

전자기 작동기와 압전 작동기를 이용한 하이브리드 마운트의 제어성능 평가

Control Performance of Hybrid Mount Using Electromagnetic Actuator and PZT Actuator

팽 용 석* · 육 지 용* · 최 승 복† · 문 석 준**

Yong-Seok Paeng, Ji-Yong Yook, Seung-Bok Choi and Seok-Jun Moon

(2007년 4월 20일 접수 ; 2007년 6월 20일 심사완료)

Key Words : Hybrid Mount(하이브리드 마운트), Electromagnetic Actuator(전자기 작동기), Piezoelectric Actuator(압전 작동기), Sliding Mode Controller(슬라이딩 모드 제어기)

ABSTRACT

This paper presents an active vibration control of a dynamic system using hybrid mount which consists of elastic rubber-piezostack actuator and elastic rubber-electromagnetic actuator, respectively. After identifying stiffness, damping properties of the elastic rubber, PZT actuator and electromagnetic element, a mathematical model of the hybrid mount is established. The mount model is then incorporated into the dynamic system and the governing equation of motion is obtained in a state space. A sliding mode controller is designed in order to actively attenuate the vibration of the system. Control responses such as acceleration and transmitted force of the dynamic system are experimentally evaluated and presented in time and frequency domains.

1. 서 론

기술의 발달로 인한 항공기, 선박, 자동차 엔진과 기계류의 고출력화 추세는 종전보다 현격히 높은 소음과 진동 문제를 야기시키고 있으며, 이러한 소음과 진동은 시스템의 성능과 수명에 큰 영향을 끼치게 된다. 이러한 이유로, 산업 전반에서 사용되고 있는 기계와 엔진, 펌프류에서 발생하는 진동을 감소시키기 위해 보다 효과적인 진동절연성능을 가진 마운트가 요구된다. 현재 진동절연에 널리 사용되고 있는 고무마운트는 댐핑과 강성을 가진 고무를 주재료로 한다. 수동형인 고무마운트는 작은 댐핑으로

인해 고주파수의 비공진주파수 대역에서는 우수한 진동절연성능을 보이지만 공진주파수 대역에서는 비공진주파수 대역에서와 달리 진동절연의 성능저감을 보인다⁽¹⁾. 예를들어 펌프나 자동차 엔진과 같은 기계류의 저주파수 영역에서는 가진 변위와 충격력이 크며, 시스템의 공진이 존재한다^(2,3). 또한 고주파수 공진 영역에서의 진동절연이 필요하다. 이러한 공진영역에서의 급격한 움직임을 제한하기 위하여 큰 강성이 필요하며, 시스템으로 전달되는 충격력을 줄이기 위하여 큰 감쇠력이 필요하다. 그러나 고무마운트만으로는 이러한 조건을 만족시킬 수 없으므로 고무마운트의 저주파수 대역과 고주파수의 공진 대역에서 보다 나은 진동절연성능을 향상시키기 위한 새로운 메커니즘이 필요하다.

이 연구에서는 고무마운트와 전자기 작동기(electromagnetic actuator), 고무마운트와 압전 작동기(PZT actuator)를 결합한 능동하이브리드 마운

