

〈논 문〉

자기점성유체를 이용한 가변감쇠 마운트의 모델화

A Modeling of a Variable-damping Mount Using Magneto-Rheological Fluid

안영공* · 양보석* · 森下信**

Young Kong Ahn, Bo-Suk Yang and Shin Morishita

(2000년 9월 26일 접수 ; 2000년 11월 11일 심사완료)

Key Words : Mount(마운트), Vibration Isolation(진동 절연), Magneto-Rheological Fluid(자기점성유체)

ABSTRACT

This paper deals with an application of Magneto-Rheological (MR) fluid to a small size mount for precision equipment of automobiles. MR fluid is known as a class of functional fluids with controllable apparent viscosity of fluid by the applied magnetic field strength. A typical MR fluid is a suspension where pure iron particles of 1-20 (m in diameter) are dispersed in a liquid such as mineral oil or silicone oil, at the concentration of 20 - 40 vol%. Electro magnetic coil is installed at the bottom of a variable-damping mount filled with MR fluid, and performance of the mount was investigated experimentally. Furthermore, the properties of the MR Mount on experimental study were explained analytically by mechanical model of the MR mount.

1. 서 론

자동차의 기계적 성능은 근래 기술개발에 의해 고도로 발달되었으나, 안정성, 쾌적성의 향상을 도모하기 위해 많은 종류의 정보를 정확하고도 신속하게 처리하는 것이 필요 불가결하다. 이 때문에 자동차의 전자화가 급속하게 진전되고 있고, 전자화의 핵심적인 정밀기기에는 제어용 컴퓨터, 지도정보용 DVD플레이어, 음악용 CD플레이어 등이 있다. 이들 자동차 탑재용 전자기기에 의해 주행 중에 다양한 정보처리가 이루어지고 있다. 또한 현재 일본등에서 다각적인 프로젝트로서 진행되고 있는 ITS(Intelligent Transport System)의 실현을 위해서는 어느 수준 이상의 높은 처리능력을 가진 컴퓨터를 자동차에 탑재하는 것이 필요하다. 이들 전자장치의 작동 신뢰성을 향상시키기 위해, 노면의 굴곡에 의한 저주파수 진동, 엔진에 의한 고주파수 진동 등의 폭넓은 주파수 범위에서의 진동전달을 억제하는 것이 필요하다.

자동차 탑재용 정밀기기의 지지구조로서 고점도 실리콘 유체를 주입한 소형 마운트 등이 현재 이용되고 있다. 이는 기본적으로 수동적인 감쇠기라고 할 수 있다. 진동제진성능의 향상과 폭넓은 운전주파수에서도 높은 제진효과를 유지함은 물론, 불규칙한 충격가진으로부터 기계장치 및 구조물을 보호하기 위해 능동형^(1,2) 및 반능동형^(3,4) 마운트의 개발이 시도되고 있으나, 제진성능과 높은 신뢰성을 동시에 만족시킨다는 점에서는 반능동형이 주목을 받고 있다.

따라서 본 연구에서는 외부자장에 의해 유동학적 특성을 변화시키는 것이 가능한 기능성유체로서 알려진 자기점성유체(Magneto-Rheological fluid : MR유체)를 이용하여, 외부자장의 강도에 의해 감쇠특성이 변화하는 소형 유체마운트를 제작하여 진동 제진성능에 관하여 실험적인 평가를 수행하였다. 또한 MR유체를 이용한 마운트의 모델화를 통하여 MR유체의 걸보기상의 점도변화에 의한 마운트의 제진특성의 메커니즘을 이론적으로 고찰하였다.

