

초정밀 나노 스테이지에서의 다중 변위 확대 기구 해석

민경석*(고려대 기계공학과), 최우천(고려대 기계공학과)

Analysis of Multiple Displacement Magnification Mechanism in Ultraprecision Nano Stage

K. S. Min(Mechanical Eng. Dept., Korea Univ.), W. C. Choi(Mechanical Eng. Dept., Korea Univ.)

ABSTRACT

A displacement magnification mechanism is usually employed in a nano-positioning stage to achieve a large stage motion. A lever mechanism is the most widely used displacement magnifying mechanism. For more large stage motion, double or multiple lever mechanisms can be used. In this case, a more accurate analysis model is needed. This study proposes a more reasonable analysis model for a multiple lever mechanism based on the single lever mechanism model. This paper describes that the high equivalent stiffness of the lever is the most important factor reducing the magnification ratio of the lever mechanism through increasing the deflection of the link and including the axial displacement of the pivot.

Key Words : nano stage, displacement magnification mechanism, flexure hinge, lever mechanism, multiple displacement magnification mechanism

1. 서론

높은 정밀도와 반복성 때문에 압전 소자에 의해 구동되는 나노 스테이지가 정밀 위치 결정기구를 필요로 하는 분야에서 점차로 널리 쓰이고 있다.

유연 힌지가 적용된 나노 스테이지는 스틱-슬립과 백래시현상이 거의 없고, 연속적인 변위를 가지며, 윤활이 필요없다는 장점을 가지고 있다. 그러나 적층된 압전구동기를 사용하게 되는 경우 매우 적은 구동 범위를 가지게 되므로 긴 구동 범위를 가지면서 높은 정밀도를 원하는 경우 압전 구동기의 입력 변위를 확대시키는 변위 확대 기구를 사용하게 되었다.

유연 힌지와 변위 확대 기구를 적용한 초정밀 스테이지는 유연 힌지, 스테이지의 강성 평가 및 변위 확대 기구에 대한 연구가 각각 내지는 종합적으로 진행되어 왔다. Paros 와 Weisbord[1]는 유연 힌지의 강성을 평가하였으며, 유연 힌지의 강성은 힌지의 반지름과 최소두께에 영향을 받고, 반지름 대비 최소두께가 아주 작은 경우에 한하여 근사한 결과를 얻음을 제시하였다. Ryu 등[2,3]은 유연 힌지와 강제로 가정된 링크로 구성된 스테이지를 Lagrange

방정식을 통해 지배 방정식을 구하였으며, Jouaneh 와 Yang[4,5]은 변위 확대 기구를 본격적으로 스테이지의 해석에 포함시켰으며, 이를 바탕으로 스테이지의 정적 및 동적 해석을 시도하였다. Min 과 Choi[6]는 변위 확대 기구를 오일러 빔으로 가정하여 이의 처짐 및 변위 확대 기구의 해석을 통해 최종 변위를 예측하는 방법을 제시하였다.

변위 확대 기구는 압전 구동기의 변형에 의한 스테이지의 적은 최종 변위를 확대시켜 보다 큰 최종 변위를 얻고자 하는 경우 사용되는데, 보다 큰 변위를 위해 단일 변위 확대 기구가 아닌 다중 변위 확대 기구를 사용하는 경우에 대한 본격적인 연구가 거의 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 단일 변위 확대 기구를 사용한 경우의 오일러 빔 이론에 다중 변위 확대 기구를 적용하여, 보다 일반적인 해석 방법을 제시하고자 하며, 본 연구를 통하여 다중 변위 확대 기구를 사용할 경우 각 확대 기구에서의 등가 강성의 증가가 변위 확대를 감소시키는 역할을 하게 되며, 변위 확대 기구의 수가 증가할수록 이 영향이 계속 큰 값으로 증가하게 됨을 제시하였다.

