

MR 유체와 압전 작동기를 이용한 자동차 엔진 마운트의 능동진동제어

Active Vibration Control of Automotive Engine Mount Using MR Fluid and Piezostack

최 상 민* · 벤 큐 오* · 최 승 북†

Sang-Min Choi, Vien-Quoc Nguyen and Seung-Bok Choi

(2008년 9월 5일 접수 ; 2008년 10월 27일 심사완료)

Key Words : Hybrid Engine Mount(하이브리드 엔진 마운트), MR Fluid(MR 유체), Piezostack Actuator(압전 작동기), Sliding Mode Controller(슬라이딩모드 제어기)

ABSTRACT

This paper presents vibration control of an active hybrid engine mount featuring a magneto-rheological(MR) fluid and a piezostack actuator. The MR fluid is adopted to improve isolation performance at resonant frequencies, while the piezostack actuator is adopted for performance improvement at non-resonant frequencies, especially at high frequencies. Based on some particular practical requirements of engine mounts, the proposed mount is designed and manufactured. The characteristics of rubber element, piezostack actuator and MR fluid are verified for system analysis and controller synthesis. The dynamic model of the proposed mount with a supported mass(engine) is established. In this work, a sliding mode controller is synthesized for the mount system to reduce vibrations transmitted from the engine in a wide frequency range. Computer simulations are performed to evaluate control performances of the proposed active engine mount in time and frequency domains.

1. 서 론

일반적으로 자동차 엔진 마운트는 엔진을 차체에 연결하는 부품으로써 엔진의 지지와 함께 엔진에서 차체로 전달되는 진동을 절연하는 역할을 하고 있다. 엔진의 진동을 절연하기 위해 진폭이 큰 저주파수 영역에서는 큰 강성과 댐핑이 필요하지만 진폭이 작은 고주파수 영역에서는 작은 강성과 댐핑이 요구된다. 하지만 기존의 고무 마운트는 작은 강성과 댐

핑으로 인해 고주파수의 비공진 주파수 대역에서는 우수한 진동절연의 성능을 보이지만 공진 주파수 대역에서는 비공진 주파수 대역에서와 달리 진동절연의 성능저감을 보인다. 이러한 기존 고무 마운트의 댐핑이 작은 단점을 보완하기 위하여 고안된 유체 마운트는 고무의 강성을 이용하여 정하중을 지지하고, 유체점성과 관성트랙의 형상을 조절하여 공진 주파수 대역에서의 우수한 진동절연 효과를 얻을 수 있다. 그러나 비공진 주파수 대역에서의 진동절연 성능이 저하될 수 있다⁽¹⁻³⁾. 기존의 고무 마운트나 유체 마운트와 같은 수동형 마운트가 특정 주파수 영역에서만 효과적인 한계를 극복하기 위하여 지능 재료를 이용한 마운트에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 기존의 수동형 마운트를 기본으로 하여 진

† 교신저자: 정희원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

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

* 인하대학교 대학원 기계공학과

동 및 소음에 따라 지능재료를 통해 능동적으로 적절한 제어력을 부하함으로써 진동 및 소음 저감성을 크게 향상시킬 수 있는 새로운 엔진 마운트의 개발에 자동차 업계는 몰두해 왔으며 그 중 한가지 방법으로 수동 마운트에 지능재료를 결합한 구조를 갖는 능동 하이브리드 마운트(hybrid mount) 시스템이다⁽⁴⁻⁶⁾. MR 유체(magneto-rheological fluid) 등의 지능유체를 이용한 반능동형 엔진 마운트는 진동절연을 위해 유로 사이를 유동하는 유체를 이용하여 유로 조절을 통해 유동저항을 발생시켜 댐핑을 발생시키며 마운트 시스템에 힘을 직접적으로 발생시키는 못하지만 댐핑특성을 조절 할 수 있어 효과적인 진동절연을 기대할 수 있다⁽⁷⁾. 그리고 능동재료인 압전재료(piezoelectric material) 등을 이용한 능동형 엔진 마운트는 큰 힘을 발생시킬 수 있는 적층형 압전 작동기를 이용하여 고주파수 영역에서는 매우 우수한 진동절연 성능을 발휘한다^(8,9).

