

수정 Lagrangian model을 이용한 선회 비 예혼합 화염에 대한 수치적 연구

민병혁* · 김호영**† · 정진택**

Numerical Analysis for a Swirling Confined Non-Premixed Flame with Modified Lagrangian model

Min, Byoung Hyouk*, Kim, Ho Young**† and Chung, Jin Taek**

ABSTRACT

The purpose of this study is to verify that the modified Lagrangian model can predict temperature, flow and scalar fields in the high temperature recirculation region of swirling confined diffusion flame. In the meantime numerical results from EBU and Equilibrium PDF models as well as experimental results are compared with those from the modified Lagrangian model. Adaption of three different turbulent models were accompanied with this procedure. Look-up table of the ignition characteristic time scale which is one of important factors of the Lagrangian model was referred to the 11-step reduced mechanism. Eventually, results with the Lagrangian model show a good accordance with experimental results, which shows the validity of this model. Results from Chen's model differ from those of the others. Numerical results of \tilde{k} show significant deviation from experimental results for three models.

Key Words : Lagrangian Combustion Model, EBU(Eddy Break Up), PDF, RNG $k-\epsilon$

기 호 설 명

τ_{ig}	Ignition characteristic ime scale	\bar{Y}_F	Mean fuel mass fraction
τ_K	Komogorov time scale	\bar{P}	Mean probability density function
τ_M	Turubulent mixing time scale	\dot{w}_F	Spontaneous reaction rate of fuel
\tilde{w}_F	Mean reaction rate of fuel		

1. 서 론

선회유동 연소는 고온의 연소산화물의 재순환에 의하여 화염을 안정시키고, 연료와 산화제의 빠른 혼합을 얻기 위하여 일반적으로 적용되어지는 기술이다. 특히 가스터빈 연소기의 분무 특성

에 큰 영향을 주며, 연료와 생성물간의 혼합으로 인한 NOx등의 배기 물질 저감 등에 큰 영향을 주는 것으로 나타나고 있다.[1,2] 그러나 이러한 선회유동 연소에 대한 수치적 연구는 여전히 그 중요성에 비하여 정확도가 많이 떨어지고 있으며, 따라서 아직도 많은 연구가 진행되어오고 있다.

Meier등[1]은 Fig.1과 같은 TECFLAM 연소기에서 선회 구속 연소 유동에 대하여 온도와 혼합분율, 주요 성분들의 농도에 대한 joint PDF를 spontaneous Raman scattering기법을 이용하여

* 고려대 기계공학과 대학원

** 고려대 기계공학과

† 연락처, kimhy@korea.ac.kr

측정하였다. 특히 측정된 평균 혼합분율과 온도가 각각 생성된 화염의 다른 부분에 대하여 영향을 미치고 있고, 화염이 세 가지 영역, 즉 낮은 온도와 급격한 혼합분율의 변화를 보이는 곳과 높은 온도와 연료가 농후한 지역, 그리고 기연가스와 혼합구간으로 나누어짐을 나타내고 있다. 또한 수치적 방법으로 FLUENT5 code를 이용하여 해석하였으나 실험값과 오차가 크게 나타나고 있다. Repp등[2]은 동일한 연소기에 대하여 MC(Monte Carlo)-PDF 방식과 presumed PDF 방식의 연소모형을 적용하여 swirling confined diffusion flame의 다양한 성분 분포와 유동장을 해석하고 이들 두 모델의 특성을 비교하였다. Presumed PDF 모델을 화학 비평형 효과를 포함하는 ILDM(Intrinsic low dimensional manifolds) 방식에 기반을 둔 reduced mechanism과 함께 사용하였을 때, 실험값과 비교하여 연소기 축 부분의 화염 중심 재순환 영역의 범위를 크게 벗어나게 예측하였으나, 유동과 혼합영역에서의 주요특성에 대하여는 대체로 좋은 결과를 보여주었다. 뿐만 아니라 CO를 포함하는 성분들의 평균과 분산에 대하여도 좋은 결과를 보이고, MC-PDF 모델과 비교하여 선회유동에서의 예측도 비교적 가능함과 계산시간에 대한 절감도 보여주어 수치 해석적 효과에 대하여 좋은 결과를 나타내었다.

본 연구는 위의 연구들에서 사용된 선회구속연소기에 대하여 수정 Lagrangian combustion model을 사용하여 선회 연소 유동을 해석하고 실험값과 비교하여 제시한 모델을 검증하는 것을 목적으로 한다. Lagrangian 연소 모델의 특징은 반응-난류간의 상호작용을 잘 나타내며, 특히 다단계 화학반응에 기반을 둔 연소 특성 시간 척도(Ignition characteristic time scale)을 적용하여 난류 연소 유동 해석 시에 소홀히 하기 쉬운 반응에 관한 측면을 효과적으로 적용하는 것이다.[3] 또한 국부적인 소멸과 재연소 등에 대한

해석에도 좋은 결과를 나타내고 있으며, 다양한 난류 연소 유동에 대하여 이 모델을 사용한 많은 연구가 진행되어 오고 있으며[3,4,5,6,7], 최근에는 Koutmos등[9]은 Lagrangian model과 LES(Large eddy simulation)방식의 난류 모델을 적용하여 메탄 제트화염을 해석하였다. 본 연구에서는 Gonzalez등[3]에 의하여 제시된 모델에 대하여 기본적인 연소 모델(EBU-Arrhenius)으로 연료 분사 부분에 대한 과도한 반응률을 수정하였으며, 이를 실험값과 비교 검증하며, 다양한 $k-\epsilon$ 계열의 난류 모델을 적용하여 해석하였다.

