

피에조 구동형 2축 스테이지의 설계 및 해석

류성훈*, 한창수, 최기봉 (한국기계연구원 지능형정밀기계연구부)

Design and Analysis of Two-Axis Stage Driven by Piezoelectric elements

S. H. Ryu, C. S. Han, K.-B. Choi(Intelligent and Precision Machine Dept., KIMM)

ABSTRACT

Piezoelectric elements driven ultra-precision stages have been used for high accuracy, fast response and high load capacity, which are allowable to apply the stages to AFMs. Most of the piezoelectric driven stages are guided by flexure hinges for force transmission and mechanical amplification. However the flexure hinge mechanisms cause lack of position accuracy due to coupled and parasitic motions. Hence it is important that the mechanism design of the stage is focused on the stiffness of the flexure hinges to accomplish fast response and high accuracy without the coupled and parasitic motions. In this study, some constraints for optimal design of a piezoelectric elements driven stage and a design method are proposed. Next, an optimal design is carried out using mathematical calculation. Finally the designed results are verified by FEM.

Key Words : Ultra precision stage (초정밀 스테이지), Piezoelectric element (압전소자), Flexure hinge (유연힌지), FEM(유한요소법), Optimal design (최적설계)

1. 서론

나노미터의 분해능을 갖는 나노 위치결정 스테이지는 초집적 반도체 제조장치나 AFM 및 STM 과 같은 스캐닝 장비에서 중요한 역할을 담당하게 되면서 그 요구가 증대되고 있다. 최근의 반도체 제조장비나 스캐닝 장비들에 사용되는 스테이지는 고속·고분해능을 만족하도록 요구하고 있다. 이러한 요구를 충실히 만족시킬 수 있는 것으로 단일체로 구성된 유연힌지 메커니즘의 안내기구와 피에조 소자에 의한 구동 방법이 대표적이다.

피에조 구동형 스테이지⁽¹⁾⁽²⁾는 작동속도, 강성, 분해능 및 구동기의 출력 등이 전자기력 또는 정전기력 구동기에 비해 매우 좋은 장점을 가지고 있어 반도체 공정용 스테퍼, 초정밀 레이저 용접용 스테이지 및 AFM 용의 스테이지로 널리 이용되고 있다. 스테이지의 구조는 운동의 안내를 위한 유연힌지 메커니즘(flexure hinge mechanism)이 필수적이며 유연힌지 메커니즘의 설계가 핵심을 이루고 있다. 단일체 구조의 유연힌지 메커니즘에는 노치형 힌지 및 판스프링형 힌지로 나눌 수 있으며, 노치형 힌지에는 노치의 형태에 따라 원형, 포물선형,

타원형 등으로 분류된다. 이들 중 원형의 노치 유연힌지(round notch type flexure hinge)는 가공상 오차가 타 힌지에 비해 가장 작게 가공할 수 있는 장점이 있어 힌지 메커니즘에 많이 적용되고 있다.

본 연구에서는 고속·고분해능의 피에조 구동형 스테이지의 설계를 위한 구속조건들을 제시하고, 이 조건들을 만족하는 유연힌지의 설계방법을 제시하며, 수학적 모델링 및 FEM 을 통한 정·동적 해석을 수행한다.

2. 피에조 구동형 스테이지

2.1 스테이지의 구조

본 논문에서 제시한 스테이지의 구조는 Fig.1 과 같다. 제시한 스테이지는 고정 프레임, 외측 이동평판, 내측 이동평판, 각 방향 안내기구 및 각 방향의 구동용 피에조로 구성된다. 외측 이동평판은 고정 프레임과 x 축 운동용 안내기구에 의해 구속되어 있고, 외측 환형 이동평판과 내측 이동평판은 y 축 운동용 안내기구에 의해 구속되어 있어, 각 방향으로의 운동을 비연성화시킨다. 각 방향의 안내기구는 2 개의 병렬 4 결 링크로 구성되어 있어 타

방향으로의 운동을 구속한 채 구동방향으로의 운동만을 안내한다. 또한 안내기구는 단일체의 원형 노치로 구성된 유연 힌지(round notch type flexure hinge)로 구성되어 있다.



