

## 자기유변탄성체 액츄에이터의 마찰특성 연구

이득원 · 이철희\* · 김철현\* · 조원오\*

인하대학교 기계공학부  
\*장암칼스㈜

### A Study of Friction Characteristics in Magneto-Rheological Elastomer

Deuk-Won Lee, Chul-Hee Lee<sup>†</sup>, Cheol-Hyun Kim\* and Won-Oh Cho\*

School of Mechanical Engineering, Inha University  
\*R & D Center, Chang Am CALS Co.

(Received May 1, 2011; Revised June 20, 2011; Accepted June 28, 2011)

**Abstract** – In this study, friction characteristics using elastomeric actuator with Magneto-rheological (MR) materials are identified. Typically, Magneto-rheological materials are divided into two groups by MR fluid in fluid state and MR elastomer in solid state like rubber. The stiffness characteristics of Magneto-rheological material can be changed as magnetic field is applied. MR fluid has been applied to various industry fields such as to brake, clutch, damper, engine mount and etc. However, MR fluid has been used under the sealed condition to prevent leaking issues. In order to overcome these problems, MR elastomer that has same property as MR fluid has been developed and studied. MR elastomer mainly consists of polymer material such as natural rubber or silicon rubber with particles that can be polarized with magnetic field. And it is called as a smart material since its stiffness and damping characteristics can be changed. In this study, MR elastomer is produced and pin-on-disc tests are carried out to identify the friction characteristics of the material. Several test conditions are applied to evaluate the feasibility to use as a smart actuator in the field of vibration control.

**Keywords** – magneto-rheological elastomer(자기유변 탄성체), coefficient of friction(마찰계수), magnetic field(자기장), pin-on-disc test(핀온디스크시험)

### 1. 서 론

자기유변학적 (Magneto-rheological, MR) 재료들은 자기장에 의해 특성이 변화하는 물질이다. 자기유변 물질은 사용되는 비자성 물질의 종류에 따라서 구분되며, 대표적으로 액체형태인 자기유변 유체(MR Fluid, MRF) 와 고무와 같은 고체형태인 자기유변 탄성체(MR Elastomer, MRE) 두 가지로 나눌 수 있으며, 현재 두 물질이 가장 활발히 연구되고 있다. 자기유변 유체는 실리콘 오일 또는 미네랄 오일 등의 비전도성 용

매 속에 마이크로 크기의 자성을 가질 수 있는 입자들을 분산시킨 비콜로이드 용액으로, 자기장이 부하되지 않은 경우에는 분산 입자가 뉴턴 유체 성질을 띠지만 자기장이 부하 되면 분산 입자가 분극화를 일으켜 부하된 자기장과 평행한 방향으로 섬유질이 형성되어 전단력이나 유동에 대한 저항력을 가지며 기계적 성질이 변하는 유체이다. 이러한 성질을 이용하여 자기유변 유체는 브레이크와 클러치, 댐퍼, 엔진마운트 등 여러 분야에 활용되어 왔으며, 진동 감쇠 성능과 트라이볼로지 성질에 대한 연구도 활발히 진행 중이다[1-3]. 자기유변 유체는 유체 특성상 밀폐된 공간에서만 사용할 수 있다는 제한조건이 있으며, 이러한 문제점을 보완하기 위

<sup>†</sup>책임저자 : chulhee@inha.ac.kr

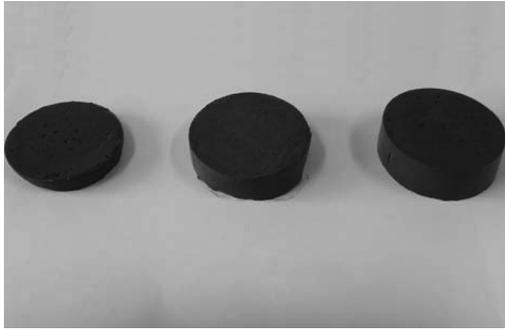


Fig. 1. MR elastomer.

