

# MR유체를 이용한 비틀림진동 감쇠기

안 영공\*,<sup>0</sup>신 동춘\*\*, 양 보석\*, 김 동조\*

## Torsional Vibration Damper Using Magneto-Rheological Fluid

Young Kong Ahn, Dong-Choon Sin, Bo-Suk Yang and Dong-Jo Kim

### ABSTRACT

Magneto-Rheological fluid (MR fluid) is known as a class of functional fluid with controllable apparent viscosity of the fluid by the applied magnetic field strength. Extensive researches with the functional fluids have been done on applications of the fluid to mechanical components such as suspension, absorber, engine mount, clutch, break, valve, etc.

In this study, a new torsional damper using MR fluid is proposed, and the response property of the damper was theoretically investigated. The present damper is quit effective for reducing the driveline vibration in a wide range of the engine speed.

### 1. 서론

자동차의 고급화, 고품질화와 함께 저진동 및 저소음에 대한 요구는 점점 높아지고 있다. 또한 저연비의 관점으로부터 차량용 엔진의 크랭크축계의 경량화가 요구되어져 이에 따른 크랭크축계의 비틀림진동의 저감이 중요한 문제가 되어져 왔다. 크랭크축계의 진동감쇠기로서는 수동형 감쇠기가 일반적으로 사용 연구되어져 왔고<sup>1-3)</sup>, 이들 감쇠기는 고무감쇠기, 점성고무감쇠기, 점성감쇠기의 3종류가 있다. 종래의 수동형 감쇠기는 일반적으로 감쇠기 내부의 부가질량이 한 개 부착되어져 있고 하나의 진동주파수의 진동을 줄이기 위해 설계되어진다. 그러나 크랭크축계에 연결된 엔진의 회전수는 변화하게 되므로, 보다 효과적으로 크랭크축계의 진동을 줄이기 위해서는 엔진회전수의 변화에 따라 감쇠기의 특성이 변화되어져야 한다.

제진장치를 구성하는 방법에 따라서 수동, 능동, 준 능동형 감쇠기로써 분류 할 수 있다. 수동형 감쇠기는 높은 안정성과 신뢰성을 가지고 있으나, 능동형 감쇠기에 비해 제진성능이 뒤떨어지는 단점을 가지고 있다. 반면 능동형 감쇠기는 수동형에 비해 비용이 증가하고, 또한 장치가 복잡하며,

신뢰성이 떨어진다. 이와 같은 두 감쇠기의 단점을 극복하기 위한 방법으로 기능성유체를 이용한 준 능동감쇠기에 대한 연구가 활발히 진행되어져 왔다. 즉, 준 능동감쇠기는 수동형 감쇠기의 장점인 단순성, 높은 안정성과 신뢰성을 가지고 있고, 단순한 제어장치를 장착함으로써 능동형 감쇠기의 장점인 높은 제진성능을 소유하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 외부자장에 의해 유동학적 특성을 변화시키는 것이 가능한 기능성유체로서 알려진 자기점성유체(Magneto-Rheological fluid; MR유체)를 이용하여, 외부자장의 강도에 의해 감쇠특성이 변화하는 비틀림진동 감쇠기를 제안하였고, 제진특성에 관하여 이론적 평가를 수행하였다.

### 2. MR 유체

MR유체는 1948년 Rabinow<sup>4)</sup>에 의해 최초로 보고된 이래로 기본특성에 관한 검토에서부터 응용 액츄에이터의 모델화까지 다양한 연구가 수행되고 있다.<sup>5-10)</sup> 자장에 응답하는 유체로서 잘 알려진 자성유체도 기본적으로는 MR유체와 같은 조성(組成)을 가지고, 또한 자장에 반응한다는 의미에서는 같은 특징을 가진다.<sup>11, 12)</sup> 그러나 입자의 크기가 자성유체는 겨우 수십 나노미터(*nm*)인 것에 비해 MR유체에는 수 마이크로미터(*μm*) 정도로 훨씬 크고, 아울러 MR유체의 특성은 자성유체와 크게

\* 부경대학교 기계공학부

\*\* 부경대학교 기계공학부 대학원

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. 발생하는 항복응력의 크기에 관해서는 분산계 ER유체에 비해 MR유체가 100배 정도 이고<sup>13)</sup>, 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 있으나, 높은 전압을 부가해야 하는 단점을 가지고 있다. 응답특성은 ER유체의 경우가 양호하다는 것을 고려하면 ER유체와 MR유체는 용도에 의해 각각 응용가능성이 남아 있는 것으로 생각된다.

