

초정밀 다축 위치제어장치 개발 및 보정에 관한 연구

정상화(조선대 기계공학과), 차경래* (조선대 대학원 기계공학과)

A Study on the Development and Compensation of Precision Multi-Axis Positioning System

S. H. Jeong(Mecha. Eng. Dept. CHU), K. R. Cha(Mechanical Eng. Dept., Graduate School of CHU)

ABSTRACT

In recent years, precision positioning stage is demanded for some industrial fields such as semi conductor lithography, ultra precision machining and fabricating of nano structure. In this research, precision multi-axis positioning stage, which consists of pzt actuator, flexure, and capacitance gauge, is designed and developed. The performance of it such as 3-axis positioning, characteristic of motion and resolution is verified.

Key Words : PZT Actuator (압전액츄에이터), Flexure(탄성힌지), Capacitance gauge (정전용량형센서), FEM(유한요소법), Hysteresis (히스테리시스)

1. 서론

90년대 이후 급속도로 발전하고 있는 반도체 가공기술, 광전자학 및 능동광학, 정보통신 및 유전자공학의 발달로 초정밀 계측과 초정밀 가공의 필요성이 강조되고 있다. 이러한 응용분야에서는 아주 미세한 에러도 상품의 질이나 수명에 매우 큰 손실을 가져오게 되므로 보다 정밀한 가공과 측정이 필요하게 된다. 반도체칩과 고밀도 자기기록장치 가공기술과 관련된 에너지 빔 가공, 포토 리소그래피 가공 등을 비롯하여 초정밀 기계부품 및 초정밀렌즈 가공, 초정밀 측정기기에는 정밀도가 1nm 까지 이르는 초정밀 위치제어장치가 필요하다. 연대별로 가공정밀도는 신기술의 요구에 따라 관련기술의 수용능력에 따라 점차적으로 정밀도가 더해가고 있다. 현재는 초정밀인 경우 10 nm 정도이나 2000년대 이후에는 1 nm 수준까지 도달할 것으로 예상하고 있다. 최근에는 단일구조 탄성힌지 메커니즘이 정밀도를 증가시키기 위한 가이드로써 많이 쓰이고 있다. 탄성힌지 메커니즘은 두 개의 강체를 잇는 연결부분의 탄성변형을 이용하는 것으로써 두 강체 간의 미끄럼 마찰을 하지 않고 정밀한 상대운동을 발생시킬 수 있다. 최근 이 메커니즘을 초정밀 분야에 적용시키는 사례가 증가하고 있다. 선진국에서는 이와 같은 탄성힌지와 압전액츄에이터를 이용하는 시스템이 상용화 되기 시작하고 있는

추세이다. 본 연구에서는 탄성힌지를 설계하고 유한요소법을 이용하여 모드해석, 주파수해석 및 응력해석을 수행하였으며 이를 설계에 반영하여 탄성힌지를 완성하였다. 또한 기본적으로 탄성힌지, 압전액츄에이터, 정전용량형센서로 구성되는 초정밀 다축 위치제어장치를 개발하였으며 운동특성 및 분해능 등의 실험을 통해 시스템 성능을 검증하였다.

2. 연구내용

2.1 시스템구성

본 연구에서 개발한 초정밀 다축 위치제어장치의 구성은 Fig. 1 과 같다.

