

영구자석을 이용한 전단모드 MR 댐퍼 설계 및 해석

Design and Analysis of Magneto-Rheological Damper Using Permanent Magnet

김 완 호* · 칼루반 수레쉬* · 박 진 하* · 최 상 민* ·
박 춘 용* · 강 제 원* · 최 승 복†

Wan Ho Kim, Kaluvan Suresh, Jhin Ha Park, Sang Min Choi,
Chun-Yong Park, Je-Won Kang and Seung-Bok Choi

(Received April 28, 2016 ; Revised June 20, 2016 ; Accepted July 12, 2016)

Key Words : Permanent Magnet(영구자석), MR Damper(MR 댐퍼), Shear Mode(전단모드), Variation of Magnetization Area(자화 면적의 변화)

ABSTRACT

A novel Permanent Magnet based Magneto Rheological (PM-MR) damper is proposed in this paper. The principle of proposed MR damper is achieved by designing a linearly varying magnetization area with-respect to the movable permanent magnetic based piston setup. Nowadays, commercially available MR damper uses electromagnetic coils for generating the variable magnetic fields corresponding to the variable damping force. The amount of magnetic field produced by the electromagnetic coils are depends on the biasing current of voltage source. The key enabling concept of the proposed MR damper is to replace the electromagnetic coils and the voltage sources by utilizing the variable area based permanent magnetic piston setup. The proposed unique design structure of PM-MR damper has an increasing shear mode damping force with the piston movement in both jounce and rebound motion. In this research, analytical model of the proposed structure is derived and the structural design of proposed concept is verified using numerical CAD tool. As a result, the damping force is increase when piston movement in both jounce and rebound motion.

1. 서 론

오늘날 많은 산업 현장 및 장비에서는 진동 문제를 해결하기 위해 많은 시도가 이루어지고 있다. 일반적으로 사용하고 있는 수동형 댐퍼는 유체의 점도에 의해 발생하는 감쇠력을 이용하여 진동을 절연하게 된다. 그러나 수동형 댐퍼는 환경의 변화에 대응

하지 못하고, 가진 특성 및 시스템이 조금의 변화라도 발생하게 되면 진동 절연 성능이 급격하게 감소하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 능동 댐퍼와 반능동 댐퍼의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 능동 댐퍼는 비연속적인 감쇠력, 구조의 복잡성 및 높은 가격으로 인하여 보편화 되지 못하고 있는 실정이다. 이런 이유로 최근에는 ER (electro-rheological) 또는 MR(magneto-rheological) 유

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

* Department of Mechanical Engineering, Inha University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2015 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

체를 이용한 반-능동형 댐퍼에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 여기서, MR 유체는 자기장(magnetic field)에 의해 상 변화가 일어나는 지능 유체로서 ER 유체에 비하여 침전물 발생이 매우 적을 뿐만 아니라 비교적 큰 항복응력을 발생시켜 보다 큰 힘을 요하는 각종 응용장치에 적용하려는 연구가 시도되고 있다. Carlson et al⁽¹⁾은 차량용 MR 댐퍼를 제안하였으며, 스카이훅 제어기(skyhook controller)를 적용하여 제안된 댐퍼의 우수성을 입증하였다. Spencer et al⁽²⁾은 지진을 방지하기 위한 MR 댐퍼를 제안하여 이론적 모델의 타당성을 입증하였고, Wereley et al⁽³⁾은 반능동형 MR 댐퍼를 제안하고 감쇠력 히스테리시스(hysteresis)에 대한 이론적 모델을 제시하고 실험결과와 비교 분석하였다. 최근에 Choi et al⁽⁴⁾은 실린더형 MR 댐퍼를 제안하고, MR 댐퍼를 장착한 자동차의 감쇠력 제어특성을 고찰하였다.

그러나 일반적으로 MR 댐퍼는 자기장을 발생시키기 위하여 자기회로를 피스톤에 구성하게 되고, 외부 자기장의 제어를 위한 컨트롤러와 전원 장치가 사용되게 된다. 이러한 구조의 문제로 인하여 MR 댐퍼의 제작에 많은 어려움이 있고 가격이 높다는 단점을 갖는다.

