

엔진 캠/태핏 시스템의 토크 측정과 마찰·마멸 특성에 관한 연구

여창동(연세대학교 대학원), 김대은(연세대학교 기계공학과), 윤정의(대우자동차)

Torque Measurement and Tribological Characteristics of the Cam/Tappet System in an I.C. Engine

C. D. Yeo, D. E. Kim(Yonsei Uni.), J. E. Yun(Daewoo Motor Co.)

ABSTRACT

The operating torque and tribological characteristics of the cam/tappet system in an I.C. engine have an important effect on engine efficiency. In this paper, we measured the torque of cam/tappet system with respect to the oil temperature and camshaft speed to characterize the tribological behavior. Also, accelerated test was performed to analyze the wear characteristics of cam/tappet interface.

The torque of the cam/tappet system decreased with respect to camshaft speed and was not significantly affected by the oil temperature. The results of accelerated test showed that the running-in wear occurred during the tests and the center of the tappet was mainly damaged by the rolling and sliding friction.

Keywords : Friction coefficient(마찰 계수), Accelerated test(가속 실험), Slip-ratio(미끄럼률), Scuffing wear(긁힘 마멸), Elastohydrodynamic lubrication(탄성유체 윤활)

1. 서 론

엔진 내에서 자체적으로 에너지를 소산하는 요소는 여러 가지가 있으며, 그 중 가장 대표적인 것이 피스톤과 실린더 벽간의 마찰운동과 밸브 구동계에서의 접촉운동 등이 있다. 이전의 여러 연구에 의하면 피스톤/실린더 계에 의해 소모되는 에너지는 엔진 전체의 기계적 에너지 소모 중에서 약 75%를 차지한다고 보고된 바 있으며, 이 중 상당부분은 실린더 벽과 피스톤간의 마찰이 주요 원인으로 지적되고 있다. 또한 밸브 기구계의 경우 엔진구동 동력의 10~25%를 소비하고 있는 것으로 알려져 있으며, 이러한 에너지 소모량의 50%가량이 캠과 태핏간의 마찰에서부터 비롯된다고 한다. 이러한 에너지 소산작용은 엔진의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라

연비에도 영향을 미치고 나아가서는 엔진의 수명과 신뢰성에 관련되므로 이를 해결하기 위한 여러 방면의 연구 및 투자가 이루어지고 있다. 특히 최근에 저소음 고효율엔진에 대한 집중적인 관심이 모아지는 시점에서, 이들 소음 및 진동원은 결국 앞서 언급한 엔진내의 동력소비 요인들과 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 이를 해결하기 위해서는 엔진내의 각종 문제점들에 대한 체계적인 분류와 그에 따른 과학적인 연구가 요구되며, 마찰 및 마멸에 대한 근본적인 이해가 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 이러한 엔진내의 접촉하는 부품들 중에서 캠과 태핏간의 접촉운동시 발생하는 토크의 측정과 마찰·마멸 특성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 본론

2.1 실험 장치 및 방법

그림 1은 캠과 태핏사이의 작동토크 측정을 위한 전체적인 실험장치 구성도이다. 실험장치의 각 요소들은 시스템의 안정을 위해 정반위에 장착하였고, 작동시 발생하는 진동의 영향을 줄이기 위해 방진고무를 이용하여 정반을 지지하도록 하였다. 캠축의 구동은 벨트 구동시 발생하는 토크미터의 굽힘 영향을 방지하기 위해 모터축과 일직선상으로 연결하여 구동하였다. 축간 연결부는 회전시에 토크미터의 신호에 영향을 주는 편심을 감소시키기 위해 토크미터 양단에 베어링과 플렉시블 커플링으로 지지하였다. 캠축의 회전속도는 모터 제어기에서 조절하도록 하였다. 윤활유의 공급은 2개의 펌프를 사용하여 주입/배출을 하도록 하였고 윤활유의 온도는 온도제어기(temperature controller)와 열전대(thermocouple), 가열기(heater)를 사용하여 조절하였다. 또한, 실린더 헤드에 주입되는 오일의 압력은 압력 게이지에서의 압력값을 모니터링하여 조절하였다. 캠축 구동시 토크미터에서 나오는 신호는 스트레인 게이지 증폭기를 통해서 컴퓨터로 저장된다.

