

부가적인 유로가 있는 MR 댐퍼의 감쇠력 특성

Damping Force Characteristics of MR Damper with Additional Flow Path

손 정 우* · 오 종 석** · 최 승 북†

Jung Woo Sohn, Jong-Seok Oh and Seung-Bok Choi

(Received April 17, 2015 ; Revised April 17, 2015 ; Accepted May 22, 2015)

Key Words : MR Damper(MR 댐퍼), Additional Flow Path(부가 유로), Damping Force(감쇠력)

ABSTRACT

In this work, a new type of MR damper with additional flow path in piston is proposed and damping force characteristics are numerically evaluated. Flow-mode type MR damper is considered and mathematical model is established based on Bingham rheological model of MR fluid to obtain accurate prediction of damping force characteristics. Damping force of the proposed MR damper are calculated with respect to piston velocity and input current. In addition, investigation on damping force characteristics is carried out according to number of additional flow path and excellence of the proposed MR damper is demonstrated.

1. 서 론

MR 유체는 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 지능 재료의 하나로 자기장에 의해 유변학적 특성이 변하는 유체이다. MR 유체의 유변학적 특성은 가역적이며 인가되는 자기장의 특성에 따라 연속적으로 변할 수 있다. MR 유체는 자성을 갖는 입자와 자성을 갖지 않는 베이스 오일의 조합으로 이루어지며 자기장 인가에 따라 자성을 갖는 입자가 자기장의 방향에 따라 체인 형상을 이루게 되고, 이러한 체인 구조를 끊고 유체가 유동하기 위해서 항복 응력이 발생하게 된다.

이러한 항복 응력의 크기는 인가하는 자기장의 크기에 따라 조절될 수 있다. MR 유체를 활용하면 기어와 같은 부가적인 장치 없이 간단한 구조를 갖

는 기계 장치를 설계할 수 있는 장점이 있으며 반응 속도도 빠르고 사용되는 에너지도 매우 낮다. 이러한 MR 유체의 특성을 이용하여 다양한 기계 장치들을 구성하고자 하는 연구가 많이 진행되었다. 최근에도 댐퍼, 시트댐퍼, 마운트, 클러치, 브레이크 등의 장치들을 자동차, 항공기, 철도, 중공업, 군용 시스템 등에 활용하고자 하는 노력들이 계속되고 있다⁽¹⁻⁶⁾. 이 가운데 자동차용 MR 댐퍼에 대한 연구가 가장 활발하게 진행되었으며, 최근에는 상용 제품이 개발되어 일부 자동차에 적용되어 사용되고 있다. Carlson 등은 자동차용 MR 댐퍼의 구조를 제안하고, 스카이 훅 제어를 이용하여 제안된 댐퍼의 특성을 확인하였다⁽⁷⁾. Spencer 등은 MR 댐퍼의 이론적 모델을 제안하고 타당성을 검증하였다⁽⁸⁾. Lee와 Choi는 승용차용 MR 댐퍼의 구조를 제안하고 그 제어 성능을 검증하였다⁽⁹⁾. 또한 Sung과 Choi는

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

* Member, Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology

** Member, Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Inha University

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

자동차용 MR 댐퍼의 최적 설계를 유한요소법을 이용하여 제안하였다⁽¹⁰⁾.

일반적인 MR 댐퍼의 감쇠력과 피스톤 속도와의 관계는 비선형이다. 피스톤 속도가 0 m/sec일때는 감쇠력 또한 0 N이지만, 피스톤 속도가 조금만 증가해도 감쇠력은 매우 급격하게 증가하게 되고, 그 후에는 피스톤 속도가 증가할수록 감쇠력도 완만하게 증가하는 경향을 나타낸다⁽¹¹⁾. 이러한 특성은 피스톤 속도에 관계없이 큰 감쇠력을 얻을 수 있다는 장점이 되기도 하지만, 낮은 피스톤 속도에서 운동의 방향이 상하로 연속적으로 변화하는 경우에는 감쇠력의 급격한 변화가 발생하는 단점이 된다. 즉, 낮은 피스톤 속도에서 수직 방향의 진동이 발생하는 경우에는 양의 감쇠에서 음의 감쇠까지 감쇠력의 급격한 변화가 발생되게 되고, 이러한 경우 승차감 또한 급격히 떨어지게 된다. 승차감을 향상시키기 위하여 MR 댐퍼의 특성을 정확하게 표현하는 수학적 모델을 적용할 수 있다. MR 유체의 특성을 나타내기 위해 많이 사용되는 모델은 Bingham 모델과 Bi-viscous 모델 등이 있다. Bingham 모델은 수학적으로 매우 간단하여 폭넓게 활용되고 있으나, MR 댐퍼의 비선형성을 표현하지 못하는 단점이 있다. 또한 Bi-viscous 모델은 수학적 표현이 복잡하고 실험을 통해서 계수를 얻어야 하는 단점이 있다. Wereley 등은 Bingham 모델, Bi-viscous 모델, Herschel-Bulkley 모델을 적용한 MR 댐퍼의 이론적 해석을 수행하였다⁽¹²⁾. Seong 등은 MR 유체의 이력 현상을 고려한 모델을 구성하고 실험을 통하여 평가를 수행하였다⁽¹³⁾. 제어 알고리즘을 이용하여 승차감을 향상시킬 수도 있다. Sky-Hook 제어기는 구조가 간단하여 쉽게 적용할 수 있으나 외란과 모델 불확실성이 있는 경우 성능이 저하될 수 있다. 다양한 형태의 강건 제어기, 최적 제어기 등이 적용될 수 있으나 이러한 제어기는 수학적으로 복잡하여 구현하기 어려운 단점이 있다⁽¹⁴⁾. Oh 등은 바이패스 홀이 있는 형태의 MR 댐퍼를 제안하여 낮은 피스톤 속도에서의 감쇠력 특성을 향상시킬 수 있도록 하였다^(15,16).

