향상된 폴리우레탄 기반 자기유변탄성체의 마찰 마모 특성연구

연성룡 · 홍성근 · 이광희 · 이철희[†] · 김철현*

인하대학교 기계공학과

*장암칼스(주)

Friction and Wear Properties of Improved Polyurethane Based Magneto-Rheological Elastomer

Chenglong Lian, Sung-Geun Hong, Kwang-Hee Lee, Chul-Hee Lee[†] and Cheol-Hyun Kim*

Dept. of Mechanical Engineering, Inha University

*R & D Center, CALS Co.Ltd.

(Received August 15, 2012; Revised October 7, 2012; Accepted October 8, 2012)

Abstract – Typical magneto-rheological (MR) elastomers consist of silicon-based material. A number of studies have been carried out to evaluate the vibration and tribological characteristics of silicon-based MR elastomers. However, these elastomers have quite low strength, so they have low wear resistance. In this study, polyurethane-based MR elastomers with performances better than those of MR elastomers. Experiments have been conducted on different MR elastomers (Pu MR elastomer, Pu-Si MR elastomer, and Pu-wrapped-Si MR elastomer) and different predefined magnetic directions (Non-Direction, Vertical Direction, and Horizontal Directionality) to evaluate the friction and wear performance under a magnetic field. The results show that Pu-wrapped-Si MR elastomer with a horizontal predefined magnetic field has the best performance in terms of wear.

Keywords – magneto-rheological elastomer(자기유변탄성체), coefficient of friction(마찰계수), polyurethane(폴리우레탄), silicon(실리콘), wear(마모)

1. 서 론

자기유변(magnet-rheological, MR) 재료[1]는 스마트 재료 중의 하나이며 자기장에 의해 특성이 변화하는 물질이다. 자기유변재료는 전기유변(electro-rheological, ER)재료와 달리 반응속도가 빠르기 때문에 기계적인 성질이 신속하게 전환되는 장점을 가지고 있다. 자기유변 유체(MR fluid, MRF)는 자기장 부하 시 유체 흐름의 저항이 증가하는 자기유변 효과를 가진 유체로 Jacob Rabinow가 최초로 발견, 개발하였으며, Winslow의 ER 효과와 유사한 현상을 보인다. 자기유변유체는 낮은 투

자율(permeability)의 용매에 상자성(paramagnetic) 입자를 분산시킨 유체로, 자기장 무부하 시에는 입자가 자유롭게 운동하는 뉴토니안(Newtonian) 유체와 같은 거동을 보이지만 자기장 부하 시에는 입자가 대전되어 체인 구조를 형성하여 항복 응력을 갖는 빙햄(Bingham) 유체의 거동을 보인다. 자기유변유체의 자기장에 따른 항복 응력의 연속적 변화는 댐퍼, 밸브, 마운트, 클러치, 브레이크 등 폭넓은 응용장치에 적용될 수 있다. 그러나 자기유변유체는 유체 특성상 밀폐된 공간에서만 사용할 수 있다는 제한조건이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 자기유변유체의 성질을 그대로 이용하면서 밀폐된 공간이 아닌 곳에서도 사용할 수 있는 자기유변탄성체(MR elastomer, MRE)가 개발되었다. 자기유변탄성체는 고분자 재료인 고무 혹은 실리콘(silicon,

[†]Corresponding Author: chulhee@inha.ac.kr

© 이 논문은 한국윤활학회 2012년도 추계 학술대회 (2012.10.17~19. 제주) 발표논문임.

Si) 등의 주성분에 철 입자가 포함된 형태로 구성되어 있다. 기존의 자기유변유체와 같은 성질을 가지고 있으면서도 고체의 성질을 가지고 있기 때문에 사용이 편리하여 다양한 공학 영역에서 응용연구가 가능하다. 자기유변탄성체는 자기유변유체에 비해서 아직 활용도가 낮지만 자기유변유체가 가지고 있는 단점을 보완할 수 있기 때문에 자기유변유체를 대체할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 현재 개발되고 있는 자기유변탄성체는 아직 기초적인 수준에 머물러 있지만 마찰 특성의 변화와 자기유변유체 미세한 표면 가공의 연구[2,3], 자기유변탄성체를 이용한 진동 감쇠기에 대한 연구[4], 자기유변탄성체 및 유체의 특성 연구와 모델링에 대한 연구[5,6], 터치 디스플레이 햅틱 가상 표면특성에 대한 연구[7], 자기유변탄성체의 감쇠 성능에 대한 연구[8], 자기유변탄성중합체의 트라이볼로지 특성연구[9], 자기유변탄성체의 마찰제어 적용 연구[10], 프로펠러 샤프트 센터 베어링용 진동감쇠장치[11], 마찰제어 로봇패드[12]등 다양한 분야에서 실용화를 위해 연구되고 있다. 또한, 재료의 마찰 및 마모 특성은 제품수명과 큰 관련이 있기 때문에 연구 및 응용에 있어서 상당히 중요하게 여겨지고 있다.

