MR 밸브의 전자기적 설계와 성능 평가

김기한† · 남윤주* · 박명관**

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(자기 유변 유체), MR Valve(MR 밸브)

Abstract

This paper presents an electromagnetic design for the magneto-rheological fluid valve. The MR valve can control high-level fluid power without moving parts, due to the apparent viscosity controllability of the MR fluid in magnetic fields. In order to improve the static characteristic of the MR valve, the length of the flux path is decreased by removing the unnecessary bulk of the yoke. Then, in order to improve the dynamic and hysteretic characteristics, the magnetic reluctance of the ferromagnetic material is increased by minimizing the cross sectional area through which the flux passes. Two MR valves, one is a conventional type valve and the other is the proposed one, were fabricated and performance evaluation is experimentally achieved through the comparison study using by-pass damper system.

1. 서 론

MR 유체(Magneto-Rheological Fluid)는 부하되는 자기장에 반응하여 항복 전단응력이 변하는 유체로 저투자율의 비전도성 용매에 높은 투자율을 지닌 수~수십 마이크론 크기의 입자를 분산시킨 것이다. MR 유체는 자기장 무부하시 Newtonian 유체의 거동을 나타내며 isotropic 한 역학적 성질을 나타내다가 자기장 부하시 입자가 자기장 방향으로 체인 구조를 형성, 유체의 전단에 대해 저항하여 항복응력을 갖는 Bingham 유체와 유사한 거동을 갖게 되며 anisotropic 한 역학적 성질을 나타낸다.

이러한 MR유체를 이용한 밸브는 기존의 기계식 밸브에 비해 밸브 내부의 기계적 이동 메커니즘 필요 없이 유량조절을 위한 전자석만 필요하기에 설계가 단순하고 제작이 용이하다. 또한 내구성이 뛰어나고, 다양한 크기의 MR작동기에 적용되어 사용될 수 있다는 장점이 있다.(2~4)

기존 연구를 살펴보면, YOSHIDA등은 다양한 MR 유체를 제작하여 MR밸브에 적용하여 기본점도를 낮추고 영구자석과 전자석을 이용한 2port, 3port밸브를 제작하여 실험하였고(5) Hitchcock등은 FEM을 이용하여By-pass댐퍼를 제작하고 성능 테스트를 수행하였다.(6) Li등은 Ampere's Law & Gauss's Law를 이용한 전자기적 설계를 시행하고 이를 FEM을 이용한 자기장 해석을 통해 증명하였다.(2) Yoo등은 자로를 구성하는 재료의 비교로 고투자율 재료의 중요성을 simulation을 통해 증명하였고, 장치의 부피 감소를 이루었으며 자기포화 방지를 위한 simulation으로 주요 치수를 최적설계 하였다.(3,4) 그러나 이러한 연구의 대부분은 자기회로의 자기포화를 회피하기 위해서 자기장 해석을 수행하거나 입출력의 비선형성을 제거하기 위한 근본적인 자기회로 설계 방법을 제시하지 못하거나, 자기회로의 제한적인 설계 변수만을 도출하고 실제 실험이 아니라 Simulation으로 평가를 마치는 등의 한계를 가지고 있다.

MR유체에 자기장을 효과적으로 공급하기 위해

† 부산대학교 기계공학부 석사과정
E-mail : kihan@pusan.ac.kr
TEL : (051)514-3054 FAX : (051)514-0685
* 부산대학교 대학원 지능기계공학과
** 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

서는 MR밸브의 자기회로 설계가 매우 중요하다. MR유체 자체의 응답시간은 수 msec이내인데 반해, MR밸브는 상대적으로 느린 응답시간을 갖는다. 이는 MR유체와 강자성체로 구성된 자기회로의 전자기적 특성과 크게 관계한다. 뿐만 아니라, 강자성체의 자화(magnetizaition) 특성은 MR 밸브의 비선형 입출력 관계를 초래한다. 따라서, MR유체 작동기의 응답 특성을 향상시키고 비선형 입출력 이력특성을 제거하기 위해서는 전자기적 특성을 고려한 자기회로의 설계가 필수적이다.(1)

따라서 본 연구의 목적은 MR 밸브의 기계적, 전자기적 설계방법을 제시하고, 이를 통한 MR 밸브의 최적설계로 향상된 성능의 MR 밸브를 개발하여 by-pass 댐퍼 시스템에 적용한 실제 실험을 통해 기존 기계적 설계 방법만을 이용한 MR 밸브와의 성능비교로 설계방법의 타당성과 우수성을 입증하는데 있다.