† 교신저자 : 정희원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 868-1716

* 정희원, 인하대학교 대학원 기계공학과

** 정희원, 한국기계연구원 e-엔지니어링연구센터

트를 제안한다. 전자기 작동기는 인가전류의 양에 따라 발생력의 세기가 조절되는 장치로 전류인가 시 코일을 둘러싸고 있는 회로에 자속이 흐르게 되고 플런저에 자기력을 발생시켜 전자기 작동기를 작동하게 된다⁽⁴⁾. 압전 작동기에 사용된 압전재료는 큰 힘을 발생시킬 수 있는 적층형으로 전기장 부하를 통하여 변위 및 힘 제어가 가능하며, 빠른 응답특성을 가진다^(5,6). 두 종류의 하이브리드 마운트에서 고무요소는 하중을 지지하고 두 작동기는 진동절연의 역할을 한다. 위와 같은 두 종류의 하이브리드 마운트에 대한 실험을 수행하기 위해 고무마운트의 동특성을 측정하였고, 시스템의 수학적 지배방정식을 유도하였으며, 효과적인 진동제어를 위하여 시스템의 불확실성을 고려한 강건 슬라이딩모드 제어기(sliding mode controller)를 설계하였다. 제어기를 통하여 시스템의 제어성능을 변위, 가속도, 전달력에 대하여 평가하였다.

2. 하이브리드 마운트 시스템 모델링

2.1 전자기 작동기로 구성된 하이브리드 마운트

이 연구에서는 기존의 고무마운트에 능동요소인 전자기 작동기와 압전 작동기를 결합하여 하이브리드 마운트를 구성하였다. 전자기 작동기는 대부분 코일을 중심으로 자기력에 의해 움직이는 플런저(plunger)와 바깥을 감싸고 있는 케이스 그리고 코일 안의 코어에 해당하는 연자성재료로 자기회로가 형성되어 진다^(7,8).

이 연구에서 제안한 하이브리드 마운트에 대한 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 하이브리드 마운트는 고무마운트가 중앙에 배치되고 그 주위를 총 4개의 전자기 작동기가 병렬로 결합된 형태이다. 하이브리드 마운트의 모델링에서 전자기 작동기의 발생력과 고무마운트의 강성과 댐핑력만을 이용하여 모델링이 가능하다. 이것은 곧 기존 고무마운트의 특성을 변화시키지 않고 우수한 진동제어 성능을 가질 수 있다는 장점을 제공한다.

하이브리드 마운트의 지배방정식을 도출하기 위하여 고무마운트와 전자기 작동기 각각에 대한 모델링을 수행하였다. 여기서, k_r 과 b_r 은 고무의 강성과 댐핑력을 나타내며 각각 103,882 N/m와 210 Nm/s의 값을 가진다. 이 연구에서 사용된 전자기 작동기

의 설계도를 Fig. 2에 나타내었다. 전자기 작동기의 발생력은 자기장 안에 전류를 흘려보내면 힘을 발생한다는 플레밍의 법칙을 근거로 설계하였다⁽⁹⁾. 이를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_a = B \cdot I \cdot L \cdot N \quad (1)$$

식 (1)에서 B 는 자기장의 세기(Tesla), I 는 전류의 세기(A), L 은 자기장을 수직으로 통과하는 전선의 길이이며, N 은 코일을 감은수이다. 따라서 작동기의 발생력은 식 (1)을 통해 구할 수 있다⁽⁹⁾. 하이브리드 마운트의 기계적 모델은 고무마운트와 식 (1)의 전

