

엔진 경사 조건이 오일 공급 시스템에 미치는 영향

전 문 수^{*1)} · 김 승 기²⁾ · 박 병 완²⁾

충주대학교 에너지시스템공학과¹⁾ · 지엠대우 오토엔테크놀로지²⁾

The Effect of Engine Tilting Conditions on the Oil Supply System

Mun Soo Chon^{*1)} · Soong Kee Kim²⁾ · Pyong Wan Park²⁾

¹⁾Department of Energy System Engineering, Chungju National University, Chungju 380-702, Korea

²⁾GM Daewoo Auto & Technology, 199-1 Cheongcheon-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

(Received 17 February 2004 / Accepted 19 April 2004)

Abstract : Engine lubrication system is generally affected by vehicle driving conditions; acceleration, braking deceleration, and cornering. The oil supply system such as oil pan, baffle plate, and oil pick-up pipe should be optimized to cope with severe driving conditions. The main purpose of this paper is to understand the effect of the engine tilting angle on the oil supply system using engine tilting test rig. For the purpose, the oil pressure fluctuation and oil aeration in the main gallery are measured at various engine tilting angles. In addition, the oil flow is visualized by using transparent oil pan to investigate the cause of the formation of oil aeration. The test results show there is a strong correlation between the main gallery oil pressure fluctuation and oil aeration. It is also found that the visualization technique is helpful to stabilize the oil supply system at severe driving conditions.

Key words : Lubrication system(윤활 시스템), Vehicle driving condition(차량 운전 조건), Engine tilting angle(엔진 경사각), Oil supply system(오일 공급 시스템), Aeration(공기 포집량)

1. 서론

엔진 개발이 소형화, 경량화 및 고속 고효율화를 추구함에 따라 이에 상응하는 엔진의 윤활 특성 확보는 내구 성능과 관련하여 엔진 개발 과정에서 매우 중요한 과제이다. 특히 최근에는 HLA (hydraulic lash adjuster), timing chain, chain tensioner, oil jet, VVT 등과 같은 각종 기능성 윤활 부품의 증가와 엔진의 출력 향상에 따른 메인 베어링의 하중 증가로 인하여 채택되는 메인 베어링 부위의 half oil groove 등은 오일의 유량, 압력, 온도 및 에어레이션 등과 같은 엔진 오일 공급 조건을 더욱 열악하게 만들고

있다.¹⁻⁴⁾

그러나 이와 같은 열악한 오일 공급 조건을 극복하기 위하여 단순히 오일 유량을 증가 시키는 것은 오히려 오일 팬 시스템 내에서 공기의 과다 혼입에 의한 오일 에어레이션 증가를 유발하여 베어링 내 유막의 하중 지지력 저하에 따른 베어링 부위의 파손 또는 HLA와 같은 윤활 기능 부품의 장애를 가져오는 등 윤활 시스템의 여러 문제점을 초래하게 된다.^{4,5)}

따라서 공기의 과다 혼입에 의한 오일 에어레이션의 억제 방안으로 oil drain hole 크기를 적절히 제어하여 설계하거나 오일 팬 시스템 내의 baffle plate를 최적화하는 방안이 제시되는 등 안정된 오일 공급을 위하여 오일 팬 시스템의 중요성이 강조되고

*To whom correspondence should be addressed.
mschon@chungju.ac.kr

있다.^{5,6)}

오일 팬 시스템은 엔진 내부로 공급되는 오일을 저장하는 기능 이외에도 사용 오일을 충분히 냉각시키고, baffle plate를 설치하여 각 부품에서 윤활 및 냉각 기능을 마친 오일이 다시 모여질 때 오일 속으로 유입되는 공기를 적절히 제거할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 엔진이 차량에 탑재되어 급가속, 급제동 및 급선회 등 가혹한 운전 조건에서도 오일이 안정적으로 공급될 수 있도록 오일 팬의 형상 및 오일 pick-up 파이프의 위치를 최적화하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 엔진 경사 시험 장치(engine tilting test rig)를 이용하여 실제 차량의 급가속, 급제동 및 좌우 회전시 나타나는 엔진 경사 조건이 오일 공급 시스템에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 이를 위하여 엔진 경사 및 운전 조건 변화에 따른 오일 공급 압력의 변동량을 측정하였으며, 오일 공급 압력의 변동량과 오일 에어레이션의 상관 관계를 비교 분석하였다. 또한 오일 팬 내의 오일 거동을 가시화함으로써 오일 에어레이션의 증가 원인을 파악하고 해결 방안을 제시하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 엔진 경사 실험 장치(engine tilting test rig)이다.⁷⁾ 실험 장치는 차량의 급가속, 급제동 및 좌우 회전시 나타나는 차량의 가속 조건의 변화가 엔진 오일 공급 시스템에 미치는 영향을 엔진 경사각으로 모사할 수 있는 장치로 실험 장치에 장착된 엔진을 전후좌우 4방향으로 최대 5°/sec 속도로 50°까지 기울이면서 작동할 수 있도록 제작되었으며, 식 (1)에 엔진 경사각과 차량 가속도와의 상관 관계를 나타내었다.

