

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.1.34

영구자석을 이용한 새로운 MR 브레이크의 해석

윤동원[†] · 박중호* · 손영수* · 박희창* · 박철훈*

(2008년 5월 19일 접수, 2008년 10월 23일 수정, 2008년 12월 9일 심사완료)

Analysis of a Novel MR Rotary Brake with Permanent Magnet

Yun Dong-won, Park Jung-ho, Son Young-su, Park Hee-chang
and Park Cheol-hoon

Key Words: FEM(유한요소법), MR(자기유변유체), MR Brake(MR 브레이크), Permanent Magnet (영구자석), Rotary Brake(회전형 브레이크),

Abstract

In this paper, a novel MR brake with permanent magnet is developed. This system consists of rotary disk, permanent magnet, spring and MR fluid. Permanent magnets are attached to the rotary disk and moves in the direction of radius. The magnets are linked to rotor axis by spring. As rotation speed increases, the magnets move outward from the center of the system by centrifugal force in the MR fluid. A proper design of stator or case makes the system have unique torque characteristics. The research is performed like following procedures. First, the electromagnetic characteristic of the system is analyzed using Maxwell. Next, torque is calculated using the results of the electromagnetic analysis. Finally, the performance of various types of the brake systems are investigated and compared with each other.

기호설명

- A : 면적(m^2)
- B : 자속밀도(T)
- G : complex modulus
- g : 간극(m)
- H : 자계강도 (A/m)
- S : 상대속도 (m/s)
- W : 자석의 폭
- γ' : 전단속도

[†] 책임저자, 회원, 한국기계연구원 지능형생산시스템 연구본부

E-mail : dwyun@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7769 FAX : (042)868-7611

* 한국기계연구원 지능형 생산시스템 연구본부

연구 등이 진행되었고,^(3,4) Kim 등에 의해 MR 유체를 이용한 장치의 자기적, 전기적 회로 해석과 최적화에 대한 연구도 진행되는 등⁽⁵⁾ 기존의 MR 브레이크 및 액추에이터에 대한 연구 등은 주로 제어전류를 이용한 장치의 설계 및 해석, 제작에 관한 것이 주이다.

본 연구에서는 기존의 능동 제어형 MR 브레이크와는 다른 방식의 영구자석을 이용한 새로운 MR 브레이크를 제안하고, 해석 및 설계를 수행하였으며, 시스템의 동작특성에 대한 해석을 수행하였다.

2. 영구자석을 이용한 회전형 MR 브레이크

2.1 이론적 배경

자기유변유체(MR fluid)는 외부 자기장의 세기에 따라 그 유체의 점성이 변화하는 물질이다. 그리고, 이러한 점성 변화에 따라 유체의 전단응력은 그에 따라서 증가하게 된다.

MR 유체의 이러한 성질은 외부 자기장에 의해 유체 중에 용해되어 있는 입자들이 자기장의 방향으로 일렬로 정렬하는 것에서 기인된다. 이러한 체인 형상의 정렬은 유체의 흐름을 방해하게 되고, 따라서 유체의 점성이 증가하게 되는 것이다.

MR 유체는 외부 자기장이 작용하지 않을 때는 뉴턴 유체로 거동하고, 외부 자기장이 작용할 때는 Bingham-plastic 모델처럼 거동하게 된다. MR 유체 내에서 발생하는 전단응력이 항복응력 이상일 때는 Bingham plastic 모델처럼 거동하게 되고,

의 스프링으로 구성되어 있다. 로터가 정지 상태 일 때에는 스프링의 힘에 의해 자석은 region 1 부분에 위치하게 되고, 회전속도가 증가함에 따라 원심력에 의해 자석은 중심에서 바깥 방향으로 움직이게 된다. 이때 특정 속도 이상이 되면, 자석은 region 1에서 region 2로 움직이게 되고, region 2는 region 1에 비해 자석과 스테이터 간의 공극이 훨씬 작은 브레이크 케이스의 형상에 의해 자석과 스테이터 사이의 공극의 자속밀도가 증가하게 된다. 따라서, region 2에서는 region 1에 비해 MR 유체의 점성이 급격히 증가하게 되고, 따라서, 브레이크의 제동력이 증가하게 된다.

