

MR 유체를 이용한 운전석 댐퍼의 성능특성

남무호*

Performance Characteristics of Seat Damper Using MR Fluid

Moo-Ho, Nam*

Abstract

This paper presents the development of a semi-active seat damper using MR fluids and the performance analysis of seat suspension system with a MR seat damper. An annular orifice type MR seat damper is proposed for a seat suspension of a commercial vehicle. After formulating the governing equation of motion, then an appropriate size of the seat damper is designed and manufactured. Following the evaluation of field-dependant damping force characteristics, the controllability of the damping force is experimentally demonstrated in time domain by adopting PID controller. A semi-active seat suspension with the proposed MR damper is constructed and its dynamic model is established. Subsequently, vibration control capability of the semi-active suspension system is investigated by employing the sky-hook controller.

Key Words : MR Fluid(MR 유체), MR Damper(MR 댐퍼), Seat Damper(운전석 댐퍼), Seat Suspension(운전석 현가장치)

1. 서론

최근 들어 상업용 차량의 수요가 급증하면서 차량의 성능뿐만 아니라 운전자의 안전과 개선된 운전 조건에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^(1,2) 더욱이 상업용 차량의 운전자는 거친 환경과 장시간의 운전으로 인하여 많은 피로를 느끼게 되므로 이를 줄이는 연구가 제기되고 있다. 상업용 차량의 경우 외부로부터 운전자에게 전달되는 진동을 적절히 절연시키기 위한 장치로 주 현가장치(primary

suspension), 캐빈 현가장치(cabin suspension)와 운전석 현가장치(seat suspension)가 있다. 특히, 운전석 현가장치는 진동이 운전자에게 직접적으로 전달되는 장치로 운전자의 승차감과 피로에 중요한 영향을 주고있다.

기존의 운전석용 수동형 댐퍼는 일정한 댐핑특성을 가지고 있으므로 다양한 형태의 가진입력에 적절히 대응하지 못하는 한계를 가지고 있으며, 유압을 이용한 능동형 댐퍼는 수동형 댐퍼의 단점을 극복할 수 있지만 복잡한 구조의 기계적인 구동장치가 필요하며 전력소모가 크며

* 유한대학 기계과

고가인 단점을 가지고 있다.^(3,4) 최근에는 수동형 댐퍼의 한계를 극복하고 능동형 댐퍼의 우수한 진동절연효과를 기대할 수 있는 ER 유체(electrorheological fluid)를 이용한 반능동형 댐퍼를 운전석 현가장치에 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(5,6,7,8) ER 유체는 일반적으로 전기장 무부하 시에는 뉴토니언(Newtonian) 유체의 거동을 보이지만, 전기장 부하에 따라 유체 내부에 분포된 입자들이 두 전극 사이에 체인 형상의 구조를 형성함으로써 유체의 유동에 저항하는 힘을 발생시키게 된다. 따라서, ER 유체는 일반적인 유체와는 달리 전기장 부하에 따라 항복응력이 발생하며, 이러한 항복응력은 전기장의 세기에 따라 조절이 가능한 역학적 특성을 가진다. 따라서, 이를 이용한 ER 댐퍼는 감쇠력의 크기를 연속적으로 조절할 수 있으며, 단순한 설계, 빠른 응답특성, 낮은 전력소모를 특징으로 한다. 한편, MR 유체(magnetorheological fluid)는 자기장 부하에 의하여 ER 유체가 가지는 역학적 특성을 가질 수 있으며, 현재 개발된 MR 유체는, ER 유체에 비하여 상당히 높은 항복응력을 갖는 장점과 느린 응답특성의 단점을 지니고 있다. 이러한 MR 유체를 이용한 댐퍼(이하 "MR 댐퍼"로 칭함)를 구조물에 적용하여 지진으로부터 건물을 보호하기 위한 연구가 수행된 바 있으며,⁽⁹⁾ 중형 승용차용 주 현가장치에도 MR 댐퍼를 적용하여 노면에 의한 진동과 충격을 효율적으로 완화시키기 위한 연구가 수행된 바가 있다.⁽¹⁰⁾ 본 연구는 상업용 차량 운전석으로 직접 유입되는 진동을 효과적으로 절연하기 위한 MR 댐퍼를 제안하고 이에 대한 성능특성을 해석하여 실용화에 필요한 기초자료를 확보하는 것을 목적으로 한다.

