

초정밀 3 축 이송 스테이지의 개발 : 1. 설계 및 제작

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

Development of a 3-axis fine positioning stage : Part 1. Design and Fabrication

J. O. Kang*, H. Seomoon(Grad. School, KIT), S. Baek, C. S. Han(KIMM), S. W. Hong(KIT)

ABSTRACT

This paper presents a 3-axis fine positioning stage. All the procedure concerning the design and fabrication of the stage are described. The stage considered here is composed of flexure hinges, piezoelectric actuators and their peripherals. A special flexure hinge is adopted to be able to actuate the single stage in three axes at the same time. A ball contact mechanism is introduced into the piezoelectric actuator to avoid the cross talk among the axes. The final design is obtained with the theoretical analysis on the stage. An actual fine stage is developed and the design specifications are verified through an experiment.

Key Words : Fine stage(초정밀 스테이지), Flexure hinge(유연 힌지), Experiment design(실험계획), FEM(유한요소법)

1. 서론

나노미터 정밀도의 다축 구동 초정밀 스테이지는 반복 정밀도를 유지하기 위해 아송 오차를 최소화할 수 있도록 이송 메커니즘이 설계되어야 하며, 매우 높은 이송 분해능을 가져야 한다.^[1,2] 이러한 조건을 만족하기 위하여 시스템 구성을 할 때 보편적으로 단일한 스테이지 상에 다축 구동을 하는 메커니즘, 유연 힌지 및 압전 소자 구동기의 조합을 사용하는 것이 바람직하며 그 장점으로 인해 그 적용 범위가 넓어지고 있다.^[2,3,4]

다축 구동용 스테이지는 한 축을 구동하는 스테이지를 쌓아 여러 축에 대한 이송을 가능하게 하는 적층형 스테이지가 많이 사용된다. 그러나 응답 속도가 느리고 하부 스테이지가 상부 스테이지의 관성 질량을 움직여야 하며 직교성 등에 관련된 원천 오차를 가지는 단점 갖는다. 이와 같은 단점을 배제하기 위하여 하나의 구조물에 다축 운동을 가능하도록 하나의 스테이지에 X 방향 및 Y 방향에 대한 병렬 구동 메커니즘을 구현하는 것이 유리하다. 이러한 스테이지는 X 축과 Y 축에 대하여 동일한 낮은 관성을 가져 높은 응답성과 서로의 축에 대하여 독립적인 운동을 가능하게 하며, 구동 방향의 측면 방향에 설치된 센서에 의해 구동 방향에

의한 흔들림(Rutout)을 측정·보상할 수 있다. 그리고, 3 개의 구동기 중 2 개의 구동기를 한 방향으로 설치하여 회전 각 발생을 가능하게 한다.

본 연구에서는 단일 스테이지 상에서 유연 힌지 및 압전 소자를 이용하여 3 축(XY θ)을 동시에 제어할 수 있는 초정밀 이송 스테이지를 개발하였다. 제안된 스테이지는 좁은 공간에서 활용될 수 있도록 개발되었으며 3 축의 운동에 관련된 유연 힌지를 복합적으로 설계하였다. 따라서 개발을 위해 먼저 신규 설계된 복합 유연 힌지 및 스테이지에 대한 특성 해석을 실시하였다. 본 연구에서 채용한 유연 힌지와 압전 소자 구동기는 일반적으로 부드럽고 연속적인 운동을 제공하게 된다. 유연 힌지 및 유연 힌지를 사용하는 스테이지의 특성은 유연 힌지의 변수들인 레버의 길이, 노치(Notch)의 반경, 노치부의 두께(t), 그리고 힌지의 높이(b) 등의 변수들에 의해 그 특성이 많이 바뀌게 된다.^[3,5,6] 따라서 원하는 성능을 갖는 스테이지를 설계하기 위해서는 유연 힌지에 대한 적절한 해석 및 설계가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 응용 목적에 따라 설계된 초기 설계를 기초로 동적 모델링을 하였으며 동특성 해석을 실시하였다.

