J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng., Vol. 32, No. 2, April 2016, pp. 39~43
Journal of the Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers
ISSN 1229-4845(Print) · 2287-4666(Online)
http://Journal.kstle.or.kr

DOI http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2016.32.2.39

진폭에 따른 자기유변탄성체의 마찰 특성 연구

연성룡 · 이광희 · 이철희†
인하대학교 기계공학과

Effect of Vibrational Amplitude on Friction and Wear Properties of Magnetorheological Elastomer

Chenglong Lian, Kwang-Hee Lee and Chul-Hee Lee†
Department of Mechanical Engineering, Inha University
(Received February 6, 2016; Revised March 23, 2016; Accepted March 25, 2016)

Abstract – Magnetorheological elastomers (MREs) are a type of "smart" material, and their properties can be controlled rapidly and reversibly under the influence of an external stimulus. The application of an external magnetic field can change the shear modulus, hardness, and friction coefficient of MREs. The friction can cause vibration; moreover, the vibration can affect friction. The change of friction depends on the relative motion, normal force, roughness of the rubbing surfaces, material type, temperature, lubrication, relative humidity, and vibration condition. As MREs are a type of "smart material," their friction coefficient can be reduced by applying an external magnetic field—the applications of this feature in engineering have been widely studied. However, the friction properties of MREs under vibration have not been tested to date. In this study, MRE samples and a reciprocating friction tester were fabricated. The friction coefficient was measured to evaluate the friction properties under various vibration conditions; subsequently, the wear depth and wear surface profile of the MRE were observed in order to evaluate the wear properties. The results show that the friction coefficient of the MREs decreased when a magnetic field was applied. Moreover, the friction coefficient decreased when the vibrational amplitudes increased. The wear depth of the MRE also decreased as the vibrational amplitudes increased.

Keywords – magnetorheological elastomer(자기유변탄성체), friction coefficient (마찰계수), vibrational amplitude (진동 진폭)

1. 서 론

자기유변탄성체는 자기장을 인가하면 재료의 성질이 변화하는 특성을 가진 자기유변재료의 하나이며, 고분자 재료인 실리콘 등의 주성분에 철 입자가 포함된 형태로 구성되어 있다. 자기유변탄성체에 자기장을 가하면 탄성계수, 전단계수 등이 변화하는 특성을 이용하여, 다양한 분야에서 자기유변탄성체에 관한 연구가 진행되고 있다. 선행 연구를 살펴보면, 자기유변탄성체를 이용한 진동 감쇠기에 대한 연구[1], 자기유변탄성체 및 유체의 특성 연구와 모델링에 대한 연구[2,3], 자기유변탄성체 기계 특성에 대한 연구[4], 자기유변탄성체 댐퍼에 대한 연구[5], 자기유변탄성체를 이용한 진동 아이솔레이터에 대한 연구[6], 등방성 자기유변탄성체에 대한 연구[7] 등 많은 연구들이 진행되고 있다. 또한 최근에 자기유변탄성체에 자기장을 인가하면 자기유변탄성체의 강도가 달라지고 이에 따라 변화하는 마찰계수에 대한 연구도 진행되고 있다[8-12].

모터, 엔진과 같은 회전 동력을 주로 사용하는 기계장치에서는 필연적으로 진동이 발생하게 되며, 특히 자동차 시스템에서는 많은 진동이 발생한다. 진동은 마찰에 영향을 줄 수 있으며 마찰은 진동을 발생시킬 수

†Corresponding author : chulhee@inha.ac.kr
Tel: +82-32-860-7311, Fax: +82-32-873-7311
◎ 이 논문은 한국윤활학회 2015년도 추계학술대회 (2015.10.14~15/경주 대명리조트) 발표논문임.

있다[11]. 이 때문에 진동 조건에 따라 마찰특성을 변화시키는 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 예를 들면, 진동 조건하에 정, 동마찰의 프로세스에 대한 연구[13], 진동 상태 하에 플라스틱과 아이스 간의 동마찰에 관한 연구[14], 다양한 진동 진폭 조건하에 다양한 재료의 마찰계수에 대한 연구[15] 등이 있다.

