

차량용 MR충격댐퍼의 동특성 해석

Dynamic Characteristic Analysis of MR Impact Damper for Vehicle System

송현정* · 우다윗** · 최승복†

Hyun-Jeong Song, David Woo and Seung-Bok Choi

(2006년 4월 17일 접수 ; 2006년 6월 26일 심사완료)

Key Words : Magneto-rheological Fluid(MR유체), Bingham Flow(빙햄유동), MR Impact Damper(MR충격댐퍼), Impact Control(충격 제어), Vehicle Collision(차량충돌), Occupant Model(운전자 모델)

ABSTRACT

This paper presents the dynamic characteristics of MR impact damper for vehicle collision system. Various types of mechanism have been proposed to reduce force transmitted to the vehicle chassis and finally to protect occupants from injury. In the case of head-on collision, the bumper makes main role of isolation material for collision attenuation. In this study, the proposed bumper system consists of MR impact damper and structures. The MR impact damper utilizes MR fluid which has reversible properties with applied magnetic field. The MR fluid operates under flow mode. The bellows is used for generation of fluid flow. A mathematical model of the MR impact damper is derived incorporating with Bingham model of the MR fluid. Field dependent damping force is investigated with time and frequency domain. The MR impact damper is then incorporated with vehicle crash system. The governing equation of motion of vehicle model is formulated considering occupant model. Dynamic characteristics of vehicle collision system investigated with computer simulation.

1. 서 론

최근 차량충돌 시 운전자에 대한 안전성확보와 사고자에 대한 보호를 위해 충돌력을 흡수할 수 있는 범퍼 및 미연에 방지할 수 있는 시스템에 대한 필요성이 요구되고 있다. 이를 위해 차량의 충돌로부터 보호하기 위해 제동장치와 연계해 사전에 제동력을 발생시킬 수 있도록 하는 시스템뿐만 아니라 직접적인 충돌로부터 차량과 운전자를 보호하도록 하는 범

퍼에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 충돌과 관련하여 운전자의 안정성을 확보하기 위해 에어백을 이용한 운전자의 보호, 안전벨트를 이용한 운전자의 내부 충돌 방지, ABS를 구성하여 제동성능 향상을 통해 충돌을 저감시키는 시스템에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다⁽¹⁾. Mizuno는 일본에서 차량의 양립성으로 인한 차종에 따른 다양한 방향에서의 충돌특성과 보행자에 대한 충돌 사고 분석을 통한특성을 살펴보았다⁽²⁾. Witteman은 충돌 시 발생하는 충격력 저감을 위해 마찰댐퍼를 이용한 차량의 안정성 확보를 제안하였으며 FEM을 통해 차량모델 해석을 통해 이를 입증하였다⁽³⁾. Wagstrom은 1자유도 시스템으로 이루어진 차량모델을 통해 다양한 충돌조건에서 차량의 강성변화가 차량의 안정성을 향상될 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 살펴보았다⁽⁴⁾.

† 책임저자; 정회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 868-1716

* 정회원, 인하대학교 기계공학부

** 인하대학교 대학원 기계공학과

Jawad는 지능범퍼를 제안하였고 이는 유압시스템을 이용하여 사전에 강성변화를 발생시킬 수 있도록 전충돌 제어를 제안하여 서로 다른 충돌조건에 대한 충격력 저감 성능을 고찰하였다⁽⁵⁾. 또한 인가되는 전기장 및 자기장 부하에 따라 그 유변학적 거동이 변하는 특성을 가지는 지능유체를 이용한 충격저감에 대한 활발한 연구가 수행되고 있다. Wereley는 헬기의 기관총 발사 시 발생하는 충격력이 헬기에 전달되는 것을 저감시키기 위해 MR댐퍼를 제안하였으며 이에 대한 수학적 모델링을 통해 제어를 설계하였고 실제 시스템에 적용하여 제어 성능을 확인하였으며 Ahmadian은 포에서 포탄이 발사될 때 MR댐퍼를 이용한 충격저감 메커니즘을 제안하였다^(6,7). Choi는 MR댐퍼를 이용하여 차량용 서스펜션에 적용하여 제어 성능을 확인하였으며 Song은 충격력 저감을 위한 ER충격댐퍼를 제안하였으며 1자유도 시스템을 구성한 후 가속도 저감을 통한 충격력 제어 성능을 확인하였다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 이와 같은 연구로부터 유변학적 특성이 가역적으로 변하는 지능유체를 이용한 충격력 저감에 대한 충분한 가능성들이 제시 되었으며 현재도 다양한 형태의 연구가 진행되고 있다.

