

영구자석을 이용한 회전형 MR 브레이크의 설계

윤동원[†]·박중호*·함영복*

Design of MR rotary brake with permanent magnet

Dong-won Youn, Jung-ho Park and Young-bog Ham

Key Words: MR(자기유변유체), MR 브레이크(MR 브레이크), rotary brake(회전형 브레이크), permanent magnet(영구자석)

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. To show the performance of the system, the research is performed by following procedure. First, the electromagnetic characteristic of the system is analyzed using FEM and commercial code, Maxwell is used for this analysis. Then, torque is calculated using the result of the electromagnetic analysis to validate the performance of the system.

1. 서론

기호설명

τ : 전단응력 (Pa)
 η : 점성계수(Pa·s)
G: complex modulus
g: 간극(m)
A: 면적(m²)
B: 자속밀도(T)
H: 자계강도 (A/m)
 μ : 투자율

일반적으로 브레이크는 캘리퍼 디스크 브레이크, 원판 디스크 브레이크, 내부 슈 드럼 브레이크, 밴드 브레이크 및 확장, 수축형 브레이크로 나누어진다. 이러한 브레이크는 기계적 마찰에 의해 작동하며, 기계, 공압, 유압 혹은 전기 장치에 의해 작동된다 [1]. 이해 반해 직접적인 기계적 마찰에 의해 제동력을 얻는 것이 아니라, 입자로 이루어진 매질에 의해 제동력을 얻는 브레이크들이 있으며, 파우더 브레이크와 기능성 유체를 이용한 브레이크들이 있다.

파우더 브레이크는 자기장을 인가함으로써 자성을 가지고 있는 파우더가 자기장에 따라 체인형상의 클러스터를 형성하여 마찰력을 발생하게 되어 브레이크 작용을 한다. 하지만, 성능대비 사이즈가 크며 고속응답을 기대하기 어렵고 일정 사용시간이 지나면 파우더를 보충해야 된다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 고속으로 회전하는

[†] 한국기계연구원
E-mail : dwyoun@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7769 FAX : (042)868-7611

* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부

장치의 응답성에 고정밀도로 추종하기 위해서는 기존의 파우더 브레이크 보다는 인가 자기장에 의해 수 ms 단위로 점성변화를 제어할 수 있는 장치가 필요하며, 기능성 유체를 이용한 브레이크가 이에 해당한다. 이 중, MR (Magneto-Rheological) 유체를 이용한 브레이크가 대표적인 브레이크라고 할 수 있다.

기존의 회전형 MR 브레이크는 코일에 흐르는 전류를 이용하여 MR 유체 주위에 자기장을 형성하여 작동시키는 방식이다[2]. 본 연구에서는 영구자석을 이용한 새로운 방식의 회전형 MR 브레이크를 제안하고 해석 및 설계를 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,

$$\tau = \tau_y + \eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

의 관계식이 성립하고, 발생하는 전단응력이 항복응력보다 작을 때에는

$$\tau = G\gamma \quad (2)$$

의 관계식이 성립하며, 점탄성적으로 거동하게

된다. 여기서, G 는 재료의 complex modulus로써 자기장에 의존적인 값이고, η 는 자기장이 인가되지 않을 때의 점성계수이다.

MR 브레이크와 같은 Fig. 1과 같은 direct-shear mode 시스템에서 발생하는 힘은

$$F = F_\eta + F_\tau = \frac{\eta SA}{g} + \tau_y A \quad (3)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서, S 는 상대속도이고, $A=Lw$ 로써, 면적을 뜻한다. 여기서, w 는 전단면의 폭이다.[3]

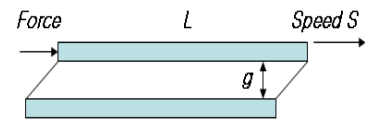


Fig. 1 Model of direct-shear mode

식(3)에서 τ_y 는 자기장의 세기가 커질수록 커지는 값이므로, MR 브레이크에서 저항토크를 증가시키기 위해서는 MR 유체에 발생하는 자기장의 세기를 키워야 한다는 것을 알 수 있다.

2.2 시스템 구성 및 개요

이 절에서는 영구자석을 이용한 회전형 MR 브레이크의 작동원리 및 구성에 대해 소개한다.