2. 관련 이론

2.1 Lagrangian combustion model

Borghini등[6]에 의하여 I.E.M.(The Interaction by Exchange with the Mean) 개념으로부터 시작된 M.I.L.(Modele Intermittent Lagrangien) model은 소멸(extinction) 근처의 난류 제트 확산 화염에 대하여 좋은 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서는 이 모델에 대하여 간략하게 소개하며, 이전의 모델 적용과의 차이를 설명하겠다. I.E.M. 개념은 식(1)에서와 같이 평균값과 실측치의 특성 시간상에서의 분자 확산(혹은 미소 혼합 과정)에 의한 것이다.

$$\frac{dY_i}{dt} = \frac{(\bar{Y}_i - Y_i)}{\tau} + \dot{w}_i(Y_{i=1, \dots, N}, T) \quad (1)$$

여기서,

Y_i : 성분 i 의 순간 질량 분율

\dot{w}_i : i 성분 이외의 성분과 온도에 의한 성분 i 의 순간 반응률

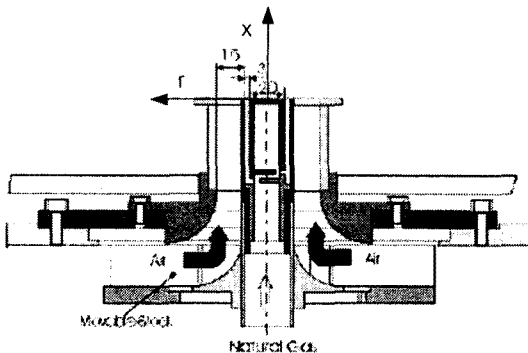


Fig. 1 TECFLAM Combustor[1,2]

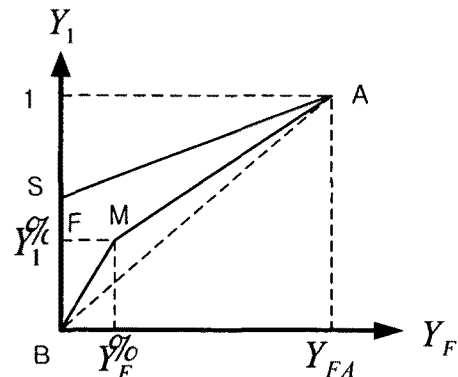


Fig. 2 $\tilde{P}(Y_1, Y_F)$ for the M.I.L. model[7]

$1/\tau$: 혼합 주파수, τ 는 난류 운동에너지 및 소산율과 $\tau \propto k/\varepsilon$ 의 관계가 있다.

식(1)은 \widetilde{Y}_i 와 \widetilde{Y}'_i, Y'_i 에 대한 Eulerian 방정식과 동일하며, 소염 근처나 Bluff-body에 의하여 안정화된 화염에 적용되는 PDF 개념과도 동일한 것으로 알려지고 있다. Fig.2에서는 이러한 I.E.M. model을 이용한 M.I.L. model의 개념을 나타내고 있다. 가상적인 Y_1 (혼합분율과 같은 불활성 물질)과 Y_F 의 공간에서 연소가 발생하지 않는 혼합의 형태인 AMB 선에서 완전 연소 이후의 평형상태를 나타내는 ASB 선으로의 이동은 순간적이며, 이때를 "sudden combustion"이라고 할 수 있으며, "순간 연소"는 다른 의미로 높은 활성화 에너지 상태로 볼 수 있다. 순간 연소에서는 반응이 반응물의 소모가 거의 없는 열 해리의 상태에서 출발하여 이후 점화지연(ignition delay)을 거치며 급속히 빨라지게 된다. 이때 대부분의 반응물이 소모되고 열 해리가 크게 나타나는 기간은 점화지연 시간에 비하여 짧은 시간이며 이러한 것이 빠른 화학반응의 개념과 일치하게 된다. 그러므로 이러한 순간연소에 대한 PDF model의 적용이 필요하다.

2.1.1 Mean Reaction Rate (\widetilde{w}_F)의 계산

연료의 평균 반응률, \widetilde{w}_F 은 식(1)의 Y_F 와 ϕ 에 대한 I.E.M. 방정식으로부터 유래된다. 이때 연소는 순간적이며, mixing time scale은 주어진 분포를 따른다. 각각에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dY_F}{dt} = \frac{\overline{Y}_F - Y_F}{\tau} + \dot{w}_F \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\overline{\phi} - \phi}{\tau} \quad (3)$$

식(2)과 (3)를 이용하여 각 구간에서의 연료의 순간 반응률을 식(4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{w}_F = \begin{cases} -\overline{Y}_F/\tau & \phi \leq \phi_s \\ -[\overline{Y}_F(1-\phi_s) - (\phi - \phi_s)] / \tau(1-\phi_s) & \phi \geq \phi_s \end{cases} \quad (4)$$

여기서, ϕ_s 는 혼합분율의 stoichiometric value를 나타내고 있다. 이와 같은 순간 반응률과 앞에서 언급한 "sudden combustion"에 대한 확률 밀도함수를 이용하면 식(5)과 같이 나타낼 수 있

다.

$$R_{LAG} = \widetilde{w}_F = \int_0^1 \widetilde{P}_\phi(\phi) \int_{\tau_{ic}(\phi)}^\infty \dot{w}_F P(\tau) d\tau d\phi \quad (5)$$

여기서 $\widetilde{P}_\phi(\phi)$ 는 혼합분율의 PDF이며, $P(\tau)$ 는 난류 시간 척도의 분포를 나타내고 있다. 전자의 경우는 Beta 함수를 이용한 presumed PDF를 사용하였으며, 후자의 경우는 Bray등[8]의 실험 결과에 따라, 지수함수 형태의 식(6)을 이용한다.

$$P(\tau) = \begin{cases} \frac{\exp(-(\tau - \tau_K)/(\tau_m - \tau_K))}{(\tau_m - \tau_K)} & \tau \geq \tau_K \\ 0 & \tau < \tau_K \end{cases} \quad (6)$$