지능형 재료인 자기유변탄성체는 여러 기계, 자동차 분야에서 연구가 진행되고 있다. 또한 자기장 유무 조건 하의 마찰에 대해 많은 연구가 진행되고 있으나, 진동 상태 하의 마찰 특성에 대한 연구는 현재 미비한 실정이다. 이 때문에 본 연구에서는 진동 상태 조건하에 자기유변탄성체의 마찰 특성을 고찰하였다.

본 연구에서는 진동 조건을 부여할 수 있는 마찰 시험 장치를 구축하여 다양한 진동 조건에 따른 마찰 실험을 진행하였다. 마찰 특성을 고찰하기 위하여 각 조건하의 마찰계수를 측정 및 분석하였으며 마모량을 측정하여 각 조건하의 마모 특성을 고찰하였다.

2. 자기유변탄성체의 제작

Fig. 1은 본 실험에 사용된 자기유변탄성체이다. 다양한 주성분 재료별 자기유변탄성체 중에서 실리콘 기반 자기유변탄성체의 자기 영향이 가장 크게 나오기 때문에 이번 실험에서 실리콘 기반 자기유변탄성체를 제작하여 실험하였다[8, 9]. 자기유변탄성체의 철 입자 사이즈는 10 μm이며 중량비는 79.8±2%이다. 이 철 입자 사이즈와 중량비는 많은 기존 연구를 참고하여 여러 번의 실험을 통하여 가장 큰 자기 영향이 나타난 것으로 확인하여 선정되었다[8, 9]. 제작과정은 혼합, 경화, 냉각 3 단계를 거쳐 완성되었다.

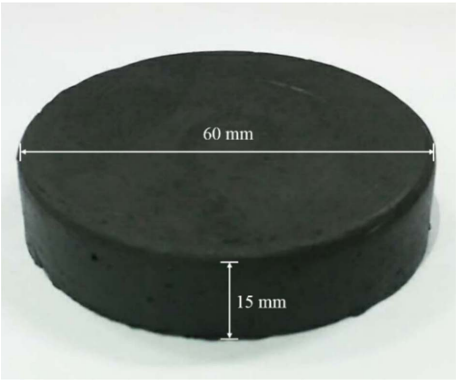

Fig. 1. Dimension of MRE.

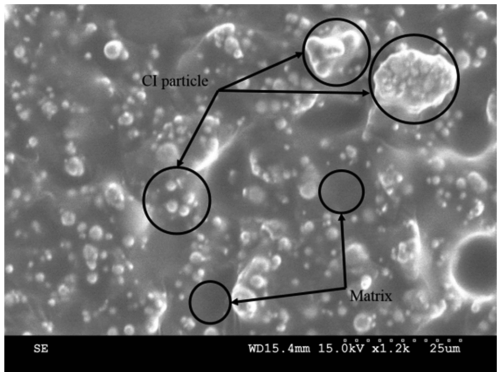

Fig. 2. Scanning electron microscope image of MRE.

전자석에서 생성되는 자기력을 균일하게 작용시키기 위하여 자기유변탄성체를 원통형으로 제작하였으며 지름은 60 mm로 정하였다. 시편이 너무 얇으면 빨리 파괴될 가능성이 크며, 너무 두꺼우면 마찰 표면과 전자석의 간격이 커져 작용하는 자기력이 많이 감소될 수 있기 때문에 두께는 15 mm로 정하였다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 자기유변탄성체의 scanning electron microscope 사진이다. 흰색은 carbonyl iron(CI) particle이며 회색은 실리콘 본체이다. CI particle이 실리콘 본체에 분포되어 있다. 자기장을 인가하게 되면 CI particle들이 뭉쳐서 자기유변탄성체의 강도를 증가시키게 된다.

