

# 다양한 박막을 증착한 디젤 엔진용 피스톤링과 실린더 블록의 마찰 마멸 및 스커핑 수명 평가

안태식\* · 조대현 · 정순오 · 이영제†

성균관대학교 기계공학부

## Friction, Wear and Scuffing Life of Piston Rings With Several Coating for Low Friction Diesel Enging

Tae-Sik Ahn<sup>\*</sup>, Dae-Hyun Cho, Chung-Soon Oh and Young-Ze Lee<sup>†</sup>

Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

**Abstract** – Wear and scuffing tests were conducted using friction and wear measurement of piston rings and cylinder blocks in low friction diesel engine. The frictional forces, wear amounts and cycles to scuffing in boundary lubricated sliding condition were measured using the reciprocating wear tester. The cylinder blocks were used as reciprocating specimens, and the piston rings with several coatings were used as fixed pin. Several coatings were used such as DLC, TiN, Cr-ceramic and TiAlN in order to improve the tribological characteristics. From the tests wear volume of piston ring surfaces applied various coatings were compared. During the tests coefficients of friction were monitored. Test results showed that DLC coatings showed good tribological properties. TiN and Cr-ceramic coated rings showed good wear resistance properties but produced high friction.

**Key words** – Wear, Friction, Piston ring, Cylinder block, Scuffing test, Coating.

### 1. 서 론

자동차 시스템에서 오일 소모와 배기가스 증가의 원인은 엔진의 피스톤 링과 실린더 블록 사이의 윤활면에서 발생하는 마찰과 마멸로 알려져 있다. 피스톤 링과 실린더 블록 사이에서 발생하는 마찰은 자동차 엔진 손실의 20~40%를 차지하고, 마멸은 링과 블록 사이의 기밀을 약화 시켜 배기가스를 증가시킨다. 따라서 저 마찰 디젤 엔진의 개발을 위해서는 피스톤 링과 실린더 블록사이에서의 트라이볼로지 현상에 대한 연구가 필연적이다[1,2].

이에 피스톤 링과 실린더 블록 사이의 저 마찰, 내 마멸 특성을 목표로 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중 피스톤 링에 마찰 계수가 낮고, 내마멸성을 갖는 박막 적용이 상용화가 가능한 대안이다. 일반적으로 저 마찰,

내 마멸 특성을 갖는 세라믹 박막은 미끄럼 요소들의 수명을 증가시킨다.

본 연구에서는 디젤 엔진의 피스톤 링과 실린더 블록 사이의 트라이볼로지 현상을 관찰하여 다양한 박막이 그에 미치는 영향을 알아보고자 한다. 피스톤 링에 TiN, TiAlN, Cr-ceramic, 그리고 DLC 박막을 증착한 후 왕복 마찰 시험기를 사용하여 마찰력, 마멸량, 스커핑 수명을 평가하였다.

### 2. 실 험

#### 2-1. 실험 장치

Fig. 1과 같은 왕복 마찰 시험기를 사용하여 피스톤 링과 실린더 블록의 왕복 직선 운동을 구현하였다. 시험기는 0~600 rpm까지 속도를 조절이 가능하고 최대 250 kgf의 수직 하중을 부여할 수 있다. 윤활유장치들 통해 윤활유를 공급하고 가열 장치를 통해 상온에서

\*주저자 : cp2195@daum.net

†책임저자 : yzlee@skku.edu

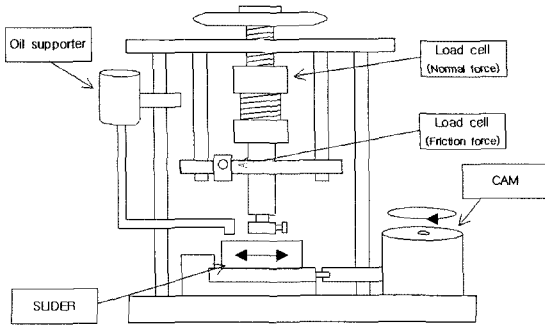


Fig. 1. Reciprocating wear tester.

