

< 논문 >

## MR 유체 작동기의 전자기적 설계 방법

남윤주\* · 문영진\*\* · 박명관† · 이육형\*\*

(2006년 5월 15일 접수, 2006년 7월 26일 심사완료)

### Electromagnetic Design Methodology for MR Fluid Actuator

Yun-Joo Nam, Young-Jin Moon, Myeong-Kwan Park and Yuk-Hyung Lee

**Key Words :** Magneto-Rheological Fluid(자기유변유체), MR Fluid Actuator(MR 유체 작동기)

#### Abstract

This paper presents an electromagnetic design methodology for the magneto-rheological (MR) fluid actuator. In order to improve the performance of the MR fluid actuator, the magnetic circuit including the MR fluid, the ferromagnetic material for flux path and the electromagnetic coil should be well designed, thereby the magnetic field intensity can be effectively supplied to the MR fluid. First of all, in order to improve the static characteristic, the length of the flux path is decreased by removing the unnecessary bulk of the yoke. Next, in order to improve the dynamic and hysteretic characteristics, the magnetic reluctance of the ferromagnetic material is increased by minimizing the cross section through which the flux passes. The effectiveness of the proposed design methodology is verified by the magnetic analysis and a series of basic experiments.

#### 1. 서론

MR(magneto-rheological) 유체는 비전도성 용매에 수 마이크론 크기의 극성 입자를 분산시킨 현탁액(suspension)이다.<sup>(1,2)</sup> MR 유체는 외부에서 부하된 자기장 강도에 따라 수 msec 이내에 유변학적 특성이 연속적이면서 가역적으로 변하는 기능성 유체이다. 이러한 특징 때문에, MR 유체는 충격 흡수장치,<sup>(3,4)</sup> 진동 절연장치<sup>(5,6)</sup> 그리고 브레이크 및 클러치<sup>(7)</sup>와 같은 다양한 장치에 적용되어 왔다.

MR 유체를 이용하는 작동기는 간단한 구조, 높은 출력 및 낮은 관성력을 제공한다. 특히, MR 유체 작동기는 출력을 연속적으로 제어할 수 있을 뿐만 아니라 수동 작동기와 같이 고유의 수동성(passivity property)을 갖기 때문에 인터페이스 장치로서의 제어가능성과 안전성을 동시에 보장한다. 따라서 기존의 제어시스템의 성능을 개선하기 위해서 MR 유체 작동기를 적용하는 것은 매우 효과적이다.

MR 유체에 자기장을 효과적으로 공급하기 위해서는 MR 유체 작동기의 자기회로 설계가 매우 중요하다. MR 유체 자체의 응답시간은 수 msec 이내인데 반해, MR 유체 작동기는 상대적으로 느린 응답시간을 갖는다.<sup>(8)</sup> 이는 MR 유체와 강자성체로 구성된 자기회로의 전자기적 특성과 크게 관계한다. 뿐만 아니라, 강자성체의 자화(magnetization) 특성은 MR 유체 작동기의 비선형 입출력 관계를 초래한다. 따라서, MR 유체 작동기의 응답특성을 향상시키고 비선형 입출력 이력특성을 제거하기 위해서는 전자기적 특성을 고려한 자기회로의 설계가 필수적이다.

회전형 MR 유체 작동기의 설계에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어왔다. 전형적으로 MR 유체는 자기장이 부하되었을 때, Bingham 유체와 유사한 거동을 보인다. 이에 관계된 많은 연구들은 Bingham 거동에 기초한 MR 유체 작동기의 모델식이 비교적 정확하며 실용적임을 입증하였다. 따라서 Bingham 모델을 이용하여 MR 유체 작동기의 주요 설계변수를 결정하려는 연구가 수행되었다. Choi 등<sup>(9)</sup>은 ER(electro-rheological) 및 MR 유체 클러치의 효과적인 성능 비교를 위해 주요 설계 변수에 기초한 무차원 모델식을 유도했으며, 이의 유용성을 실험적으로 입증하였다. Lampe 등<sup>(10)</sup>은 실린더 형과 디스크 형

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

E-mail : mkpark1@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2464 FAX : (051)514-0685

\* 회원, 부산대학교 대학원 지능기계공학과

\*\* 부산대학교 기계기술연구소

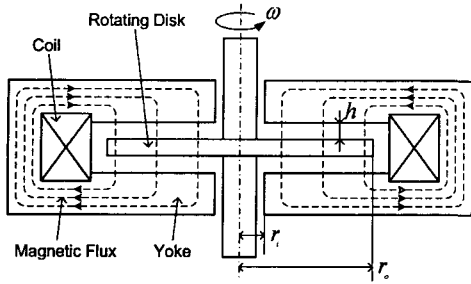


Fig. 1 Operating principle of the MR fluid actuator

MR 유체 클러치의 토크 전달 관계식을 유도하고, 그들의 특성을 이론적으로 비교·평가하였다. 그러나 이러한 연구들은 MR 유체 작동기의 기계적 설계변수를 도출하는데 초점을 맞추고 있기 때문에, 자기회로를 구성하는 전자석 코일, MR 유체 그리고 자로(flux path) 형성을 위한 강자성체의 자기적 특성을 고려하는데 한계를 갖는다. 이를 극복하기 위해, FEM을 이용하여 MR 유체 작동기의 자기장 해석을 수행한 연구들이 보고되고 있다. Lee 등<sup>(11)</sup>은 FEM을 이용한 자기장 해석과 CFD를 이용한 MR 유체 유동 해석을 수행하였고, 이에 기초하여 MR 유체 클러치를 위한 단순화된 수학적 모델을 제안하였다. Bolter와 Janocha<sup>(12)</sup>는 MR 유체 클러치의 주요 설계변수를 결정하기 위해 자기장 해석을 수행하였다. 그러나, 이러한 연구들의 대부분은 자기회로의 자기포화를 회피하기 위해서 또는 정상상태에서의 자기적 특성을 조사하기 위해서 자기장 해석을 수행하였다. 따라서 이들 결과는 자기회로의 설계변수를 해석적으로 제시하지 못하였기 때문에 근본적으로 MR 유체 작동기의 자기회로 설계에 그리 효과적이지 못한다. 최근에, 자기회로의 전자기적 특성에 기초한 MR 작동기의 성능 해석 및 설계에 관한 연구가 수행되었다. Takesue 외 5인<sup>(13)</sup>은 등가 전기회로 이론을 이용한 MR 유체 작동기의 자기회로 설계 방법을 제시하였고, 기초 실험과 자기장 해석을 통해 제안된 방법의 유용성을 입증하였다. An과 Kwon<sup>(8)</sup>은 Hodgdon의 모델을 이용하여 자기회로를 구성하는 강자성체의 자화(magnetization) 특성을 조사하고, 이에 기초한 MR 유체 브레이크의 비선형 입출력·모델식을 제안하였다. 또한, Takesue 외 2인<sup>(14)</sup>은 FEM을 이용한 자기장 해석 결과에 기초하여 MR 유체 작동기의 과도 응답특성에 영향을 주는 두 가지 요인을 조사하고, 개발된 작동기의 성능평가를 통해 제안된 개선 방안의 유용성을 입증하였다. 그러나, 이들 역시 입출력의 비선형성을 제거하기 위한 근본적인 자기회로 설계 방법을 제시하지 못하거나,<sup>(8)</sup> 자기회로의 제한적인 설계 변수만을 도출하는<sup>(13,14)</sup> 한계를 가지고 있다.