이 연구에서는 효과적인 진동절연을 위해 MR 유체와 압전 작동기를 이용한 능동 하이브리드 마운트를 제안하였다. 자기장 인가에 따라 그 유변학적 특성이 가역적으로 변하는 MR 유체를 이용하여 변위가 큰 저주파수 영역에서의 진동을 효과적으로 절연하고 작은 변위가 발생하는 고주파수 영역대에서의 진동절연을 위해 압전 작동기를 사용하여 진동제어를 수행하는 역할을 한다. 위와 같은 하이브리드 마운트의 성능평가를 위해 고무 마운트의 동특성을 측정하였고, 시스템의 수학적 지배방정식을 유도하였으며, 효과적인 진동제어를 위하여 시스템의 불확실성을 고려한 강건 슬라이딩모드 제어기(sliding mode controller)를 설계하였으며, 제어기를 이용한 시뮬레이션을 통해 시스템의 가속도, 전달력 등을 평가하였다.

2. 하이브리드 마운트 시스템 모델링

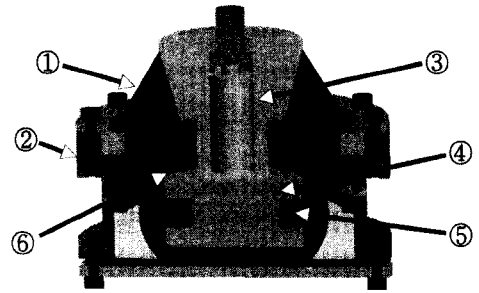
이 연구에서 제안한 하이브리드 마운트를 Fig. 1에 나타내었다. 하이브리드 마운트는 고무 요소, 압전 작동기, 원형 디스크, 코일(coil), 하우징(housing) 등으로 구성된다. 그리고 원형 디스크에 코일이 감겨있고 디스크 주변으로 MR 유체로 채워져 있으면 수직 방향의 운동이 발생한다. 하이브리드 마운트의 고무 요소와 압전 작동기는 직렬로 연결되어 하이브

리드 마운트 전체의 강성은 고무에 의한 강성이 지배적으로 영향을 미치게 된다. 이러한 구성 방식은 압전 작동기가 파괴되어 제어력을 발생시킬 수 없을 경우, 하이브리드 마운트는 MR 유체, 즉 지능 유체로 구성된 반능동형 엔진 마운트의 특성을 갖게 되어 진동을 절연하게 된다.

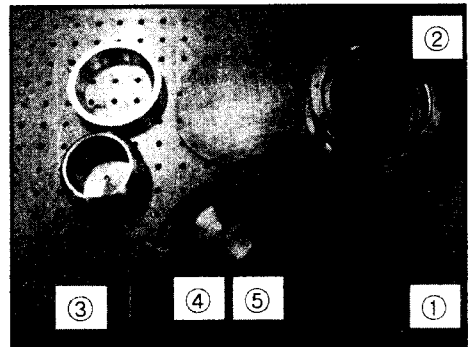
이 연구에서 제안된 하이브리드 마운트의 지배방정식을 도출하기 위하여 고무 요소, MR 유체와 압전 작동기 각각에 대한 모델링을 수행하였다. 하이브리드 마운트의 기계적 모델은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 모델로부터 하이브리드 마운트의 지배방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x}_1(t) + b_r(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_0(t)) + k_r(x_1(t) - x_0(t)) - k_p(x_2(t) - x_1(t)) - f_a - f_{MR} = 0 \quad (1)$$

여기서, m 은 압전 작동기의 관성질량이며, 이를 매개질량이라 한다. 이 질량은 압전 작동기에서 발생하는 변위와 힘이 구조물로 효과적으로 작용하기 위



