

# 엔진 윤활 시스템에 있어서 Aeration 발생 Mechanism 연구

윤 정 의, 김 봉 조

대우자동차 기술연구소 엔진시험2팀

## A Study on the Aeration Mechanism in the Engine Lubrication System

Jeong-eui Yun, Bong-jo Kim

Engine Test II Team, Technical Center, DWMC

**Abstract** - In development process of engine lubrication system, many failure cases are related with aeration problem. Therefore, it is very important to clarify the aeration in the engine oil circuit system. As of today, many factors have been introduced as the major cause in the engine oil aeration. However, still many test data related with those are required to clearly understand it. In this paper the aeration measurement system and calculation method are introduced. And also using this system we measured engine oil aeration for various cases. From these results some conclusions are reduced.

**Key words** – Engine, Aeration, Lubrication, Oil pan

### Nomenclature

- $V_{Total(T_1)}$  : Volume of extracted oil (aerated)  
at  $T_1$  temperature
- $V_{oil(T_1)}$  : Volume of degassed oil (de-aerated)  
at  $T_1$  temperature
- $V_{air(T_1)}$  :  $= V_{Total(T_1)} - V_{oil(T_1)}$
- $T_1$  : Mean temperature of (aerated) oil  
when extracted
- $T_2$  : Mean temperature of (de-aerated)  
oil after degassing
- $T_{ref}$  : Reference temperature, 110°C
- $\beta$  : Thermal expansion coefficient  
for oil [ $1/C^\circ$ ]

### 1. 서론

엔진의 윤활시스템 설계 시 설계자에게 있어서 가장 어려운 부분은 운전 중 윤활유 거동 (온도, 압력, 점도, 통기,..) 예측 부분이다. 최근 개발되는 엔진이 대부분 고속, 고회력 조건에서 운전 됨으로 인해 이에 대한 기초적인 실험 데이터의 부족으로 인해 윤활 시스템의 설계에 어려움이 나타나고 있다<sup>(1-3)</sup>. 그리고 일선 산업 현장에 엔진 윤활 시스템의 내구 검증과정에서 자주 겪게 되는 어려움은 설계 시 예측하지 못한 결과(베어링 표면의 국부적인 파손, 기타 오

일 관련 부품의 비정상적인 거동 등)와 마주쳤을 때 그 원인을 찾아 내는 일이다. 이때 개발자에 있어서 가장 어려운 부분 중의 하나가 윤활유의 거동과 관련된 통기(Aeration)이다. 통기는 오일에 녹아 있거나 기포상태로서 존재하는 공기를 의미하며, 오일 속에 존재하는 이러한 공기는 윤활유의 점도 및 압축성(Compressibility)을 변화 시켜 오일펌프의 효율 및 각종 베어링의 강성 저하와 함께 HLA와 같은 오일 관련 기능 부품의 성능을 저하 시키게 된다.

엔진에 있어서 통기량은 운전 조건에 따라 다양하게 변화하며, 실제 차량에서는 운전자의 운전성향에 따라 달라질 수 있다<sup>(4)</sup>. 특히 운전자의 운전 성향에 따라 통기량이 달라지는 것은 오일 팬 때문이다. 엔진의 오일 펌프에 유입되는 오일은 오일 팬에 담겨져 있으며, 오일 팬에 담겨진 오일은 운전자의 운전성향 (가감속 및 회전)에 따라 유면의 거동이 급격히 달라지기 때문이다.

본 연구에서는 먼저 엔진 개발에 있어서 이러한 통기량을 측정하기 위해 자체적으로 개발한 측정 장비의 설명과 함께, 이를 이용한 통기량의 계산방법을 정의하였다. 그리고 이렇게 개발한 측정 장비를 실 엔진에 적용하여 엔진의 운전 조건 변화에 따른 통기량의 변화를 측정함으로써 엔진 오일에서의 통기 현상을 정량적으로 관찰하였다.

## 2. 실험

오일에 공기가 녹아 있거나 기포상태로서 (직경10-3~1mm) 산재 되어 있는 것을 의미하는 통기(aeration)는 운전 중 압축성의 특성으로 인해 오일의 강성을 떨어뜨려 베어링을 포함한 엔진의 제 운동부에 악영향을 주어 신뢰성에 치명적인 결과를 초래한다. 엔진 오일에 있어서 이러한 통기와 관련된 원인으로는 Crank Shaft의 balance weight의 회전에 의한 오일의 비산, OIL DRAIN SYSTEM, 오일펌프의 과다성능, PCV 통로의 설계, 오일 온도, 점도, 첨가제 등 여러 가지가 있다는 것이 알려져 있다<sup>6)</sup>.

