

# MR 밸브 내장형 서보 액추에이터의 힘 제어에 관한 연구

## A study on the force control of a servo actuator with built-in MR Valve

안경관 · 송주영 · 김정수 · 안영공 · 박중호

K. K. Ahn, J. Y. Song, J. S. Kim, Y. K. Ahn and J. H. Park

**Key Words** : Magneto-Rheological Fluid (MR 유체), MR cylinder (MR 실린더), Servo Actuator (서보 액추에이터), Force Control (힘제어)

**Abstract:** A servo actuator with a valve using MR (Magneto-Rheological) fluid is proposed for fluid control systems. The MR fluid is well known as a functional fluid whose apparent viscosity is controlled by the applied magnetic field strength. The pressure in the MR cylinder can be controlled by the applied magnetic field strength. Good points of the MR cylinder are more simple, compact and reliable structure than a conventional oil hydraulic cylinder. The experimental results show that the MR cylinder could be used as a servo actuator.

### 기호 설명

- $\Delta P$  : 실린더의 압력차
- $D$  : 피스톤의 직경
- $D_c$  : 코일부분의 피스톤 직경
- $l$  : 솔레노이드를 제외한 피스톤의 길이
- $l_1$  : 솔레노이드의 길이
- $\mu_0$  : 진공의 투자율
- $\mu_s$  : MR 유체의 비투자율
- $k$  : MR 효과계수
- $B_g$  : 간극에서의 자속 밀도
- $B_1, B_2$ : 피스톤 각 방향의 자속밀도
- $h$  : 간극
- $\sigma$  : 자속의 누설계수
- $\Phi$  : 자속
- $d$  : 코일의 직경
- $I$  : 전류
- $R$  : 전체의 자기저항
- $\alpha$  : 도선의 체적 충전율

### 1. 서 론

MR유체 (Magneto-Rheological Fluid)는 자성체의 미립자를 분산시킨 현탁액으로서, 자기장에 의하여 분산 입자의 구조가 변화되어 걸보기 점도가 변화하는 기능성 유체이다. 이러한 가제어성 유체를 이용하면, 일반적인 유압장치의 복잡한 기계적인 요소가 없는 저가의 밸브장치를 만들 수 있고, 보다 낮은 에너지 공급원으로도 구동이 가능하다. 또한, MR유체의 적용이 간단하므로 다양한 장치에 응용할 수 있고, 부가 전류에 대한 MR 유체의 점도변화가 크게 나타나므로 대형의 기계요소에도 적용이 가능하다.<sup>1)</sup> 따라서, 현재 MR 유체를 이용한 수많은 장치들이 개발되어 왔다.<sup>1~6)</sup>

본 연구에서는 기존의 MR유체를 이용하는 댐퍼와는 달리 벨로우즈를 이용한 MR유체 구동 머니플레이터에 관한 연구<sup>7~10)</sup>를 바탕으로 MR유체를 이용한 실린더를 설계 및 제작 하고, 힘 제어를 수행하여 밸브 내장형 MR 실린더가 서보 액추에이터로서 가능성을 실험적으로 검토하였다.

### 2. MR 실린더의 설계 및 제작

#### 2.1 MR 실린더

Fig. 1은 MR 실린더의 개략도를 나타내고 있다.

접수일 : 2006년 1월 11일  
 안경관(책임저자) : 울산대학교 기계자동차공학부  
 E-mail : kkahn@ulsan.ac.kr, Tel : 052-259-1501  
 송주영, 김정수: 울산대학교 대학원 기계자동차공학부  
 안영공 : 송도테크노파크 자동차부품산업클러스터사업단(CAI)  
 박중호 : 한국기계연구원 첨단산업기술연구부

