



# 하우징 위에 전자석코일을 갖고 있는 MR 브레이크의 최적설계

## Optimal Design of MR Brake with Magnetic Coils Located on the Housings

구 오 흥\* · 한 철 희\*\* · 이 태 훈\*\* · 안 진 희\*\* · 최 승 복†  
Quoc Hung Nguyen\*, Chulhee Han\*\*, Tae-Hoon Lee\*\*,  
Jin-Hee An\*\* and Seung-Bok Choi†

(Received February 13, 2018 ; Revised November 27, 2018 ; Accepted November 27, 2018)

**Key Words** : Magneto-rheological Fluid(MR 유체), MR Brake(MR 브레이크), Magnetic Coil(자기 코일), Multiple Coils(다중 코일), Optimal Design(최적설계)

### ABSTRACT

This work presents a new design structure for a magneto-rheological brake (MRB) with magnetic coils located on either side of the housing. With this structural configuration, the designed MRB is expected to provide higher braking torque at a more compact brake unit size than can be offered by conventional MRBs in which the magnetic wire coils are wound onto the non-magnetic bobbin. The working principle underlying MRBs is briefly outlined, and thereafter, the Bingham-plastic rheological model of MR fluid braking torque is used to calculate the braking torque of the MRBs under consideration. To determine the principal design parameters, an optimization is undertaken by considering the minimum mass of the new brake necessary to meet the torque requirement. To demonstrate some of the intended merits of the proposed design configuration, a comparison between the proposed MRB and the existing conventional MRBs is drawn. It is shown that the proposed MRB can provide both a much higher torque level and a wider torque control range than can be achieved by conventional MRBs.

### 1. 서 론

최근 들어 MR(magneto-rheological) 유체가 차량 현가시스템 등 여러 산업분야에서 실용화가 이루어짐에 따라, 성능이 우수한 MR 유체의 개발은 물론 이를 이용한 각종 제어시스템 개발이 한창 진행 중이다. 그 중에서 이미 상용화가 되어 가장 많이 연구되고 있는 MR 댐퍼의 경우는 전단 모드형, 유동 모드형, 그리고 두 작

동모드를 결합한 하이브리드 모드형 등 다양한 설계구조가 연구되고 있다. MR 댐퍼 이외도 실용화 단계에 있는 MR 클러치, MR 브레이크, MR 서보밸브 등 다양한 응용장치 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다<sup>(1-8)</sup>. 이 연구에서는 차량을 비롯한 여러 분야에서 사용되고 있는 유압브레이크 및 마찰브레이크를 대체할 수 있는 MR 브레이크 설계에 대하여 연구하고자 한다. 잘 알려진 바와 같이 MRB(magneto-rheological brake)의 장점은 시스템의 작동조건에 따라 브레이크 토크를 간

† Corresponding Author ; Fellow Member, Mechanical Engineering of Inha University

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

\* Division of Computational Mechatronics, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam

\*\* Mechanical Engineering of Inha University

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

단한 제어로직으로 쉽게 제어할 수 있다는 점이다. 다시 말하여, 유압브레이크나 마찰브레이크가 가지고 있지 못한 실시간 피드백제어시스템을 통하여 언제나 원하는 브레이크 토크를 재생할 수 있다는 것이 가장 큰 특징이다. 또한 기존 브레이크 시스템에 비하여 브레이크 작동시간이 매우 빠르기 때문에 매우 광범위한 동적 제어영역(dynamic controllable range)을 가지고 있어 작동속도가 낮은 시스템에서부터 매우 높은 시스템까지 응용범위가 매우 넓다.

MRB의 성능을 향상시키기 위하여 지금까지 제안된 설계구조를 보면, 디스크형<sup>(9)</sup>, 드럼형<sup>(10)</sup>, 디스크-드럼 하이브리드형<sup>(11)</sup>, T-형<sup>(12)</sup> 등이 있으며 이들 MRB에 대한 최적설계에 대한 연구가 비교적 많이 수행되어 왔다. 또한 MRB만의 고유특성인 브레이크 토크제어에 대한 연구도 여러 가지 제어로직을 통하여 실현되어 왔다<sup>(13)</sup>. 이 연구에서는 제어보다는 설계관점에서 MRB의 토크레벨 성능을 향상시키는 연구에 초점을 두고 있다. 특히 기존 디스크형 혹은 드럼형 MRB와 동일 혹은 작은 사이즈로 보다 큰 토크발생을 할 수 있는 설계구조를 제안하고자 한다. 이 설계구조에서는 기존 MRB에서 발생하는 자속 흐름의 막힘 현상(bottle-neck of the magnetic flux) 문제를 해결하기 위하여 전자석 코일이 MRB 하우징 위에 직접 위치하도록 하였다. 또한 전자석 코일의 개수를 다양하게 할 수 있도록 하여 시스템에 따라 요구되는 토크레벨을 만족할 수 있도록 새로운 설계구조를 제안하였다. 다시 말하여 전자석 코일이 1개인 경우에는 “single side-coil MRB”로 하고 여러 개의 전자석 코일이 위치하는 경우를 “multi side-coil MRB”로 명명하여 브레이크 토크 성능을 해석하고자 한다.

