

피스톤 스커트 표면의 트라이볼로지 거동에 미치는 표면형상과 코팅의 영향

조대현[†] · 정순오 · 원영덕 · 한만철* · 이영재[‡]

성균관대학교 기계공학과, *한국생산기술연구원

The Effects of Surface Profiles and Coatings on the Tribological Behaviors of the Surfaces of Piston Skirt

DaeHyun Cho[†], SoonOh Chung, YoungDuck Won, Mancheol Han* and YoungZe Lee[‡]

Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

*KITECH

Abstract – To reduce the friction losses and the wear amounts in the piston assembly two methods were proposed. One is the modification of surface profile of the skirt part. The surface coating is another method to protect the sliding surfaces. To modify the profile of the skirt surfaces the surfaces were ground to have three different shapes of profiles. Also, several coatings, such as graphite, TiN, and MoS₂, and DLC, were used to protect the surfaces of the piston skirts. The specimens of the skirt and the cylinder bores were tested with the reciprocating wear tester. SAE 5W40 engine oil was used in boundary lubrication regime. Among several coatings the graphite and DLC coatings were very effective to reduce the friction forces. Especially, DLC film represented much better tribological performances than the others. The friction coefficient of the graphite coating was the lowest, but the graphite coating was not effective to protect the surfaces.

Key words – piston skirt, DLC coating, graphite coating, surface profile, friction and wear

1. 서 론

자동차 산업은 각종 환경 규제에 의해 빠른 기술적 변화를 겪고 있는 분야로 자동차 연비와 배기가스 저감이 엔진 기술의 핵심으로 자리 잡았다[1-2]. 자동차 연비와 배기가스 문제는 자동차 유회 시스템 구현과 관련이 있는데 일반 승용차에서 에너지 소모 분포를 살펴보면 12%의 에너지만이 실제 구동에 쓰인다. 15%의 에너지 손실이 기계적인 손실로 발생하고, 주로 마찰 손실이 이에 해당한다.

이러한 마찰 손실은 연료 소모에 큰 영향을 미치는 데 기계적 손실이 10% 감소하면 오일 소모가 1.5%

감소한다. 엔진만을 살펴보았을 때, 마찰 손실이 48%를 차지하고 66%가 피스톤 어셈블리에서 발생하며, 그 중 30%의 손실이 스커트와 실린더 블록에서 발생한다[3-4].

피스톤 스커트의 유회에 대한 완전한 해석은 매우 복잡하여 피스톤 스커트의 표면 설계는 정성적으로 이루어지고 있으며, 이로 인해 상용 스커트 표면의 신뢰성이 보장되지 않고 있다. 특히 스커트 표면 홈에 관해 기존 연구들의 결과를 살펴보면 표면의 깊은 홈이 오일 저장소 역할을 하여 피스톤 스커트와 실린더 블록 사이를 혼합 유회 상태로 유지한다는 주장과 표면의 홈이 유체동압유회막 형성에 치명적 역할을 한다는 주장이 엇갈리고 있다[5]. 또한 표면의 형상은 표면 자체의 유회특성뿐만 아니라 박막의 마찰마멸 메커니즘에도 영향을 미치기 때문에, 박막을 증착하여 사용하는 스커트

[†]주저자 : 372-5@hanmail.net

[‡]책임저자 : yzlee@skku.edu

의 표면 형상에 대한 연구는 박막에 관한 연구를 수반해야 한다. 일반적으로 피스톤 스커트에 사용하는 박막은 마찰저감에 초점이 맞춰져있어 그래파이트(graphite)와 같은 연질 박막이 주로 사용되었으나, 자동차 엔진의 사용 조건이 가혹해 짐에 따라 TiN과 같은 경질 박막도 연구된 바 있다[6-8].

본 연구에서는 경계 및 혼합 윤활 환경에서 피스톤 스커트의 표면 조도 및 박막 종류를 변화 시켜 상용 스커트와 트라이볼로지 특성을 대조하고 스커트와 실린더 블록사이에서 발생하는 마찰 마멸 메커니즘을 밝히고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치 및 시편

Fig. 1과 같은 왕복 마찰 시험기를 사용하여 피스톤 스커트와 실린더 블록의 왕복 직선 운동을 구현하였다. 시험기는 0~600 rpm까지 속도조절이 가능하고 최대 250 kgf의 수직 하중을 부여할 수 있다. 본 연구에서 사용한 스트로크는 50 mm이었다. 윤활유유장치를 통해 윤활유를 공급하고 가열 장치를 통해 상온에서 250°C까지 윤활유의 온도를 조절할 수 있다.

