

타이어 압력 변화에 따른 MR 현가장치를 장착한 전체차량의 제어성능평가

Performance Evaluation of a Full Vehicle with Semi-active MR Suspension at Different Tire Pressure

김형섭*.성민상**.최승복†.권오영***

Hyung-Seob Kim, Min-Sang Seong, Seung-Bok Choi and Oh-Young Kwon

(2011년 9월 22일 접수 ; 2011년 10월 12일 심사완료)

Key Words : MR Damper(MR 댐퍼), Full Vehicle(전체차량), Tire Pressure(타이어 공기압), Ride Comfort(승차감)

ABSTRACT

This paper presents the performance of a full vehicle MR suspension system at different tire pressure. The pressure of tire is related to tire stiffness, which is significantly affects the performance of suspension system. Therefore, in this research, the effectiveness of tire pressure on full vehicle MR suspension is evaluated. As a first step, the characteristic of tire with respect to pressure is experimentally tested and modeled. After that, the governing equation of MR damper and full vehicle MR suspension system are derived. The skyhook controller is implemented and the vibration control performance of full vehicle MR suspension is evaluated via simulation with respect to the tire pressure.

1. 서론

자동차의 주행 시 노면의 가진은 타이어를 거쳐 현가장치로 전달되며, 이때 현가장치 시스템의 특성에 따라 승차감에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 차량의 진동 및 소음을 저감시켜 승차감을 증가시키는 연구는 최근 자동차의 고급화와 더불어 그 중요성이 증대되고 있다. 차량의 승차감과 안정성 및

조향특성 등의 성능에 영향을 미치는 현가장치는 노면으로부터 올라오는 진동이 직접 차체로 전달되지 않도록 하는 동적 성능이며, 탑승자가 느끼는 승차감을 향상 시킴과 동시에 기계부의 손상을 방지하는 역할을 한다. 따라서, 이러한 동적 성능을 향상시키기 위해 모터 또는 유압밸브 등을 이용한 ECS(electronic control suspension)가 적용되고 있는 추세이나, 비연속적인 댐핑력, 복잡한 구조 및 높은 가격 등의 이유로 보편화가 되지 않는 실정이다. 이러한 대안으로 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 댐퍼를 비롯하여 엔진 마운트, 브레이크 혹은 클러치, 밸브 등 각종 응용장치에 적용되고 있

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7319, Fax : (032)868-1716

* 인하대학교 기계공학과
** 정회원, 인하대학교 기계공학과
*** 한국폴리텍 II대학 남인천캠퍼스

이 논문의 일부는 2011년 추계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

다. 이에 반해, MR 유체는 자기장(magnetic field)에 의하여 상변화가 일어나는 지능 유체로서 ER 유체에 비해 큰 항복응력을 발생시키기 때문에 큰 힘을 요하는 여러 응용장치에 적용하려는 연구들이 진행되고 있다.

Carlson 등⁽¹⁾은 차량용 MR 댐퍼를 제안하였으며, 스카이훅 제어기(skyhook controller)의 구현을 통하여 제안된 MR 댐퍼의 우수성을 입증하였다. Spencer 등⁽²⁾은 지진을 방지하기 위하여 MR 댐퍼를 제안하여 이론적 모델의 타당성을 입증하였다. 그리고, Kamath 등⁽³⁾은 반능동형 MR 댐퍼를 제안하고 댐핑력 히스테리시스(hysteresis)에 대한 이론적 모델을 제시하고 실험 결과와 비교 분석하였으며 최근에는 Choi⁽⁴⁾ 등은 실린더형 MR 댐퍼를 제안하고, HILS(hardware-in-the-loop simulation) 및 강건 제어기를 통하여 제안된 댐퍼를 장착한 차량의 승차감 향상을 고찰하였다.

이 연구에서는 노면의 가진에 대하여 1차적으로 필터역할을 하는 타이어에 대하여 공기압에 따른 특성을 정확히 파악하여 MR 현가장치의 승차감 향상을 확인하고자 한다. 이를 위해 실제 기아자동차의 K7차량에 맞는 타이어에 대하여 각각의 공기압에 따른 강성(stiffness)을 실험을 통하여 확인하고, 실제적으로 K7에 장착이 가능한 MR 댐퍼를 제안한다. 이로부터 MR 댐퍼 및 타이어 강성에 대한 모델링 및 지배방정식을 도출하고, MR 현가장치를 포함한 전체차량을 모델링한다. 또한, 전체차량 현가장치의 승차감 제어를 위해 스카이훅 제어기를 구성한다. 마지막으로 타이어 공기압에 따른 MR 현가장치의 승차감 성능을 평가한다.

