

<논 문> SAE NO. 96370043

## 공회전시 연소의 사이클 변화 모델링 및 확인실험

### Modeling and its Experimental Validation on Cycle Variability of Combustion at Idle Operation

조 한 승,\* 황 승 환,\*\* 이 종 화\*\*\*  
H. S. Cho, S. H. Whang, J. W. Lee

#### ABSTRACT

The engine speed fluctuation at idle operation mainly comes from cyclic variation of combustion in SI engine. In the present study, engineering model that is representing the cyclic variation of combustion was proposed for the sub-model of the engine cycle simulation. From the observed behaviors of the mass burn rates, probability density functions for the parameters of Wiebe function were defined. The mass burn rate of each cycle is obtained by Monte Carlo perturbation method with the probability function. The simulation results shows that trends of cylinder pressure variation and imep distribution follow up with those of experimental results at idle condition.

주요기술용어 : Idle(공회전), Cyclic variation of combustion(연소변동), Cycle simulation(사이클시뮬레이션), Monte carlo method(몬테카를로 방법)

#### 1. 서 론

자동차용 엔진에 있어서 공회전시의 연소 안정성의 문제는 저진동 저소음 등 승차감에 매우 큰 영향을 미친다. 아울러 교통량의 증가에 의한 평균속도 저하로 공회전으로 운전되는 비율이 크게 늘어나게 되어, 공회전시의 연소 사이클 변동에 의한 속도안정성에 대한 중요성이 점점 더 커지

게 되었다.

공회전시 속도변동에 직접 관련되는 연소변동의 원인에는 매 사이클당 흡입 공기량의 차이, 공연비의 차이, 실린더 내의 유동특성의 변화, 초기화염의 공간적 변화에 따른 점화플러그로의 열손실의 차이, 잔류가스의 영향 등 수많은 인자를 들 수 있다<sup>1)~4)</sup>. 이러한 연소의 사이클 변동 문제에 있어서는 그 메카니즘의 규명을 위한 연구가 최근에도 많이 진행되고 있다.

연소의 사이클 변동량은 엔진에서 연소의 안정성을 나타내는 치수로 이용된다. 즉 다수의 사이클을 표본으로 하였을 때 사이클 당의 일 혹은

\* 정회원, 아주대 대학원, 고등기술연구원

\*\* 정회원, 아주대 대학원

\*\*\* 정회원, 이주대학교 공과대학

평균유효압력은 정규분포의 특성에 근접하므로, 평균유효압력의 편차를 이의 평균값으로 나눈 값을 사이클 변화계수로 정의하고 이를 연소안정성을 나타내는 척도로 이용하고 있다. 이러한 사이클 마다의 평균유효압력의 분포특성은 엔진의 부하 등에 따라 그 양상이 달라지며 특히 공회전으로 운전될 경우 정규분포에서 크게 벗어나므로<sup>5)</sup> 위와 같이 정의된 사이클 변화계수로 공회전시의 연소안정성 정도를 판단하는 것은 엄밀한 의미에서 적합하지 않다고 볼 수 있다. 평균유효압력이 낮은, 즉 실화 사이클에 근접한 사이클의 경우 엔진의 회전속도에 큰 변동을 가져오게 되므로 공회전 운전시의 연소안정성을 나타내기 위해서는 연소변동과 속도변동의 관계를 알아야 한다. 또한 공회전 속도의 안정성의 향상을 위해서는 연소의 변동을 줄여야 함은 물론 속도제어 알고리즘의 개선이 수반되어야 할 것으로 생각된다. 공회전 속도의 안정성 향상을 위한 정밀 제어 알고리즘의 연구 개발을 위해서는 실험적 방법과 병행하여 공회전 속도 변동 현상의 이해와 이를 나타낼 수 있는 모델이 필요하다. 이러한 모델은 엔진의 사이클 시뮬레이션 및 과대상태의 시뮬레이션 프로그램에 적용되어 Hardware-in-the-loop simulation에 응용될 수 있다. 연소의 사이