따라서, 본 연구의 목적은 MR 유체 작동기의

성능을 개선시키기 위하여 자기회로를 해석적으로 설계하는 것이다. 이를 위해, 자로 형성을 위한 강자성체의 자화 특성 및 자기회로의 전자기학적 특성을 고려하여 자기회로의 설계변수를 정량적으로 도출하였다. 또한, 자기장 해석 및 기초 성능평가를 통하여, 기존의 MR 유체 작동기에 비해 제안된 방법으로 설계된 MR 유체 작동기의 성능이 개선되었음을 확인하였다. 이러한 결과들은, 제안된 자기회로 설계 방법이 MR 유체 작동기를 더욱 다양한 응용장치에 적용하기 위한 기초적 설계 자료로서 유용하게 사용될 수 있음을 보여준다.

## 2. MR 유체 작동기의 기계적 설계

본 연구에서 다루지는 단일 회전 디스크를 갖는 MR 유체 작동기의 작동원리는 Fig. 1에 제시되었다. 여기서 MR 유체는 회전 디스크와 고정된 두 자극(magnetic pole) 사이의 간극에 채워진다. MR 유체 작동기의 자기회로는 MR 유체, 전자석 코일 및 자로 형성을 위한 철심 요크(yoke)로 구성된다. 외부에서 전류가 전자석 코일에 인가되면 이에 대응되는 기자력(magnetomotive force)이 생성되며 이로 인해 자기회로에는 자기장이 부하된다. 부하된 자기장 강도는 MR 유체의 항복 전단응력을 증가시켜 회전 디스크의 운동을 저항하는 방향으로 전단력을 생성한다. MR 유체의 항복 전단응력은 부하되는 자기장의 강도에 따라 변하므로 MR 유체 작동기의 출력 토크는 코일 전류를 조절함으로써 연속적이면서 가역적으로 제어될 수 있다.

MR 유체 작동기의 효과적인 설계를 위하여 다음과 같은 가정들이 소개되었다. (i) MR 유체의 극성입자는 응집 없이 균일하게 분포되어 있다. (ii) MR 유체는 회전 디스크의 전단운동에 대해 미끄럼 없이 선형 속도 분포를 갖는다. (iii) 기계적 마찰력, 유체의 열역학적 거동 및 유체 유동에 의한 관성력은 무시될 수 있다. 그러면, MR 유체의 자기장 의존 특성을 효과적으로 묘사하는 Bingham 모델에 기초하여 MR 유체 작동기의 출력 토크는 다음과 같이 유도될 수 있다.<sup>(15)</sup>

$$T_{out} = T_{MR} + T_{vis} \quad (1)$$

위 식에서 우변의 첫째 항은 부하된 자기장 강도에 대한 MR 유체의 의존 특성 즉, MR 효과에 의한 토크를 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$T_{MR} = 4\pi \operatorname{sgn}(\omega) \int_{r_i}^{r_o} \tau_y(r, H) \cdot r^2 dr \quad (2)$$

여기서  $\omega$  는 회전 디스크의 회전 속도,  $r$  은 회전 디스크의 내부 반경  $r_i$  과 외부 반경  $r_o$  사이의 반경 위치,  $H$  는  $r$  에 부하되는 자기장 강도 그리고  $\tau_y(r, H)$  는  $H$  에 대응하는 MR 유체의

항복 전단응력이다. 특히,  $\tau_y(r)$  는  $r$  에 대한 함수로 주어지며, 이는 사용된 MR 유체의 자기장 강도-항복 전단응력 특성 곡선<sup>(11)</sup>으로부터 얻을 수 있다. 둘째 항은 MR 유체의 점성으로부터 기인되는 점성 토크를 나타내며, 부하된 자기장에 대해 독립적으로 주어진다.

$$T_{vis} = \pi\eta \frac{\omega}{h} (r_o^4 - r_i^4) \quad (3)$$

여기서  $\eta$  는 MR 유체의 절대 점도 그리고  $h$  는 회전 디스크와 자극 사이의 간극이다. 그러나 적용된 MR 유체의 물성치를 고려할 때, 점성 토크  $T_{vis}$  는 MR 효과에 의한 토크  $T_{MR}$  에 비해 상대적으로 매우 작다고 고려될 수 있다. 또한, MR 유체 작동기의 설계치수를 용이하게 얻기 위하여  $\tau_y(r)$  는 상수  $\tau_y$  로 가정한다. 그러면 MR 유체 작동기의 출력 토크는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_{out} \approx \frac{4}{3} \pi \text{sgn}(\omega) \tau_y (r_o^3 - r_i^3) \quad (4)$$

따라서 MR 유체 작동기의 최대 요구 출력토크  $T_{out,max}$  와 사용된 MR 유체의 최대 항복 전단응력  $\tau_{y,max}$  를 위 식에 대입하면,  $r_i$  과  $r_o$  을 적절하게 얻을 수 있다.

