

압전작동기를 이용한 3축 능동 마운트 시스템의 설계

Design of 3 Axis Active Mount System Using Piezoelectric Actuators

김정욱* 최승복**

J. W. Kim and S. B. Choi

Key Words : Piezoactuator (압전작동기), Active Mount System (능동 마운트 시스템), Inertia Type Actuator (관성형작동기)

ABSTRACT

This work presents a 3-axis active mount featuring the piezoelectric stack actuators. The inertia configuration for the piezoelectric actuators is adopted to achieve appropriate force and moment in each axis. In addition, the rubber mount is integrated to provide stiffness for system loading. In order to analyze the active mount, the governing equation for the force and moment is derived and its validity is demonstrated by comparing generated force and moment of each actuator between analysis and experiment. In addition, the natural frequency of each actuator is identified though both simulation and experiment.

1. 서 론

기계류에서 발생하는 진동을 감소시키기 위해서는 성능이 우수한 마운트가 요구된다. 기계류의 진동 감쇠에 널리 이용되고 있는, 고무마운트와 유체마운트 등의 수동 마운트는 특정 주파수영역에서만 효과적인 진동절연특성을 갖는다^(1,2). 이를 극복하기 위해서 제안된 반능동 마운트는 주로 시스템 계수인 스프링상수나 감쇠계수를 솔레노이드 밸브나 스텝모터 또는 지능재료를 이용하여 제어해 시스템 응답을 조절한다^(3,4). 그러나 이러한 반능동 마운트는 저주파수 영역에서의 성능 향상에는 효과적이지만 고주파수 영역에서는 제어인자의 반응속도의 한계로 인하여 성능이 감소된다. 이를 개선하기 위해서는 능동 마운트가 필요하다. 전자기 작동기나 서보밸브를 이용하는 능동 마운트는 넓은 주파수영역에서 우수한 진동절연성능을 보이지만, 복잡한 기계적인 구동장치가 필요하다⁽⁵⁾. 기계장치를 단순화 시키기 위한 목적으로 압전재료와 고무마운트를 이용한 하이브리드 마운트(hybrid mount)가 제안되어 1-DOF 시스템으로 가정된 구조물의 진동제어에 적용되어 효과적인 진동감소가 확인되었다⁽⁶⁾.

하지만 여전히 이러한 능동 마운트도 6-DOF 이상의 자유도로 거동하는 실제 시스템을 1-DOF로 가정한 모델의 한계로 인하여 여러 방향의 진동에 대해서는 효과적으로 제어할 수 없다. 따라

서 보다 효과적인 진동절연을 하기 위해서는 다른 형태의 마운트와 시스템 모델이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 능동마운트가 한 방향의 진동을 고려한 것을 보완하여 6-DOF 를 고려한 모델을 세웠다. 그리고 실제 시스템 구현을 위해 정하중의 지지와 비공진 주파수 영역에서의 진동절연효과를 얻기 위한 탄성 고무 재료와 공진 주파수대역에서의 미소변위의 진동을 절연하기 위해 기계적인 장치를 단순화 시킬 수 있는 압전작동기를 사용하였다. 이들 탄성고무재료와 3 개의 관성형 압전작동기를 3 방향으로 결합하여 3축 하이브리드 마운트(hybrid mount)를 제작하였다. 제안된 모델과 작동기의 성능 효과를 고찰하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

2. 압전 작동기 구성

본 연구에서는 적층형 압전작동기를 이용하여 관성형 압전작동기(inertia type actuator)를 제작하였다. 입력전압 $V_{p_i}(t)$ 에 대하여 압전작동기에서 발생하는 힘 $F_{a_i}(t)$ 는 다음과 같이 선형모델로 고려할 수 있다.

$$F_{a_i}(t) = \alpha_i V_{p_i}(t) \tag{1}$$

여기서 α_i 는 비례계수이다. 관성질량을 사용하는 압전작동기의 기계적 모델은 Fig. 1 과 같이 나타낼 수 있고, i 번째 압전작동기에 부착되어 있는 관성질량을 m_{p_i} , 감쇠계수 c_{p_i} , 스프링 상수

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과 교수

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 868-1716

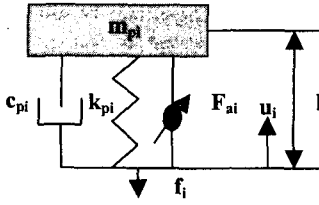


Fig. 1 Mechanical model of piezoactuator

k_{pi} , 힘의 방향 단위벡터 u_i , 작용점까지 거리를 l 라하면 관성형 압전작동기에 의해서 시스템에 전달되는 힘 f_i 는 식 (2), (3) 과 같다⁽⁷⁾.

