

오일유막의 연료 흡수 및 방출에 관한 연구

Modeling of Absorption/Desorption of Fuel in Oil Film on the Cylinder Liner in SI Engines

유상석*, 민경덕**
Sangseok Yu, Kyoungdoug Min

ABSTRACT

An oil layer fuel absorption/desorption modeling was developed. Multi- component fuel model has showed more reasonable condition than single component model. Henry's constant which is related to solubility is the most important variable in the oil layer absorption/desorption mechanism. The oil segments close to the top of the cylinder liner have more significant contribution to the fuel absorption and desorption process than other oil segments. At the warmed-up condition, the effect of the engine speed on the percent fuel absorbed/desorbed is minimal. But at low oil film temperature, percent of fuel absorbed/desorbed is decreased with increasing the engine speed because of low value of molecular diffusion coefficient of fuel. The amount of fuel trapped in the piston crevice is from 2 to 2.3 times larger than that of fuel in the oil film. However, fuel from oil film slowly desorbs into the combustion chamber compared with fuel from the piston crevices when the engine is cold.

주요기술용어 : Oil Film(오일막), Absorption/Desorption(흡수/방출), Multi- Component Fuel(다중 연료 성분), Henry's constant(Henry 상수), Crevice(간극체적)

1. 서론

실린더 라이너의 엔진 오일은 피스톤의 윤활에
는 필수적이지만 미연탄화수소의 중요한 발생원

이다. 정적연소실 실험 결과에 의하면 미연탄화수소의 발생은 오일의 연료 흡수(absorption)와 관계가 있고 오일의 산화(oxidation)와는 무관하며 미연탄화수소 발생량은 주로 연료의 가용성(solubility)과 관련됨을 알 수 있다[1]. Carrier 등은 기체상태의 연료가 엔진 사이클동안 실린더 라이너에 있는 엔진 오일막으로 흡수(absorbed)와 방출(desorbed)될 수 있는 충분한 시간이 있는 것을 보여주었다[2].

* 정회원, 서울대학교 기계공학과 대학원

** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

Trinker 등은 엔진 오일이 미연탄화수소에 미치는 영향은 미소하다는 결과들을 나타냈다[3]. 그러나, Gatellier 등은 엔진 오일을 사용하지 않는 특수 엔진이 일반 가솔린과 오일을 사용하는 엔진보다 미연탄화수소 배출량이 약 10% 정도 감소한다는 결과를 발표하였다[4]. Ishizawa 등은 특수 피스톤링을 이용하여 오일을 사용하지 않고 수행한 엔진 실험으로부터 오일의 영향은 미연탄화수소 발생의 약 20-30% 정도 된다는 결과를 얻었다[5]. 위와 같이 오일이 미연탄화수소에 미치는 영향은 약 10-30% 정도로 광범위하지만, 다양한 엔진 운전 조건 및 어떤 인자들이 미연탄화수소 발생에 어느 정도 영향을 미치는지를 엔진 실험을 통해 얻기 힘들다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

오일의 연료 흡수/방출의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서 C는 오일 안의 연료 농도[kg/m³]이고, D는 확산 계수[m²/s]이다.

(1)의 차분식은 음해법중 가중계수(weight factor) 0.5를 사용하는 Crank-Nicolson 식을 사용하였다. 이 차분식에서 나온 여러 개의 연립 방정식은 삼중 대각 행렬 알고리즘을 이용하여 계산하였다. 또 시간 간격은 1 CA당 40 단계(step)이며 오일막은 상사점에서 하사점까지를 91개 격자(Cell)로 나누고 1개 격자는 11개 마디(node)으로 나누었다. 1개 격자에 대한 연료 흡수량은 각 마디에서의 값들을 적분한 결과이다.

지배방정식에 대한 경계 조건은 다음과 같다. 실린더 라이너 벽과 오일의 경계면에서는 연료가 벽으로 흡수될 수 없으므로

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2)$$

로 표시할 수 있다.

