

복합모드형 ER 엔진마운트의 성능평가 (I)

- 엔진마운트의 제작 및 시험 -

최 영 태* · 최 승 복**

(1999 년 3 월 17 일 접수)

Performance Evaluation of a Mixed-Mode Type ER Engine Mount (I)

- Manufacturing and Test of Engine Mount -

Young-Tai Choi and Seung-Bok Choi

Key Words : Electro-Rheological Fluid(전기유동유체), ER Engine Mount(ER 엔진마운트), Hydraulic Engine Mount(유체봉입 엔진마운트), Vibration Isolation(진동절연)

Abstract

This paper presents a mixed-mode type ER(electro-rheological) engine mount, and its vibration control performance for a passenger vehicle is presented. The field-dependent yield stress of a transformer oil-based ER fluid is empirically distilled in both shear and flow modes. This is then incorporated with the governing equation of motion of the proposed mixed-mode(shear mode plus flow mode) type engine mount. The damping force is analyzed with respect to the intensity of the electric field and design parameters such as electrode gap. Subsequently, the ER engine mount which is equivalent to the conventional hydraulic engine mount in terms of the damping level is designed and manufactured. Both computer simulation and experimental test are undertaken in order to evaluate vibration isolation performance. In addition, this performance is compared with that of the conventional hydraulic engine mount.

1. 서 론

최근 자동차 기술의 발달로 인한 차량의 경량화, 엔진의 고출력화 추세는 종전보다 현격히 높은 소음과 진동 문제를 야기시키며, 이 소음과 진동은 승차감에 큰 영향을 미치게 한다. 자동차에서 승차감의 안락함은 내부 공간의 크기, 각종 주변 편의 시설 등에 의한 영향도 있지만, 가장 결정적인 영향을 주는 것은 주행중 탑승자가 느끼는 차량의 진동과 실내 소음이다. 이러한 차량의 진동과 소음원중에 하나는 엔진구동계로 자동차 엔진에서 발생하는 가스폭발과 불균형력은 차량의 소음과 진동의 큰 원인이 된다. 따라서 엔진의 움

직임에 기인되는 자동차의 소음과 진동문제를 해결하기 위해 우수한 진동절연성능을 나타내는 엔진마운트의 설계와 제어에 대한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다.

최근에는 압전소재(piezoelectric materials), ER 유체(electro-rheological fluids) 그리고 MR 유체(magneto-rheological fluids) 등의 지능재료를 이용한 새로운 형태의 엔진마운트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻¹²⁾ 이러한 지능재료중 ER 유체는 부하되는 전기장의 강도에 비례하여 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 기본적으로 비전도성의 용액에 전도성의 입자를 분산시킨 현탁액이다. ER 유체에 전기장을 부하하면 액상에서 고상으로 바뀌며, 이 과정은 가역적으로 매우 빠르게 일어난다. 따라서, 이러한 ER 유체의 특성을 이용한 엔진마운트는 외부 조건에 따라 단순히 ER 유체에 부하되는 전기장의 크기만을 변화시켜

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : soangback@dragon.inha.ac.kr
TEL : (032)860-7319 FAX : (032)868-1716

연속적인 댐핑력 제어가 가능하며 설계구조가 단순화되는 장점을 갖게된다. 이러한 ER 엔진마운트는 ER 유체와 전극사이의 상대운동에 따라 세 가지 형태로 분류할 수 있다. 첫번째는 전단모드(shear mode)형 ER 엔진마운트로 평행한 두개의 전극중 한쪽의 전극은 고정되어 있고 다른 한쪽이 회전이나 이동을 하는 형태이다. 이때 유체의 이동과 전극의 움직임은 평행하게 일어난다. 두번째 형태는 유동모드(flow mode)형 ER 엔진마운트로 두 전극은 고정되어 있고, 고정된 전극 사이로 유체가 이동되는 형태이다. 세번째 형태는 압착모드(squeeze mode)형 ER 엔진마운트로 유체의 유동이 전극의 움직임에 수직한 방향으로 일어나는 형태이다.