식(5)에서 보면 τ 에 대한 적분은 $\tau_{ic}(\phi)$ 의 값에 크게 좌우되는데, 이 값보다 적은 시간 척도의 경우는 점화가 일어나지 않으므로 평균 반응률에 영향을 주지 않는다. $\tau_{ic}(\phi)$ 는 성분과 온도의 함수이다. 특히 반응을 일 단계 화학반응으로 간주하면, $\tau_{ic}(\phi)$ 는 혼합분율만의 함수이다. $\tau_{ic}(\phi)$ 는 초기에 주어진 당량비와 온도에 따른 점화시간과는 다르며, 유체 입자가 점화에 이르기까지 겪는 혼합시간으로 간주하여야 한다. Fallot등[3]은 $\tau_{ic}(\phi)$ 에 대하여 혼합분율과 산소의 질량 분율을 이용한 chemical time library를 만들어 연소유동 해석 시 Look-up table로 사용하였다. 이때 6 단계 화학반응과 완전 다단계 화학반응을 이용하였으며, 두 가지 모두 유동해석에 있어서 큰 차이를 보이지 않음을 나타내었다. 본 연구에서는 아래의 반응식과 같이 Chen[10]이 제시한 11-step Reduced mechanism을 이용하였으며, Look-up table을 만드는 순서는 다음과 같다.

- 1) 초기 \overline{Y}_{O_2} 와 $\overline{\phi}$ 을 임의로 선택한 후 단열 일단계 화학반응으로 설정하여 반응 초기의 $\overline{Y}_{CH_4}, \overline{Y}_{CO_2}, \overline{Y}_{H_2O}, \overline{T}$ 의 값을 구한다.
- 2) 이때 다단계 화학반응에 속하는 다른 성분들의 값은 0으로 놓는다. 이후 각 성분의 \overline{Y}_i 에 위에서 구한 값과 11-step reduced mechanism을 이용하여 각 성분들($i = CH_4, O_2, CO_2, H_2O, CO, H_2, CH_3, CH_2O$)의 \dot{w}_i 를 구한 다음, 식(1)을 대수적(Algebraic)으로 해석한 식(7)에 대입하여 n+1단계의 Y_i 와 온도를 계산한다.

O + H	↔ O + OH
H ₂ + O	↔ OH + H
H ₂ + OH	↔ H ₂ O + H
2H	↔ H ₂
OH + CO	↔ H + CO ₂
O ₂ + CH ₃	↔ H ₂ + H + CO
O ₂ + 0.5CH ₃ OH	↔ H ₂ + O + 1.5CH ₂ O
H ₂ O + CH ₃	↔ H ₂ + H + C ₂ H ₂
2H + 2CH ₃	↔ 3H ₂ + C ₂ H ₂
2CH ₃	↔ H ₂ + C ₂ H ₄
0.5CH ₃ OH	↔ CH ₄ + 0.5CH ₂ O

$$Y_i^{n+1} = \bar{Y}_i + (Y_i^n - \bar{Y}_i) \exp\left(\frac{-\Delta t}{\tau}\right) + \dot{w}_i \tau \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{\tau}\right)\right] \quad (7)$$

3) 2)의 단계에서 τ 값을 고정하고 Δt 을 증가시켜서 점화가 일어나는 순간(온도가 이전단계보다 급격히 증가하는 순간)의 값을 찾는다. 이때의 τ 값으로는 점화가 일어나지 않으면 다음 단계의 τ 값을 입력하고 앞의 과정을 반복한다.

4) 3)에서 구한 τ 값을 $\tau_{ig}(Y_{O_2}, \phi)$ 에 저장한다. 위의 과정을 순서대로 나타내면 Fig.3과 같다. 이때 τ 과 Δt 의 값은 $1E-6 \leq \tau, \Delta t \leq 1E-2$ 의 범위에서 사용한다. 계산된 τ_{ig} 을 나타내면 Fig.4와 같으며, 각각의 선도는 서로 다른 초기 \bar{Y}_{O_2} 값에 대한 것이며 ϕ 의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 이론 혼합비에서 급격히 값이 적어지는 것을 볼 수 있다. 이는 이 부분에서의 연소가 활발히 일어나는 것으로 보이며, \bar{Y}_{O_2} 값이 점차 증가하면서 이러한 값들도 대부분의 영역에서 높아지는 것을 볼 수 있다.

2.1.2 평균 반응률의 유동해석시의 적용

Fig.5는 유동해석 시 앞에서 계산된 평균 반응률에 대한 적용 순서를 나타낸 그림이다. 먼저 산화제와 혼합분율의 평균값과 분산에 대한 전달 방정식을 계산한 다음, 각각의 값을 이용하여 Look-up table에서의 τ_{ig} 값을 구하며, 이 값을 이용하여 식(5)의 평균 반응률을 계산한다. 이 값을 식(8)과 같이 Eddy-Break-Up model과 Arrhenius model에 의한 평균 반응률 값과 비교하여 가장 작은 값을 연소 시 연료의 평균반응률

값으로 이용한다. 이와 같은 과정을 하는 이유는 Lagrangian model의 경우, 식(4)과 같이 연료의 평균 질량 분율 값에 의하여 연료가 농후한 지역에서 반응률이 급격히 증가하여 점화가 잘 일어나지 않는 경우가 나타난다. 그러므로 이때의 반응률을 EBU-Arrhenius model을 이용하여 국부적으로 연료가 농후한 부분의 반응률이 크게 증가하는 것을 미연에 방지한다.

$$R_{FU} = \text{Min}[R_{EBU}, R_{ARR}, R_{LAG}] \quad (8)$$

위의 식에서 사용되는 각각의 반응률은 식(9)~(13)와 같다. 특히 EBU model의 경우는 성분들의 값 중 최소값을 대표값으로 한다.

