

지능재료를 이용한 엔진 마운트의 진동 제어 Vibration Control of Engine Mount Utilizing Smart Materials

송현정*, 최승복**
Hyun-Jeong Song and Seung-Bok Choi

Key Words : ER fluid(ER 유체), Piezoelectric Actuator(압전 작동기), ER Engine Mount(ER 엔진마운트), Vibration Control(진동 제어), Sliding Mode Controller(슬라이딩 모드 제어기)

ABSTRACT

This paper presents vibration control of an engine mount for a passenger vehicle utilizing ER fluid and piezoelectric actuator. The proposed engine mount can be isolated the vibration of wide frequency range with many types of amplitude. The main function of ER fluid is to attenuate vibration for low frequency with large amplitude, while the piezoelectric actuator is activated in high frequency range with small amplitude. A mathematical model of the engine mount is derived using hydraulic model and mechanical model. After formulating the governing equation of motion, then field-dependent dynamic stiffness of the engine mount is evaluated for various engine speed and excitation amplitude conditions. Then robust controller is designed to attenuate vibration of wide range frequency component. Computer simulation is undertaken in order to evaluate the vibration control performance such as transmissibility magnitude in frequency domains.

1. 서 론

차량의 엔진 마운트 시스템은 엔진의 하중을 지지하고 엔진의 불균일한 힘으로부터 진동을 절연하는 역할을 한다. 이러한 엔진으로부터 발생되는 소음과 진동 문제를 해결하기 위해 다양한 형태의 엔진 마운트에 대한 연구와 개발이 진행되고 있다. 현재 강성계수와 감쇠계수의 동적 특성이 일정한 형태의 고무 엔진 마운트가 널리 사용되고 있고, 이는 가진 주파수 및 가진 진폭에 대해 거의 일정한 동특성을 보이기 때문에 다양한 주파수 성분을 갖는 외부 진동 문제를 해결하는 데는 그 성능의 한계를 보이고 있다⁽¹⁾. 이를 보완하기 위해 제안된 유체봉입 엔진 마운트는 내부에 유로를 설치하여 유동이 발생될 때 유체 저항에 의한 댐핑력이 발생되도록 하였고 이때 댐핑력을 설정된 유로의 크기 및 유체의 속도에 의해 결정되며 저주파수 영역에는 비교적 좋은 절연 성능을 보이나 고주파수 영역에서는 오히려 성능이 저하되는 특징을 보인다^(2,3). ER 유체 및 MR 유체의 지능유체를 이용하여 반능동형태의 엔진 마운트에 대한 연구가 수행되고 있고 이는 전기장/자기장의 세기에 따라 다양한 크기를 갖는 댐핑력을 연속적으로 발생시키는 형태이다⁽⁴⁾. 발생시킬 수 있는 댐핑력이 반능동 조건에 따라 제한적으로 시스템에 부하될

수 있기 때문에 비교적 낮은 주파수 영역에서의 절연 성능에 효과적으로 사용될 수 있으나 고주파수 영역에서의 진동 절연 성능을 기대하기 어려운 특징이 있다. 능동형 작동기를 이용한 능동형 엔진 마운트는 전자기 구동기, 압전 작동기 등을 이용한 형태가 많이 사용되고 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 이중 압전 작동기를 이용한 형태는 넓은 주파수 대역의 진동을 절연 시키기 위해서는 변위 및 힘을 확대 할 수 있는 메커니즘을 적용하여 압전 작동기의 발생 변위가 작은 특징을 극복하여 적용하고 있으나 낮은 주파수 영역의 큰 변위를 갖는 영역에서는 그 성능이 제한적이다.

본 연구에서는 ER 유체와 압전 작동기를 갖는 승용차량용 엔진 마운트를 제안하였으며 ER 유체는 낮은 주파수 영역의 큰 가진 요소의 진동 절연을 위해 사용하였고 빠른 응답 특성을 갖는 압전 작동기는 높은 주파수 영역의 작은 가진 요소의 진동 절연을 하도록 구성하였다. 시스템의 능동제어를 위하여 강건제어기를 사용하였으며 시뮬레이션을 통하여 시스템의 성능을 고찰하였다.

