Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 27(2) : 175~181, 2017
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2017.27.2.175

한국소음진동공학회논문집 제 27 권 제 2 호, pp. 175~181, 2017
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

자기 코어 형상에 따른 MR 브레이크의 성능 예측

Performance Estimation of Magneto-rheological Brake with Different Magnetic Core Shapes

박 정 민* · 최 승 복** · 손 정 우†

Jiong Min Park, Seung-Bok Choi and Jung Woo Sohn

(Received November 22, 2016 ; Revised January 17, 2017 ; Accepted January 17, 2017)

Key Words : MR Fluid(자기 유동유체), MR Brake(MR 브레이크), Magnetic Core(자기 코어)

ABSTRACT

In the present work, to achieve high braking performance with restricted size, characteristics of magneto-rheological (MR) fluid brake is numerically investigated considering different magnetic core shapes. As a first step, structural configuration of the MR brakes are proposed with four different magnetic core shapes, such as single flat, single inclined, dual flat and dual inclined. To estimate braking performance of the proposed MR brakes, electromagnetic analysis is carried out and the results of magnetic field intensity distribution are observed. Based on the electromagnetic analysis results, braking torque of the MR brake is estimated according to magnitude of current input and results are discussed. It is observed that enhanced braking torque can be achieved by adopting the modified magnetic core shape under limited small size of the MR brake.

1. 서 론

MR 유체는 인가하는 외부 자기장의 크기에 따라 특성이 변하는 지능 유체로 실리콘 오일과 같은 베이스 유체에 자성 입자가 분사되어 있다. 자기장 무부하시에는 뉴턴(Newtonian) 유체의 특성을 갖고 있으나, 자기장 부하시에는 자성 입자들이 체인 구조를 형성하고 항복 응력이 증가하는 빙햄(Bingham) 유체의 특성을 갖게 된다. MR 유체를 이용한 기계 장치의 개발에 대한 연구가 다양한 분야에서 진행되고 있으며, 이러한 MR 기계 장치는 빠른 응답 특성, 낮은 소비 전력, 장치 구조의 단순화 등의 장점을 갖게 된다. MR 효과를 이용한 대표적인 기계 장치로는 MR 댐퍼, MR 마운트, MR 클러치, MR 브레이크 등이 있다. MR 댐퍼는 가장 많은 연구가 수행되고 있는 장치로, 승용차용 MR 댐퍼는 2000년대 초반 상용 제품이 출시되어, 현재 고급 승용차에 장착되어 사용되고 있다[1~3].

MR 마운트의 경우, 승용차의 엔진 마운트에 적용하기 위한 연구가 다양하게 진행되어 왔으며, 최근에는 자동차 트랜스미션의 진동 절연을 위한 MR 마운트가 개발되어 상용화 되었다[4,5]. MR 클러치와 브레이크는 간단한 구조에서도 효과적인 회전력 전달이나 회전력 감소가 가능하여 다양한 분야에 응용하기 위한 연구가 진행되고 있다[6,7].

† Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology
E-mail: jwsohn@kumoh.ac.kr
* Member, Graduate Student, Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology
** Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

최근에는 햅틱 액추에이터로 MR 브레이크를 이용하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. Kim 등은 햅틱 시스템의 힘 반영 장치에 적용하기 위한 소형 MR 브레이크를 제안하고 실험을 통하여 성능을 측정하였다[8]. 이 연구에서는 회전자를 얇게 설계하고 회전자에 다수의 슬릿을 형상하여 추가적인 항복 응력이 발생할 수 있도록 하였다. Ann 등은 햅틱 시스템에 적용하기 위하여 능동 구동기인 직류 모터와 반능동 구동기인 MR 브레이크로 이루어진 하이브리드 구동기의 힘 제어 방법을 제안하고, 실험을 통해 성능과 안정성을 확인하였다[9]. MR 브레이크와 직류 모터를 병렬로 연결하여 직류 모터의 불안정성을 보완할 수 있도록 하였다. Yoon 등은 하지 근력을 증진시키기 위한 자전거에 MR 브레이크를 적용하여 사용자의 좌우 하지 근력의 차이에 따라 제동력을 조절하여 원활한 주행을 할 수 있도록 하였다[10]. Noh 등은 상용 가속 페달과 MR 브레이크를 연결하여 주행 중 기어 변속의 최적 타이밍을 운전자에 전달하는 햅틱 장치를 제안하고, 실험을 통하여 성능을 검증하였다[11]. Park 등은 하지 재활 운동 기구에 적용하기 위한 소형 MR 브레이크를 설계하고 해석과 실험을 통하여 성능을 검증하였다[12]. Nguyen 등은 햅틱 그리퍼에 적용하기 위한 디스크 형태, 수정된 드럼 형태, 하이브리드 형태의 세 가지 MR 브레이크를 제안하고 유한요소해석을 통하여 브레이크의 중량을 최소화 하면서 높은 토크를 발생시킬 수 있는 설계 파라미터를 최적화하였다[13]. 이러한 기존 연구에서는 향상된 성능을 갖는 MR 브레이크의 적용에 많은 관심을 가지고 있었으며, 제한된 설계 파라미터를 이용한 MR 브레이크의 설계와 성능 평가에 대한 연구는 수행되지 않았다.

