

# MR 댐퍼를 적용한 자동차 현가장치의 진동제어 : 실차시험 평가

## Vibration Control of Vehicle Suspension Featuring Magnetorheological Dampers: Road Test Evaluation

성금길\*·최승복†

Kum-Gil Sung and Seung-Bok Choi

**Key Words** : Magnetorheological Fluid(자기유변유체), MR Damper(MR 댐퍼), Vibration Control(진동제어), Vehicle Suspension(자동차 현가장치), Road Test(실차시험)

### ABSTRACT

This paper presents vehicle road test of a semi-active suspension system equipped with continuously controllable magnetorheological (MR) dampers. As a first step, front and rear MR dampers are designed and manufactured based on the optimized damping force levels and mechanical dimensions required for a commercial middle-sized passenger vehicle. After experimentally evaluating dynamic characteristics of the MR dampers, the test vehicle is prepared for road test by integrating current suppliers, real-time data acquisition system and numerous sensors such as accelerometer and gyroscope. Subsequently, the manufactured four MR dampers (two for front parts and two for rear parts) are incorporated with the test vehicle and a skyhook control algorithm is formulated and realized in the data acquisition system. In order to emphasize practical aspect of the proposed MR suspension system, road tests are undertaken on proving grounds: bump and paved roads. The control responses are evaluated in both time and frequency domains by activating the MR dampers.

## 1. 서론

자동차 운전자와 승객의 승차감에 대한 요구는 나날이 증가하고 있으나, 승차감의 무리한 향상은 자동차의 조종안정성 감소를 유발한다. 이러한 자동차의 승차감과 조종안정성은 댐퍼를 포함한 현가장치에 의하여 확보될 수 있는 차량의 동적 성능이다. 이러한 동적 성능을 향상하고자 모터 혹은 유압밸브 등을 이용한 ECS(electronic control suspension)가 적용되고 있는 추세이나, 비연속적인 댐핑력, 구조의 복잡성 및 고가 등의 이유로 보편화 되지 않고 있는 실정이다. 최근에는 ER(electrorheological) 및 MR(magnetorheological) 유체를 이용한 반능동형 현가장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. ER 유체는 전기장(electric field)에 의하여 상변화가 일어나는 지능유체로서 반응속도가 매우 빠르기 때문에 차량용 댐퍼<sup>(1)</sup>를 비롯하여 엔진마운트, 브레이크/클러치, 벨브 등 각종 응용장치에 적용하려는 시도가 활발히 진행되고 있다.

한편, MR 유체는 자기장(magnetic field)에 의하여 상변화가 일어나는 지능 유체로서 ER 유체에 비하여

비교적 큰 항복응력을 발생시켜 보다 큰 힘을 요하는 각종 응용장치에 적용하려는 연구가 시도되고 있다. Carlson 등<sup>(2)</sup>은 차량용 MR 댐퍼를 제안하였으며, 스카이훅 제어기(skyhook controller)의 구현을 통하여 제안된 댐퍼의 우수성을 입증하였다. Spencer 등<sup>(3)</sup>은 지진을 방지하기 위해 MR 댐퍼를 제안하여 이론적 모델의 타당성을 입증하였다. 그리고, Kamath 등<sup>(4)</sup>은 반능동형 MR 댐퍼를 제안하고 댐핑력 히스테리시스(hysteresis)에 대한 이론적 모델을 제시하고 실험결과와 비교 분석하였다. 최근에 Choi 등<sup>(5)</sup>은 실린더형 MR 댐퍼를 제안하고, 1/4 차량에 HILS(hardware-in-the-loop simulation) 및 강건제어를 적용하여 제안된 댐퍼를 장착한 차량의 승차감 향상을 고찰하였다.

