

엔진 마찰 특성에 미치는 부수적 인자의 영향

조명래[†] · 김중수* · 오대윤* · 한동철**

(2002년 3월 23일 접수, 2002년 7월 15일 심사완료)

The Effects of Additional Factors on the Engine Friction Characteristics

Cho, Myung-Rae, Kim, Joong-Soo, Oh, Dae-Yoon and Han, Dong-Chul

Key Words : Friction Loss(마찰 손실), Pumping Loss(펌핑 손실), Mechanical Friction loss(기계적 마찰 손실), Strip-Down(스트립 다운)

Abstract

This paper reports on the effects of additional factors on the engine friction characteristics. The total friction loss of engine is composed of pumping and mechanical friction loss. The pumping loss was calculated from the cylinder pressure, and the mechanical friction loss was measured by strip-down method under the motoring condition. The various parameters were tested. The engine friction loss was much affected by oil and coolant temperature. The low viscosity oil was very effective to reduce the friction loss, and friction modifier was very useful to reduce the friction loss at lower engine speed. The engine friction loss was varied with engine running time because of surface roughness decreasing and oil degradation. To prevent oil-churning effect, it was very important to maintain the proper oil level. The presented results will be very useful to understand friction characteristics of engine.

기호설명

- n_r : 행정 당 크랭크 회전수
- P : 실린더 압력, kPa
- T_m : 마찰 토크, Nm
- V : 실린더 1기통의 체적, m^3
- V_d : 전체 실린더 체적, m^3

1. 서론

최근 환경 오염에 대한 각국의 규제 강화 및 유가 상승 등에 따른 경제적 요인에 의해 저연비 차량에 대한 시장의 요구는 점차 확대되고 있다. 차량의 연비 개선을 위해서는 샤시, 엔진 및 트랜스미션 등 많은 분야에서의 노력을 필요로 한다. 차량의 동력원인 엔진의 경우 연소 효율 개선을

위한 다양한 노력이 진행되는 동시에 엔진 동력 손실의 약 15~20%를 차지하는 마찰 손실을 줄이려는 노력 또한 활발히 진행되고 있다. 엔진에서 발생하는 마찰 손실을 줄이는 것은 엔진의 기계적 효율을 개선하는 것으로, 특히 저속의 부분 부하 조건에서 엔진의 마찰 손실 10%를 저감하면 엔진의 연비는 약 1~1.5% 정도 개선되는 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁾

통상 엔진 모터링 시험을 통해 평가되는 엔진의 마찰 손실(tFMEP : total frictional mean effective pressure)은 엔진 각 구동 요소의 순수한 기계적 마찰 손실(FMEP : frictional mean effective pressure)과 실린더 내에서 공기의 흡입, 압축에 의한 펌핑 손실(PMEP : pumping mean effective pressure)로 구성된다. 엔진 구동 요소의 순수한 기계적 마찰 손실은 피어링 상태에서는 측정이 불가능하므로 모터링 운전 상태에서 엔진 구동 요소를 하나씩 제거 시켜가며 엔진의 마찰 토크를 측정하는 스트립 다운(strip-down)법을 주로 사용한다.^(2,3) 보통 엔진의 기계적 마찰 손실에 가장 큰 영향을 미치는 구동 요소는 링(ring)과 스커트(skirt) 및 커넥팅 로드 베

[†] 책임저자, 회원, 현대자동차 파워트레인연구소

E-mail : formell@hyundai-motor.com

TEL : (031)369-4574 FAX : (031)369-4503

* 현대자동차 파워트레인연구소

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

어링(connecting-rod bearing)으로 구성된 피스톤 결합체이다. 이 부분의 손실은 전체 기계적 마찰 손실의 약 40% 정도를 차지한다. 한편 실린더 내의 피스톤 왕복 운동에 의한 펌핑 손실은 연소실 내의 압력 측정을 통해 구할 수 있는데, 전체 마찰 손실에서 펌핑 손실이 차지하는 비중은 엔진간 편차는 있으나 대략 30% 정도에 달한다.