이를 위하여, MR 유체의 거동을 빙햄(Bingham) 유체 거동으로 가정하여, 운전석용 MR 댐퍼의 동적모델링을 수행하였으며, 이를 토대로 MR 댐퍼를 설계 제작하여 자기장 부하에 따른 댐퍼특성의 변화와 PID제어기를 이용한 감쇠력 제어성능을 실험적으로 고찰하였다. 또한 MR 댐퍼가 적용된 운전석 현가장치의 동적 지배방정식을 도출하였으며, 반능동형 작동기에 효과적인 스카이훅 제어기를 설계하여 진동제어성능을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 고찰하였다.

2. 운전석용 MR 댐퍼

2.1 MR 유체의 빙햄특성

본 연구에서 사용한 MR 유체는 낮은 투자율(permeability)의 용매에 1~10 μm 크기의 상자성(paramagnetic) 입자

를 분산시킨 안정한 비콜로이드 용액이며, 자기장이 가해짐에 따라 유체의 항복응력이 변화되는 특성을 가지고 있다. 이러한 매커니즘에 의해 MR 유체는 서론에서 설명한 ER 유체와 마찬가지로 빙햄거동을 하며, 이러한 현상을 Fig. 1에 나타내었다. MR 유체의 거동은 일반적으로 다음과 같은 빙햄모델로 표현된다.

$$\tau = \tau_y(H) + \eta\dot{\gamma}, \quad \tau_y(H) = \alpha H^\beta \quad (1)$$

여기서, τ 는 MR 유체의 전단응력을 나타내며, η 는 MR 유체의 기본점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비(shear rate), H 는 코일에 흐르는 전류 I 에 비례하는 자기장을 나타낸다. $\tau_y(H)$ 는 MR 유체의 항복응력을 표현하는 것으로서 H 의 증가와 더불어 증가한다. 비례상수 α 와 지수 β 는 MR 유체에 사용된 용매와 입자의 종류, 조성비, 조성환경 등에 의하여 결정되는 고유 특성치이다. 본 연구에서 사용된 MR 유체는 Carbonyl iron과 Hydrocarbon oil을 합성한 것으로 입자체적비는 32%인 미국 Lord사에서 제조한 MRF-132LD이며, 제조사에서 제공받은 자료에 의하면 α 와 β 는 각각 83.46과 1.25이다.

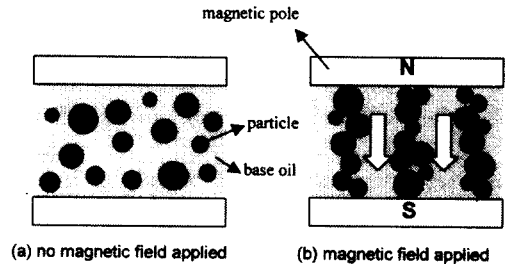


Fig. 1 Phenomenological behavior of an MR fluid

2.2 운전석용 MR 댐퍼의 모델링

본 연구에서 제안한 운전석용 MR 댐퍼의 구조를 Fig. 2에 도시하였다. 제안된 운전석용 MR 댐퍼는 본체부분과 외부 어큐뮬레이터로 구성되어 있으며, 외부 어큐뮬레이터는 다이어프램(diaphragm)을 경계로 가스챔버와 유체 챔버로 구성되었다. 환형 오리피스형 MR 댐퍼의 피스톤은 내측 피스톤과 외측 피스톤으로 이루어져 있으며, 내측 피스톤에 코일이 감겨져 있다. 코일에 흐르는 전류와 발생하는 자기장은 다음의 식에 의해 결정된다.

$$H = \frac{NI}{2h} \quad (2)$$

여기서, H 는 자기장의 세기, N 은 감긴 코일의 권수, I 는 코일에 인가된 전류이며 h 는 자극간극이다. 내측 피스톤에 감겨져 있는 코일에 전류가 흐르게 되면 피스톤부에 자기장이 형성되고, 이로 인해 환형 오리피스 사이를 유동하는 MR 유체는 순간적으로 뉴토니안 유동에서 비형 플라ستيك 유동으로 전환하게 된다. 즉 자기장이 인가됨에 따라 환형 오리피스 사이의 MR 유체의 항복응력은 증가하게 되어 유체 유동저항을 증가시킴으로써 감쇠력을 증가시킬 수 있다. 따라서 기존의 고정된 특성만을 가지고 있는 수동식 댐퍼와 다르게 피스톤 속도에만 의존적이지 않고 자기장에 따라 연속적이고 제어 가능한 감쇠력을 발생시킬 수 있다. 운전석용 MR 댐퍼의 모델링을 위한 가정으로 MR 유체는 비압축성 유체로 가정하였으며, 유체의 흐름을 두 평판 사이의 유동으로 해석하면 유체가 환형 오리피스를 지날 때 발생하는 유체저항은 다음과 같다.