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

where, θ : engine tilting angle (deg.)

a : acceleration of vehicle (m/s^2)

g : acceleration of gravity (m/s^2)

또한 운전 중 엔진의 경사각 변화에 따른 오일 공급 시스템의 안정성을 확인하기 위하여 메인 갤러

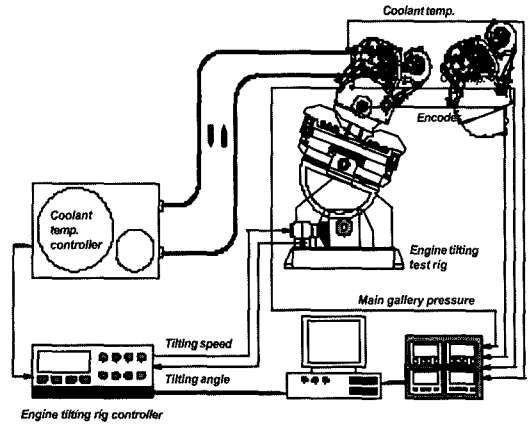


Fig. 1 Schematic diagram of engine tilting test rig

리에 압력 센서(XT-152B-190-300G, Kulite)를 설치하여 메인 갤러리 내 오일 압력 변동량을 측정하였으며, 실험 조건을 일정하게 유지시키기 위하여 냉각수 온도 컨트롤러를 설치하였고 필요에 따라 엔진의 운전 속도 및 경사 속도 등을 제어할 수 있도록 제작하였다.

2.2 오일 에어레이션 측정 방법

Fig. 2와 식 (2)는 각각 본 연구에서 사용한 오일 에어레이션의 측정 원리 및 정의를 나타낸다.^{8,9)}

오일 에어레이션 측정을 위해서 먼저 Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 운전 중인 엔진에서 표본 추출한 오일의 체적과 온도를 측정 후, Fig. 2(b)와 같이 오일 내에 포함되어 있는 공기를 제거한 순수 오일의 체적과 온도를 다시 측정한다. 이 때 오일 온도

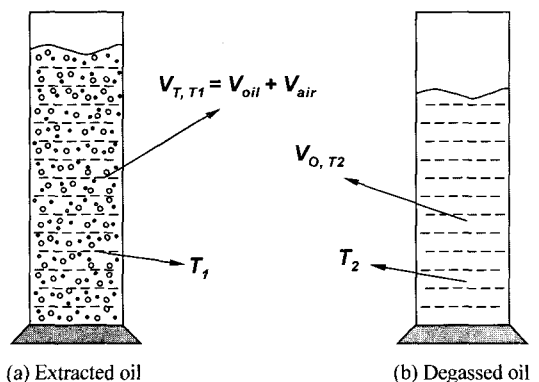


Fig. 2 Principle of oil aeration measurements

변화에 따른 체적 변화는 사용 오일의 체적 탄성 계수를 고려하여 보정하였으며, 측정 결과들을 동일한 조건에서 비교할 수 있도록 하기 위하여 기준 조건(대기압, 110°C)에서 오일 에어레이션을 정의하였다.

$$A(\%) = \frac{\text{air vol. at reference temp.}}{\text{oil vol. at reference temp.}} \times 100$$

$$= f_{ref} \left\{ \frac{V_{T, T_1}}{V_{O, T_1} [1 - (T_1 - T_2)\beta]} - 1 \right\} \quad (2)$$

where, f_{ref} : temp. correction factor

$$\left(= \frac{T_{ref}}{T_1 [1 + (T_{ref} - T_1)\beta]} \right)$$

T^1 : mean temp. of extracted oil

T^2 : mean temp. of degassed oil

T^{ref} : reference temp. (=110°C)