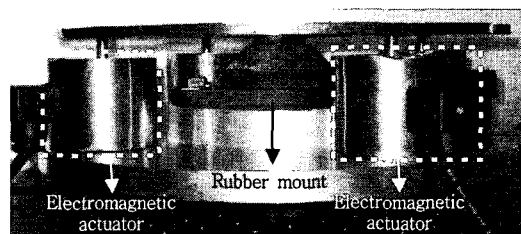


Fig. 1 Configuration of the hybrid mount

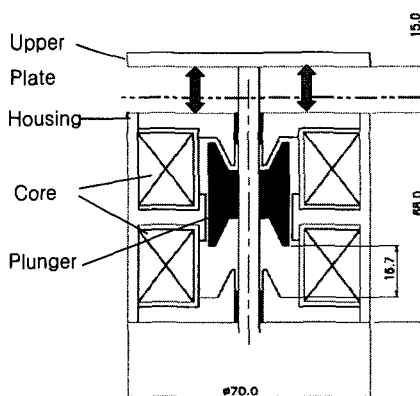


Fig. 2 Design of electromagnetic actuator

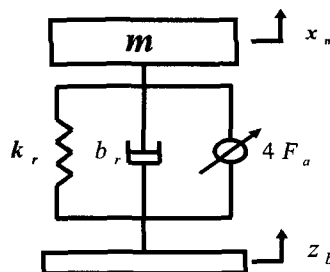


Fig. 3 Mechanical model of the hybrid mount system

자기 작동기를 고려하여 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 하이브리드 마운트의 상태 공간 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t}) = \mathbf{A}\mathbf{x}(\mathbf{t}) + \mathbf{B}u(\mathbf{t}) + \mathbf{\Gamma}z(\mathbf{t}) \quad (2)$$

여기서,

$$\mathbf{x}(\mathbf{t}) = [x_1 \quad x_2]^T, u(\mathbf{t}) = F_a, \mathbf{z}(\mathbf{t}) = [z_1 \quad z_2]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_r/m & -b_r/m \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_r/m & -b_r/m \end{bmatrix}$$

이고 z_b 는 베이스가 가진 변위이며, m 은 고무마운트의 상부질량을 나타낸다. Fig. 2에서 플런저주위에 코어가 상부와 하부에 감겨져 있음을 볼 수 있다. 여기서 상부와 하부의 코일의 감은 방향은 서로 다르며, 이로 인해 상부 코일전류를 흘려주면 윗방향으로 유도전류가 발생하게 된다. 이때 발생한 유도전류에 의해 플런저가 전자석이 되어 상판(upper plate)이 윗방향으로 작동하게 된다.

2.2 압전 작동기로 구성된 하이브리드 마운트

이 연구에서는 압전 작동기를 결합한 형태의 하이브리드 마운트를 구성하였으며, 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 압전 작동기를 구성하는 압전재료는 폴링(poling axis)과 전기장방향이 동일하게 제작되었으며, 다음과 같이 압전재료의 전기적인 상태와 기계적인 상태를 나타내는 두 식으로 표현된다. 여기서, D 는 전기변위(electric displacement),

$$D = \epsilon_{33}E + d_{33}T \quad (5)$$

$$S = \epsilon_{33}E + \frac{1}{c}T \quad (6)$$

d_{33} 는 압전전하 상수(piezoelectric charge constant), T 는 응력, ϵ_{33} 는 유전상수(dielectric constant), E 는 전기장, S 는 변형률, c 는 탄성계수를 나타낸다. n 개의 압전디스크를 적층형 작동기의 지배방정식은 압전재료의 기계적 상태를 나타내는 식 (6)을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_p &= AT = AcS - Acd_{33}E \\ &= \frac{Ac}{l}(y_h - y_b) - Acd_{33}\frac{n}{l}V \\ &= k_p(y_h - y_b) - \alpha V = k_p(y_h - y_b) - f_a \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, f_a 는 적층형 압전 작동기에 가해지는 힘을 의미하며, A 는 압전디스크의 단면적, l 은 압전 작동기의 길이, V 는 압전 작동기에 가해지는 부하전압, $k_p (= Ac/l)$ 는 압전 작동기의 스프링상수, $\alpha (= Acd_{33}n/l)$ 는 압전 작동기의 게인값, $f_a (= \alpha V)$ 는 부하전압 V 로 조절되는 작동기의 힘을 나타낸다. $y_h(t)$ 는 압전 작동기 상단의 변위를, $y_b(t)$ 는 압전 작동기의 하단변위를 나타낸다. 이 연구에서 제작된 압전 작동기의 k_p 와 α 의 값은 각각 90 MN/m와 9 N/V이다.