이 연구에서 제안하고자 하는 MR 댐퍼는 기존 MR 댐퍼가 갖는 단점을 극복하기 위하여 전류코일로서 발생시키는 자기회로와 컨트롤러를 사용하지 않고 감쇠력을 변화시킬 수 있는 새로운 형태의 MR 댐퍼다. 제안된 댐퍼는 영구자석을 이용하는 MR 댐퍼로서 자기장의 세기를 피스톤의 위치에 따라 변화시킬 수 있는 MR 댐퍼다. 제안된 MR 댐퍼의 성능 평가를 위하여 새로운 MR 댐퍼를 설계하였고, 설계된 댐퍼의 성능을 검증하기 위해 FEM 해석(ANSYS)을 통하여 제안된 MR 댐퍼내의 자기장 해석을 수행하였다. 또한, MR 댐퍼의 감쇠력 지배방정식을 도출 하였다.

2. 영구자석 전단모드 MR 댐퍼

2.1 영구자석 MR 댐퍼의 원리

(1) 영구자석의 위치에 의한 자기장 변화 모델

Fig. 1은 제안된 댐퍼의 중공형 자성체를 보여준다. 중공형 자성체는 상자성체 1개 와 강자성체 2개

로 이루어져 있다. 여기서 상자성체(paramagnetic)란 자기장 안에서 약하게 자화되고 자기장이 제거되면 자화하지 않는 재료이고, 강자성체(ferromagnetic)는 자기장 하에서 강하게 자화되고 자기장이 제거되어도 자화가 남는 재료이다. 강자성체는 서로 90°의 각을 갖고 상자성체에 조립된다. 상자성체는 실린더 형태를 띠며, 강자성체가 삽입 될 수 있는 홈을 갖고 있다. 강자성체는 자화면적이 변화 할 수 있도록 삼각형 형태로 설계된다. Fig. 2는 피스톤의 위치에 따라 자속 밀도가 변화하는 댐퍼의 개념도이다. 영구자석이 강자성체 사이에 위치하여 자기장을 발생시키면 자기장은 자석의 N극에서 시작하여 삼각뿔 형태의 강자성체를 타고 S극으로 들어온다. 이런 구조로 인하여 자석의 위치에 따라 자화 면적의 변화로 인하여 통과되는 자기장의 세기도 변화되는 것이다. 변화된 자화면적과 자기장의 세기는 감쇠력을 변화시킨다. 따라서 이 MR 댐퍼는 영구자석의 속도뿐 아니라 위치에 따라 감쇠력이 변화한다. 이 연구에서는 영구자석의 속도와 위치에 따른 자기장의 변화를 도출하기 위해 자기장 해석 프로그램을 이용해 자기장 해석을 수행한다.

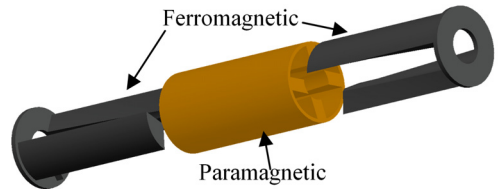


Fig. 1 Schematics of cylindrical magnetic

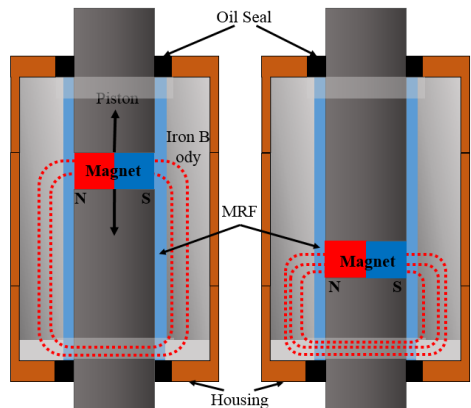


Fig. 2 Variation of magnet circuit

(2) 스위치 모델을 이용한 자화 방향의 전환

이 댐퍼는 가해지는 힘의 방향이 바뀔 때 자석의 자화 방향이 전환되는 스위치 구조를 갖고 있다. 스위치는 피스톤 내부에 위치한다. 피스톤이 진행방향의 축을 회전축으로 하면 Fig. 3에 도시된 바와 같이 댐퍼의 압축(jounce mode) 혹은 인장(rebound mode)시 하부피스톤(under piston)과 영구자석이 90° 회전하게 되어 자화방향 역시 90° 회전한다. 이런 구조로 인하여 댐퍼에 인장력 혹은 압축력이 작용되면 영구자석은 항상 자화 면적이 증가하는 방향으로 움직이게 된다. 스위치 구조 메커니즘은 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 통하여 검증하였다.

