

초정밀 마이크로 위치결정 스테이지의 설계

한창수(한국기계연구원), 김경호(한국과학기술원), 이찬홍(한국기계연구원)

Design of the precision micro-positioning stage

C. S. Han(KIMM), K. H. Kim(KAIST), C. H. Lee(KIMM)

ABSTRACT

We present a micro-positioning stage that has minimized geometrical error and can drive in the 4-axis. This stage divided into two parts: $Z\theta_x\theta_y$ motion stage and θ_z motion stage. These stages are constructed in flexure hinges, piezoelectric actuators and displacement sensors. The dynamic model for each stage is obtained and their FE (finite element) models are made. Using the Lagrange's equation, the motion of equation is found. Through the parametric analysis and FE analysis, sensitivity of the design parameters is executed. Finally, fundamental frequencies, maximum stress, and displacement sensitivity for each stage are obtained. We expect that this micro-positioning stage be a useful micro-alignment device for various applications.

Key Words : micro-positioning (마이크로 위치결정), stage (스테이지), flexure hinge (유연 힌지), Piezoelectric actuator (압전 구동기), FEM(유한요소법)

1. 서론

초정밀 마이크로 스테이지는 SPM(Scanning Probe Microscope), 미세조정(microalignment), 미세 가공(microfabrication)과 같은 분야에서 필수적인 장치이다. 이것은 나노미터급의 고정밀, 고속, 부하능력(load capacity)을 요구하며, 여기에 사용되는 구동기로 압전소자(piezoelectric device)를 사용한다. 일반적으로 이런 장치에는 자벌레 방식(inchworm type), 마찰구동 방식(friction drive type)과 유연 힌지 방식(flexure hinge type)이 있다.

마찰구동방식은 압전소자의 전단변형이나 튜브 방식의 구조를 이용해 설계되며, 긴 이동거리를 갖는다. 그러나 구동시의 비선형성에 대한 모델링이나 수명설계에 대한 안정성 확보가 어렵다⁽¹⁾.

자벌레 방식도 긴 이동거리를 갖는 장점이 있으나 한축 방향의 이송을 위해서 여러 개의 압전구동기를 사용해야 하므로 제어가 복잡해지는 단점이 있다⁽²⁾.

유연힌지 방식의 100 μm 정도의 짧은 이송거리 정도에서만 사용이 가능하지만 안정성, 제어성, 정밀도 측면에서 다른 방식에 비해 우수한 특성을 가

지고 있다. 유연 힌지 방식은 변위를 증폭해서 사용하는 방식과 증폭하지 않는 방식으로 나누어 지는데, 변위를 증폭하는 방식은 주로 레버구조를 이용한다. 이 방식은 레버에 의해 메커니즘이 복잡해지고, 구동에 있어서 비선형적 특성이 증가하며, 유연적으로 스테이지의 구동대역이 낮아지게 된다^(3,4). 따라서 압전 구동기의 크기에 비해 스테이지의 크기에 대한 제약이 적은 경우에는 증폭없이 유연한지만을 사용하여 마이크로 스테이지를 설계한다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 변위 확대 메커니즘 없이 유연 힌지만을 이용하여 미세 구동이 가능하고, 고정밀의 이송이 가능한 마이크로 스테이지를 설계하였다

2. 스테이지의 설계

그림 1 에 보여준 스테이지는 4 축으로 구동이 가능한 것으로, $Z\theta_x\theta_y$ 스테이지와 θ_z 스테이지로 구성되어 있다. $Z\theta_x\theta_y$ 스테이지는 3 개의 압전 구동기(PZT 1, PZT 2, PZT 3)와 각 구동기의 양 끝단에 유니버설 힌지가 장착되어 있고, 구동되는 테이블은 θ_z 스테이지 전체가 된다. θ_z 스테이지는 2 개의 압전 구동기(PZT 4, PZT 5)가 서로 회전방향

에 대해 대칭인 위치에 배치되어 있으며, 마찬가지로 양 끝단에 2 차원 힌지가 부착되어 있다. $Z\theta_x$, θ_y 스테이지는 Z 축 구동을 위해서는 압전구동기가 같은 위상으로 같은 정도만큼 이송하며, θ_x 는 중심축에 있는 압전구동기와 양측면의 압전구동기가 서로 반대 위상으로 구동하게 된다. θ_y 방향 이송을 위해서는 양측면에 있는 압전구동기가 서로 반대 위상으로 구동하게 된다. θ_z 테이블 위에는 반도체 장치의 경우 웨이퍼 척(Wafer Chuck)과 같은 부하가 놓여있다.