(a) Schematic configuration



(b) Photograph

- ① Rubber element ② Housing
- ③ Piezostack actuator ④ Disk
- ⑤ Coil ⑥ MR fluid

Fig. 1 Configuration of the hybrid mount

한 것이며, 이 연구에서는 1.5 kg으로 설정하였다. 여기서, k_p 과 b_r 은 고무의 강성과 댐핑력을 나타내며 실험을 통하여 각각 114586 N/m와 453 Nm/s의 값을 가지는 것을 확인하였다. 식 (1)의 $x_1(t)$ 는 관성질량의 변위를 나타낸다. 하이브리드 마운트의 하부로부터 진동이 전달되면, 이때의 하부 가진 변위 $x_0(t)$ 에 의하여 하이브리드 마운트에 설치된 상부질량 M 은 진동하게 된다. 따라서 식 (1)의 하이브리드 마운트에 대한 지배방정식을 연계하여 Fig. 2에서 보는 2자유도 시스템의 수학적 모델을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_2(t) &= -k_p(x_2(t) - x_1(t)) - f_a \\ m\ddot{x}_1(t) &= -b_r(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_0(t)) - k_r(x_1(t) - x_0(t)) \\ &\quad + k_p(x_2(t) - x_1(t)) + f_a + f_{MR} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, M 은 하이브리드 마운트 위에 설치된 질량이다.

MR 응용장치들은 MR 유체와 전극의 상대 운동에 따라 유동 모드(flow mode), 전단 모드(shear mode), 압착 모드(squeeze mode)의 형태로 분류할 수 있다⁽¹⁰⁾. 제안된 하이브리드 마운트에서는 디스

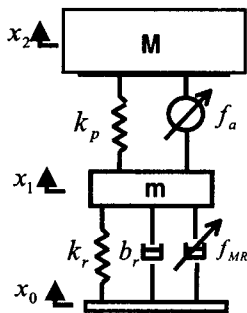


Fig. 2 Mechanical model of the hybrid mount

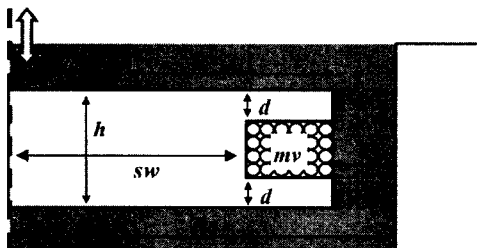


Fig. 3 Geometric parameters of the hybrid mount

크의 수직 방향의 운동시 유동 모드와 전단 모드가 동시에 작용한다. 먼저, 전단모드의 경우 MR 유체의 거동은 일반적으로 다음과 같은 빙햄 모델로 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad \tau_y(H) = \alpha H^\beta \quad (3)$$

여기서 τ 는 MR 유체의 전단응력을 나타내며, η 는 MR 유체의 기본점성 계수이고, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비를 나타낸다. τ_y 는 MR 유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로서, 자기장의 세기(field intensity) H 의 증가와 더불어 증가한다. 이때, 비례상수 α 와 지수 β 는 MR 유체의 항복응력을 결정하는 고유 특성 값이며, α 와 β 는 각각 0.13과 1.13으로 측정되었다. 이 연구에서 사용된 MR 유체는 미국 Lord사의 MRF-132DG로 carbonyl iron과 hydrocarbon oil을 합성한 것이며, 중량비는 80.98%이며, 기본점성계수는 0.092 Pa·s, 밀도는 2.92~3.18 g/cm³이다⁽¹¹⁾. 자기장의 세기(H)는 권선수(N)와 여기에 흐르는 전류(I)를 이용하면 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$NI = H \times L \quad (4)$$

여기서 L 은 자기장 경로의 길이를 나타낸다. 이 연구에서 제안된 하이브리드 마운트 구조 중 Fig. 3을 보면 MR 유체에 흐르는 자기장의 경로는 2개이며 강자성체에 흐르는 자기장의 경로는 1개이다. 따라서 식 (4)를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$NI = 2 \times H_M L_M + H_S L_S \quad (5)$$

여기서 아래첨자 M, S 는 각각 MR 유체와 철을 의미한다. 이때 철에 흐르는 자기장은 MR 유체의 자기장에 비해 매우 작기 때문에 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_M = \frac{NI}{2g} \quad (6)$$

여기서 g 는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 MR 유체에 흐르는 자기장 경로의 길이를 나타낸다($g = L_M$).