본 연구에서는 연속적인 제어가 가능한 MR 댐퍼를 개발하고, 이를 장착한 반능동 현가장치의 실차시험을 수행하고자 한다. 이를 위하여 중형차에 장착이 가능한 MR 댐퍼를 제안하고, 이에 최적화 기법을 적용하여 설계 및 제작을 완료한다. 제작된 전후륜 MR 댐퍼를 이용하여 자기장 부하에 따른 댐핑력 성능시험을 수행하고, 이를 실차시험용 차량에 장착한다. 실시간 승차감 제어를 수행하고 이를 평가하기 위하여, 실차시험용 차량에 전류공급장치, 실시간 데이터 처리장치 및 가속도계와 자이로스코프를 포함한 다양한 센서들을 설치한다. 실시간 처리장치에는 승차감 제어를 위한 스카이훅 제어기 및 센서들

† 교신저자; 인하대학교 기계공학과

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 868-1716

\* 인하대학교 기계공학과

의 신호를 처리하기 위한 알고리즘을 적용한다. 제안된 MR 현가장치의 실제 적용성을 평가하기 위하여, 범프로 및 주행로에서 실차시험을 수행하고 이러한 결과를 도시한다.

## 2. MR 댐퍼

제안된 MR 댐퍼의 구조를 Fig.1 에 도시하였다. MR 댐퍼는 크게 실린더, 피스톤 및 가스챔버로 구분되며, 피스톤의 운동에 따른 로드와 부피를 보상하기 위하여 부동피스톤을 구성하였다. 또한 피스톤 내에 원형 덕트(duct)를 구성하기 위하여 피스톤 양 끝단에 지그를 설치하였으며, 이를 통하여 MR 유체가 자극(magnetic pole) 사이를 흐를 수 있도록 하였다. 따라서, 피스톤의 원형 덕트는 자기회로로 이루어지도록 하였으며, 부하되는 자기장에 따라 MR 유체가 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 MR 효과를 효율적으로 발생시킬 수 있도록 하였다.

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

MR 댐퍼의 모델링을 위하여 MR 유체는 비압축성 유체로 가정하였고, 동일공간에서의 내부압력은 모든 방향으로 균일하게 작용하며, 유로 형상에 따른 압력손실은 없다고 가정하였다. 따라서, MR 유체의 유동을 두 평판사이의 유동으로 가정한 유체저항( $R_e$ )과 가스챔버의 가스압력에 의한 컴플라이언스(compliance,  $C_g$ )는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서,  $\eta$  는 자기장 무부하 시 MR 유체의 점성계수,  $L$  은 자기회로내 유로의 길이,  $b$  는 내측 전극의 바깥 원둘레,  $h$  는 자극의 간극을 나타낸다. 또한  $V_0$ ,  $P_0$  는 초기 작동점에서 가스챔버의 부피와 압력

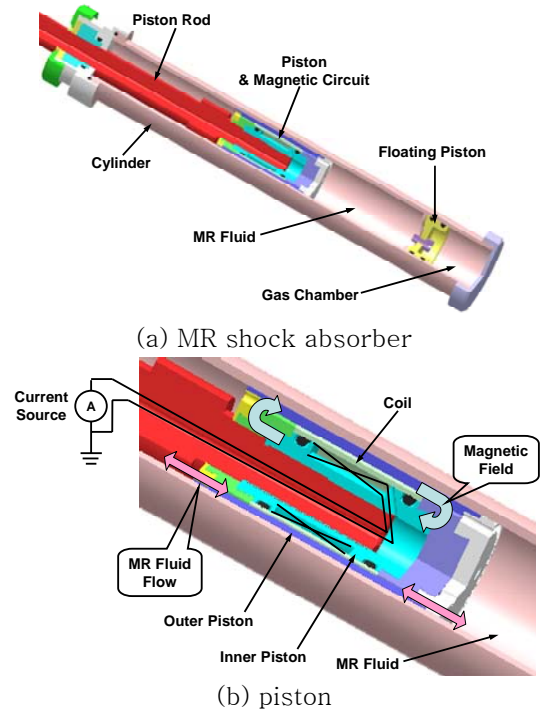


Fig. 1 Schematic configuration of the proposed MR damper

을 나타내며,  $\kappa$  는 비열비(specific heat ratio)로 정적 비열과 정압 비열의 비를 나타낸다.