2. MR 유체

MR유체는 외부자장에 의해 유체가 가지는 항복응력을 변화시킬 수 있는 기능성유체로 알려져 있다. 일정한 용매에 높은 투자율(permeability)을 가진 직경 1~수십 μm 의

* 정회원, 부경대학교 기계공학부

E-mail : ahn@mail1.pknu.ac.kr

Tel : (051)620-6455, Fax : (051)620-6450

** Department of Mechanical Engineering, Yokohama National University

철 분말을 분산시킨 용액이다. 외부에서 자장을 부과하면 MR유체 내부의 철 분말입자가 자계방향으로 사슬모양의 클러스터(cluster)가 형성되어 유체의 유동저항이 증가되고, 매크로적으로 보면 유체의 항복응력이 증가하게 된다. 다시 말해서 걸보기상의 점도가 증가한다고 표현할 수 있다.

MR유체는 1948년 Rabinow에 의해 최초로 보고된 것으로 알려져 있고, 그 문헌에는 몇 개의 응용예가 실려져 있다.⁽⁵⁾ 또한 그 문헌에는 ER유체(Electro-Rheological Fluid : 전기점성유체)의 초기의 연구자로서 알려진 Winslow⁽⁶⁾의 이름이 있고, 전장에 응답하는 유체인 ER유체에 대하여 자장에 응답하는 유체에 관한 보고를 한 것으로 보인다. 그 후 ER유체의 연구에 종사하던 러시아의 연구자가 주목하고⁽⁷⁾ 또한 미국의 한 기업이 응용연구에 적극적으로 전념하여⁽⁸⁾ 현재에는 기본특성에 관한 검토^{(9)~(11)}에서부터 응용 액츄에이터의 모델화^{(12)~(14)}까지 다양한 연구가 수행되고 있다. 자장에 응답하는 유체로서 잘 알려진 자성유체도 기본적으로는 MR유체와 같은 조성(組成)을 가지고, 또한 자장에 반응한다는 의미에서는 같은 특징을 가진다.^(15, 16) 그러나 입자의 크기가 자성유체는 겨우 수십 나노미터(nm)인 것에 비해 MR유체에는 수 마이크로미터(μm) 정도로 훨씬 크고, 아울러 MR유체의 특성은 자성유체와 크게 다르다. 자성유체는 뉴턴 유체적인 특성을 나타내지만, MR유체는 소성유체(Bingham 유체)로서의 특성을 가지고 있다.

MR유체의 항복응력이 변화하는 메커니즘은 ER유체와 아주 유사하고, 자장과 전장이라는 점이 다를 뿐이다. MR유체와 분산계 ER유체, 또한 균일계 ER유체의 특성을 비교하면 Table 1과 같다.⁽¹⁶⁾ 특히 발생하는 항복응력의 크기에 관해서는 분산계 ER유체에 비해 MR유체가 100배 정도이고, 고전압을 이용할 필요가 없는 점이 MR유체의 적용가능성이 높고 평가되는 근거로 알려져 있다. 기본점도는 ER유체의 경우가 폭넓게 설정 가능한 것으로 생각된다. 또한 ER유체는 한 쌍의 전극만을 설치하면 그 특성을 이용할 수 있다는 간편성을 가지고 있고, 응답특성 또한 ER유체의 경우가 양호하다는 것을 고려하면 ER유체와 MR유체는 용도에 의해 각각 응용가능성이 남아 있는 것으로 생각된다.

MR유체중의 클러스터형성을 확인하기 위해 MR유체를 10배정도의 Base Oil로 희석하여 광학 현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1(a)는 무자장 하의 상태이고, 흰 점상의 물질이 철의 미립자이다. 이는 작은 부정형의 클러스터를 형성하여 그 덩어리가 랜덤하게 분산되어져 있다. 그 후 그림 (b), (c), (d)의 순으로 서서히 자속밀도를 10 mT, 15 mT, 20

mT로 증가시키면서 관찰하였다. 그림에서 자계의 방향은 지면 중방향으로 향하고 있다. Fig. 1로부터 자계가 강하게 될수록 사슬모양의 클러스터는 길게 성장하고, 클러스터사이의 간격이 조밀하게 되어 가는 것을 관찰할 수 있다.