이 연구에서는 제한된 크기에서 높은 브레이크 성능을 얻기 위해, 다양한 내부 자기 코어 형상을 제안하고 그에 따른 MR 브레이크의 성능 변화를 고찰한다. 먼저 네 가지 다른 형태의 자기 코어를 설계하고 전자기 해석을 수행하여 자기 코어 형상에 따른 전자기 특성 변화를 확인한다. 전자기 해석 결과를 바탕으로 입력 전류의 크기에 따른 브레이크 토크를 계산하고, 자기 코어 형상에 따른 토크 크기의 변화를 확인하여, 제안된 MR 브레이크의 우수성을 확인한다.

2. 시스템 모델

이 연구에서 개발된 MR 브레이크를 적용하고자 하는 햅틱 마스터 장치의 구조 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 이 햅틱 마스터 장치는 슬레이브 로봇의 엔드이펙터(end effector)를 제어하기 위한 것으로 손목의 3자유도 회전과 그러퍼의 1자유도 운동이 가능한 형태이며 4개의 햅틱 액추에이터가 각 회전축에 사용되도록 설계되었다. 작업자에게 햅틱 효과를 효율적으로 전달하기 위하여 마스터 장치의 저중량, 저관성 설계가 필요한데, 햅틱 액추에이터 또한 소형이면서 저중량으로 설계되어야 한다. 이에 이 연구에서는 기어와 같은 부가적인 기계 장치가 필요 없고, 소형으로 제작이 가능한 MR 브레이크를 적용하고자 한다.

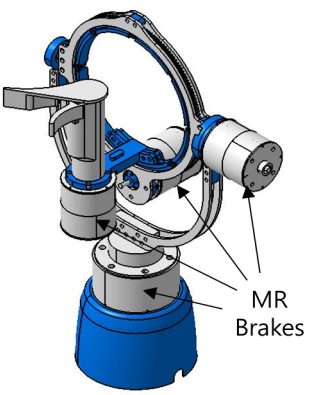


Fig. 1 Structural configuration of haptic master device

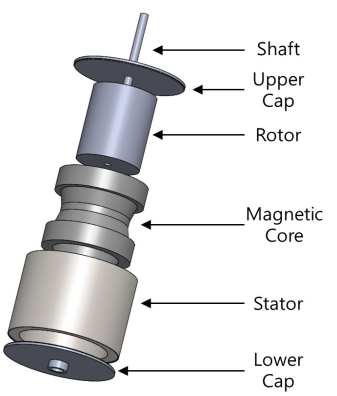


Fig. 2 Exploded view of the proposed MR brake

이 연구에서 개발된 MR 브레이크의 구조를 Fig. 2에 나타내었다. MR 브레이크는 크게 디스크 형태와 드럼 형태로 구분할 수 있는데, 일반적으로 디스크 형태는 반경이 큰 경우에 큰 힘을 낼 수 있는 특성을 가진다. 이에 이 연구에서는 반경이 작은 형태로 제작이 가능한 드럼 형태의 MR 브레이크를 고려하였다. 회전축과 회전체는 결합되어 회전하게 되고 자기 코어와 회전체 사이에는 MR 유체가 충전되어 자기장 인가에 따라 MR 효과가 발생하게 된다. 자기 코어에는 코일이 권선되고 고정자에 의해 고정된다. 이 연구에서는 다양한 형태의 자기 코어에 대하여 발생 가능한 MR 효과를 고찰하고 브레이크 토크를 예측하고자 한다. 상부와 하부의 캡은 고정자와 체결된다. 회전축과 상부와 하부 캡은 알루미늄을 고려하였으며, 회전자, 고정자, 자기 코어는 강자성체인 S45C를 고려하였다. 각 부분의 재료와 밀도를 Table 1에 정리하였다.

