

## MR 유체를 이용한 엔진마운트의 진동제어

### Vibration Control of an Engine Mount Featuring MR Fluid

이현희\* · 최승복\*\*

Hyun-Hee Lee and Seung-Bok Choi

**Key Words :** Vibration Control(진동제어), MR Fluid(MR 유체), Engine Mount(엔진마운트), Herschel-Bulkely Model(허셸-버클리모델), Skyhook Controller(스카이훅 제어기)

#### ABSTRACT

A magnetorheological(MR) engine mount for a passenger vehicle and its vibration control performance is experimentally evaluated. A mixed-mode model for the MR engine is derived by incorporating Herschel-Bulkely model of the MR fluid. After analyzing the field-dependent damping force, a appropriate size of the MR engine mount is manufactured. The field-dependent displacement transmissibility of the engine mount is evaluated in the frequency domain at various excitation levels. In addition, time-dependant damping force is experimentally investigated by changing the excitation amplitude.

### 1. 서론

자동차에서 발생하는 소음과 진동의 원인으로 가장 큰 영향을 주는 것은 엔진 구동계로 자동차 엔진에서 발생하는 가스폭발과 불균형력이 큰 원인이 된다<sup>[1]</sup>. 엔진구동에 의해 발생하는 진동과 소음은 가진 폭이 큰 저주파수 영역과 가진 폭이 작은 고주파수 영역으로 구분할 수 있다. 고주파수 영역의 가진 진폭과 비교하여 상대적으로 진폭이 큰 저주파수 영역의 가지는 차체로 전달되는 충격력이 크기 때문에 승차감에 큰 영향을 준다. 승차감 향상을 위하여 저주파수 영역의 진동은 우선적으로 절연되어야 한다. 또한 높은 엔진의 회전수에 의해 발생하는 고주파수 영역의 가지는 진폭과 충격력이 작아 주로 소음문제를 유발시킨다. 자동차에서의 엔진마운트는 엔진과 차체를 연결하여 엔진을 지지하고, 엔진으로부터의 가진력을 흡수하는 역할을 한다. 일반적으로 엔진에서 발생하는 진동을 절연하기 위해서는 엔진마운트의 강성이 작은 것이 유리하지만, 엔진의 진동을 조절하고 마운트의 내구성을 유지하기 위해서는 강성이 클수록 좋다. 엔진 마운트의 성능요구조건은 가진 주파수에 따라 변하게 된다. 저주파수 영역에서는

엔진의 가진 변위와 충격력이 크고 엔진과 엔진마운트로 구성되는 시스템의 공진이 존재한다. 따라서, 엔진의 급격한 진동을 제한하기 위해서는 큰 강성이 필요하고, 차체로 전달되는 충격력을 줄이기 위해서는 큰 감쇠력이 필요하다. 반면에 가진 변위와 충격력이 작은 고주파수 영역에서는 보다 작은 강성과 감쇠력이 필요하다<sup>[2,3]</sup>. 고무 마운트는 진동수와 진폭에 무관하게 거의 일정한 강성과 감쇠를 가지고 있어서 위에서 기술한 두 가지 역할을 만족시키는 데에는 부족함이 있다. 유체의 유동저항을 이용하여 큰 댐핑을 얻을 수 있는 유압 마운트는 저주파수 영역에 존재하는 마운트 시스템의 특정한 공진점에서의 진동절연효과는 기대할 수 있지만, 다른 주파수 영역에서의 성능 저하는 피할 수 없는 단점이다<sup>[4]</sup>. 특정주파수 영역에서의 성능 향상만을 위해 적용 가능한 수동식 마운트의 단점을 극복하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

그 중에서도 ER 유체 그리고 MR 유체 등의 지능재료를 이용한 새로운 형태의 엔진마운트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[7,8,9]</sup>. 이러한 지능재료 중 본 연구에서는 MR 유체를 이용한 엔진마운트에 대한 연구를 수행하였다. MR 유체의 특성을 유동모드 하에서 실험적으로 도출하였으며, MR 엔진마운트의 유체역학적 모델로부터 동적모델링을 수행한 후, 자기장의 강도에 의해 강성과 감쇠력이 변화하는 MR 엔진마운트를 제작하였다. 전달률 시험장치를 구축하여 자기장 증가에 따른

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

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

MR 엔진마운트의 변위전달률 응답특성을 주파수 영역에서 고찰하였으며, 시간영역에서 자기장에 따른 댐핑력을 고찰하였다.

