

초정밀 3 축 이송 스테이지의 개발 : 1. 해석 및 설계

강중옥*, 서문훈*, 한창수**, 홍성욱#

Development of 3-axis Fine Positioning Stage : Part 1. Analysis and Design

Joong-Ok Kang*, Moon-Hoon Seo*, Chang-Soo Han** and Seong-Wook Hong#

ABSTRACT

This paper presents a procedure for analysis and design of a fine positioning stage, which has many applications in industries for machine tools, semiconductor, LCD and so forth. The stage considered here is based on a single module with 3 axes which 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 the dimension of flexure hinges. A sensitivity analysis on the notch positions is also performed to obtain a guideline of fabrication accuracy for the stage. An actual fine stage is made and verified through an experiment on the dynamic characteristics.

Key Words : Fine positioning stage(초정밀 스테이지), Flexure hinge(유연 힌지), Experiment design(실험계획), Finite element method(유한 요소법), Natural frequency(고유진동수), Frequency response(주파수 응답), Piezoelectric actuator(압전 소자 구동기), Orthogonal array(직교배열), Notch(노치), Stiffness coefficient(강성)

1. 서론

초정밀 스테이지는 높은 정밀도 및 반복성을 유지하기 위해 오차가 최소화하도록 이동 메커니즘이 설계되어야 하며, 높은 이송 분해능을 가져야 한다.^[1-4] 이러한 조건들을 만족하기 위하여 초정밀 스테이지에서는 유연 힌지(Flexure hinge)와 압전 소자 구동기(Piezoelectric actuator)를 많이 사용하고 있다. 유연 힌지는 스테이지와 단일체로 구성되며 힌지 재료의 탄성 변형을 이용하여 이송하게 되므로 부드럽고 연속적인 운동을 제공하게

된다.^[5-10] 또한 구조적으로도 안정적이며 마모가 없어 다른 이송 시스템에 비해 그 수명이 월등히 길다. 일반적으로 이와 같은 유연 힌지 및 유연 힌지를 사용하는 스테이지의 특성은 유연 힌지의 변수들인 레버의 길이, 힌지의 두께, 노치(Notch)의 반경, 노치부의 두께, 그리고 힌지의 높이 등의 변수들에 의해 그 동특성이 많이 바뀌게 된다.^[2-9] 따라서 원하는 성능을 갖는 스테이지를 설계하기 위해서는 유연 힌지에 대한 적절한 해석 및 설계가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 유연 힌지 및 압전 소자를 이용하여 3 축(XYθ)을 동시에 제어할 수 있는 초정

접수일: 2003년 8월 18일; 게재승인일: 2004년 1월 9일

* 금오공과대학교 대학원 기전공학과

** 한국기계연구원

교신저자, 금오공대 기계공학부

E-mail : swhong@kumoh.ac.kr

Tel : (054)467-4214, Fax : (054)467-4472

밀 이송 스테이지를 개발하였다. 본 연구에서 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. 응용 목적에 따라 설계된 초기설계를 기초로 동적 모델링을 하였으며 동특성 해석을 실시하였다.

초기 설계에 대한 기초 해석을 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 높이 등 3 가지 변수를 중심으로 실험 계획법을 통하여 최적화하였다. 또한 제작에 따르는 정밀도 등의 조건을 설정하기 위해 설계 변수에 관한 민감도 해석을 실시하였으며, 제작의 용이함을 위하여 스테이지 동특성에 영향을 주지 않는 범위에서 유연 힌지의 형태를 변경하여 최종설계를 하였다. 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 이송시킨다. 이 스테이지는 3 축이 한 평면 상에서 구현되었으며 동시에 구동이 되며, 되먹임 제어를 위해 용량형 센서가 설치된다.

Fig. 1 에서 볼 수 있는 바와 같이 본 연구에서 제안하는 스테이지는 유연 힌지가 XY 방향으로 동시에 변형이 될 수 있도록 “ Γ ”자 형태로 구성되었다. 따라서 1 축 이송을 전제로 한 유연 힌지와 차이를 보일 수 있다. 한편 회전각변위를 위해 Y 축으로는 2 개의 압전 구동기가 설치되며 두 구동기 모두에 예압이 가해진 상태에서 두 구동기에서 서로 반대인 입력을 인가하여 회전각변위를 발생시키게 된다.

