

## 피스톤 런닝부의 소재에 따른 마모특성 연구

장정환<sup>1</sup>· 이해경<sup>1</sup>· 주병돈<sup>1</sup>· 이재호<sup>1</sup>· 문영훈<sup>1#</sup>

### A Study on Wear Characteristics of Piston Running Part

J. H. Jang, H. K. Yi, B. D. Joo, J. H. Lee and Y. H. Moon

#### Abstract

Abrasive wear between piston ring face and cylinder liner is an extremely unpredictable and hard-to-reproduce phenomenon that significantly decreases engine performance. Wear by abrasion are forms of wear caused by contact between a particle and solid material. Abrasive wear is the loss of material by the passage of hard particles over a surface. From the pin-on-disk test, particle dent test and scuffing test, abrasive wear characteristics of diesel engine cylinder liner-piston ring have been investigated. Pin-on-disk test results indicate that abrasive wear resistance is not simply related to the hardness of materials, but is influenced also by the microstructure, temperature, lubricity and micro-fracture properties. In particle dent test, dent resistance stress decreases with increasing temperature. From the scuffing test by using pin-on-disk tester, scuffing mechanisms for the soft coating and hard coating were proposed and experimentally confirmed.

**Key Words** : Piston ring, Cylinder liner, Wear characteristics, Pin-on-Disk

#### 1. 서론

일반적으로 상대운동을 하는 모든 물체에는 마찰이 존재하며 각 경우에 상응하는 적절한 윤활을 하고 있지만 마모(Wear)는 필연적으로 발생한다. 마찰 부위에 형성되는 마모로 인해 윤활유 속에는 다량의 마모 입자들이 존재하게 됨으로써 마모를 가속시키는 요인으로 작용하여 손상의 원인이 되기도 한다. [1]

고하중의 기계들은 다양한 구동 부분들의 접촉에 의한 여러 가지 형태의 손상에 사용주기가 노출되어 있다. 높은 내구성을 이루고, 주요 비용을 줄이기 위해서는, 마멸 형태의 안정성과 변형성에 대한 높은 저항성을 요구한다. 표면 코팅은 좋은 미끄러짐과 다른 마멸 방식들에서 수명 연장을 가능하게 하는 마멸 특성을 가지며, 또한 구성 성분의 제조 단가를 줄이고, 성능을 향상시킨다. [2]

피스톤 링에 요구되는 중요한 기능으로는 실린

더 라이너와의 성공적인 초기 길들이기 및 Life Time 증가를 위한 운전중의 내마모성 증가를 들 수 있으며, 이에 대한 대책으로 실린더 라이너와 Sliding되는 피스톤 링의 Running면에 Base Metal과는 다른 다양한 재질의 Layer가 적용되고 있으며, 연질 코팅(Soft coating)과 경질 코팅(Hard coating) 두 가지로 구분된다. 연질 코팅의 경우 대체로 얇고 Soft한 재질이 사용되며, Running-in시 발생하기 쉬운 Scuffing을 예방하고 Running-in 시간을 단축하는 목적이 있다. 경질 코팅은 연질 코팅보다 두껍고 높은 경도를 나타내며, 마모 저항성 증가로 피스톤 링의 수명을 연장시키는 목적으로 사용된다.

본 연구에서는 피스톤 런닝부 재료 및 마모 특성을 규명하기 위해서 나노 인덴테이션, 나노 스케치 결과와 경도와와의 상관성을 파악하였고, 윤활, 무 윤활 상태에서의 연삭 마멸 시험을 통해 코팅 층의 마모 특성을 규명하였다.

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

## 2. 시험 대상재

본 연구에 사용된 피스톤 링 모재부의 종류는 4가지 이며, 경질 코팅(Hard coating), 연질 코팅(Soft coating)의 두 종류의 코팅 층의 특성을 파악하기 위하여 연삭 마멸 시험, 혼입물 압흔 시험, 스커핑 시험을 통해 디젤엔진 실린더와 피스톤 간의 연삭 마멸 거동을 분석하였다. 각 소재의 종류와 경도를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Rockwell hardness (B-scale)

Type	Cylinder liner	Piston ring
Hard coating	93.6	HAC : 114.3
		HAS : 101.8
		HBC : 96.5
		HBS : 95.2
Soft coating	96.8	SAC : 79.9
		SAS : 100.5
		SBC : 84.4
		SBS : 93

HAC(Hard A-coating)의 코팅 재료는 크롬과 알루미늄 산화물이며, ECD(electrochemical deposition) 방법에 의해 코팅되었으며, 코팅층의 두께는  $0.35 \pm 0.05\text{mm}$  이다.

