

엔진 오일의 공기 혼입 발생기구에 관한 연구(I)

A Study on the Mechanism of Oil Aeration in Automotive Engines(I)

이 두 순*, 김 원 규*, 오 대 윤**, 최 재 권**
Doosoon Lee, Wonkyu Kim, Daeyoon Oh, Jaekwon Choi

ABSTRACT

We developed a new measuring equipment which makes it possible to perform on-line measurements with the merits of its simplicity and the time-saving characteristics. By using the newly developed measurement system, the amount of aeration is directly measured on several parameters, i. e., engine speed, oil quantity, oil deterioration, oil temperature and viscosity, etc. It showed that oil aeration is strongly related to the gas movements in crankcase and the residence time of circulating oil in oil pan. In addition, in order to clarify the mechanism of aeration and to quantify the degree of aeration, a modelling analysis to predict aeration was performed, and as a guiding parameter, Aeration Index was defined. Finally, the parameter was compared with the actual amount of aeration, and it was confirmed that they gave a good correlation with each other.

주요기술용어: Aeration(공기 혼입), Deaeration(공기 소멸), Aeration Index(공기 혼입 지수)

Nomenclature

A : area, mm²
 C : distance between banjo and oil surface
in the oil sump, mm
 D : rotational diameter, mm
 l : distance or length, mm
 N : rotational speed, rpm
 μ : dynamic viscosity, Pa · sec.
 ρ : density, kg/m³

Q : flow rate, L/min
 T : temperature, °C
 τ : characteristic time, sec.
 V : velocity, m/sec.
 V : volume, cc

Subscripts

a, air : air
 b : blowby passage
 BH : bulk head
 bot : bottom of the oil sump
 $Cyl.$: cylinder
 C/SHT : crankshaft
 $Dea.$: deaeration

* 현대자동차 선형연구소

** 정회원, 현대자동차 선형연구소

max : maximum
 p : piston
 sump : oil sump

1. 서 론

엔진 오일내에 공기 혼입이 심하게 발생하면 오일 펌프의 흡입 능력이 저하되고 HLA (Hydraulic Lash Adjuster) 작동 불량으로 벨브 타움, 엔진 성능 저하, 운전성 및 배출 가스 악화, 나아가 벨브 파단과 같은 엔진 신뢰성 저하 문제를 야기할 수 있다. 최근 승용차 엔진은 고속 고성능화와 함께 엔진 크기 간소화를 추진함으로써 엔진 오일에 공기가 혼입될 수 있는 여지가 점차 증가하고 있는 추세이다. 그러나 정작 공기 혼입에 대한 메커니즘 분석과 정량적인 기준의 제시는 거의 이루어지지 않고 있다. 기존의 공기 혼입을 측정 방법은 엔진에서 채취한 오일을 여러 시간 동안 대기 방출하여 공기를 소멸시킨 후 다시 가열하여 부피 차이를 계산하는 등, 복잡하고 시간이 많이 소요되어 다양한 변화 인자에 대한 분석이 어려운 단점이 있다. 또한 공기 혼입 현상 자체의 복잡성 때문에 엔진 설계시 기준이 될 만한 변화 인자를 제시하기가 현실적으로 어려운 실정이었다. 따라서 궁극적으로 공기 혼입 현상에 대한 메커니즘 분석과 엔진 하드웨어 설계에 기준이 될 만한 변화 인자를 설정하기 위하여, 엔진에서 직접 연결 상태로 공기 혼입율을 측정할 수 있는 장치를 개발하였고 이를 통해 다양한 변화 인자에 대한 분석이 가능하게 되었다. 일반적으로 공기 혼입이 발생하는 메커니즘은 오일 펌프나 오일 스트레이너에서의 누설에 의해 공기가 흡입되거나, 크랭크케이스 내에 있는 오일이 각종 회전 운동계 및 가스 유동에 의해 심하게 교란(disturbance)되어 공기가 혼입되는 것으로 밝혀져 있다. 공기 혼입의 주요 인자로는 엔진 회전수, 오일양, 온도 및 점도, 엔진 설계, 오일 드레인 회로, 오일팬 설계, 벨트레이션계 등이 보고되어 있다[1, 2]. 본 연구에서는 당사에서 개발한 공기 혼입을 측정 장치를 사용하여 엔진 회전수,