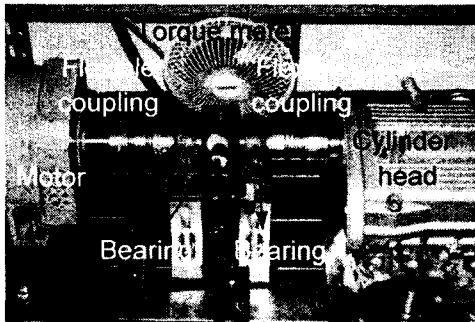


그림 1. 실험 장치 구성도

마멸실험을 위한 실험장치는 그림 1의 실험장치중 축간 연결부인 베어링, 토크미터, 커플링을 제거하고 모터축과 캠축을 바로 연결하여 구성하였다. 캠과 태핏의 마멸 가속조건을 위해서 캠과 태핏의 표

면은 실험전 알코올로 세척하여 엔진오일을 제거하였고 실험중 엔진오일은 공급하지 않았다. 실험에 사용된 재료와 실험조건은 표1, 2와 같다.

표 1 실험재료

캠축	T.I.G. remelt 주철
태핏	Steel (M35512)
엔진오일	SAE 7.5W30

표 2 실험 조건

토크 측정 실험	
캠축 회전속도(rpm)	300~2500
엔진오일 온도(°C)	25~95
가속 실험	
캠축 회전속도(rpm)	100, 200, 500, 700, 2500
작동시간(cycles)	60000, 480000, 1554000, 2175000

2.2 실험 결과 및 고찰

2.2.1 토크측정 실험 결과

(1) 캠 각도에 따른 토크의 변화

캠 로우브는 밸브스프링과 태핏에 의하여 캠 리프트에 따라 연속적으로 부하를 받는다. 캠 로우브의 기하학적 형상에 의해 작동토크는 캠 각도에 따라 그림 3과 같은 변화를 가진다.

이러한 토크의 변화 추이는 그림 2와 같은 캠/태핏 접촉 과정으로 설명할 수 있다. 즉, 그림 2(a)와 같은 상태를 캠 각도 0°로 정하면 그림 2(b)의 캠 각도 약 90°까지는 캠의 형상이 일정한 기본원 부분이 태핏과 접촉을 하게 되므로 전체 토크는 큰 변화를 가지지 않는다. 하지만 그림 2(c)의 캠 각도 약 90° 이상에서는 캠의 플랭크 부분과 노우즈 부분이 접촉을 하게 되므로 캠축은 시계방향(+)의 토크를 받는다. 그리고 그림 2(d)와 같이 캠과 태핏의 수직 접촉점이 지나면 캠 로우브

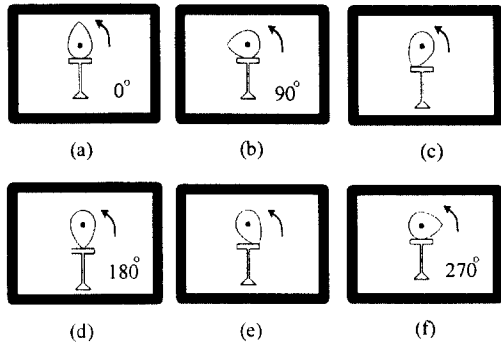


그림 2. 캠각도에 따른 캠과 태핏의 접촉 형태

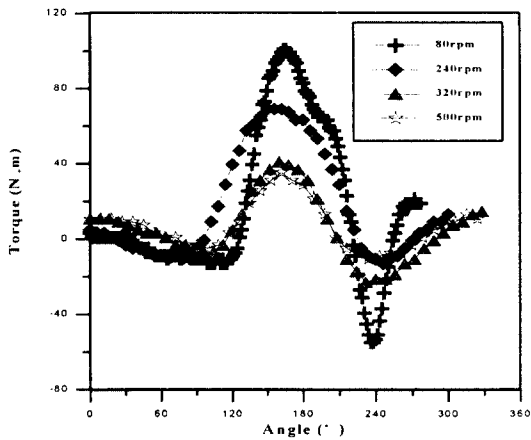


그림 3. 캠각도에 따른 토크의 변화

의 형상에 의해 캠축은 반시계방향(-)의 토크를 받고 이후 기본원이 접촉하게되는 캠 각도 270° 이후에는 다시 0에 가까운 토크값을 가지게 되는 것이다.

