

디젤엔진 피스톤 링 코팅 층의 경도에 따른 마찰특성

장정환¹ · 주병돈¹ · 이호진¹ · 김은화¹ · 문영훈[#]

Effect of Coating Layer Hardness on Frictional Characteristics of Diesel Engine Piston Ring

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

(Received June 23, 2009 / Revised July 14, 2009 / Accepted July 14, 2009)

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. The effect of surface roughness of cylinder liner on the friction coefficient was analyzed. This study provided tribological data of hard and soft piston ring coatings against cylinder liner. The surface roughness does exert an influence on the average friction coefficient, with smoother surfaces generally yielding lower friction coefficients. In case of hard-coating, the scratch depth, width and pile-up height had close relationship with 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 such as, scratch depth, width, pile-up height and elastic modulus.

Key Words : Friction Coefficient, Piston Ring, Coating Layer, Nano-indentation, Nano-scratch, Pin-on-Disk(POD)

1. 서 론

피스톤 링과 실린더 라이너는 내연 기관에서의 가장 중요한 마찰 시스템 중에 하나이다. 실린더 라이너와 피스톤 링의 접촉 표면은 마찰, 마모, 윤활 등에 영향을 미치는 인자이다. 이러한 접촉면은 엔진부 운전 특성에 따라 다양한 재질의 층이 적용되고 있으며, 크게 연질코팅과 경질코팅으로 구분 가능하다[1~3]. 연질코팅의 경우 대체로 얇고 부드러운 재질이 사용되며, 초기 구동 시 발생하기 쉬운 스킵핑(scuffing)을 예방하는데 그 목적이 있다. 경질코팅의 목적은 연질코팅보다 두껍고 높은 경도를 나타내며, 마모 저항성 증가로 피스톤 링의 수명주기를 연장시키는데 있다.

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[4~5].

마찰계수는 미끄럼 속도와 코팅 층에서 분리된 입자와 진행 방향의 수직 하중에 의해 영향을 받으며, 이러한 미끄럼 속도, 접촉면의 표면 조도, 표면 경도, 표면의 화학 성분 등은 경계 윤활 조건에서의 마찰 거동의 중요한 요소이다[6~8].

나노 스크래치는 매우 작은 스케일의 기계적 물성을 측정하기 위해 널리 사용되는 기술로써, 마찰력, 마찰계수와 탄성계수 등을 측정할 수 있으

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

며, 작은 하중으로 코팅 층의 스크래치 저항성 등을 평가하는데 사용된다[9~10].

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 측정하였으며, 실린더 라이너의 표면조도는 3가지의 경우(Ra 0.2~0.5, 0.7~1.0, 1.2~1.5 μm)로 분류하여 실험을 진행하였다. 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, 낮은 것을 연질 코팅으로 구분하였다. Type I~IV는 경질 코팅을 Type V~VI는 연질 코팅을 의미하며, Table 1에 코팅 층의 특성을 나타내었다. Fig. 1(a)~(b)의 Type I, II의 경우 크롬-알루미늄 산화물로 구성되어 있으며, ECD (electro-chemical deposition) 방법에 의해 코팅되었다. Fig. 1(c)~(d)의 Type III, IV는 플라즈마 용

사(plasma-sprayed) 방법에 의해 코팅되었다. Fig. 1(e)~(f)의 Type V~VI은 Cu-Al 합금으로 부분적으로 금속 산화물의 형태로 이루어져 있다.

실린더 라이너는 주철재로 이루어져 있으며, 290~300HV의 경도를 나타내었다.

2.2 Pin-on-Disk 시험

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

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 μm)를 가하여 회전속도 500rpm(0.916m/sec), 수직하중 50N의 실험조건으로 표면 조도에 대한 영향을 분석하였다.

