

## 지능형 완충기의 특성 해석

○ 이 덕영\*, 황 우석\*\*, Y.T. Choi\*\*\*

### Performance Analysis of Smart Impact Damper

Dug-Young Lee, Woo-Seok Hwang, and Young-Tai Choi

#### ABSTRACT

Electrorheological(ER) and magnetorheological(MR) fluids have a unique ability to increase the dynamic yield stress of the fluid substantially when electric or magnetic field is applied. Controllable fluids such as ER and MR fluids have received considerable attention as several components of engineering devices. One of them is a smart impact damper using ER/MR fluids. Impact damper system can be used in the joint mechanism of railroad vehicle, protection equipment of elevator's drop, and launch equipment of aircraft. This paper presents the results of an analytical study of the performance of a smart impact damper to suppress vibration during impact excitation. The damping capabilities of MR impact damper for variable applied current are analyzed using Bingham model under sudden impact load.

#### 1. 서론

전기장(ER) 유체 및 자기장(MR) 유체는 전기장이나 자기장이 부하되면 항복응력이 크게 증가하는 특성을 지니고 있다. ER 유체 및 MR 유체가 가지고 있는 폭 넓은 응용성으로 인해 미국, 영국 및 일본 등 선진 여러 나라에서 우수한 성능의 유체 개발과 함께 이들 유체를 이용한 다양한 응용장치 개발에 많은 관심과 투자를 하고 있는 중이다. ER 유체 및 MR 유체를 이용한 응용장치 중의 하나가 충격하중을 흡수할 수 있는 완충기(impact damper)이다.

ER/MR유체를 이용한 지능형 완충기는 철도차량의 연결기, 항공기의 착륙장치, 엘리베이터 낙하시의 완충장치, 드릴이나 보링 머신의 완충기 등으로 사용할 수 있다<sup>[1-4]</sup>.

일반적인 유압완충기(hydraulic shock absorber)

는 피스톤 변위에 대응하여 오리피스 면적이 변화되는 구조를 갖고 있는 것이 많고, 그 저항력을 얻는 방식은 피스톤 변위가 발생될 때 동압저항계수와 속도의 자승과의 적분으로 표현되는 관계식을 이용하는 것이 통상적이다. 이러한 종류의 완충기는 충돌 속도의 변화에 관계없이 높은 완충효율을 나타내는 방식으로 충돌 질량의 변화에는 대응하지 못하며 충돌 질량 변화에 따라 완충 효율은 점차 악화되고, 가속도가 증가되는 문제점이 있다<sup>[4]</sup>.

이러한 문제점을 해결하는 방안으로 본 논문에서는 MR유체를 작동유체로 하는 지능형 완충기의 댐핑력 및 최대변위, 행정거리, 충돌질량의 속도 및 가속도의 변화량 등의 성능 특성을 가해지는 전류 즉 자기장의 변화에 따른 특성을 해석하여 높은 완충 효율을 항상 유지할 수 있는 가능성을 해석적으로 확인하고자 한다. MR 유체는 병행(Bingham) 특성을 가진 것으로 고려하였으며, 유체의 점성 및 자기장 부하에 따른 유체의 저항력과 가스챔버의 압축성으로 인한 댐핑력을 완충기의 댐핑력으로 고려하였다.

\*,\*\* : 대구대학교 자동차·산업·기계공학부

\*\*\* : Dept. of Aerospace Eng., U. of Maryland

## 2. 이론적 배경

### 2.1 완충기의 운동방정식

다음의 Fig. 1과 같은 질량  $m$ 의 연직충돌계를 고려한다. 여기서  $x$ 는 질량  $m$ 의 변위,  $k_m$ 은  $m$ 과 완충기 사이에 있는 완충체의 스프링 상수를 의미한다.