(2) 일정한 온도(65±5℃)에서 캠축의 회전속도에 따른 토크량의 변화

일정한 온도에서 캠축의 회전속도에 따른 토크량은 그림 4에서 나타나듯이 저속에서 최고 약 12N·m이고 고속에서 약 1.5N·m 정도로 속도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 캠/태핏 시스템의 토크량에 영향을 주는 인자는 캠의 기하학적 형상에 의한 영향과 캠/태핏 사이의 마찰력에 의한 영향으로 크게 나눌 수 있다. 그러면 그림 4와 같은 회전속도에 따른

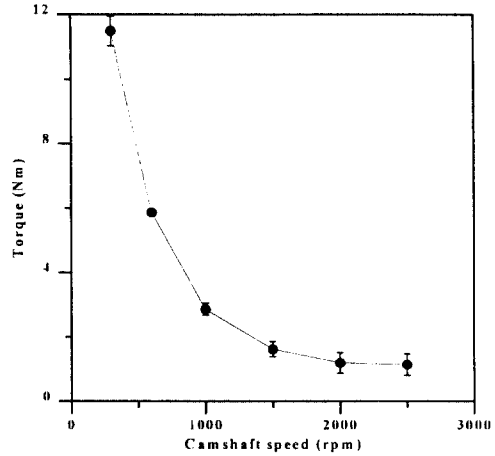


그림 4. 캠축의 회전속도에 따른 토크의 변화

토크량의 변화에 대한 각 인자의 영향을 고려할 때, 먼저 전자의 경우 캠의 기하학적 형상은 회전속도에 관계없이 항상 일정하므로 거의 영향을 미치지 못한다. 후자의 경우 캠축의 회전속도에 따라서 밸브스프링 부하는 일정하지만 캠/태핏 접촉부의 유막두께가 변하므로 일정하지 않다. 즉, 캠/태핏 사이의 윤활상태를 탄성유체윤활(elastohydrodynamic-lubrication)이라 면, 캠/태핏사이의 상대선속도가 증가할수록 마찰력은 감소하게 된다. 그러므로 그림 4와 같은 토크량의 변화는 회전속도에 따른 마찰력의 변화 경향과 같다고 생각할 수 있다.

(3) 일정한 속도(500±5rpm)에서 오일 온도에 따른 토크량의 변화

캠축의 회전속도를 약 500rpm으로 일정하게 하고, 엔진오일의 온도를 25~95℃로 변화시킬 때 캠/태핏사이의 토크량은 그림 5에서와 같이 약 6N·m로 거의 변화가 없는 경향을 나타낸다. 앞에서 언급하였듯이 캠/태핏 사이의 토크량은 그 마찰력에 의해 지배된다. 오일의 온도가 변할 때 캠/태핏 사이의 마찰력은 두 가지 요인에 영향을 받는다. 하나는 오일의 점성에 의한 영향이고 다른 하나는 윤활상태에 따른 유막두께의 영향이다. 전자의 경우, 오일