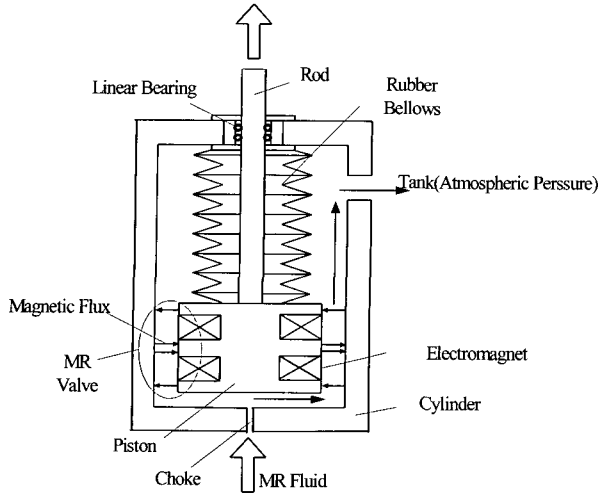


Fig. 1 Schematic of MR cylinder

본 실린더의 공급 포트에는 쇼크가 있고, 이 조리개의 상부에 일정 유량을 공급할 때, 피스톤 상하부 사이의 압력차를 이용하여 피스톤의 위치 및 힘을 제어할 수 있게 설계되어 있다. MR 유체는 전자석이 설치된 피스톤과 실린더 사이의 간극으로 이동하게 되고 전자석에 의해서 부가되는 자기장을 변화시키면 MR유체의 피스톤 상하부 사이에 압력차가 발생하게 되어 실린더가 움직이게 된다. 실린더 내의 벨로우즈는 피스톤 로드를 지지하는 리니어 베어링 내부에 MR유체가 유입되는 것을 방지하기 위해서 설치되어 있다. 본 MR실린더는 종래의 유압실린더에 비해서 크기가 소형, 구조가 단순하고 가동부가 없는 것을 특징으로 하고 있다.

## 2.2 MR 실린더의 설계

피스톤과 실린더의 재질은 각각 강자성체인 순철과 연강으로서, 피스톤의 직경과 높이는 각각 28.5mm, 120mm이고, 실린더의 내부 직경과 높이는 각각 30mm, 300mm이다. 실린더 내부의 MR 유체의 공급 압력은 0.6MPa이고, 피스톤의 전자석에 부가하는 전류가 1.5A일 때 피스톤 상하부 사이의 압력차가 0.46MPa이 되도록 MR 실린더를 설계하는 것이 목표이다. 따라서, 피스톤 상하부 양단의 압력차를 이론적으로 구하기 위해서 아래의 식(1)을 이용하였다.<sup>10)</sup>

$$\Delta P = \frac{2 \times l \times k}{h} \times B_g = \frac{4k}{\pi \sigma} \times \frac{\Phi}{Dh} = \frac{k}{h \sigma} \times \frac{D_c^2 B_2}{D} \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 MR 효과계수로, 인가하는 자속밀도에 대한 MR 효과의 전단응력의 변화비를 나타낸다.

Table 1 Design data for MR cylinder

Notation	Design data
$D$ (mm)	38.5
$\mu_0$ (Hm <sup>-1</sup> )	$4 \times 10^{-7}$
$\mu_s$	2
$k$ (kPa/T)	41
$B_g$ (T)	0.1
$B_1, B_2$ (T)	0.55
$h$ (mm)	0.7
$\sigma$	2
$d$ (mm)	0.23
$I_{max}$ (A)	2
$\alpha$	0.7
$N$	150

실린더 설계에 사용한 각종 물성치 및 치수는 Table 1에 나타나 있고, Fig. 2에 실린더와 피스톤의 설계변수에 대한 개략도를 나타내었다. 식 (2), (3)은 각각 간극에 있어서의 자속밀도와 피스톤 중심부 반경 방향에 있어서의 자속밀도이다.

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

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

상기 식 (2)로부터 1을 구하고, 식 (3)으로부터  $D_c$ 를 구할 수 있다. 피스톤, 실린더 사이의 간극 이외의 자기 저항을 무시하면, 이 자기 회로 전체의 자기 저항  $R$ 은 식 (5)이고, 권선수  $N$ 은 식 (6)이다.