본 연구에서는 이러한 통기 현상과 관련하여 실 엔진에서의 발생량을 정량적으로 측정하기 위해 먼저 운전 중 통기량을 측정할 수 있는 장치를 자체적으로 개발하였으며, 개발한 장치를 사용하여 측정한 통기량을 중심으로 중요한 운전 조건 및 설계 변수에 의한 통기량의 변화를 관찰해봄으로써 엔진에서의 통기발생 현상을 체계적으로 살펴보고자 하였다.

### 1) 측정 장치개발



Fig.1 Measurement device and experimental set-up

Fig.1은 엔진의 운전 중 통기량을 측정하기 자체적으로 개발한 실험 장치를 엔진에 장착해 놓은 모습을 보여준다. 본 측정 방법은 엔진 운전 중 측정을 원하는 오일회로에서 단열관을 사용하여 직접 특정 부위의 오일을 채집하는 방법이다. 채집 시 샘플관내에 존재하는 초기 오일 및 채집 조건을 동일하게 하기 위해 두개의 눈금이 달린 비이커를 사용하여 먼저 샘플관 속에 존재하는 오일을 첫번째 비이커를 사

용하여 제거한 후 최종적으로 측정용 샘플을 채집하는 방법을 사용하였다. 이를 위해 첫번째 채집용 비이커에 담겨지는 양 만큼의 오일을 시험엔진의 오일 주입시 추가하였으며, 측정 장치는 정의한 오일량 만큼 채집이 되면 자동적으로 두번째의 측정용 샘플 비이커를 측정 부위로 이동 시켜준다. 계측은 10-15sec내에 이루어질 수 있도록 스톱 밸브를 조절하였으며, 채집 오일량은 원거리 근접 비디오 시스템을 사용하여 수행하였다. 측정 시 샘플 오일의 온도, 압력 등 계산에 필요한 모든 데이터 및 엔진의 출력을 획득하였으며, 엔진은 오일 온도 및 냉각수 온도, 회전수 등을 시험 조건에서 일정하게 유지 시킨 후 15분 정도 운전 시켜줌으로써 측정의 정확도를 유지하였다. 그리고 채집한 샘플은 25℃ 공조방에서 대기압하에 24시간 유지하여 오일속의 공기를 제거하였다.

최종적으로 이러한 일련의 시험을 3번 수행한 후 평균하였으며, 시험간 상대적인 오차가 5% 범위를 벗어나면 추가적인 시험을 수행하는 것으로 하였다.

### 2) 통기량의 계산

지금까지 통기량(Aeration)에 대한 표준화된 측정법이나 계산방법은 아직까지 없으며, 각 연구소나 업체마다 자기 나름대로의 측정방법과 계산방법을 가지고 있다<sup>6)</sup>. 본 연구에서는 기본적으로 아래의 두 가지 방법 - 공기포함 체적기준, 공기제거 체적 기준 - 으로 통기량을 정의한 후 최종적으로는 상대적인 비교가 가능하도록 표준 조건(대기압 110℃)으로 통기량을 계산하는 방법을 채택하였다.

먼저 공기포함 체적기준 통기량( $A_{V(T1)}$ )은 아래의 (1)식으로 정의된다.

$$A_{V(T1)} = \frac{V_{air(T1)}}{V_{Total(T1)}} \times 100(\%) \quad (1)$$

이와 달리 (2)식으로 정의되는 공기제거 체적기준 통기량( $A_{O(T1)}$ )은 (1)식에 비해 상대적으로 민감도가 뛰어나다는 장점을 갖고 있다.

$$A_{O(T1)} = \frac{V_{air(T1)}}{V_{oil(T1)}} \times 100(\%) \quad (2)$$

위의 (1), (2)식은 측정 시 채집 샘플의 오일 온

도( $T_1$ )를 기준으로 계산 한 식으로 측정 결과 값들 사이의 상대적인 비교 시 어려움이 있다. 이를 없애주기 위해 기준 조건을 (대기압,  $T_{ref}=110^{\circ}\text{C}$ ) 정한 후 이들 측정값을 정의하면 각각에 대해 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$A_{V(T_{ref})} = \frac{V_{air(T_{ref})}}{V_{Total(T_{ref})}} \times 100(\%) \quad (3)$$

$$A_{O(T_{ref})} = \frac{V_{oil(T_{ref})}}{V_{Total(T_{ref})}} \times 100(\%) \quad (4)$$

오일의 체적은 온도변화에 따라 급격히 변하므로 측정결과 ( $T_1, T_2, V_{Total(T_1)}, V_{oil(T_2)}$ )를 사용하여 최종적으로 이들 값을 구할 때 온도 변화에 따른 오일 체적 변화의 영향을 고려해 주어야 한다. Fig.2는 대기압하에서 사용 오일(SAE 10W30)의 온도 변화 값에 따른 체적 변화를 측정한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 온도가 상승함에 따라 오일의 체적은 급격히 증가(밀도는 감소)하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 효과( $\beta$ )를 고려한 최종적인 식은 아래와 같다.