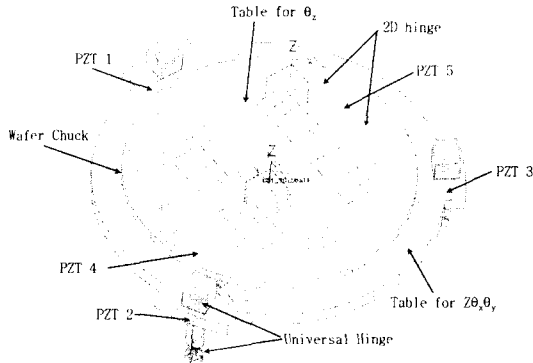


Fig. 1 Schematic representation of the micro-positioning stage

여기에 사용된 압전 구동기는 $37 \times \phi 10 \text{ mm}^3$ 의 크기를 갖고, 500V 에서 $25 \mu\text{m}$ 의 이송범위를 갖는다. 변위측정을 위해서는 측정 정도가 10nm 이하의 정전 용량형 센서를 선정하였다.

이 스테이지의 설계의 주요 목표는 구조적인 오차를 최소한으로 줄이면서 구동방향의 대역 및 비구동방향의 강성을 최대로 높이는 것이다. 이는 이 스테이지가 X-Y 스테이지위에서 위치보정을 위해 사용될 때, X-Y 방향으로의 영향을 최소화하기 위한 것이다.

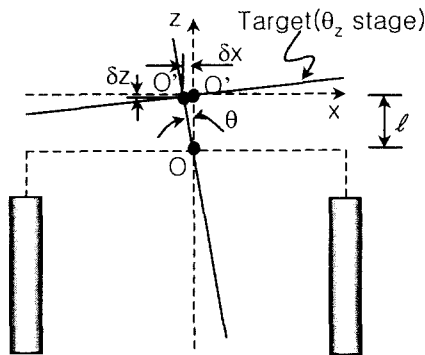


Fig. 2 Diagram of decoupled moving structure

이 스테이지가 가지는 기본적인 구조의 특징은 그림 2 에서와 같이 기존의 구동기는 회전을 일으

키는 중심(O)과 실제 이송하고자 하는 장치의 중심(O')이 서로 거리 l 만큼 떨어져 있기 때문에 θ_y 방향으로 θ 만큼 회전했을 때, x, z 방향으로 다음과 같은 기하학적 오차가 발생된다.

$$\delta x = l \sin \theta \quad (1)$$

$$\delta z = l(1 - \cos \theta) \quad (2)$$

또한 이 상태에서 θ_z 스테이지가 회전을 하게 되면 x, y 방향으로 미소 오차량이 추가적으로 발생한다. 본 연구에서 제안한 스테이지는 이 문제를 해결하기 위해 $l=0$ 이 되도록 설계하였다. 따라서 방향으로의 회전 중심이 O'에 위치하게 되어 오차량 δx , δz 가 없어짐을 물론 θ_z 스테이지가 O'에 위치하지 않고 z 축상에 어느 곳에 있던지 회전에 의한 x, y 방향의 오차가 발생하지 않게 된다.

3. 모델링

3.1 θ_z 스테이지의 모델링

θ_z 스테이지가 중심에 대칭으로 배치된 구조를 가지고 있다. 또한 해석의 편의를 위해 각각의 강체(1,2,3)는 집중질량으로 취급하였다. 압전 구동기와 중앙의 지지부(3)의 양끝에 달린 유연 힌지는 스프링과 댐퍼로 치환하여 모델링 하였다.

