

## MR 유체를 이용한 가변 감쇠 마운트의 모델화

<sup>0</sup>안영공\*, Takashi Tsuchiya\*\*\*, 양보석\*\*, Shin Morishita\*

### A Modeling of a Variable-damping Mount Using MR Fluid

Young Kong Ahn, Takashi Tsuchiya, Bo-Suk Yang and Shin Morishita

#### 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 μm 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 its performance was investigated experimentally. Furthermore, the properties of the MR Mount on experimental study were explained analytically by mechanical model of the MR mount.

**Key words :** Mount(마운트), Vibration Isolation(진동 절연), Electromagnetic Actuator(전자 액츄에이터), MR Fluid(MR 유체)

#### 1. 서론

자동차의 기계적 성능은 그간의 기술개발에 의해 고도로 향상되었으나, 안정성, 쾌적성의 향상을 도모하기 위해 많은 종류의 정보를 정확하고도 신속하게 처리하는 것이 필요 불가결하게 되고, 그 때문에 자동차의 일렉트로닉스화가 급속하게 진전되고 있다. 일렉트로닉스화의 핵심인 정밀기기에는 제어용 컴퓨터, 지도정보용 DVD 플레이어, 음악용 CD 플레이어 등이 있다. 이들 자동차 탑재용 전자기기에 의해 주행 중에 다양한 정보처리가 이루어지고 있다. 또한 현재 일본의 국가 프로젝트로서 진행되고 있는 Intelligent Transport System(ITS)의 실현을 위해, 어느 수준이상의 높은 처리능력을 가진 컴퓨터를 자동차에 탑재하는 것이 필요하다. 이들의 작동 신뢰성을 향상시키기 위해, 노면의 굴곡

에 의한 저주파수 진동, 엔진에 의한 고주파수 진동 등의 폭넓은 주파수 범위에서의 진동전달을 제어하는 것이 필요하다.

자동차 탑재용의 정밀기기의 치지기구로서 고정도 실리콘유를 주입한 소형 마운트 등이 현재 이용되고 있다. 이들은 기본적으로는 수동적인 제진용 액츄에이터라고 할 수 있다. 아울러 진동저감의 요구 때문에 준동동형, 동동형 액츄에이터의 개발이 시도되고 있으나, 제진성능과 높은 신뢰성을 동시에 만족시킨다는 점에서는 준동동형이 평가되고 있다. 따라서 본 연구에서는 외부자장에 의해 유동학적 특성을 변화시키는 것이 가능한 기능성유체로서 알려진 MR유체를 이용하여, 외부자장의 강도에 의해 감쇠특성이 변화하는 소형 유체마운트를 제작하여, 진동 제진성능에 관하여 실험적인 평가를 수행하였다.

또한 MR유체의 겉보기상의 점도변화에 의한 마운트의 기본특성을 모델화에 의해 이론적인 검토를 수행하였다.

\* Department of Mechanical Engineering,  
Yokohama National University, Japan

\*\* 부경대학교 기계공학부

\*\*\* Isuzu Motors Limited, Japan

## 2. MR 유체

MR유체(Magneto-Rheological Fluid; 자기점성유체)는 외부자장에 의해 유체가 가지는 항복응력을 변화시킬 수 있는 기능성유체로 알려져 있다. 일정한 용매에 높은 투과율을 가지 직경 1~수십  $\mu\text{m}$ 의 철분말을 분산시킨 유액이다. MR유체는 외부에서 자장을 부과하면 입자기 자계방향으로 사슬모양의 cluster의 형성이 유체의 유동체향으로 나타나는 것으로 인해 마크로적으로 보면 유체의 겉보기상의 점도가 상승한다.

