

밸브 내장형 MR 실린더를 이용한 힘 제어에 관한 연구

송주영*(울산대 대학원 기계자동차공학과), 안경관(울산대 기계자동차공학부)

A study on the force control of MR cylinder with built-in valves

J. Y. Song(Mechanical & Automotive . Eng. Dept. UOU), K. K. Ahn(Mechanical & Automotive. Dept., UOU)

ABSTRACT

A new MR cylinder with built-in valves using MR fluid (MR valve) is suggested and fabricated for fluid control systems. The MR fluid is a newly developed functional fluid whose obvious viscosity is controlled by the applied magnetic field intensity. The MR cylinder is composed of cylinder with small clearance and piston with electromagnet. The differential pressure is controlled by the applied magnetic field intensity. It has the characteristics of simple, compact and reliable structure. The size of MR cylinder and piston has $\phi 30\text{mm} \times 00\text{mm}$ and $\phi 28.5\text{mm} \times 20\text{mm}$ in face size, respectively and 0.8mm in gap length. Through experiments, it was found that the differential pressure is controlled by the applied magnetic field intensity under little influence of the flow rate, which corresponds to a pressure control valve. The differential pressure of 0.47MPa and contact force of 320N were obtained with the input current of 1.5A. The rising time of force was 1.1s in step response of a manipulator using the MR cylinder. The effectiveness of the MR cylinder was also demonstrated through the force control.

Key Words: MR Fluid(MR 유체), MR cylinder(MR 실린더), Static Characteristics(정특성), Dynamic Characteristics(동특성), Force Control(힘제어)

기호설명

ΔP : 실린더의 압력차
 D : 피스톤의 직경
 D_c : 코일부분의 피스톤 직경
 l : 슬레노이드를 제외한 피스톤의 길이
 l_1 : 슬레노이드의 길이
 μ_0 : 진공의 투자율
 μ_s : MR 유체의 비투자율
 k : MR 효과계수
 B_g : 간극에서의 자속 밀도
 B_1, B_2 : 피스톤 각 방향의 자속밀도
 h : 간극
 σ : 자속의 누설계수
 Φ : 자속
 d : 코일의 직경
 I : 전류
 R : 전체의 자기저항
 α : 도선의 채적 충전율

1. 서론

MR(magneto-rheological) 유체는 자성체 미립자를 분산시킨 현탁액이고, 자기장에 의하여 분산 입자의 구조가 변화되어 외관상의 점도가 변하는 기능성 유체이다. 이러한 가제어성 유체를 이용하면, 기계적인 요소가 없는 밸브장치를 만들 수 있고, 적은 에너지 소모, 환경오염이 없다는 장점을 갖고 있다. MR 유체는 소형으로 큰 힘을 낼 수 있고, 큰 운동 변위를 갖기 때문에 적용 범위가 상당히 넓다. 현재 MR 유체를 이용한 장치들의 일반적인 응용분야를 살펴보면, 진동하는 물체라면 어디든 적용 가능한 간단한 밸브,⁽¹⁾ 건물의 진동 절연을 위한 댐퍼,⁽²⁾ 회전체나 미소 변위로 운동하는 장치의 변위를 제어하는 부분⁽³⁾ 등에 사용되어진다. 직동형 댐퍼부분에서는 엔진 마운트, 충격 흡수기, 서보 밸브등에서, 변위 제어부분은 클러치, 브레이크, 잠금 장치 등에서 사용되고 있다.⁽³⁻⁶⁾ 지금까지 MR 유체를 이용한 새로운 액추에이터 개발에 관한 연구는 일본의 yoshida 등에 의하여 진행되어 왔으며,

특히 벨로우즈 구동 머니플레이터의 경우에 공급되는 압력에 따라 신축하는 벨로우즈를 이용한 MR 유체 구동 머니플레이터를 제작하였다. (8-9) 기존 연구에서는 MR 밸브에 의해 제어된 압력으로 벨로우즈를 이용한 액추에이터를 구동하였다. 이때 벨로우즈의 최대 신장률이 약 20% 정도였다. 본 논문에서는 MR 유체를 작동 유체로 사용해서, 밸브 부분의 가동부가 필요하지 않는 단순구조를 가지는, 힘제어가 가능한 밸브 내장형 MR 실린더를 개발하고자 한다.