오일 주입량, 오일 온도 및 점도, 오일 열화, 냉각수 온도 등을 변화시켜 가며 가솔린 엔진의 공기 혼입을 수준을 측정하고, 공기 혼입 유발 에너지와 억제 에너지를 각각 모델링하여 무차원화된 변화 인자를 제시하였다. 이상의 과정을 통해 공기 혼입에 영향을 미치는 주요 인자를 파악하고 측정값과 변화 인자간의 상관 관계를 제시하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 엔진의 사양은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of Tested Engine

| Engine Type | Gasoline In-Line 4 |
|----------------------|--------------------|
| Valve Type | DOHC (direct HLA) |
| Bore × Stroke[mm] | 75.5 × 83.5 |
| Rated Speed[rpm] | 6000 |
| Displacement Volume | 1.5 L |
| Oil Pan Volume[Max.] | 3 L |

실험 변화 인자로서, 엔진 운전 조건의 변수로는 엔진 회전수, 오일량, 오일 온도, 냉각수 온도를, 그리고 윤활유 자체의 변수로는 오일의 열화, 오일 점도를 선정하였으며 이 인자들을 변경해가며 공기 혼입율을 측정하였다. 대부분의 실험은 공기 혼입율이 가장 큰 값을 가지는 최고속도, 전부하 조건에서 수행했으며, 냉각수 온도는 90±2℃로 유지하였다. 실험에 사용된 오일은 SH급 7.5W30이며 오일점도의 영향을 파악하기 위하여 등급 오일인 SAE 20, 30, 50 오일도 실험하였다. 각 실험오일에 대한 동점성계수는 Table 2에 표시했다.

Table 2 Kinematic Viscosities of Tested Oils

| Engine Oil | Kinematic Viscosity[cSt] | |
|------------|--------------------------|------|
| | 40℃ | 100℃ |
| SAE 20 | 41 | 6.7 |
| SAE 30 | 84 | 10.6 |
| SH 7.5W30 | 65 | 10.1 |
| SAE 50 | 195 | 18.3 |

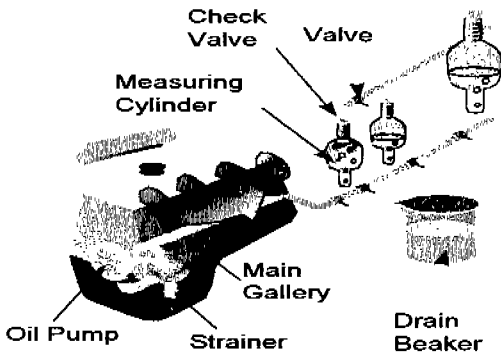


Fig.1 Aeration Measurement System

한편 공기 혼입율의 측정은 당사에서 개발한 엔진 직결식 공기 혼입을 측정 장치(Fig.1 참조)를 사용하여 엔진 운전중 연속적으로 엔진 헤드 갤러리에서 직접 측정하였다. 공기 혼입을 측정 장치의 원리는 엔진 운전 중에 헤드 갤러리에서 일정량의 오일을 가압 상태로 채취한 후 대기 중에 노출시켜 혼입된 공기의 양만큼 줄어든 오일의 부피를 측정하는 것인데, 측정 정밀도를 높이기 위해 100cc 짜리 내열 투명 실린더를 사용했으며 밸브 및 회로는 저항을 최소로 최적화하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 엔진 회전수에 따른 공기 혼입율

Fig.2와 Fig.3은 엔진 회전수에 따른 공기 혼입율과 오일 온도 및 유량 변화를 나타낸 것이다. Fig.2 에서 보는 바와 같이 공기 혼입율은 약 4000rpm 이하에서 거의 없다가 5000rpm을 기점으로 비선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 그 이유는 주로 Fig.3에서 보는 바와 같이 엔진 회전수가 증가하면, 오일 유량 및 유온이 증가하여 오일펜 내에서 잔류하면서 공기가 분리되는데 필요한 시간인 공기 소멸 시간이 부족하게 되기 때문인 것으로 판단된다[3]. 또한 고속에서는 크랭크축 회전수 및 피스톤 속도의 증가로 인해 기

