[논문] 한국소성가공학회지, 제 17 권 제 5 호, 2008
Transactions of Materials Processing, Vol.17, No.5, 2008

디젤엔진 실린더 라이너-피스톤 링의 코팅 층 강도에 따른 마모특성 연구

장정환[1] · 김정훈[2] · 김창희[2] · 문영훈[#]

Effect of Coating Layer Hardness on the Wear Characteristics of Diesel Engine Cylinder liner-Piston Ring

J. H. Jang, J. H. Kim, C. H. Kim, Y. H. Moon

(Received May 26, 2008)

Abstract

The wear between piston ring face and cylinder liner is an extremely unpredictable and hard-to-reproduce phenomenon that significantly decreases engine performance. This study will discuss characteristics of wear between hard and soft piston ring coatings with running surface of cylinder liner. Detailed tribological analysis by using Pin-on-Disk(POD) testing machine describes the lubricity mechanism between piston ring coatings and cylinder liner at different temperature with and without oil. The effect of surface roughness of the cylinder liner on the friction coefficient and wear amount of piston ring coatings will also be analyzed. To simulate scuffing mechanism between piston ring and cylinder liner, accelerated lab testing was performed. This study will provide the data from tribological testing of hard and soft piston ring coatings against cylinder liner. Furthermore, the microstructures and morphological features of the surface and the near-surface materials during wear will be investigated. From the scuffing test by using POD testing machine, scuffing mechanisms for the soft and hard coating will be analyzed and experimentally confirmed.

Key Words : Piston Ring, Cylinder Liner, Wear, Coating Layer, Pin-on-Disk(POD) Test, Scuffing

1. 서 론

일반적으로 상대운동을 하는 모든 물체에는 마찰이 존재하며, 이에 따른 마모(wear)는 필연적으로 발생한다. 마찰 부위에 형성되는 마모로 인해 윤활유 속에는 다량의 마모 입자들이 존재하게 됨으로써 마모를 가속시키는 요인으로도 작용하여 손상의 원인이 되기도 한다[1~2].

실린더 라이너와 접촉하는 피스톤 링의 접촉면은 엔진부 운전 특성에 따라 다양한 재질의 층이 적용되고 있으며, 크게 연질코팅(soft coating)과 경질코팅(hard coating) 두 가지로 구분 가능하다.

연질코팅의 경우 대체로 얇고 부드러운 재질이 사용되며, 엔진가동 초기에 발생하기 쉬운 스커핑(scuffing)을 예방하고 라이너와의 접촉 안정성을 조기에 이루려는 목적이 있다. 또한 경질코팅은 연질코팅보다 높은 경도를 가지며, 마모 저항성 증가로 피스톤 링의 수명을 연장시키는 목적으로 사용된다. 매우 복잡한 마모 현상의 하나인 스커핑은 기계, 물리, 화학, 열 등의 상호작용에 의해 일어난다. 이러한 스커핑 메커니즘을 이해하기 위해서는 스커핑 방지를 위해 사용된 코팅 재료의 이해와 실제 가동 조건에 따른 특성들을 파악해야만 한다[3].

1. 부산대학교 정밀기계공학과/ 정밀정형 및 금형가공 연구소
2. 두산엔진(주) 기술연구소
교신저자: 부산대학교, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

본 연구에서는 경질코팅과 연질코팅의 두 분류로 나뉘어 코팅된 피스톤 링의 마모 특성에 관한 연구를 하기 위해서, 먼저 실제 엔진 가동 조건과 유사한 조건에서 실험을 통해 온도별(25, 100, 170, 230℃) 마모 특성과 표면 조도에 대한 마모 특성을 분석하고자 하였으며, 실린더 라이너의 표면조도를 3가지의 경우(Ra 0.2~0.5, 0.7~1.0, 1.2~1.5 μm)로 분류하여 실험을 진행하였다. 또한 스커핑 실험을 통한 마모 진행과정을 고찰하고자 하였으며, 이를 통해 마찰계수와 스커핑 진행과정과의 상관관계를 분석하였다.

