

MR 브레이크의 내구성에 따른 제어성능평가

Control Performance Evaluation of MR Brake Depending on Durability

김완호* · 박진하* · 양순용* · 신철수* · 최승복†

Wan Ho Kim, Jhin Ha Park, Soon Yong Yang, Cheol Soo Shin and Seung-Bok Choi

(Received April 28, 2016 ; Revised August 12, 2016 ; Accepted August 12, 2016)

Key Words : Magneto-rheological Fluid(자기유변유체), MR Brake(자기유변 브레이크), Wear Test(내구성 실험), Performance Comparison(성능비교)

ABSTRACT

This paper presents performance comparison results of magneto-rheological (MR) brake in the sense of wear characteristics. To create wear circumstance, the brake is operated in 100 000 cycles by DC motor. To make wear test in same design parameters such as the radius of the housing, ferromagnetic disc and gap size, small sample of stainless are inserted in housing of MR brake. The performances of brake are compared between the initial stage (no wear) and 100 000 revolution cycles operated stage (wear). At each circumstance, torque of the brake is measured and compared by applying step current and sinusoidal control input. The controller used in this work is a simple, but effective PID controller. It is demonstrated that the wear behavior is more obvious as the operating cycle is increased in the torque control process.

1. 서 론

일반적으로 자동차 제동장치에 많이 쓰이는 장비인 브레이크는 차량의 성능과 매우 밀접한 관계가 있다. 이러한 장비들의 내구성은 자동차의 안정성에 직결되어 있기 때문에 오늘날 많은 자동차 부품 업계에서 장비들의 수명향상을 위한 연구를 시도해왔다. 기존의 브레이크는 주로 브레이크패드와 드럼의 직접 마찰을 통해 제동토크를 발생시켰다. 하지만 이러한 방법은 장비들의 마찰에 의한 내구성 감소 문제를 야기하였다. 현재 많이 사용되고 있는 브레이크는 유압-드럼식이다. 이는 페달을 통해 전달된 압력이 마스터 실린더를 통하여 제동력을 전

달한다. 또한 브레이크 토크 제어에 따라 효율에 큰 영향이 있으므로 제어 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 ABS(잠김 방지 브레이크 시스템)는 차량의 제동 환경에 따라 능동적으로 브레이크의 제동력을 제어한다. 이와 같은 동력 제어 시스템은 환경에 따라 제동력을 제어해야 하기 때문에 반응성이 좋은 능동형 혹은 반-능동형 제동장비가 필수적이다.

그러므로 금속끼리의 직접 마찰을 줄이고 보다 더 강력하며 제어 성이 좋은 브레이크의 연구가 필요하게 되었다. 이런 이유로 최근에는 ER(electro-rheological) 또는 MR(magneto-rheological) 유체를 이용한 반-능동형 브레이크에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. Edward 등⁽¹⁾은 sliding mode con-

† Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University
E-mail : Seungbok@inha.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Inha University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2016 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

troller가 적용된 자동차용 MR 브레이크를 연구하였다. 여기서 MR 유체는 자기장(magnetic field)에 의해 상 변화가 일어나는 지능 유체로서 ER 유체에 비하여 침전물 발생이 매우 적을 뿐 아니라 비교적 큰 항복응력을 발생시켜 보다 큰 힘을 요구하는 각종 응용장치에 적용하는 연구가 시도되고 있다. Carlson 등⁽²⁾은 MR 유체가 적용된 상용화된 장치들에 대한 연구를 진행하였고, Spencer 등⁽³⁾은 MR 장치 중 가장 많이 연구된 MR 댐퍼에 대한 수학적 모델을 제시하였다. Lee 등⁽⁴⁾은 소형 MR 댐퍼를 모델링 및 제어에 관한 연구를 진행하였다. 또한, Wereley 등⁽⁵⁾은 히스테리시스를 없앤 헬리콥터용 MR 댐퍼를 연구함으로써 MR 사용 영역이 광범위하다는 것을 입증하였다.

