

工學碩士 學位論文

라디칼인젝터를 適用한 定積燃燒機의
燃燒特性에 관한 計算的 研究

Numerical Study on Combustion Charaterestics
in a Constant Volume Combustor
having a Radical Injector

指導教授 朴 權 夏

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

趙 尙 武

趙尙武의 工學碩士 學位論文을 認准함

委員長 崔在星 ㉠

委員 趙權回 ㉠

委員 朴權夏 ㉠

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機械工學科

趙尙武

目 次

ABSTRACT	iii
I. 序論	
1.1 연구배경	1
1.2 연구내용	4
II. 研究方法	
2.1 수학적 모델	6
III. 計算條件	
3.1 반응율상수 변화에 따른 연소특성	9
3.2 부실의 당량비 변화에 따른 연소특성	13
IV. 計算結果 및 考察	
4.1 반응율상수의 영향	16
4.1.1 반응율상수 변화에 따른 연소특성	16
4.1.2 당량비변화에 따른 연소특성	20

4.1.3 온도분포 및 화학종분포	22
4.2 라디칼인젝터가 장착된 연소실	40
4.2.1 실험치와의 비교	40
4.2.2 당량비 변화에 따른 특성	40
4.2.3 연소실내의 온도 분포 특성	40
4.3 라디칼인젝터가 있는 경우와 없는 경우의 비교	45

V. 結論

參考文獻	54
------------	----

ABSTRACT

Numerical Study on Combustion Characteristics
in a Constant Volume Combustor having a Radical Injector

Sang-Moo Jo

Department of Mechanical Engineering, Graduate School
Korea Maritime National University
Busan, Korea

(Supervised by Professor Kweonha Park)

A premixed-compression-ignition engine has been studied to improve the performances of efficiency and exhaust emissions. However those systems have some difficulties for controlling combustion process.

Radical is an activated chemical species formed by a chemical chain reaction between reactant and product. When the chain reactions occur, the energy bond of species is broken easily by the released radical. The combustion chamber of premixed-compression-ignition engine is consist of

a main chamber with lean premixture and a subchamber with rich premixture. Those are connected by narrow cylindrical connections. With ignition start in the subchamber, many different kinds of radical is jetted into the main chamber. The premixed gas in main chamber is quickly burned up by the radical ignition in multi-pionts.

In this thesis, the combustion phenomena in a constant volume combustor having a radical injector are numerically analyzed. The some constants in the reaction rate equation are adjusted by the experimented results tested in the same geometrical chamber. the code is applied on the two combustors in a wide range of equivalence ratio. The results shows that the burning time is much shorter in the combustor having radical injector.

I. 序 論

1.1 연구배경

예혼합압축착화 엔진은 디젤엔진과 가솔린엔진의 단점을 상호 보완하여 저배기, 고효율, 고출력을 동시에 실현하기 위한 궁극적인 수단으로 제안되어, 이미 PREDIC, HCDC, HCCI, ATAC 등의 이름으로 연구가 활발히 진행되고 있다^{1)~4)}. 그러나, 이러한 시스템의 대부분은 출력제어를 위한 당량비의 가변 폭이 좁고 착화시기의 제어가 곤란하기 때문에 쉽게 실용화되지 못하고 있다.

이에 따라, 폭 넓은 엔진의 작동영역에서 희박혼합기의 연소안정성 및 착화시기의 재현성을 확보하기 위해 라디칼인젝터를 장착한 예혼합압축착화엔진이 제시되고 있다. 예혼합압축착화엔진은 연소실에 도입한 초희박혼합기에 다량의 라디칼을 순간적으로 공급하고 다점자기착화를 유발하여 급속연소를 실현함으로써, 열효율이 높고 유해배출물이 저감되며, 정밀한 착화시기의 제어에 의해 사이클 변동이 매우 낮은 것으로 보고되고 있다. 그러나, 이 엔진에서의 라디칼인젝터는 라디칼의 생성 및 분출을 고려하는 화학적, 열·유체역학적인 측면이 충분히 고려되지 못하고 있다.

라디칼은 반응물과 생성물의 중간에서 생성되는 활성화학종(중간활성매체)으로서 CH계 연료의 연소반응에서는 CH, OH, H, C₂ 등이 알려져 있다. 이들은 예혼합연소에서 반응의 방아쇠와 같은 역할로 다음의 화학반응을 일으켜 무수한 연쇄반응이 유발되며, 이때 에너지 평형상태에 있던 화학종들이 반응 에너지에 의해 여기되며 에너지 준위를 깨고 순간적으로 평형상태를 벗어난다고 알려져 있다^{1),2)}. 연소실에 도입된 예혼합기에 다량의 라디칼을 광범위한 영

역에 걸쳐 순간적으로 공급하여 예혼합기의 동시다점착화를 유발함으로써, 당량비의 가변 폭이 넓으며 착화시기를 임의로 제어할 수 있다. 예혼합압축착화엔진의 연소실 형상은 부실을 가진 디젤엔진과 흡사하나, 연료공급법, 부실의 구성부품과 연소개념에서 많은 차이를 보인다. 즉, 희박 예혼합기가 채워진 주실에 라디칼을 분출하는 라디칼인젝터는 다수의 연락공을 가진 미소한 체적의 챔버로서, 여기에 주실과는 별도로 과농의 예혼합기를 형성하고 이를 스파크플러그로써 점화시키게 된다. 점화후의 연소가스는 엔탈피가 높은 기연가스와 다양한 종류의 라디칼을 포함하여 주실로 분출되고, 미리 도입된 주실의 예혼합기는 다점자기착화를 유발하게 된다. 예혼합압축착화엔진의 개념도는 Fig.1.1 과 같다. 이는 라디칼인젝터가 장착된 엔진의 연소실을 개략적으로 나타낸 것이다. 각 그림을 순차적으로 설명하면 먼저, 흡기행정시에 희박한 예혼합기가 흡기관을 통하여 연소실로 유입된다. 다음으로, 압축행정의 말기에 라디칼인젝터 내부에 과농의 예혼합기를 형성시키고, 스파크플러그로써 점화하여 라디칼이 포함된 기연 및 미연가스를 연소실에 분사한다. 마지막으로, 예혼합기에 다점자기착화를 유발하여 연소를 시작한다.

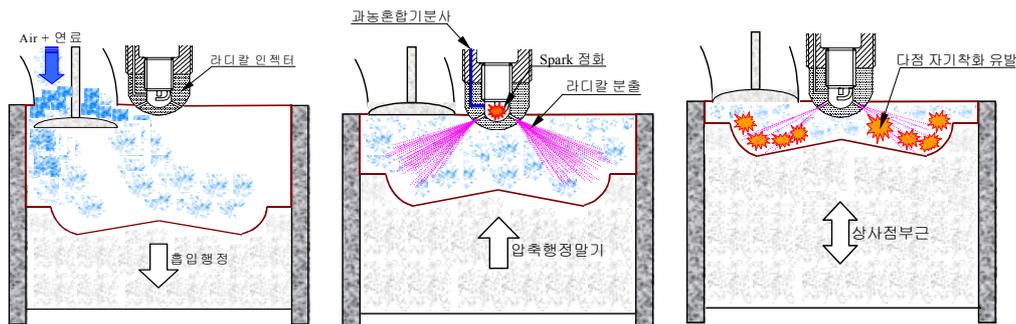


Fig. 1.1 Combustion process in premixed self-ignition engine having radical injector

상술한 엔진의 연구를 위하여 라디칼인젝터로부터 생성·분출되는 라디칼의 열·유체공학적 측면을 수치해석적 방법을 통하여, 라디칼인젝터가 장착된 정적연소기의 연소특성을 해석하는 것이 필요하다.

내연기관에서 수치해석연구는 엔진 내부 유동 및 연소 현상의 이해와 해석, 연소실 내 현상에 대한 물리적 모델의 개발과 검증^{5),6)}을 중심으로 이루어지며, 수치해석 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 각 요소 모델에 대한 다양한 실험 결과와의 검증 작업이 요구된다^{7),8),9)}. 최근에는 컴퓨터의 발전과 연소실내의 유동분무연소현상에 대한 이해가 높아지면서 다차원 코드가 널리 이용되고 있다. 다차원 코드는 기존의 code에 경험적으로 알게된 사실을 모델링하여 실제 현상을 정확하게 예측할 수 있도록 하고 있다. 이러한 다차원계산은 Wakins가 1973년에 최초로 수행하였다¹⁰⁾. Diwakar는 KIVA코드를 이용하여 실린더를 3차원적으로 해석하고 자신의 CONCHAS 코드를 이용하여 2차원으로 해석한 이전의 해석결과와 비교하여 경향이 전반적으로 일치함을 보였고¹¹⁾, Kong은 KIVA code를 이용하여 흡기 계통까지 포함시켜 실린더 내 유동을 계산하고 이를 LDV(laser doppler velocimetry)에 의한 계측 결과와 비교하여 그 결과가 유사함을 증명하였다¹²⁾.

다차원 모델을 이용한 컴퓨터 코드는 직접 개발하기가 어렵기 때문에 많은 연구자들이 기존에 개발된 code를 이용하고 있으며, 이 code들 중 KIVA는 미국국립연구소인 Los Alamos 연구소에서 개발되어 계속 발전되고 있는 연소실에서 화학반응 및 연료분무를 포함한 엔진성능해석용 프로그램이다. 라디칼 연소실의 연소해석은 KIVA code에 기반을 두고 있으며, 실제로 KIVA code는 내부연소 엔진해석에 많이 쓰이며 그 외 다양한 버너, 분젠버너화염, 무반

응분무 등 많은 연구에 사용되었다^{13),14)}.

1.2 연구내용

본 연구에서는 라디칼 인젝터를 장착한 엔진의 연소실을 모사한 정적연소기에서의 연소현상을 해석하고 이를 동일한ジオ메트리에서 실험한 결과와 비교하여, 본 계산에 적합한 계산상수들을 제시하고 연소특성을 상세히 분석하고자 한다.

일반적으로 연소모델은 충분한 반응시간으로 평형상태를 유지할 경우에는 평형모델(equilibrium model)을 쓰고, 반응이 비교적 느리게 진행되어 주어진 시간 간격으로 반응 진행 과정의 추적이 필요한 경우에는 Arrhenius 형태의 비평형모델(kinetic model)을 적용한다. 이중 Arrhenius 형태의 비평형모델에서 사용되는 activation energy, pre-exponential factor 등의 값은 경험상수로 화학반응기간 및 점화시작점에 큰 영향을 미치게 된다. 이 값들은 엔진 및 연소실의 형상과 특성에 따라 그 값이 크게 변화하며, 많은 연구에서 여러 가지 상수값을 제안하고 있다^{15),16)}.

본 연구는 Arrhenius 형태의 비평형모델(kinetic model)에서 경험값으로 사용되는 activation energy, pre-exponential factor의 값을 다양하게 적용하여 계산을 수행한후, 실험결과와 비교하여 실험결과에 가장 접근하는 값을 선정하여 당량비 변화에 따른 정적연소기의 연소특성을 해석하였다.

상술한 해석결과를 기반으로 라디칼인젝터가 장착된 연소실의 연소특성을 해석한다. 라디칼인젝터가 장착된 연소실은 연료가 희박한 상태로 분포되어있는 주실과 주실보다 농후한 상태의 부실이 작은 연락공으로 연결되어있으며, 부실에서 점화를 일으킨다. 본 연구에서는 주실의 당량비를 변화시켜 연소시

의 연소유동, 압력과 온도변화, 각종 화학종들의 거동등을 시간의 경과에 따라 상세하게 분석하고자 한다.

II. 研究方法

2.1 수학적 모델

화학 반응 및 연료분무를 포함한 연소해석에서 전달방정식은 다음과 같이 모델링된다.

화학종 m 에 대한 질량보존방정식은,

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}) = \dot{\rho}^s \quad (1)$$

여기에서 ρ_m , ρ 는 각각 화학종 m 과 전체밀도, \mathbf{u} 는 유속, D 는 확산계수를 나타낸다.

모멘텀보존식은,

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p - A_0 \nabla(2/3 \rho k) + \nabla \cdot \sigma + F^s + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

여기서, p 는 유체의 압력이며 σ 는 점성전단응력으로 다음과 같이 Newtonian 형식으로 쓴다.

$$\sigma = \mu[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] - \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \quad (3)$$

에너지방정식은

$$\frac{\partial(\rho D)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} D) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{J} + \rho \varepsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s \quad (4)$$

이며, \mathbf{J} 는 단위내부에너지이고, 열 유속 \mathbf{J} 는

$$\mathbf{J} = -K \nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla(\rho_m / \rho) \quad (5)$$

으로 나타낸다.

$k-\varepsilon$ 모델에 대하여, 난류운동에너지(k)에 관한 보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = -\frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} + \sigma : \nabla \mathbf{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{\text{Pr}_k} \right) \nabla k \right] - \rho \varepsilon + \bar{W}^s \quad (6)$$

그리고 난류운동에너지소산율 ϵ 에 관한 보존식은,

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \epsilon) = -\left(\frac{2}{3} C_1 - C_3\right) \rho \epsilon \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{\text{Pr}_\epsilon}\right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} \left[C_1 \sigma : \nabla - C_2 \rho \epsilon + C_s \bar{W}^s \right] \quad (7)$$

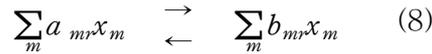
으로 표시된다.

$k-\epsilon$ 난류모델에서 사용한 상수값들은 다음과 같다.

Table 2.1 Values of the turbulence model constants

C_μ	C_1	C_2	C_3	Pr_k	Pr_ϵ	C_s
0.09	1.44	1.92	-1.0	1.0	1.3	1.5

계에서 일어나는 화학반응은



으로 나타낼 수 있으며, x_m 은 화학종 m 의 1몰을 나타내며 a_{mr} 과 b_{mr} 은 r 번째 화학반응에서의 총괄양론계수이다.

임의의 화학반응 r 이 진행하는데 소요된 시간을 고려한 반응률의 식은,

$$\dot{w}_r = k_{fr} \prod_m (\rho_m / W_m)^{a'_{mr}} - k_{br} \prod_m (\rho_m / W_m)^{b'_{mr}} \quad (9)$$

전진반응과 역반응의 계수 k_{fr} 과 k_{br} 은 온도의 함수인 Arrhenius의 형식으로 다음과 같이 표현된다.

$$k_{fr} = A_{fr} T^{\zeta_{fr}} \exp\{-E_{fr}/T\}$$

$$k_{br} = A_{br} T^{\zeta_{br}} \exp\{-E_{br}/T\} \quad (10)$$

이상의 식에서 반응차수인 a'_{mr} , b'_{mr} , 실험 data에 의한 상수 A_{fr} , A_{br} , ζ_{fr} , ζ_{br} , E_{fr} , E_{br} 는 각각의 반응에 대해 실험적으로 제시되는 값을 사용한다.