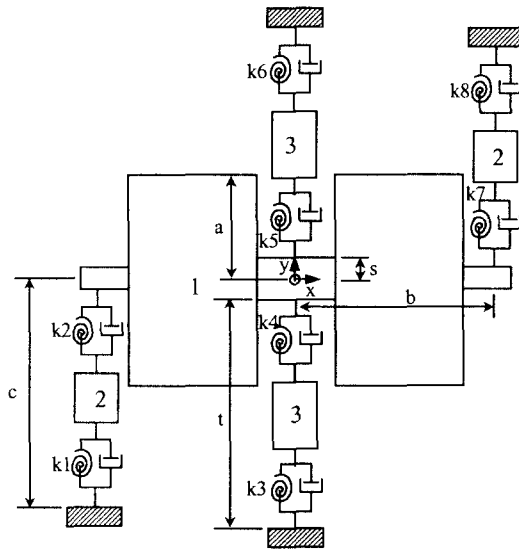


Fig. 3 Modeling of the θ_z stage

압전소자는 자체의 강성과 댐핑 성능이 있으므로 모델링 시에 이를 고려하였다.

3.2 $Z\theta_x\theta_y$ 스테이지의 모델링

$Z\theta_x\theta_y$ 스테이지는 중심에서 같은 거리(R)로 120 간격으로 배치된 대칭적인 구조로 3 개의 압전

구동기가 장착되어 있다. 압전구동기의 양끝단에 유니버설 유연 힌지를 장착했기 때문에 세 방향에 대한 기본적인 모델링의 구성은 같지만 θ_x , θ_y 방향의 구동에 대한 스프링 계수와 z 축 방향의 스프링 계수는 서로 달라지게 된다.

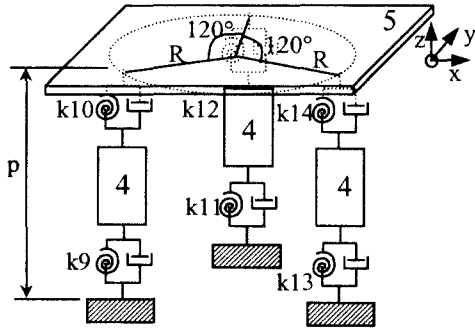


Fig. 4 Modeling of the Z θ_x θ_y stage

3.3 운동 방정식 유도

Lagrange's equation 은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{\theta}_i} + \frac{\partial V}{\partial \theta_i} = \bar{F}_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

이때, T , R , V 는 각각 운동에너지, 손실함수, 위치에너지이고, F 는 외력을 나타낸다.

그리고 수식적으로는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T [m] \dot{\theta}, \quad R = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T [c] \dot{\theta}, \quad \text{and} \quad V = \frac{1}{2} \bar{\theta}^T [k] \bar{\theta} \quad (5)$$

여기서 $[m]$, $[c]$, $[k]$ 는 각각 질량, 댐퍼, 스프링 행렬을 나타낸다. Fig. 4, Fig. 5 의 모델에 대한 운동방정식은 행렬형식으로 다음과 같이 주어진다.

$$[m] \ddot{\theta} + [c] \dot{\theta} + [k] \theta = \bar{F} \quad (6)$$

위 식으로부터 고유치(eigenvalue)와 정상모드(normal mode)를 구할 수 있다. 또한 이 식을 2 차 미분식으로 비연성화하여 정리하면 강제 가진에 대한 구동 방정식을 시간에 대해 구할 수 있다. 여기서는 그 과정을 생략하고, 해석 결과만을 보여줄 것이다.