본 연구를 위해 두께 3 mm, 가로 및 세로 길이가 각각 4 mm, 3 mm인 알루미늄 합금인 피스톤 스커트 시편을 상용 피스톤 스커트로부터 직접 가공하였다. 실린더 블록 시편 역시 상용 실린더 블록을 두께 4 mm, 가로 및 세로 길이를 각각 4 mm, 60 mm로 직접 가공하였다. 피스톤 스커트는 알루미늄 합금이고 실린더 블록은 주철이다.

상용 실린더 블록의 표면 조도는 중심선 거칠기로 0.7 μm이었다. 실제 상용 피스톤 스커트를 살펴보면 가

공과정 중에 커다란 산(peak)과 골(valley)이 생겨 표면이 매우 거칠다. 이러한 형태로 가공하는 이유는 표면의 골 부분이 윤활유 저장소 역할을 하기 때문인데 어느 정도의 산과 골이 최적의 윤활 조건을 형성하는 지 알려진 바가 없다. 각기 다른 형상을 갖는 스커트 시편을 가공하기 위해, 처음시편은 실제 사용되는 피스톤 스커트의 표면을 사용하였고, 다른 두 시편은 표면을 곱게 연마(polishing)하여 형상을 다르게 가공한 시편들을 사용하였다. 표면 측정 결과 각기 5.121 μm, 3.753 μm 그리고 1.935 μm의 중심선 거칠기 값을 나타내었다.

그래파이트를 10 μm 증착한 상용 피스톤 스커트 시편과 이황화몰리브덴(MoS₂)과 그래파이트를 10 μm 증착한 시편, 그리고 DLC(Diamond-like carbon)와 TiN(Titanium nitride) 박막을 2 μm로 각각 증착한 시편을 준비하였다. 그래파이트와 이황화몰리브덴과 그래파이트를 일반적인 전기도금을 사용하여 증착하였고, DLC와 TiN 박막은 PVD방법을 사용하여 증착하였다.

2-3. 실험 방법

피스톤 스커트의 표면 조도 변화 실험은 200 N의 하중과 2 Hz의 속도를 가지고 SAE5W-40 오일의 윤활환경에서 1시간동안 수행했다. 로드셀을 통해 마찰력을 실시간으로 측정하였고, 시험 동안의 피스톤 스커트 시편의 마멸 깊이를 알아보기 위해 실험 전과 후에 표면 거칠기 측정 장치를 사용하여 표면 프로파일의 변화를 관찰하였다. 200 N의 하중은 스커트 표면형상 변화와 마찰계수를 비교하기에 적합한 하중이었다.

피스톤 스커트의 박막에 따른 표면마이 마찰과 마멸에 미치는 영향을 알아보기 위해 두 가지 하중을 가하여 실험을 수행하였다. 서로 다른 윤활조건에서 실험을 하기 위해 50 N과 700 N을 설정하였다. 마찰계수를 보다 정밀하게 관찰하기위해 0.5 Hz의 속도로 SAE 5W40 오일의 윤활환경에서 3시간동안 수행했다.

3. 실험 결과

3-1. 피스톤 스커트 표면 형상 실험

실험 후 표면 형상의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 세 경우 모두 표면거칠기가 감소하여 실험 전 보다 평탄하여졌다. 상대적으로 거친 표면이 거칠기의 변화가 컸으며, 고운 표면은 그 차이가 상대적으로 매우 작았다. 실험 후 표면 산의 높이를 비교하면, 고운 표면의

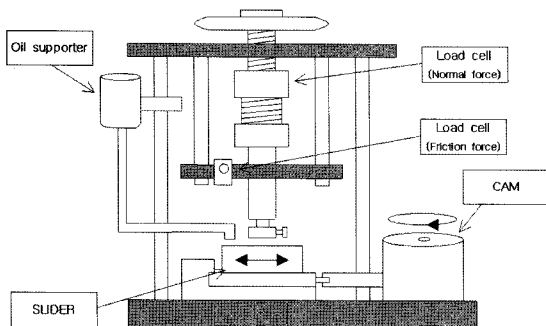


Fig. 1. Schematic diagram of reciprocating wear tester.

