

라디칼인젝터를 적용한 정적연소기의 연소특성에 관한 계산적 연구

조상무*·전재혁*·장인선*·박권하†·정성식**

(2003년 3월 5일 접수, 2003년 6월 18일 심사완료)

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

Sangmu Jo, Jaehyeuk Jeon, Insun Jang, Kweonha Park and Sungsik Jeong

Key Words: Radical Injector(라디칼 인젝터), Radical Combustion(활성기 연소), Premixed-Compression-Ignition Engine(예혼합 압축착화엔진)

Abstract

A premixed-compression-ignition engine has been studied to improve the efficiency and to decrease 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 radicals. The combustion chamber of the 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 paper, 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 experimental results tested in the same geometrical chamber. The code is applied on the two combustors in a wide range of equivalence ratio. The results show that the burning time is much shorter in the combustor having radical injector.

기호설명

- ρ : 밀도 g/cm³
- ρ_m : 화학종 m의 밀도, g/cm³
- u : 속도벡터, cm/s
- J : 열유속
- P : 가스압력
- I : 단위 내부 에너지
- D : 확산계수

σ : 진단 응력

1. 서론

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.

폭 넓은 엔진의 작동영역에서 희박혼합기의 연소안정성 및 착화시기의 재현성을 확보하기 위해

† 책임저자, 회원, 한국해양대학교 기계공학과

E-mail : khpark@hanara.kmaritime.ac.kr

TEL : (051)410-4367

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 동아대학교 기계공학과

라디칼인젝터를 장착한 예혼합압축착화엔진이 제시되고 있다. 예혼합압축착화엔진은 연소실에 도입한 초회박혼합기에 다량의 라디칼을 순간적으로 공급하고 다점자기착화를 유발하여 급속연소를 실현한다. 이로 인하여 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 활성화합중(중간활성매체)으로서 CH계 연료의 연소반응에서는 CH, OH, H, C2 등이 알려져 있다. 이들은 예혼합연소에서 반응의 활성화 역할로 다음의 화학반응을 일으켜 무수한 연쇄반응이 유발된다. 이때 에너지 평형상태에 있던 화학종들이 반응에너지에 의해 여기되며 에너지 준위를 깨고 순간적으로 평형상태를 벗어난다고 알려져 있다.^(1,2) 연소실에 도입된 예혼합기에 다량의 라디칼을 광범위한 영역에 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, 회박 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 분출된다. 미리 도입된 주실의 예혼합기는 다점자기착화를 유발하게 된다. 예혼합압축착화엔진의 개념도는 Fig. 1과 같다. 이는 라디칼인젝터가 장착된 엔진의 연소실을 개략적으로 나타낸 것이다. 각 그림을 순차적으로 설명하면 먼저, 흡기행정시에 회박한 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.

내연기관에서 수치해석연구는 엔진 내부 유동

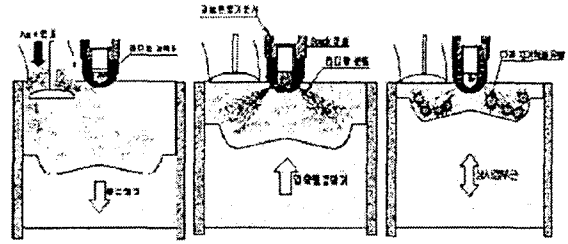


Fig. 1 Combustion process in premixed self-ignition engine having radical injector

및 연소 현상의 이해와 해석, 연소실 내 현상에 대한 물리적 모델의 개발과 검증^(5,6)을 중심으로 이루어진다. 그리고 수치해석 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 각 요소 모델에 대한 다양한 실험 결과와의 검증 작업이 요구된다.⁽⁷⁻⁹⁾

본 연구에서는 라디칼인젝터를 적용한 정적 연소기에서 주실의 당량비의 변화에 따른 연소유동, 압력과 온도변화, 각종 화학종들의 거동등을 시간의 경과에 따라 분석하고자 한다.

2. 수학적모델

화학 반응 및 연료분무를 포함한 연소해석에서 전달방정식은 다음과 같이 모델링된다.

화학종 m에 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 m과 전체밀도, \mathbf{u} 는 유속, D 는 확산계수를 나타낸다.

모멘텀보존식은,

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

여기서, p 는 유체의 압력이며 $\boldsymbol{\sigma}$ 는 점성전단응력으로 다음과 같이 Newtonian형식으로 쓴다.