유연 힌지는 외부 프레임과 스테이지 이동부

사이의 결합부로서 단일체 구조물을 이루어 조합시 발생하는 오차를 제거할 수 있고, 상대적으로 높은 강성을 가질 수 있는 장점이 있으며, 그 형태는 보편적으로 빔 형태와 노치(Notch, 반원형골)를 가지는 힌지 형태가 사용되어진다. 연구에서 사용되어진 유연 힌지는 Fig. 2 와 같이 원형의 노치를 가지는 형태이며, 스테이지 해석 과정에서 이 노치부의 강성이 스테이지의 강성과 변형량에 큰 영향을 준다는 것을 확인하였다. 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.^[6]

Fig. 2 는 스테이지의 특성을 결정하는데 가장 큰 영향을 주는 독립 변수인 유연 힌지의 노치의 반경(R)·노치 목의 두께(t)·힌지의 높이(b) 등 유연 힌지 주요 변수에 대해서 나타낸 그림이다.^[6]

한편, 스테이지를 구동하기 위하여 압전 소자 구동기(PZT actuator)를 사용하게 된다. 압전 소자에 예압을 인가하기 위해 영구자석을 이용하였다.

구동기와 스테이지를 결합할 때 면접촉에 의한 결합은 마찰의 효과나 XY 방향의 간섭 효과가 나타나므로 직경 2mm 의 볼을 사용하여 면접촉을 하도록 하였다.

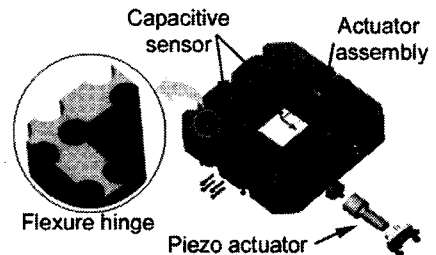


Fig. 1 The initial design of the fine stage

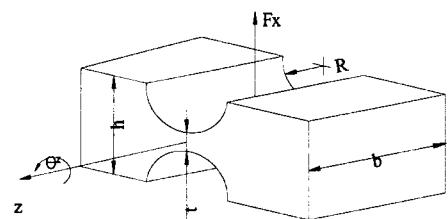


Fig. 2 Schematic diagram of flexure hinge

이 경우 압전 소자에 사용된 예압은 인장에 약한 압전 소자 구동기의 단점을 보완하고, 스테이지 이동부와 압전 소자를 결합시켜 주는 역할을 동시에 수행하게 된다. 이와 같은 스테이지의 자세한 구성은 참고문헌^[11]에 자세히 기술하였다.

2.2 초정밀 스테이지 설계 목표

스테이지의 설계 목표치를 Table 1 에 요약하였다. 스테이지 이동부의 충분한 변형을 얻기 위하여 유연 힌지의 강성이 압전 소자 강성의 1/10 이하가 되어야 함과 동시에 스테이지 상단에 부착되는 다른 부속품을 고려하여 관성 등의 영향을 배제하려면 스테이지 전체의 고유 진동수는 최소 200 Hz 이상이 되도록 설계를 하여야 한다. 이를 위해 먼저 압전 소자 강성과 비교하여 적합한 최대 한계의 스테이지 강성을 얻은 후 스테이지의 고유 진동수 조건을 확인하는 방식으로 설계 변수 값을 선정하였다.

3. 초정밀 스테이지의 모델링 해석

3.1 유연 힌지의 강성

참고문헌^[6]의 원형 노치를 가지는 유연 힌지 관련 공식으로부터, 스테이지의 유연 힌지부 포텐셜 에너지 항(Potential energy term)을 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$V = 8 \cdot \frac{1}{2} K_{\theta} \left(\frac{x}{L}\right)^2 \quad (1)$$

여기서, x 는 변형량, K_{θ} 는 힌지의 비틀림 강성(Torsional stiffness)을 나타내며, L 은 일반적으로 노치 간의 거리를 의미한다. 식 (1)을 편미분하게 되면 다음과 같다.

$$\frac{\partial V}{\partial x} = 8 \cdot K_{\theta} \cdot \frac{x}{L^2} \quad (2)$$

식 (2)에서 스테이지 전체의 강성은 다음과 같다.

$$K_{eff} = 8 \cdot \frac{1}{L^2} \cdot K_{\theta} \quad (3)$$

한편 노치위치에서의 모멘트에 의한 θ 방향의 비틀림 강성 K_{θ} 는 다음과 같이 구한다.

$$K_{\theta} = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad (4)$$

여기서 R, b, t 는 Fig.2 에 나타낸 변수들이다.

