

온도 변화에 따른 ER 엔진마운트의 제어 특성 Control Characteristics of ER engine mount considering Temperature Variation

송현정*·최승복**

Hyun-Jeong Song and Seung-Bok Choi

Key Words : ER fluid(ER 유체), ER Engine Mount(ER 엔진마운트), Vibration Control(진동 제어), Temperature Variation(온도 변화), Dynamic Stiffness(동강성)

ABSTRACT

The engine mount of vehicle systems is role of support engine mass and isolate noise and vibration from engine disturbance forces. One of attractive candidates to achieve this goal is to utilize a semi-active ER engine mount. By applying this, we can effectively control damping force and hence the noise and vibration by just controlling the intensity of electric field. However, control performance of the engine mount may be very sensitive to temperature variation during engine operation. In this work, we investigate dynamic performances of ER engine mount with respect to the temperature variation. In order to undertake this, a flow-mode type of ER engine mount is designed and manufactured. Displacement transmissibility is experimentally and numerically evaluated as a function of the electric field. The ER engine mount is then incorporated with full-vehicle model in order to investigate vibration control performance. After formulating the governing equation of motion, a semi-active controller is designed. The controller is implemented through a hardware-in-the-loop simulation (HILS), and control responses such as acceleration level at various engine speeds are evaluated in the frequency and time domains.

1. 서론

최근 차량은 고출력과 함께 경량화가 이루어지고 있으며 이에 따라 소음 진동문제가 더욱 중요시 되고 있다. 소음 진동의 주요 원인은 엔진 폭발에 의한 불균일한 힘으로부터 발생되고 이러한 소음 진동은 사시로 전달되어 구조상의 문제와 승차자가 느끼는 승차감에 있어서 문제를 야기 시킨다. 엔진으로부터 발생하는 소음진동을 저감시키기 위해 수동형에서 반능동형 그리고 능동형까지 다양한 형태로 연구가 진행되고 있다. 수동형 엔진마운트의 종류는 대표적으로 점탄성 재료를 이용한 고무 엔진마운트⁽¹⁾, 내부에 유로가 설치되어 유로를 따라 유동이 일어날 때 댐핑력을 발생시키는 유체봉입 엔진마운트⁽²⁾가 있다. 수동형 엔진마운트는 제한된 주파수 영역에서만 좋은 진동절연 성능을 보이는 단점이 있다. 능동형 엔진마운트는 전자석을 이용한 솔레노이드 방식⁽³⁾과 압전재료를 이용하여 힘을 증폭시키는 방식⁽⁴⁾ 등이 있다. 이러한 방법은 비교적 넓은 대역에서의 좋은 진동절연 성능을 보이나 다수의 센서가 필요하고 복잡한 제어 알고리즘이 필요하며 큰 에너지가 소모되는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 인가하는 전기장/자기장에 따라 그 유변학적

특성이 변하는 ER(electro-rheological)유체와 MR(magneto-rheological)유체를 이용한 반능동형 엔진마운트⁽⁵⁾에 대한 연구가 진행되고 있다. 엔진을 지지하고 있는 엔진마운트 시스템은 엔진의 운전 시 또는 외부 조건에 의해 온도변화에 노출되어 있다. ER 유체를 이용한 엔진마운트의 경우는 온도 조건에 따라 성능의 변화가 발생되며 이에 대한 연구는 매우 드문 실정이다.

본 연구에서는 중형차량용 ER 엔진마운트를 제안하였으며 작동형태는 유동모드로서 단품 실험을 통해 온도변화에 따른 ER 엔진마운트의 동적특성 실험을 한 후 1 자유도 시스템을 구성하여 전기장에 따른 진동절연 특성을 살펴보았다. 온도 변화에 따른 ER 유체의 고유 특성과 HILS를 이용하여 전체 차량 시스템에서 엔진마운트 시스템의 제어 성능을 고찰하였다.

