

난류 예혼합 화염장에 대한 수치 모델링

강성모·김용모*

Numerical Modeling for Turbulent Premixed Flames

Sungmo Kang and Yongmo Kim

ABSTRACT

The LES-based level-set flamelet model has been applied to analyze the turbulent propane/air premixed bluff-body flame with a highly wrinkled flame fronts. The present study has been motivated to investigate the interaction between the flame front and turbulent eddies. Special emphasis is given to study the effect of G equation filtering treatment on the precise structure of turbulent premixed flames as well as the effect of sub-grid scale (SGS) eddies on the wrinkling of the flame surface. The level-set/flamelet model has been adopted to account for the effect of turbulence-flame interaction as well as to properly capture the flame front. Numerical results indicate that the present LES-based level-set flamelet approach has a capability to realistically simulate the highly non-stationary turbulent premixed flame.

Key Words: Large Eddy Simulation (LES), Level-Set Method, Flamelet Model, Turbulent Premixed Flame

1. 서론

공업용 버너나 가스터빈, 내연기관과 같은 실제적인 연소기에서 연소현상은 난류 유동 환경에 영향을 받게 된다. 난류는 다양한 시간 척도와 길이 척도를 가지므로 그 자체만 예측하는 것도 매우 어려운 일이며 연소현상이 여기에 더해지게 되면 물리적 현상의 복잡한 정도는 대단히 증가하게 된다.

지금까지의 연소 모델링은 주로 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)에 적용되어 비교적 단순한 물리적 현상이 발생하는 형상에 대해서는 잘 예측하여 왔다. 그러나 이러한 정보들은 대부분 시간평균된 값들이며 대부분의 난류화염, 특히 난류 부상 화염장이나 스윙이 존재하는 화염장에서 발생하는 국부적인 화염의 소화나 재점화, 그 이후의 화염의 전파특성을 예측하는데 많은 한계를 보이고 있다. 이를 해결하기 위

하여 많은 연구자들이 난류의 최소 척도인 Kolmogorov scale까지 해결하는 DNS (Direct Numerical Simulation)을 적용하였으나 이는 많은 컴퓨터 용량 및 계산시간을 요구하기 때문에 단순한 형상 및 낮은 레이놀즈 수를 가지는 유동에 극히 제한되어 진행되어 왔다. 이러한 이유로 최근에는 큰 난류구조는 직접 계산하고 작은 난류구조는 모델링하는 LES (Large-Eddy Simulation)을 사용함으로써 좀 더 적은 수의 격자를 가지고 높은 레이놀즈 수를 가지는 유동장까지 확대하여 해석하고 있다. 그러나 이러한 LES 방법에서 화학반응에 의한 반응영역의 두께가 LES의 격자크기 보다 작기 때문에 이로 인해 발생하는 비선형적인 반응율과 관계된 화학적 생성항의 모델링이 필요하게 된다.

본 연구에서는 난류 예혼합 화염장 해석을 위하여 개발한 LES 및 RANS 기반의 난류연소모델을 flame holder를 가지는 난류 예혼합 화염장에 적용하여 예측능력을 검증하였다.

* 한양대학교 기계기술연구소

** 한양대학교 기계공학부

† 연락저자, ymkim@hanyang.ac.kr

2. 물리 및 수치모델

2.1 LES 지배방정식

난류 연소 유동장을 해석하기 위하여 본 연구에서는 LES를 이용하였으며 연속방정식과 운동량방정식에 밀도 가중 평균과 공간 평균법을 적용하면 다음과 같은 LES 방정식들을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_{i+}} \frac{\partial \tilde{t}_{ij}}{\partial x_{j-}} \frac{\partial \tau_{ij}^{SGS}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서, $\bar{\rho}$ 는 밀도, u_i 는 x_i 방향의 속도성분, p 는 압력, 그리고 t_{ij} 는 shear stress tensor를 나타낸다. 위 방정식에서 subgrid stress-tensor는 다음과 같다.

$$\tau_{ij}^{SGS} = \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) \quad (3)$$

Subgrid stress-tensor는 Smagorinsky eddy viscosity로 모델링하였다.