클 변동에 대한 모델에 관해서는 Brehob<sup>5)</sup> 등 최근 여러 곳에서 연구, 제시하고 있으나 공회전 운전시에는 그 특성과 효과가 다른 운전조건인 경우와 상이하므로 연구 보완될 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 자동차용 전기점화엔진에서 점화시기 및 공연비에 따른 공회전시 연소의 사이클 변동 특성을 실험적으로 분석하고, 그 특성을 모사하기에 적합한 공학적 모델을 연구하였다. 또한 이를 기존의 사이클 시뮬레이션 프로그램에 적용하여 공회전시의 압력변화, 평균유효압력 변화 등을 모사하여 실험결과와 비교하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

실험에서 사용한 엔진은 자동차용 1.5리터 연료분사식 가솔린 엔진이다. 연료량과 점화시기를 조절하기 위해서 기존의 ECU외에 PC-ECU를 부착하였으며, 4번 실린더에 압력센서(Kistler, 6051)를 설치하여 실린더 압력을 측정하였다. 또한 다른 실린더의 영향을 줄이기 위해 4번 실린더의 배기포트에 배기분석기(Horiba 8120)용 샘플링튜브를 삽입하여 배기가스의 농도를 측정하고 이로부터 공기과잉율을 계산하였다. 실험장

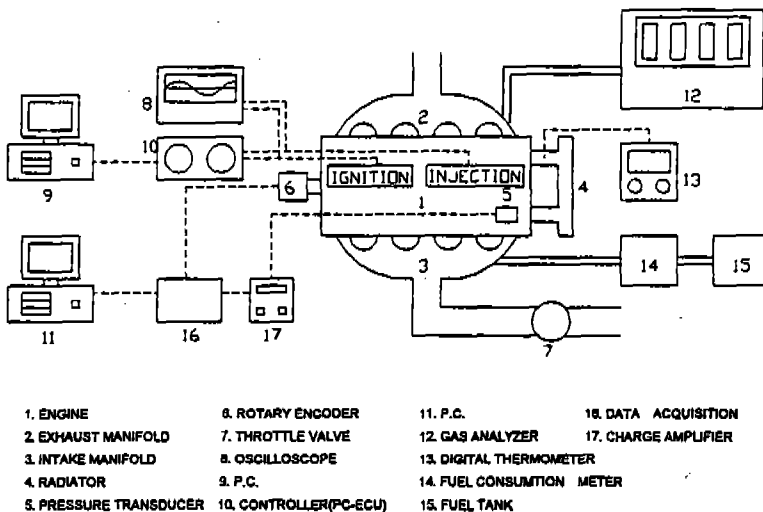


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

치에 대한 개략적인 구성은 Fig.1과 같다.

공기과잉율과 점화시기가 연소율에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 공기과잉율( $\lambda$ )을 0.9-1.1범위에서 점화시기를 변경시키면서 각 운전조건에 대해서 700사이클의 실린더 압력을 측정하였다. 이때 엔진의 회전속도는 750RPM으로 고정하였다.

### 3. 사이클 시뮬레이션 모델

엔진 시뮬레이션 프로그램은 엔진의 기하학적 치수, 흡·배기밸브의 개폐형상, 밸브타이밍, 밸브리프트, 점화시기, 공연비, 흡·배기시스템의 압력과 온도, 실린더내 각부의 온도경계치, 재순환된 배기가스 질량(the mass of exhaust gas recycled) 등의 입력자료를 근거로 실린더내의 열역학적 상태를 계산하여 기하학적 형상과 운전조건에 따른 엔진의 특성을 예측하도록 고안되어 있다. 프로그램의 구성은 크게 흡·배기모델, 연소모델 그리고 연소율에 대한 사이클 변동 모델로 구분할 수 있다.

#### 3.1 흡·배기모델

밸브의 개폐에 따른 밸브주위의 유동을 1차원, 준정상 단열상태, 압축성 유동이라는 가정하에서 실린더로 유입, 유출되는 유체의 양을 계산한다. 흡·배기시스템내의 압력은 일정하다는 가정하에서 밸브리프트의 변화에 따라서 밸브주위의 정방향, 역방향, 실린더내의 유동형태를 고려하였다.