화학종의 연속방정식에서 chemical source term은 (9)식에 의하여 구하여진 반응율 \dot{w}_r 에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{\rho}_m^c = W_m \sum_r (b_{mr} - a_{mr}) \dot{w}_r \quad (11)$$

화학반응에 의해 발생하는 열은

$$\dot{Q}^c = \sum_r Q_r \dot{w}_r \quad (12)$$

이며 여기서 Q_r 은 표준온도에서의 발열량의 값이다.

$$Q_r = \sum_m (a_{mr} - b_{mr}) (\Delta h_f^0)_m \quad (13)$$

$(\Delta h_f^0)_m$ 은 화학종 m 의 표준온도에서의 생성열이다.

공기의 점성은 Sutherland의 식

$$\mu_{air} = \frac{A_1 T^{3/2}}{T + A_2} \quad (14)$$

으로 나타내며, A_1, A_2 는 상수이다.

점성은 확산도를 고려하여

$$\mu = \rho \nu_0 + \mu_{air} \quad (15)$$

이며 ν_0 는 표준상태 동점성으로서 입력치이다.

D 는 Fick's Law에서의 물질확산계수로서, $\mu/\rho Sc$ 로 구해지며, Sc 는 Schmidt수로서 0.11로 주어지며, 운동량확산 대 질량확산의 비를 나타낸다.

점성의 두 번째 계수 λ 는

$$\lambda = A_3 \mu$$

로 구하여지며, A_3 는 실험상수이다.

Ⅲ. 計算條件

계산격자의 생성은 결과의 정확도를 결정하는 중요한 요인 중의 하나이다. 컴퓨터의 처리능력이 크게 향상되어 계산시간은 크게 단축된 반면 형상은 더욱 복잡해져 격자생성에 많은 시간이 소요되며, 특히 3차원 형상의 경우 실질적인 해석과정에서 가장 시간이 많이 소요되는 부분이다. 형상 적응력이 우수하고 격자 분포의 임의적인 안배가 가능한 비정렬 격자를 사용하는 유한 요소법 등에 기초한 코드들도 많이 개발되고 있으나, 연소를 포함한 다양한 물리현상을 모사하는 데에는 아직 부족한점이 많은 것으로 알려져있다. 이러한 3차원 격자 생성과 test작업은 실제 연구에서 많은 시간과 노력이 투자되는 부분이며, 알려져 있는 바와 같이 수치 해석에 있어서 격자의 질은 계산에 결정적인 영향을 미칠 수 있으므로 많은 경험이 요구되는 부분이다.

3.1 반응률상수 변화에 따른 연소특성

연소시 사용되는 모델중 Arrhenius 형태의 비평형모델(kinetic model)은 다음과 같다.

$$w_f = A\rho^2 Y_f Y_0 \exp\left(-\frac{E}{T}\right)$$

이식에서 A와 E는 반응률상수로 각각, pre-exponential factor와 activation energy이다. 이 값들은 경험상수로 화학반응기간 및 점화시작점에 큰 영향을 미치며, 엔진 및 연소실의 특성에 따라 다른값을 가지게 된다. 많은 연구에서 서로 다른 E값을 제안하고 있다. n-heptan의 연료를 사용할 경우 Nishida¹⁵⁾는

E=12000을 제시하였고, Gosman¹⁶⁾은 E=20143을 사용했으며, KIVA code에서는 E=15780을 제안하였으나 사용자가 임의의 값을 넣을수 있도록 하고 있다. 본 연구에서는 실험값에 근접하는 A와 E값을 얻기 위해 상기 제시된 값을 중심으로 5가지의 값을 적용하여 계산을 수행하며, 실험값에 근접한 A와 E값을 적용하여 라디칼유도에 의한 연소계산을 수행하여 결과치를 실험값과 비교했다.

Fig. 3.1과 Fig. 3.2는 계산을 수행하기 위한 생성한 격자를 보여준다. 실험 결과와 비교하기 위해 라디칼유도분출에 의한 연소를 위한 계산격자와 부실을 제거한 경우의 격자를 생성했다. 주실과 부실의 체적을 실험과 같이 했다. 계산에 사용된 연료도 역시 실험과 같이 n-heptan(C_7H_{16})이며, 초기압력 및 초기 온도 역시 실험조건과 동일한 403K와 0.5MPa이다. 먼저 부실이 없는 경우 반응상수를 변화시키며 다양한 당량비(0.6~1.3)에서 계산을 수행하였으며, 이 계산에서 가장 좋은 결과를 보이는 반응상수를 적용하여 부실이 있는 경우에 당량비를 변화시키며 계산을 수행하였다. Table 3.1과 Table 3.2은 각각 계산조건과 변화시킨 반응계수의 값을 보여준다.

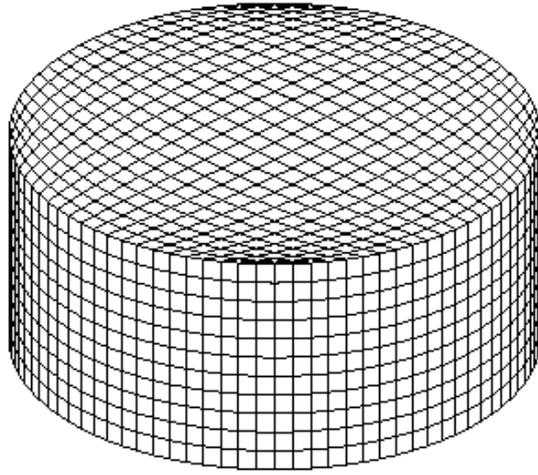


Fig. 3.1 Calculation grids of SI-chamber

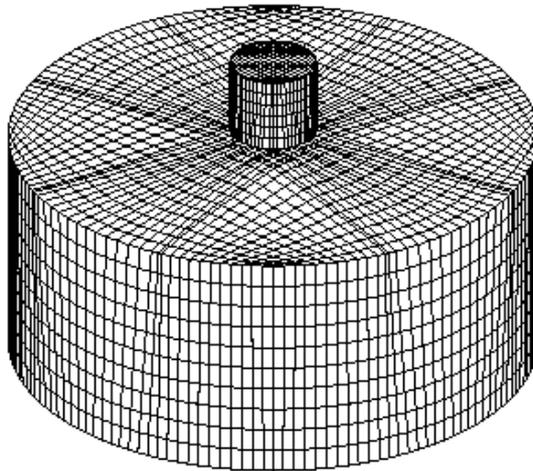


Fig. 3.2 Calculation grids of RI-Chamber

Table 3.1 Calculation conditions

Initial pressure		0.5MPa
Fuel		n-Heptan
Equivalence ratio		$\Phi=0.6\sim 1.3$
Volume	Main chamber	476cc
	Sub chamber	3cc

Table 3.2 Values of Reaction rate factor

	A	E
Case 1	3.1×10^{11}	16500
Case 2	3.1×10^{11}	20000
Case 3	3.1×10^{11}	17500
Case 4	2.5×10^{11}	17500
Case 5	5.1×10^{11}	17500

3.2 부실의 당량비 변화에 따른 연소특성

먼저 반응률상수 변화에 따른 연소특성을 실험결과와 비교하여 가장 적절한 값을 선정하여, 라디칼 인젝터를 장착한 연소실의 계산수행에 적용하였다.

Fig. 3.3 과 Fig. 3.4는 계산격자의 3차원형상과 그 단면을 보여준다. 대상이 되는 정적 연소기는 3cc체적의 부실과 616cc체적의 주실이 연락공으로 연결하고 있으며, 연락공의 윗면에 분사노즐과 점화플러그가 위치하고 있다. 연료는 n-Heptan을 사용하며, 부실의 당량비는 2.5로 매우 농후하다. 주실의 당량비는 1.0, 0.7, 0.5, 0.3으로 변화를 주어 계산을 수행하게 되며, 부실에서의 연료 분사기간은 1.5, 2.0, 2.5ms로 변화된다. 각 분사기간에 따른 분사량의 차이는 없다. 연락공의 수가 2개일 경우와 4개일 경우로 나누어 계산을 수행하며, 각각의 경우 계산 조건은 동일하다. 연락공이 2개인 경우 홀의 직경은 1.2mm이고, 연락공이 4개인 경우 홀의 직경은 0.8mm으로 하여 총 단면적의 합은 실험장치와 동일하게 하였다.

Table 3.3은 계산 조건을 보여준다.

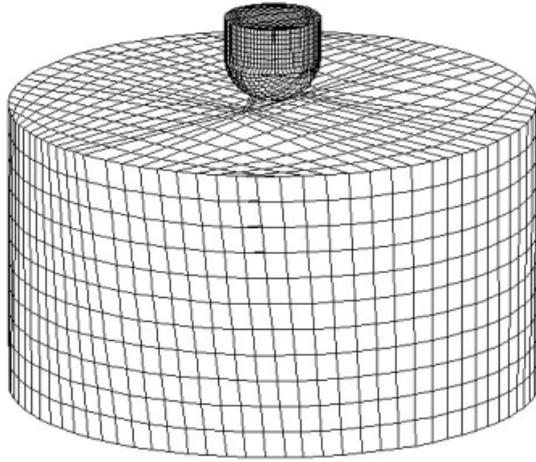


Fig. 3.3 Calculation grids in 3-D view

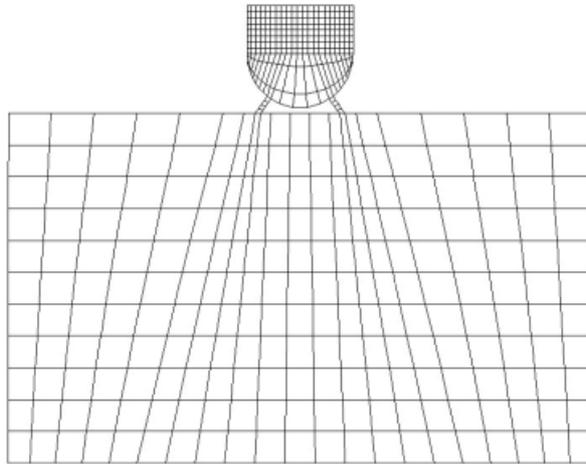


Fig. 3.4 Slice grids

Table 3.3 Specification of combustion chamber

Items	2 holes	4 holes
Fuel	n-Heptan	
Initial gas pressure (MPa)	2kgf/cm ²	
Hole dia. (mm)	1.2	0.8
Equi. ratio of main-chamber	1.0, 0.7, 0.5, 0.3	
Equi. ratio of sub-chamber	2.5	

IV. 計算結果 및 考察

4.1. 반응율상수의 영향

4.1.1 반응율상수 변화에 따른 연소특성

Fig. 4.1과 Fig. 4.2는 당량비가 0.8, 1.0에서 반응율계수 A와 E를 Table 3과 같이 변화시킬때 시간에 따른 연소실내의 압력을 실험치와 비교한 것이다. Pre-exponential factor A는 반응율과 비례하는 상수로 이 값이 커지면 연소기간이 짧아지고, 이 값이 작아지면 연소기간이 길어지는 경향을 보인다. E값은 활성화 에너지로 연소가 시작되기 위해서 필요한 최소한의 에너지량을 나타내며 이 값이 커지면 연소가 시작되는 시기가 늦추어지고, 이 값이 작아지면 연소가 시작되는 시기가 빨라지는 경향을 보인다.

Case1과 Case2는 A값이 3.1×10^{11} 이고, E값을 각각 16500, 20000으로 변경한 경우이다. 당량비 0.8에서 Case1의 경우 연소실내의 압력은 10ms부근에서 상승하기 시작하여 40ms부근에서 3000kPa까지 빠르게 상승하며, 그이후 서서히 감소하게 된다. 당량비 0.8에서 Case2의 경우 연소실내의 압력은 Case1의 경우보다 매우 느린 150ms부근 이후에서 서서히 상승하기 시작한다. 당량비 1.0에서 Case1의 경우 연소실내의 압력은 10ms이전에서 상승하기 시작하여 25ms부근에서 3500kPa까지 빠르게 상승하며, 그이후 서서히 감소하게 된다. 당량비 1.0에서 Case2의 경우 연소실내의 압력은 Case1의 경우보다 느린 75ms부근에서 상승하기 시작한다. Case1에서 Case2로 E값이 1650에서 20000으로 커짐에 따라 연소시작점이 당량비 0.8의 경우 140ms이상, 당량비 1.0의 경우 50ms이상 늦추어 짐을 알 수 있다. Case4와 Case5는 E값은 17500으로 동일하게 하고, A값을 각각 2.5×10^{11} , 5.1×10^{11} 으로 변경한 경우이다. 당량비

0.8에서 Case4의 경우 연소실내의 압력은 25ms부근에서 상승하기 시작하여 110ms부근에서 3000kPa까지 빠르게 상승하며, 그이후 서서히 감소하게 된다. 당량비 0.8에서 Case5의 경우 연소실내의 압력은 Case4의 경우와 비슷한 25ms부근에서 상승하기 시작하여 65ms까지 상승한뒤 서서히 감소하게된다. 당량비 1.0에서 Case4의 경우 연소실내의 압력은 10ms부근에서 상승하기 시작하여 40ms부근에서 3500kPa까지 빠르게 상승하며, 그이후 서서히 감소하게 된다. 당량비 1.0에서 Case5의 경우 연소실내의 압력은 Case4의 경우와 비슷한 10ms부근에서 상승하기 시작하여 25ms까지 상승한뒤 서서히 감소하게된다. Case4에서 Case5로 A값이 2.5×10^{11} 에서 5.1×10^{11} 로 커짐에 따라 압력상승이 빠르게 나타나며, 연소기간이 짧아짐을 알 수 있다.

Case3인 경우 당량비가 0.8일 때 25ms부근에서 압력이 상승하기 시작하여 85ms까지 상승한뒤 서서히 감소하게 되고, 당량비가 1.0일 때 10ms부근에서 압력이 상승하기 시작하여 40ms부근까지 상승한뒤 서서히 감소하게 된다. 이는 당량비가 0.8인 경우 Case3($A=3.1 \times 10^{11}$, $E=17500$)에서 실험치와 유사한 결과를 보이며, 이 값은 당량비가 1.0일때에도 실험결과를 잘 모사하고 있다.