2. 스테이지 해석 모델과 변위 확대 원리

2.1 변위 확대 기구의 오일러 빔 모델

스테이지의 이동자를 압전 소자로 직접 구동시키는 방법과는 달리, Fig. 1 처럼 변위 확대 기구를 사용하여 스테이지를 구동시키는 방법은 압전 구동기의 변위보다 큰 출력 변위를 얻을 수 있기 때문에 기존의 나노 스테이지에서 큰 구동 범위를 얻기 위해 자주 사용되어 왔다. 스테이지의 실제 구동시, 입력 변위에 대한 출력 변위의 확대비는 링크의 변형이 고려되지 않은 경우의 확대비보다 작은 값을 가지게 된다. 이의 여러 원인 중에서 링크의 처짐이 확대비 감소에 가장 크게 영향을 미치므로, 이의 해석을 위하여 레버와 같은 구조의 변위 확대 기구를 사용하는 나노 스테이지의 성능 평가시, Fig. 2 와 같은 오일러 빔 모델을 구성하고, 링크의 처짐에 관한 식 (1)-(2)와 같은 처짐 방정식을 제시하였다.

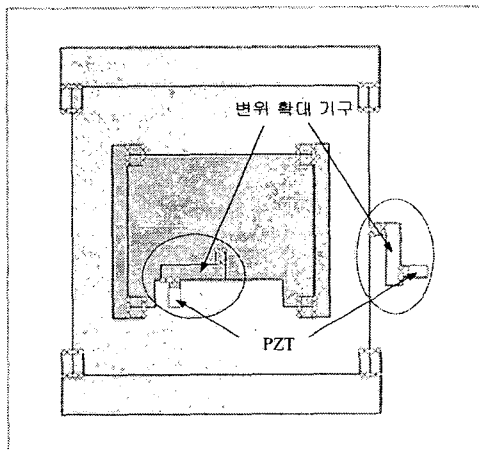


Fig. 1 Structure of nano-positioning stage

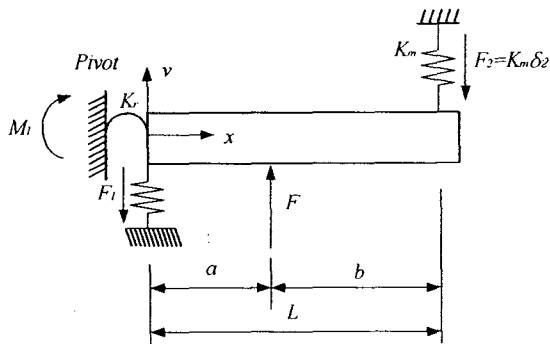


Fig. 2 Euler-Beam model for deflection of the single lever

$$EIV = \frac{M_1}{2}x^2 - \frac{R_1}{6}x^3 + \frac{F}{6}(x-a)^3 + c_1x \quad (1)$$

$$c_1 = \frac{1}{L} \left(EI\delta_c - \frac{M_1}{2}L^2 + \frac{R_1}{6}L^3 - \frac{F}{6}b^3 \right) \quad (2)$$

2.2 변위 확대 원리

일반적으로 변위 확대는 지렛대의 원리에 의하여 얻어지며, Fig. 2의 단일 레버 모델에서 링크의 처짐이나 기타 확대비를 감소시키는 요인을 제외한 경우의 기하학적인 확대비는 L/a 가 된다. 보다 큰 변위 확대를 얻기 위해 단일 레버가 아닌 Fig. 3 처럼 두개 이상의 다중 레버를 사용하게 되는 경우 입력 변위 Δu_i 와 출력 변위 Δv_n 는 다음의 식 (3)과 같은 관계가 성립하며, n 개의 레버에 대한 최종 출력 변위 Δv_n 와 입력 변위 Δu_i 은 식 (4)와 같은 관계를 가진다.

$$\Delta v_i = \frac{L_i}{a_i} \Delta u_i \quad (3)$$

$$\Delta v_n = \frac{L_n L_{n-1} \cdots L_1}{a_n a_{n-1} \cdots a_1} \Delta u_i \quad (4)$$

