

# 오일 Aeration에 따른 엔진의 마찰 및 윤활 특성에 대한 연구

## A Study on the Engine Friction & Lubrication Characteristics related with Oil Aeration

김영직, 이창희, 윤정의  
대우자동차 기술연구소 엔진시험2팀  
Young-Jic Kim, Chang-Hee Lee and Jeong-Eui Yoon  
Engine Test 2 Team, Technical Center, DWMC

**Abstract** - This paper presents the friction and lubrication characteristic related with oil aeration. It is well known that oil aeration occurs severe problem on lubrication system, in particular, in the engine bearings and hydraulic lash adjuster. In this study, engine tests were carried out in motoring conditions. In order to investigate oil aeration characteristics, we measured oil aeration with respect to oil temperature, oil viscosity, modified oil drain system. From the results, we concluded that aeration can be reduced by improving oil drain system and FMEP can be reduced by minimising of aeration.

**Key words** - Aeration, FMEP(friction mean effective pressure), Oil viscosity, Oil drain system, Motoring

### 1. 서론

엔진이 고출력, 고속화되면서 윤활 시스템은 중요한 과제로 연구되었다. 윤활 시스템의 뒷받침이 없이는 엔진의 고속화는 실현될 수 없다. 윤활 시스템이 제대로 작동해야 냉각시스템의 안정을 기대할 수 있고, 그것을 바탕으로 엔진은 정상출력을 낼 수 있다.<sup>(1-3)</sup>

그러나 고성능 엔진을 실현하기 위해서는 풀어야 할 숙제가 있는데, 그것은 오일 중에 공기가 혼입되는 aeration이라는 현상이다. 오일 중에 공기가 혼입되면 고속으로 작동하는 bearing과 hydraulic tappet에 치명적인 손상을 주게된다. 유체마찰을 하는 엔진 각 접동부에 공기가 혼입되면, 오일유막이 깨지고 경계, 건조마찰이 되어 마찰력에 의한 고온이 발생하고 이에 따라 부품의 마멸, 소착을 초래한다. 이러한 현상이 일어날 수 있는 실제 차량에서 엔진의 운전조건은 다양하다.<sup>(4)</sup> 운전자의

운전성향에 따라 급발진, 급선회, 급정거 등의 가혹한 운전조건은 엔진 오일팬의 오일유면을 변경시켜, 공기가 오일펌프로 빨려들어가 오일내에 공기가 혼입되는 aeration을 유발하여 정상조건보다 bearing을 손상하는 요인이 많아지기 때문에 비정상조건에 대해서도 윤활특성에 대한 연구가 요구된다. 이러한 엔진 윤활시스템에서 aeration에 대한 연구는 국내에서 미약한 수준이다.

이에 본 논문에서는 aeration과 엔진의 마찰 및 윤활 특성에 대하여 초점을 맞추었고, 엔진 motoring시 엔진 윤활시스템의 현상(aeration, 오일압, 오일온도), 엔진마찰구동력(FMEP)과 aeration oil 점도의 관계, oil drain system을 개선하였을 때 aeration의 변화와 그 영향을 알아보고자 한다.

### 2. Aeration에 대한 고찰

1) Aeration의 정의

Aeration이라 함은 오일에 공기가 녹아 있거나 기포상태로서 (직경 $10^{-3}$ ~1mm) 산재되어 있는 것을 의미한다. 이 때 오일에 섞여 있는 공기방울들은 오일과 함께 움직이며 압축성이기 때문에, 오일의 강성을 떨어뜨려 베어링을 포함한 엔진의 제 운동부에 악영향을 신뢰성에 치명적인 결과를 초래한다.

## 2) Aeration의 원인

여러 가지 원인이 있으며, 그것들은 다음과 같다.

### ① Crank Shaft의 balance weight의 회전에 의한 oil의 비산

오일팬의 깊이가 얇거나 오일팬 내의 오일 수준이 너무 높으면 오일이 크랭크 축에 의해 비산되는 비율이 높아진다. 이것은 크랭크 축이 오일유면과 충돌하면서 생기는 공기의 혼입, balance weight가 오일을 통과할 때 생기는 balance weight면에서의 박리가 주원인이다. balance weight에 의해 생기는 aeration량은 엔진의 회전수가 증가함에 따라 직선적으로 증가한다. 이때 생기는 aeration에 의해 엔진의 마찰손실이 증가하며 밸브의 tappet에 오작동을 유발하여 출력을 감소시킨다. 오일팬의 형상에 따라 그 양상이 바뀌며, 오일팬의 baffle plate의 design도 aeration양에 영향을 준다.

