

고속회전 하는 정밀부품을 위한 연질/경질 코팅의 트라이볼로지적 특성에 관한 연구

오진규[†], 정구현[†], 김대은*, 유제환^{††}, 김형재^{††}

Tribological Characteristics of Soft/Hard Coating

for High-Speed Rotating Machine Elements

Jin-Kyu Oh[†], Koo-Hyun Chung[†], Dae-Eun Kim*, Je-Hwan You^{††}, Hyung-Chae Kim

Abstract

Recently, rotating elements which use mechanical and electrical systems have been utilized for high speed and accuracy to increase the performance. The most important thing to get a more reliable system is to understand the friction, wear and characteristics which has an effect on various coated surfaces. In this study, the tribological characteristics of various soft/hard materials were investigated by using a custom-built pin-on-reciprocator tester. From the experimental results, it was found that the friction coefficients of the soft material coated surfaces were lower under various normal loads due to thier self-lubricating ability and material transfer to the counter surface.

Key Words : Material transfer layer, Rotating elements, Soft/hard coated surface, Tribological characteristics

1. 서 론

고효율, 고성능을 구현하기 위해 기계 및 전기전자기기 등에 사용되는 회전 부품은 점차 정밀화, 고속화되어 가고 있다. 이러한 고속 회전하는 부품의 신뢰성 및 내구성을 만족시키기 위하여, 일반적으로 부품간 접촉 표면에 코팅을 사용하여 저 마찰, 마멸 특성을 얻고 있으며, 이와 관련한

많은 연구가 진행되고 있다[1-10]. 일반적으로 코팅 기술은 그 재료를 전부 교체하지 않고 표면에 이종의 특성을 가지는 피막을 생성시킴으로서 원하는 특성을 얻고자 수행되며, 이러한 코팅기술을 사용하면 재료 표면의 물리·화학적 특성, 경도, 표면 형상 및 거칠기 등을 변화 시킬 수 있다[11]. 코팅 기술의 발달에 따라 하드디스크 드라이브(hard disk drive), 및 테이프 레코더(tape recorder), 헤

[†] 연세대학교 대학원 기계공학과

* 주저자, 연세대 기계공학부 (kimde@yonsei.ac.kr)

주소: 120-749 서울시 서대문구 신촌동 134번지

†† 삼성전자(주)

드의 드럼 등과 같은 전자 기기 분야뿐만 아니라 절삭 공구, 기어, 베어링과 같은 일반 기계 및 인공 고관절 등과 같은 바이오 분야까지 그 적용범위가 넓혀지고 있다[12]. 트라이 볼로지적 관점에서의 코팅 기술은 코팅표면 및 그와 접촉하는 상대 재료의 마찰과 마멸을 원하는 수준으로 조절하기 위해 사용된다. 대표적으로는 MoS_2 및 DLC[13] 등의 적용에 의한 마찰계수의 저감 등을 들 수 있다.

코팅 표면의 트라이볼로지적 특성은 코팅 작업 시의 변수, 코팅 방법, 코팅 재료, 작동 조건, 상대 운동 형태 및 실험 환경과 같은 다양한 변수들에 의해 직접적인 영향을 받는다. 또한 경질 코팅(hard coating)인 경우 쟁기질(ploughing)현상을 막아주므로 마멸의 저감 측면에서 유리할 수 있으나, 반면에 표면에 전단 강도가 낮은 연질 박막(soft coating)을 코팅하는 경우 낮은 마찰계수를 나타나게 할 수 있다.

본 연구에서는 다양한 고속회전 기기의 정밀 부품에 사용되는 연질/경질 코팅에 대하여 실험계획법을 통해 얻은 적절한 실험 조건에서 마찰 시험과 실험 후 접촉 표면에 대한 관찰을 통해 코팅 재료와 작동 조건에 따른 마찰 및 마멸 특성을 살펴보고자 한다.

2. 시편 및 실험 방법

본 연구에서는 고속회전 부품에 사용되는 여러 코팅 재료 중에서 다양한 연질/경질 코팅 재료로서 PTFE(Polytetrafluoroethylene), NiP(Nickel-Phosphorus), Al_2O_3 (Alumina), WC(Tungsten-Carbide), PTFE가 첨가된 NiP/PTFE를 사용하였다. 코팅시편은 순응표면(conformal) 형상, 비순응 표면(non-conformal) 형상, 평판(plate) 형상의 알루미늄 합금 모재 위에 앞에서 언급한 코팅 재료를 이용하여 제작되었다. 코팅 두께(film thickness) 및 표면의 거칠기(surface roughness), 경도(hardness)는 VSEM(Vertical Scanning Electron Microscopy), 접촉식 표면 조도기(surface profiler), Micro-hardness tester, Nano-indenter tester를 사용하여 각각 측정하였다. 코팅 두께는 Fig 1에서와 같이 VSEM을 이용하여 코팅표면을 수직으로 절단한 후 측정하였다. 평균 표면 거칠기(average roughness, Ra)는 5회 이상 측정하여 평균값을 취하였다. 측정 결과는 Table.1에서와 같다.