### 3. MR 유체 작동기의 전자기적 설계

MR 유체 작동기의 성능을 향상시키기 위해서는 기계적 설계뿐만 아니라 자기회로의 전자기적 설계가 동시에 이뤄져야 한다. 이 장에서는, MR 유체에 자기장을 효과적으로 공급하기 위하여 자기회로의 전자기적 특성과 철심 요크를 위한 강자성체의 자화 특성을 고려한 자기회로의 설계를 수행한다.

자기회로의 설계 목표 중 하나는 MR 유체에 부하되는 자기장 강도를 가능한 증가시키는 것이다. 증가된 자기장 강도는 MR 유체 작동기의 정특성을 향상시키는 효과를 제공한다. 외부로부터 인가된 전류에 의해 자기회로에 생성된 기자력과 자기장 강도 사이의 관계식은 Ampere 의 법칙에 기초하여 다음과 같이 주어진다.

$$NI = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H_f l_f + H_s l_s \quad (5)$$

여기서  $N$  은 전자석 코일의 감은 수,  $I$  는 코일 전류,  $H$  는 자기장 강도, 그리고  $l$  은 자로의 길이를 나타낸다. 하첨자  $f$  와  $s$  는 각각 MR 유체 및 철심 요크와 관계된 상태량을 나타낸다. 기자력은 실제로 이용 가능한 전류전원 공급기의 용량에 의해 제한되며, MR 유체의 자로 길이  $l_f = h$  는 MR 유체 작동기의 요구 출력과 제작의 용이성을 고려하여 한정된다. 또한, 철심 요크 내부의 자기장 강도  $H_s$  는 사용된 강자성체의

자화 특성에 의해 제한된다. 따라서 MR 유체에 공급되는 자기장 강도  $H_f$  를 증가시키기 위해서는 철심 요크의 길이  $l_s$  를 가능한 작게 설계하는 것이 바람직하다.

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

$$\begin{aligned} \varepsilon_{inv} &= -\frac{d\phi}{dt} = -L_s \frac{dI_{eddy}}{dt} = R_s I_{eddy} \quad (6) \\ &\Rightarrow I_{eddy}(t) = I_{eddy,0} \exp(-R_s t / L_s) \\ &\Rightarrow \phi(t) = \phi_0 \exp(-R_s t / L_s) \end{aligned}$$

여기서  $\varepsilon_{inv}$  는 역기전력(counter electromotive force),  $\phi$  는 자기회로를 지나는 자속,  $I_{eddy}$  는 자기회로에 발생하는 와전류(eddy current)이다.  $L_s$  과  $R_s$  은 각각 철심 요크의 자기 인덕턴스(magnetic inductance) 및 자기저항(magnetic reluctance)이며, 철심 요크의 기하학적 형상에 의해 결정된다. 그리고 하첨자  $0$  는 각 상태량에 대한 초기값을 의미한다. 자속  $\phi$  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, 자기 저항(magnetic reluctance)은 다음과 같이 표현된다.

$$R_s = \frac{l_s}{\mu_s S_s} \quad (7)$$

여기서  $\mu_s$  는 자성체의 자기 투자율(magnetic permeability) 그리고  $S_s$  는 자속이 지나는 철심 요크의 단면적이다. 앞서 언급한 바와 같이, 철심 요크의 자로 길이  $l_s$  는 MR 유체에 가능한 큰 자기장 강도를 공급하기 위해 감소시켜야 한다. 따라서 철심 요크의 자기저항을 증가시키기 위해서는 철심요크의 단면적을 줄이는 것이 바람직하다. 또한, 줄어든 단면적은 전도체인 철심 요크의 전기저항을 증가시켜 와전류의 크기를 줄이는 효과를 제공한다.

일반적으로 MR 유체 작동기는 입력 전류와 출력 토크 사이에 비선형적 관계를 갖는다. MR 유체는 자기 이력현상을 거의 갖지 않는 초상자성체이므로, 이러한 비선형성은 주로 철심 요크에 사용되는 강자성체의 자기 이력특성 으로부터 기인된다.<sup>(8)</sup> 따라서 MR 작동기의 성능 향상과 출력 토크의 효과적인 제어를 위해서는 자기회로의 자화 특성

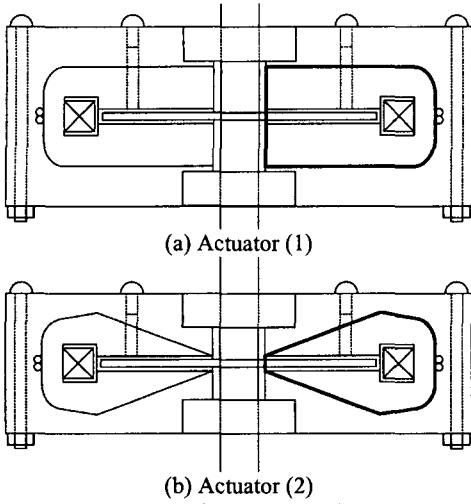


Fig. 2 Schematic configurations of the MR Actuators

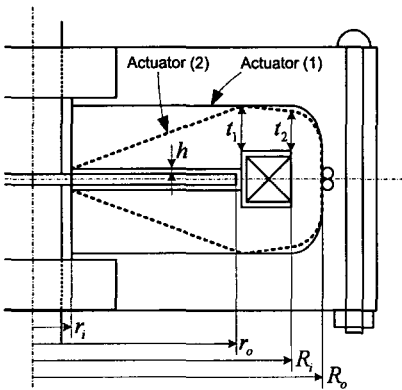


Fig. 3 Design parameters of the MR actuators

을 개선시켜야 한다. 실제로, 강자성체는 자기회로의 개회로(open circuits)로 인해 자화의 반대방향으로 자기장이 형성되는 소자(demagnetization) 특성을 갖는다. 이러한 소자력(demagnetizing field)는 MR 유체에 부하되는 자기장 강도를 저감시킬 뿐만 아니라 강자성체의 자기 이력특성을 악화시키는 원인이 되므로 가능한 감소시키는 것이 바람직하다. 이를 위한 효과적인 방법은 자속이 지나는 단면적에 대한 자로의 길이의 비  $l_s/S_s$  를 증가시키는 것이며,<sup>(16)</sup> 이는 앞서 언급했던 바와 같이 자기저항을 증가시키는 것과 동일한 조건이다. 따라서 철심 요크의 단면적을 가능한 감소시키는 것은 자기회로의 응답특성과 자화 특성을 동시에 개선시키는 효과를 제공한다.