기존의 회전형 MR 브레이크는 코일과 MR 유체로 구성되어 있어서, 코일에 전류를 인가하면, 코일 주위에 자장이 형성되고 이 자장에 의해 MR 유체의 점성을 변화시켜 브레이크로서의 작용을 하게 하였다. 본 연구에서는 기존의 회전형 MR 브레이크와는 달리 영구자석과 스프링, MR 유체를 사용하여 브레이크로 또는 감속기로써 작용하게 하였다.

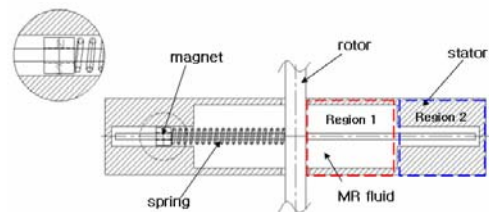


Fig. 2 MR rotary brake system

Fig. 2는 회전형 MR 브레이크의 개념도를 보여주고 있다. 시스템은 MR 유체가 저장되어 있는 브레이크 케이스인 스테이터, 회전 로터, 영구자석, 로터와 영구자석 사이의 스프링으로 구성되어 있다. 로터가 정지 상태일 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.

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

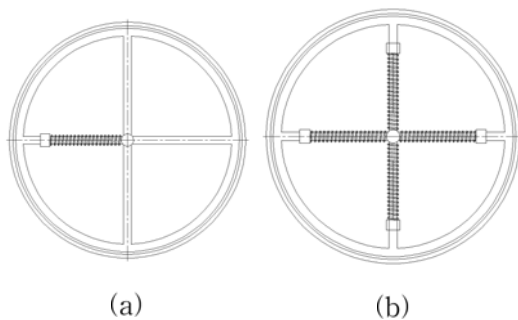


Fig. 3 Shape of the rotors

3. 시스템 해석

3.1 해석절차

제안된 시스템의 성능을 검증하기 위하여 시스템에 대한 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 전자기장 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 Lord 사의 MDF 122를 사용하였다.

Table 1 Properties of parts

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

MR 브레이크의 유한요소 해석을 위하여, Fig. 4와 같이 2D 모델로 가정하였다. 회전형 MR 브레이크는 원통형이므로 원통형 모델을 하여야 하나, 자석은 직육면체이므로 직교 좌표계로 모델

링하여야 한다. 본 연구에서는 자석의 하나의 크기는 전체 브레이크에 비해 훨씬 작으므로, 자석과 케이스 간의 전자기장 분포해석을 위해 직각 좌표계의 2D 모델로 가정하여 전자기장 해석을 수행하였다.

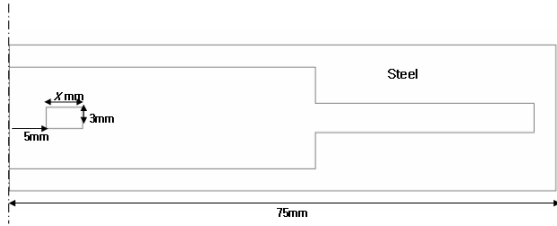
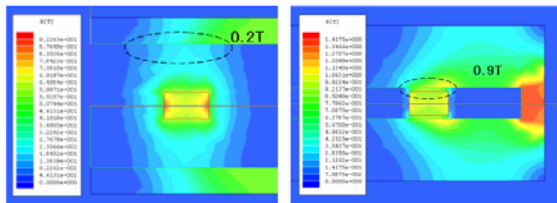


Fig. 4 2D model of the rotary MR brake

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.

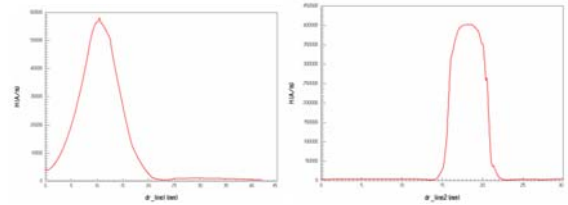
자석의 크기는 case 1: 5mm × 5mm × 3mm, case 2 : 10mm × 5mm × 3mm의 2가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 제안된 영구자석을 이용한 회전형 MR 브레이크의 성능이 잘 구현되기 위해서는 Fig.2의 region 1에서는 MR 유체에 의한 토크가 작아야 하고, region 2에서 MR 유체의 토크가 최대가 되어야 한다.