엔진의 마찰 손실은 각 구동 요소의 치수 및 형상 등 기본적인 설계 인자에 의해 가장 큰 영향을 받는다. 예를 들어 피스톤 링의 마찰 특성이 가장 큰 영향을 미치는 설계 인자는 링 장력이며,^(4,5) 밸브트레인 시스템의 마찰은 구동 형식 및 밸브 스프링 강성에 의해 지배적인 영향을 받는다.^(6,7) 한편 베어링의 마찰 손실에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 베어링 직경이다.⁽⁸⁾ 따라서 엔진 베어링, 피스톤, 밸브트레인 등의 설계 인자가 엔진 마찰 특성에 미치는 영향에 대해 많은 연구가 이루어졌다. 그러나 엔진의 마찰 특성은 이러한 기본적인 설계 인자 뿐 아니라 엔진의 회전 속도, 냉각수 온도 및 오일 온도, 오일 양 등의 운전 조건과 엔진의 길들이기 시간 등 여러 인자의 영향을 받는다.

본 연구에서는 엔진의 설계 변수 외의 기타 인자들이 엔진 마찰 특성에 미치는 영향을 규명하기 위한 실험을 수행하고 그 결과를 나타내었다. 본 연구를 통해 제시된 결과들은 엔진의 마찰 평가를 위한 시험 기준으로 활용될 수 있을 뿐 아니라, 엔진 마찰을 최소화 하기 위한 운전 조건의 설정을 위해 중요하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 엔진 시험

Fig. 1 에는 본 시험에 사용된 장치의 개략도를 나타내었다. 엔진은 110kW 급 DC 다이내모미터(dynamometer)에 의해 구동되며 엔진의 냉각수 및 오일 온도는 각각 별도의 쿨러에 의해 일정 온도로 조절된다.

일반적으로 엔진의 마찰 손실을 평가하는 방법으로는 피어링 상태에서 엔진의 연소압과 구동 토크를 측정하여 마찰 손실을 구하는 방법과 모터링 상태에서 연소실 압력과 마찰 토크를 측정하여 마찰 손실을 구하는 방법이 있다. 피어링 상태에서 마찰 손실을 구하는 방법은 엔진 전체의 마찰 손실 수준 평가는 가능하나 엔진 구동 요소의 마찰 손실을 평가할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 모터링법을 이용하여 엔진의 마찰 손실 수준을 평가하였다.

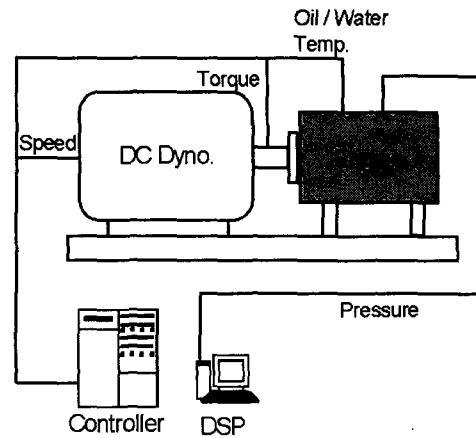


Fig. 1 Schematic diagram of engine test system

엔진에서 발생하는 전체 마찰 손실(tFMEP)을 모터링 운전 상태에서 엔진의 마찰 토크를 측정하여 구하였으며 펌핑 손실(PMEP)은 모터링 운전 상태에서 연소실 압력의 측정을 통해 구하였다. 측정된 마찰 토크 및 연소실 압력으로부터 다음과 같은 식을 이용하여 마찰 손실 및 펌핑 손실을 구할 수 있다.

$$tFMEP = - \frac{6.28 \cdot n_r \cdot T_m}{V_d} \quad (1)$$

$$PMEP = \frac{1}{V_d} \int pdV \quad (2)$$

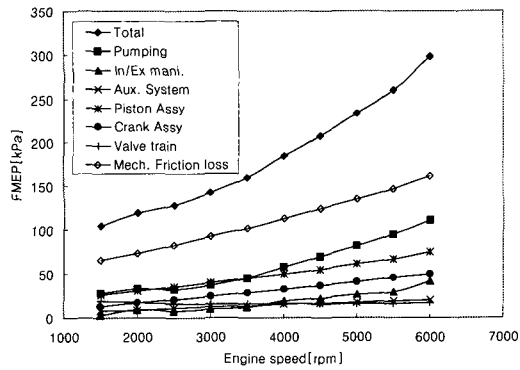
한편 각 구동 요소의 마찰 손실은 모터링 운전 상태에서 엔진 구동 요소를 차례로 제거하면서 마찰 토크를 측정하여 구할 수 있다. 각 요소의 마찰 토크를 측정하는 일반적인 순서는 다음과 같다.

