

자기유변유체를 이용한 승용차량 속 업소버의 유한요소 최적설계

Optimal Design of Magnetorheological Shock Absorbers for Passenger Vehicle via Finite Element Method

성 금 길* · 최 승 북†

Kum-Gil Sung and Seung-Bok Choi

(2007년 9월 27일 접수 ; 2008년 1월 9일 심사완료)

Key Words : Magnetorheological Fluid(자기유변유체), Magnetic Field(자기장), Shock Absorber(속 업소버), Finite Element Method(유한요소법), Optimal Design(최적설계), Objective Function(목적함수), Full-vehicle (전체차량)

ABSTRACT

This paper presents optimal design of controllable magnetorheological(MR) shock absorbers for passenger vehicle. In order to achieve this goal, two MR shock absorbers (one for front suspension; one for rear suspension) are designed using an optimization methodology based on design specifications for a commercial passenger vehicle. The optimization problem is to find optimal geometric dimensions of the magnetic circuits for the front and rear MR shock absorbers in order to improve the performance such as damping force as an objective function. The first order optimization method using commercial finite element method(FEM) software is adopted for the constrained optimization algorithm. After manufacturing the MR shock absorbers with optimally obtained design parameters, their field-dependent damping forces are experimentally evaluated and compared with those of conventional shock absorbers. In addition, vibration control performances of the full-vehicle installed with the proposed MR shock absorbers are evaluated under bump road condition and obstacle avoidance test.

1. 서 론

자동차의 승차감과 조종안정성은 속 업소버(shock absorber)를 포함한 현가장치에 의하여 확보될 수 있는 차량의 동적 성능이다. 이러한 동적 성능을 향상하고자 모터 혹은 유압밸브 등을 이용한 전자제어 현가장치(electronic control suspension)가 적용되고 있는 추세이나, 비연속적인 감쇠력, 구

조의 복잡성 및 고가 등의 이유로 보편화 되지 않고 있는 실정이다. 최근에는 이를 개선하기 위하여 전기유변(electrorheological, 이하 ER) 및 자기유변(magnetorheological, 이하 MR) 유체를 이용한 반능동형 현가장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. ER유체는 전기장(electric field)에 의하여 상변화가 일어나는 지능유체로서 반응속도가 매우 빠르기 때문에 차량용 속 업소버⁽¹⁾를 비롯하여 엔진마운트, 브레이크/클러치, 밸브 등 각종 응용장치에 적용하려는 시도가 활발히 진행되고 있다.

한편, MR유체는 자기장(magnetic field)에 의하여 상변화가 일어나는 지능 유체로서 ER유체에 비하여

† 교신저자: 정희원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

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

* 정희원, 인하대학교 대학원 기계공학과

비교적 큰 항복응력을 발생시켜 보다 큰 힘을 요하는 각종 응용장치에 적용하려는 연구가 시도되고 있다. Carlson 등⁽²⁾은 차량용 MR유체 속 업소버를 제안하였으며, 스카이훅 제어기(sky-hook controller)의 구현을 통하여 제안된 속 업소버의 우수성을 입증하였다. Spencer 등⁽³⁾은 지진을 방지하기 위해 MR유체 댐퍼(damper)를 제안하여 이론적 모델의 타당성을 입증하였다. 그리고, Kamath 등⁽⁴⁾은 반능동형 전기유변유체 속 업소버를 제안하고 감쇠력 히스테리시스(hysteresis)에 대한 이론적 모델을 제시하고 실험결과와 비교 분석하였다.

최근에 MR유체 응용장치의 모델링 및 설계에 대한 연구가 활발히 수행되고 있으며⁽⁵⁻⁶⁾, 유한요소법(finite element method)을 이용한 모델링 및 해석에 대한 연구도 수행되고 있다⁽⁷⁾. Nicolais와 Wereley⁽⁸⁾은 분석적인 최적화 설계기법을 제안하였다. 이는 자기회로(magnetic circuit)의 영구적 포화 와 병목현상을 무시하고, 일정한 자속밀도(magnetic flux density)가 자기회로내에 발생한다는 가정을 통하여 해석되었다. 그러나, 압력강하(pressure drop)는 자기회로뿐만 아니라 MR유체가 흐르는 덕트(duct)의 형상에도 영향을 받기 때문에, 이는 실제 응용장치에서 항상 성립되지 않는다. 따라서, MR유체 속 업소버의 기하학적인 최적화 설계에 대한 연구가 필요한 실정이다.