그러나 단면적의 지나친 감소는 철심 요크의 자기 포화(magnetic saturation)를 초래할 수 있으므로 이를 제한하기 위한 구속조건이 요구된다. 이러한 구속조건은 다음에 주어진 Gauss 법칙으로부터 얻어진다.

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS = B_f S_f = B_s S_s \quad (8)$$

여기서  $B_f$  와  $B_s$  는 각각 MR 유체와 철심 요크 내부의 자속밀도를 나타낸다. 그리고  $S_f$  와  $S_s$  는 각각 자극과 철심 요크의 단면적을 나타낸다. MR 유체에 최대 공급 가능한 자속밀도  $B_{f,max}$  는 MR 유체의 최대 항복 전단응력  $\tau_{y,max}$  에 대응하여 결정되며, 철심 요크의 포화 자속밀도  $B_{s,sat}$  는 사용된 강자성체의 자기 특성으로부터 얻을 수 있다. 또한,  $S_f$  는 식 (4)에서 얻어진 결과를 이용하여  $\pi(r_o^2 - r_i^2)$  로 계산될 수 있다. 따라서  $S_s$  의 크기는 MR 유체에 최대 적용 가능한 자기장 강도가 부하되었을 때, 철심 요크가 자기 포화되지 않는 범위에서 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$S_s \geq S_{s,min} = \frac{B_{f,max} S_f}{B_{s,sat}} \quad (9)$$

기존의 많은 연구들이 식 (8)에 기초하여 MR 유체 작동기를 설계했음에도 불구하고 이에 대한 면밀한 분석을 제시하지 못했기 때문에, 위 조건은 자기회로의 설계 과정에서 다소 제한적으로 적용되었다.

물론 자기회로의 설계는 철심 요크를 위한 강자성체의 선정 문제를 포함한다. 이는 재료의 투자율과 자화 특성이 자기회로 성능에 크게 영향을 주기 때문이다. 그러나 이러한 문제는 본 연구의 범위를 벗어나므로 향후 연구 과제로 남겨둔다.

#### 4. MR 유체 작동기의 제작

본 연구에서 제작된 두 종의 MR 유체 작동기의 구조는 Fig. 2에 제시되었다. 이들 중 하나는 기존의 단일 디스크형 MR 유체 작동기와 유사한 형태를 가지며, 다른 하나는 앞서 제시된 설계 방법에 기초하여 제안된 형태이다. 편의상, 본 논문에서는 전자를 'Actuator (1)'로, 후자를 'Actuator (2)'로 명명한다.

두 종의 MR 유체 작동기 사이에는 크게 두 개의 구조적 차이가 존재하며, 이는 제안된 MR 유체 작동기들의 주요 설계변수를 보여주는 Fig. 3으로부터 확연히 알 수 있다. 그 차이 중 하나는 전자석 보빈(bobbin)을 둘러싸는 영역  $r_o \leq r \leq R_o$  에서의 철심 요크 형상이며, 다른 하나는 회전 디스크에 대응하는 영역  $r_i \leq r \leq r_o$  에서의 철심 요크 형상이다. 설계의 편의를 위해, 두 MR 작동기에 대해 공통적인 설계 변수가 먼저 결정되어야 한다. 전자석 보빈의 설계 치수는 사용된 코일의 직경과 코일의 감은 수를 고려하여, 그것의 면적과 둘레의 길이를 작게 하기 위해 가능한 정사각형에 가깝게 선정되었다. 이러한 고려는 앞장에서 제시된

Table 1 Magnetic properties used for designing the MR fluid actuators

Property	Value	Material
$\tau_{y,max}$	38.28 kPa	MRF-132AD for MR fluid <sup>(17)</sup>
$B_{f,max}$	0.676 T	
$H_{f,max}$	150 A/mm	
$\eta_f$	$4.506 \times 10^{-6}$ H/m	
$B_{s,sat}$	1.326 T	SS41 steel for yoke <sup>(8)</sup>
$H_{s,sat}$	1.989 A/mm	
$\eta_s$	$6.667 \times 10^{-4}$ H/m	

Table 2 Design parameters of the MR fluid actuators

Parameters	Symbol	Value
Desired Max. torque	$T_{out,max}$	5.0 Nm
Available Max. Current	$I_{max}$	5.0 A
Gap for MR fluid	$h$	1.0 mm
Coil turn number	$N$	81
Inner radius of disk	$r_i$	8.0 mm
Outer radius of disk	$r_o$	31.7 mm
Inner radius of yoke	$R_i$	42.7 mm
Outer radius of yoke	$R_o$	48.2 mm
Yoke thickness 1	$t_1$	7.7 mm
Yoke thickness 2	$t_2$	5.9 mm
Shaft diameter	-	10.0 mm
Coil diameter	-	0.7 mm

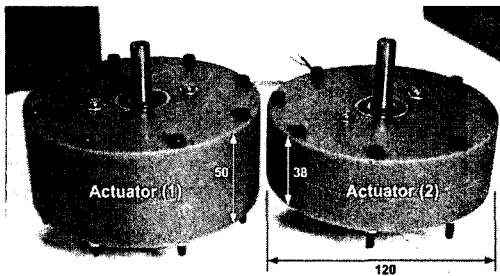


Fig. 4 External appearance of the MR actuators

바와 같이, 철심 요크의 자로 길이  $l_y$ 의 감소에 의해 MR 유체에 부하되는 자기장 강도를 증가시킬 뿐만 아니라 MR 유체 작동기의 부피를 감소시키는 효과를 동시에 갖는다. 한편, 전자석 보빈의 외부를 반경방향으로 둘러싸는 철심 요크의 설계 치수  $R_i$ 와  $R_o$ 는 식 (9)와 사용된 자성체들의 물성치를 이용하여 얻을 수 있다. 본 연구에서 사용된 MR 유체는 Lord corporation에서 조성된 MRF-132AD이며, 철심 요크를 위한 강자성체로는 SS41이 사용되었다. 자성체의 자기 포화를 방지하고 작동기의 선형적인 입출력 관계를 얻기 위해서, 각 자성체의 실제 포화 또는 최대 물성치의 대략 85%에 대응하는 값들이 제안된 MR 유체 작동기의 설계에 이용되었다. 이용된 물성치들은 Table 1에 제시되었다.