$$Re = \frac{12\eta L}{bh^3} \quad (3)$$

여기서, L 은 환형 오리피스의 길이, b 는 환형 오리피스의 둘레를 나타낸다. 자기장 부하 시 MR 유체의 전단응력 증가에 따른 압력강하는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta P_{MR} = 2 \frac{L_m}{h} \tau_y(H) = 2 \frac{L_m}{h} \alpha H^\beta \quad (4)$$

여기서, L_m 은 자기장이 인가되는 자극 길이이며 ΔP_{MR} 은 유체 유동에 저항하는 압력이므로 유체의 유동방향에 따라 그 부호가 변화한다. 본드 그래프(bond graph) 모델로부터 운전석용 MR 댐퍼의 동적 지배방정식을 구하면 다음과 같이 구해진다.¹⁷⁾

$$\dot{q}_d = -A_r V_p \quad (5)$$

$$F_d = -\frac{A_r}{C_g} q_d + (A_p - A_r)^2 R_c V_p + (A_p - A_r) \Delta P_{MR} \cdot \text{sgn}(V_p) \quad (6)$$

여기서, q_d 는 가스챔버의 부피, A_r 은 피스톤로드의 단면적, V_p 는 피스톤 속도, F_d 는 감쇠력, A_p 는 피스톤의 단면적, C_g 는 가스챔버의 컴플라이언스를 나타낸다. 식 (5), (6)으로부터 감쇠력 F_d 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_d = k_c x_p + c_c \dot{x}_p + F_{MR} \cdot \text{sgn}(\dot{x}_p) \quad (7)$$

$$\text{여기서, } k_c = \frac{A_r^2}{C_g}, c_c = (A_p - A_r)^2 R_c, F_{MR} = (A_p - A_r) \Delta P_{MR}$$

로 정의되며, 식 (7)의 우변은 각각 가스챔버의 압축성으로 의한 감쇠력과 유체점성과 오리피스에 의한 유체 저항력, 자기장인가 시 발생하는 MR 유체의 항복응력에 의한 힘이다. 제안된 모델을 근거로 하여 운전석용 MR 댐퍼를 설계 및 제작하였으며, Fig. 3에 제작된 운전석용 MR 댐퍼의 사진을 나타내었다.

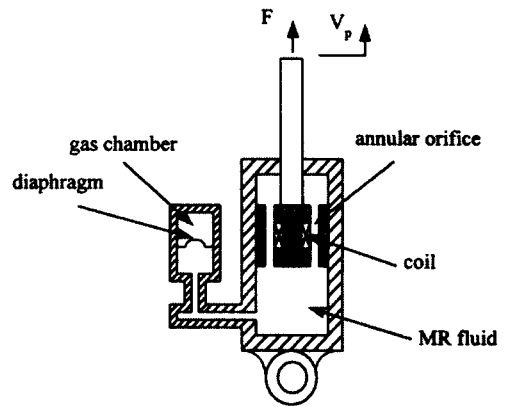


Fig. 2 Schematic diagram of the MR seat damper

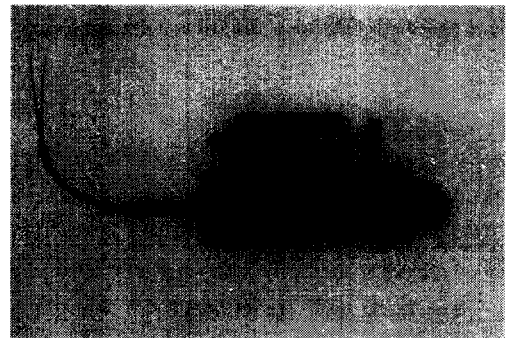


Fig. 3 Photograph of the MR seat damper

3. 운전석용 MR 댐퍼의 성능 분석

본 연구에서는 자기장에 따른 운전석용 MR 댐퍼의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 분석하였다. 운전석용 MR 댐퍼의 감쇠력 실험을 수행하기 위하여 Fig. 4

