

MR 밸브의 전자기적 설계와 성능평가

김기한* · 남윤주** · 박명관†

(2007년 8월 27일 접수, 2008년 1월 22일 심사완료)

Electromagnetic Design and Performance Evaluation of an MR Valve

Ki-Han Kim, Yun-Joo Nam and Myeong-Kwan Park

Key Words : Electromagnetic Design(전자기적 설계), Magneto-Rheological Fluid(자기유변유체), MR Valve(MR 밸브)

Abstract

This paper presents an electromagnetic design method for magneto-rheological (MR) valves. Since the apparent viscosity of MR fluids is adjusted by applying magnetic fields, the MR valves can control high-level fluid power without any mechanical moving parts. In order to improve the performances of the MR valve, it is important that the magnetic field is effectively supplied to the MR fluid. For the purpose, the magnetic circuit composed with the yoke for forming magnetic flux path, the electromagnetic coil and the MR fluid should be well designed. In order to improve the static characteristic of the MR valve, the length of the magnetic flux path is decreased by removing the unnecessary bulk of the yoke. Also, in order to improve its dynamic and hysteretic characteristics, the magnetic reluctance of the magnetic circuit should be increased by minimizing the cross-sectional area of the yoke through which the magnetic flux passes. After two MR valves, one is a conventional type valve and the other is the proposed one, are designed and fabricated, their performances are evaluated experimentally.

1. 서 론

MR(magneto-rheological) 유체는 저 투자율의 비전도성 용매에 고 투자율을 가진 수에서 수십 마이크로 크기의 입자를 분산시킨 현탁액이다.⁽¹⁾ 이러한 MR 유체는 자기장 무 부하 시에 뉴턴(Newtonian) 유체의 거동을 가지지만, 자기장 부하 시에는 입자들이 자기장 방향으로 배열되어 형성된 체인 구조에 의해 빙햄(Bingham) 유체와 유사

한 거동을 갖는다.

MR 유체를 적용한 장치들은 전류 입력을 이용하여 연속적이며 가역적인 출력 제어가 가능하다. 뿐만 아니라 간단한 구조, 부피 대비 고출력, 저관성력 등의 장점 때문에 충격흡수장치,⁽²⁾ 진동절연장치,⁽³⁾ 브레이크⁽⁴⁾ 및 클러치⁽⁵⁾ 등에 대한 다양한 응용연구가 활발히 진행되어 왔다.

특히, MR 밸브는 기존 밸브들과는 달리 기계 작동부 없이도 큰 유체 동력을 효과적으로 제어할 수 있기 때문에 장치의 경량화 및 단순화에 매우 유리하다. 따라서 많은 연구자들에 의해 MR 유체를 이용한 릴리프 밸브,⁽⁶⁾ 압력 및 유량제어밸브,^(7,8) 디젤 엔진용 흡·배기 조절밸브⁽⁹⁾ 및 바이패스 댐퍼용 밸브⁽¹⁰⁾에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다.

MR 유체에 자기장을 효과적으로 공급하기 위

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

E-mail : mkpark1@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2464 FAX : (051)514-0685

* 부산대학교 대학원 기계공학부

** 부산대학교 대학원 능형기계공학과

해서 MR 유체 장치의 자기회로 설계가 매우 중요하다. 일반적으로 MR 유체 자체의 응답시간은 수 msec 이내인데 반해, MR 유체 장치는 상대적으로 느린 응답시간을 갖는다.⁽¹¹⁾ 이는 MR 유체와 강자성체로 구성된 자기회로의 전자기적 특성과 크게 관계한다. 특히, 강자성체의 자화(magnetization) 특성은 MR 유체 장치의 비선형 입출력 관계를 야기할 수 있다. 따라서 MR 밸브의 응답특성 및 비선형 입출력 이력특성을 개선하기 위해서 전자기적 특성을 고려한 자기회로의 설계가 필수적이다.

이에 대한 기존 MR 밸브의 연구를 살펴보면 다음과 같다. Yoo와 Wereley는 유한요소해석을 통하여, 밸브의 성능은 유지하면서 밸브 크기의 최소화를 시도했다. 이러한 최적설계는 제한된 밸브의 크기에 대해서 자기회로가 최대 자속밀도 분포를 갖도록 이뤄졌다.⁽¹²⁾ 그 후, 개발된 MR 밸브를 이용하여 휘스톤 브릿지 구조의 유압 시스템을 구성하고 이에 대한 성능평가를 수행하였다.⁽¹³⁾ Li 외 2인은 밸브 자기회로 내부의 자속밀도 포화를 방지하기 위해서 그리고 밸브의 무게를 최소화하기 위해서, 유한요소해석을 통해 밸브의 치수를 시행착오에 의한 최적화를 수행하였다. 또한 MR 유체의 빙햄거동 특성에 고려하여 MR 밸브의 성능예측을 수행하였다.⁽¹⁴⁾ 또한, Ai 외 2인은 유로(flow path)의 형태에 따른 밸브의 성능을 비교하기 위하여, Yoo와 Wereley의 설계 및 해석방법에 기초하여 축 방향 유로와 반경 방향 유로를 갖는 각각의 밸브를 설계하고 시뮬레이션을 통해 성능을 비교하였다. 그리고 두 방식이 결합된 밸브가 가장 우수한 성능을 제시함을 확인하였다.⁽¹⁵⁾ 그러나 이들 연구들은 자기회로의 자기 포화를 회피하기 위해서 또는 밸브의 정특성 평가를 위해서 자기장 해석을 수행하였기 때문에, 자기회로의 설계 변수를 해석적으로 제시하는데 한계를 갖는다.

