Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 27(1) : 65~71, 2017
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2017.27.1.065

한국소음진동공학회논문집 제 27 권 제 1 호, pp. 65~71, 2017
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

피스톤 바이패스 유로가 있는 MR 댐퍼 장착 1/4 차량 현가시스템의 성능평가

Performance Evaluation of a Quarter Car Suspension System Installed with MR Damper Featuring Bypass Flow Holes in Piston

김 완 호* · 황 용 훈* · 박 진 하* · 신 철 수* · 최 승 복†

Wan Ho Kim, Yong Hoon Hwang, Jhin Ha Park, Cheol-Soo Shin and Seung-Bok Choi

(Received October 27, 2016 ; Revised December 19, 2016 ; Accepted December 19, 2016)

Key Words : Bypass Hole(부가유로), MR Damper(MR 댐퍼), Vehicle Suspension System(차량현가장치), Ride Comfort (승차감), Vibration Control(진동제어), Slope of Damping Force(감쇠력 기울기)

ABSTRACT

This work presents a comparative work on the ride comfort of a quarter car suspension system between two different magneto-rheological (MR) dampers; one is conventional type without bypass hole and the other is featured by several bypass holes in the piston. As a first step, two different MR dampers are designed on the basis of the governing equation and manufactured with same geometric dimensions except the bypass holes. After investigating the field-dependent damping properties, two dampers are installed to the quarter car suspension system. The suspension model is then derived and a sky-hook controller is implemented to identify vibration control performance under random road. It is shown that the suspension system with MR damper featured by the bypass holes can provide much better ride quality than the case without the bypass holes. This is validated via experimental implementation.

1. 서 론

차량용 현가장치는 제동장치, 조향장치와 더불어 탑승한 승차자의 승차감에 영향을 끼치는 중요한 장치다. 그리하여 과거부터 현가장치의 주요부품인 댐퍼에 관한 많은 연구가 있어왔다. 일반적으로 사용하고 있는 수동형 댐퍼는 유체의 점도에 의해 발생되는 감쇠력을 이용하여 차체의 진동을 흡수한다. 그러나 수동형 댐퍼는 환경의 변화에 능동적으로 대응 하지 못하고, 가진 특성 및 시스템이 조금의 변화라도 발생하게 되면 진동 흡수 성능이 급격하게 감소하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 능동형 댐퍼와 반 능동형 댐퍼의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 능동형 댐퍼는 비연속적인 감쇠력, 구조의 복잡성 및 높은 가격으로 인하여 보편화 되지 못하고 있는 실정이다. 이런 이유로 최근에는 ER(electro-rheological) 또는 MR(magneto-rheological) 유체를 이용한 반 능동형 댐퍼에 대한 연구가 많이 진행 되고 있다. 여기서, MR 유체는 자기장(magnetic field)에 의해 상 변화가 일어나는 지능 유체로서 ER 유체에 비하여 침전물 발생이 매

† Corresponding Author; Member, Mechanical Engineering of Inha University
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
* Mechanical Engineering of Inha University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2016 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

우 적을 뿐만 아니라 비교적 큰 항복응력을 발생시켜 보다 큰 힘을 요하는 각종 응용장치에 적용하려는 연구가 시도되고 있다.

Carlson 등[1]은 차량용 MR 댐퍼를 제안하였으며, 스카이훅 제어기(skyhook controller)를 적용하여 제안된 댐퍼의 우수성을 입증하였다. Spencer 등[2]은 지진에 의한 진동을 흡수하기 위한 MR 댐퍼를 제안하여 이론적 모델의 타당성을 입증하였고, Wereley 등[3]은 반 능동형 MR 댐퍼를 제안하고 감쇠력 히스테리시스(hysteresis)에 대한 이론적 모델을 제시하고 실험결과와 비교 분석하였다.

최근에 Choi 등[4]은 실린더형 MR 댐퍼를 제안하고, MR 댐퍼를 장착한 자동차의 감쇠력 제어특성을 고찰하였다. 최근 이러한 자동차용 현가장치에 들어가는 MR 댐퍼에 관한 연구가 많이 진행되고 그에 따른 반 능동형 현가장치에 대한 지식이 축적됨에 따라 탑승자에게 조금이라도 더 나은 승차감을 제공하기 위한 응용연구와 제어기법에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다. MR 댐퍼의 소형화에 관한 연구도 이루어졌다. Lee 등[5]은 소형 MR 댐퍼를 설계 및 해석을 하고 실험적으로 그 성능을 입증함으로써 MR 댐퍼의 사용 범위를 넓혔다.

