

## 자기장 영향에 따른 자기유변탄성체의 구름 마찰 특성 연구

연성룡<sup>1</sup> · 이광희<sup>1</sup> · 김철현<sup>2</sup> · 이철희<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 기계공학과, <sup>2</sup>장암칼스 주식회사

### A Study on Rolling Friction Characteristics of Magneto-Rheological Elastomer under Magnetic Fields

Chenglong Lian<sup>1</sup>, Kwang-Hee Lee<sup>1</sup>, Cheol-Hyun Kim<sup>2</sup> and Chul-Hee Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha University

<sup>2</sup>R & D Center, CALS Co.,

(Received April 13, 2014 ; Revised May 15, 2014 ; Accepted May 20, 2014)

**Abstract** – Magneto-rheological elastomer (MR elastomer) is a smart material, because it has mechanical properties that change under a magnetic field. An MR elastomer changes its stiffness characteristics when the inner particles (iron particles) align along the direction of a magnetic field. There has been much research to make use of this characteristic to control vibration issues in various mechanical systems, such as for mounting systems in the automotive field, home appliances, etc. Furthermore, the friction and wear properties of MR elastomer have been studied, as these relate to the durability of the material needed to meet engineering requirements. Rolling friction (or rolling resistance) is one of these friction properties, but has not yet been studied in the context of MR elastomers. In this study, an MR elastomer is fabricated in the shape of a hollow cylinder to evaluate the rolling friction characteristic under a magnetic field. The test apparatus is setup and a strain gauge is used to calculate the rolling resistance under test conditions. Permanent magnets are used to supply the magnetic field during tests. The load and rolling speed conditions are also considered for the tests. The test results show that rolling friction characteristic has a different trend under different magnetic field, load, and rolling speed conditions. It is assumed that the stiffness change of an MR elastomer under a magnetic field has an effect on the rolling friction characteristic of the MR elastomer. For the future work, the rolling friction characteristics of MR elastomers will be controlled by adjusting the strength of the magnetic field using electromagnets.

**Keywords** – coefficient of friction(마찰계수), magneto-rheological elastomer(자기유변탄성체), rolling friction(구름마찰), smart material(지능재료)

### 1. 서 론

자기유변탄성체(MR Elastomer)는 자력을 가하면 재료의 성질이 변하는 특성을 가진 자기유변재료의 하나이며, 고체 형태인 자기유변탄성체는 천연고무나 실리콘 고무와 같은 폴리머 재료 안에 극성을 이룰 수 있는 입자들을 첨가한 자기유변물질이다. 기존의 자기유변유체와 같은 성질을 가지고 있으면서도 고체의 성질

을 가지고 있기 때문에 사용이 편리하여 다양한 공학 영역에서 연구와 응용이 가능하다.

현재 개발되고 있는 자기유변탄성체는 아직 기초적인 수준에 머물러 있으나 마찰 특성의 변화와 자기유변유체의 미세한 표면 가공의 연구[1-8], 자기유변탄성체를 이용한 진동 감쇠기에 대한 연구[9], 자기유변탄성체 및 유체의 특성 연구와 모델링에 대한 연구[10-11], 터치 디스플레이 햅틱 가상 표면특성에 대한 연구, 자기유변탄성체의 감쇠 성능에 대한 연구, 프로펠러 샤프트 센터 베어링용 진동감쇠장치, 마

\*Corresponding author : chulhee@inha.ac.kr  
Tel: +82-32-860-7311, Fax: +82-32-873-7311

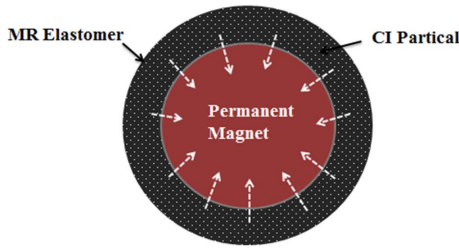


Fig. 1. MR Elastomer under magnetic field.