초기 설계에 대한 기초해석을 통해 얻어진 결과를 토대로 스테이지의 특성에 가장 큰 영향을 주는

유연 힌지에 대한 세부 설계를 실시하였다. 특히, 그 설계 조건을 설정하기 위해 노치의 반경, 두께 및 힌지의 높이의 3 가지 변수를 중심으로 실험계획법을 통하여 최적화한 결과^[6]를 활용하여 결정하였다. 또한 제작에 따르는 정밀도 등의 조건을 설정하기 위해 설계 변수에 관한 민감도 해석을 실시하였다. 해석 결과를 토대로 실제 초정밀 스테이지를 설계 및 제작하였으며 설계 검증을 위한 동특성 실험을 실시하였다. 실험 결과 제안된 모델링 및 해석 방법이 실제 시스템에서 잘 적용될 수 있음을 확인하였다.

2. 초정밀 스테이지의 구성

2.1 스테이지 구성

본 연구에서 고려하고 있는 초정밀 스테이지는 Fig. 1 과 같은 형태이다. 재질은 알루미늄이며, X, Y 방향으로 압전 소자 구동기를 부착하여, X, Y 및 θ 방향으로 스테이지를 이동시킨다. 이 스테이지는 3 축이 한 평면 상에서 구현되었으며 동시에 구동이 되며, 되먹임 제어를 위해 용량형 센서가 설치되게 된다. 압전 소자 구동기는 영구자석을 이용한 자기력 예압을 사용하였으며 점 접촉을 위해 볼을 사용하여 스테이지 이동부와 접촉되어 구동하게 설계하였다. Fig. 1 에서 볼 수 있는 바와 같이 본 연구에서 제안하는 스테이지는 유연 힌지가 XY 방향으로 동시 구동 변형이 될 수 있도록 “1”자 형태로 구성되었다. 따라서 1 축 이송을 전체로 한 유연 힌지와 차이를 볼 수 있다. 한편 회전각변위를 위해 Y 축으로는 2 개의 압전 구동기가 설치되며 두 구동기 모두에 예압이 가해진 상태에서 두 구동기에 서로 반대의 입력을 인가하여 회전각변위를 발생시키게 된다. 유연 힌지는 Fig. 2 와 같이 원형의 노치를 가지는 형태이며, 스테이지 해석에서 이 노치부의 강성이 스테이지의 강성에 큰 영향을 미치게 된다.

2.2 초정밀 스테이지 설계 목표

스테이지의 설계 목표치를 Table 1 에 요약하였다. 스테이지의 강성이 압전 소자강성의 1/10 이하가 되어야 함과 동시에 스테이지 전체의 고유 진동수는 최소 200 Hz 이상이 되도록 설계를 하여야 한다. 이를 위해 먼저 압전 소자 구동기 강성과 비교하여 적합한 최대 한계의 스테이지 강성을 얻은 후 스테이지의 고유 진동수 조건을 확인하는 방식으로 설계 변수를 선정하게 된다.^[6]

3. 스테이지의 해석, 설계 및 제작

본 연구에서 고려하고 있는 이송 스테이지의 모델링 및 해석 방법에 관해서는 참고 문헌^[6]에서 자세히 취급한 바 있으며 여기서는 그 결과를 근거로 설계변수를 결정하고 제작하는 과정에 대해 간략히 기술하도록 한다.

3.1 강성 계산 및 유한요소 해석

참고 문헌^[5]에서 원형 노치를 가지는 유연 힌지로 이뤄진 스테이지 전체의 강성은 다음과 같다.

$$K_{eff} = 8 \cdot \frac{1}{L^2} \cdot K_{\theta} \quad (1)$$

여기서, L은 노치 간의 거리를 의미하며, K_{θ} 는 비틀림 모멘트에 의한 힌지의 θ 방향 비틀림 강성(Torsional stiffness)을 나타내며 다음과 같이 구한다.