2. MR 댐퍼

실제 K7에 적용이 가능한 MR 댐퍼의 구조를 Fig. 1에 도시하였다. MR 댐퍼는 크게 실린더, 피스톤 및 가스챔버로 구성되어 있으며, 피스톤의 운동에 따른 로드부의 부피보상을 위해 부동 피스톤을 구성하였다. 또한 피스톤 내에 원형 덕트(duct)를 구성하기 위하여 피스톤 양쪽 끝단에 지그를 설치하였으며, 이를 통하여 MR 유체가 자극(magnetic pole) 사이를 흐를 수 있도록 하였다. 따라서, 피스톤의 원형 덕트는 자기회로로 이뤄지도록 하였으며,

부하되는 자기장에 따라 MR 유체가 항복응력을 발생시킬 수 있도록 설계하였다. 각각의 부품은 강자성체와 상자성체로 구성이 되며, 내측 피스톤 양끝단 및 외측 피스톤은 강자성체로 구성되어 자극을 형성하게 되고, 내측 피스톤의 중간부분은 상자성체로 구성되어 생성된 자기장이 자극에 집중되어 MR 효과가 효율적으로 발생시킬 수 있도록 하였다. 피스톤을 중심으로 위쪽을 상부챔버, 아래쪽을 하부챔버로 정의하고, 두 챔버와 실린더 사이에 MR 유체가 채워진다. 자기회로에 전류가 흐르면 자극에 자기장이 발생이 되면서 자극을 지나가는 MR 유체의 항복응력이 증가하게 됨에 따라 유체의 유동저항이 증가하게 된다. 이것은 상부와 하부의 챔버에 압력강하를 발생시키며, 이에 의해 피스톤의 상하운동에 저항하는 댐핑력이 발생된다. 결국, 자기장 무부하시에는 피스톤의 속도에 따라 유체점성에 의한 댐핑력만을 발생되나, 자기장 인가시 MR 유체의 항복응력으로 인한 댐핑력이 발생된다.

MR 댐퍼의 모델링을 위해 MR 유체는 비압축성 유체(incompressible flow)로 가정하였고, 동일공간에서의 내부압력은 모든 방향으로 균일하게 작용하며, 유로 형상에 따른 압력손실은 없다고 가정하였다.

따라서, MR 유체의 유동을 두 평판 사이의 유동으로 가정한 유체저항(fluid resistance, R_f)과 가스 챔버의 가스압력에 의한 컴플라이언스(compliance, C_g)는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

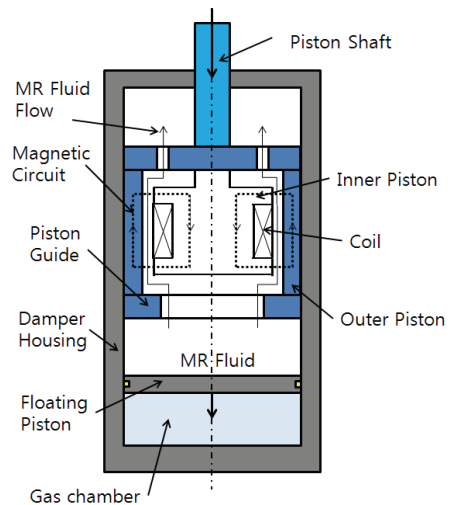


Fig. 1 Schematic configuration of MR damper

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

여기서, η 는 자기장 무부하 시 MR 유체의 점성계수, L 은 자기회로내 유로의 길이, b 는 내측 코어의 바깥 원둘레, h 는 자극의 간극을 나타낸다. 또한 V_0 , P_0 는 초기 작동점에서의 가스챔버의 부피와 압력을 나타내며, κ 는 비열비(specific heat ratio)로 정적 비열과 정압 비열의 비를 나타낸다.

MR 유체의 항복응력 변화에 따른 댐퍼 내의 압력 강하(pressure drop)는 다음과 같이 표현 될 수있다.