또한, 자동차의 다양한 동역학적 특성을 해석하기 위하여 실차실험에 선행하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하는 것은 시간과 비용 면에서 매우 유용한 방법이다. 이는 실제 자동차의 거동과 유사한 시뮬레이션 모델을 구축하는 것에 의하여 가능하며, 이러한 시뮬레이션을 이 연구에 적용하여 기하학적인 최적화 설계기법을 통하여 제작된 MR유체 속 업소버의 성능을 미리 검증할 수 있다.

이 연구에서는 상용화된 속 업소버의 설계변수 제한조건(constraints)에 의하여 제한된 MR속 업소버의 최적설계를 수행하고, 이를 통하여 제작된 MR속 업소버의 성능시험을 수행하고자 한다. 이를 위하여 MR유체의 항복응력 변화에 따른 MR속 업소버의 동적 지배 방정식을 도출하고, 전륜 및 후륜용 MR속 업소버를 최적화 기법을 적용하여 설계한다. 최적화는 감쇠력과 같은 MR속 업소버의 성능을 향상시키기 위하여 전·후륜 MR속 업소버의 자기회로를 위한

최적 설계변수를 구하는 것이며, 이를 위하여 상용 유한요소해석 소프트웨어를 사용한다. 최적화된 MR속 업소버를 제작한 후 자기장 부하에 따른 감쇠력 성능시험을 수행하고, 해석결과 및 상용화된 속 업소버와 성능비교를 수행한다. 그리고 MR속 업소버를 적용한 전체차량의 모델링 및 스카이훅 제어기를 구성하여, 범프(bump) 가진 및 장애물회피 시험 하에서 MR속 업소버의 성능시험을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 수행한다.

2. MR속 업소버의 모델링

제안된 MR속 업소버의 구조를 Fig. 1에 도시하였다. MR속 업소버는 크게 실린더(cylinder), 피스톤(piston) 및 가스챔버(gas chamber)로 구분되며, 피스톤의 운동에 따른 로드(rod)의 부피를 보상하기 위하여 부동피스톤(floating piston)을 구성하였다. 또한 피스톤 내에 원형 덕트를 구성하기 위하여 피스톤 양끝단에 지그를 설치하였으며, 이를 통하여 MR유체가 자극(magnetic pole) 사이를 흐를 수 있

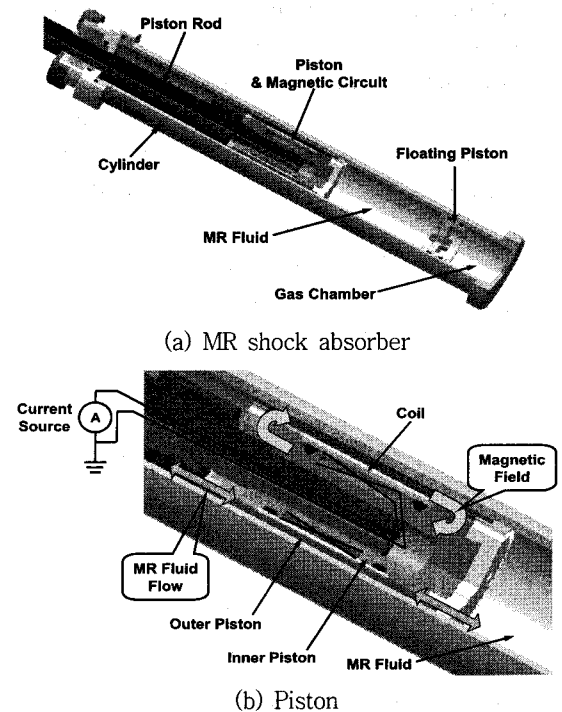


Fig. 1 Schematic configuration of the proposed MR shock absorber

도록 하였다. 따라서, 피스톤의 원형 덕트는 자기회로로 이루어지도록 하였으며, 부하되는 자기장에 따라 MR유체가 항복응력을 발생시킬 수 있도록 설계하였다. 내측 피스톤 양끝단 및 외측 피스톤은 강자성체(ferromagnetic substance)로 구성되어 자극을 형성하게 되며, 내측 피스톤의 중간부분은 상자성체(paramagnetic substance)로 구성되어 생성된 자기장이 자극에 집중되어 MR효과를 효율적으로 발생시킬 수 있도록 하였다.