이 연구를 수행하는 가장 중요한 목적은 가능한 한 작은 크기의 MRB를 이용하여 현재의 MR 유체 특성으로 얼마나 높은 브레이크 토크를 얻을 수 있는지, 따라서 어느 분야에 실용화가 가능한지 파악하고자 하는 것이다. 이를 위하여 이 연구에서는 제안된 MRB의 토크계산을 위한 수학적 모델을 유도하고 최적설계를 수행한다. 최적설계의 목적함수는 요구토크(required or desired torque)를 얻기 위하여 가장 작은 MRB무게로 선택하였으며, 이를 결정하는 주된 설계변수로는 디스크, 하우징, 샤프트 무게 등이 고려되었다. 최적설계를 통하여 결정된 설계변수를 이용하여 브레이크에 분포되는 자기장세기를 분석하고 여러 조건에서 브레이크 토크를 계산한 후, 제안한 MRB의 우수성을 보이기 위

하여 기존의 MRB와 성능해석을 비교 분석하였다.

## 2. MRB의 토크 계산

우선 MRB의 작동원리를 이해하기 위하여 기존에 많이 연구되어왔던 디스크형 MRB의 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 구동축의 회전에 의하여 토크발생이 일어나면 MR 유체가 흐르는 덕트(혹은 gap)에 자기장이 형성되어 MRF의 입자들이 체인을 형성하고, 이에 따른 유체흐름의 저항력(resistance force)이 발생하여 이로 인한 브레이크 토크가 발생하게 된다. 와이어 코일이 비 자성체인 보빈(bobbin)에 감겨있기 때문에 자속의 흐름이 원활하지 못하여 높은 전류공급에도 불구하고 낮은 브레이크 토크가 발생한다. 반면에 Fig. 2에 나타낸 이 연구에서 제안하는 MRB의 경우에는 자기장 형성이 하우징과 같은 방향으로 형성되고 하우징 위에 코일이 직접 위치하기 때문에 작은 크기로의 설계가 가능하고 자속의 흐름도 원활하며, 낮은 전류공급에도 큰 토크를 얻을 수 있다. 이 연구에서는 기존 MRB와의 비교 연구를 수행하기 위하여 1개 및 3개의 코일 전자석이 하우징 위에 설치된 경우를 고려하여 브레이크 토크 특성을 분석하였다.

MR 유체를 방형유체(Bingham fluid)로 가정하고 브

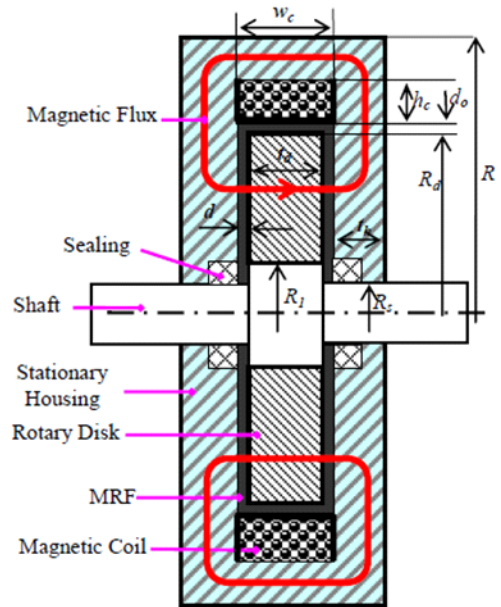
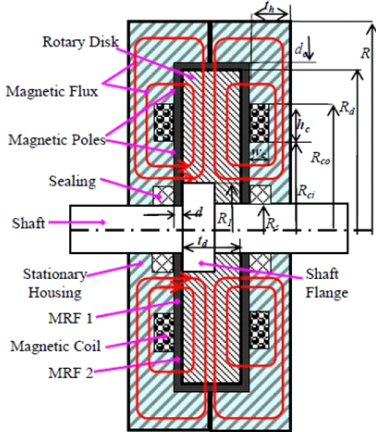


Fig. 1 Design structure of conventional disc-type MRB

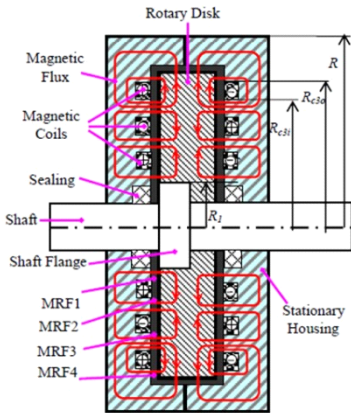
레이크 내에서 MR 유체의 거동이 선형속도 분포를 갖는다고 가정하면 MRB의 토크는 다음과 같이 계산할 수 있다<sup>(11,15-18)</sup>.