(a) dr=3.1mm 길 때 (b) dr=52.7mm 길 때
Fig. 5 Flux density distribution of case 1

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. case 1과 case 2에 대한 자기장 해석 결과는 다음과 같다.



(a) dr=3.1mm ! 때 (b) dr=52.7mm ! 때
Fig. 6 Magnetic field intensity of case 1

Table. 2 Analysis results

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

3.3 회전형 MR 브레이크의 토크계산

MR 유체에서 자기장의 세기와 전단응력의 사이의 관계는

$$\tau = f(B) \quad (4)$$

이며, 자속밀도가 커질수록 전단응력도 커지게 된다. 자기장의 세기 H와 자속밀도 B 사이의 관계는

$$B = \mu H \quad (5)$$

이므로, MR 유체에서 자기장에 의한 전단응력의 변화를 알기 위해서는 전자기장 해석을 통해 자속밀도나 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 x에서의 회전형 MR 브레이크의 토크 T는 식 (3)에서 구한 전단력 F를

이용하면,

$$T = 2xF = 2x \left(\int^A \frac{\eta S}{g} dA + \int^A \tau_y dA \right) \quad (6)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 영구자석이 4개인 시스템에 대해 해석을 수행하므로, 토크 T는

$$T = 8xF = 8x \left(\int^A \frac{\eta S}{g} dA + \int^A \tau_y dA \right) \quad (7)$$

와 같이 나타낼 수 있다. Table 1과 식(7)를 이용하여 2가지 case의 MR 브레이크에 대해서 토크를 구한 결과가 Fig. 7에 나타나 있다.

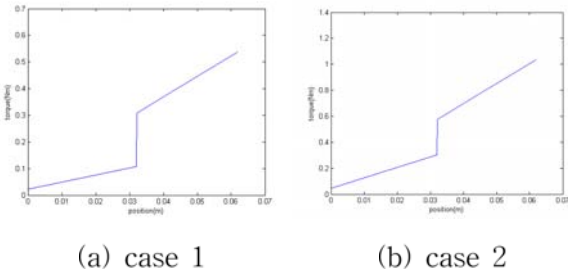


Fig. 7 Torque calculation of MR rotary brake

Fig.7에서 알 수 있듯이, case 1의 경우는 region 1에서 최대 토크 0.1Nm 정도이고, region 2에서 0.52Nm 정도라는 것을 알 수 있으며, case 2의 경우는 region 1에서 0.3Nm, region 2에서 1.02Nm 정도임을 알 수 있다.

제안된 시스템이 적절하게 동작되기 위해서는 region 1영역에서는 토크가 거의 발생하지 않고, region 2에서 최대의 토크가 발생하여야 한다. 하지만, 위에서 살펴본 바와 같이, case 1과 case 2 모두 region 1에서의 토크가 각각 0.1Nm, 0.3Nm 정도로 나오므로, 이를 감소시키는 방안이 필요하며, 다음 절에서 이를 위한 방안에 대해 연구해 보았다.

3.4 MR 브레이크 성능 향상을 위한 방안

3.3절에서 알 수 있듯이, region 1에서의 토크를 감소시켜야 한다. region 1 부분에서의 토크를 줄이기 위해서 region 1 부분의 스테이터의 재질을

Fig. 8과 같이 비자성체로 바뀌어서 해석을 수행해 보았다.

