Transactions of the KSNVE, 23(5) : 463~471, 2013
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2013.23.5.463

한국소음진동공학회논문집 제 23 권 제 5 호, pp. 463~471, 2013
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

MR 댐퍼를 이용한 전자제어 현가장치의 승차감 평가

Ride Comfort Evaluation of Electronic Control Suspension Using a Magneto-rheological Damper

성 금 길† · 최 승 복*
Kum-Gil Sung and Seung-Bok Choi

(Received March 29, 2013 ; Revised March 29, 2013 ; Accepted April 18, 2013)

Key Words : Magneto-rheological Fluid(자기유변유체), Magnetic Field(자기장), Damper(댐퍼), Electronic Control Suspension(ECS, 전자제어 현가장치), Ride Comfort(승차감)

ABSTRACT

This paper presents design and control of electronic control suspension(ECS) equipped with controllable magnetorheological(MR) damper for passenger vehicle. In order to achieve this goal, a cylindrical type MR fluid damper that satisfies design specification of a middle-sized commercial passenger vehicle is proposed. After manufacturing the MR damper with design parameters, their field-dependent damping forces are experimentally evaluated and compared with those of a conventional damper. A quarter-vehicle MR ECS system consisting of sprung mass, spring, tire, controller and the MR damper is established in order to investigate the ride comfort performances. On the basis of the governing equation of motion of the suspension system, five control strategies(soft, hard, comfort, sport and optimal mode) are formulated. The proposed control strategies are then experimentally realized with the quarter-vehicle MR ECS system. Control performances such as vertical acceleration of the car body and tire deflection are evaluated in frequency domains on random road condition. In addition, performance comparison of WRMS(weighted root mean square) of the quarter-vehicle MR ECS system on random road are undertaken in order to investigate ride comfort characteristics.

1. 서 론

자동차의 현가장치는 승차감과 주행안정성을 결정하는 주요한 장치로서 자동차를 구성하는 중요한 부분이다[1]. 일반적으로 승차감을 향상시키기 위해서는 댐핑력(damping force)이 낮은 현가장치가 필요로 하나, 이 경우 승차감은 뛰어나지만 급가속, 급제동 및 급선회 등의 경우에는 심한 피치(pitch), 롤(roll) 및 히브(heave) 등의 자세변화로 인하여 주행안정성이 감소되게 된다. 반면에, 댐핑력이 높은 현가장치의 경우 각종 운전상황에서 발생되는 자동차의 자세변화는 노면점착(ride holding)을 통하여 억제되어 주행안정성이 향상될 수 있으나, 노면의

† Corresponding Author ; Member, School of Mechanical and Automotive Engineering, Yeungnam College of Seicence and Technology
E-mail : kgsung@ync.ac.kr
Tel : +82-53-650-9214, Fax : +82-53-625-0861
* Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University

‡ Recommended by Editor Weui Bong Jeong
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

진동이 흡수되지 않고 차체에 직접 전달되므로 운전자 및 승객의 승차감이 저하된다. 이러한 이유로 인하여 승차감과 주행안정성 두 가지를 동시에 만족하는 자동차 현가장치 개발에는 어려움이 있다. 현재 주로 사용되고 있는 기계식 현가장치는 댐퍼(damper)의 댐핑력이 일정 값으로 고정되어 있어, 상반된 요구를 동시에 만족시킬 수 없는 한계가 있다. 승차감과 주행안정성 두 가지를 동시에 만족시키기 위해서는 주행조건 및 노면조건에 적합하도록 주행 중 현가장치의 특성을 변화시켜야 하며, 이를 위하여 최근에 연구되고 있는 것이 전자제어 현가장치(electronic control suspension, ECS)이다. ECS는 주행속도와 도로조건에 따라 댐핑력을 가변시켜 차체의 자세를 제어하고, 이를 통하여 승차감과 주행안정성을 동시에 향상시키는 것을 목적으로 하는 전자제어 시스템이다. 기존의 상용 ECS는 모터 및 유압장치 등을 사용하여 댐핑력의 변화를 2~4단으로 조절하는 방식이나, 에너지소비, 구조의 복잡성 및 경제성 등을 이유로 고가의 차량에만 적용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 MR(magneto-rheological) 유체를 이용한 댐퍼를 적용하여 새로운 ECS를 제안하고자 한다.

