

공작기계 적용을 위한 MR 클러치 설계

김옥현[#]

Design of a Magneto-Rheological Fluid Clutch for Machine Tool Application

Ock Hyun Kim[#]

(Received 11 March 2009; received in revised form 26 March 2009; accepted 28 March 2009)

ABSTRACT

Magneto-Rheological(MR) fluid composes of a base fluid and ferromagnetic particles less than tens of micrometer size dispersed in the fluid. It is called as a smart material because its rheological properties are changable by a magnetic field. Its important applications are active devices such as controllable dampers and controllable clutches. The merit of those products is that their functional characteristics are controllable such that they enable active control strategies. This paper proposes an idea for machine tool applications of the MR fluid clutch as a safety device for power transmission. FEM has been used for magnetic field analyses and the results are compared with some former experiments. Some design syntheses of the MR clutches are suggested and hopefully considered that it may be an effective safety device for power transmission of machine tools.

Key Words : MR fluid(자성유체), Clutch(클러치), Machine tool(공작기계), Power transmission(동력전달), FEM (유한요소법), Magnetic field(자장)

1. 서 론

자기유변유체는 매우 작은 강자성체 입자를 물이나 오일에 분포시킨 유체이다. 자기유변유체에 자장이 걸리지 않을 때에는 유체 안에 분포되어 있는 강자성체입자가 유체 안에 불규칙적으로 분포하며 자유롭게 움직일 수 있으나, 자장을 걸어주

면 입자들이 규칙적으로 배열하게 되어 유체의 항복전단강도가 증가하게 된다. 즉, 자기유변유체는 자장을 이용하여 유체의 특성을 변화시킬 수 있는 특징을 갖는다. 이와 같은 제어 가능한 유체라는 특징으로부터 자기유변유체는 고유한 응용분야를 갖는다.

현재 주요 응용분야는 진동억제용 댐퍼^[1,5], 동력 전달용 클러치^[2,3], 회전축 씰링(sealing)이다^[4]. 자기유변유체에 들어가는 강자성체입자는 3산화철(Fe_3O_4)이 주요성분을 이루며 기타 목적에 따라 산화망간(manganese oxide)과 아연산화물(zinc oxide) 등이 첨가된다. 댐퍼나 클러치용에 사용되

[#] 교신저자 : 충북대학교 기계공학부
E-mail : ohkim@chungbuk.ac.kr

는 자기유변유체의 입자 크기는 수십 마이크로 정도이며 쉘링용으로는 10 나노미터 정도의 입자크기가 사용된다. 유체로는 물, 실리콘오일 등 점성이 낮은 유체가 댄퍼용 또는 클러치용으로 사용되며, 퍼플로리에테르(perfluoropolyether) 등 점성이 크고 증발이 작은 불활성유체가 쉘링용으로 사용된다. 자기유변유체처럼 유체의 특성을 변화시킬 수 있는 유체로서 전기유변(Electro-Rheological) 유체가 있다. 이것은 유체에 전기장을 걸어줌으로써 유체의 특성을 변화시키는 것으로 자기유변유체에 비해 큰 부하를 전달하기에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다.^[7]

공작기계에서 자기진단기능과 페일세이프(fail-safe) 기능은 매우 중요한 연구 테마가 되고 있다. 자기유변유체 클러치는 자기유변유체를 매개체로 동력전달을 단속한다. 자기유변유체 클러치는 자기유변유체에 가해지는 자장의 세기를 제어함으로써 전달 가능한 토오크의 크기를 제어할 수 있다. 즉, 기존의 마찰클러치 등과 같은 패시브(passive)장치에 비해 작업조건에 따라 쉽게 허용 전달토오크를 조정할 수 있는 장점을 갖는다.

본 연구는 이와 같은 특성을 갖는 자기유변유체 클러치를 공작기계 동력전달 계통의 안전장치로서 사용하는 것을 제안한다. 자기유변유체 클러치를 공작기계의 동력전달 계통에 설치하고 원하는 허용전달 토오크를 갖도록 자장을 걸어줌으로써 공구의 절손, 이물질 개입 등 돌발 상황 발생시 공작기계에 과부하가 걸리지 않도록 보호할 수 있게 된다. 이와 같은 목적의 자기유변유체 클러치의 구조를 제시하였으며, 기초설계의 과정과 방법을 제시하였다.