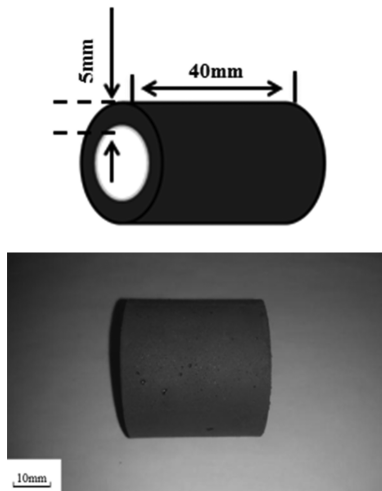


Fig. 2. MR Elastomer specimen for rolling friction test.

찰제어 로봇패드 등[12-27] 다양한 분야에서 연구되고 있다. 또한, 재료의 마찰 및 마모 특성은 제품 수명, 안전성과 큰 관련이 있기 때문에 연구 및 응용에 있어서 상당히 중요하다. 또한 실리콘 기반 자기유변탄성체를 대상으로 자기장의 변화에 따른 정도, 표면 접도를 변화시켜 미끄럼 마찰 계수의 변화에 대한 연구가 수행되었다. 예를 들면, 자기유변탄성중합체의 트라이블로지 특성연구[18], 자기유변탄성체의 마찰제어 적용 연구[19], 향상된 폴리우레탄 기반 자기유변탄성체의 마찰 마모 특성 연구[22] 등이 있고, 그 결과 자기장의 유무에 따라 자기유변탄성체의 미끄럼 마찰계수가 변화하는 것을 확인하였다.

본 연구는 실리콘 기반 자기유변탄성체의 구름마찰 특성을 분석하기 위해 타이어 형태의 자기유변탄성체와 구름 마찰 시험기를 제작하여 자기장의 유무에 따른 구름 마찰실험을 진행하여 구름마찰계수의 변화를 분석하였다.

## 2. 자기유변탄성체

자기유변탄성체는 지능 재료중의 하나이며 자기장을 부하하면 내부에 있는 철 입자(CI particle) 들이 자기장방향으로 정렬되어 자기유변탄성체의 강성을 증가시킬 수 있다(Fig. 1). 자기유변탄성체의 표면 강성이 증가되면 표면 변형 손실을 줄일 수 있어 마찰력을 감소시킬 수 있다. 기존 연구로 자기유변탄성체의 미끄럼 마찰계수는 자기장의 세기에 따라 변화함을 확인하였다[27]. 표면 변형은 미끄럼 마찰 뿐만 아니라 구름 마찰에도 많은 영향이 있으므로 자기유변탄성체의 자기장 변화에 따른 구름 마찰특성을 연구하기 위하여 Fig. 2와 같이 자기유변탄성체 시편을 제작하였다.

연구에 사용된 자기유변탄성체는 실리콘 기반으로 제작하였고, 사용된 철 입자의 크기는 10  $\mu\text{m}$ 이며 투입비율은 79.8 $\pm$ 2%이다. 제작 시 140 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 60분 동안 경화하고 80 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 냉각시켰다. 또한 금형과 자기유변탄성체 사이에 삽입한 파이프는 자기장의 영향을 받지 않는 알루미늄으로 제작하였다. 실리콘을 경화시킬 때, 파이프와 분리되는 현상을 방지하기 위해 알루미늄 파이프 표면을 요철형태로 가공하여 경화될 때 실리콘과 파이프가 분리되지 않도록 하였다.

## 3. 연구방법 및 내용

Fig. 3는 구름마찰계수 측정을 위하여 사용한 실험 장치를 나타낸다. 자기유변탄성체는 두 개의 알루미늄 판(70 $\times$ 20 $\times$ 2 mm) 사이에 위치하고 있으며, 위에 있는 알루미늄 판이 슬라이더(Slider)에 의하여 좌우 반복운동을 수행한다. 질량체는 위에 있는 알루미늄 판 위에 위치하여 자기유변탄성체에 하중을 부하한다. 이 때 자기유변탄성체의 부드러운 성질 때문에 왕복 운동시 하중에 의해 스트레인 게이지 상하방향의 전단력이 생겨 정확한 마찰계수를 측정할 수 없는 문제가 발생한다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해 스트레인 게이지의 양 쪽을 조인트 형태로 만들어 스트레인 게이지 상하방향의 변형을 없애 정확한 데이터를 구할 수 있게 하였다. 영구자석은 자기유변탄성체 시편의 중간 파이프에 위치하며, 슬라이더와 알루미늄 판 사이에는 스트레인 게이지가 위치하여 마찰계수를 구하기 위한 변형률 데이터를 수집한다. 수집된 변형률 데이터는 DAQ Board를 통해 PC로 전송되며, 구름마찰계수는 아래 식 (1) 쿨롱 힘의 법칙을 통해 계산할 수 있다[28-29].