MR 유체의 항복응력 변화에 따른 댐퍼 내의 압력강하(pressure drop)는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

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

여기서,  $\tau_y$  는 부하된 자기장에 의하여 발생된 항복응력이며,  $B$  는 자기장에 의하여 발생된 자속밀도(magnetic flux density)이다.  $c$  는 유체의 속도와 관계된 계수이며, 일반적으로 2 에서 3 사이의 값이 사용된다.  $L_p$  는 자극의 길이이다. 따라서, MR 댐퍼의 동적 지배 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_D = k_e x_p + C_e \dot{x}_p + F_{MR} \quad (3)$$

$$F_{MR} = (A_p - A_r) P_{MR} \text{sgn}(\dot{x}_p)$$

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

위 식(2)와 (3)으로부터 부하하는 자기장에 따라 댐퍼에 발생하는 댐핑력은 자기회로뿐만 아니라 MR 유체가 흐르는 덕트의 형상에도 영향을 받기 때문에, 실제 응용장치에 발생하는 댐핑력의 정확한 해석을 위해서는 이에 대한 보다 면밀한 연구가 필수적이다. 따라서, 본 연구에 선행하여 발표된 연구결과를 활

**Table 1** Design parameters of the MR dampers

Parameter	Value	
	Front	Rear
Duct Length ( $L$ )	82mm	82mm
Piston Head Area ( $A_p$ )	1661.90mm <sup>2</sup>	1194.59mm <sup>2</sup>
Piston Rod Area ( $A_r$ )	380.13mm <sup>2</sup>	132.73mm <sup>2</sup>
Maximum Stroke	164mm	187mm
Electrode Width ( $b$ )	123.53mm	99.90mm

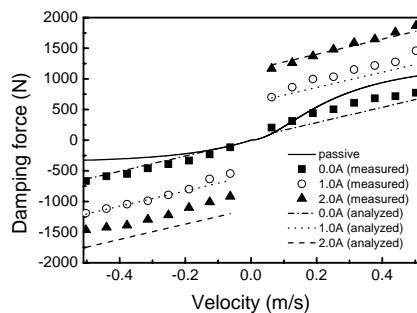


(a) front

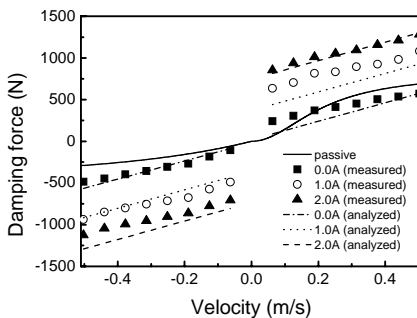


(b) rear

**Fig. 2** Photographs of the manufactured MR dampers



(a) front



(b) rear

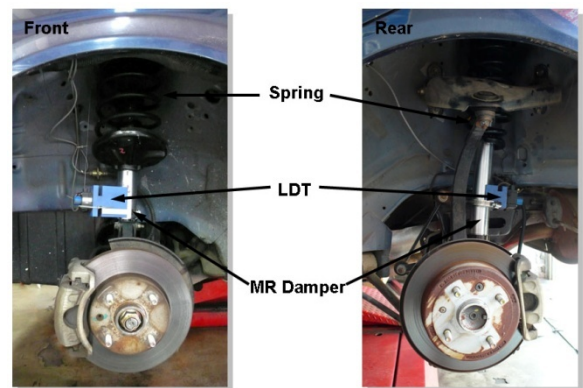
**Fig. 3** Field-dependent damping forces of the MR dampers

용하여 MR 댐퍼의 기하학적 최적화 설계 및 제작을 수행하였으며, 이에 따른 전후륜 댐퍼의 설계변수, 사진 및 댐핑력 성능곡선을 Table1 및 Fig.2~3 에 나타내었다<sup>(6)</sup>.