또한, 가스와 접촉하고 있는 면에서는 가스로부터 전달되는 연료량은 오일로 흡수되는 연료량과 같으므로 다음과 같다.

$$D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = h_d \cdot (\phi_\infty - \phi_o) \quad (3)$$

여기서 ϕ_∞ 는 실린더 내의 평균 연료농도이고 ϕ_o 는 오일 표면에서 가스 안에 있는 연료농도이다. h_d 는 물질전달상수 (mass transfer coefficient)로서 Reynold의 상사관계로부터 구했고, 엔진내의 열전달 계수는 Woschni 식을 이용하여 얻었다[6].

계면에서의 경계조건은 오일과 가스 경계면에서의 Henry의 법칙을 적용하여 오일속의 연료 농도와 가스 속의 연료 농도 사이의 관계를 구했다[7].

$$y_g \cdot p = H \cdot x_f \quad (4)$$

여기서 y_g 는 가스 상태내의 연료 몰비이고 p 는 가스 압력, H 는 Henry 상수, x_f 는 오일내의 연료 몰비이다.

흡기과정 동안 가스내의 연료농도 (ϕ_∞)는 실린더 내로 유입되는 순간유량(공기+연료)으로부터 계산된다. 열역학 제 1법칙으로부터 순간유량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\dot{m}}{m} = \frac{T}{T_i} \frac{\dot{V}}{V} + \frac{1}{\gamma} \frac{\dot{p}}{p} \frac{T}{T_i} - \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\dot{Q}}{\dot{p}V} \frac{T}{T_i} \quad (5)$$

여기서 \dot{m} 은 질량 유량, m 은 연소실 안의 총 질량, p 는 실린더 내의 압력, T_i 는 흡기 공기 온도, T 는 실린더 내의 온도이고, γ 는 비열비이다. \dot{Q} 는 Woschni식으로부터 구한 열 발생률 (Heat release rate)이다.

흡기 과정이 끝난 후 압축 과정 및 연소 과정 동안의 미연 가스내의 연료 농도 ($\phi(\theta)$)는 압축 과정을 가역단열과정(isentropic)으로 가정하여 다음과 같이 구했다.

$$\phi(t) = \phi(IVC) \cdot \frac{\rho(t)}{\rho(IVC)} \quad (6)$$

여기서 $\rho(t)$ 는 미연 혼합물의 가역단열 압축 과정으로 계산할 수 있다.

연소후 미연탄화수소 유동율은 기연가스 질량 유동율에 비례하는 것으로 가정했다. 또, 배기 과정 동안 배기 밸브를 통해서 나가는 가스 유량은 흡기 과정시와 유사한 방법으로 계산 하였다.

2.2 오일막 두께 및 오일 보충

실린더 라이너 위치에 따른 오일막 두께는 Reynolds 식[8]에 기초한 Tian[9] 등의 시뮬레이션 결과를 이용하였다. 이 식으로부터 오일막의 두께가 윤활유의 점도와 피스톤 속도의 제곱근으로 계산되어진다는 것을 예측할 수 있다.

$$\delta(x) = C_1 + C_2 \sqrt{\mu S_p} \quad (7)$$

여기서 μ 는 윤활유의 점도, S_p 는 피스톤 평균속도와 순간속도의 합이고, C_1 과 C_2 는 시뮬레이션 결과로부터 나오는 상수이다.

피스톤이 하사점부터 상승함에 따라 피스톤보다 아래쪽에 위치하게 되는 오일막은 크랭크 케이스내의 가스에 노출되어 새롭게 공급된 오일과 섞이게 된다. 그러므로 피스톤보다 아래쪽에 위치하는 오일의 일부분이 크랭크 케이스내의 오일과 교체된다고 가정하였다.