2. MR 실린더의 설계 및 제작

2.1 제안한 MR 실린더

Fig. 1은 제안한 MR 실린더의 개략도를 나타내고 있다. 본 MR 실린더의 작동원리를 살펴보면, 전자석을 장착한 피스톤과 실린더 사이의 간극에 MR 유체를 통과시켜, 전자석에 의하여 생기는 자기장에 의하여 피스톤과 실린더 사이의 틈새의 양단의 차압을 제어함으로써, 실린더를 구동하도록 되어있다. 이전의 유압실린더와 비교하면 제안하는 MR 실린더는 소형, 단순구조 및 가동부가 없는 것을 특징으로 하고 있다.

실린더의 공급 포트에는 쇼크가 있고, 이 조리개의 상류에 일정 유량을 공급할 때, 피스톤 상류에서의 압력을 피스톤의 전자석에 의해 생긴 자기장에 의하여 제어할 수 있다. 또 실린더 내의 로드 주위에는 고무재질의 벨로우즈가 장착되어, MR 유체의 분산 입자의 침입을 막는 역할을 한다.

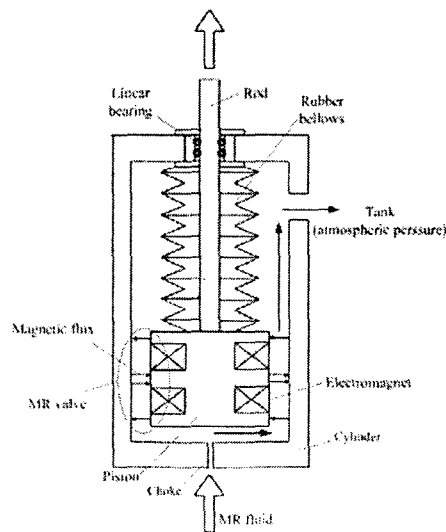


Fig. 1 Schematic of the MR cylinder

Table. 1 Design data for MR cylinder

Notation	Design data
D (mm)	38.5
μ_0 (Hm ⁻¹)	$4\pi \times 10^{-7}$
μ_s	2
k (kPa/T)	41
B_g (T)	0.1
B_1, B_2 (T)	0.55
h (mm)	0.7
σ	2
d (mm)	0.23
I_{max} (A)	2
α	0.7
N	150

2.2 MR 실린더의 설계

피스톤은 자속의 유동성이 좋은 연철재로 최대 직경이 $\phi 28.5$ mm, 높이가 120mm로 구성되고, 실린더는 저탄소 강재로 내경이 $\phi 30$ mm, 높이가 300mm이다. 공급 압력 0.6MPa, 인가 전류 1.5A 일 때 피스톤 차압이 0.46MPa이 되도록 MR 실린더를 설계, 제작하였다. 피스톤, 실린더는 잔류 자속이 가능한 작은 재료를 선택하였다.

실린더의 발생력을 구하기 위한 설계변수를 얻기 위해 다음과 같은 식들을 이용한다. (2) 식 (1)은 피스톤부 양단의 압력차를 구하는 식으로서, 이 식에서 사용되는 자속은 설계변수와 물성치로부터 구할 수 있다. (9) 이 때 실린더 설계에 사용한 각종 물성치 및 치수는 Table. 1에 나타나 있다.

$$\Delta P = \frac{2 \times 2l \times k}{h} \times B_g = \frac{4k}{\pi \sigma} \times \frac{\Phi}{Dh} = \frac{k}{h\sigma} \times \frac{D_c^2 B_g}{D} \quad (1)$$

여기서 k 는 MR 효과계수로, 인가 자속밀도에 대한 MR 효과의 전단응력의 변화비를 나타낸다. Fig. 2는 물성치 및 자기 회로 각 부분의 자속 밀도를 나타내고, 자속 밀도는 자기 포화가 되지 않는 범위에서 값을 선정한다. 여기서 B_g 는 자기포화가 일어나지 않도록 0.1로 설정하였다. Fig. 2의 각 부분에서 자속밀도는 식 (2)-(3)과 같이 표현된다.