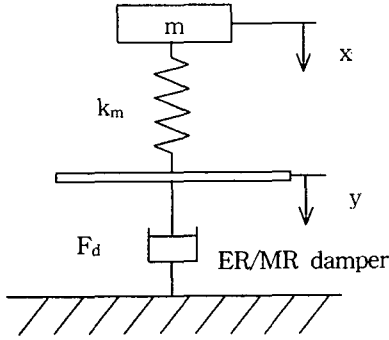


Fig.1 Impact damper model

완충기에 사용하는 ER/MR유체는 식(1)과 같이 실험적 고찰을 통하여 일반적으로 잘 알려진 전기장/자기장 부하에 따른 병행 거동을 하는 것으로 가정한다.

$$\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서,  $\tau$ 는 ER/MR유체의 전단응력,  $\mu$ 는 유체의 기본점성계수(plastic viscosity)이며,  $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비(shear rate)이다. 이러한 ER/MR유체의 성질을 완충기에 적용하면 기존의 유압완충기에 비해 간단한 구조설계가 가능하여 생산가 감소와 신뢰성 증가를 가져오며, 반발 댐핑력의 크기를 조절할 수 있고 반응시간이 빠르므로(1ms이하) 순간적인 제어효과가 좋다. 또 적은 소모동력으로 제어가 가능하다<sup>[5]</sup>.

질량  $m$ 이 높이  $H$ 로부터 낙하되어  $\dot{x}(0)$ 로 충돌할 때, 충돌에너지가 완충기에 전부 흡수되는 것으로 가정한다. 이 경우  $\dot{y}(0) = \dot{x}(0) = \sqrt{2gH}$ 이며, 운동방정식은 다음 식 (2)와 같이 된다.

$$m\ddot{x} = -k_m(x-y) + mg \quad (2)$$

그리고 완충기의 댐핑력  $F_d$ 는 다음 식(3)과 같다.

$$k_m(x-y) = F_d \quad (3)$$

### 2.2 완충기의 댐핑력

Fig.2는 MR유체를 이용한 전형적인 지능형 완충기이다. 완충기의 댐핑력은 ER/MR유체가 전극(자극) 틈새로 흐를 때 발생하는 압력강하 즉 전기장/자기장 무부하시의 유체 점성에 의한 유체의 저항력과 전기장/자기장 인가시의 항복응력에 의한 압력강하와 가스챔버의 압축성으로 인한 댐핑력의 합으로 다음 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_d = (A_p - A_r)\Delta P + A_r P_g \quad (4)$$

여기서  $A_p$ 는 피스톤의 단면적,  $A_r$  피스톤 로드 단면적,  $\Delta P$ 는 전극(자극) 틈새에 걸친 압력강하,  $P_g$ 는 가스 챔버의 가스 압력이다.

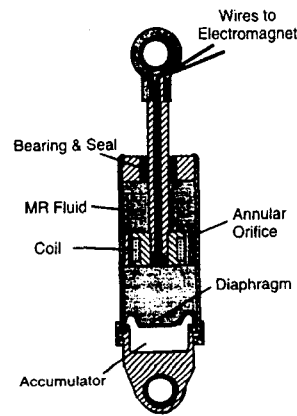


Fig. 2 MR Damper  
(Courtesy of Lord Co.)

Fig. 3은 전극(자극) 틈새의 속도 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 영역 1 및 3은

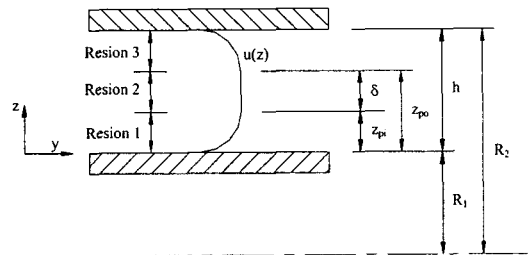


Fig. 3 Velocity profile

항복후영역(post-yield)으로 유체의 전단응력의 크기가 항복응력보다 큰 영역이며, 영역 2는 항복전 영역(pre-yield)으로 유체의 전단응력이 항복응력

보다 작은 플러그(plug) 유동 영역을 나타낸다.