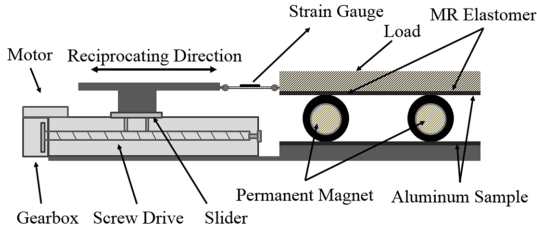


Fig. 3. Schematic of experimental setup.

Table 1. Experimental conditions

| Parameters                       | Value                   |
|----------------------------------|-------------------------|
| MR Elastomer<br>Dimensions (mm)  |                         |
| - Inner Diameter                 | 30                      |
| - External Diameter              | 40                      |
| - Thickness                      | 5                       |
| Aluminum Pipe<br>Dimensions (mm) |                         |
| - Inner Diameter                 | 26                      |
| - External Diameter              | 30                      |
| - Thickness                      | 2                       |
| Load (N)                         | 30,50,70                |
| Linear Velocity (mm/s)           | 6,10                    |
| Distance (mm)                    | 720                     |
| Magnetic Field (T)               | 0.1                     |
| Rolling Stroke (mm)              | 20                      |
| Lubricant Condition              | No                      |
| Temperature                      | Room Temperature (25°C) |

$$\mu = Fr/N \quad (1)$$

식 (1)에서  $F$ 는 구름 마찰력,  $r$ 은 자기유변탄성체 시편의 반지름,  $\mu$ 는 구름 마찰계수,  $N$ 은 하중이다.

자기장을 부하할 때 자기유변탄성체 파이프의 중간에 영구자석을 삽입하여 실험을 진행하며, 자기장을 부하하지 않을 때에는 영구자석과 같은 중량의 환봉을 삽입하여 실험을 진행한다. 자기장의 조절은 자기장을 On-Off 하는 방식으로 실험을 진행한다. 실험 조건은 아래 Table 1과 같으며, 자기유변탄성체에 인가한 자기장의 세기는 0.1 T, 하중은 30, 50, 70 N이다.

좌, 우 왕복운동의 속도는 6, 10 mm/s, 구름 왕복거리 20 mm이다. 각 조건마다 3 번의 실험을 진행하

여 결과를 정리하였다.