2개의 압전 작동기와 고무요소로 구성된 하이브리드 마운트의 기계적 모델은 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (7)의 $f_a = \alpha v$ 를 이용하여 하이브리드 마운트의 지배방정식은 다음과 같이 유도된다. 아래의 식에서 m 은 압전 작동기와 케이스의 무게이다.

$$\begin{aligned} m\ddot{z}(t) + b_r\dot{z}(t) + k_r z(t) \\ + 2k_p(z(t) - y(t)) + 2f_a(t) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

압전 작동기의 하부 질량으로 작동기에서 발생하는 힘이 효과적으로 작용되게 하기 위함이다. 이 연구에

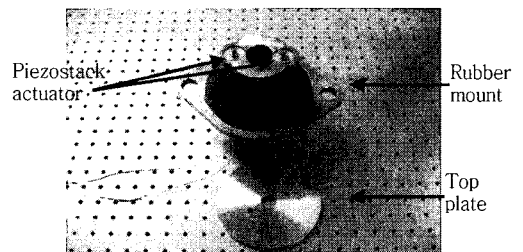
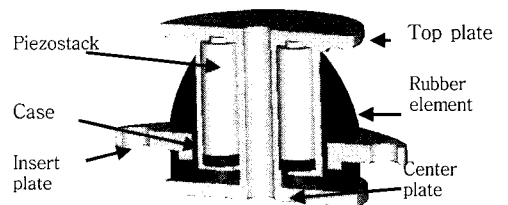


Fig. 4 Configuration of the hybrid mount

서는 m 은 2.5 kg이며 식 (8)의 $z(t)$ 는 매개질량의 변위를 나타낸다. 진동제어성능평가를 위해 하이브리드 마운트시스템을 Fig. 5에 나타내었다. 하이브리드 마운트 시스템의 수학적 모델링은 식 (9)와 같다.

$$M\ddot{y}(t) = -2k_p(y(t) - z(t)) + 2f_a(t)$$

$$m\ddot{z}(t) = 2k_p(y(t) - z(t)) + k_r(-z(t) + d(t)) + b_r(-\dot{z}(t) + \dot{d}(t)) - 2f_a(t) \quad (9)$$

여기서, M 은 하이브리드 마운트 상부의 질량이다. 작동기의 시상수를 고려하기 위해 식 (10)을 적용하였으며, 시상수는 10 msec로 설정하였다.

$$\tau \frac{d}{dt} f_a + f_a = \alpha V(t) \quad (10)$$

하이브리드 마운트 시스템의 상태 공간 방정식은 아래의 식과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{\Gamma}d(t) \quad (11)$$

$$\mathbf{x}(t) = [y(t) \quad \dot{y}(t) \quad z(t) \quad \dot{z}(t) \quad f_a(t)]^T \quad (12)$$

$$u(t) = V(t) \quad (13)$$

$$\mathbf{D}(t) = [d(t) \quad \dot{d}(t)]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2k_p}{M} & 0 & \frac{2k_p}{M} & 0 & \frac{2}{M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{2k_p}{m} & 0 & -\frac{(2k_p+k_r)}{m} & -\frac{b_r}{m} & \frac{2}{m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\alpha}{\tau} \end{bmatrix} \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_r}{m} & \frac{b_r}{m} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

3. 제어기 설계

이 연구에서는 작동기의 시상수와 수평방향의 모멘트에 대한 시스템의 불확실성을 고려한 하이브리드

드 마운트의 발생력을 제어하기 위하여 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 두 가지 하이브리드 마운트의 제어입력을 구하기 위하여 다음과 같이 슬라이딩 서피스를 설정한다.

$$s = \mathbf{G}\mathbf{x}(t) \quad (17)$$

여기서, $\mathbf{G} = [g_1 \quad g_2]$ 는 슬라이딩 서피스의 기울기이며 슬라이딩 서피스($s=0$)에서 슬라이딩모드가 존재하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s(t)^2 \leq -\eta |s(t)| \quad (18)$$

위 식 (18)을 만족하는 슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = -(\mathbf{GB})^{-1}(\mathbf{GA}\mathbf{x}(t) + k \cdot \text{sgn}(s(t))) \quad (19)$$