β : thermal expansion coefficient for oil

V_{T, T_1} : volume of extracted oil

V_{O, T_1} : volume of degassed oil

2.3 실험 방법

엔진 경사 실험 장치를 사용하여 차량의 급가속, 급제동 및 급회전시 나타나는 차량의 가속 조건을 모사하기 위하여 실험 장치에 장착된 엔진을 전후 좌우 4방향 모두 차량의 가속도 1g에 해당하는 45°까지 0.44°/sec의 일정한 속도로 엔진을 기울이면서 메인 갤러리 내 오일 압력 변동을 실시간으로 측정하였다. 이 때 일정한 엔진 운전 조건에서 메인 갤러리 오일 압력이 엔진 경사각 0°일 때의 압력 대비 0.5bar 이상 저하될 때 오일 공급 계통에 이상이 있는 것으로 판단하여 이때의 엔진 경사각을 최대 틸팅각(max. tilting angle)으로 정의하였다.⁷⁾

실험 조건을 일정하게 유지시키기 위하여 냉각수 온도를 90°C로 고정시켰으며, 엔진 회전 속도는 3,000 및 4,500rpm에서 수행하였다.

또한 엔진 운전 시간의 영향을 살펴보기 위하여 일정한 엔진 경사 조건에서 엔진을 10분 동안 운전 하면서 메인 갤러리의 오일 압력 변동량을 측정하였으며, 동일한 실험 조건에서 오일 에어레이션을 측정하여 메인 갤러리 압력 변동과의 상관 관계를 비교 검토하였다.

한편, 엔진 경사 조건 변화에 따른 baffle plate 및 오일 pick-up 파이프 위치 등을 최적화하고, 오일 에어레이션 발생 원인을 분석하기 위하여 실제 엔진의 오일 팬과 동일한 기하학적 형상을 갖는 투명 아크릴 오일 팬을 제작하여 오일 팬 내부의 오일 유동을 가시화하였다.

실험은 0.8L의 배기량을 갖는 엔진을 대상으로 하였으며, 주요 제원을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of test engines

Type	SOHC
Displacement	796cc
Bore × Stroke	68.5×72
Engine oil	10W30
Oil pan material	Cast iron

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 메인 갤러리 내 오일 압력 거동

엔진 경사각 변화에 따른 오일 공급 압력 변화를 살펴보기 위하여 먼저 엔진 경사각 변화에 따른 메인 갤러리의 오일 압력 변화를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이 때 엔진의 경사각 변화는 상대적으로 취약한 오일 공급 조건을 갖는 우회전 조건이며, 엔진의 회전 속도는 3,000rpm이다. 또한 엔진의 오일 공급량은 기준 오일 공급량 대비 1리터 부족한 상태인 최저 공급 오일량 조건에서 실험을 수행하였다.

선도에 나타낸 바와 같이 일정한 운전 조건에서

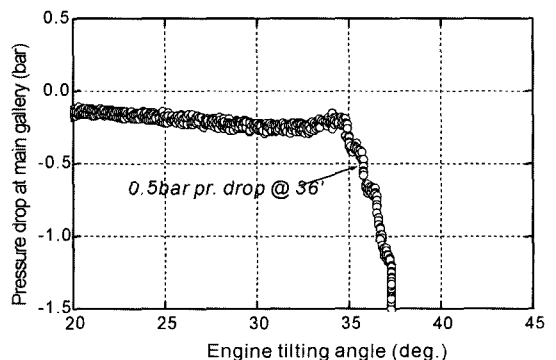


Fig. 3 Effects of the engine tilting angle on the oil pressure variation at main gallery