피스톤을 중심으로 위쪽을 상부챔버, 아래쪽을 하부챔버로 정의하고, 이 두 챔버와 실린더 사이에 MR유체가 완전히 채워지게 된다. 자기회로에 전류가 인가되면 자극에 자기장이 부하되고, 자극을 지나는 MR유체에 의해 항복응력이 증가하게 되어 유체의 유동저항을 증가시키게 된다. 이것은 상부와 하부의 챔버에 압력강화를 발생시키고, 이에 따라 피스톤의 상하운동에 저항하는 방향의 감쇠력이 발생된다. 결과적으로, 자기장 무부하 시에는 피스톤의 속도에 따라 유체점성에 의한 감쇠력만을 발생되나, 자기장 인가 시 MR유체의 항복응력으로 인한 감쇠력이 발생된다.

MR속 업소버의 모델링을 위하여 MR유체는 비압축성 유체로 가정하였고, 동일공간에서의 내부압력은 모든 방향으로 균일하게 작용하며, 유로 형상에 따른 압력손실은 없다고 가정하였다. 따라서, MR유체의 유동을 두 평판 사이의 유동으로 가정한 유체저항(R_e)과 가스챔버의 가스압력에 의한 컴플라이언스(compliance, C_g)는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{12\eta L}{bh^3} \\ C_g &= \frac{V_0}{P_0\kappa} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, η 는 자기장 무부하 시 MR유체의 점성계수, L 은 자기회로내 유로의 길이, b 는 내측 전극의 바깥원둘레, h 는 자극의 간극을 나타낸다. 또한 V_0 , P_0 는 초기 작동점에서 가스챔버의 부피와 압력을 나타내며, κ 는 비열비(specific heat ratio)로 정적비열과 정압비열의 비를 나타낸다.

MR유체의 항복응력 변화에 따른 속 업소버 내의 압력강화는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$P_{MR} = 2 \frac{cL_p}{h} \tau_y(B) \quad (2)$$

여기서, τ_y 는 부하된 자기장에 의하여 발생된 항복응력이며, B 는 자기장에 의하여 발생된 자속밀도이다. c 는 유체의 속도와 관계된 계수이며, 일반적으로 2에서 3사이의 값이 사용된다. L_p 는 자극의 길이이다. 따라서, MR속 업소버의 동적 지배 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} F_D &= k_e x_p + C_e \dot{x}_p + F_{MR} \\ k_e &= \frac{A_r^2}{C_g}, \quad C_e = (A_p - A_r)^2 R_e \\ F_{MR} &= (A_p - A_r) P_{MR} \operatorname{sgn}(\dot{x}_p) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, x_p , \dot{x}_p 는 피스톤의 변위와 속도를 나타내며, A_p , A_r 은 피스톤과 피스톤 로드의 면적을 나타낸다.

3. MR속 업소버의 최적화

이 연구에서 사용된 MR유체는 미국 Lord사의 MRF-132DG⁽⁹⁾이며, 제공된 자료를 바탕으로 하여 항복응력을 다음과 같은 함수로 설정하였다(Fig.2).

$$\tau_y(B) = A_2 + \frac{(A_1 - A_2)}{1 + e^{(B-x_0)/dx}} \quad (4)$$

여기서 A_1 , A_2 , x_0 및 dx 는 각각 -5.09, 51.08, 0.44 및 0.19이다. Table 1에 MR속 업소버의 자기회로에 사용된 재료들의 자성물성치를 나타내었다. 강자성체는 저탄소강인 S20C를 가공 후 열처리하여 사

Table 1 Magnetic properties of the components

Component	Material	Relative permeability	Saturation flux density
Ferro-magnetic	S20C	2000	1.5 Tesla
Para-magnetic	Aluminum alloy	1	-
Coil	Copper	1	-
MR fluid	MRF-132DG	B-H curve ⁽⁹⁾	B-H curve ⁽⁹⁾
Air	-	1	-

용하였으며, 이에 대한 B-H선도를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 약 5 A/mm에서 1.5 Tesla에 포화됨을 확인할 수 있다. 상자성체로는 알루미늄합금을 사용하였으며, 코일은 구리를 사용하였다. MR속 업소버의 자기회로에 사용된 각각의 재료 구성을 Fig. 4에 자세히 나타내었다.