1. 엔진 전체의 마찰 토크 및 연소실 압력을 측정한다.
2. 흡기 및 배기 매니폴드를 제거한 상태에서 엔진 마찰 토크를 측정한다.
3. 워터 펌프와 전동기 등 보조 기구류를 제거한 상태에서 마찰 토크를 측정한다.
4. 밸브트레인을 제거하고 실린더 헤드를 장착한 상태에서 마찰 토크를 측정한다.
5. 피스톤을 제거한 상태에서 마찰 토크를 측정한다.
6. 밸브트레인을 장착한 상태에서 마찰 토크를 측정한다.

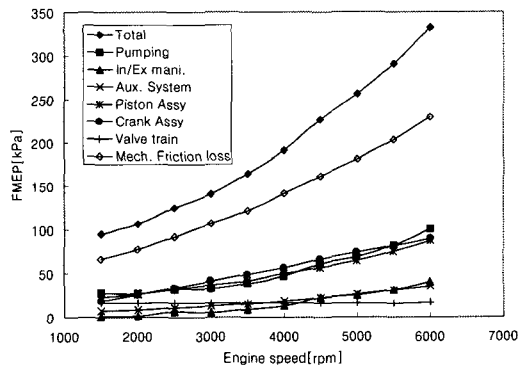
피스톤계의 마찰 손실은 4 단계와 5 단계의 마찰 차이로부터 구할 수 있고, 단계 5의 마찰 손실은 크랭크 샤프트계의 마찰 손실이 된다. 밸브트레인 시스템의 마찰 손실은 단계 6과 5의 차이로

Table 1 List of engine test

항목	내용	비고
길들이기	40H	시간별 마찰측정
오일 온도	80, 90, 100°C	냉각수 90°C 유지
오일	Oil A (7.5W30) Oil B (5W20)	기본 운전후 엔진 세척
첨가제	FM	기본 운전후 엔진 세척
엔진	A, B, C, D	1.3~2.0l In Line- 4
냉각수 온도	70, 80, 90°C	오일 90°C 유지
오일 양	2.5 ~ 5 l	Max level: 4l
회전 속도	1500-6000rpm	-



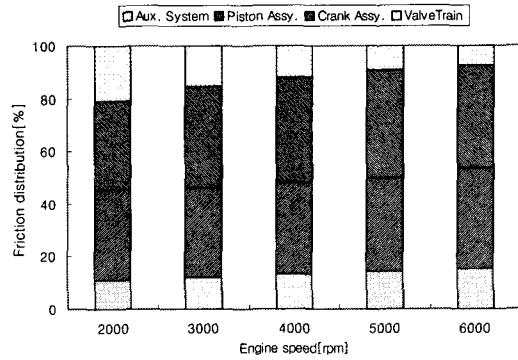
(a) Eng. B



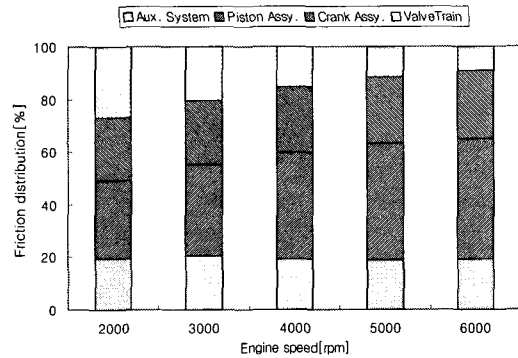
(b) Eng. C

Fig. 2 Measured friction loss

부터 구할 수 있다. 한편 보조 기구류의 기계적 마찰 손실은 단계 2 와 3 의 차이로부터 구할 수 있다. 엔진의 순수한 기계적 마찰 손실은 위에서 언급한 각 구동부의 마찰 손실을 더함으로써 구할



(a) Eng. C



(b) Eng. D

Fig. 3 Friction loss distribution in each elements

수 있다.