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

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

$\alpha$ 은 도선의 체적 충전율이라 하고, 전자석에 흐른 전류를  $I$ 라 하면, 자속은

$$\Phi = \frac{NI}{R} = \frac{\pi \alpha \mu_0 \mu_s I}{4hd^2} \times D l l_1 (D - D_c) \quad (6)$$

이 되고, 상기 식으로부터 마지막 설계 변수인  $l_1$ 을 구할 수 있다. 피스톤 양단의 압력차가 0.46MPa이 되도록 하기 위하여, 권선수 150의 2개의 전자석을 이용하였고,<sup>10)</sup> 전자석의 극성은 서로 다르게 직렬로 배치함으로써 발생력을 증대시킬 수 있었다.

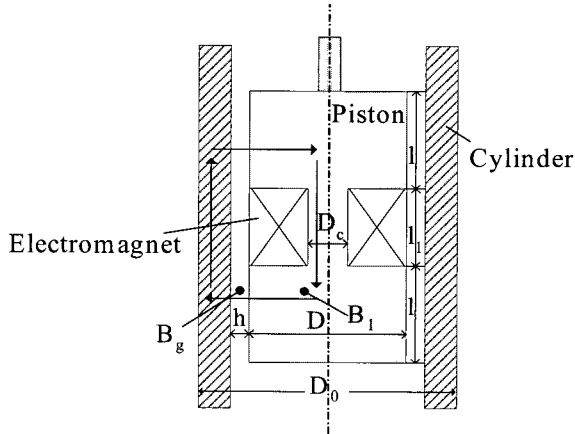


Fig. 2 Magnetic diagram of MR cylinder

또한, 유체의 점성에 의한 압력 손실이 자장에 의하여 생기는 차압과 비교하여 충분히 작아지도록 설계하였다.

### 2.3 ANSYS를 이용한 자기장 해석

실린더와 피스톤 사이에서 발생하는 MR유체의 효과는 자기장의 방향에 크게 영향을 받게 된다.

따라서, ANSYS를 이용하여 자기장 해석을 수행하였다. 자기장은 솔레노이드에 감겨 있는 코일의 권선수, 보빈 형상 및 재질에 영향을 받는다. 피스톤부의 자기장에 대한 유한요소 해석을 통하여 제안하는 실린더에서 발생할 수 있는 압력을 예측하였다.

본 연구에서는, 이차원 모델의 자유 격자(Free mesh)로서 자기장 해석을 수행하였다. 요소 타입(Element type)은 PLANE 13을 사용하였고, MR 유체와 피스톤부의 상대 투과율은 각각 5, 5000을 사용하였다.(10) 또한, 미국 Lord사에서 제공된 MR 유체의 B-H 곡선을 입력하여 해석의 정확도를 높였다.

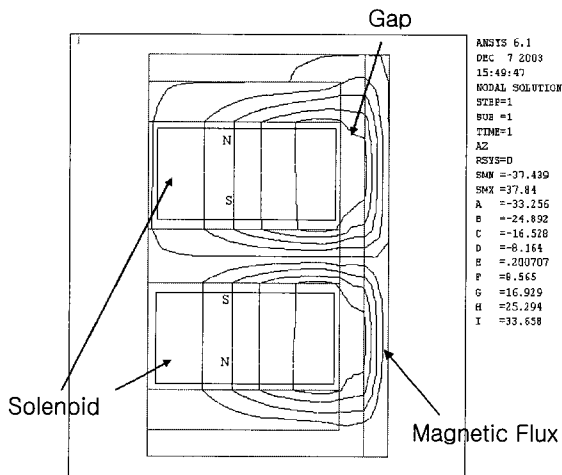


Fig. 3 Flow of magnetic flux

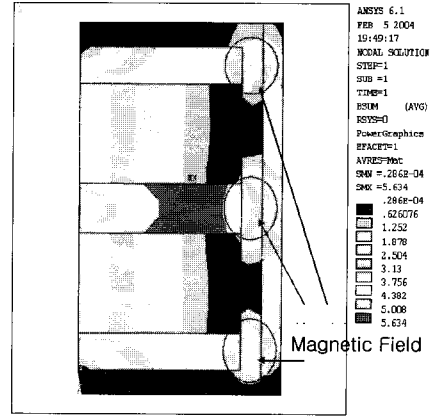


Fig. 4 Intensity of magnetic field

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 상기 조건에 의해 해석된 자속의 경로 및 자계의 강도를 나타내고 있다.

