

Flexure 기구를 채용한 초정밀 스테이지의 설계

안일혁¹, *최우천²

¹ 고려대학교 기계공학과 대학원, ² 고려대학교 기계공학과

Design of an ultra precision stage of flexure mechanisms

I. H. Ahn¹, *W. C. Choi²

¹ Dept. of Mech. Eng., Korea Univ., ² Dept. of Mech. Eng. Korea Univ.

Key words : Stage, Flexure Hinge, Lever, Magnification Ratio, Travel Range, Design Parameter, Neck Thickness

1. 서론

유연 힌지 구조를 적용한 초정밀 스테이지는 stick-slip 현상, 백래시가 없고, 연속적인 변위의 생성이 가능하며 윤활이 필요 없는 장점 때문에 초정밀 위치 결정 기구에 널리 사용되고 있다. 기존의 초정밀 스테이지는 대변위 위치 제어와 미소변위 제어에 필요한 스테이지가 분리되어 구동되는 듀얼 타입의 스테이지 구조를 사용하였는데, 최근 들어 AFM 또는 STM 장비에 대변위 위치 제어가 가능한 단일 스테이지가 적용되기 시작하면서 대변위 제어에 필요한 변위 확대 기구에 대한 연구의 중요성이 점차 증가하고 있다. 기존의 압전 소자를 직접 구동하는 경우는 매우 적은 변위만을 얻을 수 있으므로, 보다 큰 변위를 얻기 위하여 주로 지렛대의 원리를 이용한 레버 기구가 변위 확대 기구로써 주로 사용되고 있다.

정밀함을 확보하기 위한 방법으로, 스테이지에 유연 힌지를 채용하는 경우가 많다¹. 이는 백래시 없이 연속적인 변위를 반복적으로 제공할 수 있으며 힌과 변위 사이에 거의 선형적인 관계를 갖는 장점이 있어 자주 채용되고 있다. 또한, 스테이지로서 넓은 구동 범위를 갖기 위해, 변위를 확대할 수 있는 레버가 많이 사용된다². 다중 레버가 사용되기도 하지만, 보통은 단일 레버가 사용된다.

큰 확대비를 얻는데 주요한 요소가 되는 강성의 영향 파악을 위해 여러 시도가 있었다.³⁻⁶ 그러나 지금까지의 연구에서는 스테이지의 변위 확대에 크게 기여하지 못했을 뿐 아니라 레버 구조에 대한 이론적 접근도 없었다.

본 연구에서는 레버에 대한 이론적인 해석을 수행하고, 높은 확대비를 내는 설계변수값을 제안한다. 즉, PZT로 입력 변위를 가할 때, 스테이지에서의 각종 설계변수가 변위 확대비에 미치는 영향을 해석하여, 높은 확대비를 얻도록 레버를 구성하는 최적의 힌지를 설계한다.

2. 확대비와 구동 범위를 위한 해석

2.1 스테이지 해석

연구대상인 스테이지가 Fig. 1에 나타나 있다. 연결부위는 유연 힌지(flexure hinge)로 구성되어 있다. 본 연구에서 추구하는 정밀 스테이지는 높은 확대비와 높은 고유진동수를 요구하고 있다. 본 연구에서의 스테이지는 여러 유연 힌지를 가지고 있기 때문에 힌지가 확대비나 다른 성능에 미치는 영향을 직관적으로 파악하기 어렵다. 최적의 설계를 하기 위한 전 단계 작업으로 유연 힌지들의 최적값을 정하는 작업이 필요하다