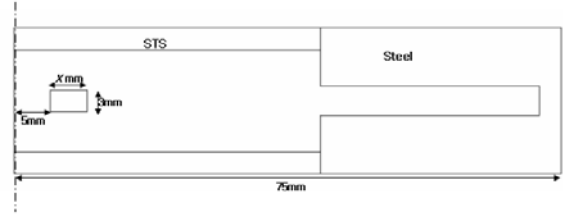


Fig. 8 Modified model of the rotary MR brake

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

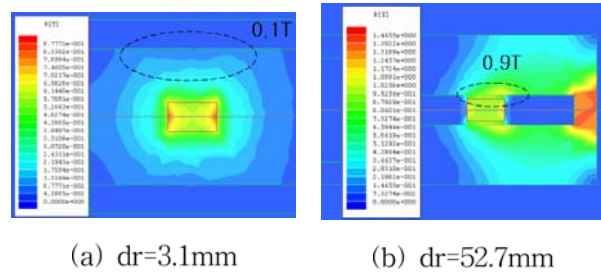


Fig. 9 Flux density distribution of case 3

Fig.10에 case 3에 대한 자기장의 세기의 그래프가 나타나 있다.

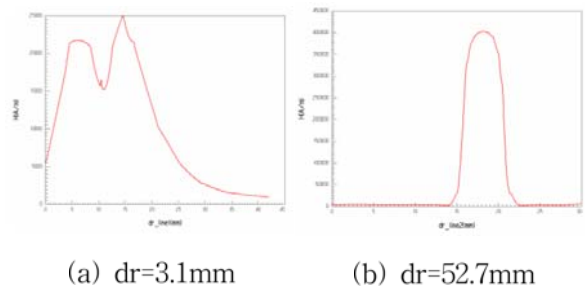


Fig. 10 Magnetic field intensity of case 3

Table. 3 Analysis result

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

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 경우 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. 따라서, 영구자석을 이용한 회전형 MR 브레이크를 설계시, 토크가 최소화되어야 하는 영역(region 1)의 브레이크 스테이터는 비자성체로 제작해야 함을 알 수 있다. Fig. 12에서 각 경우에 대한 해석결과를 비교하였다.

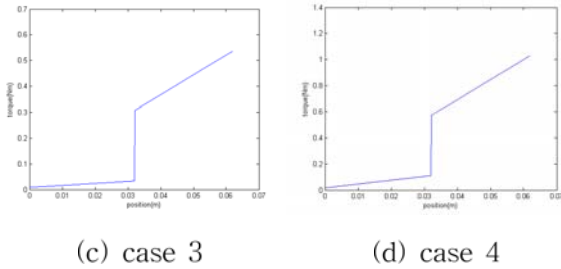


Fig. 11 Torque calculation of MR rotary brake

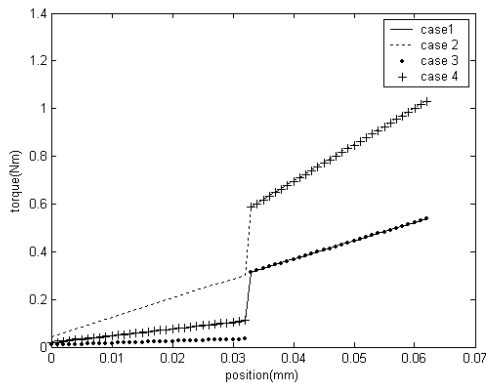


Fig. 12 Comparison of the results

4. 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 계산을 통해 각 시스템에 대한 해석 및 비교, 검토를 수행하였다. 해석 결과, 제안된 MR 브레이크는 초기에 예상과 같이, 영구자석의 위치에 따라 일정영역(region 1)에서는 제동력이 거의 없고, 회전속도의 증가에 따른 원심력으로 영구자석의 위치가 설계에 의해 지정된 특정영역에 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.

향후 연구에서는 스프링을 포함한 동역학적 해석을 수행할 것이며, 실제 시스템 제작 및 실험을 통해서 해석결과를 검증하고, 제안된 시스템에 대한 검증을 수행할 것이다.

참고문헌

- (1) 박문식, 이건상, 주석재, “컴퓨터 통합 기계설계”, 인터비전
- (2) D.W.Youn, J.H.Park, S.K.Choi, S.N.Yun, S.Y.Ham, 2006, "Electromagnetic Analysis and design of rotary MR brake", KSPSE conference, pp. 146-151
- (3) 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.
- (4) Xiaojie Wang and Faramarz Gordaninejad, 1999, "Flow analysis of field-controllable, electro- and magneto- rheological fluids using herschel-bulkley model", Jounals of Intelligent Materials, Systems and Structures, Vol. 10, No. 8, pp 601-608.