와 같은 시험장치를 구성하였다. 모터와 펌프로 구성된 유압 서보 장치에 의해 운전석용 MR 댐퍼에 진동을 주고, 이 때의 가진변위는 가진기의 하부에 장착된 LVDT로 측정하며, 컴퓨터의 D/A 변환기를 통하여 출력된 신호는 전력 공급기를 거쳐 댐퍼의 피스톤에 감겨 있는 코일에 전류를 인가하게 되며, 이때 자기장 부하에 따른 감쇠력은 로드셀을 이용하여 측정하게 된다.

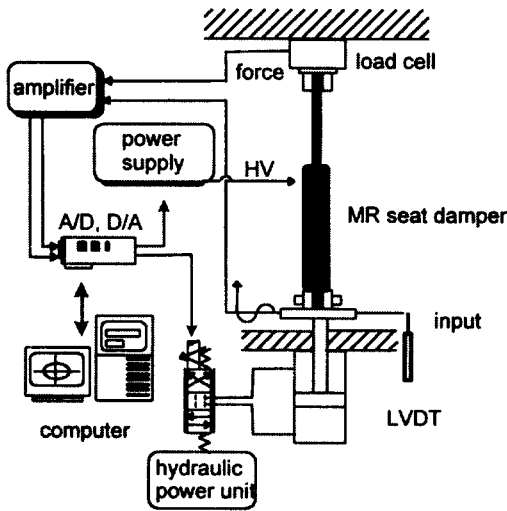


Fig. 4 Schematic diagram of the MR seat damper tester

3.1 자기장에 따른 감쇠력

Fig. 5는 운전석용 MR 댐퍼에 공급되는 전류를 0에서 2A까지 0.5A씩 증가시키면서 측정한 감쇠력을 시간영역에서 도시한 것이다. 본 실험모델에 도입된 차량의 경우 탑재된 시트의 공진 주파수가 1.5Hz이기 때문에 가진 조건은 주파수 1.5Hz, 진폭 10mm로 하였다.⁶⁾ 자기장이 인가되지 않았을 때는 173N의 감쇠력이 발생되었으나, 2A의 전류에 의한 자기장인가 시에는 421N으로 약 2.5배의 감쇠력의 증가가 있었다. 이상에서 알 수 있듯이 자기장이 증가할수록 댐퍼의 감쇠력이 증가함을 알 수 있다. 이는 자기장부하 시 MR 유체가 항복응력을 갖게 되어 피스톤이 상하운동을 하기 위해서는 더 많은 힘이 요구되기 때문이다. 이러한 사실로부터 운전석용 MR 댐퍼는 피스톤 속도와 무관하게 단지 자기장만의 제어로 감쇠력이 조절됨을 알 수 있다.