해 자기유변 유체의 성질을 그대로 이용하면서 밀폐된 공간이 아닌 곳에서도 사용 할 수 있는 자기유변 탄성체가 개발되었다. 또한, 자기유변 탄성체는 지능자기장의 부하 유무에 따라 감쇠 및 강성 특성이 변화하는 성질도 가지고 있다. 현재 국내의 연구 기관 및 다양한 분야에서 자기유변 탄성체에 대한 새로운 연구들이 시도되고 있지만 아직은 기초적 수준에 머무르고 있다[4].

Fig. 1은 본 연구를 위하여 개발된 자기유변 탄성체이다. 자기유변 탄성체는 천연고무나 실리콘 고무와 같은 폴리머 재료 안에 자기유변 유체와 유사하게 자기력에 의해 극성을 이룰 수 있는 입자들을 첨가한 고체이다. 본 연구에서는 자기유변 탄성체를 제작하고 마찰, 마모 등의 트라이볼로지 특성을 알아보기 위한 초기 실험을 수행하며, 본 연구에서는 자기유변 탄성체의 마찰 특성을 자기장 유무 및 여러가지 실험 조건을 고려하여 비교 평가한다.

## 2. 자기유변 탄성체 제작

본 연구에서 사용된 자기유변 탄성체는 서로 다른 점도를 지닌 2가지 고분자를 사용하여( $\alpha$ ,  $\omega$ -Vinyl Polydimethylsiloxane과  $\alpha$ ,  $\omega$ -Hydrido Polydimethylsiloxane) Hydrosilylation 반응을 통해 실리콘 젤로 합성을 하고, Fe, Ni, Co 분말을 첨가하여 자성에 대하여 극성이 나타나도록 하였다. 첨가제와 실리콘 고분자와의 분리되는 속도를 늦추고 실리콘 반응 시 각 첨가제와의 결합이 이루어지도록 하기 위한 점착 촉진제로 Vinyl Trialkoxy Silane과 Hydrogen Trialkoxy Silane 등을 첨가하였다. 촉매로는 백금산 6배위수와 Divinyl Tetramethyl Disiloxane을 사용하여 반응시킨 후 적정 Pt 함량이 되도록 첨가하여 합성하였다.

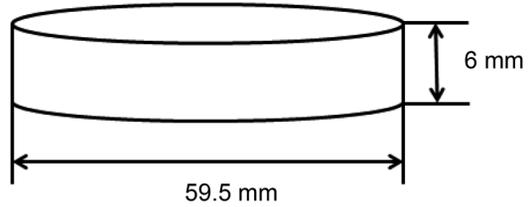


Fig. 2. Dimension of MR elastomer specimen.



Fig. 3. Pin-on-disc tester.

합성된 자기유변 탄성체는 미리 제작된 형틀에 붓고 기포가 제거되도록 상온에서 방치하였다가 형틀을 조립하여 오븐에서 2시간동안 경화하였다. 자기유변 탄성체의 크기는 Fig. 2에서와 같이 직경 59.5 mm 두께 6 mm으로 제작되었다.

## 3. 실험

### 3-1. 실험 장비

Fig. 3은 핀 온 디스크 시험기(Pin-on-disc tester)이며 자기유변 탄성체의 마찰 특성을 조사하기 위하여 핀 온 디스크 실험을 실시하였다.

자기유변 탄성체도 자기유변 유체와 동일한 특성인 자기장 부하 유무에 따른 강성변화를 가지며, 본 연구용으로 개발된 핀 온 디스크 시험기는 자기장을 임의로 부하할 수 있는 장비로써, 자기유변 재료들의 특성 변화를 측정하기 위해서 개발된 장비이다. 실험은 자기장 부하

유무에 따른 다른 특성 때문에 자기장의 부하 유무 및 하중의 변화를 실험의 조건으로 나누어 진행하였다.