한편, MR 밸브 이외의 MR 유체 작동기에 전자기적 설계를 적용한 몇몇 연구들이 보고되고 있다. Gavin 외 2인은 MR 댐퍼의 전력소비를 최소화하고 응답속도를 향상시키기 위해 전자기적 설계를 시도하였다. 이때 요크(yoke)를 위한 강자성체와 MR 유체의 비선형 전자기적 특성을 MR 유체의 비뉴턴유체 거동을 결합하여 해석을 수행하였다.⁽¹⁶⁾ Takesue 등은 등가 전기회로 이론을 이용하여 MR 브레이크의 자기회로 설계 방법을 제시하였고, 기초 실험과 자기장 해석을 통해 제안된 방법의 유용성을 입증하였다.⁽¹⁷⁾ 또한 FEM을 이용한 자기장 해석결과에 기초하여 MR 브레이크의 과

도 응답특성에 영향을 주는 두 가지 요인을 조사하고, 실험을 통해 제안된 개선 방안의 유용성을 입증하였다.⁽¹⁸⁾ 최근에, Nam 외 3인은 MR 브레이크의 응답시간을 향상시키고 비선형 입출력 특성을 개선하기 위해, 강자성체와 MR 유체의 자화 특성 및 자기회로의 전자기적 특성을 고려한 설계 방법을 제시하였다. 또한 자기장 해석과 기초 실험을 통해서 제안된 전자기적 설계 방법의 유용성을 확인하였다.⁽⁴⁾ 이들 연구 결과는 MR 유체 장치의 자기회로 설계에 있어 유용한 관점들을 제시하고 있다. 그러나, MR 밸브는 구조적인 형상과 작동 방식에 있어서 MR 댐퍼 또는 MR 브레이크와 실제로 큰 차이를 갖는다. 이러한 차이는 분명 앞서 제시된 연구 결과를 MR 밸브에 직접 적용하는데 한계를 제공한다.

따라서 본 연구의 목적은 MR 밸브의 성능을 개선하기 위한 자기회로의 해석적 설계방법을 제시하는 것이다. 이를 위해, 강자성체 및 MR 유체의 자화 특성 및 자기회로의 전자기적 특성을 고려하여 자기회로의 설계변수를 정량적으로 도출하였다. 그리고 자기장 해석 및 기초 성능평가를 통하여 기존과 유사한 구조를 갖는 MR 밸브에 비해 제안된 방법으로 설계된 MR 밸브의 성능이 개선되었음을 확인하였다. 이러한 결과들은 제안된 자기회로 설계방법이 MR 밸브의 응용범위를 확장하기 위한 기초적 설계 자료로써 유용하게 사용될 수 있음을 보여준다.

2. MR 밸브의 기계적 설계

본 연구에서 고려된 MR 밸브의 구조는 Fig. 1에 제시되었다. MR 유체는 밸브의 입구(inlet)로 유입되어 요크(yoke)와 케이싱(casing)사이를 통과한 후, 출구(outlet)로 유출된다. MR 밸브 내부의 자기회로는 MR 유체, 전자석 코일(coil) 그리고 자로(magnetic flux path) 형성을 위한 요크(yoke)와 케이싱으로 구성된다. 제안된 MR 밸브에서는 요크와 케이싱 사이의 간극을 일정하게 유지시키는 것이 중요하다. 따라서, 요크와 케이싱은 전체나사형 샤프트(shaft)에 너트로 고정되었다. 이로 인해 요크의 축방향 병진운동 및 회전운동은 불가능하며 MR 유체가 지나는 간극의 크기는 일정하게 유지된다. 그리고 비전도체이며 비자성체인 재료로 제작된 부쉬(bush)와 와셔(washer)는 자기장의 누설을 완화하기 위해 설치되었다.

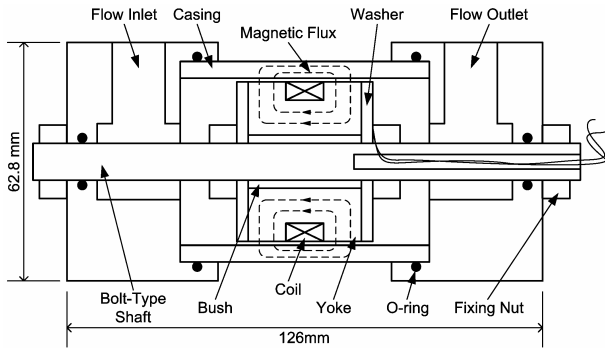


Fig. 1 Schematic configuration of the MR valve

외부로부터 전류가 전자석 코일에 인가되면 이에 대응되는 기자력(magnetomotive force)이 자기회로 내부에 생성되며, 이로 인해 케이싱과 요크 사이의 간극을 지나는 MR 유체에 자기장이 부하될 수 있다. 부하된 자기장 강도는 MR 유체의 항복전단응력(yield shear stress)을 증가시켜 유체의 흐름을 방해함으로써 MR 밸브의 입출구 사이에 압력강하를 생성한다. 따라서 MR 밸브의 출력 즉, 압력강하 크기는 코일 전류를 조절함으로써 연속적이면서도 가역적으로 제어될 수 있다.

MR 밸브의 효과적인 설계를 위해서, MR 유체의 극성 입자는 응집 없이 균일하게 분포되어 있으며 유체의 열역학적 거동 및 유체 유동에 의한 관성력은 무시 가능하다고 가정하였다. 그러면 MR 유체의 자기장 의존 특성을 효과적으로 묘사하는 빙햄(Bingham)모델에 기초하여, MR 밸브의 압력강하는 다음과 같이 유도될 수 있다.^(7,14)

$$\Delta P = \Delta P_{\eta} + \Delta P_{MR} \quad (1)$$

위 식에서 우변의 첫째 항은 MR 유체의 자체 점성에 의한 압력강하를 나타내며, 부하된 자기장에 대해 독립적으로 주어진다.

$$\Delta P_{\eta} = \frac{12\eta L_1 Q}{bh^3} \quad (2)$$

여기서 η 는 유체의 점도, $L_1 (= 2l_p + l_c)$ 은 요크의 길이, Q 는 유량 그리고 b 는 요크의 너비를 각각 나타낸다. 또한 h 는 케이싱과 요크 사이의 간극으로, 밸브의 내구성과 제작의 용이함을 고려하여 일반적으로 0.5~2mm 내에서 결정된다. 둘째 항은 부하된 자기장 강도에 의한 MR 유체의 의존 특성, 즉 MR 효과(MR effect)에 의한 압력강하를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta P_{MR} = 2 \frac{L_2}{h} \tau_y(H) \quad (3)$$

여기서 $L_2 (= 2l_p)$ 는 자극의 길이이고, $\tau_y(H)$ 는 부하된 자기장 강도 H 에 대응하는 MR 유체의 항복전단응력이다.