## 2. MR 유체의 특성

MR 유체는 자기장 무부하 시에는 용매내에 분산된 입자들이 자유로이 운동하는 등방향의 역학적 구조를 나타내지만, 자기장 부하시에는 분산된 입자가 체인형 구조를 형성함으로써 이방향의 역학적 성질로 바뀌게 된다. 이를 Fig.1에 나타내었다. 적용된 모델링에서 유체 거동은 지금까지 많이 적용된 Bingham-plastic model을 사용하지 않고, Herschel-Bulkely Model을 사용하였다<sup>[10]</sup>. MR 유체는 자기장 무부하시는 Newtonian 유체로 거동을 하다가 자기장 부하시에는 Non-Newtonian 거동을 보이는데, 지금까지 많은 논문들에서는 Bingham-plastic model로 표현 되어왔다. 하지만 post-yield 영역에서 유체점성이 일정하다는 가정이 정확한 유체 거동을 표현하지 못하고 있다. 따라서 post-yield 영역에서 유체점성이 일정하지 않고 보통 shear thinning 혹은 shear thickening 한 거동을 잘 나타내는 Herschel-Bulkely Model을 사용하였다. Herschel-Bulkely Model은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau_y(H) + K \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (1)$$

$$\tau_y(H) = \alpha_1 H^2 + \alpha_2 H$$

여기서,  $\tau$ 는 MR 유체의 전단응력을 나타내며,  $K$ 는 유체의 기본 점성계수,  $(du/dy)$ 는 전단비,  $n$ 은 유체의 유동계수,  $H$ 는 MR 유체에 부하 되는 자기장,  $\tau_y(H)$ 는 MR 유체의 항복응력,  $\alpha_1, \alpha_2$ 는 MR 유체의 고유 특성치를 나타내는 상수이다. 유체의 유동계수  $n$ 의 값에 따라서 post-yield 영역에서 유체가 shear thinning 혹은 shear thickening 한 거동 등을 잘 표현하므로 좀 더 정확한 유체거동을 예측할 수 있다.

본 연구에서 사용한 MR 유체는 carbonyl iron과 hydrocarbon oil을 혼합한 것이며, 입자체적비가 32%인 MRF-132LD(LORD Corp.)으로 제조사에서 제공 받은 자료를 이용하여 항복응력을 도출하였다. Fig.2는 MR 유체의 유동모드형 실험장치를

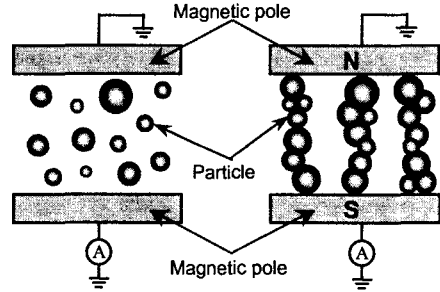


Fig.1 Phenomenological behavior of MR fluid

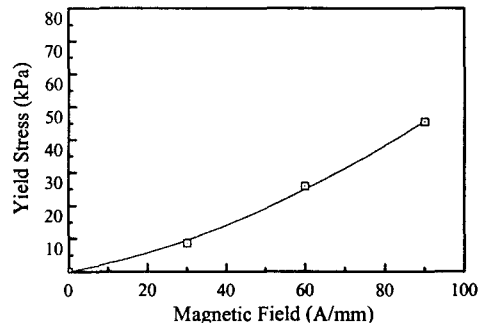


Fig.2 Yield stress as a function of magnetic field

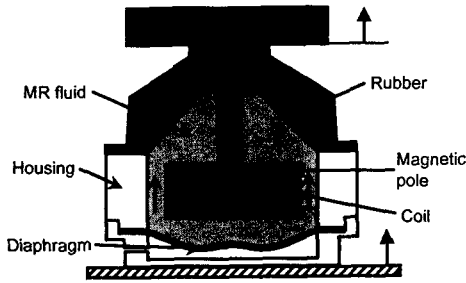
이용한 실험결과를 나타낸 것이다. 수행된 실험 결과는 식(1)을 이용하여 표현하면 다음식과 같다.