MR 유체는 자기장(magnetic field)에 의하여 상변화가 일어나는 지능 유체이며, 비교적 큰 항복응력을 발생시켜 큰 힘을 요하는 각종 응용장치에 적용하려는 연구가 시도되고 있다. Carlson et al[2]은 차량용 MR 댐퍼를 제안하였으며, 스카이훅 제어기(sky-hook controller)의 구현을 통하여 제안된 댐퍼의 우수성을 입증하였다. Spencer et al[3]은 지진을 방지하기 위해 MR 댐퍼를 제안하여 이론적 모델의 타당성을 입증하였다. 그리고, Kamath et al[4]은 반능동형 MR 댐퍼를 제안하고 댐핑력 히스테리시스(hysteresis)에 대한 이론적 모델을 제시하고 실험결과와 비교 분석하였다. 최근에 Choi et al[5,6]은 실린더형 MR 댐퍼를 제안하고, MR 댐퍼를 장착한 시스템의 댐핑력 제어특성을 고찰하였다.

MR 댐퍼를 장착한 ECS의 승차감 평가를 위해서는 다양한 조건 하에서의 실차실험이 요구되나, 이는 시간적, 비용적 측면에서 비효율적인 문제가 있어 1/4차량에 대하여 실험을 진행하였다. 이를 위하여 이 연구에서는 실제 중형차의 현가장치에 장착할 수 있는 MR 댐퍼를 설계 및 제작하고, 자기장 부하에 따른 MR 댐퍼의 댐핑력 성능시험을 수행한다. 실제차량의 운행 시 보다 정확한 실시간 제어를 수행할 수 있도록 MR 댐퍼의 시간지연을 고려하며, 이를 통하여 제안된 MR 댐퍼의 ECS 적용 타당성을 검증한다. MR 댐퍼를 이용한 중형차용 ECS의 승차감 향상을 실험을 통하여 입증하기 위하여 MR 댐퍼를 1/4차량 현가장치에 적용한 후, 이에 대한 모델링 및 지배방정식을 도출하고, MR 댐퍼를 이용한 ECS의 제어를 위하여 소프트(soft), 하드(hard), 안락(comfort), 스포츠(sport) 및 최적(optimal)의 5가지 모드를 구성한 후 주행 조건에 따른 차량의 승차감 향상을 실험을 통하여 입증한다.

2. MR 댐퍼

이 연구에서는 MR 유체가 가지고 있는 항복응력을 이용한 실린더형 MR 댐퍼를 제안하고 모델링하였으며, 그 구조를 Fig. 1에 도시하였다. MR 댐퍼는 크게 실린더, 피스톤 및 가스챔버로 구성되며, 피스톤의 운동에 따른 피스톤로드의 부피를 보상하기 위하여 부동피스톤을 구성하였다. 또한 피스톤 내에 원형 덕트(duct)를 구성하기 위하여 피스톤 양끝단에 지그를 설치하였으며, 이를 통하여 MR 유체가 원형덕트 내의 자극(magnetic pole) 사이를 원활히 흐를 수 있도록 하였다. 따라서, 피스톤의 원형덕트는 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[7]. MR 댐퍼는 자기장 무부하 시 피스톤의 속도에 따라 유체점성에 의한 댐핑력만을 발생시키게 되나, 자기장 부하 시 MR 유체의 항복응력으로 인한 댐핑력이 가해지므로 더 큰 댐핑력을 발생시키게 되는 장치이다. 따라서, MR 댐퍼는 기존의 수동(passive) 댐퍼와 달리 자기장에 따라 연속적으로 제어 가능한 댐핑력을 발생시킬 수 있는 반능동(semi-active) 댐퍼이다.

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.

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

여기서, η는 자기장 무부하 시 MR 유체의 점성계수, L은 원형덕트의 길이, b는 내측 전극의 바깥 원둘레, h는 자극의 간극을 나타낸다. 또한 V_0, P_0는 초기 작동점에서 가스챔버의 부피와 압력을 나타내며, κ는 비열비(specific heat ratio)로 정적비열과 정압비열의 비를 나타낸다.