2. ER 엔진마운트의 동적 모델링

Fig. 1 은 제작된 ER 엔진마운트의 개략도를 보여주고 있다. 상부에 있는 고무부분은 엔진을 지지하는 동시에 진동을 절연 시켜주는 역할을 한다. 상부챔버와 하부챔버 사이에 유로가 설치되어 운동 발생시 유로를 통해 유동이 이루어진다. 전기장 무부하시 ER 유체는 뉴토니안(Newtonian)거동을 하게 되며 유동발생시 유로에서의 유동저항에 의한 댐핑력을 발생시키게 된다. 전기장 부하시에 는 전극사이를 유동하는 ER 유체는 빙햄(Bingham)

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

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

거동을 하게 되며 항복응력이 발생하여 유동저항을 일으킨다. 고무는 선형이라고 가정하였으며 ER 유체는 비압축성 유체라고 가정하였다.

Fig. 2 는 ER 엔진마운트의 유체역학적 모델을 보여주고 있다. 이 모델로부터 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$M\ddot{x}_m = -k_R(x_m - x_b) - c_R(\dot{x}_m - \dot{x}_b) + A_p P_1 \quad (1)$$

여기서, k_R 와 c_R 은 각각 수직방향의 고무 강성과 댐핑 상수이고, P_1 은 상부챔버에서의 압력이다. 가진시 유동이 발생하게 될 때 상부챔버와 하부챔버 사이에 있는 유로에서 유동저항 및 ER 효과에 의해 압력강하가 일어나고 이때의 연속방정식은 다음과 같다.

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

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

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

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.

$$M\ddot{x}_m = k_R(x_b - x_m) + c_R(\dot{x}_b - \dot{x}_m) + k_1(x_b + x_i - x_m) \quad (5)$$

$$k_2 x_i + k_1(x_m - x_b - x_i) = c_i \dot{x}_i + \operatorname{sgn}(\dot{x}_i) F_{ER} \quad (6)$$

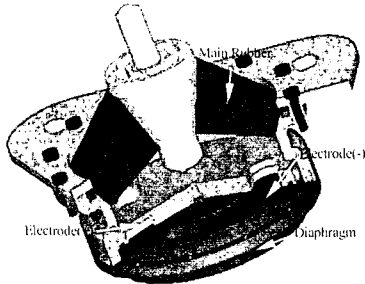


Fig. 1 Configuration of ER engine mount

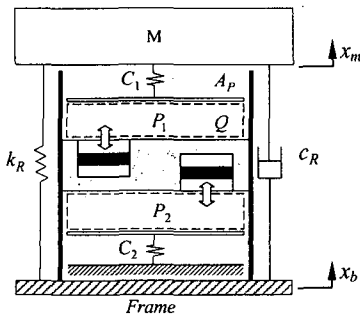


Fig. 2 Hydraulic model of ER engine mount

여기서 각각 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$k_1 \equiv A_p^2 / C_1, \quad k_2 \equiv A_p^2 / C_2, \quad c_i \equiv A_p^2 12\eta l / (bh^3),$$

$$F_{ER} = 2A_p l / h \tau_y(E), \quad \tau_y(E) = \alpha E^\beta$$

설계제작 된 ER 엔진마운트의 성능평가를 위한 실험장치의 사진을 Fig. 3 에 나타내었다. 엔진마운트는 온도챔버 내부에 설치되어 있으며 온도챔버는 서큘레이터로부터 일정한 온도를 유지하게 된다. ER 엔진마운트는 상부에 고정되어 있는 로드셀과 연결되어 있으며 하부에는 전자석 가진기와 연결되어 일정한 온도에서 시험을 하였다. 전자석 가진기를 통해 입력된 가진형태는 진폭 $\pm 1.0\text{mm}$ 의 정현파형으로 가진 주파수는 3Hz 에서 30Hz 까지로 하였고 온도범위는 30°C, 70°C 로 하였다. 인가되는 전기장은 최대 2kV/mm 로 하였다.