이 연구에서는 MR유체를 이용하여 정면 충돌 시 발생하는 충격력 저감을 위한 MR충격댐퍼를 제안하여 수학적 모델링을 수행하였으며 이를 이용하여 운전자의 인체 모델과 연계된 차량모델에 적용하여 차량 속도에 따른 인체에서의 가속도 저감성능 및 프레임의 강성변화 특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 고찰하였다.

2. MR충격 댐퍼의 구성 및 모델링

2.1 MR유체의 특성

MR유체는 자기장 부하에 따라 유변학적 특성이 변하는 유체이다. 자기장 무부하 시에는 뉴토니안 거동을 보이다가 자기장 부하 시 빙햄(Bingham) 거동을 보이며 자기장 부하에 따라 발생하는 항복응력과의 관계를 실험을 통해 Fig. 1과 같이 얻을 수 있으며 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_y(H) = \alpha H^\beta \quad (1)$$

여기서 H [kA/m]는 인가된 자기장의 세기이고 각

각 α, β 는 1.3, 1.13으로서 실험적으로 얻어진 값을 사용하였다.

2.2 MR충격댐퍼의 모델링 및 설계

MR충격댐퍼는 범퍼의 지지부에 설치되며 충돌 시 댐핑력을 발생시키는 역할을 하게 된다. Fig. 2는 제안된 MR충격댐퍼의 구조를 보여주고 있다. MR충격댐퍼는 상부챔버, 자기장을 발생시키기 위한 자기회로, 자기회로 아래 부분에 위치한 하부챔버로 구성이 되고 다이어프램은 하부로 유동이 된 유체를 담당하게 된다. 내측실린더에는 자기장 발생을 위한 자기회로가 설치되고 외측실린더를 사이에 두고 유로를 형성하게 된다. 상부챔버를 구성하고 있는 부분에 길이방향으로의 변형을 특성이 좋은 벨로즈를 사용하여 내부에서 유동발생시 체적변화율을 활발하게 하였으며 내부에 충전 된 MR유체에 대해 내압성, 내유성, 기밀성이 유지되도록 하였다. MR유체는 상부챔버와 하부챔버 사이에 채워지게 되며 외부 충격하중인가 시 MR유체는 상부챔버에서 유로를 통해 하부챔버로 유동이 일어나게 된다. 자기장 무부하

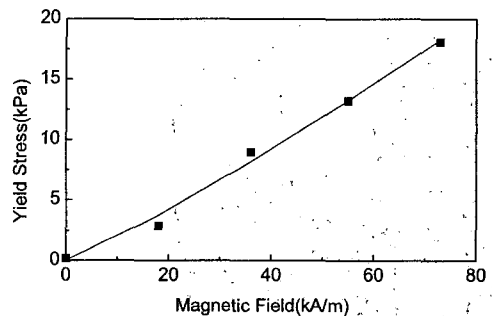


Fig. 1 Bingham characteristic of MR fluid

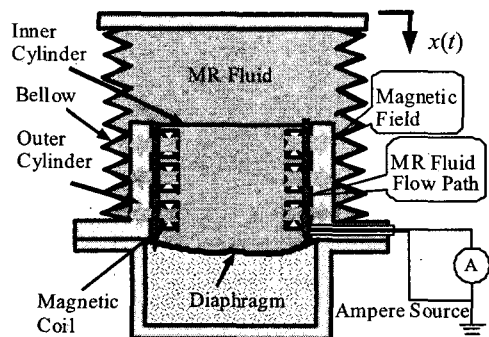


Fig. 2 Configuration of the MR impact damper

시에는 순수하게 뉴토니안 거동을 보이게 되고 점성에 의한 댐핑력만을 발생시키며 자기장 부하 시에는 유로에서 자기장의 세기에 따른 항복응력으로 인한 댐핑력을 발생시키게 된다. 이때 MR유체는 고정된 두 자극 사이를 유동하게 되는데 이는 유동모드에 해당된다.