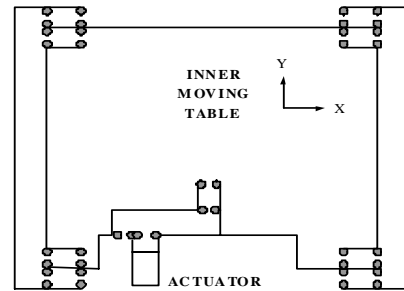


Fig. 1 Schematic of a stage for analysis

스테이지의 구동범위에 레버가 미치는 영향을 이론적으로 구하기 위해, 이 힌지들을 축방향 스프링으로 모델링하였다. 이에 대한 근거로, 유연 힌지가 수직방향을 제외한 타 방향들에 대해서 큰 강성을 가지기 때문이다. 모델링한 결과는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 K_c 는 테이블을 지지하고 있는 힌지들의 강성이고, K_1, K_2, K_{34} 는 레버의 각 부분 힌지의 강성이다. K_1 은 피벗역할이고, K_2 는 입력점이며, K_{34} 는 스테이지로 힘을 전달시켜주는 힌지 3과 4을 하나로 묶은 강성이다. a, L 은 입력점과 피벗 사이, 출력점과 피벗 사이의 길이를 나타낸다.

각 스프링 상수를 Fig. 2로 정의한 상태에서 수식을 전개하면 각 스프링 상수가 레버의 확대비에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 최종 결과는 다음과 같다.

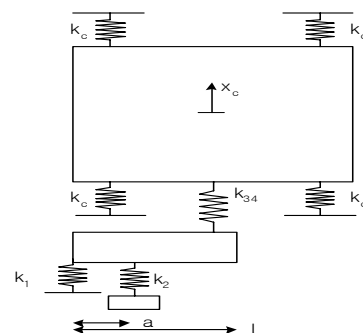
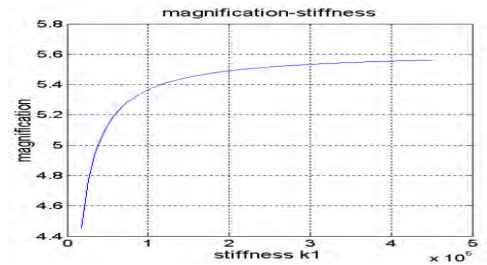


Fig. 2 Stage with spring models for analysis

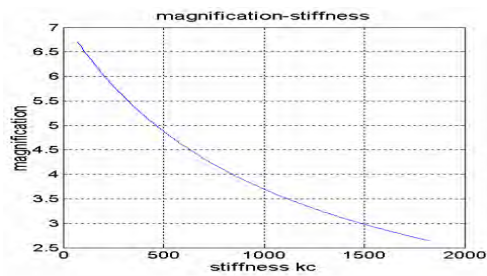
$$\begin{aligned}
 x_2 &= \frac{1}{(k_2 + k_1 B_2)} [-(k_2 - k_1 B_1)x_2 + (k_1 B_3 A + k_{34}(A-1))x_c] \\
 &= C_1 x_2 + C_2 x_c \\
 x_2 &= \frac{1}{(k_2 a + \kappa B_3)} [-(\kappa B_4 - k_2 a)x_2 - (\kappa B_6 A + k_{34}(A-1)L)x_c] \\
 &= C_3 x_2 + C_4 x_c
 \end{aligned} \tag{1}$$

윗 식으로부터 레버의 확대비를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$r = \frac{x_c}{x_2} = \frac{C_1 - C_3}{C_4 - C_2} \quad (2)$$



(a) effect of k_1



(b) effect of k_c

Fig. 3 Effects of design parameters on magnification

여기서 C_1, C_2, C_3, C_4 값들은 Fig. 2의 모델링에서 사용한 강성과 길이로 구성되고, $A, B_1 \sim B_6$ 는 참고문헌[8]에 나타나있다.

앞에서 유도된 확대비 r 에 대한 일부 변수들의 민감도를 확인하였다. Fig. 3에서 보듯이, 각 변수들마다 확대비에 미치는 영향이 적지 않음을 알 수 있다.

실제 스테이지를 설계할 때, 큰 확대비만 만족시켜서는 안 되고, 최소 공진 주파수로 제한되는 응답특성들을 함께 고려한다.