Table 1 Comparison of properties of MR and ER fluids

Property	MR fluid	ER fluid Particle-type Liquid crystal	
Max. yield Stress	50~100 kPa	1~5 kPa	-
(Plastic) viscosity	0.2~1 Pas	0.1~1 Pas	0.05~2 kPas
App. Viscosity variation	-	-	~10(~30)
Max. field	~250 kA/m	~5 kV/m	~2 kV/m
Operable temperature	-50~200 °C	-40~120 °C	-40~110 °C
Sedimentation	Soft (1~3 hours)	Soft (1~6 months)	None
Density	3~6.5 g/cm ³	1~3 g/cm ³	1~2 g/cm ³
Power supply	2~50 W (2~25 V, 1~2 A)	2~50 W (1~4 kV, 1~30 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	2~50 W (1~4 kV, 0.1~3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

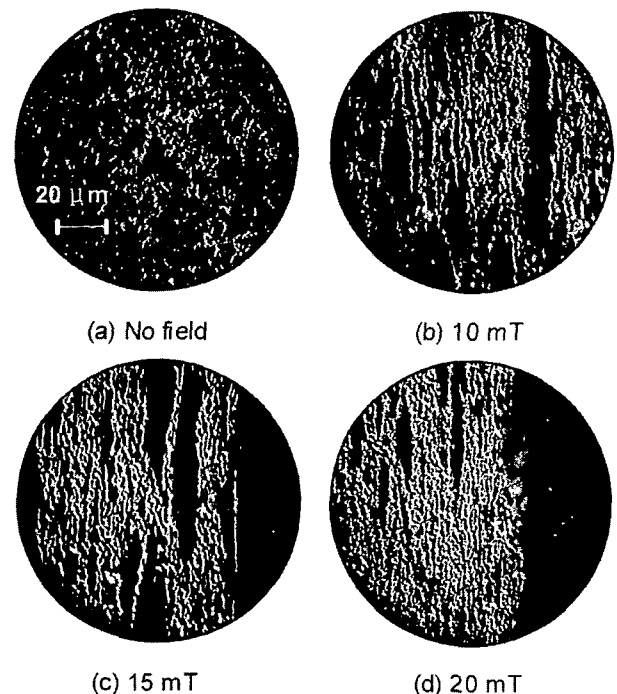


Fig. 1 Cluster formation of MR fluid

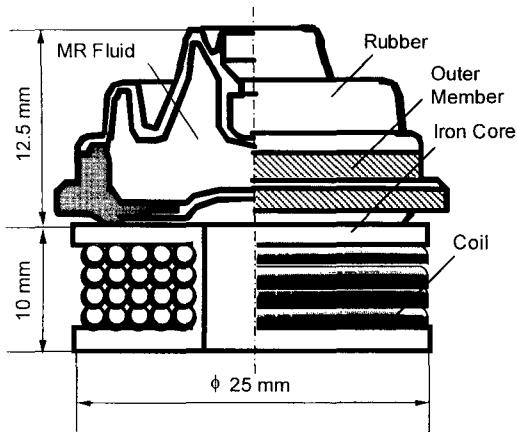


Fig. 2 Schematic view of MR mount

3. MR 유체를 이용한 소형 마운트

본 연구에서 이용한 소형마운트의 구조를 Fig. 2에 개략적으로 나타내었다. 이 마운트는 상부의 마운트부와 하부의 전자기 코일로 구성되어 있다. 이 소형마운트는 실용성을 중요시하여 자동차 탑재용 CD플레이어 등의 방진 대책으로서 이용되고 있는 유체마운트를 그대로 사용하였다. 기존의 ER 또는 MR마운트가 2개의 챔버를 가지는데 비하여, 이 마운트는 하나의 챔버를 가지고 있고, 또한 크기가 아주 작은 것이 특징이다.