2.2 영구자석 MR 댐퍼의 모델

(1) 영구자석 MR 댐퍼의 수학적 모델

Fig. 4에 도시된 바와 같이 제안된 댐퍼는 전단

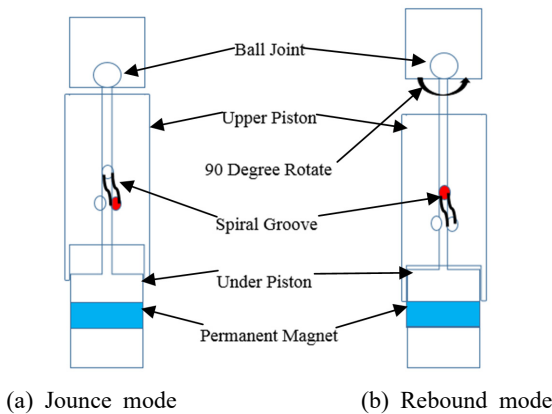


Fig. 3 Switch rotating mechanism of piston

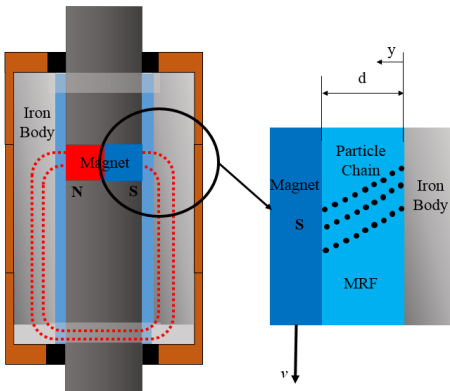


Fig. 4 Schematics of shear mode

모드(shear mode)로 자기의 한 극이 다른 극에 상대운동을 하여 그 사이에 충전되어 있는 MR 유체의 미립자들의 사슬이 이동하는 극의 방향의 반대방향으로 항복응력이 작용한다. 이 연구에서는 극을 생성하기 위하여 영구자석을 이용하였고, 자기회로가 구성될 수 있도록 하기 위하여 강자성체인 철을 이용하였다. 제안된 MR 댐퍼는 움직이는 영구자석과 정지해 있는 강자성체 사이에 자기장이 생성되게 되면 그 사이에 존재하는 MR 유체의 항복응력이 변화하는 전단 모드 MR 댐퍼이다. 제안된 MR 댐퍼의 수학적 모델을 도출하기 위하여 Bingham 모델을 사용하였다⁽⁵⁾. 제안된 영구자석의 감쇠력은 다음과 같다.

$$F_d = \tau_y (H_{PM}) A(x) \text{sgn}(\dot{x}) + \pi(R + d)H\eta \frac{\dot{x}}{d} \tag{1}$$

여기서 F_d 는 MR 댐퍼의 감쇠력을 나타내며, $\tau_y(H_{PM})$ 는 MR 유체의 항복응력, H_{PM} 은 영구자석에 의해 인가되는 자기장의 세기, A 는 자화 면적, R 은 피스톤 반지름, d 는 영구자석과 자화 면적 사이의 간극, H 는 피스톤이 움직일 수 있는 전체 변위, η 는 MR 유체의 점성계수를 나타낸다. 식 (1)은 다음과 같이 2종류의 힘의 합으로 표현할 수 있다.

$$F_d = F_\eta + F_y \tag{2}$$

여기서 F_η 는 뉴토니안(Newtonian) 점성힘, F_y 는 MR 유체에 의한 항복응력 힘으로 나타낼 수 있고, 각각의 항들은 다음과 같이 표현된다.