일반적으로 MR 유체의 자체 점성에 의한 압력강하 ΔP_{η} 는 MR 효과에 의한 압력강하 ΔP_{MR} 에 비해 상대적으로 작다고 고려될 수 있다. 따라서 MR 밸브의 주요 기계적 설계 변수는 식 (3)에 기초하여 효과적으로 얻어질 수 있다. 다시 말해서, MR 유체의 자화특성⁽¹⁹⁾을 고려하여 얻어진 최대 부하 가능한 자기장 강도 H_{max} 에 대응하는 MR 유체의 최대 항복전단응력 $\tau_{y,max}(H_{max})$ 을 이용하면, 요구되는 MR 밸브의 압력강하 ΔP_{des} 를 얻기 위한 자극의 길이 L_2 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$L_2 \approx \frac{\Delta P_{des} h}{2\tau_{y,max}(H_{max})} \quad (4)$$

3. MR 밸브의 전자기적 설계

MR 밸브의 성능을 향상시키기 위해서는 기계적 설계뿐만 아니라 전자기적 설계가 이루어져야 한다. 이 장에서는 MR 유체에 자기장을 효과적으로 공급하기 위하여, 자기회로의 전자기적 특성과 사용된 자성체의 자화특성을 고려하여 자기회로의 전자기적 설계를 수행한다.

자기 회로의 설계 목표 중 하나는 MR 유체에 부하되는 자기장 강도를 가능한 증가시키는 것이다. 증가된 자기장 강도는 MR 밸브의 정특성을 향상시키는 효과를 제공한다. 외부로부터 인가된 전류에 의해 자기회로에 생성된 기자력과 자기장 강도 사이의 관계식은 Ampere의 법칙에 기초하여 다음과 같이 주어진다.

$$NI = \oint_C H \cdot dl = H_f l_f + H_s l_s \quad (5)$$

여기서 N 은 전자석 코일의 감은 수, I 는 코일 전류 그리고 l 은 자로의 길이를 나타낸다. 하첨자 f 는 MR 유체 그리고 s 는 요크와 케이싱을 포함한 강자성체와 관계된 상태량을 나타낸다. 실제로 기자력은 이용 가능한 전류전원공급기의 용량에 의해 제한된다. MR 유체의 자로 길이 l_f 는 요크와 케이싱 사이의 두 간극 $2h$ 와 동일하다. 또한 요크와 케이싱 내부의 자기장 강도 H_s 는 사용된 강자성체

의 자화특성에 의해 한정된다. 따라서 MR유체에 부하되는 자기장 강도 H_f 를 증가시키기 위해서는 요크 및 케이싱의 자로 길이 l_s 을 가능한 짧게 설계하는 것이 바람직하다.

다음으로 고려되는 자기회로의 설계 목표는 자기회로의 응답특성을 향상시키는 것이다. 이는 MR 밸브의 응답특성은 자기회로의 자기 응답특성 및 강자성체의 자화특성에 크게 영향을 갖기 때문이다. 자기회로의 자기 응답특성은 Faraday 법칙을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{inv} &= -\frac{d\phi}{dt} = -L_s \frac{dI_{eddy}}{dt} = R_s I_{eddy} & (6) \\ \Rightarrow I_{eddy}(t) &= I_{eddy,0} \exp[-R_s t / L_s] \\ \Rightarrow \phi(t) &= \phi_0 \exp[-R_s t / L_s]\end{aligned}$$

여기서 ε_{inv} 는 역기전력(counter electromotive force), ϕ 는 자기회로를 지나가는 자속 그리고 I_{eddy} 는 자기회로에 발생하는 와전류(eddy current)이다. L_s 과 R_s 은 각각 자기회로의 자기 인덕턴스(magnetic inductance) 및 자기저항(magnetic reluctance)이며, 이들은 자기회로의 기하학적 형상에 의해 결정된다. 그리고 하첨자 0는 각 상태량에 대한 초기값을 의미한다. 자속 ϕ 가 시간에 대해 변할 때, 자속의 변화를 상쇄하는 방향으로 역기전력이 생성된다. 이러한 역기전력에 의해 자극의 표면에 유도된 와전류는 도체의 저항에 의해서 줄(joule)열로 변환되기 때문에 시간이 지남에 따라 감소되거나 자속의 응답시간을 지연시키는 요인이 된다. 자기회로의 시상수(time constant)는 $L_s/R_s \propto 1/R_s^2$ 로 주어지므로 이를 줄이기 위한 실용적인 방법은 자기저항을 증가시키는 것이다. 자기회로 해석에서 자기저항은 다음과 같이 표현된다.

$$R_s = \frac{l_s}{\mu_s S_s} \quad (7)$$

여기서 μ_s 는 강자성체의 자기 투자율(magnetic permeability) 그리고 S_s 는 자속이 지나가는 강자성체의 단면적이다. 앞서 언급한 바와 같이, 요크 및 케이싱의 자로 길이 l_s 는 MR 유체에 가능한 큰 자기장 강도를 공급하기 위해 감소시켜야 한다. 따라서 자기회로의 자기저항을 증가시키기 위해서는 강자성체인 요크와 케이싱의 단면적을 줄이는 것이 바람직하다. 또한 줄어든 단면적은 전도체인 요크와 케이싱의 전기저항을 증가시켜 와전류의

크기를 감소시키는 추가적인 효과를 제공한다.

일반적으로 대부분의 MR 밸브들은 입력 전류와 출력 사이에 비선형적 관계를 갖는다. MR 유체는 자기 이력현상을 거의 갖지 않는 초상자성체이므로, 이러한 비선형성은 주로 강자성체의 자기 이력특성으로부터 기인된다.⁽¹¹⁾ 따라서 MR 밸브의 성능 향상과 출력의 효과적인 제어를 위해서는 자기회로의 자화특성을 개선시켜야 한다. 실제로, 강자성체는 자기회로의 개회로(open circuits)로 인해 자화의 반대방향으로 자기장이 형성되는 소자(demagnetization) 특성을 갖는다. 이러한 소자력(demagnetizing field)는 MR 유체에 부하되는 자기장 강도를 저감시킬 뿐만 아니라 강자성체의 자기 이력특성을 악화시키는 원인이 되므로 가능한 감소시키는 것이 바람직하다. 이를 위한 효과적인 방법은 자속이 지나가는 단면적에 대한 자로의 길이의 비 l_s / S_s 를 증가시키는 것이며,⁽²⁰⁾ 이는 앞서 언급했던 자기저항을 증가시키는 것과 동일한 조건이다. 따라서 요크 및 케이싱의 단면적을 가능한 작게 설계하는 것은 자기회로의 응답특성과 자화특성을 동시에 개선시키는 효과를 제공한다.