지금까지 수행된 ER 엔진마운트의 연구를 살펴보면 Duclos⁽⁵⁾는 관성트랙(inertia track) 끝에 부착된 ER 밸브의 개폐에 의하여 진동을 제어하는 유동모드형태의 ER 엔진마운트를 제시하였다. Ushijima 등⁽⁶⁾은 실린더 모양의 전극판을 사용한 유동모드형태의 ER 엔진마운트를 제안하였고, 전기장 부하에 따른 ER 엔진마운트의 진동절연성능을 실험을 통하여 도출하였다. 이로부터 ER 엔진마운트 시스템의 역학적 모델을 도출한 후, 스카이hook 제어 알고리즘을 적용하여 진동절연성능의 향상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. Petek 등⁽⁷⁾은 평판 모양의 전극판을 여러 개 갖는 유동모드형태의 ER 엔진마운트를 제시하고, 전기장 부하에 따른 진동절연성능실험을 수행하였다. 또한, ER 유체의 온도변화에 따른 성능변화를 고찰하였고, ER 엔진마운트의 소비전력이 2W 이하로 매우 낮음을 발표하였다. Morishita 등⁽⁸⁾은 평판모양의 전극판을 여러 개 갖는 유동모드형태의 ER 엔진마운트를 제작하고, 전극간극 및 가진진폭과 같은 중요변수변화에 따른 진동절연성능의 변화를 실험을 통하여 고찰하였다. Genesseeux⁽⁹⁾는 낮은 주파수 영역의 가진에서는 일반 유체봉입 엔진마운트와 같이 관성트랙이 작동되고 높은 주파수의 가진에서는 ER 유체로 작동되는 분리기(decoupler)를 장착한 유동모드형태의 ER 엔진마운트를 제안하였다. Williams 등⁽¹⁰⁾은 압착모드형태의 ER 엔진마운트를 제안하고 이에 대한 수학적 모델을 제시하였다. 수학적 모델을 근거로한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 후 실험결과와 비교하여 제안된 모델의 타당성을 증명하였다. 국내에서는, 최영태 등⁽¹¹⁾이 유동모드형태의 ER 엔진마운트에 대한 이론적 해석을 수행하였고, 진동제어 알고리즘을 적용하여 진동절연성능의 향상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 또한, Choi 등⁽¹²⁾이 전단모드형 ER 엔진마운트를 제안하여 실험적 고찰을 통하여 진동제어성능

을 연구하였다.

지금까지 언급된 ER 엔진마운트의 연구는 주로 유동모드형 ER 엔진마운트가 많이 제안되었다. 그러나 이러한 유동모드형 ER 엔진마운트의 경우, 작은 가진입력시 높은 전기장이 부하되면 엔진마운트내의 전극사이로 ER 유체의 유동이 발생되지 않는 락업(lock-up)상태가 발생한다.^(8,11) 이 락업상태가 발생되면 공진주파수 이후의 비교적 높은 주파수 영역에서 ER 엔진마운트의 진동절연성능이 크게 저하되는 단점을 나타낸다. 반면 압착모드형 ER 엔진마운트는 락업상태시 이러한 큰 진동절연성능의 저하는 발생되지 않으나 주로 작은 변위의 가진에서만 작동될 수 있고, 압착모드에 대한 유동모델의 복잡성으로 인하여 이론적 해석을 통한 성능예측과 제어기 설계의 어려움이 있다. 또한, 가진입력시 두 전극판이 수직하게 상대적으로 운동됨으로 부분적이나 순간적으로 과도한 고전압으로 인한 ER 유체의 절연과괴가 더 쉽게 발생할 수 있다. 전단모드형태의 ER 엔진마운트 경우, 락업상태는 두 전극판과의 상대운동이 없는 상태를 의미하므로, 유동모드형 ER 엔진마운트와 같은 큰 진동절연성능의 악화는 발생되지 않는다. 그러나 전단모드형 ER 엔진마운트의 경우 큰 저항력을 발생시키기 위해서는 마운트내에 구성되는 전극면적이 크게 증가되는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 단일모드형태의 ER 엔진마운트가 갖고있는 단점을 극복하기 위하여 전단모드와 유동모드가 혼합된 복합모드(mixed-mode)형태의 엔진마운트를 제안하고 이에 대한 성능을 고찰하고자 한다. 우선, ER 엔진마운트에 핵심이 되는 ER 유체를 직접 조성하고, 조성된 ER 유체의 전기장 증가에 따른 항복응력값을 두 유체작동모드에 대하여 실험적으로 얻었다. 그후 복합모드형태의 ER 엔진마운트를 제안하고, 제안된 ER 엔진마운트에 대한 유체역학적 모델을 구성하였다. 구성된 유체역학적 모델로부터 전기장 부하에 따른 ER 유체의 거동특성이 고려된 ER 엔진마운트의 동적지배방정식을 도출하였다. 도출된 지배방정식과 실험을 통해 얻어진 ER 유체의 항복응력을 연계한 후, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기존 상용 유체봉입 엔진마운트의 댐핑력수준과 유사한 ER 엔진마운트를 설계, 제작하였다. 전기장 증가에 따른 단품 ER 엔진마운트의 진동절연성능을 고찰하였으며, 기존 상용유체봉입 엔진마운트의 성능과 비교하였다.

2. 유체작동모드에 따른 ER 유체의 항복응력

본 연구에서는 ER 유체에 대한 빙행특성실험을 수행하여, ER 유체의 항복응력을 도출하고자 한다. 일반적으로 ER 응용장치의 유체작동모드에 따라 전단모드, 유동모드 그리고 압착모드인 3종류형태의 전기점도계(electroviscometer)가 존재할 수 있다. 본 연구에서 제안된 엔진마운트의 유체작동모드형태가 전단모드와 유동모드이므로, 전단모드형태의 전기점도계와 유동모드형태의 전기점도계를 이용하여 두 모드에서의 ER 유체의 항복응력을 측정하였다.