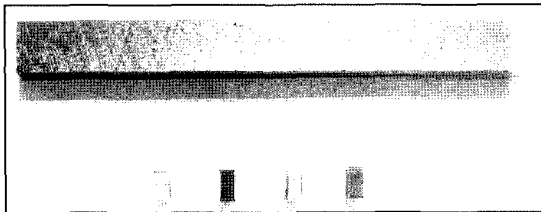


Fig. 2. Cylinder block and piston ring specimens.

250°C까지 윤활유의 온도를 조절할 수 있다.

2-2. 시편

실린더 블록은 주철이고 피스톤 링은 TiN(6 μm), TiAlN(8 μm), Cr-ceramic(300 μm) 그리고 DLC(2 μm) 박막을 각각 증착한 구상흑연주철이다. Fig. 2와 같이 피스톤 링 시편은 길이 1.5 mm 직경 2.5 mm로 홀더에 고정하여 사용하였고, 실린더 블록 시편은 직경 4 mm 길이 60 mm로 가공하였다.

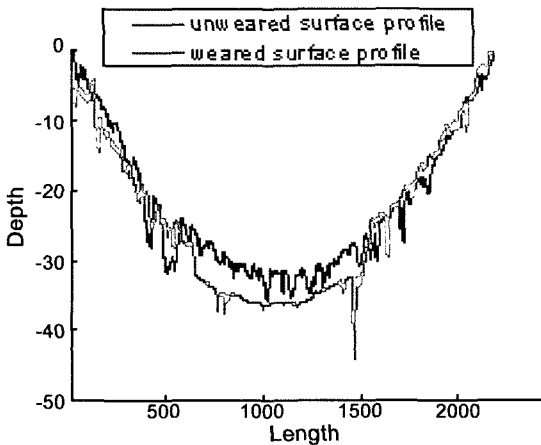


Fig. 3. Cylinder block and piston ring specimens.

Table 1. Condition of friction and wear test

Normal Load (kgf)	Speed (rpm)	Test Time (hour)
50	120	2

Table 2. Condition of scuffing test

Initial Load (kgf)	Step Size of Load (kgf)	Increasing Load Time (minute)
30	20	3

2-2. 실험 방법

마찰 계수는 마찰 계수 데이터의 평균값을 사용하였고, 마멸량은 Fig. 3과 같이 실험 전과 후의 형상을 대조하여 마멸 깊이를 산출한 후, 왕복 거리를 곱하여 비교하였다.

마찰 마멸 실험은 SAE5W-40 오일 환경에서 Ra 0.68~0.70 μm의 표면 조도를 갖는 실린더 블록을 사용하였고, 수직하중 50 kgf, 속도 120 rpm으로 2시간 동안 수행하였다.

스커핑 실험은 미네랄 오일 환경에서 Ra 0.74~0.76 μm의 표면 조도를 갖는 실린더 블록을 사용하였고, 초기하중 300 N에서 스커핑이 발생할 때 까지 단계하중 200 N을 매 3분마다 부과하였다.

3. 실험 결과

3-1. 마찰 마멸 실험

실린더 블록 시편의 마멸량을 Fig. 4에, 마찰 계수를 Fig. 5에 나타냈다. TiAlN 박막을 피스톤 링에 증착했을 때 마멸량이 가장 컸고 DLC 박막의 경우 마멸량이 가장 적으며, 마찰계수 또한 다른 박막에 비해