2. 시험대상재

본 연구를 위한 소재는 선박용 디젤엔진 실린더 라이너와 피스톤 링을 사용하였으며, 실린더 라이너를 기준으로 코팅 층의 경도가 높은 경질코팅과 반대의 경우인 연질코팅의 마모 특성을 파악하고자 하였다. 실제 선박용 디젤 엔진 실린더 라이너와 피스톤 링의 마모 거동에 대한 분석을 위하여, 실린더 라이너를 디스크로, 피스톤 링을 회전운동을 하는 핀으로 하여 Pin-on-Disk 시험을 실시하였다.

Fig. 1(a)에 나타낸 연질코팅(Soft coating)의 코팅층은 Cu-Al 합금으로 이루어져 있으며, 코팅 층의 두께는 0.25~0.35mm, 경도는 100~160HV의 범위에서 평균 143.7HV을 나타내었다. Fig. 1(b)에 나타낸 경질코팅(Hard coating)의 경우 코팅 층은 Cr-Ceramic 합금으로 ECD(electro-chemical deposition) 방법에 의해 코팅되었으며, 코팅 층의 두께는 0.3~0.4mm, 경도는 700~740HV의 범위에서 평균 719.6HV을 나타내었다. Fig. 1(c)에 나타낸 실린더 라이너의 경우 주철재로 이루어져 있으며, 검은 부분이 흑연 박편(graphite flakes)을 나타내며, 290~300HV의 경도를 나타내었다.

3. 실험 내용

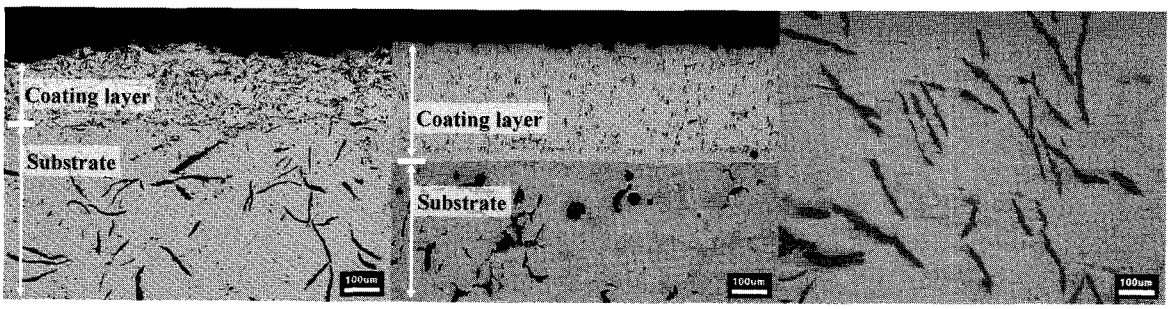
3.1 Pin-on-Disk test

실린더 라이너/피스톤 링 대상 부품재에 대해 POD 시험을 실시하여 코팅층의 순수 내마모성을 평가하였다. 실린더 라이너를 디스크로, 피스톤 링을 핀으로 가공하여 핀의 무게 변화에 따른 마모된 정도와 마찰계수를 관찰하였다.

실험 장비는 PLINT사의 TE-92 마모 시험기를 이용하였으며, Fig. 2에 그 개략도를 나타내었고, Fig. 3에 디스크와 핀의 치수를 나타내었다. 기계장치 상부에 모터가 위치해 있으며, 이에 의해 회전 속도를 제어하게 된다. 또한 하중장치(load cell)는 수직 축에 수평방향으로 위치해 있으며, 공기압에 의해 정밀하게 제어할 수 있다. 마모량 측정은 실험 전과 후의 핀의 무게를 전자 저울(측정능력: 0.1mg)을 이용하였다.