하지만 MR 브레이크는 자기장 인가 시 발생하는 MR 유체 분자들의 사슬(chain of particle)에 의해 디스크 혹은 하우징에 미세한 마모가 발생한다. 따라서 이런 마모 정도에 따른 브레이크의 성능의 비교분석이 필수적이다. Nguyen 등⁽⁶⁾은 형상 별 MR 브레이크를 제안하여 그에 따른 최적설계를 진행하였다. Sohn 등⁽⁷⁾은 모터사이클용 디스크 타입의 MR 브레이크를 허셀-버클리(Herschel-Bulkley) 유변 모델로 설계하여 이론적 모델을 실험적으로 입증하였다. 최근에 Choi 등⁽⁸⁾은 ABS(anti lock brake system)에 적용 가능한 ER 브레이크를 제안하고, 자동차의 제동특성을 고찰하였다.

이 연구에서는 MR 브레이크의 내구성에 따른 제동력 성능을 비교하여 MR 브레이크 응용 연구 시 고려해야 하는 브레이크 내구 수명에 대한 정보를 제공하였다.

2. MR 브레이크 디자인

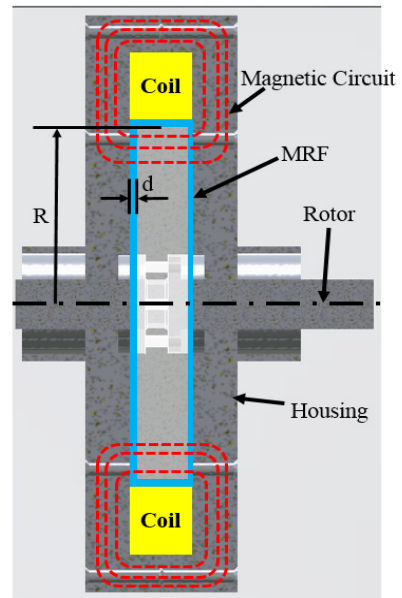
(1) 브레이크 모델

MR 브레이크는 제동토크를 발생시키기 위해서 구동 디스크와 하우징 사이에 MR 유체가 충전되어 있고 하우징 안에는 전류코일이 내장되어 있는 구조를 갖는다. 코일에 전류가 흐르면 자기장이 형성되어 자기장 방향과 평행한 MR 유체의 사슬(chain)이 형성되면 구동 디스크와 하우징 사이의 전단응력이 발생한다. 이 전단응력에 의해 제동토크가 발생되고 하우징에 마모가 일어나게 된다. 코일에 의한 자기

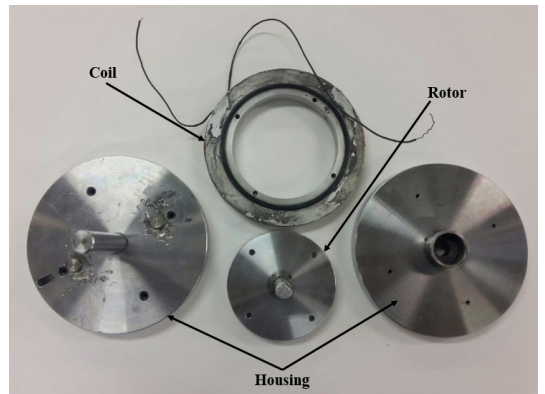
회로와 MR 브레이크의 구조가 Fig. 1에 도시되어 있다. 수행될 브레이크 내구성 실험을 위한 브레이크의 모델을 수립하였다. 브레이크의 제동토크의 모델은 빙햄(Bingham) 모델을 이용하였다. 빙햄 모델은 인가 자기장에 대한 MR 유체의 발생 전단응력을 나타낸 모델로서 널리 알려져 있다. 빙햄 모델을⁽¹⁾ 이용한 전단응력은 다음과 같다.

$$\tau = \mu_p \dot{\gamma} + \tau_H \tag{1}$$

τ_H 는 MR 유체의 사슬에 의한 항복응력이다. 빙햄



(a) Scheme of MR brake



(b) Fabricated MR brake

Fig. 1 Configuration of MR brake

Table 1 Parameter of MR brake

Parameter	Value
R(radius of disk)	43.25 mm
d(distance between housing and disk)	1 mm
N(number of disk)	1

