한국소성가공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집 pp. 294~297

디젤엔진 피스톤 링 코팅 층의 마찰특성

장정환[1]· 주병돈[1]· 이호진[1]· 김은화[1]· 문영훈#

Frictional characteristics of coating layer in diesel engine piston ring

J. H. Jang, B. D. Joo, H. J. Lee, E. H. Kim and Y. H. Moon

Abstract

The frictional behaviors of Cermets/Cr-Ceramics and Cu-Al coatings of piston ring were investigated. Friction tests were carried out by pin-on-disk test and materials properties of coating layer were analyzed by nano indentation tester. Higher friction coefficient was obtained at harder coating with rougher surface. In case of hard-coating, the scratch depth, width and pile-up height had close relationship with indentation hardness. So the scratch width, depth and pile-up height increases with decreasing friction coefficient. But in case of soft-coating, the friction coefficients are strongly dependent on the morphological characteristics after nano scratching more than indentation hardness.

Key Words : Piston ring, Coating layer, Nano-indentation, Nano-scratch, Pin-on-Disk(POD), Friction coefficient

1. 서 론

Cermets 및 Cr-Ceramics 재료는 여러 가지 적용을 위한 마모 저항성이 큰 재료로 매우 잘 알려져 있다. 이러한 재료는 실린더 라이너와의 접촉면의 다양한 조건에 대해서 매끄러운 표면과 높은 강도를 가지기 때문에 피스톤 링 표면 코팅을 위한 재료로 적용된다. 피스톤 링의 표면 코팅은 실린더 라이너와의 접촉면에서 좋은 미끄러짐과 함께 사용 주기를 연장시키며, 재료의 단가를 줄일 수 있다[1~2].

마찰계수는 미끄럼 속도와 코팅 층에서 분리된 입자와 진행 방향의 수직 하중에 의해 영향을 받으며, 이러한 미끄럼 속도, 접촉면의 표면 조도 등은 경계 윤활 조건에서의 마찰 거동의 중요한 요소이다[3~4].

나노 스크래치는 매우 작은 스케일의 기계적 물성을 측정하기 위해 널리 사용되는 기술로써, 마찰력, 마찰계수, 탄성 회복 등의 물성을 측정할 수 있으며, 작은 하중으로 코팅 층의 스크래치 저항성 등을 평가하는데 사용된다[5~6].

본 연구에서는 피스톤 링 코팅 층의 마찰 특성 분석을 위해서 6종류의 피스톤 링 코팅에 대해 Pin-on-Disk(POD) 시험을 통한 실린더 라이너와 피스톤 링 코팅 층 사이의 마찰계수를 측정하였다. 또한 경도, 탄성계수 등의 재료 물성을 분석하기 위해서 나노 인덴테이션 시험을 실시하였으며, 스크래치 폭, 깊이, 파일-업(pile-up) 높이 등의 스크래치 된 표면의 형상 특성 분석을 위해서 나노 스크래치 시험을 실시하였다.