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

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

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

$$k_e = A_r^2 / C_g, C_e = (A_p - A_r)^2 R_e \quad (3)$$

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

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

위 모델을 바탕으로 Table 1과 설계 변수를 결정하였다. Fig. 2는 K7에 장착되는 수동형 댐퍼(passive damper)의 댐핑력 특성과 설계 변수에 따른 MR 댐퍼의 시뮬레이션을 통한 성능을 도시한 것이다. Fig. 2에 보이는 바와 같이 설계된 MR 댐퍼의 댐핑력 범위가 K7 댐퍼의 댐핑력을 포함하고 있어, 이 연구에서 제안한 MR 댐퍼가 충분한 성능을 낼 수 있을 것으로 기대된다⁽⁵⁾.

3. 시스템 모델

3.1 타이어 모델

타이어의 강성은 자동차의 승차감 및 안정성과 밀접한 관계를 갖는 물성이며, 이는 타이어의 공기압에 따라 변화하는 특징이 있다. 이러한 타이어 모델의 적용을 위하여 준대형 K7 승용차에 맞는 타이어인 225-45-R18 모델을 선정하고, 이에 대해서 강성시험을 수행하였다. 타이어의 특성은 크게 타이어의 종강성(vertical stiffness), 횡강성(lateral stiffness) 및 비틀림강성(distortional stiffness)으로 구분되어 평가되는데, 종강성은 판을 수직방향으로 이동시킬 때 측정되는 타이어의 수직 방향에 대한 강성으로 차량의 승차감과 크게 관련이 있기 때문에 이 연구에서는

Table 1 Design parameters of the MR damper

| Parameter | Value | |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Front | Rear |
| Piston head length(L) | 87.2 mm | 87.2 mm |
| Piston head area(A_p) | 1661.90 mm ² | 1194.59 mm ² |
| Piston head area(A_r) | 380.13 mm ² | 132.73 mm ² |
| Piston head width(b) | 117.81 mm | 99.90 mm |
| Magnetic pole length(L_p) | 11.74 mm | 10.32 mm |
| Maximum stroke | 164 mm | 187 mm |

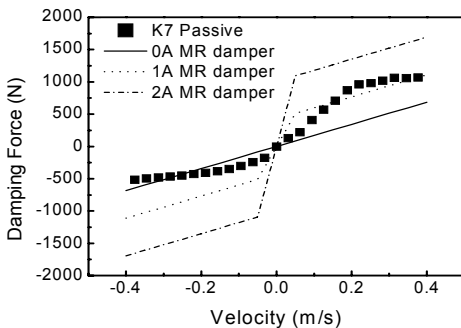


Fig. 2 Field-dependent damping forces

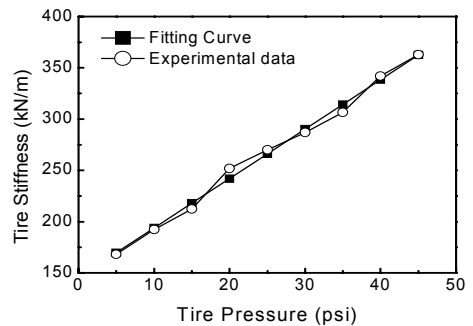


Fig. 3 Vertical stiffness with respect to tire pressure (225-45-R18)

차량의 수직성분만 고려하여 타이어의 종강성을 실험을 통하여 측정하였다. 공기압 5 psi부터 5 psi 만큼씩 올리면서 타이어의 최대 압력 허용치인 45 psi 까지의 각각에 대해 종강성을 측정하였고 Fig. 5와 같이 공기압과 종강성의 관계가 비례관계가 이뤄지는 것을 알 수 있었고 그에 따라 최소자승법(least square method)을 통하여 식 (4)와 같이 1차 방정식의 형태로 표현하였다. 이는 공기압이 증가하면 타이어의 인장력이 커지기 때문에 강성이 증가하는 것이다⁽⁶⁾.

$$k_t = k_0 + \alpha(T_{p0} + \Delta P) \quad (4)$$

여기서 k_0 는 타이어의 기본 강성계수를 나타내며, α 는 타이어 압력이 비례하여 생기는 강성계수를 나타내며, T_{p0} 는 타이어의 기준 압력을 나타낸다.

3.2 전체차량 모델

MR댐퍼를 적용한 차량을 7자유도로 가정하여 모델링하고 지배방정식을 유도하였다. Fig. 4는 MR댐퍼를 적용한 차량의 모델로, 차체(body)와 휠(wheel)은 각각 강체로 해석하고 차체의 끝에 4개의 독립현가방식의 MR 댐퍼를 장착한 것으로 구성하였다. 타이어는 앞서 모델링한 바와 같이 강성만을 갖는 것으로 고려하였는데, 실제 차량에서 발생할 수 있는 타이어의 댐핑은 타이어의 강성에 비하여 무시할 수 있을 만큼 작기 때문이다.