Fig. 3 에서 솔레노이드에서 발생한 자기장이 간극의 수직방향으로 형성되어 있다. 간극의 수직방향으로 자기장이 형성됨으로써, MR유체의 점성을 보다 효과적으로 제어할 수 있다. 전자석의 위쪽과 아래쪽의 극성을 반대로 배치하였기 때문에 두 개의 전자석으로부터 형성된 자기장이 만나는 피스톤의 가운데 부분의 자계강도가 약 두 배로 증가한 것을 Fig. 4에서 알 수 있다.

### 2.4 실험장치의 개략도

MR 실린더에 관한 실험장치의 사진과 개략도를 Fig. 5 및 6에 나타내었다. 압력 센서 (Honeywell, SA05OPG1HD) 및 로드셀(Bongshin, CDES-200)를 이용하여 피스톤 상부의 압력과 피스톤 로드에서 전달

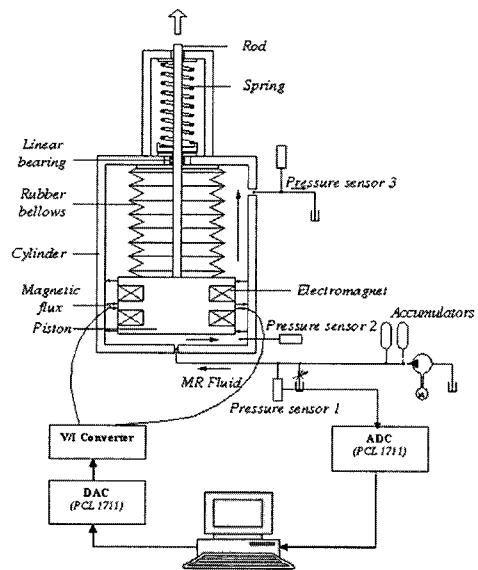


Fig. 5 Experimental setup of MR cylinder

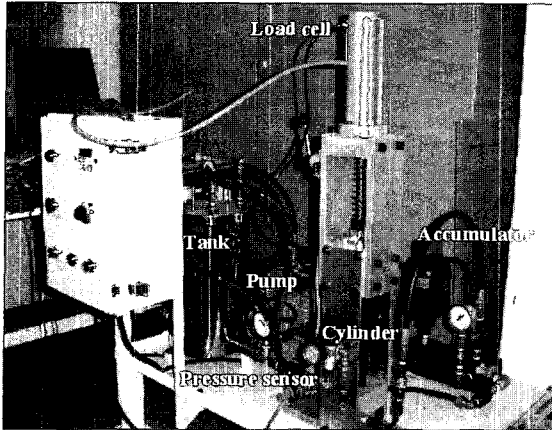


Fig. 6 Photograph of the experimental setup

되는 힘을 측정하였고, 샘플링 타임은 1ms로 설정하였다. 피스톤의 힘을 제어하기 위한 제어실험은 컴퓨터를 이용한 PID 제어 등의 연산 처리를 행하고, 연산된 제어 입력 값은 D/A 변환기 및 V/I 변환기를 통하여 전류로 변환되어 피스톤부의 전자석에 공급된다. 분산입자에 의해 내접기어의 마모가 심하여, 펌프의 수명을 단축시키므로 펌프기어의 마모를 적게 받는 트로코이드 펌프 (주NIPPON 오일 펌프 TOP-204HBVB, 정격 압력 3MPa, 정격 유량 7.2LPM) 를 사용하고 있다. 트로코이드 펌프로부터 토출된 MR 유체는 실린더 하단부의 오리피스를 통해 실린더로 유입된다.