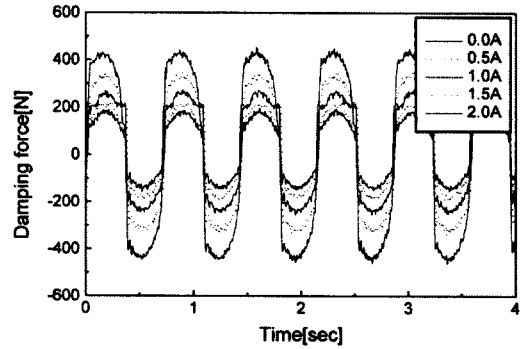


Fig. 5 Time history of damping force

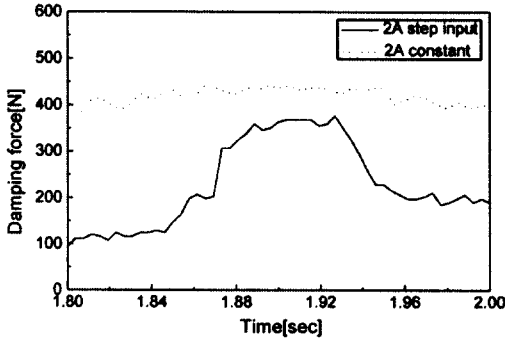
3.2 응답 특성 및 제어 성능

Fig. 6은 본 연구에서 사용된 운전석용 MR 댐퍼의 응답 특성을 나타낸 그림이다. 운전석용 MR 댐퍼에 전류가 인가될 때 댐퍼 내부의 MR 유체가 항복응력을 갖기 위해서는 일정시간의 시간 지연이 발생한다. 또한, 일정하게 자기장이 인가되었을 경우와 계단 입력으로 자기장이 인가되었을 경우에 발생하는 감쇠력이 다소 차이가 남을 알 수 있다. 이것은 시스템에 자기장이 인가될 때 감쇠력을 발생시키기까지의 MR 유체가 갖고 있는 시간지연에 운전석용 MR 댐퍼가 갖고 있는 시간 지연이 부가되어 발생한 차이이다.

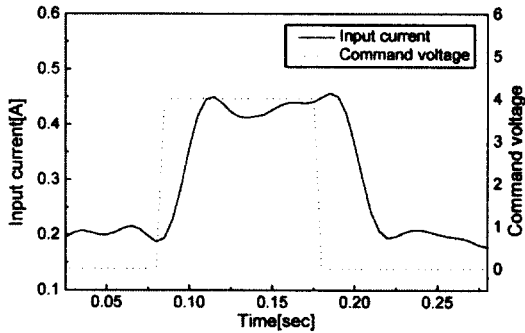
또한, 운전석용 MR 댐퍼의 제어 성능을 알아보기 위하여 감쇠력 추종 실험을 수행하였으며, Fig. 7에 그 결과를 나타내었다. 이 실험에서 운전석용 MR 댐퍼의 감쇠력이 요구감쇠력을 추적하기 위하여 사용된 제어 알고리즘은 오차신호에 비례, 적분, 미분의 과정을 수행하여 제어입력을 결정하는 PID제어기이며, 제어알고리즘은 다음과 같다.

$$U = k_p e + k_i \int e + k_d \dot{e}, \quad e = F_d - F_m \quad (8)$$

여기서 k_p 는 비례계수, k_i 는 적분계수, k_d 는 미분계수, e 는 오차를 나타내며, F_d 와 F_m 은 각각 요구감쇠력과 측정된 감쇠력을 나타낸다. 감쇠력 추종 실험은 임의의 시간 구간에 대해 실시하였다. 본 실험에서는 실험시작 2초 후부터 제어를 수행하여, 이후 2초간 요구감쇠력을 추종하였을 때의 차이를 확인하였으며, 이로부터 제어 수행 시 운전석용 MR 댐퍼에서 발생하는 감쇠력이 요구감쇠력과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 통하여 운전석용 MR 댐퍼로 공급되는 전류를 적절하게 제어함으로써 원하는 감쇠력을 연속적으로 얻을 수 있음을 확인하였다.



(a) response of the MR damper



(b) response of the power supply

Fig. 6 Response of the MR seat damper to step input

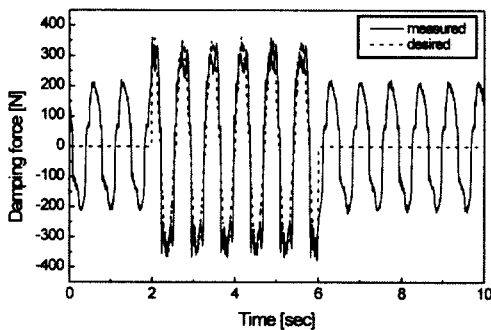


Fig. 7 Damping force control using PID controller

4. 반능동형 운전석 현가장치

4.1 운전석 현가장치의 모델링

본 연구에서 제안된 운전석 현가장치 모델이 Fig. 8에

나타나 있다. 노면으로부터 차량의 바퀴에 전달되는 가진은 주 현가장치와 캐빈 현가장치를 거쳐 운전석 현가장치에 전달되는데 운전석 현가장치는 X형의 링크구조로서 수직방향의 운동만을 하게 된다. Fig. 8에 나타난 모델로부터 동적 지배방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{q}_1 &= -c_1(\dot{q}_1 - \dot{q}_0) - k_1(q_1 - q_0) \\
 &\quad + c_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) + k_2(q_2 - q_1) - u \\
 m_2 \ddot{q}_2 &= -c_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) - k_2(q_2 - q_1)
 \end{aligned} \tag{9}$$

여기서, u 는 운전석용 MR 댐퍼의 제어 감쇠력이며, c_1 은 댐퍼가 운전석에 경사지게 장착되어 있기 때문에 다음과 같이 비선형함수로 나타내어진다.

$$c_1 = f(\theta) = c_A \sin^2 \theta \tag{10}$$

여기서, c_A 는 자기장이 인가되지 않았을 경우의 운전석용 MR 댐퍼의 댐핑계수를 나타내고, θ 는 댐퍼와 바닥면 사이의 각도이다. Table 1에 현가장치모델에 적용된 파라미터들을 나타내었다.