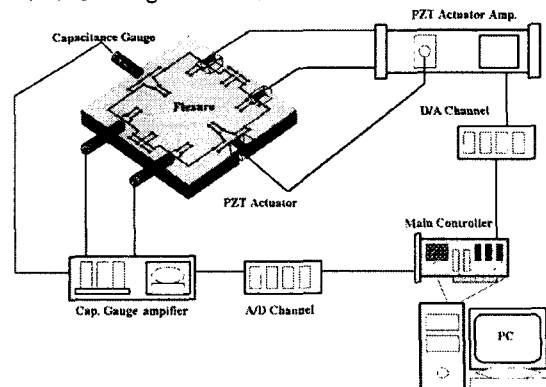


Fig. 1 Schematic diagram of precision positioning system

Fig. 1 에서 보는 것처럼 시스템은 X, Y, 그리고 Yaw, 3 축 위치조정을 위한 가이드 부분인 탄성힌지와 각각의 3 축 변위를 발생시키기 위한 압전액추에이터, 압전액추에이터에 의해 발생된 변위를 측정하기 위한 정전용량형센서, 측정된 변위값을 제어하기 위해 Digital 값으로 처리하는 A/D Processor, 컴퓨터와 Main Controller 에서 나오는 압전액추에이터 구동신호를 처리하는 D/A Processor, 및 총체적인 제어를 감독하는 Main Controller 및 Main Computer 로 구성된다.

2.2 탄성힌지설계

초정밀 위치제어장치는 정밀위치 구동과 반복성이 필수적이다. 미끄럼이나 구름과 같은 방식으로 움직이는 기계요소는 마찰에 의한 스틱슬립이나 백래쉬등의 문제로 마이크로미터 이하의 정도의 연속적이고 높은 반복정밀도를 요구하는 정밀한 운동을 실현하기에 부적합하다. 또한 마이크로미터 이하의 정밀구동을 하는데 있어서 마찰, 환경변화등에 기인한 온도변화나 온도구배는 이송테이블의 구동 정밀도에 좋지 않은 영향을 준다. 초정밀 위치제어장치에서 가이드를 이용한 구동을 할 경우 가이드의 형상오차가 테이블의 구동 정밀도에 직접적인 영향을 주게 된다. 이러한 이유로 탄성힌지를 사용하여 가이드 역할을 수행하도록하였다. 굽힘을 이용한 탄성변형은 형태가 간단하고 동작이 편리하여 마찰이나 백래쉬가 없고 응답속도가 비교적 빠른 장점으로 미세구동에 많이 응용되고 있다. 압전액추에이터에 대한 구동력은 한 평면상에서 상대운동을 하는 구조로 된 탄성힌지로 가이드되어 3 축의 운동이 구현되어진다. 즉 3 자유도 운동이 동일한 특성을 가지면서 기구학적으로 독립된 운동특성을 갖도록 하여 MIMO 시스템을 3 개의 SISO 시스템으로 근사화 할 수 있는 방향으로 설계되었다.

2.2.1 탄성힌지의 유한요소해석

본 연구에서는 초정밀 위치조정 시스템의 플렉서 가이드 부분의 최적 설계를 위하여 모드해석 (Mode Analysis)과 주파수 분석(Frequency Analysis) 그리고 응력해석(Stress Analysis)을 하였다. 모드해석은 초정밀 위치조정시스템의 고유진동 특성을 파악하기 위하여 수행하였고 주파수 분석은 주 구동원인 압전액추에이터(Piezo Electric Actuator)와의 공진현상특성을 파악하기 위하여 수행하였다. 또한 응력해석은 위치조정을 위하여 압전액추에이터에서 발생하는 힘에 의한 탄성힌지의 응력집중 및 응력분포특성을 파악하기 위하여 수행하였다.

설계된 데이터를 근거하여 상용 CAD 소프트웨어를 이용하여 모델링 하였으며 모델링된 결과를 직접 상용 유한요소해석 소프트웨어인

MSC/PATRAN 그리고 COSMOS/Designstar 으로 전달하여 유한요소해석의 전처리과정(Pre-processing)을 수행하였다. 이 전처리된 데이터들은 상용 해석 프로그램인 MSC/NASTRAN 및 COSMOS/M 에서 해석하여 다시 그 결과를 MSC/PATRAN 과 COSMOS/Designstar 에서 각각 가시화하고 이 결과를 확인 하였다.

