

회전 라이너를 이용한 엔진 마찰저감

주 신 혁^{*1)} · 김 명 진¹⁾ · Ronald D. Matthews¹⁾ · 전 광 민²⁾

텍사스 어스틴 대학교 기계공학과¹⁾ · 연세대학교 기계공학과²⁾

Engine Friction Reduction Through Liner Rotation

Shinhyuk Joo^{*1)} · Myungjin Kim¹⁾ · Ronald D. Matthews¹⁾ · Kwang-Min Chun²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, University of Texas at Austin, Austin 78712, U.S.A.

²⁾Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 134-100, Korea

(Received 28 February 2005 / Accepted 18 November 2005)

Abstract : Cylinder liner rotation is a new concept for reducing piston assembly friction in the internal combustion engine. The purpose of cylinder liner rotation is to reduce the occurrence of boundary and mixed lubrication friction in the piston assembly. This paper reports the results of experiments to quantify the potential of the rotating liner engine. A GM Quad-4 SI engine was converted to single cylinder operation and modified for cylinder liner rotation. The hot motoring method was used to compare the friction loss between the baseline engine and the rotating liner engine. Additionally, tear-down tests were used to measure the contribution of each engine component to the total friction torque. The cycle-averaged motoring torque of the RLE represents a 23~31% friction reduction compared to the baseline engine for hot motoring tests. Through tear down tests, it was found that the piston assembly friction of the baseline engine is reduced from 90% at 1200 rpm to 71% at 2000 rpm through liner rotation.

Key words : Rotating liner engine(회전 라이너 엔진), Engine friction(엔진마찰), Liner rotation(라이너 회전), Friction reduction(마찰저감), Engine lubrication(엔진 윤활)

1. 서 론

최근 세계 각국의 자동차 관련 배기가스 규제 강화와 유가 상승으로 인해 고효율 내연기관 개발에 대한 요구가 지속적으로 상승하고 있다. 고효율 내연기관 개발을 위해서는 기계효율의 증대, 즉 마찰 손실의 저감이 필수적이다. 기계 마찰 손실이 전체 기관의 효율에 미치는 영향을 고찰하여보면 고효율 엔진 개발을 위한 마찰 저감의 중요성이 좀 더 명확하게 나타난다.

Fig. 1은 고정된 속도에서 부하변화에 따라 기관의 열효율이 어떻게 변화되는 지를 보여주는 예이다. 무부하 상태에서는 열효율이 0이므로 연료로부터 발생된 모든 도시 동력이 pumping 손실과 기계 손실을 극복하는데 사용되어진다. 부분부하 영역에서는 부하가 증가함에 따라 마찰 손실이 전체 손실에서 차지하는 비중이 약 55%에서 시작하여 점차 증가하며 결국 완전 부하조건에 가까워지면 마찰 손실이 전체 손실의 약 85%에 이르게 된다. 따라서 기계 손실의 저감 즉, 마찰 손실의 저감은 고효율 내연기관 개발을 위해서는 반드시 구현해야 하는 중요한 인자임을 알 수 있다.

*To whom correspondence should be addressed.
shinhyukjoo@me.utexas.edu

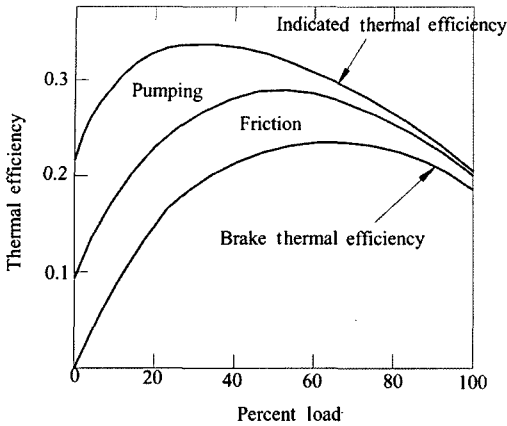


Fig. 1 Contributions of pumping and mechanical friction to the losses separating indicated and brake thermal efficiency at fixed speed¹⁾

많은 연구^{1,6,7)}를 통하여 기관의 각각 요소가 마찰 손실에 기여하는 정도가 이론적 또는 실험적으로 밝혀진 바 있다. 이와 같은 연구에 따르면 기관의 마찰은 크게 피스톤/링 기구, 밸브트레인, 베어링, 기타부품(냉각수 펌프, 발전장치, 윤활유 펌프 등) 등으로 나누어 질 수 있다.