전단모드에서의 ER 유체의 항복응력을 도출하고자 본 연구에서는 안쪽 실린더가 회전을 하고 바깥쪽의 실린더는 고정되어 있는 couette 형태의 전기점도계가 사용되었다.⁽¹³⁾ 실험은 일정한 전단속도비에 대해 전기장 증가에 따른 토크의 변화량을 측정하는 방법으로 수행되었다. 전단속도비를 50, 100, 150, 200, 400, 600, 800, 1000 및 1200 1/s의 9단계로 변화시켜 실험을 수행하였고, 사용된 ER 유체는 본 실험실에서 직접조성된 ITS50 ER 유체가 사용되었다. 이 ITS50 ER 유체는 용매로 트랜스포머 오일을 사용하였으며, 전도성 입자로 특수 화학 처리된 전분입자가 용매에 대한 무게중량비로 50% 포함되었다. 실험 조건으로 전기장은 0~3kV/mm까지 0.5kV/mm씩 증가시켰으며, ER 유체의 온도는 30°C로 실험을 수행하였다.

유동모드에서의 ER 유체의 항복응력을 도출하고자, 두 고정된 전극간극으로 구성된 유로로 ER 유체가 유동될 때 발생하는 압력강하와 전단응력과의 관계를 구하면 다음과 같은 무차원수식으로 표현될 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$T^{*3} - \frac{3}{4}P^{*2}T^{*} + \frac{P^{*3}}{4} - \frac{P^{*2}}{4} = 0 \quad (1)$$

여기서,

$$P^{*} = \frac{\Delta P}{\Delta P_N}, \quad T^{*} = \frac{\Delta P_c}{2\Delta P_N} = \frac{\tau_y L}{\Delta P_N h} \quad (2)$$

상기식에서 ΔP 는 두 전극 사이의 압력강하, ΔP_N 는 전기장 무부하시의 두 전극 사이의 압력강하이고, ΔP_c 는 전기장 부하시 전극간극으로 유동이 발생되기 위한 최소한의 압력강하이다. τ_y 는 유동모드에서의 항복응력, L 은 전극길이, 그리고 h 는 전극간극이다. 식 (1)은 주어진 P^{*} 에 대해 3개의 근(solution)을 갖는 비선형 함수이므로 수치해석적 방법을 사용하여 근을 구할 수 있다. 이 근들중 물리적으로 타당한 근의 범위를 구하면 다음과 같다.

$$0 \leq T^{*} \leq \frac{P^{*}}{2} \quad (3)$$

이 범위를 적용하여 식 (1)을 수치해석방법으로 풀면 물리적으로 타당한 하나의 근이 구해진다. 이 근이 구해지면 유동모드에서의 항복응력 τ_y 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_y = \frac{h\Delta P_N T^{*}}{L} \quad (4)$$

일반적으로 ER 유체의 항복응력은 전기장뿐 아니라 전단속도비에 따라라도 변화될 수 있다. 따라서 ER 응용장치에 적용하기 위해서는 앞에서 언급된 바와 같이 여러 전단속도비에서 얻어진 전단응력에서부터 일차함수를 이용한 곡선맞춤법을 수행한 후 전단속도비 0에서의 값인 동적항복응력을 도출하여 사용한다. 이를 위해, 유동모드일 때 전극간극 사이에서 발생하는 전단응력 τ 와 전단속도비 $\dot{\gamma}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\tau = \frac{\Delta P}{L} \left(\frac{h}{2} - z \right) \quad (5)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau_y}{\eta}$$

여기서 $0 \leq z \leq h$ 이고, η 는 ER 유체의 점성계수이다. 식 (5)에서 알 수 있듯이 유동모드에서의 전단응력은 전극간극에 대하여 일차함수형태로 변화되며 최대의 전단응력은 벽면($z=0$)에서 발생된다. 따라서 본 연구에서는 이 벽면에서의 전단응력과 전단속도비를 기준으로 하여 유동모드에서의 항복응력을 도출하였다. 유동모드에서의 항복응력을 도출하기 위한 실험으로 전기장은 0~3kV/mm까지 0.5kV/mm씩 증가시켰으며, 실험시 ER 유체의 온도는 30°C가 되도록 하였다. 항복응력측정을 위한 실험장치구성과 실험절차는 참고문헌⁽¹⁵⁾에 잘 기술되어 있어 생략한다.

Fig. 1에 전단모드와 유동모드일 때의 ITS50 ER 유체의 빙행특성실험결과를 비교, 도시하였다. Fig. 1(a)는 전기장 증가에 따른 항복응력을 도시한 것으로 전기장 부하에 따라 항복응력이 지수적으로 증가되는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림에서 알 수 있듯이 실험이 수행된 3kV/mm 이내의 전기장에서는 전단모드와 유동모드에서의 항복응력의 크기와 경향이 거의 동일함을 알 수 있다. Fig. 1(b)는 이때 소요된 전류밀도를 나타내는 것으로 그림에서 알 수 있듯이, 전기장 증가에 따라 항복응력과 같이 전류밀도 또한 지수적으로 증가됨을 알 수 있다. 또한 소요된 전류밀도의 수치가 매우 작음을 알 수 있는데 이는 실제 ER 유체응용장치의 경

