가스터빈 모사 연소기에서 선회 확산 화염의 연소특성 해석

정대로* · 허강열**†

Simulation of Methane Swirl Flame in a Gas Turbine Model Combustor

Dae-Ro Joung*, Kang-Yul Huh**†

ABSTRACT

The firtst-order conditional moment closure (CMC) model is applied to CH4/air swirl diffusion flame in a gas turbine model combustor. The flow and mixing fields are calculated by fast chemistry assumption with SLFM library and a beta function pdf for mixture fraction. RNG k-e model is used to consider the swirl flame in a confined wall. Reacting scalar fields are calculated by elliptic CMC formulation with chemical kinetic mechanism, GRI Mech 3.0. Validation is done against measurement data for mean flow and scalar fields in the model combustor [1]. Results show reasonable agreement with the mean mixture fraction and its variance, while temperature is overpredicted as the level of local extinction increases. The second-order CMC model is needed to consider local extinction with considerable conditional fluctuations near the nozzle.

Key Words : Conditional moment closure (CMC), Swirl flow, Scalar dissipation rate, Steady laminar flamelet model (SLFM)

기 호 설 명

κ	Scalar dissipation rate	h	Enthalphy
TKE(k)	Turbulence kinetic energy	$<\|>$	Ensemble average
ED(ϵ)	Turbulent energy dissip rate	μ_t	Turbulence dynamic viscosity
η	요동하는 혼합분율 ξ에 대한 표본 공간 변수	L_c	Characteristic length
Y_i	Mass fraction of species i	$C\mu$	RNG k-e model constant, 0.085

1. 서 론

선회 유동(swirl flow)을 이용한 연소방식은 소형 연소기에서 빠르고 효율적인 혼합에 의해 에너지 효율을 높이고 고온 생성물의 재순환에 의하여 넓은 작동 범위에 걸쳐 안정된 화염을 유지하므로 실용 연소 시스템에서 광범위하게 사용되고 있다. 최근, 실험실 스케일의 버너로부터 실용 연소기에 이르기까지 난류 연소의 국소 화염구조와 스칼라 값의 측정에 레이저 측정 기술이 적용되고 있다. Stuttgart 가스터빈 모사 연소기 [1]는 상온, 상압 상태의 CH_4/air 선회 확산 화염에 대하여 혼합분율(mixture fraction), 농도, 난류유동 등의 변수에 대한 측정이 이루어진 테

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

스트 장치이다. 노즐 근처에서 고속의 입구 유동으로 인하여 국소 소염이 발생하며 닫힌 공간에서의 선회 유동으로 인하여 내·외부에 재순환 영역을 형성한다.

기존의 표준 k-e 모델은 닫힌 공간에서 선회 유동이 있을 때 난류 유동장을 예측하는데 만족스러운 결과를 주지 못하였다. [2] 일반적으로 Damköhler수가 큰 경우, 모든 영역에서 임의의 낮은 스칼라 소산율, $\kappa(100\ s^{-1})$를 갖는 층류 화염편 구조를 가정할 수 있으나 국소적인 소염(extinction)이 일어나는 경우에는 소염에 의한 밀도 차이를 무시할 수 없기 때문에 합리적인 가정이 될 수 없다. 본 연구에서는 RNG k-ϵ 모델과 스칼라소산율에 따른 정상 층류 화염편(SLFM) 구조를 갖는다는 가정에 의해 선회유동에 의한 재순환 유동장을 계산하였다. 이로부터 얻어진 유동장에 따라 일차 CMC 모델을 적용하여 혼합분율 공간에서 난류 화염 구조를 계산하였으며 가스 터빈 모사 연소기의 유동장, 혼합장 그리고 화염구조에 대하여 측정 결과와의 비교를 통해 타당성을 검증하였다.

2. 수학적 모델

2.1 지배 방정식

지배방정식은 비직교 격자계에 대한 유한 체적법(Finite Volume Method)을 사용하여 이산화하였다. 유동장은 선회 유동에 의한 재순환 영역의 합리적인 예측이 가능한 RNG k-ϵ 모델을 적용하였다. RNG k-ϵ 모델은 standard k-ϵ 모델과 비교하여 ϵ방정식에서 평균 변형률에 따른 추가항과 상이한 모델 상수를 갖는다. Favre pdf는 밀도가중 평균값과 혼합분율의 분산(mixture fraction variance)항으로부터 베타 함수를 가정하여 계산하였다.