$$F_\eta = \eta\pi(R + d)H \frac{\dot{x}}{d} \tag{3}$$

$$F_y = \tau_y (H_{MR}) A(x) \text{sgn}(\dot{x}) \tag{4}$$

여기서 \dot{x} 는 피스톤의 속도이고 $\text{sgn}(\dot{x})$ 는 신호함수로서 피스톤의 속도가 양수일 때 1, 음수일 때 -1을 출력한다. 영구자석을 이용한 전단모드 댐퍼의 감쇠력을 구하기 위해서 최종적으로 피스톤 변위에 따른 항복응력과 자화면적이 계산되어야 한다. Fig. 5는 영구자석 MR 댐퍼의 자화면적을 도시한 그림이다. 위

치에 대한 자화 면적 함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A(x) = \frac{\ell_f L}{2H} (2x + L) \tag{5}$$

(2) 자기장 시뮬레이션

제안된 MR 댐퍼의 특징은 영구자석의 위치가 따라 자기장의 세기가 변화하는 것이다. 식 (1)에서 항복응력은 영구자석의 위치에 따른 자기장세기의 함수로 나타낼 수 있다. ANSYS를 이용하여 위치에 따른 자기장의 세기의 해석을 수행하였다. Fig. 6은 해석중인 댐퍼의 단면도이다. 시뮬레이션에 사용된 MR 유체는 Lord사의 132-DG이다.

2.3 영구자석 댐퍼의 감쇠력 성능

(1) 자기장 함수

Fig. 7은 자기장 시뮬레이션 해석결과를 보여준다. 피스톤 변위에 대한 자기장의 세기 함수는 다음과 나타낼 수 있으며 단위는 kA/m이다.

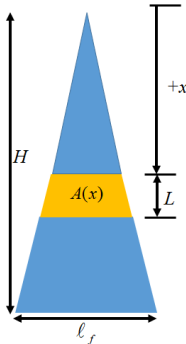


Fig. 5 Variables of magnetization area

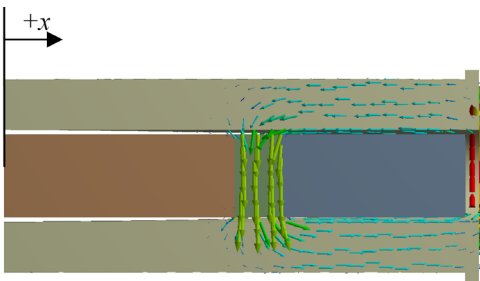


Fig. 6 Magnet circuit in simulation

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

식 (6)과 같이 자기장의 세기는 영구자석의 위치의 관한 3차 다항식으로 나타낼 수 있다. Fig. 8은 Fig. 7의 해석결과를 토대로 실제 피스톤이 왕복할 때 나타내어지는 자기장세기-변위 곡선이다. 도시된 것처럼 피스톤이 하강할 때(jounce mode) 자기장의 세기가 줄어들고 끝에 도달하여 다시 상승할 때(rebound mode) 같은 경향으로 자기장의 세기가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 해석된 자기장 세기 함수를 바탕으로 Fig. 9에 도시된 항복응력-자기장세기의 관계를 이용하면 위치에 따른 항복응력을 도출할 수 있다. 사용된 MR 유체의 항복응력과 자기장 세기의 관계는 다음과 같다.

$$\tau_y(H_{PM}) = b_3 H_{PM}^3 + b_2 H_{PM}^2 + b_1 H_{PM} + b_0 \tag{7}$$

그 결과 Fig. 10에 도시된 것과 같이 MR 유체의 항복응력과 피스톤 변위의 관계를 나타낼 수 있다. 그림에서 피스톤 변위에 따라 증가하다가 일정한 구간을 지나 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다.

