

보염기 주위의 난류 예혼합 연소에 관한 난류화염 속도 모델의 평가 박남섭¹ · 고상철[†]

(원고접수일 : 2010년 7월 23일, 원고수정일 : 2010년 9월 30일, 심사완료일 : 2010년 10월 25일)

Evaluation of Turbulent Flame Speed Model for Turbulent Premixed Combustion Flow around Bluff Body

Nam-Seob Park¹ · Sang-Cheol Ko[†]

요약 : 본 연구의 목적은 실용연소기를 대상으로 한 복잡한 난류 연소장의 Dynamic SGS G-방정식의 유용성을 확인하는 데에 있다. 본 연구에서는 sub-grid 난류확산과 화염 두께에 근거한 새로운 난류 화염 전파속도 모델을 제안하였으며, sub-grid 난류강도를 이용한 기존 모델과의 비교, 검증을 수행하였다. 해석결과는 실험결과와의 비교를 통해 속도와 온도분포를 잘 예측하고 있음을 확인하였다.

주제어 : 예혼합 연소, 대 와동 모사, Dynamic Sub-grid G 방정식 모델, 난류 화염 전파속도, 보염기

Abstract: The objective of this study is to investigate the validity of the dynamic sub-grid G-equation model to a complex turbulent premixed combustion such as bluff body stabilized turbulent premixed flames for the considering of the realistic engineering application. In this study, a new turbulent flame speed model, introduced by the sub-grid turbulent diffusivity and the flame thickness, is also proposed and is compared with an usual model using sub-grid turbulent intensity and with the experimental data. The calculated results can predict the velocity and temperature of the combustion flow in good agreement with the experiment data.

Key words: Premixed combustion, Large eddy simulation, Dynamic sub-grid G-equation model, turbulent flame speed, Flame holder

1. 서 론

연소실 내부의 연소 반응류에 대한 기초연구 및 테스트 장비를 통한 코드 개발과 검증을 위한 데이터 베이스화가 Sjunnensson 등[1-3]에 의해 수립되었다. 그는 사각 단면의 채널 내부에 화염 안정화를 위한 보염기가 설치된 연소기를 대상으로, 반응류 뿐만 아니라 비 반응류에 대하여 속도장 및 온도장을 측정하였으며 또한 화염 가시화를 수행하였다.

한편, 위의 실험결과를 만족하기 위하여 다양한 수치해석적 연구가 수행되었으며, Olovsson[4]은

k-ε난류모델에 근거한 유동해석 방법으로는 이와 같은 유동을 잘 예측할 수 없다는 사실을 알게 되었다. k-ε난류모델의 기본적인 불일치는 보염기 후방의 혼합율에 관한 과소평가로 인해, 화학반응뿐만 아니라 유동패턴을 잘 예측할 수 없다는 것이다. 실험결과에서 보면, 비 반응류인 경우에 있어서 후류가 고 에너지를 함유한 큰 척도 볼텍스(Large scale vortex) 구조를 갖는 전형적인 Karmann 와열 거동을 하고 있음을 나타내고 있다. 이와 같은 유형의 난류는 명백히 비등방성이고 또한 형상에 의존하기 때문에 k-ε모델과 같은 단순

[†] 교신저자(전주대학교 기계자동차공학부, E-mail: scko@jj.ac.kr, Tel: 063-220-2623)

¹ 유한대학 기계과

한 난류모델로는 모델화가 어렵다.

이와 같은 이유로, 비정상적인 난류 거동에 대한 보다 정확한 예측방법을 필요로 하게 되었으나, 직접해법(DNS: Direct numerical Simulation)의 경우는 과도한 격자해상도와 계산기 능력을 필요로 하기 때문에 실용적이지 못한 실정이다. 따라서 큰 스케일의 와동은 직접해석하고 작은 스케일의 와동은 모델화를 행하는, 대 와동 모사(LES: Large Eddy Simulation)가 비정상 연소류의 수치해석에 가장 적합하다고 판단되어 진다. 근래에 G 방정식[5]의 LES에서의 고정도 모델로서 Dynamic sub-grid 연소모델[6] 등이 제안되어 있지만, 아직 복잡한 실용 연소장예의 적용 예는 보고되어 있지 않으며, 기 보고되었던 LES의 적용 예 또한 단순한 형상 또는 저 레이놀즈 유동의 경우가 대부분이다.

공학상 중요한 실용 연소기의 경우, 고 레이놀즈 수 유동에서의 화염날림이나 소염, 연소 진동 등의 연소 비정상 거동을 해명하기 위해서는 정확한 난류 혼합과정에 대한 해석을 바탕으로 화염면의 위치를 나타내는 고 정도의 연소모델을 확립할 필요가 있다고 판단되며, 특히 연소모델을 정립하는 과정에서 난류 화염 전파 속도(Turbulent flame propagation speed)에 대한 실용적인 모델화가 가장 중요한 과제라 생각된다.