Table 1 에는 본 연구에서 수행한 시험 항목을 정리하여 나타내었다. 엔진 운전 시간에 따른 마찰 변화 효과를 고찰하기 위해 최대 40 시간 동안 전부하 조건에서 파이어링 운전을 수행한 후 마찰 시험을 수행하였다. 길들이기 운전 중에는 매 일정시간 마다 모터링 운전을 통해 마찰을 측정하였다. 각 마찰 측정시에는 엔진 오일 및 냉각수 온도를 일정하게 유지하였다. 오일의 종류 및 첨가제에 따른 시험시에는 엔진에 대한 시험 오일 및 첨가제의 적응성을 높이기 위해 최소 10 시간 최대 30 시간 동안 파이어링 상태로 길들이기 운전을 수행하였다. 또한 오일 및 첨가제 교체시 디젤 엔진유를 이용하여 기존 오일 및 첨가제에 대한 세척 작업을 수행하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 기본 마찰 특성

본 시험에 사용된 엔진의 전체 마찰 손실 및 각 구성 요소의 마찰 분배 특성에 대한 측정 결과를 Fig. 2 에 나타내었다. 시험 중 오일 및 냉각수

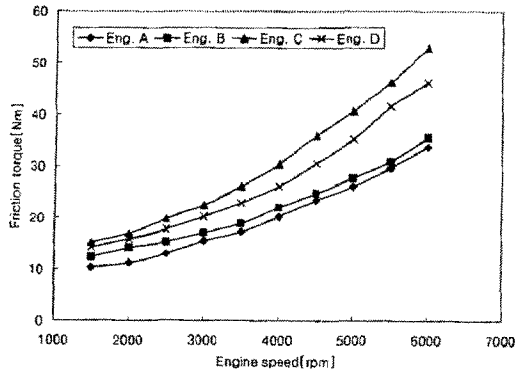


Fig. 4 The effect of engine volume on the total friction loss

온도는 90°C 를 유지하였다.

엔진의 회전 속도가 증가할수록 밸브트레인을 제외한 각 구동 요소의 마찰 손실이 증가하는 경향을 나타낸다. 밸브트레인 시스템의 경우에는 혼합 윤활 영역에서 작동하므로 회전 속도가 증가할수록 마찰은 감소하는 경향을 나타내게 된다. 전체 마찰 손실에서 흡배기에 의한 펌핑 손실이 약 30% 정도 차지함을 알 수 있으며, 순수 기계적 마찰 손실에서 피스톤계와 크랭크계의 마찰 손실이 큰 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 각 구동 요소의 기계적 마찰 손실 분배 비율을 Fig. 3 에 나타내었다.

3.2 엔진 배기량의 영향

엔진 배기량에 따른 절대적인 마찰 크기를 비교하기 위해 마찰 토크 측정 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 배기량이 증가할수록 절대적인 마찰 토크가 급격히 증가하는데, 이는 각 무빙계의 치수 및 중량 등과 밀접한 관계가 있다. 또한 동일 배기량(C, D) 내에서도 각 구동부의 방식 및 치수 변화에 따라 마찰 토크가 차이가 남을 알 수 있다.

3.3 냉각수 온도의 영향

냉각수 온도에 따른 펌핑 손실 및 전체 마찰 손실 측정 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 측정된 결과는 엔진이 정상 상태에 도달했을 때의 결과이다. 냉각수 온도가 증가할수록 펌핑 손실 및 전체 마찰 손실이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 냉각수 온도가 증가할수록 오일 온도는 증가하게 되며 전체 마찰 손실은 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 냉각수 온도 및 오일 온도 상승에 따른 실린더 블록의 열변형에 의해 연소실 체적이 다소 증가하게 되므로 펌핑 손실 역시 감소하게 되나 기계적 마찰 손실 감소에 비해서는 작은 수준이다.

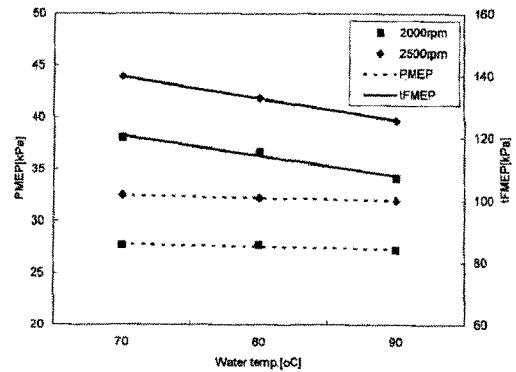


Fig. 5 The effect of cooling water temperature on the pumping and total friction loss at the steady state (Eng. C)

