

DOI <http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2015.31.2.62>

DLC와 PTFE표면코팅에 따른 자기유변유체의 마찰 마모 특성

장 봉¹ · 이광희¹ · 이철희^{1*} · 최종명²

¹인하대학교 기계공학과, ²인하대학교 전자공학과

Friction and Wear Characteristics of Magneto-rheological Fluid Depend on Surface Coated by DLC and PTFE

Peng Zhang¹, Kwang-Hee Lee¹, Chul-Hee Lee^{1*} and JongMyong Choi²

¹Dept. of Mechanical Engineering, InHa University, Incheon 402-751, Korea

²Dept. of Electrical Engineering, InHa University, Incheon 402-751, Korea

(Received December 27, 2014; Revised February 21, 2015; Accepted February 23, 2015)

Abstract – A magnetorheological (MR) fluid is a smart material whose rheological behavior can be controlled by varying the parameters of the applied magnetic field. Because the damping force and shear force of an MR fluid can be controlled using a magnetic field, it is widely employed in many industrial applications, such as in vehicle vibration control, powertrains, high-precision grinding processes, valves, and seals. However, the characteristics of friction caused by iron particles inside the MR fluid need to be understood and improved so that it can be used in practical applications. Surface process technologies such as polytetrafluoroethylene (PTFE) coatings and diamond-like carbon (DLC) coatings are widely used to improve the surface friction properties. This study examines the friction characteristics of an MR fluid with different surface process technologies such as PTFE coatings and DLC coatings, by using a reciprocating friction tester. The coefficients of friction are in the following descending order: MR fluid without any coating, MR fluid with a DLC coating, and MR fluid with a PTFE coating. Scanning electron microscopy is used to observe the worn surfaces before and after the experiment. In addition, energy dispersive X-ray spectroscopy is used to analyze the chemical composition of the worn surface. Through a comparison of the results, the friction characteristics of the MR fluid based on the different coating technologies are analyzed.

Keywords – MR fluid(자기유변유체), friction characteristics(마찰특성), surface coating(표면코팅), DLC, PTFE, magnetic field(자기장)

Nomenclature

μ_k : Kinetic friction coefficient (마찰계수)
F : Friction force (N) (마찰력)
P : Applied load(N) (작용하중)

1. 서 론

자기유변유체(Magnetorheological fluids)는 기계적인 성질을 제어할 수 있는 유체이며 여러 연구분야에서 응용하고 있는 스마트 재료이다. 자기유변유체는 저 히스테리시스(hysteresis)를 갖고 있는 고투자율 자성 입자(magnetic particles)와 비 투자율 유체로 구성된 콜로이드 서스펜션(colloid suspension)이다[1-2]. 자기장이 자기유변체에 인가되면 기유(base oil) 내부의 철 입자가

*Corresponding author : chulhee@inha.ac.kr
Tel: +82-32-860-7311, Fax: +82-32-873-7611

자기장 방향에 따라 사슬 모양을 형성하면서 강성 및 댐핑 특성이 변하게 된다[3]. 자기유변유체의 유변특성으로 인해 자기장의 세기에 따라 자기유변유체의 감쇠력 및 전단력을 제어할 수 있으므로 자동차의 진동제어, 기계동력전달장치, 초정밀 연마 가공, 밸브와 밀봉 등 다양한 분야에 응용되고 있다[4-7]. 기존 연구에서는 자기유변유체의 트라이볼로지 특성을 연마공정에 적용하였으며, 실험결과를 통해 연마공정에서의 지배적 마모 메커니즘에 따라 마모가 발생하는 것을 확인하였다[8]. 또한 포볼(four-ball) 마찰시험기를 이용하여 자기장을 인가할 때에 자기유변유체의 마찰 및 마모 특성을 연구하였다[9-10]. 표면 처리 기술 분야에서 표면 코팅 기술은 마모 성능을 향상시키는 역할을 하므로 다양한 산업 분야에서 광범위하게 응용되고 있다. 따라서 마찰 성능향상을 위한 표면코팅 방법 및 그 특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[11-12]. 대표적인 표면코팅 처리방법으로는 DLC(Diamond-like-carbon)코팅과 PTFE(Polytetrafluoroethylene) 코팅이 있다. DLC(Diamond-like-carbon) 코팅은 탄소성분의 가스를 이용하여 진공 상태에서 코팅막을 증착하고 표면에 다이아몬드와 유사한 비정질 구조의 탄소막 코팅층을 형성하는 기법이다. 낮은 마찰 계수와 높은 내마모성을 갖고 있는 DLC코팅 기법은 자동차 엔진 구성 부품에서 접촉 부분의 마찰력을 낮추기 위해 많이 쓰인다[13-14]. PTFE는 불소수지를 도료화하여 표면에 적당량을 도포하고 일정한 온도에서 가열하여 소성을 거치면서 비활성의 단단한 코팅층을 형성하는 기법이다. PTFE는 고체재료 중에서 가장 낮은 마찰 특성, 탁월한 화학적인 안정성과 내 고온성을 갖고 있는 재료로서 피스톤링, 기계공업용 베어링, 동작기계의 가이드 웨이 등 분야에 광범위하게 사용되고 있다[15-16]. 자기유변유체 내부의 철 입자로 인해 표면에서의 마모 발생 가능성이 높아짐에 따라 이를 개선할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다[17]. 따라서 본 연구에서는 마모 개선을 위한 표면 코팅 방법에 따른 자기유변유체의 마찰 특성을 분석하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험소개