다음으로, 두 MR 유체 작동기의 구조적 차이와 관계되는 설계변수들이 결정된다. 본 논문에서 제안된 자기회로의 설계 조건은 다음과 같이 정리된다. (i)포화되지 않는 범위 내에서 자속이 지나는 단면적의 최소화, (ii)자로의 길이를 줄이기 위한 철심 요크의 불필요한 부분 제거. 첫 번째 조건은  $r_o \leq r \leq R_i$ 에 대응하는 철심 요크의 두께  $t(r)$ 의 설계와 관계되며, 이는 식 (9)을 이용하여 다음과 같이 얻어진다.

$$t(r) = \frac{S_{s,min}}{2\pi r} \quad \text{for } r_o \leq r \leq R_i \quad (10)$$

Actuator (1)은 주어진 반경 범위에서 반경의 증가와 관계없이  $t_1 = t(r_o)$ 의 일정한 두께를 갖는 반면, Actuator (2)의 철심 요크 두께는 위 식에 따라 설계되었다. Actuator (1)의 경우, 반경의 증가에 따라 넓어진 철심 요크의 단면적의 자속밀도를 저감시켜 MR 유체 작동기의 성능 저하를 가져올 것으로 예상된다. 두 번째 조건은  $r_i \leq r \leq r_o$ 에 대응하는 철심 요크의 두께 설계와 관계된다. 제안된 MR 유체 작동기가 요구 출력 토크를 갖기 위해서는 식 (9)에 제시된 철심 요크의 단면적에 비해 상대적으로 넓은 크기의 자극이 요구된다. 다시 말해서, MR 유체와 철심 요크의 포화 자속밀도 차이로 인해 발생하는 단면적의 변화는 불가피하다. 그럼에도 불구하고, 단면적의 크기를 가능한 줄이기 위해서 Actuator (2)와 같은 기하학적 형상이 제안되었다. 이러한 형상 변화는 단면적의 완만한 변화를 유도할 뿐만 아니라 자로의 길이를 감소시켜 MR 유체에 부하되는 자기장 강도를 증가시키는데 매우 효과적이다. 아울러, 이는 MR 유체 작동기의 두께 및 무게를 줄이는 데에도 큰 도움을 준다.

앞서 제시된 설계 절차에 따라 얻어진 MR 유체 작동기들의 설계 치수들은 Table 2에 제시되었다. 제작된 작동기들의 외부 형상은 Fig. 4에 제시되었다. 이때, MR 유체 작동기의 구조를 지지하기 위한 외부 케이싱과 전자석 보빈은 비자성체이면서 비전도성 재료인 MC 플라스틱으로 제작되었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 철심 요크의 형상 변화로 인해, MR 유체 작동기의 두께는 12mm 만큼 그리고 중량은 대략 27%만큼 감소되었다. Actuator (2)의 실제 중량은 1.4 kgf이다

## 5. MR 유체 작동기의 자기장 해석

본 연구에서 제안된 설계방법의 유용성을 조사하고, 제작된 MR 유체 작동기의 성능을 예측하기 위해 자기장 해석이 수행되었다. 해석된 영역은 Fig. 2에서 굵은 선으로 표시되었다. Fig. 5는 5 A의 입력 전류에 대한 MR 유체 작동기의 자속밀도 분포를 보여준다. 얻어진 결과로부터, 두 종의 MR 유체 작동기 모두 철심 요크의 실제

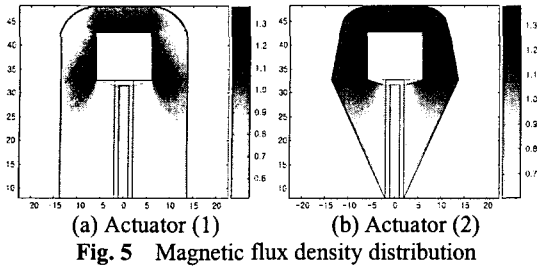


Fig. 5 Magnetic flux density distribution

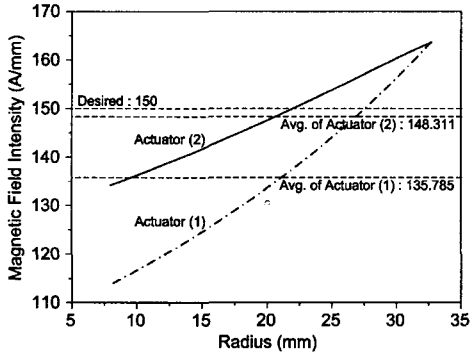


Fig. 6 Magnetic field intensity in radial direction

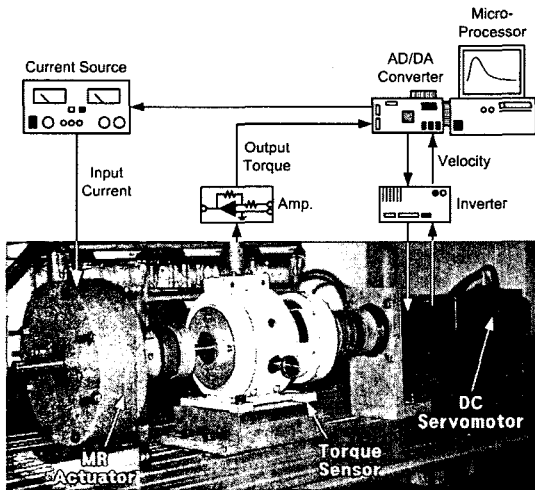
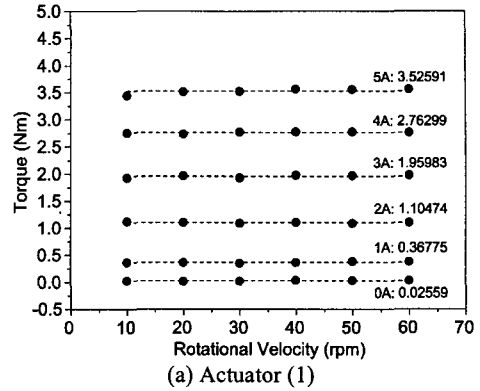
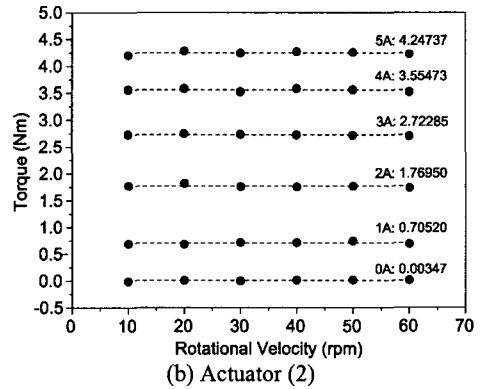