$$R_{FU,EBU} = C_R \bar{\rho} \bar{Y}_{FU} \frac{\epsilon}{k} \quad (9)$$

$$R_{OX,EBU} = C_R \bar{\rho} \frac{\bar{Y}_{OX}}{s} \frac{\epsilon}{k} \quad (10)$$

$$R_{PR,EBU} = C_R \bar{\rho} \frac{\bar{Y}_{PR}}{1+s} \frac{\epsilon}{k} \quad (11)$$

$$R_{EBU} = \text{Min}[R_{FU,EBU}, R_{OX,EBU}, R_{PR,EBU}] \quad (12)$$

$$R_{ARR} = 3.3E14 \bar{\rho}^{-1.5} \cdot \bar{Y}_{FU} \cdot \bar{Y}_{OX}^{0.5} \cdot \exp(-2700./T) \quad (13)$$

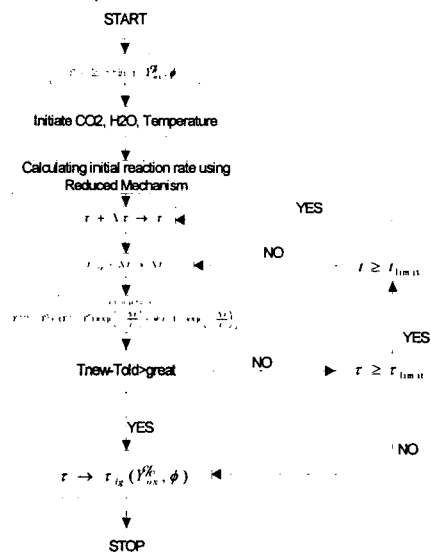


Fig. 3 Flow chart of calculating for Ignition Characteristic Time scale

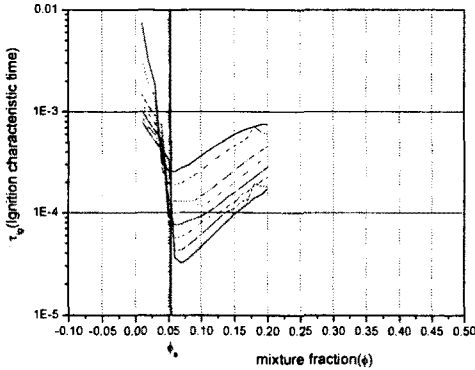


Fig. 4 Ignition characteristic time scale vs mixture fraction for various mean fraction of Oxygen

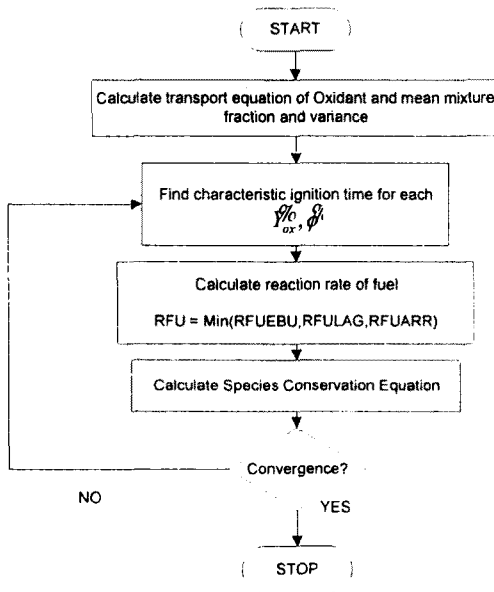


Fig. 5 Flow chart of Applying for Ignition characteristic time scale

2.2 Turbulence model

본 연구에서는 난류 연소 현상에 적용되는 여러 가지 $k-\epsilon$ 계열의 난류 모델에 대하여 비교 분석하였다. 이는 Lagrangian 과 EBU model의 방정식에 필요한 turbulent mixing time scale, $\tau_m = Rk/\epsilon$ 을 보다 정확하게 계산하기 위함이다. 본 연구에서는 표준 $k-\epsilon$ 과 Chen's extended $k-\epsilon$ [11], RNG $k-\epsilon$ model를 적용하여 비교하였다. Yakhot등[12]의 RNG (Renormalized

Group) $k-\epsilon$ model은 등방적이고 균일한 난류 유동의 경우에 대한 $k-\epsilon$ 전달 방정식을 renormalization하여 얻는다. 이때 각 계수들과 함수들은 이론적으로 얻어지는 것으로 실험에 의하여 구한 값은 아니다. 그러므로 이 모델은 변형 없이 광범위하게 사용되고 있다. 식(14)~(15)는 난류 에너지와 소산율에 대한 각각의 전달 방정식을 나타낸 것이며, 방정식에 사용된 계수들은 아래와 같다. RNG $k-\epsilon$ model은 표준 $k-\epsilon$ 와 비교하여, 빠른 변형률과 유선이 있는 유동의 경우 turbulent viscosity가 작게 나타나기 때문에 이러한 유동의 경우 모델의 적용에 좋은 효과를 나타내고 있다.

$$u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_K - \epsilon \quad (14)$$

$$u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} P_K \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (15)$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad P_K = 2\mu_T \overline{S_{ij}S_{ij}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

여기서

$$C_\mu = 0.085, \quad C_{1\epsilon} = 1.42 - \eta \left(\frac{-\eta/\eta_0}{1 + \beta\eta^3} \right),$$

$$C_{2\epsilon} = 1.68, \quad \sigma_k = 0.7179, \quad \sigma_\epsilon = 0.7179$$

$$\eta = \frac{Sk}{\epsilon}, \quad S = (2 \overline{S_{ij}S_{ij}})^{1/2}, \quad \beta = 0.015, \quad \eta_0 = 4.38$$

3. 결과 및 고찰

3.1 선화연소유동에 대한 연소모델 적용 및 타 연소모델과의 비교

해석시의 경계 조건 등은 참고문헌[1,2]에서와 동일하게 적용하였으며, 특히 경계조건으로 설정한 속도 분포 등은 연소기 입구 1mm위치에서 측정된 값을 기준으로 공급되는 유량과 비교하여 설정하였다. Radiation에 의한 열전달을 고려하여 Flux model을 적용하였으며, 이때의 흡수계수는 0.5로 하였다. 제안된 연소모델의 검증과 비교를 위하여 EBU-Arrhenius model과 Equilibrium PDF model을 사용하였다. 이때 세 경우 모두 난류 모델은 RNG $k-\epsilon$ model을 사용하였다.

