

선회유동을 가지는 난류 예혼합 부상화염장의 해석

강성모* · 김용모* · 정재화** · 안달홍**

Numerical Modeling of Turbulent Swirling Premixed Lifted Flames

Sungmo Kang, Yongmo Kim, Jae-Hwa Chung, and Dal-Hong Ahn

ABSTRACT

This study has numerically modelled the combustion processes of the turbulent swirling premixed lifted flames in the low-swirl burner (LSB). In these turbulent swirling premixed flames, the four tangentially-injected air jets induce the turbulent swirling flow which plays the crucial role to stabilize the turbulent lifted flame. In the present approach, the turbulence-chemistry interaction is represented by the level-set based flamelet model. Two-dimensional and three-dimensional computations are made for the various swirl numbers and nozzle length. In terms of the centerline velocity profiles and flame liftoff heights, numerical results are compared with experimental data. The three-dimensional approach yields the much better conformity with agreements with measurements without any analytic assumptions on the inlet swirl profiles, compared to the two-dimensional approach. Numerical clearly results indicate that the present level-set based flamelet approach has realistically simulated the structure and stabilization mechanism of the turbulent swirling stoichiometric and lean-premixed lifted flames in the low-swirl burner.

Key Words: Level-set, Flamelet model, Turbulent premixed flame, Swirling flow, Lifted flame, Low-swirl burner

1. 서 론

공업용 버너, 가스터빈, 내연기관과 같은 실용 연소기내의 연소현상은 난류 유동 환경에 영향을 받게 된다. 난류는 다양한 시간척도와 길이척도를 가지므로 그 자체만 예측하는 것도 매우 어려운 일이며, 여기에 연소 현상이 더해지게 되면 물리적 현상의 복잡한 정도는 대단히 증가하게 된다. 난류 예혼합 및 부분 예혼합 화염은 가스터빈, 연소로, 내연기관 등과 같은 다양한 연소 장치에 응용되어지고 있다. 이와 같은 연소기계의 설계와 운용을 보다 효과적으로 하기 위하여 난류 예혼합 및 부분 예혼합 화염에 대한 다양한 연구

가 이루어지고 있다 [1].

난류 유동장을 묘사하는 가장 정확한 방법인 DNS (Direct Numerical Simulation)는 수치비용이 커서 실용 연소장치에 적용하기는 거의 불가능하다. 난류유동을 해석하는 차선의 방법인 LES (Large Eddy Simulation), RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 등을 이용해 예혼합 화염장을 해석할 경우, 난류와 화학반응의 상호작용을 적절히 표현하는 모델이 요구된다. 특히 난류와 상호작용을 제대로 반영할 수 있는 난류연소 모델의 개발은 실용 연소기의 화염 안정성 및 공해물질 배출특성을 정확히 예측하는 데 있어서 매우 중요하다. 난류 예혼합 및 부분 예혼합 화염장의 화학반응과 난류의 상호작용을 고려할 수 있는 난류연소 모델로는 pdf-transport 모델 [2], CMC (Conditional Moment Closure) 모델 [3], linear eddy 모델 [4], 그리고 화염편 (flamelet) 모델 [5] 등이 있다.

* 한양대학교 기계기술연구소

† 연락저자, ymkim@hanyang.ac.kr
한양대학교 기계공학부

** 전력연구원

이러한 난류연소 모델중 수치효율성, 예측정확도 및 적용성 등을 고려하여 본 연구에서는 난류 예혼합 화염장의 난류와 화학반응 상호작용은 level-set 기반의 화염면 모델을 이용하여 모델링하였으며 이러한 난류연소 모델의 예측능력을 검증하기 위해서 상대적으로 약한 스칼라에 의해 안정화되는 난류 부상화염 [6,7]에 대한 실험결과를 사용하였다. 기본적으로 선회유동을 가지는 난류 예혼합 부상화염의 기초이론 및 실제적인 응용에 있어서 난류와 화학반응의 상호작용, 화염안정화 메커니즘, 그리고 화염과 와동의 상호작용 등은 매우 중요한 물리적 과정이다. 이러한 난류 부상 예혼합 화염은 상대적으로 약한 스칼라에 의해 화염을 안정화시키는 LSB 버너 (low-swirl burner)에 의해 형성된다 [8]. LSB 버너는 초기에는 난류 예혼합 화염의 기초연구와 난류화염속도의 계측 및 난류화염 영역이론의 평가에 사용되어왔다 [8,9,10,11,12]. 또한 최근에는 예혼합 저공해 버너 및 회박 예혼합 가스 터빈 연소기의 화염구조 및 화염 안정화 메커니즘에 대한 이해하는 데 유의한 정보를 제공하고 기초설계 자료 그리고 수치모델의 검증자료로서 유용하게 활용되고 있다 [13,14,15].