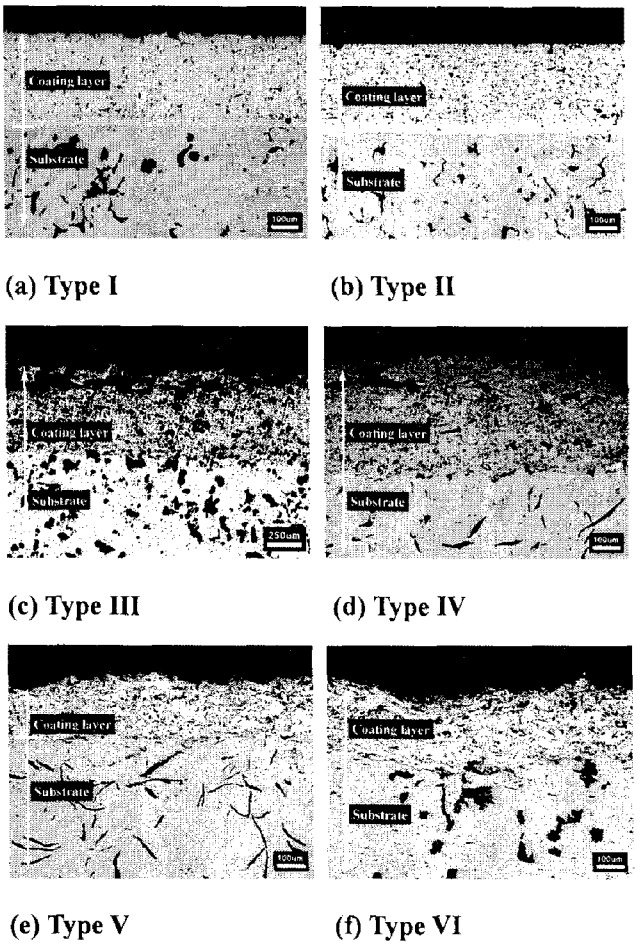
2. 실험 방법

2.1 시험 재료

피스톤 링의 표면 코팅 층의 경도가 실린더 라이너를 기준으로 높은 것을 경질 코팅(Hard-coating), 낮은 것을 연질 코팅(Soft-coating)으로 구분하였으며, Type I~IV 는 경질 코팅을 Type V~VI 는 연질 코팅을 나타낸다.

1. 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형가공 연구소
교신저자: 부산대학교, E-mail:yhmoon@pusan.ac.kr

Fig. 1(a)~(b)에 나타낸 Type I, II 의 경우 크롬-알루미늄 산화물로 구성되어 있으며, ECD(electro-chemical deposition) 방법에 의해 코팅되었으며, 코팅 층의 두께는 Type I-0.33mm, Type II-0.31mm 이다. Fig. 1(c)~(d)에 나타낸 Type III, IV 는 플라즈마 용사(plasma-sprayed) 방법에 의해 코팅되었으며, 코팅 층의 두께는 Type III-0.7mm, Type IV-0.39mm 이다. Fig. 1(e)~(f)에 나타낸 Type V~VI 은 Cu-Al 합금으로 부분적으로 금속 산화물의 형태로 이루어져 있으며, 코팅 층의 두께는 Type V-0.2mm, Type VI-0.28mm 이다.



(a) Type I (b) Type II

(c) Type III (d) Type IV

(e) Type V (f) Type VI

Fig. 1 Microstructures of piston ring materials

2.2 Pin-on-Disk 시험

실린더 라이너/피스톤 링 대상 부품재에 대해 실린더 라이너를 디스크로, 피스톤 링을 회전운동을 하는 핀으로 하여 POD 시험을 실시하여 코팅층의 마찰계수를 관찰하였다.

실험장비는 PLINT사의 TE-92 마찰 시험기를 이용하였으며, Fig. 2에 그 개략도를 나타내었다.

실린더 라이너의 표면 조도에 따른 코팅 층의 마찰특성을 분석하기 위해, 디스크는 표면 연마에 의해 총 3종류 범위의 초기 표면조도(Ra 0.2~0.5, 0.7~1.0, 1.2~1.5㎛)를 가하여 회전속도 0.916m/sec, 수직하중 50N의 실험조건으로 표면 조도에 대한 영향을 분석하였다.

또한 윤활특성을 파악하기 위해서 Fig. 3에서와 같이 챔버에 디스크와 핀이 충분히 잠길 정도의 윤활제를 첨가한 후, POD 시험을 실시하였다.