Table 1. Wear depth and surface peak height after test

	Test 1	Test 2	Test 3
Wear depth (μm)	13.03	10.7	3.7
Peak height (μm)	6.02	2.85	2.01

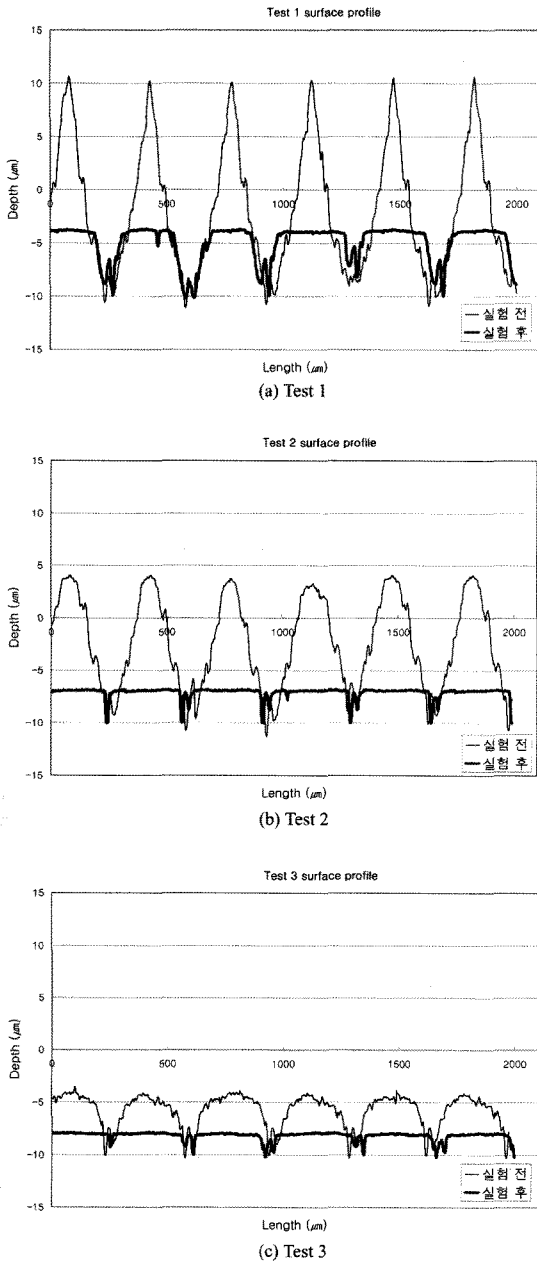
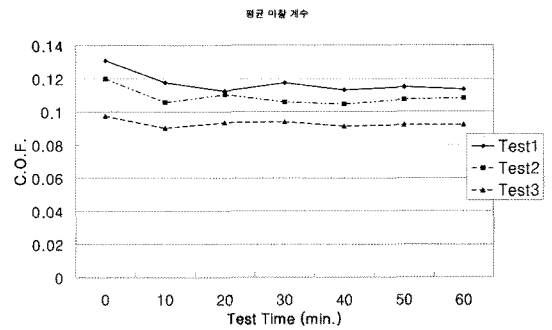
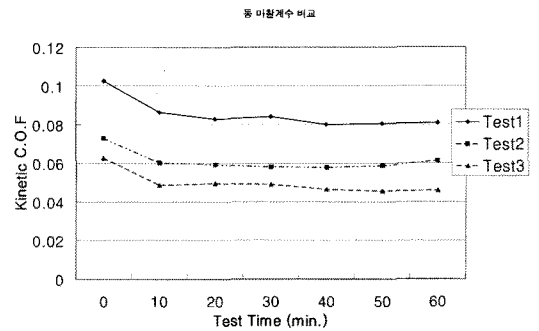


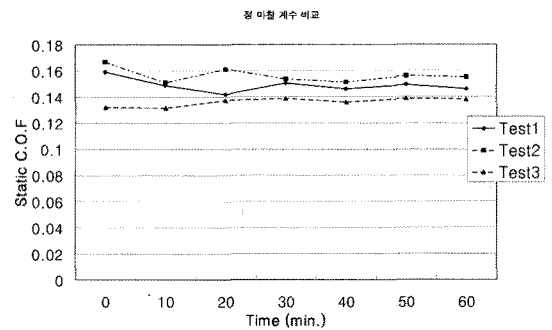
Fig. 2. Surface profiles of the piston skirt specimens.



