

# 로터리 MR댐퍼의 설계

이종석<sup>†</sup>·이지웅<sup>\*</sup>·백운경<sup>\*\*</sup>

## Design of A Rotary MR Damper

Jong Seok Lee, Woon Kyung Baek

**Key Words:** Magneto-rheological Fluids(MR유체), Rotary Magneto-rheological Damper(RMR댐퍼), Torque Performance(토크 성능), Magnetic flux(자속), Electromagnet(전자석)

### Abstract

This paper presents the design study of a rotary MRF(Magneto-Rheological Fluid) damper that can be conveniently used in the joints to control the damping torques. The basic design concept is to determine the geometric design variables allowing the magnetic flux to flow across the same sectional areas under volume constraint condition. The effects of each design variables for generating the torques were investigated by magnetic field analyses.

### 1. 서론

MR(Magneto-rheological)유체는 자기장의 세기에 따라 걸보기 점도가 가역적으로 변화하는 지능형 유체이다. ER(Electro-rheological)유체와 비교하여 높은 항복응력(yield stress)을 나타내는 MR유체는 MR유체 자체뿐만 아니라 MR유체의 특성을 이용한 응용장치의 설계와 제어에 관한 연구가 많은 연구자들의 관심이 되고 있다. 또한, 다양한 분야에서 기존 시스템의 성능을 향상시키기 위해 MR유체를 사용한 응용장치를 적용하는 연구가 수행되어지고 있다.

Jolly 등<sup>(1)</sup>은 MR유체의 유변학적 및 자기적 특성을 기술하고, MR유체를 활용하는 장치에 응용되는 작동모드와 MR유체의 적용 예를 보였다.

Li 등<sup>(2)</sup>은 MR유체를 활용하는 브레이크(brake)를 설계 및 제작하고, 브레이크의 성능을 제작된 시험기를 통해 실험적으로 평가하였다. Lee 등<sup>(3)</sup>은 ANSYS를 사용하여 MR유체의 각 위치에 작용하는 자기장의 세기와 점도 분포를 계산하고, CFD를 사용하여 MR클러치 내부의 유동을 해석함으로써 실험 결과와 근사한 예측을 수행하였다. Yuliang 등<sup>(4)</sup>은 디스크 형 및 드럼 형의 MR클러치에 대해 발생하는 토크식을 유도하고, 디스크 형 MR클러치를 제작하여 MR유체 공급에 따른 토크를 실험을 통해 나타내었다. Nam 등<sup>(5)</sup>은 MR유체 작동기의 성능을 향상시키기 위해 자기회로의 해석적인 설계방법을 제안하고, 설계방법을 통해 제작된 MR유체 작동기의 성능이 우수함을 보였다. Takesue 등<sup>(6-7)</sup>은 MR유체 작동기의 토크 피드백 시스템을 제안하여 실험을 통해 MR유체 작동기의 응답특성을 개선하였다. 또한, MR유체 작동기의 동적특성을 조사하고 응답특성을 개선하기 위해 자기장 해석과 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 회전조인트에서 감쇠토크의 제어가 가능한 RMR(Rotary Magento-rheological)댐퍼를 설계개념 및 방법을 제안하였다.