만일 흡기시스템의 압력이 다음과 같이 초크압력비보다 크거나 같다면, 즉

$$\frac{P_m}{P_o} \geq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma(\gamma-1)} \quad (1)$$

유량은 초크되지 않고 다음과 같다.

$$\dot{m}_{th} = C_D A_R P_o \left(\frac{2}{RT_o}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \left(\frac{P_m}{P_o}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - \left(\frac{P_m}{P_o}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

만약 흡기시스템의 압력이 다음과 같이 초크압력보다 낮으면, 즉

$$\frac{P_m}{P_o} < \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma(\gamma-1)} \quad (3)$$

유량은 초킹이 일어나서

$$\dot{m}_{th} = C_D A_R P_o \left(\frac{\gamma}{RT_o}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{2}(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \quad (4)$$

와 같이된다. 여기서  $\gamma$ 는 비열비,  $C_D$ 는 유량계수,  $R$ ,  $A_R$ 은 기체상수, 밸브리프트변화에 따라 변하는 유체통과면적을 의미한다.  $P_o$ ,  $T_o$ ,  $P$ 는 각각 흡기시스템에서의 압력과 온도 그리고 실린더압력을 나타낸다<sup>1)</sup>.

유량계수(discharge coefficient)는 밸브리프트, 유동방향, 밸브에서의 압력강하, 흡·배기밸브 구분에 따른 함수로 표현되며 프로그램내에서는 밸브시트각과 밸브직경과 리프트의 비로 구성된 경험식을 사용하였다<sup>9)</sup>.

실린더 압력이 흡기시스템의 압력보다 높을때는 역유동이 발생하는 압력차를 계산하여 이상기체상태방정식에 적용, 그 영향을 반영하였다.

#### 3.2 연소모델

사이클 시뮬레이션을 위한 모델로는 화염속도를 고려한 모델과 무차원연소 함수가 널리 이용되고 있다. 본 연구에서 이용한 연소모델인 Wiebe 연소율함수는 연소실의 기하학적 형상에 무관하여 적용하기가 간단하므로 엔진시뮬레이션의 종속모델로 널리 이용되고 있다. Wiebe 함수는 식 (5)에 나타난 바와 같이 최종질량연소율(final mass burn fraction)을 나타내는 효율계수  $a$ 와 연소율 곡선의 기울기와 관계있는 형상계수  $m$  그리고 전연소구간(total burn duration)인  $\theta_b$ 가 변수이다.

$$x_b = 1 - \text{EXP}(1 - a X F^{(m+1)})$$

$$\text{where } X F = \frac{\theta - \theta_s}{\theta_b} \quad (5)$$

$XF$  : fraction of combustion duration

$x_b$  : mass fraction burned

$\theta_b$  : total burn duration

$\theta_s$  : crank angle of spark timing

연소실내 연소과정은 점화시기부터 전연소구간을 기초로 크랭크각변화에 따른 질량연소율을 계산한다. 계산된 전연소구간에서의 질량연소율을 근거로 미연소영역, 연소영역내의 단열영역, 연소경계면으로 구분하여 실린더내의 열전달현상을 고려하였으며 이때 열전달 계수로는 식 (6)~(8)에 나타난 Woschni<sup>6)</sup>의 경험식을 인용하였다.

$$h_u = h \cdot T_u^{-0.53} \quad (6)$$

$$h_b = h \cdot T_b^{-0.53} \quad (7)$$

여기서  $h$ 는 다음과 같다.

$$h = 110 \cdot B^{-0.2} \cdot T^{-0.53} \cdot P^{0.8} \cdot [C_1 \cdot \bar{S}_p + C_2 \cdot \frac{V_s \cdot T_1}{P_1 \cdot V_1} \cdot (P - P_m)]^{0.8} \quad (8)$$

$h_u$ ,  $h_b$ 은 미연소영역과 연소영역에서의 열전달 계수,  $T_u$ ,  $T_b$ 는 미연소영역과 연소영역의 온도를 의미하며  $B$ 는 실린더직경,  $\bar{S}_p$ 는 피스톤 평균속도,  $P_m$ 은 모터링시의 압력을 나타낸다.  $V_s$ ,  $P$ ,  $T$ 는 실린더체적, 가스압력과 온도,  $C_1$ ,  $C_2$ 는 상수이며 그리고  $P_1$ ,  $T_1$ ,  $V_1$ 는 IVC상태에서의 가스압력, 온도, 체적을 나타낸다.