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

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

여기서, τ_y는 부하된 자기장에 의하여 발생된 항복응력이며, B는 자기장에 의하여 발생된 자속밀도(magnetic flux density)이다. c는 유체의 속도와 관계된 계수이며, 일반적으로 2에서 3사이의 값이 사용된다. L_p는 자극의 길이이다. 따라서, MR 댐퍼의 동적 지배방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

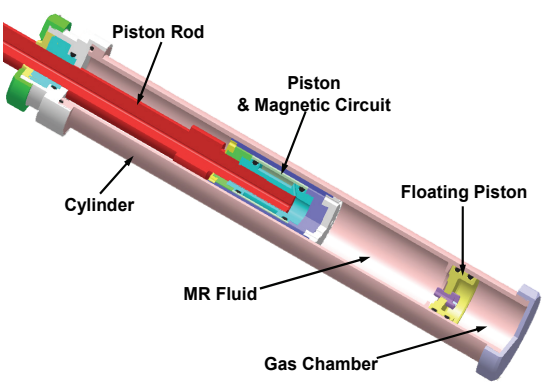


Fig. 1 Schematic configuration of the proposed MR damper

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

여기서,

$$k_e = \frac{A_r^2}{C_g}, \quad C_e = (A_p - A_r)^2 R_e$$

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

이다. 여기서, x_p, $\dot{x}_p$는 피스톤의 변위와 속도를 나타내며, A_p, A_r은 피스톤과 로드의 면적을 나타낸다.

위 식 (2)와 (3)으로부터 부하되는 자기장에 따라 댐퍼에 발생하는 댐핑력은 자기장 부하에 따른 자속밀도 뿐만 아니라 MR 유체가 흐르는 덕트의 형상에도 영향을 받기 때문에, 실제 응용장치에 발생되는 댐핑력의 정확한 해석을 위해서는 이에 대한 보다 면밀한 연구가 필수적이다. 따라서, 이 연구에 선행하여 발표된 연구결과를 활용하여 맥퍼슨 스트럿(MacPherson Strut)형 현가장치에 장착할 수 있는 MR 댐퍼의 기하학적 최적화 설계 및 제작을 수행하였으며, 이에 따른 댐퍼의 사진을 Fig. 2에 나타내었다[7].

Fig. 3은 MR 댐퍼에 공급된 전류의 크기를 0.0, 1.0 및 2.0A로 증가시켰을 경우의 MR 댐퍼에서 발생된 댐핑력을 속도에 따라 나타낸 것이다. 이때의 댐핑력은 각각의 속도에서의 최대 댐핑력으로 구해지며, 피스톤 속도는 가진 진폭을 ±20 mm로 고정시키고 가진 주파수를 0.5 Hz에서 4.0 Hz까지 변화시켜 얻었다. 자기장 증가에 따라 MR 댐퍼의 댐핑력이 연속적으로 증가됨을 알 수 있으며, 낮은 피스톤 속도에서뿐만 아니라 높은 피스톤 속도에서도 높은 댐핑력이 발생됨을 확인할 수 있다. 그림에서와 같이 피스톤 속도 0.0628 m/s 가진 및 전류 0.0 A 부하 시 203.1 N의 댐핑력이 발생되며, 전류 2.0 A 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. 이로부터 피스톤 속도에 관계없이 자기장의 제어만으로도 넓은 제어영역을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

이 연구에서는 MR 댐퍼에 사각파형(step wave)의 전류를 공급하여 댐핑력이 정상상태의 댐핑력에 63.2 %가 될 때의 시간, 즉 시상수를 구하여 응답시간을 도출하였고, 부하되는 사각파형 입력의 주파수