이 연구에서는 MR속 업소버 내의 자기회로를 위한 최적형상을 산출하기 위하여 상용소프트웨어인 ANSYS의 electromagnetic 해석을 사용하였으며, ANSYS 내에서 모델링, mesh, 해석 및 최적화 등을 수행하였다⁽¹⁰⁾. 최적화 기법은 first order optimization을 사용하였으며, 유한요소법을 이용한 설계최적화를 수행하기 위하여 목적함수(objective function)는 다음과 같이 감쇠력의 역수를 최소화하는 것으로 설정하였다.

$$Q = \frac{1}{F_D} \quad (5)$$

자기회로의 기하학적인 형상은 MR속 업소버의 성

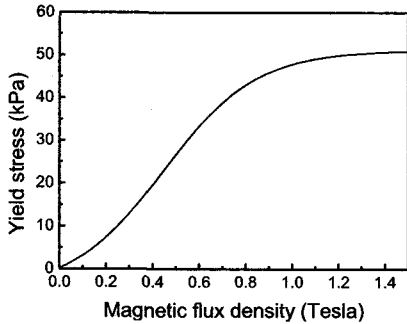


Fig. 2 The field-dependent yield stress of the MR fluid(MRF-132DG from Lord Corp.)

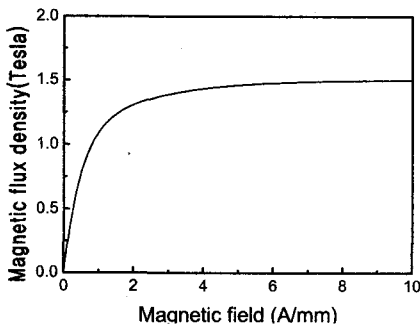


Fig. 3 The B-H curve of the low carbon steel (S20C)

능에 큰 영향을 미치기 때문에 코일(coil)의 폭(W_c), 자극의 길이(L_p) 및 외부자극(armature)의 폭(W_a)을 최적화 설계변수(design variable)로 선정하였다. MR속 업소버의 자기회로는 축대칭이므로 전자기 해석(electromagnetic analysis)을 위하여 2차원 요소인 plain13을 사용하여 모델링 하였으며, 유한요소 해석을 위하여 4변형요소를 사용하여 모델을 분할하였다. 해석을 수행한 후 자극부를 통과하는 MR유체의 항복응력을 구하기 위하여 평균자속밀도를 산출하였으며, 이를 식 (3)과 (4)에 대입하여 MR속 업소버의 감쇠력을 최종적으로 산출하였다.

제안된 MR속 업소버는 실제차량에 장착 후 성능 평가를 수행할 예정이므로, 실험용 승용차(매그너스,

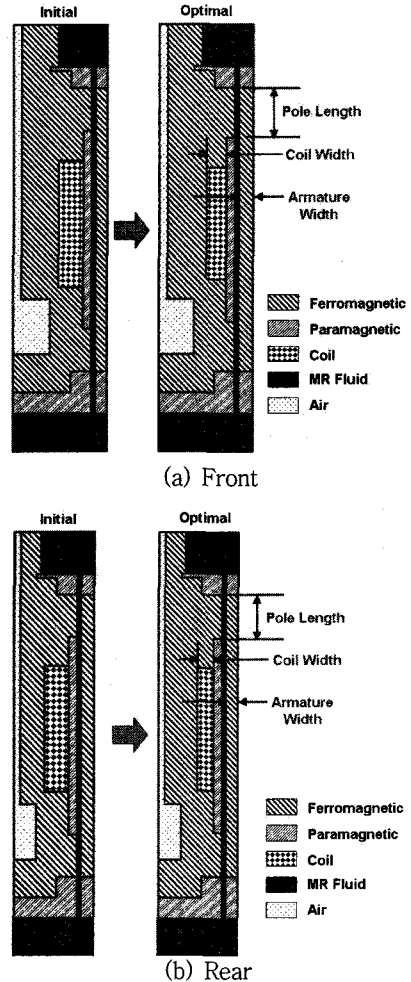


Fig. 4 2D FEA model of the initial and optimized MR shock absorbers

GM대우)에 적합한 상용화된 속 업소버의 외형 치수 및 조립부 치수 등을 만족하여야 한다. 따라서 최적화 해석 시 이를 설계 구속조건으로 설정하였으며, MR속 업소버의 작동모드는 2개의 고정된 평판 사이를 MR유체가 흐르도록 하는 유동모드로 선정하여 초기 모델링을 수행하였다. 해석 수행 시 코일의 폭, 자극의 길이 및 외부자극의 폭에 대한 범위는 각각