$$I = \Phi / \pi D B_g \sigma \quad (2)$$

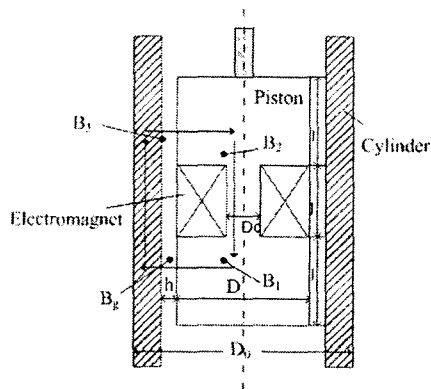


Fig. 2 Magnetic Diagram of MR cylinder

$$D_c = \Phi / \pi / B_1 \quad (3)$$

상기 식 (2)로부터 l 을 구하고, 식 (3)으로부터 D_c 를 구할 수 있다. 식 (6)은 자속과 전류의 관계를 나타낸다. 여기서 R 과 N 은 식 (4) 및 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$R = \frac{2}{\pi \mu_0 \mu_s} \times \frac{h}{Dl} \quad (4)$$

$$N_s = \alpha \times \frac{l(D - D_c)}{2d^2} \quad (5)$$

$$\Phi = \frac{NI}{R} \quad (6)$$

상기 식으로부터 마지막 설계 변수인 l_1 을 구할 수 있다. 마지막 설계 변수인 l_1 을 구하기 위해서, 식 (6)에 위에서 구한 값들과 설계변수, 물성치를 대입한다.

$$\Delta P = \frac{2 \times 2l \times k}{h} \times B_g \quad (7)$$

그 결과, 압력차는 0.23MPa이 된다. 결과값이 목표의 약 절반에 해당하므로 이를 보상하기 위한 방안이 제시되어야 한다.

전자석 1개로는 피스톤, 실린더의 자기 포화에 의하여 피스톤에서 발생하는 자속이 제한되기 때문에, 전자석의 극성을 서로 다르게 직렬로 배치함으로써 발생력을 증대시킨다. 피스톤 양단의 압력차가 0.46MPa이 되도록 하기 위하여, 권선수 150의 2개의 전자석을 이용하였다.⁽¹⁰⁾ 그러나, 전자석의 개수에 비례하여 피스톤 양단의 압력차와 실린더 추

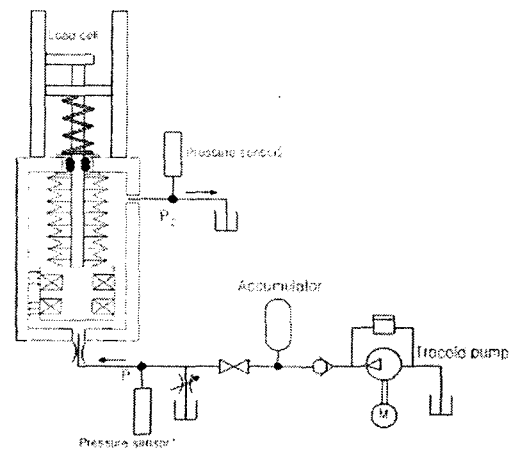


Fig. 3 Experimental setup of the MR cylinder

력을 낼 수 있기 때문에, 가장 경량으로 최대출력이 되도록 전자석의 개수를 실험에 의해 2개로 결정하였다. 또한 유체의 점성에 의한 압력 손실, 자장에 의하여 생기는 차압과 비교하여 충분히 작아지도록 설계하였다.

2.3 실험장치의 개략도

MR 실린더의 특성 실험을 위해, Fig. 3 및 4와 같은 실험장치를 구성하였다. 이 때, 압력은 압력 센서 (Honeywell, SA05OPG1HD), 힘은 로드셀 (Bongshin, CDES-200)를 이용하여 측정하였고, 샘플링 타임은 1ms로 설정하였다. 퍼스널 컴퓨터 안에서 PID 제어 등의 연산 처리를 행하고, 연산된 제어 입력값은 D/A 변환기 및 V/I 변환기를 이용하여 전류로 변환되고, 이 전류를 MR 실린더의 피스톤부에 장착된 전자석에 공급한다. 트로코이드 펌프로부터 도출된 유체는 실린더 하단부의 오리피스를