Fig.6은 세 가지 연소모델을 적용하였을 때의 온도분포를 나타낸 그림이다. Meier[1]등은 실험

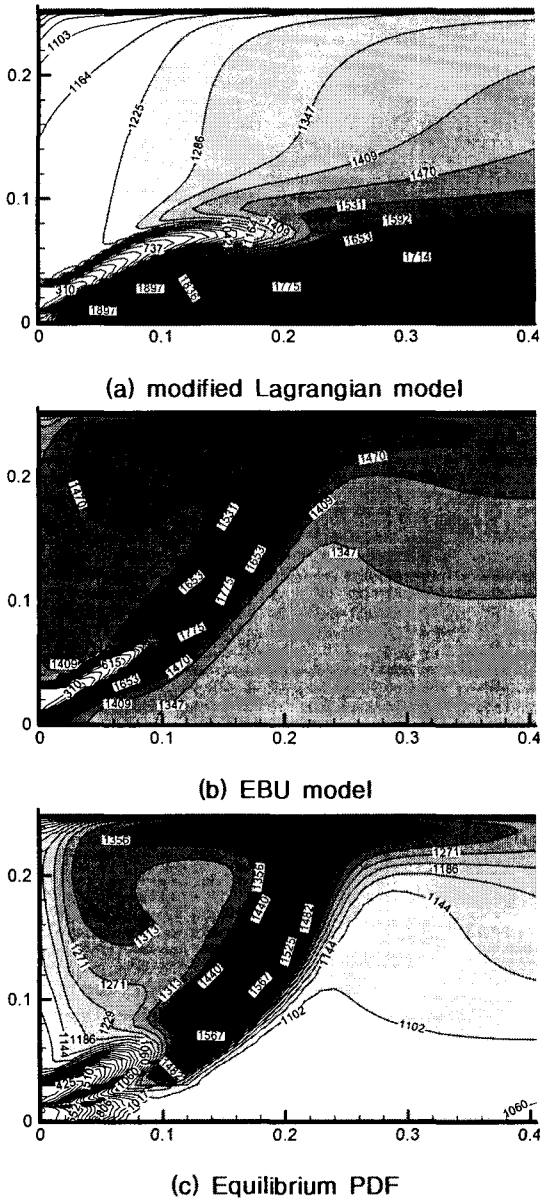


Fig. 6 Contours of mean temperature for using each combustion model

을 통하여 연소기 축을 중심으로 하는 재순환 영역에서 높은 온도를 보이고 있으며, 이는 외부로의 열전달 등에 의한 열 손실이 없는 것으로 나타내었다. Lagrangian 연소 모델을 사용한 Fig.6(a)은 실험에 의하여 관찰된 높은 온도의 재순환 영역을 잘 나타내고 있다. 그러나 Fig.6(b)과 (c)에서 다른 연소 모델을 사용하였을 경우를 보면, 모두 연소기 중심의 재순환 영역에서보다 공급된 공기와 연료의 혼합된 전단면에서부터 높은 온도가 나타나며, 이러한 지역은 연소기 벽으로 향하고 있다. 이는 다른 연소모델의

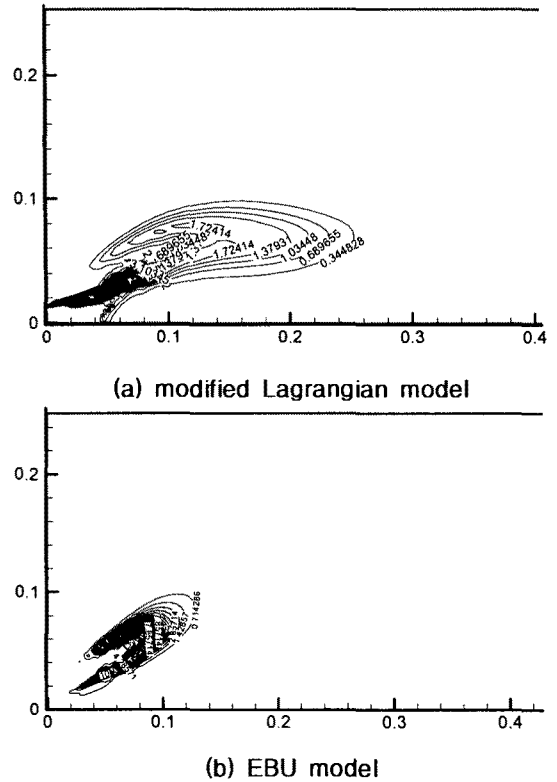


Fig. 7 Contours of reaction rate for using two combustion model

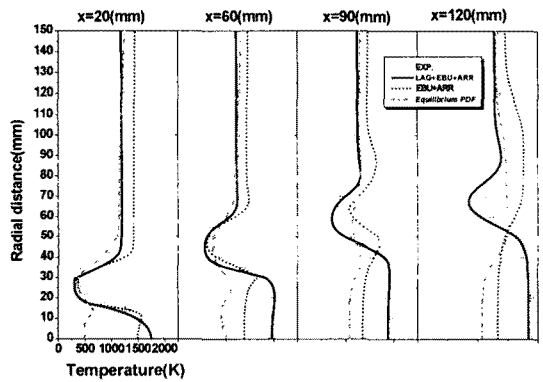


Fig. 8 Radial distributions of temperature at several axial distance for each model