2차원 및 3차원 수치계산을 화학 당량비 및 회박 예혼합 난류선회유동 화염장을 가지는 LSB 버너의 다양한 선회 수 및 노즐 길이에 대하여 수행하였다. 수치 해석 결과를 이용하여 다양한 연소조건에서 측정된 화염부상 높이와 중심축 속도분포를 상세히 비교하였다.

2. 물리 및 수치모델

2.1 지배방정식

Favre 평균된 ϕ -수송방정식을 다음처럼 Catesian 텐서 형태로 표기한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\bar{u}_j\bar{\phi}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 속도벡터, 엔탈피, 난류운동에너지와 소산율, 혼합분율의 평균과 변동을 포함한다. Γ_ϕ 와 S_ϕ 는 확산계수와 생성항을 각각 나타내며 참고문헌에 나타난다 [16].

2.2 Level-set G 기반 화염면 모델

난류 부분 예혼합 화염에서는 예혼합 및 비 예혼합 연소에 대한 공식을 사용해야한다. 이를 위해 비 예혼합 연소의 화염면 모델이 예혼합 연소의 화염면 모델과 결합된다. 난류 유동장내의 연료와 산화제의 혼합은 질량분율의 평균과 변동에 대한 수송방정식에 의해 설명된다. 예혼합 연소를 설명하기 위해 G -방정식 [1]을 사용하는 level-set 접근법이 도입된다. 여기서 등

스칼라 면 (iso-scalar surface) $G(x,t)=G_0$ 는 순간 화염면의 위치를 정의함으로써 유동장을 기연가스 영역 ($G > G_0$)과 미연혼합기 영역 ($G < G_0$)으로 나눈다. G 는 비연소 스칼라이므로 counter-gradient diffusion과 관련된 복잡성을 피한다. 난류 화염면의 평균 위치에 대한 방정식은 다음처럼 나타낸다 [5].

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{G}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{u} \bar{G}) = (\bar{\rho} s_T) |\nabla \bar{G}| - \bar{\rho} D_t \bar{\kappa} |\nabla \bar{G}| \quad (2)$$

$$\bar{\kappa} = \nabla \cdot \bar{n} = \nabla \cdot \left(-\frac{\nabla \bar{G}}{|\nabla \bar{G}|} \right) \quad (3)$$

여기서 $\bar{\kappa}$ 는 화염면의 곡률, \bar{n} 은 화염면에 수직한 단위벡터, D_t 는 난류 확산률 (turbulent diffusivity)이다. 난류 확산률 D_t 는 integral length scale l 과 난류속도 v' 로부터 결정될 수 있다.

$$D_t = a_4 l v', \quad l = a_1 v^3 / \bar{\epsilon}, \quad v' = (\bar{k} / a_2)^{1/2} \quad (4)$$

$$a_1 = 0.37, \quad a_2 = 1.5, \quad a_4 = 0.78$$

스칼라 G 의 변동에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \overline{G'^2}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{u} \overline{G'^2}) = \nabla_{||} \cdot (\bar{\rho} D_t \nabla_{||} \overline{G'^2}) + 2 \bar{\rho} D_t (\nabla \bar{G})^2 - c_s \bar{\rho} \frac{\bar{\epsilon}}{k} \overline{G'^2} \quad (5)$$

여기서 $\nabla_{||}$ 평균화염면에 접선한 방향으로만 미분하는 것을 의미하고 모델 상수는 $c_s = 2.0$ 이다.

Eq. (2)에 있는 난류화염 속도 s_T 를 모델하기 위해서 다음의 가정을 따른다. 연료와 산화제는 국부적으로 예혼합되어서, 부분 예혼합 화염은 성층화된 국부 예혼합 환경을 통해 전파한다. 난류 예혼합 연소에 대해 난류화염 속도 s_T 는 다음처럼 결정될 수 있다 [5].

$$\frac{s_T - s_L}{v'} = -\frac{a_4 b_3^2}{2b_1} Da + \left[\left(\frac{a_4 b_3^2}{2b_1} Da \right)^2 + a_4 b_3^2 Da \right]^{0.5} \quad (6)$$

여기서 s_L 은 평면 화염의 층류화염 속도, Damköhler 수는 $Da = s_L l / (v' l_F)$, l 과 l_F 는 integral length scale과 층류화염 두께, v' 은 난류 강도이다. 모델 상수들은 $b_1=2.0$ 과 $b_3=1.0$ 이다. 조건적 난류 Damköhler 수 $Da(Z)$ 는 조건적 난류화염 속도 $s_T(Z)$ 를 결정하기 위해 도입된다.

$$s_T(Z) = s_L(Z) + v' f\{Da(Z)\} \quad (7)$$

여기서 $f()$ 는 Eq. (6)의 우변을 나타내며, $Da(Z)$ 는 다음처럼 정의된다.

$$Da(Z) = \frac{s_L(Z)l}{v' l_F(Z)} = \frac{s_L^2(Z)l}{v'D} \quad (8)$$

위 식에서 층류화염 두께는 $l_F(Z) = D/s_L(Z)$ 로 대체된다. 여기서 D 는 층류 확산계수이다.