실험 조건은 실제 선박용 디젤 엔진 가동 조건을 기준으로[4](회전 속도; 1500rpm(2.75m/sec), 하중; 100N(50bar))으로 4가지 온도(25, 100, 170, 230℃)에 대해서 60분간 실험을 진행한 후 마모 특성을 분석하였다. 마모시험용 디스크는 표면 조도를 0.2~0.5μm 범위에서 가공하였으며, 핀은 코팅층의 특성 분석을 위해서 초기 표면조도를 유지한 채(경질코팅의 경우 0.28~0.35μm, 연질코팅의 경우 7.5~8μm) 시험하였다.

또한 디스크의 표면 조도에 따른 코팅 층의 영향을 분석하였다. 회전속도 500rpm(0.916m/sec), 수



(a) Soft coating (b) Hard coating (c) Cylinder liner

Fig.1 Microstructure of piston ring-cylinder liner

직하중을 50N으로 실험을 진행하였으며, 디스크는 표면 연마에 의해 총 3종류 범위의 초기 표면조도(Ra 0.2~0.5, 0.7~1.0, 1.2~1.5μm)를 가하여 표면조도에 대한 영향을 분석하였으며, 핀은 온도 실험과 동일하게 초기 표면조도를 유지한 채 가공하였다.

피스톤 링과 실린더 라이너 사이의 윤활특성을 파악하기 위해서 Fig. 4에서와 같이 챔버에 디스크와 핀이 충분히 잠길 정도의 윤활제를 첨가한 후, POD 시험을 실시하였다. 윤활시험에서는 마모를 촉진시키기 위해 가혹한 조건인 회전 속도 1500rpm (2.748m/sec), 수직하중 400N으로 30분 동안 실험을 수행하였다.

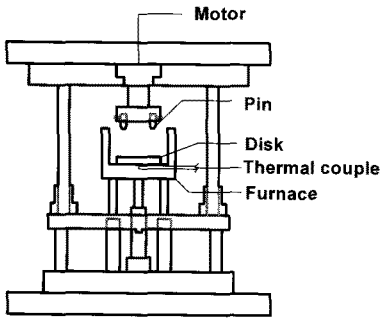


Fig. 2 Schematic drawing of Pin-on-Disk test

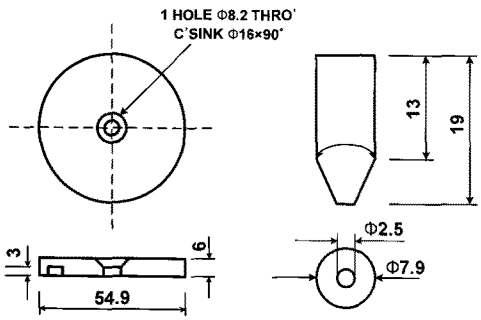


Fig. 3 Dimensions of disk and pin

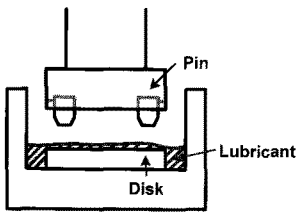


Fig. 4 Schematic drawing of lubricant test

3.2 스커핑 시험(Scuffing test)

실린더 라이너/피스톤 링 사이의 스커핑 현상을 연구하기 위해 4가지의 온도(25, 100, 170, 230℃)에 대한 무윤활 POD 시험 장치를 통하여 시간에 대한 표면 스커핑 거동을 분석하였다. 일정시간 간격(1min)으로 총 20분 동안 마찰표면을 50배율로 현미경 관찰하여 표면 흠(surface scar) 발생 정도로 스커핑 저항성을 평가하였다. 표면 흠 발생을 엄밀하게 분석하기 위해 회전속도를 1000rpm, 실험하중을 20N으로 낮추어서 스커핑 현상을 관찰하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 코팅 층 순수 마모 특성

마모율은 마모체적과 미끄럼거리를 이용하여 계산하였으며, 핀의 마모율을 기준으로 제시하였으며, 온도별로 측정된 핀의 마모율을 Fig. 5에 나타내었다.