3-2. 실험 방법

첫 번째 실험은 마찰 특성 확인 실험을 하기 전에 자기장 부하 유무에 따른 자기유변 탄성체의 특성을 확인하기 위해 광학현미경(Microscope)를 이용하여 자기장을 부하하였을 때와 부하하지 않았을 때의 표면을 관찰하였다. 그 다음으로 자기유변 탄성체 고유의 성질을 확인하기 위하여 자기장을 부하하지 않은 조건에서 마찰 특성 실험을 실시 하였으며, 자기장을 부하하면 강성이 변하는 자기유변 탄성체의 특성이 마찰에 미치는 영향을 확인하기 위하여 자기장을 부하한 조건에서 실험을 실시하였다. 자기유변 탄성체의 성능을 확인하여 위하여 자기장을 임의로 부하할 수 있는 핀 온 디스크 시험기를 이용하여 마찰계수를 측정하였다. 실험에 사용된 핀의 직경은 5 mm, 길이는 30 mm이며 실험 재질이 고무재질이라 핀으로 실험할 경우 실험 시작과 동시에 핀의 날카로운 부분에 고무가 찢어지는 현상이 발생하는 현상을 제거하기 위하여 Fig. 4와 같이 핀 앞부분을 직경 9.5 mm의 강구 모양으로 제작하



Fig. 4. Modified specimen of pin.

Table 1. Experimental conditions

		Load (N)	Velocity (mm/s)	Time (hour)	Gauss (G)
No Magnetic Force	Test 1	5	2.36	2	0
	Test 2	10	2.36	2	
	Test 3	15	2.36	2	
Applied Magnetic Force	Test 4	5	2.36	2	20
	Test 5	10	2.36	2	
	Test 6	15	2.36	2	

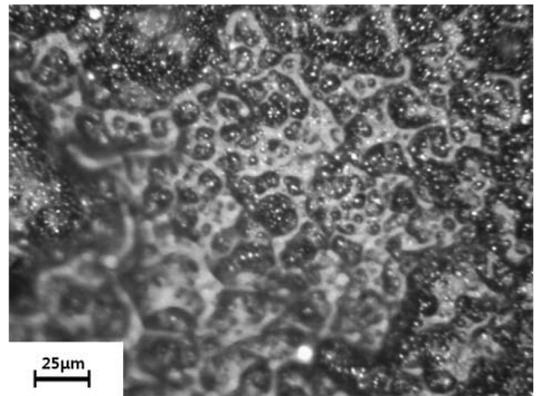
여 실험을 실시하였다.

Table 1은 핀 온 디스크 실험에 사용된 실험 조건을 나타내며 자기장을 부하한 조건과 부하하지 않은 조건으로 분류하였다. 실험 조건은 고무 분야에서 일반적으로 사용하는 조건에서의 실험 속도와 시간을 사용한 것이다. 실험 속도와 시간은 각각 2.36 mm/s와 2시간으로 일정하고 하중 조건만을 5 N, 10 N, 15 N으로 변경하며 실험을 실시하였다.

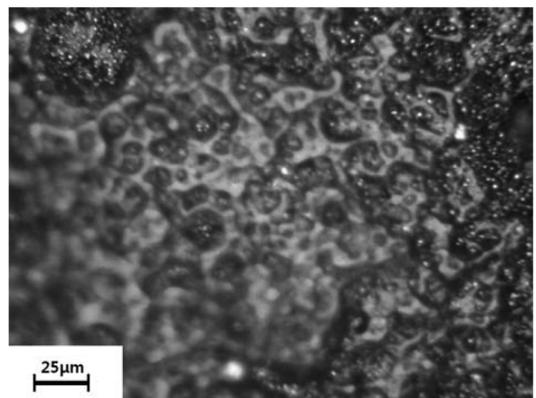
4. 실험 결과 및 논의

4-1. 표면 특성

자기장 부하 유무에 따른 자기유변 탄성체의 특성을 확인하기 위해 광학현미경(IMS-D-345)을 이용하여 자기장을 부하하였을 때와 부하하지 않았을 때의 표면을 관찰하였다. Fig. 5(a)는 자기장을 부하하지 않았을 때



(a)



(b)

Fig. 5. Microscopic images of CI particles: (a) no magnetic field, (b) magnetic field applied.

자기유변 탄성체의 표면이고, Fig. 5(b)는 자기장을 부하한 상태에서의 표면이다. 자기유변 탄성체는 자기장을 부하하지 않았을 때는 탄성이 낮으며, 자기장을 부하하게 되면 탄성과 강성이 동시에 커지는 변화를 보인다. Fig. 5(b)를 보면 자기장을 부하하지 않았을 때와는 달리 자기장을 부하하였을 때 극성을 가지는 CI 입자(CI-particle)가 자력으로 인해 뭉치려고 하는 현상을 확인할 수 있다. 이러한 CI 입자의 뭉쳐지는 현상으로 인해 구조 변화가 발생하며, 자기유변 탄성체의 자기장 유무에 따른 특성 변화를 확인하였다.

