

Tilting Test Rig를 이용한 엔진 윤활 시스템 안정성 평가

Safety Estimation of Engine Lubrication System using Tilting Test Rig

윤 정 의*, 전 문 수**
Jeong-eui Yun, Mun-soo Chon

ABSTRACT

Engine lubrication system is generally affected by vehicle driving conditions, which are composed of acceleration, braking deceleration and accelerating during cornering. The major reason is due to the oil pan system in which oil is directly influenced by inertia force caused by vehicle driving conditions. Therefore, to confirm safety of engine lubrication system inertia force effects are also considered in the developing state. For the purpose, we have carried the engine tilting tests using ourselves made test rig. Verifying the test results we also measured the inertia effects on the engine lubrication system using the circular tuning and slalom test with vehicle. Through the comparison study between two kinds of results we obtained that the engine tilting test rig was very useful to confirm the safety evaluation of engine lubrication system.

주요기술용어 : Engine lubrication system(엔진 윤활계), Engine tilting test rig(엔진 경사 시험 장치), Aeration (공기 포집량), Circular tuning test(원선회 시험), Slalom test(회전 시험)

1. 서 론

엔진의 개발이 소형화, 경량화 및 고속, 고출력화됨에 따라 이에 상응하는 엔진의 윤활 특성 확보는 내구 성능과 관련하여 엔진 개발 과정에서 매우 중요한 과제이다. 일반적으로 엔진 윤활 시스템 개발 과정은 먼저 각 윤활 부품들이 온도, 하중, 회전 또는 미끄럼 속도 등과 같은 주변으로부터 받게 되는 여러 환경 조건에 만족하는 윤활유를 선정 한 후, 가혹한 엔진 운전 조건에서 엔진의 각 윤활 부품에 공급되는 윤활유가 유량, 압력, 온도 등과 같은 엔진 공급 조건을 유지할 수 있도록 윤활 시스템을 설계

하게 된다. 이때 엔진 윤활 시스템 설계 과정에서 설계자가 가장 많은 시간을 소비하는 부분은 오일 펌프, 오일 필터, 기능 부품(Oil jet, HLA, Check valve 등)의 선정 및 운동 부위의 베어링 등의 설계 과정이다. 이러한 각 윤활 부품의 선정과 함께 여러 운동 부위의 베어링 설계는 오랜 기간 동안 검증되어 온 기존의 여러 해석 프로그램을 이용하여 체계적으로 접근한다. 설계된 윤활 시스템은 Proto 엔진으로 제작한 후, 여러 가지 다양한 실험을 통하여 설계의 타당성을 검증하고 보완하는 과정을 거치면서 윤활 시스템을 개발하지만 이러한 일련의 개발 과정에 있어서 아직도 체계적인 방법으로 접근하기 쉽지않은 부분이 엔진의 오일 팬

* 회원, 동해대학교 자동차공학과

** 회원, 대우자동차 기술연구소

시스템이다.¹⁻²⁾

엔진의 오일 팬은 기본적으로 펌프로 공급하는 오일을 저장하는 기능 이외에 사용 오일의 냉각 기능 및 각 부품에서 윤활 및 냉각 기능을 마친 윤활유가 다시 모여질 때 오일 속으로 유입되는 공기 혼입을 제어하는 기능 등 여러 가지 중요한 기능을 가지고 있다. 특히 개발된 엔진이 차량에 탑재되어 급가속, 급제동 및 급선회 등의 조건으로 운전될 때의 오일 거동은 정지된 상태에서 엔진 동력계를 통해 운전될 때와는 전혀 다른 현상을 나타낸다.