2. 자기유변유체 클러치의 구조

자기유변유체 클러치는 Fig. 1에 보인바와 같이 내축(inner shaft)에는 원판 디스크가 고정된다. 클러치는 회전축에 대하여 축대칭이므로 편의상 Fig. 1에는 반만을 표시하였다. 원판은 자기유변유체가 채워진 하우징의 내부 공간에 설치되고

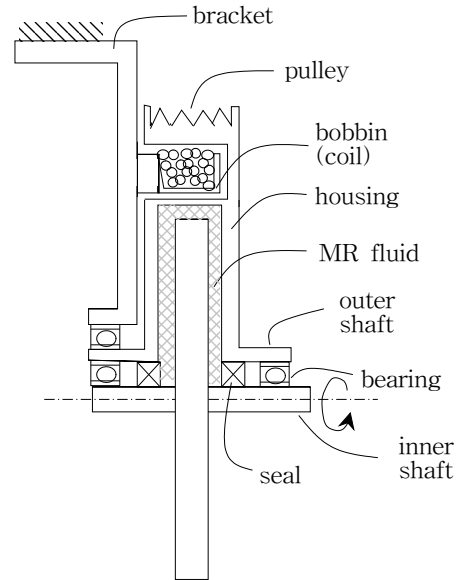


Fig. 1 Schematic of a MR clutch

원판 디스크는 자기유변유체와 접촉하며 회전한다. 하우징은 내축과 마찰이 작은 씰(seal)과 베어링으로 연결된다. 자기유변유체가 충전된 하우징 내부공간에 자장을 걸어주기 위하여 하우징의 측면에 원호를 따라 구루부가 형성되고 구루부에는 전선을 감은 보빈(코일)이 설치된다. 보빈은 하우징과 충분히 작은 틈새를 가지어 서로 접촉하지 않는다. 보빈은 외축(outer shaft)에 베어링으로 연결되는 브라켓트에 고정되며 브라켓트는 공작기계의 프레임(frame)에 고정된다. 이렇게 함으로써 보빈은 하우징이나 내축의 회전과 관계없이 공간상에 고정되므로 어려움 없이 코일에 전력을 공급할 수 있다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 하우징 외경부를 벨트 구동을 위한 풀리(pulley)로 하여 하우징을 구동 하고 내축을 중동축으로 하여 사용할 수 있다. 이때 코일에 전류를 공급하지 않으면 자기유변유체에 자장이 형성되지 않아 내축은 하우징과 헛돌게 되어 동력을 전달하지 못하게 된다. 코일에 전류를 증가시키면 자기유변유체에 자장이 걸리게 되고 자기유변유체의 항복전단강도가 증가하게 되어 내축의 허용 회전 토오크가 증가하게 된다. 즉 코일에 흐르는 전류를 조정함으로써 내축의 전달 토오크를

조정할 수 있게 된다. 내축이 원하는 허용 전달 토크를 갖도록 코일에 전류를 부가하면 내축에 허용 토크 이상의 부하가 걸릴 때 내축의 원판 디스크는 자기유변유체 내에서 미끄러지게 되어 구동축에 과부하가 걸리지 않게 된다. 이와 같은 원리에 의해 자기유변유체 클러치는 동력전달 계통의 안전장치로 기능하게 된다. 물론 상술한 벨트 구동 대신에 내축 또는 외축을 구동축으로 하고 다른 한 축을 종동축으로 하여 사용하여도 동일한 효과를 얻을 수 있다.

3. 자기유변유체 클러치 설계

자기유변유체 클러치에 사용하기 위한 자기유변유체의 바람직한 특성은 포화자화가 크고 자장의 세기에 따라 변하는 항복전단강도의 범위가 큰 것이다. 그래야 제어할 수 있는 전달 토크의 범위가 크게 되므로 바람직하다. 또한 보빈의 코일에 전류가 흐를 때 자료가 되는 재료는 포화자화가 크고, 코일 전류의 차단 시 잔류자기 가 작을 것이 요구된다. 자기유변유체 클러치와 가변 댐퍼에 사용되는 자기유변유체는 미국의 Lord 사의 제품이 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 Table 1과 같은 규격의 Lord 사가 클러치

용으로 추천하고 있는 자기유변유체를 사용하는 것으로 하여 설계한다^[2].