Table 1 Parameters of the MR seat suspension system

Parameter	Symbol	Unit	Value
seat frame mass	m_1	kg	20
driver mass	m_2	kg	50
suspension damping	c_A	Ns/m	1080
cushion damping	c_2	Ns/m	152.8
suspension stiffness	k_1	N/m	7414.86
cushion stiffness	k_2	N/m	8228.78

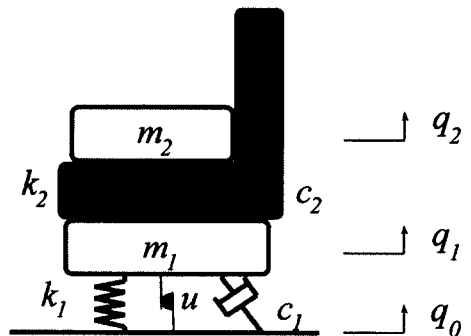


Fig. 8 Model of MR seat suspension system

4.2 제어기 설계

본 연구에서는 운전석용 MR 댐퍼를 장착한 운전석 현가장치의 진동 제어성능을 고찰하고자 일반적으로 많이 사용되는 스카이훅(skyhook)제어기를 사용하였다. 스카이훅 제어 알고리즘은 절대 고정변위를 갖는 천정과 운전석 사이에 가상의 댐퍼를 설치하고 이때 발생하는 가상 댐퍼의 감쇠력을 요구 감쇠력으로 사용하는 것으로 구조가 간단하고 실현이 용이하며 반능동형 댐퍼에 적합하여 일반적으로 많이 사용되고 있다.⁽¹¹⁾ 스카이훅 제어알고리즘의 요구 감쇠력은 운전석의 수직변위와 관련하여 다음과 같이 정의한다.

$$u = C\dot{q}_1 \quad (11)$$

여기서, C 는 스카이훅 알고리즘의 제어게인값을 나타내며 물리적으로는 댐핑계수를 나타내고, \dot{q}_1 는 운전석 바닥면의 수직방향의 속도를 나타낸다. 운전석용 MR 댐퍼는 반능동형이므로 식(11)로부터 얻어진 제어입력은 다음과 같은 반능동 조건을 만족해야 한다.

$$u = \begin{cases} u & \text{for } u \cdot \dot{q}_1 > 0 \\ 0 & \text{for } u \cdot \dot{q}_1 \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

식(4), (6), (12)로부터 운전석용 MR 댐퍼에 인가되는 제어자기장을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$H = \left[\frac{u}{\sin\theta \cdot (A_p - A_r)} \cdot \frac{h}{4L_m\alpha} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (13)$$

4.3 제어 성능 분석

본 연구에서 사용된 운전석 현가장치의 개략도를 Fig. 9에 도시하였다. 유압 서보 장치에 의하여 운전석 현가장치의 바닥 면이 가진 되며, 가진주파수는 0.4~2.4Hz이고 가진변위는 ±20mm이다. Fig. 10은 컴퓨터 시뮬레이션 결과로서 해석모델로 도입한 차량의 경우, 운전석 현가 시스템의 공진 영역인 1.5Hz에서의 스카이훅 제어성능을 시간 영역에서 도시한 것이며, 제어 시 가속도와 변위가 줄어드는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 주파수 영역에서 진동 절연 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석한 것으로서, 시스템의 첫 번째 공진에서 매우 우수한 진동절연 성능을 나타내었다. 뿐만 아니라 공진영역 이외의 전 영역에 걸쳐 R.M.S. 변위 전달률이 1이하의 우수한 진동 절연

