

# 반능동형 MR유체 마운트의 성능제어

## Control Performance for Semi-active Mount Featuring Magneto-Rheological Fluid

김옥삼 · 박우철 · 이현창

O. S. Kim, W. C. Park and H. C. Lee

**Keywords** : Magneto Rheological fluid(자기 유변유체 ; MR유체), Semi active(반능동), Mount(마운트), Magnetic field(자기장), Natural frequency(고유 진동수), Transmissibility(전달률)

**Abstract** : In this paper, the semi active mount featuring Magneto rheological fluid(MR Fluid) is proposed. MR fluid is suspension of micro sized magnetizable particles in a fluid medium, and its apparent viscosity can be varied by the applied strength of magnetic field. When the controllable MR fluid is applied to mechanical devices, the devices provide simple, rapid response interfaces between electronic controls and mechanical systems. The MR fluid is applied in the conventional fluid mount for improving its performance of the mount's isolation effect. A appropriate size of the MR mount is designed and manufactured on the basis of Bingham model of MR fluid. In addition, the field dependent damping forces of MR mount are evaluated with respect to the input frequency variation.

### 1. 서론

외부나 기계 자체로부터 발생하는 가진력을 흡수하기 위하여 마운트를 사용한다. 일반적으로 가진력에 의해 발생하는 구조물의 진동을 절연하기 위해서는 마운트의 강성이 낮은 것이 좋지만, 지지하고자 하는 구조물이나 엔진의 위치를 조정하고, 마운트의 내구성을 유지하기 위해서는 강성이 클수록 좋다. 특히 엔진에 사용된 마운트는 진폭이 작은 입력에 대해서는 낮은 강성을 가지고, 진폭이 큰 입력에 대해서는 높은 강성도와 감쇠를 가져야하는 상반된 설계 조건을 만족<sup>1)</sup>시켜야 한다. 기존의 고무만으로 만들어진 마운트는 외부와 내부의 가진 주파수와 진폭비와 무관하게 거의 일정한 강성과 감쇠를 가지고 있어 앞에서 언급

한 상반된 설계 조건을 만족시키기에는 부족함이 있다.

따라서 제진성능과 높은 신뢰성을 동시에 만족시키는 반능동형 소재로, 외부에서 인가하는 에너지에 따라 유동학적 성질이 변하는 반능동형 마운트에 대한 연구가 진행되고 있다<sup>2)</sup>. 자기 유동유체<sup>3)</sup>(Magneto Rheological Fluid ; 이하 MR유체라 칭함)는 외부에서 가해지는 에너지가 없을 경우에는 뉴토니안 유체(Newtonian fluid)의 특성을 나타내지만, 부하되는 자기장의 크기에 따라 유체의 항복응력이 증가하는 특성을 보인다. MR 유체는 자기장에 의하여 항복응력과 점성이 변하며, 가역적인 반응이, 가해지는 자기장의 크기에 따라 연속적이고 국부적으로 제어할 수 있는 특성을 갖고 있다. 아울러 MR유체를 이용한 응용 장치는 연속적인 제어가 가능하고, 설계가 간단하며, 유지가 용이하다. 이러한 장점들 때문에 자동차, 항공기 산업, 대형 건축물 등 여러 분야에서 연구가 수행되고 있으며, 특히 댐퍼, 엔진마운트, 제진대 등의 반능동 성능제어에 대한 많은 관심이 모아

---

접수일 : 2003년 1월 일

김옥삼 (책임저자) : 여수대학교 기계공학과

E-mail : kos@yosu.ac.kr, Tel. 061-659-3284

박우철, 이현창 : 삼척대학교 자동차공학과

지고 있다<sup>4)</sup>.

본 연구에서는 연속적이고 가역적으로 감쇠력을 가변할 수 있고, 실시간 제어가 가능한 MR유체를 특징으로 하는 새로운 형태의 마운트를 제안하고, 자기장 부하에 따른 감쇠력을 분석하여 제어 가능성을 확인하고, MR 마운트를 설계 및 제작하는데 필요한 기초 자료를 마련하고자 한다.