$$\tau_y(H) = 3.16H^2 + 224.25H \quad (2)$$

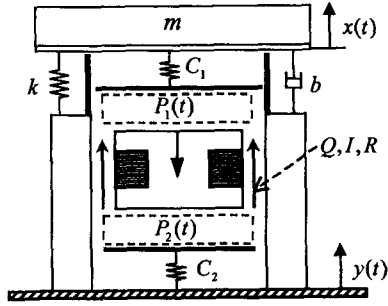
여기서, 항복응력  $\tau_y(H)$ 의 단위는 Pa이며, 자기장  $H$ 의 단위는 A/mm이다.

## 3. MR 마운트의 동적 모델링 및 제작

MR 엔진마운트의 구조를 Fig.3(a)에 도시하였다. 마운트에서 상부는 기본 강성과 댐핑을 유지하기 위해서 고무로 구성이 되었으며, 하부는 부하질량을 지지할 수 있는 강제하우징과 마운트 내부의 체적 변화시 보정할 수 있는 다이어프램으로 구성이 되어 있다. 마운트의 상·하부 챔버에는 MR 유체가 봉입되어 있으며, 실린더 모양의 Magnetic pole은 상부의 고무에 고정되어 있어서, 외부가진 입력시 고무와 함께 거동한다. 외부 가진 입력에 의하여 상부챔버의 체적변화와 함께 Magnetic pole



(a) Schematic diagram of MR engine mount



(b) Hydraulic model of MR engine mount

Fig.3 Modeling of MR engine mount

이 가진 입력과 같은 방향으로 거동을 한다. 체적 변화로 MR 유체는 간극을 통하여 상·하부 챔버로 유동하며, 동시에 Magnetic pole의 거동으로 유체의 전단이 일어난다. 이때 유체의 점성 때문에 유체 댐핑력이 발생한다. 자극사이에 자기장이 부하되면, MR 유체의 항복응력이 증가하여 마운트의 강성과 댐핑을 증가시킬 수 있다. 간극을 통하여 하부로 밀려 내려온 MR 유체는 하부 챔버에 포함되어 있는 다이어프램에 변화된 체적만큼 저장된다.

MR 엔진마운트의 역학적 해석을 위한 여러 가지 가정을 하였다. MR 유체는 비압축성유체로 자극사이로의 유체 유동은 층류라 가정하였고, 상부 챔버의 내부압력은 모든 방향으로 균일하게 작용한다고 가정하였다. 그리고 마운트의 설치 조건을 고려할 때 마운트에 작용하는 가진력은 대부분 수직 방향만으로 작용하므로 MR 엔진마운트는 수직 방향만을 고려하였다.

Fig.3 (b)에 나타낸 MR 엔진마운트의 유체역학적 모델은 다음과 같은 형식의 지배방정식으로 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x} = -k(x(t) - y(t)) - b(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) - A\eta \frac{\dot{x}(t) - \dot{y}(t)}{h} + P_1(t)A_1 - A\tau_{ys}(H)\text{sgn}(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) \quad (3)$$

$$P_2(t) - P_1(t) = \Delta P_0(t) + \Delta P_{MR}(t) = I\dot{Q}_f(t) + RQ_f(t) + \alpha \frac{L}{h} \tau_{yf}(H)\text{sgn}(Q_f(t)) \quad (4)$$

$$= \frac{\rho L}{A} \dot{Q}_f(t) + \frac{12\eta L}{wh} Q_f(t) + \alpha \frac{L}{h} \tau_{yf}(H)\text{sgn}(Q_f(t))$$

$$C_1 \dot{P}_1(t) = Q(t) - A_1(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) \quad (5)$$

