

미세요철표면을 이용한 태핏 표면의 마모 저감에 관한 연구

여창동 · 김대은*

연세대학교 대학원 기계공학과
*연세대학교 기계공학과

Wear Reduction of Tappet Surface by Undulated Surface

Chang-Dong Yeo and Dae-Eun Kim

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University
*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

Abstract—The damage of cam/tappet surface is one of the major reasons for energy loss in an I.C. engine. High friction causes the accelerated wear of the cam/tappet surfaces which in turn changes the valve opening/closing timing. During the accelerated test evidence of both rolling fatigue and sliding abrasive wear could be found. Based on the results of the accelerated test, a scheme was devised to decrease tappet wear. Wear reduction of the tappet was achieved by using undulated surface topography in the tappet center region. The wear reduction is achieved by trapping of the wear particles in the undulations as well as by increasing the supply of lubricant to the sliding interface.

Key words—undulated surface, abrasive wear, fatigue wear, accelerated test, cam, tappet.

1. 서 론

엔진 내에서 자체적으로 에너지를 소산하는 요소는 여러 가지가 있으며 가장 대표적으로 피스톤과 실린더 벽간의 마찰운동, 밸브 구동계(valve train system)에서 캠/태핏간의 접촉 운동 등이 있다. 이외에 각 회전요소의 지지 부에 설치되어 있는 베어링 등에 의해 소모되는 에너지가 있으나 앞서의 두 예에 비하면 작다고 할 수 있을 것이다. 기존의 여러 연구에 의하면 피스톤/실린더 계에 의해 소모되는 에너지는 엔진의 전체 기계적 에너지 소모의 약 75%를 차지한다고 보고된 바 있으며, 이중 상당부분은 실린더 벽과 피스톤간의 마찰이 주요 원인으로 지적되고 있다. 또한 밸브 구동계의 경우, 엔진 구동 동력의 10~25%를 소비하고 있는 것으로 알려져 있으며, 이러한 에너지 소모량의 50%가량이 캠과 태핏간의 마찰에서부터 비롯된다고 한다[1,2].

직접 구동 방식(direct acting type)의 평면 태핏의 경우, 캠과 태핏의 마찰은 캠과 태핏 표면의 마모를 유

발시키고, 이는 마찰력 증가로 인한 동력 손실 등을 초래한다. 이와 같은 에너지 소산 작용은 엔진의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 연비에도 영향을 미치고 나아가서는 엔진의 수명과 신뢰성에 관련되므로 이를 줄이기 위해 많은 연구자들이 실험적/이론적 접근을 하였다. Burak[3]은 태핏의 회전을 고려한 캠/태핏 접촉모델을 바탕으로 캠 각도에 따른 마찰계수와 유막 두께, 그리고 태핏의 표면 거칠기와 회전속도가 에너지 손실에 미치는 영향을 수치 해석적으로 계산하였다. Willermet[4,5]는 윤활제와 태핏의 회전속도에 따른 캠/태핏의 마찰에 관한 연구에서 태핏의 회전속도가 증가할수록 마찰력은 감소하며, 또한 기존의 태핏보다 회전속도를 높이도록 설계한 squeeze film tappet은 약 20%정도의 마찰력이 저감된다는 결과를 보고하였다. Roylance[6]는 캠/태핏의 표면 처리와 경도 등의 물성치가 캠/태핏 시스템의 작동성능에 미치는 영향을 조사하였는데, 오랜 작동시간에 견딜 만큼의 충분한 경도를 가지고 표면 거칠기가 변하지 않는 재료

선택의 필요성을 제시하였다. Sun[7]은 캠/태핏 시스템의 메커니즘을 기존의 평면 태핏에서 롤러 태핏으로 대체하였을 때, 캠축의 회전속도에 따른 마찰력과 토크의 비교/분석을 통해 롤러 태핏의 경우가 평면 태핏보다 마찰력과 토크 모두 감소한다고 보고하였다. 롤러 태핏이 마찰·마모 면에서 평면 태핏보다 우수한 것은 롤러 태핏의 경우, 캠과 태핏이 미끄럼 접촉을 하는 평면 태핏과는 달리, 캠/태핏 접촉 형태가 구름접촉이므로 마찰력 상승을 유발하는 굽힘 마모(scuffing wear)가 감소되기 때문이라고 설명하였다.

본 연구에서는 캠/태핏 시스템의 가속마모실험을 통하여 규명한 태핏의 마모 메커니즘을 바탕으로, 태핏의 표면에 미세요철표면(undulated surface)을 가공하여 밸브 구동계에서 에너지 손실의 주원인인 평면 태핏 표면의 마찰·마모를 저감하도록 하였다. 가속마모실험에서는 윤활유를 사용하지 않는 건식 실험, 또는 모터의 회전 속도를 작게 함으로써 윤활 효과를 감소시켜서 마모를 가속화하였다.

2. 실험 장치 및 방법

태핏 표면의 미세요철표면 가공 방법은 Fig. 1에서와 같이 기본적으로 에칭 가공에 바탕을 두었다. Fig. 1을 참고하면 미세요철표면 가공 순서는 다음과 같다.

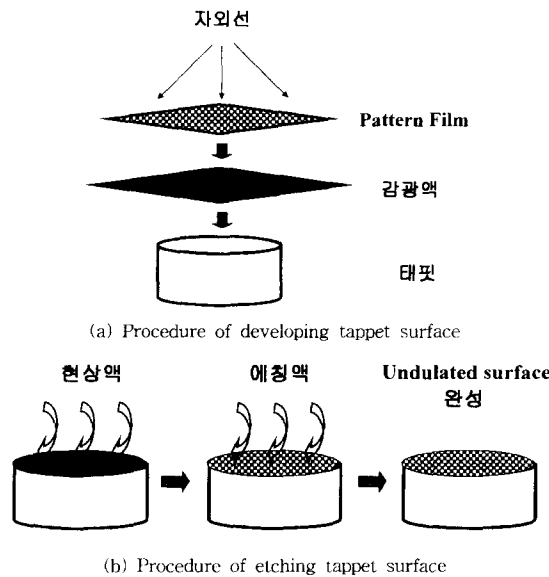


Fig. 1. Procedure of fabricating undulated surface.

1) 감광 필름이 태핏 표면에 견고하게 부착되도록 하기 위하여 태핏 표면을 사포(cc2000 CW)로 매끄럽게 가공한다. ($Ra \approx 0.02$)

2) 암실에서 감광액(TPR)을 태핏 표면에 얇게 묻힌 후, 50~60°C의 따뜻한 공기로 건조시킨다.

3) 암실에서 Pattern film을 태핏 표면에 고착시킨 후, 자외선에 노출시킨다. Pattern film은 Corel draw에서 원하는 형상과 크기의 패턴을 작성한 후, 투명 필름에 인쇄하여 만든다.

4) Pattern film을 떼어낸 후, 태핏 표면을 현상액에 담구어 서서히 교반시키면 태핏 표면의 감광 필름이 현상된다.