이 연구에서는 부가적인 유로가 있는 승용차용 MR 댐퍼의 감쇠력 특성을 고찰한다. 피스톤 내부에 부가 유로가 있는 MR 댐퍼 구조를 제안하고, 이러한 댐퍼에서 발생하는 감쇠력을 정확히 표현하기 위한 수학적 모델을 구축한다. 이를 바탕으로 컴퓨터

시뮬레이션을 수행하여 부가 유로의 개수 변화에 따른 MR 댐퍼의 감쇠력 특성 변화를 관찰하고 제안된 모델의 우수성을 확인한다.

2. 시스템 모델링

이 연구에서 고려한 피스톤 내부에 부가 유로가 있는 유동 모드 형태의 MF 댐퍼의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 피스톤을 기준으로 상부와 하부 챔버로 나누어지고, MR 유체가 전체에 채워진다. 피스톤의 운동에 대한 부피 보상을 위하여 부동 피스톤과 어큐뮬레이터가 하부 챔버에 설치되어 있다. 부가 유로가 없는 기존의 유동 모드 형태 MR 댐퍼의 경우 피스톤의 상하 운동에 의해 간극을 통해서만 MR 유체의 유동이 발생되게 된다. 코일에 전류를 인가하여 간극 주위에 자기장을 발생시키면 MR 유체에는 항복 응력이 발생되고, 이로 인해 유체의 유동 저항이 증가하게 된다. 이 때 상부와 하부 챔버 사이에는 압력강하가 발생되고, 이를 이용하여 피스톤의 운동에 대응하는 감쇠력이 생성된다. 즉 코일에 인가하는 전류의 크기를 조절하여 감쇠력을 제어할 수 있게 된다. 이 연구에서 제안된 모델은 피스톤 로드 주위에 부가 유로가 존재하여 피스톤의 상하운동에 따라 MR 유체가 이 곳을 통하여 유동할 수 있게 설계 되어 있다. 자기장을 인가하지 않은 경우에는 간극과 부가 유로 두 곳을 통해 MR 유체의 유동이 가능하고, 자기장을 인가한 경우에는

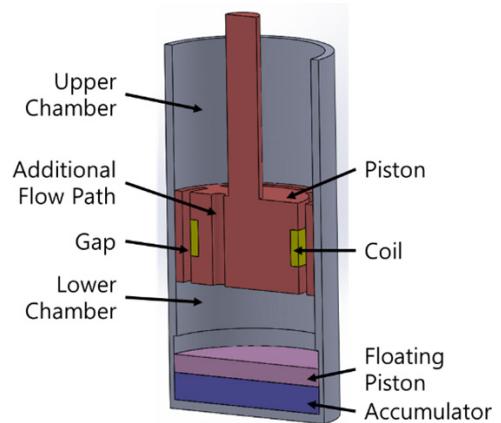


Fig. 1 Structural configuration of the proposed MR damper with additional flow path

부가 유로를 통해서만 MR 유체의 유동이 발생하게 된다. 여기서, 부가 유로는 자기장의 영향을 받지 않는 곳에 위치하는 것으로 가정하였다.