(1) 모드해석

초정밀 위치조정 시스템의 고유 진동특성을 파악하기 위하여 모드해석을 하였다. 실제 초정밀 위치조정 시스템에서는 가이드 부분인 탄성힌지 부분에 압전액추에이터의 팽창력과 압축력이 가해져 구동 되는데, 모드해석에서는 X 축으로 가해지는 압전액추에이터의 구동력을 100 N 으로 모사하였다. 또한 구동 되는 부분 내판을 제외한 옆면을 고정시키는 것으로 경계조건을 주었다. Fig. 2 는 초정밀 위치제어장치의 1 차 모드 해석결과를 나타낸 것이다.

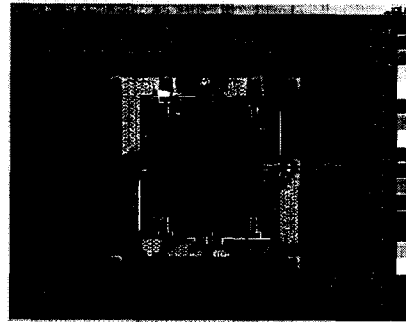


Fig. 2 Mode analysis of precision stage (1st mode)

해석결과 1 차 모드는 28.904 Hz 로 나타났으며 node 7931 에서 가장 XY 방향으로 큰 변형이 일어남을 알 수 있다. 또한 측면에서 보았을 때 Z 방향에 대한 변위가 없음을 알 수 있다. 이것은 설계 의도에 따라 X, Y, θ 축 이외의 다른 자유도를 허용하지 않는 구조임을 알 수 있다. 즉 3 축 초정밀 위치조정 시스템의 가이드로 적합한 것으로 판단된다. Table 1 은 1 차에서 5 차 모드까지 해석했을 때 각모드별 주파수를 나타낸 것이다.

Table 1 Mode analysis of precision stage

| Mode | Frequency |
|----------------------|-----------|
| 1 st mode | 28.904 |
| 2 nd mode | 30.855 |
| 3 rd mode | 32.221 |
| 4 th mode | 32.766 |
| 5 th mode | 37.998 |

(1) 주파수해석

주파수 해석결과, 1 차 모드인 28.904 Hz 부근에

서 큰 진폭이 일어남을 알 수 있었다. 초정밀 위치조정시스템의 구동원이자 주요 진동원이라 할 수 있는 압전액츄에이터의 공진주파수는 일반적으로 10~50 kHz 로 고주파수영역이다. 그러므로 위치조정 시스템의 본체이자 가이드 부분인 플렉서부분은 1 차 모드가 28 Hz 부근이므로 압전액츄에이터의 진동에 의한 공진현상이 없을 것으로 추정되므로 안정한 시스템으로 판단할 수 있다.

Fig. 3 은 초정밀 위치조정 시스템의 주파수 해석 결과이다.

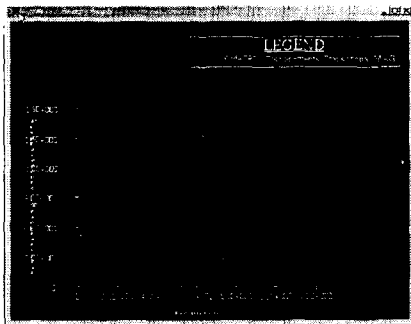


Fig. 3 Frequency analysis of precision stage

(3) 응력해석

수학적인 모델링을 통하여 설계된 탄성힌지의 탄성변형범위를 만족하는 작용력과 변위를 파악하기 위하여 응력해석을 수행하였다. 전체적인 모델에서의 X 축, Y 축의 각축에 각각 힘과 변위를 가하여 그때의 탄성힌지의 응력집중현상 및 발생변위정도를 응력해석을 통하여 확인할 수 있었다. Fig. 4 는 초정밀 위치제어장치의 구동력인 압전액츄에이터의 힘으로 800 N 을 Y 축 방향으로 가했을 때의 탄성힌지 부분의 응력분포를 나타낸 것이다. 재질의 항복강도는 $3.447E+8 \text{ N/m}^2$, 파단강도는 $6.204E+8 \text{ N/m}^2$ 인데 최대응력(Max Stress (Von misses))은 $9.943E+7 \text{ N/m}^2$ 으로 변형이나 파괴가 발생하지 않음을 알 수 있다. Fig 5 는 X 축 방향으로 $90 \mu\text{m}$ 의 작용력을 주었을 때 그때의 발생변위에 대한 분포를 나타낸 것이다.