2. 엔진 마운트의 구성 및 모델링

엔진 마운트는 엔진의 하중을 지지하기 위한 고무, ER 유체를 이용한 부분과 압전 작동기를 이용한 부분으로 구성이 된다. 두 지능재료를 이용하여 넓은 주파수 영역에서의 진동 절연을 하도록 하였다. Fig. 1은 제안된 엔진 마운트의 개략도를 보여주고 있다. 상부에 있는 고무부분은 엔진을 지지하는 동시에 진동을 절연 시켜주는 역할을 한다. 또한 고무하부에 설치되어 있는 ER 유체 부분

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과

E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 868-1716

은 전극이 실린더 형태로 구성되어 있고 외부 가진 입력 시 댐핑력을 발생시킬 수 있도록 다중의 실린더 형태로 되어있다. 또한 압전 작동기는 하부에 고정되어 힘을 발생 시킬 수 있도록 구성되어 있다.

2.1 ER 유체를 이용한 구성 및 모델링

Fig. 2 는 ER 유체로 구성이 되는 부분의 개략도를 보이고 있다. 상부챔버와 하부챔버 사이에 유로가 설치되어 운동 발생시 유로를 통해 유동이 이루어진다. 전기장 무부하시 ER 유체는 뉴토니안 거동을 하게 되며 유동발생시 유로에서의 유동저항에 의한 댐핑력 만을 발생시키게 된다. 전기장 부하시에는 극이 서로 다른 전극사이를 유동하는 ER 유체는 빙햄(Bingham)거동을 하게 되며 항복응력이 발생하여 유동저항을 일으킨다. 이때 다양한 형태의 외부 가진에 대해 전극 간극을 일정하게 유지시켜 주기 위해 선형 베어링을 내부에 구성하였으며 전극을 보호하고 적절 한 댐핑력을 발생시킬 수 있도록 전극이 고정되는 부분은 구형 형태를 갖는 형상으로 고정이 되어 있도록 하였다. 여기에서 사용된 ER 엔진마운트의 작동 형태는 전단모드와 유동모드가 함께 발생하는 복합모드 형으로 하여 엔진마운트에 적용하였다. 고무의 동특성을 나타내는 강성과 댐핑은 선형으로 가정하였으며 ER 유체는 비압축성 유체라고 가정하였다.

Fig. 3 은 ER 엔진 마운트의 유체역학적 모델을 보여주고 있다. 이 모델로부터 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$m_m \ddot{x}_m = -k_R(x_m - x_a) - c_R(\dot{x}_m - \dot{x}_a) + A_p P_1 \quad (1)$$

여기서, k_R 와 c_R 은 각각 수직방향의 고무 강성과 댐핑 상수이고, P_1 은 상부챔버에서의 압력이다.

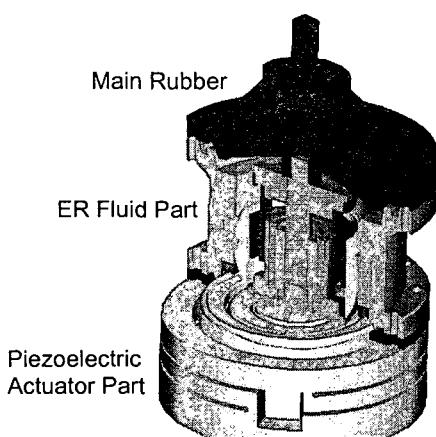


Fig. 1 Configuration of ER engine mount

가진시 유동이 발생하게 될 때 상부챔버와 하부챔버 사이에 있는 유로에서 유동저항 및 ER 효과에 의해 압력강하가 일어나고 이때의 연속방정식은 다음과 같다.

$$C_1 \dot{P}_1 = A_p (\dot{x}_m - \dot{x}_a) + Q \quad (2)$$

$$C_2 \dot{P}_2 = -Q \quad (3)$$

$$P_2 - P_1 = \frac{12\eta l}{bh^3} Q + 2 \frac{l}{h} \tau_y \operatorname{sgn}(Q) \quad (4)$$