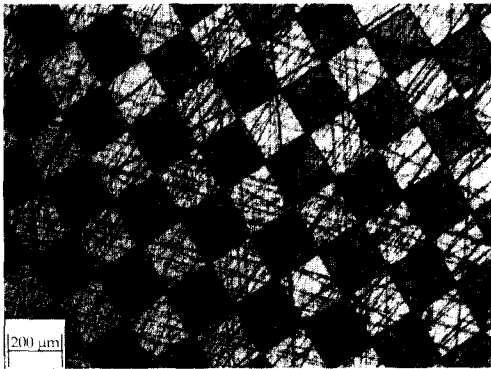
5) 현상된 태핏 표면을 60~70°C의 에칭액(염화 제2철액)에 담근 후, 교반시켜서 에칭한다.

Fig. 2는 Fig. 1과 같은 공정으로 얻어진 태핏의 표면을 광학 현미경을 통하여 촬영한 결과이다. 즉, Fig. 2(a)와 같은 초기의 태핏 표면은 감광 필름을 현상한 후에는 Fig. 2(b)와 같이 자외선에 노출된 부분은 필름이 남아있고 자외선에 노출되지 않은 부분은 현상액에 의해서 없어진다. 따라서 실제 에칭시 태핏 표면에 남아있는 감광 필름 부분은 염화 제2철과 반응하지 않으므로 이 부분을 제외한 나머지 부분만 재료가 제거되어 Fig. 2(c)와 같은 미세요철표면이 가공되는 것이다. Fig. 2(d)와 같이 미세요철표면의 골간 폭은 약 250 μm 정도로 고정하였고, 가공 깊이는 2~10 μm 로 다양하게 변화시켜서 이것이 마멸 특성에 미치는 영향을 알아보도록 하였다. 즉, 가공 깊이가 5, 7, 10 μm 일 때의 태핏을 각각 Tappet A, Tappet B, Tappet C로 정의하였다.

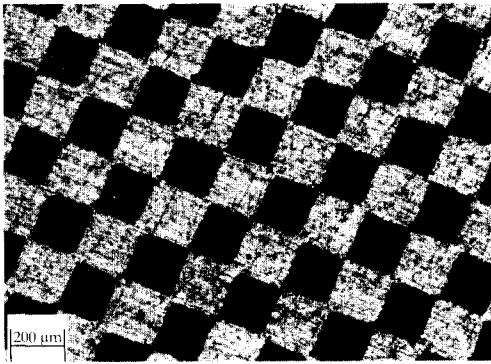
이와 같은 공정으로 미세요철표면이 가공된 태핏으로 다음의 두 가지의 실험을 수행하였다. 첫째는 Fig. 3과 같은 실험장치를 구성하여 가속마모실험을 행하였다. Fig. 3의 각 요소들은 시스템의 안정을 위해 정반위에 장착을 시켰고, 작동시 발생하는 진동의 영향을 줄이기 위해 방진고무를 이용하여 정반을 지지하도록 하였다. 캠축의 구동은 플렉시블 커플링을 사용하여 모터축과 일직선상으로 연결하여 구동하였다. 캠과 태핏의 마모 가속조건을 위해서 각각의 실험전에 캠과 태핏의 표면은 알코올로 세척하여 잔류하는 엔진오일을 최대한 제거하였고 실험중 엔진오일의 공급은 하지 않았다. 하지만 캠축의 원활한 회전을 위해서 캠축의 저어널 베어링부는 실험전 엔진오일을 충분히



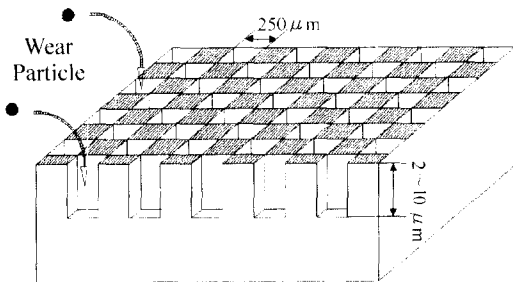
(a) Initial tapet surface



(b) After developing



(c) Undulated surface



(d) undulated surface diagram

Fig. 2. Optical micrographs of pattern fabrication stages.

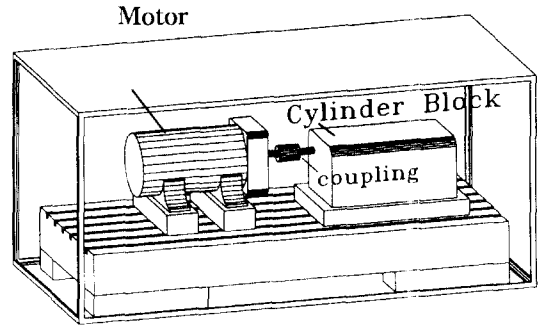


Fig. 3. Experimental setup for accelerated test.

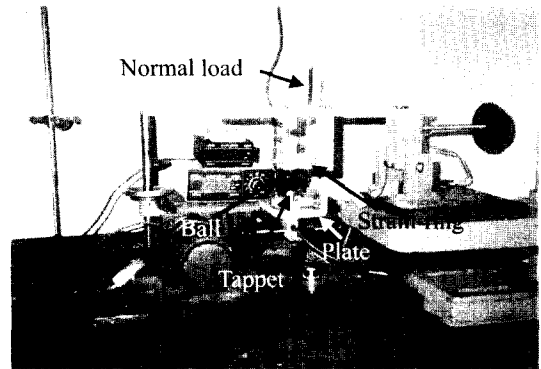


Fig. 4. Experimental setup for ball-on-reciprocator test.

히 묻히거나 그리스를 주입하도록 하였다. 캠축의 회전속도와 캠 회전수는 각각 700 rpm, 480000 cycles로 설정하여 반복 실험하였다. 둘째는 미세요철표면의 마찰 특성을 체계적으로 분석하기 위하여 Fig. 4와 같은 ball-on-reciprocator 장치를 구성하였다. 실험은 ball과 tappet의 접촉 환경을 건식일 때와 경계 윤활 상태일 때로 나누어 행하였다. 건식 실험의 경우, 실험전 ball과 tappet을 초음파 세척하여 표면의 이물질울 최대한 제거한 후 실험하였고, 경계 윤활 실험의 경우, tappet 표면에 엔진 오일을 소량 묻힌 후 실험하였다. 실험 장치 중에서 ball부는 고정되고, tappet은 plate에 고정되어 plate와 함께 양방향 왕복운동을 한다. Plate의 속도는 1 Hz(60 rpm)로 일정하게 조절하였는데, 이때 plate의 구동 방식이 slider-crank mechanism방식이기 때문에 실제 ball과 tappet 접촉부의 선속도는 -0.1~0.1 m/s로 변한다. 하중은 dead weight방식으로, 1000 gf를 추가하였다. 마찰력의 측정은 스트레인 게이지에 의해 검출된 스트레인 량이 전압으로 변환되고 amplifier로 증폭되어 A/D board를 통해 PC에 저장됨으로써 실시

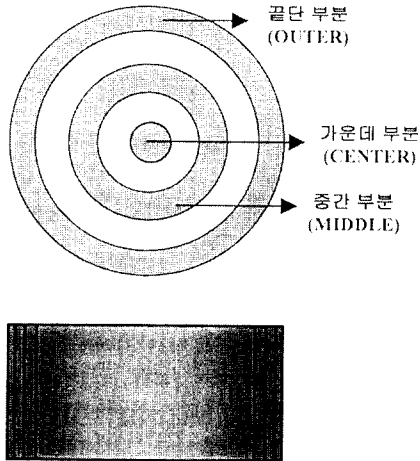


Fig. 5. Definition of wear region of tappet.