MR유체는 1948년 Rabinow에 의해 최초로 보고된 것으로 알려져 있고, 그 문헌에는 몇 개의 용용 예가 실려져 있다.<sup>(1)</sup> 또한 그 문헌에는 ER유체(Electro-Rheological Fluid; 전기점성유체)의 초기의 연구자로서 알려진 Winslow<sup>(2)</sup>의 이름이 있고, 전장에 응답하는 유체에 관한 보고를 한 것으로 보인다. 그 후 ER유체의 연구에 종사하던 러시아의 연구자가 주목하고<sup>(3)</sup> 또한 미국의 한 기업이 용용연구에 적극적으로 전념하여<sup>(4)</sup> 현재에는 기본특성에 관한 검토<sup>(5)~(7)</sup>에서부터 용용 액츄에이터의 모델화<sup>(8)~(10)</sup>까지 다양한 연구가 수행되고 있다. 자장에 응답하는 유체로서 알려진 자성유체도 기본적으로는 MR유체와 같은 조성(組成)을 가지고, 또한 자장에 반응한다는 의미에서는 같은 특징을 가진다.<sup>(11)</sup> 그러나 입자의 크기가 자성유체는 겨우 수십 나노미터인 것에 비해 MR유체에는 수  $\mu\text{m}$  정도로 훨씬 크고, 아울러 MR유체의 특성은 자성유체와 크게 다르다. 자성유체는 뉴톤 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.<sup>(12)</sup> 특히 발생하는 항복응력의 크기에 관해서는 MR유체가 10<sup>2</sup>배 정도이고, 고전압을 이용할 필요가 없는 점으로 MR유체의 적용가능성이 높이 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 Cluster형성을 확인하기 위해 MR유체를 10배정도의 Mineral Oil로 희석하여 광학 현미경으로 관찰한 결과를 Fig.1에 나타내었다.

Fig. 1(a)는 무자장 하의 상태이고, 흰 점상의 물질이 철의 미립자이다. 이는 작은 부정형의 Cluster를 형성하여 그 덩어리가 Random하게 분산되어져 있다. 그 후 그림 (b), (c), (d)의 순으로 서서히 자속밀도를 10 mT, 15 mT, 20 mT로 증가시켜 관찰하였다. 그림에서 자계의 방향은 지면 종방향으로 향하고 있다. Fig. 1로부터 자계가 강하게 될수록 사슬모양의 Cluster는 길게 성장하고, Cluster사이의 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 (Plastic) viscosity	50 - 100 kPa 0.2 - 1 Pa s	1-5 kPa 0.1 - 1 Pa s	- 0.05 - 2 kPa s
App. Viscosity variation	-	-	~10 (~30)
Max. field	~250 kA/m	~5 kA/m	~2 kA/m
Operable temperature	-50 - 150 °C	-40 - 120 °C	-40 - 110 °C
Response time	100 - 200 ms	1 - 20 ms	1 - 10 (~400) ms
Sedimentation	Soft (1 - 3 hours)	Soft (1 - 6 months)	None
Density	3 - 6.5 g/cm <sup>3</sup>	1 - 3 g/cm <sup>3</sup>	1 - 2 g/cm <sup>3</sup>
Power supply	2 - 50 Watts (2 - 25 V, 1 - 2 A)	2 - 50 Watts (1 - 4 kV, 1 - 30 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	2 - 50 Watts (1 - 4 kV, 0.1 - 3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

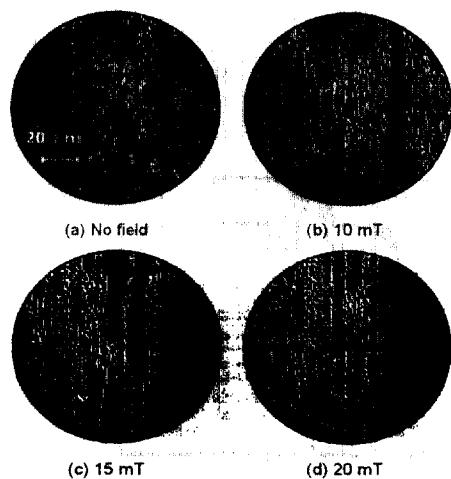


Fig. 1 Cluster formation of MR fluid

### 3. MR 유체를 이용한 소형 마운트

본 연구에서 제작한 소형마운트의 구조를 Fig.2에 개략적으로 나타내었다. 본 마운트는 상부의 마운트부와 하부의 전자기 코일로 구성되어 있다. 이 소형마운트는 실용성을 중요시하여 자동차 탑재용 CD플레이어 등의 방진 대책으로서 이용되고 있는 유체마운트를 그대로 사용하였다. Polypropylene의 재료로 만든 케이스에 Butyl 고무의 Diaphragm이 접착된 것으로서, 내부에 MR유체를 약 2 cc 봉입 가능하다.

