자기유변탄성체의 마찰제어적용 연구

연성룡 · 이득원 · 이광희 · 이철희[†] · 김철현* · 조원오*

인하대학교 기계공학부

*장암칼스㈜

Application Study of Magneto-Rheological Elastomer to Friction Control

ChenglongLian, Deuk-Won Lee, Kwang-Hee Lee, Chul-Hee Lee[†], Cheol-Hyun Kim* and Won-Oh Cho*

Department of Mechanical Engineering, Inha University

*R & D Center, CALS Co.

(Received March 25, 2012; Revised April 20, 2012; Accepted April 21, 2012)

Abstract – In this study, application feasibility of Magneto-rheological elastomer to friction control is investigated to identify the reciprocating friction and wear performance in applied magnetic field. Friction and wear of MR elastomer are measured by reciprocating tester by controlling the magnetic field. In the case of applied magnetic field, the coefficient of friction increases as both load and velocity increase. For the case of no magnetic field, the value of coefficient of friction hardly changes during the test. The amount of destruction is measured through cross section images of MR elastomer after tests. The depths of destruction are compared for MR elastomer with or without magnetic field. The results show that the depth of destruction of MR elastomer with magnetic field is deeper than without magnetic field. Based on the obtained results, optimal braking and driving performance can be achieved by controlling the coefficient of friction of MR elastomer, which can be applied to various industrial applications such as driving systems of automobiles and robots.

Keywords – magneto-rheological elastomer(자기유변탄성체), coefficient of friction(마찰계수), friction control(마찰제어), wear(마모)

1. 서 론

자기유변(Magneto-rheological)재료는 자기장에 의해 특성이 변화하는 물질이다. 자성을 가하면 재료내부철 입자에 의해 재료의 강성과 같은 성질이 변하기 때문에 이를 이용하여 다양한 분야에 적용할 수 있다. 자기유변재료는 자기유변유체(MR Fluid) 및 자기유변탄성체(MR Elastomer)로 나눌 수 있다. 자기유변탄성체는 실리콘오일 또는 미네랄오일 등의 비전도성 용매속에 마이크로 크기의 자성을 가질 수 있는 입자들을 분산시킨 비플로이드 용액으로, 자기장이 부하되지 않은 경

우는 분산입자가 뉴튼유체성질을 띠지만 자기장이 부하되면 분산입자가 분극화를 일으켜 부하된 자기장과 평행한 방향으로 섬유질이 형성되어 전단력이나 유동에 대한 저항력을 가지며 기계적 성질이 변하는 유체이다. 이러한 성질을 이용하여 자기유변유체는 브레이크와 클러치, 댐퍼, 엔진마운트 등 여러 분야에 활용되어 왔으며, 진동감쇠성능과 트라이볼로지 성질에 대한 연구도 활발히 진행중이다. 기존에 쓰이던 자기유변유체는 액체의 특성상 항상 밀폐된 용기에 담아서 써야하는 단점이 있기 때문에 이를 보완하기 위해 새로운 자기유변재료인 자기유변탄성체가 개발되었다[1,2].

고체 형태인 자기유변탄성체는 고분자 재료인 고무 혹은 실리콘 등의 주성분에 철 입자가 포함된 형태로

[†]주저자 · 책임저자 : chulhee@inha.ac.kr

구성되어 있다. 기존의 자기유변유체와 같은 성질을 가지고 있으면서도 고체의 성질을 가지고 있기 때문에 사용이 편리하여 다양한 공학 영역에서 응용연구가 가능하다. 예를들어, 마찰 특성의 변화와 MR 유체 미세한 표면 가공의 연구[3,4], 자기유변탄성체를 이용한 진동 감쇠기에 대한 연구[5], 자기유변탄성체 및 유체의 특성 연구와 모델링에 대한 연구[6,7], 터치디스플레이 햅틱가상표면특성에 대한 연구[8], 자기유변탄성체의 감쇠 성능에 대한 연구[9]등이 있다. 또한 재료의 마찰 및 마모특성은 제품수명과 큰 관련이 있기 때문에 연구 및 응용에 있어서 상당히 중요하게 여겨지고 있다.