---

† 비회원, 부경대학교 대학원

E-mail : jsuklee@mail.pknu.ac.kr

TEL : (051)620-1615 FAX : (051)620-1615

\* 부경대학교 대학원

\*\* 부경대학교 기계공학부

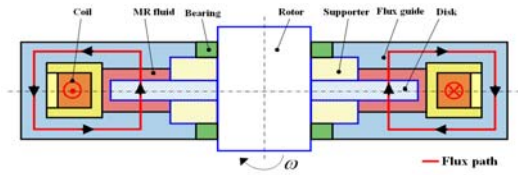


Fig. 1 Sectional view of a RMR Damper

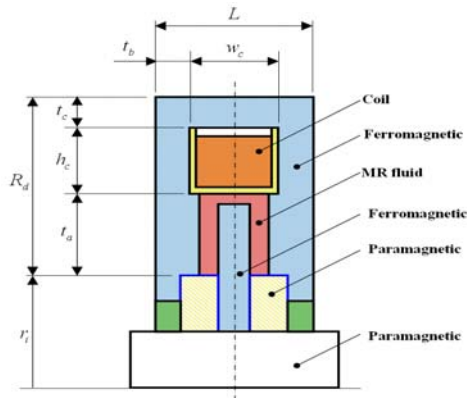


Fig. 2 Material properties and design variables of a RMR Damper

하기 위한 방법을 제안한다. RMR댐퍼의 설계 개념은 코일에 의해 발생한 자속이 동일한 면적을 통과하도록 RMR댐퍼의 설계변수를 결정하는 것이다. 제한된 공간내에 RMR댐퍼를 설계하는 경우에 적용할 수 있는 설계방법을 제시하고, 각 설계변수가 RMR댐퍼에서 발생하는 토크에 미치는 영향을 조사한다. 제안된 방법을 통해 설계할 경우 다양한 적용분야에 쉽고, 빠르게 RMR댐퍼를 설계할 수 있다.

## 2. RMR댐퍼의 구조

### 2.1 디스크형 RMR댐퍼의 형상

본 연구에서 고려하는 단일 디스크를 가지는 RMR댐퍼의 단면도와 각 부품의 명칭을 Fig. 1에 나타내었으며, 설계의 편의를 위해 단순화된 형상을 고려한다.

RMR댐퍼의 토크는 플럭스 가이드(flux guide)와 디스크(disk)사이의 상대 회전운동으로 인하여 발생하며 MR유체의 항복응력의 크기에 따라 토크가 변화한다. MR유체의 항복응력은 코일에서 발생한 자속이 플럭스 가이드를 통해 MR유체로 유도되는 자계강도의 세기를 통해 조절할 수 있

다.

로터(rotor)와 플럭스 가이드는 베어링(bearing)으로 결합되어 로터가 자유롭게 회전 운동을 할 수 있으며, 서포터(supporter)는 디스크의 위치와 MR유체의 공극을 일정하게 유지하기 위해 로터와 결합된다.

### 2.2 부품의 재질과 설계변수

Fig. 2에 RMR댐퍼를 구성하는 부품의 재질을 나타내었다. 자속이 통과하는 플럭스 가이드와 디스크는 강자성체(ferromagnetic material)이며, 자속이 통과하지 않는 서포터와 로터는 상자성체(paramagnetic material)로 상대투자율이 1보다 크지만 1에 매우 가까운 값을 갖는다. 코일은 구리(copper)로서 상대투자율이 1보다 작지만 1에 매우 가까운 값을 가지고 있다. 강자성체는 투자율(permeability)이 상수가 아니고 자계강도에 의존하기 때문에 비선형(nonlinear) 특성을 나타낸다. 또한, 자속밀도와 자계강도의 관계가 닫힌 형태의 곡선으로서 이력곡선(hysteresis curve)을 나타낸다. 강자성체의 상대투자율(relative permeability)이 높을수록 RMR댐퍼의 부피를 줄일 수 있다.

Fig. 2는 RMR댐퍼의 주요 설계변수를 나타내었다. 주요 설계변수는 제약된 공간에서 MR유체로 자속을 최대한 전달시키기 위해 각 치수들의 균형이 필요하다.

Fig. 2에 표기한 설계변수에서  $r_i$ 는 회전 중심으로부터 MR유체가 노출되기 전까지의 반경,  $R_d$ 는 플럭스 가이드의 반경방향 길이,  $L$ 은 RMR댐퍼의 폭이다.  $t_b$ 는 MR유체가 자기장에 노출되는 길이,  $t_b$ 는 반경방향으로 자속이 통과하는 폭,  $t_c$ 는 축방향으로 자속이 통과하는 면적의 폭,  $h_c$ 는 코일의 높이,  $w_c$ 는 코일의 폭이다.

## 3. RMR댐퍼의 토크 식

### 3.1 MR유체의 항복응력

MR유체는 항복응력을 가지는 빙햄(Bingham)유체로서 식 (1)과 나타낼 수 있다.

$$\tau = \tau_y + \tau_\mu = \tau_y(H) + \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서,  $\tau_y$ 는 자계강도의 세기에 의해 결정되는

MR유체의 항복응력,  $\mu$ 는 점성계수,  $\dot{\gamma}$ 는 전단률 (shear rate)이다.

자계강도에 대한 MR유체의 항복응력은 식 (2)와 같이 Carlson의 실험식<sup>(8)</sup> 이용하여 체적비율 (volume fraction)이 0.4인 MR유체의 특성을 사용한다.

$$\begin{aligned} \tau_y &= C271700\phi^{1.5239}\tanh(6.33e^{-6}H) \\ &= \kappa H^\beta \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $C$ 는 기저 유체(carrier fluid)에 따라 결정되는 상수,  $\phi$ 는 체적비율,  $H$ 는 자계강도,  $\kappa$ ,  $\beta$ 는 MR유체의 고유의 특성을 나타내는 상수이다.