경우, 낮은 온도의 연료와 공기와의 혼합으로 인하여 노즐 앞부분에서의 점화가 되지 않고 있지만, Lagrangian model의 경우는 낮은 온도에서도 점화가 되고 있기 때문이다. Fig.7은 Lagrangian model과 EBU model을 사용하였을 때의 연료의 반응률을 도시한 그림이다. Fig.7(a)에서 보면, 반응률이 가장 큰 지점은 연료와 공기가 처음으로 접하는 곳과 근접한 지역에서 나타나며,

이후의 지역에서는 반응물이 비록 앞에서의 값보다 작게 나오지만, 연료와 공기가 접하는 부분을 중심으로 넓게 분포하고 있다. 이와는 다르게 Fig.7(b)에서 보면 연소는 국부적으로 일어나고 있으며, 특히 반응이 연료와 공기가 접하는 부분에서만 일어나고 있다. 이 결과는 Lagrangian model의 특징을 잘 보여주는 것으로 국부적인 소염과 재연소의 과정을 나타내는 것으로 볼 수 있다. Fig.8은 연소기 축을 따른 각 지점에서의 반경방향 온도분포를 실험값과 비교하여 나타낸 것이다. Lagrangian model에 의한 해석결과는 연소기 앞부분부터 시작하여 중심부의 재순환 영역에서의 온도분포가 실험값과 잘 맞고 있으며, 중간의 온도가 낮은 부분-Fig. 6(a)에서보면 선회공기가 공급되어지는 부분-에서는 축을 따라 내려갈수록 실험값과 오차를 나타내고 있다. EBU model을 사용하였을 때는 연소기 앞부분에서의 중심부 온도부분이 다소 실험값과 같은 결과를 나타내고 있지만, 출구로 나갈수록 실험값과 다르게 나타나고 있다. 이는 높은 온도영역이 대각선으로 중심부에서 벽으로 향하고 있기 때문이다. 후자의 두 모델들은 중심부 이외의 지역에서는 예측이 가능함을 보여주고 있다.

Fig.9~11은 축의 네 지점에서의 반경방향에 대한 각 방향의 평균 속도성분의 분포를 나타낸 그림이다. Fig.9에서 Lagrangian model을 사용하였을 경우 연소기 입구 근처($x=20mm$)에서는 축 방향 속도성분의 최고점이 실험값에 비하여 축 중심으로 다소 치우쳐 있다. 이러한 실험값과의 차이는 출구로 나갈수록 없어지다가 다시 커지고 있으며, 이런 경향은 다른 속도 성분에서도 나타나고 있다. 특히 선회속도를 보면, EBU와 PDF model을 사용하였을 때 모든 지점에서 연소기 중심부($0 \leq r \leq 20$)의 속도가 실험값에 비하여 낮게 나타나고 있지만 Lagrangian model의 경우는 다소 크게 나타나고 있다. 이는 이 모델을 사용하였을 경우, 중심부분에서의 높은 온도를 예측하고 이로 인하여 이 부분에서의 속도가 증가하기 때문이다.

Fig.12~13은 반경방향에 대한 각 지점의 평균 CH_4 와 O_2 의 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 12에서 보면 Lagrangian model에 의한 값과 실험값이 대체로 일치하며, 특히 중심부에서의 분포가 좋은 결과를 나타내고 있다. 그러나 다른 두 model 중 PDF의 경우는 실험값과의 오차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 연료와는 다르게 O_2 분포의 경우는 전반적으로 세 가지 모델 모두 실험값과 근접하고 있음을 보여주고 있다.

3.2 난류 모델에 대한 비교

Fig.14는 세 가지 $k-\epsilon$ model들을 사용하였을

때의 축 방향의 네 지점에 대한 반경방향 온도 분포를 나타내는 그림이다. Chen's model을 적용하였을 때, 중심부분에서의 고온영역에 대한 온도가 실험값에 비하여 낮지만 다른 두 모델의 경우는 큰 차이가 없게 나타나고 있다.