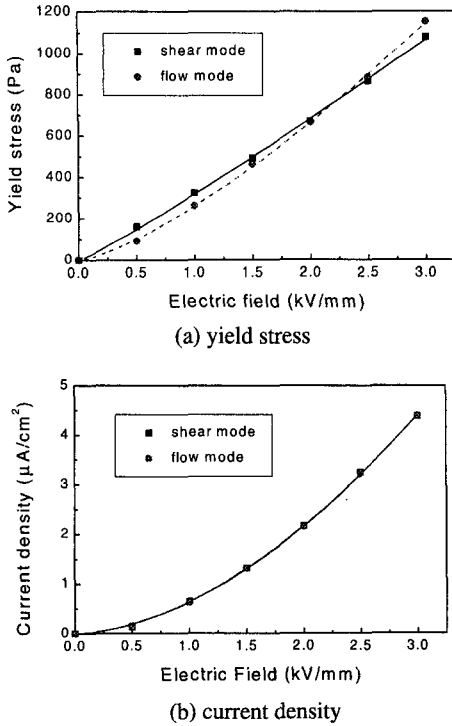


Fig. 1 Bingham characteristics of the ITS50 ER fluid

우 소요되는 전력소모가 매우 작음을 의미한다. 한편, 그림에서 알 수 있듯이 전단모드와 유동모드에서의 전류밀도의 경향과 크기가 거의 차이가 없이 동일함을 알 수 있다. 이로부터 ITS50 ER 유체의 경우 3kV/mm 이내의 전기장에서는 유체작동모드에 상관없이 전단모드와 유동모드에서의 빙헴 특성이 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나 이러한 경향은 유체종류마다 달라질 수 있다.⁽¹⁵⁾ 한편, 실험으로 얻어진 ITS50 ER 유체의 항복응력을 전기장의 함수로 표현하면 전단모드에서는 $317.8E^{1.10}$ Pa 이고, 유동모드에서는 $260.5E^{1.35}$ Pa 이다. 이때 소요된 전류밀도는 전단모드에서는 $0.632E^{1.77}$ $\mu A/cm^2$ 이고, 유동모드에서는 $0.631E^{1.77}$ $\mu A/cm^2$ 이다.

3. ER 엔진마운트의 모델링 및 제작

본 논문에서 제안된 복합모드형태의 ER 엔진마운트의 구조는 Fig. 2 와 같다. 다중 실린더가 하판과 상판에 평행하게 고정되어 있고 이 실린더들은 전극으로 작동된다. 전극간의 간극을 일정하게 유지하기 위하여 엔진마운트 중앙에 선형 베어링(linear bearing)을 구성하였다. ER 유체는 하판을 중

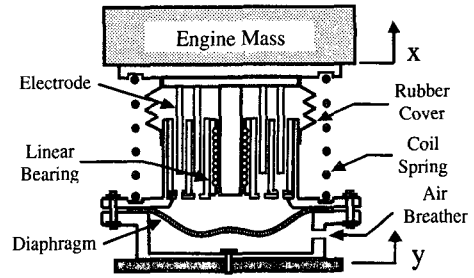


Fig. 2 Configuration of the mixed-mode ER engine mount

심으로 상부챔버와 하부챔버로 나뉘어진 두 챔버에 모두 채워지게 되며, 하판 밑에 다이어프램을 구성하여 전극간극 사이로 흘러내려온 ER 유체를 수용하였다. 또한, ER 유체의 유출을 방지하고자 상·하판의 옆면에 고무커버가 부착되었다. 상판에는 엔진질량이 고정되고, 하판은 차체에 고정되며, 상·하판 사이에 코일 스프링을 장착하여 정지 상태에서 엔진 질량을 지지하게 하였다. 한편, 제안된 ER 엔진마운트는 상부챔버의 ER 유체봉입상태와 챔버의 밀봉상태에 따라 유체작동모드가 두가지 형태로 나뉘어 질 수 있다. 만일 상부챔버에 ER 유체를 완전히 채우지 않고 상부챔버를 밀봉하지 않는다면 상부챔버내는 대기압상태가 되므로 제안된 엔진마운트는 유체작동모드로 전단모드만을 나타내게 된다.⁽¹²⁾ 그러나 본 연구에서 처럼 상부챔버에 ER 유체가 완전히 채워져 밀봉된다면 상부챔버내의 압력은 엔진마운트의 진동상태에 따라 변화되므로 전단모드와 유동모드 두 가지 작동모드를 나타내게 된다.