1~7 mm, 5~20 mm 및 1~6 mm로 설정하였으며, 초기값은 각각 6 mm, 10 mm 및 3 mm로 설정하였다. MR속 업소버의 피스톤 속도와 전류를 0.3 m/s 와 2.0 A/mm로 설정한 상태에서 1차해석 후 목적함수와 감쇠력의 초기값은 전류의 경우 각각 796.2×10^{-6} 과 1256.0 N으로 해석되었으며, 후륜의 경우 각각 1325.2×10^{-6} 과 754.6 N으로 해석되었다.

전·후륜 MR속 업소버에 대하여 최적화를 수행한 후 2차원 모델의 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 전륜의 경우 6번의 연산이 반복적으로 수행되었으며, 후륜의 경우 5번의 연산이 반복적으로 수행되어 최적화를 수행하였다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 연산을 반복함에 따라 초기 전·후륜의 목적함수는 각각 796.2×10^{-6} 및 1325.2×10^{-6} 의 값에서 655.5×10^{-6} 및 1020.4×10^{-6} 으로 수렴함을 확인할 수 있으며, 이때의 감쇠력은 목적함수가 감소함에 따라 전·후륜 각각 1256.0 N 및 754.6 N의 값에서 1525.6 N 및 980 N으로 약 25% 증가되었음을 확인할 수 있다. 전륜의 최적화 수행 후 최종 설계변수는 코일의 폭 4.94 mm, 자극의 길이 11.74 mm 및 외부자극의 폭 3.54 mm로 결정되었으며, 후륜의 경우 각각 4.05 mm, 10.32 mm 및 2.85 mm로 결정되었다. 추가적으로 MR 속 업소버 설계를 위한 최적화 수행결과를 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Fig. 6~8에 최적화된 전·후륜 자기회로의 다양한 결과를 도시하였다. Fig. 6은 자기회로의 자속밀도를 3차원으로 나타낸 결과이며, 최고 및 최저 자속밀도의 수치와 위치를 확인할 수 있다. 최고 자속밀도는 약 1.5 Tesla이며, 자기회로의 설계구조 제약으로 인하여 최고 자속밀도가 한 부분에 집중되었음을 확인할 수 있다. Fig. 7은 자기회로의 자속선을 2차원 평면에 도시한 그림이며, 자속선이 2개의 자극부에 집중되어 있어 MR효과가 효과적으로 발생할 수 있