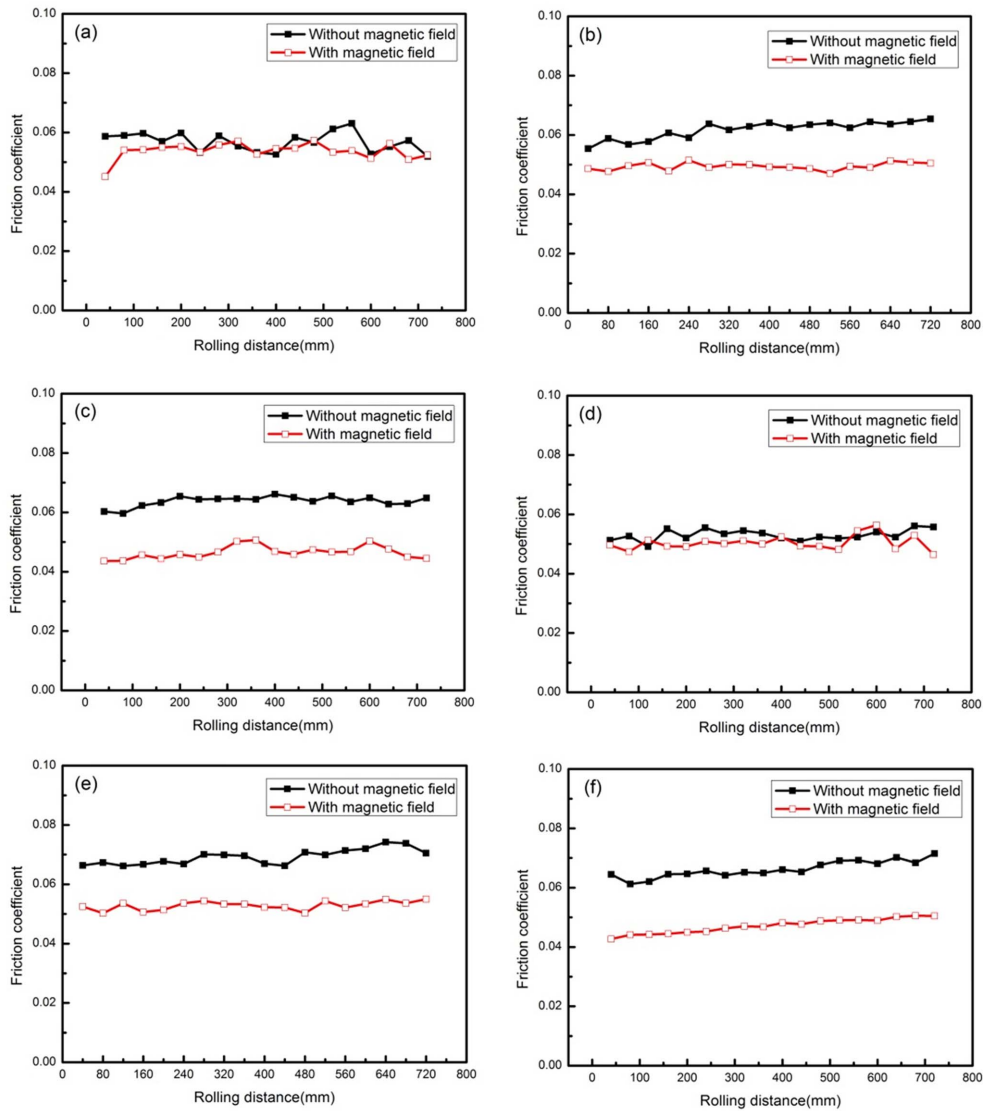
#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 자기장 유무 조건에서 속도 및 하중 조건에 따른 구름 마찰계수의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 4(a)-(c)는 6 mm/s의 속도 조건에서 30, 50, 70 N의 세 가지 하중 조건 별 시간에 따른 구름 마찰계수의 변화를 나타낸다. 그리고 Fig. 4(d)-(f)는 10 mm/s의 속도조건에서 30, 50, 70 N의 세 가지 하중 조건 별 시간에 따른 구름 마찰계수의 변화를 나타낸다.

모든 결과 그래프에서 자기장을 부하한 조건의 구름 마찰계수가 자기장을 가하지 않은 조건보다 전체적으로 작게 나타났다. 물체의 강도가 증가하면 구름 마찰계수에 영향을 주는 탄성 히스테리시스(elastic hysteresis)가 감소되어 마찰계수가 작아지는데, 자기유변탄성체에 자기장을 부하하면 자기유변탄성체의 강도가 증가하고, 이로 인해 마찰 에너지의 손실이 줄어들어 구름 마찰력이 감소하게 된다. 그리고 구름마찰력이 감소함으로 인해 구름 마찰계수도 작아지는 것을 확인하였다. 또한 자기장을 가하면 자기유변탄성체의 표면 점도도 줄어드는 현상을 보이는데, 이로 인해 응착 작용이 작아져서 구름 마찰계수를 줄일 수 있을 것으로 예상하였다.

일정한 속도와 서로 다른 하중의 Fig. 4(a)-(c)를 비교해 보면, 자기장을 가하지 않을 때 하중의 증가에 따라 마찰계수가 증가하는 것을 확인하였다. 이는 가한 하중이 커지면 부드러운 자기유변탄성체와 알루미늄 판의 접촉면적이 커져 구름 마찰계수가 증가하기 때문이다. 또한 점도가 큰 자기유변탄성체의 표면과 알루미늄 판의 접촉면에서는 하중이 클수록 응착 현상이 커져 마찰계수가 증가하는 것도 확인할 수 있다. 반면에 자기장을 가하면 자기유변탄성체의 표면 점성이 감소하여 응착현상이 크게 나타나지 않는다. 또한 자기장을 가하면 자기유변탄성체의 강성이 커져 하중이 증가해도 자기장을 가하지 않은 자기유변탄성체와 달리 접촉면적이 크게 변화하지 않아 오히려 마찰계수가 감소하였다. Fig. 4(d)-(f)도 같은 경향을 보였다.