$$\tau_{ij}^{SGS} - \frac{1}{3} \tau_{kk}^{SGS} \delta_{ij} = -2\bar{\rho} \nu_i \left(\tilde{s}_{ij} - \frac{1}{3} \tilde{s}_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (4)$$

$$\tilde{s}_{ij} = \frac{1}{2} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j + \tilde{u}_j \tilde{u}_i)$$

$$\nu_i = C \Delta^2 |\tilde{S}|, \quad |\tilde{S}| = \sqrt{2 \tilde{s}_{ij} \tilde{s}_{ij}}$$

위 식에서 모델상수, C 를 결정하기 위하여 dynamic subgrid 모델을 적용하였으며 이는 LES 방정식을 통해 결정할 수 있는 값에 test-filter (방정식을 유도하기 위한 filter보다 더 큰 크기의 필터이며 $\hat{\phi}$ 로 표기한다)를 통해 다시 평균을 취한 stress tensor를 필요로 하며 다음과 같다.

$$T_{ij} = \bar{\rho} (\hat{u}_i \hat{u}_j - \hat{u}_i \hat{u}_j) \quad (5)$$

Germano [1]의 동일성에 따라 식 (5)는 식 (4)와 비슷한 형태로 모델할 수 있다.

$$T_{ij} - \frac{1}{3} T_{kk} \delta_{ij} = -2\bar{\rho} \hat{\nu}_i \hat{S}_{ij} \quad (6)$$

$$\hat{\nu}_i = C \hat{\Delta}^2 |\hat{S}|$$

위 두 식 모두 계산할 수 없는 항, 즉 $\hat{u}_i \hat{u}_j$ 를 포함하고 있으나 두 식의 차는 이 항을 제거할 수 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$L_{ij} = T_{ij} - \hat{\tau}_{ij} = \hat{u}_i \hat{u}_j - \hat{u}_i \hat{u}_j \quad (7)$$

두 식이 모델링된 형태로 다시 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{ij} - \frac{1}{3} L_{kk} \delta_{ij} = -C \Delta^2 M_{ij} \quad (8)$$

$$M_{ij} = 2 \left[\left(\frac{\hat{\Delta}}{\Delta} \right)^2 |\hat{S}| \hat{S}_{ij} - |\hat{S}| \hat{S}_{ij} \right]$$

위 식을 통해 모델상수, C 는 다음과 같은 식으로 결정된다.

$$C = - \frac{L_{ij} M_{ij}}{\Delta^2 M_{kl} M_{kl}} \quad (9)$$

2.2 Level Set 방법

2.2.1 G 방정식의 유도

Williams [2]는 화염면 모델에 기초한 G 방정식을 제안하였으며 기연 가스와 미연가스의 경계인 화염면의 변화과정을 묘사하기 위하여 level-set 방법을 사용하였다. 스칼라 양인 G 는 $G=G_0$ 에서 화염면임을 나타내며 이러한 화염면의 순간적이고 국부적인 위치는 다음과 같은 음함수적 방법으로 표현된다.

$$G(x, t) - G_0 = 0 \quad (10)$$

여기서 G 가 G_0 보다 크면 기연가스이고 그렇지 않으면 미연가스이다. 식 (10)을 미분하게 되면

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{dx_j}{dt} \cdot \nabla G = 0 \quad (11)$$

이며 여기서 x_j 는 화염면의 위치이다.

화염면의 전파속도는 국부적인 유동속도와 화염면에 수직인 방향의 층류 화염속도의 합으로 결정된다.

$$\frac{dx_j}{dt} = v + s_L n \quad (12)$$

여기서 v 는 국부적인 유동속도이며 s_L 는 층류화염속도이며 화염면에 대한 수직벡터는 다음과 같다.

$$n = - \frac{\nabla G}{|\nabla G|} \quad (13)$$

식 (11)과 식 (12)를 결합하면 순간적인 G 방정식을 얻을 수 있으며 다음과 같다.

$$\frac{\partial G}{\partial t} + v \cdot \nabla G = s_L |\nabla G| \quad (14)$$

위 식은 단지 화염면을 묘사하는 식 (10)과 식 (12)로부터 유도되었기 때문에 식 (14)는 화염면에서만 유효하며 그 이외의 G 값은 임의적으로 계산되며 일반적으로 화염면과의 거리를 나타내는 함수이다.

