

능동형 진동제어를 위한 초정밀 마이크로 스테이지

김화수, 조영만, *김종원
 서울대학교 기계항공공학부

Ultra-Precision Micro-Stage for Active Vibration Control

H. S. Kim, Y. M. Cho, *J. W. Kim
 Dept. of Mech. and Aerospace. Eng., Seoul Nat'l Univ.

Key words : Micro-Stage, Lever-linkage, Physics-based Modeling, Model uncertainties, μ -synthesis, Active Vibration Control

1. 서론

최근 반도체, 디스플레이 및 초정밀 가공 산업의 발전과 함께 초정밀 환경 조성의 필요성이 대두됨에 따라 마이크로 미터 단위의 미소 진동을 제어하기 위한 노력이 계속되고 있다. 기존의 수동형 제진 시스템의 경우 시스템의 공진 주파수가 낮아 지도록 설계함으로써 비교적 적은 비용과 추가적인 외부 에너지의 소모 없이 간단하게 공진 주파수 이상의 주파수 영역에서 제진 효과를 기대할 수 있으나 실제로 수 Hz 영역까지 시스템의 공진 주파수를 낮추는 것은 어려우며 또한 설계된 제진 시스템의 크기와 중량은 커질 수 밖에 없는 실정이다. 따라서 수 Hz의 저주파 영역에서 제진 성능을 확보하기 위해서는 능동형 제진 시스템의 구축이 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 수직축 방향의 병진 운동과 수평 두 축 방향에 대한 회전 운동이 가능한 3 자유도의 마이크로 스테이지를 설계하고 물리적 모델링을 통해 마이크로 스테이지에 존재하는 불확실성을 구조화하여 이를 통해 강인 제어를 설계함으로써 마이크로 미터 단위의 진동을 수 Hz의 저주파 영역에서 제어할 수 있는 능동형 제진 시스템을 개발하였다.

2. 마이크로 스테이지의 설계

본 연구에서 개발한 3 자유도 마이크로 스테이지는 Fig. 1 과 같이 하판과 상판 그리고 3 개의 구동 모듈로 이루어져 있다. 각각의 구동 모듈은 초정밀 구동이 가능하게끔 강성이 높고 구형 분해능에 한계가 없는 압전 구동 소자를 구동기로 사용하고 있으며 플렉서 힌지를 통해 그 운동이 상판에 전달되도록 하였다. 한편 레버 링크지를 사용하여 압전 구동 소자를 수직 구동이 아닌 수평 구동이 되게 함으로써 마이크로 스테이지의 크기를 줄일 수 있었으며 수평 방향의 강성을 최대로 확보함으로써 제진 주파수 영역 내에서 수평 방향의 공진 모드가 나타나지 않도록 하였다. 구동 모듈의 배치는 서로 간의 간섭을 최소화하도록 회전 형으로 이루어졌으며 상판도 원형으로 설계하여 모든 방향에서 대칭이 되도록 하였다.

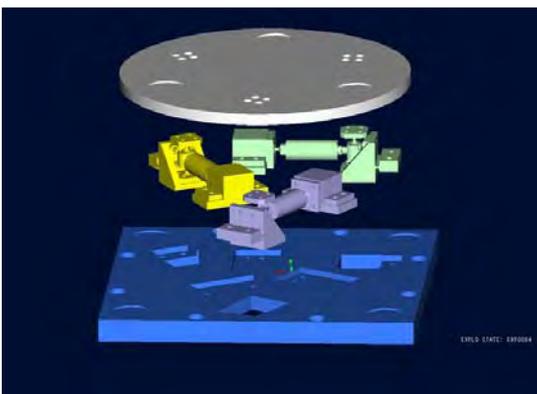


Fig. 1 Schematic diagram for the 3-DOF micro-stage

3. 마이크로 스테이지의 모델링

마이크로 스테이지의 모델링은 크게 실험적 모델링과 물리적 모델링의 두 단계로 이루어진다. 먼저 FEM 해석을 병행한 실험적 모델링을 통하여 마이크로 스테이지의 동역학적 특성을 살펴 보고 시스템에 존재하는 공진 모드를 확인한다. 이를 바탕으로 질량, 스프링 및 댐퍼로 이루어진 물리적 모델링을 통해 시스템의 변수를 최소화 하고 마이크로 스테이지에 존재하는 불확실성을 구조화하여 추후 강인 제어기의 설계가 용이하도록 한다. 설계된 마이크로 스테이지는 압전 구동 소자에 대한 3 개의 전압 입력들과 각각의 구동 모듈이 상판과 연결된 지점에서의 3 개의 출력 변위들을 갖는 다입력 다출력 시스템이다. 따라서 마이크로 스테이지의 입력 전압에 대한 출력 변위 사이의 전달 함수는 3×3 행렬 $H = [h_{ij}]$, ($i, j = 1, 2, 3$)이 된다. 다음의 Fig. 2 는 500 Hz의 주파수 대역의 랜덤 신호로 1 개의 압전 구동 소자를 가진하는 실험을 통해 얻은 전압 입력에 대한 상판 위의 세 지점에서의 변위 사이의 주파수 응답 곡선 h_{ij} , ($j = 1, 2, 3$)을 보여주고 있다.