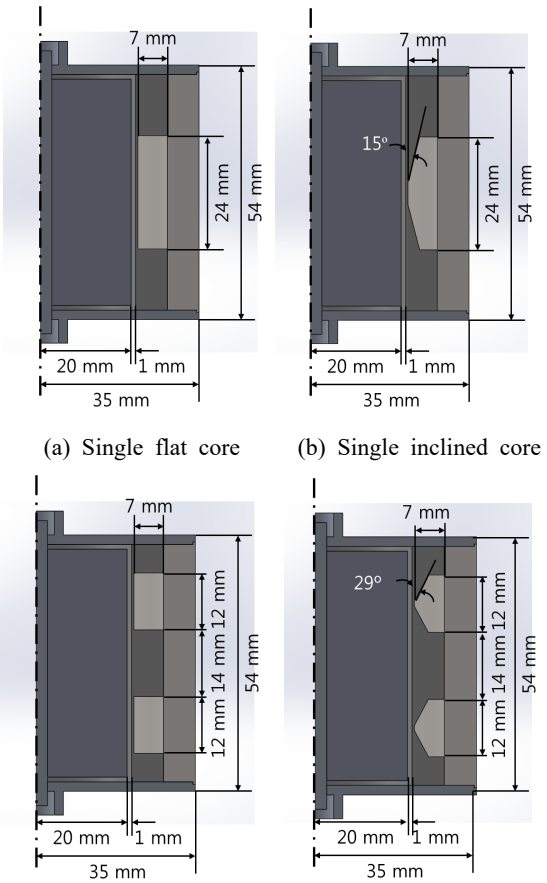
이 연구에서 제안된 네 가지 다른 형상의 자기 코어를 갖는 MR 브레이크의 구조를 Fig. 3에 나타내었다. 단일 코어와 이중 코어를 고려하였고, MR 유체와 닿는 면이 직선 형태인 평평한(flat) 코어와 일정 각도를 갖고 있는 형태인 기울어진(inclined)

Table 1 Material properties of MR brake

Part	Material	Density
Shaft	Aluminum	3887 kg/m^3
Upper cap		
Lower cap		
Rotor	SM45C	7850 kg/m^3
Stator		
Magnetic core		
Coil	Copper alloy	8300 kg/m^3

Table 2 Material properties of MR fluid[14]

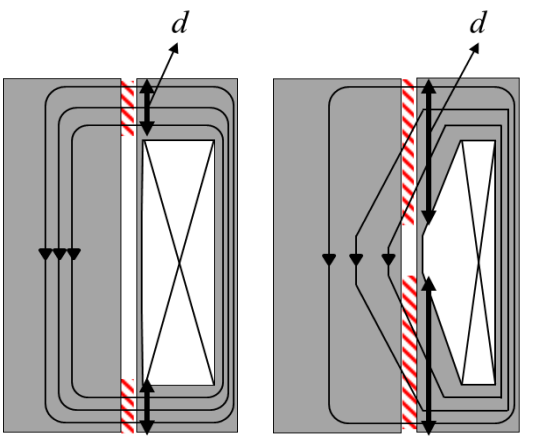
Name	MRF-132DG
Appearance	Dark gray liquid
Viscosity	0.112 Pa-s @40 ºC
Density	2.95~3.15 g/cm^3
Operating temperature	-40~ + 130 ºC