## 2. MR유체의 역학적 특성

MR유체는 150~250kA/m 정도의 자기장에 대하여 50~100kPa 사이의 항복응력을 나타내며, 25℃에서 0.2~0.3Pa·s 사이의 점성을 유지한다. MR유체의 최대 항복응력은 자기 포화에 의해 제한을 받으며, 사용온도는 40~150℃사이로 매우 넓은 범위의 온도에 대하여 안정적이다. 아울러 Fig. 1과 같이 외부에서 가해지는 에너지로 자기장을 부하하면, 유체 중에 분산된 입자가 자화(magnetization) 현상을 일으켜 양쪽의 전극을 향하여 자기장과 평행한 방향으로 체인과 같은 형상의 기둥 모양의 클러스터를 형성하고, 이와 같이 형성된 기둥 모양의 클러스터 내의 입자들의 결합력에 의해 유체 유동이나 외부에서 가해지는 전단력에 대하여 저항하는 강도를 보유하게 된다<sup>5)</sup>.

이러한 MR유체의 유동 메카니즘은 다음 식과 같은 Bingham 거동을 한다.

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma}, \tau_y(H) = \alpha H^\beta \quad (1)$$

여기서  $\tau$ 는 유체의 전단응력,  $\dot{\gamma}$ 는 전단 속도비이며,  $\eta$ 는 유체의 점도를 나타낸다.  $\tau_y$ 는 유체의 항복응력을 표현하는 것으로 자기장( $H$ )와 더불어 지수 함수로 증가한다. 여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 MR 유체의 용매 종류, 입자 종류, 입자 중량비와 용매의 점성 등 MR유체의 조성성분에 영향을 받는 고유상수이다.

## 3. 반능동형 MR마운트의 설계

### 3.1 반능동형 마운트의 구조와 동적 모델링

MR유체를 이용한 반능동 마운트의 대략적인 구조는 Fig. 2와 같다. 마운트 상부는 기본 강성과 댐핑력을 유지하기 위해서 고무(rubber)로 구성되어 있으며, 수직방향의 정적하중을 지지하는

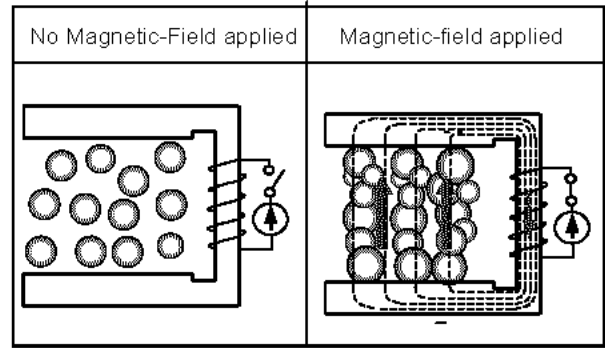


Fig. 1 Micro structure of MR fluids

스프링 역할을 한다. 또한 상부에 유실을 구성하여 팽창 강성을 형성해 동하중을 받게 된다. 하부는 부하질량을 지지할 수 있는 강재로 제작된 하우징과 마운트 내부의 체적변화를 보정할 수 있는 다이어프램(diaphragm)으로 구성되어 있다. 다이어프램에 의하여 형성된 하부유실은 주로 상부에서 간극을 통해 유체를 저장하는 기능을 한다. 마운트의 상·하부 유실에는 MR유체가 봉입되어 있으며, 실린더 모양의 자극(Magnetic pole)은 유실의 중간에 있다. MR유체에 자기장을 가하는 자극은 원통모양의 평판으로 일정한 간격을 가지며, 솔레노이드에 자기장을 발생한다. 자극 사이에 자기장이 부하되면 MR유체의 항복응력이 증가하여 마운트의 강성과 감쇠력을 증가시킬 수 있다.