$$m_{pi} u_i \ddot{i} + c_{pi} u_i \dot{i} + k_{pi} u_i (l - l_r) = u_i F_{a_i}(t) \quad (2)$$

$$u_i f_i = m_{pi} u_i \ddot{i} \quad (3)$$

3 개의 관성형 작동기에서 시스템에 전달되는 전달력(C_F)과 모멘트(C_M)는 각각의 작동기의 작용점에서 시스템의 무게중심까지의 거리를 r_i 라고 했을 때 다음 식 (4), (5) 와 같다.

$$C_F = \sum_{i=1}^3 m_{pi} \ddot{i}^C u_i \quad (4)$$

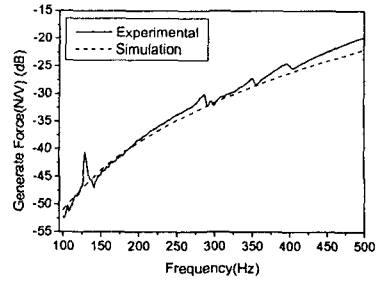
$$C_M = \sum_{i=1}^3 (C r_i \times m_{pi} \ddot{i}^C u_i) \quad (5)$$

본 논문에서 사용한 적층형 압전작동기는 Piezo Mechanik 사의 Pst350 bp10/25 VS 18 이다. 입력전압과 발생힘의 관계를 구하기 위해 센서는 MMF 사의 KF24 를 이용하였다. Table 1 은 실험을 통해서 구한 각각의 관성형 압전작동기의 계수이다.

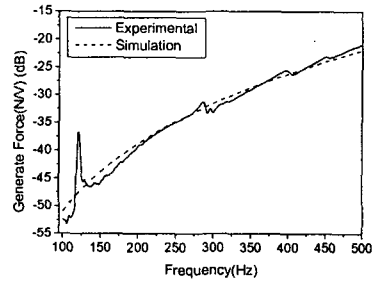
각각의 압전작동기에 의해서 시스템에 전달되는 전달력을 주파수 영역에 대하여 시뮬레이션과 실험 결과를 도식하면 Fig. 2 와 같다.

Table. 1 Actuator's Parameter

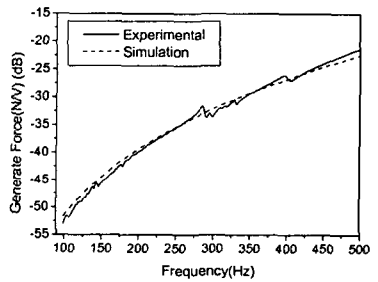
	m_p (kg)	c_p (N/s)	k_p (N/m)	α (N/V)
Actuator1	0.317	400	2.579e7	0.574
Actuator2	0.317	400	2.579e7	0.580
Actuator3	0.310	300	2.32e7	0.498



(a) Actuator1



(b) Actuator2



(c) Actuator3

Fig. 2 Comparison of Experimental and Simulation Result of Generate force(N/V) of Piezoactuator

3. 전체 마운트 모델 및 시뮬레이션

전체 시스템의 구성은 관성력을 이용하여 힘을 발생시키는 압전작동기 부분, 고무마운트 그리고 이 둘을 연결시키는 역할을 하는 지그로 구성되어 있다. 모델링을 위한 좌표계의 설정은 Fig. 3 과 같이 고무마운트가 고정되는 평면에 위치한 절대 좌표계 {U}와 고무마운트와 지그가 연결되는 면에 위치한 이동좌표계 {B}, 그리고 고무를 제외한 강체 부분의 질량 중심점에 위치한 이동 좌표계 {C}로 구성이 되어있으며, 고무 마운트 부분은 Fig. 4 와 같이 각각 6 개씩의 댐핑과 강성을 가지고 있는 요소로 가정하였다⁽⁸⁾.