(a) Single flat core (b) Single inclined core

(c) Dual flat cores (d) Dual inclined cores

Fig. 3 Sectional view and geometric dimensions of the proposed MR brakes



(a) single flat core (b) single inclined core

Fig. 4 Schematic diagram of the magnetic structure

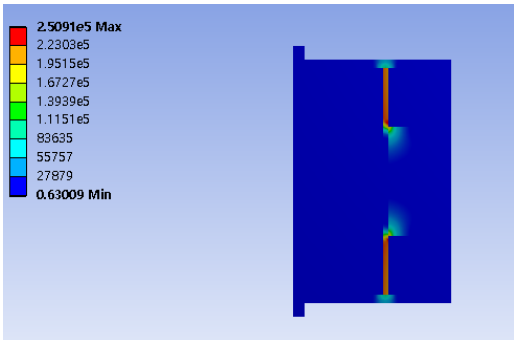
코어를 고려하여, 전체 4가지 형태를 설계하였다. 이러한 변형된 형태의 코어를 고려한 것은 Fig. 4와 같이 자기력 선속(자속)의 경로를 확대하여 MR 효과가 발생하는 영역(d)을 증가시키고 향상된 브레이크 토크를 얻기 위해서이다. 같은 형상의 코어의 경우 단일 코어와 이중 코어는 코일의 감긴 수를 동일하게 유지하기 위하여 코일이 감기는 부분의 부피가 동일하도록 설계하였다. 또한, 코어에 보빈 없이 코일을 직접 권선하는 형태를 고려하였는데, 기존 연구를 통하여 보빈이 없는 경우에도 성능에 차이가 없음을 확인하였다[15]. MR 브레이크의 높이는 54 mm이고, 반지름은 35 mm로 제한하였다. 회전체의 반지름은 20 mm이며, MR 유체가 충전되는 회전체와 코어 사이의 간격은 1 mm, 간극의 길이는 50 mm이다.

3. 성능 해석

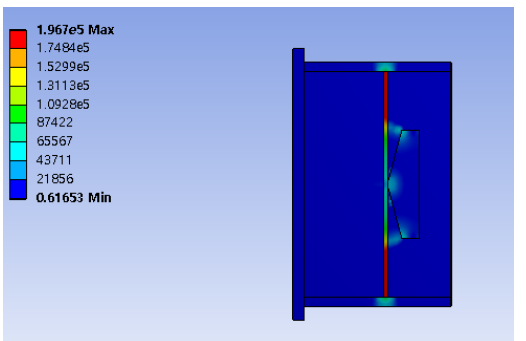
이 연구에서는 ANSYS Workbench를 사용하여 제안된 MR 브레이크의 특성을 확인하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 구해진 자계 강도를 Fig. 5에 나타내었다. 코어 형상에 따라 자계 강도의 분포가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 평평한 형태의 코어를 적용한 경우에는 코어의 위쪽과 아래쪽 영역에서만 MR 효과가 발생하지만, Fig. 5(b)와 같이 기울어진 형태의 코어를 적용한 경우에는 MR 유체가 있는 전체 영역에서 MR 효과가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 평평한 형태의 코어를 갖는 브레이크의 경우 최대 0.25e6 A/m, 전체적으로는 0.19e6 A/m ~ 0.22e6 A/m의 자계 강도가 발생하지만, 기울어진 형태의 코어에서는 최대 0.19e6 A/m, 전체 영역에서는 0.06e6 A/m ~ 0.15e6 A/m의 자계 강도가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 기울어진 형태의 코어를 적용할 경우, 자계 강도의 최댓값은 감소하지만, 자계 강도가 발생하는 영역은 증가한 것으로 판단할 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 5(c)와 (d)에서 보는 바와 같이 이중 코어를 적용한 경우에도 동일하게 나타난다.

MR 브레이크에 발생하는 전체 토크 T_{Total}는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

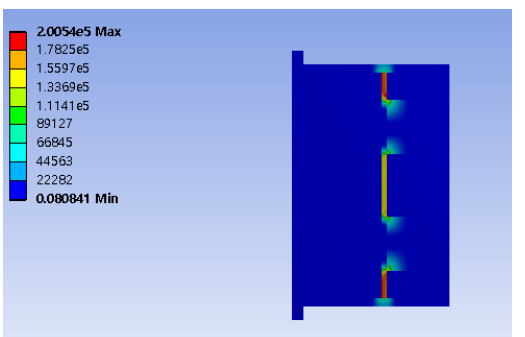
$$T_{Total} = T_{MR} + T_{\eta} \tag{1}$$