2. MR 밸브의 기계적 설계

본 연구에서 다뤄지는 MR 밸브의 구조는 Fig. 1 에 제시되었다. 여기서 MR 유체는 Inlet 으로 들어와서 전자석 Bobbin 과 Casing 사이를 통과하여 Outlet 으로 나가게 된다. Shaft 는 Bobbin 을 고정해주는 역할을 하고, Bush 와 Yoke 는 비자성체로 제작되어 자기장의 누설을 막아준다. MR 밸브의 자기 회로는 Fig. 1 의 점선과 같이 MR 유체, 전자석 Coil 및 자로를 형성하는 Yoke 와 Casing 으로 구성된다. 외부에서 전류가 전자석 코일에 인가되면 이에 대응되는 기자력 (magneto- motive force)이 생성되며 이로 인해 자기 회로에는 자기장이 부하된다. 부하된 자기장 강도는 MR 유체의 항복 전단 응력을 증가시켜 유체의 흐름을 저항하는 방향으로 전단력을 생성한다. MR 유체의 항복전단응력은 부하되는 자기장의 강도에 따라 변하므로 MR 밸브의 출력은 코일 전류를 조절함으로써 연속적이면서 가역적으로 제어될 수 있다.

MR 밸브의 효과적인 설계를 위해 MR 유체의 극성입자는 응집 없이 균일하게 분포되어 있으며, 기계적 마찰력, 유체의 열역학적 거동 및 유체 유동에 의한 관성력은 무시될 수 있다고 가정한다. 그러면, MR 유체의 자기장 의존 특성을 효과적으로 묘사하는 Bingham 모델에 기초하여 MR 밸브의 압력강하는 다음과 같이 유도될 수 있다.

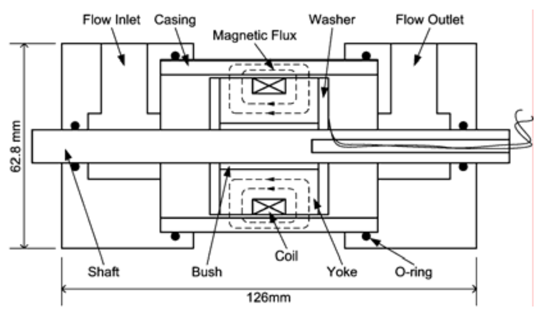


Fig. 1 Schematic of the MR valve

$$\Delta P = \Delta P_{\mu} + \Delta P_{MR} \tag{1}$$

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

$$\Delta P_{\mu} = \frac{12\mu LQ}{bh^3} \tag{2}$$

여기서 μ 는 점성계수, L 은 자로 길이, Q 는 유량, b 는 자극 너비, h 는 Casing 과 Yoke 사이의 간극으로, MR 유체의 투자율과 제작의 용이성을 고려하여 1mm 로 설정하였다. 둘째 항은 부하된 자기장 강도에 의한 MR 유체의 의존특성 즉, MR 효과에 의한 압력강하를 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 $\tau_y(H)$ 는 자기장 강도 H 에 대응하는 MR 유체의 항복 전단 응력이다. 위 식에 자기장에 의해 요구되는 최대압력강하 $\Delta P_{MR,\max}$ 와 사용된 MR 유체의 최대 항복 전단응력 $\tau_{y,\max}$ 을 대입하면 L 을 적절하게 얻을 수 있다.