브레이크 케이스(stator)의 구조의 적절한 설계를 통한 region 1과 region 2의 경계의 위치설정과 스프링의 강성을 조절하여, 특정 회전수 이상에서 브레이크의 제동력이 크게 발생하는 브레이크를 설계할 수 있다. 기존의 MR 브레이크는 코일에 흐르는 전류에 의해 능동적으로 브레이크 작용을 하는 능동형(active) 브레이크라고 한다면, 이 연구에서 제안한 브레이크는 영구자석을 이용하여 회전수에 따라 브레이크 작용을 하는 수동형(passive) 브레이크라고 할 수 있다. 기존의 능동형 MR 브레이크는 제동력을 발생시키기 위해서 외부의 다른 에너지원으로부터 전류를 공급하여야만 하지만, 본 논문에서 제안된 브레이크는 외부의 에너지원 없이 자체 회전에너지에서 제동력을 얻을 수 있는 장점이 있다. 제안된 시스템은 특정 회전수 이상에서 제동력이 발생하는 것이 목적이며, 시스템 응답속도는 능동형 모델에 비해 중요하지 않다.

회전자(rotor)의 형상은 Fig. 3과 같이 다양한 형태를 가질 수 있다. 가장 기본적인 형태는 Fig.

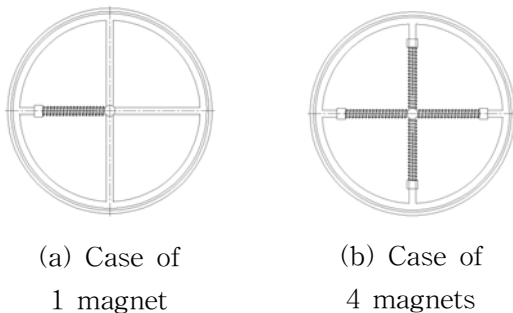


Fig. 3 Shape of the rotors

3(a)와 같이 하나의 영구자석을 사용한 형태이지만, 브레이크의 제동력을 증가시키기 위해서는 영구자석의 개수가 증가할수록 제동력 또한 증가하게 된다. 본 논문에서는 Fig. 3(b)와 같이 4개의 영구자석을 사용한 시스템에 대해서 해석을 수행해 보았다.

3. 시스템 해석

3.1 해석절차

본 논문에서 제안된 영구자석을 이용한 회전형 MR 브레이크의 성능을 검증하기 위하여 해석을 수행하였다. 먼저 유한요소법을 이용하여 영구자석의 위치에 따른 전자기장 해석을 수행하였다. 전자기장 유한요소 해석을 통해 자석과 케이스 간 공극 사이의 자기장의 세기를 구하였으며, MR 유체에서 자기장의 세기와 유체의 전단응력의 관계를 이용하여 영구자석의 위치에 따른 MR 유체의 전단응력을 구하였다. 이렇게 구해진 전단응력을 이용하여 영구자석의 반경 방향 위치에 따른 MR 브레이크의 토크를 구하여, 제안된 회전형 MR 브레이크의 성능을 검증해 보기로 한다.

3.2 전자기장 해석

MR 유체는 유체에 가해지는 전자기장의 세기에 따라 점성이 달라지게 된다. 따라서, 시스템의 전자기장 해석을 통하여 MR 브레이크 내의 전자

Table 1 Properties of parts

Parts	Material	
stator	Steel	B-H curve
magnet	NdFe30	
MR fluid	MDF 122-2AD	B-H curve

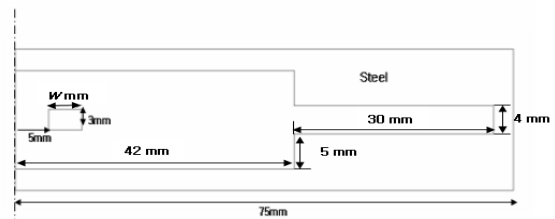
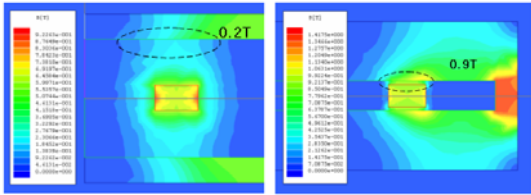


Fig. 4 2D model of the rotary MR brake

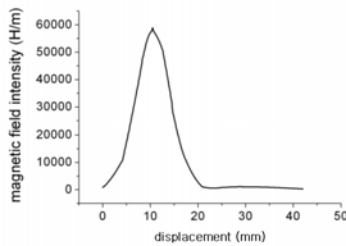
Table 2 Analysis results when using magnetic stator