MR 댐퍼의 감쇠력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{Dampner} = F_{vis} + F_{cont} + F_{accu} \quad (1)$$

여기서, F_{cont} 는 간극에서의 제어력, F_{vis} 는 간극과 부가 유로에서의 점성력, F_{accu} 은 실험으로 구할 수 있는 어큐물레이터의 탄성력이다. MR 효과에 의한 제어 가능한 감쇠력은 피스톤 상부와 하부의 압력 차이에 따른 압력 강하에 의해 생성되며, 이 때 압력강하 상관계수 ΔP_{cont} 는 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta P_{cont} = \frac{cL_{gap}}{D_{gap}} \tau_y \quad (2)$$

여기서 c 는 MR 유체의 유속계수, D_{gap} 은 간극의 폭, L_{gap} 는 간극의 길이, τ_y 는 MR 유체의 항복응력이다. 따라서 MR 효과에 의한 제어 가능한 감쇠력은 압력강하 상관계수와 면적의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{cont} = (A_p - A_r)\Delta P_{cont} \text{sgn}(V_p) \quad (3)$$

여기서 A_p 와 A_r 은 각각 피스톤의 단면적과 피스톤 로드와 단면적이다. V_p 는 피스톤의 속도이고, 속도의 방향성을 표시하기 위하여 signum 함수를 사용하였다. MR 유체의 항복응력은 자속밀도 B 의 함수로 나타낼 수 있으며 Bingham 모델을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \tau_y(B) &= A_6 B^6 + A_5 B^5 + A_4 B^4 \\ &\quad + A_3 B^3 + A_2 B^2 + A_1 B^1 + A_0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} A_6 &= 0, A_5 = 0, A_4 = 0, \\ A_3 &= 0.00168768, A_2 = 0.60283606, \\ A_1 &= 132.122081, A_0 = 0 \end{aligned}$$

간극에서 발생하는 MR 유체의 유동은 Fig. 2(a)와 같이 고정된 두 평판 사이의 유동으로 가정할 수 있으며, 이 때의 압력강하 상관계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_{gap} = \rho g f_{gap} \frac{L_{gap}}{D_{gap}} \frac{V_{gap}^2}{2g} \quad (5)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도이고, f_{gap} , V_{gap} , D_{gap} 는 각각 간극에서의 마찰계수, 유체의 속도, 수력지름이다. 부가 유로에서 발생하는 MR 유체의 유동은 Fig. 2(b)와 같이 원통형의 파이프 내의 유동으로 고려할 수 있으며, 이 때의 압력강하 상관계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_{flow\ path} = \rho g f_{flow\ path} \frac{L_{flow\ path}}{D_{flow\ path}} \frac{V_{flow\ path}^2}{2g} \quad (6)$$

여기서, $f_{flow\ path}$, $V_{flow\ path}$, $D_{flow\ path}$ 는 각각 부가 유로에서의 마찰계수, 유체의 속도, 지름이다. 간극과 부가 유로의 입구와 출구의 상태가 동일하므로, 동일한 압력강하 상관계수를 가지게 된다. 따라서 식 (5)와 (6)을 이용하여, 점성력에 의한 감쇠력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{vis} &= (A_p - A_r)\Delta P_{vis} \\ &= (A_p - A_r)\Delta P_{gap} = (A_p - A_r)\Delta P_{flow\ path} \end{aligned} \quad (7)$$

또한, 어큐물레이터에서의 탄성력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

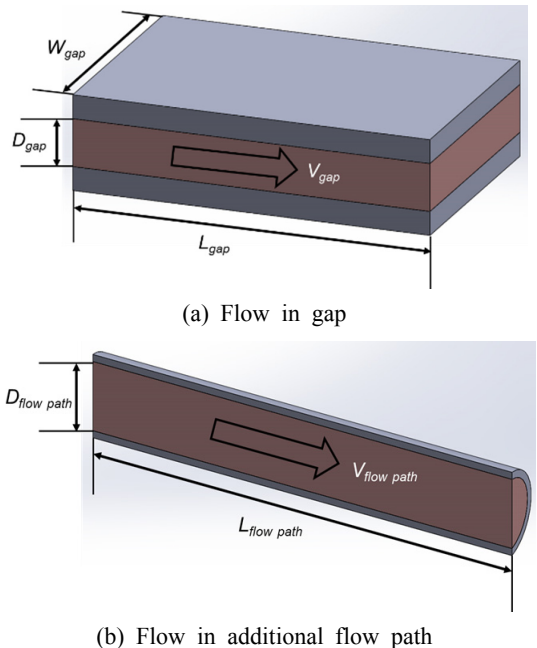


Fig. 2 Schematics of flow in gap and additional flow path

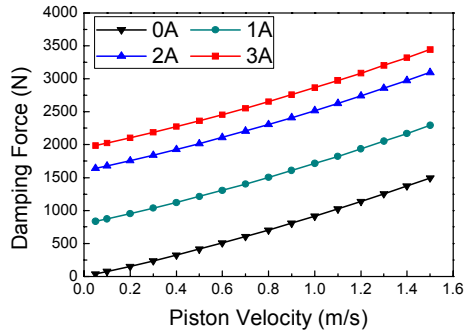
$$F_{accu} = (A_p - A_r) \Delta P_{accu} = (A_p - A_r) P_0 \left(V_0 / (V_0 + A_p x_p) \right)^\gamma \quad (8)$$