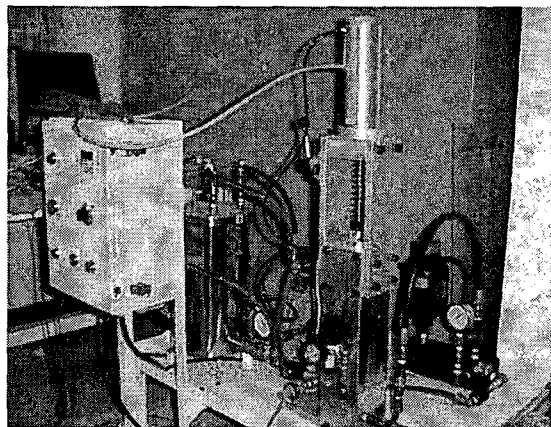


Fig. 4 Configuration of the MR cylinder

통해 실린더로 들어간다.

피스톤 양단의 차압에 의한 추력이 스프링의 반력보다 크게되면, 실린더의 로드가 상승하게 된다. 실험에 사용된 MR 유체는 미국 Lord사의 MRF-122-2ED이다. 이 유체는, 평균 직경 2.7㎜의 Mn-Zn계 페라이트 미립자를 질량비 80%로 유체중에 분산된 것이고, 기저 점도는 0.07Pa·s, 밀도는 2.38g/cc로, 이전의 제품과 비교하여 유체의 기저점도가 매우 낮다.

펌프는, 분산입자의 영향을 적게 받는 트로코이드 펌프 (NIPPON 오일 펌프 TOP-204HBVB, 정격 압력 3MPa, 정격 유량 7.2LPM) 를 사용하고 있다. 토출 압력의 맥동을 저감하기 위하여 블레이드 형태의 어큐플레이터를 사용하고 있다. 또한 펌프 내장의 릴리프 밸브와 실린더 입구측의 스톱 밸브를 조정하여 펌프의 토출 압력을 조정하고 있다. 측정은 실린더 입구의 압력, 실린더의 힘 및 전자석, 전류에 대해서 행하고 있다.

3. ANSYS 를 이용한 유한요소해석

실린더와 피스톤 사이에서 매개체 역할을 하고 있는 유체의 점성은 피스톤 양단의 압력차를 결정하고, 작용하는 자기장의 형태와 세기에 따라 점성이 변한다. 그러므로, 정확한 실린더의 성능 예측을 위해서, 가장 먼저 솔레노이드에서 발생하는 자기장의 크기를 알아야 한다. 이 때 작용하는 자기장은 솔레노이드에 감겨 있는 코일의 권선수, 보빈 형상 및 재질에 영향을 받는다. 여기서는 피스톤부의 자기장에 대한 유한요소해석을 통하여 제안하는 실린더에서 발생할 수 있는 압력을 예측하고자 한다.

본 연구에서는, 이차원 모델링을 하였고 Free Mesh 로 해석을 수행하였다. Element type 은 PLANE 13 을 사용하였고, MR 유체 및 실린더와 피스톤부의 상대 투자율은 각각 5, 1 및 5000 을 각각 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 또한 미국 Lord 사에서 제공된 MR 유체의 B-H 곡선을 입력하여 해석의 정확도를 높였다.

Fig. 5 와 Fig. 6 은 상기조건에 의해 해석한 자속의 경로 및 자계의 강도를 각각 나타내고 있다. Fig. 5 에서 솔레노이드에서 발생한 자기장이 간극의 수직방향으로 형성되어 있다. 간극의 수직방향으로 자기장이 형성됨으로써, MR 유체의 점성을 제어할 수 있고, 결국 피스톤 양단의 압력차가 발생된다.