화학종 i의 조건 평균 질량 분율은 다음과 같이 정의 된다.

$$Q_i(\eta,\mathbf{x},t)=\langle Y_i|\eta\rangle\equiv\langle Y_i(\mathbf{x},t)|\xi(\mathbf{x},t)=\eta\rangle \quad (1)$$

분자확산계수가 모든 화학종에 대해서 같다고 가정하면 난류 확산 연소에서 화학량론(stoichiometry)에 의해 주요 연소 특성이 결정되므로 혼합분율을 매개변수로 사용한 것은 합리적인 선택이다.

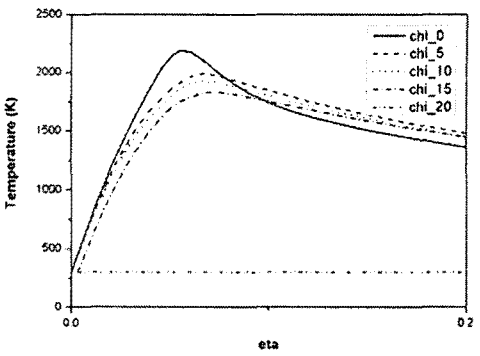

Fig. 1 Conditional mean temperatures according to the scalar dissipation rate, chi

Reynolds 수가 큰 유동장에서 조건평균된 Y_i와 h에 대한 지배방정식은 다음과 같다. [3]

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t}+\langle\mathbf{u}|\eta\rangle\mathrm{g}\nabla Q_i+\frac{\nabla\mathrm{g}\left(\left\langle\mathbf{u}''Y_i''\middle|\eta\right\rangle P(\eta)\rho_\eta\right)}{P(\eta)\rho_\eta}=\langle N|\eta\rangle\frac{\partial^2 Q_i}{\partial\eta^2}+\langle w_i|\eta\rangle \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_h}{\partial t}+\langle\mathbf{u}|\eta\rangle\mathrm{g}\nabla Q_h+\frac{\nabla\mathrm{g}\left(\left\langle\mathbf{u}''h''\middle|\eta\right\rangle P(\eta)\rho_\eta\right)}{P(\eta)\rho_\eta}=\langle N|\eta\rangle\frac{\partial^2 Q_h}{\partial\eta^2} \quad (3)$$

여기서 ρ_η는 $<\rho|\eta>$를 의미하며 N 은 스칼라소산율(scalar dissipation rate)이고 $D\nabla\xi\cdot\nabla\xi$로 정의된다. Y'', h'' 과 u'' 은 조건평균한 값에 대한 조건 섭동을 나타낸다. 비선형 조건평균 화학 반응율은 일차 닫힘의 경우 다음과 같이 근사되어진다.

$$\langle w_i|\eta\rangle\approx w_i(Q_1,\ldots,Q_n,Q_h) \quad (4)$$

화학종의 Favre 평균 질량 분율은 다음과 같이 pdf를 적분한 형태로 나타낼 수 있다.

$$\overset{\circ}{Y}_i(\mathbf{x},t)=\int_{\eta=0}^{\eta=1}Q_i(\eta,\mathbf{x},t)\overset{\circ}{P}(\eta,\mathbf{x},t)\,d\eta \quad (5)$$

평균 혼합분율과 분산에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{\xi})}{\partial t}+\nabla\cdot(\bar{\rho}\mathbf{u}\tilde{\xi})=\nabla\cdot\left[\frac{\mu_t}{Sc_\xi}\nabla\tilde{\xi}\right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{\xi}''^2)}{\partial t}+\nabla\cdot(\bar{\rho}\mathbf{u}\tilde{\xi}''^2)=\nabla\cdot\left[\frac{\mu_t}{Sc_{\xi''^2}}\nabla\tilde{\xi}''^2\right]+\frac{2\mu_t}{Sc_{\xi''^2}}(\nabla\tilde{\xi})^2-\bar{\rho}\tilde{\chi} \quad (7)$$