Fig. 4.3과 Fig. 4.4는 당량비 0.8과 1.0에서 시간의 경과에 따른 온도를 나타내는 그림이며, 압력의 변화와 유사한 경향을 보이며 온도 역시 Case3이 실험 값에 가장 근접하고 있다.

Table 4.1 Test cases

	A	E
Case 1	3.1×10^{11}	16500
Case 2	3.1×10^{11}	20000
Case 3	3.1×10^{11}	17500
Case 4	2.5×10^{11}	17500
Case 5	5.1×10^{11}	17500

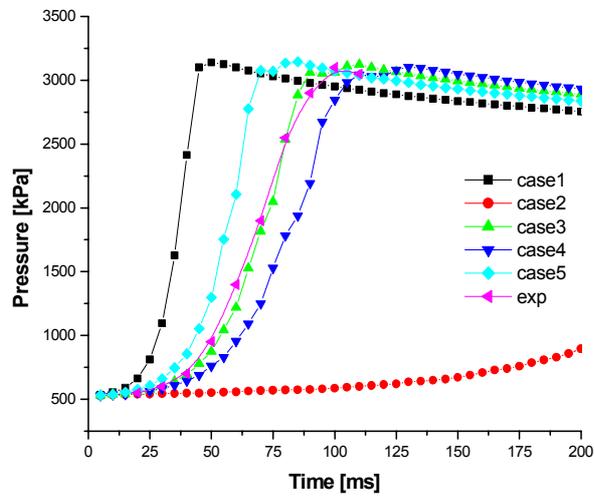


Fig. 4.1 Pressure about changing reaction rate constants ($\phi=0.8$)

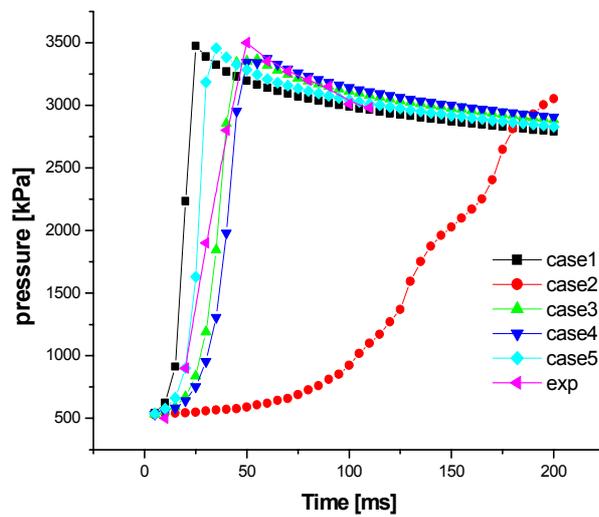


Fig. 4.2 Pressure about changing reaction rate constants ($\phi=1.0$)

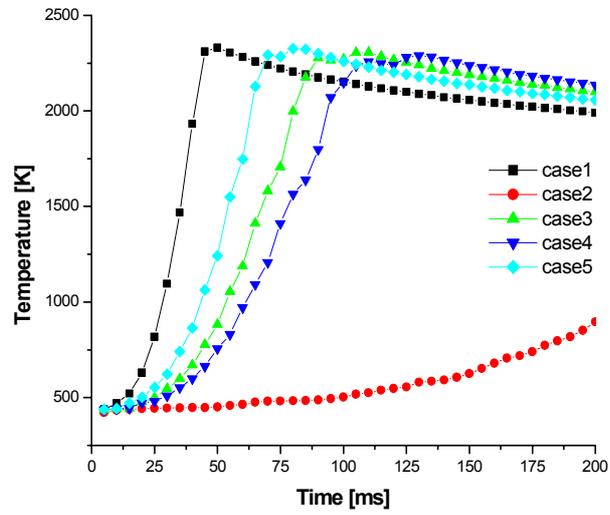


Fig. 4.3 Temperature about changing reaction rate constants ($\phi=0.8$)

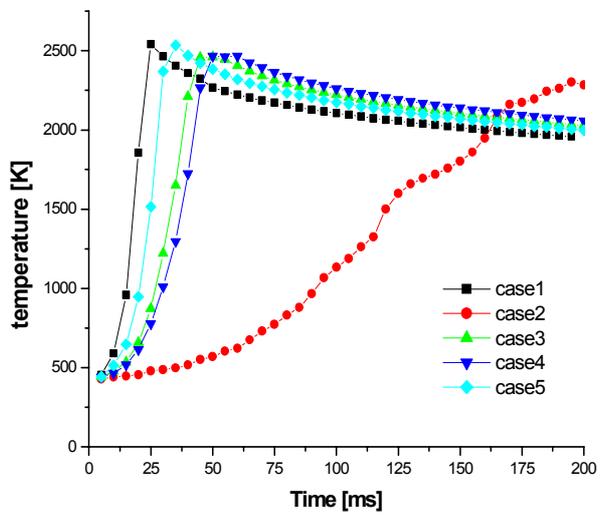


Fig. 4.4 Temperature about changing reaction rate constants ($\phi=1.0$)

4.1.2 당량비변화에 따른 연소특성

Fig. 4.5와 Fig. 4.6은 반응률상수가 실험치와 유사한 결과를 나타내는 Case3을 적용하여 당량비 변화에 따른 압력과 온도를 시간의 경과에 따라 나타내주는 그림이다.

당량비 1.0의 경우 10ms에서 원활하게 연소가 시작되며 20ms에서 연소지연기간을 가진후 활발한 연소가 진행되어 3400kPa까지 급격히 압력이 상승하며 그 기간은 25ms 정도이다. 연소가 완료된 후 열전달에 의하여 압력이 점차 낮아지고 있다. 당량비가 증가하여 1.2로 약간 농후해지면 연소가 시작되는 지점은 당량비 1.0일 때와 비슷한 10ms에서 시작되며 연소지연기간과 연소기간역시 당량비 1.0인 경우와 유사한 양상을 나타내나 최고압력은 3500kPa로 당량비 1.0일 때 보다 약간 높아진다. 하지만 당량비가 더 농후해져 1.25가 되면 오히려 최고압력은 약간 낮아지게 되고, 당량비가 1.3인경우는 연소가 일어나지 않았다. 당량비를 약간 낮추어 0.8로 약간 희박하게 하면 당량비 1.0일 때 보다 느린 25ms에서 연소가 시작되며 40ms까지 점화지연기간을 가진 뒤 활발하게 연소가 진행되어 3000kPa까지 압력이 상승한다. 연소기간은 45ms정도로 당량비 1.0일 때에 비해 많이 길어진다. 당량비가 0.7로 더욱 희박해지면 45ms에서 연소가 시작되며 연소기간은 더욱 느려져 150ms가 되어야 연소가 완료된다. 최고압력 역시 더 낮아져 2800kPa정도가 된다. 당량비가 0.6으로 매우 희박해지면 연소는 100ms부근에서 매우 느리게 진행되며 연소가 원활히 이루어지지 않는 것으로 보인다.

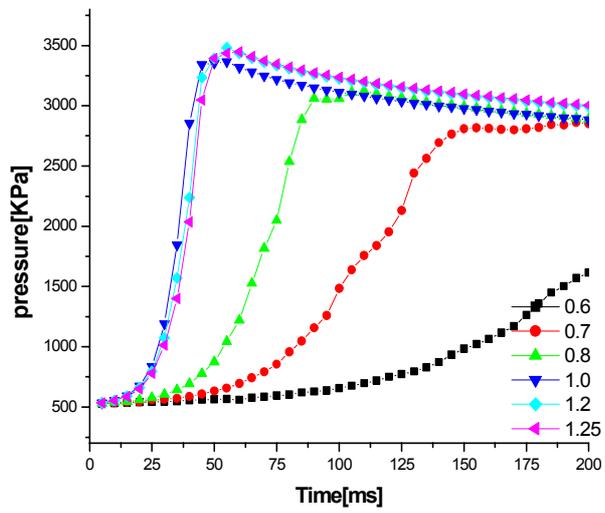


Fig. 4.5 Pressure about changing equivalence ratio

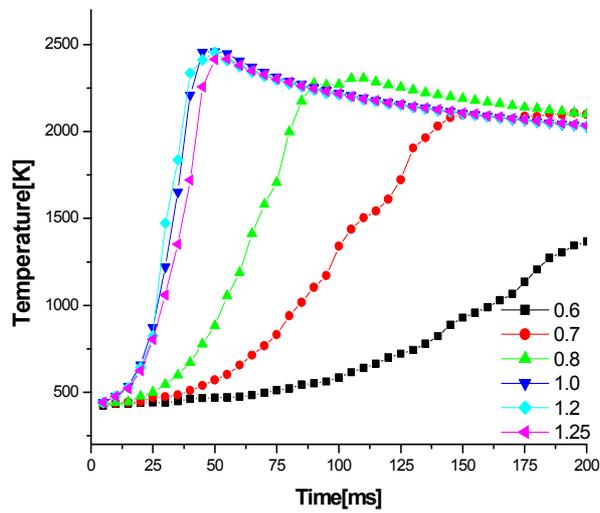


Fig. 4.6 Temperature about changing equivalence ratio

4.1.3 온도분포 및 화학종분포

Fig. 4.7과 Fig. 4.8은 당량비 0.8과 1.0에서 시간에 따른 압력 및 온도와 화학종의 변화를 보여주는 그림이다. 가로축은 시간이며, 왼쪽의 세로축은 압력 [kPa]과 온도[K]를 나타내고, 오른쪽의 세로축은 각 화학종의 몰농도 값이다. 당량비 0.8인 경우 압력과 온도는 약 30ms부근에서 상승하기 시작하여 90ms 부근까지 상승하며, 압력과 온도가 상승함에 따라 산소는 줄어들고 CO₂, H₂O, NO등은 많아지게 된다. 당량비 1.0의 경우 압력과 온도가 10ms부근에서 상승하기 시작하며, 20ms부터 40ms까지 급격히 상승하여 50ms 부근에서 최고치를 나타내고 있다. 당량비 1.0의 경우가 0.8의 경우보다 연소가 빨리 시작되며, 그 속도 역시 매우 빠른 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.9~4.24는 연소실 전체의 온도 및 화학종의 분포를 시간의 경과에 따라 물분류로 나타낸 것이다.