(a) Average coefficient of friction



(b) Kinetic coefficient of friction at maximum velocity



(c) Static coefficient of friction

Fig. 3. Change of coefficient of friction with time.

마멸깊이가 제일 작았음을 알 수 있다.

Fig. 3은 실험 중 마찰 계수 변화를 나타낸 것이다. 실험 결과, 상용 피스톤 스커트를 그대로 사용한 Test 1의 경우 가장 높은 평균마찰계수를 보였고, 마멸 깊이도 가장 깊었다. 반면, 표면을 곱게 가공한 Test 3은 평균마찰계수가 가장 낮았고, 마멸 역시 적었다. 이러한 경향은 상용 피스톤 스커트의 가공 형태가 최적의 윤활 조건을 형성하지 못함을 보여주는데, 이는 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 명확하게 나타나있다. 표면 골의 윤활유 저장소 효과는 표면과 표면 사이의 상대속도가

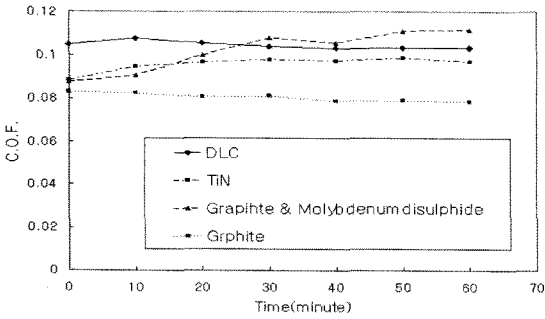


Fig. 4. Change of coefficient of friction with time.

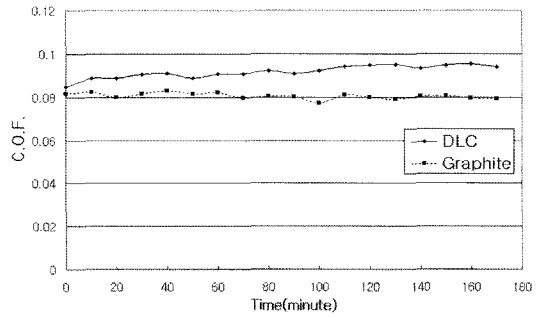
어느 수준 이상 존재할 때, 더욱 확연히 드러나므로 마찰계수를 정마찰 계수와 속도가 최대일 때의 동마찰 계수로 구분하여 관찰하였다. Fig. 3(b)에서 보이듯 골의 윤활유 저장소 효과는 속도가 존재하여 유압의 영향을 많이 받게 되는 동마찰 계수에서 비교적 명확히 나타났다. 그리고 Fig. 3(c)에서 나타나듯 표면 사이의 상대속도가 없는 정마찰 계수의 경우, 윤활유 저장 효과가 나타나지 않으므로 마찰계수의 차이가 거의 없었다. 고운 표면을 갖는 피스톤 스커트의 표면이 엔진 효율 증가에 유리하였다.

3-2. 피스톤 스커트 박막 실험

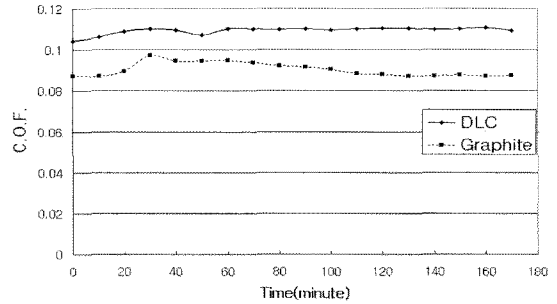
Fig. 4에 다양한 박막을 적용한 피스톤 스커트의 실린더블록과의 마찰계수를 나타냈다. 상용 피스톤 스커트인 그래파이트를 증착한 시편이 마찰계수가 가장 낮고 경질 박막인 DLC와 TiN은 안정적인 마찰계수를 보인다. 반면, 이황화몰리브덴과 그래파이트를 혼합하여 증착한 시편의 경우 마찰계수가 0.12에 가깝게 상승하는데, 이 값은 코팅을 증착하지 않은 피스톤 스커트 시편의 마찰계수와 같은 값으로 이황화몰리브덴과 그래파이트를 혼합한 박막이 피스톤 스커트 표면에서 박리되었음을 의미한다.