이 값들로부터 각 격자점에서의 beta pdf를 구할 수 있다. $S_{c\xi}$와 $S_{c\xi''}$은 난류 Schmidt 수를 의미하며 모두 0.68로 하였다. [4]

2.2 테스트 case

Stuttgart 가스 터빈 모사 연소기에서 상온, 상압 상태의 선회유동이 있는 CH_4/air 확산 화염에 대한 실험 데이터를 이용하여 난류 연소 모델 검증을 수행하였다. 실험 장치는 Fig. 2와 같다. 연소실은 85 × 85 mm의 사각 단면을 가지고 높이는 114 mm이다. 상온의 선회 공기가 지름 15 mm인 central 노즐과 내경 17 mm, 외경이 25 mm에서 40 mm로 굴곡진 annular 노즐을 통해 공급되고 공기 노즐 사이에서 고리 모양으로 72개의 작은 채널(0.5 × 0.5 mm)들을 통해 비선회 CH_4가 공급된다. 바깥쪽 annular 노즐의 출구에 해당하는 위치가 h = 0인 높이에 해당한다.

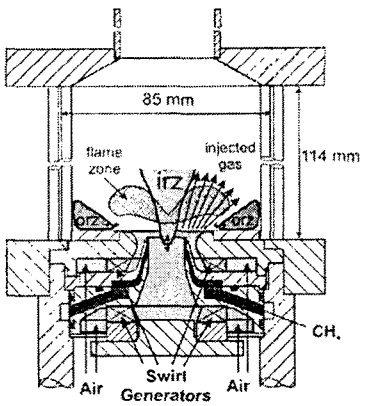

Figure 2. A schematic drawing of the Stuttgart model combustor

Table 1. Test conditions

Air (g/min)	CH4 (g/min)	$P_{th}(kW)$	Φ_{glob}	f_{glob}	$T_{glob}(K)$
1095	41.8	34.9	0.65	0.037	1750

p_{th}, thermal power ; ϕ_{glob}, equivalence ratio for the overall mixture ; f_{glob}, mixture fraction for the overall mixture ; T_{glob}, adiabatic temperature for the overall mixture with inlet temperature T_0 = 295 K

Table 1은 실험에서 선회비가 약 0.9에 해당하는 경우의 주요 운전 조건을 나타낸다.

2.3 수치 해석

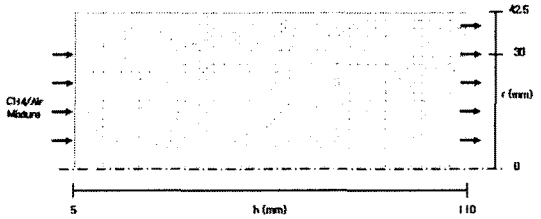

Figure 3. Computational grid

유동장은 2차원 축대칭으로 가정하였고 축방향과 반경방향에 대하여 110 × 42의 격자로 나누어 SIMPLE 알고리즘을 이용하여 계산하였다. 실험 에서는 central 노즐 출구인 h = -4.5 mm인 위치에서 CH_4와 공기가 공급되지만 강한 재순환 영역이 노즐 출구까지 영향을 미치기 때문에 CH_4와 공기로 명확히 구분하여 입구 경계조건을 주는 것이 부적절하다. 따라서 수치해석을 위한 입구 경계조건으로 높이 h = 5 mm인 위치에서의 속도, 혼합분율 및 분산 그리고 TKE의 실험값을 사용하였다. 비록 반경방향 r = 30 mm까지 측정 데이터가 주어졌으나 벽 근처의 속도나 다른 스칼라 값들이 축 근처에 비해 매우 작기 때문에 반경 30 mm까지를 입구 경계조건으로 사용하였다. 주어진 ED는 노즐 외부직경 L_c를 60 mm로 하여 계산하였다.

$$TKE=\frac{1}{2}(u'^2+v'^2+w'^2) \quad (8)$$

$$ED = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} \cdot TKE^{\frac{3}{2}}}{0.07 \times L_c} \quad (9)$$

연소가 활발히 진행되는 경우 일반적으로 전 영역에 대하여 임의의 스칼라 소산율(100 s^{-1})에 대한 층류 화염편을 가정하였으나 이번 실험의 경우와 같이 국소적인 소염이 일어나는 경우에는 평균 밀도의 차이가 커지므로 합리적인 가정이 될 수 없다. 그러므로 유동장 결과에 따라 각 격자점에서의 TKE와 ED 그리고 혼합 분율 분산으로부터 모델링된 κ에 따른 층류 화염편 구조를 가정하여 계산을 수행하였다.