이와 같은 이유로 엔진 동력계를 이용한 엔진 개발 초기 단계에서 나타나지 않았던 공기 과다 혼입에 의한 하중 지지력의 저하에 따른 베어링 부위의 파손 및 HLA와 같은 기능 부품의 장애 등과 같은 여러 윤활 시스템의 문제점이 차량 시험에서 발생하게 된다. 그러나 엔진의 설계 및 개발 단계에서 이러한 문제점을 파악하고 검증할 수 있는 방법이 아직 체계화되어 있지 않으며, 차량 테스트를 통한 개발 시험 과정이 단편적으로 보고되어 있지만 그 타당성에 대한 논의가 아직도 부족한 것이 현실이다.³⁻⁵⁾

따라서 본 연구에서는 엔진 개발 단계에서 차량의 급가속, 급제동 및 좌우 선회시 엔진의 윤활 시스템 안정성을 평가할 수 있는 방법의 모색을 위해 자체 개발한 엔진 경사 시험 장치(Engine tilting test rig)를 통해 초기 개발 엔진 상태에서 이를 평가할 수 있는 방법을 소개하고, 엔진 경사 시험 장치를 이용한 시험 결과와 차량 시험을 통해 얻은 결과와 서로 비교 분석함으로써 그 타당성을 검증하고자 한다. 또한 이러한 시험 방법으로 직접 오일 팬 시스템의 개발에 적용한 사례를 통해 엔진 개발 과정에서 엔진 경사 시험 장치를 통한 엔진의 윤활 시스템 해석의 효율성을 제시하였다.

2. 실험 장치

Fig. 1은 본 실험을 위해 자체 개발한 엔진 경사 시험 장치(Engine tilting test rig)를 나타낸다.

실험 장치는 차량의 급가속, 급제동 및 좌우 선회를 모사하기 위하여 장착된 엔진을 전후좌우 4방향으로 최대 5m/sec의 속도로 650까지 기울이면서 작동할 수 있도록 설계하였으며, 운전 중 엔진의 경사 각 변화에 따른 오일 공급 시스템의 안정성을 평가하기 위하여 메인 갤러리에 설치한 압력 센서(XT-152B-190-300G, Kulite)로부터 메인 갤러리 내 오일 압력 변동량을 측정하였다. 또한 실험 조건을 일정하게 유지시키기 위하여 냉각수 온도 컨트롤러를 설치하였으며, 필요에 따라 엔진의 운전 속도 및 기울임 속도 등을 제어할 수 있도록 설계하였다.

2. 실험 방법

지금까지 알려진 차량의 급가속, 급제동 및 좌우 선회시의 엔진 윤활 시스템의 안정성은 오일 펌프로부터 공급되는 윤활 압력의 안정성 및 공급되는 윤활유의 공기 포집량(Aeration) 등으로 평가하여 왔다. 그러나 이들 두 변수 중 공기 포집량은 측정 방법에 따라 그 결과값이 달라지기 때문에 객관적인 평가에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 평가 방법 대신에 오일 펌프에서 엔진의 메인 갤러리(Main gallery)로 공급되는 윤활유의 압력을 실시간으로 측정하여, 그 변화량을 엔진 윤활 시스템의 안정성 평가의 지수로 사용하였다.

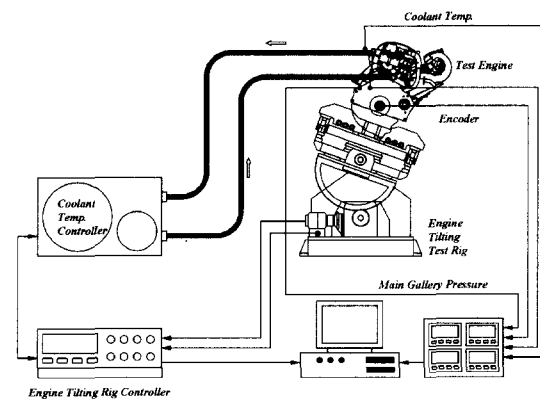


Fig. 1 Schematic diagram of engine tilting test rig

Fig. 2는 엔진 경사 시험 장치에 시험 엔진을 장착한 후, 엔진의 회전 속도를 3,000rpm으로 일정하게 유지한 상태에서 엔진을 기울이면서 측정된 메인 갤러리에서의 압력값 변화를 그려놓은 것이다. 선도에 나타나 있듯이 일정한 운전 조건에서 엔진을 기울이면 오일 팬 내의 유회유 거동이 변화하여 오일 펌프를 통한 오일 공급 압력이 변화되며 어떤 특정 기울기에 이르면 오일 공급 압력이 급격하게 저하된다. 이와 같이 오일 압력이 급격하게 떨어지는 현상에 대한 원인은 두 가지로 설명할 수 있다.