식 (4)에 의하면 레버의 수를 증가시키기에 따라 최초의 입력 변위보다 매우 큰 최종 출력 변위를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 단 식 (3)과 (4)의 경우 확대비를 감소시키는 요인들을 고려하지 않은 상태에서의 확대비이므로, 이러한 요인들을 고려한 경우의 해석은 실제 확대비가 식 (4)와 같은 단순한 각 레버의 기하학적 확대비의 곱이 아니고, 각 레버에 작용하는 외력도 고려해야 한다. 본 연구에서는 다중 변위 확대 기구를 사용하는 경우, 기존의 단일 레버를 사용하였을시 적용한 오일러 빔 이론에 레버의 증가에 따른 외부 등가 강성의 영향을 포함한 일반적인 다중 변위 확대 기구의 해석 방법을 제시하였다.

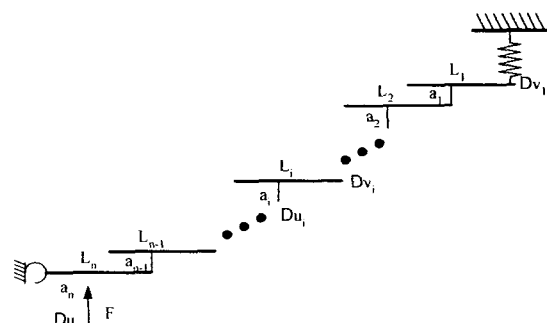


Fig. 3 Euler-Beam model for deflection of the lever

3. 다중 변위 확대 기구 해석

3.1 등가 강성 해석

본 장에서는 앞서 Fig. 3의 다중 레버 기구 중에서 임의의 레버에 해당하는 i 번째 레버에서의 등가 강성 모델을 Fig. 4와 같이 고려하였다. i 번째 레버에 작용하는 $i-1$ 번째 레버까지의 등가 강성을 K_{mi-1} 으로 정의하였으며, i 번째 레버 기구에서는 외부 선형 스프링으로 작용한다고 가정하였다. Fig. 4의 i 번째 레버에서의 힘-모멘트 평형, 힘-변형, 그리고 굽힘 강성 K_{ri} 의 변위 입력부에 해당하는 등가 선형 강성은 다음의 식 (5)-(10)과 같이 나타낼 수 있다. 단, 식 (9)에서 r_i 는 i 번째 레버의 기하학적인 확대비이며 L_i/a_i 이다.

$$M_1 - F_{in}a_i + F_{out}L_i = 0 \quad (5)$$

$$F_{out} = K_m \delta_{out} \quad (6)$$

$$F_{in} = K_m \delta_{in} \quad (7)$$

$$M_1 = K_r \theta \quad (8)$$

$$\delta_{out} = r_i \delta_{in} \quad (9)$$

$$K_r = K_{eqi} a_i^2 \quad (10)$$

식 (6)-(10)을 모멘트 평형 방정식 (5)에 대입하여 정리하면 다음의 식 (11)과 (12)를 얻을 수 있다.

$$K_r \theta = K_{eqi} a_i^2 \theta = F_{in} a_i + K_{mi-1} \delta_{out} L_i \quad (11)$$

$$= F_{in} a_i + K_{mi-1} r_i \delta_{in} L_i$$

$$K_m \delta_{in} = (K_{eqi} + r_i^2 K_{mi-1}) \delta_{in} \quad (12)$$

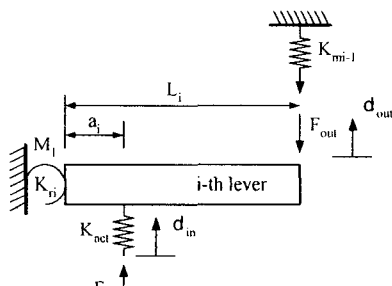


Fig. 4 Euler-Beam model for deflection of the i -th lever

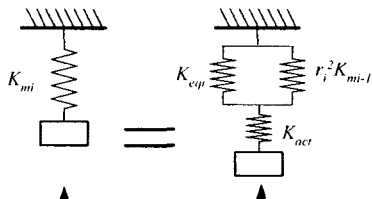


Fig. 5 Equivalent stiffness of i -th lever

윗 식 (12)에서 K_{mi} 는 i 번째 레버의 입력부에 작용하는 등가 강성이자 $i+1$ 번째 레버에서는 외부 스프링으로 작용하는 등가 강성이다. 식 (12)에 K_{act} 의 영향을 포함하여 적용할 경우 i 번째 레버까지의 등가 강성에 관한 다음과 같은 식을 구할 수 있게 된다.