MR마운트의 거동을 나타내는 지배방정식을 구하기 위하여 MR유체는 비압축성 유체이며, 자극에 의해 형성된 유로에서의 유체의 유동은 층류라 하였고, 상부 챔버의 압력은 균일하게 작용하고 마운트에 작용하는 가진력은 수직방향만으로

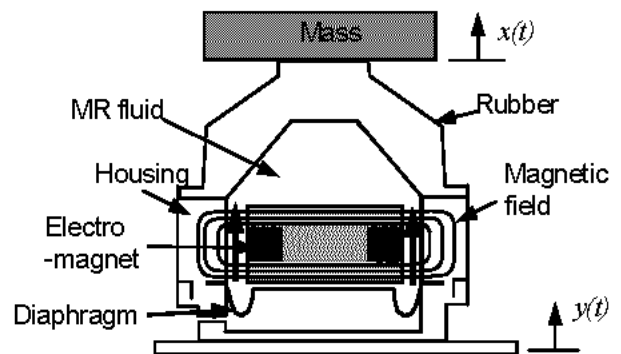


Fig. 2 Schematic diagram of the proposed mount

작용하는 것으로 고려하였다.

부하 질량  $M$ 이 탑재된 MR 마운트에 기저의 가진 입력  $y(t) = Y\sin\omega t$ 가 작용할 때 부하질량  $M$ 의 거동을 표현하는 동적 지배방정식을 구하면 다음과 같다.

$$M\ddot{x} = -k_r(x-y) - b_r(\dot{x} - \dot{y}) + A_p P_1 \quad (2)$$

여기서  $k_r$ 은 주고무의 수직 강성계수이고,  $b_r$ 은 주고무의 감쇠계수이며,  $A_p$ 는 부고무의 등가 피스톤 면적이다.

전극과 전극 사이의 MR유체의 유동 형태에 따라 외부에서 작용하는 전단력이나 유체의 유동에 의한 전단력은 다르게 나타나며, 이러한 전단력의 차이에 의해 유체의 유동을 일으키는 압력강하는 다르게 표현 된다<sup>6)</sup>. 유체가 자극에 의하여 형성된 유로를 통하여 유동할 때 발생하는 상부 챔버와 하부 챔버 사이의 전체 압력 강하  $\Delta P$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta P(t) = P_2 - P_1 = \Delta P_f(t) + \Delta P_{MR}(t) \quad (3)$$

여기서  $P_1$ 과  $P_2$ 는 각각 상부 챔버와 하부 챔버의 압력을 나타내며,  $\Delta P_f$ 는 자기장이 부하되지 않은 경우의 유체 유동에 의해 발생하는 압력강하를 나타내며, Fig. 2와 같은 형태의 MR마운트는 전극은 고정되고, 고정된 전극 사이로 유체의 유동이 발생하는 형태이므로 식(3)과 같이 표현된다.  $\Delta P_{MR}$ 은 자기장 부하시 MR효과에 의해 발생하는 압력강하이다. 이를 압력강하를 풀어서 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta P_f = I_f \dot{q}_f + R_f q_f = \frac{\rho L}{A_f} \dot{q}_f + \frac{12\eta L}{bh^3} q_f \quad (4)$$

$$\Delta P_{MR} = 2 \frac{L}{h} \tau_{yf}(H) \text{sgn}(q_f) = P_{MRf} \text{sgn}(q_f) \quad (5)$$

여기서  $\rho$ 는 MR유도의 밀도,  $h$ 는 전극의 간극을 나타내며,  $L$ 은 전극에 의해서 형성된 유로 중 자기장이 형성되는 전극의 길이,  $A_f$ 는 자극의 간격에 의해 형성된 유로의 단면적을 나타낸다. 유체의 유동을 나타내는 식(2)의  $P_1$ ,  $P_2$ 는 직접 측정하기가 어렵고, 이들 값으로는 시스템의 상태를 파악할 수 어렵다. 따라서 연속방정식을 적용하여 식(1)과 식(2)의  $P_1$ 과  $P_2$ 를 제거하고, 정리하면 다음과 같은 MR마운트의 거동을 나타내는 동적 지배방정식을 얻게 된다.

$$M\ddot{x} = -k_r(x-y) - b_r(\dot{x} - \dot{y}) + k_p(x-y) + k_{pf1}x_i$$

(6)

$$M_f \ddot{x} = -b_f \dot{x}_i - [k_{pf1} + k_{pf2}]x_i - k_p(x-y) - F_{MR}(t) \quad (7)$$

여기서  $M_f = I_f A_p A_f$ ,  $b_f = R_f A_p A_f$ ,  $k_p = \frac{A_p^2}{C_1}$ ,

$$k_{pf1} = \frac{A_p A_f}{C_1}, k_{pf2} = \frac{A_p A_f}{C_2}, F_{MR} = P_{MR} A_p \text{sgn}(q_f)$$

이며,  $C_1$ ,  $C_2$ 는 각각 상부, 하부 챔버의 컴플라이언스를 나타낸다.