Fig. 7 Experimental apparatus for performance tests

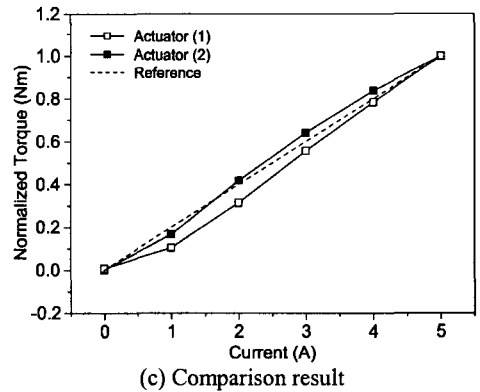
포화 자속밀도인 1.56 T를 증가하지 않았음을 알 수 있다. 또한, Actuator (1)에 비해 Actuator (2)의 자속밀도가 보다 균일하게 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 이는 자기회로의 설계 조건으로 제시되었던 (i)자속이 지나는 단면적의 최소화와 (ii)불필요한 철심 요크의 제거 효과로부터 기인된 것이다. 따라서 Actuator (1)에 비해 Actuator (2)가 보다 향상된 정특성, 동특성 그리고 선형적인 입출력 특성을 제시할 것으로 기대된다. 그리고 식 (2)에서 언급된 바와 같이, MR 유체 작동기의 반경 위치에 대한 함수로 주어지는 자기장 강도  $H(r)$ 는 Fig. 6에 도시되었다. 반경 위치가 증가할



(a) Actuator (1)



(b) Actuator (2)



(c) Comparison result

Fig. 8 Static characteristic

수록 자기장 강도는 증가하는 경향을 보이는데, 이는 전자석 보빈에 가까울수록 보빈을 둘러싸는 자로의 길이가 짧아지기 때문이다. 그럼에도 불구하고, Actuator (1)에 비해, Actuator (2)가 반경에 대한 자기장 강도의 변화가 확연히 작을 뿐만 아니라 그 평균값은 더욱 큼을 알 수 있다. 특히, Actuator (2)의 자기장 강도의 평균값 148.311 A/mm은 설계과정에서 제시된 MR유체의 자기장 강도 150 A/mm에 매우 근사함을 알 수 있다. 이러한 결과는 제안된 자기회로 설계 방법의 유용성을 간접적으로 입증한다.