이 연구는 동일한 설계조건 하에서 좀 더 나은 승차감을 제공하는 MR 댐퍼를 설계하는 방법과 실제 현가장치에 적용되었을 때 기존 방법과 어떤 차이가 있는 지를 실험적으로 입증한 내용을 포함한다. 그 방법으로 이 연구에서는 피스톤에 자기장이 통하지 않는 부가적인 유로를 선택하였고 그 효과를 알아보기 위해 같은 설계변수를 가진 두 MR 댐퍼를 제작하고 성능을 실험적으로 비교해 봄으로써 그 차이를 연구하였고, 더불어 각각의 MR 댐퍼가 적용된 현가시스템의 진동제어성능을 비교하여 실험적으로 부가적인 유로의 효과를 입증하였다.

2. MR 댐퍼 성능평가

2.1 부가적인 유로의 효과

최근에 자동차용 반 능동형 현가장치에 쓰이는 MR 댐퍼는 실린더형으로 중공형의 긴 실린더 안에 MR 유체가 충진되어 있고, 가진 되는 피스톤 부에 코일을 설치해 입력 전류에 따른 항복응력을 조절하여 감쇠력을 제어한다. 피스톤 부는 코일이 부착된 보빈(bobbin)과 일정한 간극을 이격하여 자기장 통로로 활용되는 슬리브(sleeve)로 구성되어 있다. Fig. 1에 도시된 바와 같이 보빈과 슬리브사이에 간극이 존재하는데 이 간극을 오리피스(orifice)라 칭한다. MR 댐퍼는 이 오리피스에 걸리는 MR 유체의 항복

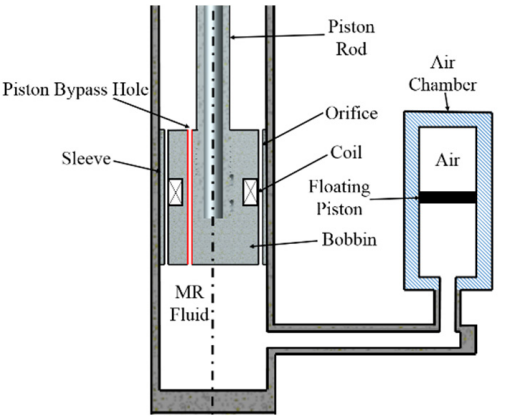
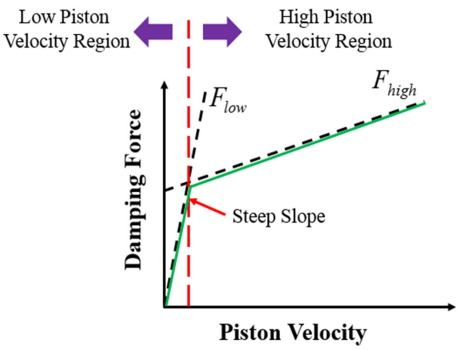
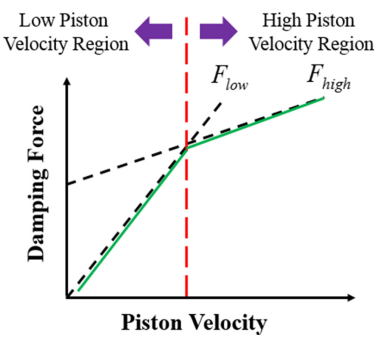