2-1. 실험장치

본 논문에서는 왕복 마찰시험기(R&B 108-RF)를 이용하여 실험을 진행하였다. 이 왕복 마찰시험기는 DC 모터로 작동하면서 크랭크축 연동장치를 통해 핀이 시

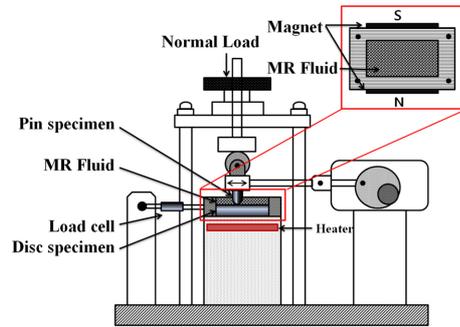


Fig. 1. Schematic diagram of the reciprocating friction wear tester (R&B 108-RF).

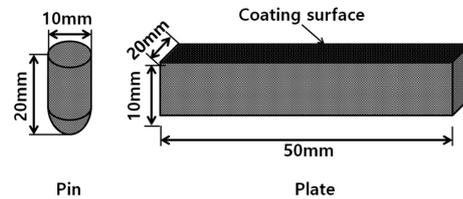


Fig. 2. Specimen dimensions of pin and plate.

핀 위에서 왕복 마찰운동을 하게 되며 왕복 마찰거리는 10 mm이다. 왕복 마찰 시험기의 세부 도면은 Fig. 1과 같이 나타나며 하중 시스템, 히터 시스템, 핀(pin)과 플레이트(plate)의 고정 시스템, 동력 전달 시스템과 마찰계수 측정을 위한 로드셀(Load cell) 등으로 구성되어 있다. 실험장치의 시편 양쪽에는 자석을 배열하였으며, 핀과 플레이트 접촉 부분의 자기장세기는 5 mT 이다. 핀과 플레이트 사이의 공간에(Fig. 1 확대도 표시) 자기유변유체를 넣고 마찰계수, 온도, 하중 등을 측정해서 데이터를 기록한다. 여기에서 마찰력은 로드셀을 통해 측정하며 마찰계수의 계산식은 다음과 같이 나타난다.

$$\mu_k = \frac{F}{P} \tag{1}$$

여기서 μ_k 는 동 마찰계수, F 는 왕복 운동 시 측정된 마찰력, P 는 작용하중(수직응력)이다.

2-2. 실험 재료

본 실험에서 사용된 자기유변유체(Magneto-rheological fluid)는 Lord Corporation 제품이며 세부 모델명은 MRF-132DG이다. 철 입자의 무게비율은 80.9%이며 점성(viscosity), 밀도(density) 등에 대한 정보는 Table 1에 자세하게 설명되어 있다. 핀(pin)과 플레이트의 재

Table 1. Properties of MRF-132DG

Property	Values
Appearance	Dark Gray Liquid
Viscosity at 40°C (Pa·s)	0.0920 ± 0.015
Operating temperature (°C)	-40 ~ +150
Phase change time (ms)	1 ~ 2
Density (g/cm ³)	2.98~3.18
Particle size (μm)	1 ~ 4