Fig. 2는 위의 각각의 인자가 전체 기계적 손실에서 차지하는 부분을 일반적으로 나타내는 그림이다.²⁾ Fig. 2에 도시된 바와 같이 전체 기계손실에서 약 50% 정도를 차지하는 피스톤/링 기구에서의 마찰 저감은 고효율 엔진 개발을 위해 반드시 구현해야 하는 필수 요소이다. 따라서 이와 관련하여 피스톤/링 기구에서의 마모현상을 이해하고 마찰 손실을 줄이기 위한 많은 연구가¹⁻³⁾ 수행되어 왔으나 마

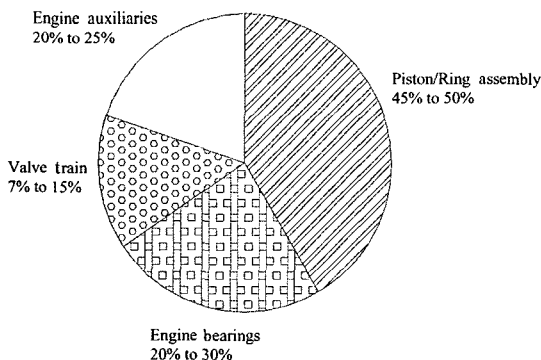


Fig. 2 Distribution of the total mechanical losses, for a diesel engine²⁾

찰 저감은 마찰, 마모 현상, 마찰 요인간의 상호 연관성, 배기가스, 내구성, 소음 및 진동, blow-by, 오일 소모 등의 복잡한 현상 등에 대해 이해부족으로 인해 현재 까지도 개선의 여지가 많이 남아 있다고 할 수 있다.

일반적으로 피스톤/링 기구의 윤활 특성은 Stribeck 선도로 설명 될 수 있다. Fig. 3은 세 가지 윤활 영역으로 나누어진 일반적인 Stribeck 선도이다. 그림에서 마찰계수 변화가 $\text{viscosity} \times \text{speed} / \text{load}$ 변화에 대해 갖는 기울기에 따라 경계층(boundary), 혼합(mixed), 유체(hydrodynamic)의 세 가지 영역으로 윤활 영역이 나누어짐을 볼 수 있다. 경계층 윤활영역에서는 마찰 되는 두 면 간의 직접 접촉이 일어나는데 이 영역에서는 마찰면의 형상 및 윤활유 특성이 마찰 손실에 큰 영향을 미침이 알려져 있다. 반면 유체 윤활 영역에서는 두 마찰면간의 직접 접촉이 일어나지 않으며 윤활 막이 두면을 완전히 분리시킨다. 따라서 이 윤활 영역에서의 마찰손실은 각각의 마찰면의 상대속도에 의해 윤활막 내 윤활유에 작용하는 전단력에 의해 발생한다. 혼합 윤활영역은 이미 설명한 두 구간 사이의 천이 구간이다. 피스톤 링 계의 마찰은 엔진 운전 중의 피스톤 속도 변화, 피스톤 링의 동적 거동, 피스톤 링, 링 홈, 실린더 벽의 윤활 막과 연소가스 간의 상호 작용 등에 의해 매우 복잡하게 이루어진다는 사실이 많은 연구를 통하여 밝혀진 바 있다. 그러나 기본적인 마찰은 경계층, 혼합, 유체 영역에서 이루어진다. 엔진의 운전 중 하사점과 상사점 근처에서는 피스톤 속도가 0에