잔류가스의 비율( $x_r$ )은 공회전상태에서 연소 안정성에 큰 영향을 주게된다. 본연구에서는 잔류가스량을 다음과 같은 방법으로 구하였다. 현 사이클에서 흡입된 공기량( $m_i$ )과 전사이클에서 계산되어진 배기가스량과의 차를 남은잔류가스량( $m_r$ )로 보고 식 (9)와 같이 표시하였다.

$$x_r = 1 - \frac{m_r}{m_r + m_i} \quad (9)$$

### 3.3 연소율에 대한 사이클 변동 모델

사이클 변동의 원인은 여러가지를 들 수 있겠으나 주로 연소과정에서 발생하는 연소율의 변동에 의해 나타나고 이는 실린더압력의 사이클 변화를 가져오게 된다. 따라서 사이클 변동을 고려하기 위해서는 연소율에 대한 사이클 변동모델이 필요하게 된다.

본 연구의 목적은 사이클 변동의 원인 자체를 규명하기 위한 것보다는 공회전시 속도제어 알고리즘 등에 이용될 수 있는 시뮬레이션 모델링에 있으므로 연소모델로서 Wiebe 함수를 기본으로 하여 이 함수의 변수들이 어떤 거동을 나타내는지를 분석하고 이로부터 Monte Carlo 방법을 적용하여 현상내에 존재하는 불확실성을 확률개념(probability theory)을 이용하여 다룸으로서 그것에 대한 정보를 얻을 수 있도록 수학적으로 처리하였다.

측정된 700사이클의 실린더압력 데이터로부터 구한 연소율을 Wiebe함수로 근사시킬 경우  $a$ ,  $m$ ,  $\theta_b$ 는 Fig.2에 나타낸 것과 같은 분포를 갖는

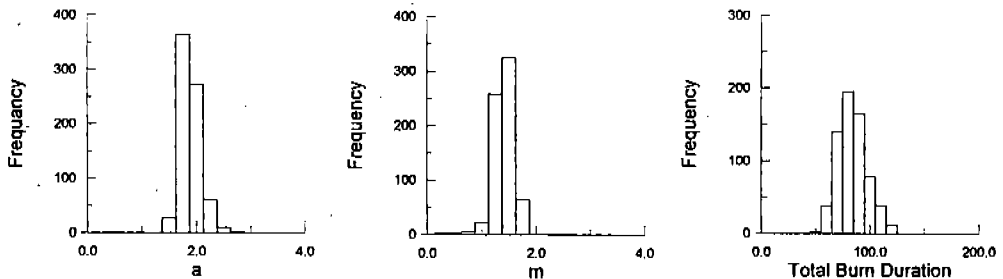


Fig.2 Distribution of variables in wiebe function at  $\lambda=1.0$  and spark timing =  $10^\circ$  CA(BTDC)

다. 따라서 이를 형성화하여 각 변수의 확률분포 함수를 면적이 1인 삼각형 분포형태(triangular distribution)로 근사시켰다<sup>8),9)</sup>.

$a=x \text{ min}$ ,  $\beta=\text{most likely}$ ,  $r=x \text{ max}$ 라고 할때 분포형태를 함수로서 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f(x) &= 0 && \text{for } x < a \\
 f(x) &= h \frac{x-a}{\beta-a} && \text{for } a \leq x \leq \beta \\
 f(x) &= h \frac{r-x}{r-\beta} && \text{for } \beta \leq x \leq r \\
 f(x) &= 0 && \text{for } x > r
 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서  $h$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$h = \frac{2}{r-a}$$

여기서 연소율 함수의 세변수  $a$ ,  $m$ ,  $\theta_b$ 에 대한 빈도수 많은 영역(most likely region)를 기준으로 상영역(upper bound), 하영역(lower bound)의 범위  $l$ ,  $u$ 는 다음과 같은 방법으로 결정하였다.