Table 2. Property of DLC and PTFE

Property	Values	
	DLC	PTFE
Density (g/cm ³)	1.8~3.6	2.1~2.3
Hardness (Kg/mm ²)	2,000~8,000	18
Refraction rate	1.8~2.6	1.35
Operating temperature (°C)	<800	<260
Melting points (°C)	3,000	327

질은 차량, 선박 등 수송 기계분야에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 알루미늄 합금(AL6061)이다. 알루미늄 합금(AL6061)의 브리넬 경도는 410 N/mm²이며 내식성, 용접성이 좋고 중간 정도의 강도이다. 기판 플레이트의 크기 규격은 길이(50 mm)×너비(20 mm)×높이(10 mm), 핀의 크기 규격은 길이(20 mm)×지름(10 mm)로 제작한다. 그리고 시편 표면코팅의 두께는 각각 10 μm이며 시편 사진은 Fig. 2와 같다. 본문에서 쓰이는 DLC와 PTFE 표면코팅은 기계적인 응용분야에서 광범위적으로 적용하고 있다. DLC(a-C:H, PVD)와 PTFE 코팅의 물성치는 Table 2와 같이 나타나며 DLC 코팅은 높은 경도, 적용온도와 용점을 갖고 있다. 이런 특성으로 인해 자기유변유체의 마찰 특성에 대한 영향을 줄 수 있다.

2-3. 실험 조건 및 방법

코팅 종류에 따른 자기유변유체의 마찰계수 변화 실험 조건은 Table 3과 같이 나타난다. 이번 실험에서 자기유변유체와 시편을 전면 접촉시키기 위해 완전히 덮을 정도의 충분한 자기유변유체를 주입하였다. 기존 연구결과를 통해 자기유변유체의 마찰계수는 자기장을 인가하는 경우에 더 큰 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다[17]. 이번 실험에서 자기유변유체의 유변특성을 충분히 나타내기 위하여 자기장의 세기는 5 mT, 실험

Table 3. Conditions for the reciprocating test (surface)

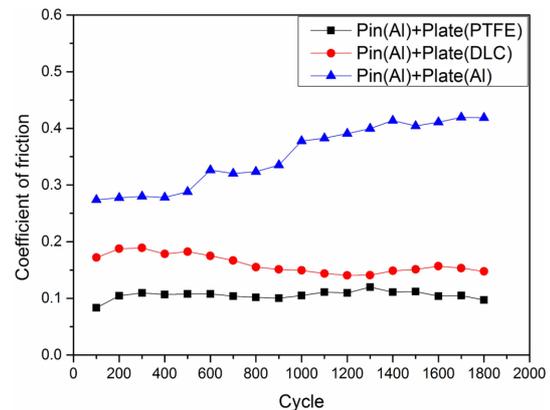
Variable	Values
Type of MR fluid	132DG
Magnetic fields (mT)	5
Oscillation frequency (Hz)	1.0
Cycles	1,800
Normal load (N)	5
Stroke (mm)	10
Coating type (plate)	None/DLC/PTFE
Coating type (pin)	None
Operating temperature (°C)	25

온도는 실내온도 25°C 유지해서 실험을 진행한다. 표면코팅처리 종류에 따른 자기유변유체의 마찰특성을 비교하기 위해 표면에 코팅하지 않은 알루미늄 합금 기판 플레이트와 DLC와 PTFE로 코팅된 기판 플레이트에서 실험을 진행한다.

3. 실험결과 및 논의

3-1. 표면코팅 종류에 따른 마찰계수

본 실험은 시편 표면의 코팅 종류에 따른 자기유변유체의 마찰 특성을 분석하는 것을 목적으로 한다. Fig. 3는 코팅처리가 되지 않은 알루미늄 합금 시편과 DLC와 PTFE로 표면이 코팅 처리된 시편에 따른 자기유변유체의 마찰계수 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 3에서 코팅처리 하지 않은 핀과 시편에서 마찰계수가