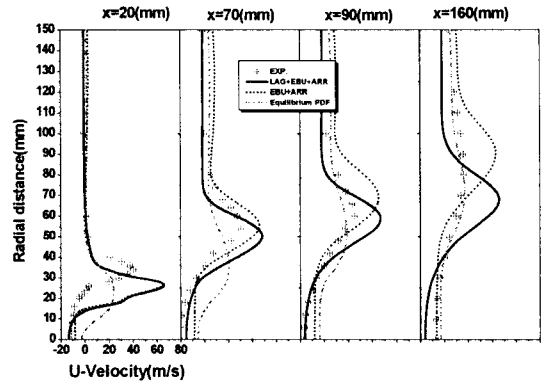


Fig. 9 Radial distributions of U-velocity at several distance for each models

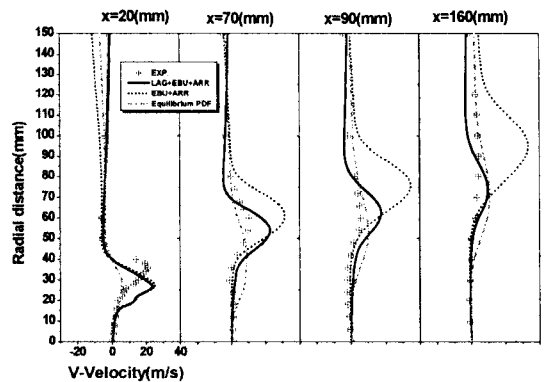


Fig. 10 Radial distributions of V-velocity at several distance for each models

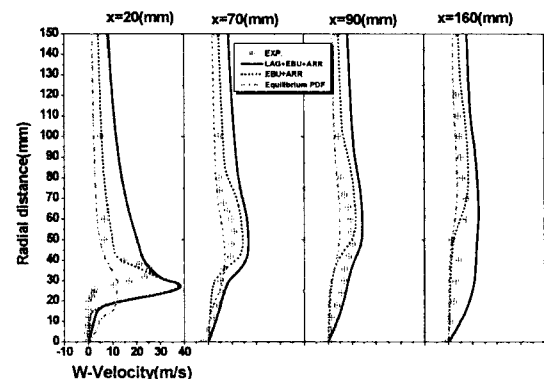


Fig. 11 Radial distributions of W-velocity at several distance for each models

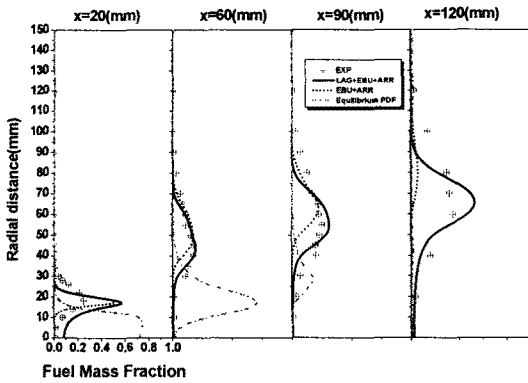


Fig. 12 Radial distributions of Fuel mass fraction at several distance for each models

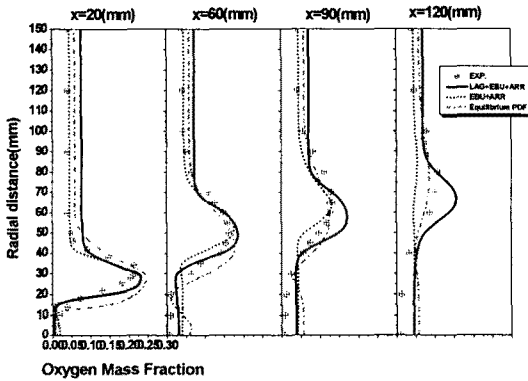


Fig. 13 Radial distributions of Oxygen mass fraction at several distance for each models

Fig.7(a)과 Fig.15의 반응률 분포에 대한 그림에서는 세 가지 난류 모델 모두가 EBU model을 적용하였을 때의 공기와 연료가 맞닿은 좁은 영역에서 반응이 일어나는 것보다는 넓은 지역에서 반응이 진행되는 것을 나타내고 있으며, Chen의 모델의 경우는 반응률 분포가 다른 모델들에 비하여 영역이 작아진 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 언급한 온도 분포의 원인으로 보인다. Fig.16은 반경방향 속도성분의 축 방향의 변화를 나타낸 그림이다. 온도분포와 마찬가지로 Chen's model만이 다른 뿐 큰 변화가 없음을 나타내고 있다. 그러나 최대속도의 위치는 세 가지 경우 모두 동일하게 실험값보다 중심부로 치우쳐지고 있다. Fig.17은 평균 난류운동에너지를 나타낸 그림이다. 모든 지점에서 중심의 재순환 영역에서는 표준 $k-\epsilon$ 과 RNG model에 의한 해석결과가 실험값보다 다소 크게 나타나고 있지만, Chen's model을 사용한 결과는 실험값보다 오히려 낮게 나타나고 있다. 중심부분의 k 값의 정점부분은

실험값에 비하여 낮게 예측되고 있지만 출구로 나아갈수록 반전되어 높게 예측되고 있으며, 이후의 벽면으로 향하는 부분에서는 대체로 실험값과 일치하는 경향을 보이고 있다.

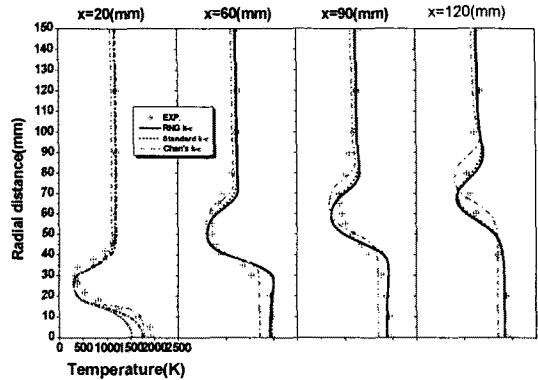
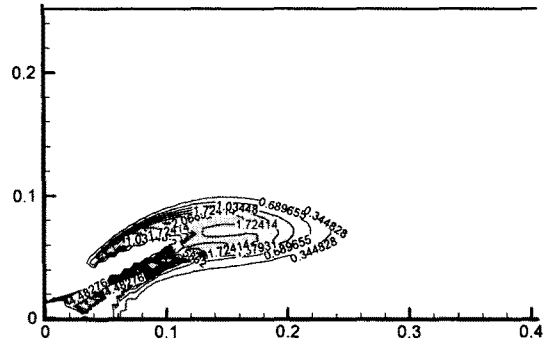
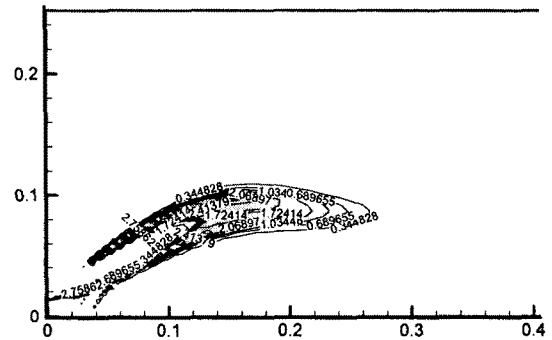


Fig. 14 Radial distributions of temperature at several distance for each turbulent models