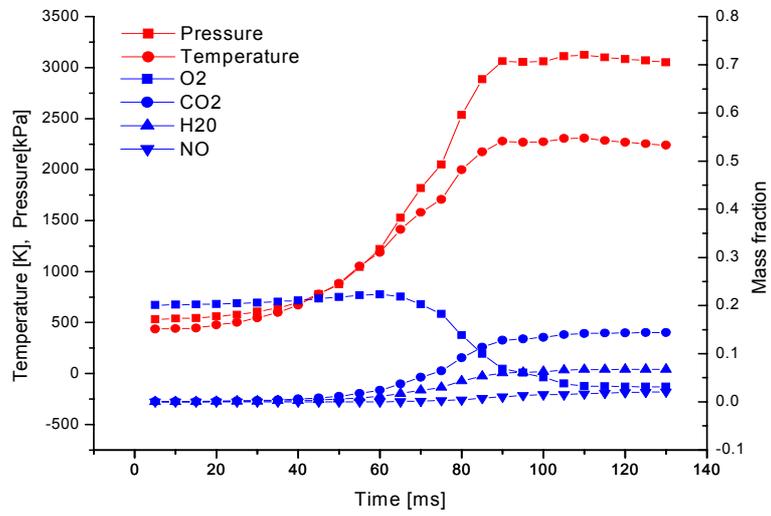


Fig. 4.7 Species at $\phi=0.8$

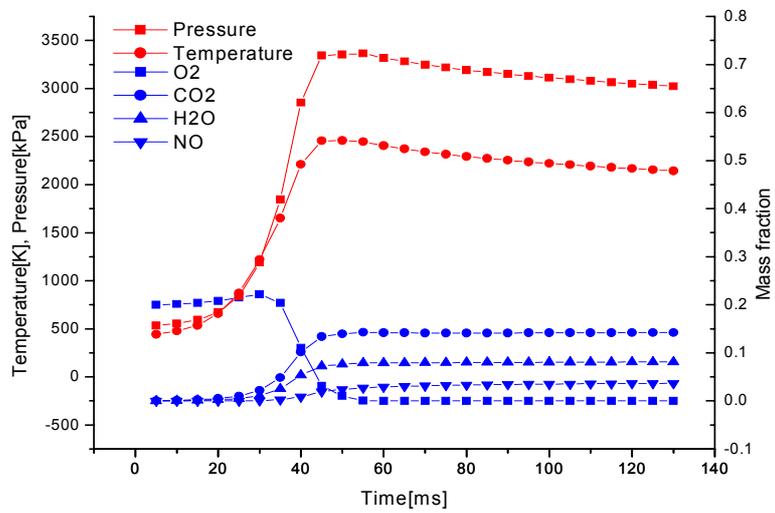


Fig. 4.8 Species at $\phi=1.0$

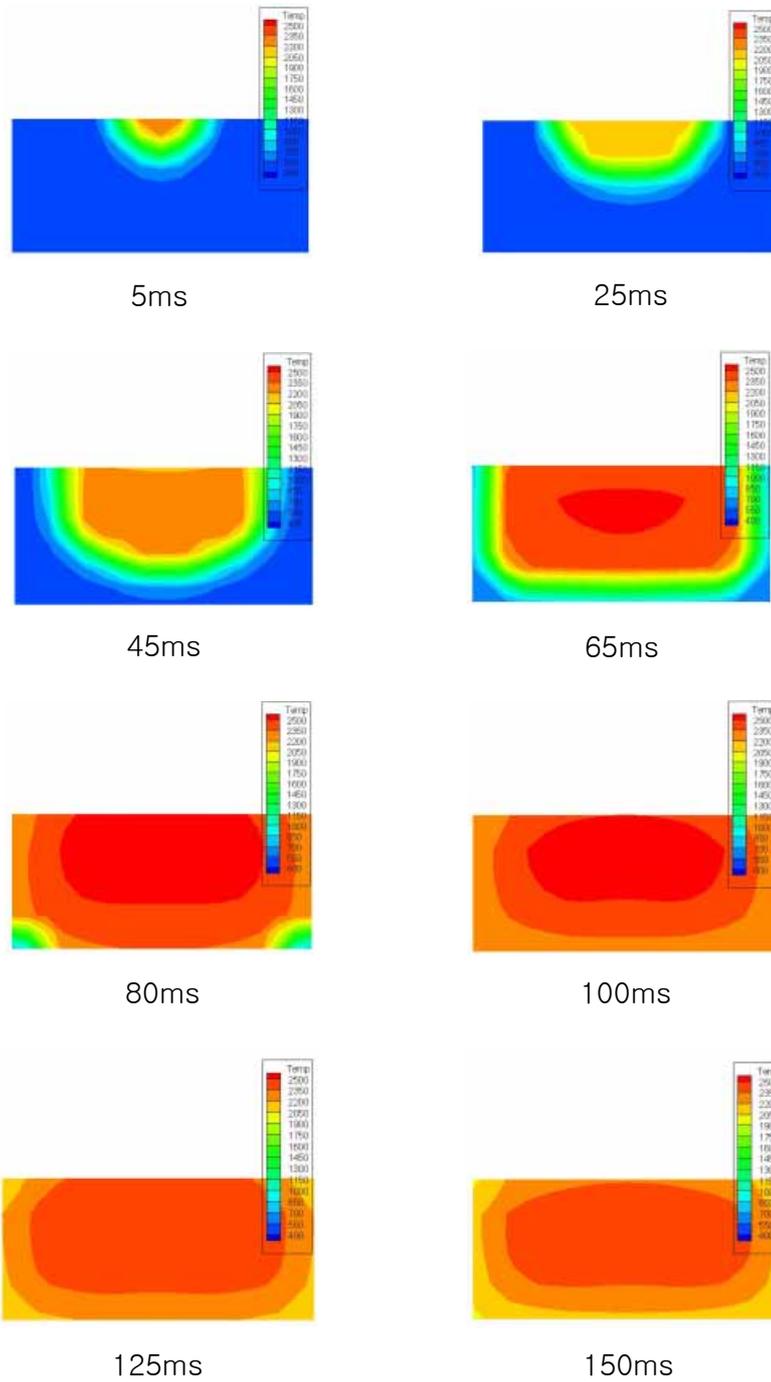


Fig. 4.9 Temperature at $\phi=0.8$

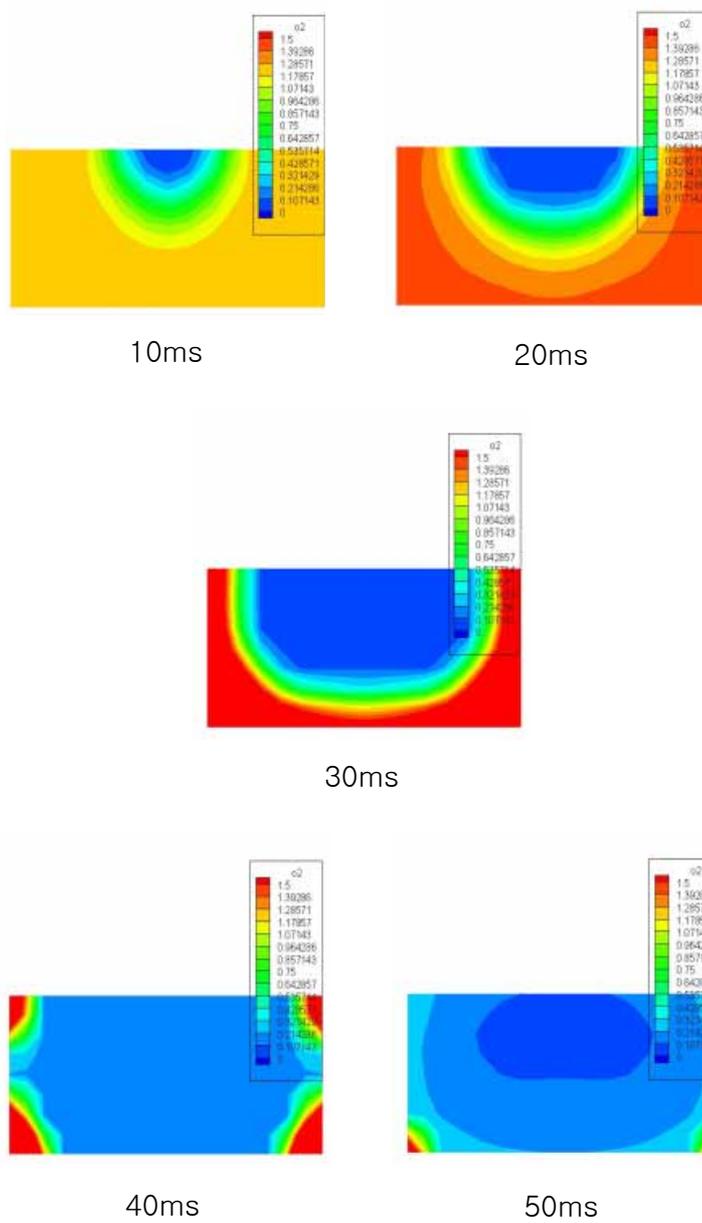


Fig. 4.10 O_2 at $\phi=0.8$

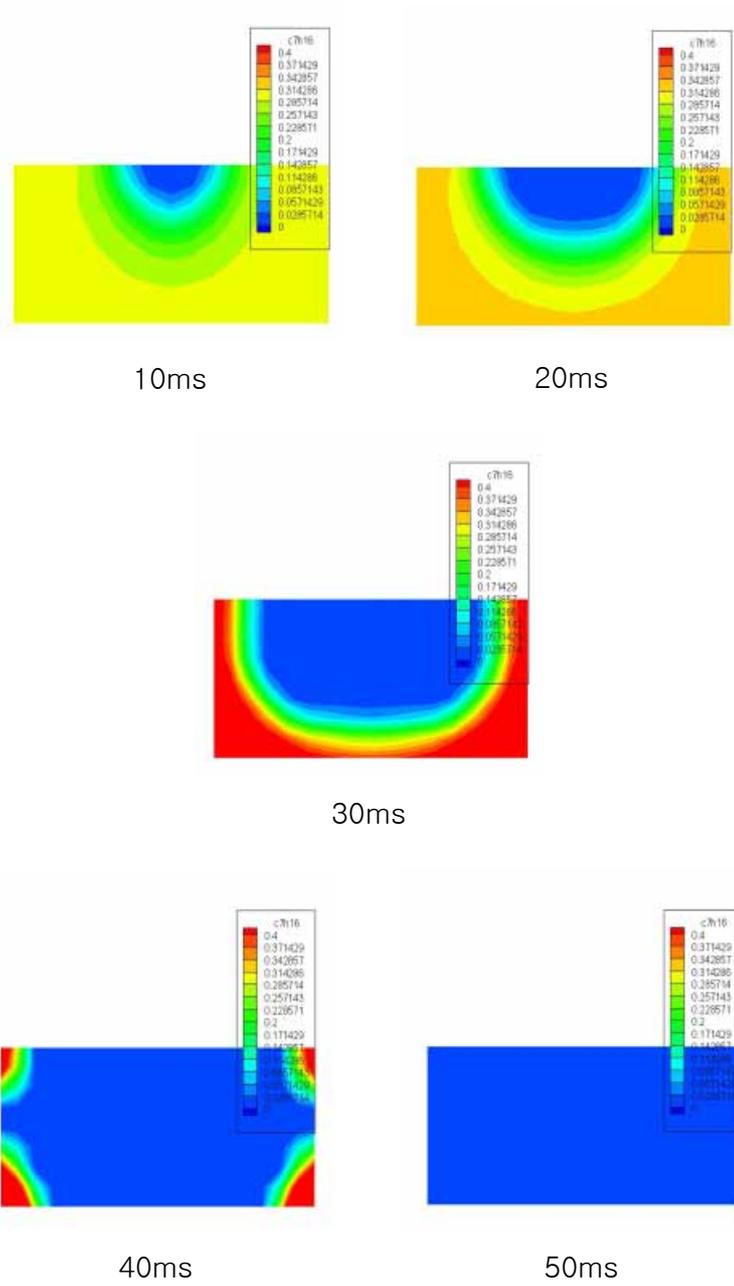
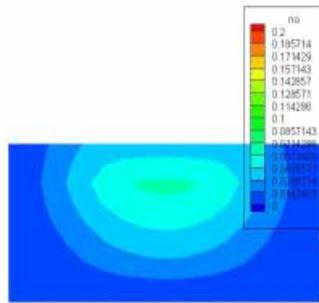
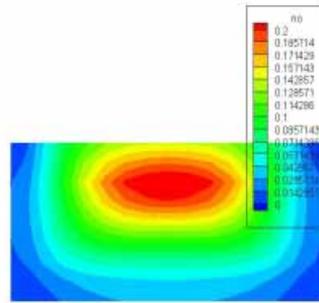