$$C_2 \dot{P}_2(t) = -Q(t) \quad (6)$$

여기서,  $m$ 은 부하질량,  $k$ 와  $b$ 는 고무의 수직강성과 댐핑,  $x(t)$ 는 부하질량의 변위,  $y(t)$ 는 가진 입력의 변위,  $A$ 는 자극간격에 의해 형성된 유로의 단면적,  $\eta$ 는 MR 유체의 점성계수,  $h$ 는 자극간격,  $P_1(t)$ 은 상부챔버의 압력,  $A_1$ 은 상부챔버의 등가 피스톤 단면적,  $\tau_{ys}(H)$ 는 전단모드 하에서의 자기장부하에 따른 MR 유체의 항복응력,  $P_2(t)$ 는 하부챔버의 압력,  $\Delta P_0(t)$ 는 자기장 무부하시의 압력차,  $\Delta P_{MR}(t)$ 는 자기장 부하시 압력차,  $I$ 는 유체관성,  $Q_f$ 는 상·하부 챔버의 압력차에 의해서 발생하는 유체 유량,  $Q_s$ 는 Magnetic pole의 전단모드 형태의 움직임에 의해서 발생하는 유체 유량,  $Q$ 는 엔진마운트의 간극에 발생하는 총 유체 유량( $Q_f + Q_s$ ),  $R$ 은 전기장 무부하시 유체의 유동저항,  $\alpha$ 는 상수( $\Delta P_{MR}(t) / \Delta P_0(t)$ 의 값에 따라서 2 또는 3의 값을 가짐),  $\tau_{yf}(H)$ 는 유동모드 하에서의 자기장부하에 따른 MR 유체의 항복응력,  $\rho$ 는 MR 유체의 밀도,  $L$ 은 자극길이,  $w$ 는 전극의 너비,  $C_1$ 은 상부 챔버의 컵플라이언스,  $C_2$ 는 하부 챔버의 컵플라이언스이다. 상·하부 챔버의 압력차에 의해서 유체의 유동이 일어난다. 이 압력차는 자기장 무부하시의 압력차  $\Delta P_0(t)$ 와 자기장 부하시 MR 유체의 항복응력에 의해 발생하는 압력차  $\Delta P_{MR}(t)$ 의 합으로 식(4)처럼 표현이 가능하다. 상·하부 챔버에서 발생하는 유체유동에 대한 방정식을 적용하면 식(5), (6)처럼 표현이 된다. 식(3) ~ (6)으로부터  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ 를 소거하여 MR 엔진마운트의 지배 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$m\ddot{x}(t) + \left\{ k + \frac{A_1^2}{C_1 + C_2} \right\} (x(t) - y(t)) + \left\{ b - A \frac{\eta}{h} \right.$$

## 4. MR 마운트의 성능시험

$$\begin{aligned}
 & + \left( \frac{C_2 A_1}{C_1 + C_2} \right)^2 R - \left( \frac{C_2 A_1}{C_1 + C_2} \right) \frac{A}{2} \left\{ \dot{x}(t) - \dot{y}(t) \right\} \\
 & + \frac{A_1 C_2}{C_1 + C_2} \alpha \frac{L}{h} \tau_{yf}(H) \operatorname{sgn}(Q_f(t)) \\
 & + A \tau_{ys}(H) \operatorname{sgn}(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) = 0
 \end{aligned} \quad (7)$$

상·하부 챔버에서의 압력차가 자기장 부하시 발생하는 MR 유체의 항복응력에 의한 압력차보다 작으면 자극사이로 유체가 흐르지 못하는 잠김상태가 되며, 잠김 상태에서는 유체저항에 의한 댐핑력을 얻을 수 없다. 이런 경우에는 식(7)이 다음과 같이 표현된다.

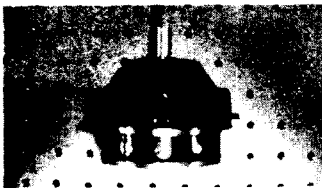
$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} + \left\{ k + \frac{A_1^2}{C_1} \right\} (x - y) + \left\{ b - A \frac{\eta}{h} \right\} (\dot{x} - \dot{y}) \\
 + A \tau_{ys}(H) \operatorname{sgn}(\dot{x} - \dot{y}) = 0
 \end{aligned} \quad (8)$$

식(7), (8)에 근거하여 중형급 승용차에 적용할 수 있는 MR 엔진마운트를 설계하고 제작하였다. Fig. 4는 제작된 마운트의 조립도와 마운트 내부에 존재하는 Magnetic pole을 나타내며, 주요 제원은 다음과 같다.