먼저 자기장 인가 시 MR충격댐퍼의 자극에서 형성되는 자기장경로를 확인하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였다. Fig. 3에서와 같이 전류인가 시 자극으로 사용되는 유로에 자기장이 고른 형태로 분포된 것을 확인 할 수 있었다. 이를 통해 자극의 구성 및 유로의 형상을 결정하였다.

해석을 위해 MR유체는 비압축성이고 수직방향의 운동만 고려하였으며 상부캠버 및 하부캠버를 구성하고 있는 부분의 피스톤 면적은 동일하다고 가정하였으며 자극형상에 따른 압력손실 및 유체의 관성에 의한 영향은 무시하였다. Fig. 4는 해석을 위한 가정으로부터 얻어진 MR충격댐퍼의 유체역학적 모델을

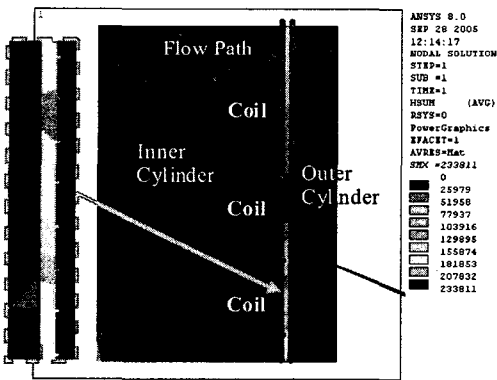


Fig. 3 FEM result of the magnetic flux

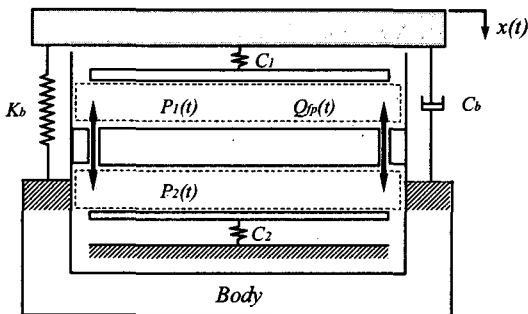
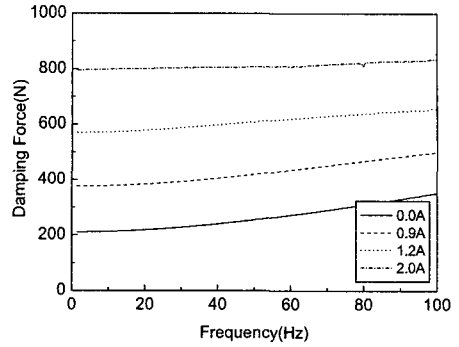
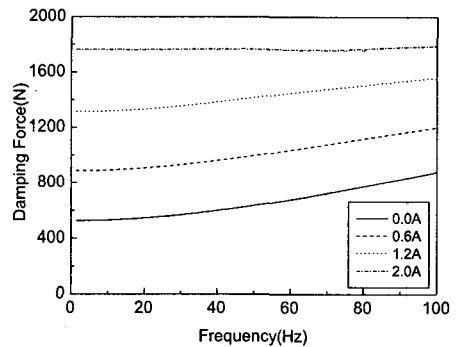


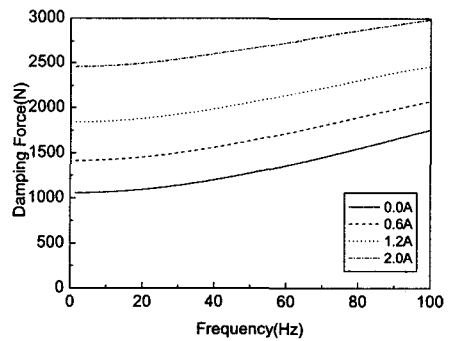
Fig. 4 Hydraulic model of the MR impact damper