여기서 k 는 불연속 게인(gain)을 나타낸다. 식 (19)의 슬라이딩모드제어기는 다음과 같이 식 (18)의 슬라이딩모드 조건을 만족한다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s(t)^2 = s(t)\mathbf{G}\dot{\mathbf{x}}(t)$$

$$= s(t)\{\mathbf{GA}\mathbf{x}(t) - \mathbf{GB}(\mathbf{GB})^{-1}\mathbf{GA}\mathbf{x}(t) - \mathbf{GB}(\mathbf{GB})^{-1}k \text{sgn}(s(t) + \mathbf{G}\mathbf{\Gamma}z(t))\}$$

$$= s(t)(-k \text{sgn}(s(t)) + \mathbf{G}\mathbf{\Gamma}z(t)) \leq -\eta |s(t)|, \quad (\eta > \mathbf{G}\mathbf{\Gamma}z(t)) \quad (20)$$

여기서, $\eta < \mathbf{G}\mathbf{\Gamma}z(t)$ 인 경우 식 (18)을 만족 하며, 슬라이딩 모드 조건에도 만족한다. 이러한 불연속 제어기는 채터링을 발생시키므로 정해진 경계조건 영역 안에서 연속 제어기로 근사화하여 포화함수로 대체한다.

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} s/\varepsilon & \text{for } |s/\varepsilon| \leq 1 \\ \text{sgn}(s) & \text{for } |s/\varepsilon| > 1 \end{cases} \quad (21)$$

4. 실험 결과

4.1 전자기 작동기로 구성된 하이브리드 마운트의 실험 결과

앞 절에서 설계한 sliding mode controller를 이용하여 전자기 작동기로 구성된 하이브리드 마운트에 대한 진동제어 실험을 수행하였으며, 실험장치의 구성은 Fig. 5와 같다. 상부 질량이 50kg이고 강성은 103,882 N/m이며, 공진주파수는 7.244 Hz이며, 시스템의 가진주파수를 공진주파수로 입력하고 가진 폭은 0.03 mm로 하였다. 그리고 전자기 작동기의 제어력을 인가하여 고무마운트의 공진점과 저주파수 영역에 대한 제어를 수행하였다. 실험에 사용된 모델 변수를 Table 1에 나타내었다. Fig. 6은 전자기 작동기의 인가 전류에 따른 제어력에 대해 나타내었

다. Figs. 7~8에서 제어하지 않았을 때와 제어력이 인가되었을 때의 변위와 가속도를 나타내었으며 Fig. 9는 상부 질량으로의 전달력을 나타내었다. 이때 전자기 작동기에 인가되는 제어전류를 Fig. 10에 나타내었다. 실험은 5, 7, 10, 20 Hz에 대해 수행하였으며

Table 1 Model and control parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
k_r [N/m]	103,882	k	108.5
b_r [Nsec/m]	210	ε	0.021
m [kg]	50	B [Tesla]	0.3
$N(n)$	600	L [m]	0.03