또한 수직 방향의 운동에서는 전단모드의 영향이 미소하므로 다음 식과 같이 유동 모드에서 힘을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
f_{MR} &= (\Delta P_c + \Delta P_\eta) \times A_p + F_f \\
&= \left(\frac{2d}{g} \tau_y + \frac{12\eta h}{g^3 b} A_p \dot{x}_1 \right) \times A_p + F_f \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) + R_f \dot{x}_1 \\
&= \frac{2d}{g} A_p \alpha \left(\frac{NI}{2g} \right)^\beta + \frac{12\eta h}{g^3 b} A_p^2 \dot{x}_1 + F_f \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) + R_f \dot{x}_1 \\
&= F_c + F_\eta + F_f
\end{aligned} \tag{7}$$

여기서 F_c , F_η , F_f 는 각각 제어력, 점성력, 마찰력을 나타낸다. 이때, ΔP_c , ΔP_η 는 각각 자기장에 영향을 받는 압력계수와 영향을 받지 않는 압력 계수를 나타낸다. A_p 는 디스크의 면적을 의미하고 \dot{x}_1 는 디스크 또는 압전 작동기의 관성질량의 속도를 나타낸다. 그리고 R_f 는 디스크의 외경(R)과 하우징의 내경(R_o)의 평균 원둘레를 나타낸다. MR 장치의 설계 변수를 Table 1에 나타내었다.

한편, 이 연구에서 적용한 압전 작동기는 폴링방향(poling axis)과 전기장방향이 동일하게 제작되었으며, 다음과 같이 압전 재료의 전기적인 상태와 기계적인 상태를 나타내는 두 식으로 표현된다.

$$D = \varepsilon_{33} E + d_{33} T \tag{8}$$

$$S = d_{33} E + \frac{1}{c} T \tag{9}$$

여기서, D 는 전기변위(electric displacement), d_{33} 는 압전전하상수(piezoelectric charge constant), T 는 응력, ε_{33} 는 유전상수(dielectric constant), E 는 전기장, S 는 변형률, c 는 탄성계수를 나타낸다. n 개의 압전 디스크를 적용한 작동기의 지배방정식은

Table 1 Design parameters of the hybrid mount

Design parameters	Values
Height of disk d	5 mm
Area of coil mv	90 mm ²
Width of disk sw	23 mm
Gap size g	1 mm
Radius of disk R	29 mm

압전 재료의 기계적 상태를 나타내는 식 (9)를 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
f_p &= AT = AcS - Acd_{33}E \\
&= \frac{Ac}{l} (y_h - y_b) - Acd_{33} \frac{n}{l} V \\
&= k_p (y_h - y_b) - \delta V = k_p (y_h - y_b) - f_a
\end{aligned} \tag{10}$$

여기서, f_p 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, $\delta (= Acd_{33}n/l)$ 는 압전 작동기의 계인 값, $f_a (= \delta V)$ 는 부하전압 V 로 조절되는 작동기의 힘을 나타낸다. $y_h(t)$ 는 압전 작동기 상단의 변위를, $y_b(t)$ 는 압전 작동기의 하단 변위를 나타낸다. 이 연구에서 제작된 압전 작동기의 k_p 와 δ 의 값은 각각 75 MN/m와 2.5 N/V이다.

따라서, 하이브리드 마운트 시스템의 상태 공간 방정식은 아래의 식과 같다.

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

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \quad \dot{x}_1(t) \quad x_2(t) \quad \dot{x}_2(t)]^T \tag{12}$$

$$u(t) = [f_a \quad f_{MR}]^T \tag{13}$$

$$d(t) = [x_0(t) \quad \dot{x}_0(t)]^T \tag{14}$$

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

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ 0 & 0 \\ \frac{-1}{M} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_r & b_r \\ m & m \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{16}$$

3. 제어기 설계

이 연구에서는 작동기의 시상수와 수평방향의 모멘트에 대한 시스템의 불확실성을 고려한 하이브리드 마운트의 발생력을 제어하기 위하여 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 하이브리드 마운트의 2개 제어입력을 구하기 위하여 다음과 같이 슬라이딩 서피스를 설정한다.

$$s = Gx(t) \quad (17)$$

여기서, G 는 슬라이딩 서피스의 기울기이며 슬라이딩 서피스($s=0$)에서 슬라이딩 모드가 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.