3. MR 밸브의 전자기적 설계

MR 밸브의 성능을 향상시키기 위해서는 기계적 설계뿐만 아니라 전자기적 설계도 이루어져야 한다. 이 장에서는 MR 유체에 자기장을 효과적으로 공급하기 위하여 자기회로의 전자기적 특성과 강자성체의 자화 특성을 고려한 자기회로의 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 Ampere 의 법칙에 기초하여

$$NI = \oint_C H \cdot dl = H_f l_f + H_{s1} l_{s1} + H_{s2} l_{s2} \quad (4)$$

와 같이 주어지며, 여기서 N 은 전자석 코일의 감은 수, I 는 코일에 부하되는 전류, H 는 자기장 강도, l 은 자로의 길이를 나타낸다. 하첨자 f 는 MR 유체, s1 과 s2 는 각각 Yoke 와 Casing 과 관계된 상태량을 나타낸다. 기자력은 실제로 이용 가능한 전류전원 공급기의 용량에 의해 제한되며, MR 유체의 자로 길이 l_f 는 Yoke 와 Casing 사이의 간극 h 과 같다. 또한, Yoke 와 Casing 내부의 자기장 강도 H_{s1}, H_{s2} 는 사용된 강자성체의 자화 특성에 의해 제한된다. 따라서 MR 유체에 공급되는 자기장 강도의 증가를 위해서는 Yoke 와 Casing 의 자로 길이 l_{s1}, l_{s2} 를 가능한 작게 설계하는 것이 바람직하다.

다음으로 고려되는 자기회로의 설계 목표는 자기 회로의 응답 특성을 향상시키는 것이다. 이는 MR 밸브의 응답 특성이 자기회로의 자기응답특성 및 강자성체의 자화 특성에 크게 영향을 갖기 때문이다. 자기 응답특성은 Faraday 의 법칙을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\varepsilon_{inv} = -\frac{d\phi}{dt} = -L_s \frac{dI_{eddy}}{dt} = R_s I_{eddy} \quad (5)$$

$$I_{eddy}(t) = I_{eddy,o} \exp(-R_s t / L_s)$$

$$\phi(t) = \phi_o \exp(-R_s t / L_s)$$

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

$$R_s = \frac{l_s}{\mu_s S_s} \quad (6)$$

여기서 μ_s 는 자성체의 자기 투자율(magnetic permeability), S_s 는 자속이 지나는 Yoke 와 Casing 의 단면적이다. 앞서 언급한 바와 같이, Yoke 와 Casing 의 자로 길이 l_s 는 MR 유체에 가능한 큰 자기장 강도를 공급하기 위해 감소시켜야 한다. 따라서 Yoke 와 Casing 의 자기저항을 증가시키기 위해서는 단면적을 줄이는 것이 바람직하다. 또한, 줄어든 단면적은 전도체인 Yoke 와 Casing 의 전기저항을 증가시켜 와전류의 크기를 줄이게 된다.

일반적으로 MR 밸브는 입력 전류와 출력 사이에 비선형적 관계를 갖는다. MR 유체는 자기 이력현상을 거의 갖지 않는 초상자성체이므로, 이러한 비선형성은 주로 자로에 사용되는 강자성체의 자기 이력특성으로부터 기인된다. 따라서 MR 밸브의 성능 향상과 출력 토크의 효과적인 제어를 위해서는 자기회로의 자화 특성을 개선시켜야 한다. 이를 위한 효과적인 방법은 자속이 지나는 단면적에 대한 자로의 길이의 비 l_s / S_s 를 증가시키는 것이며, 이는 앞서 언급했던 자기저항을 증가시키는 것과 동일한 조건이다. 따라서 Yoke 와 Casing 의 단면적을 가능한 감소시키는 것은 자기회로의 응답특성과 자화 특성을 동시에 개선시키는 효과를 제공한다. 그러나 단면적의 지나친 감소는 Yoke 와 Casing 의 자기 포화(magnetic saturation)를 초래할 수 있으므로 이를 제한하기 위한 구속조건이 요구되며, 이것은 Gauss 의 법칙에서 얻어진다.

$$\phi = \int_s B \cdot ndS = B_f S_f = B_{s1} S_{s1} = B_{s2} S_{s2} \quad (7)$$