**Fig. 3. Friction coefficient change with respect to cycle under various coating conditions.**

가장 크고 왕복 운동 사이클수가 증가함에 따라 점점 증가한다. 이는 시편 표면을 코팅하면 마찰계수가 낮아질 수 있으며 시편 표면 코팅을 하지 않은 경우의 마찰계수보다 훨씬 안정적인 것을 보인다. 기존 연구 결과에서 자기유변유체에 자기장이 부하되면 자기유변유체 내부의 철 입자들은 자기장 방향에 따라 알루미늄 플레이트 표면에 정렬되며, 자기장을 인가하는 경우 마찰계수가 높게 나오는 특성이 있다[17]. 또한 코팅을 하지 않은 시편 표면의 마찰계수가 여전히 가장 높으며, DLC로 코팅한 시편의 마찰계수가 PTFE로 코팅한 시편의 마찰계수에 비해 상대적으로 높은 마찰계수를 나타낸다. 코팅하지 않은 알루미늄보다 DLC와 PTFE 코팅을 한 알루미늄 플레이트의 표면이 더 우수한 마찰특성을 갖고 있으며, 실험에 사용된 알루미늄 합금과 DLC 코팅 및 PTFE 코팅의 경도 순서는 $DLC > Al > PTFE$ 와 같다. 경도가 커짐에 따라 마찰계수가 낮아지지만 알루미늄 핀과 플레이트로 실험한 경우는 PTFE 코팅의 경도보다 크지만 높은 표면조도 갖고 있기 때문에 오히려 높은 마찰계수가 나타난다. PTFE 코팅은 고분자소재로써 마찰 특성이 다르게 나타난다. 즉 경도 높은DLC 코팅은 마찰과정 중에 DLC 코팅성분 중의 흑연이 고체윤활제 역할을 하며 PTFE 코팅은 표면 에너지 낮아서 쉽게 움직인다. 따라서 자기유변유체가 핀과 플레이트 사이에 윤활제로써의 역할이 더 크기 때문에 오히려 PTFE 코팅표면에서는 낮은 마찰계수 일어난다[18]. 또한 알루미늄 합금 시편 표면에 마모가 증가함으로 인해 마찰계수가 왕복 슬라이드 사이클의 증가함에 따라 점점 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 그러나 표면 코팅을 하는 시편의 마찰계수가 왕복 슬라이드의 사이클수의 증가함에 따라 오히려 큰 영향을 받지 않아서 안정적인 경향을 확인할 수 있다.

3-2. 표면코팅 종류에 따른 마모 현상

시편 표면의 코팅 종류에 따른 표면 마모 상태를 관찰하기 위해 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 실험 전과 후에 시편 표면의 마모 흔적을 관찰하였다. 실험 전후의 표면 비교 결과는 Fig. 4와 같이 나타나며 마찰운동의 방향은 화살표로 표시되어 있다. Fig. 4(a)와 (c)를 통해 실험 전 DLC로 코팅된 표면이 PTFE로 코팅된 표면에 비해 상대적으로 매끄러운 것을 확인할 수 있으며 이는 Fig. 5의 표면 거칠기를 통해서도 확인할 수 있다. Fig. 4(b)와 (d)에서는 실험 후에 코팅한 시편 표면에 마모 흔적을 확인할

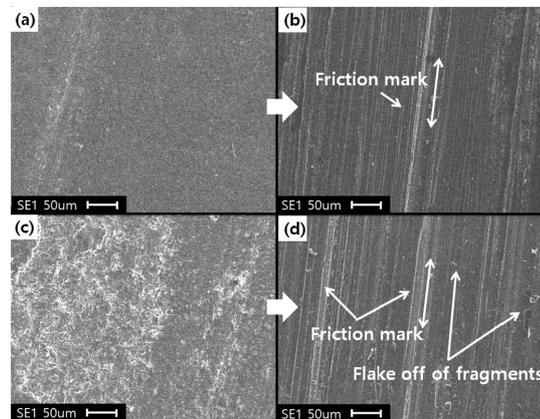


Fig. 4. SEM micrographs of the plate surface before and after the test: (a) original surface with DLC coating; (b) worn surface with DLC coating; (c) original surface with PTFE coating; (d) worn surface with PTFE coating.

수 있다. 자기유변유체 내부의 철 입자들은 자기장 방향으로 정렬되는 특성을 가지고 있다. 따라서 핀과 플레이트 접촉 표면에 자기장이 부하되는 경우 일부 입자들은 표면에 자기장 방향으로 붙게 되며 나머지 입자들은 그 위로 정렬된다. 따라서 접촉면에서 핀과 플레이트의 왕복 운동 시 핀과 플레이트 접촉뿐만 아니라 입자들과의 접촉으로 인해 마모가 발생한다. 실험 후에 DLC 코팅표면의 마모 상태와 비교하면 PTFE 코팅한 시편표면에서 더 거친 표면을 확인할 수 있으며 코팅이 벗겨져 나간 흔적 또한 확인할 수 있다.