Fig. 2 Photograph of the manufactured MR damper

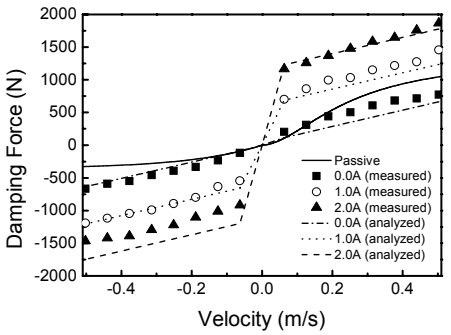
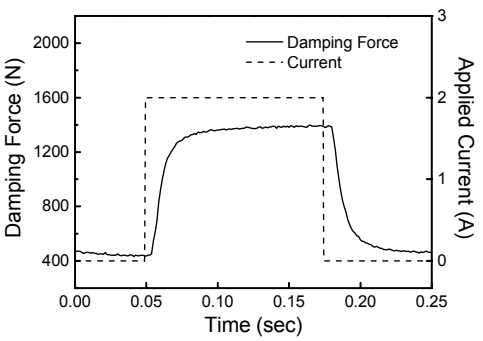
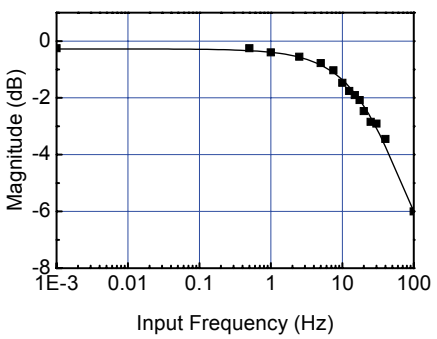


Fig. 3 Field-dependent damping forces of the MR damper



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 4 Damping force responses of the MR damper

를 증가시켰을 때의 댐핑력과 연속적으로 전류를 부하했을 때 발생되는 댐핑력의 비를 구하여 댐퍼가 지닌 대역폭을 측정하였다. Fig. 4(a)는 사각파형 입력전류 2.0 A가 1초간 부하되는 경우의 댐핑력 응답을 측정한 결과이며, 이 경우 댐핑력의 응답속도는 23 msec로 측정되었다. 또한 MR 댐퍼의 응답성능을 주파수영역에서 평가하기 위하여 사각파형 입력전류의 주파수를 증가시키는데 따른 댐핑력 변화를 Fig. 4(b)에 나타내었다. MR 댐퍼에 연속적인 전류를 입력하였을 때 얻은 정상상태의 댐핑력을 기준으로 각 자기장 입력 주파수에서 얻은 댐핑력의 크기를 정리한 결과 -3 dB일 때 30 Hz의 대역폭을 보였다. 일반적으로 차량설계 시 안정성을 위한 차체의 공진주파수는 1~2 Hz로 설계되며, 주행안정성을 위한 차륜의 공진주파수는 10~13 Hz로 설계된다. 따라서 이 연구에 사용된 댐퍼는 두 공진영역에서 충분한 제어성능을 발휘할 수 있으며, 이를 통하여 ECS에서 요구하는 승차감 및 주행안정성 두 가지의 목표를 동시에 만족하기 위하여 MR 댐퍼가 충분한 제어성능을 발휘할 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 제어기 설계

MR 댐퍼를 장착한 1/4차량의 지배방정식을 도출하기 위하여, 차량의 차체는 강체로 가정하고, 실제 자동차에서 발생할 수 있는 타이어의 댐핑은 타이어의 강성(k_t)에 비하여 무시할 만큼 작으므로 고려하지 않는다는 가정을 통하여 차량에 대한 모델을 단순화하였다. 따라서, 차륜은 비현가질량(unsprung mass, m_u)과 타이어 공기압에 따른 강성만을 갖는 모델로 하였다. 이를 고려한 1/4차량 및 MR 현가장치에 대한 시스템의 모델을 Fig. 5에 도시하였으며, 제어입력에 따른 MR 댐퍼의 댐핑력 발생시간을 시상수로 고려하여 현가질량(m_s, sprungmass)과 비현가질량(m_u, unsprungmass)의 운동방정식으로 설정하였다.

$$
\begin{aligned}
m_s\ddot{z}_s &= -k_s z_s - c_s\dot{z}_s + k_s z_u + c_s\dot{z}_u - F_{MR} \\
m_u\ddot{z}_u &= k_s z_s + c_s\dot{z}_s - (k_t + k_s)z_u - c_s\dot{z}_u + F_{MR} + k_t z_r \\
\dot{F}_{MR} &= -\frac{1}{\tau}F_{MR} + \frac{1}{\tau}u
\end{aligned}
\tag{4}
$$

여기서, τ 는 MR댐퍼의 시상수를 의미한다. 제안된

1/4차량 모델의 상태방정식은 식 (4)의 운동방정식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathrm{x}} &= A\mathrm{x} + B\mathrm{u} + Lz_r \\ \dot{y} &= C\mathrm{x} \end{aligned} \tag{5}$$