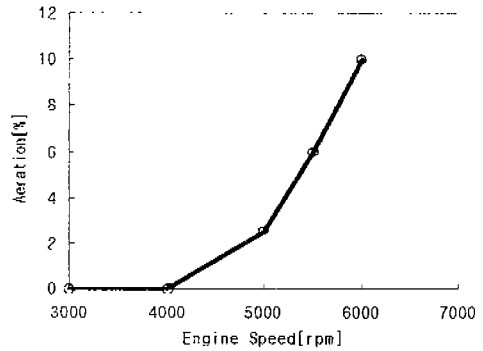


Fig.2 Variation of Aeration to Engine Speed

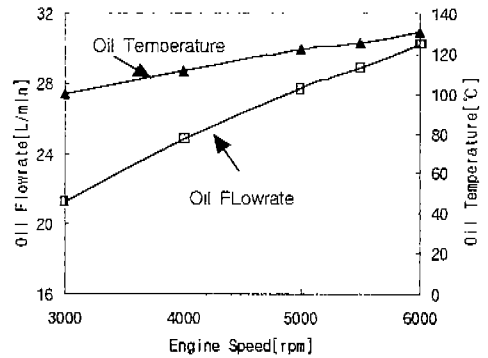


Fig.3 Variation of Oil Temperature and Oil Flowrate to Engine Speed

체 운동에너지가 증대하여 크랭크케이스 내의 오일을 교란시키기 때문이다.

3.2 오일 주입량에 따른 공기 혼입율

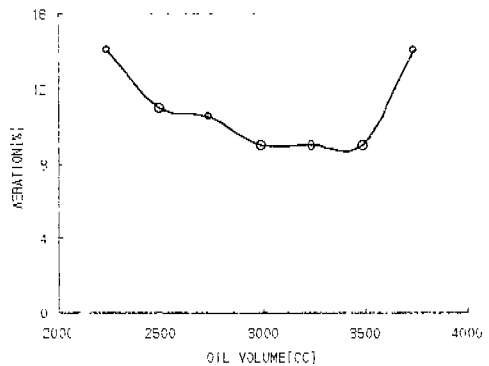


Fig.4 Variation of Aeration to Oil Volume

Fig.4는 오일양을 바꿔 가면서 실험한 결과이다. 오일양이 지나치게 많으면 크랭크축의 회전 궤적이 오일을 치면서 생기는 오일 쳐닝(churning) 현상에 의해 다량의 공기 버블이 발생함으로써 공기 혼입이 증가하고, 오일양이 지나치게 적으면 공기가 소멸되는 절대 오일양의 감소로 인하여 공기 혼입율이 급증하는 사실을 확인하였다.

3.3 오일 열화에 따른 공기 혼입율

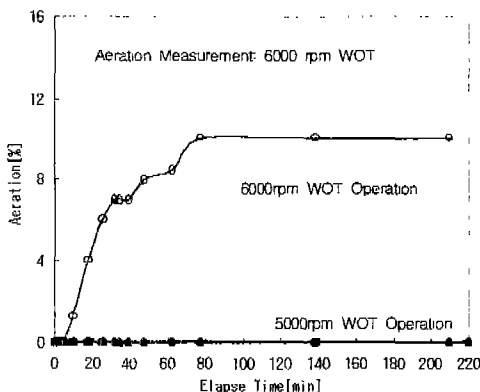


Fig.5 Variation of Aeration to Operation Time for SH7.5W30

Fig.5는 SH 7.5W30 신유를 사용하여 두 가지 길들이기 운전 조건(6000rpm WOT, 5000rpm WOT)으로 운전하여 운전 시간에 따른 공기혼입율의 변화를 비교한 것이다. 오일의 길들이기에 따라 공기 혼입율이 변화하는 현상은 오일의 열화로 열화 생성물이 형성되어, 오일 내에 형성된 공기 버블이 유면위로 떠올라 분리되는 속도가 감소되기 때문인 것으로 보고되어 있다[3]. 6000rpm WOT 길들이기 운전 조건의 경우는 대략 100분 후에 공기 혼입율이 안정된 값을 보이고 5000rpm WOT 길들이기 운전 조건의 경우는 공기 혼입율의 변화가 없었다. 그 이유는 이 운전 조건에서는 실험 기간 동안에 공기 혼입율을 가중시키는 열화 생성물이 생기지 않기 때문인 것으로 보인다.