### 3.2 MR마운트의 제작

자기장의 변화에 따라 감쇠력을 조절할 수 있는 MR마운트의 동적 지배방정식에 근거하여 MR마운트를 설계하고 제작하였다. Fig. 3은 설계하여 제작된 마운트 사진이며, 주요 제원은 Table 1과 같다. 정적하중을 고무 부분에서 담당하도록 하였으며, 하우징 내부에 자극이 존재한다. 주고무는 제작의 편의를 위하여 기존 승용차용 엔진 마운트로 사용되는 유체봉입형 마운트(평화산업주식회사)의 고무를 사용하였으며, 주고무의 형상을 기준으로 하여 등가 피스톤 단면적을 계산하였다.

자극은 솔레노이드에 의한 자기장 생성이 용이하게 저탄소강(SM15C)로 제작하였고, 자극표면은 호닝가공을 하였다. 하우징 하부에는 다이아프램을 설치하여 MR유체의 유동이 일어나기 위하여 필요한 체적 보정을 하였다. 이렇게 만들어진 MR마운트는 자기장 무부하시에는 유체의 점성에 의해서만 감쇠력을 발생시키나, 자기장 부하시에는 MR유체 효과에 의해서 감쇠력을 발생시키게 된다. 자기장을 형성하는 코일은 절연 튜브를 사용하여 외부로 전류가 누전되지 않도록 하였다.



Fig. 3 Photo of the MR mount

Table 1 Properties of MR mount

기호	명칭	크기
$A_p$	주 고무 부분의 동가 피스톤 면적	4130mm <sup>2</sup>
$A_s$	철에서 자기전속이 지나가는 면적	1225mm <sup>2</sup>
$A_g$	간극에서 자기전속이 지나가는 면적	2136mm <sup>2</sup>
$g$	간극간격	1.5mm
$k_r$	주 고무의 수직장성계수	144000N/m
$l$	자극의 길이	20mm
$m$	마운트에 의해 지지되는 질량	100kg

사용된 MR유체는 MRF 132 LD는 Carbonyl iron과 Hydrocarbon oil을 합성한 것으로 용매에 대한 입자의 중량비는 32%이며, 기본 점성계수는 0.2 Pas, 작동온도범위가 40~+50℃이다. MR유체의 빙햄 모델은  $\tau_y = 0.062H^{1.32}$  (kPa) 이며 자기장 세기 H의 단위는 A/m이고, 항복응력  $\tau_y$ 의 단위는 kPa이다.

### 3.3 실험 장치 구성 및 실험방법

MR마운트에 일정한 변위의 외부 가진을 주기 위하여 Fig. 4와 같이 유압 가진 장치에 MR마운트를 지그(jig)에 고정된 후, 마운트의 윗부분에 상판을 장착하고 블록 형태로 만든 질량을 부가하였다. 변위와 가속도를 측정하기 위하여 마운트를 고정된 하부지그 부분과 상부지그에 가속도계를 부착하였으며, 변위측정을 위하여 가진 장치인 유압실린더 부위와 상판 부위에 변위 측정 자기 센서(LVDT)를 설치하였다. 또한 힘의 전달률을 알아보기 위하여 마운트 상부와 상판 사이에 로드셀(Load cell)을 고정하였다.

