

# 미세동작제어를 위한 자기유변유체 구동기의 동적 특성

## Dynamic Characteristics of Magneto-rheological Fluid Actuator for Micro-motion Control

김 평 화\* · 한 철 희\* · 칼루반 수레쉬\* · 박 춘 용\* · 신 철 수\* · 최 승 북†  
Pyunghwa Kim, Chulhee Han, Kaluvan Suresh, Choon-Yong Park,  
Cheol-Soo Shin and Seung-Bok Choi

(Received December 3, 2015 ; Revised July 27, 2016 ; Accepted September 2, 2016)

**Key Words** : Magnetorheological Fluid(자기유변유체), MR Actuator(MR 구동기), Micro-motion(미세동작)

### ABSTRACT

This paper presents dynamic characteristics of a new actuator using magneto-rheological(MR) fluid between two electrode type coils. The concept of the actuator is to strengthen the force due to the magnetic field produced by the electrode-coil for MR fluid. The amount and direction of current input to the electrode-coils decide the characteristics of contraction-mode and extension-mode. For achieving the required actuating displacement and actuating force, the yield stress of the MR fluid between two electrode-coils is precisely changed by the input current. In this work, the MR fluid is operated in squeeze mode. The experimental results shown in this paper depict that it can be applied in the micro-level displacement and vibration control system.

### 기 호 설 명

$t$  : 자기유변유체의 높이  
 $t_c$  : 수축모드에서의 자기유변유체의 높이  
 $t_e$  : 팽창모드에서의 자기유변유체의 높이  
 $F_C$  : 두 전극이 서로 끌어당기는 힘  
 $\mu$  : 자기유변유체의 투자율  
 $s_n$  : 자극의 세기  
 $\Delta t$  : 자기유변유체의 높이 변화량  
 $F_{MR}$  : 압착모드에서 발생한 자기유변유체의 힘  
 $F_G$  : 중력  
 $V$  : 자기유변유체의 체적  
 $\tau_y$  : 자기유변유체의 항복응력

### 1. 서 론

자기유변유체를 사용한 구동기 설계는 자기유변유체가 발견된 이래로 현재까지 도전적인 과제로 남아 있다. 자기유변유체는 가해지는 자기장의 세기에 따라 점성이 변하는 성질을 가진 지능재료이다. 이러한 특성으로 인해 자기유변유체는 에너지를 흡수, 전달하는 분야에서 널리 사용되고 있다. 가장 많이 사용되는 분야는 댐퍼 설계에서 가장 널리 사용되고 있다<sup>(1-5)</sup>. MR 유체를 이용한 MR 댐퍼는 반응동 댐퍼로서, 일반적이 수동형 댐퍼가 갖는 한계점인 가진 주파수의 변화에 대한 대처가 가능하며, 능동 댐퍼가 갖는 단점인 큰 부피와 구조의 복잡함을 해결

† Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University  
E-mail : seungbok@inha.ac.kr  
\* Department of Mechanical Engineering, Inha University

‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

할 수 있기 때문에 최근에 각광 받고 있다.

또한 자기유변유체를 이용한 클러치에 대한 연구도 활발히 진행 되고 있다<sup>(6-8)</sup>. 기존에 사용되던 댐퍼 및 클러치와 비교해 본다면 자기유변유체를 이용한 구동기는 설계가 간단하고 출력성능이 뛰어나며 관성으로 인한 성능저하가 매우 작다는 점에서 우수성을 갖는다<sup>(8,9)</sup>. 이렇듯 자기유변유체는 반응동 제어에 많이 사용되며 많은 연구가 이루어지고 있다.

자기유변유체를 이용하여 구동기를 만들려는 시도는 많은 연구팀에서 시도 되었으나 성공한 사례는 전혀 보고되지 않고 있다. 이는 MR 유체가 팽창하는 효과를 이용하려 하였으나 자기유변유체는 팽창하지 않기 때문이다. 따라서 이 연구에서는 새로운 접근을 통하여 자기유변유체를 활용한 구동기를 제안하였으며, 구동기의 성능 평가를 수행 하였다. 이를 위해 두 개의 코일을 샌드위치형태로 배열하였으며 그사이에는 자기유변유체를 충전 하였다. 두 개의 코일 사이에 위치한 자기유변유체는 상부와 하부에서 발생하는 자기력에 의하여 압착모드로 구동된다. 압착모드는 자기유변유체가 구동력을 가장 크게 발생시키는 모드<sup>(10,11)</sup>로 이동 가능한 두 개의 평행판 사이에 평행판의 표면에 수직방향으로 발생하는 자기장에 의해 발생하는 모드이다. 평행판의 거리가 서로 가까워짐에 따라 발생하는 이 힘은 등면적 압착모드와 등체적 압착모드의 두 가지 모드로 구분된다. 제안된 구동기는 지금까지 연구되지 않은 새로운 형태의 자기유변유체 구동기 형태를 가진다. 이 연구에서는 이와 같이 제안된 자기유변유체를 활용한 구동기에 대한 기본원리와 구성을 설명하고 성능을 평가한다.