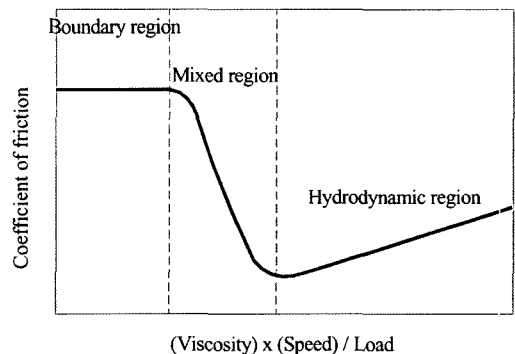


Fig. 3 Stribeck diagram showing the various regimes of lubrication

근접하므로 피스톤 링/실린더 벽 간 윤활은 윤활막의 squeeze 현상에 의해 직접접촉이 최소화 됨에도 불구하고 경계층 또는 혼합 영역에서 윤활이 일어난다고 알려져 있다. 반면, 피스톤 링과 실린더 벽간의 상대속도가 최대가 되는 피스톤의 중간 행정 부근에서는 유체 영역을 주기적으로 이동하며 일어나게 된다. 회전 라이너 엔진의 기본적인 개념은 엔진 운전 중에 상대적으로 높은 마찰 손실을 야기하는 경계층, 혼합 윤활 영역을 배제하고 모든 윤활이 유체 윤활영역에서 발생하도록 하는 것이다.⁴⁾ 회전 라이너 엔진은 라이너를 회전시킴으로써 피스톤 링과 실린더 벽사이의 상대 운동을 유지시켜 피스톤의 절대 속도가 0이 되는 하사점과 상사점에서 경계층/혼합 윤활이 아닌 유체 윤활이 일어나도록 하여 엔진의 전체 마찰을 저감 시킨다. 본 연구의 목적은 University of Texas at Austin에서 개발된 회전라이너 엔진의 마찰저감을 기본 엔진과 비교하여 그 효과를 정량적으로 분석하는 데에 있다. 이를 위하여 회전라이너 엔진과 기본 엔진에 대해 고온 모터링 시험과 Tear down 시험을 수행하여 각각에서 평균 마찰 토크를 비교 하였다.

2. 실험 장치

본 연구에서는 라이너 회전이 마찰 저감에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 2.3L 4기통 기본 엔진과 동일 기종의 엔진을 개조한 회전라이너 엔진에 대해 마찰 토크를 비교 분석하였다.

2.1 기본 엔진

기본엔진으로는 General Motors 2.3L, DOHC, 16-Valve 4 기통 Quad4 엔진이 사용 되었다. 실험의 복잡성을 피하고 단기통으로 개조된 회전라이너 엔진과의 직접 비교를 위해 2번 기통을 제외한 나머지 기통의 피스톤을 제거하여 기본엔진을 단기통으로 개조하였으며 그 자세한 제원은 Table1과 같다.

두 엔진의 마찰 토크를 직접 비교하기 위해서는 두 엔진의 피스톤/라이너 간 마찰 조건이 라이너 회전의 영향을 제외하고는 동일하게 유지되어야 한다. 이를 위하여 두 엔진 모두 신품을 사용하였으며 동일 표면 거칠기를 구현하기 위하여 20시간 길들

Table 1 Baseline engine specifications

Type	Inline 4 cylinder
Displacement (L)	2.26
Stroke (mm)	85
Bore (mm)	92
Compression ratio	10:1
Intake valve opening	22° before TDC
Intake valve closing	45° after BDC
Exhaust valve opening	120° after TDC
Exhaust valve closing	20° after TDC

이기(break-in)시험을 절차에 따라 실시하였다. 또한 두 엔진에 동일하게 SAE 5W30 점도의 합성 윤활유 (Mobile 제작)를 사용하여 윤활유에 따른 마찰 변화 를 가능성을 제거 하였다.

2.2 회전 라이너 엔진

회전라이너 엔진의 기본 설계와 제작은 텍사스 대학 윤활연구팀에 의해 수행 되었다.^{4,5)} 이 엔진은 기술한 바와 같이 4기통 기본 엔진을 단기통으로 개조한 것인데 그 주요 부품은 크게 회전 라이너, 라이너 구동부, 헤드와 라이너 간 기밀유지 부분으로 나뉘어진다.

Fig. 4 는 제작된 회전라이너 엔진의 사진이다. 사진에 보이는 바와 같이 2번 기통에 회전 라이너가 장착되었으며 헤드와 회전 라이너간의 기밀 유지를 위해 2번 기통 헤드에 특별히 설계/제작된 Seal이 장착되었다. 이 Seal은 회전하는 라이너와 정지 상태 인 헤드간의 기밀을 유지하는 역할을 한다. 회전 라

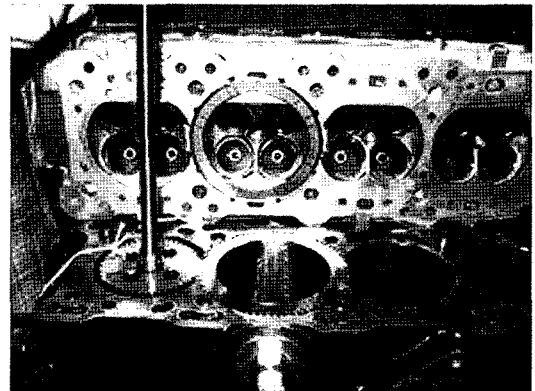


Fig. 4 Prototype rotating liner engine

이러는 1번 기통 상부에 장착된 전기 모터에 의해 구동되는 축과 연결된 치차 기구에 의해 구동 된다.