CMC 계산에 있어서는 조건평균 값들의 공간상에서의 변화가 크지 않은 점을 고려하여 축방향과 반경방향으로 각각 50 mm와 42.5 mm의 도메인에 대하여 27 × 22의 격자를 사용하였다. CH_4 연소 반응에는 53개의 화학종과 325개의 반응단계로 이루어진 GRI Mech 3.0 [5]과 28개의 화학종, 53개의 반응단계로 이루어진 Hewson NOx 메카니즘 [6]을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 선회 확산 화염 해석 검증

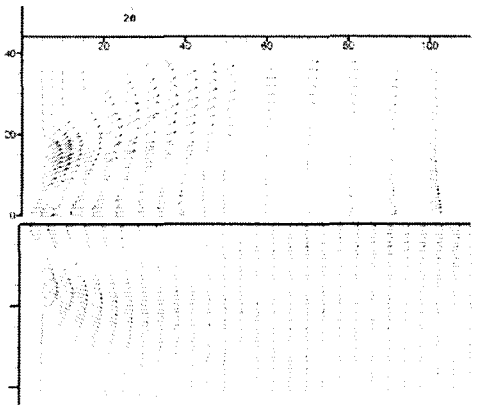

Fig. 4 Comparison of velocity fields : experiment (up) and simulation (down)

유동장에 대한 속도 벡터의 측정값과 예측값을 비교한 결과는 Fig. 4와 같다. 연소기의 축을 따라서 내부 재순환 영역이 형성되고 벽 근처에서 외부 재순환 영역이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 외부 재순환 영역은 측정값과 예측값 모두 h ≈ 30 mm까지 생기지만, 내부 재순환 영역의 크기는 적게 예측되고 있다. 모든 격자점에서 h = 5mm에서의 값을 입구 경계조건으로 줄 때 경계값이 존재하는 최대 위치의 직경을 L_c로 하여 계산하였다. 여기서 L_c는 대략 연료 노즐의 100배, 공기 노즐의 5배에 해당하는 값으로 식(9)에서와 같이 ED값을 결정한다.

Fig. 5, 6, 7은 축방향 높이에 따른 반경방향의 Favre 평균 혼합 분율과 분산, TKE 와 온도 분포를 나타낸다. h = 10mm의 상류 영역(upstream) 결과에 따르면, 입구 경계조건으로서 ED를 작게 산정한 결과 난류에 의한 확산의 영향이 커지면서 측정값보다 혼합분율의 분포가 더 균일하게 나타났다. 실험에서는 강한 난류로 인한 좁은 범위의 내부 재순환 영역에 의해 평균 혼합 분율이 높아지고 이로 인하여 온도 또한 높아졌다. 혼합 분율의 분산이 매우 작은 스케일임을 고려하면 혼합 분율과 분산 그리고 TKE에 대한 예측값은 측정값과 비교적 잘 일치하고 있다.