Fig. 1 Structure configuration of MR damper



(a) Conventional F-V diagram



(b) Effect of bypass hole

Fig. 2 Damping characteristic depending on piston velocity

응력 효과에 의해 감쇠력을 발생시킨다. 그런데 실제로 MR 댐퍼가 현가장치에서 적용될 때는 자기장 형성 시 락업(lock-up) 현상이 발생된다. 이 현상은 자기장에 의해 사슬을 형성한 MR 유체 분자들이 오리피스에서의 MR 유체의 유동을 막아 일어나는 현상으로 피스톤의 왕복운동 시 급격한 감쇠력의 변화가 발생하여 승차감에 부정적인 영향을 끼치게 된다. Fig. 2에 기존의 MR 댐퍼와 부가적인 유로를 가진 MR 댐퍼의 감쇠력-피스톤 속도 성능곡선(F-V 선도)이 도시되어 있다. F-V선도에는 MR의 효과에 의해 발생되는 bingham힘에 의해 전체 감쇠력이 지배되어 급격히 힘이 증가하는 저속구간과 주로 점성력에 의해 힘이 지배되는 고속구간으로 나뉜다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 기존의 MR 댐퍼는 락업 현상에 의해 저속 구간에서 감쇠력의 기울기가 가파른 것을 확인할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 부가적인 유로(bypass hole)개념이 도입되었다. Cook 등[6]은 최초로 부가적인 유로를 도입한 MR 댐퍼를 제시하였고, Bai 등[7]은 부가적인 유로를 사용한 MR 현가시스템을 제어하였다. 부가적인 유로는 피스톤 내부에 자기장이 통하지 않는 구멍으로서 MR 유체가 사슬을 형성하지 않고 그대로 유동하는 곳이다. 이 구멍으로 MR 유체가 유동되면 앞서 말한 락업 문제가 해결되어 Fig. 2(b)와 같이 저속 구간에서 급격한 감쇠력의 변화가 완화된다. 이런 특징은 실제 현가장치에 적용 시 승차감에 큰 변화를 주게 된다. 그러한 결과를 이 논문의 3장에 설명하였다.

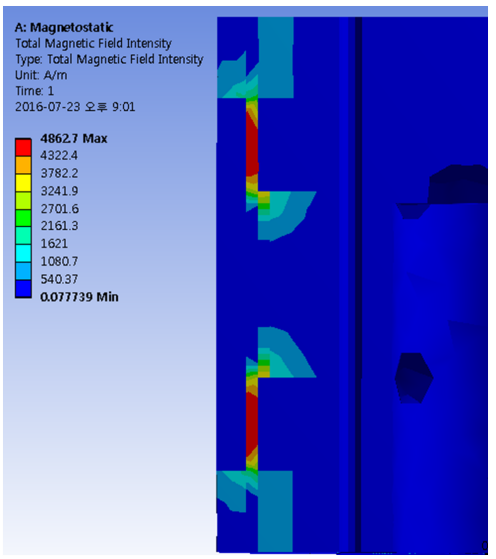


Fig. 3 Magnetic flux analysis result using FEM

2.2 MR 댐퍼 설계

현가장치에 적용하여 실험을 하기 위하여 먼저 MR 댐퍼를 설계하였다. 부가적인 유로의 효과를 알아보기 위하여 두 가지 종류의 피스톤을 설계하였다. 하나는 기존과 같이 부가적인 유로가 없는 피스톤, 그리고 다른 하나는 유로가 있는 피스톤이다. 두 댐퍼는 유로의 개수를 제외한 모든 설계 변수가 같다. MR 댐퍼의 기본적인 감쇠력 모델은 통상적으로 많이 쓰이는 빙햄(bingham) 모델이다[2]. 빙햄 모델에 의하면 유동모드 MR 댐퍼의 감쇠력은 다음과 같다.

$$F_d = F_{vis} + F_{MR} + F_{air} \tag{1}$$

(a) MR damper

(b) Piston with bypass hole

Fig. 4 Photograph of the manufactured MR damper

$$F_{air} = P_a A_p \tag{2}$$

$$P_a = \left(\frac{V_0}{V_0 + A_r X_p} \right)^{1.4} P_0 \tag{3}$$

$$F_{MR} = \Delta P_{MR} (A_p - A_r) \tag{4}$$

$$\Delta P_{MR} = \frac{CL_p}{d} \tau_y (H_{MR}) \tag{5}$$

$$\tau_y (H_{MR}) = a_3 H_{MR}^{\ 3} + a_2 H_{MR}^{\ 2} + a_1 H_{MR} + a_0 \tag{6}$$