Table 1. Property of camshaft, tappet and ball

	Harness	Surface roughness	material
Camshaft	640 HV	0.275 μm Ra	T.I.G. remelt 주철
Tappet	710 HV	0.07 μm Ra	Steel (M 35512)
Ball	790	0.02 μm Ra	STB 2

간으로 측정하였다. 태핏의 표면은 해석상 편이를 위하여 Fig. 5에서와 같이 각 부위를 정의하였고, 실험에 사용된 재료의 물성치는 각각 Table 1과 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 가속 마모 실험 후 태핏 표면의 마모

태핏의 가운데 부분만 미세요철 표면으로 가공하였을 때, 실험후 태핏의 마모 특성은 가공 깊이에 따라 각각 다른 마모 특성을 나타내었다. 먼저 태핏 표면에 미세요철표면을 가공하지 않았을 때의 태핏 전면의 마모 상태는 Fig. 6에서와 같이 실험 전에 비해서 태핏의 가운데 부분이 $6 \mu\text{m}$ 이상 집중적으로 깎여져 나간 것을 알 수 있다. 그러나 실험 후 태핏 전면의 마모 상태를 살펴보면, 가공 깊이가 약 $5 \mu\text{m}$ 일 때는 (Tappet A) Fig. 7에서와 같이 실험 후 태핏의 가운데 부분이 실험 전에 비해 약 $2\sim 3 \mu\text{m}$ 정도 깎여져 나간 것을 확인할 수 있다. 그리고 가공 깊이가 약 $7 \mu\text{m}$ 일 때는 (Tappet B) Fig. 8에서와 같이 실험후 태핏의 가운데 부분이 약 $1\sim 2 \mu\text{m}$ 정도 깎여져 나간 것을 알 수 있다. 하지만 가공 깊이가 약 $10 \mu\text{m}$ 일 정도로 상대적으로 깊을 경우 (Tappet C) 태핏 전면은 Fig. 9에서와 같이

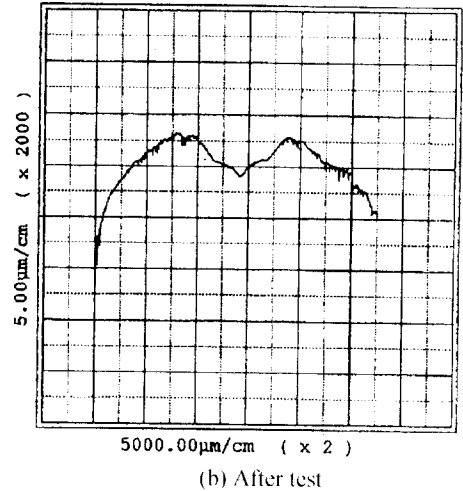
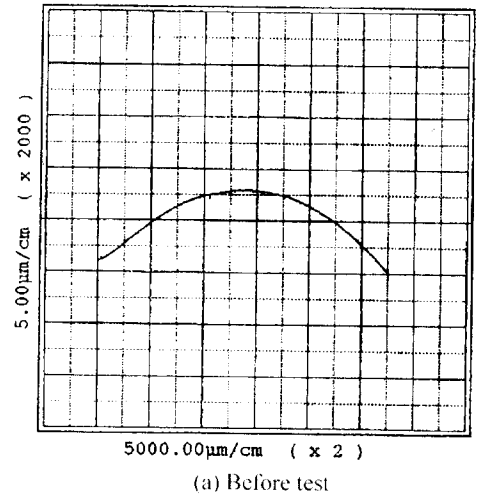


Fig. 6. Surface profile of tappet without undulated surface.

실험전의 상태에서 거의 손상이 없었다.

이와 같은 태핏 전면의 전체적인 마모 상태를 부위별로 살펴보면 Fig. 10~Fig. 12에서와 같이 나타난다. 즉, Tappet A, Tappet B 그리고 Tappet C의 실험전 표면 형상은 각각에 대해서 가운데 부분과 중간 부분의 경우 Fig. 2(c)와 같고, 끝단 부분의 경우는 미세 요철 pattern 가공을 하지 않았기 때문에 Fig. 2(a)와 같은 형상을 가진다.

먼저 실험후의 Tappet A의 표면을 살펴보면, 태핏의 가운데 부분과 중간 부분의 경우 Fig. 10(a), (b)에서와 같이 실험전과 비교할 때 태핏 중심을 기준으로 원형 띠 형상의 굽힘 흔적과 태핏 중심 방향으로의 굽

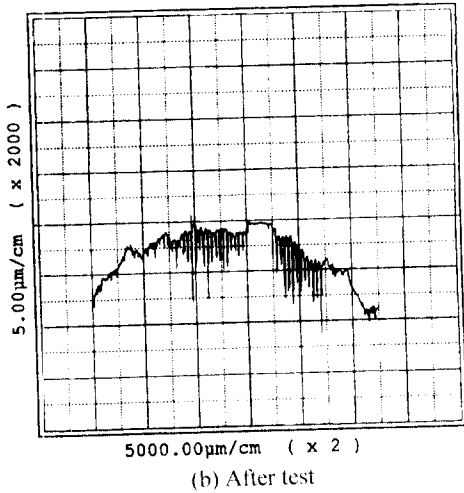
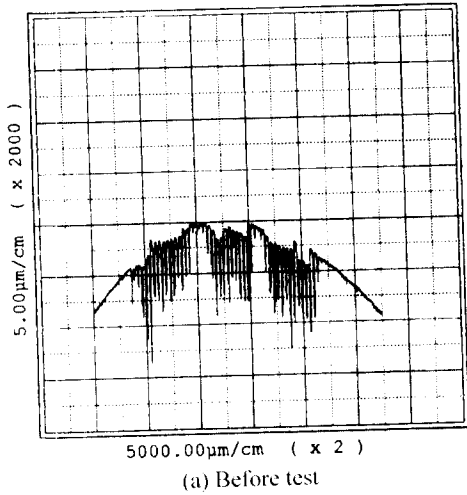


Fig. 7. Surface profile of tappet A (depth: 5 µm).