Fig. 1 Structure of 2-axis stage

2.2 모델링

Fig.1 에서 스테이지의 유연 힌지는 회전운동만을 하는 스프링으로 가정한 후, 스테이지의 운동을 수학적 모델링하기 위해 다음 Fig.2 를 고려하자. 외측과 내측 이동평판은 강체라 가정한 후 이들의 질량을 각각 M_1 , M_2 라 하고, 외측 이동평판과 고정프레임 사이의 질량, 관성 모멘트, 유연힌지의 강성계수 및 두 유연힌지 사이의 연결된 막대의 길이를 각각 m_1 , I_1 및 k_1 및 L_1 이라 하며, 외측 이동평판과 내측 이동평판 사이의 질량, 관성 모멘트, 유연힌지의 강성계수 및 두 유연힌지 사이의 연결된 막대의 길이를 각각 m_2 , I_2 및 k_2 및 L_2 라 하자.

이 시스템의 운동에너지 T 및 포텐셜 에너지 V 는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} M_1 \dot{q}_1^2 + 4 \frac{1}{2} m_1 \left(\frac{\dot{q}_1}{2} \right)^2 + 4 \frac{1}{2} I_1 \left(\frac{\dot{q}_1}{L_1} \right)^2 + \frac{1}{2} M_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2) \quad (1)$$

$$+ 4 \frac{1}{2} m_2 \left\{ \dot{q}_1^2 + \left(\frac{\dot{q}_2}{2} \right)^2 \right\} + 4 \frac{1}{2} I_2 \left(\frac{\dot{q}_2}{L_2} \right)^2$$

$$V = 8 \frac{1}{2} k_1 \left(\frac{q_1}{L_1} \right)^2 + 8 \frac{1}{2} k_2 \left(\frac{q_2}{L_2} \right)^2 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로 부터 각 방향의 비연성화된 운동방정식을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\left(M_1 + M_2 + m_1 + 4m_2 + 4 \frac{I_1}{L_1^2} \right) \ddot{q}_1 + 8 \frac{k_1}{L_1} q_1 = 0 \quad (3)$$

$$\left(M_2 + m_2 + 4 \frac{I_2}{L_2^2} \right) \ddot{q}_2 + 8 \frac{k_2}{L_2} q_2 = 0 \quad (4)$$

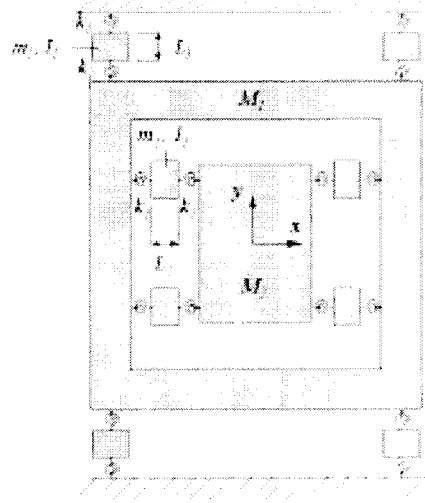


Fig.2 Schematic diagram for stage

유연힌지의 형태가 Fig.3 과 같을 때 힌지의 강성은 재료의 탄성계수를 E 라 할 때 다음 식으로 주어진다.

$$k = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi^{1/2}} \quad (5)$$

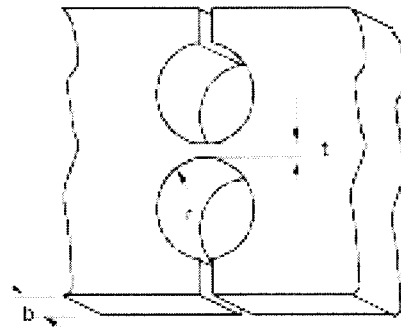


Fig.3 Schematic round notched type flexure hinge

3. 설계 및 해석

3.1 스테이지의 설계

이 스테이지를 CD 측정용 AFM 에 적용하기 위한 스테이지의 사양은 Table 1 과 같다. Table 1 에서 작업영역과 1 차 공진 주파수에 대한 사양은 수치적 설계 알고리즘에 의해 고려되어야 할 사항이다. 회전각 오차는 설계된 메커니즘이 가지는 기생오차, 가공오차 및 조립오차에서 기인한 것이다. 따라서 기생오차에 의해 기인한 것은 설계된 메커니즘을 FEM 시뮬레이션을 통해 고려될 수 있고, 조립오차

및 가공오차는 메커니즘을 가공 및 조립 후에 측정된 후 검토되어야 할 사항이다. 또한 분해능은 최종 조립된 메커니즘을 위치제어에 의해 검토되어야 할 사항이다.