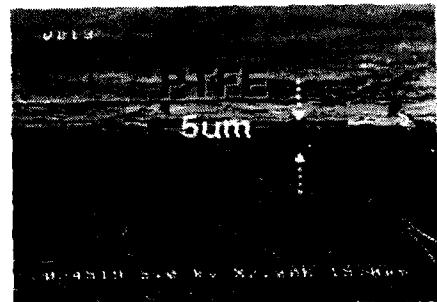


Fig. 1 SEM image of the cross-section of a PTFE coated specimen

Table 1. Film thickness and roughness of the coated specimens

	Thickness(μm)	Ra(μm)
PTFE	5	0.11
Al_2O_3	6	0.8
NiP	10	0.03
NiP/PTFE	30	0.07
WC	10	0.17

또한 코팅 시편의 경도는 미소경도시험기(micro-hardness tester)와 나노인덴터(nano-indenter)로 측정하였고 Fig.2에 제시한 바와 같이 본 연구에서는 사용된 코팅 재료의 상대적인 경도차이에 의해 연질(soft)/경질(hard) 코팅으로 나누었다.

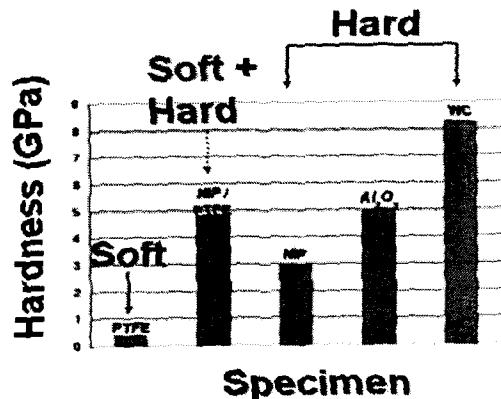


Fig. 2 Hardness values of the coated specimens

실험장치로는 Fig 3에서 보이는 바와 같이 pin-on-reciprocator tester를 이용하였다. 핀은 볼을 사용하였으며 핀의 연결부는 강성(stiffness)값이 매우 작은 서스펜션(suspension)을 이용하여 수직변위에 대한 미세한 하중 조절이 가능하게 하였다. 볼의 재질은 STB2, Si_3N_4 , Al_2O_3 를 사용하였으며 Table.2와 같은 크기 및 특성을 가지고 있다. 접촉부에서 볼과 코팅 면의 상호작용에 의해 발생하는 마찰력을 앰프를 통해 증폭되어 A/D board를 통하여 컴퓨터로 저장된다.

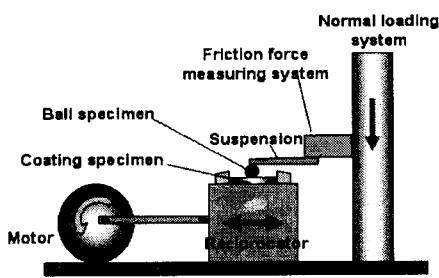


Fig. 3. Schematic of the pin-on-reciprocator tribotester

Table 2. Properties of ball specimen

Material	STB2	Si_3N_4	Al_2O_3
Hardness (HV)	780	1251	2600
Diameter (mm)	1, 3, 5	3	4
Elastic Modulus (GPa)	200	250	200

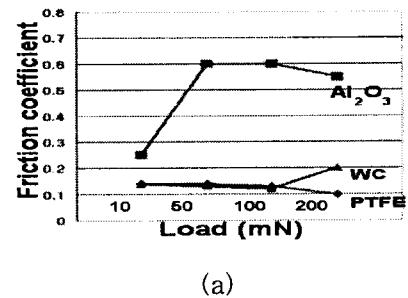
실험 방법 선정에 있어서 코팅의 마찰마멸 특성에 영향을 미치는 모든 주요 인자들을 고려하여 실험할 경우 실험 횟수는 크게 늘어나게 된다. 따라서 실험 횟수를 최소화하기 위하여 실험 조건 선정을 위한 예비 실험 시 실험 계획법을 사용하였고 실험 인자로는 마찰특성에 가장 크게 영향을 미칠 것으로 예상되는 코팅 재료, 하중, 속도, 볼 재료로 하였다. 본 연구에서는 마찰계수가 작을수록 좋은 망소 특성이므로 망소 특성 분석에 준하여 실행하였다. 실험 결과 코팅 재료에

의한 영향이 지배적이었고 나머지 인자들의 영향은 적은 것으로 나타났다. 이러한 실험 결과에 의거해 실험 조건을 13mm/s의 속도, STB2 1mm 볼, 25m의 작동 거리로 선정하였다.