3.2 스테이지의 유한 요소 모델링

본 연구에서 고려하고 있는 유연 힌지는 XY 방향에 대해 동시 변위를 줄 수 있도록 특수한 형태를 취하고 있다. 따라서 앞 절에서 소개하고 있는 유연 힌지 관계식의 적합성을 검증할 필요가 있다. 이를 위해 소개된 식과의 비교 검증을 위한 유한 요소 해석을 실시하였다. 유연 힌지를 가지는 초정밀 스테이지의 유한 요소 해석을 위해서 상용 코드인 ABAQUS^[12]를 이용하여 모델링을 하였으며 스테이지의 컴플라이언스(Compliance) 계산과 모드 해석을 실시하였다. 변형량 계산에서 외부 하중에 의한 X, Y 및 θ 방향에 대한 변위를 계산하였다. 또, 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.

3.3 스테이지 모델링

Fig. 3 은 스테이지 전체에 대한 유한 요소 모델과 계산 결과를 보여주고 있다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 프레임 부분의 강성이 충분히 높아 프레임 부분을 생략하고 유연 힌지 부분이 강체에 완전 고정된 것으로 두어도 결과에 영향을 미치지 않는다.

따라서 시스템 전체에서 프레임 부분을 생략하고 Fig. 4 와 같이 스테이지 이동부와 유연 힌지만으로 모델링을 하였다.

Table 1 Design specifications for the stage

Category	Item	Data
Frequency	Stage Resonance	> 200 Hz
Rigidity	Stiffness	Less than 1/10 of that of the PZT-actuator
Stress	Max. Stress	< 168 MPa

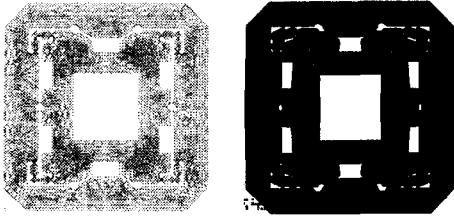


Fig. 3 Modeling, meshing and deformation result of the stage by the FEM analysis

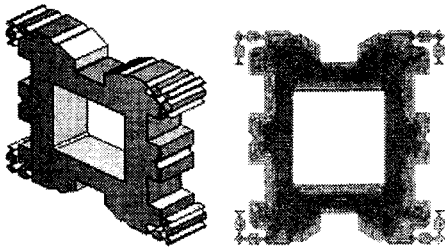


Fig. 4 Refined model for flexure hinge and stage moving elements

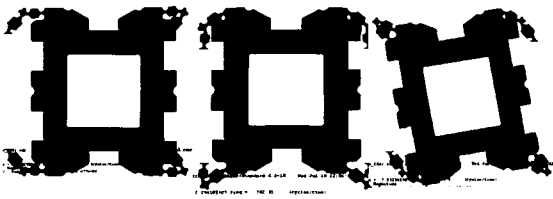


Fig. 5 First three mode shapes of stage with fine meshed finite element model

프레임에 결합된 유연 힌지 부분은 완전 고정 조건으로 두어 모든 자유도를 구속시켰다. Fig. 5는 조밀하게 메쉬된 스테이지의 1, 2, 3 차의 모드 형상을 보여주고 있다. 첫 번째 고유 진동수의 한계를 200 Hz로 두었으므로 고차 모드를 고려할 필요는 없다. 한편 그림에 의하면 1 차 모드는 X 방향과 Y 방향의 순수 병진 운동임을 볼 수 있으며, 3 차 모드부터 스테이지의 회전 운동 모드가 나타나지만 상대적으로 매우 높은 진동수를 갖는다. 또, 1,2 차 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 힌지 부분을 스프링 요소로 두어 해석하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 특히, Fig. 6(a)는 Fig. 4에서와 같이 전체 스테이지를 모델링한 경우 사용한 컴퓨터(Pentium 4)에서 허용 가능한 최대 요소수로 모델링한 경우의 유연 힌지부의 메쉬 상태를 나타내는 그림이며, Fig. 6(b)는 유연 힌지만을 모델링한 결과로서 해석 결과의 정밀도에 큰 차이를 보일 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 7은 스테이지의 이동에 가장 큰 역할을 담당하고 있는 유연 힌지를 스프링 요소 해석을 하기 위해 모델링한 것이다. 유연 힌지의 한쪽은 완전히 구속을 하고 스테이지 이동부 쪽은 X 혹은 Y 방향 중 한 방향에 대한 운동만을 고려하여 인가된 힘에 대한 변위를 구하여 각 방향에 대한 강성을 구하였다. 즉, Fig. 7의 우측 그림에서 X 방향의 강성을 구하기 위하여 유연 힌지의 아래 단면은 프레임에 고정되어 되는 부분으로 구속시켰으며, 우측 단면은 θ_x , θ_y 및 Y 방향의 자유도를 구속시켰다.

