

초정밀 3축 이송 스테이지의 설계, 모델링 및 해석

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

Design, Modeling and Analysis of a 3-axis Fine Positioning Stage

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

ABSTRACT

This paper presents a procedure for design, modeling and analysis of a fine positioning stage. The stage considered here is composed of flexure hinges, piezoelectric actuators and their peripherals. Through a series of analysis, the structural analysis model is simplified as a rigid body(the moving part) and springs (the flexure hinges). An experimental design procedure is applied to determine optimum design variables for flexure hinges. The optimum variables are validated through a numerical test. A sensitivity analysis on the notch positions is also performed to obtain a guideline of fabrication accuracy for the stage.

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

1. 서론

나노미터의 정확도에서 거동하는 초정밀 스테이지는 그 반복성 및 정밀도를 유지하기 위하여 이동 메커니즘에 있어 나노 이하의 산란 오차를 가지도록 설계되어야 한다. 이러한 조건들을 만족하기 위하여 보편적으로 초정밀 스테이지를 설계하는 연구에서는 탄성 변형을 이용하여 스테이지와 단일체로 구성되어 이송하게 되는 유연 힌지(Flexure hinge)와 압전 소자(Piezoelectric device)를 사용하여 구동을 하게 된다.^[1-4] 유연 힌지와 압전 소자는 각각 탄성 변형으로 인한 부드럽고 연속적인 운동을 제공해주는 장점을 가지고 있으며, 구조적으로 강성 및 응력에 있어 다른 이송 시스템보다 유리한 이점을 가진다.^[4]

본 연구에서는 초정밀 이송 스테이지의 개발을 위해 초기설계 및 모델링, 해석을 실시하였다. 초기 설계에 대한 기초해석을 통해 얻어진 결과를 토대로 스테이지의 특성에 가장 큰 영향을 주는 유연 힌지에 대한 해석에 집중하였다. 특히, 그 설계 조건을 설정하기 위해 노치의 반경, 두께 및 힌지의 높이의 3가지 변수를 중심으로 실험 계획법을 통하여 최적화하였다. 또한 제작에 따르는 정밀도 등의 조건을 설정하기 위해 설계변수에 관한 민감도 해석을 실시하였다.

2. 초정밀 스테이지 설계

2.1 스테이지 구성

본 연구에서 고려하고 있는 초정밀 스테이지는 Fig. 1과 같은 형태이며, 재질은 AI 이며, X, Y 방향으로 압전 소자 구동기를 부착하여, X, Y 및 θ 방향의 거동을 하게 되고 유연 힌지의 탄성 변형으로 스테이지를 이송시킨다. 이 스테이지는 3축이 동시에 구동이 되며, 장착면 기울기 보정을 위해 용량형 센서를 설치하게 된다.

유연 힌지는 유연 힌지 메커니즘은 구동기와 스테이지 이동부 사이의 결합부로서 보편적으로 빔 형태와 노치(Notch, 만원형 골)를 가지는 형태로 이루어진다. Fig. 2와 같이 원형의 노치를 가지는 유연 힌지를 사용하였으며, 스테이지 해석에서 이 노치부의 강성이 스테이지의 강성에 큰 영향을 미치게 된다. 스테이지의 거동이 유연 힌지의 탄성 변형에 의해 이루어지므로, 탄성 재료의 내부 마찰을 제외하면 마찰이 없어 윤활이 필요하지 않고 높은 분해능, 반복능 및 정확도를 가질 수 있는 장점을 가진다. Fig. 2는 유연 힌지 노치의 반경(R) 힌지의 두께(t) 힌지의 높이(b) 등 주요 변수에 대해서 나타낸 그림이다.^[4]

초정밀 스테이지를 구동하기 위하여 구동기로는 압전 소자 구동기(PZT actuator)를 사용하게 된다.^[1-4]

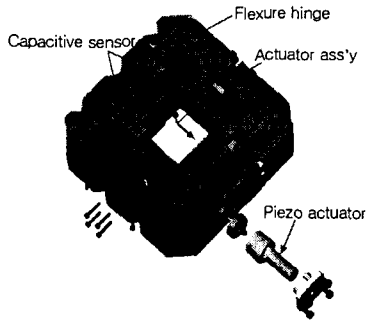


Fig. 1 The initial design of the fine stage

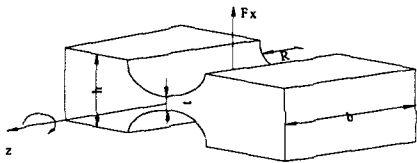


Fig. 2 Schematic diagram of flexure hinge

본 연구에도 압전 소자 구동기로 Piezomechanik 사의 PSi 150/7×7/20을 사용하였다.