CMC 결과는 평형상태의 화염구조를 초기값으로 하여 GRI 3.0 메커니즘을 사용하여 계산하였다. 실험에서 전체적인 연소장의 형태를 보면 노즐 입구 근처에서 높은 κ값으로 인하여 국소 소염이 발생하고 하류 영역(downstream)으로 갈수록 κ값이 작아지면서 반경방향으로 균일한 고온부를 형성한다. Fig. 8, 9, 10의 화염구조를 보면 측정 데이터들의 조건 섭동이 심한 것을 알 수 있는데 이로 인하여 실험에서 국소적인 소염이 일어나는 것으로 유추할 수 있다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 소염은 $\kappa \approx 20$ 근처에서 발생한다. 식(10)에서 각 격자점에서의 TKE, ED 그리고 혼합 분율 분산으로부터 계산된 κ로부터 SLFM에서 계산된 혼합 분율에 대해 조건 평균한 밀도를 유동장에서 사용하도록 하였는데, 임의의 위치에서 κ값이 증가하는 경향은 찾아 볼 수 없고 입구 근처의 좁은 영역에서 경계조건으로부터 계산된 κ값이 빠르게 소멸되는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인하여 전체적으로 κ값이 낮게 예측이 되었고 따라서 온도 또한 소염의 영향을 제대로 반영하지 못하여 높게 예측이 되었다. 일차 CMC식에 대한 계산 결과는 κ가 작은 경우에는 대체로 실험 데이터와 잘 일치하지만 κ가 큰 경우에 대해서는 섭동에 대한 추가적인 모델링을 포함하는 이차 CMC식을 이용한 계산이 필요함을 보여준다. [7] 하류영역에서는 실험 또한 κ값이 작기 때문에 계산 결과와 잘 일치하고 있다.

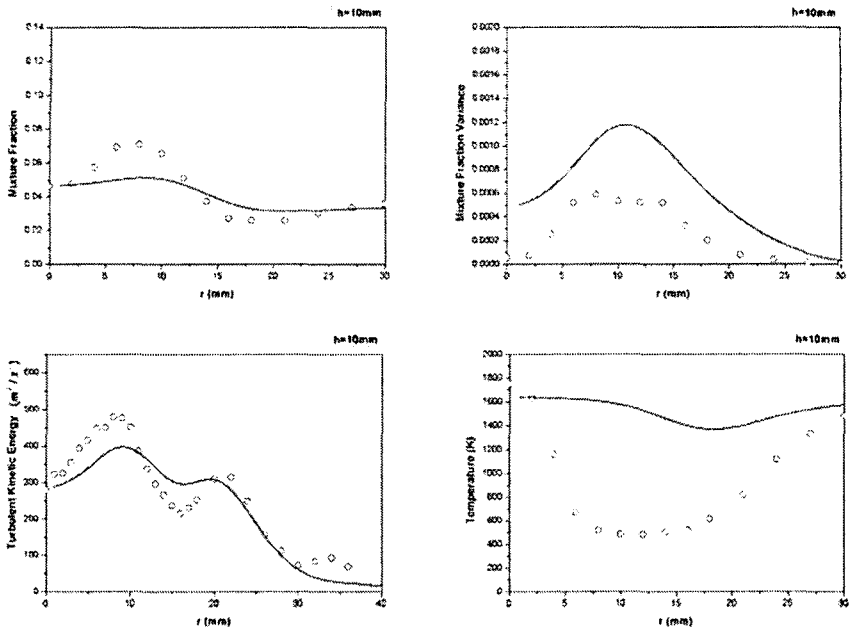

Fig. 5 Radial distributions of mean mixture fraction, mixture fraction variance, turbulent kinetic energy and mean temperature at h = 10mm (symbol : measurement, line : prediction)