외부에서 자장을 부과하면 MR유체 내부의 철분말입자가 자계방향으로 사슬모양의 클러스터(Cluster)가 형성되고 자장의 세기에 따라서 클러스터의 밀도가 변화하는 것을 광학 현미경으로 관찰할 수 있다.<sup>13)</sup> Fig. 1은 MR유체의 MR효과에 관한 메커니즘을 나타내고 있다. (a)와 같이 전장을 부과하지 않았을 경우 유체내부의 미립자는 불규칙적으로 분산되어 있고, 전장을 부과하였을 경우에 그 미립자들은 사슬구조를 형성하여 (b)의 전단모드(shear mode), (c)의 유체 유동모드(flow mode), (d)의 스퀴즈모드(squeeze mode)에서 저항하는 모습을 나타내고 있다. MR유체를 이용한 비틀림진동 감쇠기의 작동원리는 (b)의 전단모드와 유사하다.

최적 감쇠조건이 고려되어 선정된 MR유체를 이용한 감쇠기에 왕복식의 전단, 유체유동, 스퀴즈 작용이 일어나면 Fig. 1의 진동모드 (e)와 같이, MR유체 내부의 미립자들은 덩어리를 형성하지만 사슬구조를 유지하지 못하고, 불규칙하게 분산되어 질 것으로 간주된다. 이러한 원인으로 감쇠기의 응답은, Bingham유체의 특성을 나타낸 회전식 점도계로 측정된 결과와는 달리 항복응력의 변화는 작아지고 점성감쇠력이 현저하게 나타날 것으로 ER유체를 적용한 감쇠기의 결과로부터<sup>14, 15)</sup> 추정할 수 있다. 그러나, MR 유체를 이용한 감쇠기에서 쿨롱마찰특성이 나타나는데<sup>10, 16)</sup>, 이는 감쇠기에 삽입된 실링의 마찰이 감쇠기의 특성에 영향을 주기 때문에 단순히 MR유체의 항복응력에 의한 효과로 규정 짓기는 어렵다.