피스톤 스커트 표면의 변화를 알아보기 위해 50 N과 700 N의 하중으로 서로 다른 윤활조건에서 실험을 수행하였다. 박막은 우수한 마찰특성을 보인 그래파이트 박막과 DLC 박막을 사용하였다. 실험 중 마찰계수의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 200 N의 경우와 마찬가지로 두 가지 경우 모두 DLC 박막의 마찰계수보다 그래파이트 박막의 마찰계수가 현저히 작았다.

그러나 마모면을 살펴보면, Fig. 6에서 보듯이 그래파이트 박막은 매우 심하게 마모가 진행되었다. 굴곡이 없어질 정도이며, 박막이 파괴되어 모재가 나타날

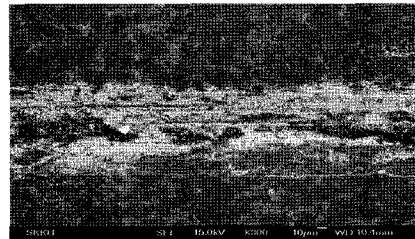


(a) Quasi-hydrodynamic lubrication regime (50N)



(b) Adsorption lubrication regime (700N)

Fig. 5. Change of coefficient of friction with time.



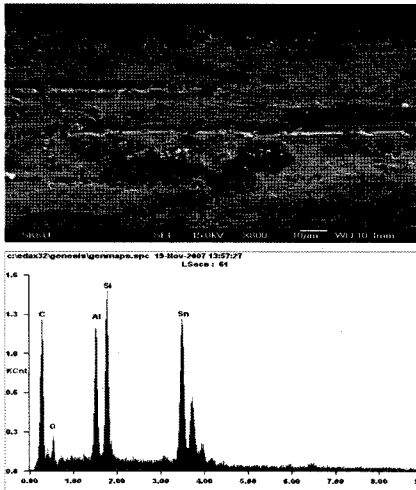
(a) Graphite coated piston skirt



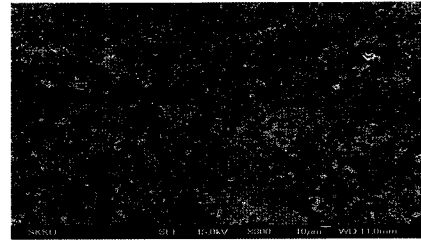
(b) DLC coated piston skirt

Fig. 6. S.E.M images of wear scar of the piston skirt specimen with the test load of 50 N.

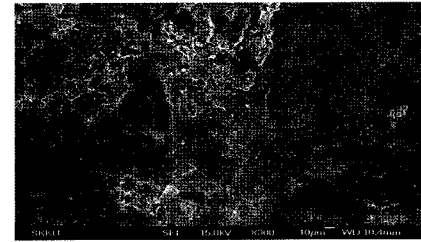
정도로 표면에서 마모가 발생하였다. DLC 박막은 굴곡의 돌기부에서만 마모 자국이 발견되어, 상대적으로 박막의 표면 보호 능력이 뛰어났음을 알 수 있다. 이



(a) Graphite coated piston skirt specimen of wear scar

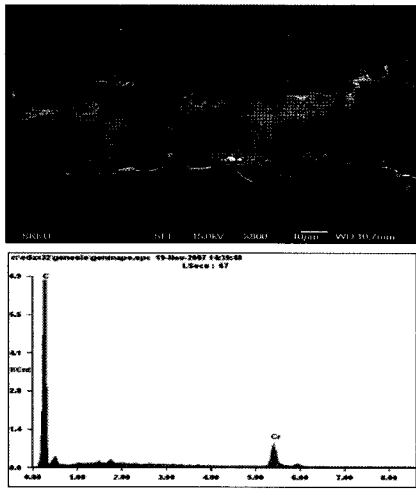


(a) Graphite coated piston skirt



(b) DLC coated piston skirt

Fig. 8. S.E.M images of wear scar of the piston skirt specimen with the test load of 700 N.