	Magnetic field intensity (A/m)	
	region 1	region 2
case 1	56000	400000
case 2	90000	385000

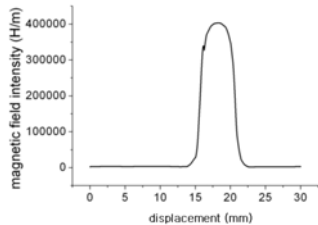


(a) $dr=3.1\text{mm}$ 일 때 (b) $dr=52.7\text{mm}$ 일 때

Fig. 5 Flux density distribution of case 1



(a) $dr=3.1\text{mm}$ 일 때



(b) $dr=52.7\text{mm}$ 일 때

Fig. 6 Magnetic field intensity of case 1

기장 분포를 해석하여야 한다.

본 연구에서 MR 브레이크 내의 전자기장 해석을 위하여 상용 유한요소 프로그램인 Maxwell을 이용하였다. 각 부분의 재질은 Table.1 과 같으며, 케이스의 재질인 철과 MR 유체는 비선형 B-H 곡선 특성을 사용하여 비선형 해석을 수행하였다. 본 연구에서 영구자석은 Nd 계열의 자석을 사용하였으며, MR 유체는 Lord사의 MDF 122를 사용하였다.

MR 브레이크의 유한요소 해석을 위하여, Fig. 4와 같이 2D 모델로 가정하였다. 회전형 MR 브

레이크는 원통형이므로 원통형으로 모델링하여야 하나, 자석은 직육면체이므로 직교 좌표계로 모델링하여야 한다. 본 연구에서는 자석의 하나의 크기는 전체 브레이크에 비해 훨씬 작으므로, 자석과 케이스 간의 전자기장 분포해석을 위해 직각좌표계의 2D 모델로 가정하여 전자기장 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 회전형 MR 브레이크의 1/2 2D모델을 보여주고 있다. 자석의 초기위치는 중심선에서 반경방향으로 5mm 떨어져 있다고 가정하였으며, 초기위치에서 반경방향 변위(dr)에 따른 전자기장 해석을 수행하였다.

자석의 크기는 case 1: $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 3\text{mm}$, case 2 : $10\text{mm} \times 5\text{mm} \times 3\text{mm}$ 의 2가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 제안된 영구자석을 이용한 회전형 MR 브레이크의 성능이 잘 구현되기 위해서는 Fig. 2의 region 1에서는 MR 유체에 의한 토크가 작아야 하고, region 2에서 MR 유체의 토크가 최대가 되어야 한다.

Fig. 5는 자석의 반경방향 위치에 따른 전자기장 해석 결과를 보여준다. region 1에 영구자석이 위치한 Fig. 5(a)의 경우는 자속밀도가 0.2T 이지만, region 2에 영구자석이 위치한 경우인 Fig. 5(b)의 경우는 자속밀도가 0.9T로서 거의 4배 이상임을 알 수 있다.

Fig. 6은 각 위치에서의 자기장의 세기를 나타내는 그래프이다. 여기서 x축은 각 region에서의 초기위치에서 부터의 자석의 이동변위를 나타낸다. case 1과 case 2에 대한 자석과 스테이터 사이의 공극에서의 자기장 해석 결과는 Table. 2와 같다.

3.3 회전형 MR 브레이크의 토크계산

MR 유체에서 자기장의 세기와 전단응력의 사이의 관계는

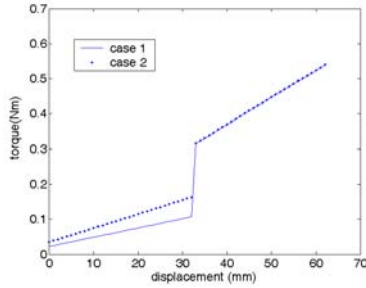


Fig. 7 Torque calculation of MR rotary brake

속밀도나 자기장의 세기를 구해내야 한다.

영구자석의 움직임에 따라 MR 유체 내에서 전단변형이 일어나면, 가장 전단응력이 약한 부분에서 전단 변형이 일어날 것이며, Fig. 5에서 알 수 있듯이 영구자석과 스테이터 사이의 자속밀도는 스테이터에 가까운 곳에서 가장 낮게 나타난다. 따라서, 스테이터 표면 근처의 자속밀도(B)나 자기장의 세기(H)를 구하고, 이때의 MR 유체의 전단응력을 구하면 된다.