성능을 수행하였다. 또한, 가속도에 있어서도 스카이훅 제어 시 우수한 성능을 보여 주었다. Fig. 12는 실험 결과로서 컴퓨터 시뮬레이션과 잘 부합하는 것을 알 수 있다. 이상에서 살펴본 바와 같이 본 연구에서 사용된 운전석용 MR 댐퍼를 운전석 현가장치에 장착 시 적절한 제어 알고

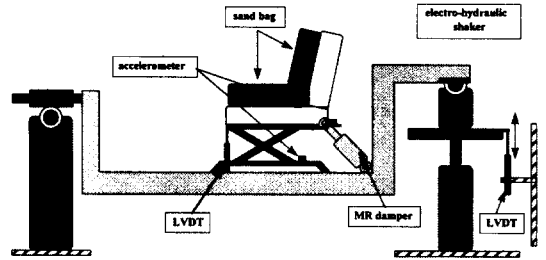
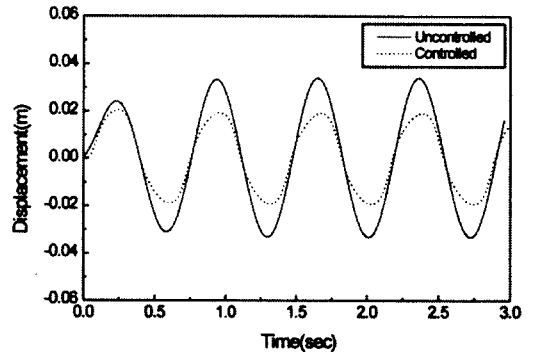
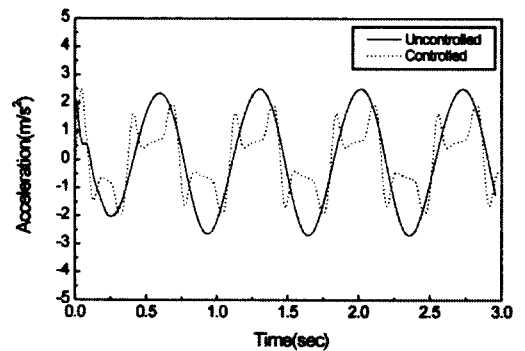


Fig. 9 Schematic of the seat testing equipment



(a) response of displacement



(b) response of acceleration

Fig. 10 Time response of MR seat suspension system at 1.5Hz

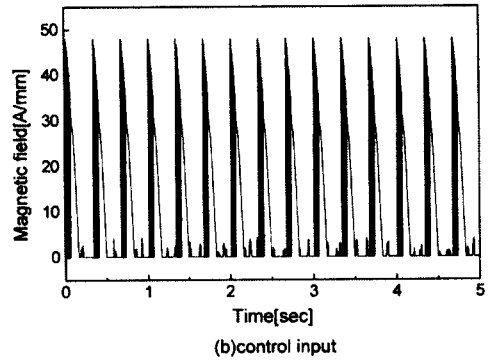
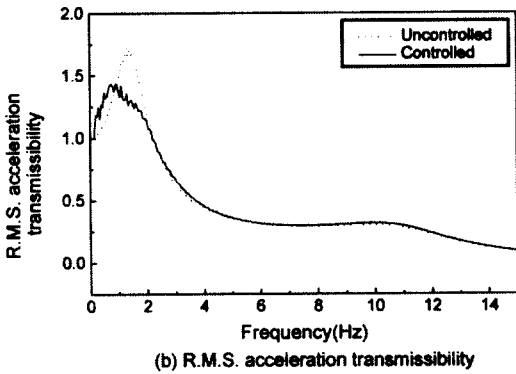
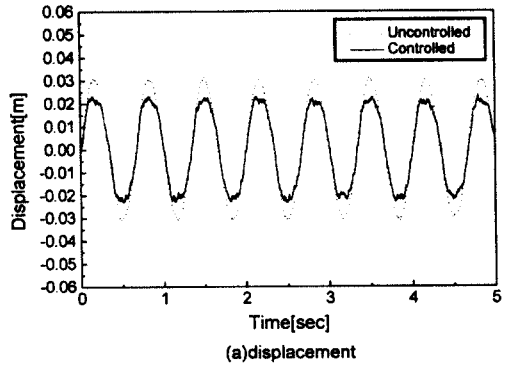
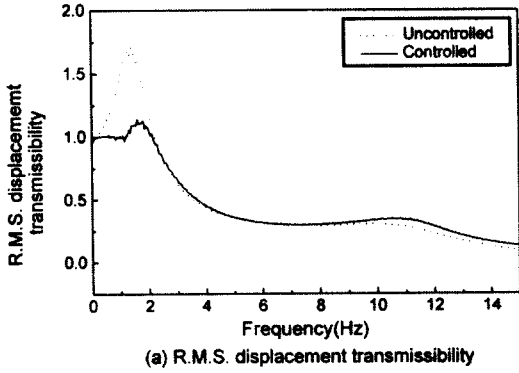