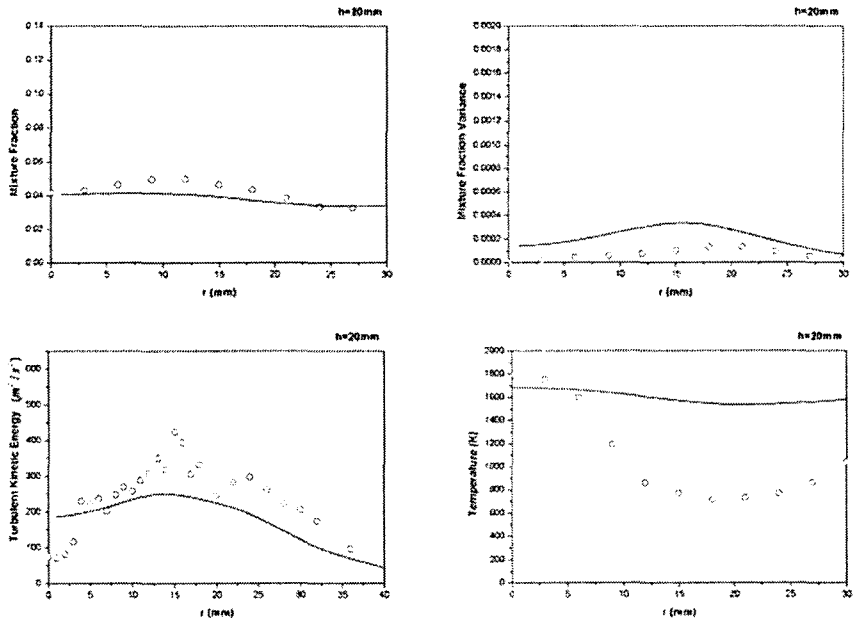

Fig. 6 Radial distributions of mean mixture fraction, mixture fraction variance, turbulent kinetic energy and mean temperature at h = 20mm (symbol : measurement, line : prediction)

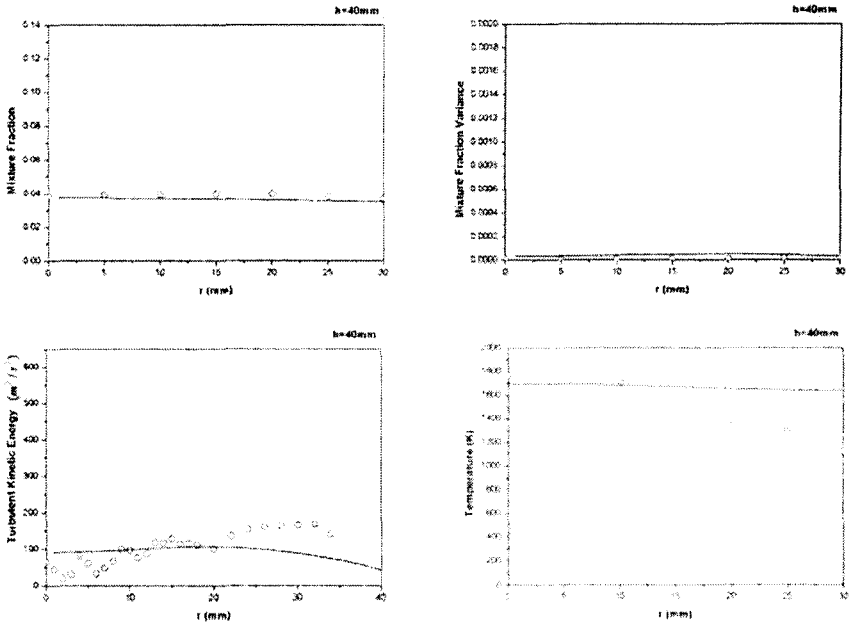

Fig. 7 Radial distributions of mean mixture fraction, mixture fraction variance, turbulent kinetic energy and mean temperature at h = 40mm (symbol : measurement, line : prediction)

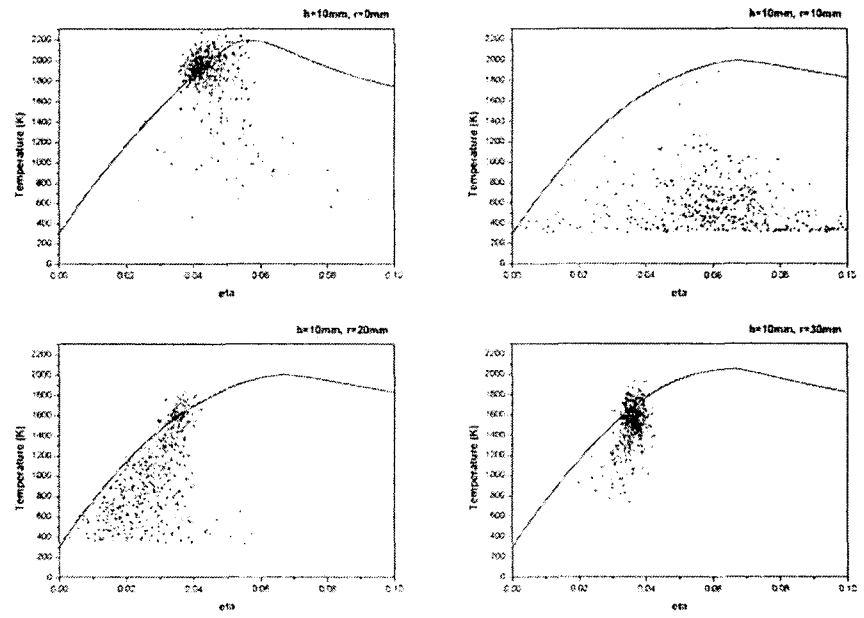

Fig. 8 Flame structures at h = 10mm r = 0, 10, 20, 30mm (symbol : measurement, line : prediction)