ER 엔진마운트 해석을 위한 가정으로 ER 유체는 비압축성유체로 가정하였고 해석의 단순화를 위해 마운트의 수직방향만을 고려하였다. 또한, ER 유체의 전기장 증가에 따른 항복응력 모델은 빙헴 모델을 사용하였으며, 시간응답은 매우 빠르기 때문에 이에 대한 동적모델은 고려하지 않았다. ER 엔진마운트의 유체특성을 고려한 유체역학적 모델이 Fig. 3 에 도시되었다. 이 모델로부터 복합모드형태의 ER 엔진마운트로부터 상부질량으로 전달되는 힘 F_i 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_i = & k_c(x-y) + A_e \eta \frac{(\dot{x}-\dot{y})}{h_e} \\
 & + A_e \tau_{ys} \operatorname{sgn}(\dot{x}-\dot{y}) - A_p P_1 \\
 = & k_c(x-y) + b_s(\dot{x}-\dot{y}) + F_{ERs} - A_p P_1
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, A_p 는 상판의 피스톤 단면적, A_e 는 전극의 총면적으로 $A_e = b_e L_e$, L_e 는 전극의 길이, b_e

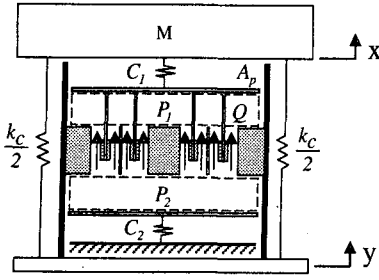


Fig. 3 Hydraulic model of the mixed-mode ER engine mount

는 전극의 너비로 $b_e = 2\pi \sum_{i=1}^4 r_i$ 로 표현된다. P_1 은 상부챔버의 압력, h_e 는 전극 간격, $r_i (i=1, 2, 3, 4)$ 는 마운트중심에서 각 실린더에 의하여 구성된 전극까지의 반지름, x 는 엔진질량의 변위이고 y 는 가진입력의 변위이다. 또한, k_c 는 코일스프링의 수직강성이며, τ_{ys} 는 유체의 작동모드가 전단모드인 경우의 ER 유체의 전기장 부하에 따른 항복응력이다

제안된 복합모드형태의 ER 엔진마운트에 대한 지배방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M\ddot{x} &= -F_1 \\ &= -k_c(x-y) - b_s(\dot{x}-\dot{y}) - F_{ERs} + A_p P_1 \end{aligned} \quad (7)$$

ER 유체가 전극간격틈새로 흐를 때 발생하는 압력강하는 전기장 무부하시의 압력강하 ΔP_i 와 전기장 부하시의 항복응력에 의한 압력강하 ΔP_{ER} 의 합으로 표현된다.

$$\begin{aligned} P_2 - P_1 &= \Delta P_i + \Delta P_{ER} \\ &= \frac{12\eta L_e}{b_e h_e^3} Q_f + 2 \frac{L_e}{h_e} \tau_{yf} \operatorname{sgn}(Q_f) \\ &= R_f Q_f + P_{ER} \operatorname{sgn}(Q_f) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 P_2 는 하부챔버의 압력, Q_f 는 상하부챔버의 압력차에 의해 발생하는 유체유량이다.

상부챔버와 하부챔버에서 발생하는 유체유동에 대한 연속방정식을 적용하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$C_1 \dot{P}_1 = -A_p(\dot{x}-\dot{y}) + Q \quad (9)$$

$$C_2 \dot{P}_2 = -Q \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Q &= Q_f + Q_s \\ &= Q_f + \frac{A_s(\dot{x}-\dot{y})}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $A_s (=b_e h_e)$ 는 전극간극에 의해 형성된 유로의 단면적, Q_s 는 전단모드에 의해 발생하는 유체유량, Q 는 엔진마운트내의 전극간극에서 발생하는 총유체유량이다. C_1 는 상부챔버의 컴플라이언스이고, C_2 는 하부챔버의 컴플라이언스이다.

식 (7)-(11)로부터 P_1, P_2 를 소거한 후, 유량 Q_f 의 반응주파수가 엔진질량의 반응주파수보다 빠르다고 가정하여 유량 Q_f 를 정적(static)모델로 고려하면, 제안된 ER 엔진마운트에 대한 지배방정식 (7)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$M\ddot{x} + k(x-y) + b(\dot{x}-\dot{y}) = -F_{ERt} \quad (12)$$

$$\text{여기서, } k = k_c + \frac{A_p^2}{C_1 + C_2},$$

$$b = b_s + \left[\left(\frac{A_p C_2}{C_1 + C_2} \right)^2 - \frac{A_p A_s C_2}{C_1 + C_2} \right] R_f$$

$$F_{ERt} = F_{ERs} + F_{ERf} = F_{ERs} + \frac{A_p C_2}{C_1 + C_2} P_{ER}$$

식 (12)에서 알 수 있듯이, 제안된 복합모드형태의 ER 엔진마운트는 전기장 부하시 전단모드의 항복응력에 의한 저항력과 유동모드의 항복응력에 의한 저항력이 동시에 발생되게 된다. 본 연구에서 사용된 ITSS50 ER 유체의 경우, 앞장의 빙헴특성시험에서 알 수 있듯이 유동모드의 항복응력은 전단모드의 항복응력과 거의 동일한 특성을 나타낸다. 따라서 전기장 부하시 ER 엔진마운트에서 발생하는 저항력 F_{ERt} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_{ERt} \equiv \left[A_e + 2 \frac{A_p C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{L_e}{h_e} \right] \tau_{ys} \quad (13)$$

식 (12)로부터 제안된 ER 엔진마운트의 역학적 모델을 Fig. 4 와 같이 구성할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이, ER 엔진마운트의 시스템 전체강성 k 는 코일 스프링의 강성과 상, 하부챔버의 팽창으로 발생하는 강성의 합으로 표현된다. 이 전체강성이 전단모드에서의 유체점성에 의한 댐핑계수와 유동모드에서의 유체 점성에 의한 댐핑계수의 합으로 정의되는 시스템 전체댐핑 b 와 병렬로 구성된

1DOF(degree-of-freedom)의 역학적 모델로 구성될 수 있다.