이용한 MR유체는 입경 1~수 미크론 정도의 고순도  $\alpha$  철의 입자를 PAO(Para Alpha Olefin)로 알려진 합성윤활유에 분산시킨 것을 이용하였다. 합성윤활유의 동점도 4.0 cSt, 입자의 농도 80 (wt %)로 하고, 성분으로서는 그 외 내마모제와 분산제를 포함하고 있다. 전자기 코일부는 알루미늄 제Boabin에 S10C의 철심을 삽입하고, 코일의 직경은 0.3 mm의 Polyamide 피복도선을 300회 감았다.

### 4. 실험

MR유체를 가변 감쇠의 제진장치에 응용함에 있어 마운트의 기본특성을 파악하기 위해 Impulse력에 대한 응답과 가진기를 이용한 강제진동에 대한 주파수응답을 측정하였다. 실험장치의 계략도는 Fig. 3에 나타내었다. 전자식 가진기 상부에 MR유체를 봉입한 소형마운트와 부가질량, 스프링, 감쇠를 가지는 진동계를 구성하였다. 여기서, 실제의 자동차 탑재용 CD플레이어의 지지계 특성치를 참고하여 마운트에 부과되는 질량을 가속도계의 질량을 포함시켜 0.06 kg, 또한 상부측의 스프링상수를 196 N/m로 하였다. 전자기 코일에 직류전류를 공급하여 어때 발생한 자장에 의해 마운트 내부의 MR유체의 특성을 변화시켜, 마운트 자신의 감쇠특성을 변화시킨다.

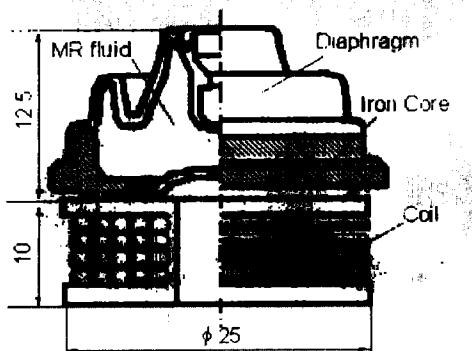


Fig. 2 Schematic view of MR mount

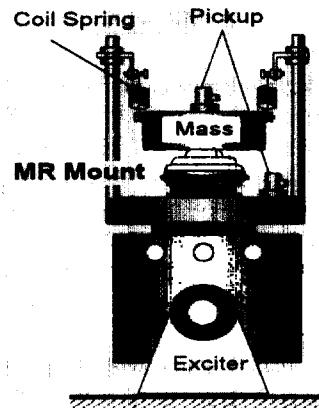


Fig. 3 Experimental setup

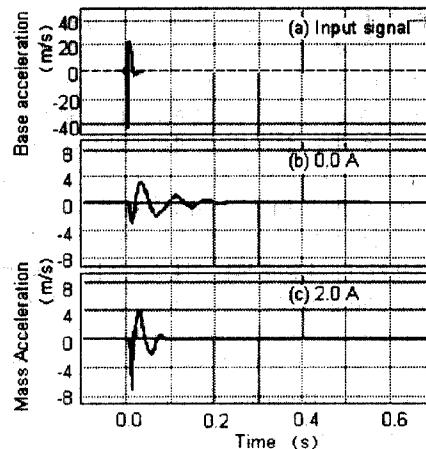


Fig. 4 Time response to impulse

#### 4.1 Impulse 입력에 대한 응답

Impulse 입력에 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 상태에는 진동이 완전히 감쇠되는 시간이 2.2 초가 필요한 것을 알 수가 있다. 한편 전류를 공급하였을 때, 진동감쇠시간을 무전류의 경우에 비해 1/2 이하로 단축되었으나, 마운트의 등가강성이 상승한 관계로 첫 번째 응답파형의 진폭이 2배 정도로 증대하였다.

## 4.2 주파수 응답

가진기 베이스측과 부하 질량측의 가속도를 가속도계로부터 측정하여 Bode 선도를 작성하였다. 가진주파수를 5~20 Hz, 진폭 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, 동강성은 40 % 증가한 것에 해당한다.