4.2. 마찰 특성 실험

자기유변 탄성체의 특성에 따른 마찰계수 변화에 대하여 알아보기 위하여 마찰 실험을 실시하였다. Fig. 6은 핀 온 디스크 시험기를 이용하여 측정한 마찰계수

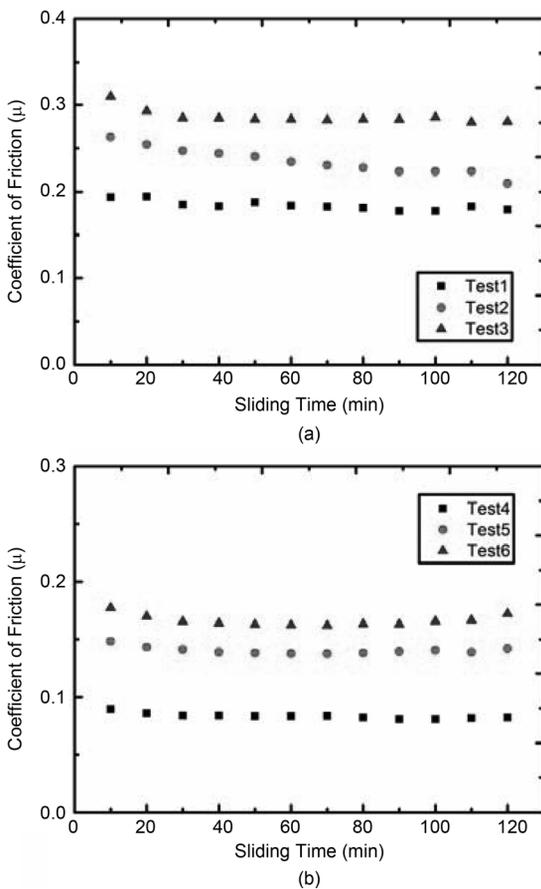


Fig. 6. Measurement of friction coefficient using pin-on-disc tester: (a) no magnetic field, (b) magnetic field applied.

데이터를 나타낸다. Fig. 6(a)와 (b)를 살펴보면 자기장을 부하하지 않은 실험(Fig. 6(a))이 전체적으로 자기장을 부하한 실험(Fig. 6(b))보다 마찰계수가 높게 측정되었으며 하중이 높을수록 마찰계수가 큰 것을 확인할 수 있다. 이로써 자기장을 부하한 경우에 자기유변 탄성체의 강성이 높아지며, 강성이 높아짐에 따라 마찰계수가 낮아져 마찰 성능이 향상된 것을 확인하였다.

4.3. 실험 후 표면 분석

핀 온 디스크 실험 이후에 고무에서만 발생하는 현상인 ‘Schallmach 파장(Schallmach waves)’ 현상과 마모로 인해 발생된 마모 입자(Worn particle)가 자기유변 탄성체 표면에서도 발생되었다[5]. Fig. 7은 자기유변 탄성체에서 발생된 Schallmach 파장과 마모 입자를 보여준다. Fig. 7(a)에서의 솔리드 화살표 방향이 실험의 진행방향이며, 화살표 앞쪽으로 Schallmach