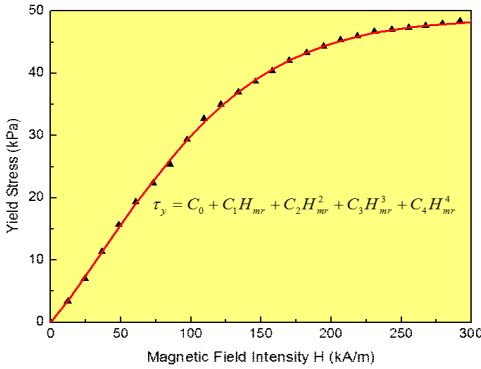


Fig. 2 Yield stress property of MR fluid (140CG)

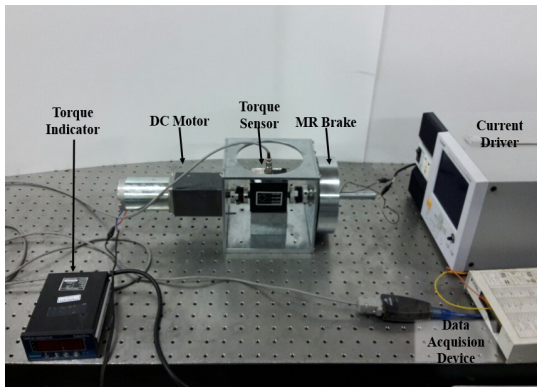


Fig. 3 Equipment of wear experiment

여기서 μ_p 는 유체 점성상수이고 $\dot{\gamma}$ 는 전단률이고 모델을 이용하여 계산된 MR 브레이크의 제동토크는 다음과 같다.

$$T_b = 2\pi N \int_{r_c}^{r_o} \tau r^2 dr = 2\pi N \int_{r_c}^{r_o} (\mu_p \dot{\gamma} + \tau_H) r^2 dr \quad (2)$$

여기서 N 은 디스크 개수, r 은 디스크의 반지름이다. 내구성 실험을 위하여 설계된 브레이크의 변수들은 Table 1에 나타나있다. 내구성 실험에 사용된 MR 유체는 Lord사의 140CG이다. Fig. 2⁹⁾는 이 실험실에서 테스트한 MR-140 CG의 성능곡선이다.

내구성에 따른 성능을 비교평가하기 위해서 2가지 상황을 조성하였다. 하나는 내구 전 상황(0회전)과 다른 하나는 내구 후 상황(100 000회전)이다. 내구성을 제외한 나머지 변인들을 통제하기 위하여 코일을 제외한 나머지 브레이크의 부품들은(하우징, 디스크 등) 모두 같은 크기로 2개씩 제작하였다. 실험에 사용된 브레이크의 회전에는 정격전압 24V의 DC모터를 사용하였다. 내구성 실험을 위한 장비구성은 Fig. 3에 도시하였다.

3. 성능비교

이 실험에서는 내구성에 따른 브레이크의 성능을 전류 입력에 따른 스텝반응(step response)과 전류 증가에 따른 제동토크변화(current response) 실험을 수행하였다. 마지막으로 2가지 상황에 따른 PID 제어를 이용하여 제어성능을 비교하였다.

(1) Step response

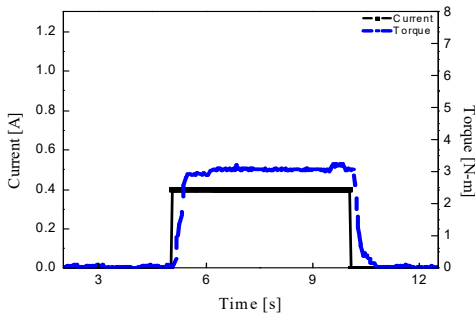
스텝반응에 의한 실험결과가 Fig. 4에 도시되어있다. 실험결과 MR 유체에 의한 시정수는 0회전과 10만 회전에서 각각 0.270 02초, 0.288 21초로 측정되었다. 시정수에 의하면 시간에 대한 브레이크의 반응시간이 약 0.01초정도 늦춰진 것이다. 그리고 내구가 진행 되었을 때의 제동토크 곡선이 6초와 9초 사이에 급격하게 저하된 성능 왜곡현상이 발생한 것을 확인할 수 있다.

