영구자석을 이용한 회전형 MR 브레이크

MR Rotary brake with permanent magnet

*#윤동원[1], 박중호[1], 박희창[1], 최상규[1], 윤소남[1]
*#D.W.Yun(dwyun@kimm.re.kr)[1], J. H. Park[1], H.C. Park[1], S.K.Choi[1], S.N.Yun[1]
[1] 한국기계연구원 지능형 정밀기계연구본부

Key words : MR, MR brake, rotary brake, permanent magnet

1. 서론

고속으로 회전하는 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[1]. 본 연구에서는 영구자석을 이용한 새로운 방식의 회전형 MR 브레이크를 제안하고 해석 및 설계를 수행하였다.

2. 영구자석을 이용한 MR 브레이크

자기유변유체(MR fluid)는 외부 자기장의 세기에 따라 그 유체의 점성이 변화하는 물질이다.

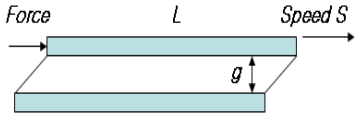


Fig. 1 Model of direct-shear mode

MR 유체 내에서 발생하는 전단응력이 항복응력 이상일 때는 Bingham plastic 모델처럼 거동하게 되고,

$$\tau = \tau_y + \eta\gamma' \qquad (1)$$

의 관계식이 성리하고, 발생하는 전단응력이 항복응력보다 작을 때에는

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

의 관계식이 성립하며, 점탄성적으로 거동하게 된다. 여기서, G는 재료의 complex modulus로써 자기장에 의존적인 값이고, η는 자기장이 인가되지 않을 때의 점성계수이다.

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

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

와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서, S는 상대 속도이고, A=Lw로써, 면적을 뜻한다. 여기서, w는 전단면의 폭이다.[2]

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

본 논문에서는 영구자석을 이용하여 회전형 MR 브레이크를 고안해 보았다. 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, MR유체를 사용하여 브레이크로 또는 감속기로써 작용하게 하였다.

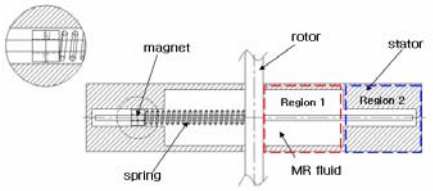
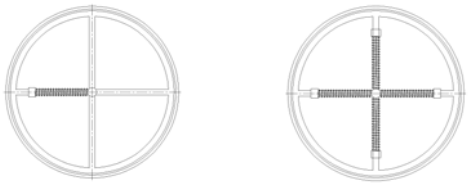


Fig. 2 MR rotary brake system

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. 따라서, 스프링의 강성과 region 1과 region 2의 위치의 적절한 설계에 의해 어떤 특정 회전속도 이상에서 제동력 및 감쇠력이 증가하는 수동형 브레이크 또는 댐퍼를 설계할 수 있다. Fig. 3에 영구자석이 장착된 브레이크 회전자를 보여주고 있다. FIg. 3(a)는 가장 기본적인 형태로써 영구자석을 하나만 사용한 경우이다. 영구자석의 수가 증가할수록 브레이크의 제동력은 증가한다. 본 연구에서는 Fig.3 (b)와 같이 영구자석이 4개인 모델에 대해 해석을 수행해 보기로 하였다.



(a) (b)

Fig. 3 Shape of the rotors

3. 시스템 해석

2절에서 설명한바와 같이, MR 유체는 자기장이 인가될 시에 그 점성이 바뀌는 특성을 가지고 있다. 따라서, MR 유체를 이용한 시스템을 해석 시에는 전자기장에 대한 해석을 수행하여야 한다. 이를 위하여, 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 MR 브레이크 시스템내의 전자기장 분포를 해석해 보기로 하였다.

Fig.4는 회전형 MR 브레이크의 1/2 2D모델을 보여주고 있다. region 1에서는 회전자와 스테이터 사이 공극에서의 자계의 세기가 약해야하므로, 이 영역에서는 스테이터의 재질을 비자성체로 정하였으며, 브레이크 작용이 일어나는 region 2에서는 회전자와 스테이터 간 공극에서의 자계의 세기가 커야 하므로, 스테이터의 재질을 자성체로 설정하였다. 자석의 초기위치는 중심선에서

반경방향으로 5mm 떨어져 있다고 가정하였으며, 초기위치에서 반경방향 변위(dr)에 따른 전자기장 해석을 수행하였다. 자석의 크기를 Table 1과 같이 2가지 경우로 나누어 해석을 수행해 보았다. Fig.5에 유한요소 해석결과를 보여주고 있다. Fig. 5(a)는 region의 한 위치에서의 자속밀도를, Fig. 5(b)는 region 2에서의 자속밀도 분포를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 초기 예상과 같이 region 2에서 자속밀도의 세기가 크게 나옴을 알 수 있다.