한편, Fig. 8은 Fig. 6(b)와 같이 유연 힌지만을 모델링한 경우의 2D 모델과 3D 모델의 메쉬 결과를 보여주고 있다. 2D 모델링은 Z축 방향으로

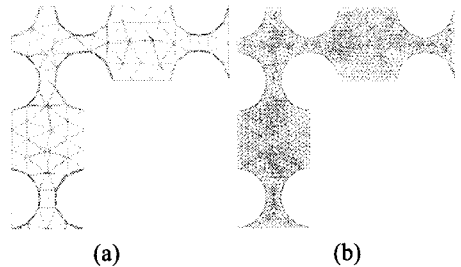


Fig. 6 Mesh of flexure hinge part from (a) whole stage modeling, (b) flexure hinge only modeling

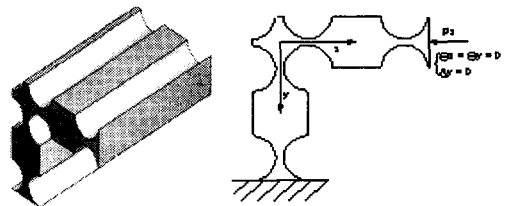


Fig. 7 3D flexure hinge model and boundary conditions for FEM analysis

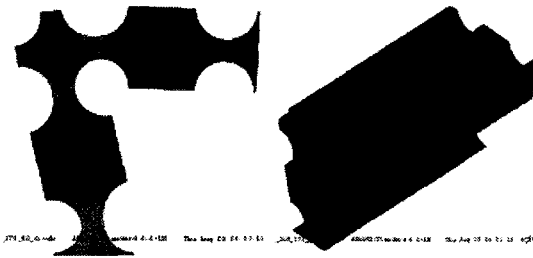


Fig. 8 2D and 3D models

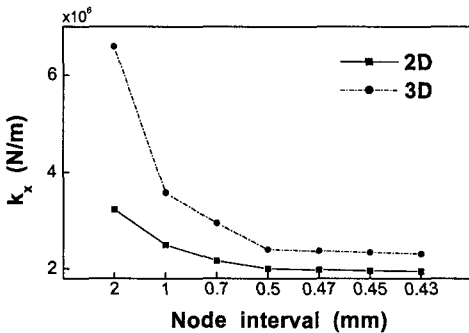


Fig. 9 Convergence of k_x with the number of mesh increased

단위길이를 가정하여 요소를 구성함으로써 3D 모델링에 비해 더욱 치밀한 모델링이 가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 유연 힌지의 강성을 계산하는 과정에서는 메쉬의 수를 늘려 계산 정밀도를 높일 수 있는 2D 모델링 방법을 채택하였다.

Fig. 9는 2D, 3D 모델에서 메쉬 수를 증가시킴(또는, 절점 간격을 감소시킴)에 따른 강성계산 결과의 변화를 보여주고 있다. 절점 간격을 0.5mm 이하로 선택하면 수렴된 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 3D 모델에서는 많은 절점을 사용해야 하므로 계산 시간이 많이 소모되며 또한 2D 모델에 비해 강성이 고평가되는 경향을 보였다. 앞으로 논의할 실험을 통한 검증과정에서 2D 모델링을 이용한 해석 결과가 실험결과와 매우 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

4. 설계 변수 최적화

4.1 유연 힌지의 설계 변수 선정

Fig. 2에서 나타난 스테이지의 변형 및 고유 진동수에 가장 큰 영향을 주는 유연 힌지의 중요

변수인 노치 반경(R), 노치부 두께(t) 및 힌지의 높이(b)를 선정하여 해석을 실시하였다.