엔진 경사각이 증가함에 따라 오일 팬 내의 오일 거동이 변화하여 펌프를 통한 오일 공급 압력이 변화되고 있으며, 35°의 경사각을 지나면서 메인 갤러리의 오일 압력이 급격하게 떨어지고, 이후 더욱 저하되어 36°의 경사각에서 오일 공급 계통의 안정성 판단 기준인 0.5bar 이상의 오일 압력 저하 현상이 나타나는 최대 틸팅각이 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 오일 압력이 급격하게 떨어지는 이유는 엔진 경사각이 증가함에 따라 펌프의 오일 흡입구가 대기 중에 노출되어 과도한 공기 혼입 현상(starvation)이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서 실험한 엔진의 경우 전술한 실험 조건에서 36°의 경사 조건에 해당하는 0.73~0.75g의 차량 우회전 조건을 넘어서면 엔진의 메인 갤러리 내 오일 압력 강하 현상이 나타날 수 있음을 예측할 수 있으며, 이 경우 엔진의 오일 공급 계통에 과도한 공기의 혼입으로 베어링 내 유막의 하중 지지력이 저하되어 베어링 부위의 파손 및 HLA 등과 같은 기능성 부품의 장애 등 실차 운전 조건에서 치명적인 원인을 제공하게 되므로 엔진 율환 시스템의 안정성 측면에서 반드시 피해야 한다.

3.2 운전 시간의 영향

엔진 오일 공급 압력이 급격하게 저하되는 특정 경사 조건에서 운전 시간 변화에 따른 오일 압력 저하 현상의 추가 발생 여부를 확인하기 위하여 운전 시간 경과에 따른 메인 갤러리의 오일 압력 변화를

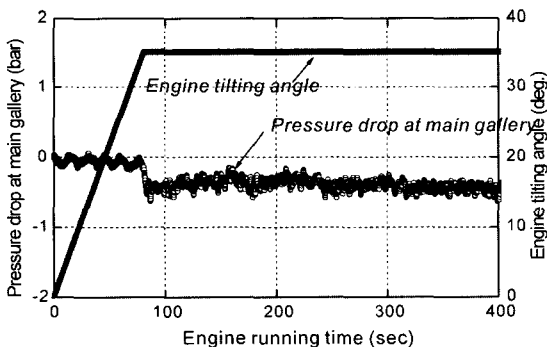


Fig. 4 Oil pressure variation at of main gallery with engine running time

측정하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

엔진 경사각 고정 후, 운전 시간 경과에 따른 메인 갤러리 내 오일 압력은 최대 틸팅각이 나타나는 엔진 경사각 이후에 대체로 일정하게 유지되고 있어, 운전 시간 경과가 오일 공급 시스템의 안정성에 미치는 추가적인 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

3.3 오일량의 영향

Fig. 5는 엔진에 주입되는 오일량의 변화에 따른 엔진의 최대 틸팅각 변화를 나타낸 선도이다. 엔진의 경사각 변화는 Fig. 3에 나타낸 것과 동일한 우회전 조건이다.

기준 오일 공급 조건에서는 최대 틸팅각이 43° 이상으로 측정되어 약 0.9g 이상의 가혹한 가속 조건에서도 안정된 오일 공급 능력을 갖는 것으로 나타났다. 그러나, 오일 공급량이 감소함에 따라 최대 틸팅각이 현저하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 실험에 적용된 엔진의 경우 차량의 좌우 회전 조건에서 엔진의 최대 틸팅각을 증가시키기 위해서는 오일 공급량을 적절하게 유지하는 것이 필요하다는 것을 확인할 수 있으며, 엔진 개발 초기 단계에서 이와 같은 실험을 수행함으로써 적정 오일 공급량을 결정하고, 실차 조건에서의 율환 시스템의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

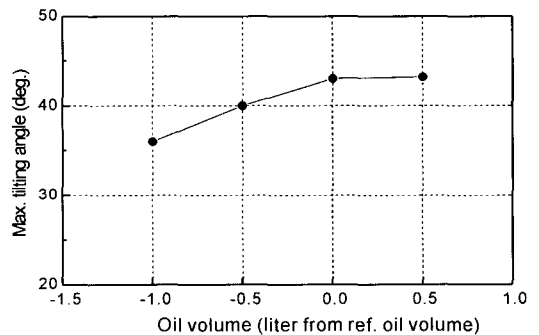


Fig. 5 Effect of the oil volume on the max. tilting angle

3.4 오일 에어레이션 특성

Fig. 6은 엔진 경사각 변화에 따른 오일 에어레이션 변화를 살펴보고 오일 공급 압력과의 상관 관계를 규명하기 위하여 Fig. 3에 나타낸 실험 결과와 동