MR 현가장치의 모델은 자기장 무 부하시 유체 저항에 의해서 발생하는 댐핑과 MR 유체의 항복응력에 의해 연속적으로 조절되는 댐핑, MR 댐퍼의 가스 챔버에 의해 생기는 강성, 차체와 휠 사이에 존재

하는 코일 스프링의 강성으로 구성되었다. 따라서 MR 현가장치는 제어 알고리즘에 의한 부하 자기장의 변화로써 MR 댐퍼의 댐핑력을 조절하여 차체의 진동을 제어하게 된다.

다음 식은 MR 댐퍼를 장착한 전체차량의 동적지배방정식을 표현한 것이다.

$$\begin{aligned} M\ddot{z} &= -f_{s1} - f_{s2} - f_{s3} - f_{s4} - u_1 - u_2 - u_3 - u_4 \\ J_\theta \ddot{\theta} &= au_1 + au_2 - bu_3 - bu_4 + af_{s1} + af_{s2} - bf_{s3} - bf_{s4} \\ J_\phi \ddot{\phi} &= -cu_1 + du_2 - cu_3 + du_4 - cf_{s1} + df_{s2} - cf_{s3} + df_{s4} \\ m_i \ddot{z}_{usi} &= f_{si} - f_{ti} + u_i \quad (i=1,2,3,4) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} f_{si} &= k_{si}(z_{si} - z_{usi}) + k_c(z_{si} - z_{usi}) + c_{si}(\dot{z}_{si} - \dot{z}_{usi}) \\ f_{ti} &= k_{ti}(z_{usi} - z_{ri}) \quad (i=1,2,3,4) \\ \dot{z}_{s1} &= \dot{z} - a\dot{\theta} + c\dot{\phi}, \quad \dot{z}_{s2} = \dot{z} - a\dot{\theta} - d\dot{\phi} \\ \dot{z}_{s3} &= \dot{z} + b\dot{\theta} + c\dot{\phi}, \quad \dot{z}_{s4} = \dot{z} + b\dot{\theta} - d\dot{\phi} \\ u_i &= F_{MRI} \quad (i=1,2,3,4) \end{aligned}$$

M 은 차체의 질량, $m_i(i=1,2,3,4)$ 는 각각의 휠의 질량, J_θ 와 J_ϕ 는 피치와 롤 방향의 관성모멘트, $k_{ci}(i=1,2,3,4)$ 는 MR 댐퍼의 가스챔버의 강성계수, $k_{si}(i=1,2,3,4)$ 는 차체와 휠 사이에 존재하는 코일 스프링의 강성계수, $c_{si}(i=1,2,3,4)$ 는 현가장치의 전체 댐핑계수로 댐퍼의 댐핑계수와 같다고 가정하였다. $k_{ti}(i=1,2,3,4)$ 는 각 타이어의 강성계수이다. 또한, 이 타이어의 강성계수는 식 (4)의 방정식에서 타이어의 압력에 따라 바뀌는 것을 알 수 있다. z, z_{usi}, z_{si} 그리고 $z_{ri}(i=1,2,3,4)$ 는 각각 차체와 휠의 수직변위, 휠의 위치에서의 차체변위 그리고 노면으로부터의 가진 변위를 나타낸다. θ 와 ϕ 는 차량의 무게중심에서의 피치(pitch)와 롤(roll)각을 나타내며, a, b, c, d 는 차량의 무게중심에서의 앞, 뒤, 좌, 우와의 거리를 나타낸다. $F_{MRI}(i=1,2,3,4)$ 는 각각의 MR 댐퍼에서 작용하는 MR 유체에 의해서 생기는 댐핑력이다.

4. 제어성능평가

이 연구에서는 간단하고 효율적인 스카이훅 제어

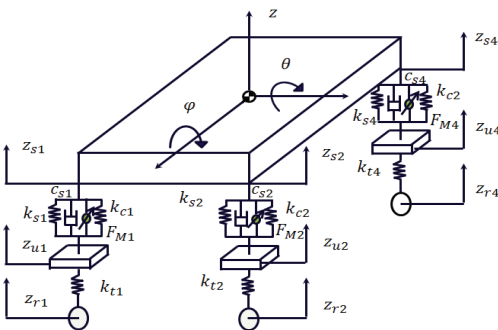


Fig. 4 Mechanical model of the MR suspension system

기를 적용하여 진동제어 및 승차감 향상을 수행하였다. MR 현가장치를 위한 스카이훅 제어기의 요구

댐핑력(u)은 각 휠 위치에서의 차체의 수직속도(\dot{z}_s)를 고려하여 다음과 같이 정의한다.