Fig. 5는 라이너 회전 구동 부를 나타내는 개념도이다. 전기 모터에 의해 발생된 토크는 벨트-풀리 기구를 통하여 회전 라이너에 연결된 치차 기구로 전달된다. 벨트-풀리 기구에 의해 모터의 회전 속도는 감속되고 라이너 회전을 위해 요구되는 토크를 측정하기 위해 풀리와 치차 기구 사이의 축에 센서가 장착되었다.

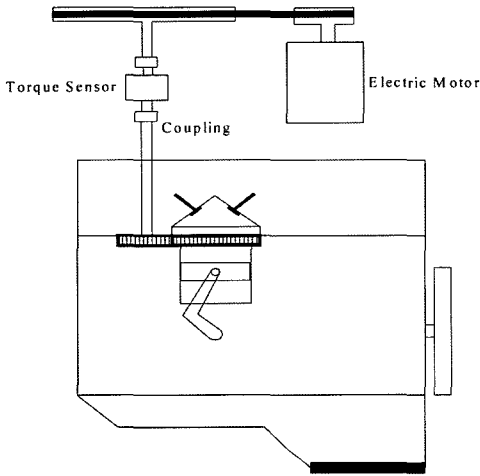


Fig. 5 Driving mechanism for rotating the liner

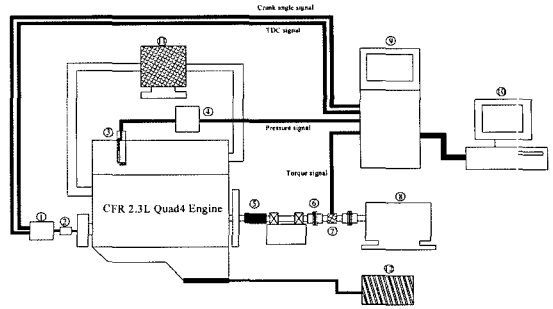
2.3 토크 측정

본 연구에서는 기본엔진과 회전라이너 엔진에서의 고온 모터링 토크를 엔진과 동력계 사이에 직접 연결된 토크 센서를 이용해 측정 비교 분석하였다.

Fig. 6은 본 연구에 사용된 실험 장치의 개념도이다. 엔진 마찰 토크 측정을 위한 센서 외에 라이너 회전에 필요한 토크 측정을 위해 라이너 구동축에 또 하나의 센서를 장착하였으며 두 센서의 상세 사양은 Table 2에 요약 되어 있다.

Table 2 Torque sensor specifications

Model	Cooper. LXT963	Cooper. LXT962
Capacity	2000 in-lbs	100 in-lbs
Linearity	± 0.1% F.S.	± 0.1% F.S.
Hysteresis	± 0.1% F.S.	± 0.1% F.S.
Repeatability	± 0.1% F.S.	± 0.1% F.S.
Output	4.1418 mV/V	2.0861 mV/V



- ① Encoder
- ② Coupling
- ③ Pressure transducer
- ④ Charge amplifier
- ⑤ Drive shaft
- ⑥ Coupling
- ⑦ Torque sensor
- ⑧ AC motor
- ⑨ Combustion analyzer
- ⑩ Personal computer
- ⑪ Water heater
- ⑫ Oil heater