여기서, V_0 와 P_0 는 어큐플레이터의 초기 부피와 압력, γ 는 열팽창계수, x_p 는 피스톤의 변위이다. 식 (3), (7), (8)을 이용하여 제안된 MR 댐퍼의 감쇠력은 다음과 같이 표현된다⁽¹⁵⁾.

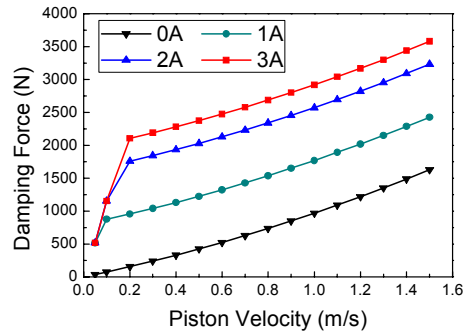
$$F_{total} = A_p P_0 \left(V_0 / (V_0 + A_p x_p) \right)^\gamma + (A_p - A_r) \left(\Delta P_{cont} \operatorname{sgn}(\dot{x}_p) + \Delta P_{gap} \right) \quad (9)$$

3. 시뮬레이션 결과 및 토의

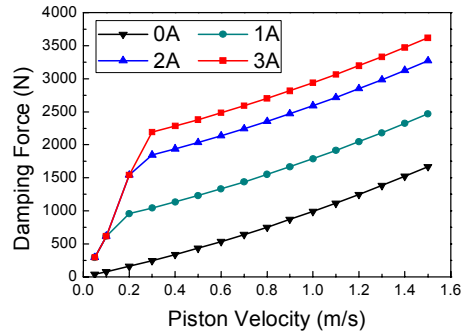
제안된 MR 댐퍼의 감쇠력 특성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 주요 설계 변수는 Table 1에 나타나 있으며, 부가 유로의 개수에 따른 감쇠력 특성을 고찰하였다. 제안된 MR 댐퍼의 감쇠력 특성을 부가 유로가 없는 경우부터 3개의 부가 유로가 있는 경우까지 고려하여 Fig. 3에 나타내었다. 피스톤의 속도는 0.05 m/s에서 1.5 m/s까지 변화시키면서 피스톤 속도에 따른 감쇠력의 변화를 관찰하였으며, 코일에 인가하는 전류의 크기는 0A에서 3A까지 1A씩 증가시키면서 인가 전류의 크기에 따른 감쇠력 특성의 변화를 함께 나타내었다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 부가 유로가 없는 일반적인 MR 댐퍼의 경우, 피스톤 속도가 0.05, 0.1, 0.2 m/s 등의 저속에서도 전류를 인가함에 따라 높은 감쇠력이 발생하고



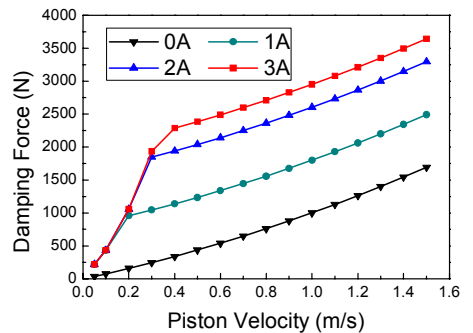
(a) Without additional flow path



(b) One additional flow path



(c) Two additional flow path



(d) Three additional flow path

Fig. 3 Damping forces characteristics

Table 1 Design parameters for MR damper

Length of additional flow path	27 mm
Diameter of additional flow path	2 mm
Length of gap	27 mm
Diameter of gap	0.7 mm
Diameter of piston	45 mm
Density of MR fluid	2600 g/m ³
Viscosity of MR fluid	500 cp
Height of coil	9 mm
Number of coil turns	100

