

MR 유체를 이용한 유량제어 밸브

Development of Flow Control Valve Using MR Fluid

이형돈, 배형섭, 이육형, 박명관*

(Hyung-Don Lee¹, Hyung-Sub Bae¹, Yuk-Hyung Lee¹, and Myeong-Kwan Park¹)

¹School of Mechanical Engineering, Pusan National University

Abstract: This paper presents development of flow control valve using MR fluid. Generally, 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 this paper, flow control valve using MR fluid on the behavior of the magnetic field influence on the numerical analysis of more accurate electromagnetic parameters were obtained, even if when magnetic field apply inside of surrounding MR fluid from electromagnet, more realistic designing way analysis of characteristic of whole magnetic field distribution is suggested by surrounding magnetic material. Also, comparison of flow rate inlet and outlet, behavior of MR fluid in experiments proposed. A new type of flow control valve using MR fluid is proposed by analysis of behavior of MR fluid in experiments.

Keywords: MRF (Magneto-Rheological Fluid), electromagnetic design, numerical analysis, ferromagnetic material, flow control valve, yield shear stress, hydraulic & air system

I. 서론

MR (Magneto-Rheological) 유체는 저 투자율의 비전도성 용매에 고 투자율을 가진 수 십 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 유사한 거동을 갖는다.

MR 유체를 적용한 장치들은 전류 입력을 이용하여 간단한 구조, 부피 대비 고효율, 저 관성력 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 유량 제어밸브[7,8], 디젤 엔진용 흡·배기 조절밸브[9] 및 바이패스 댐퍼용 밸브[10]에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다.

MR 유체에 자기장을 효과적으로 공급하기 위해서 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 개선하

기 위해서 전자기적 특성을 고려한 자기회로의 설계가 필수적이다. 따라서 본 연구의 목적은 기존의 니들 밸브의 윗부분에 추가적으로 MR 유체 장치를 설계하여 MR 유체의 자화 특성을 이용하여 니들의 개·폐를 조절하여 유량을 조절한다.

II. MR 니들 밸브

본 연구에서 제작된 MR 밸브 구조는 그림 1에 제시하였다. 유체는 밸브의 입구(inlet)로 유입되어 출구(outlet)로 유출되는데 유입된 유체는 니들의 하단부분을 밀게 된다. 이때 밸브가 열리게 되면서 유체가 통과하여 출구로 유출된다. 그리고 유체가 차단이 될 경우 스프링의 탄성력에 의해 니들이 처음의 위치로 돌아가게 된다. MR 유체는 전자석(coil)의 자기장 세기에 따른 점성과 전단 항복응력의 변화로 서론에서 언급한 빙햄 거동 특성이 나타난다. 이를 이용하여 자기장을 통하여 니들의 위치를 제어하여 입출구 양단의 압력과 유량을 제어하는 것이 본 연구의 목적이다. 본 연구에서 사용된 MR 유체는 Lord사에서 조성된 MRF-132DG이며 물성치를 표 1에 나타내었다.

MR 유체와 직접 접촉하고 있는 케이싱과 코일이 감겨진 요크(yoke)는 강자성체로 연철(SS41)이고 나머지 부분은 비자성체인 황동이 사용되었다. 또한 코일의 전류에 따른 자기장 변화를 그림 2에 나타내었다. 전류가 증가함에 따라 자기장의 세기도 선형적으로 증가하게 되는 것을 알 수 있다.

입구에서 유입된 유체는 니들 밸브를 위로 밀고, 이로 인해 형성된 개구면적으로 유체가 통과한다. 니들 밸브를 위로 밀는 유체력은 다음과 같다[12].

$$F_{flow} = 2C_d C_v A_0 (p_1 - p_2) \cos \theta \quad (1)$$

여기서 C_d 는 유량계수 0.61, C_v 는 속도계수 0.98, A_0 는 오리피스 면적, θ 는 jet angle ($= 69^\circ$)이다. 과도상태 유체력과 쿨롱 마찰력은 무시한다. 위 계수들을 식 (1)에 대입하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 4. 18., 수정: 2011. 7. 6., 채택확정: 2011. 7. 20.