2.2 최대 변위를 위한 레버 힌지 강성 변화

연구목표 중 하나가 스테이지의 큰 구동 범위가기 때문에 확대비와 더불어 스테이지의 변위에 초점을 둔다. 본 연구에서는 레버 확대비에 컴플라이어스와 유사한 개념을 첨가하였다. 구동기에서 가하는 힘을 얼마나 큰 변위로 바꾸는가의 개념으로, $\eta = x_c / F$ 로 정의한다. 이는 단위 힘에 대한 스테이지의 변위를 나타내며, 이 값이 클수록 작은 힘으로 큰 변위를 만들 수 있으나, 스테이지의 강성은 작아져 공진주파수는 작아질 수 있다.

본 연구에서는 확대비와 '출력 변위 / 입력 하중'을 곱한 다음 값을 최대화 하는 강성을 구한다. 즉, 목적함수는 다음과 같다.

$$f = r\eta = \frac{x_c}{x_2} \frac{x_c}{F}$$

K_1 의 변화에 따른 목적함수는 Fig. 5에서 볼 수 있다. 이 그림에서 목적함수를 최적화시키는 K_1 값이 존재하는 것을 알 수 있다.

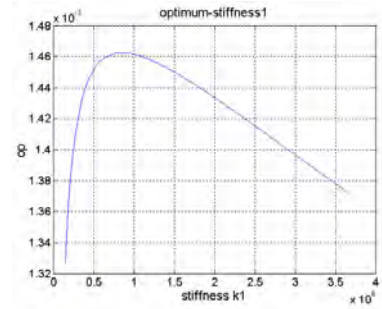


Fig. 4 Objective function as a function of K_1

제안된 레버를 적용하고 유한요소해석을 수행한 결과, 스테이지의 1차 공진 주파수는 34.6Hz이고, PZT 입력이 40 μ m 일 경우 230 μ m이상의 구동범위를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 이 결과는 본 연구에서 추구했던 목표치를 달성한 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 초정밀 위치 정밀도를 갖는 스테이지의 구동 범위를 확대하기 위해 유연 힌지와 레버를 채용한 시스템을 이론적으로 해석했다. 확대비와 이송범위의 증가를 위해 레버 쪽 강성을 변수로 채택했고, 이를 통해 목적함수를 최대화 하는 힌지 강성을 결정할 수 있었으며, 그에 적절한 힌지의 목 두께를 제시할 수 있었다.

참고문헌

1. Font: Times New Roman 9pt.
2. Tusty, J., Smith, S. and Zamudia, I. Paros J.M. and Weisbord L., "How to design flexure hinge", Machine Design, 37, pp.151-157, 1965
2. Furukawa E., Mizuno M. and Hojo T., "A Twin-Type Piezo-Driven Translation Mechanism", JSPE, Vol.28, No.1, pp.70-75, 1994
3. Yakov M. Tseytlin, "Notch flexure hinges: An effective theory", Rev. Sci. Instrum., Vol.73, No.9, pp.3363-3368, September 2002
4. Yingfei Wu and Zhaoying Zhou, "Design calculations for flexure hinges", Rev. Sci. Instrum., Vol.73, No. 8, pp. 3101-3106, August 2002
5. W Xu and T G King, "Mechanical Amplifier Design for Piezo-actuator Applications", IEE, 1995
6. S. H. Chang and B. C. Du, "A precision piezodriven micropositioner mechanism with large travel range", Rev. Sci. Instrum., Vol. 69, No. 4, pp. 1785-1791, April 1998
7. Jae W. Ryu, Dae-Gab Gweon and Kee S. Moon, "Optimal design of a flexure hinge based XY θ wafer stage", Precision Eng., Vol. 21, No. 1, pp. 18-28, 1997
8. 황은주, 민경석, 송신형, 최우천, "유연 힌지 구조의 스테이지 구동범위 확대를 위한 힌지의 목두께 해석," 한국정밀공학회지, 제22권 5호, pp.121-129, 2005