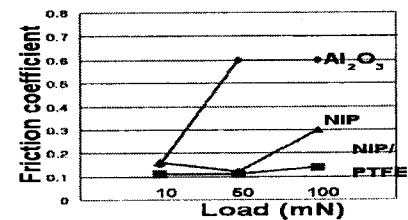
마찰실험 후에는 금속광학현미경을 이용하여 접촉 표면과 발생한 마멸 트랙과 마멸 입자, 볼의 접촉 표면을 확인하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig.4에 코팅 재료별 하중 변화에 따른 마찰계수의 변화를 보였다. 비순응 표면(non-conformal surface)의 경우 PTFE와 WC가 하중 변화에 관계없이 낮은 마찰계수를 보여주지만, Al_2O_3 의 경우에는 50mN 이상부터 급격한 마찰계수의 증가를 보여준다. 또한 순응 표면(conformal surface)인 경우 NiP/PTFE 만이 하중 변화에 관계없이 낮은 마찰계수를 보여주며 비순응 표면의 경우에서와 마찬가지로 Al_2O_3 은 50mN 이상부터 급격한 마찰계수의 변화를 보였다. NiP와 NiP/PTFE를 비교하였을 때 유사한 경향을 보이지만 PTFE 성분이 첨가된 코팅이 NiP 코팅에 비해 상대적으로 낮은 마찰계수를 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 4. Friction coefficients of various coated specimens with respect to normal load for (a) non-conformal surfaces and (b) conformal surfaces

실험 후 광학현미경을 이용하여 코팅 표면의 접촉 부분을 확인하였다. Fig.5에서 보이는 바와 같이 Al_2O_3 의 경우 급격히 마찰계수가 변하는 50mN 이후에서 코팅 표면에 마멸 트랙이 발생되었음을 알 수 있다. 하중이 증가할수록 마찰계수는 계속 증가된 값을 가지며 동시에 마멸 트랙은 넓어졌다. 또한 마멸 트랙 주변에 작은 마멸 입자들이 발생함을 확인 할 수 있었다. 이는 마멸 입자에 의한 추가적인 마찰작용으로 마찰력을 증대시킴을 알 수 있다.

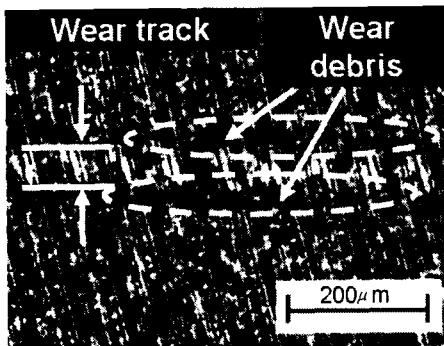


Fig.5 Optical image of the wear track(50mN load) on Al_2O_3 coated flat surface

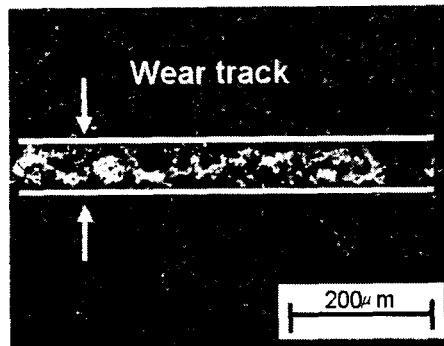
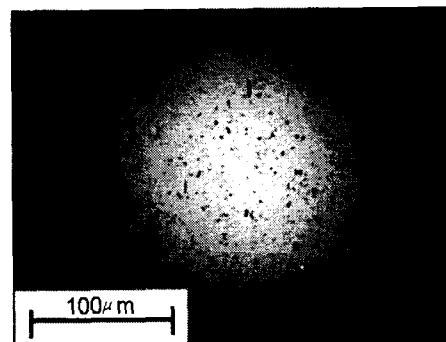


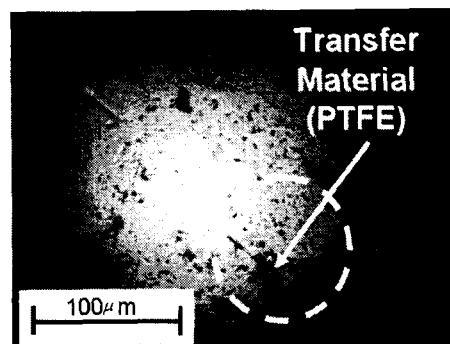
Fig.6 Optical image of the wear track(50mN load) on PTFE coated flat surface

한편 Fig.6에서 보이는 것처럼 PTFE의 경우는 동일하중(50mN)에서 심한 마멸 트랙이 발생하였으며, 하중이 증가할수록 Al_2O_3 의 경우와 같이 마멸 트랙은 넓어졌지만, Fig.4에 제시된 바와 같이 마찰계수의 급격한 증가는 없었다. 또한, Al_2O_3 에서와 같은 마멸 입자는 발견 할 수 없었다.