이형돈, 배형섭, 이육형, 박명관: 부산대학교 기계공학부

(dony4847@naver.com/hsbae@pusan.ac.kr/yhlee@bit.ac.kr/mkpark1@pusan.ac.kr)

※ 본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과임.

※ 본 논문은 2011 제26회 ICROS 학술회에서 초안이 발표되었음.

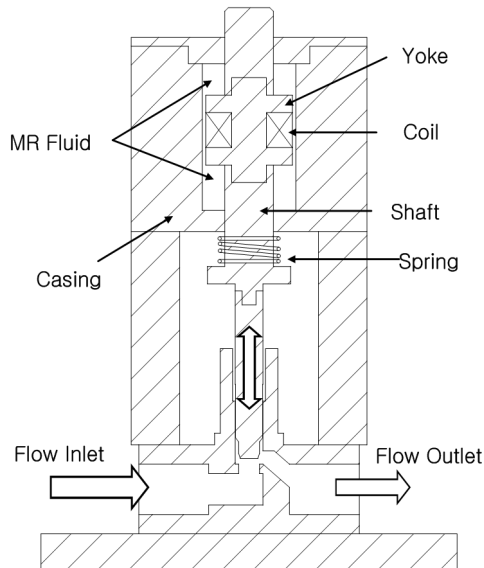


그림 1. MR 유체를 이용한 밸브 구조.

Fig. 1. Schematic configuration of the MR valve

표 1. MR 유체 물성치.

Table 1. Properties for MR Fluid.

Property	Value
Base fluid	Hydrocarbon
Operating temperature	-40 ~ 130 (°C)
Density	3,090 (kg/m ³)
Viscosity	0.09 (Pa·s)
$\tau_{y, \max}$	38.28 (KPa)
$B_{f, \max}$	0.676 (T)
$H_{f, \max}$	150 (A/mm)
μ_f	4.506×10^{-6}

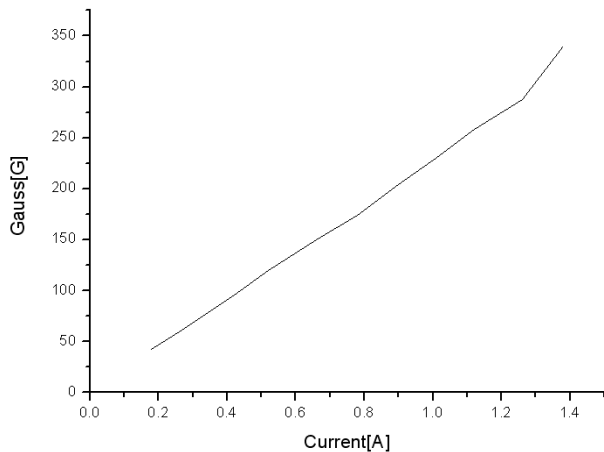


그림 2. 전류에 따른 자기장 변화.

Fig. 2. Change of magnetic field intensity according to current.

$$F_{flow} = 0.43w\Delta p x_v \quad (2)$$

여기서 w 는 오리피스스의 구배($w = \pi d_s$, 여기서, d_s 는 니들 밸브의 직경)이고, x_v 는 니들 밸브의 변위이다. 정리하면, 유체력을 이겨내는 힘이 작용하게 되는데, 이 힘은 MR device가 제공한다.