Table 1 Properties of test specimens

	Thickness(mm)	Hardness(HV)
Type I	0.33	720
Type II	0.31	480
Type III	0.70	430
Type IV	0.39	390
Type V	0.20	140
Type VI	0.28	130

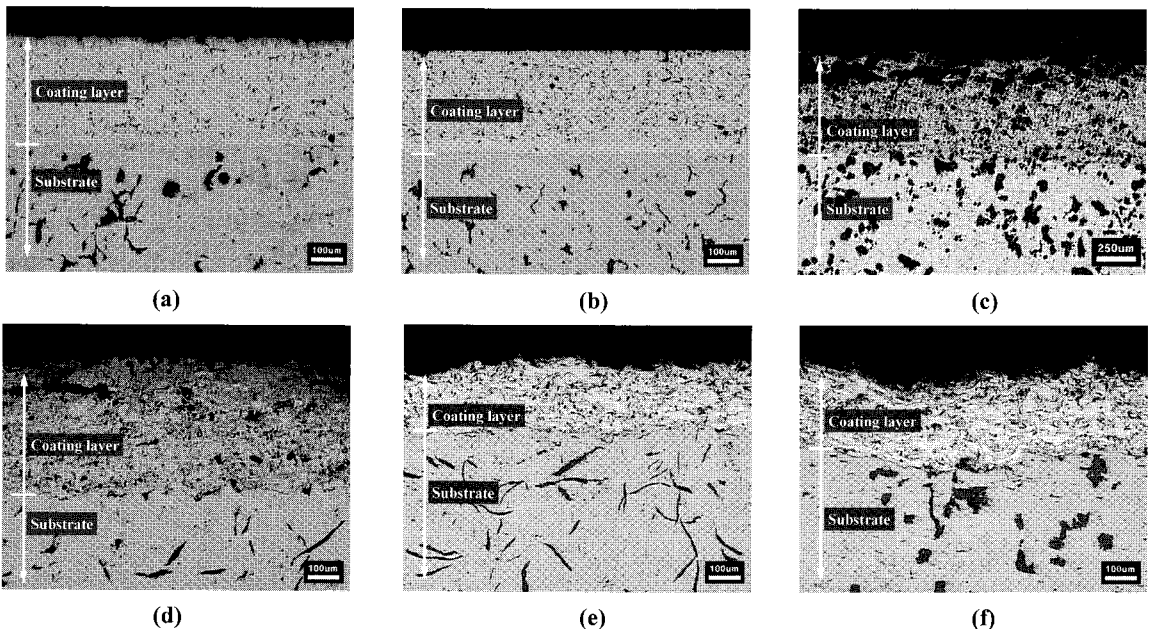


Fig. 1 Microstructures of piston ring: (a) Type I, (b) Type II, (c) Type III, (d) Type IV, (e) Type V and (f) Type VI

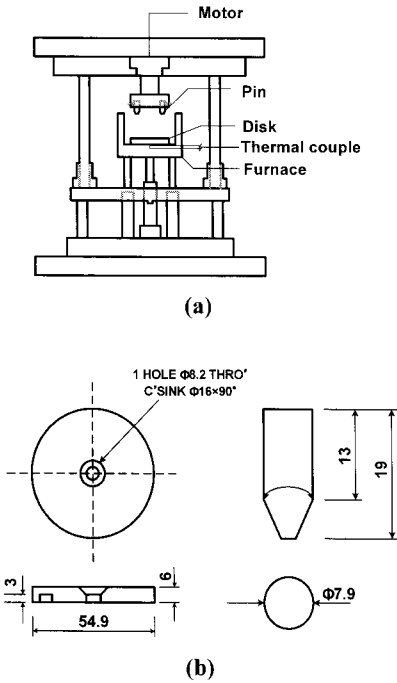


Fig. 2 Schematic drawing of Pin-on-Disk test: (a) test system and (b) dimensions of the disk and the pin

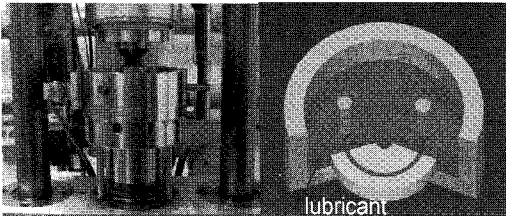


Fig. 3 Equipment and schematic drawing of lubricated pin-on-disk test

실험장비는 PLINT사의 TE-92 마찰 시험기를 이용하였으며, Fig. 2(a)에 그 개략도를 나타내었으며, Fig. 2(b)에 디스크와 핀의 치수를 나타내었다. 기계 장치 상부에 모터에 의해 회전 속도가 제어되며, 하중장치(load cell)는 하부에 수직 축에 수평방향으로 위치해 있으며, 공기압에 의해 정밀하게 제어할 수 있다.