2.3 Henry 상수 계산

Henry 상수는 연료의 흡수/방출을 결정해주는 중요한 인자 중에 하나로 Schramm과 Sorenson[7]의 실험 결과를 선형 보간 한 식을 이용해 구했다.

$$\log_{10} H \cdot \frac{M_{oil}}{M_{fuel}} = A \log_{10} T + B \quad (8)$$

여기서 H 는 Henry 상수이고 T 는 온도, 그리고 A, B 는 연료에 따라 결정되는 상수이다.

2.4 다중연료성분 (Multi-component fuel)

Table 1 Fuel component data

연료 성분	분자식	분자량 (g/mol)	물분율
124TMB	C ₉ H ₁₂	120.19	0.15
3M-Pentane	C ₈ H ₁₈	114.23	0.1
Benzene	C ₆ H ₆	78.11	0.03
Iso-octane	C ₈ H ₁₈	114.23	0.15
Cyclo-hexane	C ₆ H ₁₂	72.15	0.05
m-xylene	C ₈ H ₁₀	106.17	0.1275
n-decane	C ₁₀ H ₂₂	142.28	0.05
n-heptane	C ₇ H ₁₆	100.2	0.15
p-xylene	C ₈ H ₁₀	106.17	0.0425
Toluene	C ₇ H ₈	92.14	0.15

연료중 탄소수가 5 이하인 경우 Henry 상수가 매우 큰 값을 가지기 때문에 오일막으로의 흡수가 거의 일어나지 않는다. 그러므로, 연료 성분은 탄소 수 6~10까지의 성분을 중심으로 선택하였다. 단일 성분을 이용한 모델링의 경우는 연료 성분 중 어떤 성분이 오일막으로 가장 많이 흡수되는지는 알 수가 있지만 실제 상용 연료의 오일막으로의 흡수 정도는 알 수 없었다. 그러므로 보다 상용 연료에 근접한 결과를 얻기 위해서는 다중 성분을 이용한 모델이 필요하며, 본 연구에서는 연료 성분을 10 가지 성분으로 모델링했다. 모델링에 사용된 연료 성분은 Table 1에 제시되어 있다.

3. 결과 및 검토

3.1 다중 연료 성분에 대한 오일막의 흡수/방출 메카니즘

Fig. 1는 전체 연료에 대한 각 성분이 오일로 흡수되는 양을 나타내는 그림이다. 124TMB성분이 전체 연료중 오일로 흡수되는 양은 0.89%로 전체 연료의 15%인 것을 감안하면 매우 큰 양이다. 연료중 이 성분의 비가 커질수록 오일막

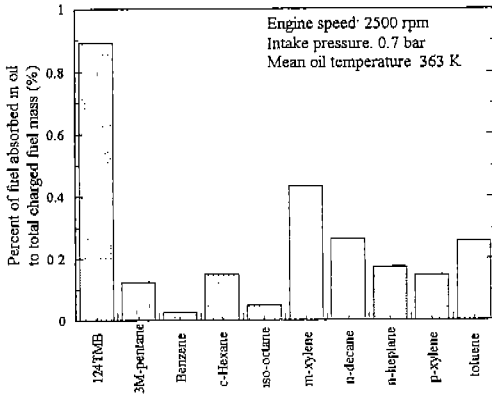


Fig. 1 Percent of fuel absorbed in oil

의 영향은 커지게 된다. n-decane의 경우 전체 연료중 차지하는 양은 5%정도이지만 오일로 흡수되는 양은 0.26%로 흡수되는 양이 상당히 많은 것을 알 수 있다. m-xylene의 경우 연료중 차지하는 비율은 12.75%이고 오일로 흡수되는 양은 0.43%로 역시 용해도가 위의 두 성분 다음으로 크고 전체 연료중에 상당량 들어있기 때문에 많은 양이 오일로 흡수됨을 알 수 있다. 그리고 용해도가 가장 작은 benzene의 경우 연료의 전체에 대한 양도 적으므로 약 0.03%로 영향이 매우 적음을 알 수 있다.

