FIRE Code를 사용한 정적연소기의 메탄-공기 균질 혼합기 연소특성 연구

이석영* · 허강열*†

A Study on Combustion Characteristics of Methane-air Homogeneous Mixture in a Constant Volume Combustion Chamber by FIRE Code

Suk-Young Lee*, Kang-Yul Huh*†

ABSTRACT

A constant volume combustion chamber was used to investigate the combustion characteristics of homogeneous charge of methane-air mixture under various initial pressure, equivalence ratio and ignition times. The constant volume combustion chamber(CVCC) mostly has been studied by the experiments of visualization until now. So it is needed the numerical analysis of fluid and combustion characteristics in chamber by the more detail simulation. In this paper, the numerical analysis is tried to approach basically the homogeneous charge combustion phenomena under the various conditions, and the combustion phenomena in chamber is numerically analyzed by the commercial FIRE code. As a results, the combustion phenomena which were mean temperature, OH radical and reaction rate in chamber were investigated and it showed that the smallest flame growth occurs for the lean state and the increase of initial charged pressure condition due to the reduced OH radical.

Key Words : Constant volume combustion chamber, homogeneous charge, equivalence ratio, reaction rate

기 호 설 명

C_K	Constant in laminar flame speed	*fu*	Fuel
fr	Fresh gas	S_L	Laminar flame speed
		y	Mass fraction

1. 서 론

엔진연구에 있어서 연소현상의 해석은 성능향상 및 배기가스 개선의 기본적인 자료를 제공하며 특히 희박운전의 경우, 연소현상의 안정화를 위하여 이에 대한 연구는 필수적이다. 희박연소는 화염속도가 낮고 초기화염 생성이 어렵기 때문에 이를 실제 엔진에 적용시 불안정한 운전조건을 극복하기 위해서는 혼합기의 유동형태나 초기압력 등을 조절함에 따른 연소메커니즘의 분석이 요구된다. 일반적으로 희박연소는 급속연소기술이 병행되어야 하므로 실린더 내부의 유체역학과 연소속도와 관련하는 연소실내 유동, 압력과 같은 주요 인자들의 영향에 대한 연구가 선행되어야 한다. 엔진연소에 영향을 미치는 유체유동의 중요한 인자는 난류와 스월의 두가지로 볼 수 있다. 난류가 미시적인 관점에서 연소촉진의 효과가 있다면 스월은 혼합기의 주유동과 관계가 되므로 화염의 발달형태를 결정하게 된다. 이러한 엔진실린더 내부 연소현상은 매우 복잡하고 측정의 어려움 때문에 일반적으로 연소실을 단순화시켜서 실험변수를 줄인 유동형 정적연소기를

* 포항공과대학교 기계공학과
† 연락저자, huh@postech.ac.kr

연소에 영향을 미치는 인자에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. Checkel과 Ting[1]은 난류에디 크기를 조절하여 정적연소기에서 난류길이크기와 화염전파속도에 관한 연구를 수행하였고 Arcoumanis와 Bae[2]는 정적연소기내의 유동속도를 측정하고 이를 바탕으로 유동에 의한 초기 화염 성장을 관찰하였으며, 초기압력, 온도, 공연비 등을 변화시키며 이에 따른 연소특성을 관찰하였다. 또한 Lefebvre[3]는 층류연소속도와 화염전파속도에 관한 정의와 함께 혼합기의 초기온도, 압력 및 농도가 연소속도에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 그리고 Hjima와 Takeno[4]는 정적연소기에서 메탄혼합기의 분위기 온도 및 압력 변화에 따른 화염전파속도에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구는 실험과 상용코드의 비교를 통해 정적연소기에서의 연소의 기본적인 현상을 고찰한 것으로서, 연소분야에서 상용코드를 체계적으로 적용하려고 시도하였다. 이를 위해 실험을 통해 얻어진 실린더내 압력결과를 FIRE code를 사용하여 계산된 결과와 상호 비교하여 계산에 대한 검증을 하였으며, 실린더내의 공연비, 압력 및 유동 등을 비롯한 여러 인자들이 희박연소에 미치는 영향을 계산을 통한 자료를 통해 상호 비교하여 정적연소기에서의 연소현상을 분석하였다.

실험방법 및 결과

2.1 실험장치

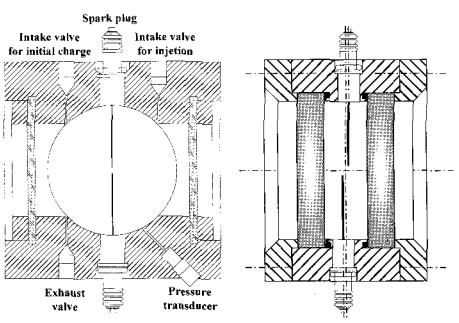
정적 연소기의 제원은 가솔린 기관의 압축상사점을 모사하여 직경 86 mm, 폭 25 mm, 체적 145 cc로 하였으며, Fig. 1은 정적연소기의 형상을 보여준다. 점화는 금속인 피아노선을 이용하여 중앙에서 일어나도록 하였고, 가시화창은 두께 20 mm의 FS창(fused silica window)을 설치하였다. Fig. 2는 실험장치의 구성도이다. 연료와 공기를 각각의 충진탱크에서 서로 다른 균질 혼합기를 만들었다. 유동 특성 해석을 위해 정온도형 열선유속계(CCA : constant temperature hot wire anemometer, IFA-300)를 사용하였다.