힘 흔적이 공존하며 미세 요철 pattern은 이러한 굽힘 마멸로 인하여 많이 손상되어 있고, 끝단 부분의 경우는 Fig. 10(c)에서와 같이 심한 표면 파손을 나타내었다. 이처럼 태핏의 끝단 부분이 다른 부위에 비하여 급격한 표면 파손을 나타내는 이유는 이 부위가 캠이 회전할 때, 캠 노우즈 부분과 가장 먼저 접촉을 하는 부분이므로 정상적으로 윤활이 이루어지지 않는 가속 실험일 때 다른 부위에 비해 충격이 최대로 전달되기 때문이다. 즉, 태핏의 끝단 부분에서 캠과의 지속적인 충격과 반복적인 미끄럼 접촉이 발생하면 태핏의 표면 하부층에서는 균열이 발생하고, 이러한 균열들은 Fig. 13(a)에서 나타나듯이 표면으로 전파되어 재료가 떨어져 나가게 되는 것이다. Fig. 13(b)는 이러한 메커

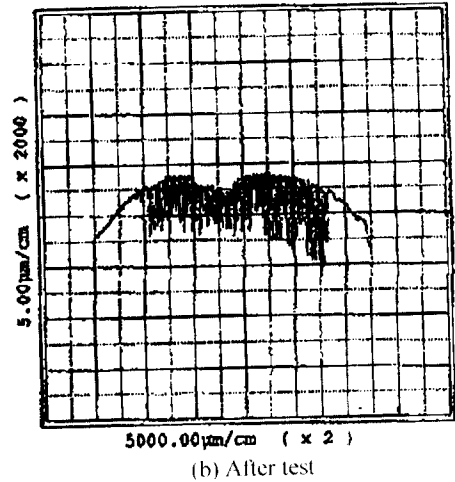
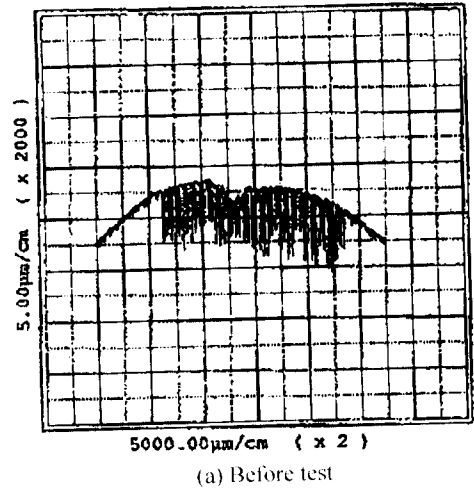


Fig. 8. Surface profile of tappet B (depth: 7 µm).

니즘으로 발생한 태핏의 마모 입자를 전자현미경으로 촬영한 것이데, 여기서 알 수 있듯이 마모 입자의 끝단에는 여러 갈래의 균열이 생성되어 있다. Fig. 14는 이러한 메커니즘으로 파손된 태핏의 끝단 부분을 전자 현미경으로 촬영한 결과를 나타낸다. Tappet B의 실험 후 표면을 살펴보면, 태핏 가운데 부분과 중간 부분의 경우 Fig. 11(a), (b)에서와 같이 전체적인 마멸 형상은 Tappet A와 거의 흡사하지만 굽힘 흔적이 Tappet A보다 뚜렷하지 않으며 미세 요철 pattern의 형상도 실험 전에 비해 일부만이 손상되어 있는 것을 알 수 있다. 또한, 끝단 부분의 경우는 Tappet A와 거의 흡사한 표면 파손 상태를 나타내었다. 그리고 Tappet C의 경우, 실험 후 태핏 가운데 부분과 중간 부분은

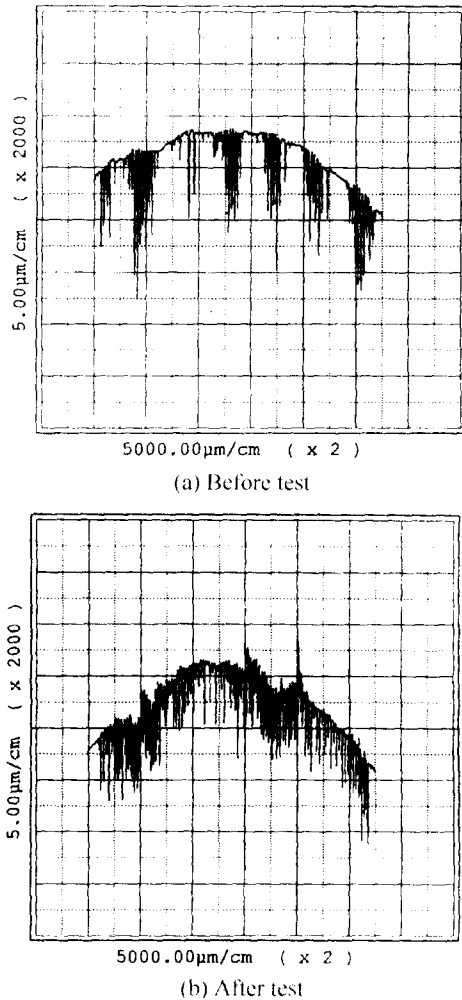
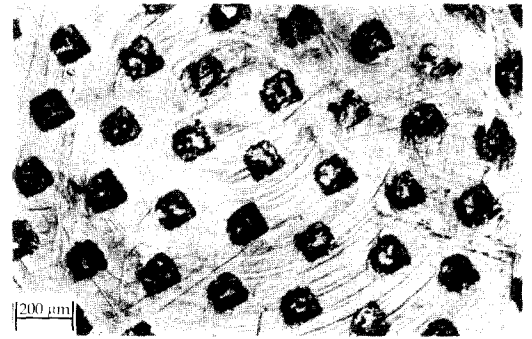
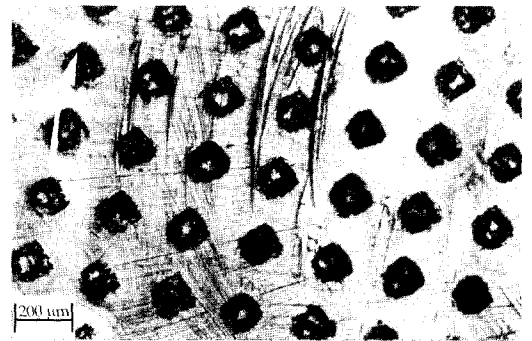


Fig. 9. Surface profile to tappet C (depth: 10 μm).

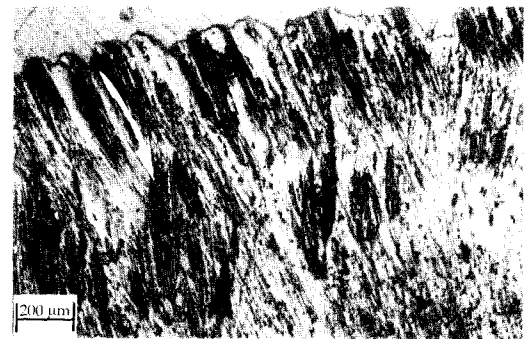
Fig. 12(a), (b)에서와 같이 Tappet A와 Tappet B에 비해 가장 마모 흔적이 적었고, 끝단 부분은 거의 흡사한 결과를 나타내었다. 이와 같은 마모 특성을 나타내는 Tappet A, Tappet B 그리고 Tappet C의 가운데 부분을 동일한 표면 거칠기와 실험 조건하에서 미세요철표면이 가공되지 않은 상태로 실험한 경우와 비교해보면, 후자의 경우 실험 후 태핏의 가운데 부분이 6 μm 이상 깎여져 나간 반면, 전자의 경우는 Tappet A, Tappet B 그리고 Tappet C가 각각 2~3 μm , 1~2 μm , 1 μm 이내로 깎여져 나갔다. 이처럼 미세요철표면을 가공한 태핏이 미세요철표면이 가공되지 않은 태핏보다 적은 마모를 발생시키는 것은 Fig. 15에서와 같이 두 가지 인자들에 기인한다고 추론할 수 있다. 즉, 첫째,