## 2. 자기유변유체 구동기

### 2.1 자기유변유체 구동기의 원리

제안된 자기유변유체 구동기는 샌드위치 형태로 배열된 두개의 코일 사이에 위치한 자기유변유체를 이용해 구동력을 발생시킨다. 자기유변유체가 흐르는 것을 막기 위해 자기유변유체를 부드러운 고무 케이스에 주입하고 그 양쪽 면에 코일을 위치시킨다. 이 때 코일은 케이스 상면과 하면에 예폭시 접착제를 이용하여 접착을 시킨다. Fig. 1은 이렇게 구성된 자기유변유체 구동기다. 각각의 코일은 양극과

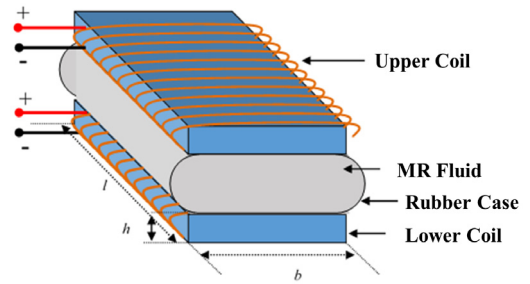


Fig. 1 Schematic diagram of MRF actuator

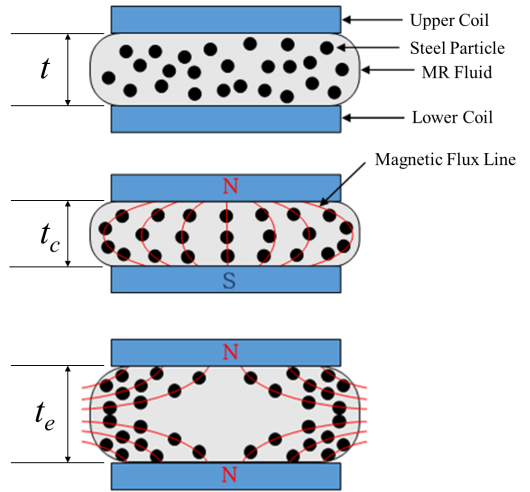


Fig. 2 Actuating mode of MRF actuator

음극의 입력부를 가지고 있으며 입력부에 가하는 극성의 서로 다른 조합을 통해 자기유변유체의 수축과 팽창운동을 유도하여 구동력을 발생시킨다.

전류 입력에 따른 코일의 극성유도와 그에 따른 자기유변유체의 작동방식은 Fig. 2와 같다. 전류 입력 값이 없는 상태에서 자기유변유체 내부의 금속 입자는 유체 내부에 분산된 상태로 존재하며 이 때 초기 자기유변유체의 높이를  $t$ 라 한다. 전류 입력 값이 주어져 한쪽 코일이 N극, 다른 코일이 S극이 유도된 경우 구동기는 수축모드의 움직임을 발생하게 된다. 이 때 발생된 자기장에 의해 자기유변유체 내부 금속 입자는 자기력선을 따라 체인을 형성하게 된다. 이렇게 수축된 상태의 자기유변유체의 높이를  $t_c$ 라 한다. 반대로 전류 입력에 의해 양쪽 코일에 동일한 극이 유도된 경우, 구동기는 팽창모드 움직임을 보인다. 이 경우에도 마찬가지로 발생한 자기장의

**Table 1** Parallel circuit mode

No.	Upper coil		Lower coil		Mode
	+	-	+	-	
1.	1	0	1	0	Contraction
	0	1	0	1	
2.	1	0	0	1	Extension
	0	1	1	0	