2.2 실험방법

한번의 연소이벤트가 종료된 후 진공펌프와 소기용 혼합탱크의 혼합기를 이용하여 연소실내의 잔류 배기가스를 배출한다. 실험을 재개할 온도가 되면, 진공펌프를 이용하여 연소실을 진공상태로 한 후 분사용 혼합탱크와 연결되어 있는 솔레노이드 밸브에 전압을 인가하여 원하는 연소실내의 초기압력으로 충진한다. 흡기포트는 분사용과 소기용이 있으며, 직경은 1 mm이다. 점화시기를 조정하여 연소가 진행되고, 연소가 종료되면 직경 2 mm의 배기포트를 통해 배기가스가 배출되게 된다. Table 1의 실험조건에서 보는 바와 같이 연소실내의 초기압력은 0.15, 0.30, 0.60 MPa이며, 혼합기의 당량비는 희박한계인 0.714와 희박조건이면서 이론당량비에 근접한 0.91로 정하였으며, 균질혼합기에 대한 점화시기는 유동특성이 가장 활발한 300 ms와 유동이 준정적상태로 존재하는 10000 ms로 하였다.

2.3 실험결과

먼저, Fig. 3 은 스파그 플러그 간극에서 측정된 평균속도와 난류강도의 결과이다. 두 경우 모두 분사종료 후 유체의 관성에 의해 일정한 값까지 증가하다가 점점 감소하여 3000 ms 이 후 부터는 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 평균속도와 난류강도의 최대값이 나타나는 시점은 분사종료 후 300 ms근방임을 알 수 있다. Fig. 5에서 측정된 압력값을 보면 최고압력은 당량비가 높고 실린더내 분사된 연료량이 많을수록 높게 나타났으며, 희박할수록 최대 연소 압력값은 감소함을 알 수 있다. 그리고 평균속도와 난류강도 최대치가 존재하는 300 ms 점화시기 조건에서는 연소속도의 증가에 따라 연소 압력이 급격하게 상승하는 반면에, 유동이 거의 정지한 상태인 점화시기 10000 ms의 조건에서는 연소압력의 상승이 완만함을 알 수 있다. 이는 점화시기가 빠를수록 빠른 유동속도로 인한 높은 난류강도로 인해 열 및 물질전달의 효과가 커서 연소기간이 단축되기 때문이다. 점화시기 300 ms의 조건에서 연소압력이 커지며, 이상의 결과로부터 유동특성과 연소특성에는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 또한 같은 량의 연료를 연소시키는 조건에서 점화시기에 따라 최대압력값에 차이가 나는 것은 최대압력에 도달할 때까지의 실린더 벽면으로의 열전달 손실량의 차이로 생각된다.



(a) Front view (b) Side view

Fig. 1 Schematic diagram of CVCC

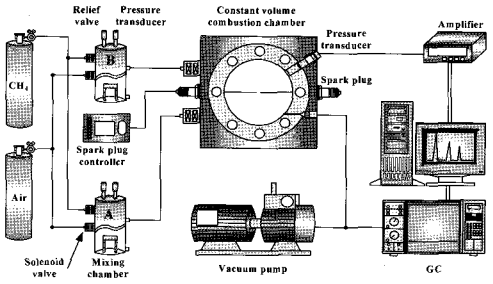


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Experimental combustion conditions

Overall pressure (MPa)	Equivalence ratio	Ignition time (ms)
0.15, 0.3, 0.6	0.714, 0.91	300, 10000

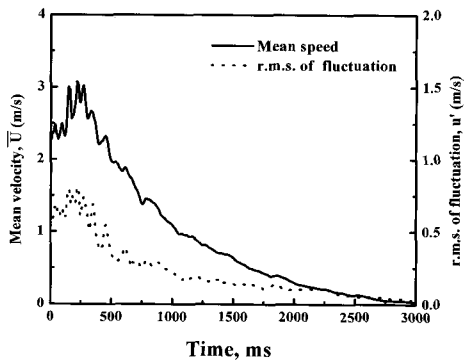


Fig. 3 Flow characteristics at spark electrode gap at the condition of 0.3 MPa

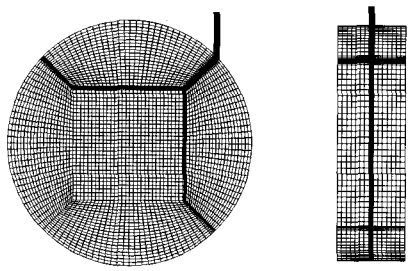


Fig. 4 Calculation grid of CVCC

3. 연소모델

예혼합 난류연소영역은 chemical time scale, integral length scale, 난류강도와 같은 여러 가지 요소로 구분 할 수 있으며, 많은 연소해석 방법 중에서 chemical time scale에 추가적인 연소모델을 적용하여 난류와 비교하게 된다. 이것이 coherent flame model(CFM)이다. CFM은 층류화염면의 개념을 기초로 하여 예혼합과 비예혼합 조건 두가지에 모두 적용 된다. 여기서의 화염모델은 미연가스와 기연가스를 분리하는 얇은층 안에서 반응이 일어난다고 가정한다. 이러한 가정을 사용하여 평균 난류반응률은 다음과 같이 층류연소속도와 화염표면밀도로 계산이 된다[5].