본 연구에서는 왕복 실험기를 이용하여 자기유변탄성체의 마찰제어연구 및 적용가능성에 대한 실험을 진행하였다. 자기유변탄성체의 마찰 및 마모에 영향을 미치는 요인을 확인하기 위하여 자기장 작용 유무, 속도, 하중 및 이동거리와 같은 다양한 조건에서 실험을 진행하였다. 언급한 조건에 대한 실험을 통해 각 조건에서의 마찰계수 값을 비교 및 분석하였다. 또한 현미경을 이용하여 자기유변탄성체의 표면 이미지와 절단면을 촬영하여 마모 상태를 관찰 및 분석하였다. 스마트 재료인 자기유변탄성체의 마찰 및 마모에 관한 실험결과를 통해 추후 자동차 및 로봇 산업에 있어서 마찰제어를 통해 구동시스템의 최적 성능을 얻을 수 있을 것이다.

2. 실험

Fig. 1(a)는 본 실험에서 사용한 자기유변탄성체로써 높이 15 mm, 지름은 59.5 mm로 제작하였다. Fig. 1(b)는 마찰계수의 측정을 위하여 사용된 핀이며, 높이 18 mm, 지름은 10 mm이고, 마찰 특성을 잘 보이기 위하여 한 쪽 끝에는 반구형으로 제작하였으며, 지속적인 자기장으로 인한 실험 오류를 방지하기 위하여 자기장의 영향을 받지 않는 알루미늄 재질로 제작하였다. 사용된 자기유변탄성체는 천연고무나 실리콘, 고무와 같은 폴리머 재료 안에 MR 유체와 유사하게자기력에 의해 극성을 이룰 수 있는 입자들을 첨가한 탄성체이다[10].

Fig. 2는 실험에 쓰인 왕복 실험기이며 전자석, 로드셀, 자기유변탄성체 시편 받침으로 구성되어 있다. 본 실험에서는 특정한 자기장 인가조건에서 속도를 변화시킬 때 위에 있는 핀과 아래 있는 자기유변탄성체 사이의 마찰계수 변화를 측정하였다. 이는 핀을 제작할 때와 같은 이유로 알루미늄 재료로 실험장치를 제작하였다. 자기유변탄성체에 자기장을 인가하기 위해 전자

Fig. 1. Specimens for reciprocating test; (a) MR elastomer (b) Modified pin.

Fig. 2. Reciprocating friction tester.

석(지름:60 mm, 높이:60 mm, 자기력의 세기:0.2T)을 사용하였다. 하중을 인가할 때는 Pin 위에 분동을 올려놓아서 하중을 인가한다.

Table 1은 마찰계수측정실험에서 각각의 경우에 적용한 조건으로써, 자기장을 인가했을 때와 인가하지 않았을 때의 두 상태로 나누어 실험을 진행하였다. 단일 스트로크길이와 총 왕복실험거리는 각 10 mm와 1,800 mm로 일정하며, 여러번의 초기시험을 통하여 마찰특성을 가장 잘 나타낼 수 있는 하중인가조건과 상대마찰속도를 결정하여 각각 2 N, 3 N과 10, 15, 20 mm/s로 변화시켰다. 이때 인가한 자기력은 0.2T로 일정하다.

Table 1. Experimental conditions

Magnetic Field	Test Number	Velocity (mm/s)	Load (N)	Distance (mm)
Unapplied	Test 1	10	2	1,800
	Test 2	10	3	1,800
	Test 3	15	2	1,800
	Test 4	15	3	1,800
	Test 5	20	2	1,800
	Test 6	20	3	1,800
Applied	Test 7	10	2	1,800
	Test 8	10	3	1,800
	Test 9	15	2	1,800
	Test 10	15	3	1,800
	Test 11	20	2	1,800
	Test 12	20	3	1,800