여기서 B 는 자속밀도를, S 는 단면적을 나타낸다. MR 유체에 최대 공급 가능한 자속밀도 $B_{f\max}$ 은 MR 유체의 최대항복전단응력 $\tau_{y\max}$ 에 대응하여 결정되며, Yoke 와 Casing 의 포화 자속밀도 B_{Ssat} 는 사용된 강자성체의 자기 특성으로부터 얻을 수 있다. 또한, MR 유체에 자기장이 작용하는 단면적은

$$S_f = \pi(2r_p + \frac{h}{2})(\frac{L}{2}) \quad (8)$$

로 계산될 수 있으며, r_p 는 피스톤의 반지름이다. 따라서 S_s 의 크기는 MR 유체에 적용 가능한 최대

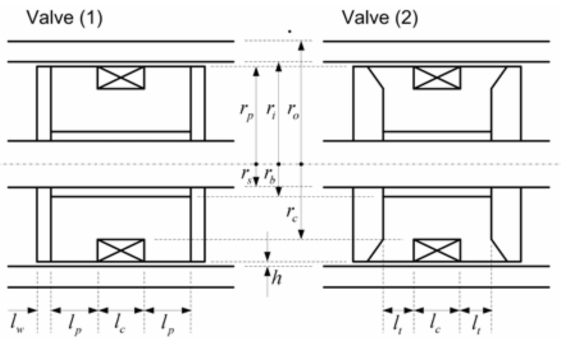


Fig. 2 Design parameters of the MR valve

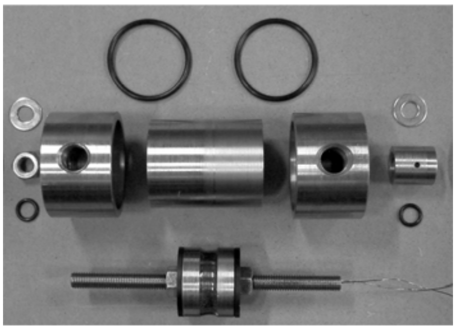


Fig. 3 Photograph of the MR valve parts

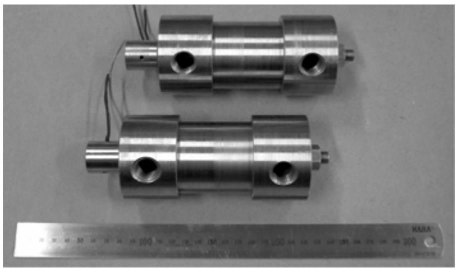


Fig. 4 External appearance of MR valve

자기장 강도가 부하되었을 때 자기 포화되지 않는 범위에서 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$S_s \geq S_{s,\min} \equiv \frac{B_{f,\max} S_f}{B_{s,sat}} \tag{9}$$

4. MR 밸브 제작

본 연구에서 제작된 두 종의 MR 밸브의 구조는 Fig. 2 에 제시되었다. Valve(1)은 기존의 MR 밸브와 유사한 형태를 가지며, Valve(2)는 본 논문에 제시된 설계 방법에 기초하여 제안된 형태이다.

전자석 bobbin 의 설계 치수는 사용된 코일의 직경과 코일의 감은 수를 고려하여, 면적과 둘레 의 길이를 작게 하기 위해 가능한 정사각형에 가깝게 선정되었다. 이러한 고려는 앞장에서 제시된 바와 같이, l_s 의 감소에 의해 MR 유체에 부하되는 자기장 강도를 증가시킬 뿐만 아니라 MR 밸브의 부피를 감소시키는 효과를 동시에 갖는다.

Table 1 **Magnetic properties for design MR valve**

Property	Value	Material
$\tau_{y,\max}$	38.25 [kPa]	MRF-132DG for MR fluid
$B_{f,\max}$	0.676 [T]	
$H_{f,\max}$	150 [A/mm]	
η_f	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]	
η_s	6.667×10^{-4} [H/m]	

Table 2 **Design parameters of the MR valve**

Parameters	Symbol	Value
Desired Pressure Drop	P_{des}	1500[kPa]
Gap between the Piston and the Casing	h	1.0[mm]
Shaft Radius	r_s	5.0[mm]
Bush Radius	r_b	2.0[mm]
Piston Head Radius	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	32.4[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 Coil Turn	N	80[turn]