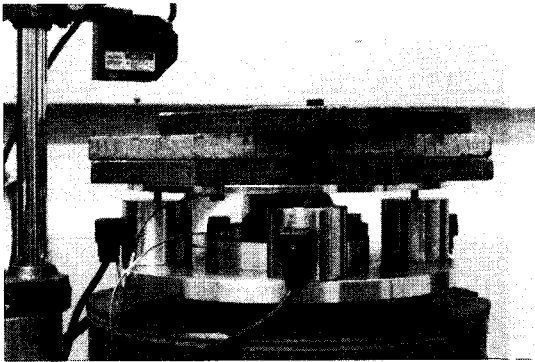


Fig. 5 Experimental apparatus of rubber-EMA hybrid mount

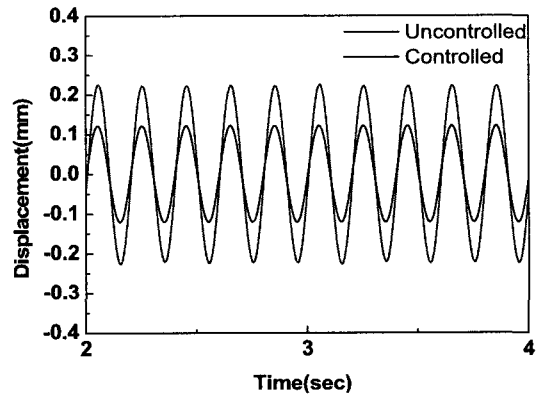


Fig. 7 Time vs. displacement

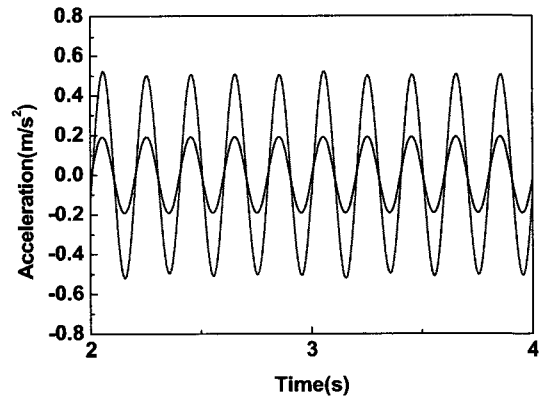


Fig. 8 Time vs. acceleration

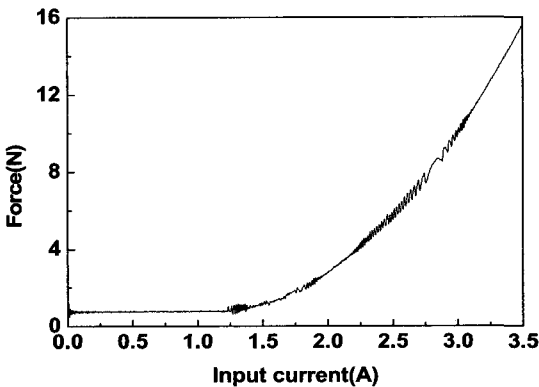


Fig. 6 Actuating force of electromagnetic actuator

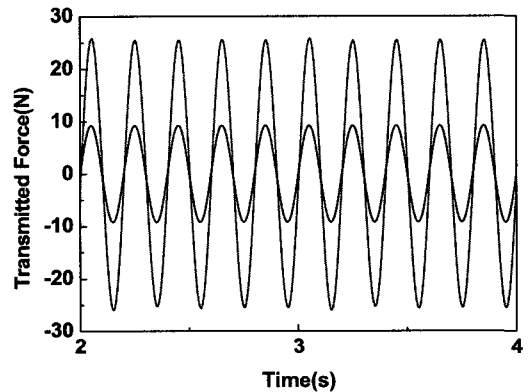


Fig. 9 Time vs. transmitted force

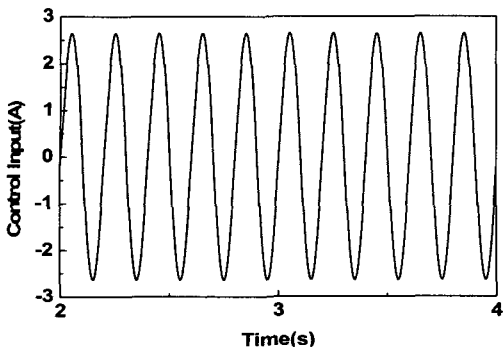


Fig. 10 Time vs. control input current

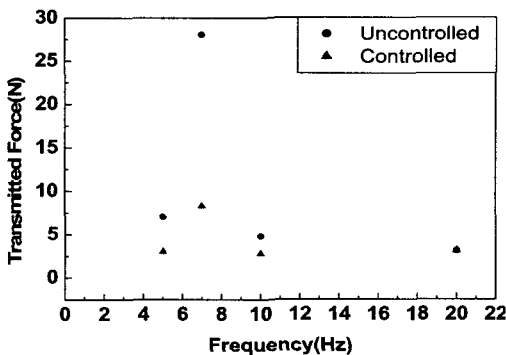


Fig. 11 Frequency vs. transmitted force

주파수에 따른 전달력을 Fig. 11에 나타내었다.