그러나 단면적의 지나친 감소는 강자성체의 자기 포화(magnetic saturation)를 초래할 수 있으므로 이를 제한하기 위한 구속조건이 요구되며, 이는 Gauss 법칙으로부터 얻어진다.

$$\phi = \int_S B \cdot ndS = B_f S_f = B_s S_s \quad (8)$$

여기서 B 는 자속 밀도를 나타낸다. MR 유체에 최대 공급 가능한 자속 밀도 $B_{f,max}$ 는 MR유체의 최대 항복전단응력 $\tau_{y,max}$ 에 대응하여 결정되며, 요크와 케이싱의 포화 자속밀도 $B_{s,sat}$ 는 사용된 강자성체의 자화특성으로부터 얻어진다. 또한, MR 유체를 지나가는 자속의 유효 단면적 S_f 는 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$S_f = 2\pi(r_p + \frac{h}{2})(l_p) \quad (9)$$

여기서 r_p 는 요크의 반지름이며 $l_p(=L_2/2)$ 는 자극의 길이를 나타낸다. 따라서 강자성체를 지나가는 자속의 단면적 S_s 는 MR 유체에 최대 적용 가능한 자기장 강도가 부하되었을 때 강자성체가 포화되지 않도록 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$S_s \geq S_{s,min} \equiv \frac{B_{f,max} S_f}{B_{s,sat}} \quad (10)$$

기존의 많은 연구들이 식 (10)을 이용하여 MR 밸브를 설계했음에도 불구하고 이에 대한 면밀한 분석을 제시하지 못했기 때문에, 위 조건이 다소 제한적으로 적용되어왔다.⁽¹²⁻¹⁵⁾ 대조적으로 본 연구에서는 식 (5)-(8)을 설계 과정에 적용하기 위한 하나의 구속조건으로 위 조건이 이용되었다.

Table 1 Magnetic properties for designing the MR valves

Property	Value	Material
$\tau_{y,max}$	38.25 kPa	MRF-132DG for MR fluid ⁽¹⁹⁾
$B_{f,max}$	0.676 T	
$H_{f,max}$	150 A/mm	
μ_f (permeability)	4.51×10^{-6} H/m	
$B_{s,sat}$	1.326 T	SS41 steel for Yoke and Casing
$H_{s,sat}$	1.989 A/mm	
μ_s (permeability)	6.667×10^{-4} H/m	

Table 2 Specifications of the MR valves

Parameters	Symbol	Value
Desired pressure drop	P_{des}	1500 kPa
Gap for the MR fluid	h	1.0 mm
Shaft radius	r_s	5.0 mm
Outer radius of the bush	r_b	7.0 mm
Outer radius of the yoke	r_p	21.0 mm
Inner radius of the casing	r_i	22.0 mm
Outer radius of the casing	r_o	26.4 mm
Core radius	r_c	16.2 mm
Magnetic pole length	l_p	10.0 mm
Throat length	l_t	6.6 mm
Core length	l_c	10.0 mm
Washer thickness	l_w	3.0 mm
Coil diameter	d_{coil}	0.5 mm
Available coil current	I_{max}	5 A
Number of the coil turn	N	80 turn
Electric resistance of the coil		1.24 Ω

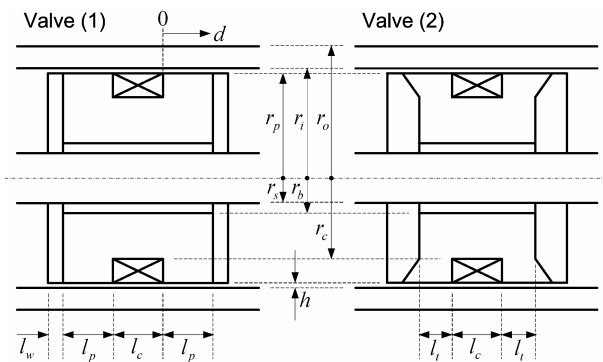


Fig. 2 Design parameters of the MR valves

4. MR 밸브의 제작

본 연구에서 제작된 두 종의 MR 밸브 구조는 Fig. 2 에 제시되었다. 이들 중 하나는 기존의 MR 밸브와 유사한 형태를 가지는 반면, 다른 하나는 앞서 제시된 설계 방법에 기초하여 제안된 형태이다. 편의상 본 논문에서는 전자를 ‘Valve (1)’로, 후자를 ‘Valve (2)’로 명명한다.

본 연구에서 사용된 MR유체는 Lord 사에서 조성된 MRF-132DG이며,⁽¹⁹⁾ 요크와 케이싱을 위한 강자성체로는 연철(SS41)이 사용되었다. 자성체의 자기포화를 방지하고 밸브의 선형적인 입출력 관계를 얻기 위해서, 각 자성체의 실제 포화 또는 최대 물성치의 대략 85%에 해당하는 값들이 제안된 MR밸브의 설계에 이용되었다. 이용된 물성치들은 Table 1 에 제시되었다. 또한 자속 누설을 완화하기 위해 설치된 부쉬와 와셔는 비전도체인 비자성체인 아세탈(acetal)로 제작하였다.

먼저, 두 MR밸브의 공통적인 설계 변수가 결정되었다. 요크의 반지름 r_p 는 MR 밸브의 크기와 요구되는 압력강하의 크기를 고려하여 적절하게 설정되었다. 케이싱과 요크 사이의 간극 h 는 밸브의 내구성과 제작의 용이함을 고려하여 1mm로 결정하였다. 그러면 케이싱의 내부 반지름 r_i 는 r_p+h 로 주어진다. 또한 샤프트의 반지름 r_s 와 부쉬의 외부 반지름 r_b 그리고 와셔의 두께 l_w 는 제작의 용이성과 전체 장치의 크기를 고려하여 적절히 선정되었다. 식 (10)에서 결정된 자속이 지나가는 강자성체의 최소 단면적을 고려하면, 코어의 반지름 r_c 과 케이싱의 외부 반지름 r_o 은 각각 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$r_c = \sqrt{S_{s,min} / \pi + r_b^2} \quad (11)$$

$$r_o = \sqrt{S_{s,min} / \pi + r_i^2} \quad (12)$$

또한 코어의 길이 l_c 는 코일의 감은 횟수 N 과 사용된 코일의 직경 d_{coil} 을 고려하여 설계되었다. 그러면, Valve (1)과 관계된 모든 설계 변수가 결정된다.