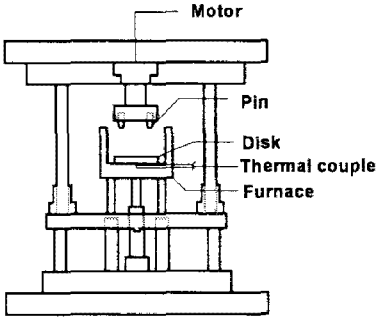


Fig. 2 Schematic drawing of Pin-on-Disk test

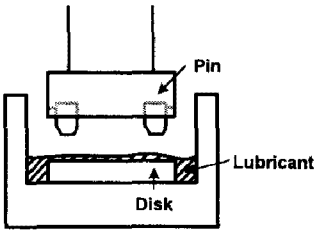


Fig. 3 Schematic drawing of lubricated POD test

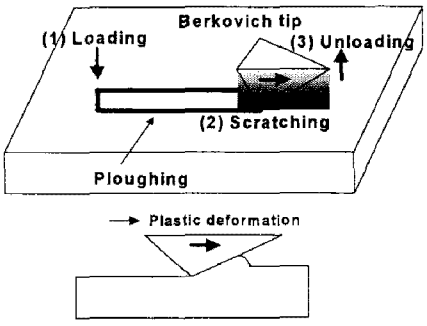


Fig. 4 Schematic illustration of scratching mechanism

2.3 나노 인덴테이션, 나노 스크래치 시험

나노 인덴테이션, 스크래치 실험은 MTS사의 Nanoindenter® XP를 사용하였으며, 팁은 탄성계수가 크고 마찰계수와 접촉 면적이 작은 베르코비치 팁(Berkovich tip)을 사용하였으며, 나노 인덴테이션 시험은 2000nm의 압입 깊이를 연속강성측정법(continuous stiffness method)을 사용함으로써 경도 및 탄성계수의 변화를 측정하였다. 또한, 나노 스

크래치 시험은 시작하중과 최대하중이 20mN으로 같은 하중을 부과하는 일정하중스크래치 법(constant load scratch)을 사용하였고, 스크래치 길이는 300㎛, 속도는 10㎛/sec로 실시하였다. Fig. 4에 나노 스크래치 공정의 메커니즘을 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Pin-on-Disk 결과

Fig. 5는 미끄럼 거리에 대한 마찰계수의 변화추이를 Type I의 경우를 예를 들어 나타낸 것이다. 초기 실험이 진행될 때 불안정한 구간이 보이며, 그 이후 안정된 상태의 마찰계수를 관찰할 수 있다. 여기서 안정된 구간의 마찰계수를 평균 마찰계수로 나타내었으며[3], 마찰계수는 식(1)과 같이 정의된다.

$$\mu = \frac{T}{F_N \cdot r} \qquad (1)$$

여기서 T는 회전력(torque), r은 디스크의 회전반경을 나타내며, F_N은 하중을 의미한다[5]. 윤활 시험의 경우 모든 종류의 코팅 층에서 0.1 이하의 마찰계수를 나타내었으며, 코팅 층의 종류에 따른 뚜렷한 마찰특성을 보이지는 않았다. 디스크 표면조도에 따른 평균 마찰계수를 Fig. 6에 나타내었다. 표면조도가 거칠수록 모든 재료의 코팅 층에서 높은 마찰계수를 나타내었으며, Type V에서 가장 높은 마찰계수를 나타내었다. 또한 Type I~II에서 표면 조도의 변화에 따른 마찰계수의 증가 폭이 가장 크게 나타나 표면 조도에 따른 마찰계수의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

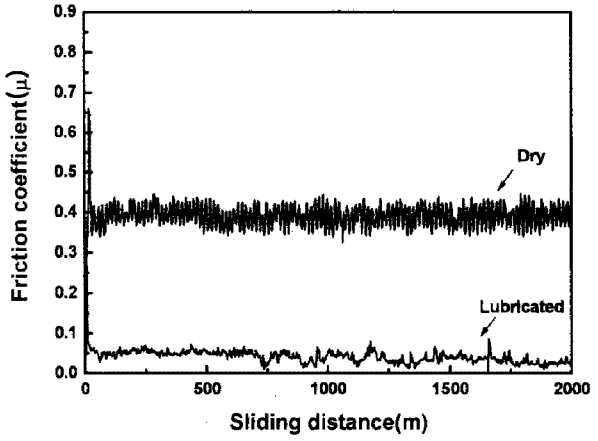


Fig. 5 Representative runs showing the variation of friction coefficient of type I at disk surface roughness 1.2~1.5