3. 실험결과 및 논의

Fig. 3은 자기장이 부하되지 않은 조건에서 왕복운동 중에 마찰계수를 측정한 실험결과이다. 이때 Fig. 3(a)는 하중 2N를 작용시킬 때 속도와 실험거리의 변화에 따라 마찰계수를 측정한 결과이고 Fig. 3(b)는 하중 3N를 작용시킬 때 속도와 실험거리의 변화에 따라 마찰계수를 측정한 결과이다. Fig. 4는 자기장이 부하되는 조건에서 측정된 실험결과이며 Fig. 4(a)는 하중 2N를 작용시킬 때 속도와 실험거리의 변화에 따라 마찰계수를 측정한 결과이고 Fig. 4(b)는 하중 3N를 작용시킬 때 속도와 실험거리의 변화에 따라 마찰계수를 측정한 결과이다. 따라서 Fig. 3과 Fig. 4의 결과를 통해서 자기장을 인가했을 때, 높은 하중이 적용되거나 속도가 증가할 경우에 마찰계수가 증가한다. 반면에 자기장을 인가하지 않았을 때는 하중이나 속도가 증가해도 마찰계수가 크게 변화하지 않는다는 것을 관찰하였다.

Fig. 3(a)와 Fig. 4(a), Fig. 3(b)와 Fig. 4(b) 각각 같은 하중에서 자기장이 인가되었을 때와 인가되지 않았을 때의 두가지 경우 서로비교를 해보면 모두 속도의 증가에 따라 마찰계수가 증가한다는 결과가 나타났다. Test 4에서 핀이 400 mm~600 mm 움직였을 때 표면파괴가 발생하여 마찰계수가 갑자기 크게 증가하였으며 움직인 거리가 600 mm를 넘어설 경우에 마모의 속도가 감소하며 마찰계수가 천천히 감소하고 있다.

Fig. 4(a)의 Test 7에서 핀의 움직인 거리가 200 mm

Fig. 3. Result of reciprocating test without magnetic field; (a) Load : 2N, (b) Load : 3N.

Fig. 4. Result of reciprocating test with magnetic field; (a) Load : 2N, (b) Load : 3N.

Fig. 5. Cross section images of MR elastomer after reciprocating test; (a) without magnetic field (b) with magnetic field.

~400 mm일 때 표면 파괴가 일어나서 마찰 계수가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. Test 9와 Test 11에서도 핀이 400 mm~600 mm를 움직였을 때 Test 4와 같은 현상이 발생하였다. 자기장을 인가하지 않는 조건에서는 Test 4를 제외하고 표면 파괴가 상대적으로 적게 나타나고 있다. 자기장을 인가할 경우에는 자기유변탄성체의 강성이 증가하기 때문에 모든 실험에서 표면 파괴가 나타나는 것으로 예상된다.

표면 파괴로 생긴 파괴의 총량을 측정하기 위하여 자기유변탄성체를 반으로 절단하고 그 절단면을 촬영하여 실험 전후의 마모 깊이를 측정하였다. Fig. 5는 자기유변탄성체에 자기장을 인가할 때와 인가하지 않았을 때의 두가지 경우의 마모부분의 깊이를 알기 위하여 마모 부분의 절단면을 촬영한 사진이다. 자기장을 인가하지 않았을 때와 자기장을 인가했을 때의 실험의 수치는 각 0.22 mm와 1.20 mm이다. 자기장을 인가하였을 경우 약 6배 정도 마모가 더 크게 나타나