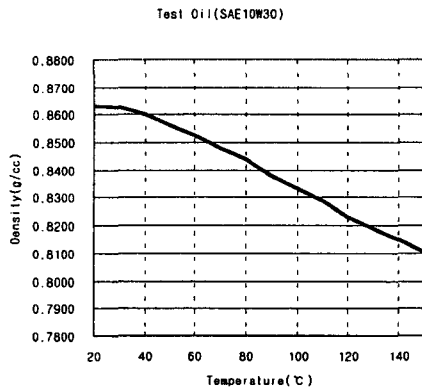


Fig.2 Variation of oil density with temperature

$$A_{V(T_1)} = \frac{V_{air(T_1)}}{V_{Total(T_1)}} \times 100(\%) \quad (5)$$

$$= \frac{V_{Total(T_1)} - V_{oil(T_2)[1 + (T_1 - T_2)\beta]}}{V_{Total(T_1)}} \times 100$$

$$A_{O(T_1)} = \frac{V_{oil(T_1)}}{V_{Total(T_1)}} \times 100(\%) \quad (6)$$

$$= \left[ \frac{V_{Total(T_1)}}{V_{oil(T_2)[1 + (T_1 - T_2)\beta]}} - 1 \right] \times 100$$

$$A_{O(T_{ref})} = \frac{V_{air(T_{ref})}}{V_{oil(T_{ref})}} \times 100(\%) \quad (7)$$

$$= f_{ref} A_{O(T_1)}$$

where, temperature correction factor

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

$$A_{V(T_{ref})} = \frac{V_{air(T_{ref})}}{V_{Total(T_{ref})}} \times 100(\%) \quad (8)$$

$$= \left[ \frac{A_{O(T_{ref})}}{100 + A_{O(T_{ref})}} \right] \times 100(\%)$$

### 3) 운전 조건 변화에 따른 통기량 측정

아래의 Table.1은 시험엔진의 제원이다. 시험은 1000rpm 씩 엔진의 회전수를 바꾸어 가면서 rpm변화에 따른 통기량의 측정을 기본으로 하여, 통기량에 직접적으로 영향을 준다고 알려진 변수(오일 온도, 오일 체적)를 중심으로 Swing Test를 수행하였다. 특히 통기량에 민감하게 반응하는 것으로 알려진 오일팬 내의 오일 체적 변화와 관련하여서는 크랭크 샤프트의 Weight Balance와 유면 사이의 부딪힘 현상에 따른 통기량의 증대 유무를 파악하기 위해 Stroke 만 증가되었을 뿐, 오일팬 형상 및 오일 펌프 용량이 동일한 다른 엔진을 사용하여 동일한 시험을 반복 수행 해봄으로써 이러한 원인을 근본적으로 규명해보고자 하였다.

Table.1 Test engine specifications

Type	SOHC
Displacement Volume (l)	1.5
Bore x Stroke [mm]	79x81.5
Oil	SAE 10W30
Oil Pan Material	Steel

### 3. 결과 및 고찰

Fig.3은 엔진 회전수 증가에 따른 통기량의 변화를 측정한 결과이다. 그림을 살펴보면 통기량은 엔진의 회전수 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 원인은 엔진 회전수의 증가에 의해 크랭크 시스템에서 오일팬으로 비산 되는 오일이 회전수 증가와 함께 큰 모멘텀(momentum)으로 쏟아지기 때문이다. 이와 함께 그림에서 표현되어져 있듯이 엔진 회전수 증가와 함께 공급되는 오일량 또한 증가 하기 때문에 오일 팬으로 쏟아지는 오일량이 증가하기 때문 인 것으로 여겨진다.

그리고 앞에서 언급하였듯이 공기제거 체적 기준 통기량( $A_{O(T1)}$ )은 공기포함 체적기준 통기량( $A_{V(T1)}$ )에 비해 상대적으로 큰 값을 보여주고 있으며, 기준 조건(대기압,  $T_{ref}=110^{\circ}\text{C}$ )으로 표현하였을 때는 이보다 다소 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 원인은 온도에 따른 오일의 체적 변화 때문이다.