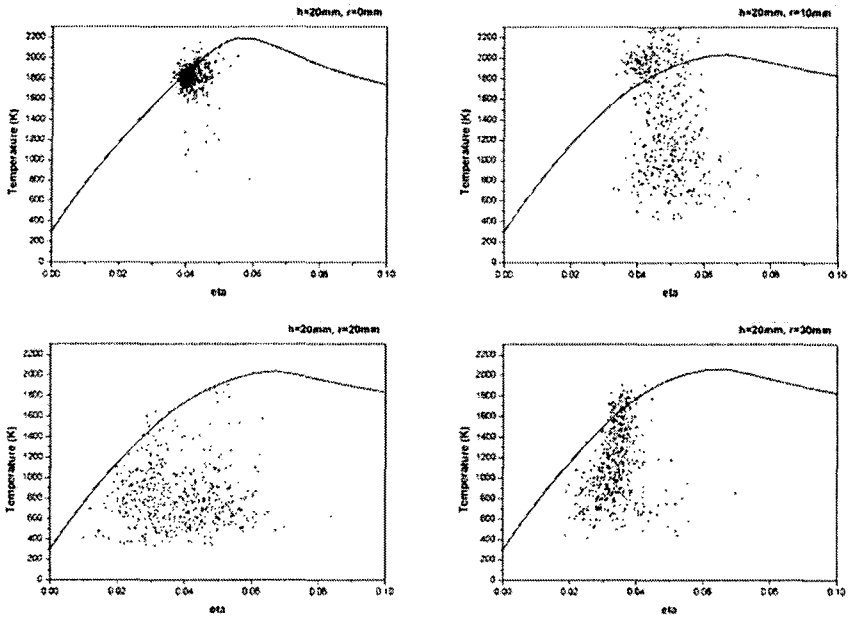

Fig. 9 Flame structures at h = 20mm r = 0, 10, 20, 30mm (symbol : measurement, line : prediction)

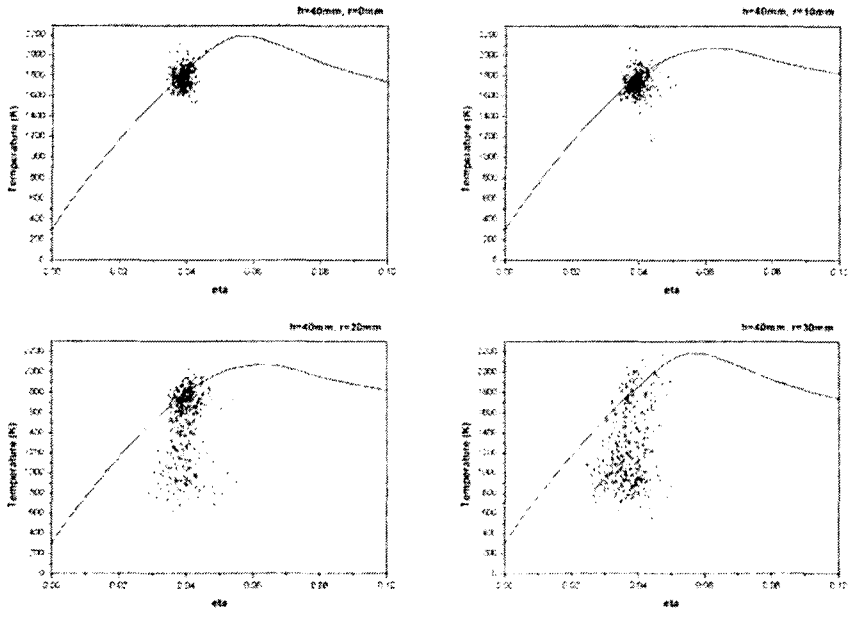

Fig. 10 Flame structures at h = 40mm r = 0, 10, 20, 30mm (symbol : measurement, line : prediction)

4. 결 론

1) 선회유동이 있는 가스터빈 모델 연소기에 대하여 RNG k-ϵ 모델과 국부 스칼라소산율에 따른 난류 유동장을 계산하였으며 전체적으로 타당한 경향의 결과를 도출하였으나 노즐 출구 근처의 소염으로 인하여 내부재순환 영역이 적게 예측되었다.