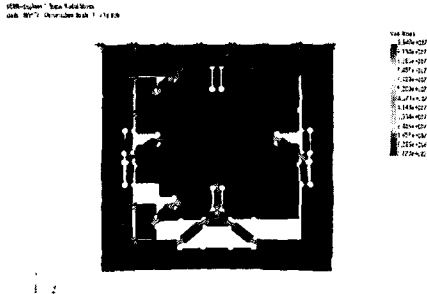


Fig. 4 Stress analysis of precision stage with 800N load

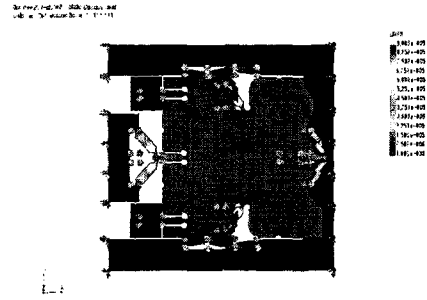
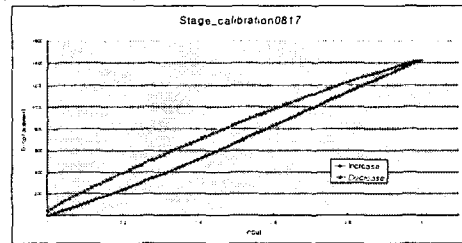


Fig.5 Stress analysis of precision stage with $90 \mu\text{m}$ displacement

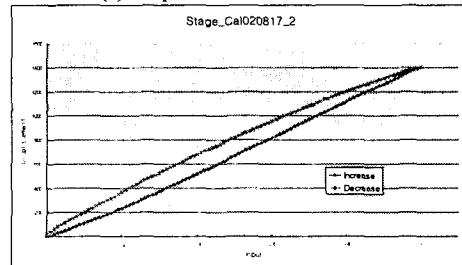
2.3 초정밀 위치제어장치의 운동특성

본 연구에서 개발한 초정밀 위치제어장치의 특성을 파악하기 위하여 압전액츄에이터의 전체이송거리 $90 \mu\text{m}$ 만큼 변위를 90 nm 스텝으로 증가와 감소를 시켰다. 압전액츄에이터 앰프의 구동은 컴퓨터에서 프로그램하여 메인컨트롤보드의 D/A 출력단을 통해 0-10 VDC 로 압전액츄에이터 앰프에 입력하였다. 또한 압전액츄에이터가 부착되어있는 것과 일직선상의 반대편에 정전용량형 센서를 부착하여 발생변위를 검출하였다. 발생된 변위는 메인컨트롤보드의 A/D 입력단을 통하여 신호를 검출하였다.

Fig. 6 은 위치제어장치의 X 축과 Y 축 방향의 전이송구간의 발생변위를 나타낸 것이다. 그래프에서 보는 것처럼 위의 조건으로 구동하였을 때 위치제어장치의 전체 이송거리는 X 방향 Y 방향의 전체 이송거리는 $90 \mu\text{m}$ 였다. 그러나 압전액츄에이터 자체내의 히스테리시스가 위치제어 시스템에서도 발생함을 알 수 있었다.