식 (1)의 F_{air}는 축압기의 힘, F_{MR}은 MR 사슬의 항복응력에 의한 힘, F_{vis}은 유체 점성에 의한 힘이다. 위 모델에서 두 가지 MR 댐퍼는 축압기 힘과 MR 사슬에 의한 힘은 같고 부가적인 유로의 존재에 의하여 첫 번째 항인 점성력이 다르게 나타나게 된다[8]. 그리고 오리피스에 걸리는 자기장, H_{MR}은 Fig. 3과 같이 자기장해석용 소프트웨어(ANSYS Workbench: Magnetostatic)을 이용한 유한요소 해석(FEA)을 수행하여 알아 낼 수 있다. 해석에 사용된 유한요소는 삼각형 형태(triangular type) 이고 코일전류는 0.1A부터 1A까지 0.1A 단위로 설정하였다. 해석에 사용된 전선의 직경은 0.5 mm이다. Fig. 3에 도시된 결과는 코일전류가 0.1 A일 때의 자기장의 세기 값이다. 빨간색으로 보이는 부분이 자기장에 의한 MR 유체의 분자체인이 가장 많이 형성되는 곳이다. 유한요소 해석의 결과를 보아 자기장이 목표 간극에 효과적으로 걸리는 것을 알 수 있다.

2.3 감쇠력 성능

위 모델의 식들에 있는 변수와 해석결과 결정된 모든 설계 변수는 Table 1에 도시되어 있다. 결정된 설계 변수에 의해 Fig. 4와 같이 실험용 MR 댐퍼를 제작하였다. Fig. 4(a)는 제작된 댐퍼의 전면이고, Fig. 4(b)는 내부 피스톤의 사진이다. 사진에 도시되어 있지는 않지만 하나는 부가적인 유로가 없는 것 또 다른 하나는 도시되어 있는 유로가 있는 것이다. 제작된 두 종류의 MR 댐퍼의 감쇠력 성능을 실험하기 위해 Fig. 5와 같이 댐퍼를 유압실린더를 장착한 가진기(exciter)에 장착하고 아래의 신호로 피스톤을 가진하였다[8].

Table 1 Parameters of MR dampers

Parameter	Symbol	Value
Initial pressure of chamber	P_0	3 bar
Initial volume of chamber	V_0	0.00125 m^3
Cross-section area of piston	A_p	0.00145 m^2
Cross-section area of piston rod	A_r	0.00013 m^2
Effective area of magnetic pole	L_p	0.016 m
Gap size of orifice	d	0.0008 m
Coefficient of yield stress	a_0	-1.026
Coefficient of yield stress	a_1	0.42
Coefficient of yield stress	a_2	-0.00116
Coefficient of yield stress	a_3	-1.0513E^{-6}

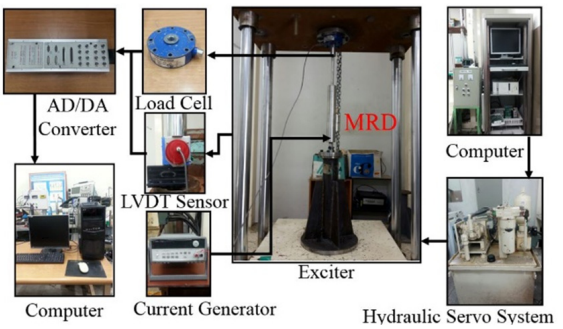
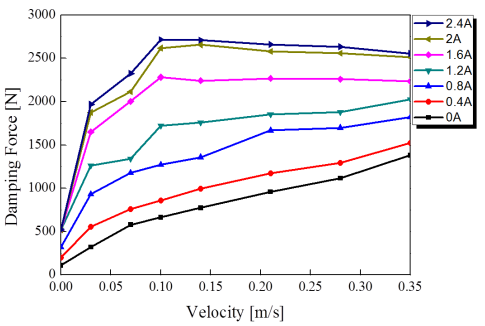