DLC와 PTFE 표면 코팅 처리된 시편표면의 마모현상을 자세히 알아보기 위하여 표면조도 측정기Surface Profilometer(Mitsutoyo SurfTest SV-3100)를 이용하여 실험 전의 코팅표면과 실험 후의 마모표면의 표면조도를 측정하였다. 실험 전과 실험 후에 측정한 Ra값의 비교 그래프는 Fig. 5과 같이 나타난다. DLC 코팅 표면의 Ra 값은 실험 전의 0.0715 μm 에서 실험 후에 0.2687 μm 로 0.1972 μm 증가하며, PTFE 코팅 표면의 Ra 값은 실험 전의 0.1633 μm 에서 실험 후에 0.3907 μm 로 0.2274 μm 증가한다. 표면 거칠기 변화량은 PTFE 코팅이 DLC코팅보다 크게 나타난다. 핀의 재질이 동일하므로 플레이트 표면의 코팅의 경도 차이가 마모에 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다. 실험전과 실험 후에 PTFE 코팅표면은 더 거칠게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 마찰계수와 표면조도가 증가하는 이유는 PTFE 코팅의 경도가 DLC코팅의 경도 보

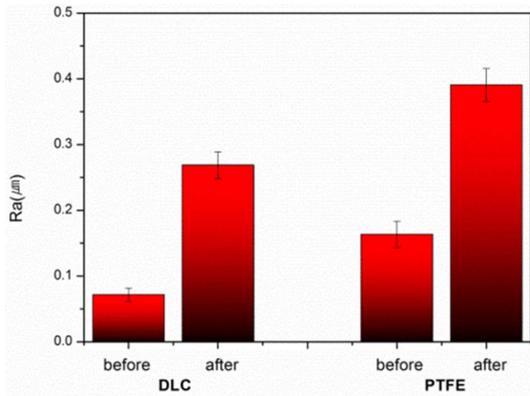


Fig. 5. Surface roughness of the plate under DLC and PTFE coatings before and after test.

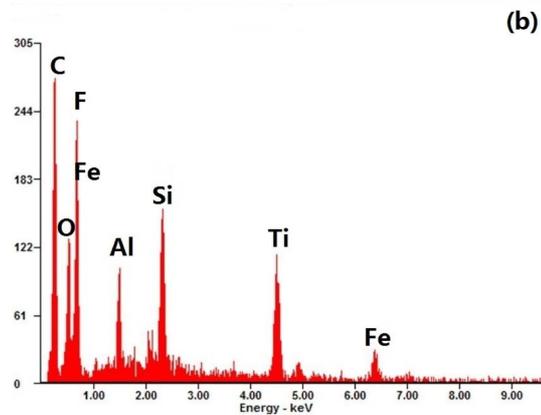
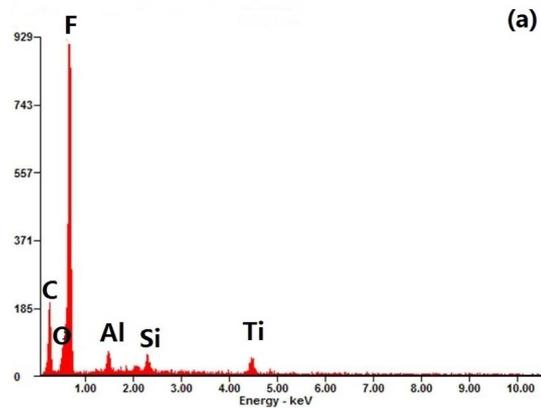


Fig. 7. EDS spectra of the plate surface with PTFE coating: (a) before the test (b) after the test.

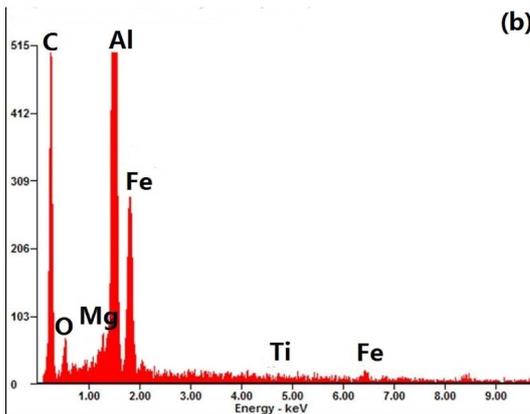
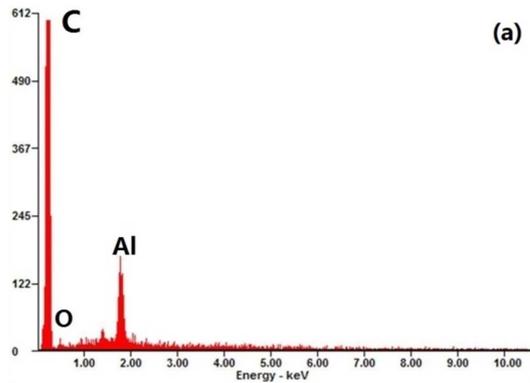