(2) Current response

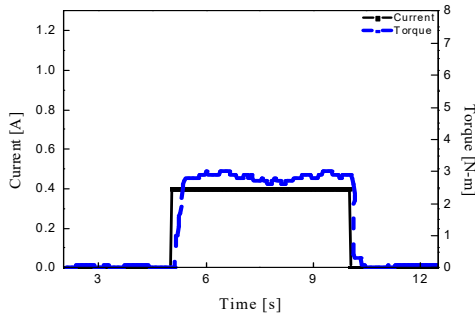
전류 증가에 의한 제동토크의 반응이 Fig. 5에 나타나어져 있다. 전류가 0.2A 증가할 때 제동토크가 약 1.3 N-m씩 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 전류 증가에 의한 제동토크의 변화는 두 가지 상황이 거의 비슷하다. 10만 회전 상황에서 전류증가에 의한 제동토크성능은 큰 차이가 없어 보인다. 하지만 전류 증가 반응에서도 제동토크의 출력임 현상이 커진 것을 확인할 수 있다.

(3) Sinusoidal response

Fig. 6은 내구 전의 전류입력 주파수 별 제동토크 성능을 나타낸 것이고, Fig. 7은 내구 후의 성능을 나타낸 것이다. 내구가 진행되었을 때 사인전류 반응