$$\overline{\rho \Phi_{fu}} = -\omega_L \Sigma \qquad (1)$$

여기서 ω_L은 화염전면에서 단위 표면적당 평균층류 연료소비율이고 Σ은 화염표면밀도이다. 최근에 사용되는 CFM은 standard CFM, MCFM과 ECFM 등이 많이 사용되며, 여기서 MCFM은 농후 또는 희박혼합기 조건에 알맞고 ECFM은 분사모듈을 잘 구사하는 DI-SI엔진에 잘 적용 된다. 따라서 본 연구에서는 균질혼합기이며 희박혼합기의 조건에 적합한 MCFM을 FIRE code에서 선택하여 사용하였다. 또한 Fig. 4는 계산을 위한 격자모형으로 약 6만여 개의 격자를 이루게 하였으며 특히, 혼합기를 2차 충진하기 위한 분사 부분에는 계산의 정확성을 높이기 위하여 조밀도를 더욱 높였다.

- 난류화염표면밀도

화염표면밀도 Σ는 다음식으로 계산되며[6],

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{u}_j \Sigma) - \frac{\partial}{x_j}\left(\frac{v_t}{\sigma_\Sigma}\frac{\partial \Sigma}{\partial x_j}\right) = S_\Sigma = S_g - S_a \qquad (2)$$

여기서 σ_Σ는 난류 Schmidt수, v_t는 난류동점성, S_g는 난류팽창률에 의한 화염 표면생성을 나타내고, S_a는 반응에 의한 화염표면의 소멸을 나타내며 이에 대한 상세한 식은 아래와 같다.

$$S_g = \alpha K_{eff} \Sigma, \qquad S_a = \beta \frac{\rho_{fu,fr} S_L}{\rho_{fu}} \Sigma^2 \qquad (3)$$

여기서 α와 β는 CFM을 사용하기 위한 arbitrary tuning 상수이며, K_{eff}는 화염의 평균확장률이며 아래식과 같이 난류화염확장을 나타내

는 K_t와 같고 K_t는 층류화염속도에서 난류성분과 길이의 함수이다.

$$K_{eff} = K_t = \varepsilon / k\ C_K \quad (4)$$

- 층류화염속도

층류화염속도는 높은 압력과 온도의 조건에서 예혼합화염 연소에 대하여 다음의 경험식이 얻어진다[7].

$$S_L = S_{LO}(1-2.1 y_{EGR})\left(\frac{T_{fr}}{T_{ref}}\right)^{a_1}\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^{a_2} \quad (5)$$

여기서 T_{ref}와 P_{ref}는 표준상태에서 기준치이며 a_1과 a_2는 연료성분과 관계되는 성분이다.

- 연료반응률

화염표면 밀도를 Σ, 평균층류연료소비율을 S_L으로 나타내면 평균 연료 반응률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{\rho \dot{r}_{fu}} = -\rho_{fr} y_{fu,fr} S_L \Sigma \quad (6)$$

또한 미연영역에서의 성분을 CH_4, O_2, N_2, CO_2 H_2O의 5가지의 종으로 가정하였고, 반면에 기연가스의 영역에서는 높은 연소온도로 인해 연료는 남아 있지 않은 것으로 가정하여 O, O_2, N, N_2, H, H_2, C, CO_2, H_2O, OH, NO의 11가지 종의 성분으로 가정하였다.

4. 계산결과 및 고찰

4.1 계산된 결과의 검증

Figure 5는 검증을 위해 실험에 의해 취득된 압력값과 계산값을 비교한 것으로서 서로 근접함을 보여준다. 정적연소기에서는 열전달 손실이 큰 비중을 차지하며 본 연구에서는 벽면의 온도는 실험실 실내온도를 기준으로 293.15K로 가정 하였고 열전달 계수는 FIRE code에서 정하여진 기본값을 취하였다. 상수는 다음의 3가지 값을 조정할 수 있는데, 첫 번째 상수값인 초기화염 표면밀도값은 착화지연를 결정하는 값으로, 권장값의 범위는 100에서 500[1/m]이며 본 연구에서는 실험값과 유사하게 잘 맞는 100으로 설정하였다. 두 번째는 확장인자는 값이 증가할수록 화염표면 밀도가 강화되어 연소 phase가 짧고 빨라지는 값으로 권장값 범위내에 포함된 1로 설정하였고, 세 번째의 연료소비인자는 권장값인 1로 설정하였다. 이러한 상수값의 설정방법은 어느 한 조건을 기준으로 실험값에 수렴하도록 상수를 결정하였으며, 다른 조건에서는 결정된 상수를 동일하게 적용하였다. 계산에 걸리는 시간은 혼합기 또는 공기의 분사기간은 평균 12시간, 연소기간은 14시간이었으며 각 조건에 대해서는 크게 차이나지 않았고 참고적으로 사용된 장비는 CPU 2G, RAM 4G을 내장한 펜티엄-4 PC였다.