4.2 압전 작동기로 구성된 하이브리드 마운트의 실험 결과

압전 작동기로 구성된 하이브리드 마운트의 실험 역시 앞절에서 설계한 sliding mode controller를 이용하여 진동 제어 성능을 평가하였다. 아래의 Fig. 12에 실험장치의 구성을 나타내었으며, Fig. 13은 압전 작동기의 제어전압에 따른 발생력에 대해 나타내었다. 실험에 사용된 상부 질량은 20 kg이고, 강성은 103,882 N/m, 댐핑은 210 Ns/m이다. 시스템의 가진 주파수 80~120 Hz로 입력하고 가진폭은 0.03 mm로 하였다. 이에 따른 상부 질량의 가속도와 전달력을 Figs. 14~15를 통해 나타내었다. Fig. 16은 sliding mode controller를 통해 인가되는 전압을 나타내었으며, PD controller에 대한 결과를 추가하여 각 주파수에 따른 전달력을 Fig. 17을 통해 나타내었다. 100 Hz에서 PD controller를 사용하였을 때와 SMC controller를 사용하였을 때 각각 150 V와 142 V로 SMC controller가 에너지 소비율과 제어성능에서 더 우수한 결과를 보였다.

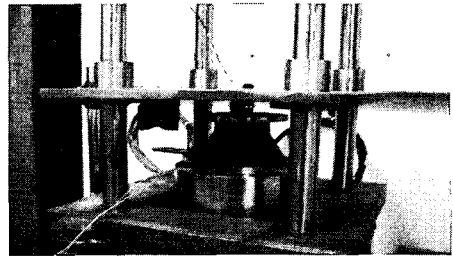


Fig. 12 Experimental apparatus of rubber-piezostack hybrid mount

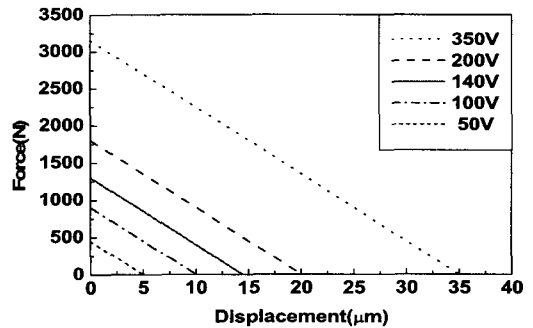


Fig. 13 Actuating force of piezoelectric actuator

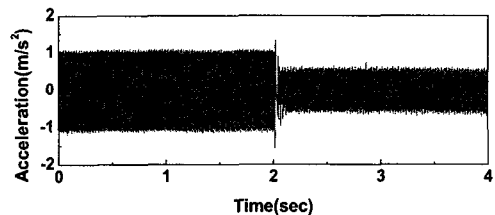


Fig. 14 Time vs. acceleration

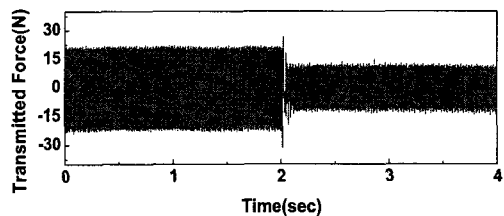


Fig. 15 Time vs. transmitted force

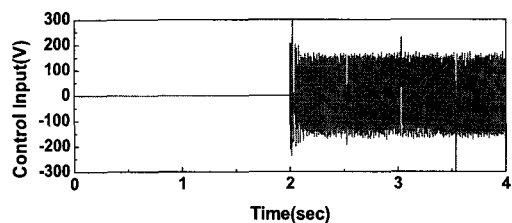


Fig. 16 Time vs. control input voltage

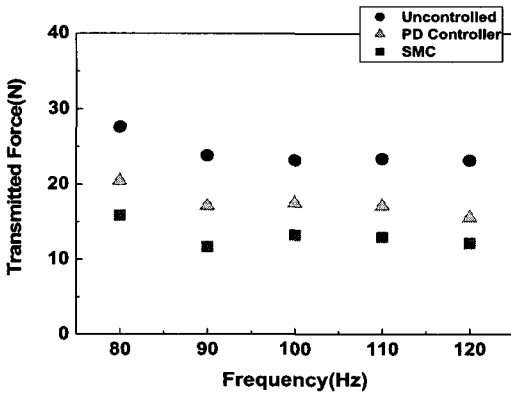


Fig. 17 Frequency vs. transmitted force

5. 결과 및 고찰

이 연구에서는 효과적인 진동절연성능을 갖는 하이브리드 마운트를 제안하였다. 기존의 고무마운트는 작은 댐핑으로 인해 고주파수의 비공진주파수 대역에서는 우수한 진동절연성능을 보이지만 공진주파수 대역에서는 비공진 주파수 대역에서와 달리 진동절연의 성능저감을 보인다. 이를 해결하기 위하여 저주파수 대역의 큰 가진변위와 충격력에 강한 전자기 작동기와 고주파수 대역에서의 빠른 응답특성과 큰 제어력을 가진 압전 작동기를 이용한 두 가지의 하이브리드 마운트를 제안하였다. 그리고 하이브리드 마운트가 고려된 시스템의 수학적 지배방정식을 유도하였으며, 효과적인 진동제어를 위해 외란에 강건한 슬라이딩모드 제어를 설계하였다. 실험을 통하여 전자기 작동기를 이용한 하이브리드 마운트는 저주파수 공진영역에서 우수한 진동절연 성능을 보였으며, 압전 작동기를 이용한 하이브리드 마운트는 중·고주파수의 공진대역에서 뛰어난 진동절연 성능을 확인할 수 있었다. 이로써 제어기의 성능이 확인되었으며, 기존의 수동형 고무마운트에 비해 진동절연의 효과가 우수함이 입증되었다.

후 기