여기서 Q 는 상부챔버와 하부챔버의 압력차로 인해 발생하는 유량이고, P_2 는 하부챔버의 압력, η 는 ER 유체의 점성, C_1 과 C_2 는 상부챔버와 하부챔버의 컴플라이언스이다. 식(1)-(4)를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_m \ddot{x}_m + k_x(x_m - x_a) + c_x(\dot{x}_m - \dot{x}_a) = -F_{ERt} \quad (5)$$

여기서 각각 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$k_x = k_R + k_1, \quad c_x = c_R + c_1 - c_2,$$

$$F_{ERt} = \left[A_e \tau_{ys} + 2 \left(\frac{A_p C_2}{C_1 + C_2} \right) \frac{L_e}{h} \tau_{yf} \right] \operatorname{sgn}(\dot{x}_m - \dot{x}_a)$$

여기서 τ_{ys} 는 전단모드에 의해 발생되는 항복응력, τ_{yf} 는 유동모드에 의해 발생되는 항복응력을

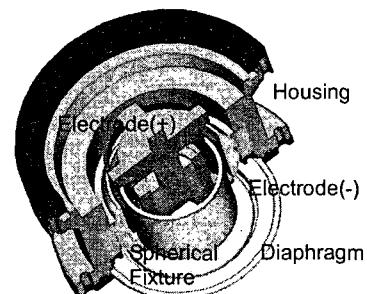


Fig. 2 Schematic configuration of the ER fluid part

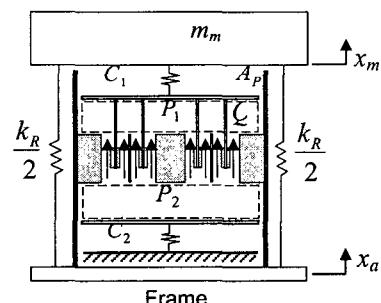


Fig. 3 Hydraulic model of ER fluid part

을 나타내고 여기에서는 각 모드에 따른 동특성이 유사하여 하나의 항으로 나타낼 수 있다.

2.2 압전 작동기를 이용한 구성 및 모델링

압전 작동기로 구성된 부분의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 적층형 압전 작동기를 사용하였고 ER 유체로 구성된 부분 아래에 설치되어 있으며 전기장에 따라 힘을 발생시키도록 설계되었다. Fig. 5는 이때의 역학적 모델을 보여주고 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_{im} \ddot{x}_a + c_p \dot{x}_a + k_p x_a = F_a \quad (6)$$

여기서 m_{im} 은 ER 유체 부분과 압전 작동기 사이에 연결되어 있는 부분의 질량이고 k_p 는 적층형 압전 작동기의 강성 계수, c_p 는 댐핑 계수를 나타내고 F_a 는 전기장에 따라 압전 작동기에서 발생되는 힘으로서 αV 로 나타낸다.

2.3 엔진 마운트의 모델링

앞서 ER 유체와 압전 작동기로 구성된 모델을 통하여 두 지능재료를 이용한 엔진 마운트의 역학적 모델을 Fig. 6과 같이 나타내었다. 제안된 엔진 마운트의 역학적 모델로부터 운동방정식을 유도하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_m \ddot{x}_m + c_x (\dot{x}_m - \dot{x}_a) + k_x (x_m - x_a) + \frac{A_p}{C_1} (A_p x_m - A_p x_a - v_i) = F(t) \quad (7)$$

$$I_i \ddot{v}_i + b_i \dot{v}_i + \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} v_i - \frac{1}{C_1} A_p (x_m - x_a) = -P_{ER}(t) \quad (8)$$

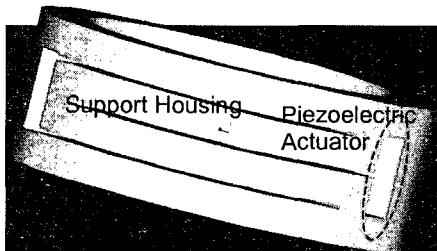


Fig. 4 Schematic configuration of the piezoelectric actuator part

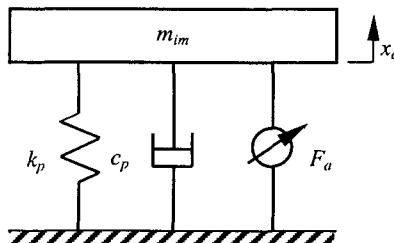


Fig. 5 Mechanical model of the piezoelectric actuator part

$$m_{im} \ddot{x}_a + c_p (\dot{x}_a - \dot{x}_m) + k_p (x_a - x_m) + \frac{A_p}{C_1} (A_p x_m - A_p x_a - v_i) = -F_a(t) \quad (9)$$

여기서 b_i 는 전극사이에서의 유체저항, v_i 는 전극 사이를 유동할 때 발생되는 ER 유체의 체적이고 $P_{ER}(t)$ 는 ER 유체에 전기장을 가했을 경우 상부챔버와 하부챔버의 압력차이가 발생하게 되는데 이때 발생하는 압력강하를 나타낸다.