Fig. 3에서  $\delta$ 는 항복전영역 즉 플러그 두께(plug thickness)를 말한다. 그리고  $\bar{\delta}$ 는  $\delta/h$  즉, 비플러그 두께(non-dimensional plug thickness)로서, 전극 틈새를 평판으로 가정하여, 하중 평형조건으로부터 얻어지는 지배방정식에 영역 2의 경계에서의 응력은 항복응력이라는 경계조건을 활용하면 다음 식(5)와 같이 표현할 수 있다<sup>[6,7]</sup>.

$$\bar{\delta} = \frac{2L\tau_y}{\Delta Ph} \quad (5)$$

Wereley<sup>[7]</sup>에 의하면 전극(자극) 틈새 사이의 압력 강하  $\Delta P$ 는 다음과 같이 주어진다 고 한다.

$$\Delta P = \frac{12\mu L(A_p - A_r)\dot{y}}{bh^3(1 - \bar{\delta})^2(1 + \bar{\delta}/2)} \quad (6)$$

여기서,  $L$ 은 전극의 길이,  $h$ 는 전극 틈새,  $b$ 는 전극의 폭(=  $2\pi R_1$ )을 나타낸다. 그리고 유체의 항복응력  $\tau_y$ 는 유체에 인가되는 전기장(E)/자기장(H)의 증가와 더불어 지수함수적으로 증가하는 것으로 알려져 있다.

$$\tau_y = \alpha H^\beta \quad (7)$$

비플러그 두께  $\bar{\delta}$ 는 식(5)의  $\Delta P$ 를 식(6)에 대입하면 다음 식(8)로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\bar{\delta}^3}{2} - \left[ \frac{3}{2} + \frac{6(A_p - A_r)\mu\dot{y}}{\tau_y b h^2} \right] \bar{\delta} + 1 = 0 \quad (8)$$

일반적으로 완충기가 작동될 때, 주위와 많은 열교환을 하지 않으므로 가스챔버에서 가스의 압축성으로 인해 발생하는 컴플라이언스(compliance)를 단열변화로 가정할 수 있다. 그러므로 가스챔버의 압력  $P_g$ 는 단열과정이라고 할 때 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_g = P_{g0} \left( \frac{v_{g0}}{v_{g0} - A_r y} \right)^n \quad (9)$$

여기서  $P_{g0}$  및  $v_{g0}$ 는 각각 초기 가스챔버 압력 및 부피,  $n$ 은 비열비(specific heat ratio)이며, 질

소 가스의 비열비는 1.4이다.

한편 완충기의 전극 틈새의 유체의 전단속도비는

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\tau - \tau_y}{\mu} \\ &= \frac{\Delta Ph}{\mu L} \left[ \frac{1 - \bar{\delta}}{2} - \frac{z}{h} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

이며,  $z$ 는 전극 틈새의 높이 즉 폭 방향의 변위를 말한다. 최대 전단속도비는 벽면에서 발생하므로 다음 식 (11)로 주어진다.

$$\begin{aligned} \gamma \Big|_{z=0} &= \frac{\Delta Ph(1 - \bar{\delta})}{2\mu L} \\ &= \frac{(A_p - A_r)6\dot{y}}{bh^2(1 - \bar{\delta})(1 + \bar{\delta}/2)} \end{aligned} \quad (11)$$

### 3. 댐핑력 해석

본 논문에서 고려한 완충기에 사용하는 MR유체는 Lord Co.의 MRF-132LD( $\alpha=60$ ,  $\beta=1.3$ )로서, 점성계수  $\mu=0.33$  Pa·s의 값을 가진다. 완충기에 작용하는 충격력은 200 kg의 질량이 높이 1 m에서 자유 낙하하는 것으로 설정한다. 낙하하는 질량의 스프링 상수는 50 MN/m이다.

완충기의 기하학적 제원으로 피스톤의 바깥지름은 76.2 mm, 자극의 길이는 12.7 mm, 자극 사이의 간격은 0.75 mm, 피스톤 로드의 지름은 50.8 mm이며, 완충기 피스톤의 최대 변위는 101.6 mm로 가정한다. 그리고 가스챔버의 초기압은 2.0682 MPa의 값을 가지는 것으로 가정한다.

솔레노이드에 감긴 코일의 권수를 100이라 하여 인가되는 전류를 0.1 A, 0.8 A, 1.5 A로 증가시켰을 때 자기장의 변화에 따른 완충기의 특성들을 해석하여 보면 다음과 같다.

Fig. 4는 완충기에 발생하는 최대 전단속도비를 시간에 대하여 나타낸 그림이다. 인가되는 전류의 크기가 증가함에 따라 전단속도비가 증가함을 보여준다. 이는 자기장의 세기가 증가하여 비플러그 두께의 값이 커지므로 자극의 벽면에서의 속도의 기울기 즉 전단비도 증가함을 보여 주지만 전류의 크기에 따라 현격한 차이는 없음을 보여준다.