3. 실험 장비 및 조건

Fig. 3은 실험에 사용된 마찰 시험 장치를 나타내며 가진기, 전자석, 자기유변탄성체, 로드셀, 레이저 거리 센서 및 슬라이더로 구성되어 있다. 전자석 위에 자기유변탄성체를 위치시키고 전자석 밑에 있는 가진기가

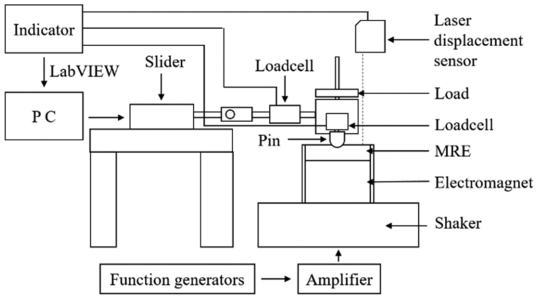

Fig. 3. Schematic diagram of the friction tester.

진동을 발생시켜 자기유변탄성체에 진동을 가한다. 자기유변탄성체 위에 있는 핀이 슬라이더에 의하여 좌우 왕복 운동을 수행한다. 수직 방향과 수평 방향에 로드셀을 하나씩 설치하여 수직 방향과 수평 방향의 실시간 힘을 측정하여 마찰계수를 구한다. 실시간으로 구해진 마찰계수 데이터가 LabVIEW를 통하여 personal computer(PC)에 전송된다. 진폭을 측정하기 위하여 레이저 거리 센서를 설치하였으며, 진동 제어기를 통하여 진동을 가한다. 마찰 특성을 보다 정밀하게 확인하기 위하여 핀의 한 쪽 끝을 반구형으로 제작하였으며, 자기장의 영향을 받지 않는 알루미늄을 사용하여 제작하였다.

우선 진동이 없는 상태에서 실험을 진행하여 베이스라인 데이터로 지정한 다음, 100 Hz 진폭의 다양한 진동을 가한 상태에서 (1, 2, 4 μm) 자기장 (80 mT)의 유무 조건하에 실험을 진행하였다. 부하한 하중은 1.5 N이며 왕복 속도가 10 mm/s 이다. 총 이동 거리는 2000 mm 이다. 마찰 표면 온도가 마찰특성에 큰 영향을 줄 수 있으므로 비접촉식 온도 측정기 (testo 835)를 이용하여 온도를 측정하였다. 실험 오차를 줄이기 위하여 각 조건에서 두 번 이상의 실험을 진행하고 평균 값을 산출하였다.

4. 결과 및 분석

Fig. 4는 진동이 없는 상태에서 자기장 유무에 따른 마찰계수 결과 그래프를 나타낸다. 대부분의 실험 시간에서 자기장을 인가하였을 때의 마찰계수가 자기장을 인가하지 않았을 때보다 작다는 것을 볼 수 있다. 자기장을 인가하면 자기유변탄성체의 강도가 증가되어 마찰 표면에 변형이 작아져 마찰계수가 작아진다는 것을 알 수 있다. 이 실험 결과는 기존의 연구결과와 일치한다[8, 9].

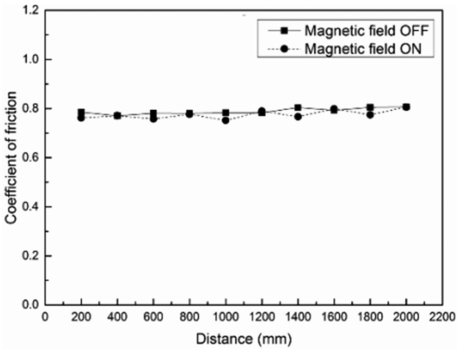

Fig. 4. Result of friction coefficient without vibration.