Fig. 6. EDS spectra of the plate surface with DLC coating: (a) before the test (b) after the test.

다 훨씬 낮아서 실험 후에 PTFE 코팅 처리된 표면이 심하게 마모되기 때문이다.

Fig. 6과 Fig. 7는 각각 실험 전과 실험 후의 DLC와

PTFE 코팅표면의 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy) 분석 사진이다. 실험 전과 실험 후에 DLC와 PTFE코팅처리하는 시편표면의 화학 성분 함유량은 Table 4와 같이 나타난다. Fig. 6과 Table 4에서 나타난 데이터를 보면 실험 후에 DLC 코팅 처리하는 시편 표면에서 산소(O)와 알루미늄 (Al)등 원소의 함유량이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 티타늄(Ti), 철(Fe)과 마그네슘(Mg) 등 원소가 새롭게 나타난다. Fig. 7과 Table 4에서 나타난 데이터를 보면 실험 후에 PTFE 코팅 처리하는 시편 표면에서 화학성분이 변하는 것을 확인할 수 있으며, 탄소(C)와 불소(F)등 원소의 함유량이 감소하여 산소(O), 실리콘(Si)과 티타늄(Ti)등 원소가 증가하고 철(Fe) 원소가 새롭게 나타난다. 자기유변유체 속에 있는 철과 기타 성분이 코팅 처리되는 시편표면에서 마찰 마모실험을 진행하기 때문에 실험 후에 코팅표면의 화학성분이 변화하는 것을 알 수 있다. 실험 후에 코팅표면에 Al, Si과 Ti 성분이 나타난

Table 4. Chemical composition of the plate surface with DLC and PTFE coatings before and after the experiments

Sample	Status	Chemical Composition (Wt%)						
		C	O	Al	Fe	Ti	F	Other
DLC	Original	94.18	1.20	0.88	-	-	-	3.74
	Worn	47.40	2.24	34.20	5.97	0.14	-	10.05
PTFE	Original	25.19	4.73	0.59	-	0.27	57.17	12.05
	worn	38.30	12.70	2.73	7.87	2.91	18.51	16.98

이유는 실험 중에 코팅 처리되는 알루미늄 재질의 시편이 마모로 인해 알루미늄 합금 (Al6061)시편에서 갖고 있는 Al, S과 Ti 원소가 노출되기 때문이다. 그러므로 Fig. 6에서 실험 후에 DLC코팅 처리하는 시편 표면의 C원소는 감소하고 Fe, Al 원소가 뚜렷하게 증가하며, Fig. 7에서 실험 후에 PTFE 코팅 처리하는 시편 표면의 F원소가 감소하고 Al과 Fe원소가 뚜렷하게 증가하는 현상이 나타난다.

4. 결 론

이번 실험에서는 시편표면의 코팅종류에 따른 마찰 계수, 표면조도와 표면 화학원소의 성분을 측정하고 실험결과 비교분석을 통하여 자기유변유체의 마찰 및 마모 특성에 관한 연구를 하였다. 자기유변유체의 마찰 및 마모 특성은 다음과 같다.

1. PTFE와 DLC를 코팅한 시편표면의 경우 PTFE 코팅표면의 마찰계수가 DLC 코팅 표면의 마찰계수보다 낮은 결과를 나타낸다.
2. 실험 후의 시편 표면을 통해 PTFE 코팅표면의 마모가 DLC 코팅표면의 마모 보다 뚜렷하게 나타나며, PTFE코팅 표면에는 마모로 인한 잔여물이 나타난 것을 확인할 수 있다.
3. PTFE 코팅의 경우 DLC 코팅에 비해 상대적으로 경도가 낮아서 마모로 인해 높은 표면조도가 나타난다.
4. 시편 코팅처리를 통해 낮은 마찰계수를 얻을 수 있고 이를 통해 마찰 성능을 향상시킬 수 있다.