2.2.2 Filtered 화염면의 위치에 대한 G 방정식

필터링한 화염면의 위치를 얻기 위하여 필터링한 화염면을 음함수적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tilde{G}(x, t) - G_0 = 0 \quad (15)$$

이 식을 미분하고 \tilde{G} 의 변위에 대한 속도를 필터링한 속도와 관계지으면 결과식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tilde{G}}{\partial t} + \frac{d\tilde{x}_j}{dt} \cdot \nabla \tilde{G} = 0 \quad (16)$$

필터링한 변위속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\tilde{x}_f}{dt} = \tilde{v} + (\overline{s_L + s_\kappa})n \quad (17)$$

여기서 s_L 은 unstrained 예혼합 화염에 대한 층류 화염 속도이며 s_κ 는 화염면의 곡률이 화염면의 변위속도에 미치는 영향을 나타낸 항으로 다음과 같다.

$$s_\kappa = -D_T \nabla \cdot n = D_T \nabla \cdot \left(\frac{\nabla G}{|\nabla G|} \right) \quad (18)$$

여기서 D_T 는 온도의 확산계수이다.

식 (16)과 식 (18)로부터 필터링한 G 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \tilde{G}}{\partial t} + \tilde{v} \cdot \nabla \tilde{G} = -(\overline{s_L + s_\kappa})n \cdot \nabla \tilde{G} \quad (19)$$

식 (19)의 우변에 나타나는 G 의 생성항은 난류화염속도와 필터링된 화염면의 수직벡터에 의해 다음과 같이 모델링된다.

$$(\overline{s_L + s_\kappa})n = s_T \tilde{n} = -s_T \frac{\nabla \tilde{G}}{|\nabla \tilde{G}|} \quad (20)$$

2.2.3 Sub-filter 화염면 두께에 대한 방정식

난류화염속도를 모델링하기 위하여 화염면의 두께와 관련된 sub-filter 화염면의 난동길이에 대한 방정식을 유도할 필요가 있다. 화염면의 난동길이는 순간적인 화염면의 위치와 필터링된 화염면의 위치의 최단거리로 정의되며 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$l = |x_f - \tilde{x}_f| \quad (21)$$

이 식을 필터링된 화염면에 대한 수직벡터의 항으로 표현하면 다음과 같다.

$$l\tilde{n} = x_f - \tilde{x}_f \quad (22)$$

식 (22)를 미분하고 식 (17)을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d(l\tilde{n})}{dt} &= \frac{d(x_f - \tilde{x}_f)}{dt} \\ &= v - \tilde{v} + s_L n - \tilde{s}_L \tilde{n} + s_\kappa n - \tilde{s}_\kappa \tilde{n} \end{aligned} \quad (23)$$

위 식의 양변에 $2l\tilde{n}$ 를 곱하고 필터링을 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dl^2}{dt} &= 2\tilde{n} \cdot lv' + 2\tilde{n} \cdot \overline{l(s_L n)'} \\ &\quad + 2\tilde{n} \cdot \overline{l(s_\kappa n)'} \end{aligned} \quad (24)$$

여기서, $v' = v - \tilde{v}$ 는 sub-filter 난동속도이고 $(s_L n)' = s_L n - \tilde{s}_L \tilde{n}$ 과 $(s_\kappa n)' = s_\kappa n - \tilde{s}_\kappa \tilde{n}$ 는 난류화염 속도의 난동 정도를 표현하게 된다.

식 (23)을 Eulerian 좌표계에서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial l^2}{\partial t} + (\tilde{v} + s_L \tilde{n}) \cdot \nabla l^2 &= 2\tilde{n} \cdot lv' \\ &\quad + 2\tilde{n} \cdot \overline{l(s_L n)'} + 2\tilde{n} \cdot \overline{l(s_\kappa n)'} \end{aligned} \quad (25)$$

위 식의 우변의 첫 번째 항은 난류에 의한 화염면의 주름지는 현상에 의한 난동길이의 생성항이고, 두 번째 항은 화염면의 전파로 인한 난동길이의 소멸항이

며, 세 번째 항은 화염면의 곡률에 의한 난동길이의 소멸항이다.