(a) Chen's $k-\epsilon$ model



(b) standard $k-\epsilon$ model

Fig. 15 Contours of reaction rate for two turbulent model

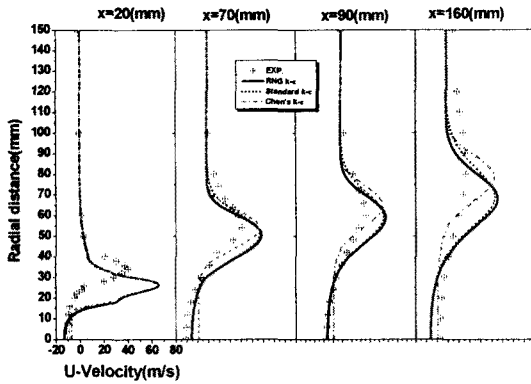


Fig. 16 Radial distributions of U-velocity at several distance for each turbulent models

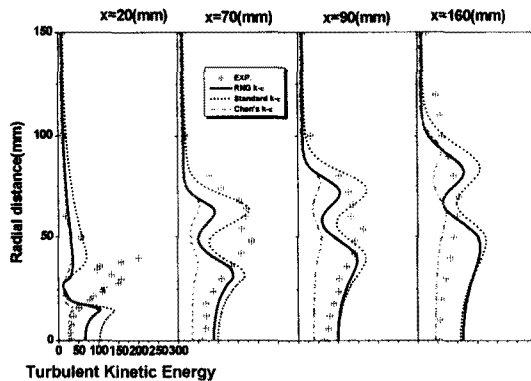


Fig. 17 Radial distributions of mean turbulent kinetic energy at several distance for each turbulent models

결론

본 연구는 선회 구속 비 예혼화염에 대하여 각각 세 가지의 연소모델과 난류 모델을 적용하여 해석한 결과를 실험값과 비교하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 세 가지 연소 모델을 적용하였을 때, 실험에서 관찰되는 연소기 중심부의 고온의 재순환 영역은 Lagrangian model을 사용하였을 때만 나타나고 있으며, 이때의 해석 결과는 실험값에 근접하는 것으로 나타나고 있다. 또한 이후의 다른 영역에서도 실험값과 비교하여 큰 오차를 나타내지 않으며 성분들(CH₄, O₂)에 대한 해석결과도 실험값에 근접함을 나타내고 있다. 그러나 속도 성분들에 대한 결과는 최대 속도의 위치가 중심으로 다소 치우치는 결과를 보이고 있으며, 이는

Lagrangian model을 사용하였을 때 나타나는 재순환 영역에서의 높은 온도의 영향으로 보인다.

2) Lagrangian model을 사용하였을 때에 대한 RNG, 표준, Chen's $k-\epsilon$ 등의 세 가지 난류 모델을 적용한 결과는 온도장 및 속도 분포 등에 대하여 모두 크게 차이하지 않고 있으나, Chen's model의 경우는 다른 모델에 비하여 연소기 중심부의 고온 재순환 영역에서의 온도가 다소 낮게 나타나고 있다. 또한 τ 의 값은 적용된 난류 모델 모두 실험값과 다소 차이를 보이고 있다.

후기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 대하여 감사 드립니다.

참고문헌

[1] W. Meier, O. Keck, O. Kunz and W. Stricker, "Investigations in the TECFLAM Swirling Diffusion Flame: Laser Raman Measurements and CFD calculations", *Applied Physics B* 71, 2000, pp.725-731.
 [2] S. Repp, A. Sadiki, C. Schneider, A. Hinz, T. Landefeld and J. Janicka, "Predicting of Swirling Confined Diffusion Flame with a Monte Carlo and a Presumed PDF Model", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 45, 2002, pp. 1271-1285.
 [3] L. Fallot, M. Gonzalez, R. Elamraoui and M. Obounou, "Modelling Finite-Rate Chemistry Effects in Nonpremixed Turbulent Combustion: Test on the Bluff-Body Stabilized Flame", *Combustion and Flame* 110, 1997, pp.298-318.
 [4] M. Obounou, M. Gonzalez and R. Borghi, "A Lagrangian model for Predicting Turbulent Diffusion Flames with Chemical Kinetic Effects", *Twenty-fifth Symposium on Combustion*, 1994, pp.1107-1113.
 [5] M. Gonzalez and R. Borghi, "A Lagrangian Model for Turbulent Combustion; Theoretical Basis and Comparisons with Experiments", *Turbulent Shear Flows* 7, 1991, pp.293-311.
 [6] R. Borghi and M. Gonzalez, "Application of Lagrangian Models to Turbulent Combustion", *Combustion and Flame* 63, 1986, pp.239-250.
 [7] R. Borghi, "Turbulent Combustion Modelling", *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1988, Vol.14, pp.245-292.

- [8] K. N. C. Bray, P. A. Libby and J. B. Moss, "Scalar Length Scale Variations in Premixed Turbulent Flames", *Twentieth Symposium on Combustion*, 1984, pp.421-427.
- [9] P. Koutmos, "Simulations of Localized Extinction in Turbulent CH₄ Jet Flames Using a Lagrangian Model for Reactedness", *Acta Astronautica* 46, 2000, pp.47-53.
- [10] J. Y. Chen, 11-step reduced chemistry based on Warnatz' detailed CH₄ mechanism, 1998, <http://www.ca.sandia.gov/tdf/3rdWorkshop/ch4mech.html>
- [11] Y. S. Chen and S. W. Kim, "Computation of Turbulent Flows Using an Extended $k-\epsilon$ Turbulent Closure Model", *NASA CR-179204*, 1987.
- [12] V. Yakhot and S. A. Orszag, "Development of Turbulent models for Shear Flows by a Double Expansion Technique", *Physics of Fluids A* 4(7), 1992, pp.1510-1520.