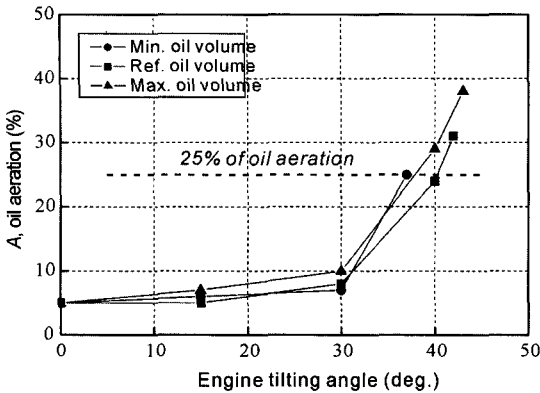


Fig. 6 Effect of the engine tilting angle on the oil aeration

일한 우회전 조건에서 엔진 경사각 변화에 따른 오일 에어레이션을 측정하여 나타낸 선도이다.

에어레이션을 측정하기 위한 오일은 펌프 출구에서 샘플링 하였으며, 공급 오일량 변화에 따른 영향을 확인하기 위하여 기준 공급 오일량 및 기준 공급 오일량에서 1리터 부족한 최저 공급 오일량 및 0.5리터 과잉 공급된 최대 공급 오일량 조건에서의 실험도 병행하였다. 이 때 엔진 오일 공급 계통의 안정성 판단 기준인 최대 톨팅각은 오일 에어레이션이 25%이상 나타나는 엔진 경사각을 임의로 정의하여 나타내었다.

선도에 나타낸 바와 같이 오일 에어레이션은 3가지 오일 공급 조건 모두 30°의 엔진 경사각을 지나면서 급격하게 증가하는 것으로 나타나 특정 경사각을 지나면서 엔진 내부로 공급되는 오일에 과도한 공기가 혼입되고 있으며, 이러한 과도한 공기의 혼입에 의한 오일 에어레이션 증가로 인하여 메인 갤러리의 오일 압력 저하 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한 최저 공급 오일량 조건에서 오일 에어레이션이 25% 이상으로 정의하여 측정한 최대 톨팅각은 Fig. 3에 나타낸 메인 갤러리 오일 압력 변동으로 정의한 엔진 톨팅 각과 동일하게 37°로 나타났으며, 기준 공급 오일량 및 최대 공급 오일량 조건에서도 두 측정 방법에서 나타나는 톨팅 각의 차이는 Table 2에 나타낸 바와 같이 최대 1.5°인 것으로 나타나 본 실험에 적용한 엔진의 경우 임의로 정의한 오일 에어레이션 25%와 메인 갤러리의 0.5bar 오일 압력 강

Table 2 Comparison of max. tilting angle test method

	Oil pr. method	Aeration method
Min. oil volume	36.0	37.0
Ref. oil volume	41.0	42.5
Max. oil volume	39.0	38.0

하는 매우 밀접한 상관 관계가 있음을 확인할 수 있다.

3.5 오일 팬 내부 유동 가시화

본 연구에서는 엔진 경사 조건 변화에 따른 오일 팬 내부의 오일 유동을 가시화하여 오일 공급 압력 저하 현상의 원인인 오일 에어레이션의 발생 원인을 분석하고, 이를 개선하기 위하여 오일 팬 내부의 오일 거동을 가시화하여 오일 공급 시스템의 최적 설계에 적용하였다.

Fig. 7은 엔진 정지 상태와 3,000rpm으로 운전될 때의 오일 팬 내부의 오일 거동을 비교하여 나타낸 것이다. 가시화 결과를 살펴보면, 엔진 내부로 오일이 순환됨에 따라 오일 팬 내의 오일량이 다소 감소하였으며 오일 내부에 기포 상태의 공기가 존재하는 것으로 나타나 에어레이션이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 유회 기능을 마친 오일이 오일 팬으로 다시 모여지면서 유면 위로 낙하하여 유면 위에 다량의 기포가 발생되고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 기포 상태의 공기는 아래쪽에 위치한 오일 펌프 흡입구에 도달되기 전에 어느 정도 제거되어 엔진 내부로 공급되는 오일의 에어레이션 발생에는 비교적 큰 영향을 미치지 않는지만, 엔진 회전 속도의 증가로 오일 유량이 증가하거나 오일 공급량이 적을 경우 유면이 낮아져 기포가 충분히 제거될 수 있는 시간이 짧아지게 된다. 이 경우 기포 상태의 공기가 오일과 함께 엔진 내부로 공급되어 운