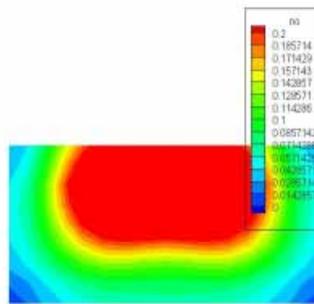
Fig. 4.11 C_7H_{16} at $\phi=0.8$



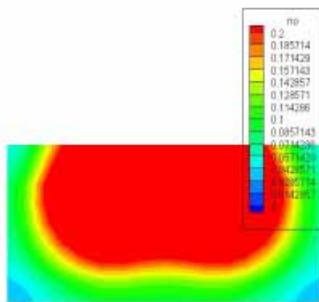
65ms



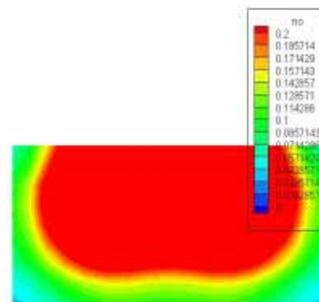
80ms



100ms

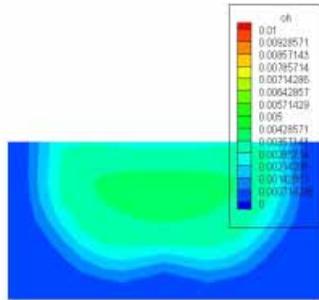


140ms

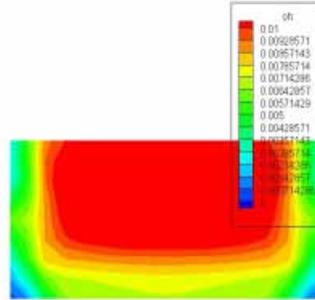


190ms

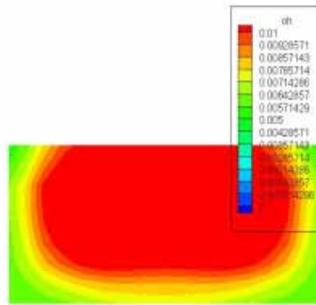
Fig. 4.12 NO at $\phi=0.8$



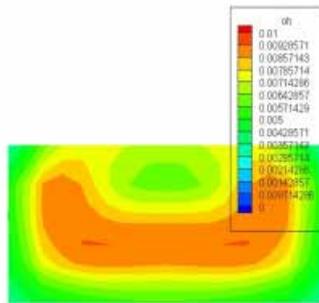
50ms



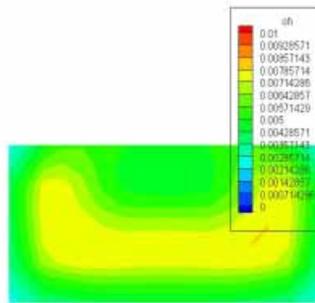
75ms



100ms

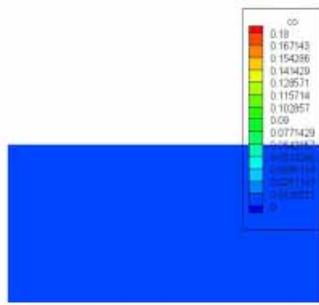


125ms

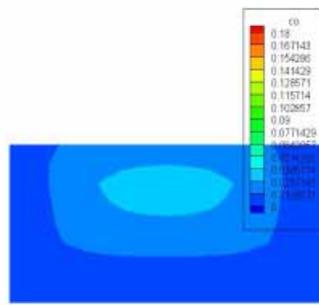


150ms

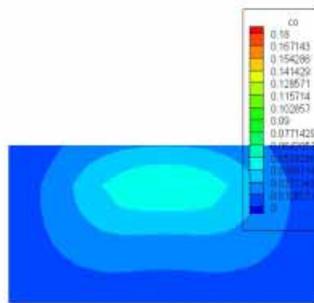
Fig. 4.13 OH at $\phi=0.8$



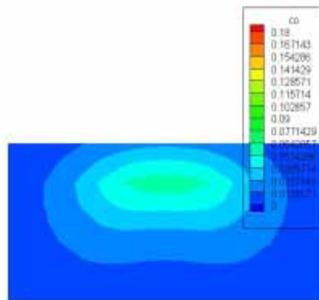
50ms



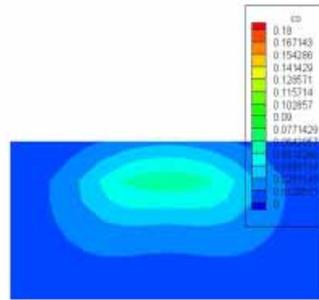
75ms



100ms



125ms



150ms

Fig. 4.14 CO at $\phi=0.8$

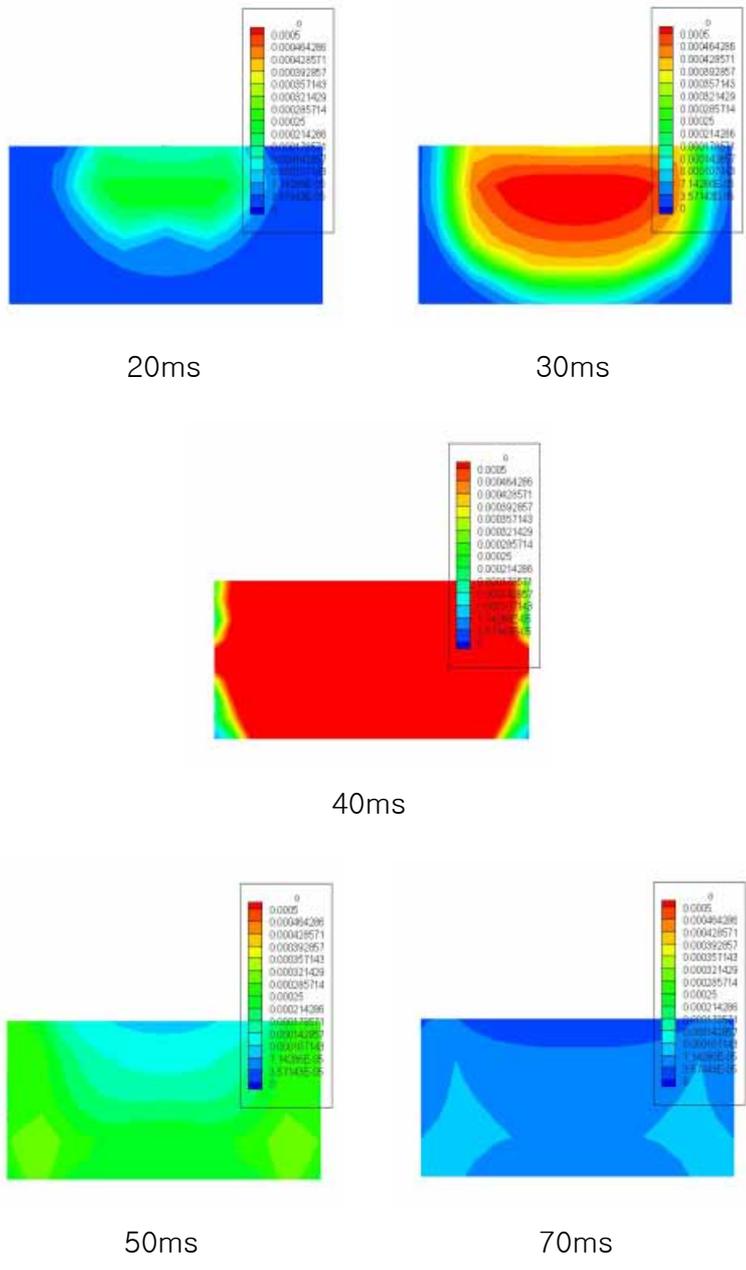
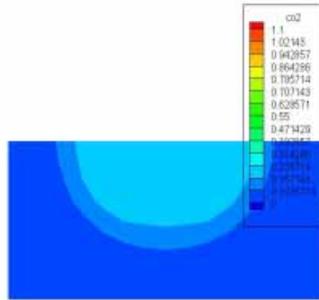
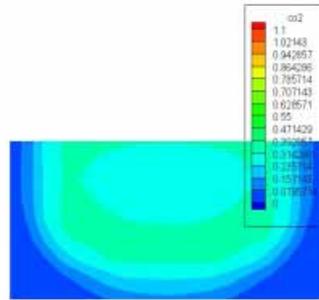