화염면의 난동길이는 단지 화염면에서만 존재하므로 화염면 이외에서 이에 대한 공간적인 미분값은 정의될 수 없다. 따라서 난동길이는 G 의 난동으로 표현해야 하며 화염면 근처에서 난동길이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$l = \frac{G'}{|\tilde{G}|} \quad (26)$$

따라서, 식 (25)의 우변의 첫 번째 항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tilde{n} \cdot lv' = \frac{\tilde{n}}{|\nabla \tilde{G}|} \cdot G'v' = -\frac{\tilde{n}}{|\nabla \tilde{G}|} D_{t,G} \cdot \tilde{G} \quad (27)$$

필터링된 화염면에 수직벡터의 정의에 따라 식 (27)은 다음과 같이 단순화 할 수 있다.

$$\tilde{n} \cdot lv' = D_{t,G} \quad (28)$$

식 (28)에 나타나는 G 에 대한 난류 확산계수는 소산을 나타내는 것이 아니라 난류에 의한 혼합을 통해 화염면의 생성을 나타내며 일정한 Schmidt 수의 가정 하에 다음과 같은 Smagorinsky 난류확산계수 형태로 모델할 수 있다.

$$D_{t,G} = \frac{C\Delta v'_\Delta}{Sc_{t,G}} \quad (29)$$

여기서, $C\Delta$ 는 필터 폭, Δ 에 의해 특성화되는 길이 척도이다.

식 (25)의 우변의 두 번째 항과 세 번째 항은 소산항이며 이러한 소산항은 난류의 small scale에서 발생하게 된다. 따라서 이러한 항들은 RANS에 근간을 둔 Peters [3]에 의해 제안된 scale 관계식을 적용할 수 있다.

$$\tilde{n} \cdot \overline{l(s_L n)'} = c_2 C \Delta \tilde{n} \cdot \tilde{s}_L \tilde{n} = -c_2 C \Delta s_T \quad (30)$$

$$\tilde{n} \cdot \overline{l(s_\kappa n)'} = c_1 \frac{l_F}{s_L} (\tilde{n} \cdot \tilde{s}_\kappa \tilde{n})^2 = -c_3 \frac{l_F}{s_L} s_T^2 \quad (31)$$

식 (28), 식 (30), 그리고 식 (31)을 식 (25)에 대입하고 생성항이 소멸항과 평형을 이룬다고 가정하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$D_{t,G} - c_2 C \Delta s_T - c_3 \frac{l_F}{s_L} s_T^2 = 0 \quad (32)$$

식 (32)를 대수적으로 정리하면 다음과 같은 난류화염속도를 얻을 수 있다.

$$\frac{s_T - s_L}{s_L} = -\frac{b_2^2 C}{2b_1 Sc_{t,G}} \frac{\Delta}{l_F} \quad (33)$$

$$+ \sqrt{\left(\frac{b_2^2 C}{2b_1 Sc_{t,G}} \frac{\Delta}{l_F} \right)^2 + \frac{b_3^2 D_t}{s_L l_F}}$$

여기서 상수는 Peters [3]에 의해 제안된 값을 적용하며 $b_1=2.0$, $b_3=1.0$ 이다. $c_2 = 1/(b_1 Sc_{t,G})$, $c_3 = 1/b_3^2$ 이며 $Sc_{t,G}=0.5$ 를 이용하였다.

2.2.4 예혼합 화염에 대한 수치모델

본 연구에서는 난류 연소장내의 속도-압력-밀도의 연계와 기하학적 유연성을 가지기 위해 압력기반 비정렬 격자 유한체적법을 사용하였다. 난류/화학반응 상호작용을 설명하기 위해 화염면 모델과 확률밀도함수(PDF)를 사용하였다. PDF는 Gaussian 분포를 가정하였으며 이 분포의 독립변수로써 필터링된 G 값과 이것의 난동성분이 사용되었다. Burning probability는 다음 식으로 결정된다.

$$p_b = \int_{G_c}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi G^2}} \exp\left[-\frac{(G - \bar{G})^2}{2 G^2}\right] dG \quad (34)$$

화학반응 기구로서 GRI-3.0 mechanism을 사용하였고 53개의 화학종과 325개의 반응식을 포함한다. 수치기억용량을 분담하고 계산 효율성을 위해 병렬계산(10-node cluster/Pentium-IV 1.7-GHz CPU)을 수행하였다.

3. 수치해석 결과

난류 예혼합 화염장 해석을 위하여 본 연구에서 개발한 LES 기반의 난류연소모델의 예측능력을 검증하기 위하여 flame holder를 가지는 난류 예혼합 화염장을 benchmark case로 채택하였다.