4.2 혼합기 분사시 유동현상

Figure 6은 흡기시 연소실내 유동상태를 보여주며 분사가 지속됨에 따라 원주방향으로의 유체의 관성과 분사 운동에너지가 계속 증가함을 보여 주며 분사가 종료되는 513 ms에서 최대값을 보여준다. 특히 T.K.E와 평균유동속도는 원주방향으로의 유체의 관성과 분사운동에너지 증가로 인해 계속 증가함을 알 수 있다. 이러한 원주방향으로의 유동으로 인해 연소실 중심부에서의 유동증가의 크기는 상대적으로 작음을 알 수 있다. 또한 전반적으로 혼합기의 분사시 분사구에 가까운 상류측의 윤곽은 선명하지만 하류측이 명확하지 않은데, 이는 하류 측에서는 충진된 기체와 분사된 기체의 혼합이 활발하게 진행되기 때문이다.

4.3 혼합기 분사후 유동현상

Figure 7에서 9는 연소과정에서 계산된 연소실내 가스온도, 연소 반응률과 OH라디칼을 시간별로 이미지화 시킨 것이다. 전반적으로 당량비가 감소하고 초기압력이 증가함에 따라 화염의 크기가 작아짐을 볼 수 있는데, 이는 초기압력의 경우 증가할수록 연소실내 밀도도 증가하여 화염전파속도가 저감되기 때문으로 생각된다. 그림에서 보면 연소가 가장 빠르게 나타나는 조건은 당량비 0.91, 연소실 초기압력 0.15 MPa과 점화시기 300 ms의 경우이다. 점화시기 300 ms가 10000 ms에 경우에 비해 화염이 빨라짐을 볼 수 있는데 이는 스파크 플러그 주변에서 평균속도와 난류강도가 높은 경우로 초기화염의 성장을 촉진시키기 때문이다[8]. 또한 실제 반응속도는 초기화염생성에 의해 결정되기 때문에 시간이 지날수록 그 정도는 더해지고 있다. 점화시기 10000 ms의 경우 화염이 구형으로 전파되는 것과는 다르게 300 ms에서는 화염의 구조가 타원형으로 약간 불균일하다. 이는 분사된 혼합기에 의한 유동으로 유체속도와 난류운동에너지가 생성되고 이러한 유동에 의한 영향인 작은 돌기로 인해 화염표면적이 증가함에 따라 화염의 크기와 함께 연소속도도 증가하게 되는 것으로 생각된다. 결국, 연소가 이러한 유동에 지배적인 영향을 받게 되는 것이다. 연소 반응률을 보면 300 ms의 조건에서 초기화염의 형태가 유동의 영향에 의해 타원형의 형태를 유지하나 시간이 경과하면서 유동이 약화됨에 따라 구형으로 변하는 것을 알 수 있다. 전체적으로 연소에 영향을 미