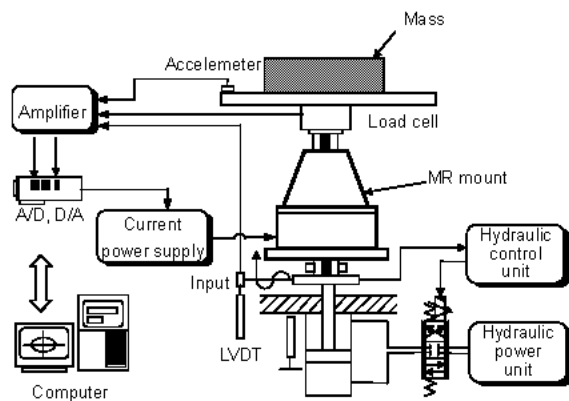


Fig. 4 Configuration of the MR mount test apparatus

가속도계의 신호는 Fig. 5와 같은 데이터추출 시스템을 구성하였고, 신호분석기(FFT, B&K)를 이용하여 주파수와 시간에 대한 결과를 얻었다. 변위 측정 자기 센서와 로드 셀에서 발생된 신호들은 DSP 보드를 통하여 신호변환을 거쳐 컴퓨터 기억장치에 저장하였다. 전류 증폭기를 통하여 MR마운트에 전류를 공급하여, 솔레노이드에 자기장을 인가하였다. 실험방법은 100kg의 부하 질량을 지지하고 있는 MR마운트에 가진 입력변위는 +1mm로 일정하게 유지하고, 가진 입력의 주파수를 변화시켜 가면서 부하 질량의 변위를 측정함으로써 MR마운트의 댐핑력을 관찰하였다.

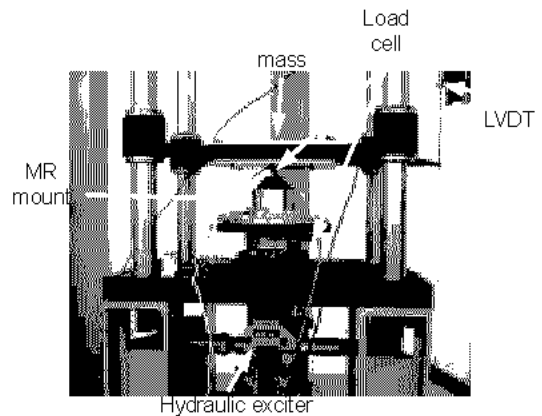


Fig. 5 Photo of the MR mount test apparatus

## 4. MR마운트의 제어성능 고찰

### 4.1 자기장에 따른 MR마운트의 감쇠력

MR마운트에 가해지는 가진 주파수는 8Hz, 입력 변위는 1mm이며, MR마운트에 가해지는 전류의 세기를 0.75A, 1.5A로 변화시켰을 때, Fig. 6은 MR마운트 상부에 고정된 부가질량의 변위를 나타낸 것이다. 전류를 부하하지 않은 경우, 가진 입력보다 매우 큰 변위를 나타내고 있다. 이는 8Hz의 가진 주파수가 MR 마운트가 포함된 시스템의 고유진동수인 8.5Hz와 매우 가까워 공진에 가까운 현상을 나타내기 때문이다. 그러나 0.75A의 전류를 부하한 경우, 질량의 변위는 크게 감소하여 나타난다. 이는 MR마운트에 전류를 공급함에 따라 MR마운트 내의 유로 사이에 형성된 자기장에 의하여 MR유체의 전단 항복응력이 증가하고 이에 따라 유체의 감쇠력이 증가하여 MR마운트의 감쇠력이 증가하였기 때문이다. MR마운트에 1.5A의 전류를 부하한 경우에도 감쇠력이