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

여기서 k 는 불연속 게인(gain)을 나타낸다. 식 (19)의 슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같이 식 (18)의 슬라이딩 모드 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s(t)^2 &= s(t)G\dot{x}(t) \\ &= s(t)\{GAX(t) - GB(GB)^{-1}GAX(t) \\ &\quad - GB(GB)^{-1}k \text{sgn}(s(t) + G\Gamma z(t))\} \\ &= s(t)(k \text{sgn}(s(t)) + G\Gamma z(t)) \leq -\eta |s(t)|, \\ &(\eta > G\Gamma z(t)) \end{aligned} \quad (20)$$

여기서, $\eta > G\Gamma z(t)$ 인 경우 식 (18)을 만족하며, 슬라이딩 모드 조건에도 만족한다. 이러한 불연속 제어기는 채터링을 발생시키므로 정해진 경계조건 영역 안에서 연속 제어로 근사화하여 포화함수로 대체한다.

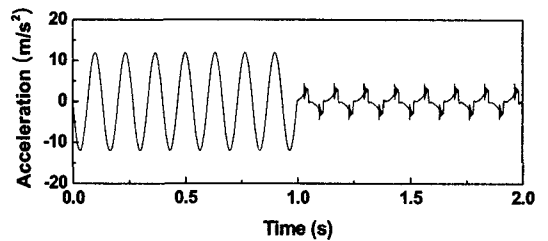
$$\begin{aligned} u(t) &= -(GB)^{-1}(GAX(t) + k \cdot \text{sat}(s(t))) \\ \text{sat}(s) &= \begin{cases} s/\varepsilon & \text{for } |s/\varepsilon| \leq 1 \\ \text{sgn}(s) & \text{for } |s/\varepsilon| > 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

4. 결과 및 고찰

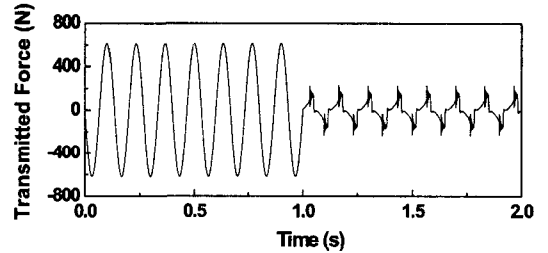
이 연구에서는 슬라이딩모드 제어를 이용하여 MR 유체와 압전 작동기로 구성된 하이브리드 마운

Table 2 Specification of exciting acceleration

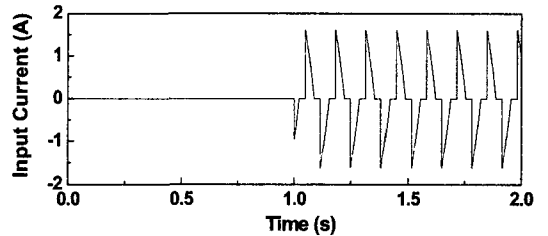
Freq. (Hz)	5	10	20	100	300
Acc. (m/s ²)	0.986	3.944	15.775	78.877	236.749



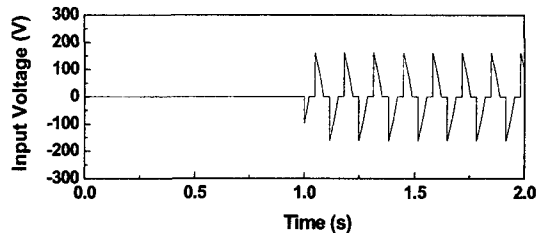
(a) Acceleration



(b) Transmitted force



(c) Control input of MR fluid



(d) Control input of piezostack actuator

Fig. 4 Time response of hybrid mount at 7.5 Hz

트에 대한 진동제어 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평가하였으며, 그 결과를 Fig. 4에서 8에 나타내었다. 시스템의 상부 질량은 50 kg, 압전 작동기의 관성질량은 1.5 kg일 때, 하이브리드 마운트의 하부로부터 입력되는 정현파형의 가진 가속도는 Table 2와 같이 가정하여 시뮬레이션을 수행하였고, 진동제어 성능을 비교하였다. 시뮬레이션을 통해 하이브리드 마운트의 하부로부터 전달되는 가진 가속도에 의한 상부질량의 가속도, 전달력 및 전달률 등을 평가하였다. Fig. 4와 5는 슬라이딩모드 제어기를 이용한 7.5 Hz와 200 Hz의 시간에 따른 시스템의 가속도, 하이브리드 마운트의 전달력 및 MR 유체와 압

전 작동기에 인가되는 전류 및 전압을 나타내었다.