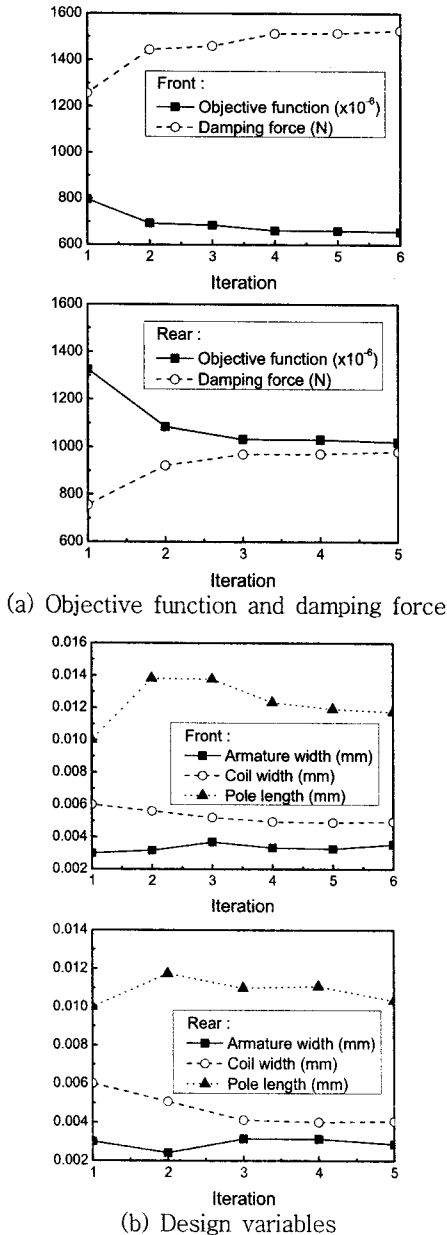


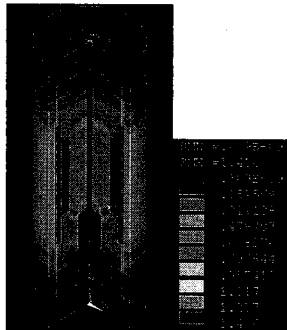
Fig. 5 Optimization results of the MR shock absorbers

Table 2 Optimization results for MR shock absorber design

	Design variable (mm)		Objective function ($\times 10^{-6}$) and damping force(N)	
	Initial	Optimal	Initial	Optimal
Front	$W_c=6$ $W_a=3$	$W_c=4.94$ $L_p=11.74$ $W_a=3.54$	$Q=796.2$ $F_D=1256.0$	$Q=655.5$ $F_D=1525.6$
Rear	$W_c=6$ $L_p=10$ $W_a=3$	$W_c=4.05$ $L_p=10.32$ $W_a=2.85$	$Q=1325.2$ $F_D=754.6$	$Q=1020.4$ $F_D=980.0$



(a) Front

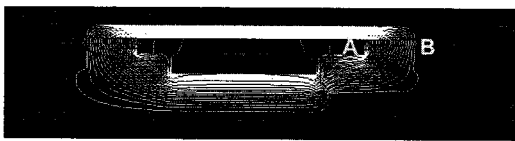


(b) Rear

Fig. 6 3D magnetic flux density of the optimized MR shock absorbers

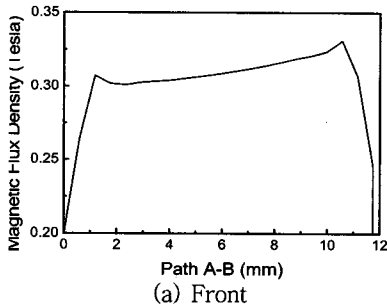


(a) Front

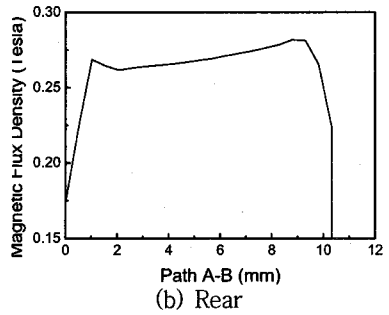


(b) Rear

Fig. 7 2D magnetic flux lines of the optimized MR shock absorbers



(a) Front



(b) Rear

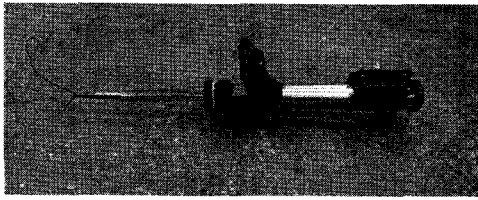
Fig. 8 Magnetic flux densities of magnetic poles along path A-B

음을 예상할 수 있다. 또한, 최종적으로 설계된 MR 속 업소버의 감쇠력을 수치적으로 예측하기 위한 A-B부분의 자속밀도를 Fig. 8에 도시하였으며, 이를 통하여 실제 제작될 MR속 업소버의 설계 적합성과 우수한 감쇠력을 예상할 수 있다.

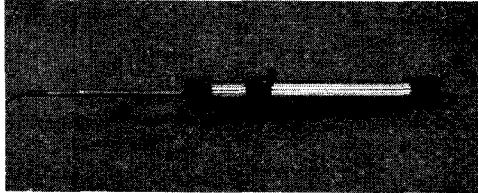
4. MR 속 업소버의 성능평가

이 연구에서는 최적설계를 통하여 Fig. 9와 같이 제작된 전·후륜 MR속 업소버의 자기장 증가에 따른 감쇠력 변화를 실험을 통하여 분석하였다. 이를 위하여 유압서보장치를 통해 MR속 업소버를 가진하였으며, 이때 MR속 업소버에서 발생된 가진변위는 LVDT(linear variable differential transducer)를 통해 측정되었다. 그리고 컴퓨터를 통하여 출력된 자기장 신호는 전류증폭장치를 통해 MR속 업소버에 부하되며, 이때 발생된 감쇠력은 로드셀(load cell)을 통하여 측정되었다⁽¹¹⁾.