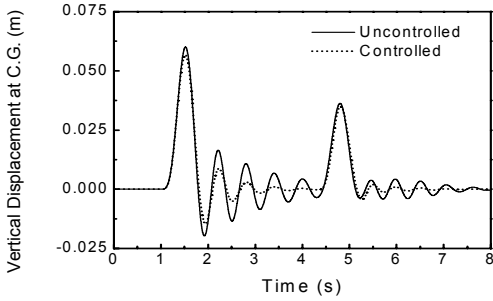
$$u_i = C_{skyi} \dot{z}_{si} \quad (i=1,2,3,4) \quad (6)$$

여기서, C_{skyi} 는 스카이훅 제어기의 제어 이득치로 물리적으로는 댐핑 계수를 의미하며, 여기서 C_{sky1} 와 C_{sky2} 는 4000, C_{sky3} 과 C_{sky4} 는 3000으로 정하였다. 또한, 이 연구에서의 현가장치는 반능동형이므로 다음의 조건을 만족해야 한다.

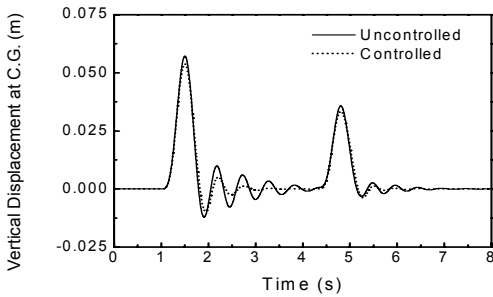
$$u_i = \begin{cases} u_i, & \text{for } u_i(\dot{z}_{si} - \dot{z}_{usi}) > 0 \\ 0, & \text{for } u_i(\dot{z}_{si} - \dot{z}_{usi}) \leq 0 \end{cases} \quad (i=1,2,3,4) \quad (7)$$

여기서, \dot{z}_{us} 는 비현가질량의 수직속도이다.

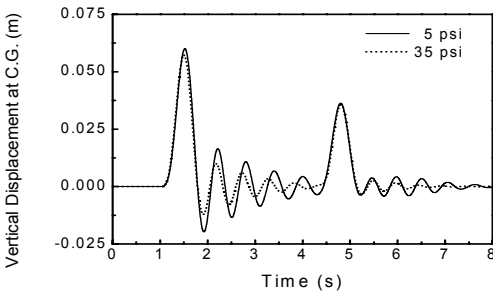
위 제어기가 적용이 되었을 때의 MR 현가장치의 승차감 개선 효과를 파악하기 위하여 범프 시험을 시뮬레이션 한 후에 타이어 압력에 따른 제어를 했을 경우와 하지 않았을 경우에 대해 각각의 타이어 압력에 따른 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 또한, Fig. 7은 랜덤 시험을 하였을 때의 진동수에



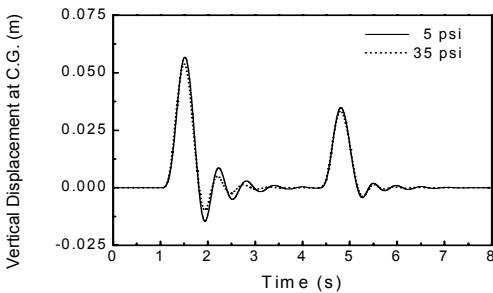
(a) Tire pressure(5 psi)



(b) Tire pressure(35 psi)

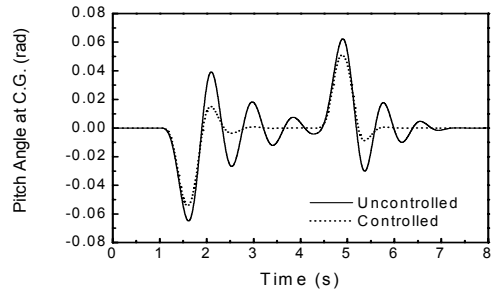


(c) Uncontrolled

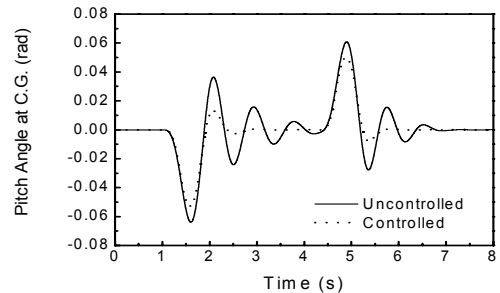


(d) Controlled

Fig. 5 Bump road responses of the MR suspension system at C.G.(vertical displacement)