Fig. 6 에서, 직렬로 배열된 두개의 전자석으로부터 형성된 자기장이 만나는 피스톤의

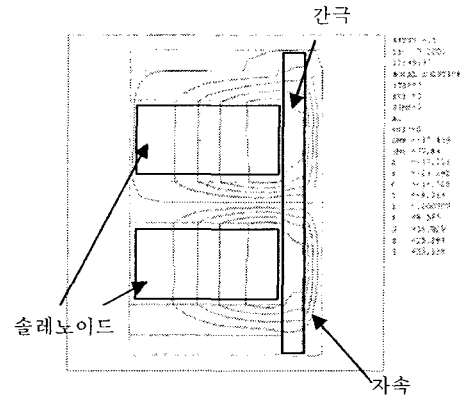


Fig. 5 Flow of Magnetic flux

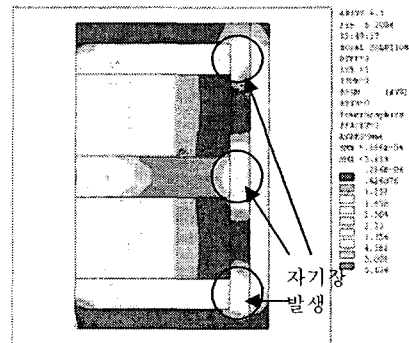


Fig. 6 Intensity of Magnetic field

가운데 부분에서 자계의 강도가 약 두 배로 커지는 것을 알 수 있다. 가운데 부분에서의 자기장의 강도가 두배로 나타나는 것은 위쪽과 아래쪽의 전자석의 극성을 반대로 배치하여 자기장이 합쳐지기 때문이다.

따라서 상기의 해석결과로부터 두개의 솔레노이드를 사용함으로써 본 연구에서 목표로 하는 압력차를 발생시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. MR 실린더의 특성 실험

MR 실린더의 정특성 및 동특성 파악을 위한 실험을 아래와 같이 실시하였다.

4.1 정특성 실험

MR 실린더의 전자석에 저주파 전류를 입력하고, MR 실린더의 정특성을 측정한 결과를 Fig. 7에 나타내고 있다. 왼쪽은 전류에 대한 압력차를, 오른쪽은 전류에 대한 힘을 각각 나타내고 있다.

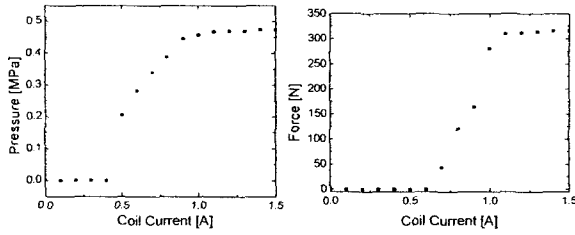


Fig. 7 Static characteristic of a MR cylinder

압력차. 힘 두 경우 모두 스프링력에 의해 약 0.5A 이전까지는 변화가 없으나, 약 0.5A보다 큰 전류를 인가하면 압력차 및 힘이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그림과 같이 전류 1.5A일 때에 $\Delta P=0.46\text{MPa}$ 이고, 약 320N의 힘을 가진다. 두 결과로부터, 제어 범위는 약 0.5A에서 1.0A임을 알 수 있다. 1.0A 이상이 되면, 자기포화가 발생하여 더 이상의 압력차를 발생시킬 수 없으며, 또한 실린더 힘도 증가하지 않게 된다. 본 실험에서는 0.5A에서 1.0A 구간에서 사용하도록 한다.

4.2 동특성 실험

MR 실린더의 전자석에 스텝과 정현파의 전류를 입력하고, MR 실린더의 동특성을 측정하였다. Fig. 8은 스텝의 입력 전류, Fig. 9는 정현파 입력 전류에 대한 동특성 실험결과를 각각 나타낸다. Fig. 8에서 상승시간 및 하강시간은 각각 1.1s, 0.1s로 측정되었다. 실린더 하단부의 오리피스 직경을 제한하였기 때문에, 하강시의 응답성과 비교하여 상승시의 응답성이 느린 것을 알 수 있다. 또 Fig. 9의