자기장 해석을 통해 MR 유체의 전단응력이 구해지면, 영구자석의 위치 x 에서의 회전형 MR 브레이크의 토크 T 는 식 (3)에서 구한 전단력 F 를 이용하면,

Table 3 Analysis result when usign magnetic and non-magnetic stator

	Magnetic field intensity (A/m)	
	region 1	region 2
case 3	16000	380000
case 4	30000	375000

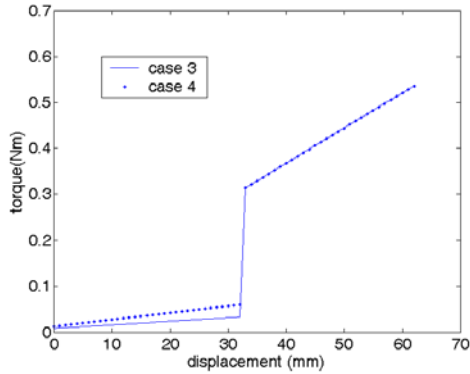


Fig. 11 Torque calculation of MR rotary brake

이기 위해서 region 1 부분의 스테이터의 재질을 Fig. 8과 같이 비자성체로 바뀌서 해석을 수행해 보았다.

case 1, case 2에서 region 1의 스테이터를 비자성체인 스테인리스 스틸로 바꾸어서 각각 case 3, case 4라 하였다.

Fig. 9에 case 3에 대한 유한요소 해석의 결과로써, 자속밀도 분포를 보여주고 있으며, Fig.10에 case 3에 대한 자기장의 세기의 그래프가 나타나 있다. 여기서 x축은 각 region에서의 초기위치에서의 자석의 이동 변위를 나타낸다.

Case 3, case 4 각각에 대해서 region 1, region 2에서의 자기장의 세기에 대한 유한 요소 해석결과가 Table 3에 나타나 있으며, 이들 값들과 식 (4), (6)을 이용하여 각 경우에 대한 토크 값을 계산해 보면, Fig. 11과 같다.

Fig. 11을 보면 알 수 있듯이, case 3의 경우에 region 1에서 최대 토크가 0.03Nm, case 4의 경우 0.1Nm 정도로 case 3의 경우는 region 1에서의 토크가 case 1에 비해 70% 정도 감소하였으며, case 4의 경우는 region 1에서의 토크가 case 2에 비해 67% 정도 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 9를 비교해보아도, region 1영역의 스테이터 재질을 비자성체로 바꾼 결과 스테이터와 자석사이의 자속밀도가 절반정도로 감소했음을 알 수 있다.

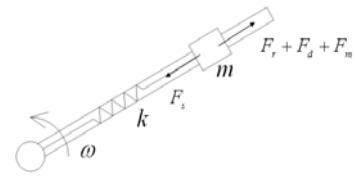
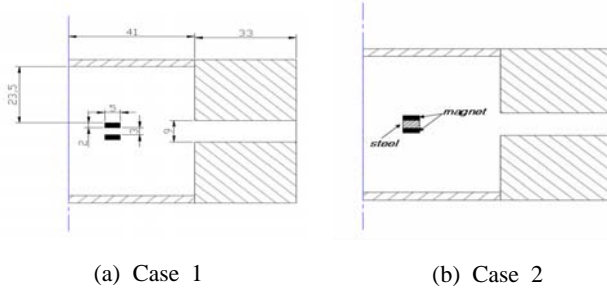


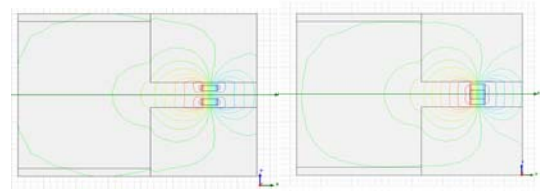
Fig. 12 Dynamic model

따라서, 영구자석을 이용한 회전형 MR 브레이크를 설계 시, 토크가 최소화되어야 하는 영역 (region 1)의 브레이크 스테이터는 비자성체로 제작해야 함을 알 수 있다.