2.3 화염면 라이브러리 절차

화학종 i 에 대해 층류 화염면 라이브러리는 $Y_i(G, \phi)$ 로 나타낸다. 여기서 ϕ 는 당량비를 나타내고 G 는 화염면 좌표를 나타낸다. 좌표 원점 ($G=G_0$)은 inner layer에 고정된다. 본 연구는 CH₂O 농도가 최고인 위치에서 G_0 를 정의한다. 화염면 라이브러리는 유동계산에 앞서 화염면 방정식의 해를 구하여 선처리된다. 화염면 라이브러리의 차원은 커져서, 혼합기 온도, 밀도, 점성계수, 당량비 등을 포함할 수 있다. 평균 화염면에 수직한 거리는 $(\mathcal{C}(\mathbf{x}) - G_0)$ 이고 \mathcal{C} 는 공간에서의 Favre 평균이라고 가정하면 화학종 i 의 평균 질량분율을 다음처럼 계산할 수도 있다.

$$\overline{Y}_i(\mathbf{x}) = \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Y_i((G-G_0)/\bar{\sigma}, \phi) P(G, \phi; \mathbf{x}) dG d\phi \quad (9)$$

여기서, 화염면 면적비 (flame surface area ratio)는 $\bar{\sigma} = s_T/s_L$ 로 구하고 joint-pdf $P(G, \phi)$ 는 pdf-수송 방정식 [2]을 포함한 여러 가지 방법으로 얻어질 수 있으나 본 연구는 일반적으로 사용하는 presumed-shape pdf를 사용한다 [5,17]. 확률 랜덤변수가 통계적으로 독립적이라고 가정하고 Bayes 정리를 이용하면 joint-pdf는 다음처럼 나타낸다.

$$P(G, \phi) = P(G)P(\phi) \quad (10)$$

여기서 $P(G)$ 를 다음처럼 Gaussian 분포로 가정한다 [5].

$$P(G) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \overline{\mathcal{C}}^2}} \exp\left[-\frac{(G - \overline{\mathcal{C}}(\mathbf{x}))^2}{2\overline{\mathcal{C}}^2}\right] dG \quad (11)$$

$P(\phi)$ 에 대해서는 델타 함수를 사용하였다. 화학반응 기구로서 GRI-Mech 3.0을 사용하였고 53개의 화학종과 325개의 반응식을 포함한다 [18].

2.4 Reinitialization

난류화염 계산에서 평균 화염면 위치를 결정하는데 사용되는 \mathcal{C} -방정식은 평균 화염면에서만 정의된다. 화염면 외부에서 \mathcal{C} -field를 정의해야하는 어려움을 피하기 위해 화염면 외부의 \mathcal{C} 를 거리함수 (distance function)로 고려한다. $|\nabla\phi|=1$ 조건을 만족시켜 거리함수를 계산하는 과정을 흔히 reinitialization, renormalization, 혹은 redistancing이라 부른다. Reinitialization은 아래의 Hamilton-Jacobi 방정식을

풀어서 이루어진다.

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \text{sign}(\phi_0)(1 - |\nabla\phi|) \quad (12)$$

$$\phi(\mathbf{x}, 0) = \phi_0(\mathbf{x}) = \mathcal{C}(\mathbf{x}, t) - G_0$$

수치해법절차에 관한 상세 정보는 참고문헌 [20]에 자세히 기술되어 있다.