Polypropylene의 재료로 만든 케이스에 Butyl 고무의 챔버(chamber)가 접착된 것으로서, 내부에 약 2cc의 MR유체를 봉입하는 것이 가능하다. MR유체는 입경 1~수 μm 정도의 고순도 α 철의 입자를 PAO(Para Alpha Olefin)로 알려진 합성윤활유에 분산시킨 것을 이용하였다. 합성윤활유의 동점도 4.0 cSt, 입자의 농도 80 wt%로 하고, 그 외 내마모제와 분산제를 포함하고 있다. 전자기 코일부는 알루미늄제 Boobin에 S10C의 철심을 삽입하고, 코일의 직경은 0.3 mm의 Polyamide 피복도선을 300회 감았다.

4. 실험

가변감쇠의 제진장치인 MR유체를 이용한 마운트의 제진특성을 파악하기 위해 impulse에 대한 시간응답과 가진기를 이용한 강제진동에 대한 주파수응답을 측정하였다. 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 전자식 가진기 상부에 MR유체를 봉입한 소형마운트위에 부가질량과 보조스프링을 설치하였다. 여기서, 실제의 자동차 탑재용 CD플레이어의 지지계 특성치를 참고하여 마운트에 부과되는 질량을 가속도계의 질량을 포함시켜 0.06 kg, 또한 상부측의 보조 스프링상수를 196 N/m로 하였다. 마운트의 제진

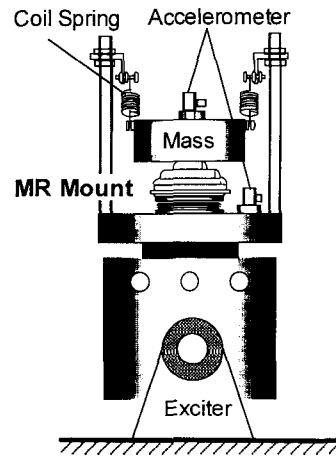


Fig. 3 Experimental setup

특성은 전자기 코일에 공급되는 직류전류의 양에 따라 변화하게 된다. 왜냐하면 전자기 코일에 직류전류를 공급하였을 때, 이 전류로 인해 발생한 자장은 마운트내부에 존재하는 MR유체의 유동특성을 변화시키기 때문이다.

4.1 Impulse입력에 대한 응답

Impulse입력에 대한 마운트의 시간응답특성을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 입력파형을 나타내고 있고, Fig. 4(b)는 코일에 전류를 공급하지 않은 경우의 질량측 가속도응답, Fig. 4(c)는 코일에 2 A의 전류를 공급한 경우의 응답을 나타내고 있다. 전류를 공급하지 않은 상태에서는 진동이 완전히 감쇠되는 시간이 0.22초가 필요한 것을 알 수가 있다. 한편 전류를 공급하였을 때, 진동감쇠시간은 무전류의 경우에 비해 1/2 이하로 단축되었으나, 마운트의 등가강성이 상승하는 관계로 첫 번째 응답파형의 진폭이 2배 정도 증가하였다.