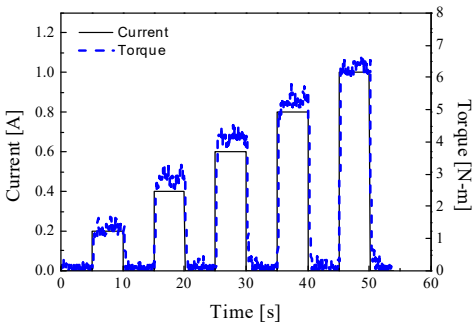


(a) No wear

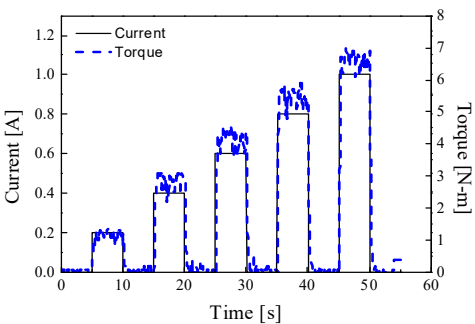


(b) Wear

Fig. 4 Comparison of step response

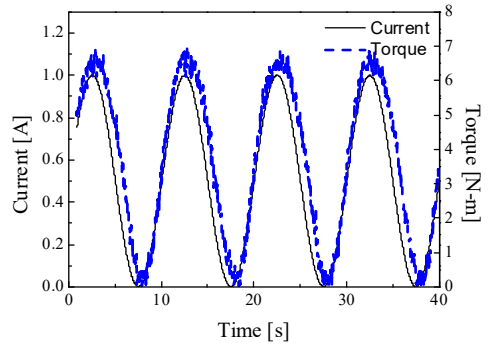


(a) No wear

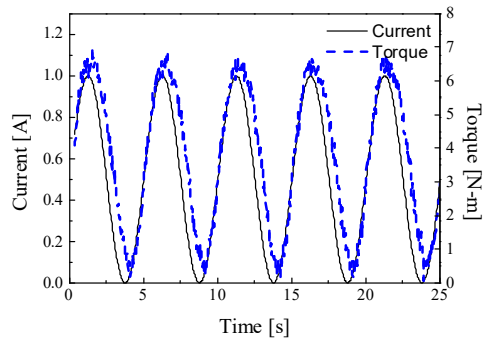


(b) Wear

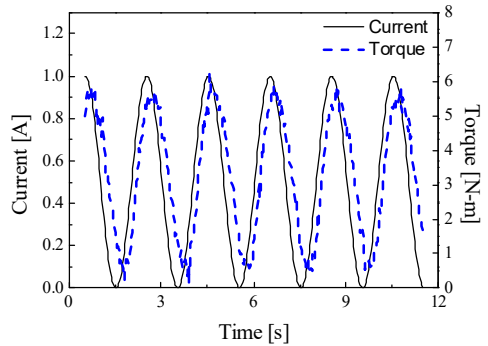
Fig. 5 Comparison of current step response



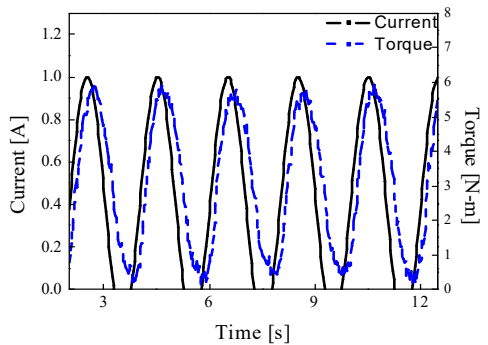
(a) 0.1 Hz



(b) 0.2 Hz

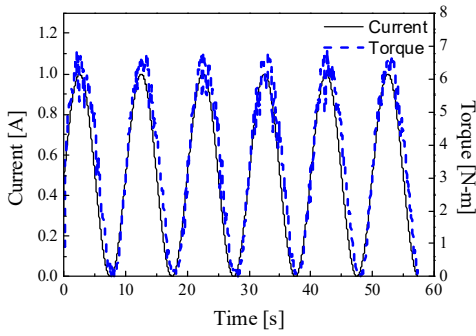


(C) 0.5 Hz

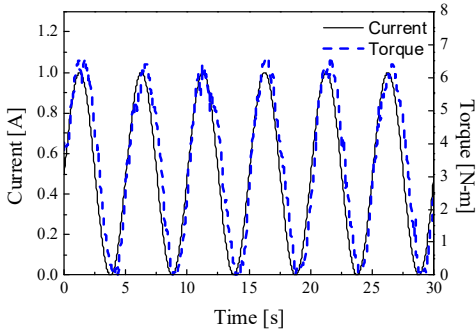


(d) 0.7 Hz

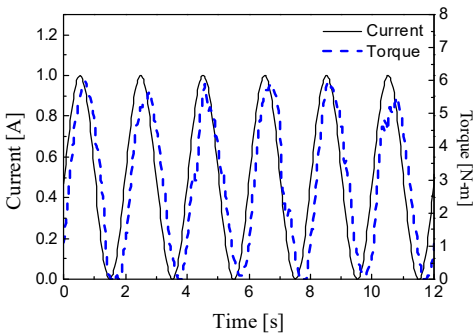
Fig. 6 0.1 Hz ~ 0.7 Hz torque response (no wear)



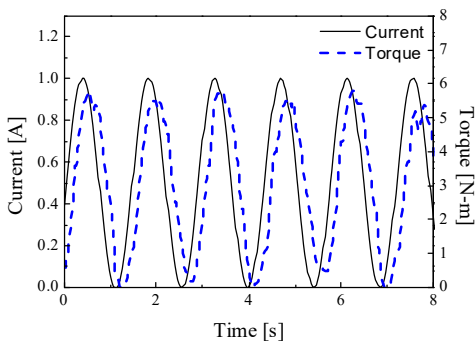
(a) 0.1 Hz



(b) 0.2 Hz



(c) 0.5 Hz



(d) 0.7 Hz

Fig. 7 0.1 Hz ~ 0.7 Hz torque response(wear)