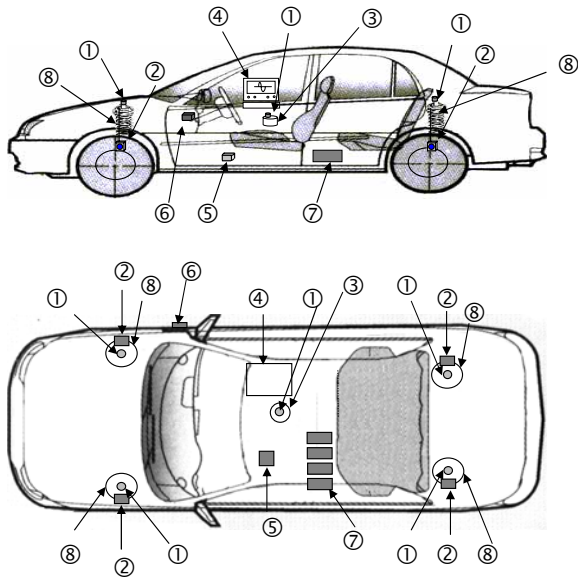
### 3. 실차시험

MR 댐퍼를 장착한 전체차량에 대하여 실차시험을 수행하였다. MR 현가장치는 시험에 사용된 중형차량의 상용 댐퍼를 기준으로 하여, 스프링(spring), 마운트(mount), 너클(knuckle) 및 각종 부품을 상용 현가장치와 동일하게 적용할 수 있도록 제작하였다. 기존 현가장치의 각종부품과 조립한 MR 현가장치를 차량에 장착한 후 Fig.4 에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 MR 현가장치와 wire-LDT(linear differential transducer)를 설치하였으며, wire-LDT의 본체는 MR 댐퍼에 고정하고 wire 는 차체에 고정하여, 차체와 차륜의 변위를 측정할 수 있도록 하였다.

실차시험을 위해 MR 현가장치 시스템을 장착한 시험차량의 개략도를 Fig.5 에 도시하였다. 주행 시 노면에 대한 시험차량의 진동제어를 수행하기 위하여 각각의 현가장치에 MR 댐퍼를 장착한 그림을 확인할 수 있다. 시험 중에 센서로부터 측정된 다양한 신호는 조수석의 테이블에 설치된 실시간 데이터 처리장치(real-time data acquisition system, ㉔)의 A/D 채널을 통하여 입력되며, 제어 알고리즘이 장착된 컴퓨터에서는 입력된 신호를 바탕으로 1ms 간격으로 차량의 거동을 분석하여 승차감 향상을 위한 요구 댐핑력을 계산한다. 컴퓨터로부터 계산된 제어 신호는 데이터 처리장치의 D/A 채널을 통하여 뒷좌석에 장착된 전류공급장치를 통하여 MR 댐퍼에 부하된다. 실차시험 수행 시 차량의 승차감에 대한 다양한 정보를 센서를 통하여 획득하기 위하여 그림에서와 같이 차량의 중심(C.G.)에서 수직방향 가속도

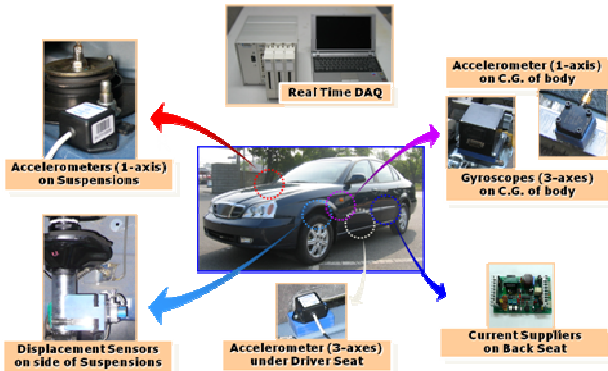


**Fig. 4** Installed front and rear MR suspension systems



- ① : 1-axis accelerometer
- ② : wire-type LDTs
- ③ : gyroscope
- ④ : real-time DAQ
- ⑤ : 3-axes accelerometer
- ⑥ : trigger
- ⑦ : current suppliers
- ⑧ : MR dampers

**Fig. 5** Layout of sensor and device configuration for the road test



**Fig. 6** Photograph of sensor and device configuration for the road test

를 측정하기 위한 1 축 가속도계(①), 각 현가장치의 상부에서 가속도를 측정하기 위한 가속도계(①), 각 현가장치의 변위를 측정하기 위한 변위센서(wire-LDT sensor, ②), 차량의 요, 롤 및 피치를 측정하기 위한 자이로스코프(gyroscope, ③) 및 승차감을 평가하기 위하여 운전석 아래에 3 축 가속도계(⑤)를 설치하였다.

본 연구에서는 간단하고 효율적인 스카이훅 제어기를 적용하여 진동제어 및 승차감 향상을 수행하였다. MR 현가장치를 위한 스카이훅 제어기의 요구 댐핑력( $u$ )은 각 차륜 위치에서의 차체의 수직속도( $\dot{z}_s$ )를 고려하여 다음과 같이 정의된다<sup>(7)</sup>.

$$u_i = C_{sky,i} \dot{z}_{s,i} \quad (i=1,2,3,4) \quad (4)$$

여기서,  $C_{sky}$  는 스카이훅 제어기의 제어 이득치이며, 물리적으로는 댐핑계수를 의미한다.