Fig. 2은 냉간 및 정상상태 운전시 실린더 라이너 위치에 따른 오일막의 연료 흡수를 나타낸 그림이다. 이 온도에 대해서는 유효 침투 깊이 (Effective Penetration Depth, EPD)가 오일막 두께보다 얇기 때문에 흡기 및 압축 초기에 흡수되는 연료 질량은 실린더 라이너를 따라서 거의 동일하게 나타난다. 그러나 압축이 진행됨에 따라 피스톤은 상사점으로 이동하고 또 압축, 연소 과정까지 연소실의 연료 농도도 증가하기 때문에 실린더 라이너 최상단부 오일막으로 흡수되는 연료량은 급속히 증가한다. 또한 피스톤 아래에 있는 오일막은 크랭크 케이스에 노출되므로 여기서는 크랭크케이스 내로 연료가 방출된다. 그러므로 실린더 라이너 최상부로부터 20mm까지가 전체 연료 흡수량의 80%를 차지하게 된다. 엔진이 정상 상태에 도달했을 때는 유효 침투 깊이가

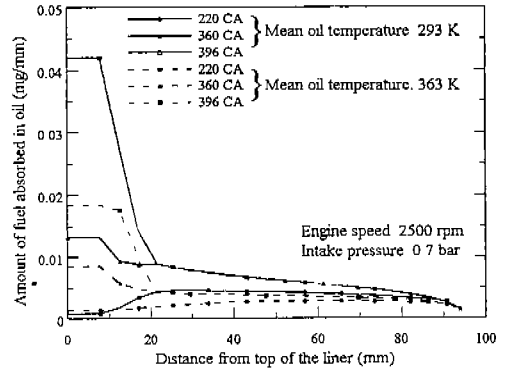


Fig. 2 The amount of fuel absorption along the cylinder liner

오일막 두께보다 더 두껍기 때문에 흡기 및 압축 과정 초기까지 연료의 흡수는 오일막의 두께에 비례하게 된다. 정상 상태 운전 조건에 대해서는 라이너의 상부로부터 20mm까지의 오일막에 전체 연료 흡수량의 약 77%의 연료가 흡수된다. 그리고 오일막이 크랭크 케이스에 노출시 연료의 확산계수가 크기 때문에 오일막에 있는 연료는 빠른 속도로 크랭크 케이스로 방출되게 된다. 그러므로 연소 기간 중에 대부분의 라이너는 크랭크케이스에 노출되어 있고 이 시기에 피스톤 하부 오일막의 연료성분 대부분은 크랭크케이스로 방출되게 되며 오일막으로 흡수되는 연료량에 대

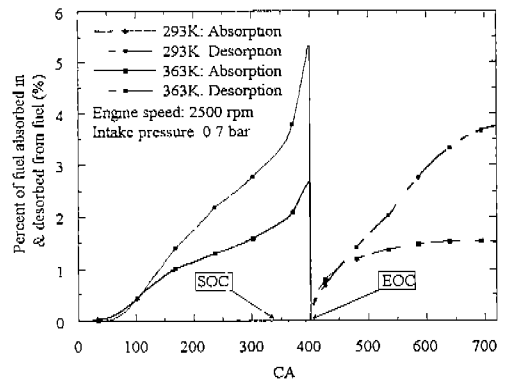


Fig. 3 Cumulative fuel absorbed in oil film and desorbed into the combustion chamber in an engine cycle

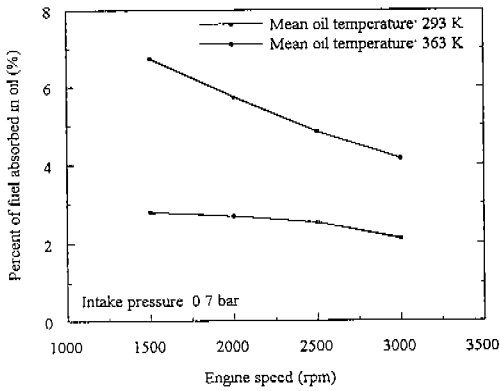


Fig. 4 Amount of fuel absorbed in oil film versus engine speed

한 연소실로 방출되는 연료량의 비는 라이너 최상부로부터 거리가 멀어짐에 따라서 상당히 감소하게 된다.