제작된 MR 엔진마운트의 외형 크기는  $\phi 120\text{mm} \times H95\text{mm}$ 이다. 마운트 내부에 존재하는 Magnetic pole의 크기는  $\phi 76\text{mm} \times H32\text{mm}$ 이며, 자극간격은 3mm, 자극길이는 10mm이다.



(a) Assembly



(b) Magnetic pole

Fig.4 Photograph of MR engine mount

### 4.1 실험 장치구성 및 실험방법

Fig.5는 MR 엔진마운트의 전달률 측정 실험을 위한 개략도를 나타낸 것이다. 60kg의 부하 질량에 가진 주파수의 변화에 따른 변위를 측정함으로써 MR 엔진마운트의 전달률을 측정할 수 있다. MR 엔진마운트에 일정한 변위의 가진을 가하기 위해서 전자석가진기를 사용하였다. 가진기의 변위 측정과 부하 질량의 변위 측정을 위하여 비접촉센서를 사용하여 전달률을 측정하였다. 전류증폭기를 사용하여 MR 엔진마운트에 전류를 공급하였다.

### 4.2 MR 엔진마운트의 성능고찰

MR 엔진마운트는 가진변위의 크기와 부하하는 자기장의 세기는 응답특성에 큰 영향을 미친다. 성능고찰을 위한 실험은  $\pm 1.0\text{mm}$ ,  $\pm 0.5\text{mm}$  그리고,  $\pm 0.1\text{mm}$ 의 세가지 가진변위로 하였다. 자기장 형성을 위해 자기장을 각각 0A/mm ~ 90A/mm까지 30A/mm씩 증가 시키면서 실험을 하였다. Fig.6(a)는 가진변위가  $\pm 1.0\text{mm}$ 이며, 자기장은 0A/mm ~ 90A/mm까지 30A/mm씩 증가시키며 부하한 실험 결과이다. 자기장이 부하되지 않았을 경우 전달률이 높게 나타나지만, 부하되는 자기장의 세기가 증가함에 따라 전달률이 점차적으로 낮게 나타나면서 공진주파수가 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 자기장이 MR 유체에 영향을 미쳐서 유체의 항복응력을 증가시키며 또한 마운트의 댐핑과 강성을 증가시키기 때문이다. 이와 같은 공진점의 이

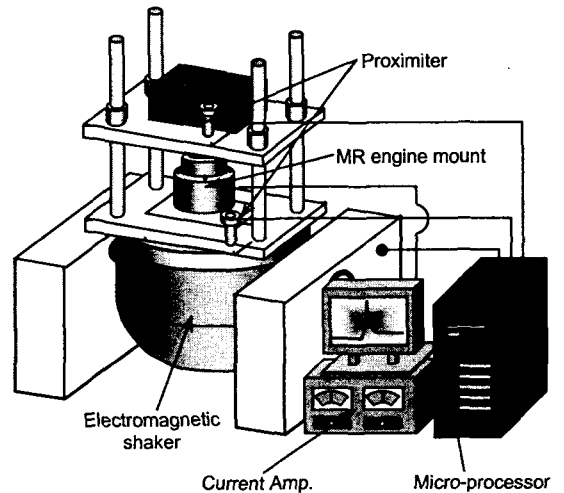
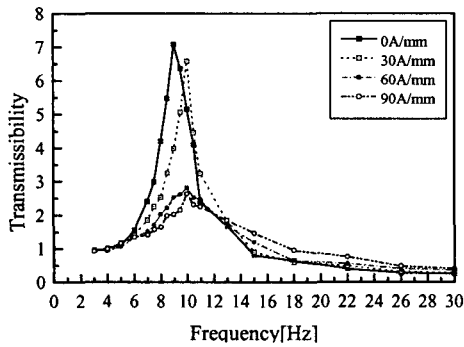
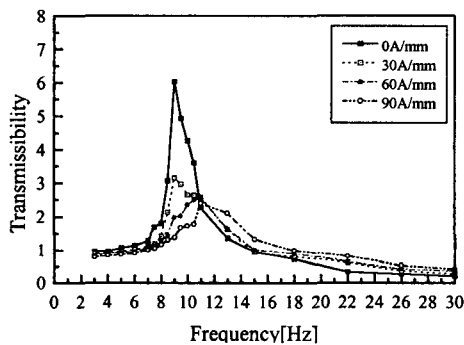