Fig. 3은 식 (2)를 사용하여 체적비율이 0.32와 0.4를 가지는 MR유체의 항복응력을 그래프로 나타내었다.

### 3.2 RMR댐퍼의 토크 식의 유도

Fig. 2를 참조하여 MR유체의 항복응력 지배를 받는 디스크 옆면에 미소면적  $dA$ 를 고려하면 전단응력(shear stress)에 의해 미소면적에서 발생하는 힘은 식 (3)과 같다.

$$dF = \tau dA \quad (3)$$

식 (3)에 상응하는 미소토크는 식 (4)와 같다.

$$dT = \tau r dA \quad (4)$$

여기서  $r$ 은 미소면적  $dA$ 에 대한 회전 중심으로부터의 거리이다. 식 (4)의 미소면적  $dA$ 를 극좌표로 변환하면 식 (5)과 같다.

$$dT = \tau r^2 dr d\theta \quad (5)$$

디스크 면 위에 영향을 미치는 토크  $T$ 는 모든 미소토크  $dT$ 의 합으로서 식 (6)와 같다.

$$T = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} \tau \pi^2 dr d\theta \quad (6)$$

식 (6)은 각 디스크 면 위의 MR유체의 항복응력에 의한 토크이다. 그러므로, 양면에서 항복응력이 발생하는 단일 디스크형 RMR댐퍼에서의 총 토크는 식 (7)과 같다.

$$T = 2 \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} \tau \pi^2 dr d\theta \quad (7)$$

축 대칭 문제에 있어서 식 (7)는 식 (8)과 같이 간략화 될 수 있다.

$$T = 4\pi \int_{r_i}^{r_i+t_a} \tau \pi^2 dr \quad (8)$$

토크에 대한 식(8)에서  $r_i$ 와  $t_a$ 는 RMR댐퍼의 설계변수이고,  $\tau$ 는 식 (1)에 의해 주어진다.

식 (8)에 식 (1)을 대입하여 정리하면 식 (9)가 유도된다.

$$T = 4\pi \int_{r_i}^{r_i+t_a} (\tau_y + \tau_\mu) r^2 dr \quad (9)$$

MR유체 공극에서 전단률은 선형적인 속도 분포를 고려하여 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_z}{dy} \approx \frac{v_{z,rotor}}{g} \quad (10)$$

여기서,  $v_{z,rotor}$ 은 로터의 선속도이고  $g$ 는 MR유체 공극의 두께이다.

식 (10)을 식 (9)에 대입하면 토크에 대해서 식 (11)을 유도할 수 있다.

$$T = 4\pi \int_{r_i}^{r_i+t_a} \left( \kappa H^\beta + \mu \frac{v_{z,rotor}}{g} \right) r^2 dr \quad (11)$$

선속도는  $v = wr$ 의 관계에 따라 각속도에 의해 대체되어 질 수 있고 식 (12)와 같이 유도 되어진다.

$$T = 4\pi \int_{r_i}^{r_i+t_a} \left( \kappa H^\beta + \mu \frac{wr}{g} \right) r^2 dr \quad (12)$$

식 (12)는 자계강도  $H$ 와 디스크의 각속도  $w$ 의 함수로써 토크를 표현되었다. 다른 모든 값들은 MR댐퍼의 설계변수( $r_i$ ,  $t_a$ ,  $g$ )와 MR유체( $\kappa$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ )의 특성으로 알려져 있다. 또한, 식 (12)는 점성과

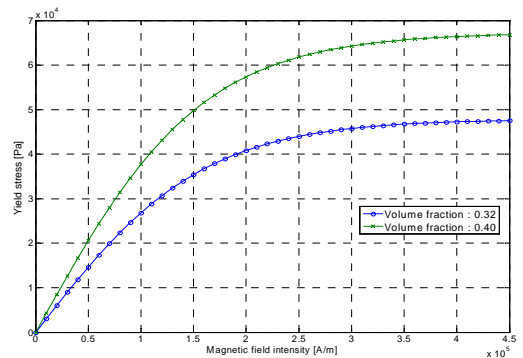


Fig. 3 Yield stress vs. magnetic field intensity curve of MR fluids

자기장에 의한 두 토크  $T_\mu$ 와  $T_\tau$ 로 나뉘 질 수 있다. 식 (13)은 점성에 의한 토크이며 식 (14)는 자기장에 의한 토크이다.