Fig. 6 Test setup for the torque sensor

토크 센서를 엔진 구동축에 장착하기 위하여 비틀림 강성은 매우 높고 축 맞춤 편심을 보상하는 특성을 가진 Flexible Steel Laminar Coupling을 사용하였다. 실린더 압력 측정을 위해서는 스파크 플러그 장착형 압전 센서(Kistler 6051)와 전하 증폭 장치가 사용되었다. 압력 신호와 토크 신호는 모두 DSP Technology Inc.의 연소 해석 장치를 이용하여 크랭크 각도별로 취득 분석 되었다. 이를 위하여 1440 pulse/cycle 분해능의 BEI H25 엔코더가 엔진 크랭크 축에 장착 되었으며 엔진 냉각수와 윤활유의 온도는 일반적인 엔진 운전조건을 모사하여 90°C로 제어 되었다. 엔진 구동을 위해서 AC모터가 사용 되었고 모터/엔진 회전 속도는 ABB 제어기를 이용하여 제어 되었다. 고온 모터링 실험에서는 엔진 속도를 1200rpm에서 2000rpm까지 200rpm간격으로 증가시켜가며 엔진 토크와 실린더 압력을 측정하여 연소 해석기로 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 고온 모터링 실험결과

고온 모터링 실험은 1200 rpm에서 2000 rpm까지 200rpm 간격으로 모터링 토크를 측정하여 수행 되었다. 회전 라이너 엔진의 헤드와 라이너 간 기밀 유지 부는 윤활유 압력 60psi (~ 4.1bar)를 기준으로 설계되었기 때문에 고온 모터링 실험 시 윤활유 압력

을 60psi로 유지 하였다.⁵⁾ 엔진 회전속도가 1200rpm 보다 낮을 경우에는 윤활유 압력이 60psi이하로 떨어지므로 고온 모터링 실험은 1200rpm보다 높은 회전 속도에서 수행 하였다. 라이너의 회전 속도는 300rpm으로 유지 하였으며 엔진 토크 외에 실린더 압력도 연속되는 20사이클 동안 측정하여 엔진의 정상 운전 여부를 판단하였다.

Fig. 7(a)는 측정된 평균 모터링 토크를 나타내며 Fig. 7(b)에는 회전라이너 엔진의 기본엔진에 대한 마찰 토크 저감량이 나타나 있다. 회전라이너의 모터링 토크가 기본 엔진에 비해 1200rpm에서 약 31% 낮게 나타났고 고속 회전에서는 그 저감 량이 다소 감소하여 그 양이 23%로 나타났다. 이로써 회전라이너의 마찰 저감 효과가 저속 운전 시에 더욱 크게

나타남을 알 수 있다. 이와 같은 회전 라이너 엔진의 평균 마찰 토크 저감은 피스톤 링/실린더 벽 사이의 마찰 저감에 기인한 것으로 판단되어지나 Fig. 7에 나타난 마찰 토크는 피스톤, 캠축, 크랭크 축 등의 마찰을 모두 포함하고 있으므로 보다 정확한 마찰 저감 요인을 알아보기 위해 Tear-down 실험을 수행 하였다.

3.2 Tear-down 실험 결과

Tear-down 실험은 크게 두 가지로 나뉘어 수행 되었다. 첫째로, 피스톤 링/실린더벽간 마찰을 제외한 크랭크 축, 캠축의 마찰만을 측정하기 위하여 피스톤과 커넥팅 로드를 제거하여 마찰 토크를 측정하였다. 따라서 이 실험에서 측정된 마찰 토크는 크랭크축과 캠축, 냉각수 및 윤활유 펌프, 타이밍 체인 등에 의한 마찰 토크가 포함된다. 두 번째로 타이밍 체인을 제거하여 크랭크축과 윤활유 펌프에 의한 마찰 토크만을 측정하였다.

기본 엔진에 대해 위에서 기술한 실험 방법에 의해서 측정한 마찰 토크 결과가 Fig. 8(a)에 나타나 있으며 Fig. 8(b)는 이 측정 결과를 토대로 계산한 피스톤 assembly (주로 피스톤 링/ 실린더 벽), 캠축, 크랭크축에 의한 각각의 마찰 토크를 나타낸 것이다. 피스톤링/실린더 벽 마찰이 전체 마찰에서 차지하는 양은 약 35%인 것으로 측정 되었다. Fig. 8(b)에서 각각의 부품들의 엔진 회전 속도 증가에 따른 마찰 토크 변화가 서로 다른 양상을 보임을 알 수 있다. 즉, 캠축 마찰은 회전 속도 증가에 상관없이 일정한 값을 보이며, 크랭크 축 마찰은 선형적인 증가, 피스톤 assembly 마찰은 감소 후 증가함을 알 수 있다. 이로써 캠축 마찰은 Fig. 3의 Stribeck 선도에서 보듯이 두면의 상대 속도 변화에 관계없는 경계층 영역에서 이루어지고 크랭크 축 마찰은 상대 속도 증가에 따라 선형적으로 증가하는 유체 영역에서 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 피스톤 assembly 마찰은 속도 증가에 따라 감소하다 증가하므로 Stribeck 선도에서 경계층, 혼합, 유체 영역에 걸쳐서 발생하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 회전 라이너 엔진에 대한 tear-down 실험 결과이다. 캠축과 크랭크축은 기본엔진과 동일하