최종질량연소율을 나타내는  $a$ 는 고부하의 조건에서는 일반적으로 5정도의 값을 갖는 것으로 알려져 있다<sup>1),10)</sup>. Fig.3은  $a$ 의 확률분포함

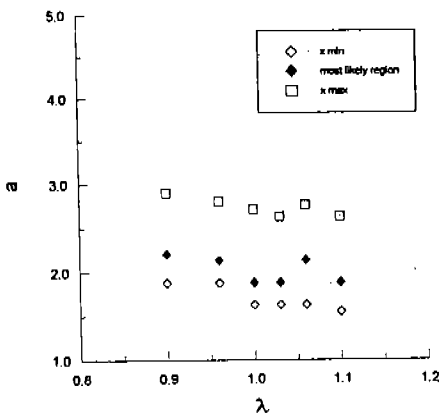


Fig.3 Parameters of “a” distribution for various  $\lambda$  at spark timing = 10° CA(BTDC)

수를 Fig.2와 같이 삼각형 분포형태로 단순화시켰을 때  $\lambda$ 변화에 따라 최소치, 빈도수 많은영역, 최고치를 나타낸 것이다. 그림에서 살펴보면 공회전 영역에서는 최종질량연소율의 최저치, 빈도수 많은영역, 최고치의 평균값이 대체로 1.7, 2.0, 2.7정도의 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이는 공회전과 같은 저부하 저속영역에서는 연소변동이 크고 연소효율도 매우낮아 최종질량연소율이 약 70~100%에 걸쳐 분포하게 되므로 5보다 훨씬 작은 값으로 나타난다고 생각된다.

전연소기간은 길면 변화폭이 크고 반대로 짧은 경우에는 변동폭이 적다는 것은 알려져있는 사실이다<sup>1)</sup>. 전연소기간의 분포는 한쪽으로 치우치면서 빈도수 많은 영역을 기준으로 상영역과 하영역의 길이가 서로 같지않는 형태(skew pattern)를 띠고 있다<sup>5)</sup>.(Fig.2 참조) 이러한 변화특성을 고려하여 빈도수 많은 명역을 기준으로 상영역과 하영역에 일정률의 범위를 정하여 전연소기간이 커질수록 변동폭이 커지게끔 설정하였다. 즉 빈도수 많은 영역의 변화에 따른 전연소구간의 변화를 나타낸 것이다<sup>9)</sup>.(식 (11) 참조)

$$\begin{aligned}
 \text{Upper bound} &= 0.6(\theta_b)_{\text{most likely region}} \\
 \text{Lower bound} &= 0.3(\theta_b)_{\text{most likely region}}
 \end{aligned} \tag{11}$$

형상계수  $m$ 은 초기연소율의 기울기에 큰 영향을 주게되는 인자이고, 또한 초기연소율은 후기

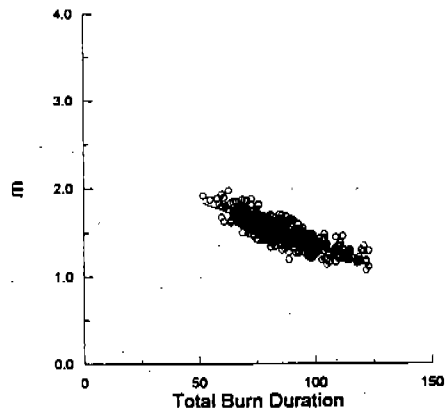


Fig.4 Relation between “m” and “total burn duration” at  $\lambda=1.0$  and spark timing 10° CA(BTDC)

연소에 직접적인 영향을 주게되는 값이므로 연소 기간과의 상관도가 클 것으로 예상하여 두 인자 간의 상관도를 알아보았다. Fig.4는 m과 전연소 기간과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 두 변수의 관계는 대체로 선형적이 된다는 것을 알 수 있다. 그러므로 이를 단순화하여 두 인자의 관계는 다음식으로 표시하였다.

$$m = a_1 \theta_b + a_2 \quad (12)$$

여기서  $a_1, a_2$ 는 운전조건에 따라 대체로 0.009 ~ 0.01 그리고 2.0 ~ 2.3의 값을 나타내었다. 따라서 운전조건 변화에 무관하게  $a_1, a_2$ 의 수치가 거의 일정함을 알 수 있다.