2) 혼합분율 공간에서의 난류화염 구조는 스칼라 소산율이 작은 하류 쪽에서는 정확히 예측하였으나 노즐 출구 근처의 부분 소염에 의한 과도한 conditional fluctuation으로 인하여 1차 CMC식의 결과에 한계가 있음을 보였다. 보다 정확한 화염 구조 예측을 위해서는 2차 CMC식을 적용하여야 할 것으로 판단된다.

3) Favre 평균온도도 노즐 출구 근처에서 동일한 이유로 인하여 과도한 스칼라소산율에 의한 소염 효과를 반영하지 못하여 내부재순환영역 경계에서 평균온도를 과도하게 예측하였다. 실험에 비해 스칼라소산율이 낮게 예측된 것은 입구 조건 중 난류에너지소산율 ED에 대한 측정값이 없기 때문이며 이에 대한 적절한 tuning이 요구된다.

4) 국부 소염이 수반되는 난류확산화염의 경우에는 난류유동장과 화염구조가 평균 밀도를 매개로 하여 긴밀히 연계되어 있으므로 기존의 방식대로 상호 분리하여 순차적으로 해를 구하는 방식은 적절하지 않으며 이에 대한 보완조치로서 본 계산에서는 각 위치에서 계산된 스칼라소산율을 유동장 계산에 직접 반영하였다.

참고문헌

[1] P. Weigand, W. Meir, X. R. Duan, W. Stricker, M. Aiger, "Investigation of swirl flames in a gas turbine model combustor I. Flow filed, structures, temperature, and species distributions", *Combustion and Flame*, 144, 2006, pp. 205-224

[2] Thomas B. Gatski, M. Yousuff Hussaini, Kohn L. Lumley, "Simulation and Modeling of Turbulent Flows", *Oxford University Press, Inc.*, 1996, pp. 155-183

[3] A. Y. Klimenko and R. W. Bilger, "Conditional moment closure for turbulent combustion," *Prog. Energy Combust. Sci*, Vol.25, 1999, pp. 595-687

[4] S. C. Kong, H. J. Kim, R. D. Reitz and Y. M. Kim, "Comparisons of combustion simulations using a representative interactive flamelet model and direct integration of CFD with detailed chemistry," *ASME*ICES 2005-1010, 2005

[5] Gregory P. Smith, David M. Golden, Michael Frenklach, Nigel W. Moriarty, Boris Eiteneer, Mikhail Goldenberg, C. Thomas Bowman, Ronald K. Hanson, Soonho Song, William C. Gardiner, Jr., Vitali V. Lissianski, and Zhiwei Qin http://www.me.berkeley.edu.gri_mech/

[6] Hewson, J.C., Bolig, M. "Reduced Mechanisms for NOx Emissions from Hydrocarbon Diffusion Flames", Twenty-Sixth Symp.(Int) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1996, pp. 2171-2179

[7] S. Sreedhara, Kang Y. Huh, "Modeling of turbulent, two-dimensional nonpremixed CH_4/H2 flame over a bluff body using first-and second-order elliptic conditional moment closures",*Combustion and Flame*, 143, 2005, pp. 119-134

[8] Seunghyun Kim, Kang Y. Huh, "Application of the Elliptic Conditional Moment Closure Model to a Two-Dimensional Nonpremixed Methanol Bluff-Body Flame", *Combustion and Flame*, 120, 2000, pp. 75-90

[9] O. Keck, W. Meier, W. Stricker, M. Aigner, "Establishment of a confined swirling natural gas/air flame as a standard flame : temperature and species distributions from laser RAMAN measurements", *Combust. Sci. and Tech.*, 174, 2002, pp. 117-151