이 연구는 민군 겸용 기술사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 깊은 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, S. H., Hong, S. R. and Choi, S. B., 2003, "Vibration Control of Flexible Beam Using Hybrid Mount", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 7, pp. 524~531.
- (2) Ikai, S., Ohsawa, K. and Nagaya, K., 2000, "Electromagnetic Actuator and Stacked Piezoelectric Sensor for Controlling Vibration of a Motor on a Flexible Structure", Journal of Sound and Vibration, pp. 393~409.
- (3) Kowalczyk, K., Svaricek, F., Bohn, C. and Karkosch, H.-J., 2004, "Active Control of Engine Induced Vibrations", International Conference on New Actuators.
- (4) Hur, S., Ha, S. D. and Choi, K. Y., 1995, "Active Vibration Control of 2 D.O.F. Model by Electromagnetic Actuator", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 252~257.
- (5) Park, D. W., Park, Y. K., Park, N. J. and Choi, S. B., 1998, "Vibration Control of Smart Structures", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 130~135.
- (6) Shin, H. C. and Choi, S. B., 1996, "Vibration Control of Very Flexible Robot-arm Using Piezo actuator", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 187~196.
- (7) Kim, K. H. and Gweon, D. G., 2005, "Design of Ultraprecision Bi-directional Actuator for nm Using a Permanent Magnet and Electromagnet", Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 9, pp. 147~154.
- (8) Gerth, H., 2004, "An Electromagnetic Actuator for Active Vibration Control without Permanent magnet", International Conference on New Actuators.
- (9) Lee, B. H. and Lee, J. W., 2004, "Design of Compact Electromagnetic Actuator with Permanent Magnet for High Efficiency", Mechanical Engineering.