그러므로, 이와같은 방법으로 전연소구간( $\theta_b$ )의 빈도수 많은 영역의 값을 입력하면 전연소구간의 범위 뿐만아니라 a, m이 결정되어 연소율 함수의 특성을 반영하게 된다.

#### 4. 사이클시뮬레이션 결과 및 검토

Fig.5는 전연소구간의 빈도수 많은 영역의 값을 입력하여 전연소구간, a, m의 확률분포를 Monte Carlo 방법으로 이용하여 각 변수에 대해서 난수를 발생시켰을때 실험결과와 비교한 것이다. 전반적으로 실험의 분포와 유사함을 나타내고 있다. 이러한 형태의 확률분포형태를 기본으로하여 각 사이클의 연소율을 구하였다.

Fig.6는 실험과 시뮬레이션에서의 사이클변화의 연소변동에 따른 압력선도분포를 나타낸 것이다. 시뮬레이션에서의 압력선도의 변화가 실제의 연소변동특성을 나타내고 있으며 본 연구의 연소변동 모델링이 실제 상황을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

시뮬레이션에서는 두가지 경우로 나누어서 사이클 변화의 연소변동에 따른 평균유효압력(IMEP)의 분포를 실험결과와 비교하였다. 첫번

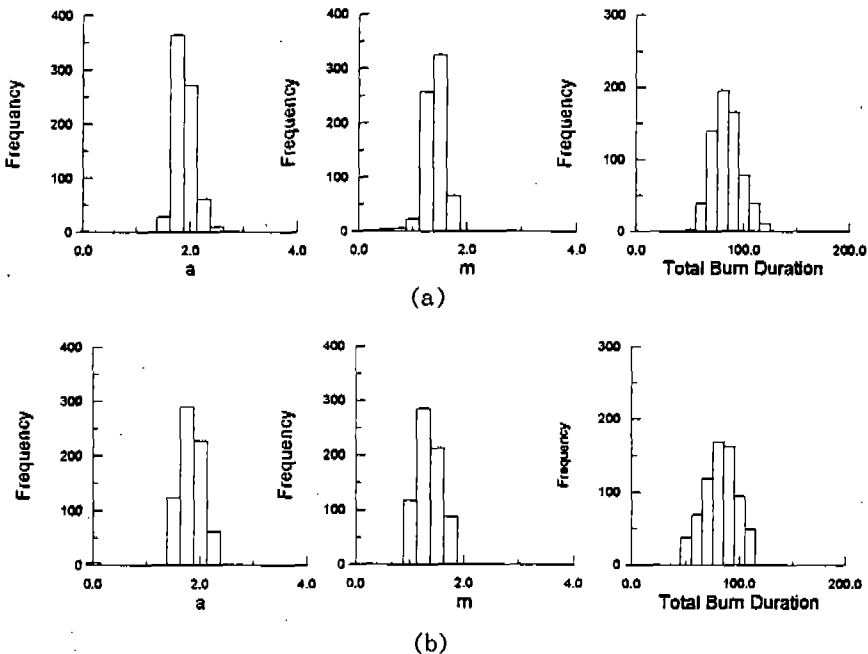


Fig.5 (a) Distribution of variables in wiebe function(experiment)  
 (b) Random number distribution of variables in wiebe function at  $\lambda = 1.0$  and spark timing =  $10^\circ$  CA (BTDC)

째 경우는 점화시기를 10° CA(BTDC)로 고정하고  $\lambda$ 를 0.9, 1.0, 1.1로 변화시키면서 연소율 함수의 변수들을 난수로 발생하였다. 두번째 경우는  $\lambda$ 를 1.0으로하고 점화시기를 5°, 10°, 15° CA(BTDC)로 변화시키면서 변수들을 난수로 발생하였다.

첫번째 경우의 결과는 Fig.7에 두번째 경우의 결과는 Fig.8에 표시하였다.