Fig. 10은 MR속 업소버에 0, 1, 2 A/mm의 자기장을 부하한 경우 피스톤 속도에 따른 감쇠력 곡선이며, 유한요소법을 이용한 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타내었다. 또한 실험용 승용차에 장착된 상용 속 업소버에 대한 감쇠력 실험결과를 나타내어 MR속 업소버의 결과와 비교할 수 있도록 하였다. 그림에서와 같이 전륜에 피스톤 속도 0.0628 m/s 가진 및 자기장 0 A/mm 부하 시 203.1 N의 감쇠력이 발생되며, 자기장 2 A/mm 부하 시 1165.5 N으로 크게 증가되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 피스톤 속도 0.5027 m/s 가진 시 773.1 N이 1866.2 N으로 증가됨을 확인할 수 있다. 후륜의 경우에도 경향을 확인할 수 있으며, 이는 자기장의 제어로 넓은 감쇠

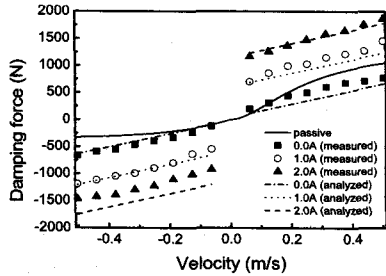


(a) Front

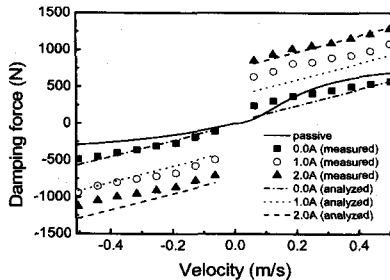


(b) Rear

Fig. 9 Photographs of the manufactured MR shock absorbers



(a) Front



(b) Rear

Fig. 10 Field-dependent damping forces of the MR shock absorbers

력 제어영역을 가질 수 있음을 의미한다.

5. 전체차량 제어성능

MR속 업소버가 적용된 MR현가장치와 전체차량의 지배방정식을 사용하여, MR속 업소버의 전체차량 제어성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석하

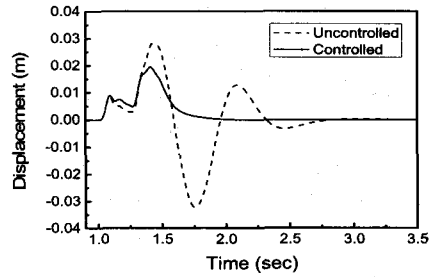
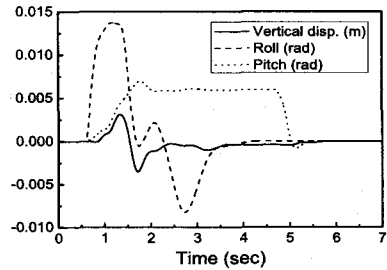
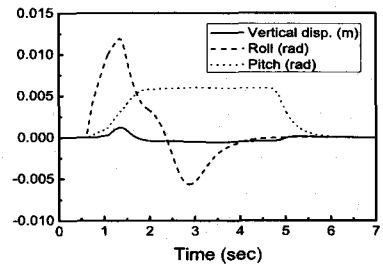


Fig. 11 Bump responses of the full-vehicle



(a) Uncontrolled



(b) Controlled

Fig. 12 Obstacle avoidance responses of the full-vehicle

였다⁽¹¹⁾. MR현가장치의 제어기는 각 차륜 위치에서의 차체의 수직속도를 요구 감쇠력으로 산정하는 스카이hook 제어기를 적용하였으며, 주행조건은 40 km/h로 단일 범프를 주행하는 것과 100 km/h로 장애물 회피 및 제동을 수행하는 것으로 하였다. 이에 대한 자세한 사항은 참고문헌 (11)에 기술되어 있으며, 본문에서는 생략하였다.