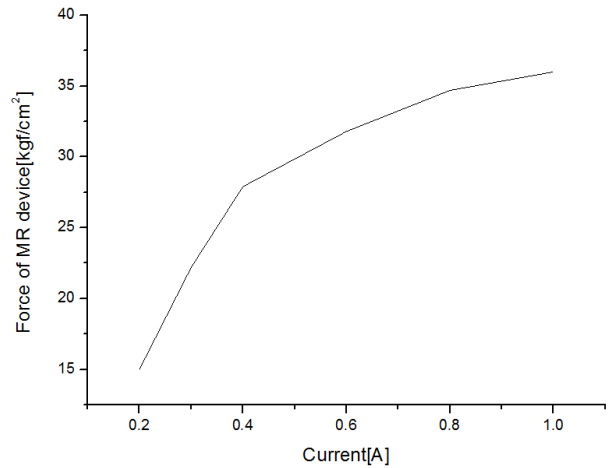


그림 3. 전류에 따른 MR device의 힘.

Fig. 3. Force of MR device according to current.

$$F_{mr} = F_h + F_v = \frac{\eta SA}{g} + \tau_y A \quad (3)$$

식 (3)에서 첫 번째 $\eta SA/g$ 는 유체력이고 두 번째 $\tau_y A$ MR 유체에서 발생하는 힘이다.

여기서, η 는 유체의 점도, S 는 요크와 케이싱의 상대속도, A 는 요크의 단면적 그리고, τ_y 는 MR 유체의 항복응력이고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_y(B) = \alpha_1 B + \alpha_2 B^2 + \alpha_3 B^3 \quad (4)$$

결과적으로, 니들 밸브의 변위값을 식 (2)에 넣게 계산하면 유체력을 알 수 있다. 전류에 따른 MR device의 힘은 그림 3과 같다. 그림 3으로부터 얻어진 $\alpha_1 = 30.15202$, $\alpha_2 = 114.45812$, $\alpha_3 = -64.02457$ 이다.

유체력이 MR device의 힘보다 크면, 니들 밸브는 위로 이동하게 되고 유량이 통과하는 개구면적은 넓어진다. 반면에 유체력보다 MR device의 힘이 크면, 니들 밸브는 이동하지 않거나, 이동하고 있을 경우 MR device에 전류를 인가하면 이동 중에 정지할 것이다.

이로 인해 개구면적이 변화함으로써 유량이 조절된다. 유량은 식 (5)와 같다.

$$Q = C_c w x_v \sqrt{\Delta p / \rho} \quad (5)$$

III. 실험

제작된 MR 유체를 사용한 밸브의 성능을 평가하기 위해 그림 4와 같이 실험장치가 구성되었다. 실험은 자기장의 세기를 조절하기 위하여 코일의 전류를 변화시켜 니들의 위치와 유량을 측정하였다. 출구의 유량은 전류에 따른 MR 유체의 전단응력 변화에 의해 조절되며, 니들의 위치를 측정함은 밸브의 개폐 정도를 알아보기 위함이며 장치 상단에 레이저 센서가 위치한다. 그리고 밸브의 입구 압력을 30 bar에 36 bar 까지 2 bar 단위로 증가시켜 실험하였으며 MR 밸브의 입출구에 설치된 유량센서와 압력센서를 이용하여 출입구의 유량과 압력을 측정하였다.

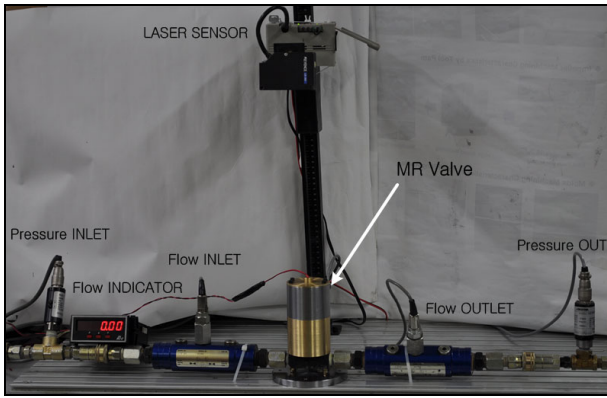


그림 4. 실험 장치.
Fig. 4. Experimental apparatus.