하우징과 원판디스크의 재료는 Table 1에 보인바와 같은 SS41 강재를 사용하는 것으로 한다. 또한 Table 2와 같이 기초설계 값을 정한다. 이 데이터들은 본 설계의 결과를 참고문헌[2]의 실험결과와 비교하기 위하여 동일한 값을 채택하였다. 자기유변유체 클러치는 코일에 최대전류 5A를 흘렸을 때 자기유변유체에는 Table 1에서 보인 최대 자속밀도 $B_{f,max}$ 를 초과하지 않고 근접하도록 설계되어야 하며 자로를 이루는 강재도 Table 1의 포화자속밀도 $B_{s,sat}$ 를 초과하지 않고 근접하도록 설계되어야 한다.

자속의 분포, 자속밀도의 크기 등의 자장해석을 위하여 FEM을 사용하였다. 이를 위해 Fig. 2에 보인 바와 같은 단순화 시킨 자장해석 모델을 설정하였다. 이 그림을 참조하여 자장해석을 위한 기본 식들을 살펴보자

가우스식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} ds = B_f S_f = B_s S_s \quad (1)$$

Table 1 Properties for designing a MR clutch^[2]

Property	Value	Material
Yield shear stress, $\tau_{y,max}$	38.28 kPa	MR fluid MRF-132AD
Magnetic flux density, $B_{f,max}$	0.676 T	
Magnetic field strength, $H_{f,max}$	150 A/mm	
Permeability, μ_f	4.506×10^{-6} H/m	
$B_{s,sat}$	1.362 T	SS41 steel
$H_{s,sat}$	1.989 A/mm	
μ_s	6.667×10^{-4} H/m	

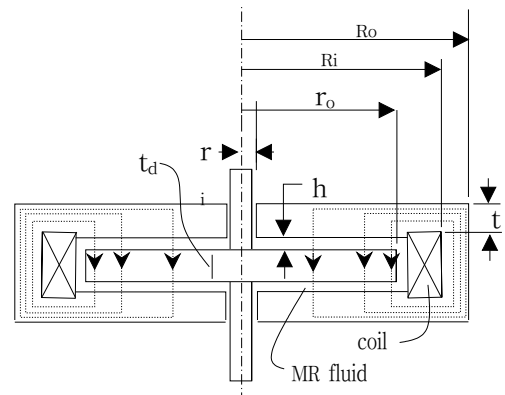


Fig. 2 Magnetic analysis model

Table 2 Conditions for MR clutch designing^{12]}

Parameter	Symbol	Value
Max. torque	T_{max}	5 Nm
Coil Max. current	I_{max}	5A
Coil Turn number	N	81
Bobbin cross-section	width × height	0.01 × 0.01m
MR fluid gap	h	0.001m
Disc thickness	t_d	0.005m

윗 식에서 B는 자속밀도, S는 자로 단면적을 의미하며 아래첨자 f는 자기유변유체, s는 하우징에서의 값을 말한다. Fig. 2를 참조하면

$$S_f = \pi(r_o^2 - r_i^2), \quad S_s = \pi(R_o^2 - R_i^2) \quad (2)$$

또한 암페어의 법칙으로 부터

$$NI = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H_f l_f + H_s l_s \quad (3)$$

윗식에서 N은 코일의 감긴 횟수, I는 코일을 흐르는 전류, H는 자장강도(Magnetic field strength), l은 자로의 길이이며 아래첨자는 앞의 식(1)과 같다. 자기유변유체 내에 속도구배가 발생할 때 전단응력 τ 는 Bingham 모델에 따라 아래의 식으로 표현된다.

$$\tau = \tau_y(H) + \mu \dot{\gamma} \quad (4)$$

윗식에서 H는 자장강도이며 τ_y 는 자기유변유체의 항복전단강도이다. $\mu, \dot{\gamma}$ 은 각각 유체의 동점성계수, 전단변형률(shear rate)이다. 보통의 사용조건에서 식(4)의 우변 두 번째 항은 첫 번째 항에 비해 충분히 작은 값을 가지므로^[2,8,9] 첫째 항만 고려한다. 이때 최대 전달토크식은 다음과 같다.