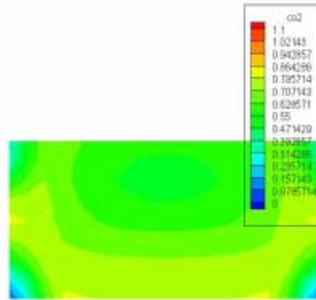
Fig. 4.15 O at $\phi=0.8$



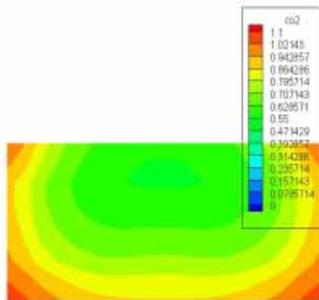
20ms



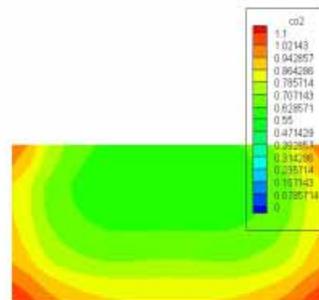
30ms



40ms



100ms



150ms

Fig. 4.16 CO₂ at $\phi=0.8$

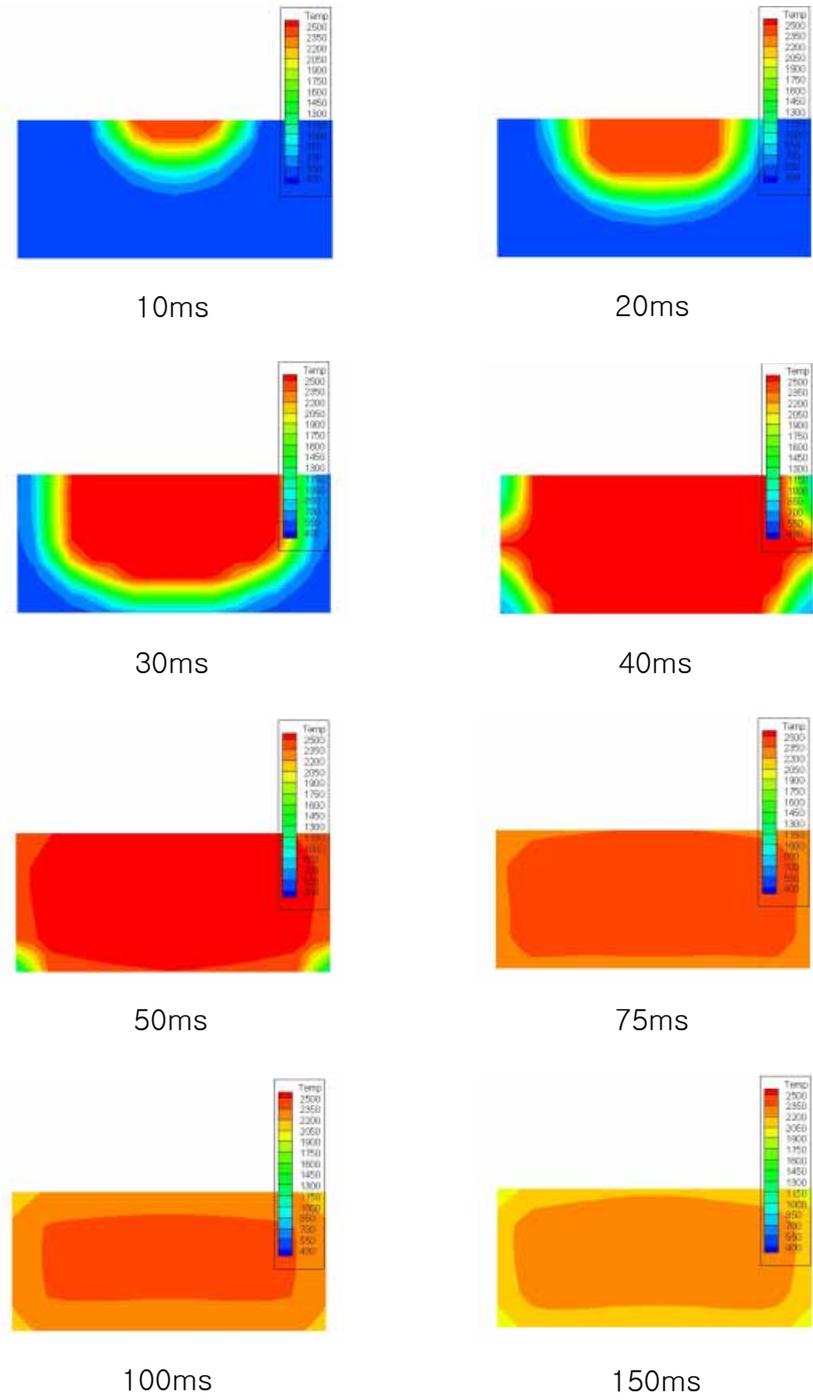


Fig. 4.17 Temperature at $\phi=1.0$

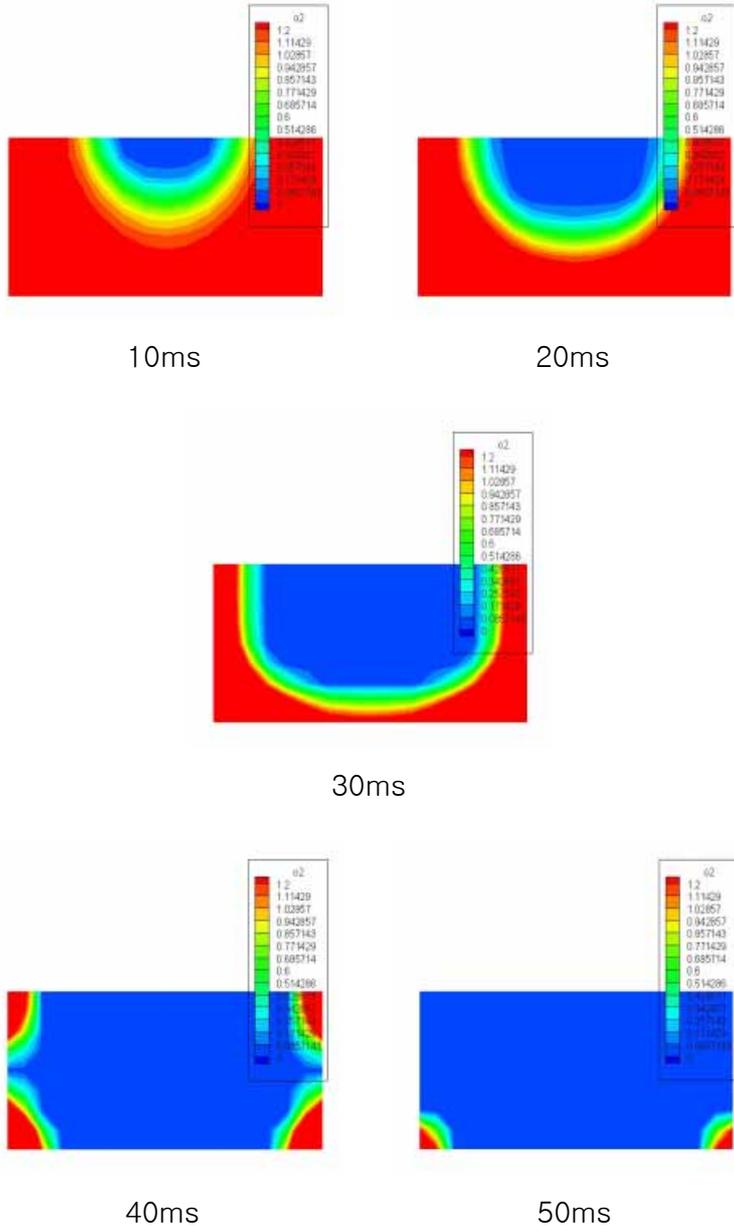


Fig. 4.18 O_2 at $\phi=1.0$

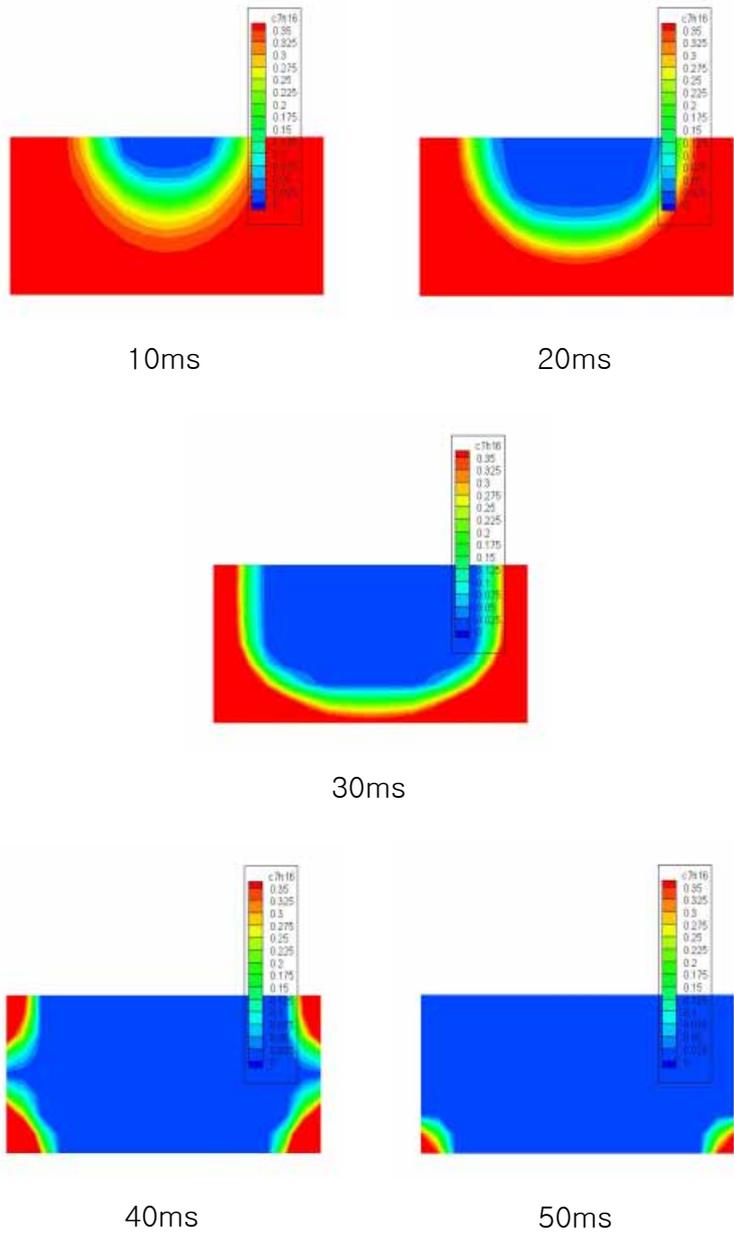


Fig. 4.19 C_7H_{16} at $\phi=1.0$

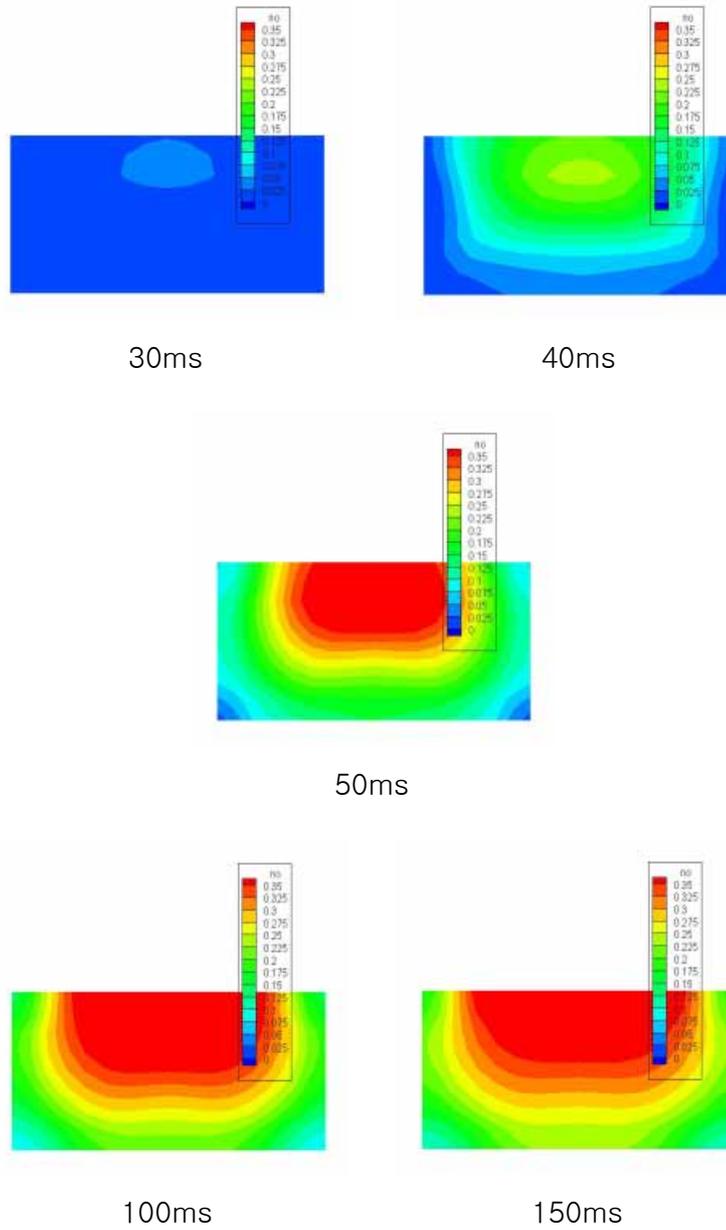
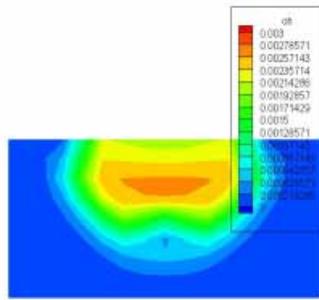
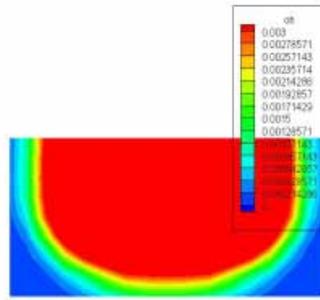


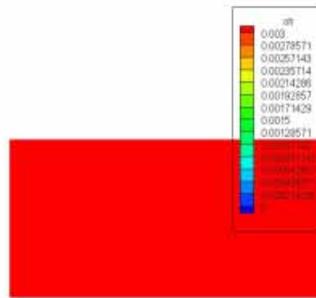
Fig. 4.20 NO at $\phi=1.0$



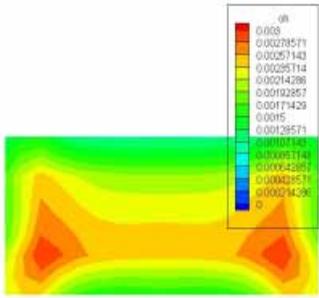
20ms



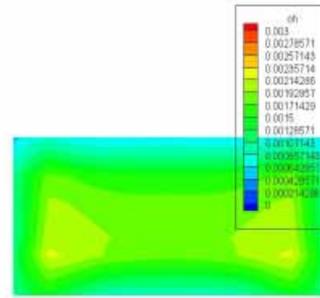
30ms



50ms

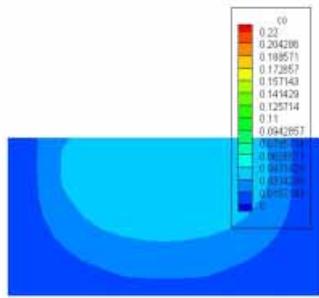


80ms

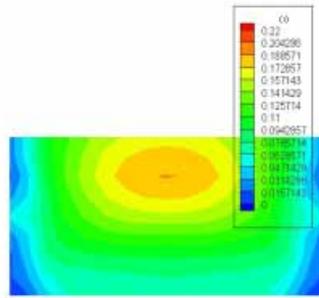


100ms

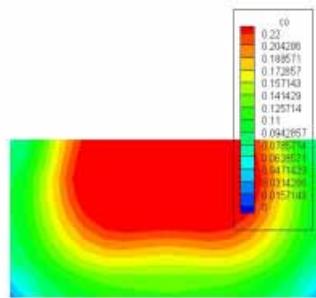
Fig. 4.21 OH at $\phi=1.0$



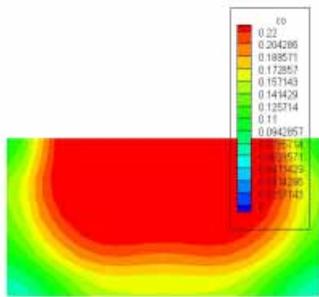
30ms



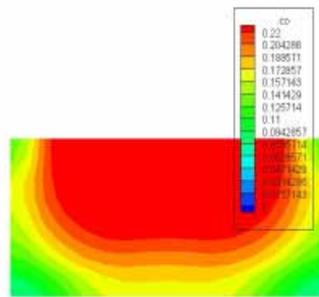
40ms



50ms

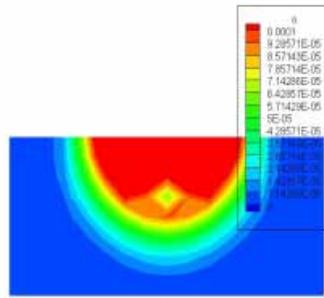


100ms

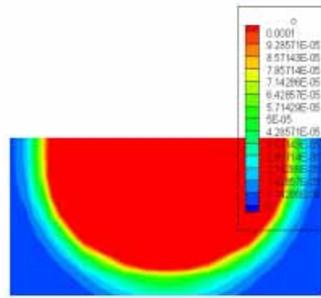


150ms

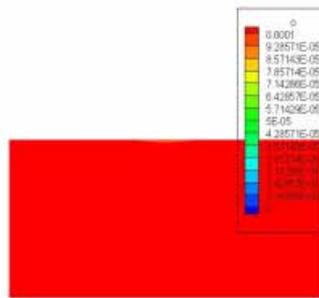
Fig. 4.22 CO at $\phi=1.0$



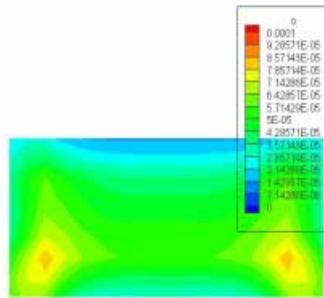
10ms



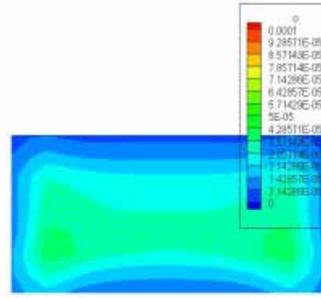
25ms



50ms

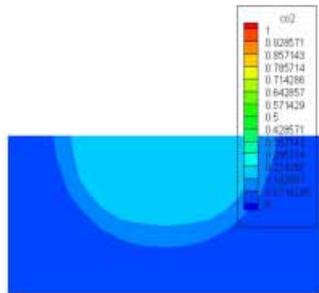


75ms

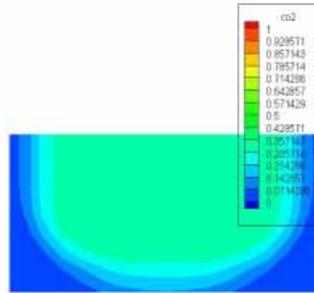


100ms

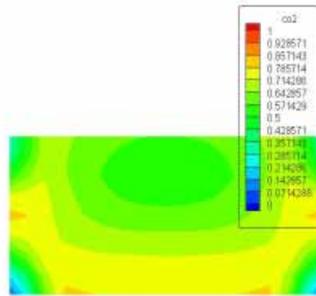
Fig. 4.23 O at $\phi=1.0$



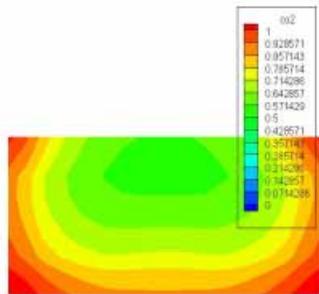
20ms



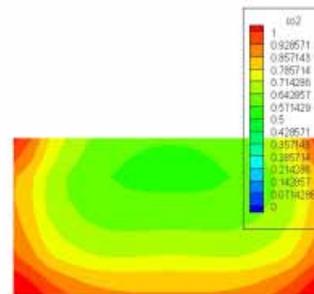
30ms



40ms



100ms



150ms

Fig. 4.24 CO₂ at $\phi=1.0$

4.2. 라디칼 인젝터가 장착된 연소실

4.2.1 실험치와의 비교

연락공이 없는 경우에서 수정한 반응률상수계수를 적용하여 연락공을 가지는 연소실의 연소특성을 계산하였다.

Fig. 4.25는 당량비가 0.8인 경우 시간에 따른 압력변화를 실험값과 비교한 것이다. 실험값의 경우 약 10ms부터 눈에 띄게 압력이 상승하기 시작하고, 계산결과는 약 20ms까지는 압력이 서서히 상승하다 그이후 급격한 상승을 나타낸다. 하지만 최고압력을 나타내는 시기는 실험결과와 계산결과 모두 50ms 부근에서 나타난다. Fig. 4.26은 당량비가 1.0인 경우 시간에 따른 압력변화를 실험값과 비교한 것이다. 실험값의 경우 5ms부터 압력상승이 나타나지만, 계산결과는 약 10ms 이후 압력상승이 나타난다. 최고압력을 나타내는 시기는 약간의 차이는 있지만 약 25ms 정도에서 나타난다.

당량비 0.8과 1.0인 경우 모두 초기 연소활성화가 시작되는 부분에 약간 느리게 나타나기는 하지만, 최고압력을 나타내는 시기는 실험값과 거의 일치하는 비교적 좋은 결과를 예측한다.

4.2.2 당량비 변화에 따른 특성

Fig. 4.27과 Fig. 4.28은 당량비변화에 따른 압력과 온도를 시간에 따라 나타낸 것이다. 당량비 1.0인 경우 가장 연소가 잘 일어나는 것을 확인할 수 있으며, 당량비가 1.2로 약간 농후한 경우 당량비 1.0인 경우보다 연소속도가 느린 것을 확인할 수 있다. 당량비가 0.8, 0.7로 희박해질수록 연소속도는 더욱 느려진다.

4.2.3 연소실내의 온도분포 특성

Fig. 4.29는 주실의 당량비가 1.0일때 연소실내부의 온도변화를 보여준다.

부실에서 연소로 인한 급속한 온도 상승이 일어난 후 19ms에서부터 연락공을 거쳐 주실로 온도상승이 이어지며, 주실을 연소시키게 된다. 23ms까지 빠른 속도로 주실전체로 온도가 상승되며, 15ms부터 온도 상승은 더 이상 일어나지 않고 부실의 벽면으로부터 온도가 감소하기 시작한다.

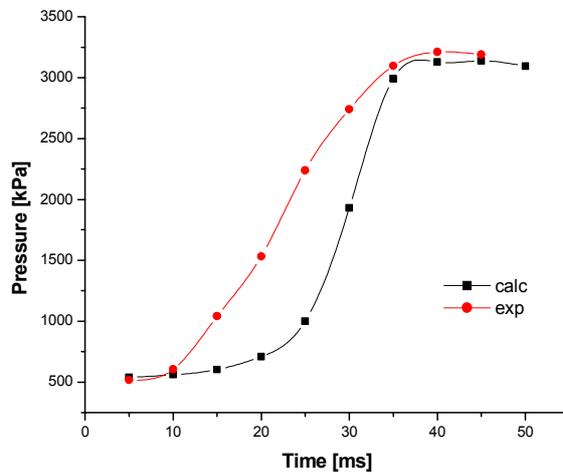


Fig. 4.25 Pressure of calculation and experiment ($\phi=0.8$)

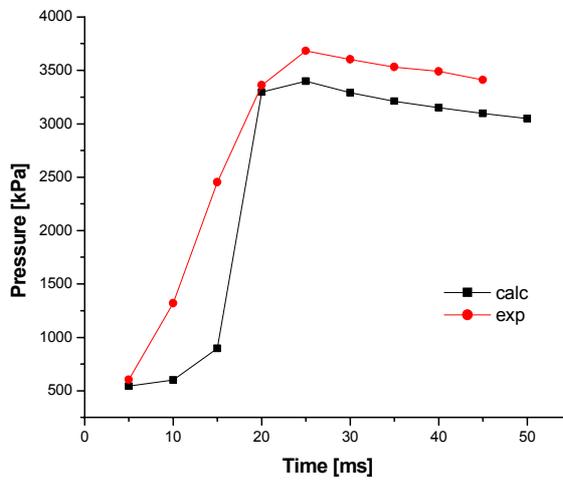


Fig. 4.26 Pressure of calculation and experiment ($\phi=1.0$)