$$T_\mu = 4\pi \int_{r_i}^{r_i+t_a} \mu \frac{wr}{g} r^2 dr \quad (13)$$

$$T_\tau = 4\pi \int_{r_i}^{r_i+t_a} \kappa H^3 r^2 dr \quad (14)$$

식 (12)에서  $\mu, w$  그리고  $g$ 는 적분변수  $r$ 에 독립이기 때문에 식 (15)를 유도할 수 있다.

$$T_\mu = \frac{\pi\mu w}{g} \{(r_i+t_a)^4 - r_i^4\} \quad (15)$$

식 (14)에서  $H$ 가 상수로 가정되면 식 (16)을 얻을 수 있다.

$$T_\tau = \frac{4\pi\kappa H^3}{3} \{(r_i+t_a)^3 - r_i^3\} \quad (16)$$

#### 4. RMR댐퍼의 설계

본 연구에서 제안하는 RMR댐퍼의 설계방법은 제약된 공간내에 RMR댐퍼가 설계되어야 할 경우에 효과적으로 적용할 수 있다. 설계변수  $r_i, R_d, L$ 이 주어지면, RMR댐퍼의 나머지 설계변수가 결정할 수 있는 수식을 유도한다. 설계의 기본 개념은 플릭스 가이드를 통해 MR유체로 유도되는 자속이 동일한 면적을 통과하도록 설계변수를 결정하는 것이다. 플릭스 가이드에서 자속이 통과하는 주요한 단면적은 세부분으로서 설계변수로 표현하면 식 (17)~(19)와 같다. 자속이 통과하는 면적이 같다고 식 (20)과 같이 가정하면  $t_a, t_b, w_c$ 에 대한 수식을 식 (21)~(23)과 같이 유도할 수 있다.

식 (21)은 코일의 높이가 주어지면  $t_a$ 에 2차 방정식 형태로 주어진다.  $t_b$ 는 식 (22)과 같이  $t_a$ 의 함수로 나타낼 수 있으며, 코일의 넓이인  $w_c$ 는 식 (23)와 같이  $t_b$ 가 결정됨으로서 계산할 수 있다.

$$S_1 = \pi \{(r_i+t_a)^2 - r_i^2\} \quad (17)$$

$$S_2 = \pi \{(r_i+R_d)^2 - (r_i+t_a+h_c)^2\} \quad (18)$$

$$S_3 = 2\pi (r_i+t_a)t_b \quad (19)$$

$$S_1 = S_2 = S_3 \quad (20)$$

$$t_a^2 + r_i t_a + (r_i + h_c)t_a = \frac{1}{2} \{(r_i + R_d)^2 - (r_i + h_c)^2\} \quad (21)$$