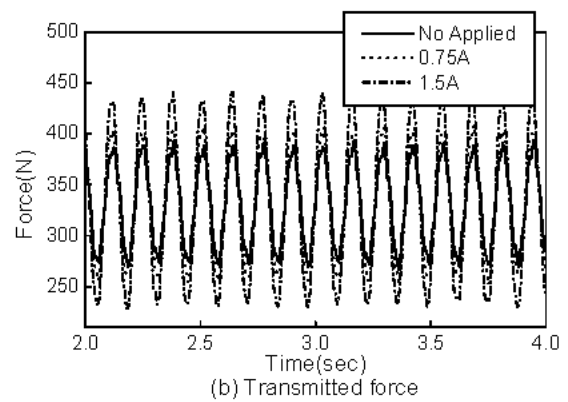
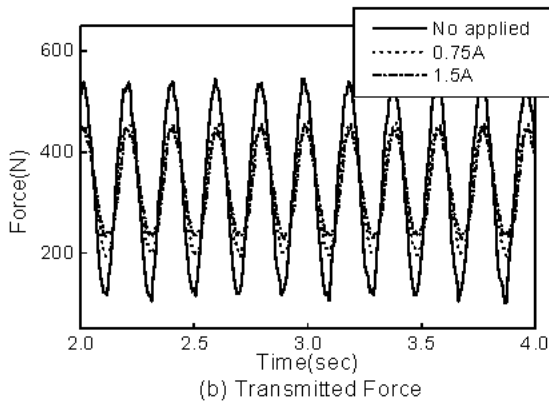
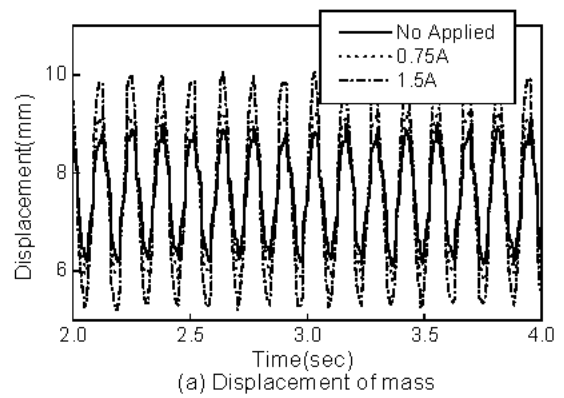
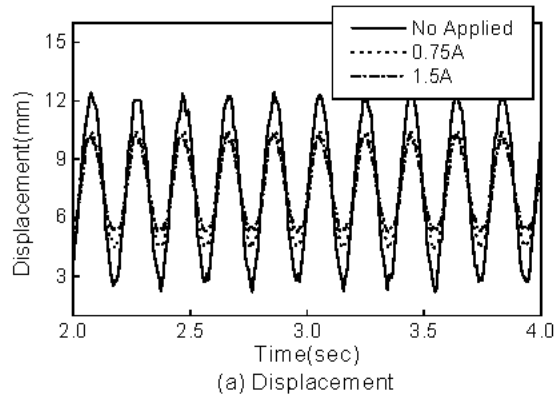


Fig. 6 Time history of damping force at 8Hz

Fig. 7 Time history of damping force at 12Hz

증가하여 변위가 약간 감소하여 나타나고 있다. MR마운트와 부가질량 사이에 설치된 로드 셀로부터 측정된 힘을 Fig. 6의 (b)는 나타내었다. 부가질량의 변위와 매우 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 전체적으로 보면 0.75A의 전류를 공급한 경우에 비하여 1.5A의 전류를 공급한 경우의 변위와 전달력의 감소 정도가 적게 나타나고 있는데, 이는 자기장 증가에 따른 MR유체의 전단항복응력 증가에 의한 감쇠력의 증가량이 전체 MR마운트의 감쇠력에서 차지하는 비율의 변화가 작아지기 때문이다. 그러므로 MR마운트에 부하하는 전류의 세기에 따라 마운트의 감쇠력을 조절할 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 MR마운트에 가해지는 가진 주파수가 12Hz, 입력 변위는 1mm이며, MR마운트에 가해지는 전류의 세기를 0, 0.75A, 1.5A로 변화시켰을 때, MR마운트 상부에 고정된 질량의 변위와 질량에 전달되는 힘을 나타낸 것이다. 가진 입력의 주파수가 시스템의 공진주파수를 지난 12Hz이기 때문에 전류를 부하하지 않은 경우, 변위의 폭이 감

소하여 가진 입력과 거의 같은 크기의 변위를 나타내고 있다. 그러나 0.75A의 전류를 MR마운트에 부하한 경우, 전류를 부하하지 않은 경우에 비하여 오히려 변위가 크게 나타나고 있다. 이는 부하 전류에 의하여 MR유체의 전단항복 응력 증가에 따라 MR마운트의 감쇠력이 증가하고, 이러한 감쇠력의 증가는 MR 마운트 상하부 유실로의 MR 유체의 유동을 오히려 방해하여 오히려 시스템의 강성이 증가하였기 때문이다. 1.5A의 전류를 부하한 경우 MR마운트 내의 감쇠력이 더욱 증가하여 부가 질량의 변위는 더욱 크게 나타나고 있다. (b)에 나타난 바와 같이 부가질량에 전달되는 힘도 변위와 유사한 경향을 나타내고 있다.