Fig. 5는 다양한 진폭 (1, 2, 4 μm)의 진동 상태에서 시간에 따른 자기유변탄성체의 마찰계수 결과 그래프이다. Fig. 5(a)에서는 낮은 마찰계수를 유지하다가 400 mm 근처에서 급격히 증가하고 이후에는 일정한 마찰계수를 유지하였다. 처음에 얇은 실리콘 유막이 생

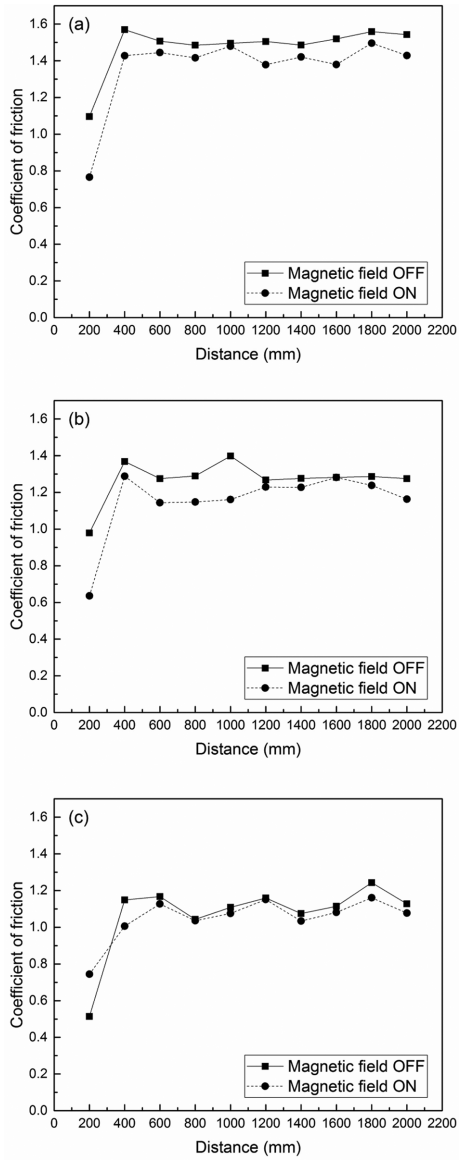

Fig. 5. Friction coefficient results with 100-Hz vibration frequency and different vibration amplitudes: (a) 1 μm, (b) 2 μm, (c) 4 μm.

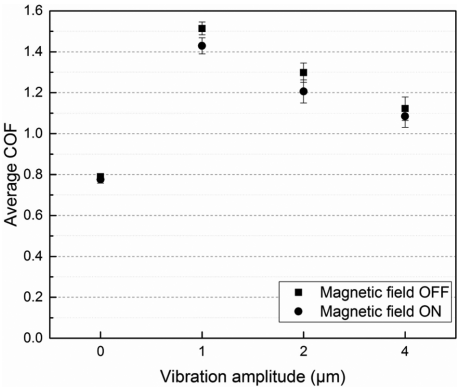

Fig. 6. Average friction coefficient results under different vibration amplitudes.

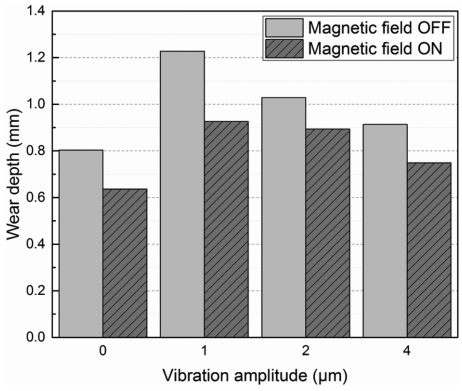

Fig. 7. Wear results under different vibration amplitudes.

겼던 것이 파괴되어 마찰계수가 급격히 증가한 것으로 추측되며 유막이 파괴된 이후에는 마찰계수가 일정하게 유지된 것으로 보인다. Fig. 5(b) 및 (c)에서도 같은 경향이 나타났다.