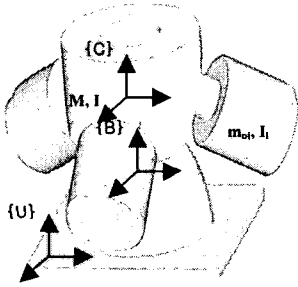


Fig. 3 Schematic of 3 axis mount system

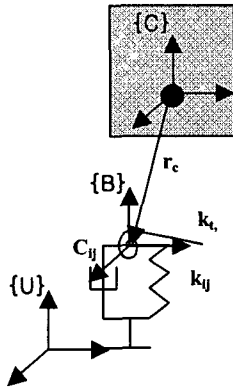


Fig. 4 Mechanical model of rubber mount

(1) 무게중심과 관성질량

{B} 좌표계에 대한 전체 시스템의 무게중심까지의 거리 ${}^B r_c$ 는 각각의 압전작동기까지의 거리를 ${}^B r_i$ 라고 하고, 지그와 고무마운트의 질량을 M , 여기까지의 거리를 ${}^B r$ 이라고 하면 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$${}^B r_c = \frac{{}^B R^B r M + \sum_{i=1}^3 {}^B R^B r_i m_{p_i}}{M + \sum_{i=1}^3 m_{p_i}} \quad (7)$$

그리고 전체 관성질량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M_{total} = M + \sum_{i=1}^3 m_{p_i} \quad (8)$$

$$I_{total} = ({}^C r - {}^C r_c) M ({}^C r - {}^C r_c)^T + \sum_{i=1}^3 ({}^C r_i - {}^C r_c) m_{p_i} ({}^C r_i - {}^C r_c)^T + I + \sum_{i=1}^3 I_i \quad (9)$$

(2) 전체 마운트 모델

압전작동기를 부착한 마운트에 대해서 {C} 좌표계에 대한 질량중심점의 6 자유도 모델로 미분방정식을 유도하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^C \ddot{X} \\ {}^C \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^C \dot{X} \\ {}^C \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & K_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^C X \\ {}^C \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^C F \\ {}^C M \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$M_1 = M_{total} \mathbf{I} \quad M_2 = \begin{bmatrix} I_{total_xx} & -I_{total_xy} & -I_{total_xz} \\ -I_{total_yx} & I_{total_yy} & -I_{total_yz} \\ -I_{total_zx} & -I_{total_zy} & I_{total_zz} \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} c_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & c_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & c_{zz} \end{bmatrix} \quad C_2 = \begin{bmatrix} 0 & c_{xx}a_x & -c_{zz}a_y \\ -c_{yy}a_z & 0 & c_{yy}a_x \\ c_{zz}a_y & -c_{zz}a_z & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 0 & -c_{yy}a_z & c_{zz}a_y \\ c_{xx}a_z & 0 & -c_{zz}a_x \\ -c_{xx}a_y & c_{yy}a_x & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_4 = \begin{bmatrix} c_{yy}a_z^2 + c_{zz}a_y^2 + c_\alpha & -c_{zz}a_x a_y & -c_{yy}a_x a_z \\ -c_{zz}a_x a_y & c_{xx}a_z^2 + c_{zz}a_x^2 + c_\beta & -c_{xx}a_y a_z \\ -c_{yy}a_x a_z & -c_{xx}a_y a_z & c_{xx}a_y^2 + c_{yy}a_x^2 + c_\gamma \end{bmatrix}$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \quad K_2 = \begin{bmatrix} 0 & k_{xx}a_x & -k_{zz}a_y \\ -k_{yy}a_z & 0 & k_{yy}a_x \\ k_{zz}a_y & -k_{zz}a_x & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_3 = \begin{bmatrix} 0 & -k_{yy}a_z & k_{zz}a_y \\ k_{xx}a_z & 0 & -k_{zz}a_x \\ -k_{xx}a_y & k_{yy}a_x & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_4 = \begin{bmatrix} k_{yy}a_z^2 + k_{zz}a_y^2 + k_\alpha & -k_{zz}a_x a_y & -k_{yy}a_x a_z \\ -k_{zz}a_x a_y & k_{xx}a_z^2 + k_{zz}a_x^2 + k_\beta & -k_{xx}a_y a_z \\ -k_{yy}a_x a_z & -k_{xx}a_y a_z & k_{xx}a_y^2 + k_{yy}a_x^2 + k_\gamma \end{bmatrix}$$

여기서 a_x, a_y, a_z 는 {C} 좌표계의 원점에서 고무마운트까지의 거리이다.

4. 결과 및 고찰

마운트의 고유진동수 실험은 마운트의 윗면에 3 축 가속도계를 설치하고, 각각의 관성형 작동기를 작동시켰을 때의 입력 전압에 대한 출력 가속도 사이의 주파수 응답 함수(FRF)를 이용해 500Hz 이하의 영역에 대하여 마운트의 고유진동수를 Fig. 5 와 같이 구하였다.