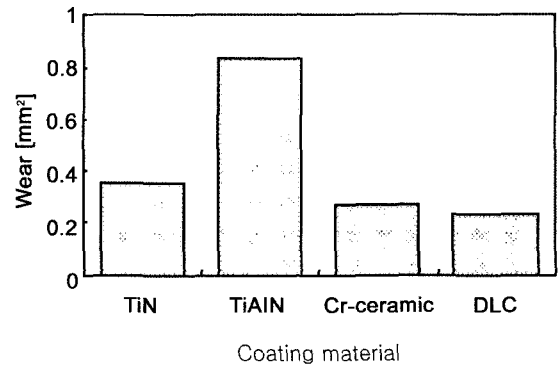


Fig. 4. Wear volumes of cylinder block

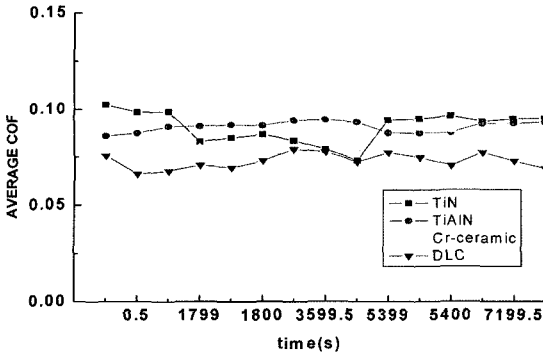


Fig. 5. Friction coefficients.

낮았다. 적은 마멸량으로 인해 낮은 마찰 계수가 나타난 것이다.

EDX 분석 결과와 SEM 이미지를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타냈다. 실험 후 박막의 구성 원소가 아니었던 철(Fe) 성분이 TiN, TiAlN 그리고 Cr-ceramic 박막을 사용한 경우 검출되었다. 이러한 철 성분은 실린더 블록에서 피스톤 링으로 전이된 것이다. 이에 반해 DLC 박막이 증착 된 경우 물질 전이 현상을 관찰할 수 없었다.

DLC 박막이 마찰 계수가 낮고 마멸량이 적은 것은

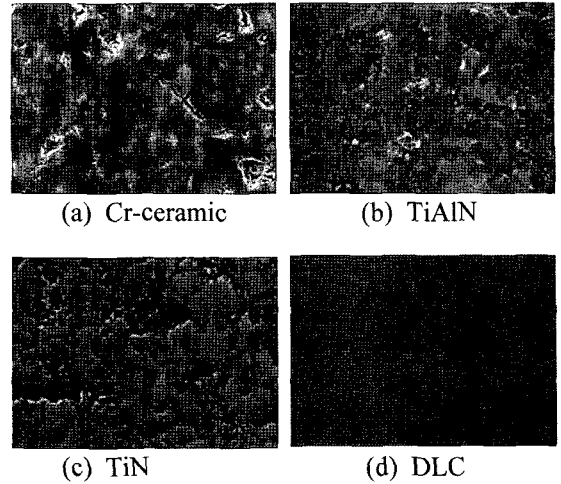


Fig. 7. SEM images of worn ring specimens.

물질전이 현상이 발생하지 않았기 때문이다. 물질 전이 현상은 응착(adhesion)에 기인하므로 박막과 실린더 블록사이의 응착이 마찰 마멸을 증가시킴을 알 수 있다.

Fig. 8은 실험 후 DLC 박막의 Raman spectrum 분석 결과로 저마찰 원인을 파악할 수 있다. 실험 전과 비교하면 실험 후 G peak가 높은 wave number 쪽으로 이동하였고, D peak의 강도는 증가하였다. 이