### ② OIL DRAIN SYSTEM

실린더 헤드로부터 오일팬으로 drain되는 경로의 형상에 따라 aeration의 양은 달라진다. 엔진head로부터 낙하하는 오일이 oil pan 오일 유면과 만날 때 aeration은 발생한다.

### ③ OIL PUMP

Oil pump의 성능이 과다하게 높은 경우에 oil pan으로 drain되는 오일량이 많아져서 aeration이 증가한다. 다른 경우는 drain되는 양보다 oil pump가 빨아들이는 양이 많은 경우이며, 이때는 oil pan내의 오일부족현상(oil starvation)이 발생하여 oil strainer로 공기가 유입돼 aeration이 발생한다.

### ④ PCV(POSITIVE CRANKCASE VENTILATION) SYSTEM

PCV 통로가 막히거나 PCV밸브가 틀어버리면 실린더헤드와 크랭크 케이스 내의 압력 차이가 발생하고 이의 보상작용으로 oil pan으로 떨어지는 oil의 양상이 변하여 aeration 양이 증가한다.

### ⑤ OIL TEMPERATURE

Aeration량은 oil의 온도가 높아질수록 증가하나, 엔진회전수에 의한 효과보다는 영향이 작다. 오일 온도가 증가하면 오일의 점도가 떨어진다. 오일의 점도가 떨어질수록 bearing clearance는 커지게 되어, 엔진으로 공급되는 오일량은 증가하게 된다. 그 결과 실린더 헤드로부터 귀환되는 오일의 양과 속도가 증가하게 되어 aeration이 증가하게 된다.

### ⑥ OIL 자체의 기포발생<sup>(1)</sup>

엔진 오일 중에 포함되어 있는 기포는 다음과 같은 두가지 형태로 존재한다.

· SOLVED AIR : 오일중에 용해되어 있는 공기에  
 며, 오일 압력이 높으면 높을수록 용해되어 있는 공기가 증가한다. 이와 같이 공기가 용해되어 있는 oil이 상대적으로 낮은 압력에 노출되면 오일자체에서 기포가 발생되어 aeration량이 증가한다. (Fig. 1 참조)

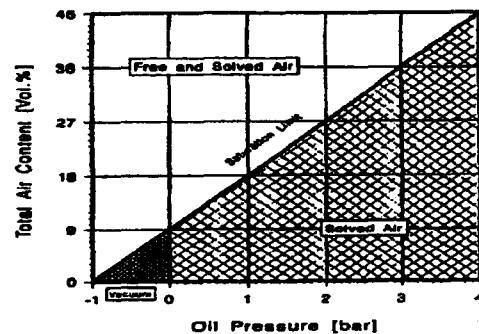


Fig. 1 오일압과 공기함유량과의 관계

· FREE(UNSOLVED) AIR : Oil중에 육안으로 식별할 수 있는 기포상태의 air

3) AERATION의 영향

① 윤활회로

전체 윤활회로 내의 오일압력이 저하한다. 오일압력의 저하는 엔진 각 부로 공급되는 오일량의 저하를 말하며, 운동부위의 윤활성능을 제대로 낼 수 없다.

② HYDRAULIC TAPPET

Tappet의 고압 chamber내에 공기가 유입되면 tappet이 압축성이 되어 valve train의 오작동을 유발하게 된다. Tappet접촉부에 오일공급이 떨어지면 경계마찰이 되어 소음이 증가한다. Valve train의 오작동은 엔진 흡배기에 영향을 주어 출력 저하 및 emission의 증가를 초래한다.

③ MAIN BEARING & CON-ROD BEARING

윤활 회로내의 오일 압력이 떨어지면 main gallery의 오일압력이 main bearing과 connecting rod bearing의 원심력을 극복하기 위한 압력보다 낮아지게 되어 bearing부위의 Oil 공급이 중단되어 bearing소착을 초래한다.