Table 3 Designed parameters

Parameter	Symbol	Value
Inner radius of disc	r_i	0.008m
Outer radius of disc	r_o	0.0317m
Inner radius of housing	R_i	0.0427m
Outer radius of housing	R_o	0.0482m
Wall thickness of housing	t	0.0077m

$$\begin{aligned} T_{max} &= 2 \int_{r_i}^{r_o} \tau_{y,max} \cdot 2\pi r^2 \cdot dr \\ &= \frac{4\pi}{3} (r_o^3 - r_i^3) \cdot \tau_{y,max} \end{aligned} \quad (5)$$

이제 설계변수를 결정하기 위하여 아래와 같이 정하자.

$$r_o = 4r_i, \quad R_o = 0.9R_i \quad (6)$$

식(5), (6)로부터 Table1, 2에 보인 파라메타 값을 대입하여 구하면 r_o 와, r_i 가 Table 3과 같이 결정된다. 식(1)과 (2)로부터 아래의 식을 얻으며

$$\pi(R_o^2 - R_i^2) = \frac{B_{f,max} \cdot \pi(r_o^2 - r_i^2)}{B_{s,sat}} \quad (7)$$

이식에 식(6)과 Table1, 2에 보인 파라메타 값을 대입하면 R_o, R_i 값을 Table 3과 같이 얻는다. 하우징의 살두께 t (Fig. 2)를 정하기 위하여 다음의 식을 적용한다. 즉, 자로 단면적이 같아야 하므로

$$\pi(R_o^2 - R_i^2) = 2\pi(r_o + h)t \quad (8)$$

이식에 이미 결정된 값들을 적용하면 Table 3과 같이 살두께 t가 결정된다.

이상과 같은 기초설계 결과를 확인하기 위하여 ANSYS를 이용하여 FEM으로 자장해석을 수행하

였으며 노드점(nodal point)에서의 해를 구하였다. Fig. 3 은 설계된 자기유변유체 클러치의 FEM 해석으로부터 얻은 자속라인을 보이고 있으며 Fig. 4는 자속밀도 B의 분포형상을 보이고 있다. 해석은 자장해석용 PLANE53 요소를 사용하였으며, 자속이 축대칭인 것과 Fig. 3의 4개의 선(축 중심선과 클러치의 윗면, 아랫면, 옆면)을 통과하지 않는 것을 경계조건으로 설정하였다. Fig. 4의 그림으로는 자속밀도값을 정확히 분별하기 어려우므로 자속밀도의 수치 값을 ANSYS에서 출력하여 검토하였으며, 그림에서 보인 자속밀도 분포의 최대값이 설계시 의도한 $B_{f,max}$ 와 $B_{s,sat}$ 값과 근접함을 확인할 수 있었다.

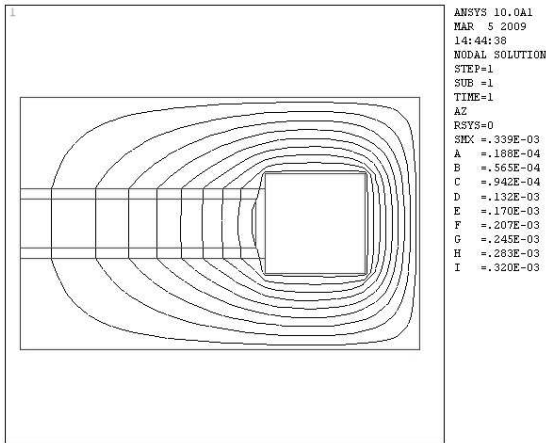


Fig. 3 Magnetic flux line with 5A current

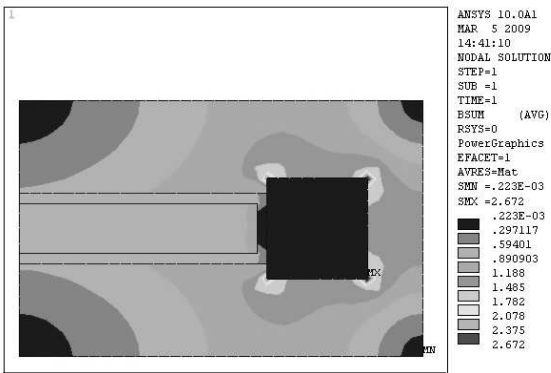


Fig. 4 Magnetic flux density, B, distribution with 5A current

상술한 설계 추론은 공학적인 해석이므로 클러치의 국소부분에서의 결과는 알려주지 않으나, 수치해석결과는 설계시 의도한 바가 만족되고 있음을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 상술한 설계 과정의 추론의 유용성을 확인시킨다.