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

본 연구에서 고려하고 있는 유연 힌지는 XY 방향에 대해 동시 변위를 줄 수 있도록 특수한 형태를 취하고 있다. 따라서 식(2)에서 구한 유연 힌지 관계식의 적합성을 검증할 필요가 있다. 소개된 식과의 비교 검증을 위해 유한 요소 해석을 실시하였다. 유연 힌지를 가지는 초정밀 스테이지의 유한 요소 해석을 위해서 상용 코드인 ABAQUS 를 이용하여 스테이지의 모드 해석을 실시하였다.^[6]

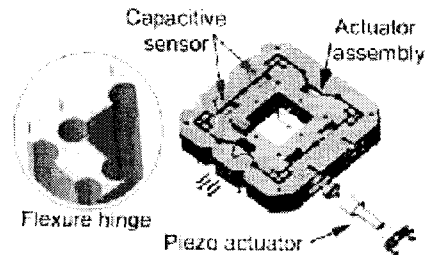


Fig. 1 The initial design of the fine stage

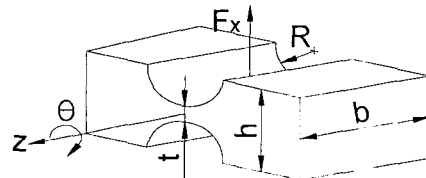


Fig. 2 Schematic diagram of flexure hinge

Table 1 Design specifications for stage

Category	Item	Data
Freq.	Control bandwidth	Upto 100 Hz
	Actuator bandwidth	Upto 20 Hz
	Stage 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

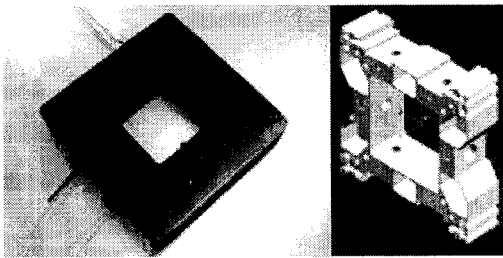


Fig. 4 Developed stage and the FEM 3D model for analysis and design

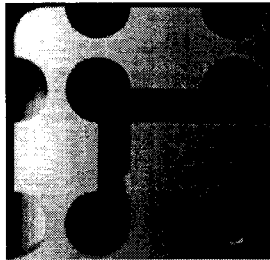


Fig. 5 Zoomed view of actual flexure hinge

3.2 설계 변수 결정 및 제작 오차 해석

실험계획법을 이용하여 유연 힌지 변수들에 대해서 해석 결과 Table 1 의 조건으로부터 각 유연 힌지의 강성 값은 3e6 N/m 이하, 스테이지 공진 주파수가 200 Hz 이상이 되도록 설계 조건을 만족시키는 유연 힌지 관련 변수는 R, t, b에 대해 각각 3, 1.69, 40 mm 로 결정하였다.^[6]

그리고, 유연 힌지의 제작 공정 중 제작상의 오차에 기인한 전체 계의 특성을 해석하기 위하여 유연 힌지 설계 변수들의 제작 오차에 대한 민감도 해석을 하였다. 해석 결과 특정 노치의 제작 오차가 전체 특성에 큰 영향을 주고 나머지 노치들은 제작 오차에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 이 노치들의 형상이 강성에 큰 변화가 주지 않는다는 것을 확인하였다.^[6]

3.3 스테이지의 제작

앞서 실시한 모델링 및 해석 결과를 반영하여

Table 2 Specifications of stage

Stage	Material	Al 7075-T6
	Mass	0.796 kg
PZT actuator	Type	PS1 150/7x7/20
	Stiffness	120e6 N/m