2.2 초정밀 스테이지 설계 목표

스테이지의 설계목표치를 Table 1에 요약하였다. 스테이지의 강성이 압전 소자 강성의 1/10 이하가 되어야함과 동시에 스테이지 전체의 고유주파수는 최소 200 Hz 이상이 되도록 설계를 하여야 한다. 이를 위해 먼저 PZT 강성과 비교하여 적합한 최대 한계의 스테이지 강성을 얻은 후 스테이지의 고유 진동수 조건을 확인하는 방식으로 설계 변수를 선정하게 된다.

3. 초정밀 스테이지의 모델링 및 해석

3.1 모델링 및 해석 관점

유연 힌지를 가지는 초정밀 스테이지의 해석을 위해서 상용 코드인 ABAQUS를 이용하여 삼차원 모

Table 1 Design specifications for stage

Category	Item	Data
Freq.	Stage 제어 대역	less than 100 Hz
	Stage 구동 대역	less than 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

델링 및 스테이지의 컴플라이언스(compliance) 계산과 모드 해석을 실시하였다. 변형량 계산에서 스테이지의 자중에 의한 변형과 외부 하중에 의한 X, Y 및 θ 방향에 대한 변위를 계산하였다. 또, 모드 해석에서 스테이지의 고유 진동수에 큰 영향을 주는 유연 힌지에 대한 주요 변수를 설정하여 변수 값의 변화에 따른 강성 변화를 해석하였다. 그리고, 유연 힌지 노치의 위치 오차에 대한 해석을 통하여 가공 정밀도의 기준을 설정하였다.

3.2 시스템 모델링

Fig. 3은 스테이지 전체에 대한 유한요소모델과 계산결과를 보여주고 있다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 프레임부분의 강성이 충분히 높아 프레임부분을 생략하고 유연 힌지 부분이 강체에 완전 고정된 것으로 두어도 결과에 영향을 미치지 않는다.

따라서 시스템 전체에서 프레임부분을 생략하고 Fig. 4와 같이 이송 스테이지와 유연 힌지만으로 모델링을 하였다.

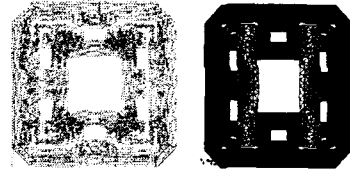


Fig. 3 Modelling, meshing and deformation result of the stage by the FEM analysis

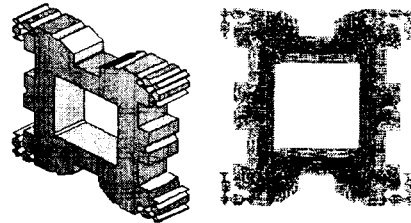


Fig. 4 Refined model for flexure hinge and stage moving elements



Fig. 5 First three mode shapes of stage with fine meshed finite element model

프레임에 결합된 유연 힌지 부분은 완전 고정조건으로 두어 모든 자유도를 구속시켰다. Fig. 5는 조밀하게 메쉬된 스테이지의 1,2,3차의 모드 형상을 보여주고 있다. 첫 번째 고유진동수의 한계를 200 Hz로 두었으므로 고차모드를 고려할 필요는 없다. 한편 그림에 의하면 1차 모드는 x 방향과 y 방향의 순수 병진 운동임을 볼 수 있으며 3차 모드부터 스테이지의 회전운동 모드가 나타나지만 상대적으로 매우 높은 진동수를 갖는다.

또, 1,2차 모드를 살펴보면 스테이지 본체는 자체의 변형이 거의 발생하지 않고 유연 힌지 부분이 집중적으로 변형되고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 스테이지 본체 부분을 강체로 가정하고 유연 힌지부분을 스프링 요소로 두어 해석이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 스테이지의 이동에 가장 큰 역할을 담당하고 있는 유연 힌지를 스프링 요소로 해석을 하기 위해 모델링한 것이다. 유연 힌지의 한쪽은 완전히 구속을 하고 스테이지 이동부쪽은 X, Y 혹은 θ 방향 중 한 방향에 대한 운동만을 고려하여 인가된 힘에 대한 변위를 구하여 각 방향에 대한 강성을 구하였다. 즉, Fig. 6의 우측 그림에서 유연 힌지의 아래 단면은 프레임에 고정되는 부분으로 구속시켰으며, 우측 단면은 θ_x, θ_y 및 y 방향의 자유도를 구속시켰다.