3. 엔진 마운트의 동특성 해석

엔진 마운트의 동특성을 살펴보기 위해 전기장에 따른 동강성 계수의 변화를 살펴 보았다. 동강성 계수는 가진 변위를 $\pm 1mm$ 의 크기를 갖는 정현파형으로 하였을 경우 ER 유체에 가해지는 전기장에 따른 댐핑력으로부터 구할 수 있다. Fig. 7은 전기장 부하에 따른 동강성계수의 특성을 보여주고 있으며 전기장의 무부하시에도 동강성 계수가 점점 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 주파수에 따라 발생되는 댐핑력이 증가하여 높은 영역에서도 그 특성이 증가하는 것을 알 수 있고 전기장 부하에 따라 발생되는 댐핑력의 증가로 인해 동강성 계수 또한 크게 증가 됨을 알 수 있다. 이로부터 비교적 낮은 주파수 영역에서의 진동절연을 위해 ER 유체가 적절하게 큰 힘을 발생시킬 수 있음을 의미한다.

4. 엔진 마운트 제어특성

엔진 마운트의 제어 성능을 고찰하기 위해 강건제어기인 슬라이딩 모드 제어기를 적용하였다. 슬라이딩 평면은 다음과 같이 정의 한다.

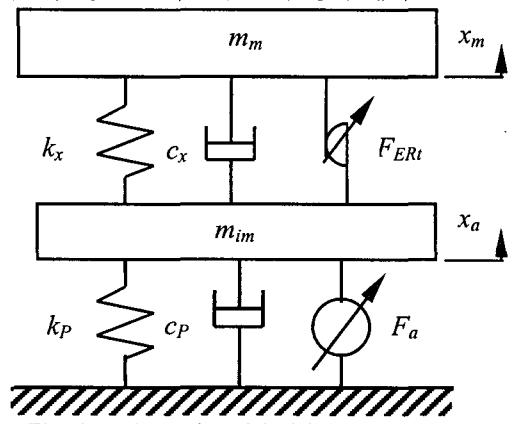


Fig. 6 Mechanical model of the engine mount

$$s(x) = Gx \quad (10)$$

여기서 G 는 슬라이딩 평면 행렬을 의미하고 다음 식으로부터 G 를 구할 수 있다⁽⁸⁾.

$$AW - WJ = BL, G = B^g \quad (11)$$

슬라이딩 모드 상태인 $s(x)d/dt[s(x)] < 0$ 를 만족하는 슬라이딩 모드 제어기를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$u = \frac{(GB)^{-1}}{1-\phi} (\|GAx\| + \|G\bar{A}x\|) \operatorname{sgn}(s) + k \operatorname{sgn}(s) \quad (12)$$

여기서 A, B 는 상태공간 방정식으로부터 얻어진 시스템 행렬을 나타내고, 제어기 u 는 ER 엔진 마운트의 댐핑력과 압전작동기로부터 발생하는 힘을 나타낸다. 다음은 ER 유체 작동 시 적용되는 반능동 조건을 나타내고 있다.

$$u = \begin{cases} u & \text{for } \dot{x}_m(\dot{x}_m - \dot{x}_a) > 0 \\ 0 & \text{for } \dot{x}_m(\dot{x}_m - \dot{x}_a) \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

위에서 제어기 u 는 물리적으로 안정한 시스템의 에너지 소산을 의미한다⁽⁹⁾. 제어입력 u 가 결정되면 ER 유체 부분에 가해지는 전기장을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E = [u \cdot h / 2 \cdot A_p l \cdot \alpha]^{1/\beta} \quad (14)$$