여기서,

$$\mathrm{x} = \begin{bmatrix} z_s & \dot{z}_s & z_u & \dot{z}_u & F_{MR} \end{bmatrix}^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} & -\frac{1}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_t+k_s}{m_u} & -\frac{c_s}{m_u} & \frac{1}{m_u} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}^T,$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_t}{m_u} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

이다. 상태변수는 각각 현가질량의 변위와 속도, 비현가질량의 변위와 속도 및 부하되는 자기장에 의한 댐핑력이며, 1/4차량의 차체질량 m_s는 실제 중형 차량의 질량을 고려하여 310 kg으로 적용하였다. 또한 비현가질량, 현가장치의 스프링 강성(k_s)및 타이어의 강성(k_t)은 각각 40 kg, 27 MN/m 및 211 MN/m으로 적용하였다.

이 연구에서는 MR 댐퍼를 장착한 ECS의 제어를 위하여 소프트, 하드, 안락, 스포츠 및 최적의 5가지 모드를 제안하다. 소프트모드는 주행안정성 보다는 승차감 향상을 위하여 MR 댐퍼에 0.0 A를 부하하여 최소의 댐핑력을 발생시키는 것을 의미하며, 하드모드는 승차감 보다는 주행안정성을 위하여 MR 댐퍼에 2.0 A를 부하하여 최고의 댐핑력을 발생시키는 것을 의미한다. 또한 안락, 스포츠 및 최적모드에서는 MR 현가장치를 장착한 차량의 성능향상을 고찰하고자 스카이훅 제어기를 사용하였다. 스카이훅 알고리즘은 Karnopp et al[8]에 의하여 제안되었으며, Fig. 6과 같이 차체 위의 공간상에 절대고정변위를 갖는 가상의 댐퍼를 설치하고 이때 발생되는 가상 댐퍼의 댐핑력을 요구 댐핑력으로 사용하는 것이다. 스카이훅 알고리즘의 요구댐핑력은 각 차륜 위치에서의 차체의 수직속도를 고려하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$u = C_{sky} \cdot \dot{z}_s \tag{6}$$

여기서, C_{sky}는 제어이득치이며, 물리적으로 댐핑계수를 의미하며, 위 식에서 도출된 요구댐핑력은 MR 댐퍼의 댐핑력과 같다. 식 (5)와 (6)을 이용하여 안락, 스포츠 및 최적모드를 위한 제어이득치를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 결정하였다. 이 연구에서 안락, 스포츠 및 최적모드를 위한 제어이득치는 각각 1130, 10000 및 6570으로 결정되었으며, 이는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 범프(bump) 노면 하에서 제어와 비제어시의 RMS(root mean square) 비로 나타낸 성능지수(performance index) J_{CF}, J_{CF} 및 J_{CF}를 최소화하기 위한 값이다.

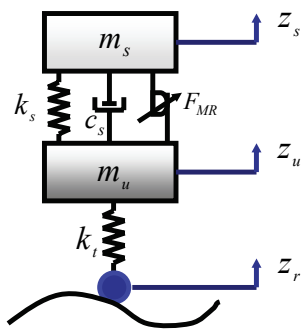


Fig. 5 Quarter vehicle model of the MR suspension system

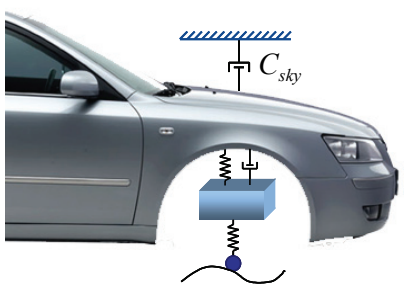
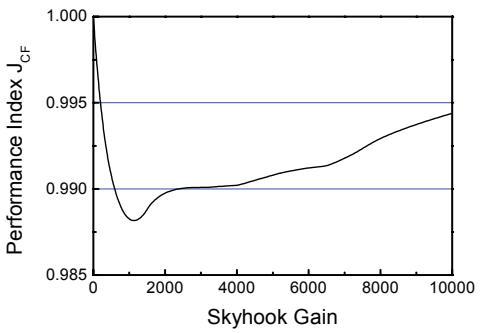