있다. 하나의 부가 유로가 있는 경우에 대한 감쇠력 특성이 Fig. 3(b)에 나타나 있는데, 0.05, 0.1 m/s의 낮은 피스톤 속도에서 전류를 인가한 경우 Fig. 3(a)의 결과와 비교하여 감쇠력이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(c)와 (d)에 나타난 바와 같이 부가 유로의 개수가 증가함에 따라 0.3 m/s 이하의 낮은 피스톤 속도에서 전류를 인가한 경우 감쇠력의 크기가 조금씩 감소하여 완만한 기울기를 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 낮은 피스톤 속도에서는 부가 유로의 개수에 따라 감쇠력 특성이 변하지만, 0.3 m/s 이상의 피스톤 속도에서는 감쇠력이 부가 유로의 개수에 영향을 받지 않고, 최대 감쇠력도 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 MR 댐퍼에 추가적인 유로를 형성하여 최대 감쇠력의 손실 없이 낮은 피스톤 속도에서는 감쇠력의 급격한 변화를 방지하고 승차감의 향상을 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

4. 결 론

이 연구에서는 추가적인 유로가 있는 형태의 MR 댐퍼의 감쇠력 특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 고찰하였다. 부가 유로가 있는 유동 모드 형태의 MR 댐퍼를 제안하고, 이러한 댐퍼의 댐핑력 특성을 정확하게 묘사할 수 있는 수학적 모델을 구축하였다. 댐퍼에 발생하는 감쇠력의 크기를 피스톤 속도와 자기장 형성을 위해 인가한 전류의 크기에 따라 계산하였고, 이를 부가 유로의 개수에 따라 감쇠력의 특성이 변하는 것을 확인하였다. 부가 유로의 개수가 증가함에 따라 낮은 피스톤 속도에서 감쇠력의 크기가 감소하여 0.05 m/sec에서 0.3 m/sec 구간에서는 감쇠력 그래프의 기울기가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 연속적이고 부드러운 감쇠력의 제어가 가능할 것으로 기대된다. 향후 MR 댐퍼를 제작하고 감쇠력 실험을 수행하여 제안된 모델의 정확성을 검증할 예정이다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014R1A1A2057625).

References

- (1) Dyke, S. J., Spencer, Jr. B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1998, An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection, *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, No. 5, pp. 693~703.
- (2) Choi, S. B., Nam, M. H. and Lee, B. K., 2000, Vibration Control of a MR Seat Damper for Commercial Vehicles, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, No. 12, pp. 936~944.
- (3) Choi, S. B., Hong, S. R., Sung, K. G. and Sohn, J. W., 2008, Optimal Control of Structural Vibrations Using a Mixed-mode Magnetorheological Fluid Mount, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 3, pp. 559~568.
- (4) Neelakantan, V. A. and Washington, G. N., 2005, Modeling and Reduction of Centrifuging in Magnetorheological(MR) Transmission Clutches for Automotive Applications, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, No. 9, pp. 703~711.
- (5) Li, W. H. and Du, H., 2003, Design and Experimental Evaluation of a Magnetorheological Brake, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, No. 7, pp. 508~515.
- (6) Choi, Y. T. and Wereley, N. M., 2003, Vibration Control of a Landing Gear System Featuring Electrorheological/Magnetorheological Fluids, *Journal of Aircraft*, Vol. 40, No. 3, pp. 432~439.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.

(11) Sung, G. K. and Choi, S.-B., 2013, Ride Comfort Evaluation of Electronic Control Suspension Using a Magneto-rheological Damper, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 464-471.

(12) Wereley, N. M., Cho, J. U., Choi, Y. T. and Choi, S. B., 2008, Magnetorheological Dampers in Shear Mode, Smart Materials and Structures, Vol. 17, No. 1, pp. 015022.

(13) Seong, M. S., Choi, S. B. and Han, Y. M., 2009, Damping Force Control of a Vehicle MR Damper Using a Preisach Hysteretic Compensator, Smart Materials and Structures, Vol. 18, No. 7, pp. 074008.

(14) Fallah, A. Y. and Taghikhany, T., 2014, Robust Semi-active Control for Uncertain Structures and Smart Dampers, Smart Materials and Structures, Vol. 23, No. 9, pp. 095040.

(15) Oh, J. S., Shin, D. K., Sohn, J. W. and Choi, S. B., 2014, Performance Evaluation on an MR Damper Featuring Bypass Hole for Passenger Vehicle, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 998-999.

(16) Sohn, J. W. Oh, J. S. and Choi, S. B., 2014, Design and Novel Type of a Magnetorheological

Damper Featuring Piston Bypass Hole, Smart Materials and Structure, Vol. 24, No. 10, pp. 035013.



Jung Woo Sohn received his Ph.D. degree in the Department of Mechanical Engineering from Inha University in 2008. He is now working as an assistant professor in the Department of Mechanical Design Engineering of

Kumoh National Institute of Technology. He has interest on the design and control of smart structures and systems.



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.