자기유변탄성체의 제작방법으로 인해 기공을 완전히 제거하기 어려운 점이 있는데, 이 때문에 표면 접촉면적이 균일하지 않아 속도가 낮은 경우와 하중이 작은 경우에서 마찰계수의 변화가 더 크게 나타났다. Fig.



**Fig. 4. Results of rolling friction coefficient: (a)–(c) Velocity = 6 mm/s, Load = 30, 50, 70 N; (d)–(f) Velocity = 10 mm/s, Load = 30, 50, 70 N.**

4(a)와 Fig. 4(d)를 비교해 보면 속도조건이 낮은 Fig. 4(a)의 마찰계수가 더 많이 변화하는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 속도조건을 가진 Fig. 4(a), Fig. 4(b) 와 Fig. 4(c)를 각각 비교하면 하중조건이 큰 Fig. 4(c)의 마찰계수 변화량이 더 적음을 알 수 있다. 따라서 자기유변탄성체의 제작 방법을 개선하여 기공을 제거할 경우 속도에 따른 마찰계수의 변화를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 자기장의 유무에 따른 자기유변탄성체의 구름마찰계수의 영향을 확인하기 위해 타이어 형태의 시편을 제작하여 하중과 속도변화에 따른 구름마찰계수를 측정하였다. 결과는 아래와 같이 정리하였다. 자기장을 부하한 조건에서 마찰계수에 영향을 주는 탄성 히스테리시스가 감소되어 자기유변탄성체의 구름

마찰계수가 자기장을 가하지 않은 조건보다 전체적으로 작게 나타났다. 또한 자기장을 가하지 않을 때 하중의 증가에 따른 접촉면적이 커져 자기유변탄성체의 구름 마찰계수가 증가하는 반면, 자기장을 가하면 자기유변탄성체의 강성이 커져 하중이 증가해도 자기장을 가하지 않은 자기유변탄성체와 달리 접촉면적이 크게 변화하지 않아 구름 마찰계수가 감소하는 것을 확인하였다.

하중이 증가할수록 자기장을 부하할 때와 부하하지 않을 때의 자기유변탄성체의 구름 마찰계수 차이가 크다. 반면에 속도에 따른 자기장을 부하할 때와 부하하지 않을 때의 자기유변탄성체의 구름 마찰계수 차이가 크지 않는 것을 확인하였다.

향후 자기장의 세기를 조절함으로써 구름마찰계수의 능동제어에 대한 연구를 진행할 예정이다.

### Acknowledgement

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0025763). 또한 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합고급인력과정지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2014-H0401-14-1003).