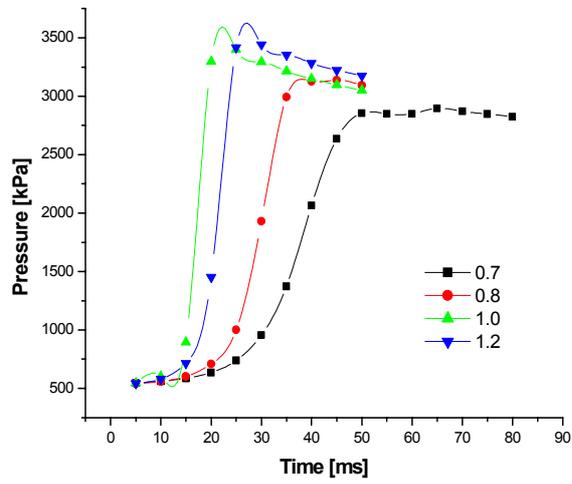


Fig. 4.27 Pressure with equivalence ratio variation

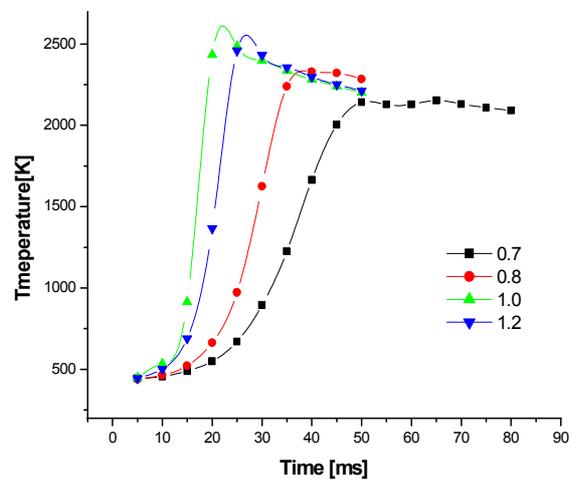


Fig. 4.28 Temperature with equivalence ratio variation

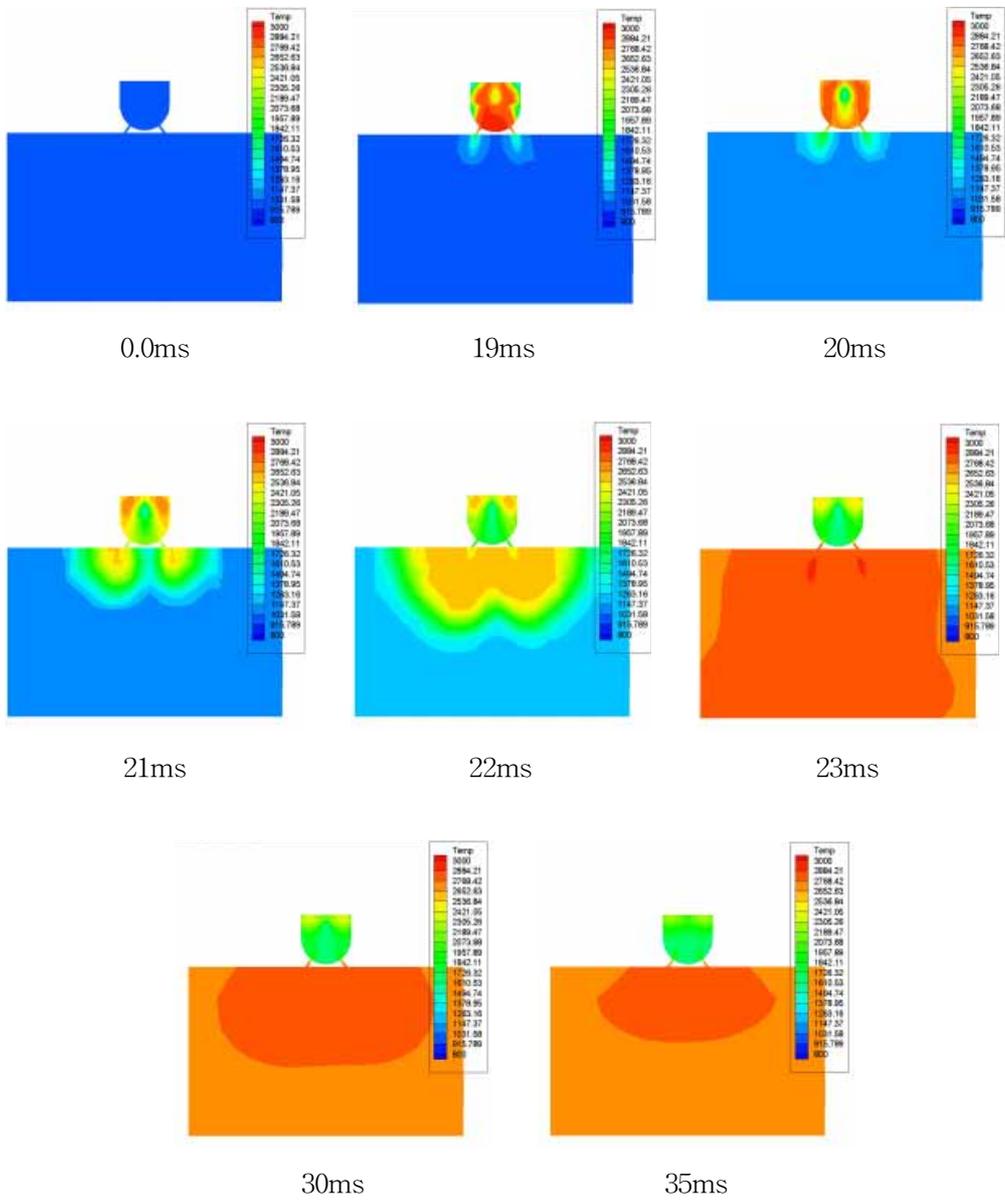


Fig. 4.29 Temperature of chamber

4.3. 라디칼 인젝터가 있는 경우와 없는 경우의 비교

Fig. 4.30~4.39는 라디칼 인젝터가 장착된 경우와 라디칼 인젝터가 장착되지 않은 경우 당량비 변화에 따른 연소실 내부의 평균압력과 평균온도를 시간의 경과에 따라 나타낸 것으로 라디칼 인젝터가 장착된 경우는 RI로 라디칼 인젝터가 장착되지 않은 경우는 SI로 표기하였다. 모든 경우에서 1ms로 나눌 때 압력이 10kPa이상 상승하기 시작하는 지점을 연소가 시작하는 시기로 정하고 각각을 비교하였다.

Fig. 4.30와 Fig. 4.31은 라디칼 인젝터가 장착되지 않은 경우 당량비가 0.7, 1.0, 1.2일 때 연소실의 평균압력과 평균온도를 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 당량비가 1.0인 경우 16ms에서 연소가 시작되어 23ms까지 온도와 압력이 서서히 상승한 뒤 28ms에서 1700kPa의 압력과 2700K의 온도까지 급격히 상승한 후 서서히 감소한다. 당량비가 0.7로 희박한 경우는 17ms에서 연소가 시작되어 26ms까지 온도와 압력이 서서히 상승한 뒤 32ms까지 급격히 상승한 후 서서히 감소한다. 당량비가 1.2로 농후한 경우는 16ms에서 연소가 시작되어 24ms까지 온도와 압력이 서서히 상승한 뒤 30ms까지 급격히 상승한 후 서서히 감소한다. 당량비가 1.2로 농후한 경우 당량비가 1.0인 경우보다 연소기간이 길어지며 당량비가 0.7로 희박한 경우 연소기간은 더욱 길어진다.

Fig. 4.32와 Fig. 4.33은 라디칼 인젝터가 장착된 경우 당량비가 0.7, 0.8, 1.0, 1.2일 때 연소실의 평균압력과 평균온도를 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 당량비가 1.0인 경우 19ms에서 연소가 시작되어 21ms까지 온도와 압력이 서서히 상승한 뒤 24ms에서 1700kPa의 압력과 2700K의 온도까지 급격히 상승한 후 서서히 감소한다. 당량비가 0.8로 희박한 경우는 19ms에서 연소가 시작

되어 21ms까지 온도와 압력이 서서히 상승한 뒤 25ms까지 급격히 상승한 후 서서히 감소한다. 당량비가 0.7로 더욱 희박한 경우는 20ms에서 연소가 시작되어 22ms까지 온도와 압력이 서서히 상승한 뒤 25ms까지 급격히 상승한 후 서서히 감소한다. 당량비가 1.2로 농후한 경우는 19ms에서 연소가 시작되어 21ms까지 온도와 압력이 서서히 상승한 뒤 24ms까지 급격히 상승한 후 서서히 감소한다. 당량비가 0.8, 0.7로 희박해지면 당량비 1.0인 경우보다 연소기간이 약간씩 길어지긴 하지만 크게 차이 나지 않으며, 당량비가 1.2로 농후한 경우는 당량비 1.0인 경우와 거의 일치하는 경향을 보인다.

Fig. 4.34와 Fig. 4.35는 당량비 1.0에서 라디칼 인젝터가 있는 경우와 없는 경우 시간에 따른 연소실내의 압력과 온도를 비교한 것이다. 라디칼 인젝터가 있는 경우가 없는 경우에 비해 연소가 시작되는 시점은 느리지만 최고 압력과 온도를 나타내는 시점이 훨씬 빠르게 나타나며, 라디칼 인젝터가 달린 경우 압력과 온도는 매우 빠르게 상승한다. 이것은 라디칼 인젝터에 의한 다점 착화로 급속 연소가 이루어 지기 때문으로 판단된다. 당량비가 0.7로 희박해지면 라디칼 인젝터가 있는 경우와 없는 경우의 차이는 더욱 커지게 된다(Fig 4.36, 4.37).

Fig. 4.38과 Fig. 4.39는 당량비 변화에 따른 연소실내 평균압력과 평균온도를 라디칼 인젝터가 있는 경우와 없는 경우 모두 나타낸 그림이다. 전반적으로 라디칼 인젝터가 있는 경우가 라디칼 인젝터가 없는 경우에 비해 압력과 온도상승이 빠르게 나타난다. 특히 라디칼 인젝터가 없는 경우는 당량비 변화에 따라 압력과 온도가 상승하는 차이가 크게 나타나는 반면, 라디칼 인젝터가 있는 경우 다점착화에 의한 급속 연소가 일어나므로 당량비 변화에 따른 차이가 거의 없거나 매우 작게 나타나고 있다.

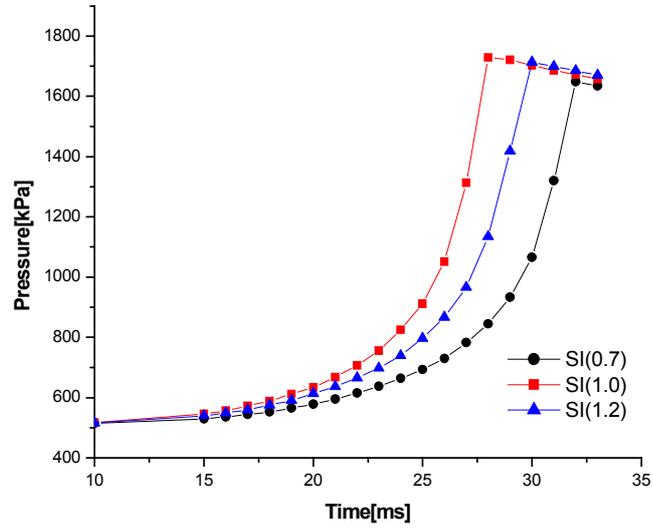


Fig. 4.30 Pressure of chamber by changing equivalence ratio without radical injector

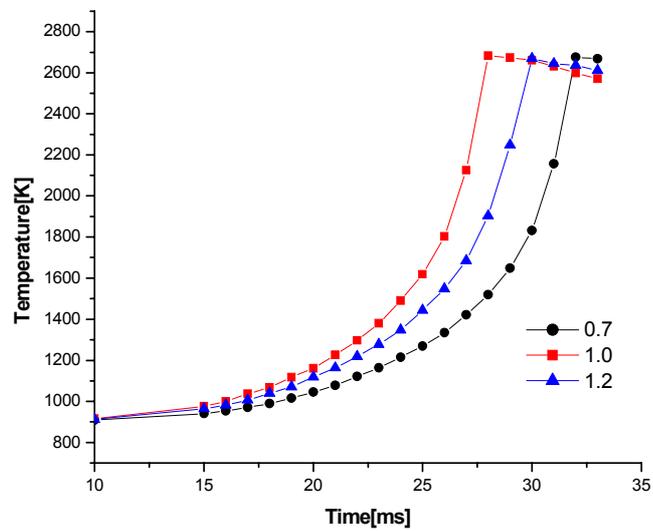


Fig. 4.31 Temperature of chamber by changing equivalence ratio without radical injector

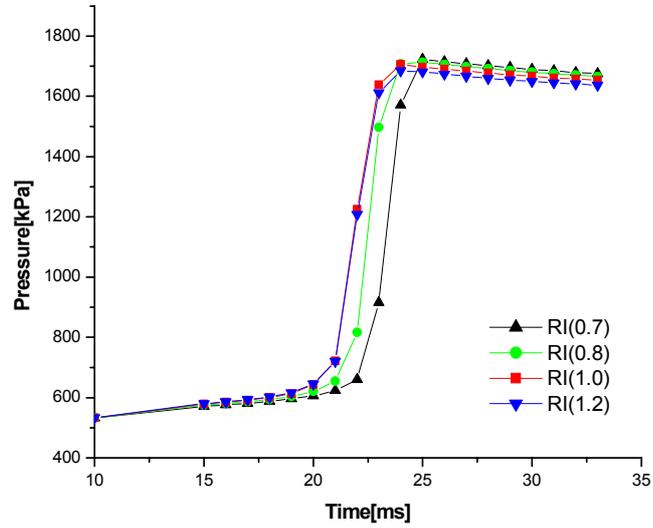


Fig. 4.32 Pressure of chamber by changing equivalence ratio with radical injector

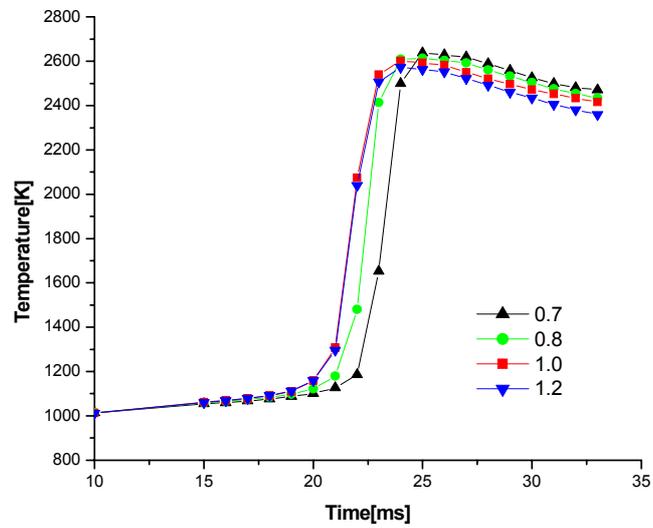


Fig. 4.33 Temperature of chamber by changing equivalence ratio without radical injector