④ OIL PUMP

Bubble(공기)이 증가하여 cavitation이 발생하여 pump효율이 저하된다.

⑤ 엔진출력

마찰력이 증가하여 엔진출력은 감소하게 된다.

2. 실험

1) 실험장치 및 실험조건

엔진의 마찰토크는 AC Dynamometer에서 측정된 구동토크로 구한다. 실험은 2998cc 6기통 가솔린엔진에서 수행되었으며 시험조건은 표 1.과 같다. 기본적으로 엔진 speed를 기준으로 하여 시험을 하였으며, 오일온도의 변화의 따른 aeration과 오일의 점도가 달라질 때 즉, 오일을 교환하였을 때 aeration이 어떻게 변하는가를 알아보기 위해 BASE 엔진오일은 SAE5W30로 사용하고, 추가로

SAE15W40을 사용하여 비교하였다. 엔진의 oil drain system(oil drain pipe)을 수정하여 aeration의 영향을 평가하였다.

엔진(rpm)	2000, 4000, 6000
Oil Temp.(℃)	90,120,150
엔진Oil	SAE5W30, SAE15W40
엔진Oil Drain Sys.	with Drian pipe, w/o Drain pipe

표 1.

2)오일압측정

위치는 oil main gallery에서 측정하였으며, 센서는 미국 Kulite사 제품으로 최대 5k까지 압력을 측정할 수 있다.

3) Aeration 측정 및 정량화

본 연구에서는 Aeration 측정을 다음과 같이 하고 있다.

① 측정장비 : 미국 Micromotion사의 mass flow meter로 유체의 밀도와 유량을 real time으로 측정을 한다.

② 장비측정원리 : Flowmeter housing 안쪽에 있는 flow sensor tube는 electromagnetic drive system에 의해 고유진동수로 진동을 한다. 이 진동은 진폭이 1mm 이하이고 진동수는 약 80Hz 정도이다. 유체가 진동 tube를 통과할 때 수직방향의 momentum이 유체에 가해진다. 진동사이클의 절반 동안은 tube가 위쪽으로 움직임에 따라 flowmeter로 흘러들어온 유체는 tube의 움직임을 저항하기 위하여 아래쪽으로 물리고, 유체가 흘러 나갈 때는 그 반대현상이 발생한다. 이러한 저항들의 조합은 flow sensor tube에 비틀림현상을 유발하는데 이를 "Coriolis effect"라고 한다. 진동사이클의 나머지 절반동안에는 tube가 아래쪽으로 움직여서 비틀림은 반대방향으로 발생한다. Sensor tube의 비틀림 양은 tube를 통과하는 유체의 flow rate에 정비례하며 전자기 sensor가 flow tube의 양측에 부착되어 진동 tube의 각속도를 측정한다. 임의의 점에서

이 두 속도 signal간의 시간차는 tube의 비틀림으로 인해 발생하고 sensor는 이 정보를 장비의 electronic unit로 보내어 여기서 질량유량에 정비례하는 출력신호로 바꿔준다. 2개의 flow tube가 있는 경우에는 2개의 tube가 180°의 위상차를 두고 진동, 비틀림이 발생하고 각각의 비틀림 양을 조합하여 Oil의 유량과 밀도를 결정한다.

사진은 오일의 유량과 밀도를 측정하는 장비의 센서 부분을 촬영한 것이다.<sup>(5)</sup>

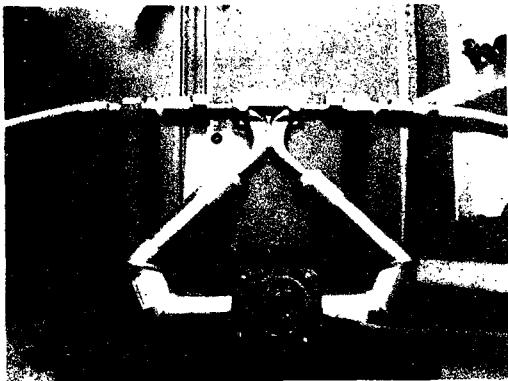


사진 1. Mass flow meter

### ③ AERATION 계산

주요 측정값은 오일의 밀도와 온도이다. 엔진을 가동시키고 엔진오일온도를 일정하게 하여 오일의 밀도를 측정한다. 만약 공기가 오일 중에 존재한다면 오일의 밀도 값은 떨어질 것이다. 이때 측정된 밀도 값과 정상상태의 값과의 차로 aeration 값을 계산할 수 있다. 기준이 되는 오일의 밀도 값은 측정 온도 조건에서의 밀도 값으로 정상상태(엔진정지상태)에서 측정된 값이다.