Fig. 2 에 제시된 것처럼, 두 종의 MR 밸브는 요크의 플랜지(flange)에 해당하는 영역 $r_c \leq r \leq r_p$ 에서 구조적 차이가 갖는다. Valve (1)은 일정한 두께의 플랜지(flange)를 갖는 반면, Valve (2)의 플랜지는 (i)자기 포화가 발생하지 않는 범위 내에서 자로의 단면적을 최소화하기 위해서 그리고 (ii)자로의 길이를 줄이기 위해 요크의 불필요한 부분을 제거하

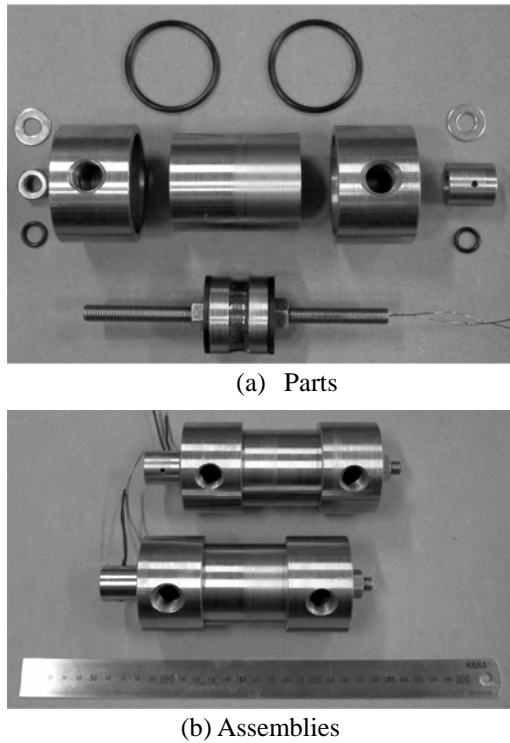


Fig. 3 External appearance of the MR valves

기 위해서 다음과 같이 설계될 수 있다.

$$l = S_{s,\min} / 2\pi r \quad \text{for } r_c \leq r \leq r_p \quad (13)$$

그러면 $r=r_c$ 에서의 플랜지 두께는 $l_f = S_{s,\min} / (2\pi r_c)$ 로 결정된다. 그러나 MR 밸브의 요구 출력을 얻기 위한 자극의 길이는 $l_p = L_2 / 2$ 로 반드시 식 (4)에 의해 결정되어야만 한다. 이는 위 식에서 얻어진 $r=r_p$ 에서의 플랜지 두께와 일치하지 않는다. 이러한 불일치는 MR유체와 강자성체의 자기 투자율 차이로부터 기인된 것이다. 그럼에도 불구하고, 단면적을 가능한 줄이기 위해 Fig. 2 와 같이 Valve (2)의 기하학적 형상이 제안되었다. 이러한 고려는 자로의 길이를 감소시켜 MR유체에 부하되는 자기장 강도를 증가시킬 뿐만 아니라 자속 밀도의 완만한 변화를 유도하는데 효과적이다. 특히, 밸브 자체의 무게를 줄이는데도 다소 유용하다. 제시된 방법에 의해 결정된 MR밸브의 설계변수는 Table 2에 주어졌다. 그리고 제작된 두 MR밸브의 외형은 Fig. 3에 제시되었다.

5. MR 밸브의 자기장 해석

본 연구에서 제안된 설계방법의 유용성을 조사하고 제작된 MR 밸브의 성능을 예측하기 위해서 자기장 해석을 수행하였다. Fig. 4는 5A의 입력

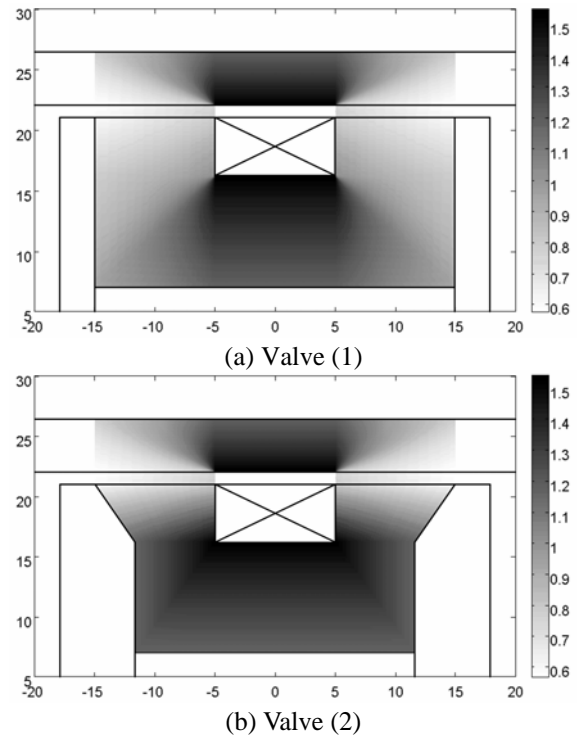


Fig. 4 Magnetic flux density distributions (color bar unit: Tesla)

전류에 대한 MR 밸브의 자속밀도 분포를 보여준다. 자극과 MR 유체 근처에서 자속밀도가 두드러지게 감소됨을 확인할 수 있으며, 이는 앞서 설명한 바와 같이 요크와 MR 유체의 투자율 차이 때문이다. 그리고 Valve (1)에 비해 Valve (2)의 자속밀도가 보다 균일하게 분포되어 있음을 확인하였다. 이는 자속이 지나는 단면적의 최소화와 요크의 불필요한 부분의 제거 효과로부터 기인된 것이다. 따라서 Valve (1)에 비해 Valve (2)가 보다 향상된 응답 특성과 선형적인 입출력 특성을 제시할 것으로 기대된다.

한편, 자극 상에서 위치에 따른 자기장 강도 $H(d)$ 가 Fig. 5에 제시되었다. 여기서 d 는 Fig. 2에 제시된 바와 같이 자극 상의 위치를 나타낸다. 자극 상의 위치가 전자석 코일에서 멀어질수록 자기장 강도는 단조롭게 감소함을 알 수 있다. 이는 전자석 코일에 가까울수록 코일을 둘러싸는 자로의 길이가 짧아지기 때문이다. 이러한 위치에 따른 자기장 강도의 변화는 전자석 코일에 가까운 곳에서 자기 포화를 일으킬 수 있다. 이러한 이유로, 실제 최대 자속밀도의 85%에 해당하는 값이 설계과정에서 이용되었음에 주목하자. 분명히 Fig. 4로부터 두 MR 밸브 모두 요크의 실제 포화 자속 밀도인 1.56T를 넘지 않음을 확인할 수 있다. 또한 Valve (1)과 Valve (2)의 평균 자기장 강도는 각각 150.843 A/mm 와 152.355 A/mm 였으며, Valve (2)가 Valve (1)에 비해 다소 큼을 확인하였다.