$$T_c = \frac{\pi\mu_c R_d^4}{d} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_d} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi\tau_{yc}}{3} (R_d^3 - R_i^3) + 2\pi R_d^2 t_d \left( \tau_{y0} + \mu_0 \frac{\Omega R_d}{d_0} \right) + 2T_{sf} \quad (1)$$

$$T_{s1} = \frac{\pi\mu_1 R_{ci}^4}{d} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_{ci}} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi\tau_{y1}}{3} (R_{ci}^3 - R_i^3) + \frac{\pi\mu_2 R_d^4}{d} \left[ 1 - \left( \frac{R_{co}}{R_d} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi\tau_{y2}}{3} (R_d^3 - R_{co}^3) + 2\pi R_d^2 t_d \left( \tau_{ya} + \mu_a \frac{\Omega R_d}{d_0} \right) + 2T_{sf} \quad (2)$$



(a) Single side-coil MRB



(b) Three side-coil MRB

Fig. 2 Design structure of the proposed MRB with magnetic coils on the housing

$$T_{s2} = \frac{\pi\mu_1 R_{cli}^4}{d} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_{cli}} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi\tau_{y1}}{3} (R_{cli}^3 - R_i^3) + \frac{\pi\mu_2 R_{2i}^4}{d} \left[ 1 - \left( \frac{R_{clo}}{R_{2i}} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi\tau_{y2}}{3} (R_{2i}^3 - R_{clo}^3) + \frac{\pi\mu_3 R_d^4}{d} \left[ 1 - \left( \frac{R_{c2o}}{R_d} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi\tau_{y3}}{3} (R_d^3 - R_{c2o}^3) + 2\pi R_d^2 t_d \left( \tau_{ya} + \mu_a \frac{\Omega R_d}{d_0} \right) + 2T_{sf} \quad (3)$$

$$T_{sN} = \frac{\pi\mu_1 R_{cli}^4}{d} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_{cli}} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi\tau_{y1}}{3} (R_{cli}^3 - R_i^3) + \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{\pi\mu_j R_{cji}^4}{d} \left[ 1 - \left( \frac{R_{c(j-1)o}}{R_{cji}} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi\tau_{yj}}{3} (R_{cji}^3 - R_{c(j-1)o}^3) \right\} + \frac{\pi\mu_{(N+1)} R_d^4}{d} \left[ 1 - \left( \frac{R_{c(N+1)o}}{R_d} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi\tau_{y3}}{3} (R_d^3 - R_{cNo}^3) + 2\pi R_d^2 t_d \left( \tau_{ya} + \mu_a \frac{\Omega R_d}{d_0} \right) + 2T_{sf} \quad (4)$$

상기 식에서 각 토크의 성분은 다음과 같이 정의된다.  $T_c$ 는 Fig. 1에 나타낸 기존 MRB의 토크,  $T_{sN}$ 은하우징 위에  $N$ 개의 전자석 코일을 가지고 있는 MRB의 토크이며,  $T_0$ 는 자기장 비인가 시 MRB의 토크를 나타낸다. 그리고 기하학적 변수들은 다음과 같이 정의된다.  $R_d$ : 디스크의 바깥 반경,  $R_i$ : 유효 MRF 부피 내부 반경,  $R_s$ : 샤프트 직경,  $d$ : 브레이크 측면 갭 사이즈,  $d_0$ : 환형 덕트 갭사이즈,  $t_d$ : 디스크 두께,  $\Omega$ : 로터의 각속도,  $T_{sf}$ : 마찰력에 의한 토크,  $R_{ci}$ : 첫 번째 코일 내부 반경,  $R_{co}$ : 첫 번째 코일 외부 반경,  $R_{cji}$ :  $j$ 번째 코일 내부 반경,  $R_{cjo}$ :  $j$ 번째 코일 외부 반경,  $\mu_c$ : 평균 점성 계수,  $\tau_{yc}$ : 평균 항복 계수,  $\mu_j$ : 유효 MR 부피의  $j$ 번째 평균 점성 계수,  $\tau_{yj}$ : 유효 MR 부피의  $j$ 번째 평균 항복 응력,  $\mu_a$ : 환형 덕트 점성계수,  $\tau_{ya}$ : 환형덕트 전단응력,  $\tau_{y0}$ : 초기 전단응력,  $\mu_0$ : 초기 점성계수를 나타낸다.