전달 토오크를 예측하기 위하여 자기유변유체의 전단항복강도 τ_y 와 자속밀도 B가 서로 선형적인 관계를 갖는 것으로 가정하자^[3]. Table 1의 값들로부터 다음과 같은 관계식이 성립하는 것으로 가정한다.

$$\tau_y = 56627B, \quad \tau_{y,max} = 38280 \text{ Pa} \quad (9)$$

이제 코일의 전류값을 바꾸어 가며 Fig. 4에 보인 바와 같은 FEM 해석 결과인 자기유변유체의 자속밀도와 식(9)로부터 전달 토오크를 이론적으로 구하였으며 기존 발표된 실험결과^[2]와 비교하였다. 앞의 식(5)에서 설명한 바와 같이 자기유변유체 클러치에서 전달토오크는 회전속도와 관계없이 인가 전류에 의해서만 영향을 받는다^[8]. Fig. 5에 그 비교 결과를 보이고 있으며, 실험결과가 이론해석 결과보다 다소 작게 나타남을 알 수 있다. 이것은 실제의 상황에서는 클러치에 베어링이나 씰링 등이 자기저항을 발생시키고, 자기유변유체에도 기포 등 불균일성이 존재하기 때문인 것으로 생각된다.

가장 이상적인 상황은 최대전류 5A를 흘릴 때 클러치의 모든 부분이 동일하게 동시에 포화자화에 도달하는 상황일 것이다. 이와 같은 상황은 완벽하게 실현되기는 어려우나 근접시키는 노력은 가능하다. Fig. 4를 살펴보면 자속밀도의 분포가 고르지 않으며 특히 사각 단면의 4 모퉁이의 자속밀도가 매우 작게 나타남을 알 수 있다. 자속밀도의 고른 분포를 위하여 Fig. 6에 보인 바와 같은 클러치 형상 수정에 대하여 고찰하였다. Fig. 2를 참조하면 식(8)으로 구한 하우징 살두께 t는 Fig. 6에서 보이고 있는 위치에서의 치수이다. 그러나 보빈의 외경부에서의 살두께 t1에 대해서는 아래의 관계식이 성립되며, 이 식으로부터 t1을 정할 수 있다.

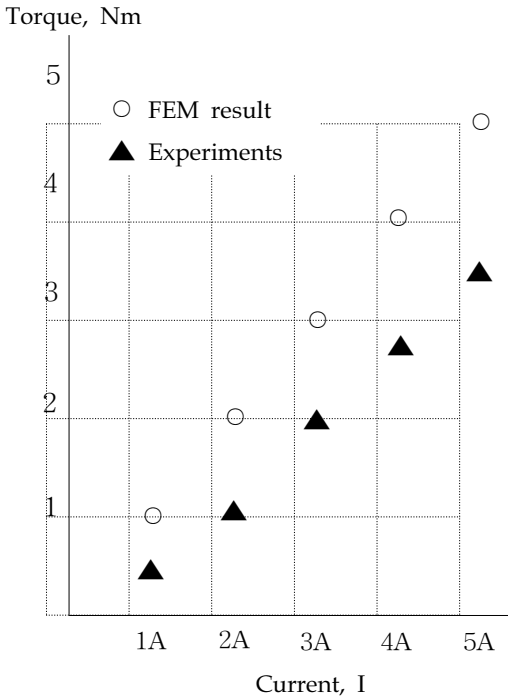


Fig. 5 Comparison of torque by FEM and experiments

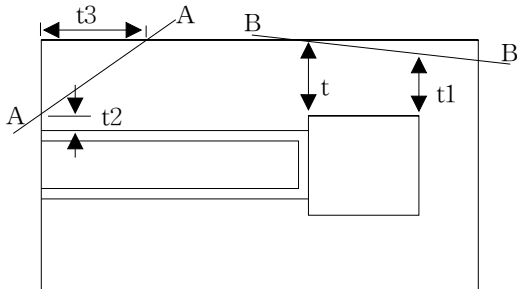


Fig. 6 Modification of the MR clutch

$$\pi (R_o^2 - R_i^2) = 2\pi R_i t_1 \quad (10)$$

또한 Fig. 4의 분포도를 참고하여 식(11)과 같은 설계 수정치를 결정하였다.