#### 4.2 MR마운트의 전달률

가진 변위 +1.0mm, MR마운트에 부하하는 전류를 각각 0A, 0.75A 그리고 1.5A로 변화시켰을 때 제안된 MR마운트의 전달률을 Fig. 8에 나타냈다. 전류를 부하하지 않은 경우, 8.5Hz에서 전달률이 크게 나타나 시스템의 공진주파수임을 확인할 수

있다. MR마운트에 0.75A의 전류를 공급한 경우, 공진 주파수 부근에서의 전달률이 감소하고 있다. 이는 부하한 자기장에 의한 MR유체의 전단항복 응력의 증가에 따른 마운트의 감쇠력의 증가에 의한 것이다. 1.5A의 전류를 공급한 경우에는 0.75A의 전류를 부하한 경우보다도 더 전달률이 감소하여 나타나고 있으며, 전달률의 최대값은 약간 고주파수 영역 쪽으로 이동하여 나타나고 있다. 따라서 MR마운트에 부하하는 자기장의 세기에 따라 전달률을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 시스템의 공진주파수도 변화시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 부하하는 자기장이 MR유체의 전단항복응력을 증가시켜 마운트의 댐핑력을 증가시키고, 유로에서의 감쇠력 증가는 상하부 유실에 있는 MR유체의 이동을 방해하여 강성을 증가시키기 때문이다. 이와 같은 공진주파수의 이동은 시스템의 진동 제어 영역의 확대를 의미하며, MR마운트에 공급하는 자기장의 세기만을 조절함으로써 간단하게 시스템의 공진 주파수를 가변하도록 제어할 수 있다.

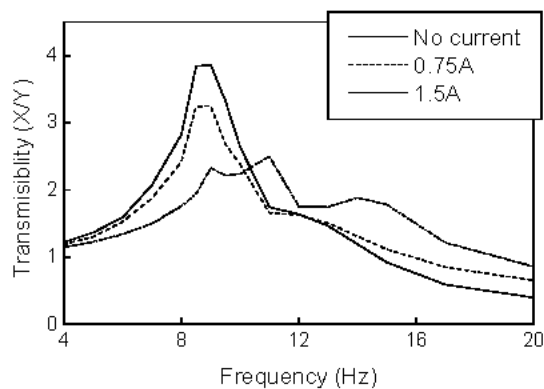


Fig. 8 Transmissibility of MR mount

## 5. 결론

연속적으로 감쇠력을 가변할 수 있고, 실시간 제어가 가능한 MR유체를 특징으로 하는 새로운 형태의 마운트를 제안하였다. 그 결과 MR마운트의 자기장 부하에 따른 마운트의 성능을 분석하였다. 부하 자기장의 세기에 따라 공진 주파수 영역에서의 전달률이 감소하고, 공진 주파수가 이동함을 확인하였다. 향후 모든 가진 영역에서 만족할 수 있는 진동 절연 성능을 갖는 제어기를 설계해야 할 것이며, 자기포화 현상과 전류공급기의

응답성을 고려한 제어기의 설계에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

## 후기

삼척대학교 교내 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 관계자 분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 임홍재, 최종운, 이상범, 1999, "유압엔진마운트의 동특성 해석 컴퓨터 시뮬레이션 방법 연구", 한국소음진동공학회지, 제9권, 제1호, pp. 42~48
2. 이현희, 최승복, 2001, "MR유체를 이용한 엔진마운트의 진동제어", 한국소음진동공학회 추계 학술대회, pp. 213~218.
3. J. D. Carlson, et al., 1994, "Magneto-rheological Fluid Devices", US Patent No. 5284330.
4. L. Zipser, L. Richter and U. Lange, 2001, "Magneto-rheologic Fluids for Actuators", Sensors and Actuators A, Vol. 92, pp. 318~325.
5. J. D. Carlson and B. F. Spencer, 1996, "Magneto Rheological Fluid Dampers For Semi active Seismic Control", Third Int. Conf. on Motion and Vibration Control, Chiba, September, I 6, pp. 35~40.
6. G. Yang, B. F. Spencer Jr., J. D. Carlson and M. K. Sain, 2002, "Large scale MR Fluid Dampers : Modeling and Dynamic Performance Considerations", Engineering Structures, Vol.24, pp. 309~323.