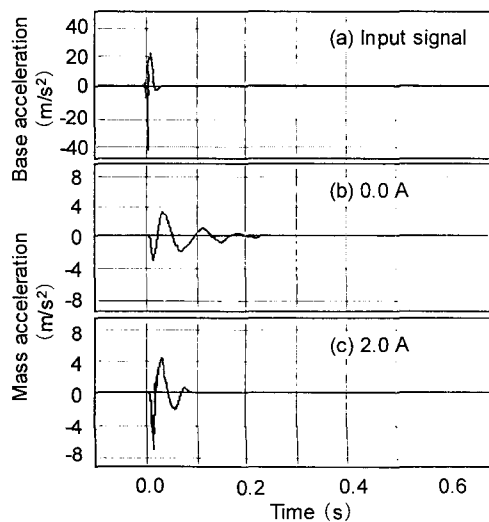


Fig. 4 Time responses to impulse input

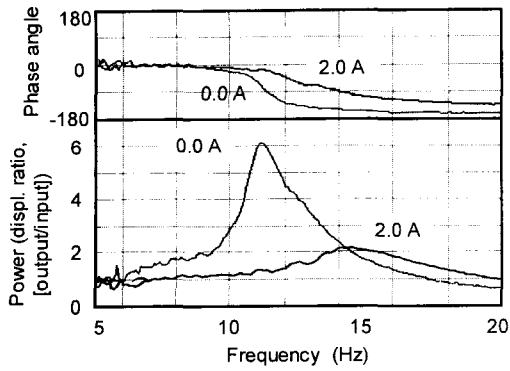


Fig. 5 Bode diagram

4.2 주파수 응답

가진기의 기초부와 부하 질량축의 가속도를 가속도계로부터 측정하여 Bode 선도를 작성하였다. 가진주파수는 5~20 Hz, 진폭은 0.3 mm, 주파수의 sweep속도를 1 Hz/s로서 정현파가진을 하여 얻은 주파수응답은 Fig. 5와 같다. 코일에 전류를 공급하지 않는 경우에 비해 2 A의 전류를 공급했을 때, 진폭비는 약 70 % 감소하고, 공진주파수가 11 Hz에서 15 Hz로 상승하였다. 본 실험에서는 공진주파수의 증가로부터 환산하여, 등가강성이 약 40 % 증가한 것에 해당한다. 약 13.5 Hz를 기준으로 이 주파수 이전에서는 코일에 전류를 공급하고(전류스위치 ON), 이후는 전류를 공급하지 않으므로(전류스위치 OFF)를 정상적인 가진이 가해지는 마운트의 제진효과를 높일 수 있을 것이다.

5. MR마운트의 모델화

기존의 ER 또는 MR마운트와 달리 하나의 챔버를 가지는 본 마운트의 제진 매커니즘을 파악하기 위해, 이상의 실험결과에 기초하여 본 MR 유체를 이용한 마운트의 모델화를 수행하였다. MR마운트의 유체·기계적 모델을 Fig. 6에 나타낸다. 고무와 코일스프링의 수축에 의해, 입력속도 V_{in} , \dot{x} m/s와 진동이 발생하고, 또한 고무의 벽에 확장현상이 발생한다. 스프링상수 K_R 은 고무와 코일스프링으로부터의 합성강성을 나타내고, C_R 은 고무의 감쇠상수이다. 확장현상이 일어날 때, 발생하는 유체의 압력변화 ΔP 에 의해 변화하는 마운트의 체적변화 ΔV 와 유량변화 ΔQ 로부터 체적강성은 $K_V = \Delta P / \Delta V$, 체적감쇠는 $C_V = \Delta P / \Delta Q$ 로 표현된다. Fig. 6으로부터 마운트의 지배방정식을 유도해야 하는데, 이 모델은 K_R 및 C_R 과 같은 기계적 요소와 유체유량 Q 에 대한 요소, 즉 2개의 에너지 영역을 가지고 있다. 이와 같은 복수의 에너지 영역을 가지는 시스템의 모델링에 유용한 수단인 bond