으나 볼의 접촉 표면을 관찰한 결과 볼의 마멸 흔적은 발견되지 않았고 Fig.7에서 보이는 바와 같이 시편표면으로부터 PTFE 코팅이 볼로 전이(transfer)되었음을 확인할 수 있었다. 이로부터 표면의 코팅물질이 마멸 후 다시 볼 표면에 전이되어 윤활효과로 하는 것으로 판단 할 수 있다.



(a)



(b)

Fig.7. Optical images of the STB2 ball surfaces slid against a PTFE coated specimens : (a) before test and (b) after test

실험을 통해 자기윤활작용(self-lubrication)을 하는 연질 코팅의 경우 코팅층이 파손되지 않는 상황에서는 경질코팅에 비해 보다 우수한 마찰마멸 특성을 보인다고 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속회전 부품의 표면에 사용되는 여러 가

지 연질/경질의 코팅 재료에 따른 마찰마멸 특성을 실험을 통하여 고찰하였다. 실험 결과로부터 연질 코팅의 경우 코팅 표면에 파손이 일어나더라도 심한 마찰계수의 변화가 없음을 확인하였으며 반면 경질 코팅의 경우는 코팅 표면 파손과 함께 급격한 마찰계수의 변화를 확인하였다. 경질 코팅의 경우 코팅 층의 파손에 의해 발생된 마멸 입자에 의한 추가적인 마찰력의 증가가 발생되어지는 것으로 고찰되었다. 이와는 달리 연질 코팅의 경우 파손된 코팅 물질이 상대 면의 표면에 전이되어 다시 윤활 작용을 함으로써 원활한 마찰특성을 보여주며 하중의 변화에 관계없이 안정된 마찰계수를 보였다.

결론적으로 연질 코팅의 경우, 자기윤활작용에 의해 코팅 층이 완전히 파손되지 않는 작동 상황에서는 상대적으로 우수한 특성을 보이는 것으로 판단된다.

후기

본 내용은 삼성전자(주) 디지털 미디어 총괄 프린팅(사)의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] K.Holmberg, A.Matthews, 1994, Coating tribology, Elsevier science B.V, pp. 70~79.
- [2] J.S.Burnell-Gray, P.K.Datta, 1996, Surface Engineering Casebook, Woodhead publishing limited, pp. 49~72.
- [3] R.Taheri, I.N.A.Oguocha, S.Yannacopoulos, 2001, "The tribological characteristics of electroless NiP coatings", Wear , Vol.249, pp. 389~396.
- [4] S.H.Lee, M.J.Kwon, J.G.Park, Y.K.Kim, H.J.Shin, 1999, " Preparation and charaterization of perfluoro-organic thin films on aluminum", Surf. Coat. Technol, Vol.12 , pp. 48~51.
- [5] M.K.Stanford, V.K.Jain, 2001, "Friction and wear characteristics of hard coating", Wear, Vol.252, pp. 990~996
- [6] A.Grosjean, M.Rezrazi, J.Takadoum, P.Bergot, 2001, "Hardness, friction and wear characteristics of nickel-SiC electroless composite deposits", Surf. Coat. Technol, Vol.137, pp. 92~96.
- [7] L.Rapoport, I.Lapsker, A.Rayhel, 1999, "Scratching of alumina in various environments", Ints. J. Refra. Matal. Hard. Metat. Vol.17, pp. 111~115.
- [8] L.G.Yu, X.S.Zhang, 1994, "The friction and wear properties of electroless Ni-polytetrafluoroethylene composite coating", Thin Solid Films, Vol.245, pp. 99~103.
- [9] J.Lu, S.Yang, J.Wang, Q.Xue, 2001, "Mechanical and tribological properties of Ni-based alloy/CeF₃/graphite high temperature self-lubricating composites", Wear, Vol.249, pp. 1070~1076.
- [10] X.Zhu, W.Lauwerens, P.Cosemans, M.V.Stappen, J.P.Cetis, L.M.Stals, J.He, 2003, "Different tribological behavior of MoS₂ coatings under fretting and pin-on-disk conditions", Surf. Coat. Technol, Vol.163-164, pp. 422~428
- [11] B.Bhushan, 1998, Principles and Applications of Tribology, Holn Wiley & Sons. INC, pp. 896~928.
- [12] B.Bhushan, 1999, Handbook of Micro/Nano tribology, CRC press, pp.597~672.
- [13] S.H.Yang, H.S.Kong, E.S.Yoon and D.E.Kim, 2002, "Effect of Environment on the Tribological Behavior of Si-incorporated Diamond-like Carbon Films", Wear, Vol.252, pp. 70~79.