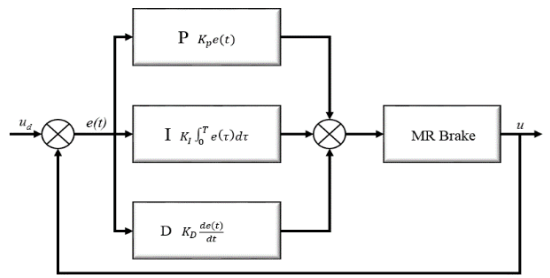
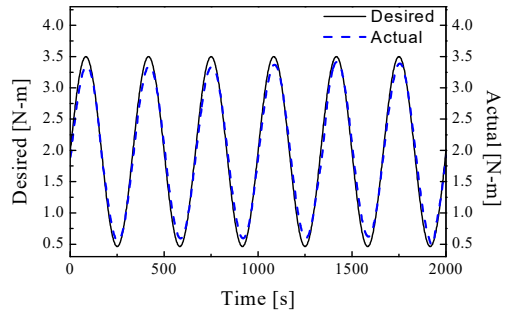
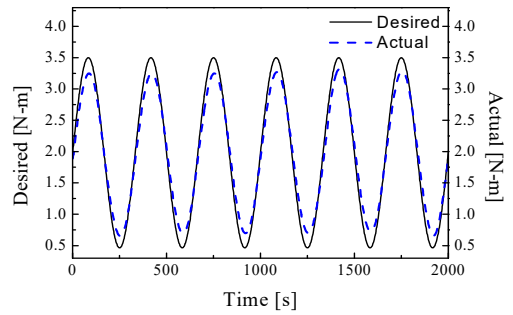


Fig. 8 Block diagram of PID control system



(a) PID no wear



(b) PID wear

Fig. 9 Comparison of control performance

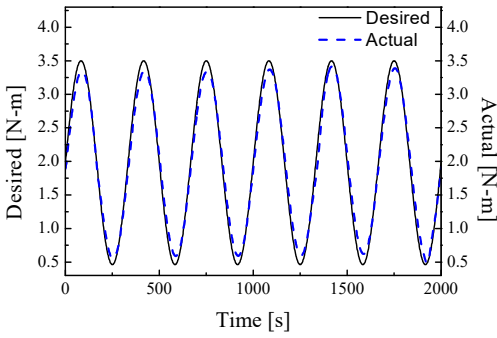
역시도 제동토크의 성능곡선이 마루지점에서 급격한 왜곡현상이 일어난 것을 확인할 수 있다.

(4) PID control performance

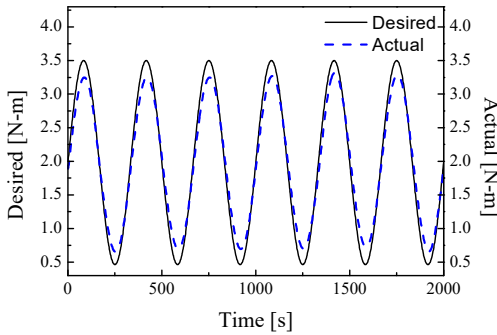
마모가 안 일어난 상황과 일어난 상황에서의 브레이크 제어성능을 확인하기 위하여 Fig. 8과 같이 제어기를 구성하였다. PID제어 입력은 다음과 같다.

$$u_d = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{d}{dt} e(\tau) \quad (3)$$

여기서 u_d 는 목표 토크(desired torque)이고 $e(t)$ 는 실제



(a) PID no wear



(b) PID wear

Fig. 9 Comparison of control performance

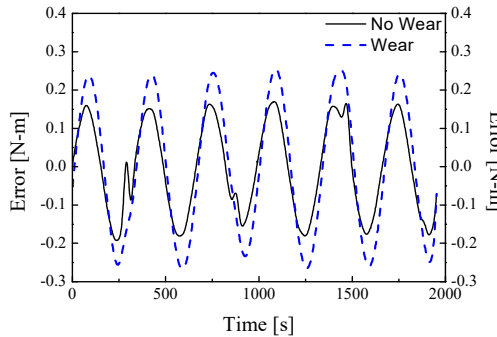


Fig. 10 Comparison of control error

토크(actual torque)와 목표토크와의 차이인 오차(error)값이다. K_p 는 비례게인(proportional gain), K_I 는 적분게인(integrative gain), K_D (derivative gain)는 미분게인이다. 위 제어 입력을 이용하여 나타낸 성능이 Fig. 9에 나타나 있다. 제어에 사용한 게인 값은 비례게인, 적분게인, 미분게인 순서대로 2, 0.08, 2이다. 그림에 나타난 검은 실선은 목표 토크 값(desired)을 나타내고, 파란 대쉬 선은 실제 측정된