는 것을 확인하였다. 실험 결과, 표면 파괴는 자기유변탄성체에 자기장을 인가하지 않을 때보다는 자기장을 인가할 때 발생하는 경향이 큰 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 자기유변탄성체의 마찰, 마모특성에 대하여 연구하였다. 여러가지 실험 조건에서 자기유변탄성체의 왕복 마찰을 측정하였고 총 왕복 실험거리는 1,800 mm, 자기장의 세기는 0.2T로 설정해서 속도와 하중을 변화하였을 때의 마찰계수의 변화를 측정하였다. 자기장을 인가한 조건에서는 속도와 하중의 증가에 따라 마찰계수가 증가하고 있으며, 자기장을 인가하지 않은 조건에서는 마찰계수가 크게 변화하지 않는다. 자기장을 인가하는 조건의 경우에는 자기유변탄성체의 성질이 바뀌어 강성이 커지므로 마찰계수가 크게 증가하였다. 자기장을 인가하지 않은 조건하의 실험에서는 마찰계수가 천천히 증가하고 있다. 특정 실험중에 일정한 속도, 하중, 자기력의 조건에서 마찰계수가 갑자기 큰 폭으로 변화하는 현상이 나타나고 있다. 이 현상은 표면 파괴로 인하여 일어나는 것으로 추측된다. 실험 후에 자기유변탄성체의 절단면을 관찰하여 파괴량을 확인해보니 자기장의 인가 유무에 따라 자기유변탄성체의 파괴 깊이를 서로 비교하여 자기장을 인가하지 않을 때보다 인가할 때가 상당량 더 깊은 것을 확인하였다. 시험에 사용된 MR탄성체는 원래 연성이 있는 재질이라서 마찰에 대한 회복력이 있으므로 표면 마모를 잘 일으키지 않으나, 자기장 인가 시 강성이 증가하여 마찰계수가 증가하여 마모가 더 크게 나타나므로, 마모발생에 대한 마찰계수의 한계치에 관련이 있는 것을 확인하였다. 이러한 연구를 바탕으로 자기유변탄성체의 마찰제어는 자동차, 로봇 등 다양한 구동시스템의 마찰계수를 효율적으로 제어하여 최적의 제동 및 구동성능을 구현할 수 있다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2010년도 산학연공동기술개발사업(No.00040836)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝히며, 이에 감사 드립니다. 또한 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었습니다(NIPA-2012-H0401-12-1007).

참고문헌

1. J.H. Park, M.W. Cho, E.S. Lee, C.H. Lee, C.H. Kim, and W.O. Cho, "A Study of Vibration Characteristics for Siloxane based on MR Elastomer," *Proceedings of The 18th International Congress on Sound & Vibration*, pp. 211-217, 2011.
2. Carlson, J. D., US Patent 5054593, 1991.
3. C.H. Lee, D.W. Lee, S.B. Choi, W.O. Cho, and H.C. Yun, "Tribological Characteristics Modification of Magnetorheological Fluid," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 133, Issue 3, 031801, 2011.
4. W.L. Song, S.B. Choi, D.W. Lee, and C.H. Lee, "Micro-precision Surface Finishing Using Magnetorheological Fluid," *Science China*, Vol. 55, No. 1, pp. 56-61, 2012.
5. H. X. Deng and X. L. Gong, "Application of Magnetorheological Elastomer to Vibration Absorber," *Community Nonlinear Science Numerical Simulation*, Vol. 13, Issue 9, pp. 1938-1947, 2008.
6. Shen, Y., Golnarachi, M. F. and Heppler, G. R., 2004, "Experimental Research and Modeling of Magnetorheological Elastomers," *Journal of International Materials and system and Structure*, Vol. 15, No. 1, pp. 27-35, 2004.
7. K. Danas, S.V. Kankanala, and N. Triantafyllidis, "Experiments and Modeling of Iron-particle-filled Magnetorheological Elastomers," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 60, Issue 1, pp. 120-138, 2012.
8. C.H. Lee and M.G. Jang, "Virtual Surface Characteristics of a Tactile Display Using Magneto-Rheological Fluid," *Sensors*, Vol. 11, No. 3, pp. 2845-2856, 2011.
9. Y. Fan, X. Gong, S. Xuan, W. Zhang, J. Zheng, and W. Jiang, "Interfacial Friction Damping Properties in Magnetorheological Elastomers," *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 3, pp. 1-8, 2011.
10. D. W. Lee, C. H. Lee, H. C. Yun, C. H. Kim, and W. O. Cho, "A Study of Tribological Characteristics in Magneto-rheological Elastomer," *Proceedings of The 52nd Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, P-100, 2011.