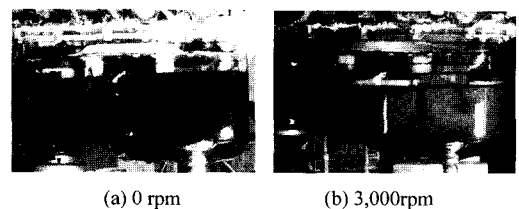


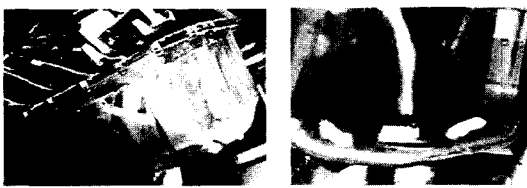
Fig. 7 Effect of engine running condition on the oil flow in the oil pan (ref. oil volume)

활유의 점도 및 압축성을 변화시키고, 오일 펌프의 효율 및 각종 베어링의 강성 저하 및 HLA와 같은 오일 관련 기능 부품의 성능을 저하시키게 된다. 특히 엔진이 차량에 탑재되어 유면과 오일 펌프 흡입구가 더욱 가까워지는 우회전 조건이 될 경우 엔진 내부로 공급되는 오일의 에어레이션 발생량이 크게 증가될 수 있음을 쉽게 예측할 수 있다.

이와 같은 차량의 우회전 조건의 경우를 Fig. 8에 나타내었다. 선도에 나타낸 엔진 경사 조건은 오일 공급 압력 저하 현상이 나타난 35° 경사 조건이며, 차량 조건으로는 약 0.7g의 우회전 조건에 해당한다. 또한 오일 공급량은 기준 공급량에서 1리터 부족한 최저 공급 오일량이다.

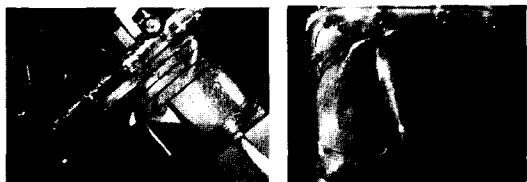
가시화 결과에 나타난 바와 같이 오일 펌프 흡입구의 일부가 유면에 노출되어 유면에서 발생하는 다량의 기포가 엔진 내부로 유입됨과 동시에 과도한 공기의 혼입 현상이 발생하여 오일 에어레이션 증가 현상이 발생하고 있음을 다시 한 번 확인할 수 있다. 따라서 오일 펌프 흡입구를 flywheel 방향으로 이동시켜 오일 에어레이션 발생 원인을 제거하면 상대적으로 열악한 우회전 조건에서도 안정적인 오일 공급 조건을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 Fig. 8에 나타낸 가시화 결과를 이용하여



(a) Intake side view (b) Front side view

Fig. 8 Oil flow visualization in the oil pan filled with min. oil volume at 35° of tilting condition (flywheel down)



(a) Intake side view (b) Front side view

Fig. 9 Oil flow visualization in the oil pan with modified oil pick-up pipe at 44° of tilting condition (flywheel down, min. oil volume)

오일 펌프 흡입구를 flywheel 방향으로 20mm 연장시킨 후 Fig. 8에 나타낸 결과와 동일한 실험 조건에서 오일 팬 내부의 오일 거동을 가시화하여 나타낸 결과이다.

오일 펌프 흡입구를 flywheel 방향으로 20mm 이동시킨 결과, 약 1g의 차량 가속 조건에 해당하는 44°의 경사 조건에서 오일 펌프 흡입구가 유면에 노출되는 것으로 나타나 매우 안정된 오일 공급 시스템을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 가시화 결과를 확인하기 위하여 동일한 실험 조건에서 메인 갤러리의 압력 변동을 측정하여 Fig. 10에 나타내었다. 엔진의 flywheel 방향으로 20mm 이동시킨 오일 펌프 흡입구를 장착한 경우 엔진 경사각이 약 42°까지 증가하여도 메인 갤러리의 압력 강하가 없는 것으로 나타났으며, 오일 공급 계통의 안정성 판단 기준인 0.5bar 이상의 오일 압력 저하 현상이 나타나는 최대 틸팅각이 기존의 오일 공급 시스템 대비 8° 증가한 44°로 나타나 오일 공급 시스템 안정성의 개선 효과를 다시 한 번 확인할 수 있다.