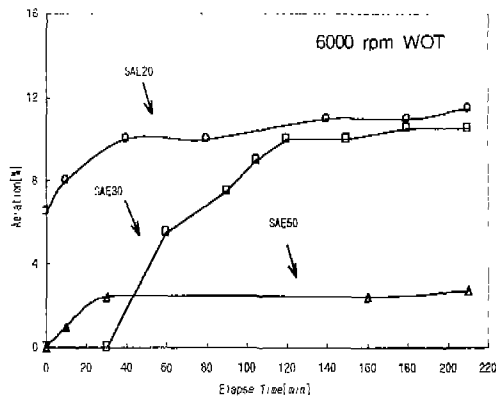


Fig.6 Variation of Aeration to Engine Operation Time for Various Oils

Fig.6은 점도가 다른 SAE 20, 30, 50의 오일에 대하여 운전 시간에 따른 공기 혼입율의 변화를 나타낸 것으로서 점도가 높은 경우에 보다 빨리 안정되는 것을 확인하였다.

3.4 오일 온도에 따른 공기 혼입율

Fig.7에 오일 온도 변화에 따른 공기 혼입율의 차이를 나타내었다. 오일 온도가 증가하면 공급 오일 유량이 증가하고 공기 버블이 분리되는 공기 소멸 시간이 감소하여 공기 혼입율이 증대한다. 더불어, 오일 온도가 증가하면 오일 점도가 낮아지고 그로 인해 표면장력이 감소하여 공기 혼입의 증가에 영향을 미친다고 보고되어 있다[3].

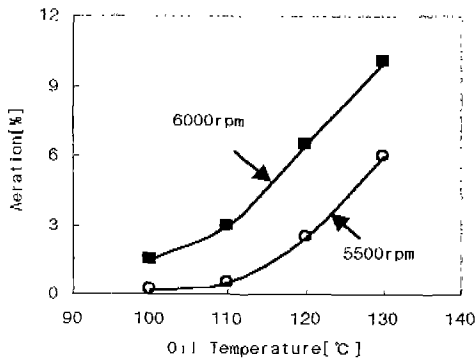


Fig.7 Effect of Oil Temperature on Aeration

3.5 오일 점도에 따른 공기 혼입율

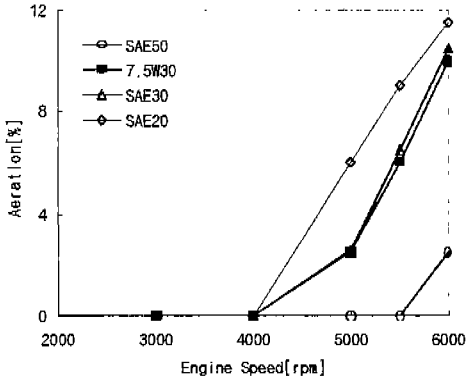


Fig.8 Effect of Oil Viscosity on Aeration

Fig.8은 점도가 다른 여러 가지 오일에 대한 공기 혼입율 측정 결과이다. 오일의 점도가 낮을수록 공기 혼입율이 증가하는 이유는 Fig.9에서와 같이 점도 감소에 따른 공급 오일유량 증가가 주요한 요인이다. 더불어, 오일 온도의 영향과 마찬가지로 오일 유면의 점도가 감소하면 표면 장력이 감소하여 공기 혼입이 증대하는 효과도 동시에 작용한다[3].

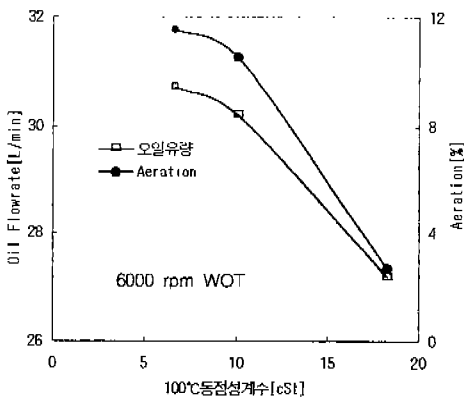


Fig.9 Variation of Oil Flowrate to Oil Viscosity at the Oil Temperature of 100°C

3.6 냉각수에 따른 공기 혼입율

Table 3 Variation of Aeration with Coolant Temperature

| Coolant Temperature[°C] | Oil Temperature[°C] | Aeration[%] |
|-------------------------|---------------------|-------------|
| 60 | 114 | 0.5 |
| 70 | 119 | 1.5 |
| 80 | 125 | 5 |
| 90 | 132 | 10 |

Table 4 Variation of Aeration with Oil Temperature at the fixed coolant temperature

| Coolant Temperature[°C] | Oil Temperature[°C] | Aeration[%] |
|-------------------------|---------------------|-------------|
| 90 | 100 | 1.5 |
| 90 | 110 | 3 |
| 90 | 120 | 6.5 |
| 90 | 132 | 10 |

Table 3, 4는 각각 냉각수온 변화에 따른 공기 혼입율 변화와 동일한 냉각수온에서 유온에 따른 공기 혼입율 변화를 나타낸 것이다. 오일온도가 동일하여도 냉각수온이 낮으면 공기 혼입율이 감소함을 알 수 있다.