제안된 ER 엔진마운트의 수학적 모델링을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 후, 이를 토대로 ER 엔진마운트를 설계, 제작하였다. 실제 상용 자동차에 적용될 수 있도록 엔진마운트의 강성과 댐핑력을 설계하였고, 설계된 ER 엔진마운트의 설계값은 Table 1에 열거되었다. 그리고 본 연구에서 제작된 복합모드 ER 엔진마운트의 사진이 Fig. 5에 도시되었다.

4. ER엔진마운트의 성능시험

4.1 실험장치 및 방법

제안된 단품 ER 엔진마운트의 진동절연성능을 고찰하기 위한 실험장치의 개략도가 Fig. 6에 도시되었다. 편심 캠(cam)에 의하여 일정한 진폭으로 ER 엔진마운트를 가진시키면서 가진부의 변위를

Table 1 Specifications of the proposed ER engine mount

Specification	Variable	Value (unit)
Electrode Area	A_e	$194.1e-4 \text{ m}^2$
Piston Area	A_p	$35.3e-4 \text{ m}^2$
Electrode Length	L_e	0.030 m
Electrode Width	b_e	0.647 m
Gap Size	h_e	0.0015 m

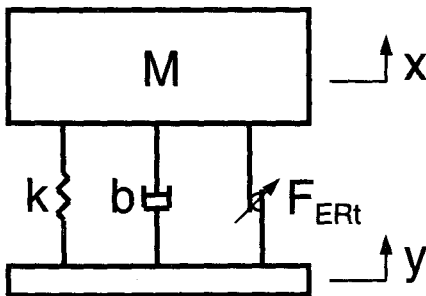


Fig. 4 Mathematical model of the proposed ER engine mount

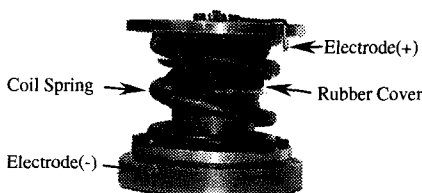


Fig. 5 Photograph of the proposed ER engine mount

측정하는 동시에 ER 엔진마운트를 통해 전달되는 엔진질량의 진동변위를 측정하였다. 이때 가진변위는 전기모타(AC 모타 : 25HP)의 회전축에 편심캠을 장착한 후 이 편심 캠을 회전시켜 정현파 가진을 발생시켰다. ER 엔진마운트에 부하되는 고전압은 컴퓨터(IBM PC Pentium)를 이용하여 발생된 낮은 전압을 전압증폭기(Trek 10/10A)로 1000 배 증폭하여 공급하였다. 이때 전압증폭기로부터 발생된 고전압이 순간적으로 역방향으로 컴퓨터에 입력되는 것을 방지하고자 전기절연기(Isolator: Mtt, RC3500R)를 사용하였다. 실험에 사용된 센서는 변위측정장치(LVDT : Sensotec, MVL-7)와 비접촉 변위센서(proximitor : Bently Nevada, 7200series)이다. LVDT 변위센서는 엔진질량변위를 측정하고, 비접촉 변위센서는 편심캠에서 들어오는 가진변위를 측정한다. 이 센서들에서 발생된 변위신호들은 DSP 보드(Mtt, TMS320C31)를 통하여 컴퓨터에 입력, 저장된다. ER 엔진마운트에 부하되는 가진진폭과 전기장을 변화시켜가면서 실험을 수행하여 각 실험조건에 따른 전달률(transmissibility)을 계산하여 제안된 엔진마운트의 성능평가를 수행하였다.

4.2 성능고찰

가진진폭변화에 따른 ER엔진마운트의 성능변화를 고찰하기 위하여 가진진폭을 0.25mm와 0.5mm로 변화시켰을 때 전기장 증가에 따른 주파수영역에서의 성능시험을 수행하였다. 시험조건으로 ER 엔진마운트에 봉입된 ER유체로는 ITS50 ER유체가 사용되었다. 또한 ER엔진마운트에 부하된 최대 전기장은 ER유체의 절연파괴를 고려하여 2kV/mm로 하였다. 시험중의 ER엔진마운트내의 유체온도는 25°C-30°C가 되도록 하였다.