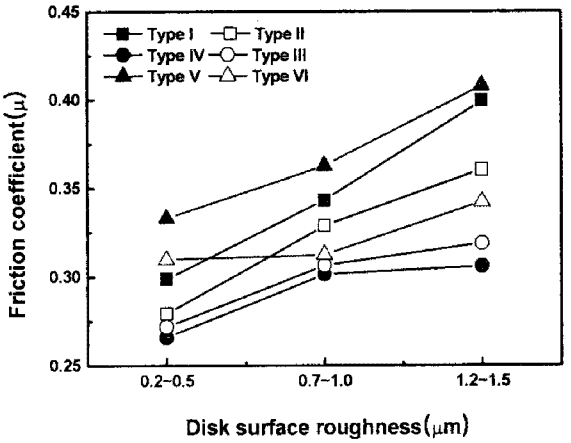


Fig. 6 Friction coefficient at various disk surface roughnesses

3.2 나노 인덴테이션, 스크래치 결과

Table 2는 코팅 층에 대한 나노 인덴테이션, 스크래치 결과를 나타낸 것이고, Fig. 7은 스크래치 시험 후의 단면 형상을 나타낸 것이다. Type I에서 가장 높은 경도와 탄성계수를 나타내었으며, 연질 코팅인 Type V~VI에서 상대적으로 낮은 경도와 탄성계수를 나타내었다. 경질 코팅은 경도가 높을수록 스크래치 폭과 파일-업(pile-up) 높이가 낮은 것을 알 수 있으며, 연질 코팅의 경우 비슷한 경도를 나타내었지만, 스크래치 폭과 파일-업 높이가 Type V에 비해 Type VI이 약 13% 높게 측정되었다.

Table 2 Results of nano-indentation

	Hardness (GPa)	Scratch width (㎛)	Pile-up height (㎚)
Type I	9.7	2.268	39.781
Type II	5.6	2.649	63.767
Type III	4.5	3.757	146.11
Type IV	3.7	4.582	198.586
Type V	2.1	5.494	273.753
Type VI	2.0	6.323	314.659

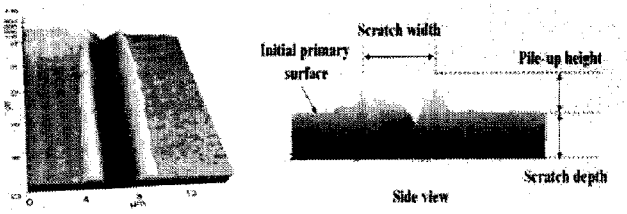


Fig. 7 Morphological characteristic after scratch test

Fig. 8은 디스크 표면 조도가 1.2~1.5인 경우의 나노 인덴테이션 경도와 마찰계수와의 관계를 나타낸 것이다. 경질 코팅의 경우 경도가 높을수록 마찰계수가 증가하는 형태를 보이며, 연질 코팅의 경우 비슷한 경도를 나타내었으나 마찰계수의 차가 크게 나타났다. 이는 경질 코팅의 경우, 경도가 마찰계수에 미치는 영향이 크게 나타났지만, 연질 코팅의 경우 경도와 마찰계수와의 상관관계가 크지 않음을 알 수 있다.