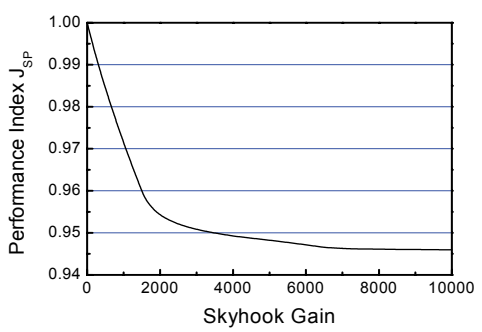
Fig. 6 Sky-hook controller for the MR suspension system

$$J_{CF} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} \ddot{z}_{sc}(i)^2}{\sum_{i=1}^{N} \ddot{z}_{suc}(i)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

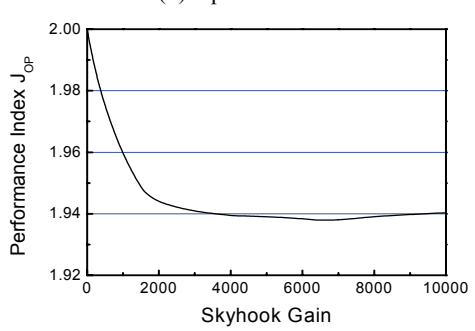
$$J_{SP} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(z_{uc}(i) - z_{rc}(i)\right)^2}{\sum_{i=1}^{N} \left(z_{uuc}(i) - z_{ruc}(i)\right)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$



(a) Comfort mode



(b) Sport mode



(c) Optimal mode

Fig. 7 Performance indexes of the quarter-vehicle MR ECS system

$$J_{OP} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} \ddot{z}_{sc}(i)^2}{\sum_{i=1}^{N} \ddot{z}_{suc}(i)^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(z_{uc}(i) - z_{rc}(i)\right)^2}{\sum_{i=1}^{N} \left(z_{uuc}(i) - z_{ruc}(i)\right)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

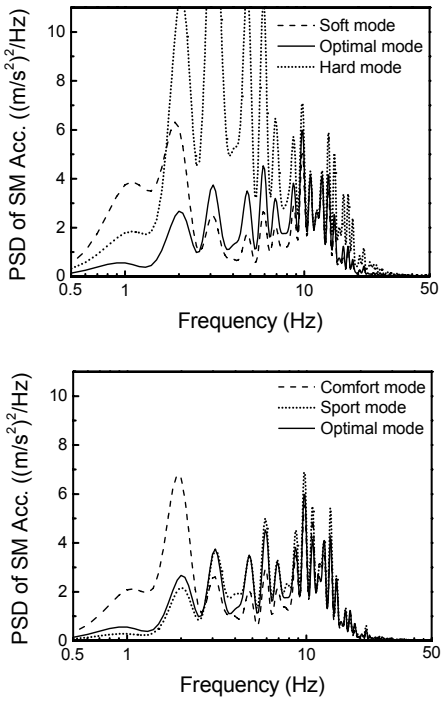
여기서, $\ddot{z}_{sc}$ 와 $\ddot{z}_{suc}$ 는 각각 제어와 비제어 시 현가질량의 수직가속도이며, $z_{uc}(i) - z_{rc}(i)$ 와 $z_{uuc}(i) - z_{ruc}(i)$ 는 각각 제어와 비제어 시 타이어의 하중편차(deflection)이다. 안락 및 스포츠모드는 각각 승차감 및 주행안정성을 향상시키기 위하여 식 (7)과 (8)과 같이 현가질량의 수직가속도 및 하중편차의 RMS 비(ratio)로 설정되며, 최적모드의 경우는 승차감과 주행안정성을 동시에 만족시키기 위하여 식 (9)와 같이 수직가속도와 하중편차 RMS비의 합으로 설정된다. 이때 MR 현가장치는 반능동형이므로 위의 수식에 구해진 제어신호에서 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$u = \begin{bmatrix} u, & for \;\; u(\dot{z}_s - \dot{z}_u) > 0 \\ 0, & for \;\; u(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \le 0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