3. 수치해석 결과

난류 예혼합 화염을 해석하기 위해 본 연구에서 사용한 level-set 기반 난류연소 모델의 예측능력을 검증하기 위해 저 스윙 버너의 난류 예혼합 화염을 검증 문제로 채택하였다. 저 스윙 버너는 노즐과 점선방향 공기제트로 구성된다. 노즐에 점선방향으로 유입되는 여러 개의 공기제트는 스윙을 발생하고 버너 출구에서 유동 divergence를 유도하며, 화염장의 난류강도와 난류화염속도를 증가시킨다. 난류 부상화염은 미연혼합기의 유체입자속도가 화염전과 속도와 평형을 이루는 위치에서 안정화된다. 입구부분의 난류는 grid와 천공판 (perforated/punching plate)에 의해 생성된다. 기하학적 스윙 수는 다음과 같이 계산하였다 [6,21].

$$S = \frac{\pi R_j R Q_j^2 \cos \alpha}{A_j(Q_j + Q_m)^2} \quad \text{or} \quad (13.a)$$

$$\frac{\pi R^2 Q_j^2 \cos \alpha}{A_j(Q_j + Q_m)^2} \quad (13.b)$$

여기서 R_j 과 R 은 각각 공기제트와 버너의 반경, A_j 는 공기제트의 전체 단면적, Q_j 와 Q 는 각각 공기제트와 예혼합기의 전체 유량, α 는 공기제트의 경사각을 나타낸다. 주어진 스윙 수와 식 (1)을 이용하여 공기제트의 유량으로부터 스윙속도 성분을 결정할 수 있다.

본 연구는 사용된 난류연소 모델의 예측능력과 정성적인 화염의 기본 특성을 빠른 시간에 알아보기 위해 2차원 수치계산을 선행한다. 수치계산은 등은 유동으로 시작한 뒤 노즐 하류 50 mm에서 반경 30 mm의 화염원으로 혼합기를 점화한다. 점화 후 화염면이 정상상태에 도달할 때까지 수치계산을 진행한다. 수치계산은 화학 당량비 혼합기 조건 [6]과 당량비 0.63의 희박혼합기 조건 [7]의 두가지 LSB 버너 난류 예혼합 화염장에 대해 다양한 스윙 수와 노즐 길이에 대하여 수행하였다.

3.1 Stoichiometric-premixed CH₄/air flame

Chan 등 [6]은 저 스윙 버너의 난류 예혼합 화염에 대해 실험하여 weak 스윙에 의해 안정화되는 자유전파 (freely-propagating) 난류 예혼합 화염의 특성을 고찰하였다. 버너는 직경 50 mm의 중심 노즐, 직경 114 mm의 공기 동축류, 2개의 공기제트로 구성된다. 공기제트는 직경 6.1 mm이고 경사각 0°이다. 실험데이

터는 평균속도와 rms 속도를 포함하고 있으며 실험계측은 다른 스윙 수, 당량비, 그리고 입구난류강도에 대해 이루어졌다. 본 연구는 실험계측 화염 중에서 SWF4의 경우에 대하여 본 연구에서 개발한 수치모델의 검증에 위해 사용하였으며 예혼합기와 공기 동축류의 평균속도 5 m/s, 당량비 1.0, 스윙 수는 0.07이다.

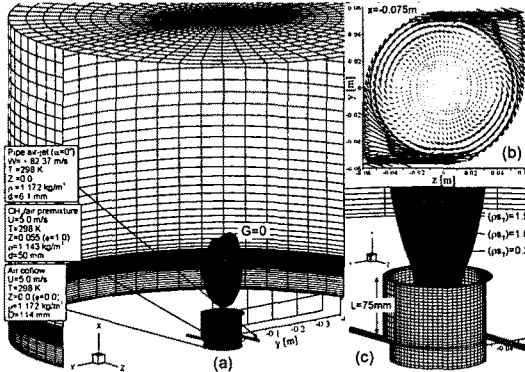


Fig. 1 Problem configuration and computational grid for the low-swirl burner. (a) Inlet boundary condition and iso-surface of $G=0$, (b) secondary flow vectors at the cross-section containing the air-jets, (c) closeup of burner.

Fig. 1은 저 스윙 버너의 구성과 3차원 수치격자를 나타낸다. 수치계산 영역은 축방향으로 0.9 m와 반경 방향으로 0.65 m까지 포함한다. 실험과 일치하여 난류 발생기는 예혼합기는 공기제트의 상류 25 mm에 지정한다. 입구 평균속도의 10% 등방성 변동을 가정하여 난류운동에너지를 지정한다.

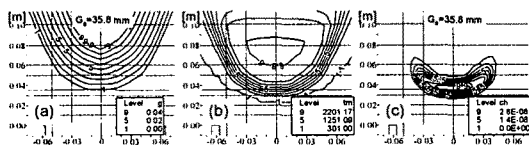


Fig. 2 Mean flame field calculated at the centerplane of $z=0$. (a) G -scalar, (b) temperature, (c) CH mass fraction.