실리콘 기반 자기유변탄성체는 상대적으로 낮은 강도를 가지고 있기 때문에 마모에 매우 취약하다. 따라서 폴리우레탄 기반의 향상된 자기유변탄성체를 제작하고 실험을 통해 마찰 마모 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 일정한 자기력을 인가하는 조건에서 내구성이 향상된 자기유변탄성체의 마찰 마모 특성을 알아보기 위하여 실험을 수행하였다. 실리콘 기반 자기유변탄성체(Si 자기유변탄성체)를 폴리우레탄 기반 자기유변탄성체(Pu 자기유변탄성체, Pu-Si 자기유변탄성체, Pu-W(wrapped)-Si 자기유변탄성체)로 대체하여 내부 상자성 입자의 배열 방향성별(비방향, 수평방향, 수직방향), 일정한 자기력, 속도, 하중을 인가하는 조건에서 마찰 마모 특성을 고찰하고 Si 자기유변탄성체와 서로 비교하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 실험

2-1. 향상된 자기유변탄성체 개발

현재까지 연구되던 대부분의 자기유변탄성체는 실리콘 기반이며 이를 대상으로 진동 및 소음 감쇠에 관한 연구를 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 그러나 실리콘 기반 자기유변탄성체는 상대적으로 낮은 강도를

Fig. 1. Particle direction in MRE; (a) Non-Direction; (b) Vertical Direction; (c) Horizontal Direction.

Fig. 2. Reciprocating friction tester.

가지고 있기 때문에 마모에 매우 취약하다. 따라서 자기유변탄성체의 마모 특성 및 내구성을 향상시키기 위하여 상대적으로 높은 강도를 가지고 있는 폴리우레탄 기반의 향상된 자기유변탄성체를 제작하였다.

본 실험에서는 폴리우레탄 기반(Pu 자기유변탄성체), 폴리우레탄-실리콘 합성 기반(Pu-Si 자기유변탄성체) 그리고 폴리우레탄으로 감싼 실리콘 기반(Pu-W-Si 자기유변탄성체) 3종류의 자기유변탄성체를 사용하여 방향성별(Fig. 1) 9개, Si 자기유변탄성체 방향성별 3개, 모두 12개의 샘플을 제작하여 각 1회의 마찰 및 마모 실험을 진행하였다. 전자석에서 발생하는 자기장을 균일하게 받기 위해서 자기유변탄성체의 면적을 전자석의 면적과 동일하게 하며, 자기유변탄성체의 지름은 60 mm, 두께는 15 mm로 샘플을 제작하였다.

2-2. 실험 장치

Fig. 2는 왕복 마찰 마모 실험장치이며 폴리우레탄 기반으로 제작된 자기유변탄성체의 마찰 마모 특성을 분석하기 위하여 왕복 동마찰 마모 실험을 수행하였다. 자기장의 세기를 조절하기 위해 원통형 전자석(지름: 60 mm, 높이: 60 mm, 자기력의 세기: 80 mT)를 사용했다. 자기유변탄성체에 자기력을 직접적으로 가하기 위하여 자기유변탄성체를 전자석의 상부에 놓고 실험하였다. 핀은 자기력의 영향을 받지 않는 알루미늄 재질로 제작하여 실험을 실시하였다. 왕복 마

Table 1. Experimental Conditions

Parameters	Condition
Contact Type	Reciprocating
Pin Material	Aluminum
Sample Material	MRE
Size of MRE	
- Diameter(mm)	60
- Thickness(mm)	15
MRE Types	Si MRE, Pu MRE, Pu-Si MRE, Pu-W-Si MRE
Direction of Predefined Magnetic Field	Non/Vertical/Horizontal
Load(N)	2
Velocity(mm/s)	5
Time(h)	3
Magnetic Field (mT)	80
Sliding Stroke(mm)	10
Lubricant Condition	No
Temperature	Room Temperature(25°C)

찰력은 오른쪽에 연결된 로드셀을 사용하여 측정을 하였다.

2-3. 실험 방법

Table 1은 실험에 사용된 실험조건을 나타내며, 여러 번의 초기실험으로 하중은 2.0N, 왕복 속도는 5mm/s, 자기력은 80mT, 실험시간은 3시간일 때 자기유변탄성체의 마모 현상 차이가 뚜렷하게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이 데이터를 기반으로 하여 본 실험에서도 같은 조건으로 실험을 실시하였다. 단일 스트로크는 10 mm이다.