Fig. 7(a)는 전체 스테이지를 모델링한 경우 허용 가능한 최대요소수로 모델링한 그림이며 Fig. 7(b)는 유연 힌지만을 모델링한 결과로서 해석결과의 정밀도에 큰 차이를 보일 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7 (b)와 같이 유연 힌지만 있는 경우로서 x 축으로의 유연 힌지 강성을 구한 것이며, 유연 힌지를 메쉬할 때의 노드의 간격을 줄여 나감으로서 증가하는 요소 수에 따른 강성의 수렴성을 나타내었다. 2D 모델과 3D 모델에 대해 모두 수렴성을 검토하였으며 메쉬의 증가에 따라 일정 값에 수렴하는 것을 볼 수 있으나 약간의 옅셋이 존재함을 볼 수 있다. 그러나 그 옅셋이 크지 않으므로 모델링 및 해석이 용이한 2D 모델을 이용하여 이후의 해석을 실시하였다.

4. 설계 변수 최적화

4.1 유연 힌지의 설계 변수 선정

Fig. 2에서 나타낸 스테이지의 변형 및 고유 진동수에 가장 큰 영향을 주는 유연 힌지의 중요 변수들 중에서 서로 독립적인 변수인 노치 반경(R), 노치부 두께(t) 및 유연 힌지의 높이(b)를 선정하여 해석을 실시하였다.

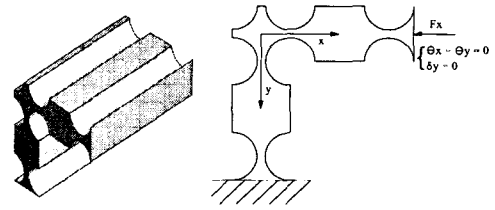


Fig. 6 Flexure hinge model for FEM analysis

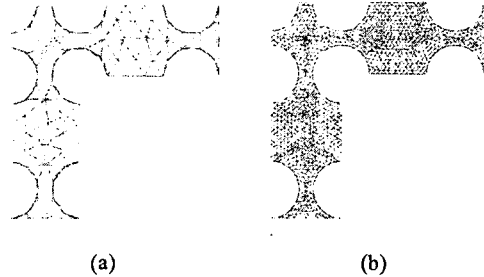


Fig. 7 Mesh of flexure hinge part; (a)whole stage modeling, (b) flexure hinge modeling

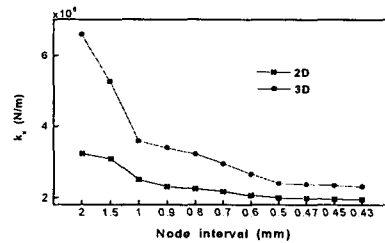


Fig. 8 Convergence of k_x with the number of mesh increased

Table 2 Level of flexure hinge parameters

	R [mm]	t [mm]	b [mm]
Level 1	3.00	1.69	20
Level 2	3.08	1.53	30
Level 3	3.16	1.37	40

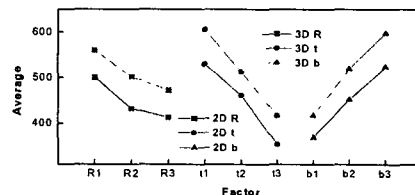


Fig. 9 The effect of selected factors

4.2 실험계획법에 의한 해석

Table 2에서 나타난 것과 같이 3 수준 실험계획법을 구성하였다. 수준은 유연 힌지 변수들을 실제 설계에 적용된 값에서 변화를 시켜 적용하였다. 이렇게 정한 3 인자의 3 수준에 대한 실험 계획은 모두 9 개의 경우에 대해서 해석을 수행하였다.