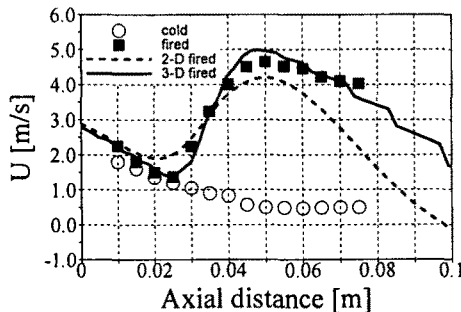


Fig. 3 Centerline profiles of predicted and measured mean axial velocity.

Fig. 2에 축방향 중심 단면에서 예측된 G -scalar, 온도장, CH 질량분율 분포를 도시하였으며 이러한 전체적 화염특성은 실험 [6]에서 계측된 LSB 버너의 난류 선회유동 예혼합 부상화염장의 기본적인 특성을 잘 나타내고 있다. 또한 Fig. 3에서는 난류 선회유동 예혼합 부상화염장의 중심축을 따른 실험치와 예측된 속도 분포를 비교하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 3차원 수치해석 결과는 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 level-set 기반의 화염면 모델이 Karlovitz 수가 1.0보다 작고 corrugated flamelet 영역에 있는 이러한 난류부상 예혼합 평균 화염장 분포에 지대한 영향을 미치는 난류 화염속도와 flame brush thickness를 잘 예측하고 있음을 의미한다. 중심축을 따른 측정된 속도분포와 비교해보면 2차원 계산결과는 화염면 전방에서는 크게 과대예측하고 화염면 후방을 따라 현저 과소예측하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 2차원 계산 결과는 최근에 보고된 Zhao 등 [22]의 2차원 수치결과에서도 유사하게 나타나고 있다. 이는 스윙을 발생시키기 위해 접선방향으로 2개의 공기제트가 유입되는 LSB 버너의 경우 축대칭 입구속도 조건을 가정한 2차원 모델은 난류 선회유동 예혼합 부상화염장의 난류혼합특성과 화염구조를 제대로 예측할 수 없음을 알 수 있다.

3.2 Lean-premixed CH₄/air flame ($\phi=0.63$)

Tachibana 등 [7]은 저 스윙 버너의 난류 예혼합 화 2염에 대해 실험적으로 분석하였으며 화염면 위치를 계측하는 방법에 대해 상세히 고찰하였다. 실험에 사용된 LSB 버너는 직경 53 mm의 노즐과 4개의 공기 제트로 구성되어 있으며 공기제트는 직경 2 mm이고 경사각 20° 로 되어있다. 위에서 논의된 LSB 버너와 비교하면 공기 동축류가 없고 공기제트의 직경이 크게 작아졌다. 난류발생기로서 64%-blockage의 천공판이 공기제트의 상류에 위치한다. 예혼합기의 평균속도는 5 m/s이고 당량비는 0.63이다. 실험데이터는 비조건 평균속도, 조건 미연 및 기연가스 속도, Reynolds mean progress variable을 포함하고 있다. 실험계측은 여러 스윙 수 ($S=0.97-1.51$)와 노즐 길이 ($L=30-150$ mm)에 대해 이루어졌다. 본 연구는 실험계측 중에서 스윙 수 $S=1.14, 1.32, 1.51$ 과 노즐 길이 $L=90, 150$ mm의 연소조건에 대하여 계산을 수행하였다.

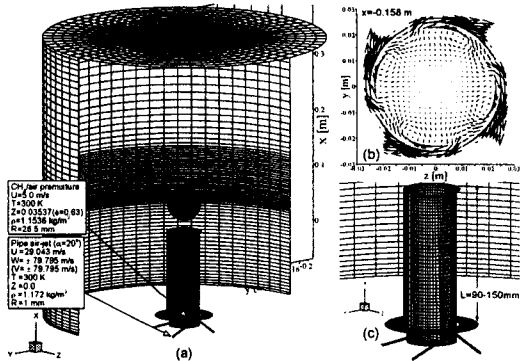


Fig. 4 Problem configuration for the low-swirl burner. (a) Inlet boundary condition and initial iso-surface of $G=0$, (b) secondary flow vectors at the cross-section containing the air-jets, (c) close-up of burner.

Fig. 4는 저 스윙 버너의 구성과 3차원 수치격자를 나타낸다. 수치계산 영역은 축방향으로 0.35 m와 반경 방향으로 0.25 m까지 포함한다. 실험에서 난류발생기 위치가 명시되지 않은 관계로 예혼합기는 공기제트의 상류 10 mm에 위치한 것으로 가정하였다. 입구 난류 특성에 대한 실험데이터가 없는 관계로, 먼저 축 중심선을 따라 속도와 온도 분포의 실험치가 주어진 $S=1.32$, $L=90$ mm의 경우에 대해 입구 난류특성의 영향을 분석하였다.