온도에 대한 실험 결과, 100℃에서 25℃에 비해 마모율이 크게 증가하는 경향을 나타내었으나, 그 이상에서는 마모율이 점점 줄어드는 경향을 보였다. 고온에서는 표면의 뚜렷한 강도 저하가 나타나 25℃에 비해 고온에서의 무른 표면에 대한 마모율이 높게 나타났다[5~6].

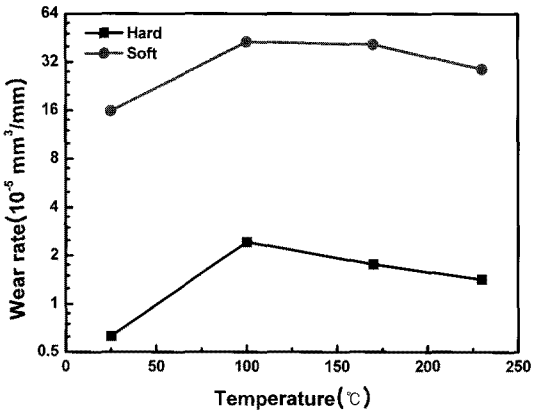


Fig. 5 Wear rates of pin at various temperatures

미끄럼 거리에 대한 마찰계수의 변화추이를 경질코팅재의 예를 들어 Fig. 6에 나타내었다. 초기 실험이 진행될 때 불안정한 구간이 보이며, 그 이후 안정된 상태의 마찰계수를 관찰할 수 있다. 여

기서 안정된 구간의 마찰계수를 평균 마찰계수로 나타내었으며[4, 7], 마찰계수는 식(1)과 같이 정의된다.

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

여기서 T는 회전력(torque), r은 디스크의 회전반경을 나타내며, F_N은 하중을 의미한다 [8].

온도에 따른 평균 마찰계수를 나타낸 Fig. 7을 보면, 25℃에 비해 고온에서의 마찰계수가 높게 측정되었고, 100℃에서 마찰계수가 가장 높게 나타났다. 이는 온도가 상승할수록 표면 산화에 의한 산화피막의 윤활작용으로 마찰계수가 낮아지는 경향을 보인 것으로 판단된다.

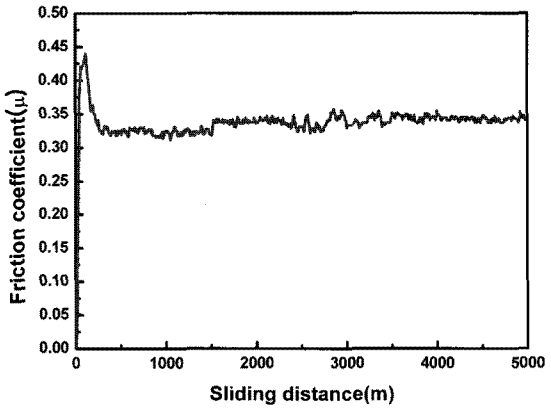


Fig. 6 Representative runs showing the variation of friction coefficient of hard coating at 25℃