IV. 실험 결과

그림 5, 6은 다양한 입력 전류 하에서 MR 밸브의 유량에 따른 니들의 변위와 유량의 크기를 보여준다. 제시된 MR 밸브는 입력 전류에 의해 효과적으로 유량이 조절 될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 입력 전류의 크기에 따라 MR 유체의 전단응력이 변화하여 니들의 변위가 달라 짐을 알 수 있다. 변위 즉, 니들의 위치가 변화함에 따라 유입 구의 크기도 변하기 때문에 유량이 달라지게 된다. 그림 7은 입구의 유량

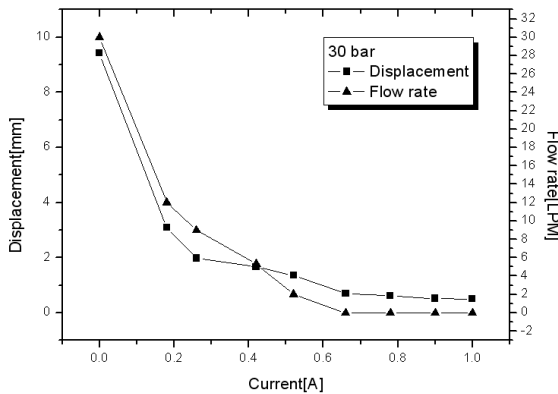


그림 5. 전류에 따른 변위와 유량 변화(30 bar).
Fig. 5. Changes of displacement and flow rate according to current(30 bar).

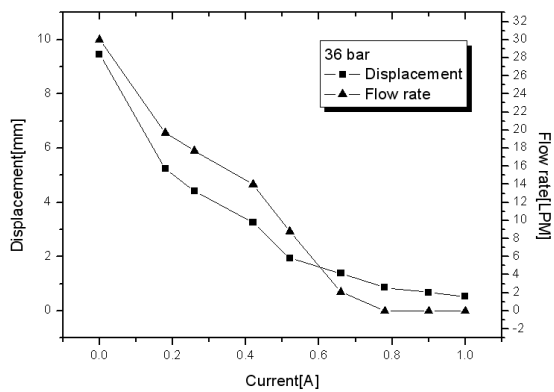


그림 6. 전류에 따른 변위와 유량 변화(36 bar).
Fig. 6. Changes of displacement and flow rate according to current(36 bar).

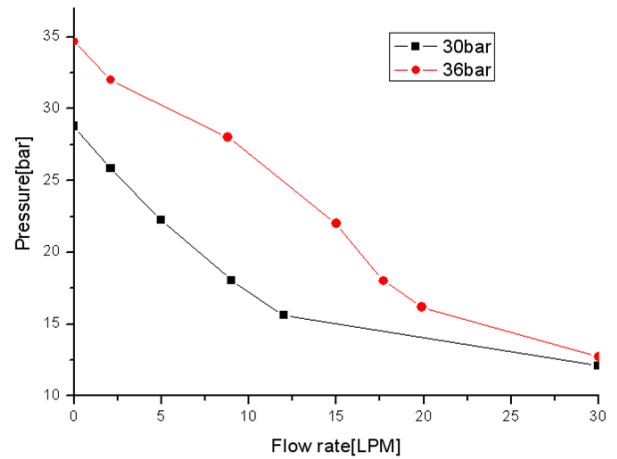


그림 7. 유량에 따른 압력 변화.
Fig. 7. Change of pressure according to flow rate.

에 따른 압력을 보여준다. 압력의 크기가 감소할수록 유량이 증가함을 할 수 있다. 니들의 변위가 적을수록 입구의 압력이 증가하여 유량이 감소하게 된다.

V. 결론

본 연구에서는 먼저 전자석의 자기장을 측정하고 각 전류에 따른 유량변화와 압력변화를 확인하였다. 실험은 30 bar부터 40 bar까지 2 bar 단위로 증가시키면서 진행하였다. 하지만 36 bar 이상의 압력이 가해지면 전자석에 인가되는 허용 전압 범위 내에서 MR 유체 클러스터가 깨지는 현상이 발생하여 밸브의 기능이 제대로 작동하지 못하였다.