Fig. 4 는 온도에 따른 ER 엔진마운트의 동강성계

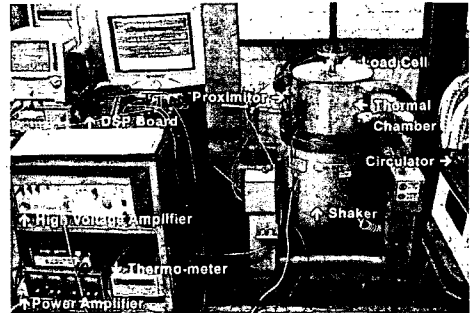
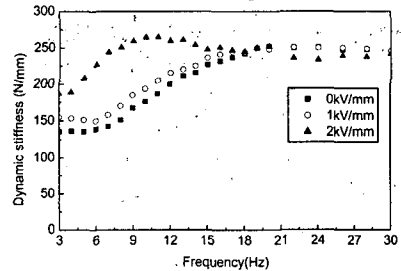
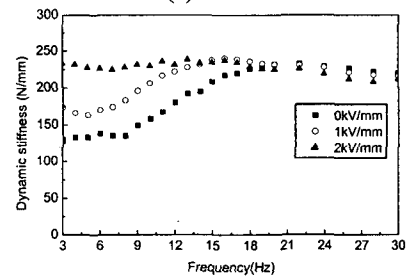


Fig. 3 Photograph of the experimental apparatus for temperature characteristic test



(a) 30°C



(b) 70°C

Fig. 4 Dynamic stiffness of ER engine mount with temperature variations

수를 나타내고 있다. 전기장 무부하시 동강성계수는 온도가 증가 할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 온도가 증가 할수록 ER 유체의 점도가 감소하고 고무의 강성이 낮아지는 비선형 거동 때문이다. ER 엔진마운트에 부하 되는 전기장의 세기가 커질수록 동강성계수가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 저기장 부하에 따라 ER 유체의 항복응력이 증가하여 엔진마운트 내부 유로에서 유동저항을 증가시키게 되고 결과적으로 댐핑력이 커지기 때문이다.

ER 엔진마운트의 전기장에 따른 동특성을 살펴 보기 위해 Fig. 5 와 같이 1 자유도 시스템을 구성 하였다. 질량은 60kg 으로 하였고, 가진 변위에 대한 질량의 변위의 비인 변위 전달률을 구하기 위해 가진기 부분에는 비접촉 변위센서(Proximitor)를 설치하였고 질량 부분에는 LVDT 를 설치하여 변위를 측정하였다. 이때 가진 변위는 $\pm 1mm$ 로 하였다. Fig. 6 은 시험 장치를 통해 측정된 ER 엔진마운트의 전기장 부하에 따른 전달률을 보여주고 있다. 제작된 ER 엔진마운트가 공진주파수 영역에서 효과적으로 진동절연이 됨을 알 수 있고 실험값과 시뮬레이션을 통해 얻은 값이 비교적 잘 일치하는 것을 통해 모델의 타당성을 확인하였다.