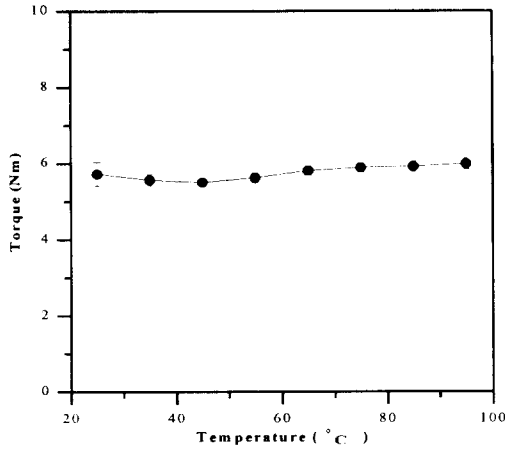


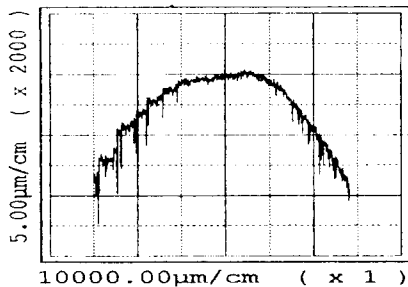
그림 5. 오일의 온도에 따른 토크의 변화 유막두께의 영향이다. 전자의 경우, 오일

의 온도가 증가하면 점도가 감소하므로 마찰력을 감소시키는 역할을 한다. 하지만 후자의 경우, 캠/태핏 사이의 윤활상태를 탄성유체 윤활이라고 하면 오일의 온도가 증가함에 따라 유막두께는 점점 얇아지고 따라서 마찰력은 증가하게 된다. 그러므로 캠축의 회전속도가 일정한 상태에서 오일의 온도를 변화시키면 마찰력은 이러한 두 요인이 서로 상쇄되어 그림 5와 같이 거의 변화를 나타내지 않는다.

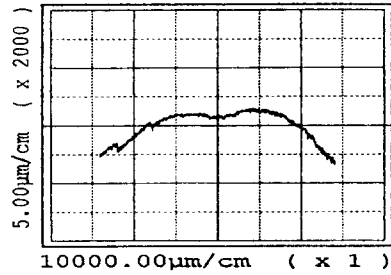
2.2.2 가속실험후의 태핏 마멸 결과

(1) 태핏 전면의 마멸

태핏은 편마멸을 방지하기 위해 그림 6(a)와 같이 태핏 전면이 큰 곡면을 가지도록 제작된다. 하지만 가속실험 후의 태핏 전면은 그림 6(b)과 같이 곡면의 정점 부분이 움푹 패인 분화구 형상의 마멸 현상을 일으킨다.



(a) 실험전 태핏 전 표면



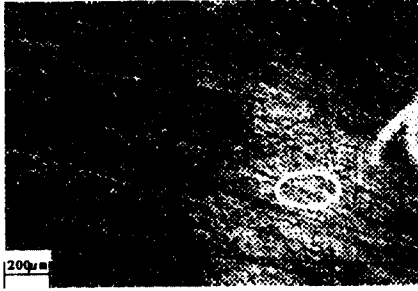
(b) 700rpm, 155400cycles후의 태핏 표면

그림 6. 가속실험후 태핏 표면의 마멸 진행

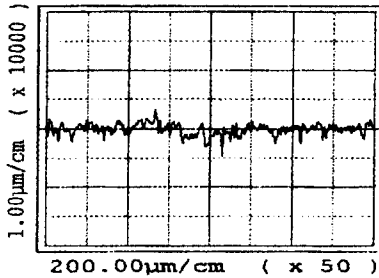
이러한 마멸 진행은 캠과 태핏의 접촉 메커니즘에서 다음의 두 가지를 고려하면 이해할 수 있다. 첫째, 캠의 기하학적 형상에 의해 태핏의 가운데 부분은 캠 로우브의 기본원, 플랭크, 노우즈부분과 지속적인 접촉을 가지지만 중간부분과 끝단 부분은 플랭크와 노우즈에서 순간적인 접촉을 이룬다. 둘째, 캠 노우즈가 태핏에 수직으로 접촉하는 앞/ 뒤 부분에서 마찰력이 가장 큰 값을 가진다. 따라서, 이러한 두 요인으로 인하여 가속실험 후 태핏 전면은 그림 6(b)와 같이 가운데 부분이 움푹 패인 분화구 형상의 마멸진행을 나타낸다.