3. 실험 결과 및 논의

3-1. 입자 방향성 및 자기유변탄성체 종류에 따른 마찰계수 변화

Fig. 3은 자기장이 인가된 방향성별 자기유변탄성체의 표면 위에서 알루미늄 핀이 직선왕복운동을 할 때, 종류에 따른 자기유변탄성체의 마찰계수 변화를 나타내는 그래프이다. Fig. 3(a)는 비방향성 자기유변탄성체의 실험 결과이다. 결과에 의하면 Pu-W-Si 자기유변탄성체의 마찰계수가 실험 시간에 따라 가장 작은 변

Fig. 3. Results of friction coefficient change with respect to predefined magnetic direction; (a) Non-Direction, (b) Vertical Direction, (c) Horizontal Direction.

화폭을 나타내고 있다. Si 자기유변탄성체와 Pu-Si 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭은 Pu-W-Si 자기유변탄성체보다 크며 Pu자기유변탄성체의 변화 폭이 가장 크다는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 3(b)는 수직 방향성별 자기유변탄성체의 실험 결과이다. 결과에 의하면 Pu-W-Si 자기유변탄성체와 Si 자기유변탄성체의 마찰

Fig. 4. Results of friction coefficient change with respect to MRE types; (a) Si MRE, (b) Pu MRE, (c) Pu-Si MRE, (d) Pu-W-Si MRE.

계수가 변화폭이 가장 작게 나타남을 알 수 있다. Pu 자기유변탄성체와 Pu-Si 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭은 서로 비슷하며 Pu-W-Si 자기유변탄성체와 Si 자기유변탄성체보다 크게 나타났다. 또한, 자기유변탄성체 제작 과정은 수작업으로 진행되고 있기 때문에 제작 시 발생 가능한 기포 및 입자의 뭉침과 같은 현상으로 120 min에서 마찰계수가 순간적으로 상승했다가 다시 감소한 것으로 예상된다. Fig. 3(c)는 수평 방향성 자기유변탄성체의 실험 결과이다. 결과에 따르면 시간에 따라 Si 자기유변탄성체, Pu-Si 자기유변탄성체와 Pu-W-Si 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭은 서로 비슷하며 Pu-Si 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭은 다소 큰 것으로 나타나고 있다. 4가지 종류의 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭을 비교한 결과 비방향성 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭이 가장 크며 수평 방향성 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭이 가장 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 상자성 입자의 방향성에 따른 자기유변탄성체의 마찰계수 변화를 나타낸다. Fig. 4(a)는 Si 자기유변탄성체의 실험 결과이다. 결과에 의하면 실험 진행 1시간 내에 비방향성 Si 자기유변탄성체의 마찰계수 변동폭은 약 0.4 정도로 보이다가 이후에는 마찰계수의 변화가 매우 작다. 수직 방향성과 수평 방향성 자기유변탄성체는 마찰초기부터 끝까지 마찰계수가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. Fig. 4(b)는 Pu 자기유변탄성체의 실험 결과이다. 결과에 의하면 비방향성 Pu 자기유변탄성체의 마찰계수 변화가 가장 크게 나타나고 있으며, 수평 방향성 Pu 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭은 가장 작게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 Pu-Si 자기유변탄성체의 실험 결과이다. 결과에 의하면 실험 시간에 따라 마찰계수가 모두 점점 커지는 경향을 나타낸다. 마찰계수 변화폭은 비방향성 Pu-Si 자기유변탄성체가 가장 크게 나타났다. Fig. 4(d)는 Pu-W-Si 자기유변탄성체의 실험 결과이다. 그래프를 보면 방향성에 따른 마찰계수의 변화가 매우 작으며 다른 종류의 자기유변탄성체와 비교하였을 때 마찰계수의 크기가 상대적으로 작게 나타내는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 4의 결과를 바탕으로 Pu 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭이 가장 크게 나타나고 있으며 Si 자기유변탄성체와 Pu-W-Si 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭이 가장 작게 나타나고 있다. 또한 Pu-W-Si 자기유변탄성체가 가장 작은 마찰계수를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5. Average Coefficient of Friction for all MREs.