$$t_b = \frac{(t_a^2 + 2r_i t_a)}{2(r_i + t_a)} \quad (22)$$

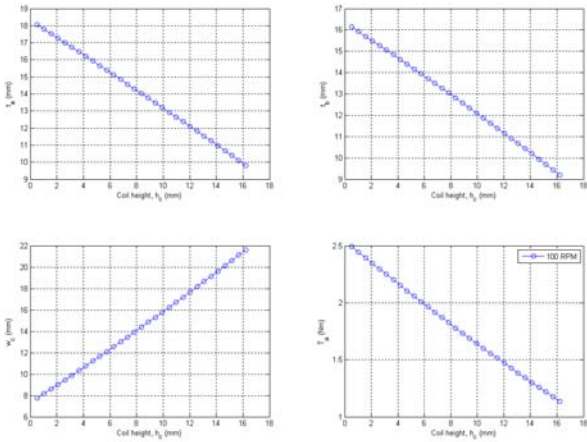
$$w_c = L - 2t_b \quad (23)$$

#### 5. 설계변수 변화에 따른 RMR댐퍼의 토크 예측

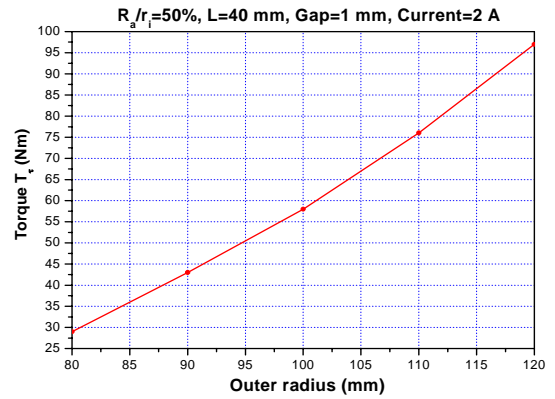
본 연구에서 고려하는 RMR댐퍼의 최대반경은 100 mm이며, 폭은 40 mm이다. 코일높이에 대한 설계변수의 변화를 조사하기 위해  $R_d/r_i$ 의 비가 0.5로 가정하였다. RMR댐퍼의 주요 설계변수를 코일높이 함수로 나타내었고 코일높이에 따라 설계변수를 계산하고, 이에 따른 토크예측 결과를 나타내었다.

##### 5.1 코일의 높이에 따른 변화

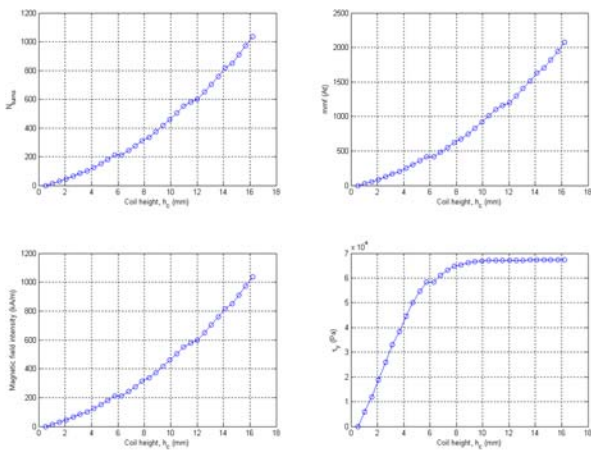
Fig. 4에 나타난  $t_a$ 는 코일높이가 높아질수록 줄어든다.  $t_b$ 는 식 (22)에 따라  $t_a$ 에 따라 결정된다. 코일의 폭  $w_c$ 는 식 (23)에 따라  $t_b$ 에 의존한다. 점성에 의한 토크는 코일높이의 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 5에 나타난 권선수는 코일높이와 폭이 결정되면 계산할 수 있으며, 권선수와 최대전류를 곱하면 기자력을 얻을 수 있다. 또한, 기자력을 MR유체의 공극 길이로 나누면 MR유체에서 발생하는 자계강도를 근사적으로 계산할 수 있다. MR유체에서 발생하는 자계강도의 세기에 따라 식 (2)를 통해 항복응력을 구할 수 있다. Fig. 6은 코일높이에 따라 자기장에 의한 토크를 나타내었다. 코일높이에 따라 토크의 변화를 확인할 수 있으며 특정 코일높이에서 가장 큰 토크를 나타내는 것을 알 수 있다.



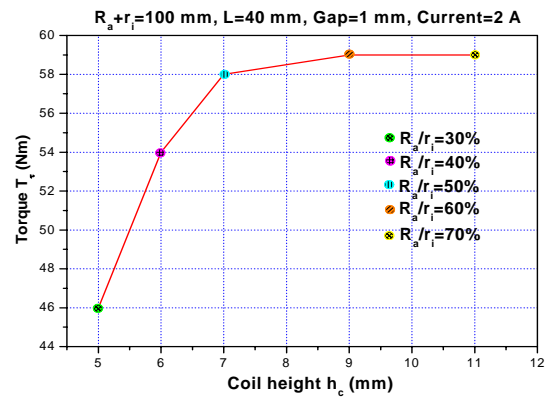
**Fig. 4** Variation of design variables and viscous torque