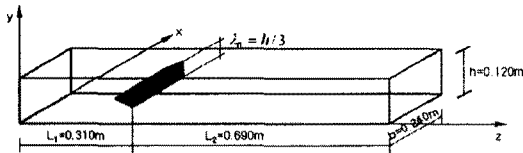


Fig. 1. Schematic diagram of the test rig for a propane/air premixed flame.

Table 1. Numerical and physical parameters.

Parameters	Values	Parameters	Values
Mass flow rate, m	0.6 kg/s	Unburnt density ρ_u	0.593 kg/m ³
Inlet bulk velocity U_b	35.13 m/s	Laminar diffusivity, $D=(\mu/c_p)/\rho_u$	1.08×10^{-4} m ² /s
Unburnt Temperature T_u	600 K	Laminar flame speed s_L	0.743 m/s
Adiabatic Temperature T_a	1,942 K	Laminar flame thickness $l_p=D/s_L$	0.145 mm
Timestep Δt	2×10^{-6} s		

Fig. 1에서 보는 바와 같이 test rig는 rectangular channel, inlet section 그리고 flame holder를 가지는 combustion section으로 구성되어 있다. 여기서 모든 길이척도는 flame-holder의 높이, $h=0.04$ m를 기준으로 무차원화하였다. 실험 [4]은 난류 등온 유동장과 난류 예혼합 화염의 경우에 대하여 수행되었다. 난류 예혼합 화염의 실험에서는 총 질량유량이 0.6 kg/s이고 당량비 0.6인 propane/air 혼합기를 사용하였다. 입구 평균속도와 온도는 각각 $U_0=35$ m/s와 $T_0=600$ K이고 미연혼합기의 밀도 ($\rho=0.593$ kg/m³) 기준의 Reynolds number는 28,000이다. 속도, 온도 그리고 화학종 (O_2 ,

CO_2 , CO)의 물분율은 각각 LDA 및 가스분석 장치를 이용하여 계측하였으며 실험에 관한 자세한 내용은 참고문헌 [4]에 잘 기술되어있다. 실험결과로부터 이 난류 예혼합 화염은 corrugated flamelet regime에 있으며 대응하는 Karlovitz number는 근사적으로 0.107영역에 있다. 본 연구에서는 수치적 오차를 최소화하기 위하여 최대한 작은 수치격자와 filter size를 사용하였다. 본 연구에서는 streamwise, normal, 그리고 spanwise 방향으로 각각 184, 74, 64 개의 격자를 사용하였다. 격자크기의 범위는 1-3 mm이고 시간간격은 2×10^{-6} s이며 대응하는 CFL number는 0.027 (40 m/s $\times 2 \times 10^{-6}$ s / 3 mm)이다.

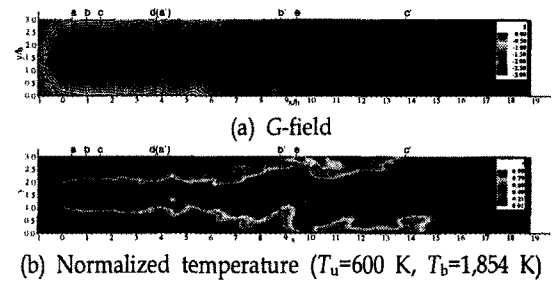


Fig. 2. Instantaneous flame field at the vertical centerplane of $z/h=0.0$. ($U_0=35$ m/s, $h=40$ mm)

Fig. 2는 수직 중심면 ($z/h=0.0$)에서 순간적인 화염장을 도시하였다. 수치해석 결과로부터 본 연구에 사용한 G-equation filtering 방법이 화염의 상세구조와 난류 flame brush내에서 minor species의 분포에 지대한 영향을 미치는 큰 wrinkling을 가지는 화염장을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3은 주유동 방향을 따라 변하는 평균 flame brush thickness에 대한 예측결과와 이론치를 비교하였다. 여기서 평균 brush thickness의 예측치는 평균 화염면, $G=0$ 에서의 G-variance의 rms값, $l_{F,t} \sim \sqrt{G'^2}$ 으로 산정된다.

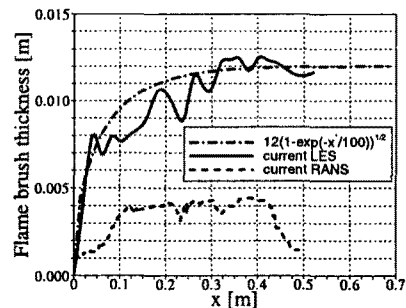


Fig. 3. Development of the mean flame brush thickness, $l_{F,t}$ along streamwise direction.