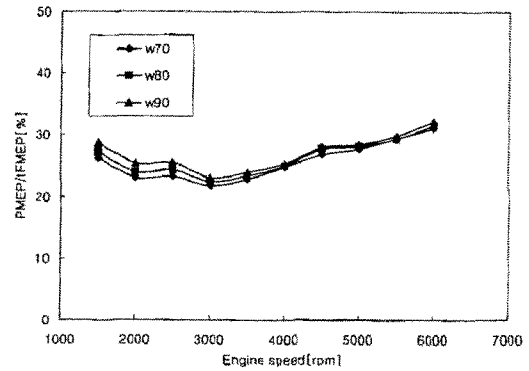


Fig. 6 The pumping loss ratio with cooling water temperature (Eng. C)

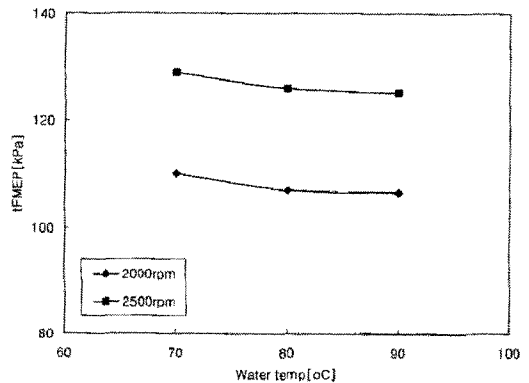


Fig. 7 The effect of cooling water temperature in the case of constant oil temperature (Eng. C)

냉각수 온도에 따라 전체 마찰 손실에서 펌핑 손실이 차지하는 비율을 Fig. 6 에 나타내었다. 냉각수 온도가 증가할수록 펌핑 손실은 감소하나 전체 마찰 손실에서 차지하는 비중은 증가한다. 이는 온도 증가에 따른 기계적 마찰 손실 감소량이 펌핑 손실 감소량보다 크기 때문에 나타나는 현상이다.

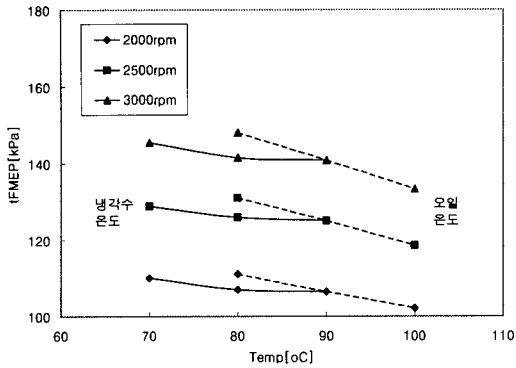


Fig. 8 The effect of oil temperature on the total friction loss (Eng. C)

한편 각 냉각수 온도에서 오일 온도를 90°C 로 일정하게 유지했을 경우의 마찰 손실 측정 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 오일 온도가 일정함에도 불구하고 마찰 손실이 다소 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이로부터 냉각수 온도에 따른 금속면 온도 변화가 엔진의 마찰 특성에 영향을 미침을 알 수 있다.

3.4 오일 온도의 영향

냉각수 온도를 90°C 로 일정하게 유지한 상태에서 오일 온도를 일정하게 증가시켜 가며 전체 마찰 손실을 측정된 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 벨트트레이를 제외한 대부분의 엔진 구동 요소는 유체 윤활 상태에서 작동하므로, 오일 온도가 증가할수록 점성 저하에 따라 엔진 마찰이 감소하는 경향을 나타낸다. 냉각수 온도 변화 결과와 비교할 때, 엔진 마찰은 오일 온도 증가에 더욱 크게 반응함을 알 수 있다.

3.5 길들이기 영향

엔진의 운전 시간에 따른 길들이기 효과의 영향을 Fig. 9 에 나타내었다. 길들이기 효과는 운전 시간에 따른 표면 조도 감소 및 엔진 오일의 열화에 기인하여 발생한다. 결과에서 보듯 시간이 지나면서 엔진 마찰을 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 표면 조도의 감소와 관련이 있다. 그러나 일정 운전 시간이 지나면 다시 증가하는 경향을 나타내는데 이는 엔진 오일의 열화에 따른 오일 물성치의 변화와 관련이 있는 것으로 판단된다. 또한 엔진에 따라 길들이기 동안의 마찰 손실 변화의 패턴이 상이함을 알 수 있다. 시험 엔진 A 의 경우 40 시간 운전 후 2000rpm 에서 전체 마찰 손실은 약 15%, 엔진 C 의 경우에는 약 7% 감소하였다.