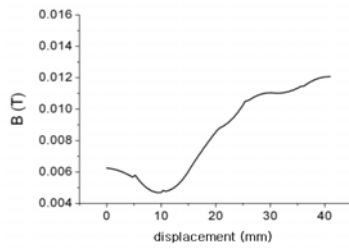
원하는 회전속도에서 제동력이 발생하게 하기 위해서는 영구자석의 속도에 따른 원심력, 운동 부분의 질량, 스프링 강성 등을 적절히 설계하여야 한다. 다른 기계적 부품의 치수가 정해져 있을 때, 제동력이 발생하는 속도는 스프링 강성이 결정하게 되며, 스프링의 강성은 Fig. 12와 같은 시스템의 동역학적 모델을 이용하여 구할 수 있다. 회전자가 각속도



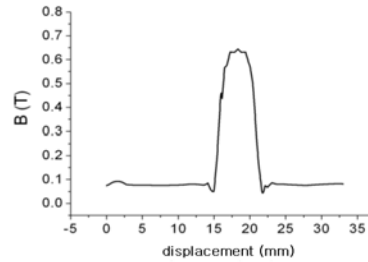
(a) Case 1 (b) Case 2
Fig. 13 Section view of the system



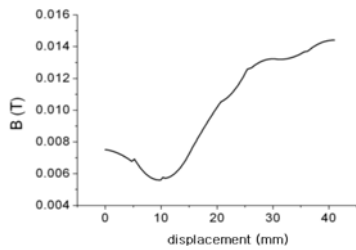
(a) Region 2 of case 1 (b) Region 2 of case 2
Fig. 14 Flux line distribution



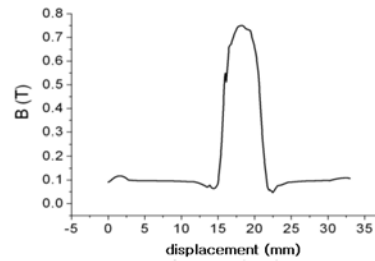
(a) Region 1 of case 1



(b) Region 2 of case 1



(c) Region 1 of case 2



(d) Region 2 of case 2

Fig. 15 Flux density between magnet and stator

에 자석을 고정하기로 하였다. 따라서, 자석과 스테이터의 형상은 Fig. 13(a)와 같은 형상이어야 한다.

이때 캐리어의 재질에 따른 특성을 비교하기 위하여, Fig. 13과 같이 캐리어가 비자성체인 경우(Fig. 13(a))와 자성체인 경우(Fig. 13(b))에 시스템을 해석해 보았다.

Fig. 14에 region 2 영역에서의 자속선 분포의 해석결과를 보여주고 있다. 자성체 캐리어를 사용한 case 2의 경우가 자속선이 자석주위에 더 집중한다는 것을 알 수 있다. 다음으로, 각각의 모델에 대하여, 자석과 스테이터 사이의 에어갭에서의 자속밀도를 구해 보았다.

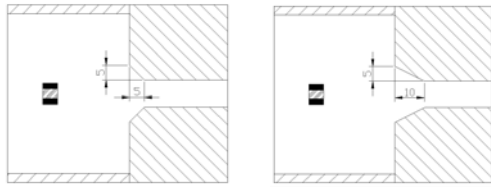
Fig. 15에서 알 수 있듯이, region 1에서의 자속 밀도는 case 1과 case 2에서 약 0.01T 정도이며, region 2에서의 최대 자속밀도는 case 1의 경우 약 0.64T, case 2의 경우 약 0.75T라는 것을 알 수 있었다. 여기서 x축은 각 region에서의 초기

위치로부터의 변위를 나타낸다. 본 시스템이 제대로 작동하기 위해서는 region 1에서는 자계 강도가 약할수록 좋고, region 2에서는 자계강도가 강할수록 좋다. 따라서, Fig. 15의 해석결과, 캐리어의 재질은 자성체가 좋다는 것을 알 수 있다.

다음으로 스테이터에서 면적 급변 부위의 형상이 시스템에 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 16과 같이, 두 영역의 경계에 있는 부분의 모서리에 각각 5mm*5mm, 5mm*10mm 크기의 모따기를 한 모델을 case 1, case 2라 하고, 자석의 위치에 따른 자석과 자계 스테이터 사이에서의 자계강도의 변화를 구해보았고, Fig. 17에 나타내었다.

Fig. 17에서도 알 수 있듯이, 형상의 변화 비율이 더 작은 case 2의 경우에 길이에 따른 자계강도의 변화율이 더 작다는 것을 알 수 있다.