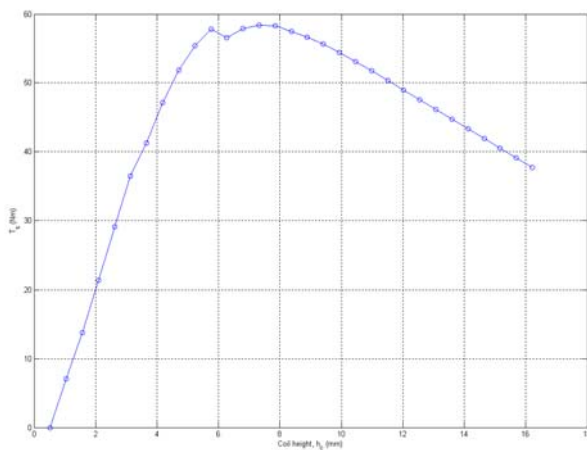
**Fig. 7** Outer radius vs. torque



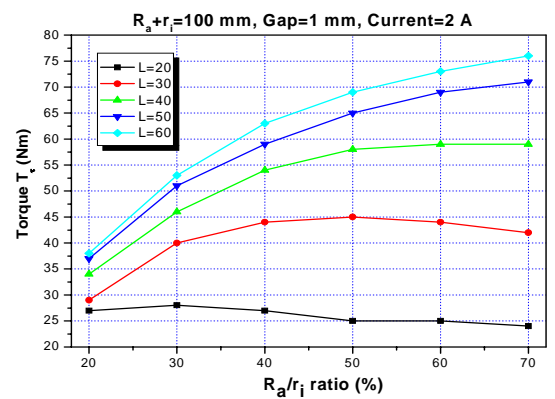
**Fig. 5** Variation of number of turns, magneto-motive force, magnetic field intensity and yield stress



**Fig. 8** Coil height vs. torque



**Fig. 6** Variation of magnetic torque



**Fig. 9**  $R_a/r_i$  vs. torque

## 5.2 주요 제한조건의 변화

가장 주요한 제한조건은 RMR댐퍼의 반경과 폭이다. 이는 부품의 중량과 성능에 직접 영향을 주기 때문이다. Fig. 7~9는 제약조건을 변화했을 때 RMR의 댐퍼의 토크변화를 조사하였다.

Fig. 7은 RMR댐퍼의 반경을 증가시켰을 때 토크변화를 나타내었다. RMR댐퍼의 반경을 증가시키면 주어진 형상에 의해 자기장에 노출되는 길이인  $t_a$ 의 면적이 넓어지므로 토크가 증가한다. Fig. 8은 코일의 높이에 따라 최대토크를  $R_d/r_i$ 의 비에 따라 나타내었다.  $R_d/r_i$ 는 0.5~0.6, 코일높이는 7~9 mm일 때 RMR댐퍼의 토크는 58~59 Nm이다. Fig. 9는  $R_d/r_i$ 의 비에 따른 토크를 RMR댐퍼의 폭에 따라 나타내었다.

## 5. 결론

본 연구는 회전조인트에서 감쇠토크의 제어가 가능한 RMR(Rotary Magento-rheological)댐퍼를 설계하기 위한 개념 및 방법을 제안하였다. RMR댐퍼의 설계 개념은 코일에 의해 발생한 자속이 동일한 면적을 통과하도록 RMR댐퍼의 설계변수를 결정하는 것이다. 특히, 제한된 공간내에 RMR댐퍼를 설계하는 경우에 RMR댐퍼의 설계변수를 코일의 높이의 함수로 유도하여, 코일의 높이가 결정되면 나머지 설계변수가 결정되도록 하였다. 또한, 코일의 높이에 따라 각 설계변수의 변화와 각 설계변수가 로터리 MR댐퍼에서 발생하는 토크에 미치는 영향을 해석하였다. 본 연구에서 제안된 설계방법은 RMR댐퍼의 초기설계 단계에서 설계 자료로서 다양한 용도로 응용될 수 있을 것이다.

## 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) 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.

- (3) Woosub Lee, Taegun Kim, Namkun Hur and Doyoung Jeon, 2000, "Design Analysis and Experimental Evaluation of An MR fluid Clutch," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 24, No. 8, pp. 2143~2150.
- (4) Shen Yuliang, Yang Shaopu, Pan Cunzhi, 2005, "Experimental Research of Magneto-rheological Fluid Clutch," xxxxx
- (5) Yunjoo Nam, Youngjin Moon, Myeongkwan Park and Yukhyung Lee, "Electromagnetic Design Methodology for MR Fluid Actuator," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 10, pp. 1305~1313.
- (6) Takesue, N., Furusho, J. and Sakaguchi, M., 2001, "Improvement of Response Properties of MR-Fluid Actuator by Torque Feedback Control," *Proc. 2001 IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, pp. 3825~3830.
- (7) Takesue, N., Furusho, J. and Kiyota, Y., 2003, "Analytic and Experimental Study on Fast Response MR-Fluid Actuator," *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, pp. 202~207.
- (8) Carlson, J. David, 2005, "MR Fluids and Device in the Real World", *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 19, No. 7, 8 & 9, pp. 1463~1470.