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

에너지방정식은

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

이며, I 는 단위내부에너지이고, 열 유속 \mathbf{J} 는

Table 1 Values of the turbulence model constants

C _μ	C1	C2	C3	Pr _ε	Pr _ε	Cs
0.09	1.44	1.92	-1.0	1.0	1.3	1.5

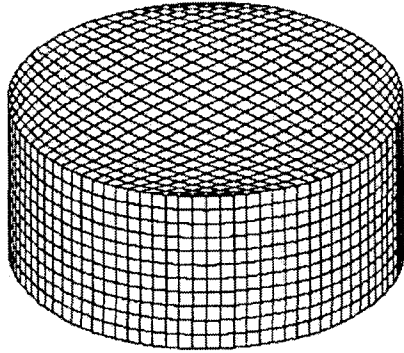


Fig. 2 Calculation grids of SI-chamber

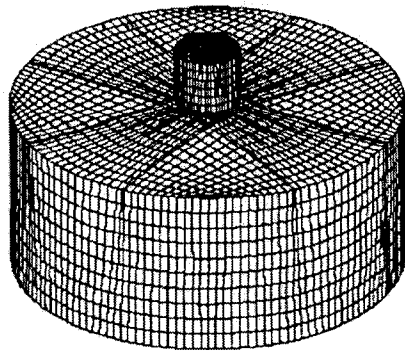


Fig. 3 Calculation grids of RI-Chamber

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

으로 나타난다.

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

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

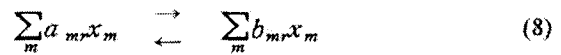
난류운동에너지소산을 ϵ 에 관한 보존식은,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \epsilon) = \\ & - \left(\frac{2}{3} C_1 - C_3 \right) \rho \epsilon \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] \\ & + \frac{\epsilon}{k} [C_1 \sigma : \nabla - C_2 \rho \epsilon + C_3 \dot{W}^s] \end{aligned} \quad (7)$$

으로 표시된다.

$k-\epsilon$ 난류모델에서 사용한 상수값들은 다음과 같다.

계에서 일어나는 화학반응은



으로 나타낼 수 있으며, x_m 은 화학종 m 의 1몰이며 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.

$$\begin{aligned} k_{fr} &= A_{fr} T^{\zeta_{fr}} \exp(-E_{fr}/T) \\ k_{br} &= A_{br} T^{\zeta_{br}} \exp(-E_{br}/T) \end{aligned} \quad (10)$$

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 식 (9)에 의하여 구하여진 반응률 \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 생성

열이다.

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 구하며, A_3 는 실험상수이다.

3. 계산조건 및 격자생성

3.1 계산조건 및 격자

Fig. 2와 Fig. 3은 계산을 수행하기 위한 생성한 격자를 보여 준다. 부실이 없는 경우 반응상수를 변화시키며 다양한 당량비(0.6~1.3)에서 계산을 수행하였다. 방정식에 사용되는 상수는 정등의 실험결과와 비교하여 결정하였으며, 이상의 계산 조건은 Table 2와 같다.

4. 계산결과 및 고찰

4.1 압력 및 온도 변화특성

Fig. 4~13은 라디칼 인젝터가 장착된 경우와 장착되지 않은 경우 당량비 변화에 따른 연소실 내부의 평균압력과 평균온도를 시간의 경과에 따

Table 2 Calculation conditions

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

라 나타낸 것이다. 여기서 라디칼 인젝터가 장착된 경우는 R1로 라디칼 인젝터가 장착되지 않은 경우는 SI로 표기하였다. 모든 경우에서 1ms로 나눌 때 압력이 10kPa이상 상승하기 시작하는 지점을 연소가 시작하는 시기로 정하고 각각을 비교하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 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 32ms

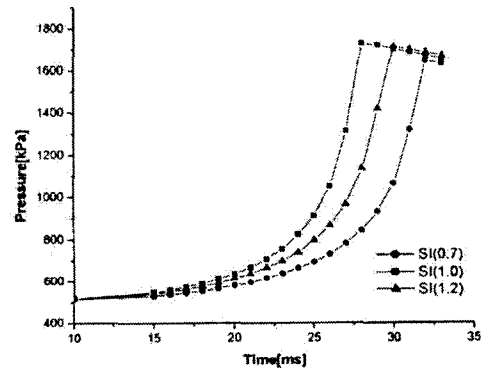


Fig. 4 Pressure of chamber by changing equivalence ratio without radical injector