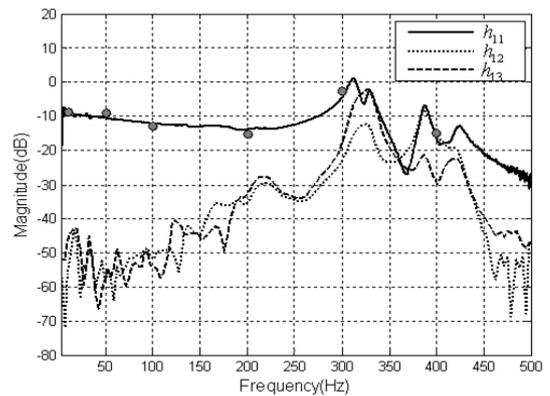


Fig. 2 Frequency response of the micro-stage

Fig. 2 에 나온 것처럼 마이크로 스테이지는 두 개의 공진 모드를 가지고 있으며 150 Hz 이하의 영역에서 가진점과 측정점이 일직선 상에 놓인 h_{11} 의 크기가 h_{12} , h_{13} 와 비교할 때 20 dB 이상의 차이를 보이므로 그 연성율은 무시할 수 있음을 알 수 있다. 마이크로 스테이지가 3 자유도의 운동을 하므로 주파수 응답 곡선만으로는 공진 모드의 운동을 확인하기 어렵다. 따라서 두 개의 공진 모드에 대응하는 운동을 확인하기 위해 FEM 해석을 병행하였고 그 결과 첫 번째 공진 모드가 수평 두 축에 대한 회전 운동, 두 번째 공진 모드가 수직축에 대한 병진 운동에 대응됨을 알 수 있었다. 이와 같은 실험적 모델링의 결과를 바탕으로 각각의 구동 모듈을 스프링(k_i), 댐퍼(c_i , $i = 1, 2, 3$)로 단순화한 물리적 모델링을 수행하였다. 다음의 Fig. 3 은 물

리적 모델링을 위한 자유 물체도를 보여주고 있다.

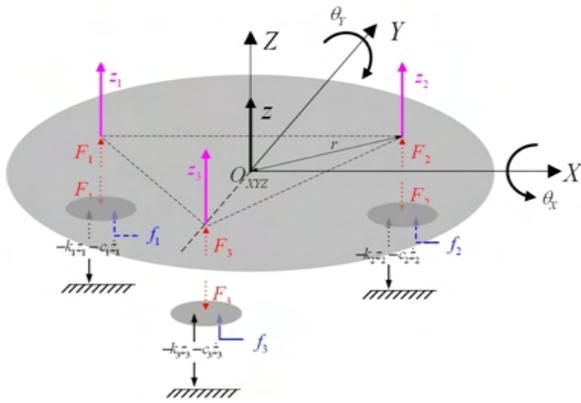


Fig. 3 Free body diagram for the micro-stage

위의 자유 물체도를 바탕으로 마이크로 스테이지의 운동 방정식과 측정점에서의 기구학적 관계를 얻을 수 있고 입력과 출력을 각각 $u = [f_1 \ f_2 \ f_3]^T$, $y = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$ 그리고 상태변수를 $x = [z \ \dot{z} \ \theta_x \ \dot{\theta}_x \ \theta_y \ \dot{\theta}_y]^T$ 로 선택할 때 다음의 상태공간 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx + Du \quad (1)$$

위의 상태 방정식의 시스템 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1+k_2+k_3}{M} & \frac{c_1+c_2+c_3}{M} & \frac{r(k_1+k_2-2k_3)}{2M} & \frac{r(c_1+c_2-2c_3)}{2M} & \frac{\sqrt{3}r(k_1-k_2)}{2M} & \frac{\sqrt{3}r(c_1-c_2)}{2M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{r(k_1+k_2-2k_3)}{2I_{xx}} & \frac{r(c_1+c_2-2c_3)}{2I_{xx}} & \frac{r^2(k_1+k_2+4k_3)}{4I_{xx}} & \frac{r^2(c_1+c_2+4c_3)}{4I_{xx}} & \frac{\sqrt{3}r^2(k_1-k_2)}{4I_{xx}} & \frac{\sqrt{3}r^2(c_1-c_2)}{4I_{xx}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{3}r(k_1-k_2)}{2I_{yy}} & \frac{\sqrt{3}r(c_1-c_2)}{2I_{yy}} & \frac{\sqrt{3}r^2(k_1-k_2)}{4I_{yy}} & \frac{\sqrt{3}r^2(c_1-c_2)}{4I_{yy}} & \frac{3r^2(k_1+k_2)}{4I_{yy}} & \frac{3r^2(c_1+c_2)}{4I_{yy}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{r}{2I_{xx}} & \frac{r}{2I_{xx}} & -\frac{r}{I_{xx}} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}r}{2I_{yy}} & -\frac{\sqrt{3}r}{2I_{yy}} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{r}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}r}{2} & 0 \\ 1 & 0 & \frac{r}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{3}r}{2} & 0 \\ 1 & 0 & -r & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