(2) 성능 곡선

위 자기장 해석으로 계산된 댐퍼의 감쇠력 결과를 이용해서 수학적 해석 프로그램 Wolfram Mathematica를 이용하여 가진 시뮬레이션을 수행하였다. 가진 변위는 식 (8)과 같다.

$$x = \frac{H}{2} \{ \sin(2\pi ft) + 1 \} \tag{8}$$

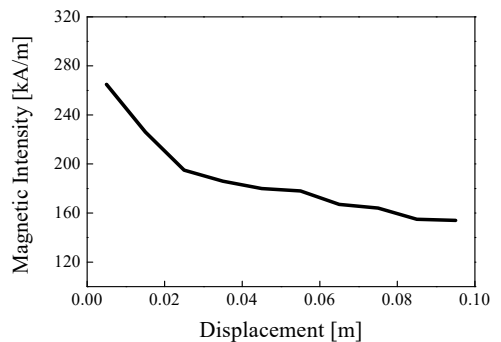


Fig. 7 Analysis result

가진 시간은 1초, 주파수 f 는 1 Hz로 설정하였다. 최종 해석에 사용된 변수들은 Table 1에 정리되어 있다. Fig. 11에서 보이는 바와 같이 감쇠력은 압축 모드(jounce mode) 일 때 피스톤 변위가 증가할수록 커지고 인장모드(rebound mode) 일 때는 피스톤 변위가 감소할수록 작아지는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 12는 MR 댐퍼의 감쇠력과 피스톤 속도의 관계를 도시한 그래프다. 최대 감쇠력은 24 N이다.

결과로 제안된 댐퍼가 압축과 인장 두 가지 상황에서 감쇠력이 증가하는 성능을 확인 할 수 있다.