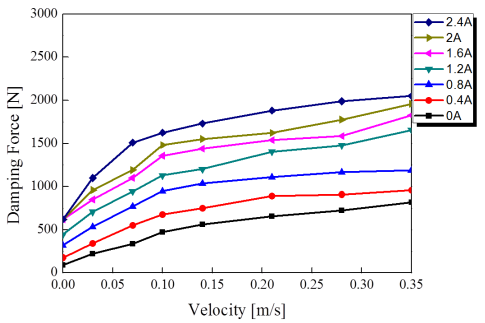
Fig. 5 Apparatus for damping force measurement

$$x = \frac{H}{2} \{ \sin(2\pi f t) + 1 \} \tag{7}$$

여기서 x는 피스톤의 위치, H는 가진 변위 그리고 f는 가진주파수다. 가진 변위와 주파수의 값은 각각 3.5 cm, 1 Hz다. Fig. 6에 실험적으로 얻은 피스톤 속도에 따른 감쇠력 곡선이 도시되어 있다. Fig. 6(a)는 부가적인 유로가 없는 MR 댐퍼의 감쇠력 곡선, Fig. 6(b)는 유로가 있는 MR 댐퍼의 감쇠력 곡선이다. 두 그래프를 비교하였을 때, 저속영역과 고속영역을 나누는 기준속도는 약 0.1 m/s 이고, 저속영역에서 부가적인 유로가 있는 MR 댐퍼의 감쇠력 곡선의 기울기가 유로가 없는 MR 댐퍼보다 확실히 작은 것을 확인할 수 있다. 그리고 그 경향성은 입력 전류가 커질수록 더 확연해 지는 것도 확인 할 수 있다.



(a) Without bypass



(b) With bypass

Fig. 6 Measured F-V diagram

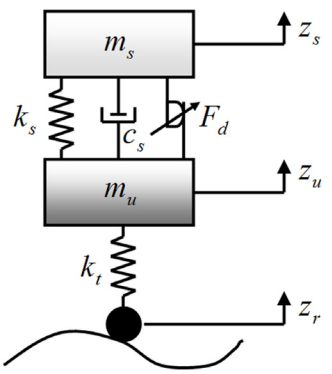


Fig. 7 A quarter suspension model

이를 통해 부가적인 유로가 피스톤의 저속영역에서 감쇠력의 급격한 변화를 완화시킬 수 있음을 확인 하였다.

3. 1/4 현가시스템 제어성능평가

3.1 1/4 현가시스템 모델

Fig. 7은 두 종류의 MR 댐퍼가 장착될 1/4 현가시스템의 모식도이다. MR 댐퍼의 감쇠력을 제어하기 위하여 스카이 후크 제어기(sky-hook controller)를 사용하였다. 스카이 후크 제어기가 적용된 1/4 현가시스템의 지배방정식은 다음과 같다[4].

$$m_s\ddot{z}_s + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s(z_s - z_u) + F_d = 0$$
$$m_u\ddot{z}_u + c_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + k_s(z_u - z_s) + k_t(z_u - z_r) - F_d = 0 \quad (8)$$

여기서 m_s, m_u, c_s, k_s 그리고 k_t는 각각 차체 질량, 아래 차체 질량, 감쇠계수, 스프링 상수 그리고 타이어의 스프링 상수다. 각각의 값은 Table 2에 도시되어 있다. 그리고 F_d는 제어기에 의해 결정되는 감쇠력으로 아래의 지배식을 따른다.

$$F_d = G_s\dot{z}_s \quad \dot{z}_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) > 0$$
$$F_d = 0 \quad \dot{z}_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) < 0 \quad (9)$$

여기서 G_s, $\dot{z}_s$ 그리고 $\dot{z}_u$는 각각 스카이 후크의 게인(gain)값, 차체의 속도 그리고 아래 차체 질량의 속도다. 제어 및 비교실험을 수행하기 위해 Fig. 8과 같이 제어기와 유압실린더를 장착한 가진기가 구축되어 있는 제어실험장비를 구성하였다. 가진기용 컴퓨터에서 가진기에 신호를 내리면 유압실린더는 명령을 받아 받은 신호대로 바닥을 가진시킨다.

3.2 제어성능평가

Fig. 9는 시간영역에서의 가진 신호를 보여준다. 이 신호는 곧 Fig. 6에 있는 z_r이다. 그러면 제어용 컴퓨터는 차체와 아래차체에 장착된 레이저변위센서(LVDT)로부터 각각의 속도신호를 A/D 변환기를 통해 받은 뒤 입력 전류신호를 식 (9)와 같이 계산하여 D/A 변환기를 통해 제어전류를 내보낸다. 이 전류를 통하여 MR 댐퍼는 감쇠력이 조절된다. 신호는 불특정한 도로주행표면을 묘사한 도로 프로파일(road profile)을 기준으로 임의로 생성한 것이다. 스카이 후크 게인값은 시행착오를 통하여 그 최적 값을 찾아내었고 그 값은 1200이다. 그에 따른 두 가지의 댐퍼의 실험 결과가 Fig. 10에 나타내었다.