피스톤 양단의 차압에 의한 추력이 스프링의 반력보다 크게 되면, 실린더의 로드가 상승하게 된다. 실험에 사용된 MR 유체는 미국 Lord사의 MRF-122-2ED이다. 이 유체는, 평균 직경 2.7 $\mu$ m의 Mn-Zn계 페라이트 미립자가 질량비 80%로 유체중에 분산된 것이고, 기저 점도는 0.07Pa·s, 밀도는 2.38g/cc로, 이전의 제품과 비교하여 유체의 기저점도가 매우 낮다. 토출 압력의 맥동을 저감하기 위하여 블래더 형의 어큐뮬레이터를 사용하고 있다. 또한 펌프에 내장된 릴리프 밸브와 실린더 입구 측의 스로틀 밸브를 조정하여 펌프의 토출 압력을 조정하고 있다.

### 3. MR 실린더의 특성 실험

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

#### 3.1 정특성 실험

MR 실린더의 전자석에 전류를 입력하고, MR 실린더의 정특성을 측정하여 결과를 Fig. 7에 나타내고

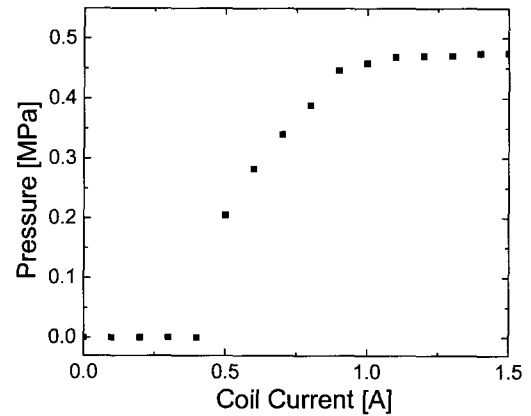
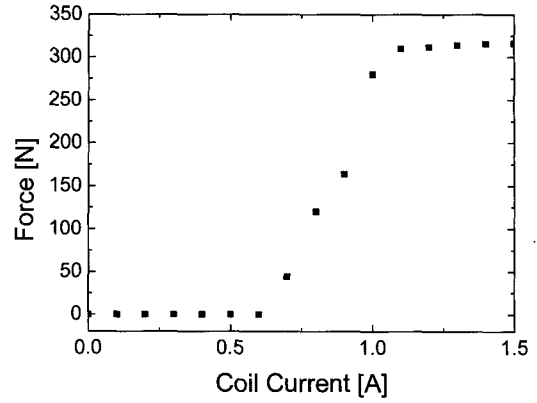


Fig. 7 Static characteristic of MR cylinder

있다. 처음의 그림은 전류에 대한 압력차를, 다음의 그림은 전류에 대한 힘을 각각 나타내고 있다. 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 약 0.46MPa의 압력차와 약 320N의 힘을 발생한다. 두 결과로부터, 제어 범위는 약 0.5A에서 1.0A임을 알 수 있다. 1.0A 이상이 되면, 자기포화가 발생하여 더 이상의 압력차가 발생하지 않으므로 피스톤의 힘도 증가하지 않게 된다.

#### 3.2 동특성 실험

MR 실린더의 전자석에 스텝과 정현파의 전류를 입력하고, MR 실린더의 동특성을 측정하였다. 스텝파는 0.4A에서 0.7A로 입력이 변할 때의 압력과 힘의 변화를 측정하였고, 사인파는 0.6A를 기준으로  $\pm 0.12A$ 의 진폭으로 측정을 행하였다. Fig. 8은 스텝의 입력 전류이고 Fig. 9는 정현파 입력 전류에 대한 동특성실험결과를 각각 나타낸다.

Fig. 8에서 상승시간 및 하강시간은 각각 1.1s, 0.1s로 측정되었다. 실린더 입구포트에 오리피스와 상단

부의 스프링을 설치해 두었기 때문에, 하강시의 응답성과 비교하여 상승시의 응답성이 느린 것을 알 수 있다. 또 Fig. 9의 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 밀봉장치에 의한 마찰에 의해 어느 정도의 시간 지연을 가지고 실린더 힘이 변화하기 시작함을 알 수 있다.