Fig. 11은 단일 범프를 주행 시 차량중심의 수직변위에 대한 결과이며, MR속 업소버의 제어 유무에 따른 결과를 비교하여 나타내었다. 그림에서와 같이 MR속 업소버를 사용하여 제어를 수행한 경우에 차량의 수직변위가 현저하게 감소되어 승차감이 향상되었음을 확인할 수 있다. Fig. 12는 장애물을 회피

및 제동 시 차량운동에 대한 결과이며, MR속 업소버의 제어 유무에 따라 결과를 나타내었다. 이를 통하여 MR속 업소버를 사용하여 제어를 수행한 경우에 차량의 수직방향 변위, 롤(roll) 및 피치(pitch)가 감소되어 차량의 승차감 및 주행안정성이 향상된 것을 확인할 수 있다. 이는 적용된 제어기에 의한 적합한 자기장이 MR속 업소버에 입력되어 알맞은 감쇠력이 생성되었기 때문이다.

6. 결 론

이 연구에서는 상용화된 속 업소버의 설계 구축조건에 의하여 제한된 MR속 업소버의 최적설계를 수행하고, 이를 통하여 제작된 MR속 업소버의 성능시험을 수행하였다. 먼저, MR유체의 항복응력 변화에 따른 MR속 업소버의 동적 지배 방정식을 도출하고, 전륜 및 후륜용 MR속 업소버를 최적화 기법을 적용하여 설계하였다. 유한요소해석 소프트웨어를 사용하여 감쇠력을 향상시키기 위한 최적설계를 수행하였으며, 이를 통하여 전·후륜 MR속 업소버의 자기회로를 위한 최적 설계변수를 도출하였다. 최종 설계변수를 이용하여 MR속 업소버를 제작한 후 자기장 부하에 따른 감쇠력 성능시험을 수행하고, 해석 결과 및 상용화된 속 업소버와 성능비교를 수행하였다. 마지막으로, MR속 업소버를 전체차량에 적용한 후 스카이훅 제어기를 이용하여, 범프 주행 및 장애물회피에 따른 우수한 제어성능을 확인하였다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 도약연구지원사업(과제번호 R17-2007-028-01000-0) 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

(1) Choi, S. B., Choi, Y. T., Chang, E. G. and Han, S. J., 1998, "Control Characteristics of a Continuously Variable ER Damper", *Mechatronics*, Vol. 8, pp. 143~161.
 (2) Carlson, J. D., Cantanzarite, D. M. and St. Clair, K. A., 1995, "Commercial Magneto-

rheological Fluid Devices", *Proceedings of the 5th International Conference on ER Fluids, MR suspensions and Associated Technology*, pp. 20~28.

(3) Spencer Jr., B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1997, "Phenomenological Model for a Megnetorheological Damper", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 230~238.

(4) Kamath, G. M., Wereley, N. M. and Jolly, M. R., 1998, "Characterization of Semi-active Magneto-rheological Fluid Lag Mode Damper", *Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Integrated Systems*, SPIE Paper 3329~3337, San Diego, CA.

(5) Wei, H. and Wereley, N. M., 2003, "Nondimensional Damping Analysis of Flow Mode Magnetorheological and Electrorheological Dampers", *Proceedings of IMECE'03*, 43135.

(6) Delivorias, R. P., 2004, "Application of ER and MR Fluid in an Automotive Crash Energy Absorber", Report No. MT04.18.

(7) Walid, H. E. A., 2002, "Finite Element Analysis Based Modeling of Magnetorheological Dampers", Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.

(8) Nicholas, C. R. and Wereley, N. M., 2004, "Volume-constrained Optimization of Magneto-rheological and Electro-rheological Valves and Dampers", *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp. 1303~1313.

(9) Lord Corporation, <http://www.lord.com>

(10) Nguyen Q. H., Han Y. M., Choi S. B. and Wereley N. M., 2007, "Geometry Optimization of MR Valves Constrained in a Specific Volume Using Finite Element Method", *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 6, pp. 2242~2252.

(11) Sung, K. G. and Choi, S. B., 2007, "Maneuver Analysis of Full-vehicle Featuring Electrorheological Suspension and Electro-rheological Brake", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 464~471.