Fig.10에서와 같이 냉각수온 90°C일 때가 60°C일 때에 비해 오일 유량이 약간 증가함을 보이고 있으며, 실린더 헤드 오일 온도가 15°C 이상 높은 것을 확인할 수 있다. 따라서 냉각수온의 차이에 의한 공기 혼입율의 차이는 실린더 헤드의 오일 온도의 차이와 이로부터 비롯되는 오일 점도의 차이로 인해 헤드로의 공급 오일 유량이 달라지기 때문이다.

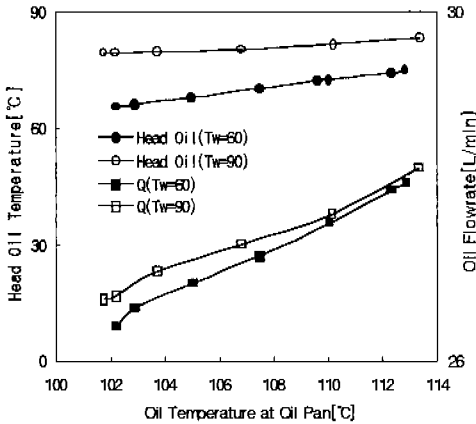


Fig.10 Effect of Coolant Temperature on Oil Flowrate and Temperature (Tw=Coolant Temperature)

4. 공기 혼입을 예측 모델링

엔진에서 공기 혼입율에 영향을 미치는 엔진의 여러 인자를 수치화, 단순화시켜 엔진의 공기 혼입율을 예측할 수 있는 기준 인자를 제시하는 것은 공기 혼입율 저감에 필수적으로 요구되는 작업이기 때문에 다음과 같이 예측 모델링을 수행하였다.

4.1 가정

오일 펌프 및 스트레이너에서 누설은 없고 오일 온도와 점도가 표면 장력의 차이로 공기 버블의 생성과 소멸에 미치는 영향은 무시한다.

4.2 모델링 과정

공기 혼입을 유발시키는 에너지는 실린더에서 나오는 기체(피스톤 왕복운동에 의한 유동 + 블로우바이 가스)와 크랭크축의 회전으로 인한 기체의 운동에너지의 합으로 정의될 수 있다.

$$\text{Aeration Energy} = \frac{1}{2} \rho_a \left[V_{Cyl}^2 + V_{C/SHT}^2 \right] \quad (1)$$

(단위 체적당)

또한 공기 혼입을 감소시키는 에너지는 특성

공기 소멸 시간에 의해 지배된다.

$$\tau_{Dea.} = \frac{V_{sump}}{Q_{oil} - Q_{drain}} \quad (2)$$

여기서 드레인되는 오일의 유량은 측정하기가 힘들고 드레인 면적이 지나칠 정도로 작지 않으면 편차가 그리 심하지 않을 것이므로 계산할 때는 무시하기로 한다. 이러한 특성 공기 소멸 시간을 사용하여 단위 체적당 에너지 항으로 환산하면 다음과 같이 공기 소멸 에너지로 정의할 수 있다.

$$\text{Deaeration Energy} = \frac{1}{2} \rho_{oil} \left[g \tau_{Dea.} \right]^2 \quad (3)$$

(단위 체적당)

식(2)를 식(3)으로 나누어 무차원화한 후 오일의 물성치에 의한 표면장력 변화의 영향을 무시하면, 다음과 같이 오일과 공기의 미시적 거동을 고려하지 않은 공기 혼입 지수를 정의할 수 있다.

$$\Pi = \frac{V_{Cyl}^2 + \frac{V_{C/SHT}^2}{\tau_{Dea.}^2}}{\tau_{Dea.}^2} \quad (4)$$

(= Aeration Index)

여기서, 변수들의 정의는 다음과 같다.