(a) Center part



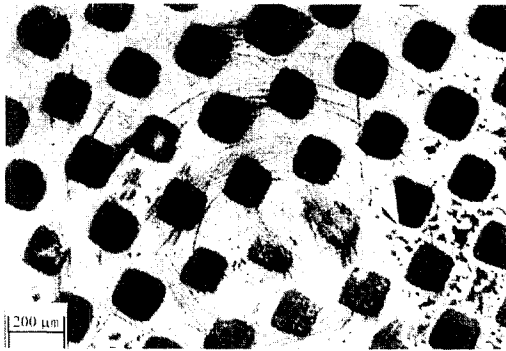
(b) Middle part



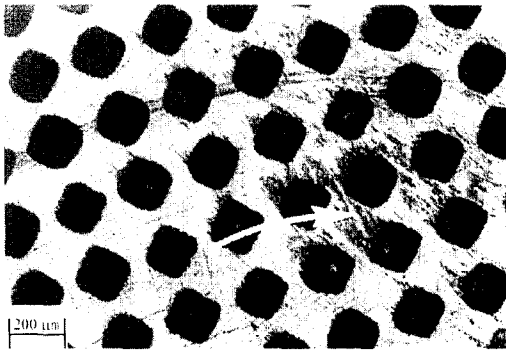
(c) Outer part

Fig. 10. Optical micrographs of tappet A (depth: 5 μm).

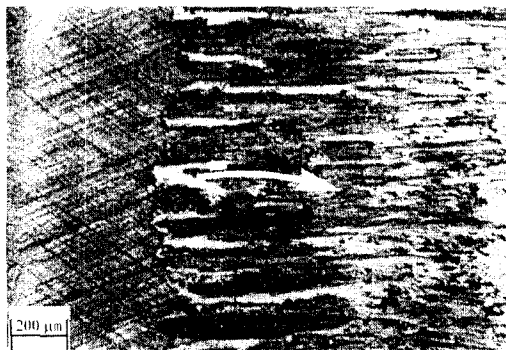
Fig. 15(a)에서와 같이 캠과 태핏의 접촉시 경계면에서 발생하는 마모 입자들이 미세 요철 pattern의 골에 갇히게 되어 이들 마모 입자들에 의한 상대 표면 갈림 현상이 소멸되기 때문이며, 둘째, 실험중 제어될 베어링부에 주기적으로 주입하는 소량의 엔진 오일 중에 미소량이 유출되어 Fig. 15(b)에서와 같은 미세 요철 pattern의 골에 저장되어 캠과 태핏의 윤활유 공급을 더 좋게 해주기 때문이라고 사료된다. 또한, 미세 요철 pattern의 가공 깊이가 큰 Tappet B가 Tappet A보다 적



(a) Center part

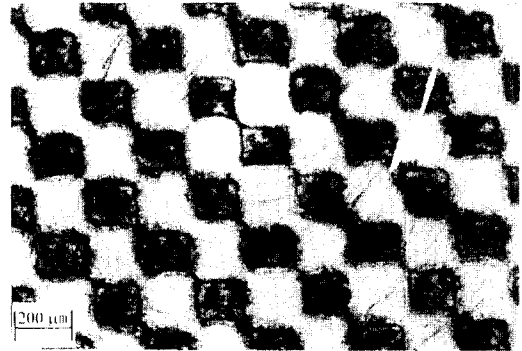


(b) Middle part

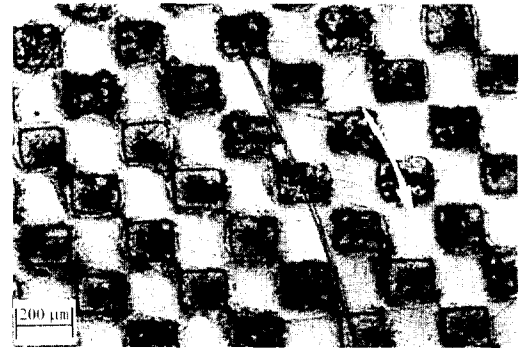


(c) Outer part

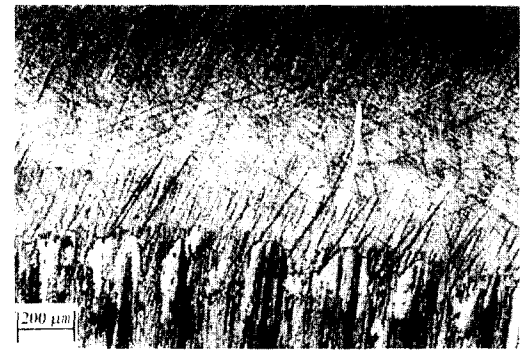
Fig. 11. Optical micrographs of tappet B (depth: 7 μm).



(a) Center part



(b) Middle part



(c) Outer part

Fig. 12. Optical micrographs of tappet C (depth: 10 μm).

은 마모가 발생하는 이유는, 캠과 태핏의 접촉시 표면의 탄성 변형량이 Tappet A의 가공 깊이보다 크기 때문이라고 추측된다. 즉, 캠과 태핏의 접촉 형태가 타원형일 때, 탄성 변형량(δ)은 다음의 식 [8]로 계산된다.

$$\delta \text{ (Elastic Deformation)} = \frac{2}{\pi} PD^* \quad (1)$$

여기서 P 와 D^* 는 다음과 같이 구해진다.

$$P = \frac{p \text{ (max. contact pressure)}}{E'} \quad (2)$$

$$D^* = D_x \ln \left(\frac{D_y + [D_x^2 + D_y^2]^{1/2}}{-D_x + [D_x^2 + D_y^2]^{1/2}} \right) + D_y \ln \left(\frac{D_x + [D_x^2 + D_y^2]^{1/2}}{-D_x + [D_x^2 + D_y^2]^{1/2}} \right)$$

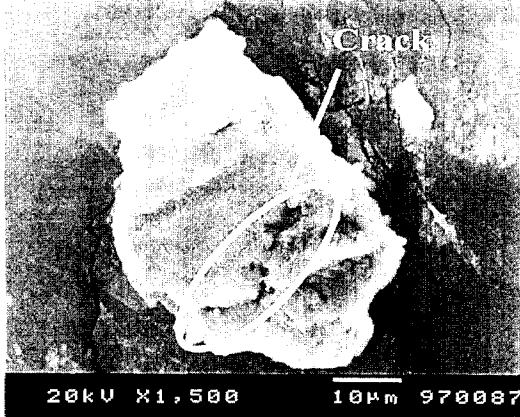
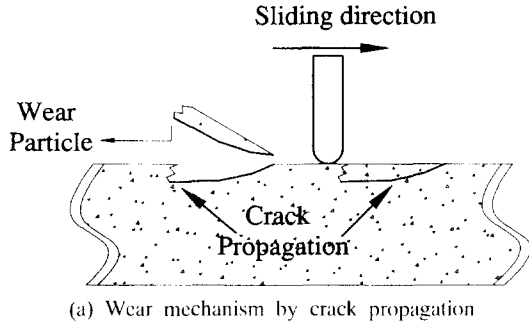