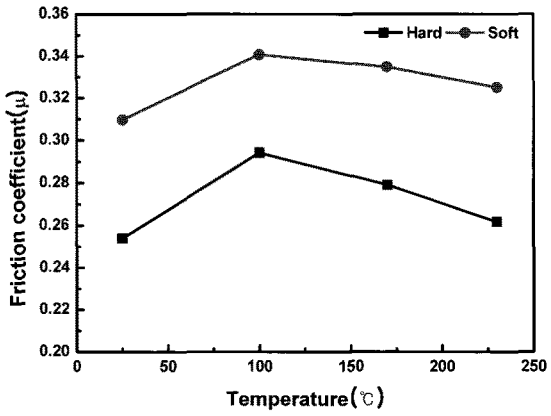


Fig. 7 Friction coefficients at various temperatures

Fig. 8은 온도에 따른 디스크의 표면을 나타낸 것이다. Fig. 8(a)의 25℃에서는 어두운 회색, Fig. 8(b)의 100℃에서는 연갈색, Fig. 8(c)의 170℃에서 붉은 갈색, Fig. 8(d)의 230℃에서 보라색을 띄었다. 이는 온도별로 고온 표면 산화가 진행됨을 의미하며, 이러한 표면 산화에 의한 산화피막이 마찰계수에 영향을 미치게 된다. 이 피막이 핀과 디스크 사이에서 보호 층(protective layers) 작용을 하여 230℃에서 100℃에 비해 더 낮은 마모율과 마찰계수를 나타내었다[4, 6-7, 9]. Fig. 9는 100℃, 230℃에서의 마모된 표면을 나타낸 것이다. Fig. 9의 (a)와 (c)는 100℃에서의 디스크 표면을 나타낸 것으로써 표면의 일부분에서 다소 거친 마모 흔적이 관찰되었으나, Fig. 9의 (b)와 (d)는 230℃에서의 디스크 표면을 보면100℃에 비해 매끄러운 표면이 넓은 범위에 걸쳐 나타났다. 이러한 산화피막으로 인한 매끄러운 표면이 핀과 디스크의 마찰을 줄이는 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

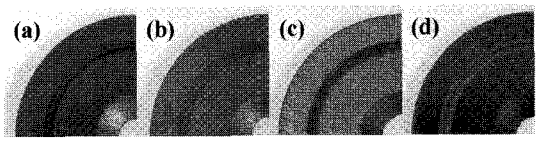
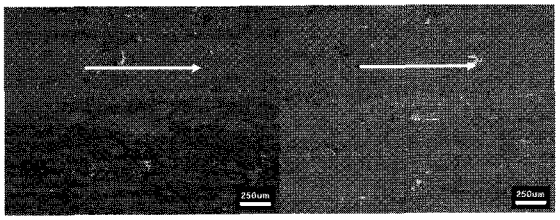
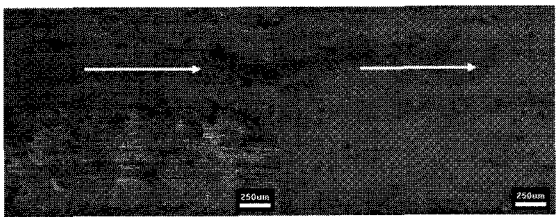


Fig. 8 Disk surface color at various temperatures and worn surface. (a) 25℃-dark gray (b) 100℃-light brown (c) 170℃-reddish brown (d) 230℃-purple



(a) Soft coating, 100℃ (b) Soft coating, 230℃



(c) Hard coating, 100℃ (d) Hard coating, 230℃

Fig. 9 Worn disk surface;(the arrow indicates the apparent sliding direction and the oxidation film forming by surface oxidation during sliding)

온도에 대한 마모 실험의 경우, 마찰계수가 낮은 25℃에서 마모율도 가장 낮게 나타났으며, 100℃에서 가장 높은 마찰계수와 마모율을 보이며, Fig. 9에 보인 바와 같이 고온일수록 표면 산화에 의한 산화피막이 넓게 형성되어 디스크와 핀 사이에서 원활한 윤활 작용을 하여 100℃에 비해 낮은 마찰계수와 마모율을 나타내었다.

표면조도에 따른 마모율을 Fig. 10에 나타내었다. 연질코팅의 경우 표면조도의 변화에 따라 마모율의 변화가 큰 반면, 경질코팅은 변화가 미미하였으며, 경질코팅에 비해 연질코팅의 마모율이 크게 나타났다. 또한 윤활의 경우 무윤활 시험과 같은 조건에서는 마모가 거의 진행되지 않았다. 이에 윤활조건에서의 마모율을 비교하기 위해서 가혹한 조건인 하중 400N, 회전 속도 1500rpm으로 실험한 결과를 나타낸 것이다.