3.3 유한요소 모델링

동역학 모델링과 더불어 유한요소 해석을 스테이지 전체에 대해 수행하였다. 이는 강체로 모델링했던 각 질량들의 고유진동수와 변형을 고려할 수 있어서 복잡한 경계조건이나 요소별 특성에 대해 해석할 수 있기 때문이다. 해석을 위해 I-DEAS S/W 을 사용하여 3 차원 모델링을 하였으며, 각 스테이지 별로 모델링을 수행하였다. 독립적인 해석 결과를 얻기 위해 Z θ_x θ_y 스테이지를 해석할 때는 θ_z 스테이지는 집중질량으로 등가치리 하였으며, 이때의 물성치는 모델링을 통해 얻은 결과를 사용하였

다. 이는 두 스테이지가 가지는 각각의 고유 진동수와 모드를 명확히 파악하기 위한 것이다. 압전구동기는 해석 시 등가의 질량으로 대체하여 모델링하였다. 해석은 압전구동기의 변위를 경계조건으로 주어 일정한 힘에 대한 변위를 구하는 정적해석과 고유진동수를 구하는 정상모드 해석을 수행하였다. 또한 중력에 의한 처짐, 최대 응력 해석을 부가적으로 병행하였다.

4. 변수 해석

4.1 설계 변수 해석

이 스테이지의 설계를 위해 사용된 유연힌지는 AI7075 이며, 설계 변수들 중에서 가장 민감한 변수는 힌지의 최소폭으로 이 변수에 대해서 스테이지의 강성을 구하였다. 일단 해석 시에는 비구동방향에 비해 구동방향의 강성이 상대적으로 커야 유리하다. 따라서 먼저 구동방향의 강성에 대한 설계를 수행하였으며, 비구동방향에 대해서는 유한요소해석을 통해 결과를 구하기로 하였다.

또한 이 스테이지가 XY 스테이지위에서 사용될 것을 고려하여 다음과 같은 조건을 설정하였다.

$$f_x > 60 \text{ Hz} \quad (7)$$

마찬가지로 유연 힌지에 집중되는 응력이 힌지 재료의 허용응력을 넘지 않아야 하므로 다음 조건이 요구된다.

$$\sigma_{\theta z_max} < S_f \sigma_{allow} \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta x_max} < S_f \sigma_{allow} \quad (9)$$

여기서 σ_{allow} 는 재료의 허용응력, S_f 는 안전계수이며 0.2-0.5 의 값을 가진다. $\sigma_{\theta x_max}$, $\sigma_{\theta z_max}$ 는 θ 방향의 최대 응력이다.

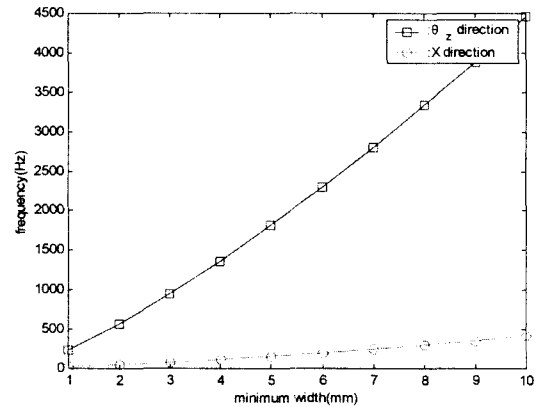


Fig. 5 Frequency analysis of the design parameter in θ_z stage

그림 5 에서는 θ_z 스테이지에서 힌지의 최소폭의 변화에 따른 비구동방향(X)과 구동방향의 주파수를

나타낸 것이다. 힌지의 최소폭이 클수록 두 주파수 간의 차이는 크게 벌어짐을 알 수 있다.

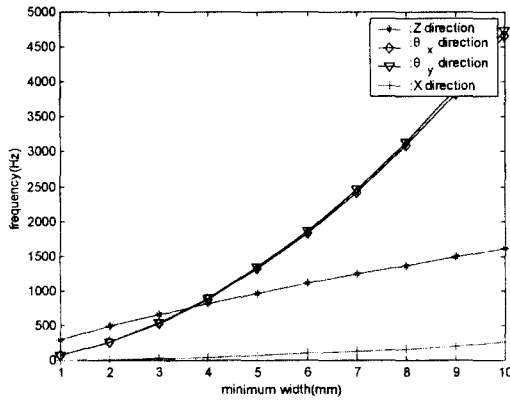


Fig. 6 Frequency analysis of the design parameter in $Z\theta_x$, θ_y stage

그림 6에서는 힌지 최소폭의 증가에 따라 방향의 주파수가 급격히 증가함을 알 수 있으며, Z 방향의 주파수도 X 방향에 비해 상대적으로 큰 비율로 증가함을 알 수 있었다.