#### i) 대기압조건에서 Aeration

$$\frac{\rho_{ref} - \rho_{measured}}{\rho_{measured}} \times 100(\%) = Aeration(\%)$$

엔진상태로 본다면 Oil Pan에서의 Aeration이다.

#### ii) 압력조건하에서의 Aeration

$$\frac{\rho_{ref} - \rho_{measured}}{\rho_{measured}} \times \frac{OIL\ 압력 + 대기압력}{대기압력} \times 100(\%) = Aeration(\%)$$

엔진상태로 본다면 Oil Pump를 지난 Oil gallery에서의 Aeration이다.<sup>(6)</sup>

## 3. 실험결과 및 고찰

### 1) Oil 온도 엔진회전수와 aeration

Fig.2은 온도에 따른 aeration 결과이다. Oil온도가 증가할수록 aeration은 감소하는 경향을 보였고, 엔진speed가 증가하면 aeration양이 증가하다 고속에서는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 일반적으로 엔진 oil은 온도가 올라가면 점도가 떨어지며, 점도가 떨어지면 오일의 순환량이 많아지고 그것에 비례하여 aeration이 증가하는 것으로 알려졌다. 그러나 본 실험결과는 그와는 반대 현상이 나타났다. 이 현상에 대해 본 연구자는 중력(gravity)에 의한 air bubble 제거효과가 고온에서 더 유리한 것으로 설명할 수 있다. 중력에 의한 air bubble 제거효과라 함은 오일속의 공기 방울이 중력에 의해 스스로 떠올라 제거되는 것으로 고온에서는 이 현상이 활발하다. 이것은 엔진의 baffle plate, oil pan, drain pipe design 설계시 고려되어야 할 사항이다. 엔진 speed의 증가에 따라 aeration은 증가하다 고속에서 감소하는 경향을 보이는 것도 oil pan, oil drain pipe 형상과 관련된 것으로 생각되며, 이와 관련된 결과는 oil drain system변경 test에서 잘 입증해준다.

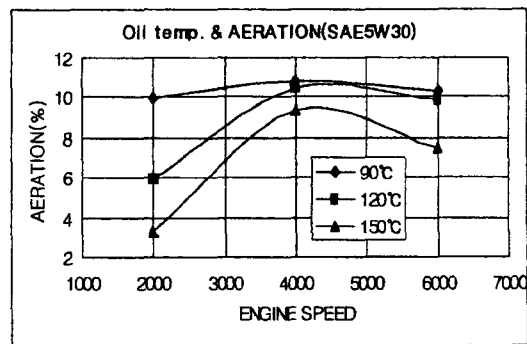


Fig. 2 Oil Temp. & Aeration

### 2) Oil의 점도와 Aeration

Fig.3은 온도에 따른 aeration 결과이다. Oil 점도와 aeration의 영향을 알아보기 위해 가솔린용 엔

진 oil SAE 5W30, diesel용 엔진oil SAE 15W40 두종류를 사용하였다. 시험결과는 점도가 낮은 SAE 5W30이 aeration이 높게 나타났다. 엔진 oil의 점도가 낮을수록 엔진 베어링 각 부분 및 gallery로 순환되는 오일양이 증가하므로 aeration이 증가하는 것으로 생각된다. 동일온도 조건에서는 점도지수의 영향이 우세하다는 것을 알 수 있다.