HBC(Hard B-coating)의 코팅층은 실링층(sealing layer)과 내-스커핑층(anti scuffing layer)의 두 층으로 되어있으며, 실링층은 니켈-흑연, 내-스커핑층은 몰리브덴 합금(molybdenum alloy)으로 구성되어 있으며, 플라즈마 용사법(plasma spraying)으로 코팅되었다. 코팅층 두께는 각각  $0.05\sim 0.1\text{mm}$  이다.

SAC(Soft A-coating)의 코팅층은 Cu-Al 합금으로 부분적으로 금속 산화물의 형태로 이루어져 있다. 코팅층의 두께는  $0.25\sim 0.35\text{mm}$ 이다. SBC(Soft B-coating) 코팅층 또한 Cu-Al 합금으로 이루어져 있다. 코팅층의 두께는  $0.25\sim 0.35\text{mm}$ 이다.

## 3. 실험 내용

### 3.1 혼입물 압흔 시험(Particle dent test)

대상 부품재로 만들어진 압반(indentation plate)을 이용하여 MTS사의 압축 시험기를 이용하여 혼입물을 넣고 압축 시험을 실시하였다. 실린더 라이너와 피스톤 링 사이에 경도가 가장 큰 HAC 재질로 별도 가공한 핀을 넣고 해당 온도( $25\sim 500^\circ\text{C}$ )까지 가열한 다음 압축 하중을 가하여 압입 흠이

영구적으로 잔존하는 시점의 하중을 측정하여 압입 흠(dent) 저항성을 관찰하였다. Fig. 1에 실험 과정에 대한 도식도를 나타내었다.

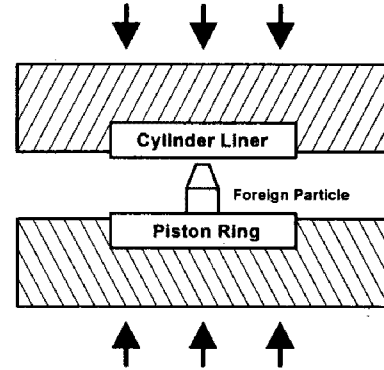


Fig. 1 Particle dent test

### 3.2 연삭 마멸 시험(Abrasive wear test)

실린더 라이너/피스톤 링 연구 대상 부품재에 대해 POD(Pin-on-Disk) 시험을 실시하여 코팅재의 순수 내마모성을 평가하였다. Table 2에 실험 조건을 나타내었으며, 실제 선박용 디젤 엔진 가동 조건과 유사하게 실험을 진행하였으며, 4시간 후 무게 변화를 측정하였다. 실험 장비는 PLINT 사의 TE-92 마모 시험기를 이용하였으며, 실린더 라이너를 디스크로, 피스톤 링을 핀으로 하여 실험을 실시하였다.

Table 2 Experimental conditions of Pin-on-Disk test

Conditions	Value
Temperature	25, 100, 170, 230 $^\circ\text{C}$
Sliding speed	2.75m/sec (1500rpm)
Test time	4 hours
Counter part diameter	17.5mm
Load	100N (50bar)

### 3.3 스커핑 시험(Scuffing test)

실린더 라이너/피스톤 링 사이의 스커핑 현상을 연구하기 위해 온도, 표면조건 별 POD 시험을 통하여 시간에 대한 스커핑 거동을 분석하였다. 일정시간 간격으로 마찰표면을 50 배율로 현미경 관찰하여 균열 발생 정도로 스커핑 저항성을 평가하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 혼입물 압흔 시험

Fig. 2에 각 온도별로 표면 흠이 영구적으로 잔존하는 시점의 응력 값을 그래프로 나타내었다.

상온에서는 50MPa 이상의 흠 발생 응력(dent stress)을 나타내었으며, 100℃의 경우 상온에 비해서 급격히 흠 발생 응력이 떨어짐을 확인할 수 있으며, 온도가 올라갈수록 흠 발생 응력이 낮아지는 폭이 좁아지는 경향을 나타내었다. 상온에서 HAS가 가장 높은 흠 발생 응력을 보였으며, 온도가 상승할수록 흠 발생 응력은 급격히 떨어짐을 보였으며, SBS가 가장 낮은 흠 발생 응력을 보였다. 혼입물 압흔 시험 결과는 경도의 추이와 유사한 것으로 판단되며, 표면 흠 저항성의 개선을 위해서는 표면 경도가 높을수록 유리함을 의미한다.