Fig. 13. Wear generation by crack propagation.

$$-D_x \ln \left(\frac{-D_y + [D_x^2 + D_y^2]^{1/2}}{D_x + [D_x^2 + D_y^2]^{1/2}} \right) - D_y \ln \left(\frac{-D_x + [D_x^2 + D_y^2]^{1/2}}{D_x + [D_x^2 + D_y^2]^{1/2}} \right) \quad (3)$$

위의 식을 바탕으로 캠의 노우즈가 태핏의 가운데를 접촉하는 구간에서의 탄성 변형량을 구하면 캠의 1회전 주기에서 최대의 탄성 변형량을 구할 수 있다. 그러나 캠 노우즈 형상을 수식화할 때의 난이함으로 인해서 여기서는 캠의 기본원이 접촉할 때의 탄성 변형량을 구해서 캠의 노우즈가 접촉할 때의 값을 추측하도록 하였다. 식 (2)와 (3)에서의 변수값들은 APPENDIX A의 결과를 토대로 구하였고, 이 결과들을 식 (1)에 대입하면 캠의 기본원이 태핏에 접촉할 때의 탄성 변형량은 약 2.6 µm가 된다. 이 때, 탄성 변형량은 식 (1)에서와 같이 최대 접촉 압력에 비례하는데, 캠의 노우즈가 태핏의 가운데 부분에 접촉할 때 최대

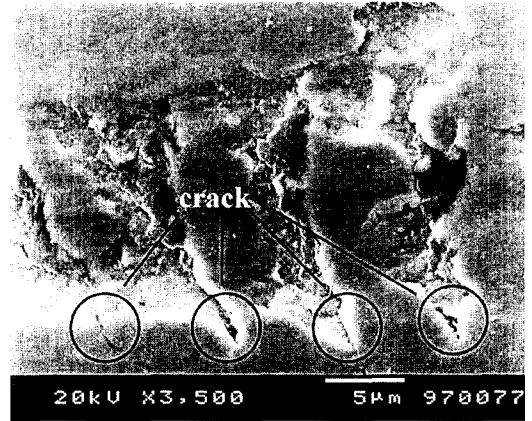
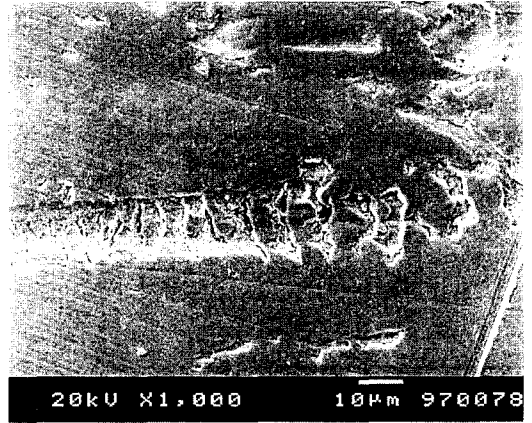


Fig. 14. SEM micrographs of wear by crack propagation.

접촉 압력은 캠 기본원이 접촉할 때의 값보다 수배 이상의 값을 가지므로 탄성 변형량도 수배 이상의 값이 된다고 추측할 수 있다. 따라서, 캠의 노우즈가 태핏에 접촉할 때의 탄성 변형량은 Tappet A의 가공 깊이인 5 µm 이상이 됨을 알 수 있고, 이 때에는 미세 요철 pattern이 마모 저감에 큰 효과를 나타내지 못하므로 상대적으로 가공 깊이가 작은 Tappet A가 Tappet C보다 많은 마모를 발생한다고 할 수 있는 것이다.

3-2. Ball-on-reciprocator를 이용한 미세요철표면의 마찰·마모 특성

3-2-1. 건식 조건에서 미세요철표면의 마찰·마모 특성

이 실험에서는 접촉면의 마멸 입자가 마찰 특성에

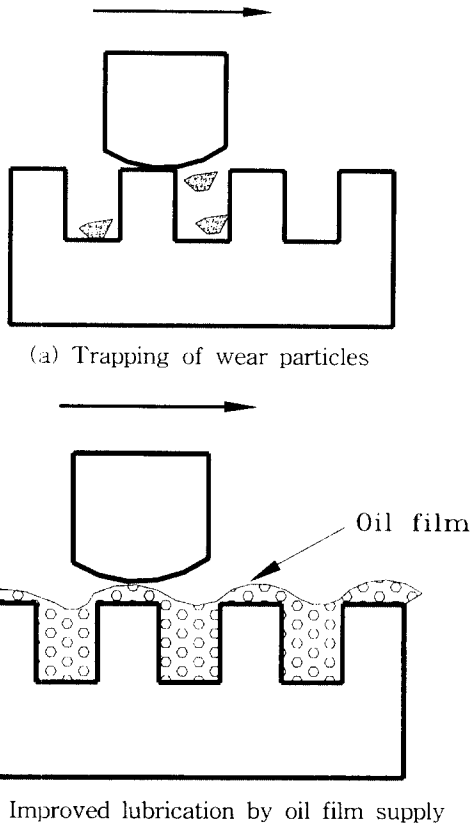


Fig. 15. Plausible mechanism of wear reduction due to undulation.

미치는 영향을 알아보기 위하여 Ball과 태핏을 초음파 세척 후, 건식 조건에서 실험하였다. Plate의 왕복 속도는 1 Hz (60 rpm)으로 조절하고, 하중은 1000 gf를 가하였다. 미세요철표면을 가공한 시편과 가공하지 않은 시편에 대한 마찰 계수의 변화는 Fig. 16과 같이 나타난다. 여기서 작동시간을 약 10분 정도로 정한 것은 작동시간이 약 30분 정도가 되더라도 마찰계수는 거의 일정한 값으로 유지되었기 때문이다. 또한 Fig. 16의 모든 data point는 3번 반복 실험한 결과를 평균한 값이다.

Fig. 16에서 알 수 있듯이 미세요철표면을 가공하지 않은 태핏의 마찰 계수는 약 0.6정도의 값을 가지고 미세요철표면을 가공한 태핏의 마찰 계수는 약 0.5정도의 값을 가진다. 이와 같이 미세요철표면을 가공한 태핏이 매번의 같은 반복 실험에서 평균적으로 다소 작은 마찰 계수값을 가지는 것은 태핏과 ball의 왕복 접촉 운동시 발생하는 마멸 입자가 요철 골 사이에 고

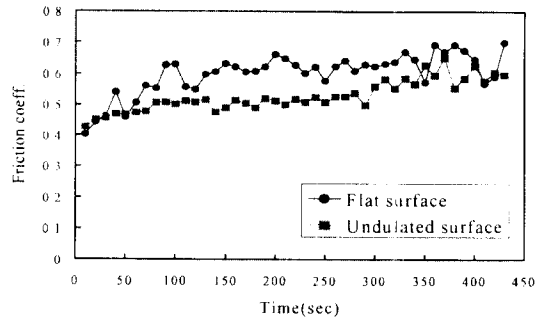


Fig. 16. Variation of friction coefficient with respect to time.