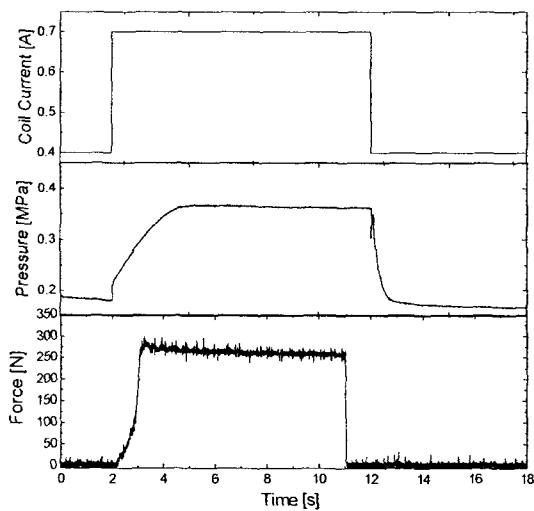


Fig. 8 Step response of MR cylinder

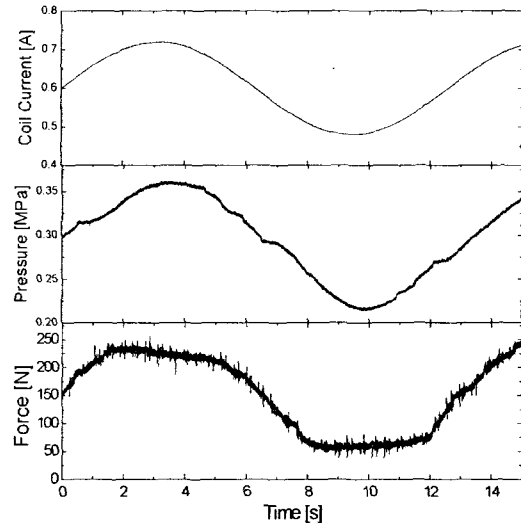


Fig. 9 Sinusoidal response of MR cylinder

정현파에 대한 실험에서 주파수 응답이 약 0.07Hz에 추종하는 것을 볼 수 있다. 실린더의 전진 및 후진이 시작되는 지점에서는 MR 입자가 클러스터를 형성, 붕괴하는 과정에서 생기는 시간 지연과 쿨롱 마찰에 의해 어느 정도의 시간 지연을 가지고 실린더 힘이 변화하기 시작함을 알 수 있다.

4.3 PID 제어 실험

제작한 MR 실린더의 서보 액추에이터로서의 가능성을 검토하기 위하여 스텝 및 정현파 목표 궤적에 대한 위치 제어실험을 실시하였다. 제어기는 산업용으로 널리 이용되는 PID 제어를 이용하였다. Fig. 10은 스텝 목표 궤적에 대한 힘제어 실험결과를 나타내고 있다. 이 때 PID제어의 비례, 적분 및 미분 계수는 목표치에 대하여 1% 이내의 오버슈트 특성이 만족되도록 8, 0.0001 및 0.01로 각각 설정하였다.

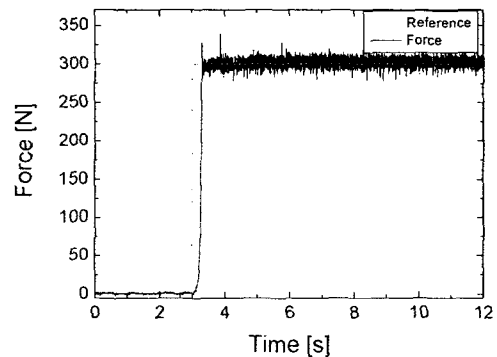


Fig. 10 Closed loop step response

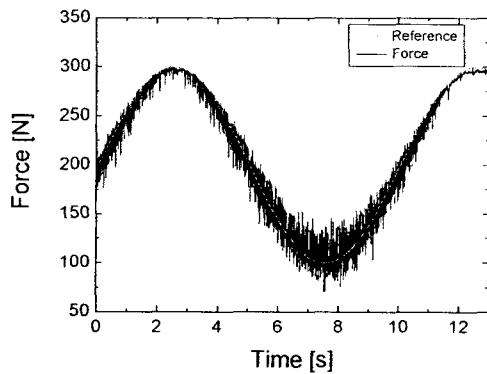


Fig. 11 Closed loop sinusoidal response

Fig. 8의 동특성 실험 결과와 비교해서 볼 때, PID 제어를 적용함으로써 빠른 응답과 0.1mm 이내의 정상상태오차를 가짐을 알 수 있다. 상승시와 하강시의 응답속도의 차이는 정특성과 마찬가지로 스프링의 반력에 의한 응답특성의 차이이다. 한편 Fig. 11은 정현파 목표궤적에 대한 힘제어 실험결과를 나타내고 있다. PID 제어기의 비례, 적분 및 미분 계인은 10, 0.0001 및 0.01로 각각 설정하였다.