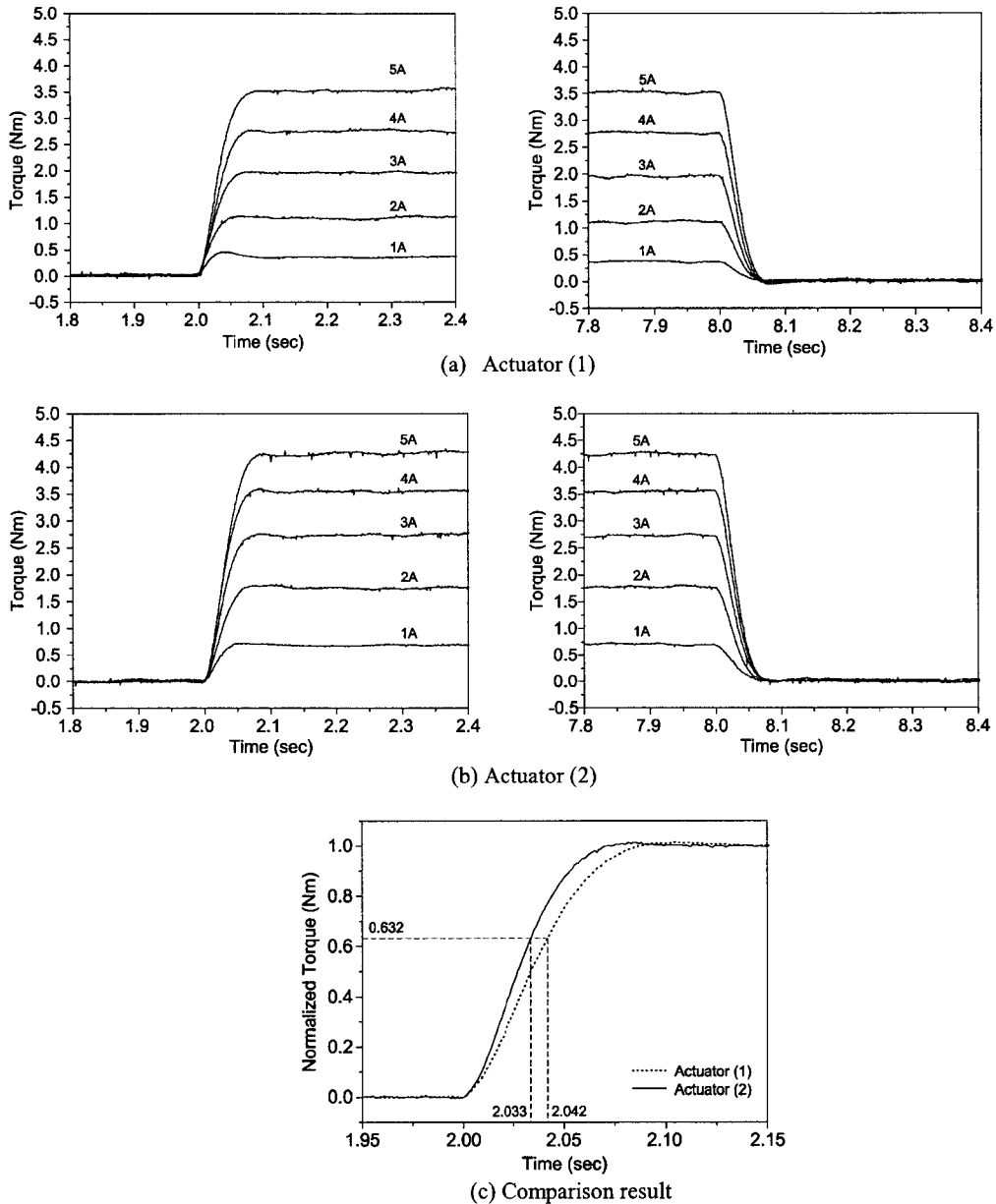


Fig. 9 Step response characteristic

## 6. MR 유체 작동기의 성능 평가

제안된 MR 유체 작동기의 성능을 평가하기 위해 구성된 실험장치의 개략도가 Fig. 7에 도시되었다. MR 유체 작동기는 DC 서보모터에 의해 한방향 일정한 속도로 회전한다. 이때 DC 서보모터의 작동속도는 부하된 외력에 관계없이 항상 일정하게 유지될 수 있도록 인버터에 의해 제어된다. MR 유체 작동기의 입력 전류는 DA 변환기의 전압 신호에 의해 제어 가능한 전류

전원공급기에 의해 조절된다. 그리고 출력 토크는 MR 유체 작동기와 DC 서보모터를 연결하는 토크센서에 의해 측정된다.

### 6.1 정특성

Fig. 8은 다양한 입력 전류에 따른 두 종의 MR 유체 작동기의 회전속도에 대한 출력 토크를 보여준다. 자기장 해석 결과로부터 예상되었던 바와 같이, Actuator (2)가 Actuator(1)에 비해 같은 입력 전류에 대해서 더 큰 출력 토크를 가짐을 알

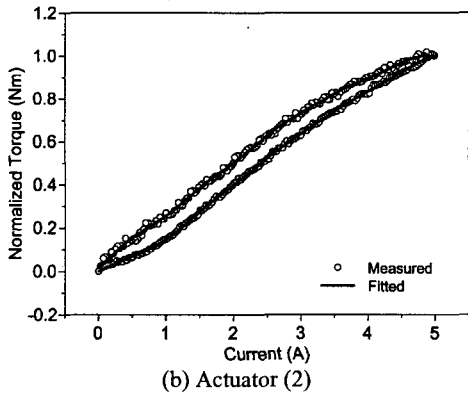
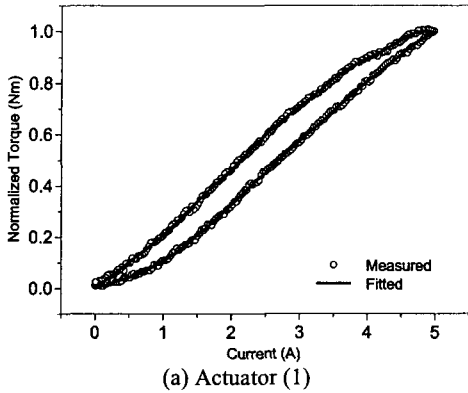


Fig. 10 Hysteresis characteristic

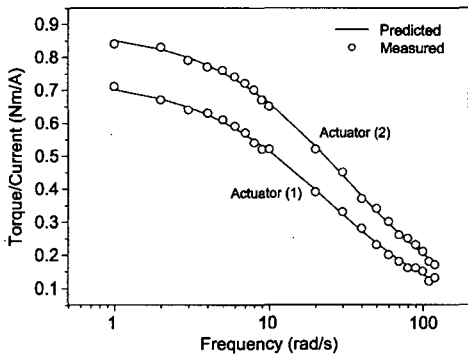


Fig. 11 Frequency response characteristic

수 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 자로 회로의 설계 방법은 MR 유체에 부하되는 자기장 강도를 증가시키는데 유효함이 입증되었다. 또한, 출력 토크는 10 rpm 이상의 회전속도에 거의 무관함을 알 수 있다. 이는 MR 유체 작동기의 기계적 설계 단계에서 소개된 점성 토크  $T_{vis}$  는 MR 효과에 의한 토크  $T_{MR}$  에 비해 상대적으로 매우 작다는 가정이 유효함을 의미한다. 특히, Fig. 8(c)는 입력 전류에 대한 각각의 최대 출력 토크로 정규화된 토크를 보여준다. 이로부터, Actuator (2)가 Actuator (1)에 비해 더욱 선형적인 정상상태 입출력

특성을 가짐을 알 수 있다.

6.2 계단 응답특성

Fig. 9는 제안된 MR 유체 작동기들의 과도응답 특성을 고찰하기 위해 수행된 실험 결과로서, 계단입력 전류에 대한 출력 토크를 보여준다. 적용된 MR 유체 작동기의 회전속도는 50 rpm이다 전 류는 2초가 되는 순간에 인가되었다가 8초가 되는 순간에 제거되었다. 결과에서 알 수 있듯이, 전류 인가 시(up-step)와 전류 제거 시(down-step)의 응답속도는 거의 유사하였으며, 입력 전류 변화에 따른 영향 또한 거의 찾아 볼 수 없었다. 또한, 두 MR 유체 작동기 간의 응답특성 비교 결과가 Fig. 9(c)에 도시되었다. 잘 알려진 바와 같이, 계단입력 전류에 대한 출력 토크는 1차 선형 시스템과 유사한 응답특성을 보였다. 이를 고려하여 얻어진 시상수는 Actuator (1)의 경우 대략 42 msec, Actuator (2)의 경우 대략 33 msec였다 이러한 응답특성의 향상은 자속이 지나는 단면적을 최소화시킨 결과로 고려될 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 자로 회로의 설계 방법은 MR 유체 작동기의 응답특성을 향상시키는데 유효함이 입증되었다.

MR 유체 작동기의 응답특성을 보다 향상시키기 위해 추가로 고려될 수 있는 방법은 회전 디스크의 외부 반경에 대한 내부 반경의 비  $r_i/r_o$  를 0.7~0.99 사이에 두는 것이다.<sup>(18)</sup> 이에 대한 연구는 향후 과제로 남겨둔다.