Fig. 4와 5를 통해 7.5 Hz 및 200 Hz에서 MR 유체와 압전 작동기에 인가되는 전류와 전압이 각각 1.5 A와 200 V이며, 1.0초 이후 부하되는 제어입력에 의하여 가속도 및 전달력이 크게 감소함을 알 수 있

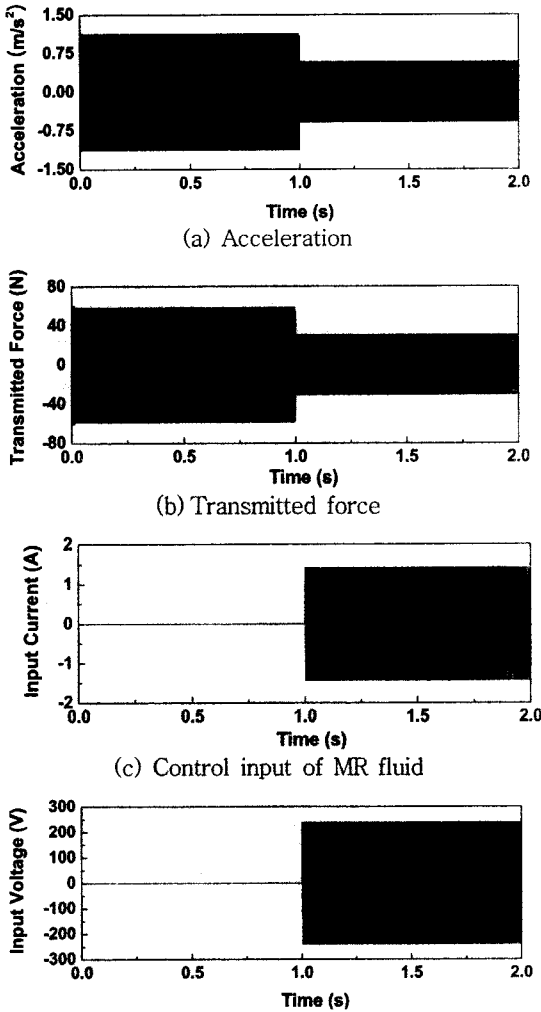


Fig. 5 Time response of hybrid mount at 200 Hz

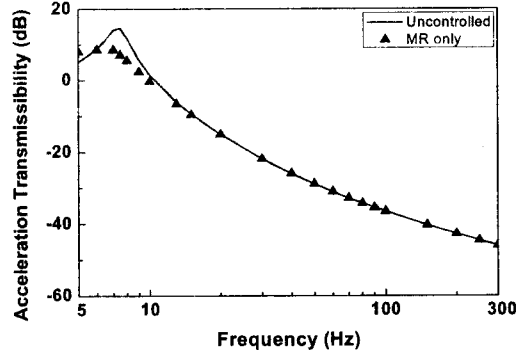


Fig. 6 Transmissibility using the MR fluid only

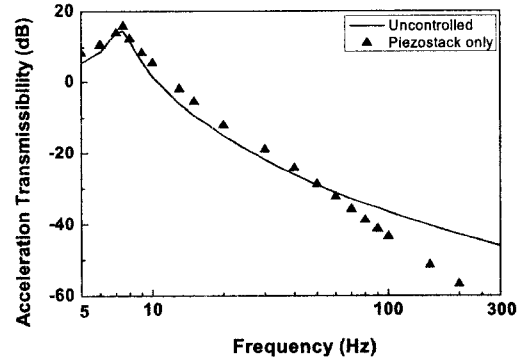


Fig. 7 Transmissibility using the piezostack actuator only

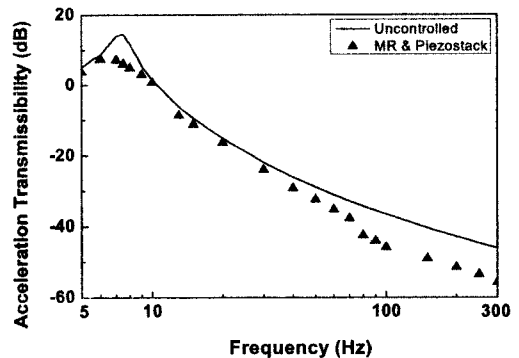


Fig. 8 Transmissibility using both the MR fluid and the piezostack actuator

다. Fig. 6에서 8은 슬라이딩모드 제어기를 이용한 진동 제어시 가속도의 전달률을 나타내었다. Fig. 6은 MR 유체만 제어하여 성능평가를 하였으며, Fig. 7은 압전 작동기만 사용하여 성능평가를 하였다. Fig. 6과 7에서 MR 유체와 압전 작동기는 특정 주파수 영역에서만 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 MR 유체와 압전 작동기 모두를 사용하여 성능평가를 하였으며, 저주파수영역에서 MR 유체, 고주파수영역에서 압전 작동기가 우수한 성능을 보이는 특성에 의해 전체적으로 우수한 결과를 보이고 있다. 특히, 공진주파수인 7.5 Hz에서는 8 dB가 감소되었고, 100 Hz에서 9 dB가 감소되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 효과적인 진동절연성능을 위해 지능재료인 MR 유체, 압전 작동기와 고무요소를 이용한 하이브리드 엔진 마운트를 제안하였다. 그리고 하이브리드 마운트가 고려된 시스템의 수학적 지배방정식을 유도하였으며, 효과적인 진동제어를 위해 외란에 강건한 슬라이딩모드 제어기를 설계하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 시스템의 가속도, 하이브리드 마운트의 전달력 및 전달률을 통해 성능평가를 하였다. 제안한 하이브리드 마운트는 저주파수영역과 고주파수영역 모두 우수한 진동절연성능을 확인할 수 있었다. 향후 실험을 수행하여 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 검증할 예정이다.

참 고 문 헌

- (1) Bernuchon, M., 1984, "A New Generation of Engine Mounts", SAE, 840259, pp. 230~236.
- (2) 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.
- (3) Kowalczyk, K., Svaricek, F., Bohn C., and Karkosch, H. J., 2004, "Active Control of Engine Induced Vibrations", International Conference on New Actuators.