3.6 오일 점도 및 첨가제의 영향

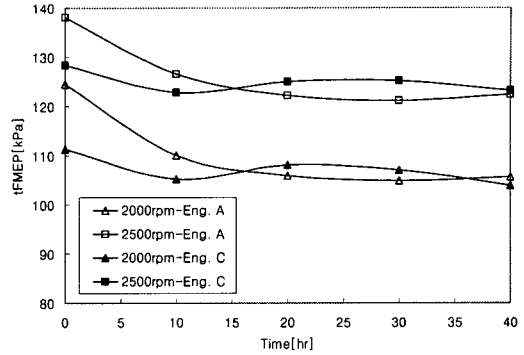


Fig. 9 The effect of running time on the total friction loss

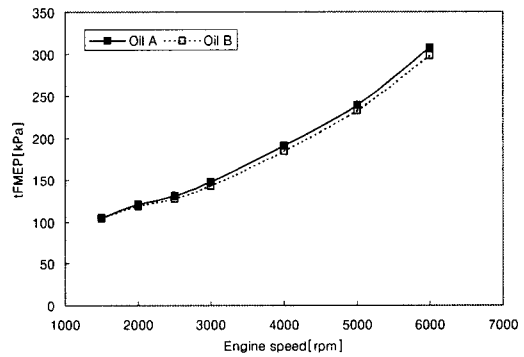


Fig. 10 The effect of oil viscosity grade (Eng. B)

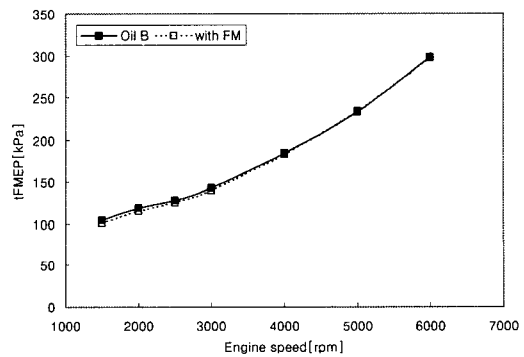


Fig. 11 The effect of friction modifier (Eng. B)

엔진 오일의 점도 등급 및 오일 및 연료 첨가제의 영향을 Fig. 10~11 에 나타내었다. 저점도 오일을 사용할 경우 점성 마찰 감소에 의해 전체 엔진 마찰은 거의 전 영역에 걸쳐 0.5~4% 감소하는 경향을 나타낸다. 특히 유체 윤활 특성이 지배적인 고속 영역에서의 마찰 감소 효과가 크다.

엔진 오일에 마찰 조정제 (friction modifier)를 첨가한 경우 전 운전 영역에 걸쳐 0.5~4% 정도의 마찰 저감 효과를 보였으나 저속에서 그 효과가

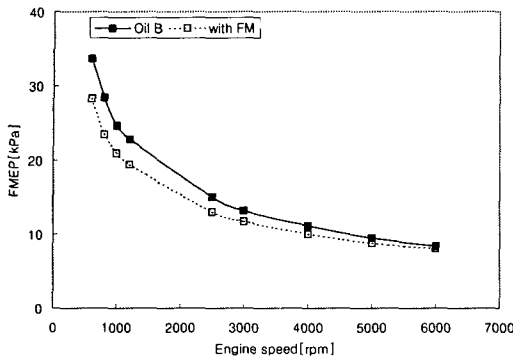


Fig. 12 The effect of friction modifier on the friction loss of valve train (Eng. B)

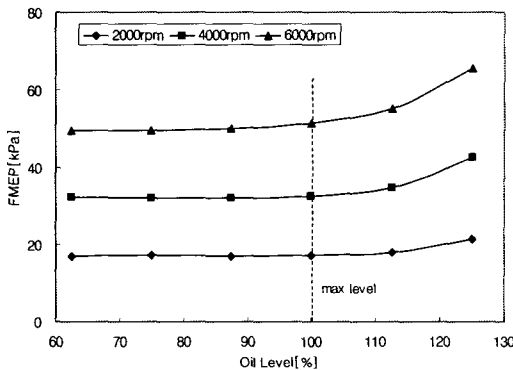


Fig. 13 The effect of the supply oil level on the friction loss of crank assembly (Eng. B)

크게 나타났다. 이는 주로 혼합 윤활 영역에서 작동하는 밸브 트레인계의 마찰 저감에 기인하는 것으로 판단된다. 마찰 조정제 첨가 여부에 따른 밸브 트레인계의 마찰 측정 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 저속 영역에서 마찰 조정제에 의한 마찰 저감 효과가 크게 발생함을 알 수 있다.