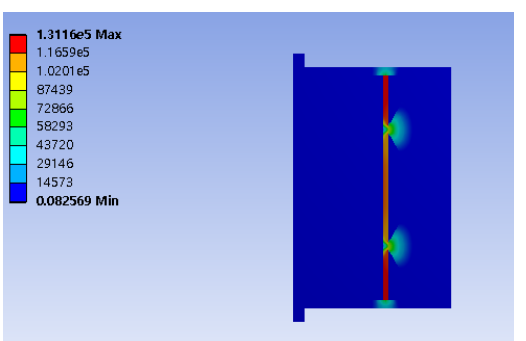
(a) Single flat core



(b) Single inclined core



(c) Dual flat cores



(d) Dual inclined cores

Fig. 5 Magnetic field intensity at input current of 3A

여기서, T_{MR} 은 MR 효과에 의해 발생되는 제어 가능한 토크이고, T_η 는 MR 유체에 점성에 의한 토크이며, 실링(sealing)과 베어링(bearing)에서 발생하는 장치의 기계적 마찰에 의한 토크는 무시하였다. 이 연구에서 고려된 드럼 타입 MR 브레이크의 경우, 제어 가능 토크 T_{MR} 과 점성에 의한 토크 T_η 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{MR} = 4\pi R^2 d\tau_y(B) \tag{2}$$

$$T_\eta = \frac{4\pi\eta R^3 d\dot{\theta}}{g} \tag{3}$$

여기서, η는 유체의 점성, R은 회전체의 반지름, g는 회전체와 코어의 간극, d는 간극에서 MR 효과가 발생하는 부분의 전체 길이, $\dot{\theta}$은 회전체의 각속도이다. 또한 $\tau_y(B)$는 MR 유체의 항복 응력으로 다음과 같이 자속 밀도 B의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\tau_y(B) = A_0 + A_1 B + A_2 B^2 + A_3 B^3 + A_4 B^4 + A_5 B^5 \tag{4}$$

식 (4)에서 각 항의 계수 A_i는 MR 유체의 종류에 따라 결정되며, 실험적으로 구해지는 값이다.

제안된 4가지 MR 브레이크에 대하여, 입력 전류를 0.5 A에서 3.0 A까지 0.5 A씩 증가시키면서 MR 유체에 형성되는 자속 밀도의 크기를 Table 3에 나타내었다. 자속 밀도는 회전체와 고정체 사이 간극에서 위치에 따라 다른 값을 가지게 되지만, 이 연구에서는 간극에서 MR 효과가 발생하는 부분의 전체 길이에 대한 평균값을 대푯값으로 사용하였다. Table 3에서 기울어진 형태의 코어를 적용할 경우, 자속 밀도의 크기가 평형한 코어를 적용한 경우보다 감소하는 것을 확인할 수 있다. Table 3의 결과를 바탕으로 식 (2)와 (4)를 이용하여 MR 효과에 의해 발생하는 제어 가능한 브레이크 토크를 계산하고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 기울어진 이중 코어의 경우 3.0 A 입력에서 최대 2.8 Nm의 토크가 발생하였다. 입력 전류가 2.0 A까지는 기울어진 단일 코어 형상에서 가장 큰 브레이크 토크가 발생하고, 입력 전류가 2.5 A 이상의 경우에는 기울어진 이중 코어 형상에서 가장 큰 토크가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 기울어진 단일 코어의 경우, 2.0 A 이상에서는 토크의 크기가 증가하지 않는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 자기 포화에 의한 결과로 판단된다. 입력 전류 2.5 A와 3.0 A인 경우에 대하여 기울어진 단일 코어를 갖는 브레이크의 자속 밀도 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 코어 주변으로 붉은 색의 포화 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 입력 전류를 증가시켜도 자속 밀도는 더 이상 증가하지 않으므로, MR 유체의 항복 응력도 증가하지 않고, 토크의 크기도 증가하지 않게 된다. 기울어진 이중 코어를 갖는 브레이크의 자속 밀도 분포는 Fig. 8에 나타내었다. 기울어진 이중 코어를 갖는 MR 브레이크의 경우에는 2.5 A 이상의 입력 전류에서도 토크가 지속적으로 증가하는데, 이는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 입력 전류가 증가하여도 자기 포화가 발생하지 않으므로 MR 유체의 항복 응력이 계속 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 단일 코어와 이중 코어의 경우 모두 평평한 형태보다 기울어진 형태의 코어에서 더 큰 토크가 발생하는 것을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 이 논문에서 제안된 기울어진 형태의 코어를 갖는 MR 브레이크의 경우, Table 3에 나타난 바와 같이 자속 밀도의 크기가 감소함에 따라, 식 (2)와 (4)에서 항복 응력 τ_y 는 일부 감소하지만, MR 효과가 발생하는 영역의 길이인 d값이 증가하여 제어 가능한 브레이크 토크가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 이 연구에서는 MR 효과가 발생하는 영역의 길이인 d 값에 대하여, 평평한 형태 코어의 경우 전체 간극 길이에서 코어의 길이를 뺀 길이의 1/2을 고려하였고, 기울어진 형태 코어의 경우 전체 간극 길이의 1/2을 고려하였다. 평평한 형태의 이중 코어를 갖는 MR 브레이크에서 가장 작은 크기의 토크가 발생하는 것은 Table 3에서 나타난 바와 같이 자속 밀도가 가장 낮게 발생하여 항복 응력 τ_y 가 감소하지