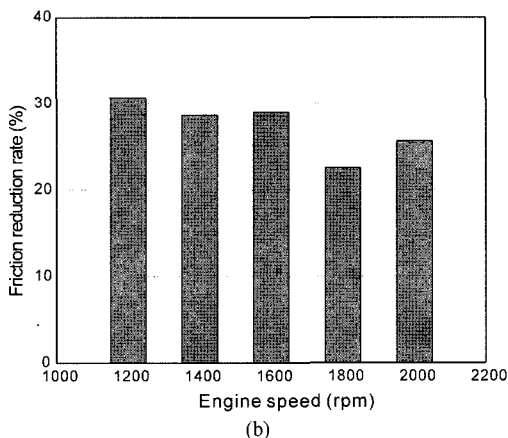
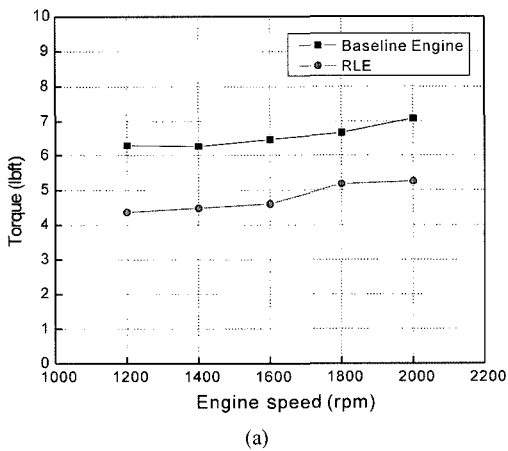
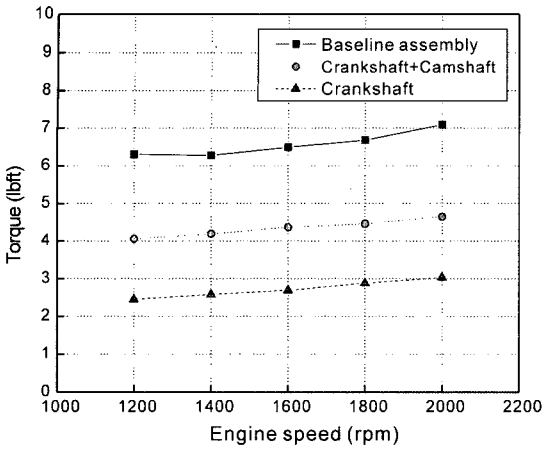
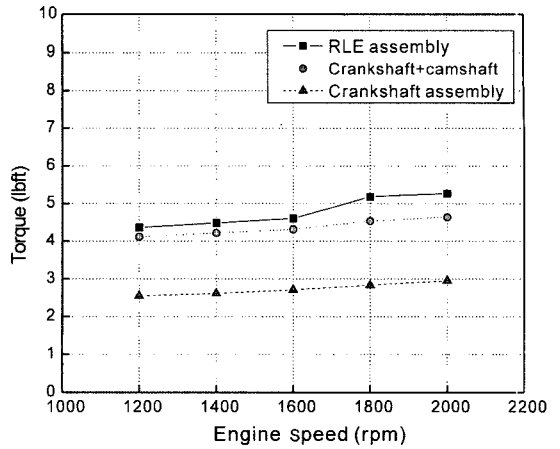