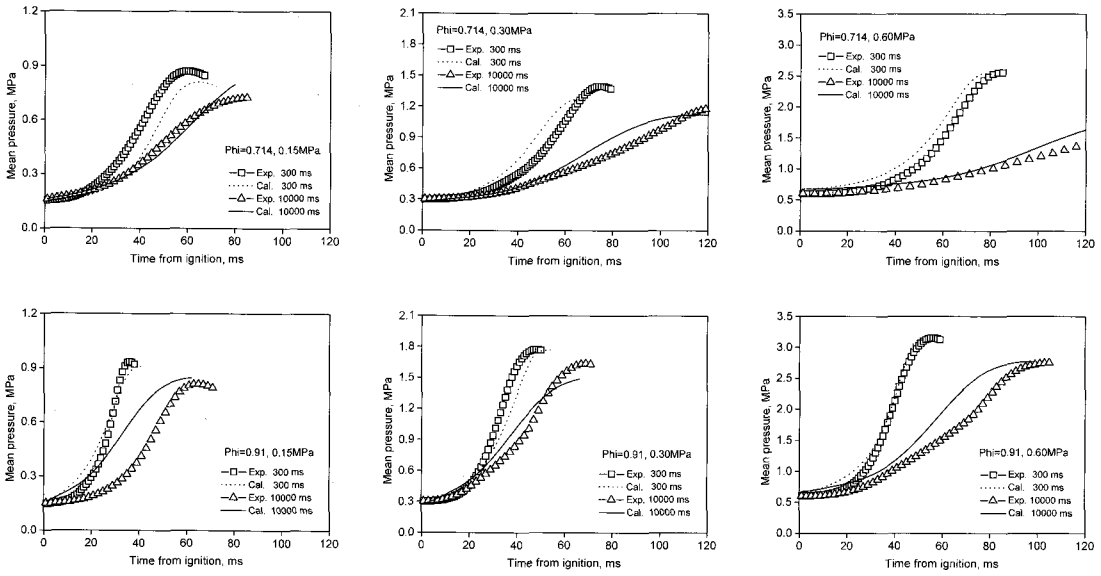
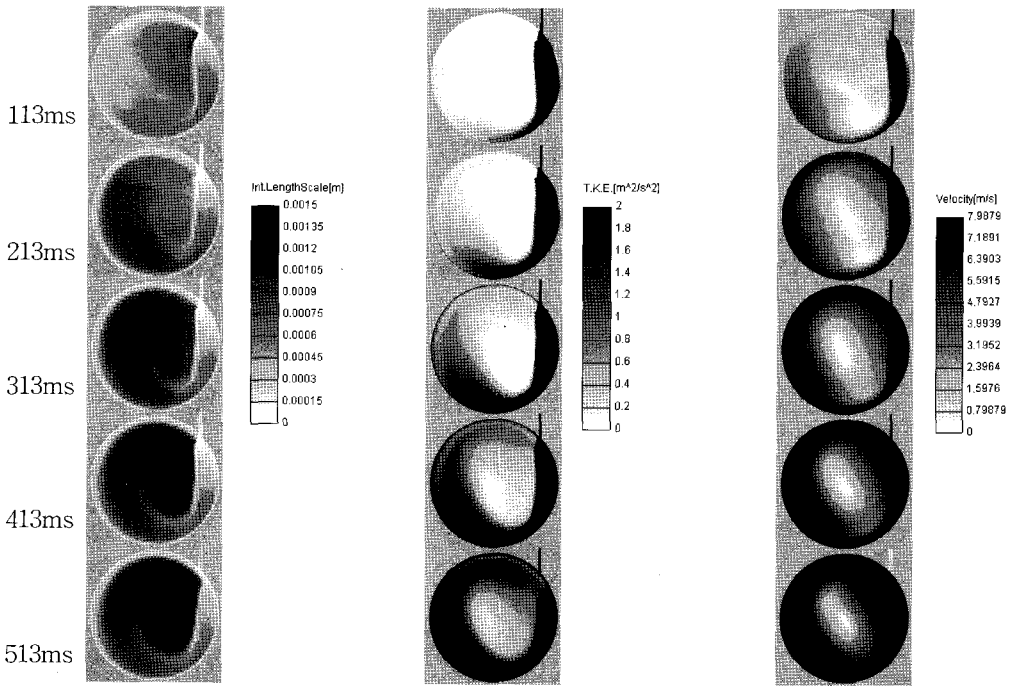


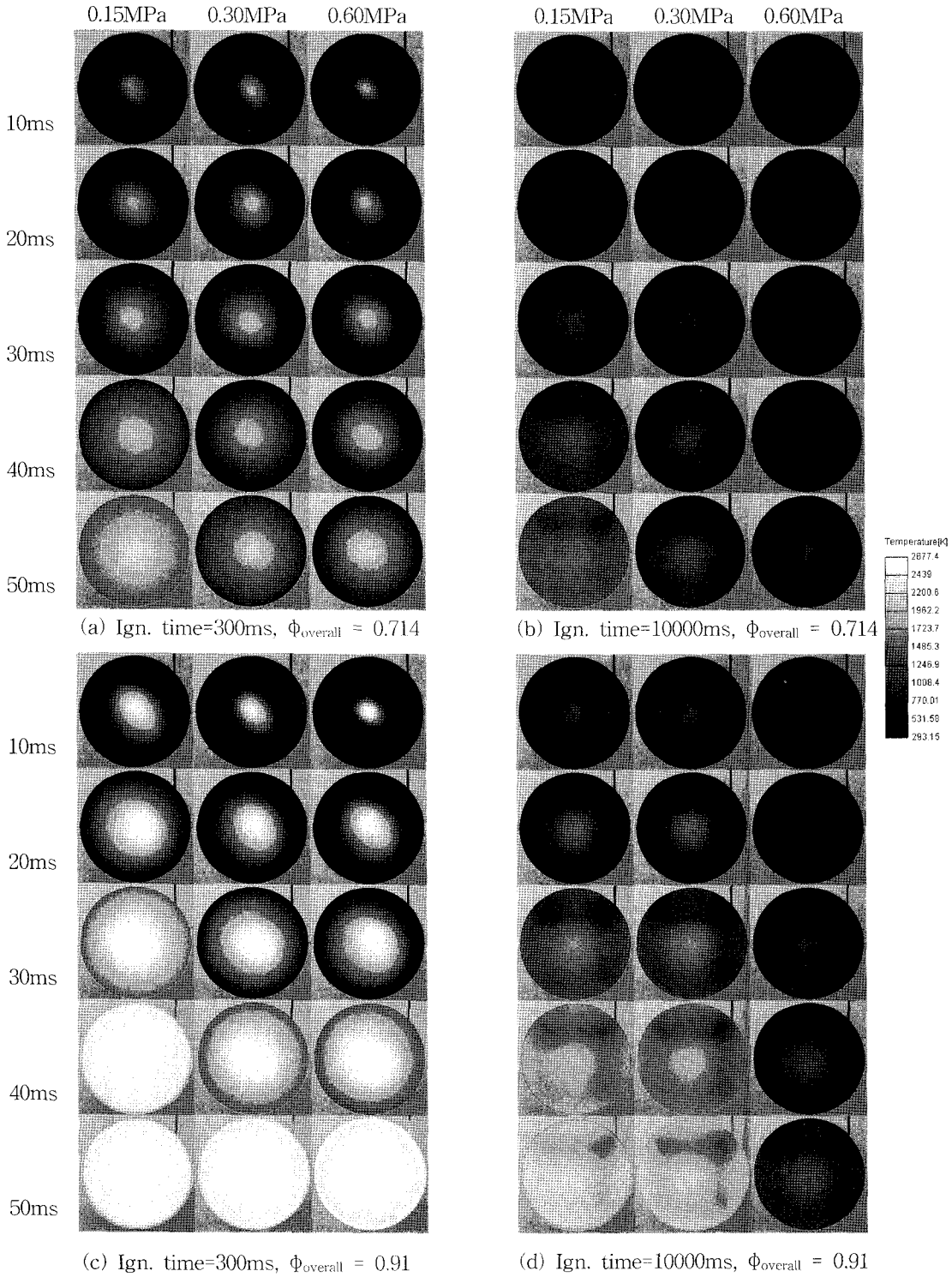
Fig. 5 Comparisons of simulation and experimental results