힌지에 걸리는 최대응력은 구동범위에 대해 계산한 결과 허용응력보다 매우 적은 값을 가지므로 설계상의 중요한 고려사항이 되지 않는다.

4.2 오차 해석

이 스테이지에서 발생할 수 있는 오차는 이상적인 경우에 기하학적 오차나 상호 간섭에 의한 오차가 발생하지 않으므로 가공 및 조립오차(0.02 mm)와 압전소자의 비선형성으로 인한 오차만을 고려하면 된다. 또한 온도 변화가 있는 환경에서 사용될 경우에는 열에 의한 구조적인 변형 오차도 고려될 수 있다. 일반적으로 XY 스테이지위에서 보상장치로서 작동할 때는 Fig. 2의 배치로 인해 미세 조정에 의한 대상물의 x, y 방향의 이동량은 기하학적인 관계에 의해 간단히 구해질 수 있다.

4.3 유한요소 해석

유한요소 해석은 각각의 스테이지에 대해 별도로 진행되었으며, 해석에 사용된 힌지의 크기는 최소 폭이 2 차원 원형 힌지는 4mm, 유니버설 힌지는 5mm이다. 각 구동방향 및 비구동방향의 고유 진동수를 구한 결과를 제시하였고, 이를 이론적 해석과 비교하여 표 1에 나타내었다.

Table 1 Fundamental frequencies of the stage (Hz)

	θ_z stage		$Z\theta_x\theta_y$ stage			
	θ_z	x	x	z	θ_x	θ_y
이론치	1365	118	67	972	1319	1341
FEM	1346	113	64	960	1301	1330

이론적 해석의 결과가 유한요소해석의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

초정밀 마이크로 위치결정 장치에 대해서 힌지에 의해 안내되는 4 축 구동 시스템을 설계하였다. 이 구동시스템은 기하학적 오차를 최소화한 배치로 설계되었으며, 이론적인 모델링과 유한요소해석을 통한 설계의 검증이 수행하였다. 설계상의 민감한 변수인 힌지의 최소폭에 대해서 주파수의 변화를 해석하였으며, 일정한 최소폭에 대해 이론적 해석과 유한요소해석의 결과를 비교한 결과 잘 일치함을 알 수 있었다.

추후의 연구에서는 이 스테이지를 제작하여, 그 성능을 실험하여 해석과의 비교 분석을 시도할 예정이다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원의 기관고유사업과 과기부의 국가지정연구실 사업의 일환으로 이루어졌음을 밝힙니다.

참고문헌

1. J. W. Judy, D. L. Polla, and W. P. Robbins, "A linear piezoelectric stepper motor with submicrometer step size and centimeter travel range," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol 37, No 5, pp. 428 - 437, 1990.
2. V. G. Dudnikov, D. V. Kovalevsky, and A. L. Shavalin "Simple, high precision linear-motor-driven XYθ positioner(walker)," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol 62, no.10, pp. 2492, 1991.
3. F. E. Scire, E. C. Taegue, "Piezodriven 50-μm range stage with subnanometer," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol 49, no.12, pp. 1735-1740, 1978.
4. S. H. Chang and B. C. Du, "A precision piezodriven micropositioner mechanism with large travel range," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 69, No. 4, pp. 1785-1792, 1998
5. C. W. Lee and S. W. Kim, "An ultraprecision stage for alignment of wafers in advanced microlithography," *Precision Eng.*, Vol. 21, No. 2/3, pp. 113-122, 1997.