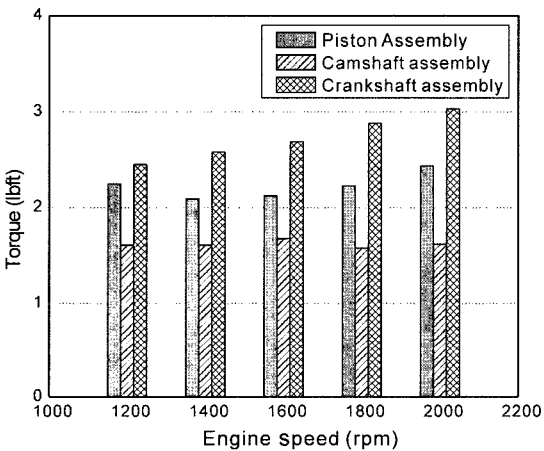
Fig. 7 Measured friction torque (upper graph) and percent friction reduction (lower graph)



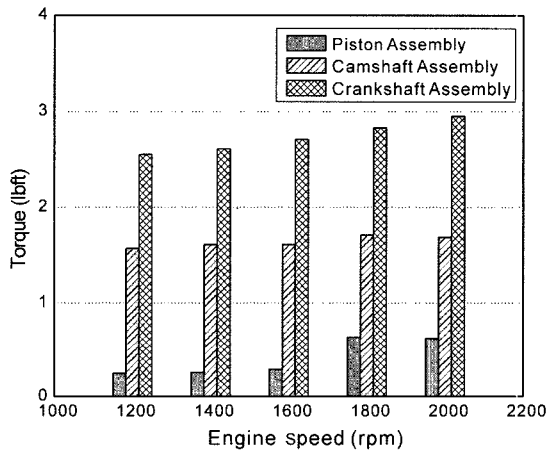
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 8 Tear-down results for the baseline engine

Fig. 9 Tear-down results for the RLE

로그 마찰 토크 역시 거의 동일하게 측정되었다. 그러나 피스톤링/실린더 벽 마찰은 기본엔진과 비교하여 운전 조건에 따라 70%~90%가 감소하여 큰 차이가 있다는 사실을 알 수 있다. 회전 라이너 엔진과 기본 엔진의 피스톤 assembly 마찰을 좀 더 명확히 비교하기 위해 그 절대 마찰량과 상대 저감량을 Fig. 10에 함께 나타내었다.

엔진 회전 속도 1200rpm에는 피스톤링/실린더 벽 마찰 저감량이 약 90%에 달했으며 엔진속도 증가에 따라 그 저감량이 점점 감소하여 2000rpm에서는 약 71%로 나타났다. Fig. 10에서 회전라이너 엔진의 피스톤링/실린더 벽 마찰 토크가 엔진 회전 속도 증가에 따라 기본 엔진의 감소 후 증가하는 경향과 달리 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 크

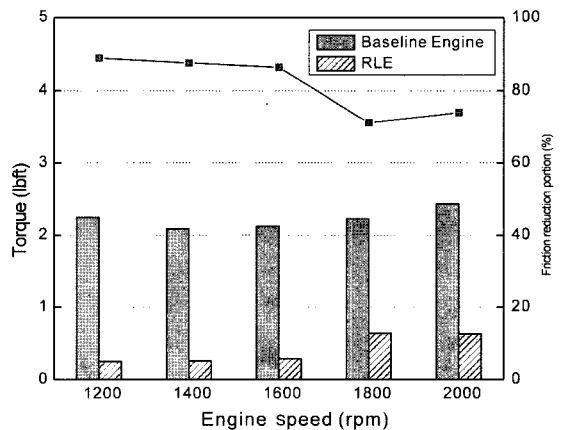


Fig. 10 Piston assembly friction of the baseline engine and the RLE

랭크축의 엔진 회전 속도 증가에 따른 마찰 증가와 마찬가지로 마찰이 두 면간의 상대 속도 변화에 따라 변화하는 유체 영역에서 윤활이 이루어졌음을 알 수 있게 한다. 이와 같은 이유로 회전 라이너의 마찰 저감 효과가 저속에서 더욱 크게 나타나는 것으로 판단되며 이 결과로써 혼합/경계층 영역에서 이루어지던 피스톤링/실린더 벽 마찰을 유체 영역에서 발생하도록 하는 라이너 회전 개념을 성공적으로 구현하였음을 확인하였다.