시뮬레이션 결과의 전반적인 분포형태가 실험 결과와 유사하게 한쪽으로 치우치는 형태를 띠고 있으며 특히 빈도수 많은 영역의 위치가 거의 일치한다. 분포상에서 빈도수(frequency)의 절대수

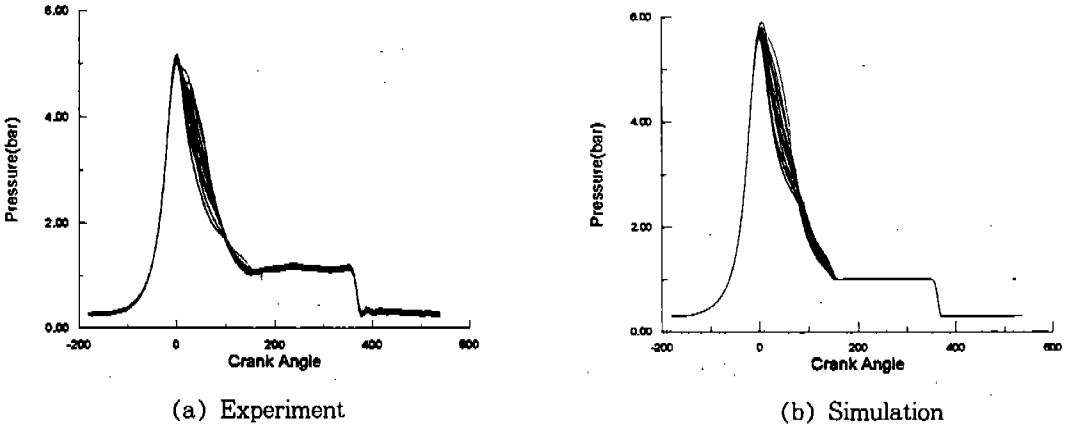


Fig.6 Comparison of cylinder pressure at  $\lambda = 1.0$  and spark timing = 10° CA(BTDC)

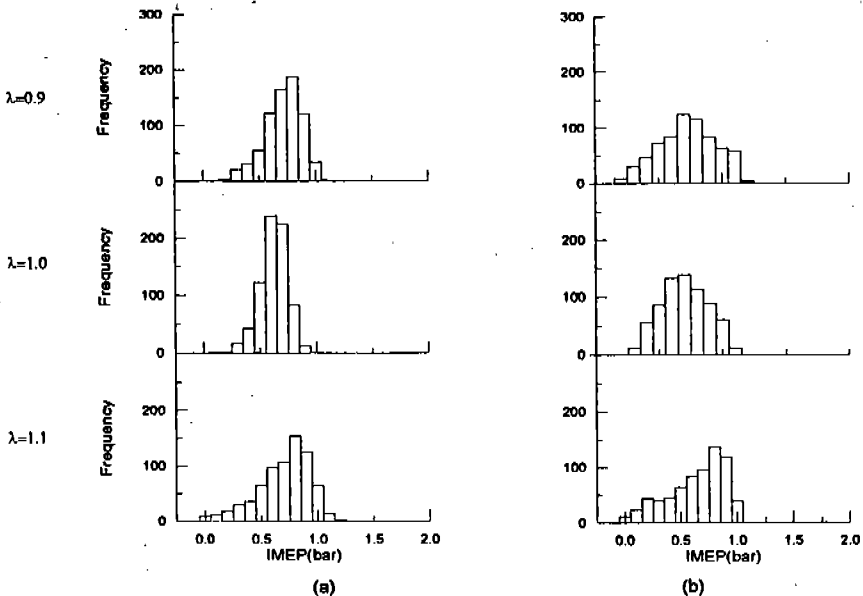


Fig.7 IMEP Distribution for (a) Experiment and (b) Simulation with various  $\lambda$  at spark timing of 10° CA(BTDC)