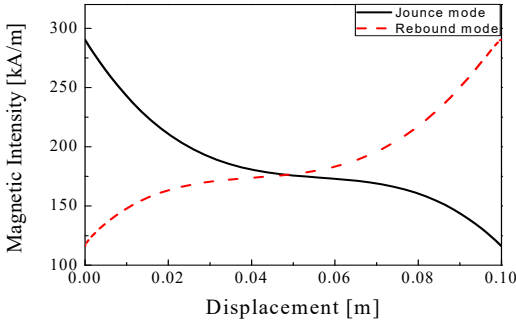


Fig. 8 Magnetic intensity - displacement diagram

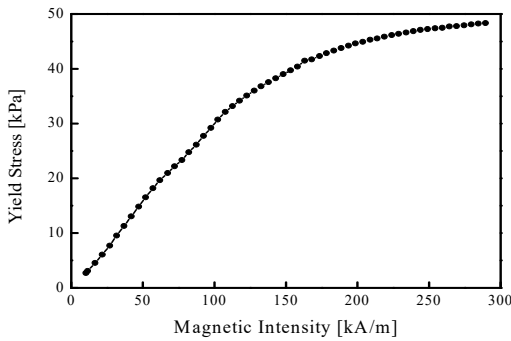


Fig. 9 Yield stress-magnetic intensity curve of Lord MR 132-DG

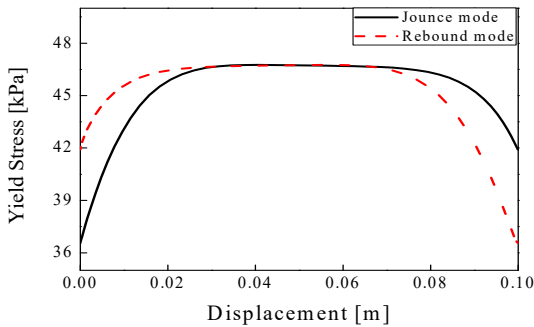


Fig. 10 Yield stress - displacement diagram

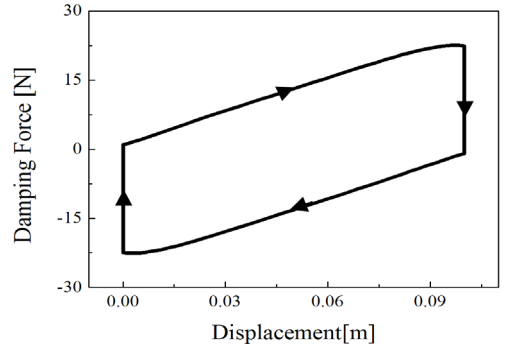


Fig. 11 Damping force - displacement diagram

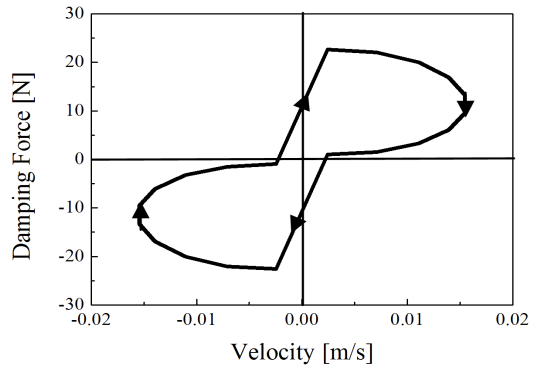


Fig. 12 Damping force - velocity diagram

Table 1 Parameters of analysis

Parameter	Value	Unit
R	22.5	mm
d	1	mm
l_f	3.6	mm
η	0.092	Pa-s
H	100	mm
L	10	mm
a_0	0.29	
a_1	-5.6E6	
a_2	9.6E7	
a_3	-5.7E8	
b_0	-2.5167	
b_1	0.4258	
b_2	-0.0011	
b_3	8E-7	

3. 결 론

이 연구에서는 영구자석을 통하여 외부전원 없이 감쇠력을 조절하는 전단모드 MR 댐퍼를 제안하였다. 제안된 MR 댐퍼의 성능을 검증하기 위하여 FEM 해석 프로그램을 이용하여 자기장 해석을 수행하였고 Bingham 모델을 이용하여 수학적 시뮬레이션을 수행하였다. 자기장 해석 결과 자기장의 세기는 압축모드일 때는 피스톤의 변위가 증가함에 따라 3차 함수의 형태로 감소하고 인장모드 일 때는 증가한다. 하지만, 자화 면적은 압축모드일 때 증가하고, 인장모드일 때 감소한다. 자기장 해석 결과로 도출된 자기장의 세기를 MR 유체의 특성에 따라 9차 함수 형태의 항복응력 함수가 도출되었으며, 변위에 대한 감쇠력 함수가 결정되었다. 그 결과 감쇠력은 압축모드일 때는 피스톤 변위가 증가함에 따라 같이 증가하고 피스톤 변위가 감소할 때 또한 증가하는 경향을 보인다. 최대 감쇠력은 24 N으로서 이 결과로부터 제안된 영구자석 MR 댐퍼는 외부전원의 공급과 제어기 없이 진동제어에 쓰일 수 있음을 확인하였다. 이는 복잡한 구조와 높은 단가를 갖는 기존의 MR 댐퍼를 대체할 수 있을 것으로 판단된다. 추후 이 영구자석 MR 댐퍼에 관한 연구를 바탕으로 성능에 직접적인 영향을 미치는 변수들을 찾아내어 실험적으로 성능을 고찰하고 이를 통해 영구자석 MR 댐퍼의 해석적 모델을 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 10, pp.

624~633.

(4) Seong, M. S., Choi, S. B., Lee, E. S. and Kim, C. H., 2012, Design of Frictionless MR Damper for Integrated Isolation Mount, Advanced Science Letters, Vol. 12, No. 1, pp. 25~29.

(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) Nguyen., Q. H., Lang, V. T. and Choi, S. B., 2015, Optimal Design and Selection of Magneto-rheological Brake Types Based on Braking Torque and Mass, Smart Materials and Structures, Vol. 24, No. 6, pp. 067001.

(7) Sohn, J. W., Jeon, J. C., Nguyen, Q. H. and Choi, S. B., 2015, Optimal Design of Disc-type Magneto-rheological Brake for Mid-Sized Motorcycle : Experimental Evaluation, Smart Materials and Structures. Vol. 24, No. 8, pp. 085009.

(8) Choi, S. B., Sung, K.-G., Cho, M.-S. and Lee, Y.-S., 2007, The Braking Performance of a Vehicle Anti-lock Brake System Featuring an Electro-rheological Valve Pressure Modulator, Smart materials and Structures, Vol. 16, No. 4, pp. 1285~1297.

(9) Park, E. J., Stoikov, D., da Luz, L. F. and Suleman, A., 2006, A Performance Evaluation of an Automotive Magnetorheological Brake Design with a Sliding Mode Controller, Mechatronics 16, pp. 405~416.



Seung-Bok Choi received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Inha University in 1979, M.S. 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.