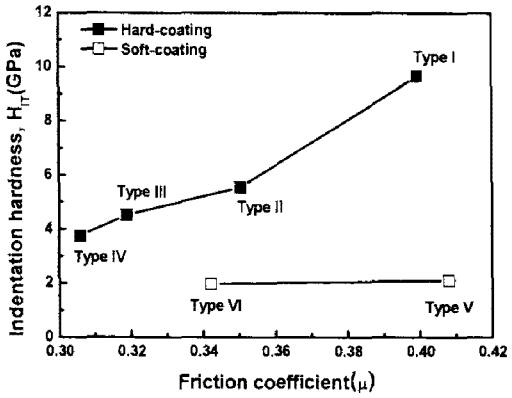


Fig. 8 Correlation between friction coefficient and hardness at disk surface roughness 1.2~1.5

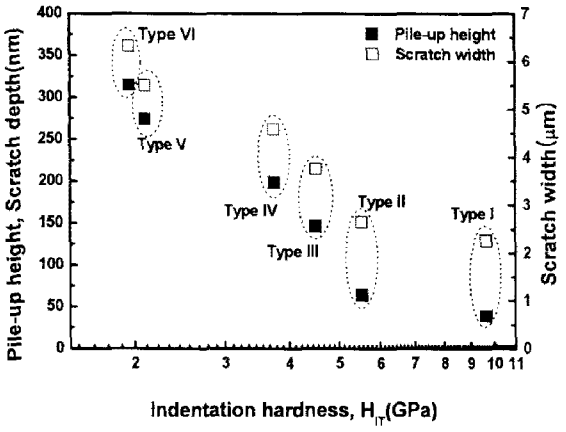


Fig. 9 Correlation between indentation hardness and nano-scratched morphologies

Fig. 9는 나노 인덴테이션 경도와 나노 스크래치 결과와의 상관관계를 나타낸 것이다. 경질 코팅의 경우, 경도의 증가에 따라 스크래치 폭과 파일-업 높이가 감소함을 보이고 있다. 연질 코팅의 경우, 비슷한 경도를 나타내었지만, 스크래치 결과 Type VI에서 Type V에 비해 더 높은 스크래치 폭과 파일-업을 나타내고 있다. 이 결과, 연질 코팅의 경우 경도에 비해 스크래치에 따른 표면 형태가 마찰계수에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 디젤 엔진 피스톤 링의 코팅층 종류에 따른 마찰 특성을 파악하고자 하였다. 그 결론을 요약하면 아래와 같다.

(1) 표면조도가 거칠수록 높은 마찰계수를 나타내었으며, 윤활에 의한 마찰계수는 0.1 이하를 나타내었다. 표면조도의 변화에 따른 마찰계수의 증가량은 Type I~II 에서 가장 높게 나타났다.

(2) 경질 코팅의 경우, 경도가 높을수록 스크래치 폭과 파일-업 높이가 감소하는 경향을 나타내었으며, 마찰계수는 크게 측정되었다.

(3) 연질 코팅의 경우, 스크래치 결과에 의한 표면 형상의 특성에 따라 마찰계수의 차이를 나타내었다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업의 연구비 일부지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] J. PRISO, M. Viljus, S. Letunovits, 2006, Friction and dry sliding wear behaviour of cermets, Wear, Vol. 260, pp. 815~824.

[2] G. Bolelli, V. Cannillo, L. Lusvarghi, T. Manfredini, 2006, Wear behaviour of thermally sprayed ceramic oxide coatings, Wear, Vol. 261, pp. 1298~1315.

[3] L. Prchlik, S. Sampath, 2007, Effect of the microstructure of thermally sprayed coatings on friction and wear reponse under lubricated and dry sliding conditions, Wear, Vol. 262, pp. 11~23.

[4] J.H. Horng, 1998, Studies of tribological behavior and separation between surfaces at initial boundary lubrication, Vol. 216, pp. 8~14.

[5] W. Tang, X. Weng, L. Deng, K. Xu, J. Lu, 2007, Nano-scratch experiments of Au/NiCr multi-layered films for microwave integrated circuits, Surface & Coatings Technology, Vol. 201, pp. 5664~5666.

[6] M. Bezzazi, A. Khamlichi, A. Jabbouri, P. Reis, J.P. Davim, 2007, Experimental characterization of frictional behaviour of clutch facings using Pin-on-disk machine, Materials and Design, Vol. 29, pp. 2148~2153.