Fig. 3은 냉간 시동시 오일막으로 흡수/방출되는 연료의 크랭크 각도에 대한 누적선도이다. 연료를 다중 연료성분으로 한 경우 흡수량중 흡기 밸브가 닫힐 때까지 대략 39%정도가 흡수된다. 압축 과정에서는 압력이 매우 높기 때문에 오일막 면적은 압축 과정동안 감소하지만 전체 연료 흡수량의 58%가 압축 과정까지 흡수된다. 또한 연소기간에 오일막 면적은 최소가 되지만 압력이 최고압에 도달함에 따라 전체 연료의 42%가 연소 과정중에 흡수된다.

오일막으로부터 연소실로 방출되는 양의 경우, 냉간 시동시는 오일막으로 흡수된 연료 중 약 42%가 팽창 과정 중에 방출된다. 그러나, 오일막 온도가 증가하여 엔진이 정상 상태에 도달하면 전체 방출량의 약 90%가 팽창 과정 중에 방출된다. 이것은 오일 온도가 낮을 때는 확산 계수가 작기 때문에 연료의 확산 속도가 작아지기 때문이고 오일 온도가 증가함에 따라 연료의 확산 속도는 증가하기 때문이다. 또한 그림에서는 연료를 다중 연료 성분으로 한 경우가 두 단일 성분 연료의 사이에 있음을 알 수 있다. 실제 상용 연료에 있어서는 이들 연료성분들이 모두 섞여 있기 때문에 Fig. 3에서도 다중 연료성분이 단일

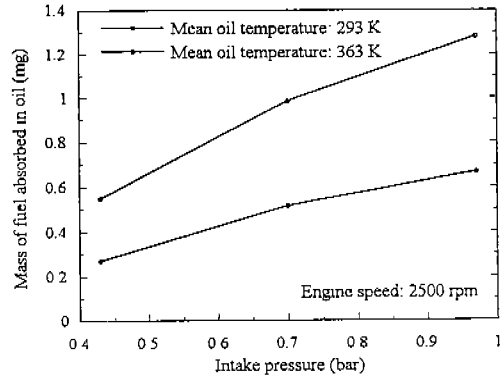


Fig. 5 Amount of fuel absorbed in oil versus inlet pressure

성분보다 더 합리적이라는 것을 보여준다.

Fig. 4는 엔진 속도 변화에 대한 오일막의 연료 흡수량에 대한 그림이다. 냉간 시동시에 엔진 속도가 증가하면 오일막의 두께는 증가하지만 동일한 크랭크 각도에 대한 시간이 짧아져서 유효 침투 깊이가 작아지게 된다. 그러므로 엔진 속도가 증가함에 따라 오일로 흡수되는 연료량은 6.7%에서 4.1%로 감소하게 된다. 그러나 오일막의 온도가 증가하면, 확산 계수가 커지기 때문에 유효 침투 깊이는 오일막 두께보다 커지게 되어 엔진 속도에 큰 영향을 받지 않게 된다.

Fig. 5는 부하 변화에 대한 오일막의 연료 흡수 변화를 나타낸 그림이다. 동일 속도에 대해서 부하를 바꾼 경우에 냉간 시동시나 또는 정상 상태에서 오일막의 연료 흡수량은 거의 선형적인 증가를 보인다. 그 양에 있어서는 냉간 시동시가 정상 상태보다 대략 2배 정도 크다. 그러나 부하가 증가하면 연소실로 들어가는 연료량이 증가하므로 실린더내의 충전 질량에 대한 백분율로 나타내면 부하 변화에 대한 영향은 거의 없다.