\* 1 means current input, and 0 means ground

자기력선에 따라 자기유변유체의 금속입자들은 체인을 형성하게 된다. 이 때 팽창된 자기유변유체의 높이를  $t_e$ 라 한다. 이러한 구동기의 수축모드와 팽창모드는 상판과 하판에 위치한 코일에 주어지는 전류에 따라 결정된다. 이 때 각각의 상판과 하판의 전극은 회로의 구성에 따라 병렬구성과 직렬구성으로 구분될 수 있다. 병렬구성의 경우 상판과 하판의 전극은 독립적으로 전류 입력을 받고 직렬구성의 경우 상판과 하판의 전극을 서로 연결시켜 전류 입력을 받는다. 병렬구성의 전류 입력에 따른 모드는 Table 1과 같고 직렬구성의 전류 입력에 따른 모드는 Table 2와 같다. 상판 코일의 C는 하판 코일의 C에 연결이 된다. 즉 한 개의 선으로 구성이 되는 것이다. Table 1과 Table 2의 결과를 비교해 볼 때, 병렬구성이 직렬구성에 비해 결과가 단순하고 독립적으로 입력되는 전류로 인해 구동력이 더욱 크게 발생하기 때문에 병렬구성이 직렬구성에 비해 더욱 우수하다 판단할 수 있다.

**2.2 자기유변유체 구동기 모델링**

각각의 코일에 의해 발생된 자기장은 자기유변유체의 점성을 변화시킨다. 이 때 발생하는 자기장은 코일에 주어지는 전류의 크기에 따라 결정되므로 전류 입력은 자기유변유체 구동기의 변위뿐 아니라 구동력 또한 결정하게 된다. 두개의 코일 사이에 작용하는 힘은 길버트 모델을 이용해 구할 수 있다<sup>(12,13)</sup>.

$$F_c = \frac{\mu s_1 s_2}{4\pi^2} \tag{1}$$

이 때  $s_1$ 과  $s_2$ 는 자극의 세기를 의미하며 식 (2)와 같은 식으로 얻을 수 있다.

**Table 2** Series circuit mode

No.	Upper coil		Lower coil		Mode
	+	-	+	-	
1.	1	C	0	C	Extension
	0	C	1	C	
2.	C	1	C	0	Extension
	C	0	C	1	
3.	1	C	C	0	Contraction
	0	C	C	1	
4.	C	1	0	C	Contraction
	C	0	1	C	

\* 1, 0, C mean current input, ground, and connected

$$S_i = NI \frac{A}{l} \tag{2}$$

$N$ 은 권선수,  $I$ 는 전류의 세기,  $A$ 는 면적,  $l$ 은 길이를 의미한다. 이 때 작동변위  $\Delta t$ 의 값은 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

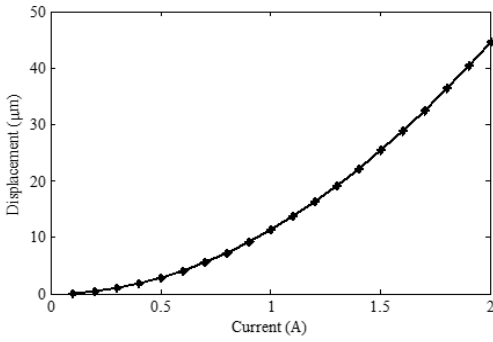
$$\Delta t = \frac{F_c - F_{MR} \pm F_G}{F_G} t \tag{3}$$

이 때  $+F_G$ 는 팽창모드에 작용하는 중력이며  $-F_G$ 는 수축모드에 작용하는 중력이다. 이 때 자기유변유체의 압착모드에 의해 발생하는  $F_{MR}$ 는 다음과 같은 식으로 얻을 수 있다<sup>(14)</sup>.

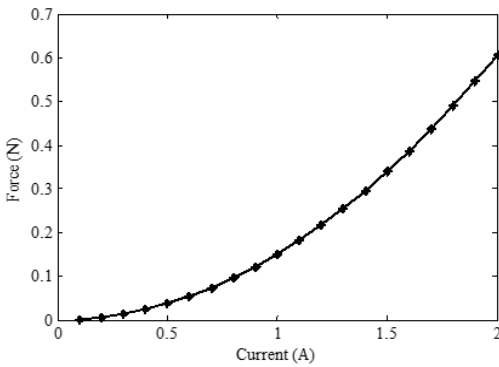
$$F_{MR} = \frac{2\tau_y V^{3/2}}{3\pi^{1/2} t^{5/2}} \tag{4}$$