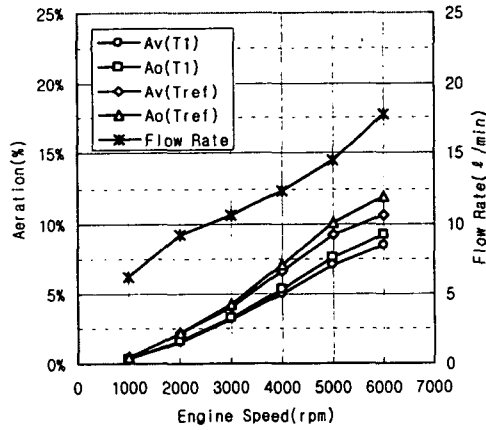


Fig.3 Variation of Aeration and oil flow rate at pump outlet with engine rpm.  $T_{oil}=90^{\circ}\text{C}$

Fig.4는 공급 오일의 온도를 변화 시켜가면서 측정한 통기량 변화의 결과이다. 그림을 살펴보면 오일의 온도가 상승하면 통기량이 증가하는 경향을 보여주는데 이는 오일의 온도 증가에 따른 유량의 증가와 밀접한 관계를 갖는 것으로 생각된다. 그림에서처럼 공급 오일량은 통기량과 함께 온도증가에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러므로

오일 온도에 따른 통기량의 증가는 오일 그 자체적인 첨가제 성분에 의한 특성 보다는 공급 오일량에 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다.

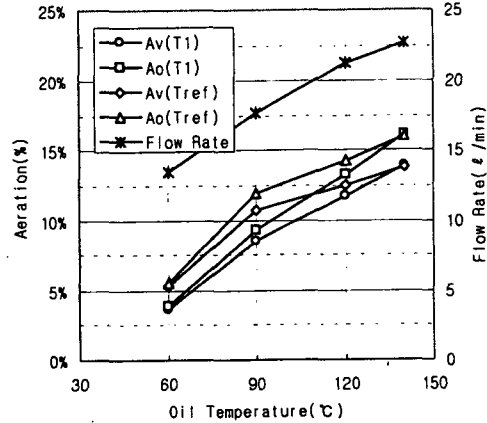


Fig.4 Variation of Aeration with oil volume and oil flow rate at pump outlet at 6000 rpm

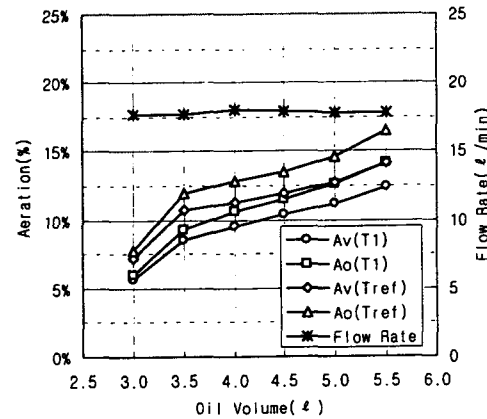


Fig.5 Variation of Aeration and oil flow rate at pump outlet with oil temperature at 6000 rpm

Fig.5는 오일팬 내의 오일 체적 변화에 따른 통기량의 변화를 측정한 결과이다. 이 경우는 앞에서와 달리 오일펌프에 의한 운환 시스템으로의 공급 유량변화가 거의 없다. 그러므로 오일 체적 증가에 따른 통기량의 증가는 엔진의 구조적인 측면에서 해석이 되어져야 한다. 일반적으로 오일 체적의 증가하면 크랭크샤프트

의 무게 중심추 (Weight Balance)와 오일면과의 접촉이 많아져 오일팬 내에서 비산 되는 오일이 증가하는 것으로 알려져 있으며 측정 결과 또한 동일한 원인에 기인하는 것으로 여겨진다. 이와 관련하여 좀더 확실한 원인 규명을 위해 Stroke 만 증가 시킨 엔진을 사용하여 동일한 시험을 반복 수행하였다.

Fig.6, 7, 8은 Stroke 만 증가되었을 뿐 (Type A Stroke=81.5, Type B Stroke=86.5) 오일팬 형상 및 오일 펌프 용량이 동일한 다른 엔진을 사용하여 반복 시험을 수행한 결과이다. 그림에 나타난 통기량은 상대적인 비교가 용이하도록 하기 위해 기준 조건 (대기압,  $T_{ref}=110^{\circ}\text{C}$ )을 사용하여 계산한 공기제거 체적기준 통기량 ( $A_{O(ref)}$ )을 사용하였다. 그리고 나머지의 시험 조건은 모두 동일하게 하였다.