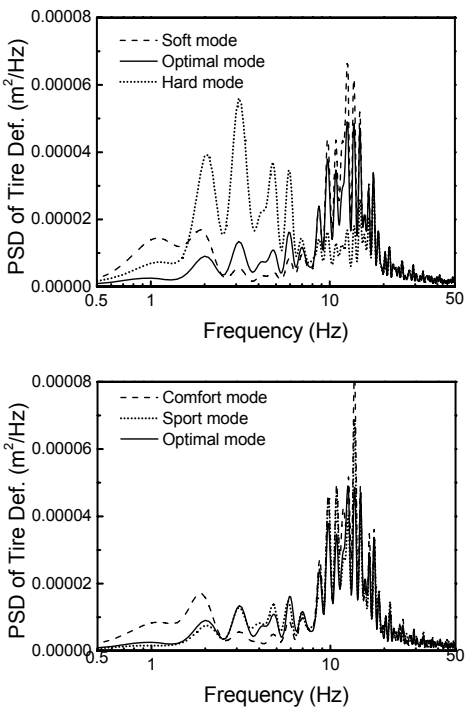
4. 승차감 평가

이 연구에서는 Fig. 8과 같은 1/4차량을 구성하여

Fig. 8 Experimental apparatus for the MR suspension system



(a) Vertical acceleration of sprung mass



(b) Tire deflection

Fig. 9 Random road responses of the MR ECS system

MR 현가장치 시스템을 이용한 전자제어 현가장치에 대한 성능시험을 수행하였다. 1/4차량 시험 방법은 MR 댐퍼 외에 차체질량, 스프링 및 타이어를 장착하여 시험하는 방법이기 때문에, 비교적 간단한 방법으로 실차실험과 유사한 성능평가를 얻을 수 있는 장점이 있다. 컴퓨터 D/A 신호에 의하여 제어되는 유압서보장치를 통해 MR 현가장치 시스템을 가진하였고, 현가질량 및 비현가질량에 발생한 변위는 LVDT를 통하여 측정되었다. 그리고 컴퓨터를 통하여 전달된 입력신호는 전류공급장치를 통하여 MR 댐퍼에 부하되며, 이때 발생된 댐핑력은 로드셀을 통하여 측정되었다.

MR 현가장치 시스템을 장착한 1/4차량의 ECS 성능을 고찰하기 위하여 노면상태를 포장도로와 유사한 랜덤(random) 입력 형태로 만들어 72 km/h로 주행하는 경우에 대한 응답특성 실험을 수행하였으며, 소프트, 하드, 안락, 스포츠 및 제어 모드 시 결과를