$$K_{mi} = \frac{K_{act} (K_{eqi} + r_i^2 K_{mi-1})}{K_{act} + K_{eqi} + r_i^2 K_{mi-1}} \quad (13)$$

식 (13)은 K_{act} , K_{eqi} , $i-1$ 번째 레버까지의 등가 강성 K_{mi-1} 그리고 i 번째 레버까지의 등가 강성 K_{mi} 가 Fig. 5와 같은 구조로 이루어져 있음을 보여 준다. 식 (13)은 또한 레버 기구가 추가될수록 그리고 각 레버의 확대비가 증가할수록 각 레버에서의 등가 강성 K_{mi} 가 증가하고 있음을 보여 준다.

3.2 다중 변위 확대 기구 해석

앞서 구한 다중 레버의 등가 강성을 Fig. 6에 나타낸 것처럼 이중 레버 기구에 적용하였고, 이 결과를 FEM 결과와 비교하였다. 레버의 기하학적인 확대비는 1차, 2차 레버 각 6.12와 2.86이며, 모든 유연 힌지는 2.5mm의 반지름을 가지고, 각 유연 힌지의 최소 두께는 다음의 Table 1에 나타났다.

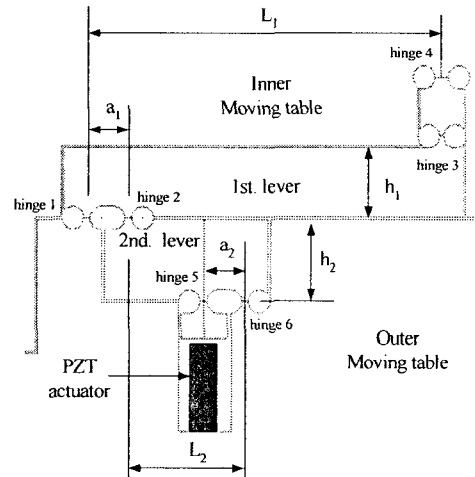


Fig. 6 Structure of double lever mechanism

Table 1 Minimum thickness of flexible hinges

hinge	thickness t(mm)
hinge 1,6 (pivot)	1.35
hinge 2,5 (actuator)	1.1
hinge 3	1
hinge 4	3

해석에 의한 1 차 레버의 확대비는 5.14 이며, 2 차 레버의 확대비는 1.27 이다. 1 차 레버의 경우보다 2 차 레버의 확대비가 기하학적인 확대비보다 매우 크게 감소하였다.

1 차 레버에 작용하는 외부 등가 강성을 K_{m0} 이라 하면, K_{m0} 은 스테이지의 이동자의 강성이 되며 그 값은 $1.31 \times 10^3 M/mm$ 이다. 이 값을 식 (13)에 적용하여 1 차 레버와 2 차 레버의 등가 강성을 구하면 각각 K_{m1} 와 K_{m2} 가 된다. K_{m2} 는 K_{m1} 에 비해 매우 큰 값을 가지며, 이로 인해 2 차 레버 해석시 피봇에서의 축방향 변위의 영향이 커짐을 알 수 있다. 피봇에서의 축방향 변위는 1 차 레버의 경우 3.9% 정도이나, 2 차 레버에서는 7.1%로 증가하여 확대비 감소에 매우 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 피봇에서의 축방향 변위를 고려한 2 차 레버의 확대비는 1.98 로 피봇에서의 축방향 변위를 고려하지 않고 단순히 출력변위와 입력변위만을 고려한 확대비 1.27 보다 기하학적인 확대비에 근사하게 나오고 있음을 알 수 있으며, 2 차 레버의 축방향 변위를 고려한 처짐과 FEM 처짐 결과를 Fig. 7 에 도시하였다.