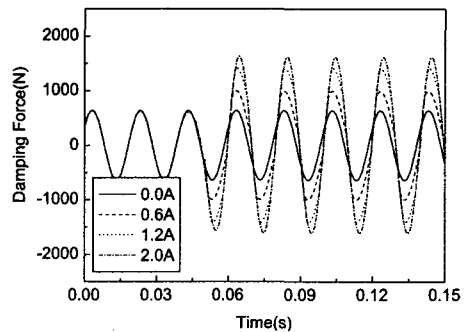
(a) 20 mm



(b) 50 mm



(c) 100 mm



(d) Time response

Fig. 5 Dynamic characteristics of the MR impact damper with input displacement

보여주고 있다. 외부로부터 입력된 가진은 $x(t)$ 의 형태로 하였으며 유체역학적 모델로부터 차체로 전달되는 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{cb} = -(k_b x(t) + c_b \dot{x}(t) - A_p P_1(t)) \quad (2)$$

여기서 k_b , c_b 는 각각 벨로즈의 강성과 댐핑, P_1 은 상부챔버에서의 압력, A_p 는 상부챔버의 유효 피스톤 단면적을 나타내며 $A_p P_1(t)$ 는 상부챔버에서의 압력강하로 인해 작용하는 힘을 나타낸다.

MR유체가 자극 사이로 유동될 때 발생하는 압력강하는 자극 사이로 형성되어 있는 유로(flow path)를 유체가 유동하게 될 때 유체와의 저항으로 인해 발생하는 압력강하 ΔP_{fp} 와 자기장 부하 시 자극이 설치되어 있는 유로에서 항복응력이 발생되게 되며 이로 인해 상부챔버와 하부챔버 사이에 발생하는 압력강하 ΔP_{MR} 의 요소로 구성된다.

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

여기서 ΔP_{fp} 는 $R_{fp} Q_{fp}(t)$ 로 나타낼 수 있으며 R_{fp} 는 자극 사이를 유동하게 될 때의 유동저항, $Q_{fp}(t)$ 는 유로를 통해 발생하는 유량이고 $A_{fp} \dot{x}_{fp}(t)$ 로 나타내며 \dot{x}_{fp} 는 유로에서의 유동발생시 생겨나는 유체의 이동속도이고 A_{fp} 는 유로의 단면적을 나타낸다. ΔP_{MR} 은 $2L/h \cdot \tau_y(H)$ 로 나타낼 수 있으며 여기서 L 은 자극의 길이, h 는 자극의 간극을 나타내며 각각 50 mm, 1 mm로 하였다. 상부챔버와 하부챔버에서 일어나는 유동에 대한 연속방정식을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_1 \dot{P}_1(t) = Q_{fp}(t) - A_p \dot{x}(t) \quad (4)$$

$$C_2 \dot{P}_2(t) = -Q_{fp}(t)$$

식 (2)~(4)를 통해 차체로 전달되는 힘을 다시 정리 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{cb} = -k_b x(t) - c_b \dot{x}(t) - k_i(x(t) - x_{fp}(t)) - k_d(x(t) - x_{fp}(t)) - c_{fp} \dot{x}_{fp}(t) + \text{sgn}(\dot{x}_{fp}(t)) F_{MR} \quad (5)$$

여기서 $k_i \equiv A_p^2 / C_1$, $k_d \equiv A_p^2 / C_2$, $c_{fp} \equiv A_p^2 / R_{fp}$,

$F_{MR} = A_p \Delta P_{MR}$ 이고 C_1 , C_2 는 상부챔버와 하부챔버에서의 컴플라이언스이다.

Fig. 5는 상부로부터 입력되는 변위에 따라 발생하는 댐핑력을 나타낸다. MR충격댐퍼로부터 발생하는 댐핑력 특성을 알아보기 위해 입력파형은 조화형태로 하였다. 이때 입력 변위는 각각 (a) 20 mm, (b) 50 mm, (c) 100 mm로 하였고 (d)는 50 Hz, 50 mm의 가진 시 시간영역에서의 댐핑력을 나타낸 값이다. 자기장 부하에 따라 댐핑력이 증가하는 것을 알 수 있고 이는 차량의 충격댐퍼 시스템에 적용 시 적절한 제어력을 얻을 수 있음을 의미한다.