그래프는 시간영역에서 연직방향으로의 차체 가속도선도이다. 검은 실선은 부가적인 유로가 없는(without bypass hole) 댐퍼의 결과이고 빨간색 파선은 부가적인 유로가 있는(with bypass hole) 댐퍼의

Table 2 Control parameter

Parameter	Symbol	Value
Sprung mass of 1/4 vehicle	m_s	315 kg
Unsprung mass of 1/4 vehicle	m_u	41.5 kg
Damping coefficient	c_s	1.8 kNs/m
Spring stiffness	k_s	22 kN/m
Tire stiffness	k_t	210 kN/m

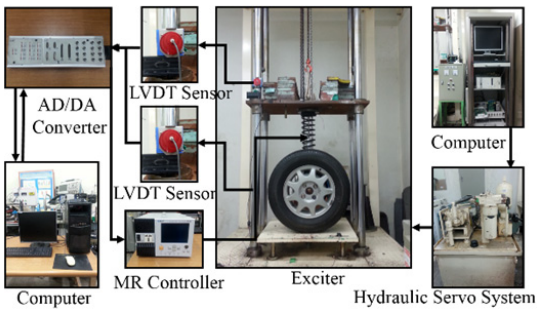


Fig. 8 Apparatus for quarter suspension model

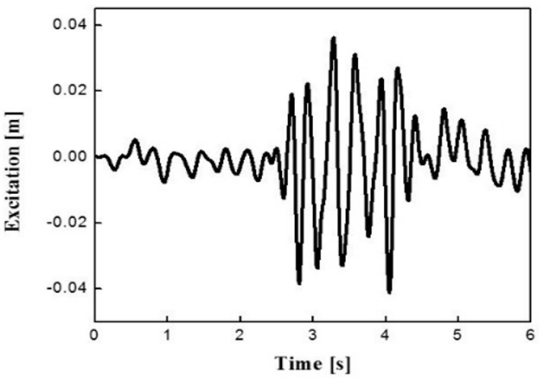
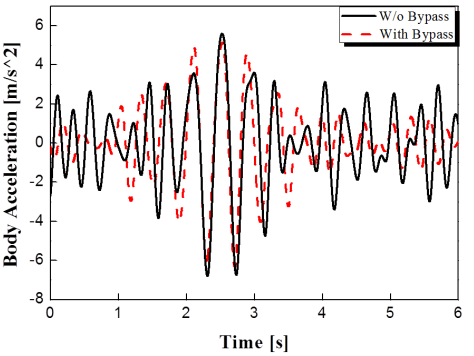
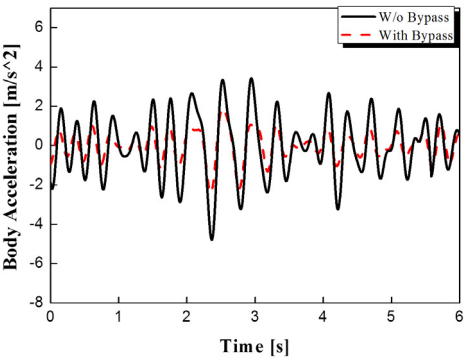


Fig. 9 Road profile (random)

결과이다. Fig. 10(a)는 제어를 하지 않을 때, Fig. 10(b)는 제어를 할 때를 나타낸 것이다. 제어를 하지 않을 때는 최대 차체 가속도는 비슷한 값을 나타내지만, 제어를 할 경우엔 부가적인 유로가 있는 MR 댐퍼가 적용된 차체의 가속도가 더 적은 값을 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 이는 제어를 하지 않을 경우엔 MR 유체에 의해 나타나는 락업 현상이 두 경우 모두 일어나지 않아 비슷한 결과를 보여주지만, 제어를 할 경우 부가적인 유로가 없는 현가시스템에서는 락업 현상이 일어나 차체 가속도의 급