또한 윤활특성을 파악하기 위해서 챔버에 디스크와 핀이 충분히 잠길 정도의 윤활제를 첨가한 후, POD 시험을 실시하였다. Fig. 3 은 윤활시험에 따른 장치와 개략도를 나타낸 것이다.

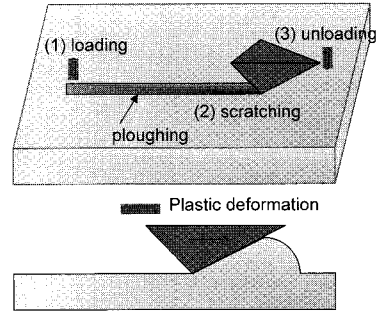


Fig. 4 Schematic drawing of scratching mechanism

2.3 나노 인덴테이션, 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 스크래치 시험은 시작하중과 최대하중이 20mN으로 같은 하중을 부과하는 일정하중스크래치 법(constant load scratch)을 사용하였고, 스크래치 길이는 300 μ m, 속도는 10 μ m/sec로 실시하였다. 나노 인덴테이션/스크래치 시험은 시편을 절단한 후의 절단면에 대해서 실시함으로써 초기 조건(표면조도)이 동일한 상태에서 실험을 진행하였다. Fig. 4에 나노 스크래치 공정의 메커니즘을 나타내었으며, 1단계 압입, 2단계 스크래칭, 3단계 언로딩 순으로 3단계에 걸쳐서 실험이 진행된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Pin-on-Disk 결과

Fig. 5는 미끄럼 거리에 대한 마찰계수의 변화추이를 Type 1의 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[6], 마찰계수는 식(1)과 같이 정의된다.

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

여기서 T 는 회전력(torque), r 은 디스크의 회전반경을 나타내며, F_N 은 수직하중을 의미한다[9].

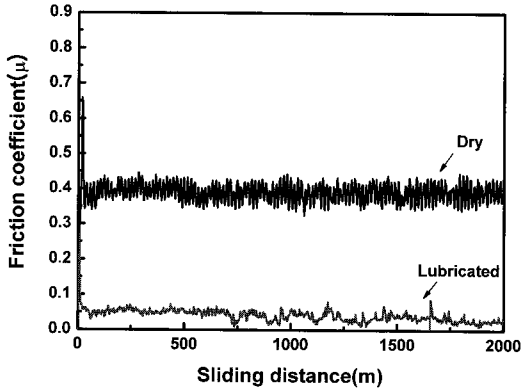


Fig. 5 Representative runs showing the variation of friction coefficient of type I at disk surface roughness 1.2~1.5

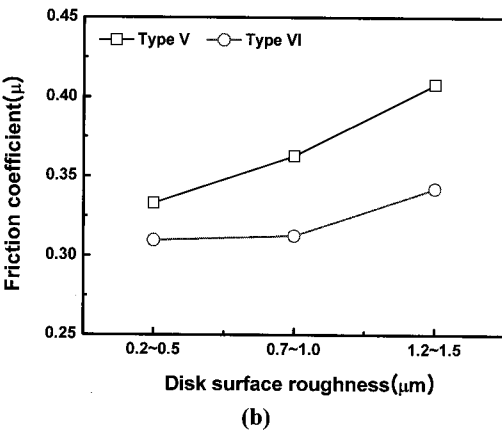
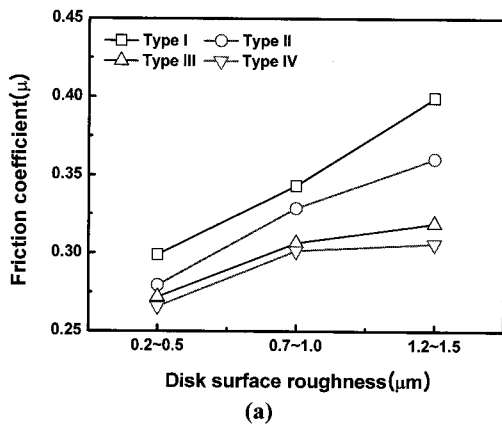