3. 차량의 충돌저감 특성

3.1 승차자를 고려한 차량모델

전체 차량의 모델을 단순화 하여 차체, 엔진룸, 범퍼로 구성하였으며 차량의 진행방향에 대한 운동만을 고려하여 3자유도를 갖도록 모델링을 수행하였다^(11,12). Fig. 6은 제안된 차량의 단순화된 모델을 보여주고 있다. 스프링 k_3 로 연결되어 있는 왼쪽 부분은 운전자의 인체모델을 단순화 시킨 형상이고 상체와 하체로 구분하여 2자유도 모델을 사용하였다⁽¹³⁾. 제안된 운전자 모델은 다음과 같다

$$M_4 \ddot{x}_4 = k_3(x_3 - x_4 - R \sin \theta) - c_2(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) - M_5 L \ddot{\theta} \cos \theta \quad (6)$$

$$M_5 L^2 \ddot{\theta} = k_3(x_3 - x_4 - R \sin \theta) R \cos \theta + M_5 g L \sin \theta \quad (7)$$

여기서 M_5 는 운전자의 머리질량, M_4 는 인체하부 질량을 나타낸다. M_3 는 프레임 질량을 나타내며 인체

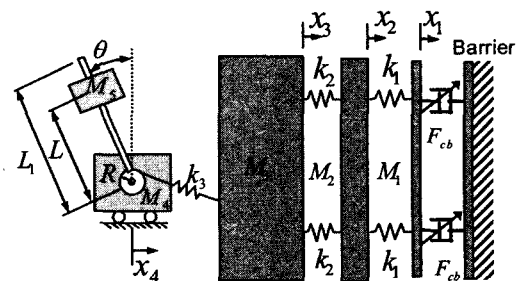


Fig. 6 Mathematical model of vehicle with the MR impact damper

모델과 연결되어 있다.

스프링 k_3 로 연결되어 있는 오른쪽 부분은 제안된 차량의 모델을 나타낸 것이고 MR충격댐퍼가 범퍼를 구성하고 있는 부분에 2개가 장착이 된 형상으로 나타내었다. MR충격댐퍼가 포함된 차량의 모델은 다음과 같다.

$$M_1\ddot{x}_1 = -2k_1(x_1 - x_2) + 2F_{cb} \quad (8)$$

$$M_2\ddot{x}_2 = 2k_1(x_1 - x_2) - 2k_2(x_2 - x_3) \quad (9)$$

$$M_3\ddot{x}_3 = 2k_2(x_2 - x_3) - 2k_3(x_3 - x_4 - R\sin\theta) \quad (10)$$

여기서 M_1 은 범퍼의 질량, M_2 는 엔진룸의 질량, F_{cb} 는 MR충격댐퍼에서 발생하는 댐핑력을 나타낸다.

3.2 시뮬레이션을 통한 성능해석

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 앞서 제안된 차량시스템에 적용한 MR충격댐퍼의 성능평가를 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 주요 변수들은 Table1과 같다.

초기값은 다음과 같이 정하였으며 초기변위는 0, 그리고 각 부분에서 초기속도를 갖도록 하였다.

$$\begin{aligned} \theta(0) = 0, x_1(0) = 0, x_2(0) = 0, x_3(0) = x_4(0) = 0 \\ \dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = \dot{x}_3(0) = \dot{x}_4(0) = v_0 \end{aligned}$$

제안된 MR충격댐퍼는 제어 입력에 따라 요구 댐핑력을 발생시킬 수 있다. 먼저 충돌 발생시 MR충격댐퍼에서 일정한 댐핑력을 발생시켰을 경우 차량시스템에서의 응답특성을 살펴보았다. 이를 위해 차

량의 충돌을 3가지의 위상(충돌 초기단계, 에어백 전개단계, 운전자 충돌단계)으로 구분하여, 각각의 단계에 맞는 댐핑력이 발생하도록 하였으며 댐퍼에서 발생하는 댐핑력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{cb} = \begin{cases} 45 \text{ kN} & \text{if } 0 < t \leq 30 \text{ (msec)} \\ 15 \text{ kN} & \text{if } 30 < t \leq 70 \text{ (msec)} \\ 30 \text{ kN} & \text{if } t > 70 \text{ (msec)} \end{cases} \quad (11)$$

차량 충돌 시 최대 감속도는 엔진과 대쉬 패널(dash panel)을 부딪치는 순간에 발생한다⁽¹⁴⁾. 이 최대 감속도는 객실부의 변형과 관련이 있으므로 운전자가 직접적으로 감당해야 하는 감속도가 되고, 큰 값을 나타낼수록 객실부에 전달되는 에너지가 크므로, 상해치가 커질 확률이 높아진다.