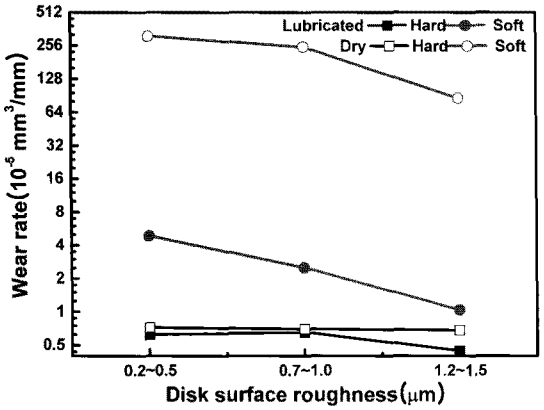


Fig.10 Wear rates at various disk surface roughnesses

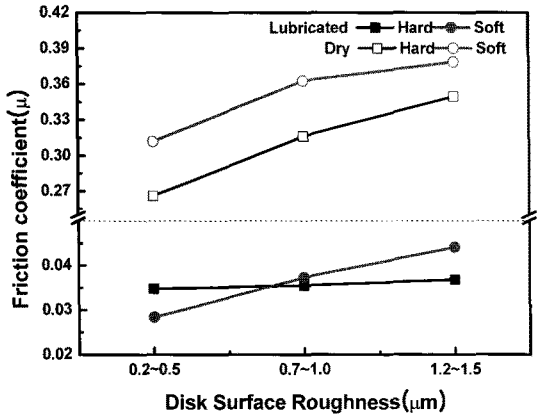
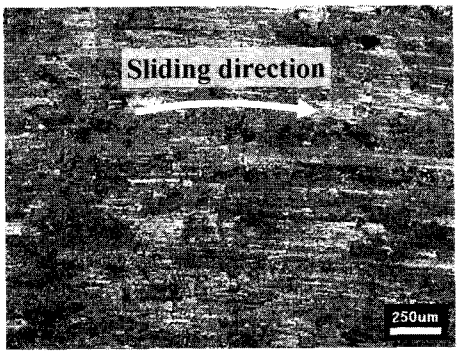


Fig.11 Friction coefficients at various surface roughnesses

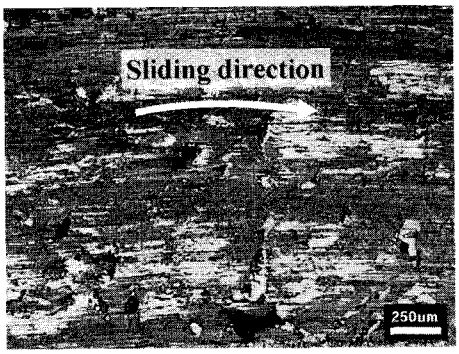
이러한 마모 특성은 Fig. 11에 보인 마찰계수 측정결과로 설명 가능하다. Fig. 11에 보인 디스크 표면 조도에 대한 마찰계수에서, 무윤활의 경우 디스크의 표면조도가 거칠어질수록 마찰계수가 증가하는 경향을 뚜렷이 보였다. 이 같은 편차는 경계 윤활조건에서 표면조도가 낮은 경우 마찰을 줄이는 효과로 나타나기 때문이다[5, 9-11]. 윤활의 경우 디스크와 핀 경계면에서의 윤활작용에 의해 마찰계수가 무윤활에 비해 낮게 측정되었으며(경질코팅의 경우 0.266→0.035), 표면조도의 변화에 따른 마찰계수의 변화는 무윤활에 비해 크지 않음을 알 수 있다.

4.2 스커핑 거동

연질코팅과 경질코팅의 온도별 마모 결과를 바탕으로 스커핑 거동을 분석하였다.