이상의 오일 공급 시스템 개선 결과를 공급 오일량 변화에 따라 측정하였으며, 그 결과를 Table 3에 정리하였다.

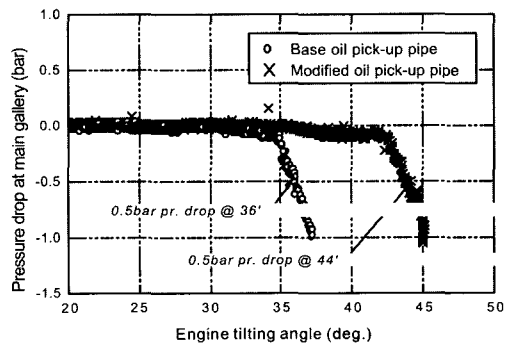


Fig. 10 Effect of modified oil pick-up pipe on the oil pressure variation at main gallery

Table 3 Comparison of max. tilting angle

Oil volume	Base pick-up pipe	Modified pick-up pipe
Min.	36.0	44.0
Ref.	41.0	45.0
Max.	39.0	45.0

4. 결론

본 연구에서는 엔진 경사 시험 장치를 이용하여 실제 차량의 급가속, 급제동 및 좌우 회전시 나타나는 엔진 경사 조건이 오일 공급 시스템에 미치는 영향을 다양한 실험을 통하여 고찰하였으며, 오일 공급 시스템의 최적화에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일정한 운전 조건에서 엔진 경사각이 증가함에 따라 오일 팬 내의 윤활유 거동이 변화하며, 메인 갤러리 내의 오일 압력 거동을 분석함으로써 오일 공급 안정성을 효과적으로 평가할 수 있었다.
- 2) 메인 갤러리 내의 오일 압력 변동 및 오일 에어레이션으로 정의한 엔진 최대 톨팅각은 거의 동일한 것으로 나타나 메인 갤러리 내의 오일 압력 강하의 주요 원인은 과도한 공기 혼입에 의한 에어레이션 발생량의 증가 때문인 것임을 확인하였다.
- 3) 오일 팬 내부의 오일 유동 가시화 결과를 이용하여 공기 혼입에 의한 오일 에어레이션의 증가 원인을 효과적으로 파악하였으며, 이를 통해 오일 공급 시스템의 안정성을 최적화하였다.

References

- 1) F. Maassen, F. Koch, F. Pischinger, "Connecting Rod Bearing Operation with Aerated Lube Oil," SAE 981404, 1998.
- 2) O. Willenbockel, W. Schnittger, J. Subhedar, M. VanSlyke, G. Kolodziej, "ECOTEC-GM's New Global 4-Cylinder Engine," SAE 2000-01-1392, 2000.
- 3) S. Inamijima, T. Ninomiya, S. Kawai, T. Igarashi, S. Yonetamari, "Development of Nissan's New Generation 4-Cylinder Engine," SAE 2001-01-0328, 2001.
- 4) G. Maas, D. Schmidt, W. Speil, "Performance of Hydraulic Lash Adjusters with Regard to Valve Train Noise at Cold Starts and Short Term Start," SAE 900451, 1990.
- 5) M. A. Mian, "Design and Analysis of Engine Lubrication Systems," SAE 970637, 1997.
- 6) F. Koch, T. Hardt, F. Haubner, "Oil Aeration in Combustion Engines Analysis and Optimization," SAE 2001-01-1074, 2001.
- 7) J. E. Yun, M. S. Chon, "Safety Estimation of Engine Lubrication System using Tilting Test Rig," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp. 1-6, 2002.
- 8) INA Test Spec, INA Test Codes for HLA Oil Supply Condition Tests, 1997.
- 9) J. E. Yun, M. S. Chon, "A Study on the Aeration Mechanism in the Engine Lubrication System," Journal of KSTLE, Vol.17, No.6, pp.447-452, 2002.