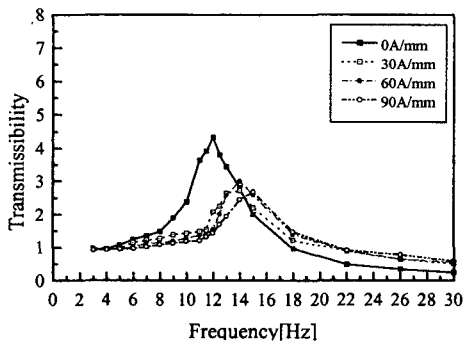
Fig.5 Configuration of the MR engine mount test apparatus



(a)  $\pm 1.0\text{mm}$  excitation



(b)  $\pm 0.5\text{mm}$  excitation

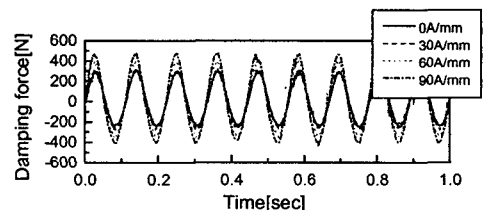


(c)  $\pm 0.1\text{mm}$  excitation

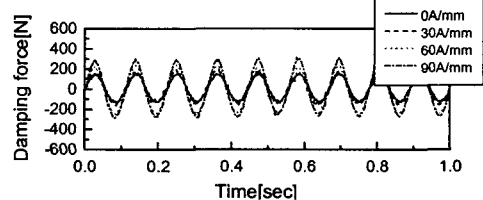
**Fig.6** Transmissibility of MR engine mount

동은 시스템의 진동제어영역의 증가를 의미한다. 가진 주파수를 공진점이 존재하는 12Hz 부근에서 두 영역으로 나눌 수 있는데, 12Hz 보다 작은 저주파수 영역과 자기장 부하시 오히려 성능이 악화되는 영역으로 12Hz 보다 큰 주파수 영역으로 나눌

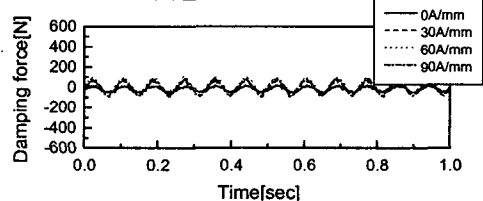
수가 있다. 저주파수 영역에서는 진동절연효과의 향상을 위해 강성과 댐핑이 높아져야 한다. 이러한 요구는 자기장이 MR 엔진마운트에 부하 됨으로써 해결될 수 있음을 확인하였다. 고주파수 영역에서는 자기장 부하시 오히려 진동절연성능이 악화되었다. 이러한 주파수 영역에서는 작은 강성과 댐핑이 진동절연성능에 좋은 영향을 미치지만, 자기장이 부하됨으로 오히려 강성과 댐핑의 증가로 진동절연성능이 저하된다. Fig.6 (b)는 가진변위를  $\pm 0.5\text{mm}$  에 부하자기장은 0A/mm, 30A/mm, 60A/mm, 90A/mm 로 실험을 한 결과이다. 여기서도 앞에서 본  $\pm 1.0\text{mm}$  의 가진변위 실험결과와 비슷하게 나타났다. 여기서도 12Hz 부근에서 저주파수 영역과 고주파수 영역으로 나누어 볼 수 있다. 저주파수 영역에서는 자기장 부하에 다른 전달률의 감소를 확인할 수 있으며, 고주파수 영역에서는 앞에서와 같이 전달률이 높아져 진동절연성능의 악화를 확인할 수 있다. Fig.6 (c)는 가진변위가  $\pm 0.1\text{mm}$ , 부하자기장은 0A/mm ~ 90A/mm 로 실험한 결과이다. 앞의 두 결과는 유사한 성능을 나타내고 있으며 그와 같이 전류 증가에 따라 보다 높은 전달률이 발생되어 제어의 필요성이 있다.