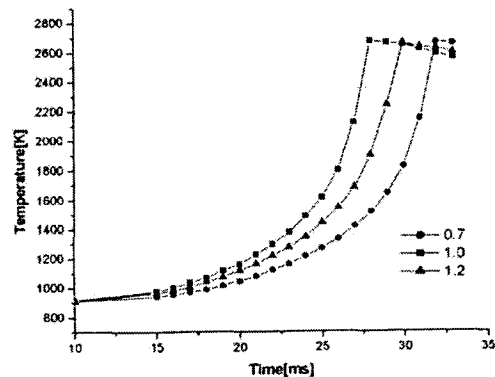


Fig. 5 Temperature of chamber by changing equivalence ratio without radical injector

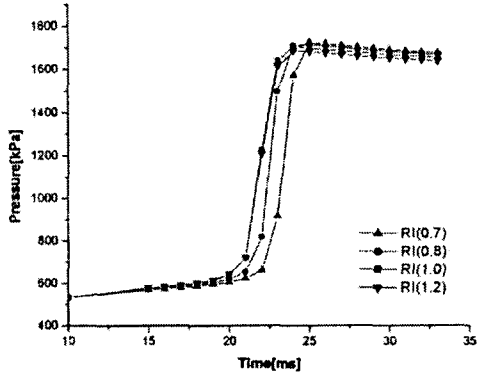


Fig. 6 Pressure of chamber by changing equivalence ratio with radical injector

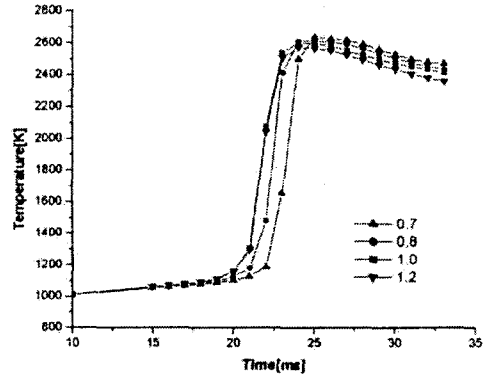


Fig. 7 Temperature of chamber by changing equivalence ratio without radical injector

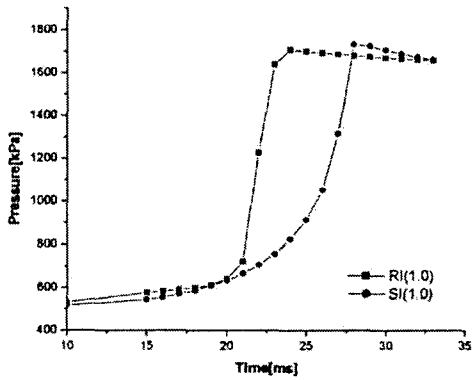


Fig. 8 Pressure of chamber ($\phi=1.0$)

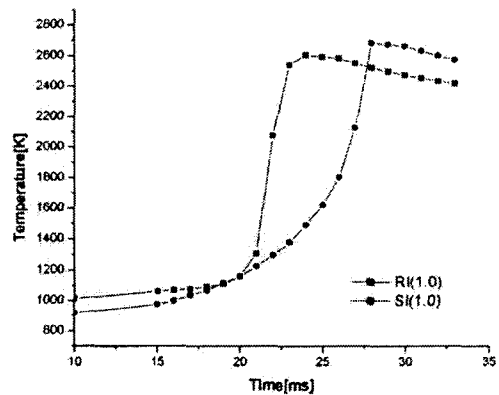


Fig. 9 Temperature of chamber ($\phi=1.0$)

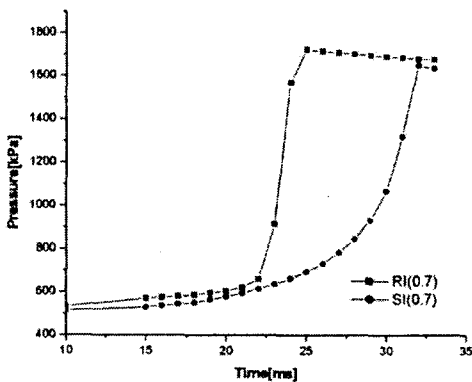


Fig. 10 Pressure of chamber ($\phi=0.7$)

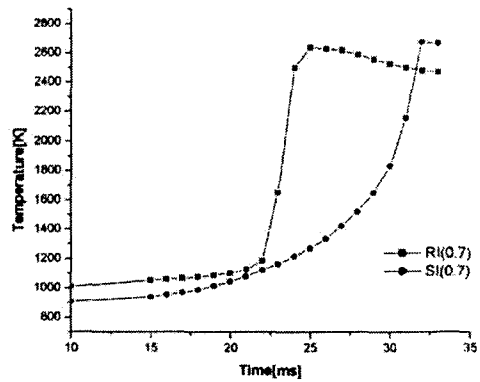


Fig. 11 Temperature of chamber ($\phi=0.7$)

까지 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. 당

량비가 1.2로 농후한 경우 당량비가 1.0인 경우보다 연소기간이 길어지며 당량비가 0.7로 희박한 경우 연소기간은 더욱 길어진다.