먼저 엔진이 급격하게 기울어짐에 따라 오일 팬 내의 오일이 한쪽으로 쏠려져 회전하는 크랭크샤프트의 일부가 오일 속으로 잠겨짐에 따라, 오일 팬으로부터 펌프로 유입되는 오일에 공기의 함유량(Aeration)이 급격히 증가하여 펌프의 공급 압력이 급격하게 저하되는 것으로 추정된다. 두 번째는 엔진이 기울어짐에 따라 오일 팬 내의 오일이 한쪽으로 쏠려져 펌프의 오일 흡입구가 대기중에 노출(Starvation)되기 때문에 발생하는 현상으로 추정할 수 있다. 그러나 이러한 두 가지의 원인 중 어떠한 경우이던 엔진 유회 시스템의 안정성 측면에서 이러한 오일 압력 강하 현상은 반드시 피해야만 한다.

따라서 본 연구에서는 일정한 엔진 운전 조건에서 메인 갤러리 오일 압력이 엔진 경사각 0일 때의 압력 대비 0.5bar 이상 저하될 때의 경사각을 틸팅 각(Tilting angle)으로 정의하였다.

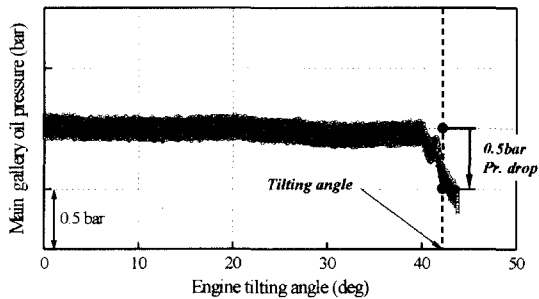


Fig. 2 Variation of oil pressure in main gallery against tilting angle of the test engine

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 엔진 틸팅 시험

Fig. 3은 엔진 경사 시험 장치를 사용하여 시험 엔진의 공급 오일량 변화에 따른 틸팅 각의 변화를 나타낸 선도이다. 이 때 엔진 회전 속도는 3,000 rpm으로 일정하게 유지시켰으며, 시험은 4방향 모두 엔진 경사각이 차량의 가속도 1g에 해당하는 45°까지만 기울였기 때문에 45° 이상의 값은 모두 같은 값으로 표현하였다. 선도를 살펴보면 시험 범위 내에서는 전체적으로 엔진 오일 체적이 증가함에 따라 엔진의 틸팅 각 또한 증가한다는 것을 명확히 보여주고 있다. 따라서 본 시험에 적용된 엔진의 경우 차량의 급가속, 급제동 및 좌우 선회시 엔진의 유회 시스템 안정성 측면에서 볼 때 틸팅 각의 증가를 위해서는 엔진의 공급 오일량을 적절히 늘여주는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 4는 동일한 엔진 운전 조건에서 엔진의 오일 펌프 흡입구 길이와 형상 변화에 따른 엔진 틸팅 각의 변화를 나타낸 것이다. 선도에 나타나 있듯이 오일 흡입구 위치와 형상의 변화는 엔진 각 방향별 틸팅 각의 변화에 매우 민감하게 반응하며, 특히 어느 한 방향으로 증가할 경우 다른 방향으로 감