4.2 실험계획법에 의한 해석

Table 2에서 나타난 것과 같이 3수준 실험계획법을 구성하였다. 수준은 유연 힌지 변수들을 실제 설계에 적용된 값에서 강성의 변화를 일으키는 최소한의 변화 값을 적용하였다. 이렇게 정한 3인자의 3수준에 대한 실험계획은 모두 9개의 경우에 대해서 해석을 수행하였다.

Fig. 10은 유연 힌지를 이루고 있는 각 변수들에 대해서 실험계획법을 이용한 2D 모델링 해석 결과이다. 해석 결과 가장 큰 영향을 주는 인자는 노치부 두께(t)로 판명되었으며, 변수들 중에서 반경(R)이 작아질수록, 두께(t)와 힌지 높이(b)가 커질수록 스테이지의 고유 진동수가 높아진다는 결과를 얻었다.

4.3 설계 변수 최적화

Table 1의 조건으로부터 유연 힌지의 강성은 스테이지 제작에 사용된 압전 소자의 강성보다 1/10 이하의 강성을 가져야 충분한 변형을 할 수 있다. 각 유연 힌지의 강성 값은 압전 소자 구동기 강성 120e6 N/m의 1/40 이하인 3e6 N/m 이하가 되어야 하며, 스테이지의 상단에 부착될 물체의 질량을 고려하면 스테이지의 공진 주파수는 최소 200 Hz 이상이 되도록 설계 조건을 제시하였다. 이와 같은 모든 설계 조건을 만족시키는 유연 힌지 관련 변수는 R, t, b에 대해 각각 3, 1.69, 40 mm로 결정하였다. 또, 스테이지 구동 거리 10 μ m에 대해 힌지가 받는 최대 응력은 14.1 MPa 정도이며, 설계 기준이 되는 응력의 한계치 170 MPa에 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. 11에서 나타난 각 노치마다 상하좌우로 0.2 mm의 가공 오차를 주고 해석하여 노치 중에서 가공 오차를 주고 해석하여 노치 중에서 가공 오차의 영향을 가장 많이 받는 노치에 대한 해석을 수행하였다.

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

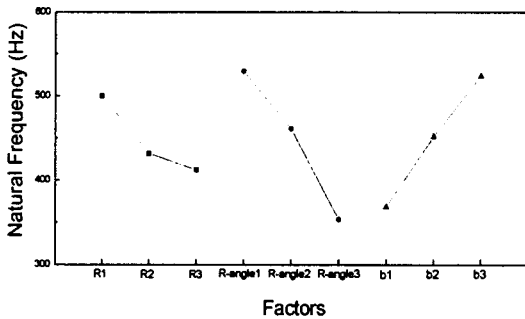


Fig. 10 Effects of design factors

5.1 스테이지 제작

앞서 실시한 모델링 및 해석 결과를 반영한 최종 설계에 의하여 실제 초정밀 3 축 스테이지를 제작을 하였다. 이동부의 질량을 최소화하기 위해 이동부의 형상을 변경시켰으며, 유연 힌지의 대칭성과 제작상의 편의를 위해 Fig. 12 의 그림과 같이 유연 힌지를 제작하였다. 대상 유연 힌지에 대한 해석 결과 강성은 2.9528e6 N/m 으로 8 개의 노치를 가지는 유연 힌지와 거의 같은 강성을 얻을 수 있었다.

Fig. 13(a)는 실제 제작된 초정밀 스테이지의 사진이며, Fig. 13(b)는 제작된 스테이지에 대한 유한요소 3 차원 모델이다.

최종 설계에 따라 제작된 스테이지의 재원은 Table 3 에 정리하였으며, 재질은 Al 7075-T6 이며, 스테이지 이동부의 질량은 0.796 kg., 이동부에 부착되는 부속품의 질량을 합치면 0.977 kg이 된다.