한편, MR 유체에서 발생하는 항복응력  $\tau_{yc}$ ,  $\tau_{yj}$ ,  $\tau_{ya}$  및 이에 해당되는 항복점 후의 평균 점성계수  $\mu_c$ ,  $\mu_j$ ,  $\mu_a$ 는 자기장 세기에 따라 변하는 MR 유체의 고유 특성값이며 일반적으로 다음의 식을 이용하여 예측한다<sup>(19)</sup>.

$$Y = Y_\infty + (Y_0 + Y_\infty) (2e^{-B\alpha_{sy}} - e^{-2B\alpha_{sy}}) \quad (5)$$

여기서,  $Y$ 는 자기장 세기에 따라 변하는 MR 유체 자체

의 물성치 ( $\tau_{yes}, \tau_{yj}, \tau_{ya}$ ) 및 ( $\mu_e, \mu_j, \mu_a$ ) 등을 나타낸다.  $Y$  값의 변화는 자기장 영 일 때의 값  $Y_0$ 에서 자기장이 saturation 되는 시점의 값  $Y_{\infty}$ 까지이다.  $Y_{SY}$ 는  $Y$ 값의 saturation 모멘트 인덱스이며, 변수  $B$ 는 MR 유체에 인가된 자기장 강도를 나타낸다. 한편, MR 유체의 누유를 방지하기 위하여 사용한 실(seal)로부터 발생하는 마찰 토크  $T_{sf}$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다<sup>(13)</sup>.

$$T_{sf} = 0.65(2R_s)^2 \Omega^{1/3} \tag{6}$$

위의 식에서,  $\Omega$ 는 브레이크 축의 분당 회전속도이며,  $R_s$ 는 실링을 포함한 축의 지름을 나타낸다.

### 3. MRB의 최적설계 및 결과

MRB 설계 시 중요한 성능은 제동토크의 크기와 MRB 자체의 무게이다. 따라서 이 연구에서는 요구토크 (required torque)를 얻기 위하여 필요한 최소의 질량을 갖는 MRB를 설계하는 것을 목표로 하였다. 이 연구에서 선택한 목적함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_b = V_d \rho_d + V_h \rho_h + V_s \rho_s + V_{MR} \rho_{MR} + V_{bob} \rho_{bob} + V_c \rho_c \tag{7}$$

위 식에서  $V_d, V_h, V_s, V_{MR}, V_{bob}$  및  $V_c$ 는 각각 디스크, 하우징, 축, MR 유체, 보빈 및 코일의 기하학적 부피를 나타낸다. 그리고  $\rho_d, \rho_h, \rho_s, \rho_{MR}, \rho_{bob}$  및  $\rho_c$ 는 각각의 변수에 해당되는 밀도를 나타낸다. 따라서 목적함수 (7)은 MRB구조의 기하학적 변수로서, 동일한 재료를 사용할 경우 MRB크기를 의미하기도 한다. 이러한 최적화기법은 “식(1)~(4)의 계산되는 일정한 요구 토크(required torque)의 크기를 만족하는 제약조건하에서 목적함수 (7)의 해를 구한다”로 요약할 수 있다. 이 연구에서는 이를 수행하기 위해 ANSYS 유한요소해석 프로그램을 사용하였으며, 2D요소(PLANE 13)로 해석하였다.

이 연구에서 사용한 MR 유체는 미국 Lord사의 MRF 132-DG로서 차량 댐퍼 및 브레이크에 많이 사용되는 유체이다. 이 연구에서 제안한 MRB는 전단모드에서 작동하기 때문에 전단모드형 rheometer를 이용하여 MR 유체의 특성을 실험한 후 커브 피팅을 통하여 다음의 값을 구했다.

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 0.1pa \cdot s; \mu_{\infty} = 3.8pa \cdot s; \alpha_{s\mu} = 4.5 T^{-1} \\ \tau_{y0} &= 15pa; \tau_{y\infty} = 40000pa; \alpha_{s\tau} = 2.9 T^{-1} \end{aligned}$$

한편, 구리로 된 전자석 코일은 24 게이지(지름 0.511 mm)를 사용하였으며, 코일에 인가하는 최대 전류는 2.5 A로 제한하였다. 전자석 코일의 단면은 사각형이며 사이즈는 다음 식에 의하여 결정된다.

$$w_c = n_w \cdot d_c, h_c = n_h \cdot d_c \tag{8}$$

위 식에서,  $w_c$  및  $h_c$ 는 코일의 높이 및 폭을 나타내며,  $n_w$  및  $n_c$ 는 각각의 코일 turn 수이고,  $d_c$ 는 와이어의 지름이다. 전자석 코일이 하우징 축 위에 정확하게 정렬되어 감겨있다고 가정하면 코일에 인가되는 전류밀도는 다음 식에 의하여 계산된다.

$$j = \frac{NI}{S_{coil}} = \frac{n_w \cdot n_h I}{w_c \cdot h_c} = \frac{n_w \cdot n_h I}{n_c \cdot n_h \cdot d_c^2} = \frac{I}{d_c^2} \tag{9}$$