Flame holder 근방에서 mean brush thickness는 주유동 방향으로 급격히 선형적으로 증가하며 하류영역에서는 flame brush thickness가 서서히 증가하는 경향을 보임을 알 수 있으며 LES 기반의 난류연소 모델은

이론치와 대체로 잘 일치하는 경향을 보이거나 RANS 기반의 난류연소 모델은 현저히 과소예측함을 알 수 있다. 여기서 이론치는 G-variance 방정식의 대류항, 생성항과 소산항간의 평형관계를 이용하여 Peters가 유도한 아래의 이론식을 이용하여 산정하였다.

$$I_{F,i} \sim a b_0 [1 - \exp(-b(x/\bar{U})/t_0)]^{1/2} \quad (35)$$

이 화염장에서 길이와 시간의 integral scales (l_0, t_0)은 대략 40 mm 와 4 ms이고 화염면 전방에서 시간평균 속도 (\bar{U})는 50 m/s로 추산된다. 모델상수 ($a=0.3, b=2.0$)를 이용하여 flame brush thickness를 산정하였다. 수치예측 결과로부터 LES 기반의 난류연소 모델은 이론치와 함께 flame broadening trend 대체로 잘 예측하고 있으나 RANS 기반의 난류연소 모델은 난류와 화염장의 상호작용에 의해 크게 영향을 받는 flame broadening trend를 제대로 예측하지 못함을 알 수 있다. 평균화염 두께는 평균 속도, 온도 그리고 농도장의 분포에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 평균화염장을 정확히 예측하기 위한 필수적인 요소이다.

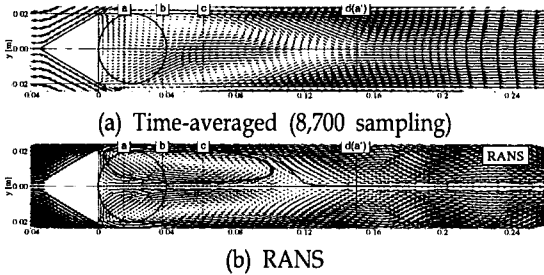


Fig. 4. Comparison of velocity vector field predicted by RANS and LES, respectively. ($\Delta t=2 \times 10^{-6}$)

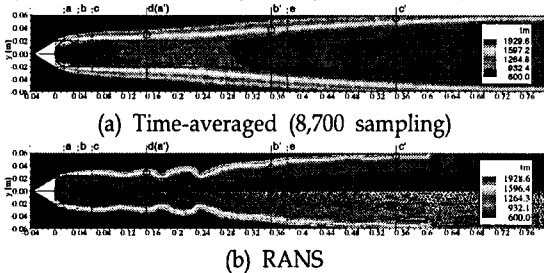


Fig. 5. Comparison of temperature field predicted by RANS and LES, respectively. ($\Delta t=2 \times 10^{-6}$)

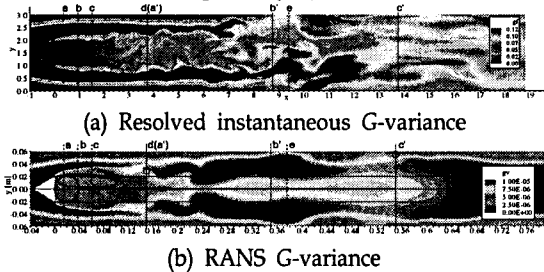


Fig. 6. Comparison of G-variance predicted by RANS and LES, respectively. ($\Delta t=2 \times 10^{-6}$)

Fig. 4-6에서는 RANS 및 LES 기반의 난류연소 모델을 이용하여 예측한 시간평균 속도장과 온도장, 그리고 G-variance를 도시하였다. 여기서 LES 기반의 난류연소 모델의 경우 8,700 sample data를 이용하여 시간평균을 하였다. 먼저 예측된 시간평균 속도장을 살펴보면 RANS 기반의 난류연소 모델은 LES 기반의 난류연소 모델에 비하여 flame holder로 재순환 영역을 과소 예측하고 있음을 알 수 있다. 예측된 시간평균 온도장을 비교해보면 LES 기반의 난류연소 모델은 주유동 방향을 따라 증가하는 flame brush 영역을 제대로 잘 예측하고 있으나 RANS 기반의 난류연소 모델은 이것을 전혀 예측하지 못함을 알 수 있다. 또한 G-variance를 살펴보면 RANS 기반의 난류연소 모델과 LES 기반의 난류연소 모델의 예측된 G-variance 분포특성이 현저히 상이하며 RANS 기반의 난류연소 모델의 경우 하류로 갈 수록 G-variance 값을 현저히 과소예측함을 알 수 있다.