Fig. 18에 중심으로부터 자석의 위치에 따른 토크의 해석결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 영역 경계부의 형상에 따라서, 브레이크의



(a) Case 1 (b) Case 2

Fig. 16 Effect of the stator shape

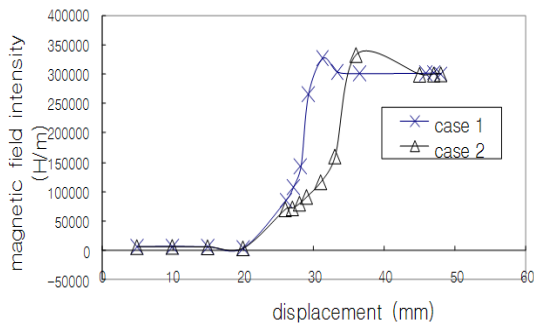


Fig. 17 Magnetic field intensity

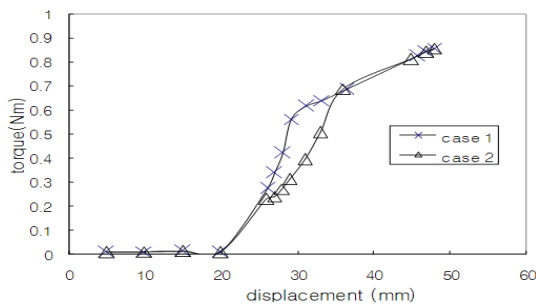


Fig. 18 Torque

토크 특성 또한 달라진다는 것을 알 수 있었고, 단면 변화부위의 모서리의 모따기 비율에 따라, 토크의 변화량의 기울기도 달라진다는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 영구자석을 이용한 새로운 회전형 MR 브레이크를 제안하고, 해석 및 설계를 하였다. 자석의 크기, 스테이터의 재질에 따라 4가지 종류의 MR 브레이크를 설계하였고, 전자기 해석과 토크 해석을 통해 각 시스템에 대한 해석 및 비교, 검토를 수행하였다. 해석 결과, 제안된 MR 브레이크는 초기의 예상과 같이, 영구자석의 위치에 따라 일정영역(region 1)에서는 제동력이 거의 없고, 회전속도의 증가에 따른 원심력에 의해 영구자석의 위치가 설계에 의해 지정된 특정

영역에 도달하게 되면 제동력이 증가함을 알 수 있었다. 따라서, 브레이크 스테이터의 형상을 적절히 설계하고, 스프링 강성을 조절함에 따라 원하는 회전수에서 제동력이 작용하거나 감속을 시키는 작용을 할 수 있음을 알았다.

또한, 영구자석을 반경방향으로 운반하는 캐리어의 재질에 따른 시스템 특성을 알아보았으며, 자성체를 이용하여, 캐리어를 만드는 것이 시스템 성능 향상에 도움이 된다는 것을 알 수 있었다. 또한, 영역 경계부의 모서리의 모따기 형상에 따라 시스템 특성이 달라진다는 것을 알았으며, 모따기의 세장비가 클수록, 자석의 위치에 따른 토크의 변동률이 작아진다는 것을 알 수 있었다.

후기

본 논문은 한국기계연구원의 자체사업에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) Charles E. Wilson, Park Mun-sik, Lee Geon-sang and Ju Seok-jae, 2002, "Machine Design," Interscience
- (2) Youn, D. W., Park, J.H., Choi, S. K., Yun, S. N. and Ham, S. Y., 2006, "Electromagnetic Analysis and Design of Rotary MR Brake," *KSPSE Conference*, pp. 146~151
- (3) Kim, K. H., Nam, Y. J., Park, M. K., 2008, "Electromagnetic Design and Performance Evaluation of an MR an MR Valve," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 32, No. 3, pp. 240~249.
- (4) Nam, Y. J., Moon, Y. J., Park, M. K., Lee, Y. H., 2006, "Electromagnetic Design Methodology for MR Fluid Actuator," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 10, pp. 1305~1313.
- (5) Kim, J. H., Lee, C. W., Kim, B. B., Park, Y. and Cao, J. G., 2001, "Design of Magneto-Rheological Fluid Based Device," *KSPSE Conference*, pp. 544~549.
- (6) Mark R. Jolly, Jonathan W. Bender and J. David Carlson, "Properties and Application of Commercial Magnetorheological Fluids," Thomas Lord Research Center, Technical Report of LORD company.