**2.3 자기유변유체 구동기 시뮬레이션**

2.2에서 제안된 자기유변유체 구동기 모델을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 요구되는 작동 변위를 얻기 위해 두 개의 코일에서 발생하는 자기장의 세기를 식 (1)을 이용하여 계산한다. 각 코일에서 발생하는 자극의 세기는 코일에 가해지는 입력 전류의 크기에 따라 결정되며 이를 통해 힘이 발생한다. 이 때 발생된  $F_c$ 는 식 (3)과 같이 작동변위  $\Delta t$ 를 결정하게 된다. Fig. 3은 전류에 따른 병렬 구성의 작동변위의 시뮬레이션 결과이다. 가진 전류가 커짐에 따라 발생하는 변위가 커짐을 볼 수 있으며,



**Fig. 3** Displacement simulation result with parallel mode



**Fig. 4** Force simulation result with parallel mode

전류에 따른 변위결과가 비선형성을 갖는 것을 볼 수 있다. 최대 변위는 2 A의 전류를 가해 주었을 때 45 µm의 변위를 발생 시켰다. Fig. 4는 식 (4)를 이용하여 인가 전류에 따른 병렬 구성의 발생 구동력을 시뮬레이션 해 보았다. 구동력 또한 변위와 마찬가지로 비선형 성을 갖는 것을 볼 수 있다. 인가 전류의 크기를 0에서 2 A의 범위로 변화시켰을 때 600 mN의 최대 구동력을 발생시키는 것으로 나타났다.

**3. 자기유변유체 구동기의 성능 평가**

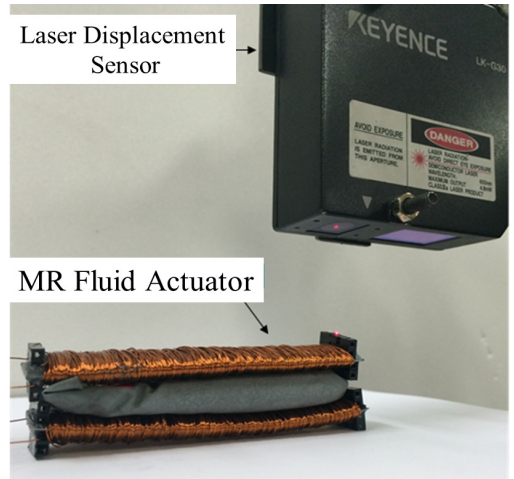
제안된 자기유변유체 구동기에 대한 유효성을 검증하기 위해 자기유변유체 구동기를 제작하였다. 제작된 자기유변유체 구동기의 사양은 Table 3과 같으며 그 형태는 Fig. 5와 같다. 실험적인 검증을 위해 수축모드와 팽창모드에 대한 실험을 수행하였다. 작동변위에 대한 변위측정을 위해 Fig. 6과 같이 장치를

**Table 3** Specification of MRF actuator

Parameter	Value
Thickness of MRF	3 mm
Length of coil	80 mm
Width of coil	20 mm
Height of coil	3 mm
Number of turns	100
Mass of coil	15 g
Magnetic permeability	$1.256 \times 10^{-6} \text{Hm}^{-1}$
Magnetic permeability of steel particle	$2000 \text{Hm}^{-1}$
Viscosity of MRF	0.112 Pa·s