Fig. 6 Friction coefficient: (a) hard coating and (b) soft coating

윤활 시험의 경우 모든 종류의 코팅 층에서 0.1 이하의 마찰계수를 나타내었으며, 코팅 층의 종류에 따른 뚜렷한 마찰특성을 보이지는 않았다. 이는 Keum[11] 등의 연구에서도 이와 유사한 결과를 볼 수 있다. Fig. 6은 무윤활 조건에서의 디스크 표면 조도에 따른 평균 마찰계수를 나타낸 것이다. 표면 조도가 0.2~0.5일 때 가장 낮은 마찰계수를 나타내었으며, 표면조도가 거칠수록 모든 재료의 코팅 층에서 높은 마찰계수를 나타내었다. 이는 거친 표면이 접촉면에서의 돌출부가 되어 표면 박리가 더 촉진되면서 마찰계수가 증가한 것으로 해석된다 [12]. Type I-II에서 표면조도의 변화에 따른 마찰계수의 증가 폭이 가장 크게 나타나 표면조도에 따른 마찰계수의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 또한, Type I-II의 마찰계수가 Type III-IV에 비해 크게 측정된 것은 3.2절의 나노 인덴테이션 결과, 높은 탄성계수에 따른 회전력이 크게 측정되었기 때문인 것으로 추측된다.

3.2 나노 인덴테이션, 스크래치 결과

Fig. 7은 스크래치 시험 후의 단면 형상을 나타낸 것이다. 스크래치 후 탄성회복이 일어나며, 스크래치 틈 주위에서 파일-업이 일어난다.

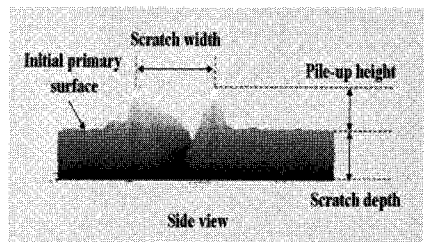
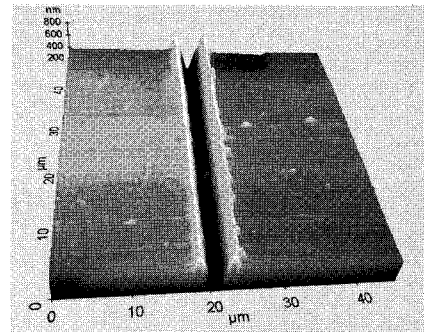
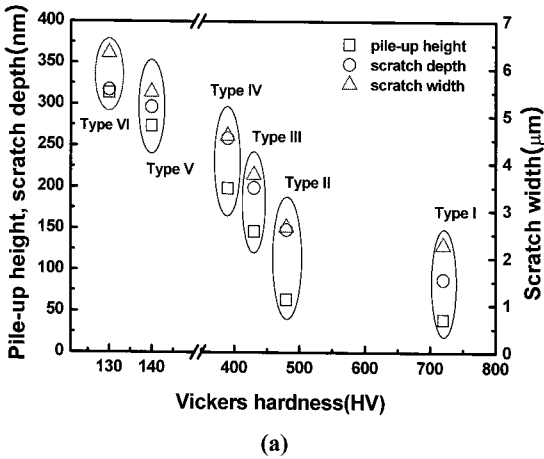
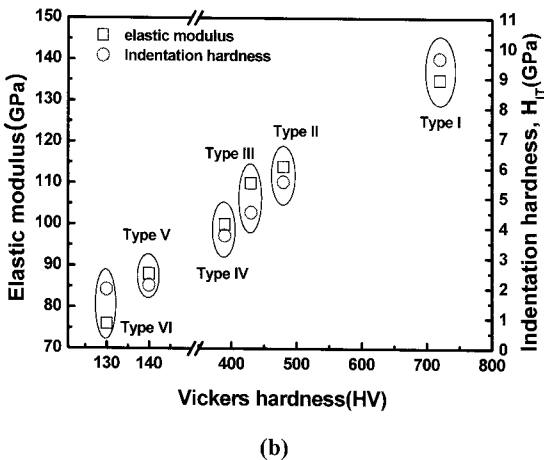


Fig. 7 Morphological characteristic: (a) morphology and (b) drawing a diagram



(a)