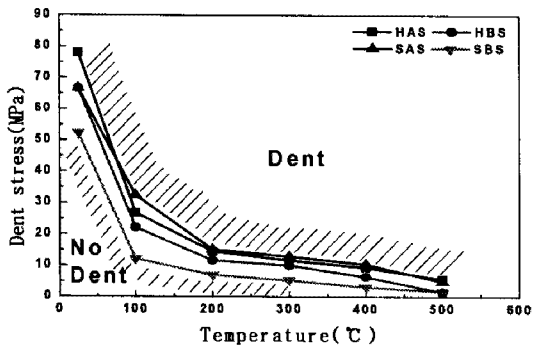
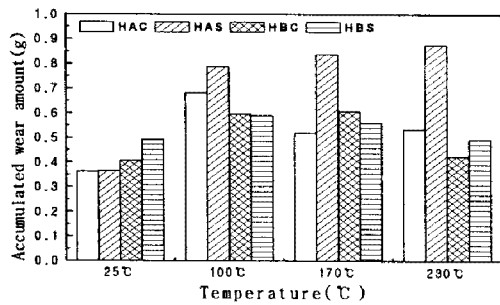


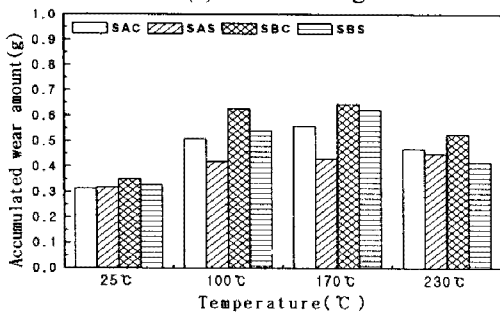
Fig. 2 Dent stresses at various temperatures

#### 4.2 연삭 마멸 시험

Fig. 3은 4시간 동안 POD 실험 후 측정된 마모량을 온도에 대해서 나타낸 것이다.



(a) Hard coating



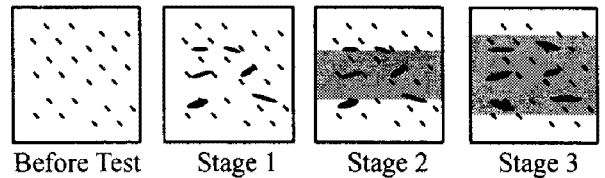
(b) Soft coating

Fig. 3 Wear amount at various temperatures

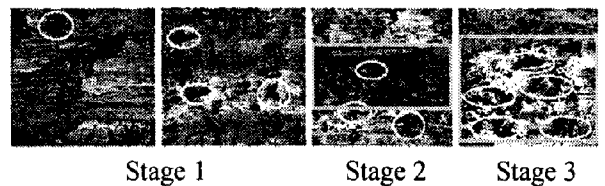
Fig. 3 (a)에 보인 바와 같이, 경질 코팅의 경우 코팅부의 경도가 모재에 비해 상당히 높은 HAC의 경우 코팅부의 마모량이 전체 시험온도구간에서 낮은 반면, 경도가 비슷한 HBC의 경우에는 마모량이 온도별로 큰 차이를 보이지는 않았다. 온도가 올라갈수록 상온에 비해 마모량이 증가하는 경향을 보였으나 고온에서는 뚜렷한 경향을 보이지는 않았다. 연질 코팅에서도 상온에 비해 고온에서 높은 마모량을 나타내었으며, 코팅부의 마모량이 모재에 비해 높게 나타났다.[3~4]

#### 4.3 스커핑 시험

Fig. 4 (a)는 연질 코팅 재료의 시간에 대한 대표적인 표면 스커핑 거동을 도식적으로 나타낸 것이다. 원재료에 시험이 진행됨에 따라 표면에 미세 균열이 발생하여(Stage 1) 균열부끼리의 연결에 의해 균열이 성장해 나가며(Stage 2), 진행 방향을

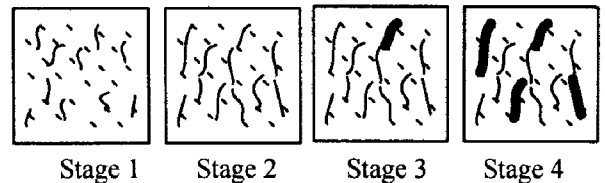


(a) Scuffing diagram of Soft coating

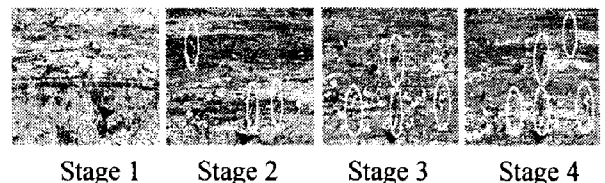


(b) Surface photograph of Soft coating

Fig. 4 Schematic scuffing mechanism of soft coated surface



(a) Scuffing diagram of Hard coating



(b) Surface photograph of Hard coating

Fig. 5 Schematic scuffing mechanism of hard coated surface

따라 균열 밴드가 형성되기 시작하여, 점점 더 커지는 현상이 나타난다(Stage 3). Fig. 4 (b)는 실제 표면 거동을 나타낸 것이다.