(a) Tire pressure(5 psi)



(b) Tire pressure(35 psi)

Fig. 6 Bump road responses of the MR suspension system at C.G.(pitch angle)

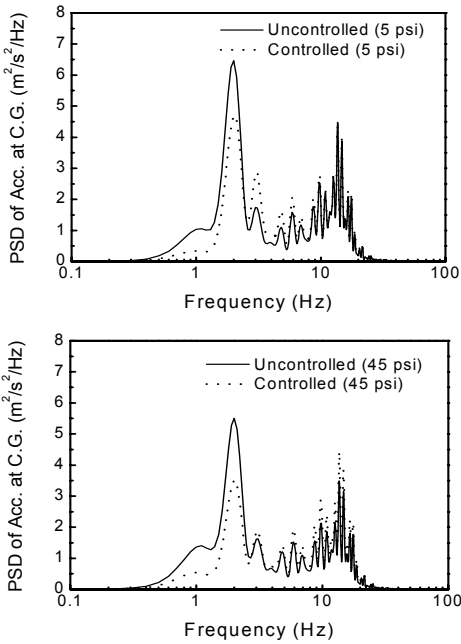


Fig. 7 Random road responses of the MR suspension system at C.G. (vertical acceleration)

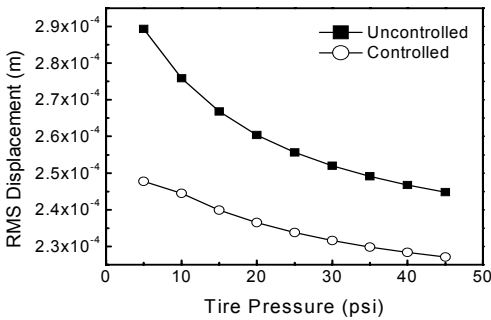


Fig. 8 RMS vertical displacement at different tire pressure

다른 특징을 알고자 PSD(power spectral density) 방법을 통해 확인하였다. 타이어의 압력이 낮아짐에 따라 공진영역에서의 PSD값이 더 크게 나와 성능이 나빠지는 것을 확인 할 수 있었다.

마지막으로 타이어 공기압에 따른 비제어 및 제어시의 진동 특성을 RMS(root mean square)기법으로 평가하였는데, RMS 값은 수치가 작을수록 진동 특성이 우수한 것을 나타낸다. 이로부터 타이어 공기압이 낮아질수록 승차감이 급격히 나빠지는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 공기압의 변화에 따른 MR 현가장치를 장착한 전체차량의 승차감을 분석하였다. 이를 위하여 실제 기아자동차의 K7에 장착이 가능한 MR 댐퍼를 제안하였으며, 자기장 부하에 따른 MR 댐퍼의 댐핑력 성능을 알아보았다. 또한, 타이어 공기압에 따른 종강성을 실험을 통하여 구하였고, 이를 전체차량의 타이어 모델에 적용하였다. MR 댐퍼가 장착된 전체차량에 대한 모델링 및 지배방정식을 도출하였고, 각각의 댐퍼에 스카이훅 제어기를 적용하였다. 이에 대한 성능 평가를 위해 범프와 랜덤 노면을 차량에 인가하고 그에 따른 결과를 통하여 진동제어 및 승차감 성능분석을 수행하였다.

마지막으로 RMS(root mean square) 분석을 통하여 타이어의 압력이 떨어짐에 따라 승차감은 급격히 나빠지는 것을 알 수 있었다. 향후, 지속적인 연구를 통해 타이어 압력이 낮더라도 높은 승차감을 유지할 수 있는 제어 알고리즘을 개발하여 타이어 압력에 대한 불확실성을 안정화시키고 그에 따른 진동제어 및 승차감을 확인할 예정이다.

후 기

이 연구는 지식경제부와 한국 과학기술재단의 전략기술인력 양성사업으로 수행 된 연구결과 입니다.

참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.

(4) Choi, S. B. 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.

(5) 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.

(6) Sung, K. G., Lee, H. G., Choi, S. B., Park, M. K. and Park, M. K., 2010, Performance Analysis with Different Tire Pressure of Quarter-vehicle System Featuring MR Damper, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 249~256.