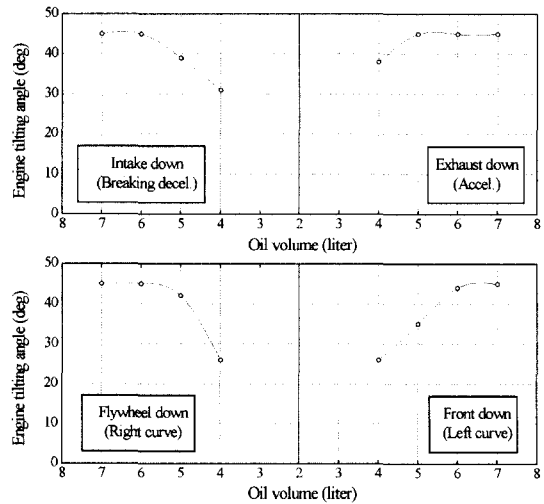


Fig. 3 Variation of tilting angle of the test engine against oil volume

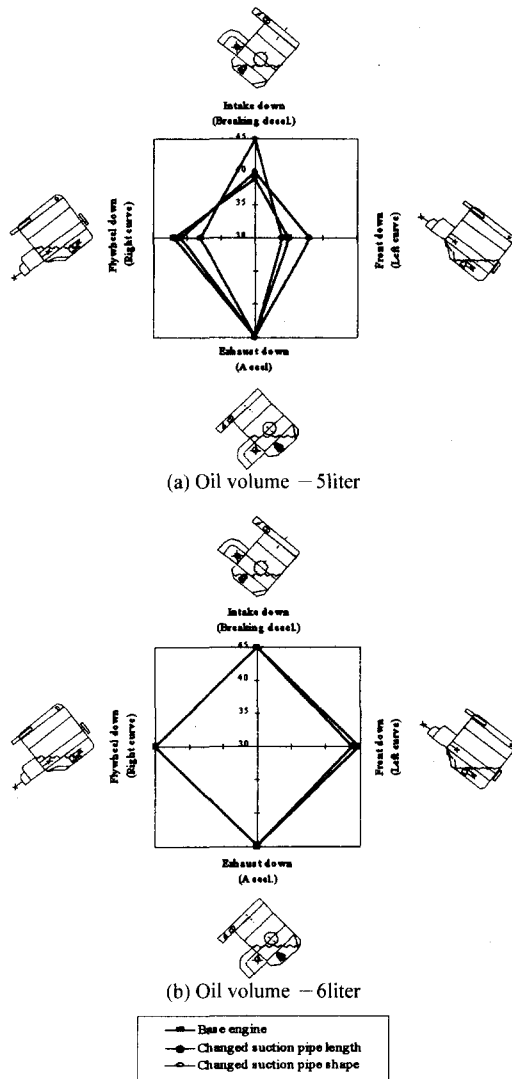


Fig. 4 Variation of tilting angle of test engine against changing suction pipe length or shape

속되는 경향을 보여준다. 이러한 결과는 엔진의 오일 펌프 흡입구의 경우, 적용 차량의 특성에 맞추어 적절히 조절해야만 한다는 것을 암시한다.

3.2 차량 가속 및 선회 시험 결과와 엔진 틸팅 시험간의 상관 관계

엔진 경사 시험 장치를 사용하여 측정된 시험 결과를 실차에서 측정된 시험 결과와 서로 비교하고 본 연구에서 개발한 엔진 경사 시험 장치를

적용한 시험 결과의 타당성을 검증하기 위하여 시험 엔진을 차량에 탑재한 후, 메인 갤러리의 압력 강하를 측정하였다. 차량 시험은 원 선회 (Circular tuning test) 및 회전 시험(Slalom test)을 수행하였으며, 차량 시험시 상호 신뢰성 있는 데이터의 비교를 위해 엔진 오일의 압력 뿐만 아니라 오일 및 냉각수 온도와 시험 차량의 전후좌우 가속도 값을 동시에 실시간으로 측정하여 차량의 운전 상태에 따른 오일 압력 강하량을 정의하였다. 실차 시험에서 측정된 가속도 a (m/s^2)와 엔진 틸팅 각 θ (deg.) 사이의 상관 관계는 아래의 식 (1)을 사용하여 정의하였으며, 이 때 메인 갤러리의 압력 강하는 차량을 정지해놓은 상태에서 엔진 오일 및 냉각수의 온도와 엔진 회전수 변화에 따른 메인 갤러리의 압력 측정 테이블과 비교하여 결정하였다.