Fig. 5 (a)는 경질 코팅 재료의 시간에 대한 대표적인 표면 스키핑 거동을 도식적으로 나타낸 것이다. 마찰 진행 방향의 직각 방향으로의 세로 균열이 발생(Stage 1) 및 성장 단계를 거쳐 연결이 일어나며(Stage 2), 균열 부위에서의 균열 박편의 박리가 시작되고(Stage 3), 진행 시간이 길어짐에 따라 박리 영역이 급속히 확대되는 과정(Stage 4)을 나타낸다. Fig. 5 (b)는 실제 표면 거동을 나타낸 것이다.

스키핑 해석을 위해 실시한 실험에서 모든 시편에서 시험개시 후 짧은 시간 경과 후에 미세균열이 발생하였기에 균열 발생 시점으로 스키핑 저항성을 분석하기에는 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 스키핑 저항성의 비교를 위해 시험도중 표면의 스키핑 상태를 관찰하여 전체 표면의 20%에 해당하는 영역에 균열과 균열밴드가 생긴 시점의 시간을 측정하여 스키핑 저항성을 평가하였다.

Fig. 6 (a)에 보인 연질 코팅의 경우 상온에서 스키핑 저항성이 가장 높게 나타났다. 고온에서는 스키핑 저항성이 상대적으로 줄어드는 경향을 보였으며 온도에 따라서는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. Fig. 6 (b)의 경질 코팅의 경우도 연질 코팅과 비슷한 경향을 나타내었으며, 연질 코팅에 비해 조금 더 빠른 시점에서 스키핑이 발생하여 스키핑 저항성이 낮게 평가되었다.

#### 4. 결론

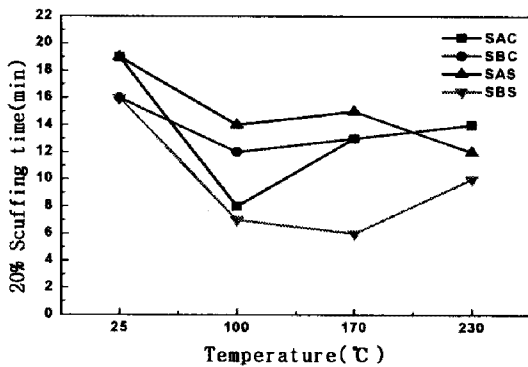
(1) 경질 코팅이 연질 코팅의 피스톤 링에 비해 다소 높은 흠 발생 능력을 보였으며, 고온으로 갈수록 흠 발생 능력이 감소하여 경도와 높은 상관성을 보였다.

(2) 경질코팅의 경우 코팅부가 모재에 비해 마모량이 적었으며 온도가 올라갈수록 상온에 비해 마모량이 증가하는 경향을 보였으나 고온에서는 뚜렷한 경향을 보이지는 않았다. 연질 코팅에서도 온도에 대해 유사한 경향을 보였으며, 코팅부의 마모량이 모재에 비해 높게 나타났다.

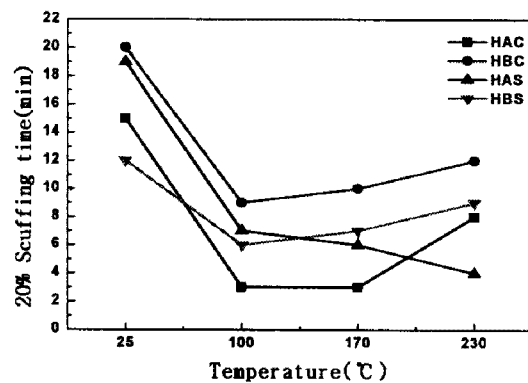
(3) 연질 코팅의 경우 진행 방향으로 미세 균열 발생과 함께 균열부 박리가 일어나는 반면 경질 코팅의 경우 진행 방향과 수직 방향으로 미세 균열이 발생하고 이러한 미세 균열의 연결을 통해 균열부 박리가 일어난다.

#### 참고 문헌

- [1] 홍 혼, 전상명, 1994, 엔진 마모 및 손상의 원인과 처방, *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] 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
- [4] G. Bolelli, V. Cannillo, L. Lusvardi, T. Manfredini, 2006, Wear behaviour of thermally sprayed ceramic oxide coatings, *Wear*, Vol.261, pp.1298~1315



(a) Soft coating



(b) Hard coating

Fig. 6 Scuffing diagram at various temperatures