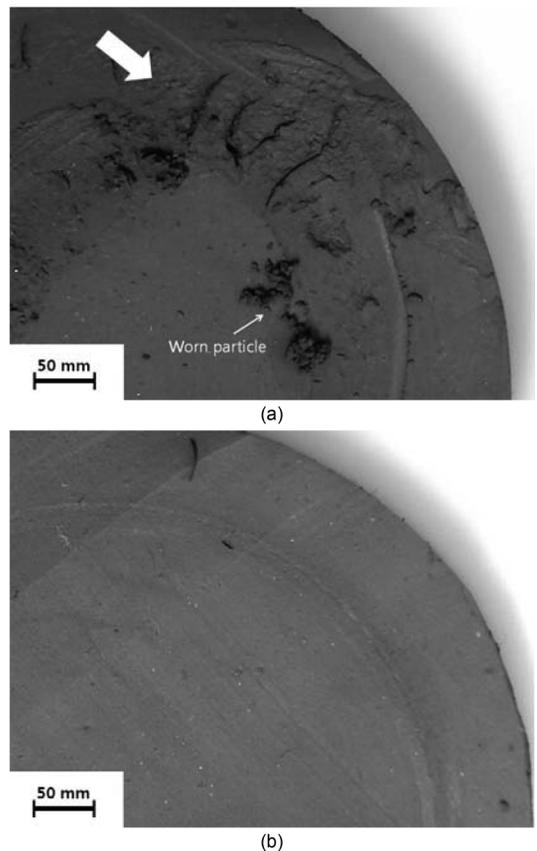


Fig. 7. MR elastomer surfaces after pin-on-disc tests: (a) no magnetic field, (b) magnetic field applied.

파장 현상과 마모 입자 현상을 보여준다. Schallamach 파장과 마모 입자 현상은 고무에서 마찰이 발생할 때 나타나는 대표적인 현상이다. Schallamach 파장은 큰 반경을 가진 부드러운 고무 표면 위를 단단한 표면이 횡으로 움직일 때 응착 효과가 운동에 대한 마찰 저항을 일으킨다. 이때 접촉면에서 발생하는 상대 운동에 의해 처음 모서리부터 시작해서 접촉면을 따라 전파되어 접촉을 통해서 표면이 접어지거나 뒤틀리고 휘면서 표면의 변위들이 움직이는 현상을 Schallamach 파장이라고 한다. 자기장을 부하하여 강성이 강해진 자기유변 탄성체에서(Fig. 7(b))는 자기장을 부하하지 않은 자기유변 탄성체(Fig. 7(a))와 비교하여 강성이 높아짐에 의해 Schallamach 파장 현상 및 마모 입자가 적게 발생하였으며, 이러한 결과로 마찰 특성이 향상된 것을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 논문은 자기유변 탄성체를 액츄에이터로 사용하기 위하여 중요 요소인 마찰 특성에 대한 연구를 수행하였다. 자기유변 탄성체는 실리콘 고무를 기반으로 2가지 서로 다른 점도를 가진 고분자와 자기장에 극성을 가지는 재료의 혼합물들을 혼합하여 제작하였으며, 제작된 자기유변 탄성체를 이용하여 실험을 실시하였다. 자기장 부하 유무에 따른 구조 변화를 광학현미경을 이용한 표면 측정을 통하여 확인하였다. 마찰 성능을 확인하기 위해 핀 온 디스크 시험기를 이용하여 자기장 부하 유무와 세 가지 다른 하중 조건에서 실험을 실시하였다. 실험 결과, 하중이 낮을수록 마찰이 적게

일어난다는 것을 확인하였으며, 자기장을 부하한 자기유변 탄성체에서 마찰 성능이 향상된다는 것을 확인하였다. 또한, 고무와 마찬가지로 자기유변 탄성체에서도 Schallamach파장과 마모 입자가 생성된 것을 확인하였다. 이러한 연구를 바탕으로 최적의 성능을 가지는 자기유변 탄성체를 개발하여 실제 액츄에이터 시스템으로의 적용이 가능하다.

## 후 기

본 논문은 지식경제부 정보통신산업진흥원의 “생체신호를 이용한 IT기반 재활의료기기 기술 사업”(C6150-1102-0001)의 지원에 의해 수행되었음.

## 참고문헌

1. Carlson, J. D., US Patent 5054593, 1991.
2. Lee, C. H. and Jang, M. G., “Virtual Surface Characteristics of a Tactile Display Using Magneto-Rheological Fluids,” *Sensors*, Vol. 11, No. 3, pp. 2845-2856, 2011.
3. Yang, G., Spencer Jr., B. F., Carlson, J. D., and Sain, M. K., “Large-scale MR Fluid Dampers: Modeling and Dynamic Performance Considerations,” *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 309-323, 2002.
4. Zhou, G. Y., “Shear Properties of a Magnetorheological Elastomer,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, pp. 139-146, 2003.
5. Fukahori, Y., Gabriel, P., and Bushfield, J. J. C., “How does Rubber Truly Slide between Schallamach Waves and Stick-slip Motion?,” *Wear*, Vol. 269, pp. 854-866, 2010.