위 식에서,  $N$  및  $S_{coil}$ 은 감은 코일의 수와 단면적을 각각 나타낸다. 이 연구에서 제안한 MRB의 가장 중요한 설계변수는 전자석 코일의 높이( $h_c, h_{cj}$ ), 전자석 코일의 폭( $w_c, w_{cj}$ ), MR 유체가 흐르는 덕트의 반경( $R_i$ ), 그리고 디스크 두께( $t_d$ ) 및 하우징 두께( $t_h$ ) 등이다. 여기서 한 가지 주의해야 할 사항은 MR 유체의 덕트 크기가 작으면 작을수록 자기장의 인가 유무에 관계없이 제동토크가 증가하게 된다. 그러나 덕트 사이즈를 매우 작게 설계할 경우 제작상의 어려움이 있으며, 또한 MR 유체의 거동현상이 제대로 발생하지 않아 정상적인 작동이 어려운 경우가 발생할 수 있다. 따라서 이 최적설계에서는 MR 유체가 흐르는 덕트의 갭(gap) 사이즈는 설계변수로 사용하지 않았으며 고정된 값을 이용하였다. 또한, 최적설계를 진행함에 있어 모든 초기값은 10 mm로 주어졌으며, 모든 기하학적 조건을 만족하는 범위에서 non-constraint 최적화기법을 이용하였다. 사용된 최적화 기법은 공역 기울기법(conjugate gradient method)으로 목적함수의 구배(gradient)를 기초로 계산을 수행하며, 목적함수 변화의 기울기를 계산하여 목적함수의 변화가 최소가 되는 지점을 찾는다<sup>(20)</sup>. 최대 반복계산 횟수는 100, 수렴조건은 목적함수의 변화율  $10e-5$ 이하로 정의하였다.

Fig. 3은 갭사이즈를 0.8 mm, 샤프트 직경을 6 mm로 고정하고 요구토크를 10 Nm로 설정했을 경우에 얻은 최적 해를 나타낸다. 세 경우 모두 2% 오차 내에서 요구토크로 빠르게 잘 수렴하는 것을 볼 수 있다. 요구토크를 만족하는 시점에서 기존의 MRB의 무게는 약 1.69 kg, 이 연구에서 제안한 single side-coil MRB

의 무게는 약 1.68 kg, 그리고 three side-coil MRB의 무게는 약 1.28 kg으로 계산되었다. 따라서 MRB의 무게를 최소화하면서 요구토크를 만족시키기 위한 최적 설계기법의 유용성이 확인되었다. 이를 보다 확실하게 증명하기 위하여 MRB의 자기장 해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4로부터 제안된 MRB가 기존의 MRB의 경우보다 자기장이 보다 균일하게 분포되어 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과는 MRB의 사이즈를 보다 작게 설계하는데 직접적인 영향을 준다. 또한 제안된 MRB인 Fig. 3(b)와 (c)를 비교할 경우 자기장 세기가 보다 강하고 균일하게 분포되

어있는 것을 알 수 있다.

요구토크 10 Nm를 만족하기 위한 최적설계 해를 Table 1에 자세히 나타내었다. 모든 MRB가 요구토크 조건 10 Nm를 만족하였으며, 이 연구에서 제안된 three side-coil MRB의 경우가 가장 가벼운 것을 알 수 있다. 여러 설계변수 중에서 제안된 MRB가 기존의 MRB 보다 사이즈면에서 작으며, 하우징부가 매우 작게 설계될 수 있음을 알 수 있고, 디스크의 반경도 작은 크기로 만들 수 있음을 알 수 있다. 한편 자기장 비인가의 즉, off-state 상에서의 토크는 기존 MRB와 제안된 MRB가 거의 동일하며, 제안된 MRB의 경우 전자석 코일의 수가 많을수록 전력소비(power consumption)가 많아짐을 쉽게 알 수 있다. 그러나 Fig. 4에서 알 수 있듯이 각각의 브레이크는 이미 자기 포화 상태임을 알 수 있으며, 이는 전력을 더욱 증가한다고 하여도 더 이