3.3 라이너 회전과 관련한 마찰 손실

라이너 회전을 이용하여 엔진 마찰을 저감 시키는 개념을 구현하기 위하여 라이너 구동 치차, 라이너 지지 베어링, 고정 헤드 면과 회전 라이너 간의 face seal 등의 새로운 마찰 부품들이 추가 되었다. 이와 같이 추가된 부품들에 의해 발생하는 마찰을 엔진 토크 센서 이외에 또 다른 토크 센서를 이용하여 측정함으로써 회전 라이너 엔진의 전체 마찰 손실과 기본 엔진의 마찰 손실을 비교 분석하였다. 라이너 회전을 위하여 추가된 모든 부품들은 약 1.5 m/s의 비교적 저속의 상대속도를 가지고 hydrodynamic 영역에서 작동하므로 그 마찰 손실이 매우 작은 것으로 확인 되었다. 실험 결과 엔진 회전 속도와 관계없이 추가 부품에 의한 마찰 손실은 약 5 kPa FMEP (Friction Mean Effective Pressure)로 나타났으며 이를 고려한 각 엔진의 전개도 조건에서의 마찰 손실 측정 결과가 Fig. 11에 나타나 있다.

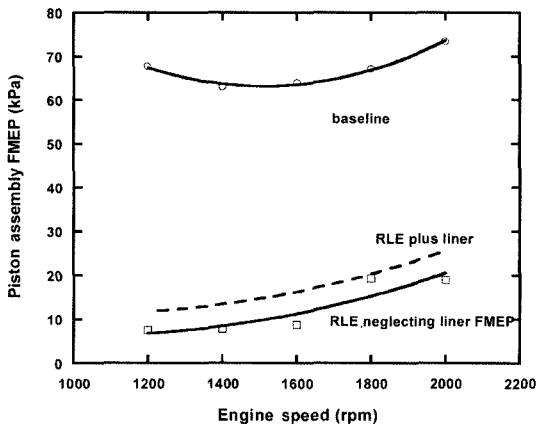


Fig. 11 RLE net energy savings expressed in FMEP (Friction Mean Effective Pressure)

4. 결론

본 연구에서는 4 기통 상용엔진을 단기통으로 개조한 기본엔진과 회전라이너 엔진에서의 마찰 토크를 측정하여 라이너 회전이 마찰 저감에 미치는 영향을 정량적으로 비교하였으며 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 라이너 구동을 위한 부품들을 저속의 상대속도를 갖고 유체 영역에서 윤활이 발생하도록 설계함으로써 1200 rpm~2000 rpm의 실험 조건에서 엔진 회전속도에 관계없이 약 5 kPa FMEP (Friction Mean Effective Pressure) 의 마찰 손실만을 추가하면서 라이너 회전 개념을 구현할 수 있었다.
- 2) 고온 모터링 실험 결과 회전 라이너 엔진이 기본 엔진에 비하여 엔진 회전속도에 따라 약 23%~31%의 마찰 저감 효과가 있음이 확인 되었다.
- 3) Tear-down 실험결과 피스톤링 / 실린더 벽 간 마찰이 1200 rpm에서 약 90% (64 kPa, FMEP), 2000 rpm에서 약 71% (59 kPa, FMEP) 감소되며 이 마찰 저감이 전체 엔진 마찰 저감의 요인임이 확인 되었다.
- 4) 회전 라이너 엔진의 마찰 저감은 라이너 회전이 경계층/혼합 윤활영역에서 발생하는 기본엔진의 피스톤링/실린더 벽간 마찰을 hydrodynamic 영역에서 발생하도록 함으로써 이루어진다고 판단된다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

References

- 1) R. C. Rosenberg, "General Friction Considerations for Engine Design," SAE 821576, 1982.
- 2) S. F. Rezeka and N. A. Henein, "A New Approach to Evaluate Instantaneous Friction and Its Components in Internal Combustion Engines," SAE 840179, 1984.
- 3) A. Comfort, "An Introduction to Heavy-Duty Diesel Engine Frictional Losses and Lubricant

- Properties Affecting Fuel Economy-Part I,” SAE 2003-01-3225, 2003.
- 4) D. Dardalis, “A Unique Hydrodynamic Face Seal for the Rotating Liner Engine, and the Rotating Liner Engine Face Seal Transient Code,” Ph.D. Dissertation, UTA, 2003.
 - 5) R. L. Norton, Design of Machinery, Second Edn., McGraw-Hill, New York, 1999.
 - 6) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1982.
 - 7) R. D. Matthews, Internal Combustion Engines and Automotive Engineering, Draft Copy of a Textbook to be Published by Harper-Collins, 2004.