$$\theta = \tan^{-1}(a/g) \quad (1)$$

where g : Acceleration of gravity (m/s^2)

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 원 선회 및 회전 시험의 차량 시험에서 식 (1)로 정의된 엔진 틸팅 각의 변화에 따른 메인 갤러리의 압력 강하를 엔진 공급 오일량의 변화에 대해 나타낸 선도이다. 선도에 나타난 메인 갤러리의 압력 강하는 차량이 정지된 상태에서의 메인 갤러리 압력과의 차이이며, 그 차이가 0.5bar 이상인 그룹과 0.5bar 이하인 그룹으로 각각 분리하여 도시하였다. 사각형으로 표시한 점선은 두 가지 차량 시험 조건에서 나타나는 엔진 틸팅 각의 범위를 나타낸 값으로, 차량 감속시는 약 42° (0.9g), 가속시는 27° (0.5g), 좌우 선회시는 39° (0.8g) 정도의 범위에서 차량이 운전되고 있음을 나타낸다. 또한 차량 시험 결과를 엔진 틸팅 시험 결과와 비교하기 위하여 엔진 틸팅 시험 결과를 선도 중심축에 화살표 및 아라비아 숫자로 표시하여 나타내었다.

먼저 4리터의 오일 체적으로 시험하였을 경우를 살펴보면, 0.5bar 이상의 메인 갤러리 압력 강하는 원 선회 및 회전 시험 모두 거의 모든 운전 영역에서 발생하는 것으로 나타나 본 시험에 적