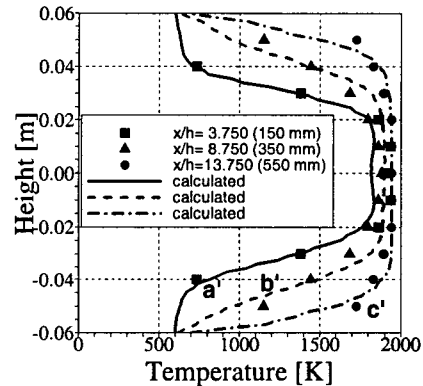


Fig. 7. Comparison of density weighted mean temperature profiles in the tree cross-sections downstream of the flame holder ($Re=28,000, h=40$ mm)

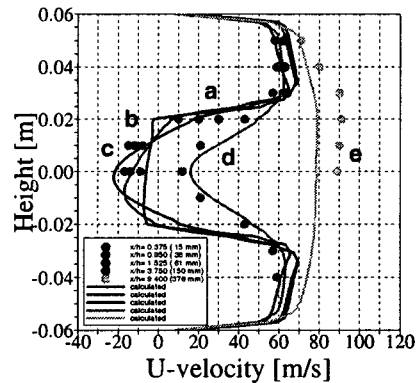


Fig. 8. Comparison of density-weighted mean U-velocity profiles in the five cross-sections downstream of the flame holder ($Re=28,000, h=40$ mm)

Fig. 7에서 보는 바와 같이 예측된 밀도가중 평균온도 분포는 주유동 방향의 세 위치 ($x=150, 350, 550$ mm)에서 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 8에서 보는 바와 같이 예측된 밀도가중 주유동방향 평균속도 분포는 주유동 방향의 다섯 위치 ($x=10, 38, 61, 150, 376$ mm.)에서 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 flame wrinkling이 크게 일어나는 상류영역에서 실험치와 약간의 오차가 있음을 알 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 평균 화염장은 평균 화염두께와 밀접하게 관련되어 있다. 이러한 수치 해석 결과는 본 연구에서 개발한 LES기반 flamelet/level-set model이 화염장의 비정상 유동특성과 평균 화염면의 broadening 현상을 제대로 예측할 수 있음을 입증하는 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 LES subgrid-scale 모델과 결합된 flamelet model 및 level-set approach를 이용하여 난류 예혼합 화염장을 모델링할 때의 상세한 수식과 절차를 제시하였다. 상세 화학반응 모델의 영향을 고려하기 위하여 flamelet 모델과 level-set 방법을 이용하여 모델링하였으며 화염면을 나타내기 위하여 스칼라 양인 G 를 이용하였고 난류 연소 속도를 모델하기 위하여 필터링된 화염면의 난동 길이 척도, 즉 난류 화염의 두께에 관한 방정식을 사용하였고 계산된 G 값과 이의 난동량을 통해 burning probability를 결정하였다. 난류 예혼합 화염장 해석을 위하여 본 연구에서 개발한 LES 및 RANS 기반의 난류연소모델을 flame holder를 가지는 난류 예혼합 화염장에 적용하여 예측능력을 검증하였다.

참고문헌

- [1] Germano, M., "Turbulence: the filtering approach," *J. Fluid Mech.*, vol. 238, pp. 325-336, 1992.
- [2] Wiliams, F. A., *Turbulent Combustion*, In *The Mathematics of Combustion* (ed. J. D. Buckmaster), pp. 197-1318, 1985.
- [3] Peters, N., *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press, 2000.
- [4] Sjunnesson, A., Henriken, P. and Lofstrom, C., "CARS Measurements and Visualization of Reacting Flows in a Bluff Body Stabilized Flame," *AIAA-92-3650, 28th Joint Propulsion Conference*, 1992.