(b) DLC coated piston skirt specimen of wear scar

Fig. 7. EDX analysis of the piston skirt specimens of wear scar with the test load of 50 N.

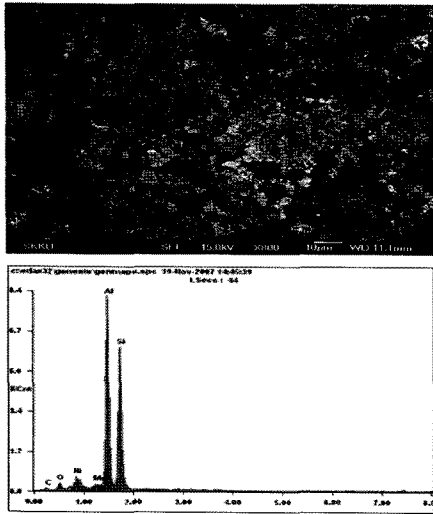
마모된 표면들의 돌기부를 중심으로 EDX 분석을 하여 Fig. 7에 나타내었다. 그라파이트 박막을 증착한 피스톤 스커트 시편은 실험 후 마멸흔에서 그라파이트 박막의 주요 원소인 탄소(Carbon)가 거의 사라지고 피스톤 스커트의 모재인 알루미늄(Aluminum)이 검출되지만 DLC 박막을 증착한 피스톤 스커트 시편은 실험 후 마멸흔에서 원래 DLC 박막의 주요 원소인 탄소와 모재와 박막 사이의 버퍼레이어(Buffer layer)인 크롬(Chrome) 만이 검출되고, 알루미늄은 검출되지 않았다.

하중을 증가하여 200 N을 가한 실험에서 마모된 표면을 관찰하면, Fig. 8과 같이 그라파이트를 증착한 피

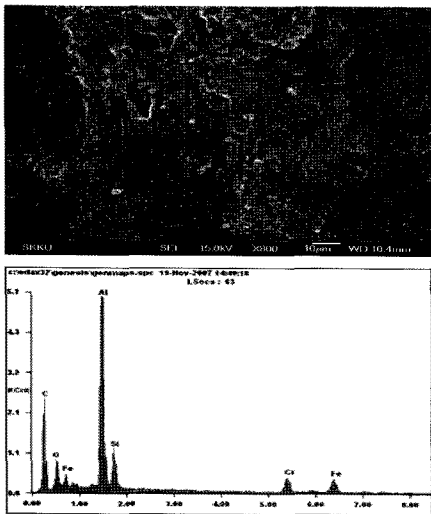
스톤 스커트 시편은 박막과 표면의 굴곡이 손상을 받아 완전히 사라지는 반면, DLC를 증착한 피스톤 스커트 시편은 박막과 표면의 굴곡이 손상을 받음에도 불구하고 박막의 성분과 표면의 굴곡이 완전히 사라지지 않았다. Fig. 9의 EDX 결과가 이를 뒷받침한다. 그라파이트 박막을 증착한 피스톤 스커트 시편의 경우 실험 후 탄소가 사라지고 피스톤 스커트의 주 원소인 알루미늄과 규소(Silicon)가 박막이 없는 피스톤 스커트 시편과 유사하게 검출되는 것과 달리 DLC 박막을 증착한 피스톤 시편은 실험 후에 알루미늄과 규소가 검출됨과 동시에 탄소 역시 남아 박막의 잔류를 보여준다. 따라서 가혹해지는 자동차 피스톤 부의 설계에 내구성 확보를 위해 피스톤 스커트에 저 마찰 경질 박막을 적용이 유리함을 알 수 있다.

Fig. 10은 실시간으로 얻은 마찰계수 데이터로 그라파이트 박막의 동마찰계수와 정마찰계수의 차이가 DLC 박막의 동마찰 계수와 정마찰 계수의 차이보다 훨씬 크다. 이러한 박막 차이가 상대면이 실린더 면에는 어떤 영향을 주었는지 알아보기 위해 상대면인 실린더 블록면을 분석하였다.