### References

- [1] Lee, C. H., Lee, D. W., Choi, S. B., Cho, W. O., Yun, H. C., "Tribological Characteristics Modification of Magnetorheological Fluid", *Trans. ASME, J. Tribol.*, Vol. 133, Issue 3, 2011. (031801)
- [2] Song, W. L., Choi, S. B., Lee, D. W., Lee, C. H. "Micro-precision surface finishing using magneto-rheological fluid", *Sci. China*, Vol. 55, No. 1, 2012. (56-61)
- [3] Song, W. L., Choi, S. B., Choi, J. Y., Lee, C. H., "Wear and friction characteristics of magnetorheological fluid under magnetic field activation", *Tribol. Trans.*, Vol. 54, No. 4. (616-624)
- [4] Hu, Z. D., Yan, H., Wang, X. M., Qiu, H. Z., "The Effect of Lubricant on Tribological Properties of Carbonyl Iron-Based Magnetorheological Fluids", *Adv. Mater. Res.*, 197. (540-543)
- [5] Bombard, A. J. de Vicente, J., "Boundary lubrication of magnetorheological fluids in PTFE/steel point contacts", *Wear* 296, 1, 2012. (484-490)
- [6] Song, W. L. Choi, S. B., "An Experimental Investigation on Tribological Characteristics of Magnetorheological Fluids: Wear and Friction", *Adv. Sci. Lett.*, Vol. 13, No. 1, 2012. (646-650)
- [7] Bombard, A. J., de Vicente, J., "Thin-film rheology and tribology of magnetorheological fluids in isoviscous-EHL contacts", *Tribol. Lett.*, Vol. 47, No. 1, 2012. (149-162)
- [8] Hu, Z., Yan, H., Qiu, H., Zhang, P., Liu, Q., "Friction and wear of magnetorheological fluid under magnetic field", *Wear*, Vol. 278, No. 8. (48-52)
- [9] Deng, H. X., Gong, X. L., "Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber", *Community Nonlinear Sci. Numer. Simul*, Vol. 13, No. 9, 2008. (1938-1947)
- [10] Shen, Y., Golnarachi, M. F., Hepler, G. R., "Experimental Research and Modeling of Magnetorheological Elastomers", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 15, No. 1, 2004. (27-35)
- [11] Danas, K., Kankanala, S. V., Triantafyllidis, N., "Experiments and modeling of iron-particle-filled magnetorheological elastomers", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 60, No. 1, 2012. (120-138)
- [12] Wang, Y. F., Wang, G. F., "Study on the Mechanical Properties of Magnetorheological Elastomers," *Adv. Mater. Res.*, No. 774, 2013. (54-57)
- [13] Shen, Y., Golnarachi, M. F., Hepler, G., "Experimental research and modeling of magnetorheological elastomers," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 15, No. 1, 2004. (27-35)
- [14] 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, 2012. (25-33)
- [15] Yeh, J.-Y., "Vibration analysis of sandwich rectangular plates with magnetorheological elastomer damping treatment," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 22, No. 3, 2013. (035010)
- [16] 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, 2012. (25-33)
- [17] Kumbhar, S., Maji, S., Kumar, B., "Development and Characterization of Isotropic Magnetorheological Elastomer." *Univers. J. Mech. Eng.*, 2013.
- [18] Lee, D. W., Lee, C. H., Yun, H. C., Kim, C. H., Cho, W. O., "A study of tribologic al characteristics in Magneto-rheological elastomer," *Proc. Spring Conference of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, April 2011. (23-24)
- [19] Lian, C. L., Lee, D. W., Lee, K. H., Lee, C. H., Kim, C. H., Cho, W. H., "Application Study of Magnetorheological Elastomer to Friction Control", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 28, No. 3,

2012. (107-111)
- [20] Lian, C. L., Hong, S. G., Lee, K. H., Lee, C. H., Kim, C. H., "Friction and Wear Properties of Improved Polyurethane Based Magneto-Rheological Elastomer", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 28, No. 6, 2012. (333-339)
- [21] Ginder, J., Clark, S., Schlotter, W., Nichols, M., "Magnetostrictive phenomena in magnetorheological elastomers", *Int. J. Mod. Phys.*, B 16, 17n18. (2412-2418)
- [22] Shen, Y., Golnaraghi, M. F., Heppler, G., "Experimental research and modeling of magnetorheological elastomers", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 15, No. 1, 2004. (27-35)
- [23] Ruddy, C., Ahearne, E., Byrne, G., "A review of magnetorheological elastomers: properties and applications", *Adv. Manuf. Sci. (AMS) Res.* Accessed 20. (2012).
- [24] Fan, Y., Gong, X., Xuan, S., Zhang, W., Zheng, J., Jiang, W., "Interfacial friction damping properties in magnetorheological elastomers", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 20, No. 3, 2011. (1-8)
- [25] Lee, C. H., Propeller shaft center bearing vibration decrease system, Korean patent 2011. (1020100051250)
- [26] Lee, C. H., Friction control of robot pad, Korean patent 2010. (1020100024773)
- [27] 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, 2013. (014501-1)
- [28] Bharat, B., "Principles and applications of tribology", Editon Edition, Wiley, New York, ISBN ISBN, 1999.
- [29] Jolly, M. R., Carlson, J. D., and Munoz, B. C., "A model of the behaviour of magnetorheological materials", *Smart Materials and Structures*. Vol. 5, No. 5, 1996. (607)