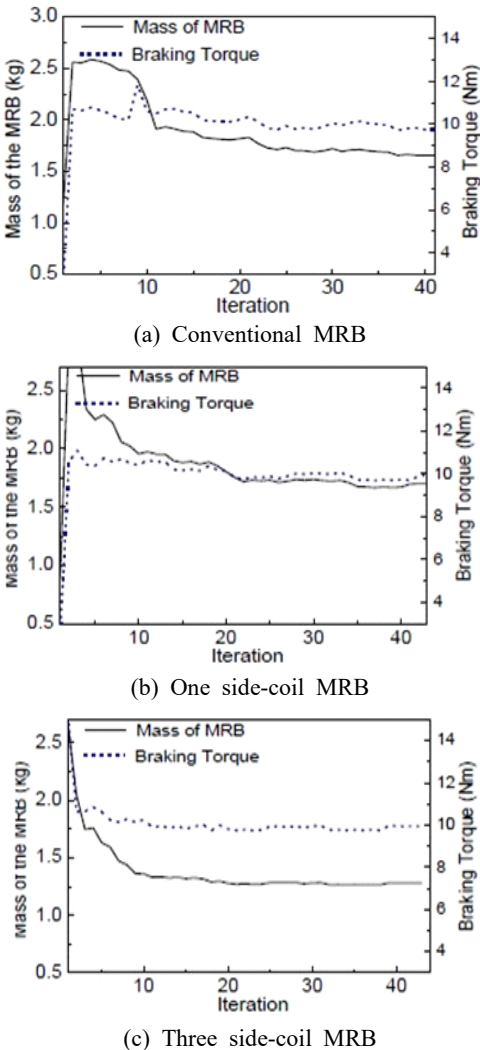


Fig. 3 Optimization solution of the MRBs with required braking torque is 10 Nm and the MRF duct size is 0.8 mm

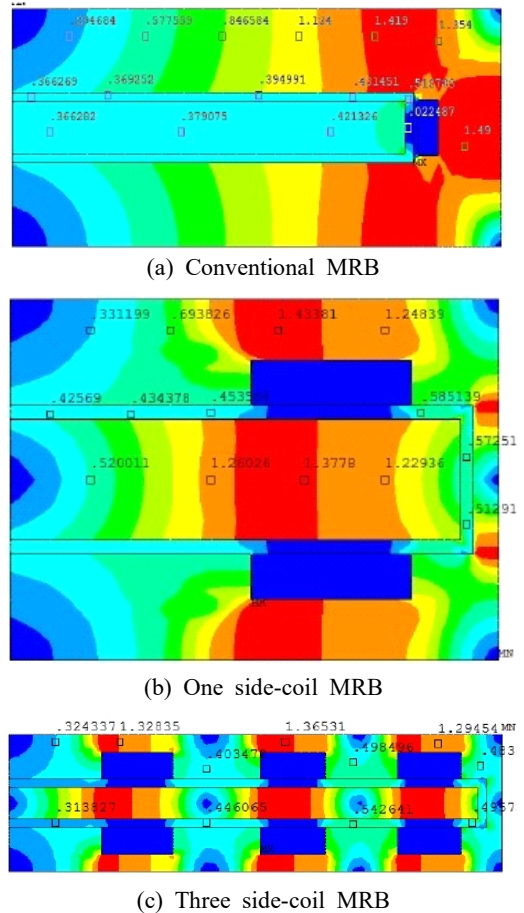


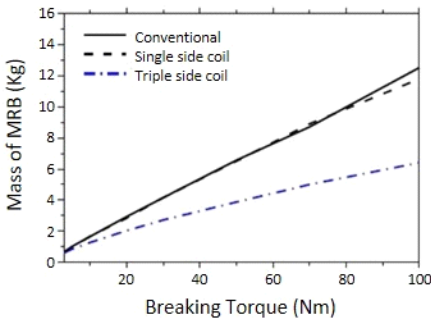
Fig. 4 Magnetic flux density of the brake at the optimum

상의 토크가 증가하지 않음을 의미한다. 제안된 MRB의 최대 토크크기와 자기장 세기에 따른 토크제어 영역을 알아보기 위하여 요구토크를 다르게 설정하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에서 보듯이 기존 MRB와 제안된 one side-coil MRB의 경우는 요구토크가 70 Nm 이하에서는 매

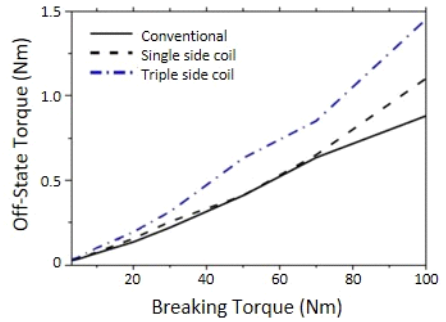
우 유사한 무게와 off-state 토크를 갖는다. 그러나 제안된 three side-coil MRB의 경우는 100 Nm까지 기존의 MRB보다 가볍게 설계할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 설계가 가능한 이유는 Fig. 5(c), (d)에서 볼 수 있듯이 제안된 MRB의 경우에는 동일한 요구토크를 얻기 위하여 디스크 등 외경과 길이 등을 많이 줄일 수