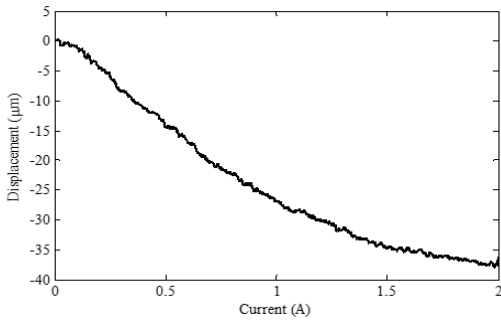


**Fig. 5** Picture of MRF actuator

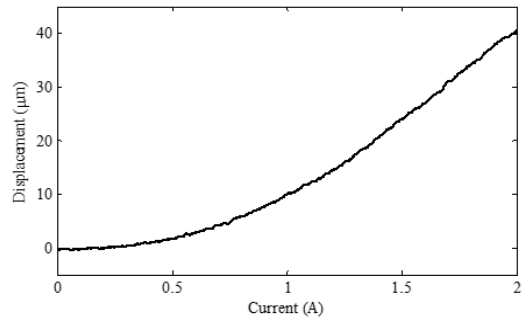


**Fig. 6** Displacement experiment

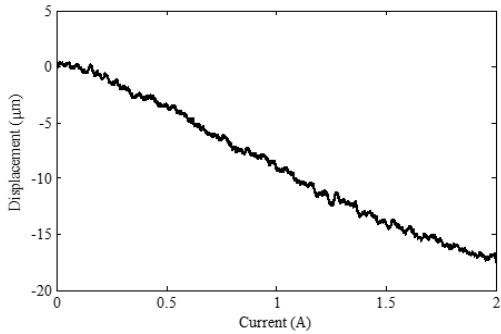
구성하고 값 측정은 레이저 변위 센서(Keyence-G30)를 사용하였다. 수축모드에서의 입출력 특성을 확인하기 위해 전류 입력을 0에서 2 A까지 변화시키며 변위를 측정하였다. Fig. 7은 병렬구성회로의 수축모드 실험 결과를 보여준다. 최대 전류일 때 -37 µm의 변위를 발생시키는 것을 볼 수 있다. Fig. 8은 직렬회로의 수축모드 실험 결과이다. 직렬 회로의 구성



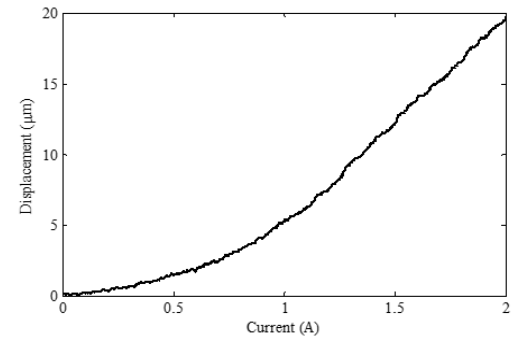
**Fig. 7** Result of displacement with contraction mode of parallel circuit



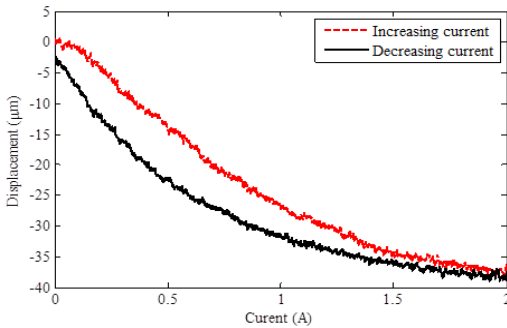
**Fig. 10** Result of displacement with extension mode of parallel circuit



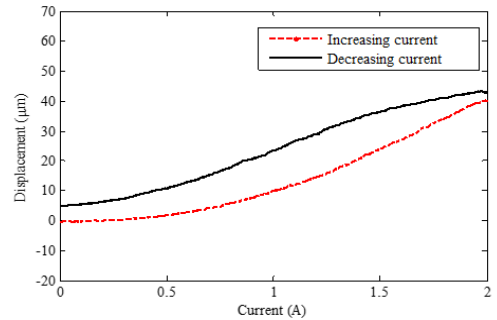
**Fig. 8** Result of displacement with contraction mode of series circuit



**Fig. 11** Result of displacement with extension mode of series circuit



**Fig. 9** Hysteresis of contraction mode of parallel circuit



**Fig. 12** Hysteresis of extension mode of parallel circuit

으로 작동 하였을 때, 최대 인가 전류 2A를 적용하였을 때 최대 변위는  $-17\ \mu\text{m}$ 로서 병렬 회로에 비하여 성능이 현저하게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 앞서 언급한바 대로 병렬구성이 직렬구성에 비해 더 좋은 성능을 보이고 있음을 확인 할 수 있었으며 이를 바탕으로 히스테리시스에 대한 실험을 수행하였다. 실험을 통해 Fig. 9와 같은 결과를 확인할 수

있었고 최대 약 25%의 히스테리시스 현상이 발생함을 확인할 수 있었다. 같은 방식으로 팽창모드에 대한 실험을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 10, Fig. 11과 같다. 연결 모드에 따른 결과는 같은 결과를 갖으며 팽창 모드에서도 병렬 회로에서 발생하는 변위의 크기가 직렬 회로에 비하여 두 배 가량 크며 최대 변위는  $-40\ \mu\text{m}$ 이다. 히스테리시스에 실험 또한