Table 3 Magnetic flux density (unit: T)

Current input	Single flat	Single inclined	Dual flat	Dual inclined
0.5 A	0.34	0.33	0.23	0.21
1.0 A	0.57	0.49	0.40	0.37
1.5 A	0.74	0.58	0.53	0.49
2.0 A	0.85	0.63	0.65	0.59
2.5 A	0.94	0.65	0.74	0.66
3.0 A	1.01	0.66	0.81	0.72

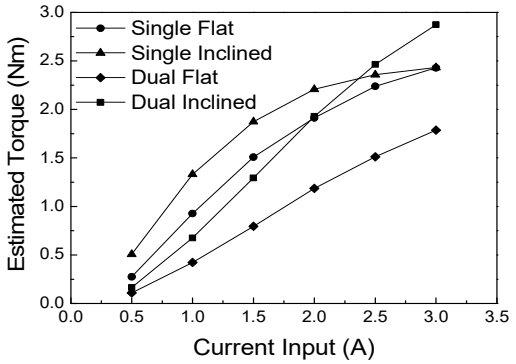
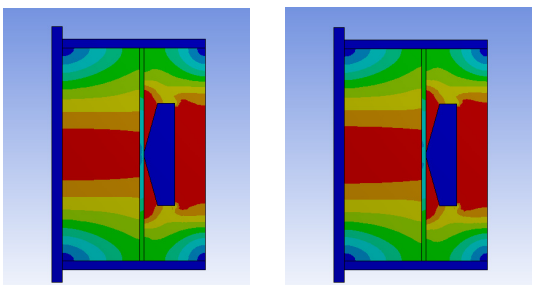
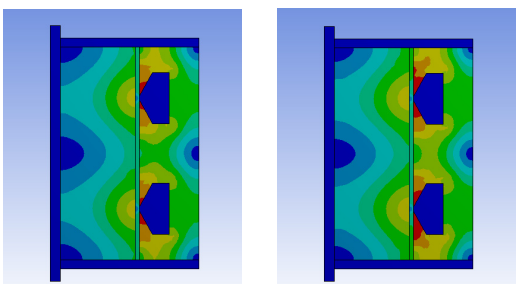


Fig. 6 Estimated controllable braking torque according to current input



(a) 2.5 A (b) 3.0 A

Fig. 7 Magnetic flux density distribution with single inclined core according to current input



(a) 2.5 A (b) 3.0 A

Fig. 8 Magnetic flux density distribution with dual inclined core according to current input

만, MR 효과가 발생하는 영역의 길이인 d값은 증가하지 않기 때문이다.

4. 결 론

이 연구에서는 제한된 크기의 MR 브레이크에서 높은 브레이크 성능을 얻기 위하여 수정된 형상을 갖는 자기 코어를 제안하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 성능을 예측하였다. 네 가지 종류의 자기 코어 형상을 제안하고, 유한요소 해석을 통하여 자기 코어의 형상에 따른 전자기 특성의 변화를 관찰하였다. 전자기 해석 결과를 이용하여, 발생 가능한 브레이크 토크를 계산하였다. MR 유체가 충전된 부분과 닿는 면이 기울어진 형태를 갖는 이중 코어 형상에서 최대 브레이크 토크가 발생하고 입력 전류에 대한 토크 크기의 증가가 선형적인 특성을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 기울어진 형태의 단일 코어의 경우 입력 전류 2.0 A 이하에서는 큰 브레이크 토크가 발생하지만, 자기 포화가 발생하여 입력 전류 2.0 A 이상에서는 토크가 증가하지 않게 되는 특성을 확인하였다. 코어 형상과 브레이크 설계 인자에 대한 최적화를 수행하면 보다 향상된 브레이크 토크를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 기울어진 형태를 갖는 이중 코어의 기울어진 각도와 두 코어 사이의 거리 등의 설계 파라미터에 대한 최적화를 수행할 예정이다. 다음 연구에서는 이 연구의 결과를 바탕으로 실제 MR 브레이크를 제작하고 실험을 통한 평가를 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2014R1A1A2057625).