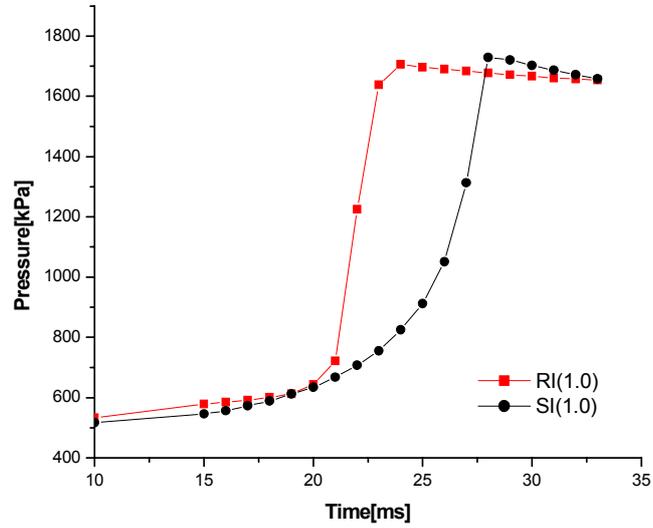


Fig. 4.34 Pressure of chamber ($\phi=1.0$)

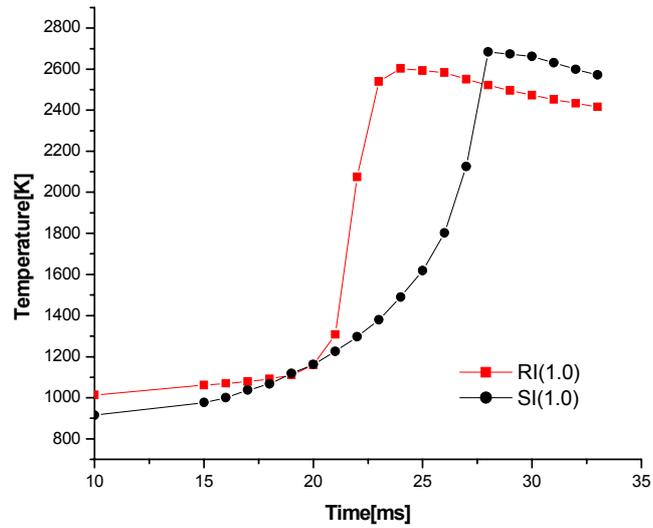


Fig. 4.35 Temperature of chamber ($\phi=1.0$)

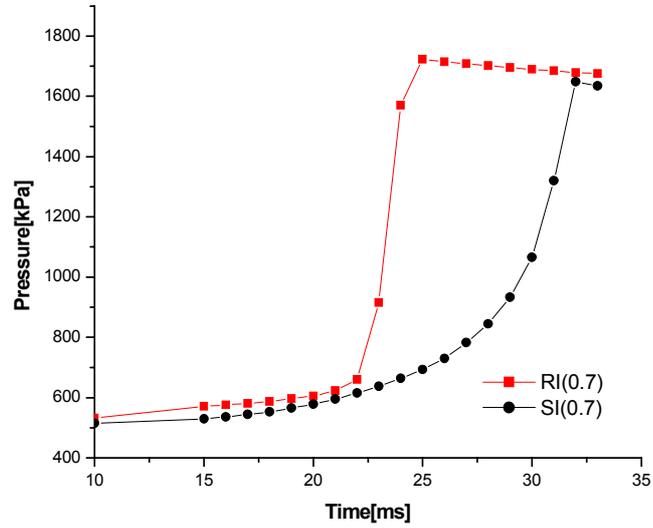


Fig. 4.36 Pressure of chamber ($\phi=0.7$)

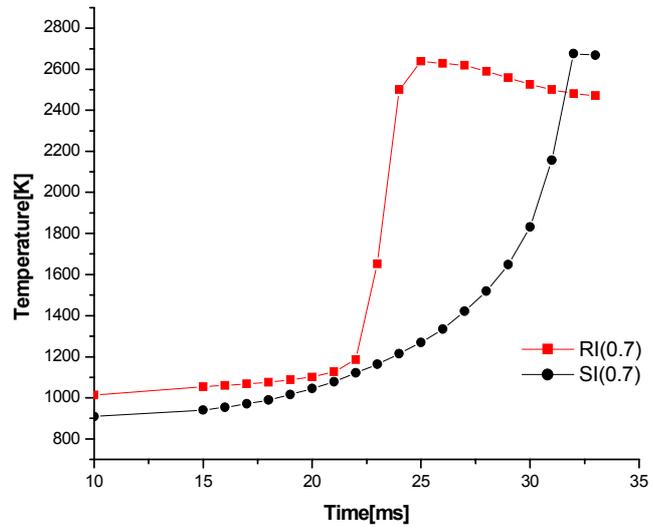


Fig. 4.37 Temperature of chamber ($\phi=0.7$)

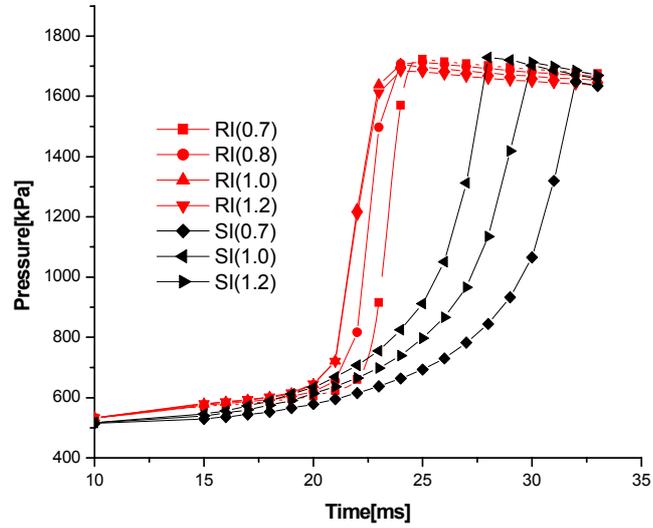


Fig. 4.38 Pressure of chamber by changing equivalence ratio

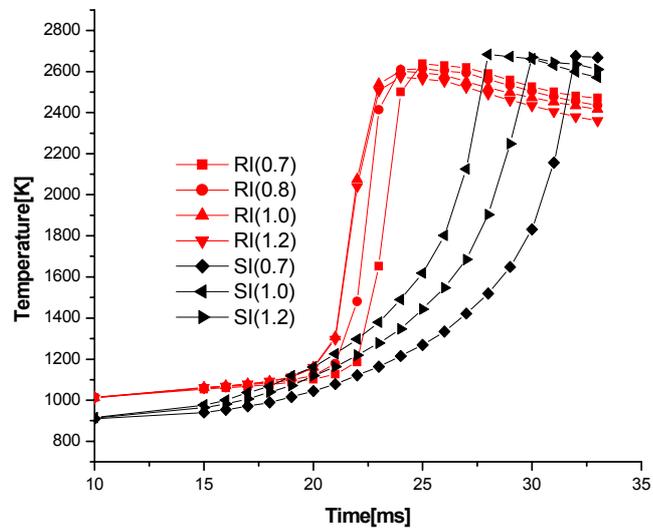


Fig. 4.39 Temperature of chamber by changing equivalence ratio

V. 結 論

라디칼 인젝터를 장착한 연소실의 연소특성을 분석하기 위하여 계산 코드의 반응을 상수값을 변화시키며 계산을 수행하고, 연소특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

반응율 상수와 당량비 변화에 따른 정적연소실내 연소특성은 다음과 같다.

- 활성화 에너지(E)값은 연소가 시작되는 시기를 결정하는데 중요한 요소로 작용하며 이 값이 커지면 연소가 시작되는 시기가 늦어지고 이 값이 작아지면 빨라진다.
- pre-exponential factor(A)값은 연소기간에 영향을 미치는데 이 값이 커지면 연소기간은 길어지고 이 값이 작아지면 짧아진다.
- 실험결과와 비교하여 정적연소기의 수치해석을 위한 반응 상수값을 제안 ($A=3.1 \times 10^{11}$, $E=17500$)하였으며, 제안한 상수값을 적용하여 당량비 변화에 따른 계산을 수행하여 선정된 값이 적절함을 보였다.

라디칼 인젝터를 적용한 연소실의 당량비 변화에 따른 연소특성은 다음과 같다.

- 라디칼 인젝터가 있는 경우 급속도로 라디칼을 분출시켜 다점착화가 활발해지며 연소가 더욱 급속히 이루어진다.
- 라디칼 인젝터가 있는 경우 라디칼 인젝터가 없는 경우보다, 당량비 변

화에 따른 연소기간의 차이가 매우 작다.

- 라디칼 인젝터가 없는 경우보다 급속도로 연소가 진행되며 당량비가 희박한 조건에서 라디칼 인젝터가 있는 경우 그 효과는 더욱 커진다.

參考文獻

- 1) Gaydon, A.G. and Wolfhard, H.G. *Flames, their structure, radiation and temperature (3rd edition)*, London, Chapman and Hall Press, 1970.
- 2) Gaydon, A.G., *Spectroscopy of flames*, Wiley Press, 1957.
- 3) Kawabata, Y. Nakagawa, K. and Shoji, F., "Operating Characteristics of Natural Gas Fueled Homogeneous Charge Compression Ignition", Energy Technology Research Institute Vol.8, 1998.
- 4) Gentili, R., Stefano F., Leonardo T., Patrice H. and Jacques L., "Experimental Study on ATAC (Active Thermo-Atmosphere Combustion) in a Two-Stroke Gasoline Engine", SAE Paper 970363.
- 5) Gaydon, A.G. and Wolfhard, H.G., *Flames, their structure, radiation and temperature (3rd edn)*, London, Chapman and Hall Press, 1970.
- 6) Gaydon, A.G., *Spectroscopy of flames*, Wiley Press, 1957.
- 7) Kong, S. and Ricart, L.M. and Reitz, R.D., "In-cylinder diesel flame imaging compared with numerical computations", SAE 950455, 1995.
- 8) Nagaoka M., Kawazoe, H. and Naomi N., "Modeling fuel spray impingement on a hot wall for gasoline Engines", SAE 940525, 1994.
- 9) Stephenson, P.W. and Rutland, C.J., "Modeling the effects of intake flow characteristics on diesel engine combustion", SAE 950282, 1995.
- 10) Zellat, M., Rolland, T.h. and Poplow, F., "Three dimensional modeling of combustion and soot formation in an indirect injection diesel engine",

SAE 900254, 1990.

11) Kuo, T.W., "Multidimensional port-and-cylinder gas flow, fuel spray, and combustion calculations for a port-fuel-injection engine", SAE 920515, 1992.

12) Gosman, A.D., Tsui, Y.Y. and Watkins, A.P., "Calculation of Three-Dimensional Air Motion in Model Engines", FS/83/29,1980.

13) Diwakar, R., "Three-Dimensional Modeling of the In-Cylinder Gas Exchange Processes in a Uniflow-Scavenged Two-Stroke Engine", SAE Paper No. 870596, 1987.

14) Kong, S.C and Hong, C.W., "Multidimensional Intake Flow Modeling of a Fourstroke Engine with Comparisons to Flow Velocity Measurements", SAE 970883, 1997.

15) Amsden, A.A., O'Rourke, P.J. and T.D Butler, "KIVA-II:A Computer Program for Chemically Reactive Flows with sprays", Los Alamos National Laboratory Report No. LA-11560-MS,1989.

16) Amsden, A.A., "KIVA-3 KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries", Los Alamos National Laboratory Report No. LA-12503-MS, 1993.

17) Nishida, K. and Hiroyasu, H., "Simplified three-dimensional modeling of mixture formation and combustion in a DI diesel engine", SAE Paper 890269, 1989.

18) Gosman, A.D and Harvey, P.S, "Computer analysis of fuel-air mixing and combustion in an axisymmetric D.I. diesel", SAE Paper 820036, 1982.

감사의 글

길다면 길고 짧다면 짧은 2년 간의 대학원생활을 마감하며 한편의 논문을 내게 되었습니다. 저의 학교생활을 도와 주신 여러 분들에게 짧은 글로나마 감사를 드리고자 합니다.

먼저 학부와 석사과정에서 늘 관심과 애정으로 부족한 저를 이끌어주신 박권하 교수님께 특별히 감사 드립니다. 바쁘신 와중에도 부족한 제 논문에 시간을 내어 충고를 아끼지 않으신 최재성, 조권희 교수님께도 깊은 감사 드립니다.

저의 첫 실험실 생활을 도와준 희성이 선배, 저의 밤샘을 곧잘 도와주곤 했던 인석이 선배, 늘 행복한 말씀을 전해주시던 김재곤 선생님, 저희에게 많은 충고와 격려를 아끼지 않으신 이화순 교수님, 언제나 웃음을 잃지 않으시는 송영호 이사님, 저희가 어려움 없이 대하도록 신경 써주신 박홍일 원장님께 감사 드리고, 사람 좋아 언제나 고민상담에 바빴던 병두, 후배의 건방도 넉넉히 받아준 현철이 선배, 자기 일에 확실히 하고 주위사람에게 친절할 석민, 늘 옆에서 나의 투정을 받아주느라 고생한 진희, 우리의 장난에도 속아넘어가 주며 웃음을 주던 착한 재혁이 에게도 감사의 말을 전합니다. 선배들의 구박도 웃으며 받아주던 성실한 승우, 뒤늦게 합류한 성윤, 이제 사회생활에 발을 디디게 될 주용, 종구 에게도 알찬 미래를 기원하고, 찾아가면 언제나 반겨주고 선배대접 해준 고마운 자동차연구회 후배들의 앞날도 밝게 빛나길 기원합니다. 제 논문을 도와주고 많은 부분을 함께 해준 예쁘고 착한 인선이 에게 특별히 고맙다는 말을 전합니다.

부족한 저를 언제나 믿음으로 이끌어 주신 부모님과 먼 곳에서도 걱정을 아끼진 않는 큰누나와 매형, 바쁜 와중에도 동생에게 신경 써주는 작은누나... 저의 사랑하는 가족들의 관심과 애정에 너무나 고마움을 느낍니다.

그 외 저의 삶에 많은 도움을 준 친구, 선후배들에게도 감사하며, 이 모든 분들의 앞날에 축복과 행복 가득하길 진심으로 바라고, 늘 건강하시길 기도합니다.

2002년 12월 31일

趙 尙 武