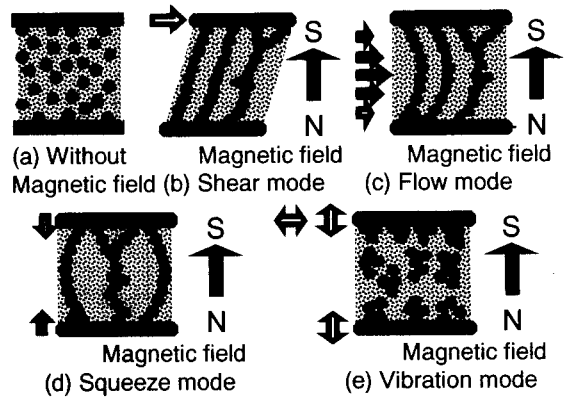


Fig. 1 Mechanism of MR effective of MR fluid

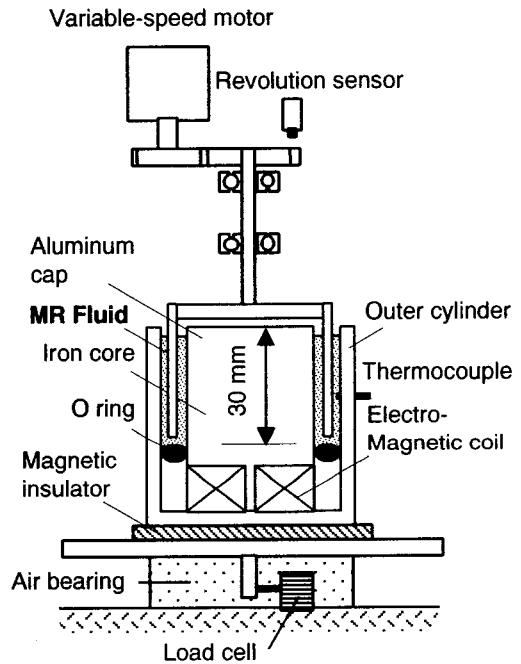


Fig. 2 Schematic of rotational viscometer

### 3. MR유체의 점도특성

부가하는 자장의 변화에 따른 MR유체의 유동학적 특성을 측정하기 위해 Fig. 2와 같은 2중원통형 회전식 점도계를 제작하였다. 이 장치는 2중원통형이기 때문에 일정 전단속도를 유체에 부가하게 되고, 또한 외부로부터 자장을 부가할 수 있도록 되어있다. 두 원통 사이에 MR유체가 주입하고, 알루미늄 cap을 일정속도로 회전시킴으로써 전달을 일으켜 외측원통에 전달되는 토크를 측정한다. 외측원통 하부에 Air bearing을 설치하여 외부의

다른 마찰력을 최소화 하였다.

원통 내부에 자장을 부가하기 위한 전자석 코일은 내측원통에 배치하였고, 전자기 코일의 직경은 0.6 mm의 Polyamide 피복도선을 약 1700회 감았다. 내외측 원통의 재질은 S10C이고, 내부원통의 직경은 52 mm, 외부원통의 내직경은 58 mm, 알루미늄 cap과의 간격은 0.5mm이다. 사용한 MR 유체는 미국 Lord사의 MR-100 유체로서, 입자의 직경이 1-수 $\mu$ m 정도의 고순도 a 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.

이 회전식 점도계를 이용하여, MR유체의 온도가 29°C로 유지하도록 온도제어를 행하였고, 부가전류를 변화시키면서 측정한 결과를 Fig.3에 나타내었다. 전단속도에 대한 전단응력을 나타내고 있고, MR유체는 점단속도가 일정하게 작동하는 전단모드가 일어나는 회전식 점도계에서 Bingham 유체의 특성이 나타남을 보여준다. 전류가 부가되지 않았을 경우에 비해 2.5A의 전류가 부가되었을 때 항복응력이 약 3배 증가하였다. 본 점도계의 구조적 문제로 인해 높은 자장을 부가하지 못했기 때문에 높은 전단응력의 변화는 얻을 수 없었다.

Fig.4는 Fig.3을 전단속도에 대한 겉보기 점도로 변환한 것이다. 전단속도가 낮아짐에 따라 겉보기 점도가 상승함을 알 수 있는데, 이는 고주파수보다 저 주파수의 진동을 제진하기 위한 감쇠기에 MR유체가 적용되었을 때 보다 효과적임을 보여준다.

#### 4. 수치해석의 결과 및 고찰

하나의 flywheel의 비틀림진동을 제진하기 위한 MR유체를 이용한 비틀림진동 감쇠기가 장착된 장치의 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. Fig.5의 flywheel에 기본적 점성감쇠력이 작용하는, 그리고 Outer Member가 외부구조물에 고정된 것으로 가정하면 Fig. 6과 같이 2자유도계로 모델링하여 나타낼 수 있다.  $C_f$ 는 flywheel에 작용하는 점성감쇠력,  $C_d$ 는 자장이 부가되지 않을 때에 작용하는 점성감쇠력,  $T_d$ 는 감쇠기내의 자장의 변화에 따라서 발생하는 감쇠기의 쿨롱마찰(Coulomb friction) 토크와 오일 실(seal)에 의한 마찰토크의 합을 나타낸다.