**Table 1** Optimal solution of the MRBs when the required torque is 10 Nm and the MR duct gap is 0.8 mm

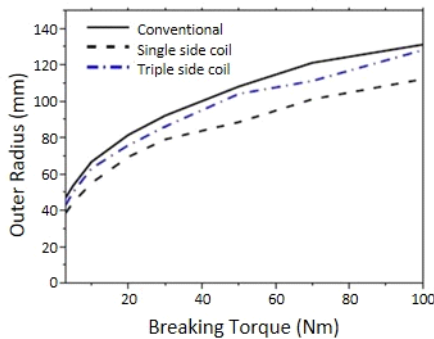
MRB types	Design parameter (mm)	Characteristics
Conventional	Coil: Width $w_c = 6.6$ ; Height $h_c = 4.6$ ; Radius $R_h = 54.2$ ; No. of turns: 116 Housing: $R_s = 6$ , $R = 65.2$ , $t_h = 7.2$ , $L = 20$ Disc: Radius $R_i = 13.1$ , $R_d = 53.8$ ; Thickness $t_d = 4$ MRF duct gap: 0.8	Max. torque: 10 Nm Mass: 1.69 kg Off-state torque: 0.08 Nm Power cons.: 15.17 W Coil resistance( $\Omega$ ): $R_c = 2.43$
Single coil	Coil: Width $w_c = 3.1$ ; Height $h_c = 8.2$ ; Radius $R_{ci} = 45$ ; No. of turns: $2 \times 96 = 192$ Housing: $R_s = 6$ , $R = 58.8$ , $t_h = 6.3$ , $L = 20.7$ Disc: Radius $R_i = 31.8$ , $R_d = 57.3$ ; Thickness $t_d = 6.4$ MRF duct gap: 0.8	Max. torque: 10 Nm Mass: 1.69 kg Off-state torque: 0.09 Nm Power cons.: 21.8 W Coil resistance( $\Omega$ ): $R_c = 1.75$
Three-coil	Coil: Width $w_{c1} \cong w_{c2} = 3.1$ ; Height $h_{c1} = 6.6$ ; $h_{c2} = 7.2$ ; $h_{c3} = 7.2$ Radius $R_{c1i} = 15.6$ , $R_{c2i} = 31.7$ , $R_{c3i} = 48.2$ ; No. of turns: $2 \times (78 + 84 + 84) = 492$ ; Housing: $R_s = 6$ , $R = 59.6$ , $t_h = 4.9$ , $L = 15.5$ Disc: Radius $R_i = 8.6$ , $R_d = 58.1$ ; Thickness $t_d = 4$ MRF duct gap: 0.8	Max. torque: 10 Nm Mass: 1.28 kg Off-state torque: 0.08 Nm Power cons.: 40.7 W Coil resistance( $\Omega$ ): $R_{c1} = 0.5$ , $R_{c2} = 1.1$ , $R_{c3} = 1.6$



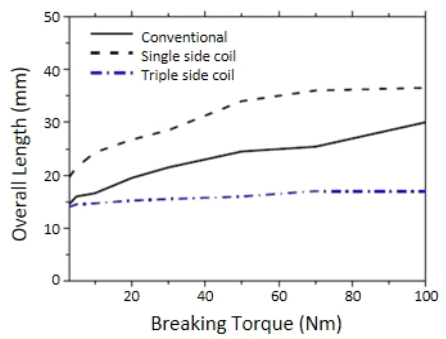
(a) Mass vs. braking torque



(b) Off-state torque vs. braking torque



(c) Overall radius vs. braking torque



(d) Overall length vs. braking torque

**Fig. 5.** Optimal results of the MRBs as a function of maximum braking torque with  $d = 0.8$  mm

있기 때문이다.

이 해석에서 고정된 MRB 덕트 사이즈 0.8 mm를 1.0 mm로 변경하여 해석하여도 Fig. 5에 나타난 결과와 유사한 경향을 보인다. 따라서 이 연구에서 제안된 MRB의 설계구조는 MR 유체가 흐르는 덕트(혹은 갭) 사이즈와 관계없이 가벼운 무게로 보다 큰 제동 토크 발생이 가능하며 자기장 비 인가시와 자기장 인가시 발생하는 토크의 제어영역을 보다 넓게 할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 결 론

이 연구에서는 기존의 MRB 구조와 다른 하우징 위에 전자석 코일이 직접 위치하는 새로운 MRB 설계구조를 제안하여 여러 가지 장점을 해석을 통해 증명하였다. 우선 제안된 MRB와 기존의 MRB의 구조를 비교하고 토크 계산식을 유도하였으며, 주요 설계변수를 결정하기 위하여 최적설계 해석을 수행하였다. MRB의 질량을 목적함수로 선정하고 요구 토크를 구속조건으로 한 최적 해를 구했으며 이를 증명하기 위한 자기장해석과 off-state 상에서의 토크 등 여러 성능을 분석하고 비교하였다. MR 유체가 흐르는 덕트 사이즈를 0.8 mm로 고정시키고 요구 토크 10 Nm를 만족하는 최적 해를 구한 결과 제안된 three-side coil MRB가 기존의 MRB보다 적은 무게로 설계가 가능하며, 보다 큰 토크발생이 가능함을 확인하였다. 나아가서 off-state의 토크는 기존 MRB와 제안된 MRB의 경우 동일하게 설정할 수 있기 때문에 자기장의 세기로 제어할 수 있는 토크영역이 제안된 MRB가 매우 넓은 것을 확인할 수 있었다. 특히, 이러한 경향은 MR 유체가 흐르는 덕트 사이즈에 관계없이 나타났으며, 이로부터 제안된 MRB의 설계구조는 MR 유체를 이용한 여러 가지 다른 응용장치에도 적용이 가능한 일반성을 지니고 있다고 할 수 있다.