### 3.3 힘제어 실험

제작한 MR 실린더의 서보 액추에이터로서의 가능성을 검토하기 위하여 산업용으로 널리 이용되는 PID 제어기로서 스텝 및 정현파 목표 궤적에 대한 힘 제어 실험을 실시하였다. Fig. 10은 스텝 목표 궤적에 대한 힘 제어 실험 결과를 나타내고 있다. 이 때 PID 제어기의 비례, 적분 및 미분 계인은 목표치에 대하여 1% 이내의 오버슈트 특성이 만족되도록 8, 0.0001 및 0.01로 각각 설정하였다.

Fig. 8의 동특성 실험 결과와 비교해서 볼 때, PID 제어를 적용함으로써 빠른 응답과 1N 이내의 정상상태 오차를 가짐을 알 수 있다. 상승시와 하강시의 응답속도의 차이는 정특성과 마찬가지로 스프링의 반력에 의한 응답특성의 차이라고 여겨진다. 한편 Fig. 11은 정현파 목표 궤적에 대한 힘제어 실험 결과를 나타내고 있다. PID 제어기의 비례, 적분 및 미분 계인은 10, 0.0001 및 0.01로 각각 설정하였다. 대체적으로 목표치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

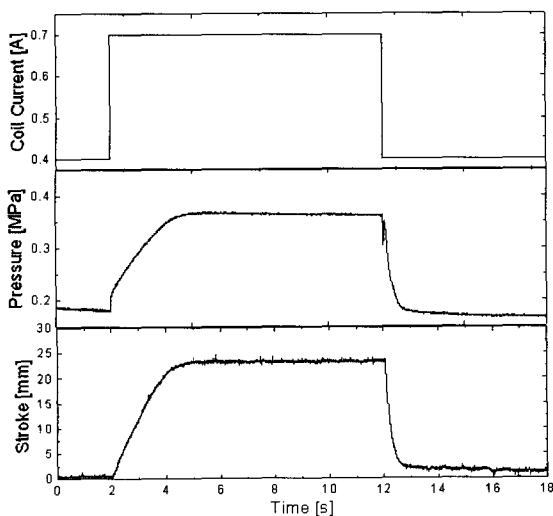


Fig. 8 Step response of MR cylinder

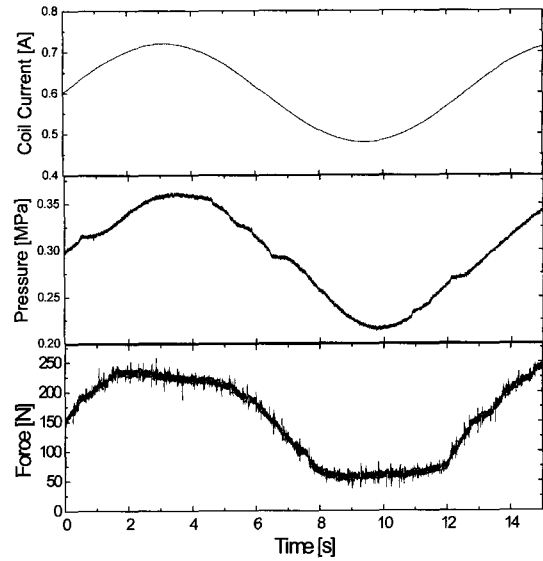


Fig. 9 Sinusoidal response of MR cylinder

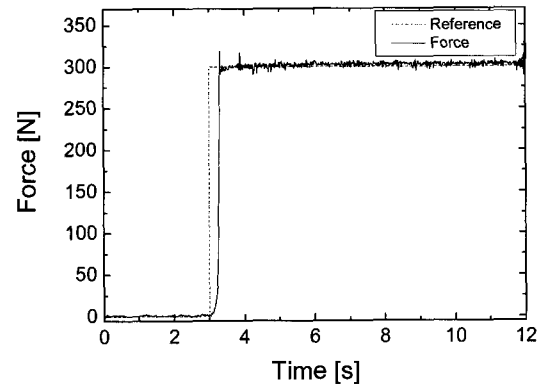


Fig. 10 Experimental result of force control with respect to step reference

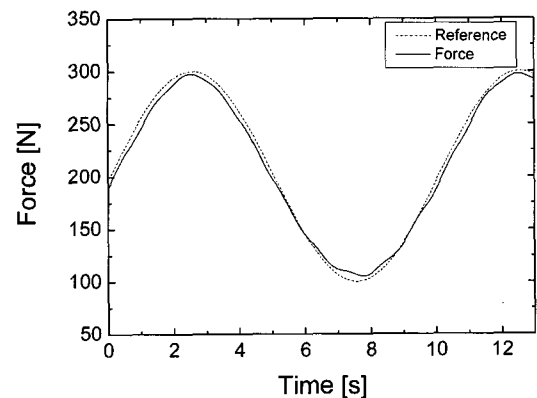


Fig. 11 Experimental result of force control with respect to sinusoidal reference

다만, 정현파의 하강시에 힘이 목표치와 차이가 생기는 이유는 잔류자기에 의한 자기포화 때문이라고 생각되고, 이는 전자석 코어의 재질 및 형상을 바꾸

면 해결될 것으로 추정된다.

## 5. 결 론

MR 유체를 이용한 새로운 서보 액추에이터로서 MR 실린더를 제안하고 설계, 제작을 수행하여 그 특성을 실험적으로 검토하였다. 정특성 실험 결과, 코일에 전류를 1.5A까지 인가하였을 때 0.46MPa의 압력차와 320N의 힘이 발생하였다. MR 실린더의 스텝 응답의 실험 결과, 상승 시간은 1.1s, 하강 시간은 0.1s였다. 그리고 시간지연에 관한 문제를 해결하기 위해, PID 제어를 설계하여, 서보 액추에이터로서의 가능성을 검토하였다. 단순한 PID 제어를 이용함으로써 응답속도의 지연 문제가 해결되었고, 능동 액추에이터로서의 이용 가능성을 실험적으로 확인하였다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- 1) Ahn, Y. K., Morishita, S., "Rheological Property of Smart Fluid and Application Technique", The Korean Fluid Power Systems Society, Vol. 1, No. 1, pp. 40~49, 2004.