Fig. 8 은 제어를 수행 하였을 경우 결과를 보여주고 있다. 전 주파수 영역에서 전동 제어가 잘

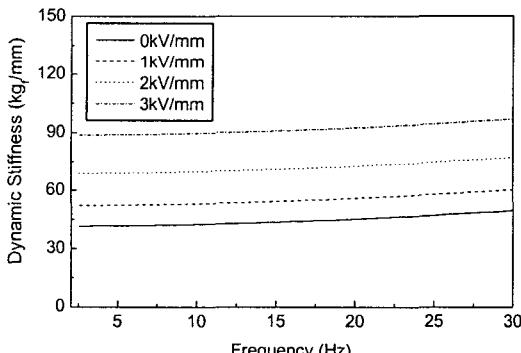


Fig. 7 Dynamic stiffness of the engine mount

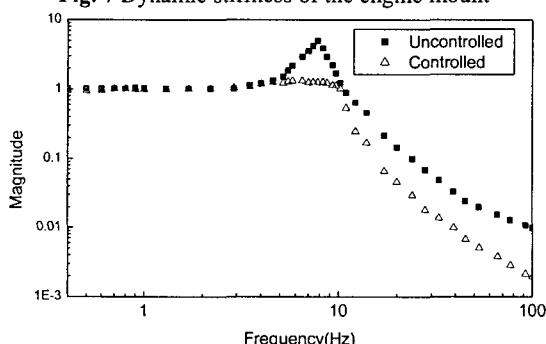


Fig. 8 Control performance of engine mount

수행되었음을 알 수 있으며 공진주파수 영역인

10Hz 부근까지는 ER 유체의 댐핑력에 의해 효과적을 진동절연이 수행되었고 공진 영역이상에서는 압전 작동기에서 발생되는 힘을 통하여 진동절연이 수행되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 지능재료를 이용한 엔진마운트가 제안되었고 지능재료를 이용한 각 부분에 대한 구성과 모델링을 수행하였다. ER 유체로 이루어진 부분과 압전 작동기를 이용한 부분의 모델링으로부터 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 동특성에 대한 성능을 고찰하였다. 강건제어 알고리즘을 통해 진동 절연 성능을 살펴 본 바 효과적으로 진동절연이 이루어 짐을 고찰하였고 향후 엔진 마운트를 제작하여 실험적으로 그 제어성능을 고찰 할 예정이다

후 기

본 연구는 민·군겸용기술사업의 지원에 의하여 이루어 졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Rivin E. I., 1985, Passive engine mount - some directions for further development. SAE Paper 850481.
- (2) Singh R., Kim G. and Ravinda R. V., 1992, Linear analysis of automotive hydro-mechanical mount with emphasis on decoupler characteristics. J. of Sound and Vibration 158(2), pp. 219-243.
- (3) Colgate J. E., Chang C. T., Chiou Y. C., Liu W. K. and Keer L. M., 1995, Modeling of a hydraulic engine mount focusing on response to sinusoidal and composite excitations. J. of Sound and Vibration. 183(3), pp. 503-528.
- (4) Choi S. B. and Song H. J., 2002, Vibration control of a passenger vehicle utilizing a semi-active ER engine mount. Vehicle System Dynamics, 37(3), pp. 193-216.
- (5) Matsuoka H., Mikasa T. and Nemoto H., 2004, NV Countermeasure technology for a cylinder-on-demand engine - development of active control engine mount. SAE Paper 2004-01-0413.
- (6) Shibayama T., Ito K., Gamii T. and Oku T., 1995, Active engine mount for a large amplitude of idling vibration. SAE Paper 951298, pp. 531-538.
- (7) Miller L. R., Ahmadian M., Nobles C. M. and Swanson D. A., 1995, Modeling and performance of an experimental active vibration isolator. ASME J. of Vibration and Acoustics, 117, pp. 272-278.
- (8) Hui S. and Zak S. H., 1992, Robust control synthesis for uncertain/nonlinear dynamical systems, Automatica, 28(2), pp. 289-298.
- (9) Karnopp D. and Crosby M. J. and Harwood R. A., 1974, Vibration control using semi-active force generator. ASME J. of Eng. for Industry, 96(619), pp. 619-626.