Fig. 6과 Fig. 7은 라디칼 인젝터가 장착된 경우

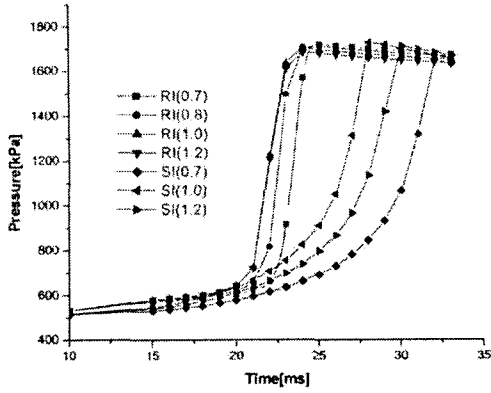


Fig. 12 Pressure of chamber by changing equivalence ratio

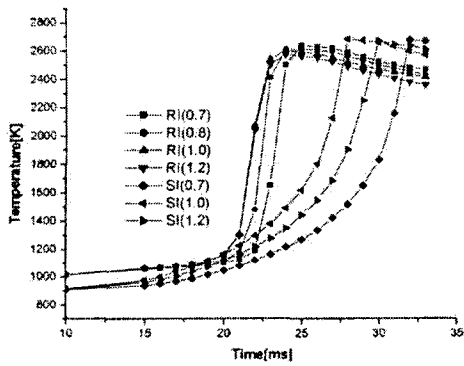


Fig. 13 Temperature of chamber by changing equivalence ratio

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 시작되어 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.

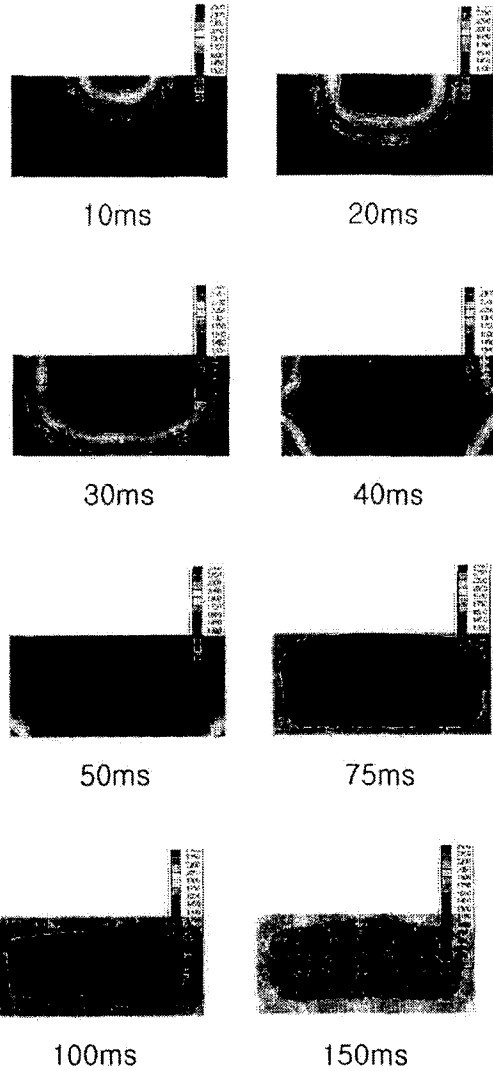


Fig. 14 Temperature of chamber

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. 8과 Fig. 9는 당량비 1.0에서 라디칼 인젝터가 있는 경우와 없는 경우 시간에 따른 연소실 내의 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 상승