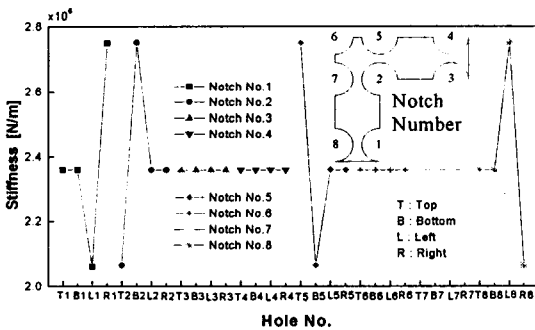


Fig. 11 Results of error analysis on notch positions

오차 해석에 대한 결과는 Fig. 11 과 같이 1· 8 번, 2· 5 번 노치가 각각 좌우 방향과 상하 방향으로 나타나는 제작 오차에 대해 큰 강성 변화를 보였다. 그리고, 나머지 노치들은 제작 오차에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

또한 6 번 노치는 유연 힌지 특성에 거의 영향을 주지 않는 것으로 판명되어 제작의 편의를 위하여 Fig. 12 와 같이 그 형상을 변화시켰다. 이와 같이 해석 결과를 적용하고 제작의 편의를 고려한 최종 설계를 하였다.

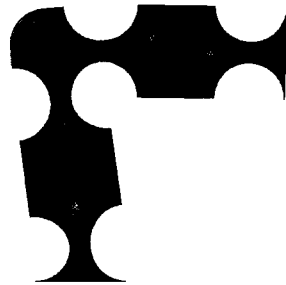


Fig. 12 Zoomed view of flexure hinge

5. 초정밀 스테이지의 제작 및 동특성 실험

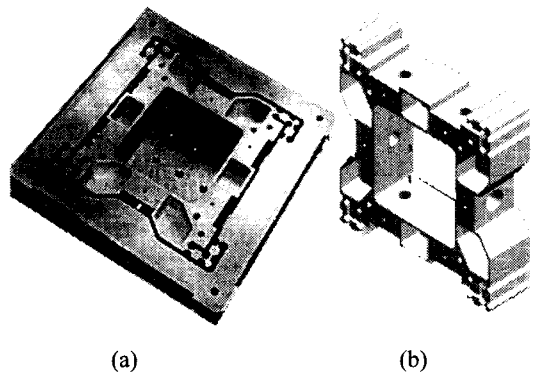


Fig. 13 Developed fine stage: (a) actual fine stage, (b) 3D model of the fine stage

Table 3 Specifications of prototype stage

Category	Item		Data
Stage	Material	Type	Al 7075-T6
		Density	2810 kg/m ³
		Modulus of Elasticity	72 GPa
	Mass of moving part		0.796(0.977) kg

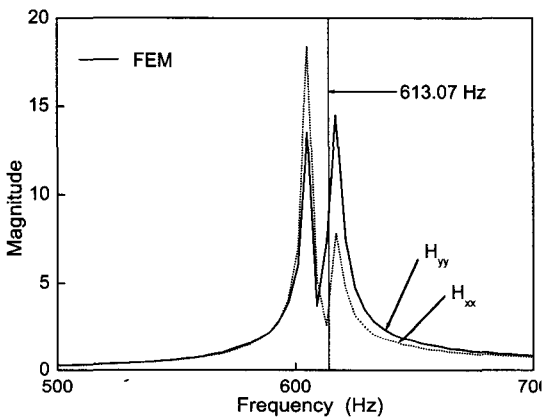


Fig. 14 Frequency response and the natural frequencies of stage moving part without accessories

5.2 해석 검증 실험

설계, 모델링 및 해석 결과에 대한 검증을 위해 실제 제작된 스테이지에 대한 동특성 실험을 수행하였다. 실험은 수식 및 유한 요소 해석 결과와 비교하기 위하여 구동기와 부속품을 설치하지 않은 상태에서 충격 가진 실험을 실시하였다.

Fig. 14 에서는 실제 측정된 스테이지의 고유진동수와 수식 및 유한 요소 해석에 의하여 계산되어진 고유진동수를 나타내었다. 그림에서 곡선은 스테이지의 주파수 응답 곡선을 나타내고 있으며, 수직선을 이용하여 1 차 고유진동수 값을 나타내었다. 주파수 응답 함수를 살펴보면 605 Hz, 617 Hz 의 두 개의 고유진동수가 관측되고 있다. 이와 같은 특성은 X, Y 방향의 특성이 완전히 일치하지 않기 때문인 것으로 파악된다. X 방향과 Y 방향의 고유진동수의 차이는 Fig. 13 에서 볼 수 있듯이 각 방향에 대한 스테이지의 설계 형태의 차이와 제작 오차에 의해서 유연 힌지가 완전 대

칭을 이루지 못하였기 때문이나 그 차이는 아주 미미한 것을 알 수 있다.