Fig. 9에서는 3인자에 대한 2D 모델과 3D 모델에 대한 유연 힌지를 이루고 있는 각 변수들에 대해 실험계획법에 의해 해석을 한 결과이다. 2D 모델에 대한 해석과 3D 모델에 대한 해석 결과를 동시에 제시하고 두 가지 모델에서 모두 설계 조건을 만족시킴으로서 최악조건에 대한 설계치의 강건성을 확보하기 위함이다. 해석 결과 가장 큰 영향을 주는 인자는 2D, 3D 모델에서 모두 변화 폭이 큰 t 로 판명되었으며, 변수들 중에서 반경이 작아질수록, t 와 b 가 커질수록 스테이지의 고유 진동수가 높아진다는 결과를 얻었다.

4.3 최적 설계 변수 결정

Table 1의 조건으로부터 유연 힌지의 강성은 $3e6$ N/m 이하가 되어야 하며, 스테이지의 공진 주파수가 200 Hz 이상이 되도록 설계 조건을 제시하였다. 이와 같은 모든 설계 조건을 만족시키는 유연 힌지 관련 변수는 R , t , b 에 대해 각각 3, 1.69, 40 mm로 결정하였다.

또, 스테이지 구동 거리 $10\mu\text{m}$ 에 대해 힌지가 받는 최대응력은 14.1 MPa 정도이며, 설계 기준이 되는 응력의 한계치 170MPa에 대해 충분히 여유를 가진다는 것을 알 수 있었다.

4.4 오차 해석

유연 힌지의 제작 공정 중 제작상의 오차에 기인한 전체 계의 특성을 해석하기 위하여 유연 힌지 설계 변수들의 제작 오차에 대한 민감도 해석을 하였다. Fig. 10에서 나타난 각 노치마다 상하좌우로 0.2mm의 가공오차를 주고 해석하여 노치 중에서 가공 오차의 영향을 가장 많이 받는 노치에 대한 해석을 수행하였다.

오차 해석에 대한 결과는 Fig. 10과 같이 1·8번, 2·5번 노치가 각각 좌우 방향과 상하 방향으로 나타나는 제작 오차에 대해 강성의 변화를 보였다. 그리고, 나머지 노치들은 제작 오차에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 해석 결과 유연 힌지가 8개의 노치를 가지는 경우 $2.5e6$ [N/m]의 강성을, 1·8·2·5번 4개의 노치를 가지는 경우 $2.7e6$ [N/m]의 강성을 가진다. 오차 해석 결과 효과가 없는 노치를 무시하여도 강성에 큰 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 그러나 유연 힌지의 대칭성을 고려하면 6번 노치만이 제거 가능한 것으로 설정할 수 있으며 이에 따

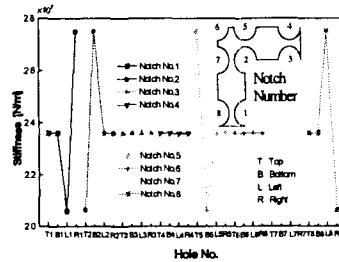


Fig. 10 Results of error analysis on notch positions

른 해석을 실시하였다. 해석 결과 강성은 $2.4e6$ [N/m]으로 8개의 노치를 가지는 유연 힌지와 거의 같은 강성을 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 나노미터의 분해능, 정밀도 및 반복성을 달성할 수 있는 유연 힌지 및 압전 소자 구동기로 이뤄진 초정밀 스테이지의 설계 및 모델링, 구조 및 진동 특성에 대한 해석을 실시하였다. 유한요소해석을 통해 설계에 적합하도록 시스템을 단순화하였으며 직교배열표를 이용한 실험계획법을 통하여 설계 조건을 만족하는 변수를 선정하였다. 또한 민감도 해석을 통해 제작 공정상의 오차에 대한 조건을 설정할 수 있었다.

후기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 “첨단기계류 부품”사업 중 “광모듈 본딩 시스템의 핵심부품설계 기술개발”과제로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한창수, 김경호, 이찬홍, "초정밀 마이크로 위치 결정 스테이지의 설계," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp.300-304, 2001.
2. J. W. Ryu, D.-G. Gweon, and K. S. Moon, "Optimal design of a flexurehinge based XYθ wafer stage," American Society for Precision Engineering, Vol. 21, pp.18-28, 1997.
3. R. Yang, M. Jouaneh, and R. Schweizer, "Design and characterization of a low-profile micropositioning stage," American Society for Precision Engineering, Vol. 18, pp.20-29, 1996.
4. S. T. Smith, Flexures, Gordon and Breach Science Publishers, 2000.