6.3 이력특성

Fig. 10은 제안된 MR 유체 작동기의 입출력 이력특성을 고찰하기 위해 수행된 실험 결과를 보여준다. 여기서, 효과적인 비교를 위해서 수직 축은 얻어진 최대 출력 토크에 대해 정규화되었다 적용된 MR 유체 작동기의 회전속도는 50 rpm 이다. 전류는 0에서 5A 를 거쳐 다시 0까지 삼각파형으로 변화시켰으며, 그 주기는 10 sec 이다 결과로부터, Actuator (2)가 Actuator (1)에 비해 적은 이력특성을 보임을 알 수 있다. 특히, Actuator (1)과 (2)의 비선형성(nonlinearity)은 각각 14 % 및 10 %로 주어졌다. 이는 철심 요크의 소자력을 감소시키기 위해 단면적을 최소화한 결과로 고려될 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 자기회로의 설계 방법은 MR 유체 작동기의 이력특성을 개선하는데 효과적임이 입증되었다.

6.4 주파수 응답특성

Fig. 11은 제안된 MR 유체 작동기들의 입출력전달함수를 유도하기 위해 수행된 주파수 응답특성 실험 결과를 보여준다. 적용된 MR 유체 작동기의 회전속도는 50 rpm 이며, 전류는



2.0+1.0sin( $\omega t$ ) A 의 정현파로 입력되었다. 1차 선형 시스템에 대한 시뮬레이션으로 얻어진 결과와 실험결과의 비교를 통해서 얻어진 각 MR 유체 작동기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_1(s) = \frac{0.73}{0.042s + 1} \text{ for Actuator (1)} \quad (11)$$

$$G_2(s) = \frac{0.88}{0.033s + 1} \text{ for Actuator (2)} \quad (12)$$

이러한 결과는 실제로 MR 유체 작동기가 이력특성으로 기인되는 비선형 입출력특성을 가짐에도 불구하고, 선형시스템으로 고려될 수 있음을 의미한다. 따라서, 본 논문에서 제안된 MR 유체 작동기들은 실제 토크 제어에서 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

## 7. 결론

본 연구에서는 MR 유체 작동기의 성능을 개선시키기 위한 자기회로의 해석적 설계 방법이 제안되었다. 얻어진 결과는 다음과 같이 정리된다.

(1) 자기회로에서 철심 요크의 불필요한 부분을 제거하여 자로의 길이를 가능한 줄임으로써, MR 유체 작동기의 정특성을 향상시켰다.

(2) 철심 요크의 자기 저항을 증가시키기 위해 자속이 지나가는 단면적을 최소화함으로써 MR 유체 작동기의 응답특성 및 이력특성을 개선시켰다.

(3) 자기장 해석 및 성능평가 실험을 통하여, 기존의 MR 유체 작동기에 비해 제안된 방법으로 설계된 MR 유체 작동기의 성능이 향상되었음을 확인하였다. 따라서, 제안된 MR 유체 작동기를 위한 자로회로 설계 방법의 유효성을 입증하였다.

(4) 제안된 자기회로 설계 방법은 MR 유체 작동기를 더욱 다양한 응용장치에 적용하기 위한 기초적 설계 지식으로 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- (1) Jolly, M. R., Bender, J. W., and Carlson, J. D., 1999, "Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids," *J. of Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 10, pp. 5~13.
- (2) Phule, P., 2001, "Magnetorheological (MR) Fluid: Principles and Applications," *Smart Materials Bulletin*, No. 2, pp. 7~10.
- (3) Mikulowski, G and Holnicki-Szulc, J., 2003, "Adaptive Aircraft Shock Absorbers," *AMAS Workshop on Smart Materials and Structures, SMART'03*, pp. 71~80.
- (4) Norris, J. A. and Ahmadian, M., 2003, "Behavior of

- Magneto-Rheological Fluids Subject to Impact and Shock Loading," *ASME Int. Mech. Eng. Congress & Exposition, IMECE'03*, pp. 1~6.
- (5) Han, Y. M., Nam, M. H., Han, S. S., Lee, H. G., and Choi, S. B., 2002, "Vibration Control Evaluation of a Commercial Vehicle Featuring MR Seat Damper," *J. Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13, pp. 575~579.
- (6) Stelzer, G. J., Schulz, M. J., Kim, J., and Allemagn, J., 2003, "A Magnetorheological Semi-Active Isolator to Reduce and Vibration Transmissibility in Automobiles," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 14, pp. 743~765.
- (7) Li, W. H. and Du, H., 2003, "Design and Experimental Evaluation of a Magnetorheological Brake," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 21, pp. 508~515.
- (8) An, J. and Kwon, D. S., 2003, "Modeling of a Magnetorheological Actuator Including Magnetic Hysteresis," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 14, pp. 541~550.
- (9) Choi, S. B., Hong, S. R., and Cheong, C. C., 1999, "Comparison of Field-Controlled Characteristics Between ER and MR Clutches," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 10, pp. 615~619.
- (10) Lampe, D., Thess, A., and Dotzauer, C., 1998, "MRF Clutch: Design Considerations and Performance," *Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. New Actuators*, pp. 449~452.
- (11) Lee, U., Kim, D., Hur, N., and Jeon, D., 1999, "Design Analysis and Experimental Evaluation of An MR fluid Clutch," *J. of Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 10, pp. 701~707.
- (12) Bolter, R. and Janocha, H., 1997, "Design Rules for MR fluid Actuators in Different Working Modes," *Proc. SPIE Symp. Smart Structures and Materials*, pp. 148~159.
- (13) Takesue, N., Asaoka, H. A., Lin, J., Sakaguchi, M., Zhang, G., and Furusho, J., 2000, "Development and Experiments of Actuator Using MR Fluid," *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pp.1838~1843.
- (14) Takesue, N., Furusho, J., and Kiyota, Y., 2004, "Fast Response MR-Fluid Actuator," *JSME Int., Part C*, Vol. 47, pp. 783~791.
- (15) Kavlicoglu, B. M., Gordaninejad, F., Evrensel, C. A., Cobanoglu, N., Liu, Y., and Fuchs, A., 2002, "A High-Torque Magneto-Rheological Fluid Clutch," *Proc. SPIE Conf. Smart Materials and Structures*, pp. 1~8.
- (16) Iskander, M. F., 1992, *Electromagnetic Fields and Waves*, Prentice Hall.
- (17) Lord Corporation, 2003, "MagnetoRheological Fluid MRF-132AD," Product Bulletin.
- (18) Carlson J. D., Leroy D. F., Holzheimer J. C. et al., 1998, "Controllable Brake," US Patent 5, 842, 547.