한편 X, Y 방향에 대한 완전 대칭 조건을 가정하고, 유한 요소 해석에서 얻어진 유연 힌지 강성 값을 대입하면 613.07 Hz 의 1 차 고유진동수를 얻을 수 있었다. 해석 결과와 실험 결과를 비교하면 실제 특성과 약 1% 정도의 오차를 가지는 매우 정확한 값을 얻는다는 것을 알 수 있다. 한편, 3.1 절에서 논의한 단순화된 강성식을 이용하면 885 Hz 가 얻어지는 등 고유진동수가 높게 평가되는 경향이 있어 본 연구에서 고려한 유연 힌지의 특수성을 반영하지 못하고 있는 것으로 사료된다.

요약하면, 스테이지의 특성을 해석하기 위하여 제안된 유한 요소 모델링의 단순화 과정 및 해석 과정이 실제 모델의 해석에서 매우 높은 신뢰도를 가지므로 설계에 활용할 수 있다는 것을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서 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. 또, 해석 결과에 대한 실험적 검증을 통해 해석 결과에 대한 신뢰도를 증명하였다. 시스템에 대한 유한 요소 모델링 및 해석 과정을 통해 설계에 적합하도록 시스템을 단순화하였다. 직교배열 표를 이용한 실험 계획법을 통하여 설계 조건을 만족하는 최적의 변수 값을 선정하였다. 또한 민감도 해석을 통해 제작 공정상의 오차에 대한 조건을 설정할 수 있었으며, 제작의 편의를 고려하여 스테이지 동특성에 크게 영향을 주지 않는 부분에 대한 형태 변경 등을 포함한 최종 설계를 하였다.

최종 설계에서 선정된 설계 변수들을 기초로 개선된 실제 스테이지를 제작하였으며, 제작된 스테이지를 통한 해석 과정 검증을 위하여 스테이지 동특성 실험을 수행하였다. 검증 실험을 통하여 제안된 모델링 과정 및 해석 방법의 정확성을 확인하였다.

후 기

실험 장치 제작 및 실험을 지원해준 백석 군

과 김만달 군에게 감사드립니다. 본 연구는 과학 기술부에서 지원하는 “첨단기계류 부품” 사업 중 “광모듈 접합 시스템의 핵심부품설계기술개발” 과제의 일부로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Taniguchi, N., Nanotechnology, Oxford University Press, 1996.
2. 한창수, 김경호, 이찬홍, “초정밀 마이크로 위치 결정 스테이지의 설계,” 한국정밀공학회 추계 학술대회논문집, pp. 300 - 304, 2001.
3. Ryu, J. W., Gweon, D.G. and Moon, K. S., “Optimal design of a flexure hinge based XYθ wafer stage,” American Society for Precision Engineering, Vol. 21, pp.18-28, 1997.
4. Yang, R., Jouaneh, M. and Schweizer, R., “Design and characterization of a low-profile micro positioning stage,” American Society for Precision Engineering , Vol. 18, pp.20-29, 1996.
5. Pahk, H. J., Lee, D. S., Park, J. H., “Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation,” Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, pp. 51-63, 2001.
6. Smith, S. T., Flexures, Gordon and Breach Science Publishers, 2000.
7. Xu, W. and King, T., “Flexure hinges for piezo-actuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy, and stress considerations,” American Society for Precision Engineering, Vol. 19, pp. 4-10, 1996.
8. Ryu, J. W. and Gweon, D.G., “Error analysis of a flexure hinge mechanism induced by machining imperfection,” American Society for Precision Engineering, Vol. 21, pp. 83-89. 1997.
9. Ryu, J. W., Lee, S. Q., Gweon, D. G., Moon, K. S., “Inverse kinematic modeling of a coupled flexure hinge mechanism,” Mechatronics, Vol. 9, pp. 657-674. 1999.
10. Elmustafa, A. A., Lagally, M. G., “Flexure-hinge guided motion nanopositioner stage for precision machining: finite element simulations,” American Society for Precision Engineering, Vol. 25, pp. 77-81. 2001.
11. 강중욱, 백석, 한창수, 홍성욱, “초정밀 3 축 이송 스테이지의 개발: 2. 제작 및 성능평가,” 한국정밀공학회지 Vol. 21, No. 3, 2004
12. ABAQUS User’s Manual Ver 5.7, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1997.