Fig. 6은 오일막 온도 변화에 대한 흡수/방출량을 나타낸 그림이다. 오일막의 온도가 저온인 경우에는 Henry 상수가 작기 때문에, 즉 연료의 오일막으로의 용해도가 크기 때문에 흡수/방출량은 커지게된다. 그러나 온도가 증가함에 따라 Henry 상수는 커지게 되고 오일로 흡수되는 연

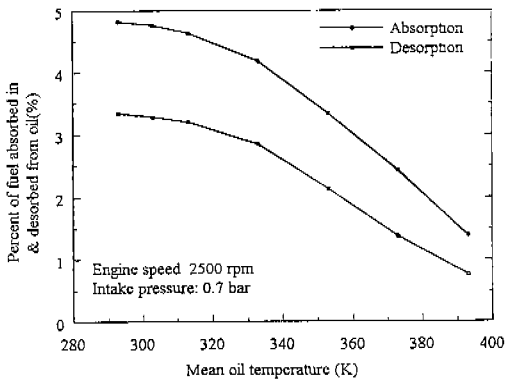


Fig. 6 Amount of fuel absorbed in the oil film & desorbed into the combustion chamber versus oil film temperature

료량은 감소하게 된다. Henry 상수가 변하게 되면 이에 의해 오일막속으로 들어가는 연료량은 영향을 받게 된다. 또한 고온으로 갈수록 오일막 두께도 작아지게 되므로 오일막 속으로 들어가는 연료량은 작아지게 된다. 그림에서 냉간 시동시의 오일막으로부터의 연료의 방출이 정상상태보다 약 4.5배 정도 크다. 이는 냉간 시동시 오일막의 영향이 정상 상태에서보다 더 중요하다는 것을 보여준다.

3.2 Crevice에 의한 영향과의 비교

미연탄화수소 배출물의 원인 중 피스톤 간극체에 의한 영향은 오일막에 의한 영향과 더불어 미연탄화수소 배출에 가장 지배적인 변수이다. 피스톤 간극체적으로 들어가는 가스량은 이상기체 상태방정식으로부터 구할 수 있다[10].

$$\frac{dm}{dt} = \frac{V_c}{RT_c} \cdot \frac{dp}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (9)$$

Fig. 7은 피스톤 간극체적과 오일막에서의 미연탄화수소 배출에 대한 냉간시동시 미연탄화수소 방출량의 누적선도이다. 냉간 시동시 팽창 과정동안에 오일막 안의 연료는 41.3%만이 연소실 안으로 방출된다. 그러나 피스톤 간극체적의 경우는 91%의 연료가 팽창 기간중에 방출된다. 그

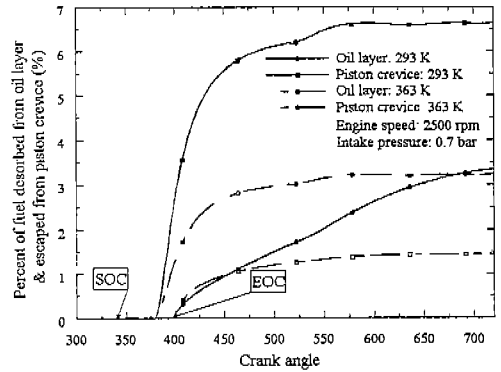


Fig. 7 The evolution of the unburned fuel from the piston crevice and oil film on the cylinder liner at cold condition

리므로, 피스톤 간극체적으로부터 나오는 미연탄화수소중에서 산화되는 양이 오일막으로부터 방출되고 산화되는 것보다 더 클 가능성이 있다. 정상 상태에서는 피스톤 간극체적에서 팽창 과정중 나오는 양은 91%정도이고 오일막의 경우도 81%의 연료가 방출된다. 냉간 시동시 오일막의 경우 연료의 확산 계수가 적기 때문에 연료가 연소실로 유입되는데 시간이 걸리지만 간극체적 유동은 실린더와 간극체적의 압력차에 의한 것이기 때문에 냉간 및 정상 상태에 관계없이 팽창 과정 중에 대부분의 연료가 연소실로 방출되게 된다. 또 냉간 시동시 간극체적에서 방출되는 양은 오일막의 약 2배이고 정상 상태에서는 약 2.3배를 차지한다. 간극체적에서 나오는 연료량이 더 큰 것은 확실하지만 이것은 이미 공기와 섞여 있기 때문에 더 쉽게 산화될 수 있다.