Fig. 5는 낙하되는 질량의 충격 후 시간에 대한 변위 변화를 보여주는데 낙하 초기에는 자기장의

## 참고문헌

세기에 따른 차이는 없다. Fig. 6의 속도 변화와 비교하면 변위의 피크값 부근에서 속도의 변화 값이 자기장의 변화와 무관함을 보여준다. 그리고 자기장의 증가에 따라 감쇠력도 증가하여 속도의 변화폭도 작아짐을 보여 준다.

Fig. 7은 낙하 질량의 가속도 크기 변화를 보여 준다. 약 22 msec 이하에서는 자기장이 증가할수록 감속도의 크기가 크지만, 시간이 증가할수록 자기장의 증가에 따라 감속도는 줄어드는, 자기장의 영향이 큼을 보여준다.

Fig. 8은 완충기의 행정(stroke)을 보여주며 Fig. 9는 완충기의 저항력 즉 감쇠력을 보여준다. Fig. 7의 낙하 질량의 가속도 크기와 반대로 22 msec 이하의 충돌 초기에는 자기장이 증가할수록 감쇠력도 증가하나 30 msec 부근에서는 오히려 0.1 A의 경우가 1.5 A의 경우보다 감쇠력이 더 큰 값을 보여 줌을 알 수 있다. 이는 Fig. 7에서 알 수 있었던 바와 같이 1.5 A의 경우 22 msec이하의 충돌 초기에 감속도와 감쇠력이 0.1 A의 경우보다 더 커서 질량의 충격에너지를 초기에 흡수한 양이 많았으므로 시간이 경과한 후 흡수해야 하는 에너지의 크기가 줄어들어 따른 결과로 판단된다.

이러한 해석 결과로부터 충격 에너지에 적절한 완충기의 행정들을 구할 수 있으므로 완충기의 각종 치수 결정 및 적절한 유체도 선정할 수 있으리라 사료된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 MR유체를 작동유체로 하는 지능형 완충기의 여러 성능 특성을 인가되는 전류 즉 자기장의 변화에 따른 시간적 변화에 대하여 높은 완충 효율을 항상 유지할 수 있는 가능성을 해석적으로 확인하여 보았다. 인가되는 전류가 증가함에 따라 충돌 초기에 낙하 질량의 감속도가 크고 감쇠력도 커 자기장의 효과를 확인할 수 있었다. 이를 활용하면, 설계 초기 단계에서 낙하질량의 변화에 따라 필요한 댐핑력을 얻을 수 있는 완충기의 설계 치수 결정이나 적절한 유체를 선정할 수 있을 것이다. 아울러 설계 변경 단계에서 설계 변경 효과를 효과적으로 예측할 수 있으리라 기대된다. 향후 초기 조건 변화에 따른 특성들을 확인하고 유체 모델을 다양화하여 일반적인 경우로 해석하여 비교할 예정이다.

1. Marksmeier, T.M., F. Gordaninejad, E.L. Wang, 1999, "Design and Performance of an Electrorheological Grease(ERG) Shock Absorber," *International J. of Modern Physics B* Vol. 13 Nos. 14, 15 &16, pp. 2135-2142
2. Ahmadian M., J.C. Poynor, J.M. Gooch, 1999, "Application of Magnetorheological Dampers for Controlling Shock Loading," *Proceedings of the ASME DSC-Vol. 67*, pp.731-735
3. Krakov, M.S., 1999, "Influence of rheological properties of magnetic fluid on damping ability of magnetic fluid shock-absorber," *J. of Magnetism and Magnetic Materials* 201, p.368-371.
4. 河内申仁, 前森健一, 1996, "ER流体を用いた油壓緩衝器," *日本機械學會論文集(C編)*, 62卷, 599號, pp.90-95.
5. 최승복 외 4, 1993, "ER유체를 이용한 반능동식 가변댐퍼의 성능해석," *한국자동차공학회는문집 제1권제1호*, pp 90-100.
6. 이덕영, 황우석, 2000, "Herschel-Bulkley 모델에 의한 전기 및 자기장 유체 댐퍼의 준안정 상태 댐핑력 해석," *한국소음진동공학회창립10주년기념학술대회논문집 II*, pp. 1298-1302
7. Wereley, N.M., and Li, P., 1998, "Non-dimensional Analysis of Semi-Active Electrorheological and Magnetorheological Dampers Using Approximate Parallel Plate Models," *Smart Materials and Structures* 7(5), pp. 732-743.