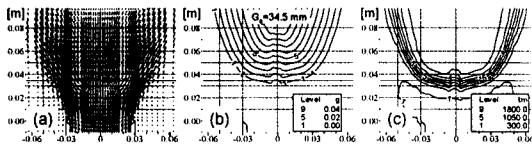


Fig. 5 Mean flame field calculated for $S=1.32$ and $L=90$ mm at the centerplane of $z=0$. (a) Velocity vectors, (b) G -scalar, (c) temperature.

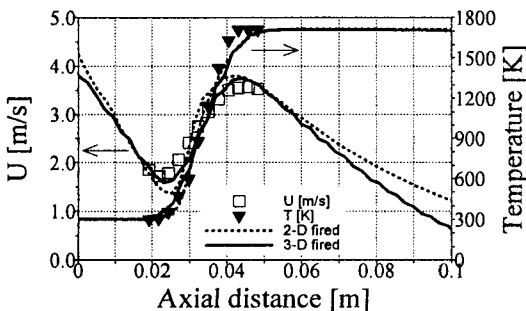


Fig. 6 Predicted and measured profiles of the mean axial velocity and reaction progress variable along the centerline: $S=1.32$, $L=90$ mm.

Fig. 5는 축방향 중심 단면에서 예측된 평균 속도 벡터, G -scalar, 온도장을 도시하였으며 예측된 전체적 화염특성은 실험 [7]에서 가시화된 LSB 버너의 난류 선회유동 예혼합 부상화염장의 기본적인 특성을 잘 나타내고 있다. Fig. 6에서는 축 중심을 따라 실험치와 예측된 평균 축방향 속도와 온도 분포를 비교하였다. Fig. 6에 도시된 바와 같이 예측된 중심축을 따른 축방향 평균 속도 및 온도 분포는 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 level-set 기반의 화염면 모델이 앞에서 논의한 화학 당량비 조건의 난류부상 예혼합 화염장에 비해 Karlovitz 수가 상대적으로 큰 당량비 0.63의 난류부상 희박 예혼합 화염장 특성과 함께 난류화염속도와 flame brush thickness를 잘 예측하고 있음을 의미한다. 중심축을 따른 예측된 축방향 속도분포와 비교해보면 2차원 모델이 화염면 전방에서 다소 과소예측하고 화염면에서 멀리 떨어진 후방에서는 과대예측하고 있음을 나타내고 있으나 앞에서 논의하였던 화학 당량비 조건의 난류부상 화염장에 비해 실험치 및 삼차원 해석결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 이 LSB 버너의 경우 스윙을 발생시키기 위해 접선방향으로 4개의 공기제트가 유입되기 때문에 가정된 축대칭 입구속도 조건으로 인한 오차가 상대적으로 감소했기 때문으로 사료된다.

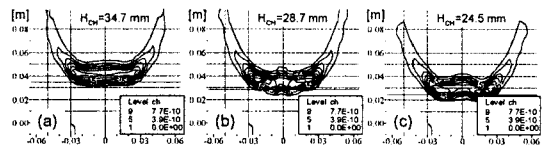


Fig. 7 Predicted contours of CH mass fraction for three different swirl numbers with $L=90$ mm. (a) $S=1.14$, (b) 1.32 , (c) 1.51 .

Fig. 7은 3개의 스윙 수 ($S=1.14, 1.32, 1.51$; $L=90$ mm)에 대해 예측된 CH 질량분율 분포를 나타낸다. 실험측정처럼 예측된 화염 부상높이는 축중심을 따라 CH 농도가 최고치의 절반인 위치로 정의한다. 스윙 수가 증가하면서 화염 부상높이는 감소됨을 볼 수 있다. 화염안정화 영역 근방에서, 상승된 스윙 강도는 유동 divergence의 향상 효과로 인한 축방향 속도의 감소와 증가된 난류강도에 대응하는 난류 화염속도의 증가를 유발한다. 그 결과 감소된 축방향 속도는 노즐 출구와 더욱 가까운 위치에서 증가된 난류 화염속도와 평형을 이룬다. 따라서 이 두 효과가 스윙 예혼합 화염의 화염부상 높이를 주로 제어하게 됨을 알 수 있다.

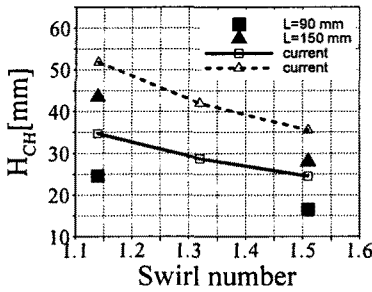


Fig. 8 Predicted and measured flame lift-off heights for different swirl numbers and nozzle lengths.