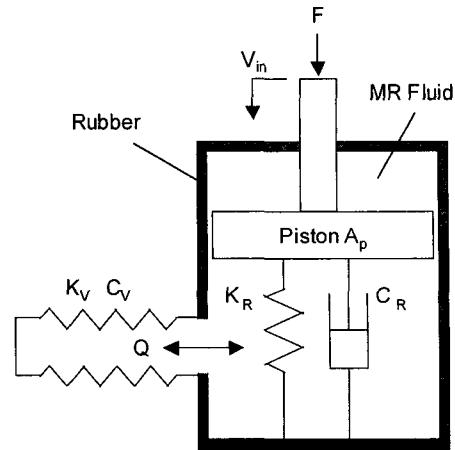


Fig. 6 Fluid and mechanical model of the MR mount

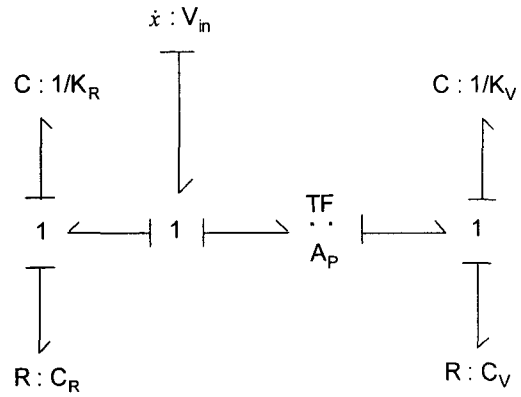


Fig. 7 Bond graph model of the MR mount

graph모델링 기법⁽¹⁷⁾을 이용하여 본 마운트를 선형적으로 전개하면, Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 7의 bond graph 모델을 이용한 유량에 관한 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{q}_V = -A_p \dot{x} \tag{1}$$

$$\dot{q}_R = \dot{x} \tag{2}$$

여기서 \dot{q}_V 는 체적강성 K_V 의 체적변위, \dot{q}_R 은 스프링 강성 K_R 의 변위, 변수 A_p 는 마운트의 유효 피스톤 단면적이다. 마운트의 제진특성을 나타내는 동강성 파라미터는 다음 식과 같이 변위 x 에 대한 힘 F 의 비로서 나타낼 수가 있다.

$$\frac{F(s)}{x(s)} = K^* = (K_R + A_p^2 K_V) + s(C_R + A_p^2 C_V) \tag{3}$$

여기서 s 는 라플라스 연산자이고, $s = j\omega$ 를 이용하여 주파수영역에 대한 식으로 식 (3)을 다음의 식 (4)와 같이 변환시킬 수 있다.

$$\begin{aligned}
 K^* &= K' + jK'' \\
 K' &= K_R + A_p^2 K_V \\
 K'' &= \omega(C_R + A_p^2 C_V)
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$ 이고, ω 는 각주파수 rad/s이다. K' 와 K'' 는 각각 동강성의 실수부와 허수부에 해당한다. 동강성의 실수부와 허수부로부터 전달률 T 는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$T = \sqrt{\frac{(K_R + A_p^2 K_V)^2 + [\omega(C_R + A_p^2 C_V)]^2}{[(K_R + A_p^2 K_V) - M_1 \omega^2]^2 + [\omega(C_R + A_p^2 C_V)]^2}} \tag{5}$$

여기서 M_1 은 마운트에 부과된 질량이다. 전달률을 계산하기 위해 식 (5)의 파라미터 M_1 , K_R , C_R 및 A_p 는 실험적으로 측정하였으며, 또한 K_V 와 C_V 는 Fig. 5의 전류를 공급하지 않은 경우의 전달률로부터 추정하였고, 이들 값을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 MR mount parameters used in the numerical simulation

Symbol	Description	Value
M_1	Sprung mass	0.06 kg
K_R	Combined stiffness of rubber and coil spring	237 N/m
C_R	Rubber danping	0.395 N · s/m
C_V	Volumetric damping	2.986×10^6 N · s/m ³
K_V	Volumetric damping	4.74×10^8 N · s/m
A_p	Piston area	0.00031 m ²