600 mm 이후에 마찰계수의 변화가 안정하게 유지되기 때문에 이 구간의 마찰계수를 이용하여 평균 마찰계수를 구하였으며 결과는 Fig. 6과 같다. 자기장을 인가하지 않았을 때보다 인가하였을 때 마찰계수가 감소함을 볼 수 있다. 자기장을 인가하면 자기유변탄성체의 강도가 증가하고 마찰 표면의 변형이 줄어들게 되어 마찰계수가 감소한 것으로 보인다. 또한 진동을 가하였을 때 마찰계수가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 탄성체의 마찰 특성은 마찰 표면 온도의 변화에 큰 영향을 받는다[16]. 진동을 가하였을 때에 마찰 표면의 온도 (29.5±0.3°C)가 진동을 가하지 않았을 때 (27.3±0.3°C)보다 높은 것을 볼 수 있다. 이 때문에 진동을 가하였을 때 자기유변탄성체 마찰 표면의 유동성이 증가되어 마찰계수가 증가하는 것으로 보여진다.

각 조건하의 평균 마찰계수 표준편차 값을 관찰해보면 진동상태에서 표준편차 값이 증가되는 것을 볼 수 있다. 표준편차 값의 증가가 가능한 이유는 진동을 가하면 간헐적인 접촉이 생겨 마찰계수의 변화가 크기 때문이다.

진동 진폭의 증가에 따라 마찰계수가 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 이 결과는 기존 연구 결과와 일치하다[15]. 진폭이 증가되면 자기유변탄성체와 핀의 표면이 크게 분리되어 실제 마찰 면적이 작아져 마찰계수가 작아진 것으로 볼 수 있다. 또한 일정한 주파수의 조건하에서 진폭이 커지면 자기유변탄성체 표면에 받은 수직방향 압력의 반대 방향의 순간 가속도가 생겨 자기유변탄성체 표면에 받는 실 하중이 감소하여 마찰계수가 작아진 것으로 추측된다.

진폭이 4 μm일 때 자기장의 유무에 따른 마찰계수의 차이가 다른 진폭의 마찰계수 차이보다 작게 나타났다. 이러한 원인은 진폭이 증가함에 따라 자기유변탄성체의 표면과 핀의 접촉면적이 작아져, 자기유변탄성체의 강도 변화가 마찰계수에 미치는 영향이 작아지기 때문이다.

진동 상태에서 자기유변탄성체의 마모 특성을 평가하기 위하여 마모 깊이를 측정하여 분석하였다. 마모 깊이를 비접촉식 레이저 위치 센서로 측정하여 Fig. 7과 같은 결과가 나타났다. 진동이 없는 상태에서 자기장을 인가하지 않았을 때보다 자기장을 인가하였을 때 마모 깊이가 22% 정도 감소되는 것을 볼 수 있다. 자기장을 인가하였을 때 자기유변탄성체의 강도가 증가함에 따라 접촉 표면의 파괴량이 줄어들어 마모량이 감소되었으며, 이 결과는 기존 연구결과와 일치한다[8-10]. 또한, 진동조건에서도 같은 경향이 나타났다.

진동을 가하였을 때 표면의 마모량이 증가되는 것을 볼 수 있다. 탄성체의 마모 특성은 마찰 표면의 온도와 가해지는 하중에 큰 영향을 받고 있다[16]. 하중과 속도가 일정할 때, 마찰 접촉면의 온도는 마모 특성에 가장 큰 영향을 주는 요소이다. 자기유변탄성체의 마찰 표면 온도가 증가하게 되면 마찰 표면의 유동성이 급격히 높아진다. 이로 인하여 진동상태에서 마찰 표면의 온도가 올라감에 따라 마모량이 증가한다고 추측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 진폭의 진동 조건에서 자기유변탄성체의 마찰 특성을 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 실험을 진행하기 위하여 자기유변탄성체 시편과 진동 상태에서 구동 가능한 왕복 마찰 실험기를 제작하였다. 결과는 다음과 같다.

1. 자기장을 인가하였을 때 진동이 있을 때와 없을 때 모두 마찰계수와 마모량이 감소하였다.

2. 진동을 가하였을 때 표면 온도가 상승되어 마찰계수와 마모량이 증가하였다.

3. 진동 진폭의 증가에 따라 자기유변탄성체와 핀의 분리가 커지게 되어 마찰계수와 마모량이 감소한다.