(a) Displacement in x direction

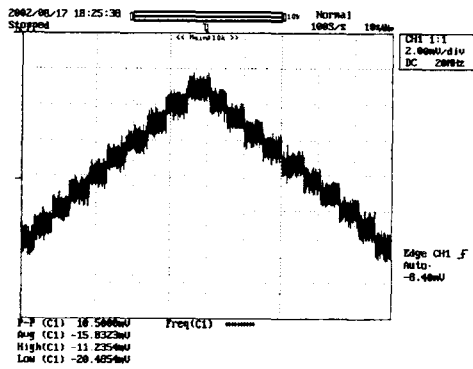


(b) Displacement in y direction

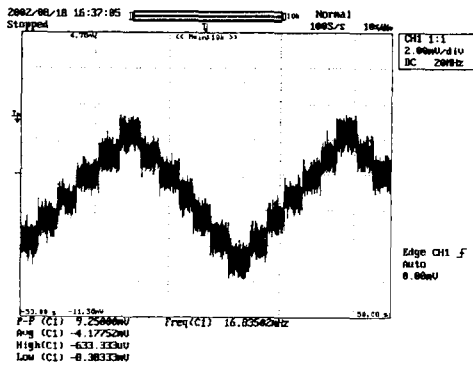
Fig. 6 Displacement of precision stage in each direction

2.4 초정밀 위치제어장치의 분해능

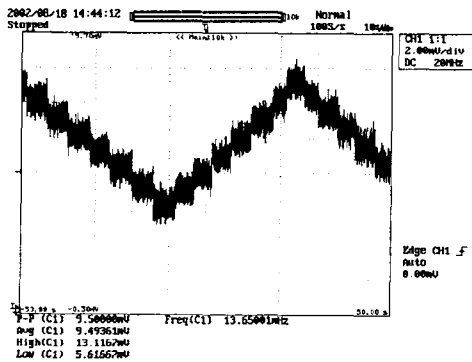
초정밀 위치제어장치의 분해능은 X 축 25 nm, Y 축 25 nm, Yawing 25 nm(0.0256 mrad)이었다. 본 연구에서 사용하고 있는 정전용량형센서는 전체측정구간이 ± 250 nm(± 10 V)로 1 mV 에 약 25nm 정도가 검출될 수 있는데 이는 변위 검출기인 정전용량형센서의 분해능에 따라 좌우되는 것으로 분해능이 작은 센서를 사용할 경우 분해능이 향상 될 수 있음을 알 수 있다.



(a) Resolution in X-axis



(b) Resolution in Y-axis



(b) Resolution in yawing

Fig. 7 Resolution of precision stage

4. 결론

본 연구에서는 초정밀 위치제어장치의 개발하였고 시스템의 성능을 검증하였다. 시스템이 구성은 압전액츄에이터에 발생된 변위가 탄성힌지에 의해 가이드되고 발생된 변위를 정전용량형센서에 의해 신호를 검출하는 기본구조를 가지고 있다. 초정밀 위치를 가이드하는 탄성힌지의 설계는 모드해석, 주파수해석 및 응력해석을 수행하여 그 결과를 기초로 하여 설계의 타당성을 검토하였다. 초정밀 위치제어장치의 운동특성은 압전액츄에이터의 전체이송거리만큼 이송하여 그때의 시스템전체의 이송거리를 정전용량형센서로 신호를 검출하였다. 시스템의 히스테리시스현상은 압전액츄에이터로 인한 것이며 향후 압전액츄에이터의 피드백 제어에 의해 해결될 수 있을 것으로 사료된다. 본연구에서 개발된 위치제어장치의 분해능은 X, Y, Yaw 가 각각 25nm 이하로 검출되었으며 이는 정전용량형센서의 분해능에 가인한 것으로 보다 더 정밀한 센서를 사용하면 분해능이 향상될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. N.Taiguchi, "Future trends of nanotechnology" Unt. Journ. Japan Soc Prec. Eng., Vol. 26, No. 1, Mar, 1992 p1-7
2. D. whitehouse, "Nanotechnology instrumentation", Measurement & Control Vol. 24, 1991. p34-46
3. J. Manul, C. Hernandez, V. Hayward, "Phase control approach to hysteresis reduction", IEEE Control System Technology Vol. 20, No. 1 pp.17-26
4. 이창우, "이중서보를 이용한 초정밀 X-Y 테이블 평면 3 자유도 위치제어", 한국과학기술원 박사학위논문, 1996