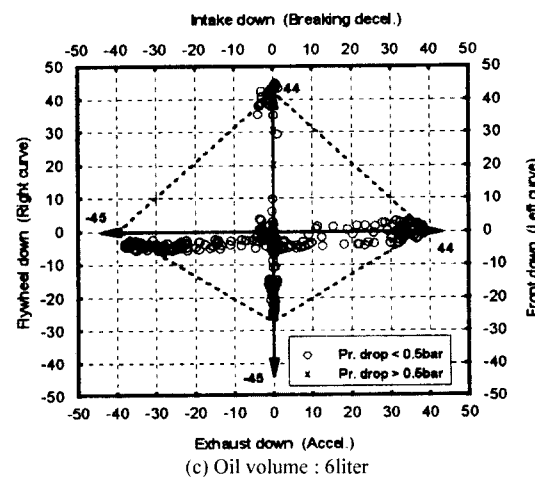
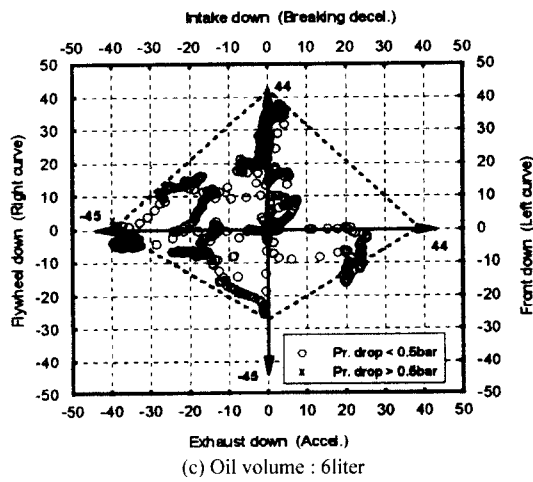
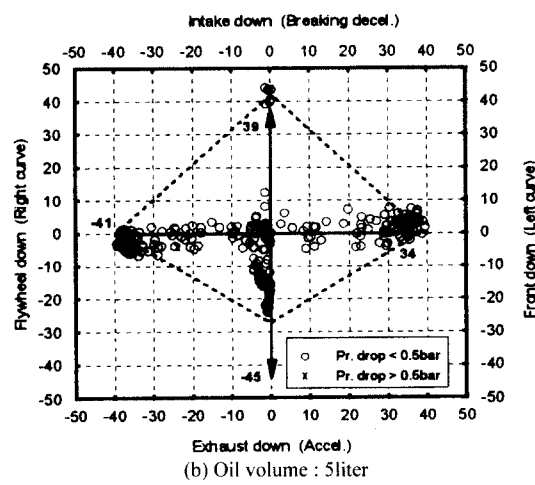
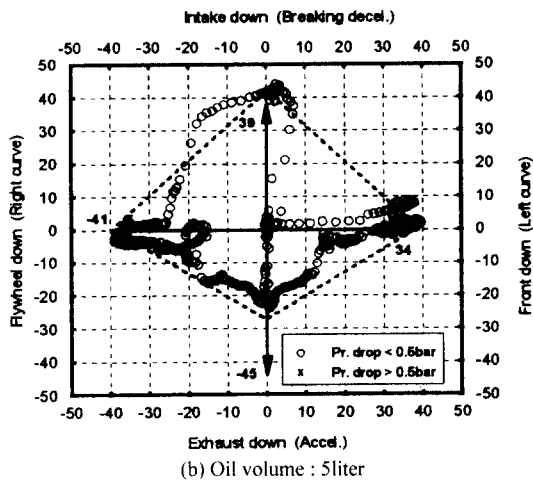
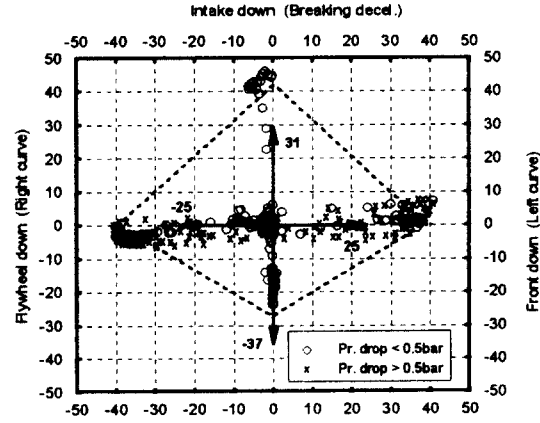
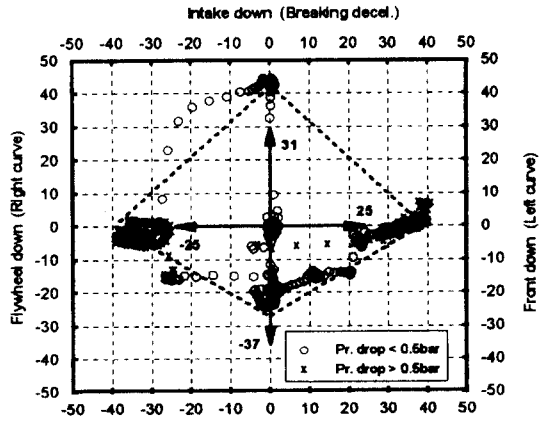


Fig. 5 Main gallery pressure drop map during circular turning test by using test vehicle

Fig. 6 Main gallery pressure drop map during slalom test by using test vehicle

용된 엔진의 경우 4리터의 오일 체적은 체적은 윤활 시스템 안정성 측면에서 매우 불리하다는 것을 알 수 있다. 그러나 5리터 및 6리터에서는 거의 모든 운전 영역 내에서 메인 갤러리의 오일 압력 저하 현상은 거의 없는 것으로 나타나 비교적 열악한 운전 조건에서도 안정된 윤활 공급이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

또한 오일량을 4리터로 공급한 후 원 선회 시험을 수행하였을 경우, 선도 중심축 좌우에 표시한 25의 엔진 틸팅 시험 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 회전 시험의 경우, 엔진 틸팅 테스트의 결과값과 다소 다른 결과를 보여준다.