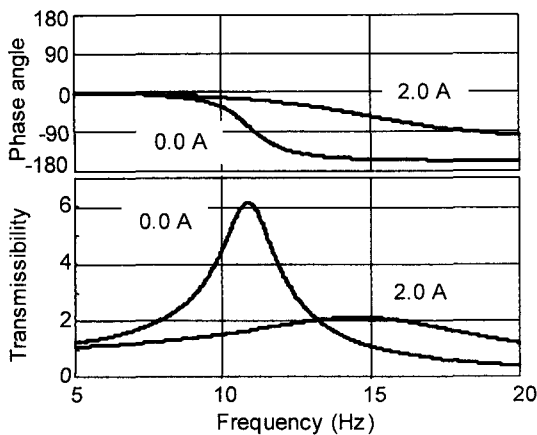


Fig. 8 Transmissibility of MR mount

Fig. 5와 같이 전류를 2 A 부과하여 실험적으로 얻은 전달률을 식 (5)를 이용하여 이론적으로 계산하기 위해 Table 2의 파라미터들을 이용하였다. 단지 Fig. 5의 전류를 2 A 부과한 경우의 공진주파수와 공진진폭을 고려하여 체적강성과 체적감쇠의 값 만을 변화시켜 얻은 응답의 수치적인 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 5와 비교하여 확인할 수 있는 것과 같이 전류를 공급함으로써 전달률의 진폭 감소와 함께 증가강성의 증대를 잘 표현하고 있어, 본 마운트의 모델화의 타당성을 뒷받침하고 있다고 볼 수 있다. 이 모델로부터 추정하면 2 A의 전류를 공급할 경우, 전류를 공급하지 않은 경우에 비해 체적감쇠가 약 12배, 체적강성이 6배정도 증가함을 알 수 있다.

6. 감도해석

마운트의 파라미터 추정의 정확도는 마운트 성능에 중요한 영향을 끼치는 요소중의 하나이다. 파라미터의 변화에 대한 마운트의 특성을 이론적으로 검토하기 위해 마운트의 지배방정식 (5)를 이용하여 감도해석(sensitivity analysis)을 행하였다. 파라미터는 체적감쇠, 체적강성, 피스톤면적이 고려되었고, Table 2에 나타난 값을 100%로 하였다.

Fig. 9에서 체적감쇠가 증가할수록 공진주파수의 피크는 작아진다. 그러나, 공진주파수의 $\sqrt{2}$ 배 부근의 주파수에

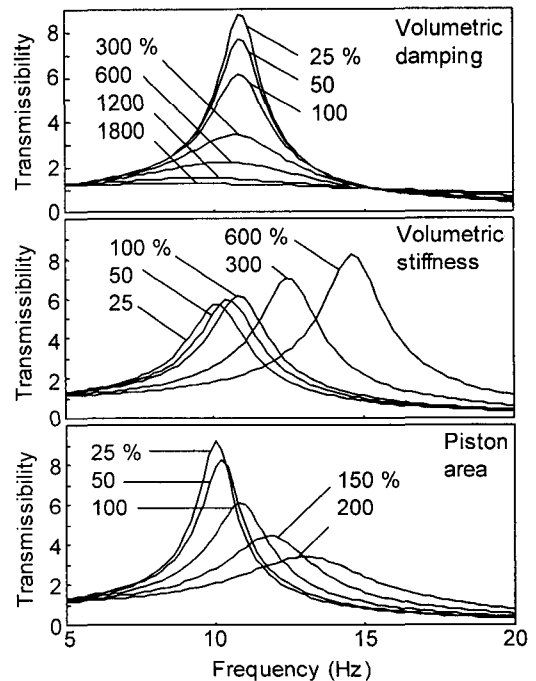


Fig. 9 Effect of volumetric damping and stiffness, and piston area on MR mounts performance

서는 전달률이 오히려 증가함을 알 수 있고, Fig. 5와 Fig. 8에서 이와 같은 현상이 나타나지 않은 것은 체적강성이 함께 증가했기 때문이다. 체적강성이 증가할 때 공진주파수와 전달률 피크가 증가하는 것을 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 체적강성과 체적감쇠는 해석적으로 평가하는 것이 쉽지 않고, 일반적으로는 실험으로부터 얻어진다. 또한 피스톤 면적이 증가하면 공진주파수는 증가하고, 공진피크가 감소하는 특성을 보이고, 마운트의 제진효과에 중요한 파라미터 중의 하나임을 알 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 기능성유체로서 주목되고 있는 MR유체를 이용하여 자동차 탑재용 정밀기기를 지지하는 반능동형 소형마운트를 제작하여 마운트의 제진특성을 규명하고, 모델화를 통하여 제진특성의 메커니즘을 이론적으로 설명하였다. 이 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 제작한 MR유체를 적용한 마운트는 2A의 일정 자장을 외부로부터 공급함으로써 정상 정현파 입력가진에 대한 응답인 전달률의 진폭이 무 자장 상태에 비해 약 70% 감소시킬 수 있음을 실험적으로 나타내었다.