- 2) Choi, S. B. and Hong, S. R., "MR유체의 특성과 진동분야에 관한 응용 연구 사례 및 연구 동향", Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 9~19, 2005.
- 3) Yokota, S., Yoshida, K. and Kondoh, Y., "A Pressure Control Valve Using MR Fluid", Proc. Fourth JHPS-ISFP Tokyo'99 vol. 11, pp. 377~380, 1999.
- 4) Kim, J. H., "Design, Fabrication and Modeling of Magneto-Rheological Fluid Based Semi-active Mount", Master Thesis, KAIST, 1996.
- 5) Janocha, H., "Application potential of magnetic field driven new actuators", Sensors and Actuators A 91, pp. 126-132, 2001.
- 6) Lee, B. H., "Design of the Current Feedback Electromagnetic Actuator for Engine Vibration Control", Master Thesis, KAIST, 2003.
- 7) Kwon, S. W., "MR Rotary Brake Development with a Permanent Magnet", Master Thesis, KAIST, 1997.
- 8) Yoshida, K., Takahashi, H., Yokota, S., Kawachi, M. and Edamura, K., "A 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) Yoshida, K., Park, J. H., Yokota, S., Kawachi, M. and Edamura, K., "A 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) Yoshida, K., Soga, T., Yokota, S., Kawachi, M. and Edamura, K., "An MR Cylinder-Driven Manipulator Using Magneto-Rheological Fluid", 8th International Conference on Mechatronics Technology, Nov 8-12, pp189~194, 2004.