치는 초기조건의 영향의 크기는 당량비, 점화시기 및 초기압력의 순서로 나타났다. 연소반응은 혼합기가 분해 되면서 발생되는 중간생성물 즉, 라디칼에 의해 지배된다. 라디칼의 생성기구에 관해서 Dyer 와 Crosley의 연구에 의하면 OH라디칼은 상대적으로 긴 수명을 가지고 있기 때



(a) Integral length scale (b) T.K.E. (c) Velocity

Fig. 6 Flow and equivalence ratio characteristics during fuel injection



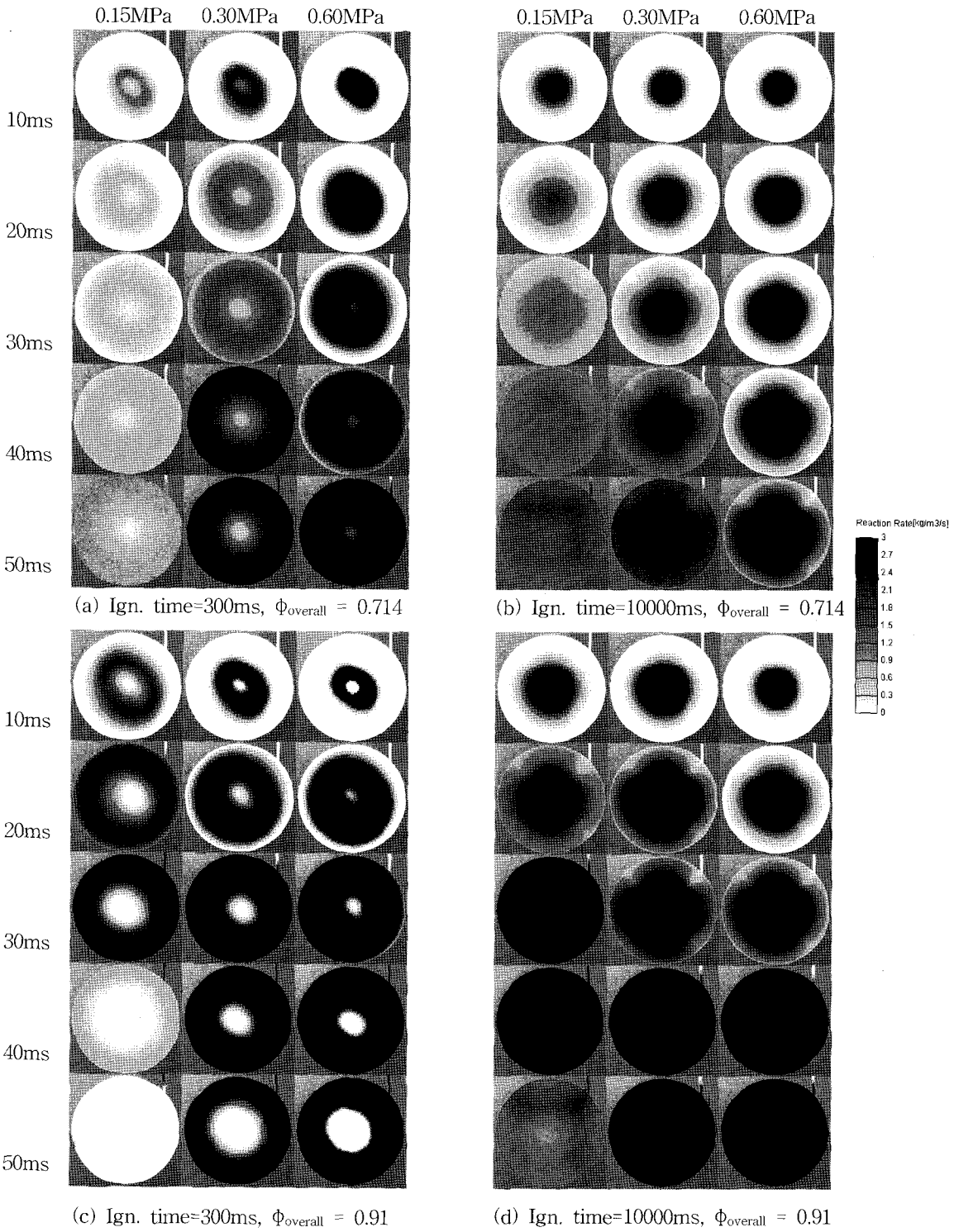
(a) Ign. time=300ms, $\Phi_{overall}$ = 0.714