(2) MR유체를 이용한 마운트의 고무벽에 확장 현상이 일어날 때, MR유체의 걸보기 점도의 변화는 마운트 내부의 압력변화와 함께 체적변화와 유체유량의 변화에 의해 마운트의 강성과 감쇠가 변화하는 것을 마운트의 모델화로 부터 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) Miller, L. R., Ahmadian, M., Nobles, C. M. and Swanson, D. A., 1995, "Modeling and Performance of an Experimental Active Vibration Isolator," Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 117, pp. 272~278.

(2) Panza, M. J., McGuire, D. P. and Jones, P. J., 1997, "Modeling, Actuation, and Control of an Active Fluid Vibration Isolator," Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 119, pp. 52~59.

(3) Duclos, T. G., 1987, "An Experimentally Tunable Hydraulic Mount which uses Electro-Rheological Fluid," SAE Technical Paper 870963, Noise and Vibration Conference, April 28~30.

(4) Graf, P. L. and Shoureshi, R., 1987, "Modeling and Implementation of Semi-Active Hydraulic Engine

Mounts," ASME Winter Annual Meeting, Paper No. 87-WA/DSC-28.

(5) Rabinow, J., 1948, "The Magnetic Fluid Clutch," AIEE Transactions, Vol. 67, pp. 1308~1315.

(6) Winslow, W. M., 1949, "Fibration of Suspensions," J. Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137~1140.

(7) Shulman, Z. P., Kordonsky, V. J., Zaltsgendler, E. A., Prokhorov, I. V., Khusid, B. M. and Demchuk, S. A., 1986, "Structure, Physical Properties and Dynamics of Magnetorheological Suspension," Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 12, No. 6, pp. 935~955.

(8) Carlson, J. D. and Spencer Jr., B.F., 1997, "Magnetorheological Fluid Dampers for Seismic Control," Proceedings of DETC'97, ASME Design Eng. Technical Conf., DETC97/VIB4124.

(9) Laun, M. H., Kormann, C. and Eillenbacher, N., 1996, "Rheometry on Magnetorheological (MR) Fluids," Rheologica Acta, Vol. 35, No. 5, pp. 417~432.

(10) Teng, X. and Conrad, H., 1996, "Quasistatic Measurements on a Magnetorheological Fluid," J. of Rheology, Vol. 40, No. 6, pp. 1167~1178.

(11) Boter, R. and Janocha, H., 1997, "Design Rules for MR Fluid Actuators in Different Working Modes," Proc. of the International Society for Optical Eng. (SPIE), Vol. 3045, pp. 148~159.

(12) Dyke, S. J. Spencer Jr., B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1996, "Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for seismic Response Reduction," Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 5, pp. 565~575.

(13) 정정교, 최 현, 김두훈, 이상조, 1999, "MR댐퍼 비선형 수학적 모델의 파라메터 추정에 관한 연구," 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 902~907.

(14) Kim, J. H., Lee, C. W., and Lee, S. K., 1996, "Modeling of Magneto-Rheological Fluid Based Semi-Active Mount," 3rd International Conf. on Motion and Vibration Control, Japan, pp. 164~169.

(15) 神山新一, 1989, "磁性流体入門," 産業圖書.

(16) 木村好次, 1998, "電氣粘性流とその應用," 日本機械學會, PSC-282 分科會報告書.

(17) Karnopp, D. C., Margolis, D. J. and Rosenberg, R. C., 1990, "System dynamics : A Unified Approach, Second Edition," John Wiley & Sons, New York.