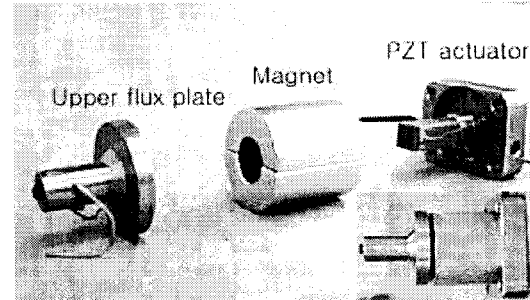


Fig. 6 PZT actuator assembly; upper flux plate, preload magnet, PZT

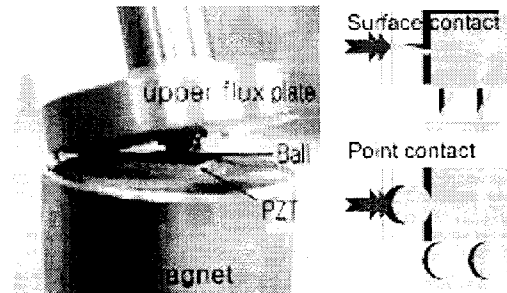


Fig. 7 Ball contact to avoid the cross-talk

Fig. 4 와 같은 실제 초정밀 3 축 스테이지를 제작하였다. 제작된 초정밀 스테이지는 3 개의 압전 소자 구동기와 3 개의 센서를 사용하여 X, Y 및 θ 축을 정밀 구동·제어하는 시스템이다. 이동부의 질량을 최소화하기 위해 이동부의 형상을 변경시켰으며 유연 힌지의 대칭성과 제작상의 편의를 위해 Fig. 5 의 그림과 같이 제작하였다. 대상 유연 힌지에 대한 해석 결과 강성은 약 2.95e6 N/m 으로 초기 설계에서의 유연 힌지와 거의 같은 강성을 얻을 수 있었다. 제작된 스테이지의 제원은 Table 2 에 정리하였다.

Fig. 6 은 압전 소자 구동부의 조합을 나타내고 있으며, 그림 우측 하단부의 그림은 완전히 조합된 형태이다. 그림에서 구동부 상단면(Upper flux plate)는 스테이지 이동부에 장착되며, 압전 소자를 감싸게 되는 영구 자석(permanent magnet)은 인장력에 매우 취약한 압전 소자 구동기에 인장력을 이기도록 가하는 예압을 주게 된다. 자석에 의한 예압은 압전 소자 스트로크(Stroke)가 예압에 영향을 받지 않아 전체 스트로크의 변화가 없으며, 구동면 상단면

과 간격을 조절하여 쉽게 예압량을 바꿀 수 있다. 또한, 이력(Hysteresis) 현상이 감소하는 장점이 있으며, 불에 의한 점 접촉을 이용할 수 있어 기계적 예압을 주기 위해 필요한 유연 힌지 수를 줄일 수 있어 전체 스테이지의 제작을 용이하게 해준다.

“ㄱ” 자 형태의 유연 힌지 메커니즘을 이용한 스테이지의 가장 큰 단점은 구동 방향의 운동에 의한 측면 방향 운동이 영향을 받는다는 것이다. 이러한 단점을 배제하기 위하여 Fig. 6의 구동부 상단면과 압전 소자를 접촉시킬 때 Fig. 7과 좌측 그림과 같이 직경 2 mm의 볼을 사이에 넣어 점 접촉을 하도록 하였다. 이는 Fig. 7의 우측 상단 그림과 같이 유연 힌지의 복합 구조에서 면 접촉 시에 나타나는 마찰력에 의한 효과와 측면 방향으로의 운동에 의한 효과를 Fig. 7의 우측 하단과 같은 점 접촉을 사용하면 배제할 수 있어 구동 방향으로만의 운동을 가능하게 해주는 장점을 가진다.