$$V_{Cyl} = \frac{[Q_p + Q_b]_{max}}{[A_{bH} + A_b]_{min}} \quad (5)$$

$$V_{C/SHT} = \pi N_{max} D_{barjyo} \cdot \left[1 + \frac{\mu_{oil}}{\mu_{air}} \cdot \frac{C}{l_{bot} - C} \right]^{-1} \quad (6)$$

4.3 모델링 및 실험 결과 비교

Fig.11은 지금까지의 실험 결과를 공기 혼입 지수와 비교하여 나타낸 것이다. Fig.11의 결과 중에서 오일 온도와 점도별로 실험한 결과는 오일의 물리적 특성에 의한 미시적인 공기의 거동 특성이 실제 공기 혼입율에 영향을 미침에도 불구하고 모델링에서는 이 영향을 무시하였다. 따라서, 오일 온도와 점도별로 측정된 공기 혼입율

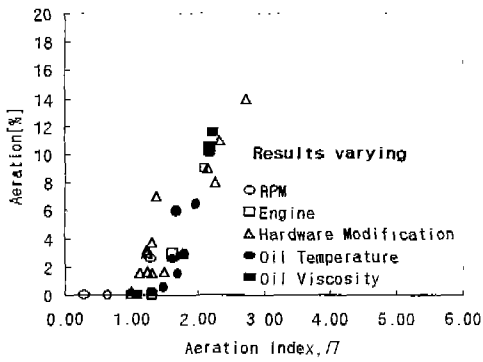


Fig.11 Aeration vs. Aeration Index, Π for Various Experimental Conditions

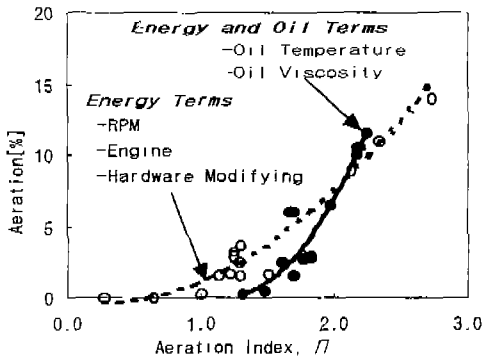


Fig.12 Curve-Fitted Results of Aeration vs. Aeration Index, Π

값의 곡선맞춤 결과는 다른 결과에 비해 기울기가 약간 크다. 이 기울기의 차이는 오일의 물리적 특성을 반영하는 것이다. 한편, 에너지 관점에서만 본 공기 혼입을 값은 다음과 같이 실제의 공기 혼입 수준을 예측하는 식으로 사용될 수 있다.

$$Aeration[\%] = 2.56\Pi^2 - 1.43\Pi, R^2 = 94\% \quad (7)$$

5. 결론

(1) 엔진유의 공기 혼입은 크랭크실 내의 기체 운동에너지로 인한 오일 교란이 주 원인이며, 오일팬 내의 공기 소멸 시간 감소로 가증된다.

(2) 엔진 회전수가 증가하면 공기 혼입율은 비선형적으로 증가하며, 이는 크랭크실 내의 기체 운동에너지, 오일 온도 및 오일 유량의 증대로 인한 공기 소멸 시간 감소 때문이다.

(3) 엔진유는 신유로부터 걸들이기를 거쳐 열화된 후에 공기 혼입율이 안정한 값을 갖게 된다.

(4) 오일 온도가 증가하거나 점도가 감소하면, 오일 유량이 증가하고 오일 유면의 표면장력 감소로 인해 공기 혼입율이 증가한다.

(5) 공기 혼입 유발 에너지와 공기 소멸 유발 에너지를 적절히 모델링하여 공기 혼입율을 예측하기 위한 변화 인자로서 공기 혼입 지수를 제시하였으며 실제 실험 결과와 좋은 상관 관계를 가짐을 확인하였다.

참고 문헌

1. Haas, A., Geiger, U., Maassen, F., "Oil Aeration in High Speed Combustion Engines", SAE Paper 940792, 1994.
2. Franz Koch et al., "Development of Modern Engine Lubrication Systems", SAE Paper 970922, 1997.
3. Shell's Recommendations about Aeration.
4. T. V. Friesen, "Transmission-Hydraulic Fluid Foaming", SAE Paper 871624, 1987.
5. 久保浩一, J. R. F. 리리호ワイト, "Correlation between Foaming and Air Entrainment Property", 트라이보`로쯔`스트 第 39卷, 1994.