앞에서 구한 물리적 모델링의 파라미터인 탄성 계수 k_i 과 감쇠 계수 c_i 의 값은 실험적 모델링과 FEM 해석을 통해 얻은 데이터를 바탕으로 추정될 수 있으며 이 때, 마이크로 스테이지의 동역학적 특성이 Fig. 2 에서 살펴본 바와 같이 전달 함수의 대각 원소, 즉 가진점과 측정점이 일직선 상에 놓인 원소들이 지배적이므로 이 값들을 이용하여 추정한다. 다음의 Table 1 은 이와 같은 방법을 통해 추정된 k_i 와 c_i 의 최소값과 최대값을 보여준다.

Table 1 Bounds of the physical parameters

Parameter	Damper	Spring
Min	0.15 (N/μm/s)	1.57(N/μm)
Max	0.45(N/μm/s)	1.85(N/μm)

4. 마이크로 스테이지를 위한 강인 제어기 설계

3 장에서 얻은 물리적 모델링의 결과를 바탕으로 저주파의 보다 넓은 주파수 대역에서 우수한 제진 성능을 가지는 강인제어기를 설계한다. 이 때 물리적 모델의 탄성 계수와 감쇠 계수가 일정한 크기 내에서 변화한다고 생각하

고 이와 같은 변화를 다음과 같이 구조화하여 이를 통해 강인 제어기를 설계하도록 한다.

여기서 $\bar{k}_i = \bar{k}_i + \Delta_{k_i} \delta_{k_i}$, $\bar{c}_i = \bar{c}_i + \Delta_{c_i} \delta_{c_i}$ (2) 여기서 \bar{k}_i 와 \bar{c}_i 는 탄성 계수 및 감쇠 계수의 최대값과 최소값의 평균값이고 δ_{k_i} 와 δ_{c_i} 는 최대값과 최소값의 차의 평균값에 해당하며 Δ_{k_i} 와 Δ_{c_i} 는 절대값이 1 보다 작은 외란에 해당한다. 설계된 강인 제어기를 통한 5~60 Hz 사이의 외란에 대한 마이크로 스테이지의 제진 성능은 Fig. 4 와 5 을 통해 확인할 수 있다.

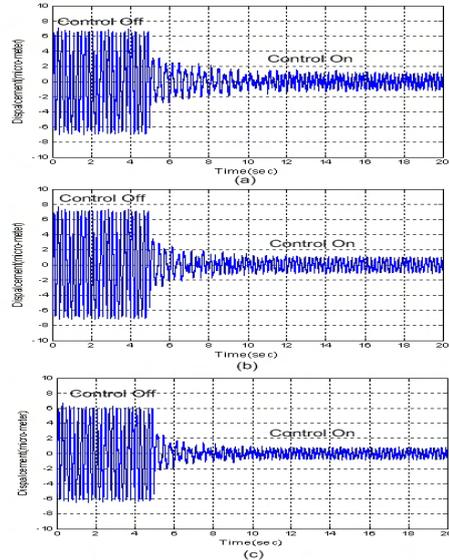


Fig. 4 Vibration attenuation at 5 Hz disturbance

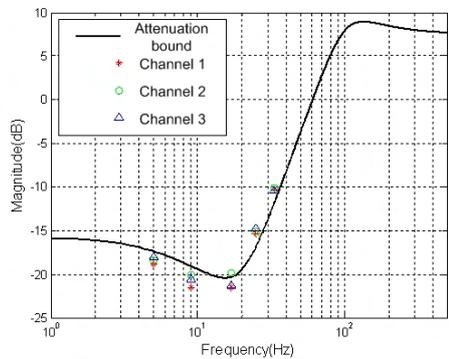


Fig. 5 Comparison of the simulated and experimental attenuation level at three sensors

5. 결론

3 자유도의 초정밀 마이크로 스테이지를 설계하고 실험적 모델링과 물리적 모델링을 통해서 동역학적 특성을 살펴 보았다. 또한 시스템의 상태 변수의 식별 과정에서 나타난 불확실성을 구조화하고 이를 바탕으로 강인 제어기를 설계하였으며 설계된 강인 제어기는 5~60 Hz 사이의 저주파 영역에서 최고 22 dB 의 제진 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 서울대 마이크로 열시스템 연구센터의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- Bai, M. R. and Lui, W., "Control design of active vibration isolation using μ , Journal of Sound and Vibration, Vol. 257, No.1, pp. 157-175.