4. 동특성 실험

설계, 해석 결과에 대한 검증을 위해 제작된 초정밀 스테이지에 대하여 고유 진동수 측정 실험을 수행하였다. Fig. 8은 실험을 통해 측정된 센서나 압전 소자 구동기 부착 부품 등이 붙지 않은 스테이지의 주파수 응답 함수이다. 파쇄선은 수식에 의하여 구하여진 고유 진동수(605 Hz) 및 X 방향 고유 진동수를 나타내었으며, Y 방향 고유 진동수(617 Hz)를 파선으로, 유한요소 모델 해석에 의한 고유 진동수(613.07 Hz)를 실선으로 표현하였다. X 방향과 Y 방향에 대한 고유 진동수의 차이는 각 방향에 대한 스테이지의 설계 차이에 기인한 값이며, 그 차이는 미미한 것을 알 수 있다.

또, 구동 방향으로만 변형이 생긴다는 경계 조건으로 유연 힌지만을 모델링하고 스테이지 이동부를

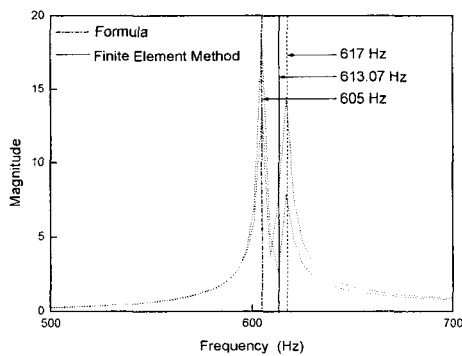


Fig. 8 Frequency response and the natural frequencies of the stage moving excluding the accessories

강제로 가정하여 각 방향에 대한 형상의 고려를 하지 않았던 유한 요소 모델의 해석 결과와 약 1% 내의 오차 범위 내의 유사한 값을 가진다는 것을 알 수 있으며, 형상의 차이를 가지는 실제 구조물의 두 방향에 대한 고유 진동수 값 사이에 존재하므로 신뢰도 높은 결과라는 결론을 내렸다. 이러한 수식에 의한 계산 값과 실험 결과로부터 제안된 설계 방법이 적합함을 검증하였다.

5. 결론

본 연구에서는 나노미터의 분해능, 정밀도 및 반복성을 달성할 수 있는 하나의 평면상에 다축 구동을 가능하게 하는 유연 힌지 및 압전 소자 구동기로 이뤄진 초정밀 스테이지의 설계 및 제작하였고, 구조 및 진동 특성에 대한 해석을 실시하였으며, 그 해석 결과에 대한 실험적 검증을 통해 해석 결과에 대한 신뢰도를 증명하였다. 개발된 스테이지는 한 개의 스테이지로 3축 이송이 가능하도록 구성되었으며 축간의 간섭을 피할 수 있도록 볼 접촉 메커니즘을 도입하였다. 시스템에 대한 체계적 해석을 통해 설계 변수를 결정하여 실제 스테이지를 제작하였으며 제작된 스테이지를 통한 검증 실험으로 제안된 설계 방법의 타당성을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

1. N. Taniguchi, Nanotechnology, Oxford University Press, 1996.
2. J. W. Ryu, D.G. Gweon, and K. S. Moon, “Optimal design of a flexure hinge based XYΘ wafer stage,” American Society for Precision Engineering, Vol. 21, pp.18-28, 1997.
3. 한창수, 김경호, 이찬홍, “초정밀 마이크로 위치 결정 스테이지의 설계,” 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 300 - 304, 2001.
4. Physik Instrumente, “Tutorial: Piezoelectrics in Positioning,” <http://www.physikinstrumente.com>
5. S. T. Smith, Flexures, Gordon and Breach Science Publishers, 2000.
6. 강중욱, 서문훈, 홍성욱, 한창수, “초정밀 3축 이송 스테이지의 설계, 모델링 및 해석,” 한국정밀학회 추계학술대회논문집, pp. 989-992, 2002.