본 연구에서의 현가장치는 반능동형이므로 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$u_i = \begin{cases} u_i, & \text{for } u_i(\dot{z}_{s,i} - \dot{z}_{us,i}) > 0 \\ 0, & \text{for } u_i(\dot{z}_{s,i} - \dot{z}_{us,i}) \leq 0 \end{cases} \quad (i=1,2,3,4) \quad (5)$$

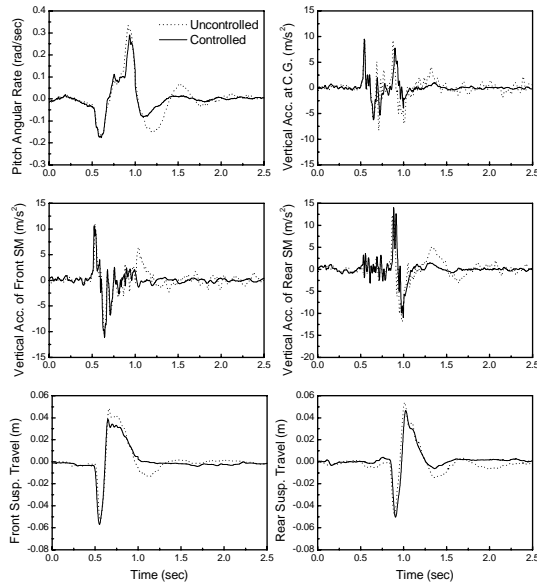
여기서,  $\dot{z}_{us}$  는 비현가질량의 수직속도이다.

한편, 위의 조건을 만족하는 입력에 의하여 MR 댐퍼에 제어신호를 발생시키기 위한 전류는 컴퓨터로부터 전류공급기를 통하여 MR 댐퍼에 공급된다<sup>(6)</sup>.

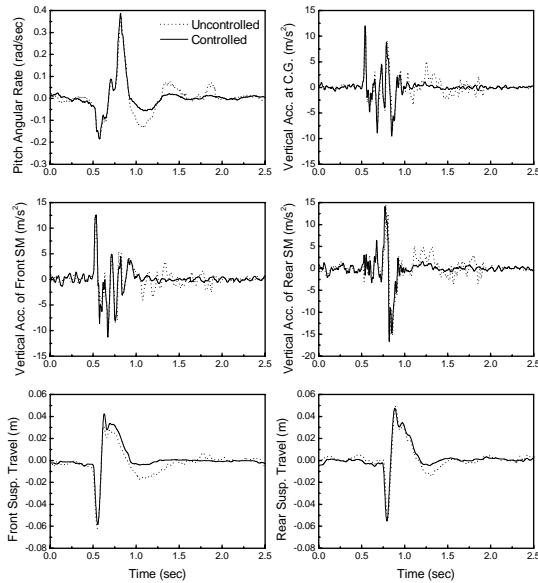
실차시험 수행 시 노면에 변화에 따라 현가장치에 통하여 전달되는 차량의 진동을 제어하기 위하여 필요한 상태변수는 제어기의 종류에 따라 다르며, 본 연구에서 제안된 스카이훅 제어기의 경우에는 각 현가장치의 상대변위이다. 이는 현가장치의 변위센서를 이용하여 측정되며, 이를 미분하여 상대속도를 도출한다. 현가장치 상단에 설치된 가속도 센서로부터 측정된 신호는 실시간 데이터 처리장치를 통하여 컴퓨터에 전달 한 후, 컴퓨터 내에 프로그램으로 코딩된 적분기를 거쳐 차체의 수직속도로 도출된다. 또한, 자이로스코프를 차량의 무게중심에 설치하여 차량의 요, 롤 및 피치를 측정하고, 차량의 무게중심에 설치된 가속도 센서로부터 수직 가속도를 측정하여 차량의 성능평가를 위한 신호로 사용한다. 운전석 밑의 3 축 가속도계는 자이로스코프의 신호와 함께 임의 노면 상에서의 승차감 평가를 위한 성능 지표의 산출을 위해 사용된다. Fig.6 은 실차시험을 위해 MR 현가장치와 각종 센서, 고전압 증폭장치 및 계측장비를 장착한 시험차량을 나타낸 사진이다.