본 연구에서 사용된 MR 유체는 Lord Corporation 에서 조성된 MRF-132DG 이며, Yoke 와 Casing 을 위한 강자성체로는 SS41 이 사용되었고, 자속 누설을 막기 위해 Yoke 를 감싸는 Brush 와 Washer 는 비자성체인 Acetal 을 사용하였다. 자성체의 자기포화를 방지하고 밸브의 선형적인 입출력 관계를 얻기 위해서, 각 자성체의 실제 포화 또는 최대 물성치의 85% 에 해당하는 값들이 제안된 MR 밸브의 설계에 이용되었으며, Table 1 에 나타난 바와 같다. 포화되지 않는 범위 내에서 자속이 지나는 단면적의 최소화를 위해 Core 의 반지름, Casing 의 외경, Flange 의 길이는 각각

$$S_c \leq \pi r_c^2 \qquad \Rightarrow r_c \geq \sqrt{\frac{S_c}{\pi}} \tag{10}$$

$$S_c \leq \pi(r_o^2 - r_i^2) \qquad \Rightarrow r_o \geq \sqrt{\frac{S_c}{\pi} + \frac{r_i^2}{4}} \tag{11}$$

$$S_c \leq \pi r_c L_p \qquad \Rightarrow L_p \geq (\frac{S_c}{\pi r_c}) \tag{12}$$

에 의해서 구해지고, 이에 의해 설계된 MR 밸브의 치수는 Table 2 에 제시되었고, 제작된 MR 밸브의 부품 형상과 제작된 전체 형상은 Fig. 3 과 Fig. 4 에 제시되었다.

5. MR 밸브의 성능 평가

제작된 MR 밸브의 성능을 평가하기 위해 Fig. 5 와 같이 실험장치가 구성되었다. MR 밸브는 실린더에 By-pass 형태로 연결되었고, 전류공급기에서 MR 밸브 내부의 전자석 코일로 전류가 공급되게 된다. MR by-pass 실린더 노드는 유압 실린더의 노드와 직렬로 연결되어 유압장치 작동에 의해 MR 실린더의 노드를 밀어주게 되고, MR 밸브로 흐르는 유량을 조절하게 된다.

MR 밸브의 Inlet, Outlet 에서 Pressure Transducer 로 압력을 측정하고, MR cylinder 와 연결된 Linear Potentiometer 가 변위와 속도를 측정하게 된다.

Fig. 6 은 다양한 입력 전류에 따른 두 종의 MR 밸브의 유량에 따른 압력강하를 보여준다. Valve(2)가 Valve(1)에 비해 압력강하가 더 크게 나타나므로, 본 논문에서 제안된 자로 회로의 설계 방법은 MR 유체에 부하되는 자기장 강도를 증가시키는데 유효함이 입증되었다. 또한 입력 전류에 따른 압력 강하가 더 선형적임을 알 수 있었다.

실험 결과에서 요구된 최대 압력 강하는 1500kPa 이었으나, 실제 최대 압력 강하는 800kPa 정도로 나타났다. 이는 자속누설에 의한 것으로, Coil 의 감은 횟수와 전류와의 상관관계에서 경험적 값인 N=160, I=2.5[A]가 아닌 전자석의 부피를 줄이기 위해 N=80, I=5[A]를 사용한 것에서 문제가 생겼다고 생각되며, 사용된 연철 특성이 계산된 값과 상이한 데서도 찾을 수 있겠다. 또한 제안된 MR 밸브가 기존에 비해 저항이 크게 나타난 것은 제작상의 문제로 Yoke 와 Washer 사이에 틈이 발생한데서 찾을 수 있으며, 이는 향후 연구과제로 남겨둔다.