$$t_1 = 0.0059m, t_2 = 0.002m, t_3 = 0.01m \quad (11)$$

이 값들을 이용하여 Fig. 6에서 보인 것과 같이 클러치 하우징을 선AA와 BB를 따라 제거하여 설계를 수정하였다. 이 그림에서 클러치는 상하 대칭이므로 편의상 윗부분만을 도시하였다. 이와 같은 수정 설계된 자기유변유체 클러치의 자속밀도 분포도를 FEM을 이용하여 해석하였으며 그 결과를 Fig. 7에 보였다. 이결과로부터 전달 토크는 5.19 Nm로 계산되었으며 Fig. 4의 경우 5.13Nm로 거의 같은 결과를 나타낸다. 즉 상술한 바와 같은 클러치의 수정설계는 전달토크의 감소 없이 자속밀도를 보다 균일하게 분포시키고, 무게를 줄일 수 있는 효과적인 설계임을 알 수 있다.

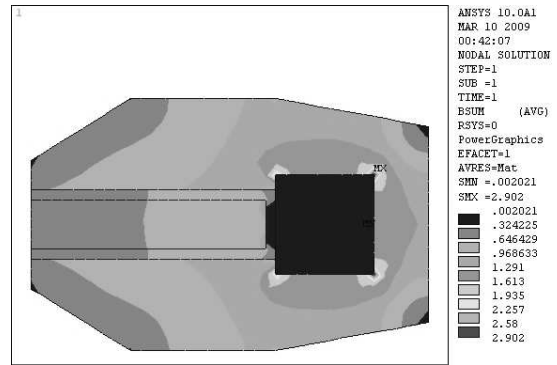


Fig. 7 Magnetic flux density, B, distribution with 5A current of a modified MR clutch

4. 결론

본 연구는 작업조건에 따라 동작기계의 허용 전달 토크를 조절할 수 있는 자기유변유체 클러치의 설계에 관한 것이다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 클러치 구조용 재료와 자기유변유체의 특성에 따라 원하는 크기의 자속밀도를 형성하기 위한 기본치수 설계 방법과 추론과정을 제시하였다.

(2) FEM 해석 및 실험 결과와 비교 검토함으로써 제시한 설계방법의 타당성을 보였다.

(3) 공작기계에서 동력전달을 위한 클러치의 실현가능한 구조를 제시하였다.

후 기

이 논문은 2007학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. G. Yang, B.F. Spencer Jr., J.D. Calson, M.K. Sain, "Large Scale MR dampers: modeling and dynamic performance considerations," *Engineering Structures*, Vol. 24, pp.309-323, 2002
2. 남윤주, 문영진, 박명관, 이육형, "MR 유체 작동기의 전자기적 설계방법," *대한기계학회논문집 A권*, 30권, 10호, pp.1305-1313, 2006
3. Lee, U., Kim, D., Hur, N. and Jeon, D., "Design Analysis and Experimental Evaluation of An MR Fluid Clutch," *J. of Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol.10, pp.701-707, 1999
4. 이효숙, "자성유체의 특성 및 응용," *한국재료학회지*, 12권, 4호, pp.264-268, 2002
5. 하성훈, 최승복, 유원희, "MR 댐퍼를 적용한 철도차량의 안전성 해석," *한국소음진동공학회 논문집*, 18권, 7호, pp.732-740, 2008
6. 김찬중, 한영민, 성금길, 최승복, "MR유체를 이용한 제어가능한 차량용 햅틱 노브," *한국소음진동공학회논문집*, 18권, 3호, pp.307-314, 2008
7. S. B. Choi, S. R. Hong and C. C. Cheong, "Comparison of Field-Controlled Characteristics Between ER and MR Clutches," *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.10, pp.615-619, 1999
8. B.M. Kavlicoglu, F. Gordaninejad, C.A. Evrensel, N. Cobanoglu, Y. Lin and A. Fuchs, "A High Torque Magneto-Rheological Fluid Clutch," *Proceedings of SPIE Vol.4697, Smart Structures and Materials 2002:Damping and Isolation*, pp.393-400, 2002
9. 안영공, 하종용, 안경관, 양보석, T. Shiraiishi and S. Morishite, "MR 유체의 동특성," *한국소음진동공학회*, 2005 춘계학술대회논문집, pp.576-579, 2005