(2) 태핏의 각부위별 마멸

실험전 태핏의 표면은 그림 7(a), (b)에서 나타나듯이 제작시 연삭과정에서 발생한 미세요철들이 전 표면에 고르게 분포되어있다. 하지만 가속실험 후 태핏의 표면은 부위에 따라 특징적인 마멸형상을 나타낸다. 먼저 가운데부분의 경우 그림 8(a)에서와 같이 태핏 중심을 기준으로 원형 띠 형상의 마멸 흔적이 일정하게 나타나고, 또한 중심방향으로 긁힘 마멸 (scuffing wear) 흔적이 조밀하게 나타난다. 이것은 캠과 태핏이 접촉상태에서 같이 회전하게 될 때 접촉점들간에 선속도가 동일하지 않아서 실제 접촉운동 형태

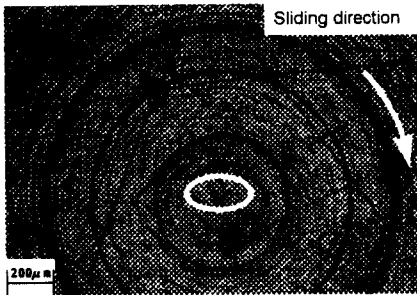


(a) 가운데 부분의 표면 형상

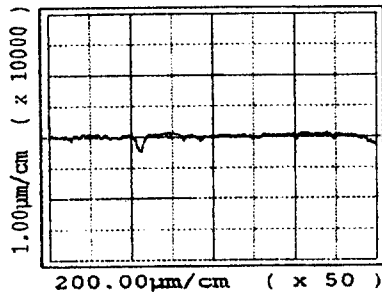


(b) 가운데 부분의 표면거칠기($Ra=0.11\mu m$)

그림 7. 실험전 태핏의 표면



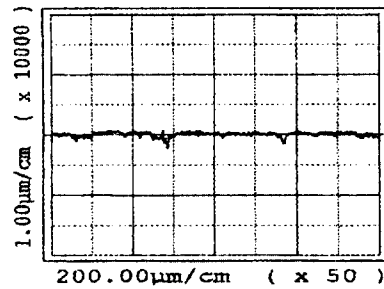
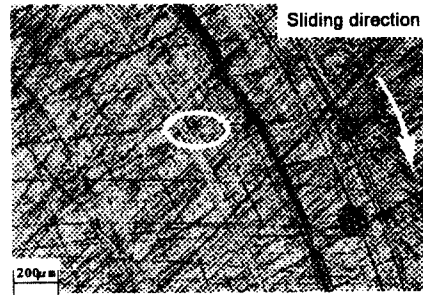
(a) 가운데 부분의 표면의 형상



(b) 가운데 부분의 표면거칠기
($Ra=0.029\mu m$)

그림 8. 2500rpm, 60000cycles후의 태핏
가운데 부분

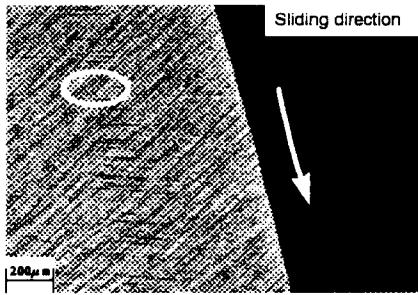
어나기 때문이라고 추측된다. 즉, 캠과 태핏의 접촉점들중 접촉압력이 가장 큰 점이 태핏의 회전을 유발시키는데 이 점에서는 캠과 태핏의 선속도가 거의 동일한 구름운동이 일어나고, 이때 구름운동은 완전한 구름운동이 아닌 어느 정도의 미끄럼률(slip ratio)을 가지게 되어 이것에 의해 원형 띠 형상의 마멸흔적이 나타난다. 그리고, 최대 접촉압력 지점을 기준으로 태핏 중심쪽과 바깥쪽에서는 태핏의 반경차이에 의해 캠과 태핏의 선속도가 달라지기 때문에 미끄럼 운동이 발생하게 되고, 이것으로 인하여 태핏 중심방향으로의 굽힘 마멸이 발생한다.