3.7 오일 양의 영향

오일 팬 내의 오일 양에 따른 크랭크 샤프트계 마찰 변화를 Fig. 13에 나타내었다. 오일 양 100%는 오일 레벨 게이지(level gage)상의 최대 위치로 본 시험에서는 4리터를 의미한다. 레벨 게이지 상의 최대 위치까지는 크랭크 샤프트계의 마찰 손실은 거의 일정 수준을 유지하나, 공급 오일 양이 그 이상이 되면서 급격히 증가하는 경향을 보이며 회전 속도가 증가할수록 그 증가 폭은 커진다. 이는 크랭크 샤프트가 회전하면서 샤프트의 밸런스 웨이트가 오일 팬 내의 오일을 쳐서 발생하는 처닝(churning) 현상에 의한 것이다. 따라서 적정 수준의 오일 레벨을 유지하는 것이 엔진의 마찰 손실을 줄이고 연료 소모를 줄이는데 효과적이라는

것을 알 수 있다.

4. 결론

설계 변수를 제외한 부수적인 인자들이 엔진 마찰에 미치는 영향을 살펴보기 위해 다양한 인자를 고려한 시험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 시험 조건 범위 내에서 냉각수 온도 및 오일 온도의 증가는 기계적 마찰 손실 뿐 아니라 펌핑 손실의 감소를 유발한다.
- (2) 오일 온도가 냉각수 온도 변화에 비해 엔진 마찰에 미치는 영향이 크다.
- (3) 오일 온도 및 냉각수 온도가 증가할수록 전체 마찰에서 펌핑 손실이 차지하는 비중이 증가한다.
- (4) 저점도 오일의 사용은 엔진 마찰을 줄이는데 효과적이다. 오일에 첨가되는 마찰 조정제는 밸브 트레인계 마찰 저감에 효과적이다.
- (5) 엔진의 운전 시간에 따라 엔진 마찰은 표면 조도 감소 및 오일 열화 등에 따라 감소 또는 증가하는 경향을 보인다.
- (6) 적절한 오일 수준을 유지하는 것이 마찰 저감 및 연비 개선에 유리하다.

참고문헌

- (1) Kim, W. Q., Seo, S. H., Kang, K. P. and Oh, D. Y., 2001, "Development of Low Viscosity Engine Oil," 2001 Research Paper Conference in Hyundai Motor
- (2) Hoshi, M., 1984, "Reducing friction losses in automobile engines," *Tribology International*.
- (3) Kovach, J. T., Tsakiris, E. A. and Wang, L. T., 1982, "Engine Friction Reduction for Improved Fuel Economy," SAE820085.
- (4) Wakuri, Y., Hamatake, T., Soejima, M. and Kitahara, T., 1995, "Study on the Mixed Lubrication of Piston Rings in Internal Combustion Engine," *J. of JSME*, 61(538), Part C, pp. 1123-1128.
- (5) Kim, J. Y., Cho, M. R., Kim, J. W. and Han, D. C., 2002, "Friction Characteristics of Piston Ring Pack with Consideration of Mixed Lubrication: Parametric Investigation," *KSME Int. Journal*, Vol. 16, No. 4, pp. 468-475.
- (6) Kim, J. Y., Han, D. C. and Cho, M. R., 2001, "The Effects of Design Parameters on the Friction Characteristics in the Valve Train System," *KSTLE Int. Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 75-79.
- (7) Paranjpe, R. S. and Gecim, B. A., 1992, "Comparative Friction Assessment of different Valve Train Types Using the FLARE CODE," SAE920491.
- (8) Ogita, Y., Niwa, K. and Tanaka, T., 1988, "Measurement of Bearing Friction Loss Under Dynamic Load," SAE880547.