(a) Uncontrolled



(b) Controlled

Fig. 10 Measured body acceleration

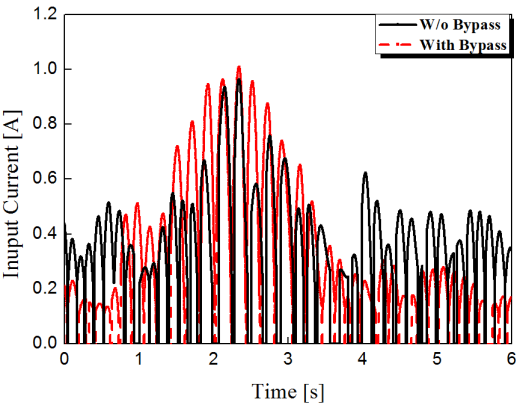


Fig. 11 Measured control input

격한 증가현상이 일어났음을 시사한다. 반면 부가적인 유로가 있는 현가시스템의 차체에서는 락업 현상에 의한 급격한 감쇠력 변화를 유로를 통해 완화시켜 차체 가속도를 낮추었음을 알 수 있다. Fig. 11은 측정된 시간영역에서의 측정된 제어 입력 전류의 선

도다. 같은 설계 변수를 갖는 두 댐퍼 중 부가적인 유로가 있는 댐퍼가 같은 전류에서 유로가 없는 댐퍼보다 감쇠력이 적기 때문에 그래프에서는 유로가 있는 시스템에서 입력 전류 값이 높게 측정되었다.

4. 결 론

이 연구는 부가적인 유로를 가진 MR 댐퍼의 성능과 이 댐퍼가 적용된 1/4 현가시스템에서의 차체 진동성능을 다음의 4단계를 통하여 고찰하였다.

(1) 부가적인 유로의 존재를 제외한 모든 설계변수가 같은 두 가지의 MR 댐퍼를 설계.

(2) 자기장해석을 통하여 설계변수를 결정하고 제작.

(3) 감쇠력 실험 및 결과 비교를 통해 이론적으로 부가적인 유로의 효과 (저속영역의 감쇠력 기울기 완화)를 확인.

(4) 제작된 두 가지 MR 댐퍼를 쿼터카 시스템에 적용 및 스카이 후크 제어기와 랜덤 신호를 사용하여 제어실험 수행

(5) 부가적인 유로의 존재에 따른 차체의 수직가속도 비교를 통하여 부가적인 유로를 장착한 MR 댐퍼가 승차감 측면에서 기존의 MR 댐퍼보다 개선된 것을 확인.

향후 각 시스템 변수들을 기준으로 MR 댐퍼의 설계변수의 최적설계와 최적 제어기 설계를 통하여 더 나은 승차감을 제공하는 MR 댐퍼를 연구할 예정이다.

References

(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 Suspension 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 Magnetorheological Damper, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 230~238.

(3) Wereley, N. M., Kamath, G. M. and Madhavan, V., 1999, Hysteresis Modeling of Semi-active Magnetorheological Helicopter Lag Damper, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 10, No. 8, pp. 624~633.

(4) Choi, S. B., Lee, H. S., Hong, S. R. and Cheong, C. C., 2000, Control and Response Characteristics of a Magnetorheological Fluid Damper for Passenger Vehicles, SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, International Society for Optics and Photonics, Vol. 3985, Newport Beach, USA, pp. 438~443.

(5) 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.

(6) Cook, E., Hu, W. and Wereley, N. M., 2007, Magnetorheological Bypass Damper Exploiting Flow Through a Porous Channel, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 18, No. 12, pp. 1197~1203.

(7) Bai, X. X., Hu, W. and Wereley, N. M., 2013, Magnetorheological Damper Utilizing an Inner Bypass for Ground Vehicle Suspensions, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, No. 7, pp. 3422~3425.

(8) Sohn, J. W., Oh, J. S. and Choi, S. B., 2015, Design and Novel Type of a Magnetorheological Damper Featuring Piston Bypass Hole, Smart Materials and Structures, Vol. 24, No. 3, pp. 035013.

Seung-Bok Choi received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Inha University in 1979, MS degree and Ph.D. degrees from Michigan State University in 1986 and 1990, respectively. He is currently Dean of the Graduate School and fellow professor in Inha University. 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 and control of various systems using smart actuators.