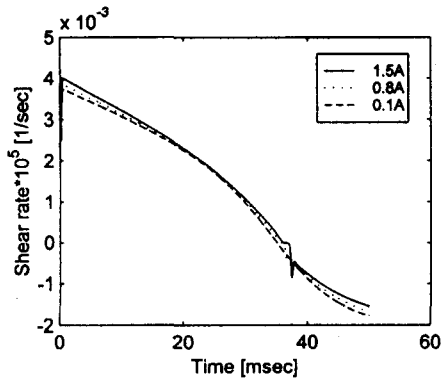


Fig. 4 Effect of applied current on maximum shear rate in damper

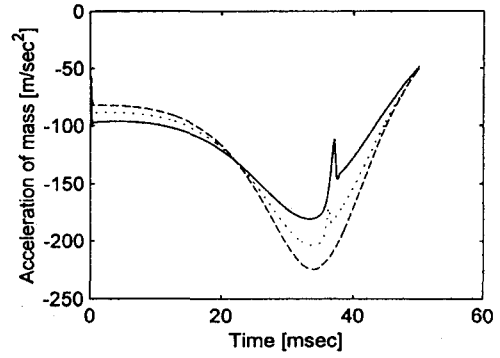


Fig. 7 Effect of applied current on acceleration of mass after impact

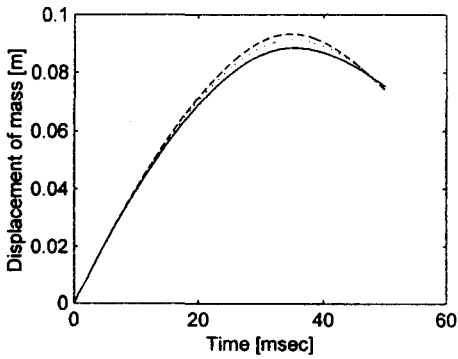


Fig. 5 Effect of applied current on displacement of mass after impact

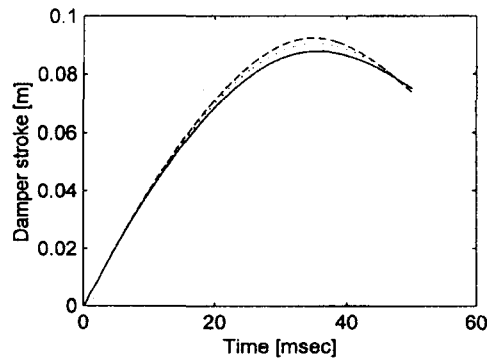


Fig. 8 Effect of applied current on damper stroke

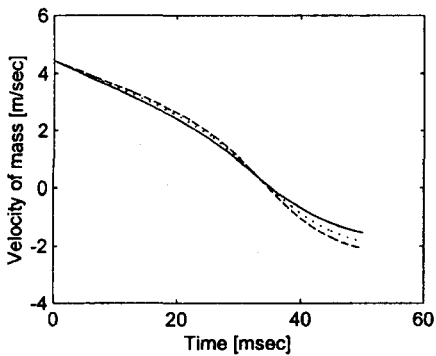


Fig. 6 Effect of applied current on velocity of mass after impact

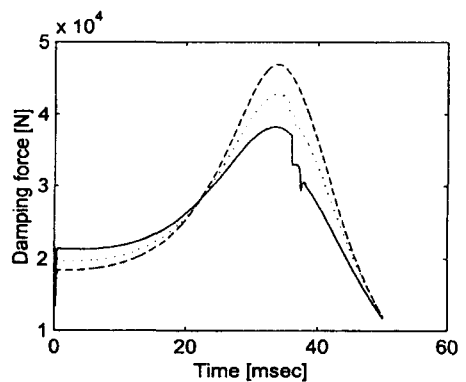


Fig. 9 Effect of applied current on damping force