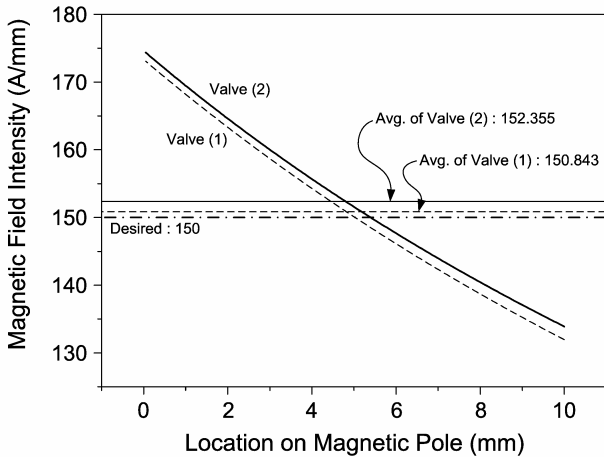


Fig. 5 Magnetic field intensity according to the location on the magnetic pole

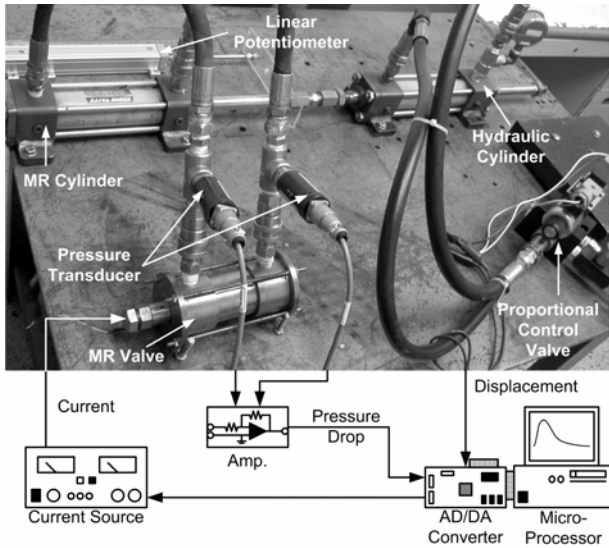
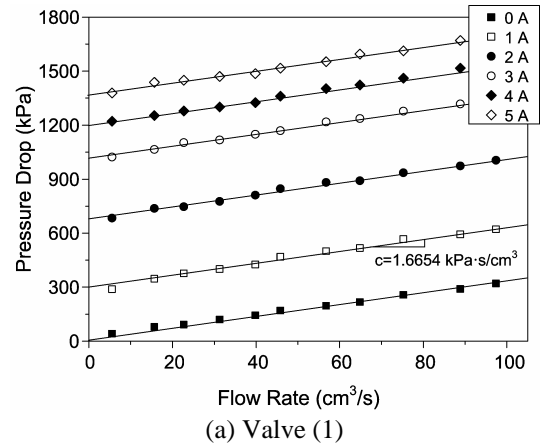


Fig. 6 Experimental apparatus

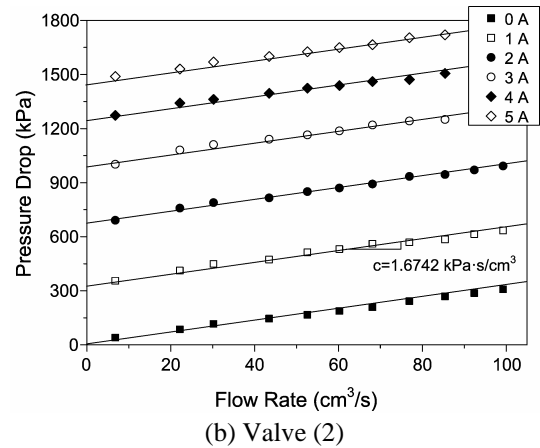
둘 사이의 차이가 확연히 크게 나타나지는 않았으나 정특성의 향상을 확인할 수 있으며, 이는 요크의 불필요한 면적을 제거 함으로써 자로의 길이를 줄였기 때문이다. 정특성에서 두드러진 개선이 이뤄지지 못한 이유는 식 (4)로부터 결정된 자극의 길이가 식 (13)으로부터 요구되는 길이보다 크기 때문으로 고려된다. 다시 말해서, 본 연구에서 고려된 밸브의 요구 출력과 크기는 자속이 지나는 단면적의 최소화와 요크의 불필요한 부분의 제거에 대한 요구를 정확히 적용하는데 제한적이다. 만약 보다 작은 출력과 크기를 갖는 MR 밸브에 있어서는 정특성에서 두드러진 향상이 있을 것으로 기대된다.

6. MR 밸브의 성능평가

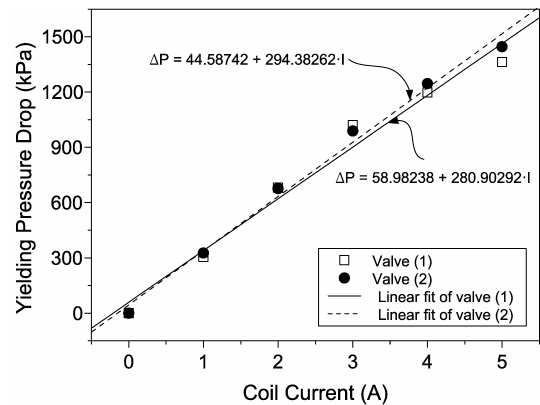
제작된 MR 밸브의 성능을 평가하기 위해 Fig. 6



(a) Valve (1)



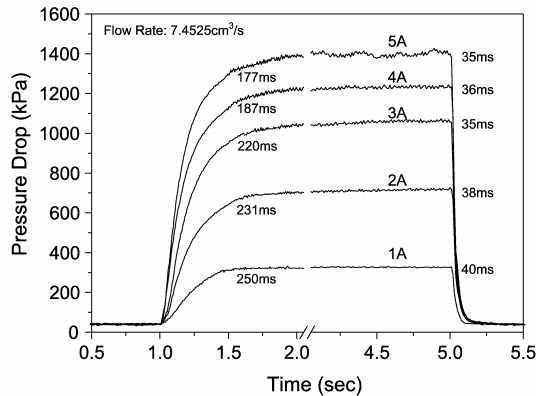
(b) Valve (2)