- (4) Choi, S. B. and Hong, S. R., 2004, "Dynamic Modeling and Vibration Control of Electrorheological Mounts", ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 126, No. 4, pp. 537~541.
- (5) Yook, J. Y., Choi, S. B., Sung, K. G and Moon, S. J., 2007, "Design of hybrid mount Using Rubber Element and Piezoelectric Actuator with Application to Vibration Control", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 390~397.
- (6) Paeng, Y. S., Yook, J. Y., Choi, S. B. and Moon, S. J., 2007, "Control Performance of Hybrid Mount Using Electromagnetic Actuator and PZT Actuator", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 7, pp. 617~623.
- (7) Hong, S. R. and Choi, S. B., 2005, "Vibration Control of a Structural System Using Magneto-rheological Fluid Mount", Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol. 16, No. 11-12, pp. 931~936.
- (8) Andrew, J. Y. and Colin, H. H., 1996, "Control of Flexural Vibration in Stiffened Structures Using Multiple Piezoceramic Actuators", Applied Acoustics, Vol. 49, No. 1, pp. 17~48.
- (9) Takayoshi, K., Takafumi, F., Takayoshi, H., Takeo, A., Nobuyoshi M., Satoru A. and Kohtarō T., 1997, "Active Vibration Control of Frame Structures with Smart Structures Using Piezoelectric Actuators (Vibration Control by Control of Bending Moments of Columns)", Smart Materials Structures, Vol. 6, pp. 448~456.
- (10) Jolly, M. R., Bender, J. W. and Carlson, J. D., 1998, "Properties and Applications of Commercial Magneto Rheological Fluids", Proceedings of the SPIE's 5th Annual Symposium on Smart structures and Materials, Vol. 3327, pp. 262~275.
- (11) Lord Corporation, Lord Technical Data, <http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7015.pdf>