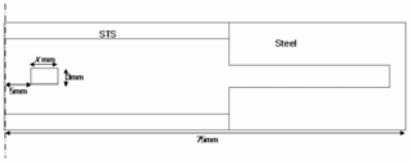
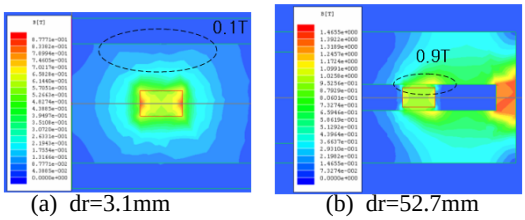


Fig. 4 2D model of the rotary MR brake



(a) dr=3.1mm (b) dr=52.7mm

Fig. 5 Flux density distribution of case 1

Table 1 Analysis cases

	case 1	case 2
magnet size	5mm*5mm*3mm	10mm*5mm*3mm

Table 2에는 case 1과 case 2에서 자석과 스테이터 사이 간극에서의 자기장의 세기를 보여주고 있다.

Table 2 FE Analysis results

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

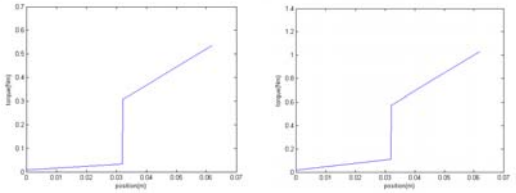
MR 유체에서 전단응력은

$$\tau = f(B) \tag{4}$$

와 같이 자기장의 세기에 의해 결정되어진다. 유한요소법을 이용하여 자기장의 세기를 구했으므로, 회전형 MR 브레이크에서 4개의 자석에 의해 발생하는 토크는 식(3)을 이용하면,

$$T = 8xF = 8x\left(\int^{A} \frac{\eta S}{g} dA + \int^{A} \tau_y dA\right) \tag{5}$$

와 같이 구할 수 있다. 식(5)를 이용하여 각 case에 대한 토크를 구해보면, Fig. 6과 같이 된다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 회전수가 증가하여 영구자석의 변위가 어느 값 이상이 되면, MR 브레이크의 제동력이 크게 작용함을 알 수 있다.



(c) case 1 (d) case 2

Fig. 6 Torque calculation of MR rotary brake

Fig. 7은 시스템의 동역학적 모델을 보여준다.

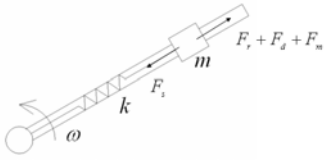


Fig. 7 Dynamic model

회전자가 각속도 ω로 회전시에 영구자석에 작용하는 힘은

$$F_s = F_r + F_d + F_e \tag{6}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, F_s: 스프링력, F_r: 원심력, F_d: MR 유체에 의한 저항력, F_e: 전자장에 의한 힘이다. 식(6)은

$$k\Delta x = mr\omega^2 + 2\tau A + F_e \tag{7}$$

와 같이 쓸 수 있고, 여기서 스프링 상수 k는

$$k = \frac{mr\omega^2 + 2\tau A + F_e}{\Delta x} \tag{8}$$

와 같이 나타낼 수 있다.

여기서 전자기장에 의한 힘 Fe는 유한요소법을 이용한 과도해석을 통해서 구했으며, case 1에 대한 해석결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 과도해석은 영구자석이 60mm/sec의 속도로 움직일 때의 결과이다.

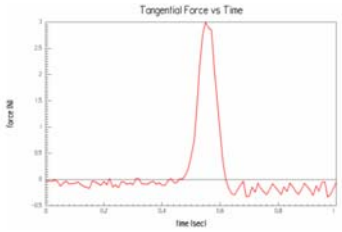


Fig. 8 Transient analysis result

4. 결론

본 논문에서는 영구자석을 이용한 새로운 회전형 MR 브레이크를 제안하고, 해석 및 설계를 하였다. 해석결과 제안된 회전형 MR 브레이크는 초기 예상과 같이, 영구자석의 위치에 따라 일정 영역(region 1)에서는 제동력이 거의 없고, 회전속도가 증가함에 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.

참고문헌

(1) 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

(2) 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.