## 5. MR마운트의 모델화

이상의 실험결과에 기초하여 MR마운트의 모델화를 수행하였다. MR마운트의 기계적 모델을 Fig. 6에 나타낸다. 고무와 코일스프링의 수축에 의해, 입력속도  $V_{in}$ ,  $x$  m/s와 진동이 발생하고, 또한 고무의 백에 확장현상이 발생한다. 스프링상수  $K_C$ 는 고무와 코일스프링으로부터의 합성강성을 나타내고,  $C_R$ 은 고무의 감쇠상수이다. 유체외 압력변화  $\Delta P$ 에 의해 변화하는 마운트의 체적변화  $\Delta U$ 로부터의 체적강성은  $K_V = \Delta P / \Delta V$ , 체적감쇠는  $C_V = \Delta P / (\omega \Delta V)$ 로 표현된다. 마운트의 선형모델은 Bond Graph 모델방법으로부터 Fig. 7과 같이 전개하였고, 이 Bond Graph 모델을 이용하여 유량에 관한 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$qv = -A_P \dot{x} \quad (1)$$

$$q_R = \dot{x} \quad (2)$$

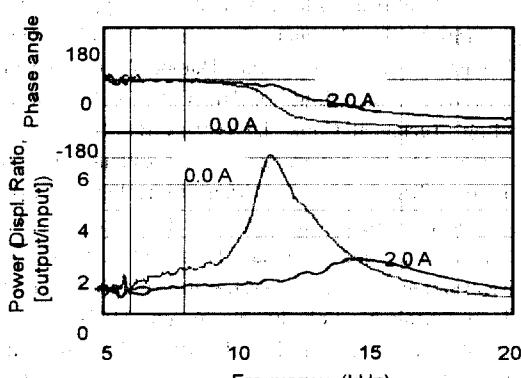


Fig. 5 Bode diagram

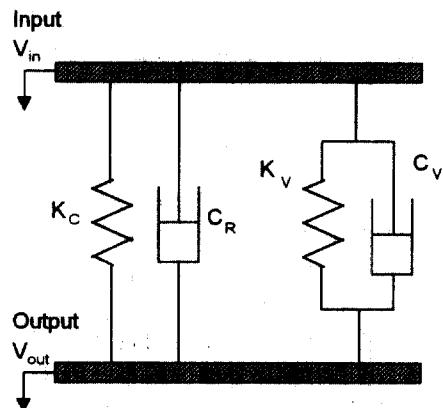


Fig. 6 Mechanical model of the MR mount

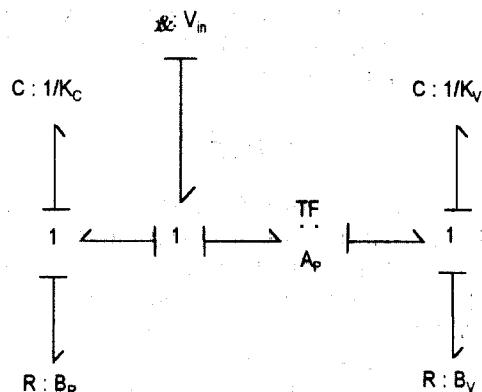


Fig. 7 Bond graph model of the MR mount

여기서  $q_V$ 는 체적강성  $K_V$ 의 체적변위,  $q_R$ 은 스프링  $K_C$ 의 변위, 변수  $A_P$ 는 마운트의 유효 피스톤 단면적이다. 마운트의 동강성은 다음의 식과 같이 변위  $x$ 에 대한 힘  $F$ 의 비로서 나타낼 수가 있다.

$$\frac{F(s)}{x(s)} = K' = (K_C + A_P^2 K_V) + s(B_R + A_P^2 B_V) \quad (3)$$

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

$$K' = K + jK'$$

$$K = K_C + A_P^2 K_V \quad (4)$$

$$K' = \omega(B_R + A_P^2 B_V)$$

여기서  $j = \sqrt{-1}$ 이고,  $\omega$ 는 각주파수(rad/sec)이다.

다.  $K$ 과  $K'$ 는 각각 동강성의 실수부와 허수부에 해당한다. 동강성의 실수부와 허수부로부터 전달률  $T_c$ 는 다음 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_c = \sqrt{\frac{(K_c + A_p^2 K_v)^2 + [\omega(B_s - A_p^2 B_r)]}{[(K_c + A_p^2 K_v) - M_1 \omega^2]^2 + [\omega(B_s - A_p^2 B_r)]}} \quad (5)$$