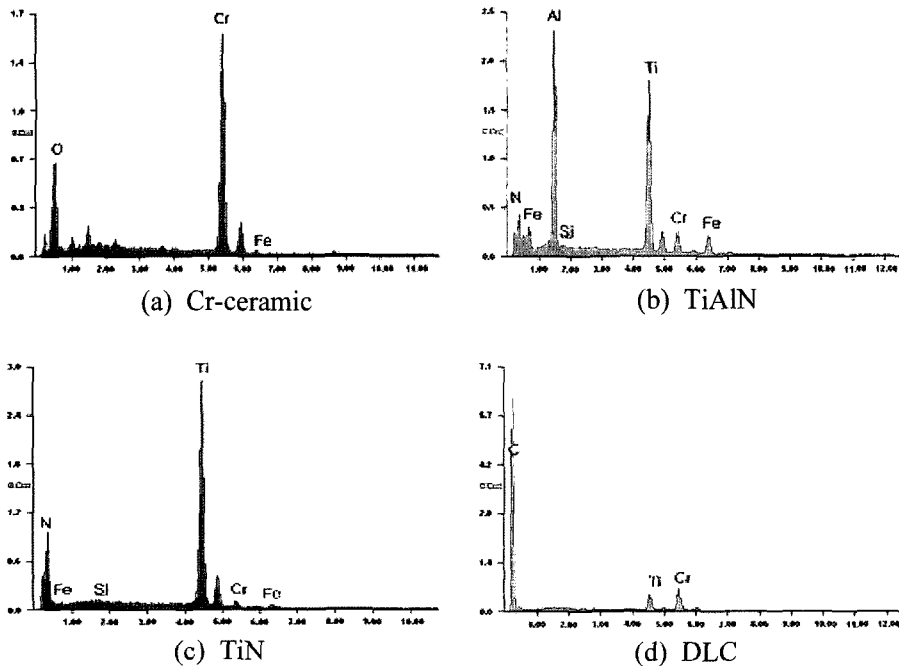


Fig. 6. EDX analysis of worn ring specimens.

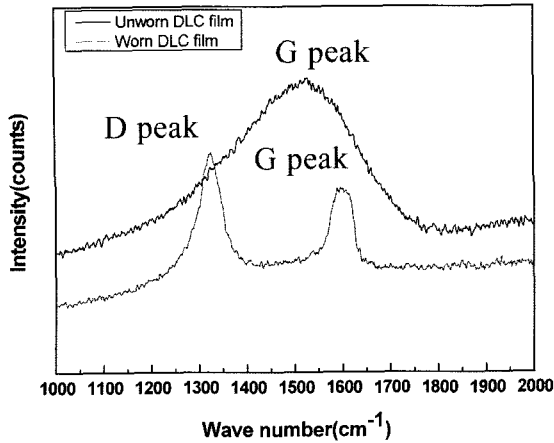
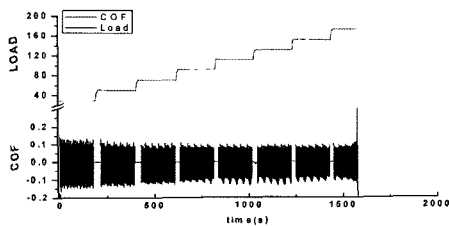


Fig. 8. Raman graph of worn ring specimen with DLC coating.

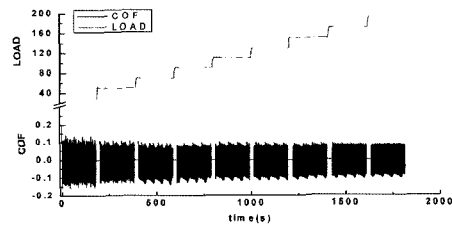
결과는 DLC 박막의 다이아몬드 결합(sp<sup>3</sup>)이 감소하고 흑연 결합(sp<sup>2</sup>)이 증가했음을 보여준다. 즉, DLC 박막이 실린더 블록과의 상대 운동 중 흑연화됨으로써 마찰 계수 및 실린더 블록의 마멸이 감소한 것이다.

3-2. 스커핑 실험

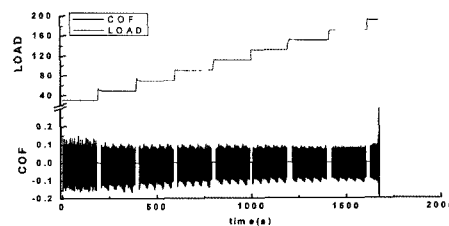
스커핑 발생 시기는 갑작스런 표면 파괴가 발생하여 마찰 계수가 급격하게 증가하는 시점으로 정의하였고, 결과를 Fig. 9에 나타냈다. Cr-ceramic과 TiAlN 박막을 피스톤 링에 증착했을 경우 스커핑이 각각



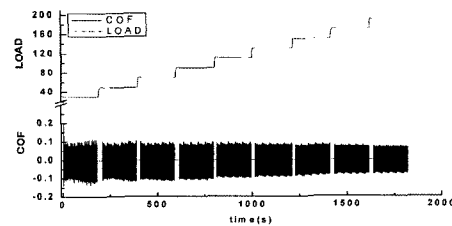
(a) Cr-ceramic



(b) TiAlN



(c) TiN



(d) DLC

Fig. 9. Time to scuffing failures.