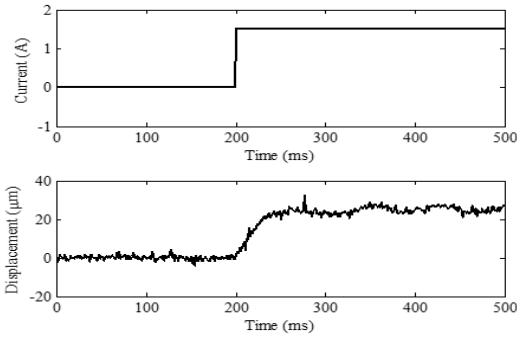


Fig. 13 Step response

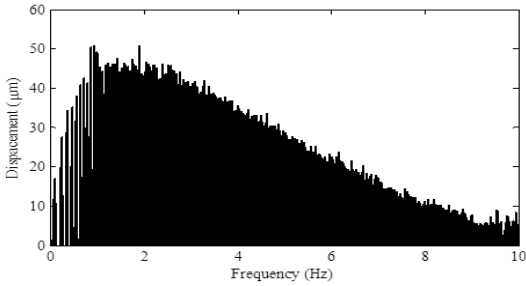


Fig. 14 Frequency response

수축모드와 같은 방식으로 실험 되었으며 결과는 Fig. 12와 같다. 팽창모드의 경우 최대 약 30%의 히스테리시스 현상이 발생하였다. 이후 구동기의 반응성을 확인하기 위해 계단 입력 신호를 통해 그 성능을 확인하였다. Fig. 13은 반응성 실험 결과를 보여준다. 반응 시간은 약 75 ms로 측정되었다. 또한 주파수 응답을 확인하기 위해 정현파 신호를 스위핑하여 Fig. 14의 결과를 확인하였다. 실험은 0에서 10 Hz 조건에서 수행되었으며 약 2.2 Hz의 주파수 대역에서 공진이 발생함을 확인하였다.

또한 해석적으로 얻어진 구동력 해석결과에 대한 유효성을 검증하기 위해 Fig. 15와 같이 포스센서(ATI Nano 25)를 이용해 장치를 구성하였다. 구동력은 전류입력을 0에서 2 A로 증가시키며 팽창모드에서 발생하는 반력을 측정하였다. 구동력의 결과는 Fig. 16과 같고 400 mN의 최대 구동력이 발생함을 확인할 수 있었다.

앞서 측정된 결과와 같이 발생 변위와 구동력에 있어 히스테리시스가 발생되는 것을 확인하였다. 정밀제어 어플리케이션 분야에 사용하기 위해서는 히스테리시스 보상이 필요할 것으로 보여진다.