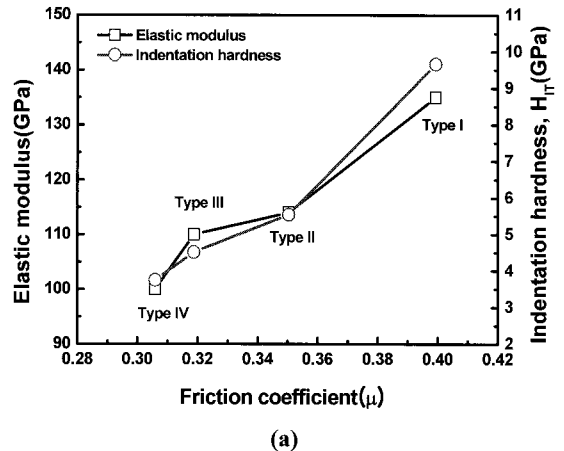


(b)

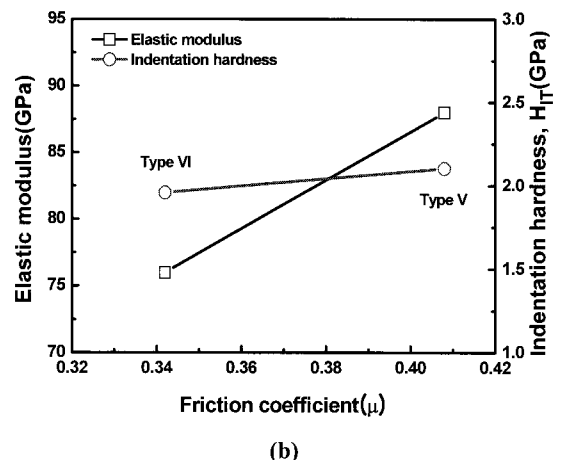
Fig. 8 Correlation between Vickers hardness and nano-scratch/indentation results: (a) nano-scratch and (b) nano-indentation

Fig. 8(a)는 비커스 경도와 나노 스크래치 결과와의 상관관계를 나타낸 것이다. 모든 코팅 층에서 경도의 증가에 따라 스크래치 폭과 스크래치 깊이 및 파일-업 높이가 감소함을 보였다. 가장 높은 경도를 나타낸 Type I 에서 가장 낮은 스크래치 결과를 나타내었으며, 연질 코팅인 Type V~VI 에서 경질 코팅에 비해 상대적으로 낮은 경도에 따른 높은 스크래치 폭과 파일-업 높이를 나타내었다. 또한, 연질 코팅의 경우 비슷한 경도를 나타내었지만, 스크래치 폭과 파일-업 높이가 Type V 에 비해 Type VI 이 약 13% 높게 측정되었다.

Fig. 8(b)는 비커스 경도와 나노 인덴테이션 결과와의 상관관계를 나타낸 것이다. 경질 코팅의 경우, 경도가 증가할수록 인덴테이션 강도 및 탄성계수



(a)



(b)

Fig. 9 Correlation between friction coefficient and nano-indentation results at disk surface roughness 1.2~1.5: (a) hard coating and (b) soft coating

는 증가함을 보였으며, 연질 코팅의 경우 비슷한 인덴테이션 강도를 나타내었지만 탄성계수가 Type VI 에 비해 Type V 가 약 13% 높게 측정되었다.

Fig. 9 는 디스크 표면 조도가 1.2~1.5 인 경우의 마찰계수와 나노 인덴테이션 결과와의 관계를 나타낸 것이다. 인덴테이션 결과값이 높을수록 마찰계수는 증가하는 경향을 보였다.

식 (1)에 의하면 일정 수직하중과 회전 반경에 대한 회전력이 높을수록 마찰계수는 높은 것을 알 수 있다. Fig. 9(a)의 경질 코팅의 경우, Type IV 에서 Type I 으로 갈수록 일정 수직하중과 회전 반경에 대한 회전력이 상대적으로 높게 나타난 것을 알 수 있다. 즉, 인덴테이션 결과 얻어진 탄성계수 및 인덴테이션 강도가 높을수록 회전력은 더 크게 나

타남을 예측할 수 있다.