이러한 현상이 나타나는 이유는 엔진 경사 시험 장치에서는 엔진의 설치 각도를 일정 속도로 변화시키면서 메인 갤러리의 압력 변동을 측정하기 때문에 차량의 원 선회 시험과 같이 가속 특성이 급격하게 변하지 않는 경우에는 두 시험 결과가 잘 일치하지만, 회전 시험의 경우처럼 차량이 15m 간격으로 놓여진 부표를 좌우 방향의 빠른 속도로 회전하는 경우, 차량의 급격한 가속 특성의 변동으로 인하여 오일 팬 내의 오일 관성력이 서로 다르게 작용하는데 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 개발한 엔진 경사 시험 장치는 엔진의 경사각이 차량 회전 시험과 같이 회전 방향이 급격하게 변하는 경우, 시험 조건을 충분히 반영하기에는 다소 부족한 부분이 있는 것으로 판단된다. 그러나 전체적으로는 잘 일치된 결과를 보여주고 있으며, 실험실에서 열악한 운전 조건을 모사하여 보다 효율적으로 엔진 윤활 공급 시스템의 안전성을 평가할 수 있는 것으로 판단하였다.

4. 결론

본 연구에서는 차량의 급가속, 급제동 및 좌우 선회시의 엔진 윤활 시스템 안정성을 평가하기 위한 엔진 경사 시험 장치를 자체적으로 개발하였다. 개발한 장비를 이용하여 엔진 경사각 변화에 따른 메인 갤러리 압력 강하량을 측정하여 오일 공급 시스템의 안전성 평가 및 오일 팬 시스템

개발에 적용하였으며, 실차 운전 조건과의 상관 관계를 검토하기 위하여 차량 운전 조건에서 시험을 수행한 결과 다음과 같은 얻었다.

1) 차량의 급가속, 급제동 및 좌우 선회시의 엔진 윤활 시스템 안정성을 평가하기 위한 엔진 경사 시험 장치(Engine tilting test rig)를 개발하였으며, 개발된 장비를 이용하여 오일 팬 시스템 개발에 효과적으로 적용할 수 있었다.

2) 오일 펌프 흡입구의 위치와 형상의 변화는 엔진 각 방향별 틸팅 각의 변화에 매우 민감하게 반응하며, 특히 어느 한 방향으로 틸팅 각이 증가할 경우 다른 방향으로 감속되는 경향을 나타내기 때문에 적용 차량의 운전 특성에 맞추어 적절히 조절해야만 한다.

3) 차량 시험 결과 차량의 급가속, 급제동 및 좌우 선회시 운전 조건에서 나타나는 틸팅 각은 차량 감속 및 가속시에는 각각 42° (0.9g), 27° (0.5g), 좌우 선회시는 39° (0.8g) 정도의 범위를 갖는 것으로 나타났다.

4) 본 연구에서 개발한 엔진 경사 시험 장치는 차량의 원 선회 시험(Circular tuning test)을 특히 잘 표현 해주고 있으며, 이는 원선회 시험의 가속 특성이 급격하게 변하지 않는 데 기인하는 것으로 판단된다.

5) 개발 엔진의 오일 체적은 차량의 급가속, 급제동 및 좌우 선회시의 엔진 윤활 시스템 안정성과 밀접한 관계를 가지므로 반드시 윤활 안정성 시험을 통해 결정해야 한다.

참 고 문 헌

- 1) F. Koch, F. Maassen, U. Geiger "Development of Modern Engine Lubrication Systems," SAE 970922, 1997.
- 2) N. S. Ap, N. C. Golm, "Thermal Balance between the Engine Oil and the Engine Coolant of Turbo Diesel Engines," SAE 970939, 1997.
- 3) Cosworth Report, EAJE0020346R Oil Aeration Testing, 1998.
- 4) FEV Report, TR3-4-1-3-5FE C Engine Tilting Test Report, 2000.
- 5) AVL Report, E04_007S Oil Aeration / Starvation Test, 1997.