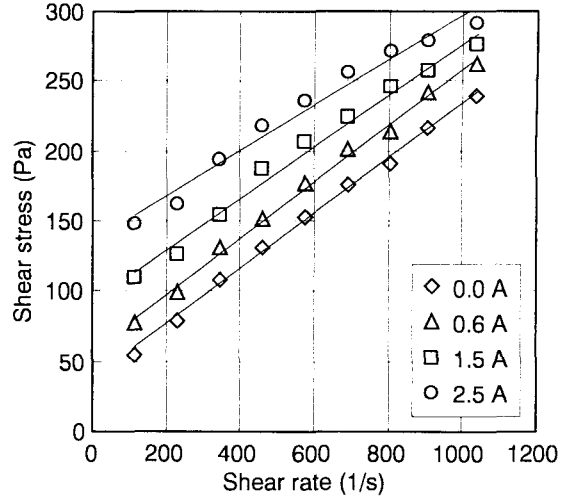


Fig. 3 Shear stress versus shear rate

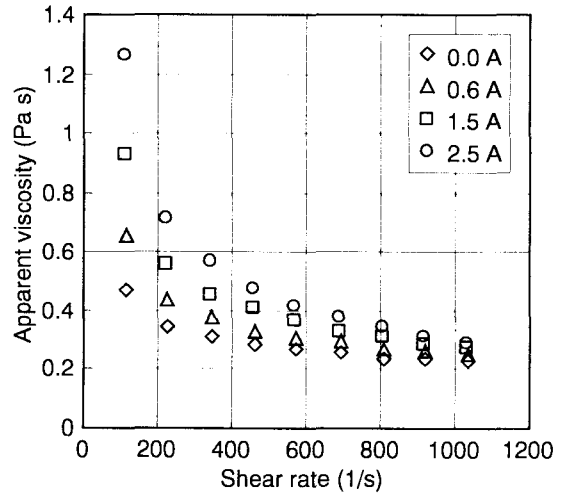


Fig. 4 Apparent viscosity versus shear rate

이와 같은 2자유도계를 Newton의 운동법칙을 이용하여 계의 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} I_f & 0 \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_f \\ \ddot{\theta}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (C_f + C_d) & -C_d \\ -C_d & C_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_f \\ \dot{\theta}_d \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} (K_f + K_d) & -K_d \\ -K_d & K_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_f \\ \theta_d \end{Bmatrix} \\
 & = \begin{Bmatrix} T_e^{j\omega t} + T_d \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_f) \\ -T_d \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_f) \end{Bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서  $I_f$ 은 Flywheel의 등가관성 모멘트,  $I_d$ 는 감쇠기의 관성모멘트이다.

식(1)은 비선형 방정식이므로 수치적분을 이용하여 감쇠기내부의 쿨롱마찰의 변화에 따른 flywheel의 전달률을 Fig. 7에 나타내었다. 수치적분에 사용된 변수는 Table 1에 나타내었다. Fig. 7에서  $\omega$ 는 flywheel의 가진 각주파수(rad/sec),  $\omega_d$ 는 감쇠기의 고유 각진동수( $= (K_d/I_d)^{1/2}$ ),  $\mu$ 는 감쇠기의 점성감쇠계수에 대한 쿨롱마찰력의 비( $= f_d/(C_d\omega_d)$ )를 나타낸다.  $\mu$ 의 값이  $2 \times 10^{-3}$ 일때 수동형 감쇠기의 최적조건상태가 되고, 부가하는 전류를 단순히 ON-OFF제어를 행할 경우, 즉 주 운전주파수가 위치하는 가진 주파수  $S_1$ 과  $S_2$ 사이에서는 전류를 부가하지 않고(OFF), 이 외의 주파수에서는 부가 가능한 전류를 최대로 부가(ON) 하면 최적조건

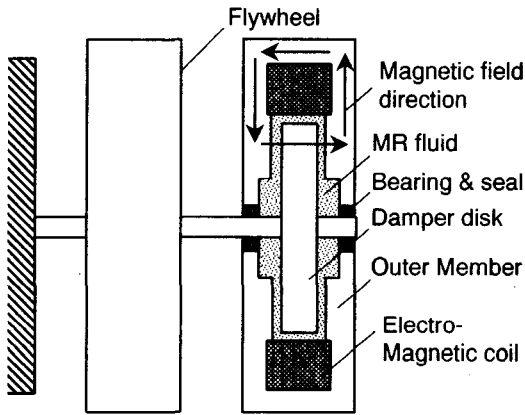


Fig. 5 Schematic of flywheel with torsional vibration damper using MR fluid

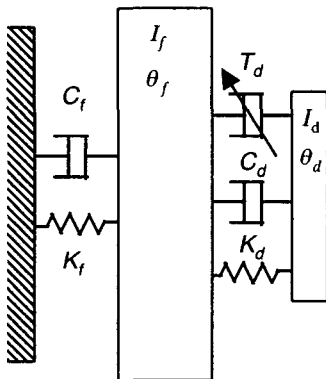


Fig. 6 Equivalent model of the flywheel and damper using MR fluid

Table 1. Parameters used in numerical simulation

Description	Value
flywheel moment of inertia $I_f$	1.565 kg·m <sup>2</sup>
torsional spring coefficient of flywheel $K_f$	$9.88 \times 10^4$ N·m/rad
moment ratio $I_d/I_f$	0.2
spring coefficient ratio $K_d/K_f$	0.2
damping ratio of flywheel $\zeta_f (= C_f / \{2(I_f K_f)^{1/2}\})$	0.05
damping ratio of damper $\zeta_d (= C_d / \{2(I_d K_d)^{1/2}\})$	0.05