립되어 이들에 의한 마찰 현상이 저감되었기 때문이라고 추측된다. 이러한 접촉면에서 마멸 입자의 거동은 Fig. 17에서 명확히 확인할 수 있다. 즉, 미세요철표면을 가공하지 않은 태핏의 실험후 마멸 트랙 끝단을 보면 Fig. 17(a)와 같이 마멸 입자가 끝단에 쌓여 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 미세요철표면을 가공한 태핏의 실험후 마멸 트랙 끝단은 Fig. 17(b)와 같이 마

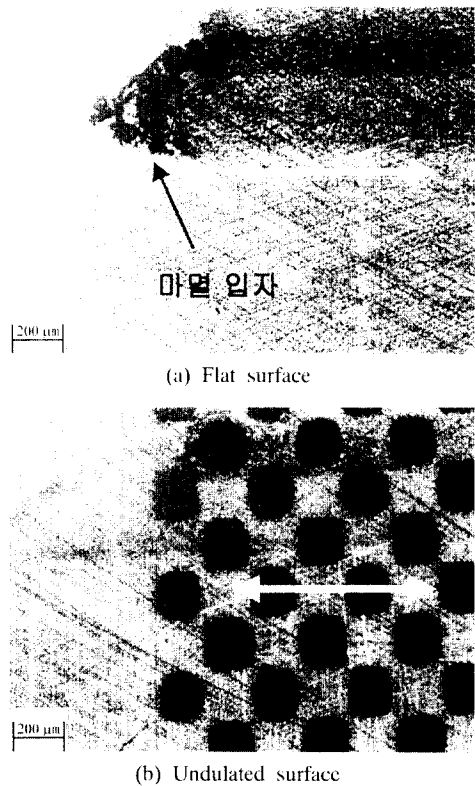
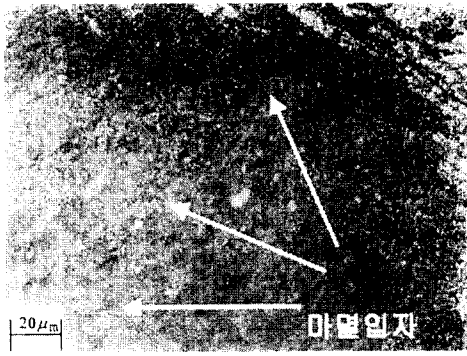
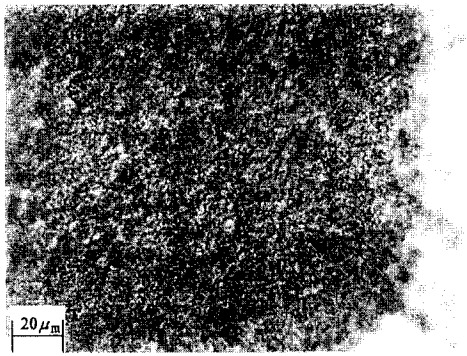


Fig. 17. Wear track after ball-on-reciprocator test in dry condition.



(a) Wear particles in undulated pattern



(b) Undulated pattern next to wear track

Fig. 18. Behavior of wear particles of undulated surface.

별 입자의 흔적으로 거의 확인할 수 없는데, 이는 ball과 tappet의 미끄럼 접촉시 발생하는 마멸 입자가 Fig. 18(a)에서와 같이 요철 끝단에 고립되어 접촉면에서 제거되기 때문이다. Fig. 18(b)는 ball이 지나가지 않은 요철을 나타낸다.

3-2-2. 경계 윤활 상태에서 미세요철표면의 마찰·마모 특성

이번 실험에서는 경계 윤활 상태에서 미세요철표면의 마찰 특성을 파악하기 위하여 태핏 표면에 엔진 오일을 소량 묻힌 후 실험하였다. 실험 장치의 조건과 실험 방법은 건식 실험일 때와 동일하다. 실험후 마찰 계수의 변화는 Fig. 19와 같고 모든 data point는 3번 반복 실험 후 평균한 값이다.

Ball과 tappet의 접촉면이 건식일 경우는 미세요철 표면을 가공한 태핏이 가공하지 않은 태핏보다 작은 마찰 계수를 나타냈지만, 접촉면이 경계 윤활 상태일 때는 Fig. 19와 같이 마찰 계수가 거의 동일함을 알 수 있다. 이와 같이 경계 윤활 상태일 때는 미세요철 표면을 가공한 태핏과 가공하지 않은 태핏의 마찰계

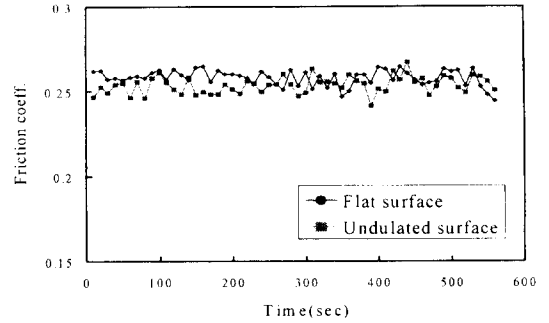
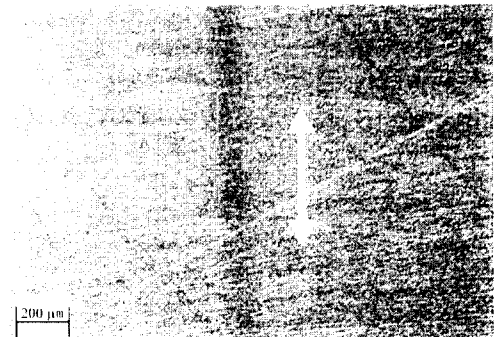


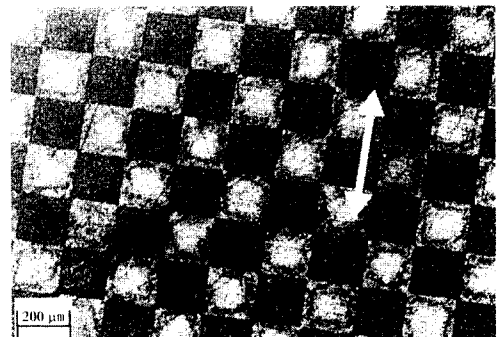
Fig. 19. Variation of friction coefficient with respect to time.

수는 거의 차이가 없다. 그러나 실험 후 태핏 표면을 비교해 보면 Fig. 20에서와 같은 차이를 나타낸다. 즉, 미세요철표면을 가공하지 않은 태핏은 Fig. 20(a)와 같이 wear track이 나타나지만 미세요철표면을 가공한 태핏의 표면은 Fig. 20(b)와 같이 wear track이 거의 확인이 되지 않는다.