VCSI(vehicle crash severity index)는 차량충돌위험지수를 나타내며 차체 감속도 데이터로부터 계산이 되며 다음과 같다.

$$VCSI = \frac{1}{T} \int_0^T (-\ddot{x})^2 dt \quad (12)$$

여기서, \ddot{x} 는 객실부의 감속도, T 는 감속도가 발생한 시간을 의미한다. 이 값은 HIC(head injury criteria)와 같은 상해치의 절대적인 지표는 될 수 없으나, 차량간의 충돌특성을 비교함에 있어 상대적인 기준으로 사용되었다. 이 연구에서는 MR충격댐퍼의 유무에 따른 최대 감속도, VCSI, 차량의 객실로 침입될 수 있는 변형을 관찰하여 충돌 시 차량 및 안전성을 비교하였다. Fig. 7은 MR충격댐퍼를

Table 1 System parameters of the vehicle

Parameters	Values	Parameters	Values
M_1	1200 kg	k_2	900 kN/m
M_2	200 kg	k_3	200 kN/m
M_3	27.2 kg	c_2	2000 kNs/m
M_4	33.5 kg	L	0.6 m
M_5	27.2 kg	L_1	0.7 m
k_1	500 kN/m (d<0.2 m)	R_1	0.1 m
	500 kN/m (d>0.2 m)		

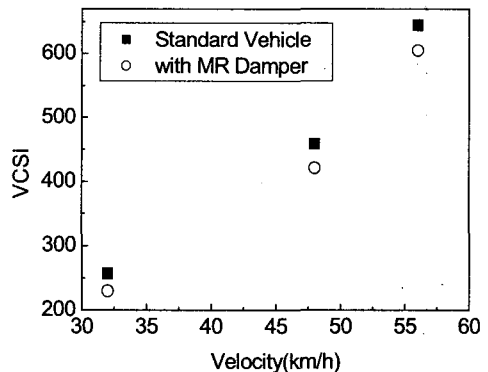
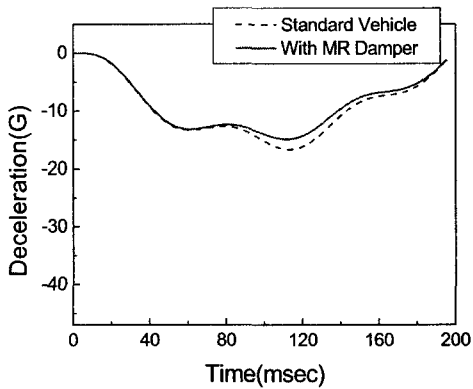


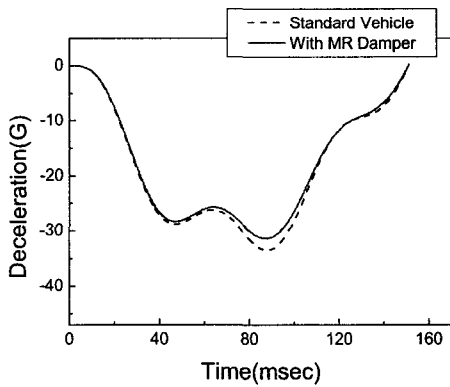
Fig. 7 Comparison of the vehicle crash severity index

장착한 차량과 장착하지 않은 차량의 VCSI값을 충돌 속도에 따라 비교한 그래프이다. MR 충격 댐퍼를 장착한 경우 32 km/h의 충돌일 때 VCSI값은 257에서 230으로 감소하였고, 48 km/h의 경우 VCSI값은 459에서 421로 줄었으며, 56 km/h의 경우 충돌이