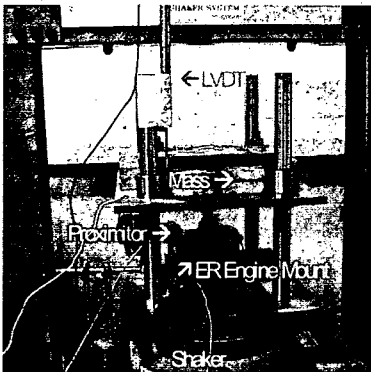


Fig. 5 Photograph of the 1DOF experimental setup

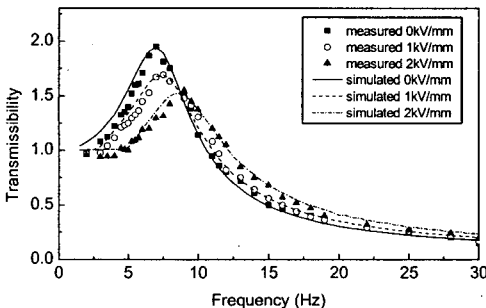


Fig. 6 Displacement transmissibility of ER engine mount

3. 전체차량 시스템의 모델링

본 연구에서 제안된 전체차량은 FF 타입이고 엔진마운트 시스템은 총 3 개의 엔진마운트로 이루어져있다. Fig. 7 은 13 자유도를 갖는 차량 모델이다. 모델링 시 엔진마운트는 서로 다른 위치와 각도를 가지도록 하였다. 차체는 강체로 가정하였으며 엔진은 피치(pitch), 요(yaw), 롤(roll) 그리고 수직방향의 자유도를 가지도록 하였다. 차체와 현가장치는 각각 수직방향의 운동만 고려하였다. 차량에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_{ph}\ddot{\phi} = -t_{br}F_{s1} - t_{br}F_{s2} + t_{bl}F_{s3} + t_{bl}F_{s4} + t_{bl}(F_{ze1} + F_{ERZ1}) - t_{el}(F_{ze2} + F_{ERZ2}) - t_{er}(F_{ze3} + F_{ERZ3}) \quad (7)$$

$$J_{th}\ddot{\theta} = l_{bf}F_{s1} - l_{br}F_{s2} - l_{br}F_{s3} + l_{bf}F_{s4} - l_{e1}(F_{ze1} + F_{ERZ1}) - l_{e2}(F_{ze2} + F_{ERZ2}) - l_{e3}(F_{ze3} + F_{ERZ3}) \quad (8)$$

$$m_b\ddot{z}_b = -(F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4}) + (F_{ze1} + F_{ze2} + F_{ze3}) + (F_{ERZ1} + F_{ERZ2} + F_{ERZ3}) \quad (9)$$

$$m_{un}\ddot{z}_{un} = F_{sn} - k_{un}z_{un}, \quad (n=1,2,3,4) \quad (10)$$

여기서 ϕ 와 θ 는 각각 차체 질량 m_b 의 피치와 롤 각변위를 나타내고 있다. 또한 엔진 좌표계에서의 F_{ERXn} , F_{ERYn} 그리고 F_{ERZn} 는 ER엔진마운트의 댐핑력 F_{ER} 로부터 얻을 수 있다. F_{sn} 은 지면으로부터 차체로 전달되는 힘이고, F_{zen} 은 엔진 좌표계에서 z 방향으로 전달되는 힘을 나타내고 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$F_{sn} = k_{sn}(z_{bn} - z_{un}) + c_{sn}(\dot{z}_{bn} - \dot{z}_{un}) \quad (n=1,2,3,4) \quad (11)$$

$$F_{zen} = K_{z2n}z_{en} + K_{z2n}x_{en} + K_{z2n}y_{en} \quad (n=1,2,3) \quad (12)$$

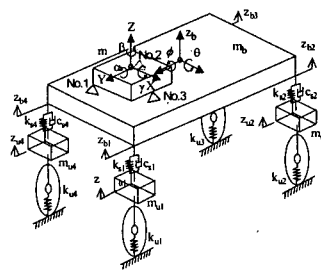


Fig. 7 Full-Vehicle model with the ER engine mount

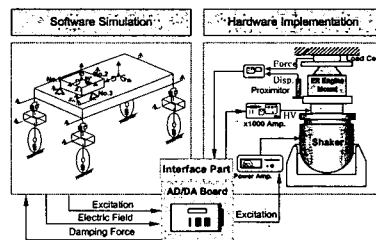


Fig. 8 Schematic configuration of the HILS

4. HILS 를 통한 제어 특성

제안된 ER 엔진마운트의 제어 특성을 평가하기 위해 HILS(hardware-in-the-loop simulation)를 수행하였다. Fig. 8 은 HILS 의 개략도 이고 총 세 부분으로 구분 할 수 있다. 첫째는 전체차량 모델이 구성되어 있는 소프트웨어 부분이고 두 번째는 전체 차량 모델 중 No.3 에 해당하는 부분과 연계된 ER 엔진마운트의 하드웨어 부분이다. 그리고 나머지는 마이크로프로세서가 장착된 DSP 보드로 구성되는 인터페이스 부분이다. ER 엔진마운트의 댐핑력은 실험적으로 측정되며 소프트웨어 부분의 전체 차량모델로 피드백 되어 진다. 전체 차량모델에서 진동제어가 이루어 지며 엔진마운트에 발생하는 변위를 소프트웨어 부에서 계산하여 가진기는 다시 하드웨어부에 설치되어 있는 ER 엔진마운트에 변위를 구현하게 되어 하나의 피드백 메커니즘을 구성한다.