토크(actual)다. 마모 전과 후 상황 모두 목표 토크 값에 실제 토크가 잘 따라 가는 양상을 확인 할 수 있다. 정량적인 수치는 제어 오차를 통해 확인 할 수 있다.

Fig. 10에 각 상황 별 제어 오차가 도시되어 있다. 목표 토크가 3.5 N-m일 때 0회전 (마모 X)의 토크는 약 3.35 N-m, 10만 회전 (마모 O)일 때는 약 3.25 N-m정도로 오차가 0.1 N-m 증가한 것을 알 수 있다. 이 사실로 MR 유체의 분자에 의한 마모가 제어 성능 오차를 약 2.8 % 증가시켰다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이 논문에는 MR 브레이크의 내구성에 따른 전류 입력에 대한 제동토크의 제어성능의 변화에 관한 연구를 다루었다. 제어성능을 실험하기 위해서 스텝전류 응답(step response), 사인 전류 응답(sinusoidal response), 그리고 PID 제어를 통한 제어성능 응답을 측정하였다. 실험으로 살펴본 결과 스텝반응과 사인 전류증가에 의한 반응은 처음과 내구가 일어난 후의 제동토크 크기 측면에서는 주목할 만한 변화를 찾을 수 없었지만 성능의 왜곡현상이 발생한 것을 확인할 수 있다. 그리고 제어성능 면에서 오차가 약 2.8 % 증가 된 것을 확인 할 수 있다. 추후 회전 수를 1 000 000 cycle까지 계속 증가시켜 내구성에 따른 성능변화를 관찰할 것이며, 하우징의 표면조도와 MR 분자의 상태에 따라서의 MR 브레이크의 성능 변화를 연구할 예정이다.

References

- (1) Park, E. J., Stoikov, D., da Luz., L. F. and Suleman, A., 2006, A Performance Evaluation of an Automotive Magnetorheological Brake Design with a Sliding Mode Controller, *Mechatronics*, Vol. 16, No. 7, pp. 405~416.
- (2) Carlson, J. D., Cantanzarite, D. M. and St. Clair, K. A., 1995, Commercial Magneto-rheological Fluid Devices, *Proceedings of the 5th International Conference on ER Fluids, MR Suspension and Associated Technology*, pp. 20~28.

(3) Spencer Jr., B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1997, Phenomenological Model for a Magnetorheological Damper, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 3, pp. 230~238.

(4) Lee, J. W., Seong, M. S., Woo, J. K. and Choi, S. B., 2012, Modeling and Vibration Control of Small-sized Magneto-rheological Damper, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 22, No. 11, pp. 1121~1127.

(5) Wereley, N. M., Kamath, G. M. and Madhavan, V., 1999, Hysteresis Modeling of Semi-active Magnetorheological Helicopter Lag Damper, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, No. 8, pp. 624~633.

(6) Nguyen, Q. H., Lang, V. T. and Choi, S. B., 2015, Optimal Design and Selection of Magneto-rheological Brake Types Based on Braking Torque and Mass, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 6, pp. 067001.

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

(8) Choi, S. B., Sung, K.-G., Cho, M.-S. and Lee, Y.-S., 2007, The Braking Performance of a Vehicle Anti-lock Brake System Featuring an Electro-rheological Valve Pressure Modulator, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 4, pp. 1285~1297.

(9) Choi, S. B. and Han, Y. M., 2007, *Magnetorheological Fluid Technology: Applications in Vehicle Systems*, Taylor & Francis Group CRC Press, Boca Raton FL, USA.



Seung-Bok Choi received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Inha University in 1979, M.S. 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.