(b) Ign. time=10000ms, $\Phi_{overall}$ = 0.714

(c) Ign. time=300ms, $\Phi_{overall}$ = 0.91

(d) Ign. time=10000ms, $\Phi_{overall}$ = 0.91

Fig. 7 Temperature characteristics during combustion



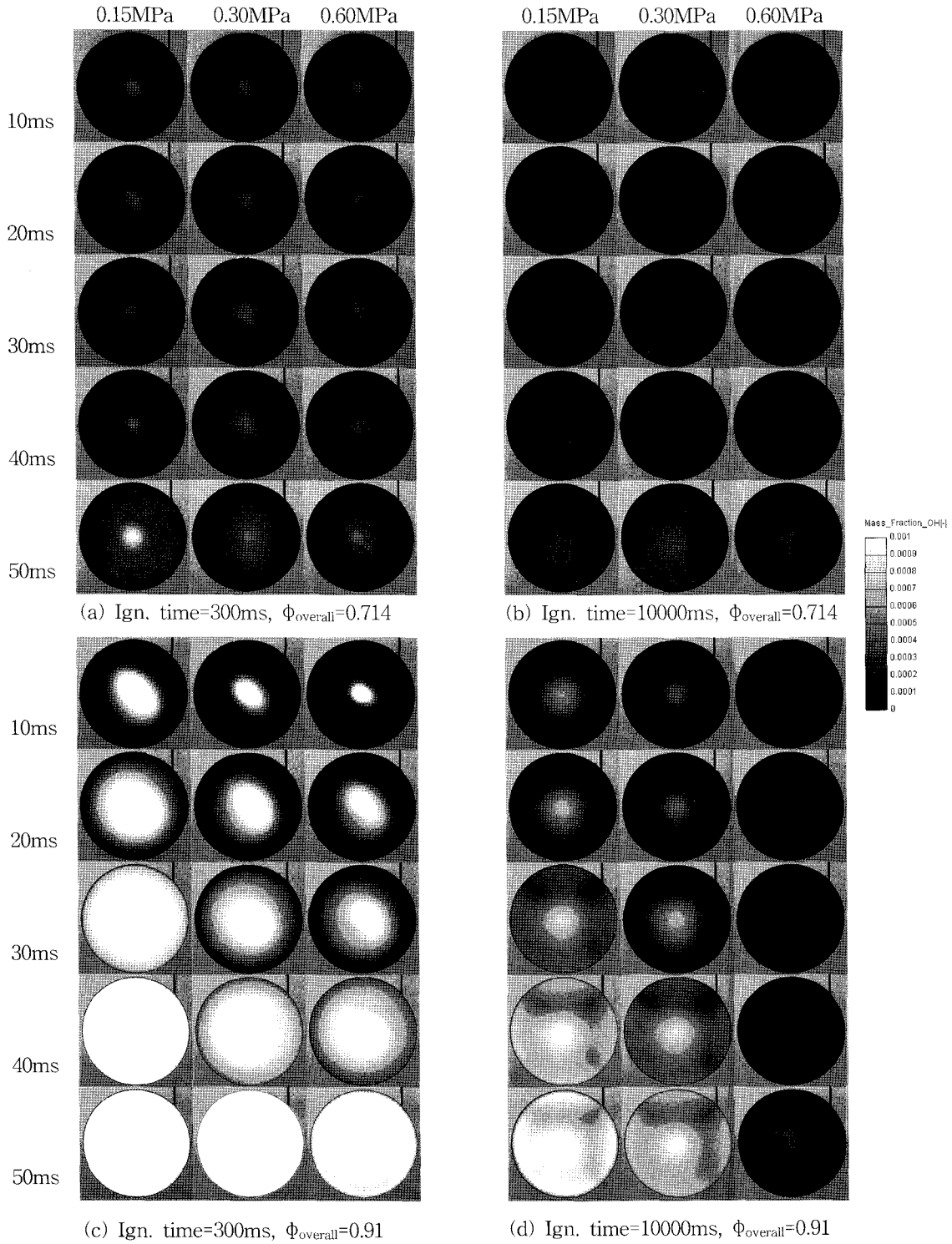
(a) Ign. time=300ms, $\Phi_{overall}$ = 0.714