실린더 블록의 정마찰력을 받는 마멸흔의 가장자리와 동마찰력을 받는 마멸흔의 중앙부분을 각각 E.D.X를 통해 분석하고 검출된 원소의 비율을 Table 2에 정리했다. 실험 전 실린더 블록에서 검출되지 않은 산



(a) Graphite coated piston skirt specimen of wear scar

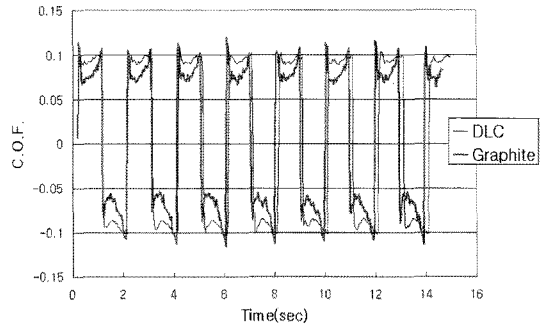


(b) DLC coated piston skirt specimen of wear scar

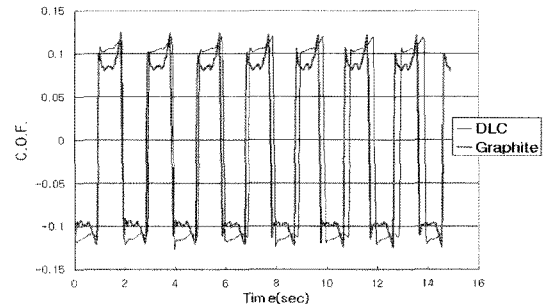
Fig. 9. E.D.X. analysis of the piston skirt specimens of wear scar with the test load of 700 N.

소(Oxygen)와 알루미늄이 실험 후 마멸흔에서 검출된다. 유사유체동압윤활영역에서 정마찰력을 받는 마멸흔의 가장자리에 알루미늄이 원소질량을 기준으로 1.8%증가하고 동마찰력을 받는 마멸흔의 중앙부분에서 0.99%증가한다. 또한 흡착윤활영역에서 정마찰력을 받는 마멸흔의 가장자리에 알루미늄이 원소질량을 기준으로 1.42%증가하고 동마찰력을 받는 마멸흔의 중앙부분에서 1.06%증가한다.

이는 그래파이트를 증착한 피스톤 스커트의 경우 저



(a) With a test load of 50 N



(b) With a test load of 700 N

Fig. 10. Change of coefficient of friction with time.

Table 2. Weight percentage of element of cylinder block against graphite coated piston skirt

Element	Original cylinder block	Test load of 50 N		Test load of 700 N	
		End Zone	Center Zone	End Zone	Center Zone
C	6.54	4.61	3.53	3.6	2.27
O	-	6.37	5.03	5.06	5.2
Fe	90.21	83.77	86.98	86.12	87.56
Al	-	1.8	0.99	1.42	1.06
Si	3.25	3.44	3.48	3.81	3.91

속 구간에서 물질전이현상이 두드러지게 발생하는 것을 의미하며, 이로 인해 마찰계수의 변화가 크고 운동 방향이 바뀌는 부분에서 표면 손상이 발생함을 의미한다.

DLC 박막을 증착한 피스톤 스커트를 사용했을 때, 상대제인 실린더 블록의 정마찰력을 받는 마멸흔의 가장자리와 동마찰력을 받는 마멸흔의 중앙부분의 EDX 분석을 Table 3에 정리하였다. DLC 박막을 증착한 피스톤 스커트의 경우 박막이 실험 후에도 잔류하여 물질 전이를 막기 때문에 마멸흔의 원소비율의 차이가

Table 3. Composition of cylinder block surfaces against DLC coated piston skirt

Element	Original cylinder block	Test load of 50 N		Test load of 700 N	
		End Zone	Center Zone	End Zone	Center Zone
C	6.54	2.88	3.04	4.87	4.77
O	-	5.28	5.36	4.2	4.18
Fe	90.21	86.10	86.2	86.21	87.14
Si	-	4.21	4.40	3.52	3.3
Sn	3.25	1.53	1	1.2	0.61