이와 같은 결과로부터 미세요철표면은 접촉면이 경



(a) Flat surface



(b) Undulated surface

Fig. 20. Wear track after ball-on-reciprocator test in boundary lubrication condition.

계 윤활 상태일 경우, 마찰계수의 관점에서는 큰 효과를 나타내지 않았다. 그러나 마모 저감에 있어서는 분명한 효과를 나타내었다. 그러므로 만약 작동시간이 충분히 길었다면 마모뿐만 아니라 이들에 의한 마찰계수의 영향이 좀더 명확했을 것이라고 추측된다.

4. 결 론

미세요철표면을 이용한 태핏 표면의 마모 저감에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미세요철표면을 가공하지 않은 태핏으로 가속마모실험을 하였을 때, 태핏의 가운데 부분은 약 $6 \mu\text{m}$ 이상이 깎여져 나갔지만 미세 요철 pattern의 가공 깊이를 약 $5\sim 10 \mu\text{m}$ 정도로 미세요철표면이 가공된 태핏을 사용하였을 때는 태핏의 가운데 부분이 약 $3 \mu\text{m}$ 이하로 깎여져 나갔다. 이와 같은 미세요철표면이 가공된 태핏의 마모 감소는 첫째, 접촉면의 마모 입자가 요철 pattern의 골 사이로 고착되어 마모 입자로 인한 표면의 굽힘 마모가 감소되기 때문이고 둘째, 오일 film이 골 사이에 잔류하여 윤활유 공급의 효율을 향상시키기 때문이다.

2. 태핏의 끝단 부분은 다른 부위에 비하여 급격한 마모를 발생시킨다. 이는 태핏의 끝단 부분이 캠과의 반복적인 충격과 미끄럼 접촉으로 인하여 표면 하부의 균열 전파로 인한 표면 손상을 발생시키기 때문이다.

3. 건식 조건에서 미세요철표면을 가공한 태핏과 가공하지 않은 태핏을 사용하여 ball-on-reciprocator 실험을 하였을 때, 마찰 계수는 후자가 약 0.6 정도의 값을 가지고 전자는 약 0.5 정도로 낮은 값을 가진다.

4. 경계 윤활 조건에서 미세요철표면을 가공한 태핏과 가공하지 않은 태핏을 사용하여 ball-on-reciprocator 실험을 하였을 때, 마찰 계수는 두 경우 모두 약 0.25 정도로 흡사하였다. 하지만 후자의 경우 실험후 명확한 마모 트랙을 형성한 반면 전자의 경우는 마모 트랙이 거의 확인되지 않았다.

참 고 문 헌

1. Staron, J.T. and Willermet, P.A., "An Analysis of Valve Train Friction in Terms of Lubrication Principles," SAE Trans., Vol. 1, pp. 1625-1639, 1983.

2. Taylor, C.M., "Valve Train Lubrication Analysis," Tribology Series, 18 Vehicle Tribology, pp. 119-131, 1995.

3. Burak, A.G., "Tribological Study for a Low-Friction Cam/Tappet System Including Tappet Spin," STLE Tribology Transaction, Vol. 35, pp. 225-234, 1992.

4. Willermet, P.A. and Pieprzak, J., "Some Effects of Lubricant Composition and Tappet Rotation on Cam/Tappet Friction," Journal of Tribology, Vol. 111, pp. 683-691, 1989.

5. Willermet, P.A., Pieprzak, J., Dailey, D., "Tappet Rotation and Friction Reduction in a Center Pivot Rocker Arm Contact," Journal of Tribology ASME, Vol. 112, pp. 655-661, 1990.

6. Roylance, B.J., Bovington, C.H., Wang, G. and Hubbard, A., "Running-in Wear Behavior of Valve Train System," Tribology Series, 18 Vehicle Tribology, pp. 143-147, 1995.

7. Sun, D.C. and Roserberg, R.C., "An Experimental Study of Automotive Cam Lifter Interface Friction," ASLE Trasaction, Vol. 30, pp. 167-176, 1985.

8. Hamrock, B.J., Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill Inc., pp. 435-462, 1994

[APPENDIX A]

Hamrock [7]이 제시한 무차원식을 토대로 다음과 같이 계산하였다.

Fig. A는 정면과 측면에서 캠과 태핏의 접촉 상태를 나타내는데, 이를 바탕으로 식 (2)과 (3)의 무차원 변수들은 다음과 같이 구해진다.

R_x : effective radius in x direction, m

R_y : effective radius in y direction, m

D_x : diameter of contact ellipse along x axis

D_y : diameter of contact ellipse along y axis

E' : effective modulus of elasticity

ω : normal load

k : ellipticity parameter

α : ratio of radius

$$R_{ax} = R_{ax}(\theta) \quad R_{ay} = \infty$$

$$R_{bx} = 13.47 \text{ m} \quad R_{by} = 13.47 \text{ m}$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{ax}} + \frac{1}{R_{bx}}$$

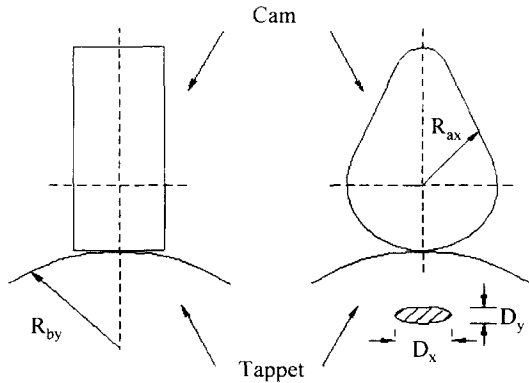


Fig. A. Contact between cam and tappet.

$$\therefore R_x = R_{ax}(\theta)$$

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{ay}} + \frac{1}{R_{by}}$$

$$\therefore R_y = R_{by} = 13.47 \text{ m}$$

여기서 α_r , k , E' 는 다음과 같이 구해진다.

$$\alpha_r = \frac{R_y}{R_x} = \frac{13.47}{R_x(\theta)}$$

$$k = \alpha_r^{2/\pi} = \left[\frac{13.47}{R_x(\theta)} \right]^{2/\pi}$$

$$E' = 2 \left(\frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right)^{-1} = 2.02 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

또한 normal load는 캠의 회전에 따라 밸브 스프링의 변위가 달라지므로 다음과 같이 캠의 회전각에 대한 함수로 나타낼 수 있다.

$$\omega_z = \omega_z(\theta)$$

이와 같이 구해진 값들을 바탕으로 식 (2), (3)의 변수들은 다음과 같이 구해진다.

$$D_x = 2 \left(\frac{6 \varepsilon \omega_z R_x}{\pi k E'} \right)^{1/3}$$

$$D_y = 2 \left(\frac{6 k 2 \varepsilon \omega_z R_x}{\pi E'} \right)^{1/3}$$

$$p = \frac{6 \omega_z}{\pi D_x D_y} \left[1 - \left(\frac{2x}{D_x} \right)^2 - \left(\frac{2y}{D_y} \right)^2 \right]^{1/2}$$