(b) Ign. time=10000ms, $\Phi_{overall}$ = 0.714

(c) Ign. time=300ms, $\Phi_{overall}$ = 0.91

(d) Ign. time=10000ms, $\Phi_{overall}$ = 0.91

Fig. 8 Reaction rate characteristics during combustion



(a) Ign. time=300ms, $\Phi_{overall}$=0.714 (b) Ign. time=10000ms, $\Phi_{overall}$=0.714

(c) Ign. time=300ms, $\Phi_{overall}$=0.91 (d) Ign. time=10000ms, $\Phi_{overall}$=0.91

Fig. 9 OH radical characteristics during combustion

문에 연소가스 중에 넓게 분포하고 라디칼은 반응에 관한 풍부한 정보를 가지는데 특히 연소반응영역과 연소장내 국소 당량비 분포를 예측하는데 적합하다고 하였다[9]. 이러한 라디칼의 분포가 연소조건과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며 연소기간이 짧을수록 일정시간 내에 존재하는 라디칼의 양이 많아짐을 알 수 있다. 연소실 압력의 증가는 높은 연소실내 온도를 형성시키고 따라서 반응영역에서 라디칼의 농도를 증가시킨다. 이는 평균가스의 온도분포와 비교시 라디칼에 가장 영향을 미치는 변수가 온도임을 알 수 있다. 전반적으로 이론당량비에 근접할수록 OH라디칼이 증가하고, 여기에 점화시기의 영향이 부가됨을 알 수 있으며, Fig. 9를 살펴보면 초기압력 0.15 MPa, 당량비 0.91 및 점화시기 300 ms의 조건에서 가장 OH라디칼의 증가가 큼을 알 수 있다. 여기서, 점화시기의 영향이란 유동에 의한 영향이며, 이러한 유동이 연소에 미치는 영향이 큼을 확인할 수 있다. 이러한 라디칼의 분포는 연소조건과 밀접한 관계가 있으며, 전반적으로 라디칼의 수는 초기압력값과는 반비례 하며, 유동속도와 당량비에는 비례하는 경향을 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 정적연소실내에서 측정된 압력결과를 상용 FIRE code를 사용하여 계산한 결과와 상호 비교하여 계산방법에 대한 신뢰성을 검증하였으며, 여러 가지 조건에서 계산된 결과를 이미지화 시켜 분석하였다. 이러한 분석을 통해 정적 연소실내의 내부유동 및 연소현상에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 점화시기 10000 ms의 경우 화염이 구형으로 전파되는 것과는 다르게 300 ms에서는 화염의 구조가 타원형으로 약간 불균일하다. 이는 분사된 혼합기에 의한 유동으로 유체속도와 난류운동에너지가 생성되고 이러한 유동이 연소에 지배적인 영향을 주었음을 알 수 있다.

2) 전반적으로 당량비가 감소하고 초기압력이 증가함에 따라 화염의 크기가 작아짐을 볼 수 있으며 이러한 결과는 초기압력이 증가할수록 연소실내 밀도가 증가하여 화염전파속도가 저감되기 때문으로 생각된다.

3) 전체적으로 연소속도에 영향을 미치는 초기조건은 초기 압력값과는 반비례 하며, 유동속도와 당량비에는 비례하는 경향을 보인다.

4) 라디칼의 분포가 연소조건과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며, 전반적으로 라디칼은 초기압력과는 반비례 하며, 온도와 당량비에 비례하는 경향을 보이고 연소기간이 짧을수록 일정시간 내에 존재하는 라디칼의 양이 많아짐을 알 수 있다.

참고문헌

[1] Checkel, M. D. and Ting, D. S. K., "Turbulence Effects on Development Turbulent Flame in a Constant Volume Combustion Chamber," SAE Paper 930867, 1993.

[2] Arcoumanis C, Bae C. S., "Corrlation between Spark Ignition Characteristics and Flame Development in a Constant Volume Combustion Chamber," SAE Paper 920413, 1992.

[3] Lefebvre, A. H., gas Turbine Combustion, Taylor and Francis, 1999, pp. 38-39.

[4] Hjima, T. and Takeno, T., "Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity," *Comb. and Flame*, Vol. 65, 1986, pp. 35-43.

[5] The user manual of FIRE software in AVL CFD company, Combustion part, 2004, pp. 3-13~3-17.

[6] Candel, S. and Poinsot, T. "Flame Stretch and the Balence Equation for the Flame Area." *Combust. Sci. and Tech.* 70, 1990, pp.1-15.

[7] Metghalchi, M. and kech, J. C. "Burning Velocities of Mixtures of Air with Methanol Isooctane and Indolene at High Pressure and Temperature," *Combustion and Flame*, 48, 1982. pp.191-210.

[8] Ramos, J. I. and Sirignano, W. A., "Axisymmetric Flow Model with and without Swirl in a Piston-Cylinder Arrangement with Idealized Valve Operation," SAE Paper 800284, 1980.

[9] Croslay, D. R. and Smith, G. P., "Rotational Energy Transfer and LIF Temperature Measurement," *Combustion and Flame*, Vol. 44, 1982, pp. 27-34.