### References

(1) Choi, S. B. and Han, Y. M., 2012, *Magnetorheological Fluid Technology: Applications in Vehicle Systems*, CRC press, New York.  
 (2) Wang, J. and Meng, G., 2001, *Magnetorheological Fluid Devices: Principles, Characteristics and Applications*

in *Mechanical Engineering, Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 215, No. 3, pp. 165~174.

(3) Muhammad, A., Yao, X. L. and Deng, J. C., 2006, *Review of Magnetorheological (MR) Fluids and Its Applications in Vibration Control*, *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 5, No. 3, pp. 17~29.

(4) Rabinow, J., 1951, *Magnetic Fluid Torque and Force Transmitting Device*, US Patent 2,575,360.

(5) An, J. and Kwon, D. S., 2003, *Modeling of a Magnetorheological Actuator Including Magnetic Hysteresis*, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, No. 9, pp. 541~550.

(6) Liu, B., Li, W. H., Kosasih, P. B. and Zhang, X. Z., 2006, *Development of an MR-brake-based Haptic Device*, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 15, pp. 1960~1969.

(7) Gang, H. G., Choi, S. B. and Sohn, J. W., 2017, *Torque Tracking Control of MR Brake Using a Fuzzy-PID Control Algorithm*, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 444~450.

(8) Kim, W. H., Park, J. H., Yang, S. Y. and Choi, S. B., 2016, *Control Performance Evaluation of MR Brake Depending on Durability*, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 26, No. 6, pp. 660~666.

(9) Huang, J., Zhang, J. Q., Yang, Y. and Wei, Y. Q., 2002, *Analysis and Design of a Cylindrical Magnetorheological Fluid Brake*, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, pp. 559~562.

(10) Nguyen, Q. H. and Choi, S. B., 2010, *Optimal Design of an Automotive Magneto-rheological Brake Considering Geometric Dimensions and Zero-field Friction Heat*, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 19, No. 11, p. 115024, doi: 10.1088/0964-1726/24/6/067001.

(11) Nguyen, Q. H. and Choi, S. B., 2012, *Optimal Design of a Novel Hybrid MR Brake for Motorcycles Considering Axial and Radial Magnetic Flux*, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 21, No. 5, p. 055003, doi: 10.1088/0964-1726/21/5/055003.

(12) Nguyen, Q. H., Lang, V. T., Nguyen, N. D. and Choi, S. B., 2014, *Geometric Optimal Design of MR Brake Considering Different Shapes of the Brake Envelope*, *Smart Matter. Struct.*, Vol. 23, No. 1, p. 015020, doi: 10.1088/0964-1726/23/1/015020.

(13) Park, E. J., Stoikov, D., Luz, L. F. and Suleman, A., 2006, A Performance Evaluation of an Automotive Magnetorheological Brake Design with a Sliding Mode Controller, *Mechatronics*, Vol. 160, No. 7, pp. 405~416.

(14) Nguyen, Q. H. and Choi, S. B., 2012, Selection of Magnetorheological Brake Types via Optimal Design Considering Maximum Torque and Constrained Volume, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 21, No. 1, p. 015012, doi: 10.1088/0964-1726/21/1/015012.

(15) Nguyen, Q. H., Lang, V. T., Nguyen, N. D. and Choi, S. B., 2014, Geometric Optimal Design of Magnetorheological Brake Considering Different Shapes of the Brake Envelope, *Smart Matter. Struct.*, Vol. 23 No. 1, p. 015020, doi: 10.1088/0964-1726/23/1/015020.

(16) Nguyen, Q. H., Nguyen, N. D. and Choi, S. B., 2014, Optimal Design of a Novel Configuration of MR Brake with Coils Placed on the Side Housings, *Proc. SPIE 9059, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, p. 905901, doi: 10.1117/12.2044561.

(17) Nguyen, Q. H., Nguyen, N. D. and Choi, S. B., 2015, Design and Evaluation of a Novel Magnetorheological Brake with Coils Placed on the Side Housings, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 24, No. 4, p. 047001, doi: 10.1088/

0964-1726/24/4/047001.

(18) Zubieta, M., Eceolaza, S., Elejabarrieta, M. J., and Bou-Ali, M. M., 2009, Magnetorheological Fluids: Characterization and Modeling of Magnetization, *Smart Mater. and Struct.*, Vol. 18, No. 9, p. 095019, doi: 10.1088/0964-1726/18/9/095019.

(19) Powell, M. J. D., 1977, Restart Procedures for the Conjugate Gradient Method. *Mathematical Programming*, Vol. 12, No. 1, pp. 241~254.



**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.