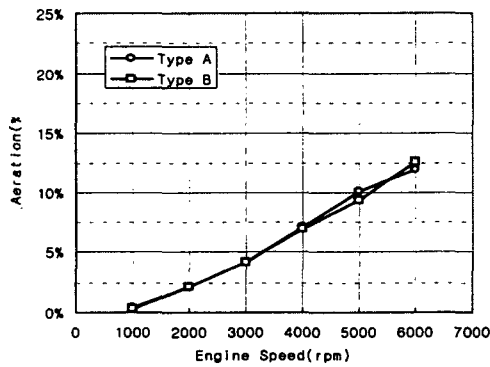


Fig.6 Effects of change of engine stroke on Aeration ( $A_{O(ref)}$ ) with against engine rpm

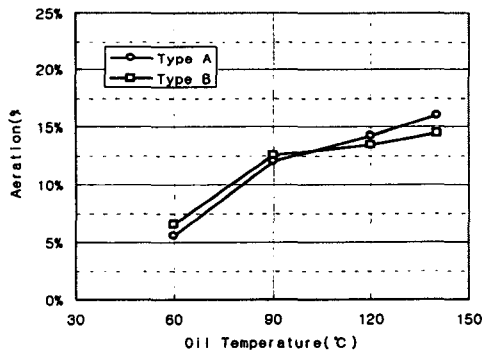


Fig.7 Effects of change of engine stroke on Aeration ( $A_{O(ref)}$ ) with against oil volume at 6000 rpm

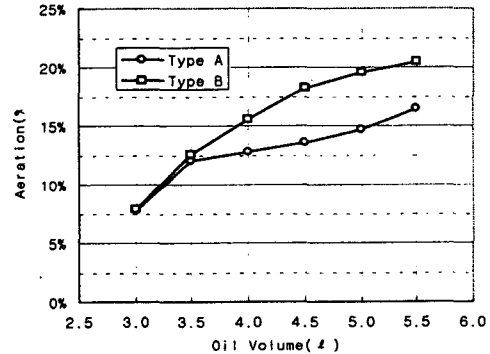


Fig.8 Effects of change of engine stroke on Aeration ( $A_{O(ref)}$ ) with against oil temperature at 6000 rpm

먼저 Fig.6과 Fig.7을 살펴보면 오일 체적을 고정시킨 동일한 운전 조건 (오일팬 내 오일체적=3 l)에서 단지 엔진의 회전수와 공급온도를 변화 시켰을 경우 Type A 엔진 및 Type B 엔진의 통기량에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 오일 체적을 변화 시킨 Fig.8의 경우, 통기량은 확연한 차이를 보여준다. 이러한 결과는 오일팬 내 오일 체적의 증가에 따른 통기량의 증가는 크랭크샤프트의 무게 중심추 (Weight Balance)와 오일면과의 접촉에 기인한다는 것을 증명하는 결과이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 통기 현상과 관련하여 실 엔진에서의 통기량을 정량적으로 측정할 수 있는 장치를 자체적으로 개발하였으며, 개발한 장치를 사용하여 측정한 통기량을 중심으로 몇가지 운전 조건 및 설계 변수에 의한 통기량의 변화를 측정하여 보았다. 이러한 일련의 연구과정을 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 엔진에서의 통기량을 기본적으로 두 가지 방법 - 공기포함 체적기준, 공기제거 체적 기준 - 으로 정의하였으며, 최종적으로는 상대적인 비교가 가능하도록 표준 조건(대기압 110°C)으로 통기량을 계산하는 방법 제시하였다.
- 2) 통기량은 엔진의 회전수 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보여주며, 이러한 원인은 엔진 회전수의 증가에 의해 크랭크 시스템에서 오일팬으로 비산 되는 오일이 비산

- 력 증가와 함께 공급되는 오일량 또한 증가하기 때문이다.
- 3) 오일의 온도가 상승하면 통기량이 증가하는 경향을 보여주는데 이는 오일의 온도 증가에 따른 유량의 증가 때문이다.
  - 4) 오일팬 내의 오일 체적이 증가하면 통기량도 증가한다. 이러한 원인은 오일 체적의 증가와 함께 크랭크샤프트의 무게 중심추 (Weight Balance)와 오일팬 내 유면 사이의 접촉이 많아져 오일팬 내에서 비산 되는 오일이 증가하기 때문이다.

## 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 연구논문지 제1권, 제1호, 1993
- (5) 윤정의 외 "오일 Aeration에 따른 엔진의 마찰 및 윤활 특성에 대한 연구", 한국윤활학회 추계학술대회논문집, 1999
- (6) INA, TEST SPEC., 1998