Fig. 7 은 제안된 MR 밸브들의 과도응답특성을 고찰하기 위해 수행된 결과로, 계단 입력 전류에 대한 압력 강하를 보여준다. 낮은 유량에서의 측정을 위해 유량은 7.4525 cm^3/s 로 설정되었다. 전류는 유량 공급 1 초 후부터 4 초간 공급된 후 제거되었다. 최대압력강하까지의 0.632 만큼의 값에 도달하는데 걸리는 시간을 서로 비교했을 때, Valve(1)의 경우 약 210 초, Valve(2)의 경우 약 120 초 정도가 걸리는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 응답특성의 향상은 자속이 지나는 단면적을

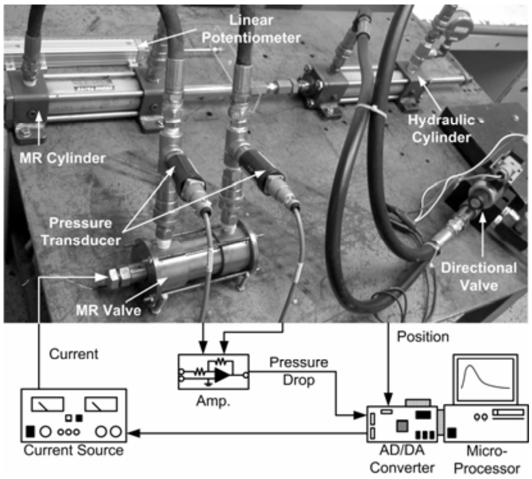
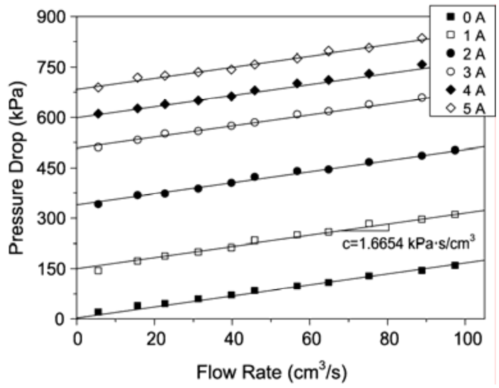
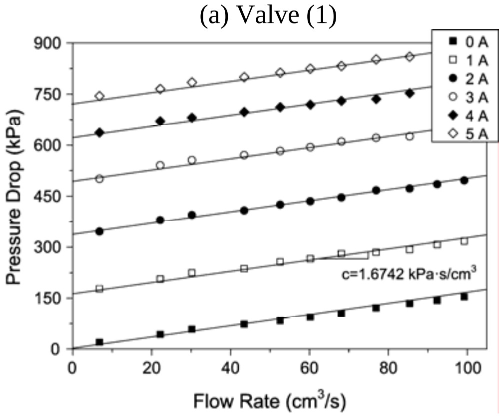


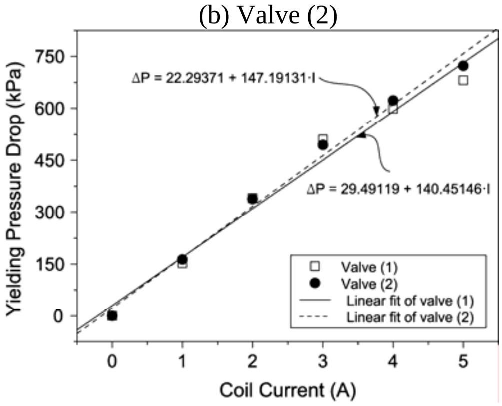
Fig. 5 Experimental setup for performance tests



(a) Valve (1)

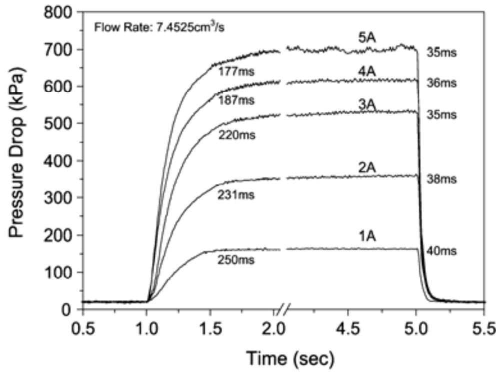


(b) Valve (2)