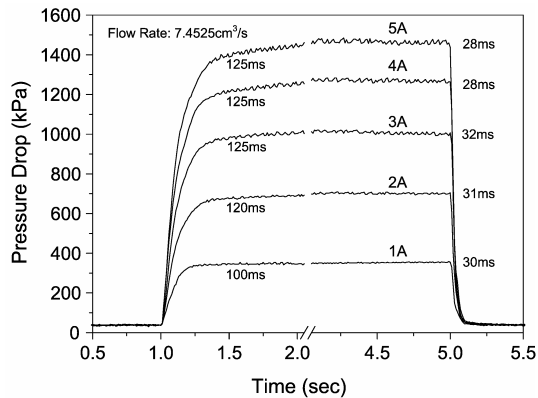
(c) Comparison of the MR effects

Fig. 7 Static characteristic

과 같이 실험장치가 구성되었다. MR 밸브에 효과적이면서도 간편하게 MR 유체를 공급하기 위해서, MR 밸브는 MR 유체로 채워진 직경 40mm, 행정거리(stroke) 100mm 인 양로드 실린더에 바이패스 형태로 연결되었다(이후 본 논문에서는 MR 실린더로 명명함). MR 밸브에 일정한 유량을 공급하기 위해서는 MR 실린더를 일정한 속도로 작동시켜야 한다. 이를 위해 유압 밸브와 유압 실린더 등으로 이루어진 유압 장치가 이용되었다. MR 실린더와 유압



(a) Valve (1)



(b) Valve (2)

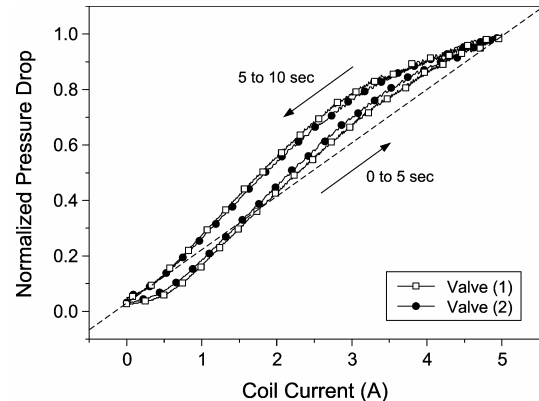
Fig. 8 Dynamic characteristic

실린더의 로드는 직렬로 연결되어 있어, 유압 밸브를 이용하여 유압 실린더의 가진 속도를 조절함으로써 MR 밸브로 공급되는 유량을 제어할 수 있다. MR 밸브 내부의 전자석 코일에는 전류 공급기에 의해 전류가 공급된다. MR 실린더가 유압 실린더에 의해 구동될 때, 바이패스 되는 MR 유체의 유량은 MR 밸브에 의해 조절된다. 이때 MR 밸브의 입출구에 설치된 압력센서를 이용하여 압력강하 크기가 측정된다. 그리고 MR 유체의 유량은 MR 실린더와 연결된 변위계를 이용하여 계산된다.

6.1 정특성

MR 밸브의 정특성을 평가하기 위해서, 일정한 전류를 전자석 코일에 인가한 후 MR 실린더의 전진 속도를 일정하도록 제어하면서 압력을 측정하였다.

Fig. 7 은 다양한 입력 전류 하에서 MR 밸브의 유량에 따른 압력강하 크기를 보여준다. 제시된 MR 밸브의 압력강하 크기는 코일 전류에 의해 효과적으로 조절될 수 있음을 알 수 있다. 압력강하 크기는 MR 유체의 유량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, 이는 MR 유체 자체의 점성에 의한 효과이다. ‘기계적 설계’에서 예상했던 바와

**Fig. 9** Hysteresis characteristic

같이, 압력강하 크기에 대한 유량의 영향은 전류의 영향에 비해 상대적으로 작을 뿐만 아니라 전류의 크기와 거의 무관함을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터, 빙햄 모델에 기초하여 유도된 식 (1)은 MR 밸브의 설계와 모델링에 매우 유용함을 알 수 있다.

두 MR 밸브의 자기장 의존 특성을 비교하기 위하여, 전류에 따른 MR 효과에 의한 압력강하 크기를 Fig. 7(c)에 제시하였다. 이는 빙햄 모델을 이용하여 측정된 값들을 보정하여 얻었다. ‘자기장 해석’ 결과에서 예상했던 것처럼, 두 MR 밸브의 차이가 확연히 크게 나타나지는 않았으나 Valve(1)에 비해 Valve(2)에서 소폭의 정특성 향상을 확인할 수 있다. 특히 전류에 대한 압력강하 크기가 거의 선형적임을 알 수 있는데, 이는 ‘전자기적 설계’에 의해 자속이 지나는 단면적을 최소화 그리고 실제 최대 자속 밀도의 85%에 해당하는 값의 이용으로부터 기인된 결과로 사료된다.

6.2 동특성

Fig. 8 은 제안된 MR 밸브들의 과도 응답특성을 조사하기 위해 수행된 결과로, 계단입력 전류에 대한 압력강하의 동적 거동을 보여준다. 제한된 실린더 로드의 길이를 고려하여 7.4525 cm³/s 의 낮은 유량에서 측정하였다. 전류는 유량 공급 1 초 후에 인가되어 5 초 후에 제거되었다.

계단입력 전류에 대한 MR 밸브의 압력강하는 1 차 지연 시스템과 거의 유사한 거동을 가지므로, 시뮬레이션과 실험 결과의 비교를 통해 각각의 응답시간을 얻었다. 대략 210msec 의 평균 상승시간을 갖는 Valve (1)과는 달리, Valve (2)는 대략 120msec 의 평균 상승시간을 보였다. 이러한 응답 성능의 향상은 자속이 지나는 강자성체의 단면적을 최소화함으로써 얻어진 결과이다. 따라서 제

안된 ‘전자기적 설계’ 방법은 MR 밸브의 동특성을 향상시키는데 효과적임을 확인하였다.

또한, Fig. 8 에서 상승시간이 하강시간에 비해 짧은 것을 알 수 있다. 하강 시간은 단지 MR 유체에 작용하는 유체 유동력에 의해 결정되는 반면, 상승시간은 유체 유동력과 자기장에 의한 MR 입자간의 응집력이 서로 상호작용하여 결정된다. 따라서 일반적으로 MR 유체의 경우 상승시간이 하강시간에 비해 느리다. 이에 대한 구체적인 논의는 본 연구의 주제와 거리가 있으므로 생략한다.

6.3 이력특성

Fig. 9 는 두 MR 밸브의 이력 특성을 비교하기 위해 수행된 실험 결과를 보여준다. 효과적인 비교를 위해 측정된 값들은 각각의 최대값과 최소값을 이용하여 정규화(normalized)되었다. $7.4525 \text{ cm}^3/\text{s}$ 의 유량 조건 하에서, 전류는 10 초의 주기를 가지며 0 에서 5A의 진폭을 갖는 삼각파 형태로 공급되었다. 결과로부터, Valve (2)가 Valve (1)보다 개선된 이력특성을 보임을 알 수 있다. 이는 요크의 소자력을 감소시키기 위해 단면적을 최소화한 결과로부터 기인된 것이다. 따라서 본 논문에서 제안된 자기회로 설계 방법은 MR 밸브의 이력 특성을 개선하는데 효과적임이 입증되었다.