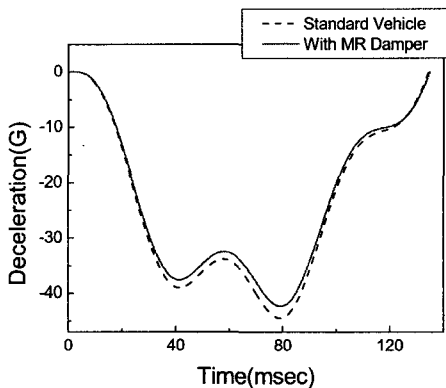
발생할 때 VCSI는 745에서 705로 줄일 수 있었다. Fig. 8은 차량 속도에 따른 감속도를 나타낸 그래프이다. 32 km/h일 경우 최대 감속도값은 18 G에서 16 G, 48 km/h일 경우 최대 감속도가 34 G에서 31 G, 56 km/h일 경우 최대 감속도 값은 44 G에서 40 G로 감소



(a) 32 km/h

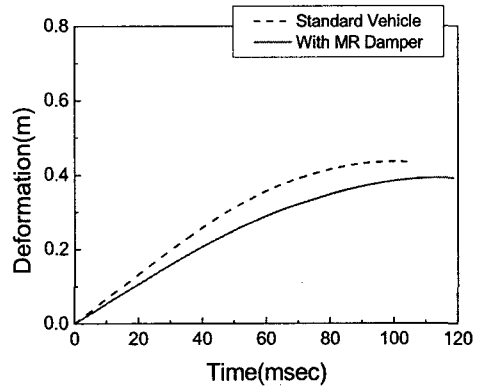


(b) 48 km/h

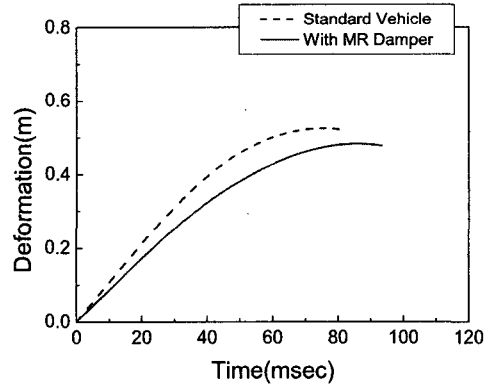


(c) 52 km/h

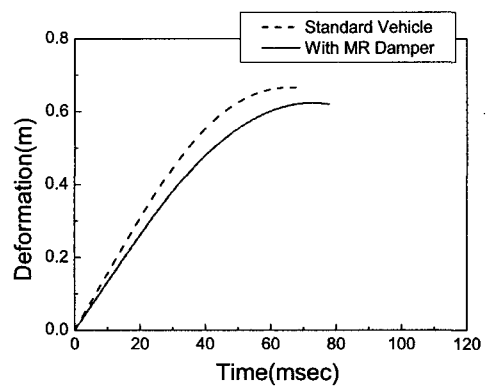
Fig. 8 Simulation results of vehicle deceleration



(a) 32 km/h



(b) 48 km/h



(c) 52 km/h

Fig. 9 Simulation results of frame deformation

하였다. MR충격댐퍼를 장착한 차량이 모든 속도에서 가속도 값이 저감되었으며 이를 통해 차량의 안전성을 향상시킬 수 있는 것을 나타냈다.