다만, 정현파의 하강시에 힘이 목표치와 차이가 생기는 이유는 관류자기에 의한 자기포화 때문이라고 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는, 페라이트 미립자를 이용한 저 점도가 낮은 MR 유체를 작동 유체로 한 새로운 액추에이터로서 MR 실린더를 제안하고 FEM 해석, 제작 및 제어 실험을 통해 새로운 실린더의 성능을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 MR 실린더는 전자석을 장착한 피스톤과 실린더와의 사이의 간극에 MR 유체를 통과시켜, 전자석에 의하여 생기는 자장에 의하여 피스톤 양면간의 차압을 제어한 것으로, 소형으로 큰 스트로크를 가지는 장점을 가지고 있다. 또한 MR 실린더의 큰 차압을 발생시키기 위하여 ANSYS를 이용한 FEM 해석을 통하여 피스톤부의 슬레노이드 및 틱새 간격에 대한 설계를 수행하였다.

정특성 실험 결과, 코일에 전류를 1.5A까지 인가하였을 때 0.46MPa의 압력차가 발생하였다. 그리고 MR 실린더의 스텝 응답의 실험 결과, 상승 시간이 1.1s, 하강 시간은 0.1s였다. 그리고 시간지연에 관한 문제를 해결하기 위해, PID 제어기를 설계하여, 서보 액추에이터로서의 가능성을 검토하였다. 본 연구를 통하여 MR 유체를 작동 유체로 사용해서, 밸브부분의 가동부가 필요하지 않는 단순구조

를 가지며, 큰 스트로크를 가진 새로운 액추에이터를 개발할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 지역산업기술혁신사업으로 울산대학교 기계부품 및 소재특성평가연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. M. H. Nam, Performance Characteristics of Seat Damper Using MR Fluid, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, vol. 5, pp. 127-134, Oct, 2000
2. Shinichi YOKOTA, Kazuhiro YOSHIDA and Yutaka KONDOH, Pressure Control Valve Using MR Fluid, Proc. Fourth JHPS-ISEP Tokyo, 9 vol. 11, pp. 377-380, 1999
3. J. H. Kim, Design, Fabrication and Modeling of Magneto-Rheological Fluid Based Semi-active Mount, Master Thesis, KAIST, 1996
4. Hartmut Janocha, Application potential of magnetic field driven new actuators, Sensors and Actuators A 91, pp. 126-132, 2001
5. B. H. Lee, Design of the Current Feedback Electromagnetic Actuator for Engine Vibration Control, Master Thesis, KAIST, 2003
6. S. W. Kwon, Rotary Brake Development with a Permanent Magnet, Master Thesis, KAIST, 1997
7. D.E. Ivers, J.D. Carlson, M.R. Jolly, M.J. Chrzan, D.R. Prindle, K.A. St. Clair, Two-way MR fluid valve, Smart Materials Bulletin, Volume 2001, Issue3, March, pp 16, 2001
8. K. Yoshida, H. Takahashi, S. Yokota, M. Kawachi and K. Edamura: Bellows-Driven Motion Control System Using a Magneto-Rheological Fluid, Proc. 5th JFPS Int. Symp. on Fluid Power, Nara2002, Nara, Japan, pp. 403-408, 2002
9. K. Yoshida, J. H. Park, S. Yokota, M. Kawachi and K. Edamura: Bellows-Driven Manipulator Using a New Magneto-Rheological Fluid, Proc. 4th Int. Symp. on Fluid Power Transmission and Control (ISFP2003), Wuhan, P. R. China, pp. 542-547, 2003
10. K. Yoshida, Tsutomu Soga, Shinichi Yokota, Masashi Kawachi and Kazuya Edamura: Bellows-Driven Manipulator Using Magneto-Rheological Fluid, 8th International Conference on Mechatronics Technology, Nov 8-12, pp189-194