이번 연구를 통해 기계적인 분야와 공업 분야에서 코팅 기술의 종류에 따른 자기유변유체의 마찰 특성을 효율적으로 이용할 수 있다.

Acknowledgements

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로

로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0025763). 또한 본 연구는 산업통상자원부 우수기술연구센터(ATC) 사업의 연구비지원과(10048876) 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT 융합 고급인력과정지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2015-H8601-15-1003).

References

- [1] Qiu, H. Z., Yan, H., Zhang, P., *et al.*, Friction Properties of Carbonyl Iron-based magnetorheological fluid [J]. *Tribology*, Vol. 29, pp. 61-67, 2009.
- [2] Bossisa, G., Lacisb, S., Meuniera, A., *et al.*, Magnetorheological fluids [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 252, pp. 224-228, 2002.
- [3] Furst, E. M., Gast, A. P. Micromechanics of Magnetorheological Suspensions [J]. *Physical Review E.*, Vol. 61, pp. 6732-6739, 2000.
- [4] Huang, J., Zhang, J. P., Yang, Y., *et al.*, Analysis and Design of Cylindrical Magneto-Rheological Fluid Brake [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, pp. 559-562, 2002.
- [5] Podgomik, B., Jacobson, S., Hogmark, S. DLC coating of boundary lubricated components-advantages of coating one of the contact surfaces rather than both or none [J]. *Tribology International*, Vol. 36, pp. 843-849, 2003.
- [6] Li, W. H., Zhang, X. Z. The effect of friction on magnetorheological fluids [J]. *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 20, pp. 45-50, 2008.
- [7] Jia, Z. F., Xia, Y. Q., Li, J. L., *et al.*, Friction and wear behavior of diamond-like carbon coating on plasmanitrided mild steel under boundary lubrication [J]. *Tribology International*, Vol. 43, pp. 474-482, 2010.
- [8] Seok, J. W., Lee, S. O., Jang, K. I., *et al.*, Tribological properties of a Magnetorheological (MR) fluid in a finishing process [J]. *Tribology Transactions*, Vol. 52, pp. 460-469, 2009.
- [9] Song, W. L., Choi, S. B., Choi, J. Y., *et al.*, Wear and friction characteristics of magnetorheological fluid under

- magnetic field activation [J]. *Tribology Transactions*, Vol. 54, pp. 616-624, 2011.
- [10] Hu, Z. D., Yan, H., Qiu, H. Z., *et al.*, Friction and wear of magnetorheological fluid under magnetic field [J]. *Wear*, pp. 278-279, pp. 48-52, 2012.
- [11] Stanford, M. K., Jain, V. K., Friction and wear characteristics of hard coatings [J]. *Wear*, Vol. 251, pp. 990-996, 2001.
- [12] Holmberg, K., Ronkainen, H., Matthews, A., Tribology of thin coatings [J]. *Ceramics International*, Vol. 26, pp. 787-795, 2000.
- [13] Kenneth H, Helena R, Anssi LK, *et al.* Friction and wear of coated surfaces-scales, modeling and simulation of tribomechanisms [J]. *Surface coatings technology*. 202: 1034-1049, 2007.
- [14] Pettersson, U., Jacobson, S., Friction and wear properties of micro textured DLC coated surface in boundary lubricated sliding [J]. *Tribology Letter*, Vol. 17, pp. 553-559, 2004.
- [15] Ouyang, J. H., Sasaki, S., Friction and wear characteristics of a Ti-containing diamond-like carbon coating with an SRV tester at high contact load and elevated temperature [J]. *Surface & Coating Technology*, Vol. 195, pp. 234-244, 2005.
- [16] Friderich, K., Karger, K. J., Lu, Z. Effects of steel counterface roughness and temperature on the friction and wear of PE(E)K composites under dry sliding conditions [J]. *Wear*, Vol. 148, No. 2, pp. 235-247, 1991.
- [17] Zhang, P., Lee, K. H., Lee, C. H., Reciprocating friction characteristics of magneto-rheological fluid for aluminum under magnetic field [J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 24, No. 1, pp. 171-176, 2014.
- [18] Basavaraju, M., Ranganatha, S., Effect of soft material hardness and hard material surface morphology on friction and transfer layer formation; dry condition. *International journal of recent technology and engineering*, Vol. 2, pp. 40-46, 2013.