Fig. 11 R.M.S. transmissibility of MR seat suspension system

Fig. 12 Time response of the MR seat suspension

리즘을 사용한다면 매우 우수한 진동 절연 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 운전자에게 전달되는 진동을 효과적으로 절연시키기 위하여 운전석용 MR 댐퍼를 제한하여 모델을 구성하였으며, 이를 토대로 상용차 운전석 현가장치에 실제로 장착 가능한 운전석용 MR 댐퍼를 설계 및 제작하였다. 제작된 운전석용 MR 댐퍼의 감쇠력 실험과 제어성능 실험을 통하여 댐퍼의 특성과 제한된 모델의 타당성을 입증하였다. 또한 운전석용 MR 댐퍼를 장착한 운전석 현가 장치의 진동절연을 위하여 스카이훅 제어알고리즘을 사용하였다. 스카이훅 제어기 사용 시 공진주파수에서 진동절연 성능이 크게 향상되었으며, 그 외의 주파수 영역에서도 우수한 진동절연 성능을 보였다. 그러므로 운전석용 MR

댐퍼를 장착한 반응동형 운전석 현가장치는 적절한 제어 시 운전자에게 전달되는 진동을 효과적으로 절연하여 운전자의 피로와 승차감을 크게 향상시킬 수 있다.

후 기

본 논문은 1999년도 유한대학 산업과학기술연구소의 지원에 의해 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) F. Queslati and S. Sankar, "Performance of a Fail-safe Active Suspension with Limited State Feedback for Improved Ride Quality and Reduced Pavement Loading in Heavy Vehicles", SAE Paper No.

- 922474, pp. 796~804, 1992.
- (2) S. Rakheja, Y. Afework and S. Sankar, "An Analytical and Experimental Investigation of the Driver-Seat-Suspension System", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 23, pp. 501~524, 1994.
- (3) T. Lijima, Y. Akatsu, K. Takahashi and H. Murakami, "Development of a Hydraulic Active Suspension", SAE Paper No. 931971, pp. 2142~2153, 1993.
- (4) D. Karnopp, "Active and Semi-Active Vibration Isolation", *Special 50th Anniversary Design Issue*, Vol. 117, pp. 177~185, 1995.
- (5) S. B. Choi, J. H. Choi, M. H. Nam, C. C. Cheong and H. G. Lee, "A Semi-Active Suspension Using ER Fluids for a Commercial Vehicle Seat", *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 9, No. 8, pp. 601~606, 1999.
- (6) 남무호, "ER시트댐퍼를 사용한 상용차운전석의 실험적 성능해석 및 진동제어", *한국공작기계학회지*, 제 7 권 제 3 호, pp. 7~13, 1998.
- (7) D. A. Brooks, "High Performance Damping Using Electro-Rheological Fluid", *Proceedings of International Conference on ERF, MRS and Their Applications*, Yamagata, Japan, pp. 250~251, 1997.
- (8) X. Wu and G. J. Graffin, "A Semi-Active Control Policy to Reduce the Occurrence and Severity of End-stop Impacts in a Suspension Sear with an Electrorheological Fluid Damper", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 203, No. 5, pp. 781~793, 1997.
- (9) S. J. Dyke, B. F. Spencer Jr. M. K. Sain and J. D. Carlson, "Seismic Response Reduction Using Magnetorheological Dampers", *Proceedings of the IFAC World Congress*, Vol.1, pp. 145~150, 1996.
- (10) 이환수, 최승복, "MR 유체를 적용한 반능동 댐퍼의 성능평가", *한국정밀공학회 추계학술대회논문집*, pp. 35~38, 1999.
- (11) D. Karnopp, M. J. Crosby and R. A. Harwood, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", *Journal of Engineering for Industry*, pp. 619~626, 1974.