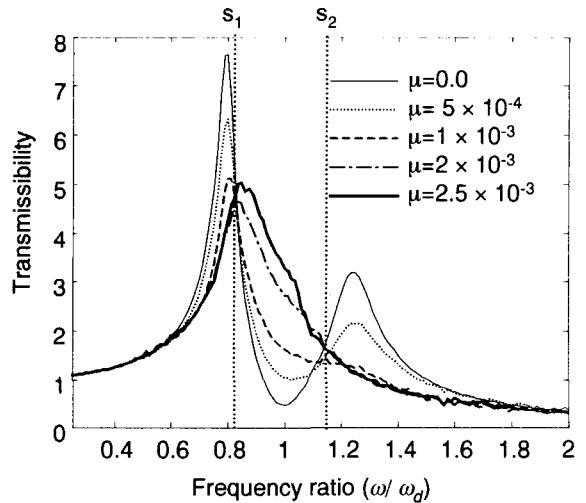


Fig. 7 Amplitude curves for the flywheel

수동형 감쇠기에 비해 그 제진 성능이 뛰어날 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 외부에 부가하는 자장에 의해 비틀림진동 감쇠기의 감쇠특성을 변화시킬수 있는 MR유체를 이용한 감쇠기를 제안하였고, 제진 성능에 관하여 이론적 평가를 수행하였다. 그 결과로서는, 차량의 가진주파수의 변화에 따라 감쇠특성을 변화시킴으로서 수동형 감쇠기에 비해 보다 효과적으로 비틀림진동을 감쇠시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 회전식 점도계에 의한 MR유체의 점도측정으로 부터, MR유체는 저 주파수의 진

동을 제진하기 위한 감쇠기에 적용되었을 경우 고주파수의 진동 감쇠기에 비해 보다 효과적임을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) Wakabayashi, K. Niikura, T. and Yamamoto, A. 1981, "Torsional Vibration Analysis of Crankshaft with Rubber Damper," Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 35, No. 12, pp. 1423-1427.
- 2) Iwamoto, S. et al., 1987, "The Development of the Torsional Vibration Damper of Viscous Shear Type with Controllable Elasticity Effect," Journal of the Marine Engineering Society in Japan, Vol. 21, No. 3, pp. 19-28.
- 3) 양보석, 정태영, 김경득, 김동조, 1997, "고속엔진축계용 점성비틀림진동감쇠기의 성능해석 및 실험," 한국동력기계공학회지, Vol. 1, No. 1, pp. 98-105
- 4) Rabinow, J., 1948, "The Magnetic Fluid Clutch," AIEE Transactions, Vol. 67, pp. 1308-1315.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Laun, M. H., Kormann, C. and Eillenbacher, N., 1996, "Rheometry on Magnetorheological (MR) Fluids." Rheologica Acta, Vol.35, No.5, pp.417-432.
- 8) Teng, X. and Conrad, H., 1996, "Quasistatic Measurements on a Magnetorheological Fluid," J. of Rheology, Vol. 40, No. 6, pp. 1167-1178.
- 9) Böter, 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.
- 10) 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.
- 11) 神山新一, 1989, "磁性流體入門," 産業圖書.
- 12) 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."
- 13) 안 영공, 양보석, S. Morishita, 2001, "자기점성 유체를 이용한 가변감쇠 마운트의 모델화," 한국소음진동학회지, Vol. 11, No. 1, pp. 141-146.
- 14) Hoque, M. S., 1988, "Experimental Investigation of an Electroviscous Damper for Rotordynamics Applications," Master thesis, Mechanical Engineering Department, Texas A&M University.
- 15) 안 영공, 양 보석, Morishita, S., 2001, "ER유체를 이용한 이방성 스퀴즈필름 댐퍼의 특성, 한국소음진동학회지, Vol. 11, No. 2.
- 16) Peel, D. J., Stanway, R. and Bullough, W. A., 1996, "Dynamic Modeling of an ER vibration Damper for Vehicle Suspension Applications," Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 5, pp. 591-606.