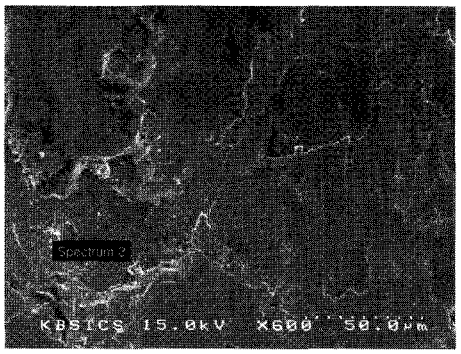


(a) Disk surface against soft coating

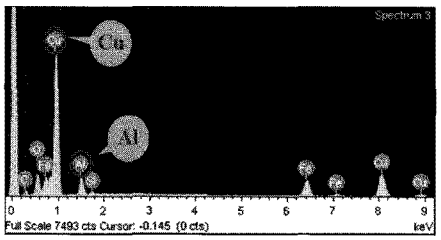


(b) Disk surface against hard coating

Fig.12 Optical micrograph of real cylinder liner that has scuffed



(a) Disk surface topography using a SEM



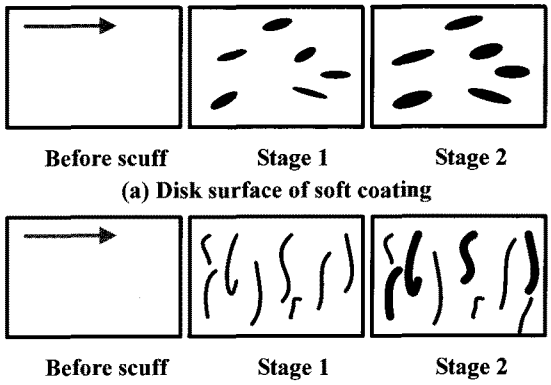
(b) Chemical composition of spectrum 3 shown in (a) using a EDX analyzer

Fig.13 Disk surface topography and chemical composition against soft coating

Fig. 12은 스커핑 실험 후의 표면 사진을 나타낸 것이다. Fig. 12(a)에 보인 연질코팅의 경우, 초기 회전 시 경도가 낮은 핀의 코팅층이 디스크 표면에 응착되는 현상이 관찰되었다. Fig. 13(a)는 스커핑 시험 초기의 마모된 디스크 표면 사진을 나타낸 것이며, Fig. 13(b)의 EDX 측정결과를 나타내었다. 측정 결과에 의하면, 핀의 코팅층의 성분인 구리(Cu)와 알루미늄(Al)이 다량 검출되어 디스크 표면에 코팅층이 응착되었음을 알 수 있다. 시간이 지남에 따라 표면에 흠이 산포해서 발생되고, 회전방향으로의 표면 흠이 배열되고 있다.

Fig. 12(b)에 보인 경질코팅의 경우, 회전 방향의 수직으로 표면 흠이 산포해서 발생됨을 알 수 있다. 연질코팅의 경우 코팅부의 낮은 전단강도로 인해 라이너 회전방향으로 표면에 흠이 발생하는 반면, 경질코팅의 경우에는 상대적으로 강한 코팅부가 라이너의 회전방향에 수직한 방향으로 높은 전단강도를 부여하여 수직방향 흠이 주로 발생하였다.

코팅층 강도에 따른 스커핑 흠의 발생 도식도를 Fig. 14에 나타내었다.



(a) Disk surface of soft coating

(b) Disk surface of hard coating

Fig.14 Scuffing diagrams for coating layer hardness (the arrow indicates the sliding direction)

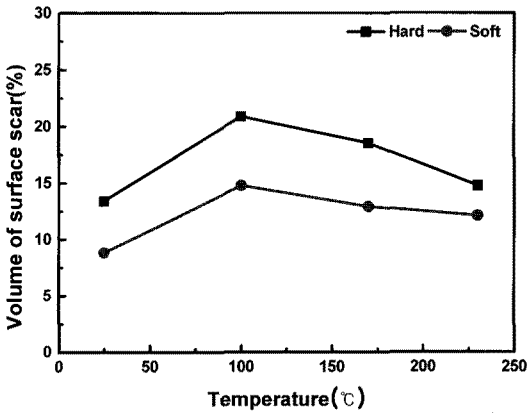


Fig.15 Volume of surface scar at various temperatures

Fig. 15는 20분 동안 스커핑 실험을 진행한 후, 마모 된 표면에서의 표면 흠의 비율을 나타낸 것으로서 고온에서 표면 흠이 크게 증가하였다. 또한 100℃에서 가장 많은 표면 흠이 발생하였으며, 100℃ 이상에서는 그 비율이 감소하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 8에 보인 바와 같이 고온일수록 표면 산화에 의한 산화피막의 윤활 작용에 기인한 것으로 판단된다. 코팅층 강도에 따른 표면 흠은 경질코팅 핀과 접촉한 디스크가 연질코팅의 경우에 비해 높게 발생되었으며, 이는 경질코팅의 경우 상대적으로 강도가 낮은 디스크에서 스커핑이 빠르게 진행되었음을 의미한다[11].