Fig. 8은 2개의 서로 다른 노즐길이의 LSB 버너에 대하여 스윙 수에 따른 계측 및 예측된 화염부상 높이를 비교하였다. 수치해석 및 실험결과에서 나타난 바와 같이 노즐 길이를 증가시키면 화염부상 높이가 증가하게 된다. 이는 노즐 하류를 따라 일어나는 난류 강도가 점차적으로 감소하기 때문에 노즐 길이가 길어질수록 노즐출구에서 난류강도는 더욱 감소하게 되는 현상과 직접적으로 연관되어 있다. 감소된 난류강도는 감소된 난류화염 속도를 낮기 때문에 긴 노즐 길이의 경우에 유체입자속도는 훨씬 더 하류 영역에서 난류 화염속도와 평형을 이루고 화염은 안정화된다. 실험치와 비교하면 본 연구는 화염부상 높이를 약간 과대예측한다. 차이는 이러한 스윙 화염 경우 난류강도의 감쇄를 과대예측하는 $k-\epsilon$ 난류모델의 결함이 주된 원인으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 level-set 기반의 화염면 모델을 사용하여 저 스윙 버너에 의해 안정화되는 난류 예혼합 부상화염장의 구조와 안정화메커니즘을 수치적으로 해석하였다. 수치계산은 화학 당량비 혼합기 조건과 당량비 0.63의 희박혼합기 조건의 두가지 LSB 버너 난류 예혼합 화염장에 대하여 다양한 스윙 수와 노즐 길이에 대하여 수행하였다. 수치해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 본 연구에서 사용한 level-set 기반의 화염면 모델은 화학 당량비 혼합기 조건과 당량비 0.63의 희박혼합기 조건의 두가지 LSB 버너 난류 선회유동 예혼합 부상화염장의 기본적인 특성을 대체적으로 잘 예측하였다. 이러한 두 연소 조건에 대하여 난류 선회유동 예혼합 부상화염장의 중심축을 따른 예측된 속도분포는 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 level-set 기반의 화염면 모델이 난류부상 예혼합 화염의 평균 화염장 분포에 지대한 영향을 미치는 난류화염속도와 flame brush

thickness를 잘 예측하고 있음을 의미한다.

2. 중심축을 따른 측정된 속도분포와 비교해보면 2차원 계산결과는 화염면 전방에서 크게 과대예측하고 화염면 후방을 따라 현저 과소예측하였다. 이는 스윙을 발생시키기 위해 접선방향으로 2개의 공기제트가 유입되는 LSB 버너의 경우 축대칭 입구속도 조건을 가정한 2차원 모델은 난류 선회유동 예혼합 부상화염장의 난류혼합특성과 화염구조를 제대로 예측할 수 없기 때문이다. 또한 스윙을 발생시키기 위해 접선방향으로 4개의 공기제트가 유입되는 당량비 0.63의 난류부상 희박 예혼합 화염장의 경우는 축대칭 입구속도 가정으로 인한 오차가 상대적으로 감소하였다.

3. LSB 버너의 난류 선회유동 예혼합 부상화염장에서 스윙 수를 증가시키면 화염 부상높이가 감소하였다. 이는 화염안정화 영역 근방에서, 상승된 스윙 강도는 유동 divergence의 항상 효과로 인한 축방향 속도의 감소와 증가된 난류강도에 대응하는 난류 화염속도의 증가를 유발함에 따라 감소된 축방향 속도는 노즐 출구와 더욱 가까운 위치에서 증가된 난류 화염속도와 평형을 이루기 때문이다.

4. LSB 버너의 노즐 길이를 증가시키면 화염부상 높이가 증가하게 되는데 이는 노즐 하류를 따라 일어나는 난류강도가 점차적으로 감소하기 때문에 노즐 길이가 길어질수록 노즐출구에서 난류강도는 더욱 감소하게 되는 현상과 직접적으로 연관되어 있다. 감소된 난류강도는 감소된 난류 화염속도를 낮기 때문에 긴 노즐 길이의 경우에 유체입자속도는 훨씬 더 하류 영역에서 난류 화염속도와 평형을 이루고 화염은 안정화되기 때문이다. 실험치와 비교하면 계산결과는 화염부상 높이를 약간 과대예측하였으며 이러한 차이는 이러한 스윙 화염의 경우에 난류강도의 감쇄를 과대예측하는 $k-\epsilon$ 난류모델의 결함이 주된 원인으로 사료된다.