없고 정마찰계수와 동마찰계수의 차이가 그래파이트를 증착한 피스톤 스커트 시편에 비해 미미하다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 엔진의 피스톤 스커트와 실린더 블록 사이의 마찰 및 마멸을 줄이기 위해 실제 상용 피스톤 스커트의 표면 형상을 검증한 후 상용 피스톤 스커트의 박막인 그래파이트 박막과 이황화몰리브덴과 그래파이트를 혼합한 박막, 그리고 경질 박막인 TiN과 DLC 박막을 사용하여 경질 박막의 적용가능성을 알아보았다. 이 중 우수한 특성을 보인 그래파이트 박막과 DLC 박막을 선택하여 마찰 및 마멸 거동에 대해 연구하였다.

1. 마찰계수 측면에서 상용 피스톤 스커트는 거친 표면이 가지는 윤활유 저장소의 이점보다 표면 돌기간의 간섭에 의한 손실이 크므로 표면을 현재보다 곱게 가공하는 것이 필요하다. 또한 고온 표면의 마모량이 작은 마찰력으로 인해 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

2. 상용 피스톤 스커트에 증착하는 그래파이트 박막은 낮은 마찰계수를 보이며, 경질박막인 DLC와 TiN도 안정적인 마찰계수를 보인다. 그래파이트 박막의 마찰계수는 DLC 박막의 마찰계수 보다 낮았지만, 비교적 작은 하중에서 그래파이트 박막은 피스톤 스커트의 표면을 보호하지 못하고 박리되는 반면 DLC 박막은 피스톤 스커트의 표면을 보호하였다. 고하중에서도 그

라파이트 박막은 완전히 제거되어 실험 후 피스톤 스커트에 큰 손상을 가져온 반면 DLC 박막은 실험 후 손상을 입지만 잔류하여 피스톤 스커트의 표면 형상의 변화를 그래파이트 박막에 비해 상당량 감소시킨다.

3. 그래파이트 박막의 손상과 마찰계수가 DLC 박막에 비해 속도에 민감하였다. 그래파이트를 증착한 피스톤 스커트의 경우 운동방향이 바뀌는 구간에서 DLC 박막에 비해 물질전이현상이 두드러지게 발생하였다. 운동 중에는 마찰계수가 낮았으며 손상도 상대적으로 작았다.

참고 문헌

1. Priest M. and Taylor C. M., "Automobile Engine Tribology-approaching the Surface", *Wear*, Vol. 241, pp. 193-203, 2000.
2. Effect of liner surface properties on wear and friction in a non-firing engine simulator. *Materials & Design*, Vol. 28, pp. 1632-1640, 2007.
3. Simon C. Tung and Michael L. McMillan, "Automotive Tribology Overview of Current Advances and Challenges for the Future", *Tribology International*, Vol. 37, pp. 517-536, 2004.
4. Knoll G. D. and Peeken H. J., "Hydrodynamic Lubrication of Piston Skirts", *J Lubr Technol Trans ASME*, Vol. 104, pp. 504-509, 1982.
5. V. D. N. Rao, D. M. Kobat, D. Yeager, and B. Lizotte, "Engine Studies of Solid Film Lubricant Coated Pistons", *SAE Paper 1997*, paper 18 pp. 20-31.
6. Zhaokuan Ye, Chao Zhang, Yucong Wang, H. S. Cheng, Simon Tung, Q. Jane Wang, and Xiaozhou He, "An Experimental Investigation of Piston Skirt Scuffing: a Piston Scuffing Apparatus, Experiments, and Scuffing Mechanism Analyses", *Wear*, Vol. 257, pp. 8-31, 2004.
7. Yucong Wang and Simon C. Tung, "Scuffing and Wear Behavior of Aluminum Piston Skirt Coatings Against Aluminum Cylinder Bore", *Wear*, Vol. 225-229, pp. 1100-1108, 1999.
8. Y. Wang, C. Yao, G. C. Barber, B. Zhou, and Q. Zou, "Scuffing Resistance of Coated Piston Skirts Run Against Cylinder Bores", *Wear*, Vol. 259, pp. 1041-1047, 2005.