## 4. 성능평가

MR 현가장치 및 스카이훅 제어로직을 적용한 실차시험 차량의 승차감 개선효과를 파악하기 위하여 범프 시험을 수행한 후 이에 대한 결과를 Fig.7~8 에 나타내었다. 시험결과는 피치각속도, 차체의 수직 가속도, 전후륜 현가장치 위치기 수직가속도 및 전후륜 현가장치 상대변위로 정리하여 나타내었다. Fig.7 은 30km/h 로 범프 노면을 주행했을 경우의 차량의 응답특성을 나타낸 것이다. 비제어의 경우에 비하여 스카이훅 제어기를 적용한 경우가 범프를 지난 후 차체 피치각속도의 잔여 진동이 빠르게 줄어드는 것을 알 수 있으며, 차체 수직가속도의 경우에서도 제어를 수행한 경우의 가속도가 감소한 것을 볼 수 있다. 전후륜의 수직가속도 및 현가장치 상대변위는 운전석 쪽의 가속도를 도시한 것으로 피치각속도 및 차체의 수직가속도와 동일하게 진동이 감쇠

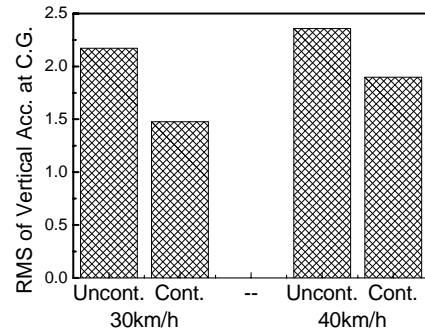


**Fig. 7** Bump responses of the MR suspension with 30km/h vehicle speed

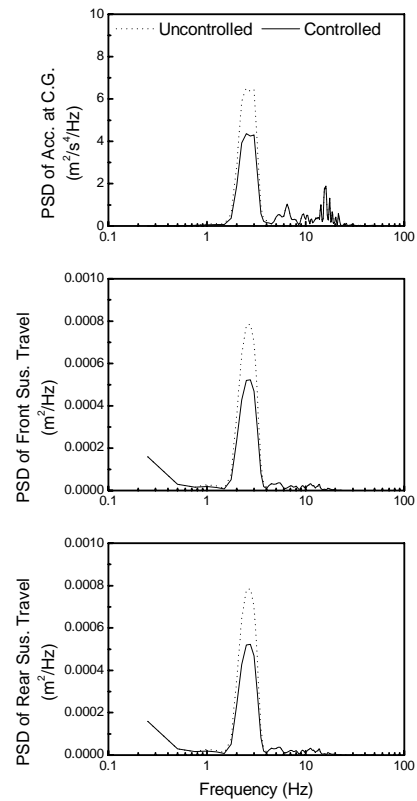


**Fig. 8** Bump responses of the MR suspension with 40km/h vehicle speed

하여, 차량의 승차감에 중점을 둔 제어기임에도 차량의 주행 안정성 또한 향상시킴을 알 수 있다. Fig.8 은 동일한 범프를 40km/h 로 주행하였을 때의 결과로 30km/h 의 결과와 유사한 제어결과를 확인할 수 있다. 이로부터 MR 현가장치를 장착한 실제 차량에 제어를 수행함으로써 차량의 승차감을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 각 제어기의 승차감 향상에 대한 성능을 파악하기 위하여 차체 중심의 수직가속도에 대한 RMS 결과를 Fig.9 에 도시하



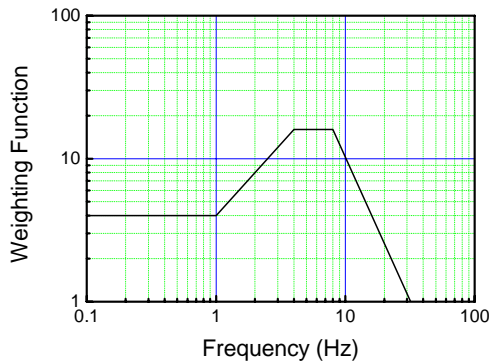
**Fig. 9** Performance comparison of vertical acceleration RMS