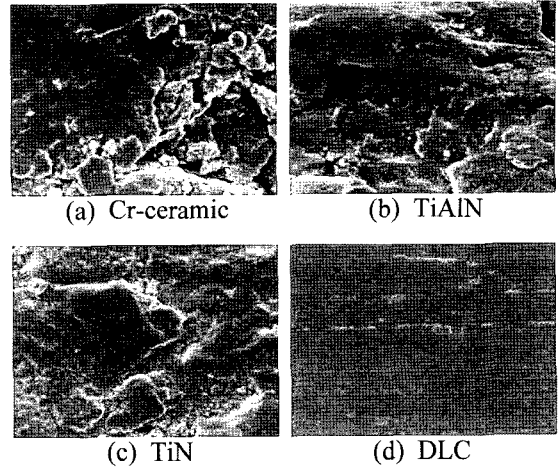


Fig. 10. SEM images of worn cylinder specimens.

170 kgf, 190 kgf의 하중에서 각각 발생하였고, TiN 박막과 DLC 박막의 경우 190 kgf까지 스커핑이 발생하지 않았다. 이는 단계 하중에 의해 박막에 따라 실린더 블록 표면이 다르게 길들여지기 때문이다.

스커핑 실험 후 피스톤 링의 상대제인 실린더 블록의 SEM 사진을 Fig. 10에 나타냈다. 스커핑이 발생한 실린더 블록의 경우 가혹한 응축에 의한 손상을 발견했고, 스커핑이 발생하지 않은 TiN 박막의 경우에서도 약간의 응축에 의한 손상을 발견했다. 그러나 DLC 박막의 상대제인 실린더 블록의 경우 연삭 흔적만이 존

재하였다. 위 결과는 DLC 박막이 증착된 피스톤 링과 실린더 블록사이의 주요 마멸 기구가 응착 마멸이 아닌 연삭 마멸임을 보여준다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 다양한 박막이 디젤 엔진용 피스톤 링과 실린더 블록 사이의 마찰, 마멸 그리고 스커핑 수명에 미치는 영향을 살폈다. Cr-ceramic, TiN 그리고 DLC 박막을 피스톤 링에 증착했을 때, 상대재인 실린더 블록의 마멸 저항이 우수하였다. 특히 DLC 박막의 경우 마멸량뿐 아니라 마찰계수도 가장 낮았다. 실린더 블록과의 상대 운동 중 DLC 박막에서 흑연화 현상이 나타나고 흑연 구조가 증가하여 마찰 계수를 낮추고 실린더 블록의 마멸을 감소시킨 것이다.

스커핑 실험에서 TiN과 DLC 박막을 사용한 경우 스커핑이 발생하지 않았지만, DLC 박막의 상대재인 실린더 블록에서만 응착 마멸이 발생치 않았고 연삭마멸만이 발생하였다. 위와 같은 이유로 DLC 박막의 상대재인 실린더 블록의 표면에서는 손상이 거의 없었다.

따라서 본 실험에 사용한 박막 중 DLC 박막이 트라이볼로지 관점에서 피스톤 링에 적용 가능한 최적의 박막임을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 핵심기술개발사업 하이브리드 용 엔진 시스템 개발의 연구비 지원으로 수행했습니다.

#### 참고 문헌

1. 김완호, 차금환, 김대은, 임윤철, “피스톤 링과 실린더 라이너에서의 마찰 저감 기술 개발”, 한국윤활학회지, 제14권, 제4호, pp. 37-43, 1998.
2. Dhananjay Kumar Srivastava, Avinash Kumar Agarwal and Jitendra Kumar, “Effect of liner surface properties on wear and friction in a non-firing engine simulator”, Materials & Design, 2006.
3. M. Kalin, E. Roman and J. Vizintin, “The effect of temperature on the tribological mechanisms and reactivity of hydrogenated, amorphous diamond-like carbon coatings under oil-lubricated conditions”, Thin Solid Films, 2006.