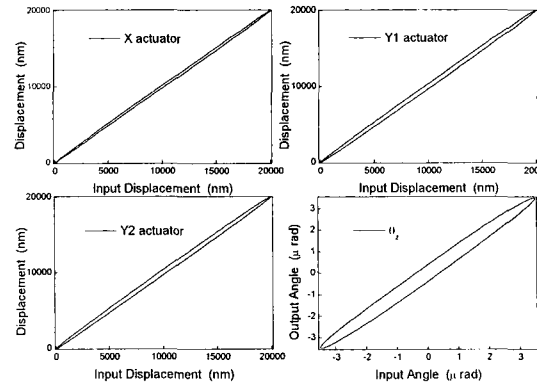


Fig. 7 Hysteresis loops of the magnetically-preloaded PZT actuator compensated with PID controller

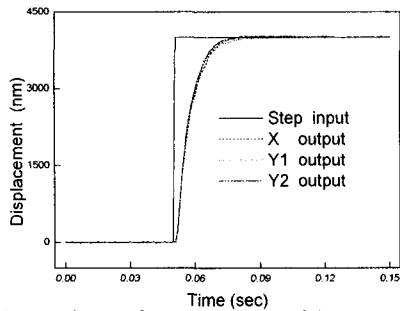


Fig. 8 Comparisons of step responses of the actuators

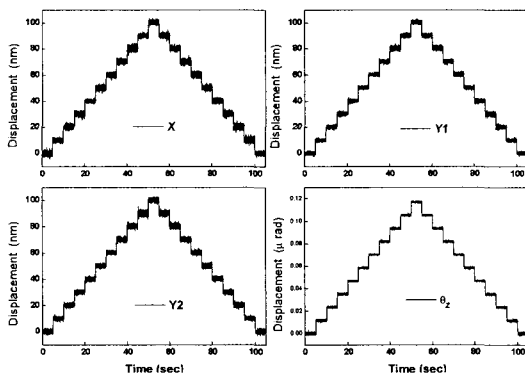


Fig. 9 Step test for the actuators with 10 nm resolution

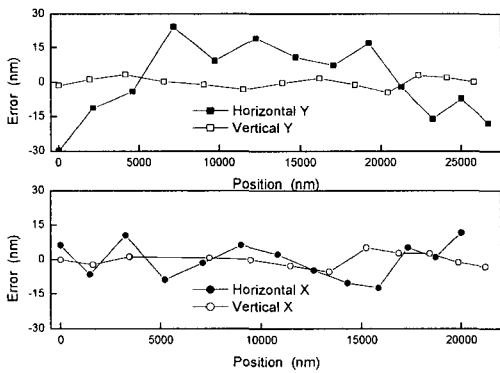


Fig. 10 Straightness error of each axis

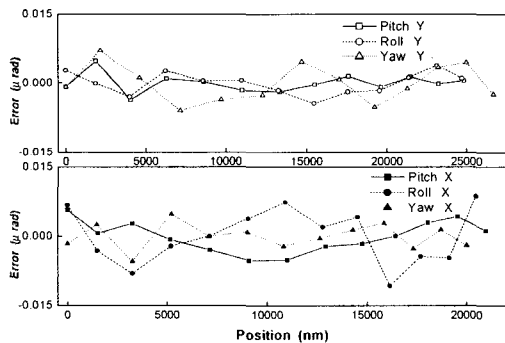


Fig. 11 Angular error of each axis

Fig. 10 은 각 구동 방향의 수평 방향(측면 방향) 과 상하 방향(Z 축 방향)에 대한 진직도(Straightness) 를 측정된 결과이다. X 방향의 진직도 측정에서 전체 스트로크 21 μm 에서 좌우 방향 12 nm, 상하 방향 5 nm 의 최대 오차를 가지며, Y 축 실험에서는 전체 구동 거리 27 μm 에서 좌우 방향 29 nm, 상하 방향 5nm 의 최대 오차를 갖는다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11 은 구동 방향에 대한 각오차를 측정된 그림으로 하나의 구동기를 사용하는 X 축의 각오차가 좀더 크게 나타나며, X 방향의 최대 각오차는 약 0.01 μrad 의 물렁 오차 값을 갖는 것으로 측정되었으며, 두 개의 구동기를 사용하는 Y 축은 요(Yaw) 각오차가 크게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 나노미터의 분해능을 가지는 초정밀 3 축 이송 스테이지에 대한 동특성 실험 및 성능 평가 실험을 수행하였다. 동특성 실험을 통하여 해석 과정의 높은 신뢰도를 확인하였으며, 회전 방향에 대한 제어와 구동 거리에 영향을 주는 예압량의 변화에 따른 계의 동특성을 파악하였다. 그리고, 제작된 스테이지의 성능이 설계 단계에서 목표로 정한 값을 만족하는지에 대한 성능 평가 실험에서 전체 구동거리, 3 축 이송, 분해능 관련 성능을 만족한다는 것을 확인하였다. 또한 불 접촉 방식을 사용함으로써 측면 방향의 간섭 없이 압전소자 구동기가 높은 분해능을 가지고 구동한다는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 “첨단 기계류 부품” 사업 중 “광모듈 접합 시스템의 핵심부품 설계기술개발” 과제로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강중욱, 서문훈, 백식, 한창수, 홍성욱, “초정밀 3 축 이송 스테이지의 개발: 1. 설계 및 제작,” 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, 2003.
2. 강중욱, 서문훈, 한창수, 홍성욱, “초정밀 3 축 이송 스테이지의 설계, 모델링 및 해석,” 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 989-992. 2002.
3. 한창수, 김경호, 이찬홍, “초정밀 마이크로 위치결정 스테이지의 설계,” 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 300 - 304, 2001.