온도에 대한 스커핑 실험 결과, 25℃에서 가장 낮은 마모율과 마찰계수 그리고 표면 흠 발생 비율을 나타내었다. 고온에서 25℃에 비해 높게 나타났으며, 100℃에서 표면 흠이 많이 발생하였다(Fig. 5, 7, 14).

5. 결 론

본 연구에서는 디젤 엔진 피스톤 링의 코팅 층 강도에 따른 마모 특성을 파악하고자 하였다. 경질코팅과 연질코팅의 두 종류에 대해 POD 실험을 통한 온도별, 표면조도 별 마모율과 마찰계수의 특성을 파악하였으며, 스커핑 실험을 통한 스커핑 메커니즘을 제시하였다. 그 결론을 요약하면 아래와 같다.

(1) 온도 실험 결과, 마찰계수가 높을수록 마모율은 크게 나타났으며, 100℃에서 마찰계수와 마모율이 가장 크게 나타내었으며, 그 이상의 온도에서는 표면 산화에 의한 산화피막의 윤활작용에 의해 마찰계수와 마모율이 점점 줄어드는 경향을 보였다.

(2) 연질코팅은 표면조도의 영향으로 인해 표면조도가 거칠어질수록 마모율은 낮게 나타났으며, 경질코팅은 표면조도의 영향이 미미하였다.

(3) 경질코팅은 회전 방향과 수직 방향으로 흠이 주로 발생하고, 연질코팅은 표면 흠이 산포해서 발생하고, 이 흠들이 회전방향으로 배열되는 형태를 띠었고, 코팅층의 응착이 관찰되었다.

(4) 온도에 대한 스커핑 실험 결과, 경질코팅 된 핀과 접촉한 디스크에서 표면 흠의 발생이 높게 나타났으며, 100℃에서 많은 표면 흠이 발생하였으며, 보다 높은 온도에서는 표면 흠의 발생 정도가 감소하는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업의 연구비 일부지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] H. Hong, S. M. Chun, 1994, Journal of the KSTLE, Vol. 10, No. 2, pp. 5~19.

[2] 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 262, pp. 11~23.

[3] 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.

[4] M. F. Jensen, J. Bøttiger, H. H. Reitz, M. E. Benzon, 2002, Simulation of wear characteristics of engine cylinders, Wear, Vol. 253, pp. 1044~1056.

[5] H. So, 1996, Characteristics of wear results tested by pin-on-disc at moderate to high speeds, Tribology International, Vol. 29, No. 5, pp. 415~423.

[6] J. Jiang, F. H. Stott, M. M. Stack, 1998, The role of triboparticulates in dry sliding wear, Tribology International, Vol. 31, No.5, pp. 245~256.

[7] O. Barrau, C. Boher, R. Gras, F. Rezai-Aria, 2007, Wear mechanisms and wear rate in a high temperature dry friction of AISI H11 tool steel: Influence of debris circulation, Wear, Vol. 263, pp. 160~168.

[8] J. K. Kim, P. K. Rohatgi, J. O. Choi, C.O. Choi, 2005, Wear properties and effect of molds on microstructure of graphite reinforced copper alloy composites made by centrifugal casting, Metals and Materials International, Vol. 11, No.4, pp. 333~340.

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

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

[11] J. Galligan, A. A. Torrance, G. Liraut, 1999, A scuffing test for piston ring/bore combinations Part I. Stearic acid lubrication, Wear, Vol. 236, pp. 199~ 209.