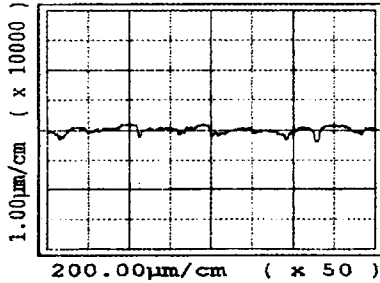
(b)중간부분의 표면거칠기($Ra=0.033\mu m$)

그림 9. 2500rpm, 60000cycles후의
태핏 중간 부분

태핏 중간부분과 끝단 부분의 마멸 진행은 그림 9(a)와 그림10(a)에서 나타나듯이 캠과의 접촉시간이 짧기 때문에 가운데 부분처럼 확연한 마멸흔적은 나타나지 않는다. 단지, 중간부분의 경우 원형의 띠형상 마멸흔적과 굽힘 마멸흔적이 미소하게 나타나고, 끝단부분의 경우 부분적으로 굽힘 마멸흔적이 나타난다.



(a) 끝단 부분의 표면 형상



(b) 끝단 부분의 표면거칠기(Ra=0.060 μm)
그림 10. 2500rpm, 60000cycles후의
태핏 끝단 부분

이러한 태핏 표면의 전체적인 마멸 과정은 표면거칠기 형상을 나타내는 그림 7(b)~그림 10(b)를 비교해 보면 알 수 있다. 즉, 실험전 각 부위의 미세요철들이 60000cycles후에는 거의 깎여져 나가서 매끄러운 표면을 형성하는 런인 현상(running-in wear)을 일으키고 이후 계속적인 작동이 이루어지면 표면이 다시 거칠어지는 과정을 나타낸다.

3. 결론

- (1) 캠축의 회전속도에 따른 토크의 평균값은 회전속도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 즉, 캠축의 회전속도가 약 1000rpm까지는 감소폭이 크고 약 2000rpm 이후부터는 토크가 거의 일정하게 나타난다.
- (2) 엔진 오일의 온도에 따른 토크의 평균값은 캠/태핏 접촉부의 마찰력에 있어서 오일의 점도와 마찰계수의 복합적인 영향

으로 인하여 거의 변화가 없다.

(3) 캠의 회전각에 대한 토크는 캠의 기하학적인 형상에 따라 캠 노우즈가 태핏을 수직으로 접촉하는 앞/ 뒤 지점에서 최대값을 나타낸다. 하지만 캠의 기본원이 접촉하는 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 동안은 토크가 큰 변화를 나타내지 않는다.

(4) 실험전 큰 곡률을 가지는 태핏 표면은 가속 상태에서 실험을 하였을 때 먼저 가운데 부분이 집중적인 마멸이 발생하고 이후에 전 곡면이 깎여져 나가는 과정을 나타낸다. 태핏의 부위별 마멸특성은 가운데 부분의 경우 환형의 띠 형상을 가지는 마멸 형태가 지배적이고 이 외에 반경 방향의 함입 마멸 흔적도 형성된다. 중간부분과 끝단 부분의 경우 확연한 마멸특성은 나타나지 않고 단지 부분적으로 굵힘 마멸흔적이 나타난다.

5. 참고 문헌

- [1] Taylor, C. M., "Valve Train Lubrication Analysis", Tribology Series, 18 Vehicle Tribology, pp. 119-131, 1995.
- [2] Sun, D. C. and Roserberg, R. C., "An Experimental Study of Automotive Cam Lifter Interface Friction" ASLE Transaction, Vol. 30, pp. 167-176, 1985.
- [3] Roylance, B. J, Bovington, C. H., Wang and Hubbard, A., "Running-in Wear Behavior of Valve-Train System", Tribology Series, 18 Vehicle Tribology, pp. 143-147, 1995.
- [4] Hamrock, B. J., "Fundamentals of fluid film lubrication", McGraw-Hill Inc., pp. 2-11, 40-43, 435-462.
- [5] Burak, A. G., "Tribological study for a low-friction cam/tappet system including tappet spin", STLE Tribology Transaction, Vol. 35, pp. 225-234, 1992.
- [6] Hong, T., Saka, Suh, N. P., "Boundary lubrication studies on undulated titanium surface", STLE Tribology Transaction, Vol. 32, pp. 289-296, 1989.