(a)  $\pm 1.0\text{mm}$  excitation



(b)  $\pm 0.5\text{mm}$  excitation



(c)  $\pm 0.1\text{mm}$  excitation

**Fig.7** Damping force of MR engine mount

Fig.7 은  $\pm 1.0\text{mm}$ ,  $\pm 0.5\text{mm}$  그리고  $\pm 0.1\text{mm}$  의 가진 변위와 이에 따른 공진 주파수에서의 댐핑력을 시간에 따라 나타낸 것이다. 각각의 가진 변위에서 부하된 자기장이 커질수록 댐핑력 또한 증가함을 알 수 있다. 특이한 현상은 댐핑력 곡선에서 자기장을 30A/mm 를 부하 했을 경우 유체 항복응력에 의한 댐핑력의 증가량은 60A/mm, 90A/mm 를 부하 했을 경우의 증가량보다 작게 나타났다. 이 결과는 Fig.6 에서 자기장을 30A/mm 부하 했을 경우와 60A/mm, 90A/mm 의 자기장을 부하 했을 경우의 전달률 감소량을 비교 했을 때, 자기장을 30A/mm 부하 했을 때 전달률 감소량의 적음과 일치한다. 즉 유체 항복응력에 의한 댐핑력이 작기 때문에 전달률의 감소량도 작아졌다.

## 5. 결론

차량의 엔진에서 발생하는 진동을 제어하기 위하여 MR 유체를 이용한 엔진마운트를 제안 하였다. 전단모드와 유동모드가 고려된 마운트의 동적 모델링을 수행하고 중형 자동차에 적용할 수 있는 MR 엔진마운트를 제작하였다. 자기장의 세기에 따라 공진을 비롯한 여러 주파수에서 변위전달률이 제어 될 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 또한 자기장에 따라 댐핑력이 제어 될 수 있음을 확인하였으며, 이를 차량에 장착할 경우 엔진으로부터 진동을 매우 효과적으로 제어 할 수 있음을 의미한다. 이를 위해 전체 차량모델을 고려한 MR 엔진마운트의 진동절연성능에 대하여 계속 연구할 예정이다.

## 참고문헌

- [1] Concoran, P. E. and Ticks, G. H., 1984, "Hydraulic Engine Mount Characteristics", *SAE Technical Paper Series* 840407..
- [2] Kano, S. and Hayashi, S., 1994, "Development of a New Optimization Method for Motor Vehicle Sub-frame Mount Layout and Mount Specifications", *SAE Technical Paper Series* 945085.
- [3] Lee, K. H., Choi, Y. T. and Hong, S. P., 1994, "Performance Design of Hydraulic Mount for Low Frequency Engine Vibration and Noise Control", *SAE Technical Paper Series* 941777.
- [4] Muzechuk, R. A., 1984, "Hydraulic Mounts-Improved Engine Isolation", *SAE Technical Paper Series* 922290.
- [5] Marc Bernuchon., 1984, "A New "Cemeation of Engine Mounts", SAE 840259.
- [6] Takao Ushijima and Takuya Dan, 1986, "Nonlinear B.B.A for Predicting Vibration of Vehicle with Hydraulic Engine Mount", SAE 860550.
- [7] 최영태, 김기선, 최승복, 정재천, 전영식, 1994, "전기유동유체를 이용한 엔진마운트의 모델 구성과 성능해석," 한국자동차공학회논문집, 제 2 권, 제 3 호, pp.62-74.
- [8] 송현정, 최영태, 최승복, 전영식, 1999, "승용차용 기존 엔진마운트와 ER 엔진마운트의 성능 비교", 대학기체학회 추계학술대회논문집(A), pp.910-915.
- [9] 최영태, 1999, "HILS 를 이용한 ER 댐퍼와 ER 엔진마운트의 성능 연구", 인하대학교 박사학위 논문.
- [10] Dug-Young Lee. And Norman M. Wereley., 2000, "Analysis of electro- and magneto-rheological flow mode dampers using Herschel-Bulkey model", *Proceedings of SPIE Vol. 3989*, pp. 244-255.