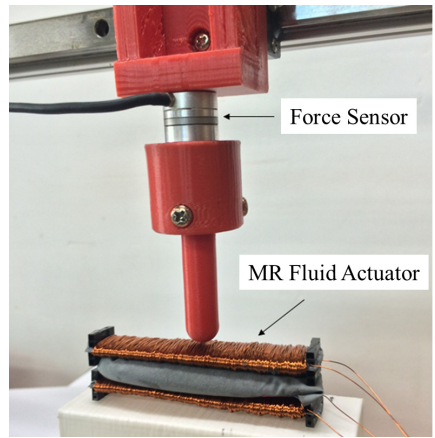


Fig. 15 Actuating force experiment

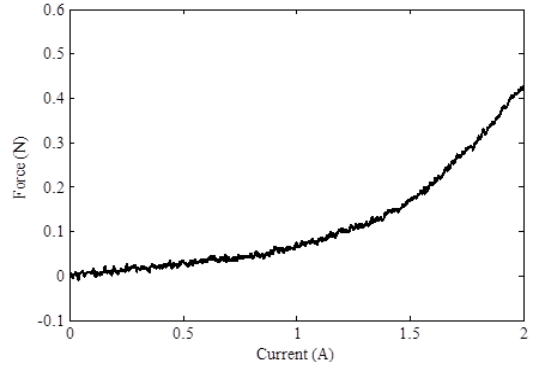


Fig. 16 Result of actuating force

#### 4. 결 론

이 연구에서는 자기유변유체를 이용한 작동기를 제안하고 성능 평가를 진행 하였다. 성능 평가를 하기 위하여 두 개의 상판코일과 하판코일을 이용한 샌드위치 형태의 자기유변유체 구동기를 제작하여 그 작동특성을 확인하였다. 이를 통해 자기유변유체를 이용한 구동기로의 가능성을 확인하였으며 이를 위한 회로의 구성과 그에 따른 성능 또한 평가하였다. 그리고 해석적으로 구동기의 특성을 예측하고 실험을 통해 이를 검증하는 과정에서 구동기가 가지는 입출력 특성을 확인하였다. 이를 통해 제안된 자기유변유체 구동기가 마이크로 수준의 변위 또는 진동을 제어하는 분야에서 유용하게 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 제안된 형태의 구동기를 구성하는 비용이 매우 저렴하기 때문에 이 구동기를

사용할 수 있는 분야는 매우 넓으며 좋은 제어 성능을 나타낼 것이라 보여진다. 그러나 작동기로 사용하기 위해서는 제안된 작동기에 대한 히스테리시스 의 보상이 이루어 져야 할 것이며, 그 밖에도 내구성 등 많은 연구가 필요할 것이다.

## References

(1) Choi, S. B., Lee, S. K. and Park, Y. P., 2001, A Hysteresis Model for the Field-dependent Damping Force of a Magnetorheological Damper, *Journal of Sound and Vibration*, pp. 585~591.

(2) Zhu, X., Jing, X. and Cheng, L., 2012, Magnetorheological Fluid Dampers: A Review on Structure Design and Analysis, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, No. 8, pp. 839~873.

(3) Hong, S. R., Wereley, N. M., Choi, Y. T. and Choi, S. B., 2008, Analytical and Experimental Validation of a Nondimensional Bingham Model for Mixed-mode Magnetorheological Dampers, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 312, No. 3, pp. 399~417.

(4) Choi, S. B., Nam, M. H. and Lee, B. K., 2000, Vibration Control of a MR Seat Damper for Commercial Vehicles, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, No. 12, pp. 936~944.

(5) Ha, S. H., Seong, M. S., Heung Q. N. and Choi, S. B., 2009, Optimal Design of MR Damper : Analytical Method and Finite Element Method, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 11, pp. 581~586.

(6) Klingenberg, D. J., 2001, Magnetorheology: Applications and Challenges, *American Institute of Chemical Engineers, AIChE Journal*, Vol. 47, No. 2, p. 246.

(7) Kim, E. S., Sohn, J. W. and Choi, S. B., 2009. Design and Control of MR Fan Clutch for Automotive Application, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 8, pp. 795~801.

(8) Senkal, D. and Gurocak, H., 2009, Spherical Brake with MR Fluid as Multi Degree of Freedom

Actuator for Haptics, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, No. 18, pp. 2149~2160.

(9) Weiss, K. D. and Carlson, J. D., 1994, A Growing Attraction to Magnetic Fluids, *Machine Design*, Vol. 66, No. 15, pp. 61~64.

(10) Farjoud, A., Cavey, R., Ahmadian, M. and Craft, M., 2009, Magneto-rheological Fluid Behavior in Squeeze Mode, *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 9, pp. 095001.

(11) Kaluvan, S., Shah, K. and Choi, S. B., 2014, A New Resonant based Measurement Method for Squeeze Mode Yield Stress of Magnetorheological Fluids, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 11, pp. 115017.

(12) Griffiths, D. J. and Reed College., 1999, *Introduction to Electrodynamics Vol. 3*, Upper Saddle River, NJ: prentice Hall.

(13) Suresh, K., Uma, G. and Umapathy, M., 2011, A New Resonance-based Method for the Measurement of Nonmagnetic-conducting-sheet Thickness, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, Vol. 60, No. 12, pp. 3892~3897.

(14) Guo, C., Gong, X., Xuan, S., Yan, Q. and Ruan, X., 2013, Squeeze Behavior of Magnetorheological Fluids under Constant Volume and Uniform Magnetic Field, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 4, pp. 045020.



**Seung-Bok Choi** received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Inha University in 1979, M.S. degree and Ph.D. degrees from Michigan State University in 1986 and 1990, respectively. He is currently Dean of the Graduate

School and fellow professor in Inha University. He is a fellow of NAEK (National Academy Engineering of Korea), KAST (The Korean Academy of Science and Technology). His research interests are robust controller design and control of various systems using smart actuators.