Fig. 7은 가진 진폭이 0.25mm일 때의 전기장 증가에 따른 ER엔진마운트의 진동절연성능을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 전기장 무부하시 큰 공진변위를 나타내나 전기장이 부하되자 공진변위가 크게 감소되는 것을 볼 수 있다. 특히

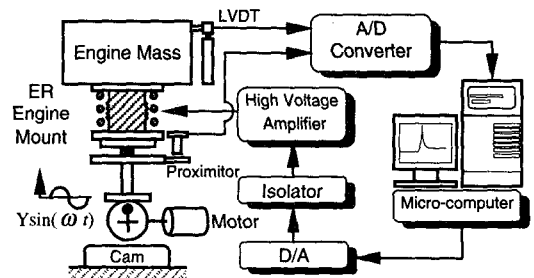


Fig. 6 Configuration of the ER engine mount tester

1kV/mm의 전기장 부하만으로도 공진변위가 크게 감소되어 ER엔진마운트가 거의 강체운동을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 제안된 ER엔진마운트는 반능동작동기이므로 강체운동이므로 진동절연성능의 향상은 발생되지 않았다. 따라서 더 높은 전기장인 2kV/mm를 부하하더라도 더 큰 진동절연성능의 향상은 없었다. 또한, 제안된 ER엔진마운트의 경우, 유동모드형태의 ER엔진마운트에서 발생하는 공진이후 비교적 높은 주파수 대역에서의 탁업상태에 의한 진동절연성능의 악화는 발생되지 않았다. 한편, ER엔진마운트와 기존 상용유체봉입 엔진마운트의 성능을 비교하여 보면, ER엔진마운트의 전기장 부하시의 성능이 시험이 수행된 모든 주파수 영역에서 기존 상용유체봉입 엔진마운트에 비하여 우수한 진동절연성능을 발생시킴을 알 수 있다. 이는 상용유체봉입 엔진마운트의 경우, 유체관성트랙을 사용하여 진동절연을 수행하기 때문이다. 이러한 유체관성트랙은 동흡진기(dynamic absorber)로 작동하여 단지 6-9Hz에 존재하는 엔진마운트계의 공진주파수에서만 효과적인 진동절연성능을 발생시킬뿐 다른 주파수영역에서는 진동절연성능의 저하를 나타낸다. 이로부터 실제 자동차에 제안된 ER엔진마운트가 장착될 경우 우수한

진동절연성능의 향상을 예측할 수 있다. Fig. 7(b)는 컴퓨터 시뮬레이션 결과로 실험결과와 매우 유사한 경향을 나타내고 있어 제안된 동적모델의 타당성을 입증해주고 있다.

Fig. 8은 가진 진폭이 증가된 0.5mm일 때의 전기장 증가에 따른 ER엔진마운트의 진동절연성능을 나타내고 있다. 1kV/mm의 전기장 부하시 공진주파수 부근에서 공진변위가 비교적 크게 존재하나 더 높은 2kV/mm의 전기장이 부하되자 공진변위가 크게 감소되는 것을 볼 수 있다. 가진진폭이 0.25mm일때의 결과와 비교하여 볼 때, 동일 전기장 부하시 가진진폭이 더 큰 0.5mm일 때의 진동절연성능이 공진주파수부근에서 약간 저하됨을 알 수 있다. 그러나 두 경우 모두 시험이 수행된 전범위 주파수대역에서 제안된 ER엔진마운트가 상용 유체봉입 엔진마운트에 비하여 우수한 진동절연성능을 나타내었다. Fig. 8(b)는 컴퓨터 시뮬레이션 결과로 실험결과와 경향이 유사함을 알 수 있다

5. 결론

본 연구에서는 승용차량의 승차감 향상에 중요한 역할을 하는 새로운 형태의 ER엔진마운트를

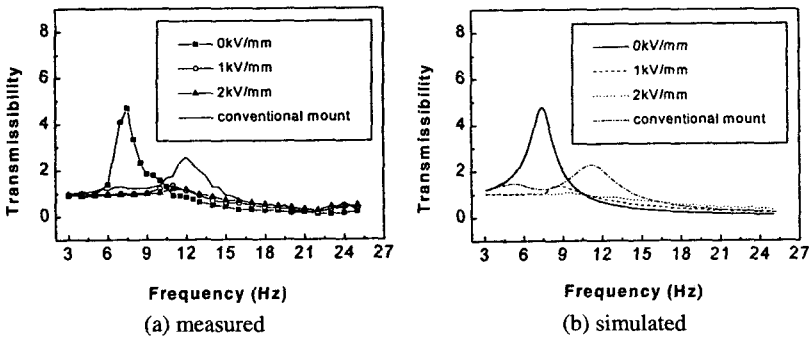


Fig. 7 Field-dependent transmissibility with constant voltages (± 0.25 mm)

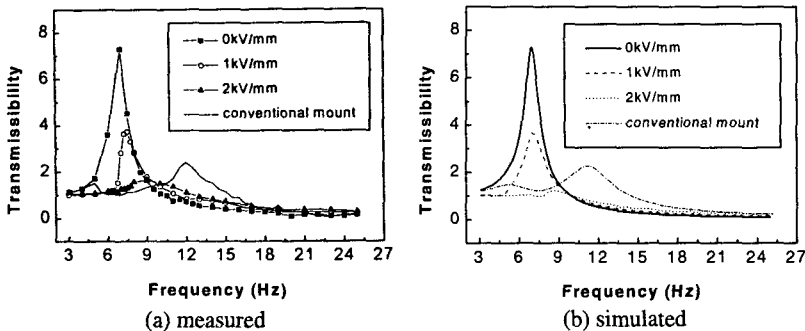


Fig. 8 Field-dependent transmissibility with constant voltages (± 0.5 mm)