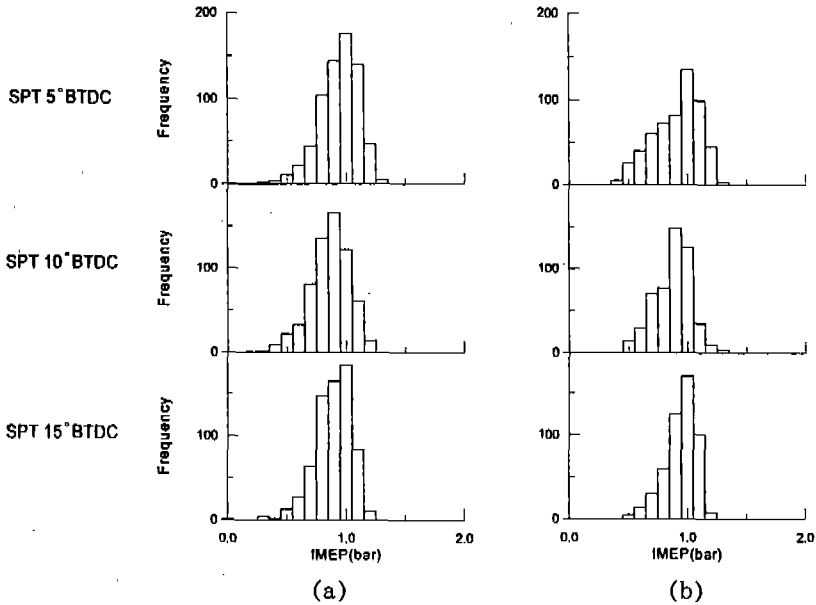


Fig.8 IMEP Distribution for (a) Experiment and (b) Simulation at different spark timing and  $\lambda=1.0$

치나 분포영역에는 차이가 있으나 시뮬레이션에는 실험결과에 대한 전반적인 경향을 예측하기 위한 것이 주목적이므로 본 연구의 연소변동 모델링에 의한 시뮬레이션은 이러한 목적에 부합된다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 전기점화기관에서 공회전시 연소의 사이클 변동특성을 모사하기위한 시뮬레이션 연구를 수행하기위한 것이다. 사이클마다의 연소변동을 고려하기위하여 연소모델의 변수를 Monte Carlo 방법으로 변화시키는 연소변동모델을 구성하고 이를 사이클 모사 프로그램에 적용하였다.

공회전 운전에서 연소의 사이클 변동특성을 반영할 수 있도록 효율계수  $a$ , 형상계수  $m$  그리고 전연소기간의 적절한 범위와 상관관계를 설정하였으며 이에따라 공회전조건에서의 빈도수 많은 영역의 전연소기간을 입력하면 사이클마다의 연소율을 구할 수 있도록 하였다. 이를 모사 프

그램에 적용해 본 결과 실린더압력변동 및 평균 유효압력의 분포에 대한 전반적인 경향이 실험결과와 비교적 잘 일치하였다. 공회전 운전에서의 새로운 시스템이나 제어기법을 실차에 적용하여 시험해 보기전에 사이클마다의 연소변동을 반영하는 사이클 시뮬레이션 프로그램을 이용하면 미리 결과를 예측해볼 수 있어 개발시간과 노력을 줄일 수 있다는 측면에서 긍정적으로 평가할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학: ME94-F-05)에 의하여 연구되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-HILL, 1988.



2. D. J. Patterson, "Pressure Variation, A Fundamental combustion Problem", SAE Paper No. 660129
3. M. B. Young, "Cyclic dispersion in the Homogeneous Charge Spark Ignition-A Literature Survey", SAE Paper No. 810020
4. J. B. Heywood et al, "Cycle-to-Cycle IMEP Fluctuation in a Stoichiometrically-Fueled S. I. Engine at Low Speed and Load", SAE Paper No. 902143
5. D. D. Brehob and C. E. Newman, "Monte Carlo Simulation of Cycle by Cycle Variability", SAE Paper No. 922165
6. R. M. Moyes, "Analytical Prediction of Discharge Coefficients for Pistion Engine Poppet Valves", GM Research Report EM-98, 1977.
7. G. Woschni, "A Universally-Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal-Combustion Engine", SAE Trans. Vol. 76, pp. 3065-3083, 1967.
8. G. A. Hazelrigg, "System Engineering", IAE, 1993.
9. 조한승 외 3인, "전기점화엔진에서 공회전시 연소의 사이클 변동 모델링 및 시뮬레이션", 한국자동차공학회, 춘계학술대회 논문집, 1995.
10. 이종화, 김응서. "전기점화 기관에서 연소의 사이클 변화 측정 및 해석", 한국자동차공학회지, 제14권 3호, 1992.