Table 1 Desired specifications of stage

Item	Value
Working range	25 μm \times 25 μm
Resolution	10 nm
Natural frequency	≥ 200 Hz
Angular error	≤ 50 μrad

1 차 공진주파수와 작업영역에 대한 사양을 만족시키기 위해 메커니즘이 만족해야 할 구속조건은 다음과 같다.

$$f_1 \geq 200 \text{ Hz} \quad (6)$$

$$\sigma_{\max} \leq \frac{1}{10} \sigma_Y \quad (7)$$

$$K \leq \frac{1}{10} k_{\text{prt}} \quad (8)$$

여기서 f_1 , σ_{\max} , σ_Y , K 및 k_{prt} 는 각각 첫번째 공진 주파수, 최대응력, 항복응력, 안내 메커니즘의 강성 및 피에조의 강성을 의미한다.

문제를 간단하기 위해 이동평판의 질량과 형태를 고정시키고, 유연힌지의 형태와 크기를 동일하게 하여 $m=m_1=m_2$, $k=k_1=k_2$ 및 $L=L_1=L_2$ 로 하며, 결과적으로 설계 파라미터는 위의 구속조건을 만족하는 유연힌지의 원형 홈의 반경 r 및 원형 홈 사이의 폭 t 를 구하는 문제로 간략화시켰다.

식 (6)의 조건을 위해서 식 (3)에서 공진주파수를 다음과 같이 구한다.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8k/L^2}{M_1 + M_2 + 5m + 4I/L^2}} \quad (9)$$

식 (7)에서 최대응력 σ_{\max} 는 이동평판을 각 축으로 최대 변위시켰을 때 모멘트에 의해 각 힌지에서 작용하며 다음과 같다.

$$\sigma_{\max} = K_t \frac{6k}{t^2 b} \frac{q_{\max}}{L + 2r} \quad (10)$$

여기서 K_t 는 응력집중계수⁽³⁾로서 다음과 같고

$$K_t = \frac{2.7t + 5.4r}{8r + t} + 0.325 \quad (11)$$

q_{\max} 는 각 방향의 최대 변위를 나타낸다.

설계 파라미터 r 및 t 는 다음과 같이 제한된 영역에서 최적설계를 수행하였다.

$$1.0 \text{ mm} \leq r \leq 10.0 \text{ mm} \quad (12)$$

$$0.3 \text{ mm} \leq t \leq 4.0 \text{ mm} \quad (13)$$

Min-Max 법에 의해 최적설계된 설계 파라미터의 해는 다음과 같다.

$$(r, t)_{\text{opt}} = (4.9, 1.8) \text{ mm} \quad (14)$$

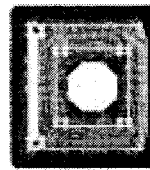
3.2 설계 메커니즘의 해석

식 (14)에 의해서 설계된 스테이지 메커니즘의 수학적 모델링으로부터 계산된 공진주파수, 강성계수, 그리고 최대응력은 다음 Table 2 와 같다.

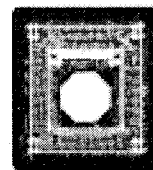
Table 2 Calculated results using mathematical model

Item	Value
f_1	201.0 Hz
f_2	356.8 Hz
K	6.0 N/ μm
σ_{\max}	49.8 MPa

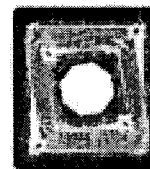
계산된 값을 비교하기 위해 FEM 을 이용하여 정·동해석을 수행하였다. 동해석 수행결과 스테이지 메커니즘의 공진주파수를 구했으며 그 결과는 Fig.4 와 같다.