3-2. 평균마찰계수

Fig. 5는 실험한 자기유변탄성체의 평균마찰계수를 나타내고 있다. 이 그래프를 보면 Si 자기유변탄성체는 방향성에 따른 마찰계수의 변화가 거의 나타나지 않고 있다. 마찰계수는 상대 물체의 재료성질에 따라 다르게 나타난다. 결과에 따르면 Si 자기유변탄성체 내부 주요 적재재료인 실리콘과 상자성 입자의 마찰에 대한 물리적 성질이 비슷한 것을 알 수 있다. Pu 자기유변탄성체의 경우에는 방향성의 변화에 따라서 마찰계수의 변화가 매우 크게 나타나고 있으며 특히 비방향성을 가졌을 때 마찰계수변화가 가장 크게 나타나고 있다. 따라서 Pu 자기유변탄성체를 제작할 때 부여하는 자기장 방향성이 마찰 특성에 많은 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. 폴리우레탄과 상자성 입자의 마찰에 대한 물리적 성질의 차이가 크게 나는 것으로 추정된다. 방향성에 따라서 분류하였을 때 모든 자기유변탄성체에서 수평 방향성 자기유변탄성체의 평균마찰계수가 가장 작게 나타나고 있으며 Pu-W-Si로 제작한 자기유변탄성체의 평균 마찰계수가 가장 낮게 나타나고 있다. 같은 평면에서 균일하게 배열한 상자성 입자는 자기유변탄성체의 마찰계수 감소에 대해 영향을 주는 것으로 사료된다. 가장 큰 마찰계수를 나타내는 자기유변탄성체는 비방향성 Pu 자기유변탄성체이며, 가장 작은 마찰계수를 나타내는 자기유변탄성체는 수평 방향성 Pu-W-Si 자기유변탄성체다.

3-3. 마모 깊이

자기장이 인가된 자기유변탄성체의 표면 위에서 알루미늄 핀이 직선 왕복운동을 하였을 때 실험이 끝난

Fig. 6. Cross section images of MR elastomer after reciprocating test; (a)-(c) Non/Vertical/Horizontal Direction Si MRE; (d)-(e) Non/Vertical Direction Pu MRE; (f)-(h) Non/Vertical/Horizontal Direction Pu-Si MRE.

Table 2. Wear Depth

MRE Types	Direction	Wear Depth(mm)
Si MRE	Non-Direction	0.2595
	Vertical Direction	0.3701
	Horizontal Direction	0.2259
Pu MRE	Non-Direction	4.7619
	Vertical Direction	0.8253
Pu-Si MRE	Non-Direction	1.8460
	Vertical Direction	2.6587
	Horizontal Direction	1.6667

후에 자기유변탄성체의 단면을 촬영하여 실험 전후의 마모 깊이를 측정하였다. Fig. 6은 자기유변탄성체 마모 부분의 깊이를 알기 위하여 자기유변탄성체를 반으로 절단하고 그 절단면을 촬영한 사진이다. Table 2는 자기유변탄성체종류 및 상자성 입자 방향성별 마모 깊

이를 측정한 결과이다. 마찰 마모 실험에 의해서 자기유변탄성체의 표면이 마모된 정도를 비교하였을 때 Pu-W-Si 자기유변탄성체는 3가지 방향성 모두 표면마모가 나타나지 않았고 Pu 자기유변탄성체 수평 방향성도 표면 마모가 나타나지 않았다. 왕복 동마찰 마모 실험을 수행하였을 때 자기유변탄성체의 표면이 마모되는 정도는 재질의 변화뿐이 아니라, 방향성의 변화에 의해서 마모 정도가 크게 좌우되고 있다. 마모가 일어난 자기유변탄성체를 비교하였을 때 수평 방향성 자기유변탄성체의 표면 마모가 가장 적게 일어나고 있음을 알 수 있으며 그 중에서 Pu 자기유변탄성체가 방향성의 변화에 따른 마모 깊이의 변화가 가장 크다. 이번 실험 결과에 의하면 내마모성은 각 재료 중에서 Pu-W-Si 자기유변탄성체가 가장 뛰어나며 각 방향성 중에서는 수평 방향성 자기유변탄성체의 내마모성이 가장 뛰어나다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 일정한 자기장력을 인가하는 조건에서 향상된 자기유변탄성체 재료 및 상자성 입자 방향성에 따른 마찰 마모 특성에 관한 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비방향성 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭이 가장 크며 수평 방향성 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭은 가장 작다는 것을 알 수 있다. Pu 자기유변탄성체의 마찰계수 변화폭이 가장 크게 나타나고 있으며 Si 자기유변탄성체와 Pu-W-Si 자기유변탄성체는 다소 작게 나타나고 있다.