레버의 처짐에 영향을 가장 크게 미치는 요소는 각 레버에서의 외부 등가 강성이며, 1 차 레버에서는 K_{m0} 가 2 차 레버에서는 K_{m1} 이 각각 외부 등가 강성으로 작용한다. 증가된 외부 등가 강성으로 인해 레버의 회전이 제약을 받게 되며, 이로 인해 레버의 처짐이 증가하는 현상을 겪게 된다. 다음의 식 (14), (15)에 기하학적인 확대비에 대한 실제 해석으로 구한 확대비를 비교하여 확대비 감소를 비교하였다.

$$mag.\ ratio.\ loss)_{1st_lever} = \frac{5.14}{6.12} = 0.84 \quad (14)$$

$$mag.\ ratio.\ loss)_{2nd_lever} = \frac{1.98}{2.86} = 0.69 \quad (15)$$

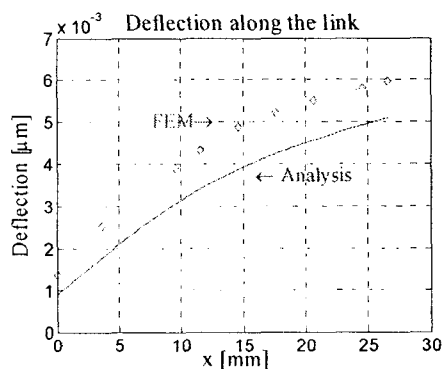


Fig. 7 Deflection of the 2nd lever

기하학적 확대비에 대한 확대비 감소는 1 차 레버는 약 16%, 2 차 레버는 약 31%로 나타났으며, 이로 인해 2 차 레버에서의 처짐이 훨씬 크게 나타났음을 알 수 있다.

4. 결론

다중 변위 확대(레버) 기구의 해석을 통해 변위 확대 기구의 수가 증가함에 따라 각 기구에서의 등가 강성이 매우 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 등가 강성의 증가로 인하여, 1 차 레버에서는 피봇의 축방향 강성과 외부 등가 강성이 매우 큰 차이를 보이지만, 레버의 수가 증가함에 따라 이 차이가 감소하여 피봇에서의 축방향 변위가 확대비에 매우 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 또한 레버의 처짐에 가장 큰 영향을 미치는 외부 등가 강성의 증가에 의해 레버의 처짐량을 증가시켜 레버의 확대비를 감소시키고 있음을 알 수 있다.

따라서 단일 변위 확대 기구보다 큰 출력 변위를 얻고자 사용하게 되는 이중 내지는 다중 레버 기구의 경우 원하는 변위 확대를 기대하기 어려우며, 본 연구에서 제시된 다중 변위 확대 기구의 해석을 통해 이를 증명하였다.

참고문헌

1. J. M. Paros and L. Weisbord, How to design flexure hinge? Machine Design, 37, pp. 151-157, 1965.
2. J. W. Ryu, D. G. Gweon and K. S. Moon, Optimal design of a flexure hinge based XYθ wafer stage? Precision Eng., Vol. 21, pp. 18-28, 1997.
3. J. W. Ryu, D. G. Gweon, Error analysis of a flexure hinge mechanism induced by machining imperfection? Precision Eng., Vol. 21, pp. 83-89, 1997.
4. Y. Renyi, J. Musa and S. Rudolph, Design and characterization of a low-profile micropositioning stage? Precision Eng., Vol. 18, pp. 20-29, 1996.
5. J. Musa and Y. Renyi, Modeling of flexure-hinge type lever mechanisms? Precision Eng., Vol. 27, pp.407-418, 2003.
6. K. S. Min and W. C. Choi, Analytical prediction of stiffness and motion of flexure hinge mechanism? Proceedings of ICPT 2004, pp. 261-266, 2004.