본 연구에서는 ER 엔진마운트에 가해지는 제어 입력을 계산하기 위해 반능동 스카이훅(skyhook) 제어기⁽⁶⁾를 사용하였다. ER 엔진마운트의 요구 댐핑력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_i = C_{skyi}(\dot{z}_i - \dot{z}_{bi}), \quad i = 1,2,3 \quad (13)$$

여기서 C_{skyi} 는 제어 계인을 나타내고 물리적으로 댐핑 계수를 나타낸다. 식(13)에 있는 제어기 u_i 는 ER엔진마운트의 댐핑력(F_{ERzi})을 나타낸다. 다음은 반능동 조건을 나타내고 있다.

$$u_i = \begin{cases} u_i & \text{for } \dot{z}_i(\dot{z}_i - \dot{z}_{bi}) > 0 \\ 0 & \text{for } \dot{z}_i(\dot{z}_i - \dot{z}_{bi}) \leq 0 \end{cases}, \quad i = 1,2,3 \quad (14)$$

위에서 제어기 u_i 는 물리적으로 안정한 시스템의 에너지 소산을 의미한다. 제어입력 u_i 가 결정되면

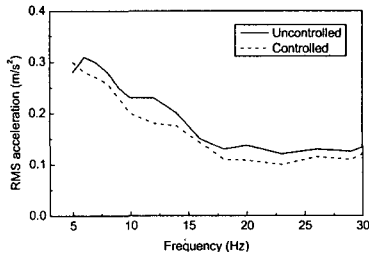


Fig. 9 RMS acceleration at driver's position

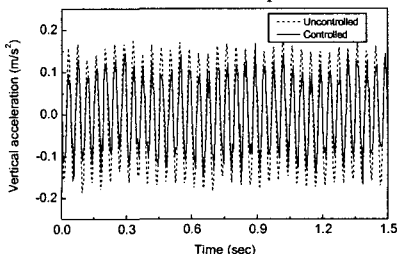


Fig. 10 Time response at the seat next to the driver

ER엔진마운트에 가해지는 전기장을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E_i = \left[\frac{u_i \cdot h}{2 \cdot A_p \cdot l \cdot \alpha} \right]^{1/\beta} \quad (15)$$

Fig. 9 는 운전자 위치에서의 RMS 가속도를 보여 주고 있다. 스카이훅 제어기를 통해 제어를 수행하였을 경우 진동이 감소되었음을 알 수 있다. Fig. 10 은 엔진 아이들시 보조석에서의 가속도를 보여 주고 있다. 제어가 수행되었을 경우 가속도가 줄어든 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 반능동형 ER 엔진마운트가 제안되었고 온도에 따른 동적특성과 전체 차량 시스템을 통해 제어 성능을 고찰하였다. 전기장에 따른 ER 엔진마운트의 제어성능을 확인 한 후에 13 자유도를 갖는 전체 차량시스템을 이용한 HILS 를 통하여 제어 성능을 평가하였다. 실험을 통해 제어시 승차자 위치에서의 RMS 가속도가 감소하여 스카이훅 제어기를 이용한 진동제어가 효과적으로 이루어 졌음을 확인 할 수 있었다. 향후 ER 엔진마운트를 실차에 장착하여 제어성능을 고찰 할 예정이다.

후 기

본 연구는 국가지정연구소(National Research Laboratory : NRL)프로그램의 지원에 의하여 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (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) 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.
- (4) Shibayama T., Ito K., Gami T. and Oku T., 1995, Active engine mount for a large amplitude of idling vibration. SAE Paper 951298, pp. 531-538.
- (5) 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.
- (6) 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.