제안하고 진동절연성능을 이론 및 실험적 방법으로 고찰하였다. 우선, ER엔진마운트에 핵심이 되는 ER유체를 직접 조성하고, 조성된 ER유체의 전기장 증가에 따른 항복응력값을 두 유체작동모드에 대하여 실험적으로 얻었다. 그후 복합모드 형태의 ER엔진마운트를 제안하고, 제안된 ER엔진마운트에 대한 유체역학적 모델을 구성하였다. 구성된 유체역학적 모델로부터 전기장 부하에 따른 ER유체의 거동특성이 고려된 ER엔진마운트의 동적지배방정식을 도출하였다. 도출된 지배방정식과 실험을 통해 얻어진 ER유체의 항복응력을 연계한 컴퓨터 시뮬레이션을 토대로 기존 상용유체봉입 엔진마운트의 댐핑력수준과 동일한 ER엔진마운트를 설계, 제작하였다. 전기장 증가에 따른 ER엔진마운트의 진동절연성능시험결과, 유동모드형태의 ER엔진마운트에서 발생하는 공진이후의 비교적 높은 주파수 영역에서의 락업상태에 의한 진동절연성능의 악화는 발생되지 않았다. ER엔진마운트의 진동절연성능과 기존 상용유체봉입 엔진마운트의 성능을 비교한 결과, 시험이 수행된 모든 주파수 영역에서 ER엔진마운트의 성능이 우수함을 확인하였다. 이는 제안된 ER엔진마운트의 실질적 적용가능성을 시사해주는 것이며, 이를 입증하기 위하여 본 연구의 제 (II)편에서는 제안된 ER엔진마운트가 3점지지방식으로 장착된 전체차량에서의 진동제어성능을 컴퓨터 시뮬레이션과 실차실험의 중간단계인 HILS(Hardware-in-the-Loop-Simulation) 방법을 통하여 평가한다.

참고문헌

- (1) 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," *International Journal of Modern Physics B*, Vol.10, Nos.23 & 24, pp. 3143~3157.
- (2) Shibayama, T., Ito, K., Gami, T. and Oku, T., 1995, "Active Engine Mount for a Large Amplitude of Idling Vibration," *SAE Technical Paper Series* 951298.
- (3) Ushijima, T. and Kumakawa, S., 1993, "Active Engine Mount with Piezo-Actuator for Vibration Control," *SAE Technical Paper Series* 930201.
- (4) Carlson, J. D. and Jr. Spencer, B. F., 1996, "Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control," *Proceedings of the third International Conference on Motion and Vibration Control*, Chiba, Japan, pp. 35~40.
- (5) Duclos, T. G., 1987, "An Externally Tunable Hydraulic Mount Which Uses Electro-Rheological Fluid," *SAE Technical Paper Series* 870963.
- (6) Ushijima, T., Takano, K. and Kojima, H., 1988, "High Performance Hydraulic Mount for Improving Vehicle Noise and Vibration," *SAE Technical Paper Series* 880073.
- (7) Petek, N. K., Goudie, R. J. and Boyle, F. P., 1988, "Actively Controlled Damping in Electrorheological Fluid-Filled Engine Mounts," *SAE Technical Paper Series* 881785.
- (8) Morishita, S. and Mitsui, J., 1992, "An Electronically Controlled Engine Mount Using Electro-Rheological Fluid," *SAE Technical Paper Series* 922290.
- (9) Genesseeaux, A., 1993, "Research for New Vibration Isolator Techniques : From Hydro-Mounts to Active Mounts," *SAE Technical Paper Series* 931324.
- (10) Williams, E. W., Rigby, S. G., Sproston, J. L. and Stanway, R., 1993, "Electrorheological Fluids Applied to An Automotive Engine Mount," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol.47, pp. 221~238.
- (11) 최영태, 김기선, 최승복, 정재천, 전영식, 1994, "전기유동유체를 이용한 엔진마운트의 모델구성과 성능해석," 한국자동차공학회논문집, 제 2 권, 제 3 호, pp. 62~74.
- (12) Choi, S. B. and Choi, Y. T., 1999, "Sliding Mode Control of a Shear-Mode Type ER Engine Mount," *KSME International Journal*, Vol.13, No.1, pp. 26~33.
- (13) 이호근, 최승복, 정재천, 강윤수, 서문석, 1998, "전극재질 및 간극에 따른 ER 유체의 특성실험," 한국유변학회지, 제 10 권, 제 3 호, pp. 165~172.
- (14) Phillips, R. W., 1969, Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress, Ph.D Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, University of California at Berkeley.
- (15) 이호근, 성금길, 최승복, 정재천, 1998, "작동모드에 따른 ER 유체의 빙햄특성비교," 한국유변학회 '98추계학술회의 논문집, pp. 132~135.