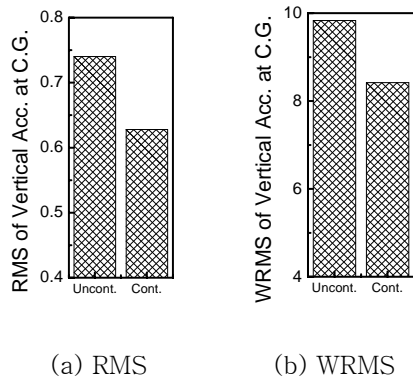
**Fig. 10** Paved road responses of the MR suspension with 72km/h vehicle speed

였다. 그래프에서 나타낸 바와 같이 스카이록 제어기의 경우 30 및 40km/h 에서 승차감 향상이 약 32 및 19.5% 향상됨을 확인할 수 있다.

도로에서 정속 주행 시 차량의 진동저감 및 승차감 개선효과를 평가하기 위하여, 포장도로에서 72km/h 로 성능시험을 수행한 후 결과를 PSD 로 정리하여 Fig.10 에 나타내었다. 결과에서와 같이 제어를 수행할 경우 차체 중심의 수직가속도 및 전후륜 현가장치 상대변위 결과에서 모두 우수한 성능을 확



**Fig. 11** Weighting function of ISO 2631 for ride comfort evaluation



**Fig. 12** Performance comparison of vertical acceleration of the MR suspension on paved road

인할 수 있으며, 이로부터 MR 현가장치를 장착한 차량에 제어를 수행함으로써 차량의 승차감을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 승차감 향상에 대한 성능을 보다 정확히 파악하기 위하여 차체 중심의 수직가속도에 대한 RMS (root mean square) 및 WRMS (weighted RMS) 결과 도출하였다. WRMS는 승차감 평가를 위하여 ISO2631에서 규정한 방법이며, Fig.11과 같이 특정 주파수값에 가중치를 곱한 RMS 값이다. Fig.12에 나타난 결과와 같이 스카이훅 제어기를 적용한 경우 RMS 및 WRMS가 약 15 및 14% 향상됨을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 연속적으로 제어가 가능한 반능동형 MR 댐퍼를 제안하고, 이를 장착한 실차시험용 차량의 승차감 평가를 수행하였다. 이를 위하여 실차시험용 차량에 장착이 가능한 MR 댐퍼를 제안하고, 이에 최적화 기법을 적용하여 최대 댐핑력 구현이 가능하도록 MR 댐퍼 설계 및 제작을 완료하였다. 제작된 전후륜 MR 댐퍼를 이용하여 자기장 부하에

따른 댐핑력 성능시험을 수행하고, 이를 실차시험용 차량에 장착하였다. 실차시험용 차량에 전류공급장치, 실시간 데이터 처리장치 및 가속도계와 자이로스코프를 포함한 다양한 센서들을 설치하여, 실시간 승차감 제어 및 평가를 수행하였다. 실시간 처리장치에는 승차감 향상을 위한 스카이훅 제어기 및 센서들의 신호를 처리하기 위한 알고리즘이 적용되었다. 제안된 MR 현가장치의 실제 적용성을 평가하기 위하여, 범프 및 주행로에서 실차시험을 수행하였으며, 제어 및 비제어시의 결과를 비교하였다. 또한, 승차감의 객관적 평가를 위하여 RMS 및 WRMS 방법을 통하여 승차감 향상을 확인하였다. 이를 통하여 제안된 전후륜 MR 댐퍼 및 스카이훅 제어기를 장착한 차량의 주행 시 승차감 향상을 확인할 수 있었다.

## 후 기

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

## 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 Magnetorheological 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) Choi, S. B. Choi and Sung, K. G., 2008, "Vibration Control of Magnetorheological Damper System Subjected to Parameter Variations", *International Journal of Vehicle Design*, Vol.46, No.1, pp.94~110.
- (6) 성금길, 최승복, 2008, "유한요소법을 이용한 MR 속 업소버의 최적설계", *한국소음진동공학회논문집*, Vol.18, No.2, pp.169~176.
- (7) 성금길, 최승복, 2007, "ER 현가장치 및 ER 브레이크를 적용한 전차량용의 거동분석", *한국소음진동공학회논문집*, Vol.17, No.5, pp.464~471.