본 연구 결과는 진동, 진폭의 변화에 따라 자기유변탄성체의 마찰 마모 특성이 변화하는 경향을 관찰할 수 있으며, 다양한 외부 환경에서의 마찰 마모 연구 및 스마트 재료로써의 실제 응용에 도움이 될 것으로 예상된다.

Acknowledgements

본 연구는 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(Grant no. NRF-2015R1D1A1A09060901). 또한, 본 연구는 산업통상자원부 우수기술연구센터 (ATC) 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다(10048876).

References

[1] Deng, H. X., Gong, X. L., "Application of Magnetorheological Elastomer to Vibration Absorber", *Community Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, Vol. 13, No. 9, pp. 1938-1947, 2008.

[2] Shen, Y., Golnarachi, M. F., Heppler, G. R., "Experimental Research and Modeling of Magnetorheological Elastomers", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 15, No. 1, pp. 27-35, 2004.

[3] Danas, K., Kankanala, S. V., Triantafyllidis, N., "Experiments and Modeling of Iron-particle-filled Magnetorheological Elastomers", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 60, No. 1, pp. 120-138, 2012.

[4] Wang, Y. F., Wang, G. F., "Study on the Mechanical Properties of Magnetorheological Elastomers", *Adv. Mater. Res.*, No. 774, pp. 54-57, 2013.

[5] Yeh, J.-Y., "Vibration Analysis of Sandwich Rectangular Plates with Magnetorheological Elastomer Damping Treatment", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 22, No. 3, pp. 035010, 2013.

[6] Liao, G., Gong, X., Xuan, S., Kang, C., Zong, L., "Development of a Real-time Tunable Stiffness and Damping Vibration Isolator Based on Magnetorheological Elastomer", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 23, No. 1, pp. 25-33, 2012.

[7] Kumbhar, S., Maji, S., Kumar, B., "Development and Characterization of Isotropic Magnetorheological Elastomer", *Univers. J. Mech. Eng.*, Vol. 1, No. 1, pp. 18-21, 2013.

[8] Lee, D. W., Lee, K., Lee, C. H., Kim, C. H., Cho, W. O., "A Study on the Tribological Characteristics of a Magneto-Rheological Elastomer", *Trans. ASME, J. Tribol.*, Vol. 135, pp. 014501-1, 2013.

[9] Lian, C. L., Lee, K., Lee, C. H., "Friction and Wear Characteristics of Magneto-rheological Elastomers Based on Silicone/polyurethane Hybrid", *Trans. ASME, J. Tribol.*, Vol. 137, pp.031607, 2015.

[10] Lian, C. L., Lee, D. W., Lee, K. H., Lee, C. H., Kim, C. H., and Cho, W. H., "Application Study of Magneto-Rheological Elastomer to Friction Control", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 28, No. 3, pp. 107-111, 2012.

[11] Lee, D. W., Park, J. H., Lee, C. H., Kim, C. H., Cho, W. O., "Stick-slip Characteristics in Magneto-Rheological Elastomer," *Proc. of The 53nd Korean Soc. of Tribol. and Lubr. Eng.*, pp. 23-24, October 2011.

[12] Maegawa, S., Nakano, K., "Mechanism of Stick-slip Associated with Schallamach Waves", *Wear*, Vol. 268, No. 7-8, pp. 924-930, 2010.

[13] Skare, T., Stahl, J., "Static and Dynamic Friction Processes under the Influence of External Vibrations", *Wear*, Vol. 154, No. 1, pp. 177-92, 1992.

[14] Lehtovaara, A., "Influence of Vibration on the Kinetic Friction between Plastics and Ice", *Wear*, Vol. 115, No. 1-2, pp. 131-138, 1987.

[15] Chowdhury, M. A., Helali, M. "The Effect of Amplitude of Vibration on the Coefficient of Friction for Different Materials", *Tribol. Int.*, Vol. 41, No. 4, pp. 307-314, 2008.

[16] Bhushan, B., *Principles and Applications of Tribology*, 2nd Edition. John Wiley&Sons Inc., NewYork, US, 1999. (ISBN 0-471-59407-5)