2. Si 자기유변탄성체는 방향성의 변화에 따른 평균 마찰계수의 변화가 매우 작게 나타나고 있다. 이를 보았을 때 자기유변탄성체의 방향성이 Si 자기유변탄성체의 마찰 특성에 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있고 Pu 자기유변탄성체는 방향성의 변화에 따른 평균 마찰계수의 차이가 매우 크게 나타나고 있는 것으로 보아 Pu 자기유변탄성체의 마찰 특성에 방향성이 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 방향성의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 보았을 때, 수평 방향성 자기유변탄성체의 평균마찰계수가 각 방향성 중 가장 작게 나타나고 있으며 Pu-W-Si 자기유변탄성체의 평균마찰계수가 가장 작게 나타나고 있다.

3. 방향성의 변화에 따른 마모 깊이 차이는 자기유변탄성체가 가장 크게 나타나고 있으며 Pu-W-Si 자기유

변탄성체는 표면 마모가 일어나지 않았다. 자기유변탄성체 방향성에 따른 마모 깊이 변화의 경향성은 뚜렷하게 나타나지 않고 있으나 수평 방향성 자기유변탄성체가 모든 경우에서 표면 마모가 가장 작게 나타나고 있다. 내마모성은 각 재료 중에서 Pu-W-Si 자기유변탄성체가 가장 뛰어나며 각 방향성 중에서는 수평 방향성 자기유변탄성체가 가장 뛰어난 것을 알 수 있다.

4. 비방향성 Pu 자기유변탄성체의 평균마찰계수가 가장 크고, Pu-W-Si 자기유변탄성체 수평방향의 평균마찰계수가 가장 작게 나타나고 있다. 비방향성Pu 자기유변탄성체의 표면 마모가 가장 크게 일어나고 있으며 수평 방향성 Pu 자기유변탄성체와 Pu-W-Si 자기유변탄성체는 마모가 일어나지 않았다.

5. Si 자기유변탄성체 내부 주요 적재재료인 실리콘과 상자성 입자의 마찰에 대한 물리적 성질이 비슷한 것을 알 수 있으며 폴리우레탄과 상자성 입자의 마찰에 대한 물리적 성질의 차이가 크게 나는 것으로 추정된다. 같은 평면에서 균일하게 배열한 상자성 입자는 자기유변탄성체의 마찰계수 감소에 대해 영향을 주는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0025763). 또한 본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구 결과입니다.

참고문헌

1. Shahinpoor, M. and Schneider, H. J., *Intelligent materials*, Chap. 14, pp.341, The royal society of Chemistry, UK, 2008.
2. Lee, C. H., Lee, D. W., Choi, S. B., Cho, W. O., and Yun, H. C., "Tribological Characteristics Modification of Magnetorheological Fluid," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 133, Issue 3, 031801, 2011.
3. Song, W. L., Choi, S. B., Lee, D. W., and Lee, C. H. "Micro-precision Surface Finishing using Magnetorheological Fluid," *Science China*, Vol. 55, No. 1, pp. 56-61, 2012.
4. Deng, H. X., and Gong, X. L., "Application of Magnetorheological Elastomer to Vibration Absorber," *Community Nonlinear Science Numerical Simulation*,

- Vol. 13, No. 9, pp. 1938-1947, 2008.
5. Shen, Y., Golnarachi, M. F., and Heppler, G. R., "Experimental Research and Modeling of Magneto-rheological Elastomers," *Journal of International Materials and system and Structure*, Vol. 15, No. 1, pp. 27-35, 2004.
  6. Danas, K., Kankanala, S. V., and Triantafyllidis, N., "Experiments and Modeling of Iron-particle-filled Magneto-rheological Elastomers," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 60, No. 1, pp. 120-138, 2012.
  7. Lee, C. H., and Jang, M. G., "Virtual Surface Characteristics of a Tactile Display Using Magneto-Rheological Fluid," *Sensors*, Vol. 11, No. 3, pp. 2845-2856, 2011.
  8. Fan, Y., Gong, X., Xuan, S., Zhang, W., Zheng, J., and Jiang, W., "Interfacial Friction Damping Properties in Magneto-rheological Elastomers", *Smart Materials and Structures*. Vol. 20, No. 3, pp. 1-8, 2011.
  9. Lee, D. W., Lee, C. H., Yun, H. C., Kim, C. H., and Cho, W. O., "A Study of Tribologic al Characteristics in Magneto-rheological Elastomer," *Proceedings of The 52nd Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, pp. 23-24, 2011.
  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", *The Korean society of tribologists and lubrication engineers*, Vol. 28, No. 3, pp. 107-111, 2012.
  11. Propeller shaft center bearing vibration decrease system, Korean patent 1020100051250, 2011.
  12. Friction control of robot pad, Korean patent 1020100024773, 2010.