해석을 통해 얻은 마운트의 고유진동수와 측정값을 Table. 2 에 나타내었다. 실제 실험에서는 6 개 이상의 고유진동수가 나왔으나, 예상치로는 4

5. 결론

6 자유도를 고려한 3 축 능동마운트의 제작을 위해 관성형 압전작동기와 전체 마운트 모델에 대하여 실험과 해석을 수행하였다. 먼저, 관성형 압전작동기의 모델은 500Hz 이하의 저주파수 영역에서 입력전압에 대한 시스템 전달력이 각각의 작동기에 대하여 실험과 해석 모두 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 압전작동기를 부착한 전체 모델은 실험과 해석을 통하여 고유진동수를 구하였다. 향후 과제로 진동제어를 위한 제어기를 설계하여 실제 구조물 적용시 성능을 확인하는 실험이 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) Rivin, E. E., 1984, "Passive Engine Mounts : Some Directions for Further Development", SAE Technical Paper Series 940259.
- (2) Singh, R., Kim, G. and Pavindra, P. V., 1992, "Linear Analysis of Automotive Hydro-Mechanical Mount with Emphasis on Decoupler Characteristics", Journal of Sound and Vibration, Vol. 158, No.2, pp.219~243.
- (3) Genesseeaus, A., 1993, "Research for New Vibration Isolation Techniques : From Hydro-Mounts to Active Mounts", SAE Technical Paper Series 931324.
- (4) Hong, S. R., Choi, S. B., Jung, W. J., Ham, I. B., and Kim, D. G., 2001, "Vibration Control of an ER Mount Subjected to High Static Loads", Journal of Sound and Vibration, Vol. 242, No.4, pp.740~748
- (5) Mizuno, T., Araki, K., 1993, "Control System Design of a Dynamic Vibration Absorber with an Electromagnetic Servomechanism", Mechanical System and Signal Processing, Vol.7, No.4, pp293~306.
- (6) Choi, S. H., Choi, Y. T., Choi, S. B., and Cheong, C. C., 1996, "Performance Analysis of an Engine Mount Featuring ER Fluids and Piezoactuators", Int. J. of Modern Physics B, Vol.10, pp.3143~3157.
- (7) 홍성룡, 2003, "MR 유체마운트와 압전세라믹마운트를 이용한 유연구조물의 진동제어", 박사학위논문.
- (8) Cyril, M. H., and Charles, E. C., 4th Edition, "Shock and Vibration Handbook" McGRAW-HILL, Inc. New York.

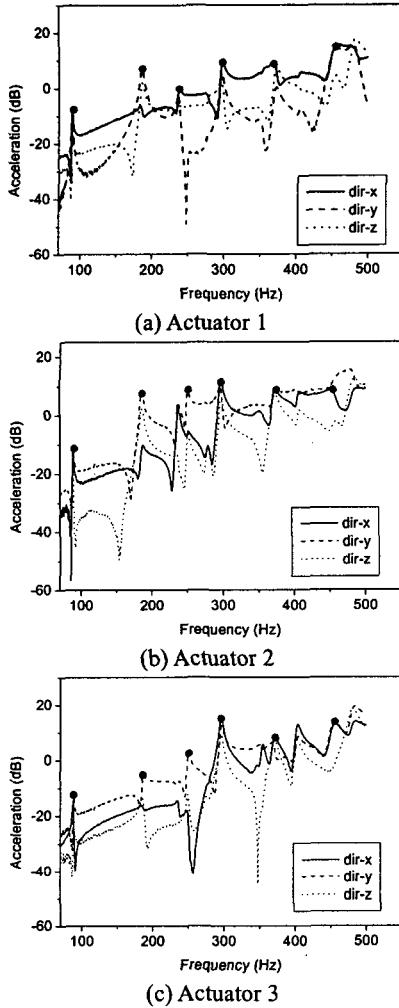


Fig. 5 Measured natural frequency

개의 고유진동수만 나왔으며 z 축에 대한 대칭성으로 인해서 k_{xx} , k_{yy} , k_{α} , k_{β} 에 대한 공진 주파수가 90Hz 와 235Hz 에서 중복되어 나왔다.

Table. 2 Comparison of natural frequency

Mode	Measured(Hz)	Predicted(Hz)
1	88.5	90
2	187	
3	236	235
4	298	
5	370	323
6	485	513