(a) Mode 1 : 205.5 Hz



(b) Mode 2 : 358.7 Hz



(c) Mode 3 : 848.3 Hz



(d) Mode 4 : 1604 Hz

Fig. 4 Dynamic analyses

Fig.4의 결과로부터 이 메커니즘의 1, 2 차 공진주파수는 Table2의 결과와 3% 이내의 오차범위 내에서 일치함을 보이고 있다. 3 차 이상의 공진주파수의 모드 형상을 살펴보면, 이동평판이 힌지와 연결되는 부분 및 프레임 부분의 변형에 의해 공진이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 이 것은 고주파영역에서는 이동평판이 강제라는 가정을 벗어나고 있음을 알 수 있다.

Fig.5는 정해석 수행 결과로서 (a) 및 (b)는 피에조 소자에 의해 힘이 가해지는 곳에 5 N의 힘을 가한 후 변형된 형상이며, (c)는 자중에 의해 중력방향의 변형된 형상이다. 이 결과로서 각 축방향의 강성을 구할 수 있으며 결과는 Table 3과 같다. 구동방향인 x 및 y 축의 강성은 Table 2에서 제시한 계산결과와 1% 이내의 오차범위 내에서 일치함을 보이고 있다. 또한 중력방향의 강성은 구동방향에 비해 매우 큰 강성을 지니고 있음을 알 수 있다.

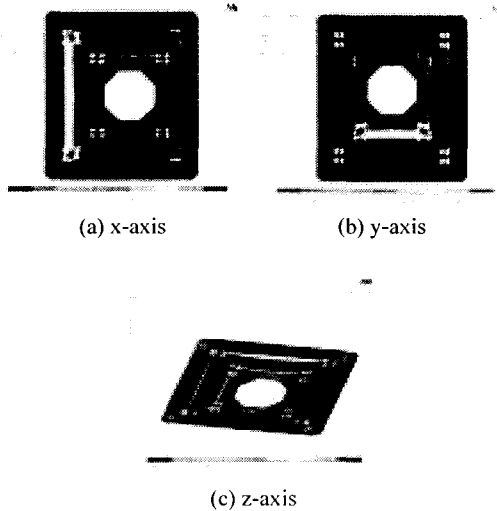


Fig.5 Static analyses

Axis	Value ($N/\mu m$)
x	5.97
y	5.96
z	107

각 구동축 방향으로 최대변위를 가한 후 유인핀지에서 최대응력을 조사하였으며 42.2 MPa의 응력이 발생함을 알 수 있었다. 이것 또한 계산에 의한 결과와 15%의 오차범위 내에서 일치하였다. 이상으로 볼 때 수학적 모델과 FEM은 매우 일치함을

알 수 있다.

구동축에 변위를 가한 후 내부 이동평판의 회전 변위량을 조사하였으며 그 결과는 Fig.6과 같다. 각 축이 최대변위를 했을 때 발생하는 회전량은 Table 1에서 제시한 사양보다 작은 값을 가진다.



Fig.6 Angular error due to PZT actuation

4. 결론

본 연구에서는 고속·고분해능의 피에조 구동형 스테이지를 제시하고, 설계를 위한 구속 조건 및 이 조건들을 만족하는 유연힌지의 최적 설계방법을 제안하며, 수학적 모델링 및 FEM을 통한 정·동적 해석을 수행하였다. 해석결과 제안된 설계방법에 따른 수학적 해석 모델은 FEM 결과와 일치하였고, 설계된 스테이지는 설계사양을 만족하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 “나노기술 기반의 차세대 산업화 핵심요소기술 개발사업”에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. Elmustafa A. A. and Lagally M. G., “Flexural-hinge guided motion nanopositioner stage for precision machining: finite element simulations,” Precision Engineering, Vol.25, pp.77-81, 2001.
2. Rang R., Jouanch M. and Schweizer R., “Design and characterization of a low-profile micropositioning stage,” Precision Engineering, Vol18, pp.20-29, 1996.
3. Smith S. T., Chetwynd D. G. and Bowen D. K., “Design and assessment of monolithic high precision translation mechanism,” J. Phys. E: Sci Instrum, Vol.20, pp.977-983, 1988.