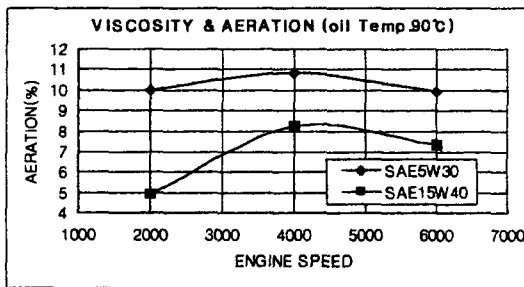


Fig. 3 Viscosity & Aeration

### 3) Oil drain system 변경에 따른 Aeration

Fig. 4은 Oil drain system의 변경에 따른 시험결과이다. Oil drain system의 변경은 엔진의 cylinder head로부터 떨어지는 oil을 oil sump로 연결해주는 oil drain pipe의 제거를 의미한다. Oil aeration은 system의 수정 후 감소되었으며, 엔진 회전수에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이 결과 엔진오일의 drain system의 design에 따라 aeration의 저감이 가능하다는 것을 알 수 있다. 단 순히 oil drain pipe를 제거한 것으로 최대 3.3%의 aeration 감소는 oil 순환 계통의 design이 중요하다는 것을 시사해 준다.

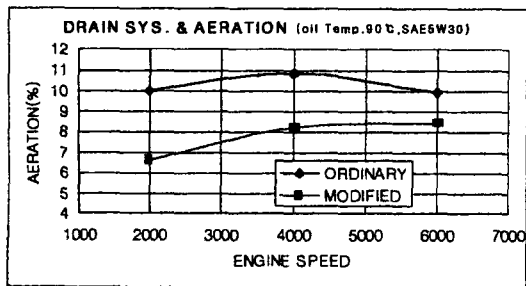


Fig. 4 Drain Sys. & Aeration

### 4) Aeration과 마찰평균유효압력(FMEP)

Fig. 5는 엔진 aeration 감소시 엔진의 마찰평균유

효압력변화를 나타낸 것이다. 이 결과는 oil drain pipe 제거 전후의 aeration 변화에 따른 FMEP를 비교하여 나타낸 것이다. Aeration이 감소한 것에 따라 FMEP도 감소하였다. 이것으로 oil aeration이 기계손실을 증가시키는 하나의 원인임을 알 수 있다.

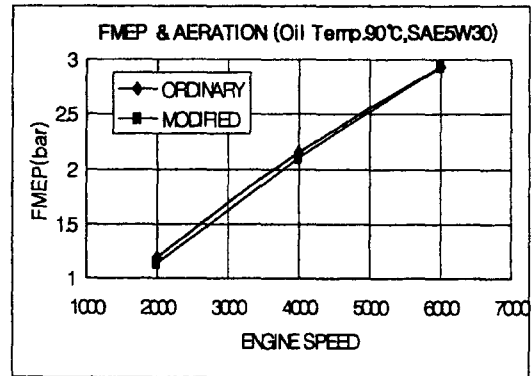


Fig. 5 FMEP & Aeration

## 4. 결론

본 연구에서는 엔진 오일의 aeration과 엔진 윤활과 마찰의 관계를 연구하였다. 결과는 다음과 같다.

- ① Oil 온도가 올라갈수록 aeration은 감소하였으며, aeration의 감소효과는 온도의 영향보다는 oil 순환 시스템 design의 영향이 더 크다.
- ② Aeration의 감소는 Oil Drain sys.의 design에 영향을 받으며, aeration의 감소로 기계손실을 줄일 수 있다.
- ③ Aeration은 점도에 영향을 받으며, 점도가 작을수록 aeration이 발생이 크다.

## 참고문헌

- (1) A.Hass, U.Geiger, and F. Maaben, "Oil Aeration in high Speed Combustion Engines",

SAE940792

(2) Franz Koch and Franz Maassen,  
"Development Modern Engine Lubrication  
System", SAE970922

(3) A.Hass, T. Esch, E. Fahl, P. Kreuter, and F.  
Pischinger "Optimized Design of the Lubrication  
System of Modern Combustion Engines",  
SAE912407

(4) 최재권 외, "오일내 공기혼입이 엔진베어링의  
신뢰성에 미치는 영향", 현대자동차 연구논문지제1  
권, 제1호, pp1-7, 1993

(5) 김재석, "Oil Aeration", 대우자동차 기술세미나  
material, 1999

(6) INA, TEST SPEC., 1998