References

(1) Dyke, S. J., Spencer, Jr. B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1998, An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection, Smart Materials and Structures, Vol. 7, No. 5, pp. 693~703.

(2) Dutta, S., Han, C., Lee, T. and Choi, S. B., 2016, A Study on Vibration Control Performance of Macpherson Type Semi-active Suspension System, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 157~164.

(3) Sohn, J. W., Oh, J. S. and Choi, S. B., 2015, Damping Force Characteristics of MR Damper with Additional Flow Path, Transactions of the Korean

Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 426~431.

(4) Lee, D. and Choi, S. B., 2010, Control of Active Engine Mount System Featuring MR Fluid and Piezostack via HILS, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 122~128.

(5) Daniel, B. and Carlson, J. D., 2009, Performance Characteristics of Prototype MR Engine Mounts Containing LORD Glycol MR Fluids, Journal of Physics, Conference Series, Vol. 129, No. 1, pp. 012035.

(6) Neelakantan, V. A. and Washington, G. N., 2005, Modeling and Reduction of Centrifuging in Magnetorheological Transmission Clutches for Automotive Applications, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16, No. 9, pp. 703~711.

(7) Sohn, J. W., Jeon, J., Nguyen, Q. H. and Choi, S. B., 2015, Optimal Design of Disk-type Magneto-rheological Brake for Mid-sized Motorcycle: Experimental Evaluation, Smart Materials and Structures, Vol. 24, No. 8, pp. 085009.

(8) Kim, S. J., Cho, C. H., Lee, J. M., Hwang, Y. and Kim, M., 2004, A Small MR Brake for Force Feedback Devices, Proceedings of KSNVE Annual Spring Conference, pp. 269~172.

(9) Ann, J., Choy, I. and Kwon, D. S., 2006, Force Control of Hybrid Actuator Comprising DC Motor and MR Brake, The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 11, No. 1, pp. 46~55.

(10) Yoon, Y. I., Kwon, T. K., Kim D. W., Kim, J. J. and Kim N. G., 2007, Development of a Health Bicycle for Improving the Muscle Strength of Lower Limb Using MR Rotary Brake, Journal of Biomedical Engineering Research, Vol. 28, No. 6, pp. 832~839.

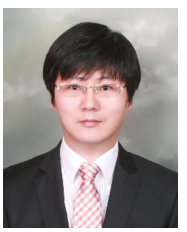
(11) Noh, K. W., Han, Y. M., and Choi, S. B., Design and Control Haptic Cue Device for Accelerator Pedal Using MR Brake, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 5, pp. 516~522.

(12) Park, W. C., Lee, H. C. and Kim, I. G., 2012, Study on the Compact MR Fluid Brake for the Training and Sporting Equipment for Leg Rehabilitation, Journal of the Korea Academia-industrial Cooperation Society, Vol. 13, No. 7, pp. 2878~2885.

(13) Nguyen Q. H., Oh, J. S. and Choi, S. B., 2012, Optimal Design of a Magnetorheological Haptic Gripper Reflecting Grasping Force and Rolling Moment from Telemanipulator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 459~467.

(14) Lord Technical Data, MFG-132DG Magneto-rheological Fluid, http://www.lord.com.

(15) Nguyen, Q. H., Choi, S. B. and Woo, J. K, Optimal Design of Magnetorheological Fluid-based Dampers for Front-loaded Washing Machines, Proceeding, of Institution of Mechanical Engineers Park C-Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 228, No. 2, pp. 294~306.



Jung Woo Sohn received his Ph.D. degree in the Department of Mechanical Engineering from Inha University in 2008. He is now working as an associate professor in the Department of Mechanical Design Engineering of Kumoh National Institute of Technology. He has interest on the design and control of smart structures and systems using smart materials such as piezoelectric materials, shape memory alloys and ER/MR fluids.

Seung-Bok Choi received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Inha University in 1979, MS degree and Ph.D. degrees from Michigan State University in 1986 and 1990, respectively. He is currently Dean of the Graduate School and fellow professor in Inha University. He is a fellow of NAEK(National Academy Engineering of Korea), KAST(The Korean Academy of Science and Technology). His research interests are robust controller design and control of various systems using smart actuators.