참고문헌

[1] F.A. Williams, "Turbulent Combustion," in *The Mathematics of Combustion* (J.D. Buckmaster, ed.), 1985, pp. 197-1318.
 [2] S.B. Pope, "Pdf methods for turbulent reactive flows," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 11, 1985, pp. 119-192.
 [3] R.W. Bilger, "Conditional moment closure for turbulent reacting flows," *Phys. Fluids*, Vol. 5, 1993, pp. 436-444.
 [4] S. Menon and A.R. Kerstein, "Stochastic simulation of the structure and propagation rate of turbulent premixed flames," *24th Symp. (Int.)*

- on *Combust.* The Combust. Inst. 1992, pp 443-450.
- [5] N. Peters, *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [6] C.K. Chan, K.S. Lau, W.K. Chan, and R.K. Cheng, "Freely propagating open premixed turbulent flames stabilized by swirl," *24th Symp. (Int.) on Combust.* The Combust. Inst. 1992, pp. 511-518.
- [7] S. Tachibana, L. Zimmer, and K. Suzuki, "Flame front detection and dynamics using PIV in a turbulent premixed flame," *12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, 2004
- [8] R.K. Cheng, "Velocity and scalar characteristics of premixed turbulent flames stabilized by weak swirl," *Combust. Flame*, Vol. 101, 1995, pp. 1-14.
- [9] B. Bedat and R.K. Cheng, "Experimental study of premixed flames in intense isotropic turbulence," *Combust. Flame*, Vol. 100, 1995, pp. 485-494.
- [10] T. Plessing, C. Kortschik, N. Peters, M.S. Mansour, and R.K. Cheng, "Measurements of the turbulent burning velocity and the structure of premixed flames on a low-swirl burner," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, 2000, pp. 359-366.
- [11] I.G. Shepherd, R.K. Cheng, T. Plessing, C. Kortschik, and N. Peters, "Premixed flame front structure in intense turbulence," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, 2002, pp. 1833-1840.
- [12] C. Kortschik, T. Plessing, and N. Peters, "Laser optical investigation of turbulent transport of temperature ahead of the preheat zone in a premixed flame," *Combust. Flame*, Vol. 136, 2004, pp. 43-50.
- [13] D.T. Yegian and R.K. Cheng, "Development of a lean premixed low-swirl burner for low NOx practical applications," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 139, 1998, pp. 207-227.
- [14] R.K. Cheng, D.T. Yegian, M.M. Miyasato, G.S. Samuelsen, C.E. Benson, R. Pellizzari, and P. Loftus, "Scaling and development of low-swirl burners for low-emission furnaces and boilers," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, 2000, pp. 1305-1313.
- [15] D. Littlejohn, A.J. Majeski, S. Tonse, C. Castaldini, and R.K. Cheng, "Laboratory investigation of an ultralow NOx premixed combustion concept for industrial boilers," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, 2002, pp. 1115-1121.
- [16] S. Kang and Y. Kim, "Parallel unstructured-grid finite-volume method for turbulent nonpremixed flames using the flamelet model," *Numer. Heat Transfer B*, Vol. 43, 2003, pp. 525-547.
- [17] M.G. Herrmann, *Numerical Simulation of Premixed Turbulent Combustion Based on a Level Set Flamelet Model*, Ph.D. thesis, RWTH Aachen, 2001.
- [18] G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C.T. Bowman, R.K. Hanson, S. Song, W.C. Gardiner, Jr., V.V. Lissianski, and Z. Qin, *Gri-mech 3.0*, University of California-Berkeley, 1999, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- [19] R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller, M.E. Coltrin, J.F. Grcar, E. Meeks, H.K. Moffat, A.E. Lutz, G. Dixon-Lewis, M.D. Smooke, J. Warnatz, G.H. Evans, R.S. Larson, R.E. Mitchell, L.R. Petzold, W.C. Reynolds, M. Caracotsios, W.E. Stewart, P. Glarborg, C. Wang, and O. Adigun, *CHEMKIN Collection*, Release 3.6, Reaction Design, Inc., San Diego, CA, 2000.
- [20] M. Sussman and E. Fatemi, "Level Set Redistancing Algorithm," *SIAM J. Sci. Comput.* Vol. 20, No. 4, 1999, pp. 1165-1191.
- [21] M.R. Johnson and R.K. Cheng, "Dynamics of flame flowfields in a low-swirl burner," *Proc. of the 19th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, Hakone, Japan, 2003.
- [22] Q.W. Zhao, C.K. Chan, and H.F. Zhao, "Numerical simulation of open swirl-stabilized premixed combustion," *Fuel*, Vol. 83, 2004, pp. 1615-1623.