Fig. 9(b)에 보인 연질 코팅의 경우, Type VI에 비해 Type V가 상대적으로 높은 마찰계수를 나타내었으며, 이는 인덴테이션 강도는 비슷하지만 Type V의 높은 탄성계수에 따른 회전력이 Type VI에 비해 상대적으로 높았기 때문인 것으로 예상된다. 즉, 연질 코팅의 경우 디스크와 핀의 마찰 접촉면 형태 및 탄성계수가 경도에 비해 마찰계수에 큰 영향을 미치는 것으로 추측된다.

4. 결론

본 연구에서는 디젤 엔진 피스톤 링의 코팅 층 종류에 따른 마찰 특성을 파악하였다. 그 결론을 요약하면 아래와 같다.

(1) 윤활 시험의 경우 모든 종류의 코팅 층에서 0.1 이하의 마찰계수를 나타내었으며, 코팅 층의 종류에 따른 뚜렷한 마찰특성을 보이지는 않았다.

(2) 표면조도가 거칠수록 높은 마찰계수를 나타내었으며, 이는 거친 표면이 접촉면에서의 돌출부가 되어 표면 박리가 더 촉진되면서 마찰계수가 증가한 것으로 해석된다. 표면조도의 변화에 따른 마찰계수의 증가량은 Type I~II에서 가장 높게 나타났다.

(3) 경질 코팅의 경우, 경도가 높을수록 스크래치 폭과 파일-업 높이가 감소하였으며, 인덴테이션 강도와 탄성계수는 증가하였다. 이는 일정 수직하중에 대한 회전력은 경도의 증가에 따른 탄성계수가 높을수록 크게 나타났기 때문이다.

(4) 연질 코팅의 경우, 마찰계수는 경도에 비해 디스크와 핀의 마찰 접촉면 형태 및 탄성계수의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업의 연구비 일부지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] P. Pawlus, 1997, Change of cylinder surface topography in the initial stage of engine life, *Wear*, Vol. 209, pp. 69~83.
- [2] Z. Ye, C. Zhang, Y. Wang, H. S. Cheng, S. Tung, Q. J. Wang, X. He, 2004, An experimental investigation of piston skirt scuffing: a piston scuffing apparatus, experiments, and scuffing mechanism analyses, *Wear*, Vol. 257, pp. 8~31.
- [3] J. H. Jang, J. H. Kim, C. H. Kim, Y. H. Moon, 2008, Effect of Coating Layer Hardness on the Wear Characteristics of Diesel Engine Cylinder Liner-Piston Ring, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 17, No. 5, pp. 343~349.
- [4] J. PRISO, M. Viljus, S. Letunovits, 2006, Friction and Dry Sliding Wear Behaviour of Cermets, *Wear*, Vol. 260, No. 7-8, pp. 815~824.
- [5] G. Bolelli, V. Cannillo, L. Lusvarghi, T. Manfredini, 2006, Wear Behaviour of Thermally Sprayed Ceramic Oxide Coatings, *Wear*, Vol. 261, No. 11-12, pp. 1298~1315.
- [6] L. Prchlik, S. Sampath, 2007, Effect of the microstructure of thermally sprayed coatings on friction and wear response under lubricated and dry sliding conditions, *Wear*, Vol. 262, pp. 11~23.
- [7] J. H. Horng, 1998, Studies of tribological behavior and separation between surfaces at initial boundary lubrication, *Wear*, Vol. 216, pp. 8~14.
- [8] S. S. Han, K. C. Park, 2008, Effect of surface roughness on frictional behavior of sheet steel for automotive, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 17, pp. 401~406.
- [9] W. Tang, X. Weng, L. Deng, K. Xu, J. Lu, 2007, Nano-scratch experiments of Au/NiCr multi-layered films for microwave integrated circuits, *Sur. Coat. Technol.*, Vol. 201, pp. 5664~5666.
- [10] 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, *Mater. Des.*, Vol. 29, pp. 2148~2153.
- [11] B. H. Lee, Y. T. Keum, 2001, Friction model of sheet metal forming considering lubricant and surface roughness, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 10, pp. 543~550.
- [12] M. H. Song, J. G. Lee, Y. S. Kim, 2000, Friction and wear behavior of ultra-thin TiN film during sliding wear against alumina and hardened steel, *Kor. J. Mater. Res.*, Vol. 10, pp. 62~68.