MR충격 댐퍼 유무에 따른 충돌 시 차량의 변형을 Fig. 9에 나타내었다. 32 km/h의 경우 40 cm에서 36 cm로, 48 km/h의 경우 51 cm에서 47 cm, 56 km/h의 경우 61cm에서 57cm로 차체의 변형을 줄일 수 있다. 이는 MR충격댐퍼를 통해 발생된 댐핑력을 통해 충격저감을 가져오고 결과적으로 차량의 변형을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 결과를 분석해 볼 때 MR충격댐퍼를 장착한 차량이 안전성을 확보할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 차량 충격 저감을 위한 MR유체를 이용한 충격댐퍼시스템의 가능성을 고찰하였다. 먼저 MR충격댐퍼를 이용한 제어 가능한 차량 범퍼구조를 제안하였고, 유체역학적 모델로부터 MR충격댐퍼의 모델링을 수행하였으며 가진 변위에 대한 댐핑력 특성을 고찰하였다. 이로부터 제안된 충격댐퍼를 장착한 차량의 충격에너지 저감 성능을 질량과 스프링으로 이루어진 차량 및 운전자 모델을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 결과 MR충격댐퍼를 장착한 차량의 경우 최대 감속도 및 차량 충돌지수, 차량의 객실 내부로의 변형이 감소함을 알 수 있었다. 이로부터 MR충격댐퍼를 사용하여 차량의 안전성 및 운전자의 안전성을 확보할 수 있음을 확인하였다. 제안된 MR충격댐퍼는 실험을 통해 자기장 부하에 따른 특성을 살펴 볼 예정이며 충격 실험기(drop tower facility)를 이용하여 충격속도 및 질량 등의 다양한 조건하에서 실험을 수행할 예정이다. 또한 단품의 MR충격댐퍼를 이용하여 HILS를 통한 차량시스템의 성능을 평가 할 예정이다.

후 기

이 연구는 국가지정연구실(National Research Laboratory : NRL) 프로그램 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Witteman, W., 1999, "Improved Vehicle Crashworthiness Design by Control of the Energy Absorption for Different Collision Situations," PhD. Dissertation, Eindhoven University of Technology, Automotive Engineering & Product Design Technology, Eindhoven, The Netherlands.
- (2) Mizuno, K. and Kajzer, J., 1999, "Compatibility Problems in Frontal, Side, Single Car Collisions and Car-to-pedestrian Accidents in Japan", Accident Analysis Prev., Vol. 31, No. 4, pp. 381 ~ 391.
- (3) Witteman, W., 2005, "Adaptive Frontal Structure Design to Achieve Optimal Deceleration Pulses", Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV); Washington DC, United States, p. 8.
- (4) Wågström, L., Thomson, R. and Pipkorn, B., 2004, "Structural Adaptivity for Acceleration Level Reduction in Passenger Car Frontal Collisions", International Journal of Crash Vol. 9, No. 2, pp. 121 ~ 127.
- (5) Jawad, S. A. W., 1996, "Intelligent Hydraulic Bumper for Frontal Collision Mitigation", Crashworthiness and Occupant Protection in Transportation Systems ASME, AMD-Vol. 218, pp. 181 ~ 189.
- (6) Lee, D. Y., Choi, Y. T. and Wereley, N. M., 2002, "Performance Analysis of ER/MR Impact Damper Systems Using Herschel-Bulkley Model", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 13, No. 7-8, pp. 525 ~ 531.
- (7) Ahmadian, M., Appleton, R. and Norris, J. A., 2002, "An Analytical Study of Fire Out of Battery Using Magnetorheological Dampers", Shock and Vibration, Vol. 9, pp. 129 ~ 142.
- (8) Lee, H. S. and Choi, S. B., 2000, "Control and Response Characteristics of a Magnetorheological Fluid Damper for Passenger Vehicles", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 11, No. 1, pp. 80 ~ 87.

(9) Lee, H. S., Choi, S. B. and Lee, S. K., 2001, "Vibration Control of a Passenger Vehicle Featuring MR Suspension Units", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 41 ~ 48.

(10) Song, H. J., Choi, S. B., Kim, J. H. and Kim, K. S., 2004, "Performance Evaluation of ER Shock Damper Subjected to Impulse Excitation", Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 13, pp. 625 ~ 628.

(11) Elmarakbi, A. M. and Zu, J. W., 2004, "Dynamic Modeling and Analysis of Vehicle Smart Structures for Frontal Collision Improvement",

International Journal of Automotive Technology, Vol. 5, No. 4, pp. 244 ~ 255.

(12) Kamal, M., 1979, "Analysis and Simulation of Vehicle-to-barrier Impact", SAE Transactions, SAE Paper No.700414.

(13) Weaver, J. R., 1968, "A Simple Occupant Dynamics Model", Journal of Biomechanics, Vol. 1, pp. 185 ~ 191.

(14) Ham, S. J., Kim, D. S. and Lee, M. S., 1997, "Study on Passenger Damage Variation for Vehicle Collision Deceleration Difference", A Previous Report of Daewoo Motor Company, pp. 64 ~ 71.