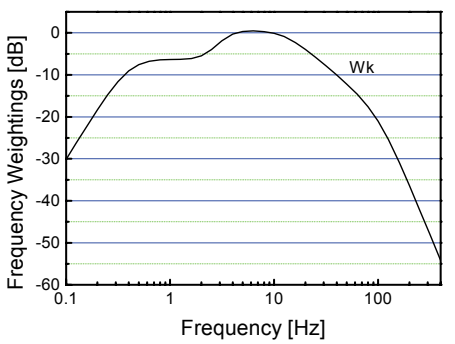


Fig. 10 Weighting curves in ISO 2631-1 for ride comfort evaluation

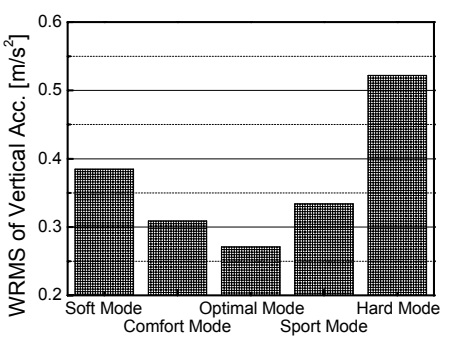


Fig. 11 Performance comparison of WRMS of the MR ECS system on random road

PSD(power spectrum density)로 나타내어 Fig. 9에 도시하였다. 승차감을 비교할 수 있는 현가질량 가속도 결과의 차량공진(1~2 Hz) 부근 및 주행안정성을 비교할 수 있는 타이어 하중편차 결과의 차륜공진(10~12 Hz) 부근에서 모두 최적모드가 성능이 매우 우수함을 확인할 수 있으며, 소프트 및 하드모드의 경우에 비하여 제어를 수행한 안락, 스포츠 및 최적모드의 승차감 및 주행안정성 성능이 비교적 우수한 것을 확인할 수 있다. 또한, 승차감 향상에 대한 성능을 보다 정확히 분석하기 위하여 현가질량 수직가속도에 대한 WRMS(weighted root mean square) 결과를 도출하였다[9]. WRMS는 승차감 평가를 위하여 ISO2631에서 규정한 방법이며, 특정 주파수 값에 Fig. 10과 같은 가중치를 곱한 RMS값이다[10]. Fig. 11의 현가질량 수직가속도의 WRMS 결과와 같이 소프트 및 하드모드의 경우에 비하여 제어를 수행한 안락, 스포츠 및 최적모드에서 승차감이 우수한 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 MR 댐퍼를 실제차량의 ECS에 적용 시 승차감뿐만 아니라 피치, 롤 및 히브 등의 다양한 주행상태 하에서도 안정성이 우수할 것으로 판단할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 MR 댐퍼를 장착한 현가장치의 ECS 적용을 위한 성능평가를 수행하였다. 이를 위하여 중형 승용차의 현가장치에 장착이 가능한 MR 댐퍼를 설계 및 제작하였으며, 자기장 부하에 따른 댐핑력 성능시험을 수행하였다. MR 댐퍼를 1/4차량 현가장치에 적용한 후, 이에 대한 모델링 및 지배방정식을 도출하였다. 1/4차량 현가장치의 승차감 및 주행안정성 향상을 평가하기 위하여 제어기를 구성하였으며, 이를 평가할 수 있도록 1/4차량 현가장치 시스템을 위한 가진 실험장치를 구성하였다. MR 댐퍼를 이용한 ECS의 제어를 위하여 소프트, 하드, 안락, 스포츠 및 최적모드를 이용한 제어모드를 구성한 후 랜덤노면 주행에 따른 차량의 승차감 및 주행안정성을 비교하였으며, 이를 통하여 MR 댐퍼를 차량 ECS에 적용 시 승차감 향상을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 향후, MR 댐퍼를 ECS에 적용할 경우 급가속, 급제동 및 급선회 경우의 차량운동 성능을 보다 정확히 분석하기 위하여 전체차량 시뮬레이션 및 HILS(hardware-in-the-loop-simulation) 시험을 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 2012학년도 영남이공대학교 연구조성비 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Gillespie, T. D., 1992, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, PA.

(2) Carlson, J. D. and 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 pp. 3329~3337.

(5) 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.

(6) Lee, J. W., Seong, M. S., Woo, J. K. and Choi, S. B., 2012, Modeling and Vibration Control of Small-sized Magneto-rheological Damper, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 11, pp. 1121~1127.

(7) Sung, K. G. and Choi, S. B., 2008, Optimal Design of Magnetorheological Shock Absorbers for Passenger Vehicle via Finite Element Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 169~176.

(8) Karnopp, D. C., Corsby, M. J. and Harwood, R. A., 1974, Vibration Control Using Semi-active Force Generators, ASME Journal of Engineering for Industry,

Vol. 96, No. 2, pp. 619~626.

(9) International Organization for Standardization Mechanical Vibration and Shock − Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration, 1997(ISO2631-1 :1997).

(10) Lin, K. Y., Hwang, J. R., Chang, S. H., Fung, C. P. and Chang, J. M., 2006, System Dynamics and Ride Quality Assessment of Automobile, Society Automotive Engineering, 2006-01-1225.

Kum-Gil Sung received the BS and PhD degrees in Mechanical Engineering from Inha University in 1998 and 2008 respectively. He is currently Director of Innovation Center of Engineering Technology Education and assistant professor in Yeungnam College of Science and Technology, Daegu. His research interests are design and control of mechanical systems using smart materials.

Seung-Bok Choi received the BS degree in Mechanical Engineering from Inha University in 1979, MS and PhD degrees from Michigan State University in 1986 and 1990 respectively. He is currently Dean of the School of Mechanical Engineering and fellow professor in Inha University, Incheon. He is a fellow of NAEK(National Academy Engineering of Korea), KAST(The Korean Academy of Science and Technology). His research interests are robust controller design for linear and nonlinear systems, and design and control of various control systems using smart actuators.