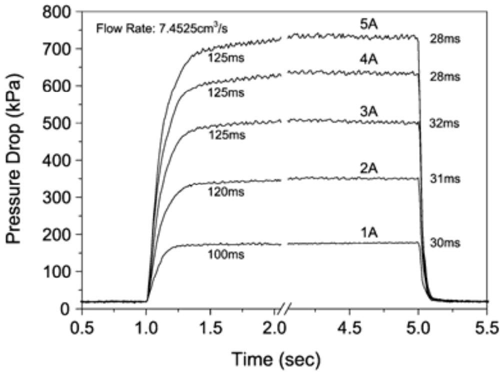


(c) Comparison result

Fig. 6 Static characteristic



(a) Valve (1)



(b) Valve (2)

Fig. 7 Step response characteristic

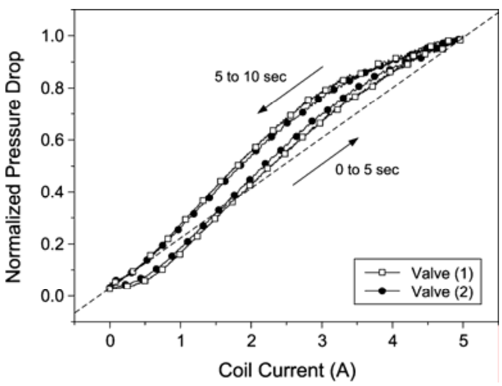


Fig. 8 Hysteresis characteristic

최소화시킨 결과로 고려될 수 잇다. 따라서 본 논문에서 제안된 자로 회로의 설계 방법은 MR 밸브의 응답특성을 향상시키는데 유효함이 입증되었다.

Fig. 8 은 두 MR 밸브의 이력 특성을 비교하기 위해 수행된 실험 결과를 효과적 비교를 위해 수직 축은 얻어진 최대 압력 강하에 대해 정규화 하였다. 결과에 의해, Valve(2)가 Valve(1)보다 적은 이력 특성을 보임을 알 수 있다. 이는 Yoke 의 소자력을 감소시키기 위해 단면적을 최소화한 결과로 고려 될 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 자기회로 설계 방법은 MR 밸브의 이력 특성을 개선하는데 효과적임이 입증되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 MR 밸브의 성능 개선을 위한 전자기적 설계 방법이 제안되었다. 이를 이용해서 자기회로에서 철심 요크의 불필요한 부분을 제거하여 자로의 길이를 줄임으로써 MR 밸브의 정특성을 향상시키고, 단면적을 최소화하여 자기저항을 증가시킴으로 MR 밸브의 응답특성 및 이력특성을 향상시켰다. 또한 이를 by-pass 댐퍼 시스템에 적용하여 성능평가 실험을 통해 기존의 MR 밸브에 비해 전자기적으로 설계된 MR 밸브의 성능이 향상되었음을 확인하였고, 이에 따라 제안된 MR 밸브를 위한 자로 설계 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

(1) Yun-Joo Nam, Young-Jin Moon, Myeong-Kwan Park and Yuk-Hyung Lee 2006 “Electromagnetic Design Methodology for MR Fluid Actuactor” *Transactions of the korean society of mechanical* , Vol. 30-10 October 2006

(2) W.H.Li, H. Du and N.Q.Guo 2003 "Finite Element Analysis and Simulation Evaluation of a Magnetorheological Valve" *Int J Adv Manuf Technol* (2003) 21:438-445

(3)Jin-Hyeong Yoo and Norman M. Wereley 2002 "Design of a High-Efficiency Magnetorheological Valve" *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13-October 2002

(4) Jin-Hyeong Yoo and Norman M. Wereley 2004 "Performance of a Magnetorheological Hydraulic Power Actuation System" *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15-November 2004

(5) Kazuhiro YOSHIDA, Hiroyuki TAKAHASHI, Shinichi YOKOTA, Masashi KAWACHI and Kazuya EDAMURA “A BELLOWS-DRIVEN MOTION CONTROL SYSTEM USING A MAGNETO-RHEOLOGICAL FLUID” *Proc. 5th JFPS Int. Symp. on Fluid Power*, Nara 2002 ; 2; 403-408

(6) Gregory H. Hitchcock, Faramarz Gordaninejad, Xiaojie Wang 2002 “A New By-Pass Fail-Safe, Magneto-Rheological Fluid Damper” *Preceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures*, San Diego, March 2002