여기서  $M_1$ 은 마운트에 부과된 질량이다. 전달률을 계산하기 위해 식 (5)의 파라미터,  $M_1$ ,  $K_c$ ,  $B_r$ ,  $A_p$ 는 실험으로부터,  $B_r$ 와  $K_v$ 는 Fig. 5의 전류를 공급하지 않은 경우의 전달률로부터 추정하였고, Table 2에 나타내었다. Fig. 8에 이들의 파라미터를 이용하여 응답을 추정하여 얻은 결과를 나타내었다. Fig. 5와 비교하여 확인할 수 있는 것과 같이 전류를 공급함으로서 마운트의 진폭 감소와 함께 등가강성의 증대를 잘 표현하고 있어, 본 마운트의 모델화의 타당성을 뒷받침하고 있다고 볼 수 있다. 이 모델로부터 추정하면 2 A의 전류를 공급할 경우, 체적감쇠가 약 12배, 체적강성이 6배정도 증가하는 것으로 된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 기능성유체로서 주목되고 있는 MR유체를 이용하여 자동차 탑재용 정밀기기를 지지하는 준능동형 소형 마운트를 제작하여 그 기본 특성을 규명하였다. 이 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 제작한 MR유체를 적용한 마운트를 이용하여 일정 자장을 외부로부터 공급함으로서 정상 정현파 입력에 대한 응답 진폭의 peak치를 약 70% 감소시킬 수 있음을 실험적으로 나타내었다.
- (2) MR유체의 겉보기 점도의 변화에 의해 마운트의 압력변화와 함께 체적변화에 의해 마운트의 강성과 감쇠가 변화하는 것을 마운트의 모델화로부터 확인하였다.

## 참고문헌

- 1) Rabinow, J., 1948, "The Magnetic Fluid Clutch," AIEE Transactions, Vol. 67, pp. 1308-1315.
- 2) Winslow, W.M., 1949, "Induced Fibration of Suspensions," J. Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137- 1140.
- 3) 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.

Table 2 MR mount parameters for numerical simulation

Symbol	Description	Value
$M_1$	sprung mass	0.06 Kg
$K_c$	Rubber stiffness	237 N/m
$C_R$	Rubber damping	0.395 N s/m
$C_V$	Volumetric damping	$2.986 \times 10^6 \text{ N s m}^5$
$K_V$	Volumetric stiffness	$4.74 \times 10^8 \text{ N m}^3$
$A_p$	Piston area	0.00031 m <sup>2</sup>

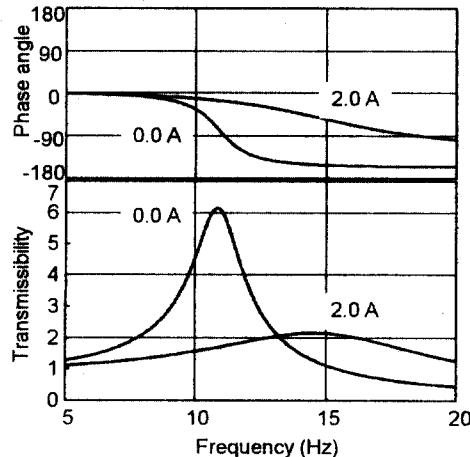


Fig. 8 Transmissibility of MR mount

- J. of Multiphase Flow, Vol.12, No.6, pp.935-955.
- 4) 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/VIB+124.
- 5) Laun, M. H., Kormann, C. and Eilenbacher, N., 1996, "Rheometry on Magnetorheological (MR) Fluids," Rheologica Acta, Vol.35, No.5, pp.417-432.
- 6) Teng, X. and Conrad, H., 1996, "Quasistatic Measurements on a Magnetorheological Fluid," J. of Rheology, Vol. 40, No. 6, pp. 1167-1178.
- 7) Böltter, 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.

- 8) 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," Smart Materials and Structures, Vol. 5, pp. 565-575
- 9) Jeoung, J. K., Choi, H. and Kim, D. H., 1999, "A Study on the Parameter Estimation of the Nonlinear Models describing MR Damper," The Korean Society for Noise and Vibration Eng., Autumn Annual Meeting, pp. 902-907 (in Korean).
- 10) 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.
- 11) 神山伸一, 磁性流体入門 (1989) 産業図書.
- 12) 木村好次, 電氣粘性流体とその応用, 日本機械學會, PSC-282 分科會報告書.
- 13) Karnopp, D. C., Margolis, D. J. and Rosenberg, R.C., 1990,"System dynamics: A Unified Approach, Second Edition," John Wiley & Sons, New York.