요약하면, 제안된 자기회로 설계 방법은 고려된 MR 밸브의 동특성을 개선하는데 매우 효과적이었던 반면, 정특성과 이력특성을 두드러지게 개선시키지는 못했다. 이는 기존의 MR 밸브와 유사한 구조를 갖는 Valve (1) 역시 요크의 플랜지 부분을 제외한 자기회로 설계 변수들이 본 연구에서 제안된 설계방법에 의해 결정되었기 때문이다. 그리고 전자기적 설계에 요구되는 Valve (2)의 자극 길이가 기계적 설계에서 결정된 값과 다름에 의해, 제안된 설계 방법이 다소 제한적으로 적용되었기 때문이다. 이러한 점을 고려했을 때, 정특성과 이력특성을 더 많이 개선하기 위해서는 전자기적 설계와 기계적 설계를 모두 충족하는 설계 방법에 대한 연구가 필요하다. 따라서, 각 단의 자극 길이는 전자기적 설계 조건을 만족하면서, 전체 자극의 길이(자극 길이의 총합)는 기계적 설계 조건을 만족할 수 있는 다단(multi-stage) 구조의 자극을 갖는 요크 설계에 대해 향후 연구할 계획이다.

7. 결 론

본 연구에서는 MR 밸브의 성능 개선을 위한 전자기적 설계 방법이 제안되었다. 자기장 해석과

기초 실험을 통해, 제안된 설계 방법의 유용성을 확인하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 자기회로에서 철심 요크의 불필요한 부분을 제거하여 자로의 길이를 가능한 줄임으로써, MR 밸브의 정특성 크기와 선형성을 소폭 향상시킬 수 있다.

(2) 철심 요크의 자기 저항을 증가시키기 위해 서자속이 지나는 단면적을 최소화함으로써 MR 밸브의 응답특성 및 이력특성을 개선할 수 있다.

(3) 제안된 자기회로 설계방법은 MR 밸브의 응용분야를 확장하기 위한 기초 자료로서 유용하게 사용될 수 있음을 간접적으로 확인하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Phule, P., 2001, "Magnetorheological (MR) Fluid: Principles and Applications," *Smart Materials Bulletin*, No. 2, pp. 7~10.
- (2) Nam, Y. J. and Park, M. K., 2007, "Performance Evaluation of Two Different Bypass-Type MR Shock Damper," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 18, pp. 707~718.
- (3) Stelzer, G. J., Schulz, M. J., Kim, J. and Allemagn, J., 2003, "A Magnetorheological Semi-Active Isolator to Reduce Vibration Transmissibility in Automobiles," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 14, pp. 743~765.
- (4) Nam, Y. J., Moon, Y. J. and Park, M. K., "Performance Improvement of a Rotary MR Fluid Actuator Based On Electromagnetic Design," *J. Intell. Mater. Syst. Struct. Onlinefirst*, 10 July 2007, (doi:10.1177/1045389X07079463).
- (5) Lampe, D., Thess, A. and Dotzauer, C., 1998, "MRF Clutch: Design Considerations and Performance," *Proc. 6th Int. Conf. New Actuators*, pp. 449~452.
- (6) Li, S., Wang, G., Chen, D. and Li, S., 2001, "New Type Relief Valve Using Magneto-Rheological Fluid" *5th Int. Conf. Fluid Power Transmission and Control*, (http://fluid.power.net/techbriefs/hanghzau/2_25.pdf).
- (7) Yoshida, K., Takahashi, H., Yokota, S., Kawachi, M. and Edamura, K., 2002, "A Bellows-Driven Motion Control System Using A Magneto-Rheological Fluid," *Proc. 5th JFPS Int. Symp. Fluid Power*, Nara, Japan, Vol. 2, pp. 403~408.
- (8) Yokota, S., Yoshida, K. and Kondoh, Y., 1999, "A Pressure Control Valve Using MR Fluid" *Proc. 4th JHPS-ISFP*, Tokyo, Japan, pp. 377~380.
- (9) Hirani, H. and Manjunatha, C. S., 2007, "Performance Evaluation of a Magnetorheological

- Fluid Variable Valve” *Proc. IMECHE, Part D, J. Auto. Eng.*, Vol. 221, pp. 83~93.
- (10) Hitchcock, G. H., Gordaninejad, F. and Wang, X., 2002, “A New By-Pass, Fail-Safe, Magneto-Rheological Fluid Damper” *Proc. SPIE Conf. Smart Materials and Structures*, San Diego, pp. 345~351.
- (11) An, J. and Kwon, D. S., 2003, “Modeling of a Magnetorheological Actuator Including Magnetic Hysteresis,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 14, pp. 541~550.
- (12) Yoo, J. H. and Wereley, N. M., 2002, “Design of a High-Efficiency Magnetorheological Valve” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol.13, pp. 679~685.
- (13) Yoo, J. H. and Wereley, N. M., 2004, “Performance of a Magnetorheological Hydraulic Power Actuator System” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 15, pp. 847~858.
- (14) Li, W. H., Du, H. and Guo, N. Q., 2003, “Finite Element Analysis and Simulation Evaluation of a Magnetorheological Valve” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 21, pp. 438~445.
- (15) Ai, H. X., Wang, D. H. and Liao, W. H., 2007, “Design and Modelling of a Magnetorheological Valve with Both Annular and Radial Flow Paths,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 17, pp. 327~334.
- (16) Gavin, H., Hoagg, J. and Dobossy, M., 2001, “Optimal Design of MR Dampers,” *Proc. U.S.-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Regions*, Seattle, WA, pp. 225~236.
- (17) Takesue, N., Asaoka, H. A., Lin, J., Sakaguchi, M., Zhang, G. and Furusho, J., 2000, “Development and Experiments of Actuator Using MR Fluid,” *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pp. 1838~1843.
- (18) Takesue, N., Furusho, J. and Kiyota, Y., 2004, “Fast Response MR-Fluid Actuator” *JSME Int. Part C*, Vol. 47, pp. 783~791.
- (19) Lord Corporation, 2006, “MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid,” Lord Technical Data.
- (20) Iskander, M. F., 1992, *Electromagnetic Fields and Waves*, Prentice Hall.