요크와 케이싱 내부 사이의 간극을 1 mm로 실험을 실시하였으나 간극을 감소시키면 MR 유체의 전단응력의 세기를 더 증가시킬 수 있어서 높은 압력에서도 유량을 조절할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] P. Phule, "Magnetorheological (MR) Fluid Principles and Applications," *Smart Materials Bulletin*, no. 2, pp. 7-10, 2001.
- [2] Y. J. Nam and M. K. Park, "Performance evaluation of two different bypass-type MR shock damper," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 18, pp. 707-718, 2007.
- [3] G. J. Stelzer, M. J. Schulz, J. Kim, and J. Allemagn, "A Magnetorheological semi-active isolator to reduce vibration transmissibility in automobiles," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 14, pp. 743-765, 2003.
- [4] Y. J. Nam, Y. J. Moon, and M. K. Park, "Performance improvement of a rotary MR fluid actuator based on electromagnetic design," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures Onlinefirst*, vol. 19, no. 6, pp. 695-705, July 2007.
- [5] D. Lampe, A. Thess, and C. Dotzauer, "MRF Clutch: Design considerations and performance," *Proc. 6th International Conference on New Actuators*, pp. 449-452, 1998.
- [6] S. Li, G. Wang, D. Chen, and S. Li, "New type relief valve using magneto-rheological fluid," *5th International Conference on Fluid Power Transmission and Control*, 2001.
- [7] K. Yoshida, H. Takahashi, S. Yokota, M. Kawachi, and K. Edamura, "A bellows-driven motion control system using a

magneto-rheological fluid,” *Proc. 5th JFPS International Symposium on Fluid Power*, Nara, Japan, vol. 2, pp. 403-408, 2002.

- [8] S. Yokota, K. Yoshida, and Y. Kondoh, “A pressure control valve using MR fluid,” *Proc. 4th JFPS International Symposium on Fluid Power*, Tokyo, Japan, pp. 377-380, 1999.
- [9] H. Hirani and C. S. Manjunatha, “Performance evaluation of a Magnetorheological fluid variable valve,” *Proc. The Institution of Mechanical Engineers, Part D, Journal of Automobile Engineering*, vol. 221, pp. 83-93, 2007.
- [10] G. H. Hitchcock, F. Gordaninejad, and X. Wang, “A new by-pass, fail-safe, magneto-rheological fluid damper,” *Proc. SPIE Conference on Smart Materials and Structures*, San Diego, vol. 4696, pp. 345-351, 2002.
- [11] J. An and D. S. Kwon, “Modeling of a Magnetorheological actuator including magnetic hysteresis,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 14, pp. 541-550, 2003.
- [12] H. E. Merritt, *Hydraulic Control Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 1967.



이형돈

2010년 부경대학교 제어계측공학과 졸업. 2010년~현재 부산대학교 기계공학부 제어자동화시스템전공 석사과정 재학중. 관심분야는 유압, MR유체, 제어.



배형섭

2004년 부산대학교 기계공학(공학석사). 2011년 부산대학교 기계공학(공학박사). 2011~현재 부산대학교 공학인증교육센터 연구원. 관심분야는 유공압제어, Magnetic Fluid 제어, MR 유체 제어, Multiphysics analysis 및 시스템 제어.



이육형

1996년 부경대학교 기계공학과(공학사). 1999년 부산대학교 지능기계공학과(공학석사). 2003년 부산대학교 지능기계공학과(공학박사). 2007년~현재 부산정보대학 기계계열 조교수. 관심분야는 기 능성유체 작동기, CAD/CAM, 제어및자동화 장치.



박명관

1958년 11월 4일생. 1984년 부산대학교 기계공학부(공학사). 1988년 동경공업대학 기계공학(공학석사). 1991년 동경공업대학 기계공학(공학박사). 1995년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 유공압 컴포넌트 설계 및 지능성 유체 작동기 및 제어.