4. 결 론

오일막에서 연료의 흡수/방출이 미연탄화수소 배출에 미치는 영향을 조사하기 위한 모델링을 개발하고, 엔진 운전조건의 영향을 연구하였다. 이상과 같은 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 오일막의 연료 흡수/방출 메커니즘의 가장

중요한 변수는 Henry 상수이다.

2. 다중 연료 성분은 단일 성분보다 상용 연료에 가까운 조건을 제공한다.

3. 실린더 라이너의 상부에서 20mm까지의 오일막이 전체 연료 흡수량의 77~80%를 차지한다.

4. 1사이클 동안에 오일막에 흡수되는 연료 중 41~81%의 연료가 팽창 과정 중에 방출된다.

5. 오일막 온도가 낮은 경우는 연료의 확산 계수가 적기 때문에 엔진 속도가 증가함에 6.7%에서 4.1%까지 흡수량이 감소한다.

6. 냉간 시동시의 오일막으로부터의 연료의 방출이 정상상태보다 약 4.5배 정도 크다.

7. 피스톤 간극체적의 경우 오일막의 2~2.3배의 연료가 연소실 안으로 흡수된다.

8. 냉간 시동시 피스톤 간극체적의 연료는 오일막의 연료보다 많은 양이 연소실로 방출되므로 팽창 과정 중에 대부분 산화될 수 있으나 오일막의 경우는 팽창 과정 중 전체 방출량의 41%만이 방출되므로 배기 밸브가 열릴 때 상당량의 연료가 산화되지 않고 배출되게 된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(981-1005-031-1) 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1 A. Andrew, A. Adamczyk, G. Walter, Rothschild, and E. Kasier, "The Effect of Fuel and Oil Structure on Hydrocarbon Emissions from Oil Layers during Closed Vessel Combustion" Combustion Science and Technology, Vol 44, pp 113-124, 1985.
- 2 G. Carrier, F. Fendell, and P. Feldman, "Cyclic Absorption/Desorption of Gas in a Liquid Wall Film," Combustion Science and Technology, Vol 25, 1981.
- 3 F. Trinker, R. Anderson, Y. Henig, W. Siegl, and E. Kasier, "The Effect of Fuel-Oil Solubility on Exhaust HC Emissions," SAE paper 912349, 1991.
- 4 B. Gatellier, J. Trapy, D. Herrier, J. Quelin, and F. Galliot, "Hydrocarbon Emissions of SI Engines as Influenced by Fuel Absorption-Desorption in Oil Films," SAE paper 920095, 1992.
- 5 S. Ishizawa and Y. Takagi, "A Study of HC Emission from a Spark Ignition Engine," JSME International Journal, Vol. 30, No. 260, 1987.
- 6 J. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Inc., New York, 1988.
- 7 J. Schramm and S. Sorenson, "Solubility of Gasoline Components in Different Lubricants for Combustion Engines Determined by Gas-Liquid Partition Chromatography," Journal of Chromatography, Vol. 538, pp 241-248, 1991.
- 8 G. Mukesh, S. Singhal, and S. Biswas, "Analytical Investigation on the Effect of Multigrade Oil in Piston Ring Lubrication," Tribology Transactions, Vol. 37, pp 719-726, 1994.
- 9 T. Tian, "Modeling The Performance of the Piston Ring-Pack in Internal Combustion Engines," Ph.D. Thesis, MIT, 1997.
- 10 K. Min, "The Effects of Crevices on the Engine-Out Hydrocarbon Emissions in Spark Ignition Engines," Ph.D. Thesis, MIT, 1994.1.