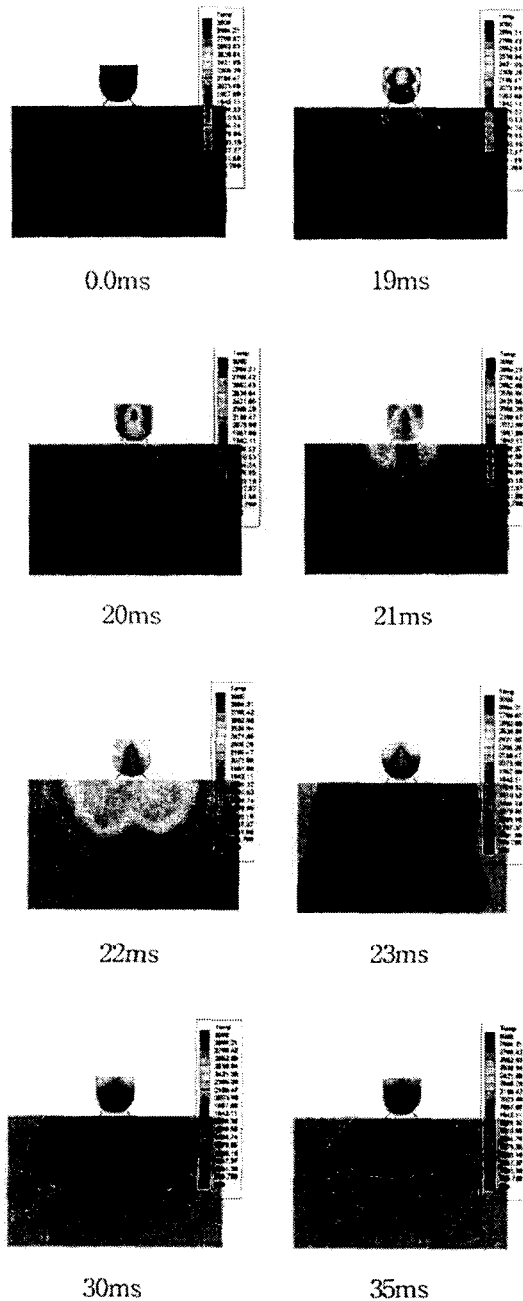


Fig. 15 Temperature of chamber

한다. 이것은 라디칼 인젝터에 의한 다점 착화로 급속 연소가 이루어지기 때문으로 판단된다. 당량비가 0.7로 희박해지면 라디칼 인젝터가 있는 경우와 없는 경우의 차이는 더욱 커지게 된다.(Fig 10, 11).

Fig. 12와 Fig. 13은 당량비 변화에 따른 연소실

내 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. 14와 Fig. 15는 주실의 당량비가 1.0일 때 SI방식과 RI방식의 연소실내부의 온도변화를 보여준다.

라디칼인젝터가 없는 경우 10ms에서 최초 점화점에서 시작되는 연소는 40ms까지 빠르게 진행되어 온도를 상승시킨 후 50ms 이후 서서히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 라디칼인젝터가 있는 경우 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.

4. 결론

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

- (1) 라디칼 인젝터가 있는 경우 급속도로 라디칼을 분출시켜 다점착화가 활발해지며 연소가 급속히 이루어진다.
- (2) 라디칼 인젝터가 있는 경우는 당량비가 감소하여도 연소기간이 크게 증가하지 않는다.
- (3) 당량비가 희박한 조건에서 라디칼 인젝터가 있는 경우 그 효과는 더욱 크다.

참고문헌

- (1) Gaydon, A.G. and Wolfhard, H.G., 1970, *Flames, Their Structure, Radiation and Temperature* (3rd edition), London, Chapman and Hall Press.
- (2) Gaydon, A.G., 1957, *Spectroscopy of flames*,

- Wiley Press.
- (3) Kawabata, Y. Nakagawa, K. and Shoji, F., 1998, "Operating Characteristics of Natural Gas Fueled Homogeneous Charge Compression Ignition," Energy Technology Research Institute Vol.8.
- (4) Gentili, R., Stefano F., Leonardo T., Patrice H. and Jacques L., 1997, "Experimental Study on ATAC (Active Thermo-Atmo Sphere Combustion) in a Two-Stroke Gasoline Engine," SAE Paper 970363.
- (5) Gaydon, A.G. and Wolfhard, H.G., 1970, *Flames, Their Structure. Radiation and Temperature* (3rd edn), London, Chapman and Hall Press.
- (6) Gaydon, A.G., 1957, *Spectroscopy of Flames*, Wiley Press.
- (7) Kong, S. and Ricart, L.M. and Reitz, R.D., 1995, "In-cylinder Diesel Flame Imaging Compared with Numerical Computations," SAE 950455.
- (8) Nagaoka M., Kawazoe, H. and Naomi N., 1994, "Modeling Fuel Spray Impingement on a Hot Wall for Gasoline Engines," SAE 940525.
- (9) Stephenson, P.W. and Rutland, C.J., 1995, "Modeling the Effects of Intake Flow Characteristics on Diesel Engine Combustion," SAE 950282.