따라서 본 연구에서는 보염기 주위의 예혼합 연소류에 관한 LES를 Dynamic SGS 연소 모델을 이용하여 수행하고, 난류 확산과 화염두께에 기초한 새로운 난류 화염전파 속도 모델을 도입하였으며, 난류강도를 이용한 기존 모델과의 비교, 검증을 수행하였다.

2. 지배방정식

2.1 기초방정식

본 계산대상의 연소류에 있어서 유속과 반응에 의한 팽창속도(연소속도)가 음속에 비해 충분히 작다는 사실로부터 밀도의 온도 의존성을 고려하면 저 마하수 근사가 성립한다. 본 연구에서는 저 마하수 근사를 실시한 질량보존식, 운동량보존식, 에너지보존식 및 화염전파를 나타내는 G 방정식을

이용한다. 이하에 본 계산에서 무차원화하여 공간필터 조작을 행한 LES의 지배방정식을 나타낸다.

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

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{u^*}{Re} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}^{SGS}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{T}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{T} \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda^*}{Re Pr} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_j^{SGS}}{\partial x_j} + \dot{\omega} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{G}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{G} \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \gamma_j^{SGS}}{\partial x_j} + \overline{\rho_u S_L^0 |\nabla G|} \quad (4)$$

여기서, ρ 는 혼합기의 밀도, u_i 는 x_i 방향의 속도, p 는 압력, μ 는 분자 점성, T 는 온도, 그리고 $\dot{\omega} = \overline{\rho_u S_L^0 |\nabla G|}$ 는 반응에 따른 열방출을 나타낸다. $Re (= U_{in} h / \nu_{air})$ 는 입구속도($U_{in} = 40$ m/s), 보염기 높이($h = 40$ mm), 입구에서의 공기의 점성계수로 무차원화한 레이놀즈 수로 $Re = 31,300$ 이다. 또한 Prandtl 수 $Pr = 0.7$ 로 하여 계산을 수행하였다. 온도 T 는 혼합기 온도 T_{gas} , 미연 혼합기의 온도 T_u , 기연 혼합기의 온도 T_b 로 다음과 같이 무차원화하였다.

$$\tilde{T} = (T_{gas} - \tilde{T}_u) / (\tilde{T}_b - \tilde{T}_u) \quad (5)$$

또한, μ^* 는 무차원한 분자 점성계수로, 온도 의존성을 나타내는 바와 같이 $\mu^* = (T_{gas} / T_u)^{0.76}$, 온도확산계수도 같은 방법으로 $\lambda^* = (T_{gas} / T_u)^{0.76}$ 을 부가하였다[7].

τ_{ij}^{SGS} 는 SGS 응력, q_j^{SGS} , γ_j^{SGS} 는 온도 T 와 G 의 SGS 스칼라 유속으로, 아래와 같이 나타낸다.

$$\tau_j^{SGS} = \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) \quad (6)$$

$$q_j^{SGS} = \bar{\rho} (\tilde{u}_j \tilde{T} - \tilde{u}_j \tilde{T}) \quad (7)$$

$$\gamma_j^{SGS} = \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{G} - \tilde{u}_i \tilde{G}) \quad (8)$$

2.2 G 방정식의 Dynamic Sub-grid 모델

식 (4)의 스칼라 유속 γ_j^{SGS} 은 단순한 구배 확산을 가정하여 아래와 같이 모델화한다.

$$\gamma_k = -\bar{\rho} C_G \Delta^2 |\tilde{S}| \frac{\partial \tilde{G}}{\partial x_k} \quad (9)$$

상수 C_G 를 결정하기 위해 Dynamic 모델을 이용하면,

$$C_G \Delta^2 = -\frac{F_i H}{H_j H_j} \quad (10)$$

여기에서,

$$F_k = \widetilde{u_k G} - \widehat{u_k} \widehat{G}, \quad H_k = (\widehat{\Delta}/\Delta)^2 |\tilde{S}| \frac{\partial \widehat{G}}{\partial x_k} - |\tilde{S}| \frac{\partial \tilde{G}}{\partial x_k}$$

$$\widetilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \widetilde{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \widetilde{u_j}}{\partial x_i} \right), \quad |\tilde{S}| = (2\widetilde{S}_{ij} \widetilde{S}_{ij})^{1/2}$$

위에서, \widetilde{S}_{ij} 는 변형율을 나타내며, 특성길이 스케일 $\Delta = (\delta x_1 \delta x_2 \delta x_3)^{1/3}$ 로 주어지고 이때 δx_i 는 격자간격을 의미한다. 또한 ($\widehat{\quad}$)은 Test 필터 조작을 나타낸다.

2.3 난류 화염 전파 속도의 모델링

G 방정식의 난류 화염전파항은 다음과 같이 근사화한다.

$$\overline{\rho_u S_L^0 |\nabla G|} = \rho_u \widetilde{S} |\nabla \tilde{G}| \quad (11)$$

여기서, \widetilde{S} 는 필터조작을 한 난류 화염 전파속도로, 모델화할 필요가 있다.

(a) Model A

LES sub-grid 연소모델의 통상적인 난류 화염 전파 속도항에 대해서는, Im 등[6]에 의해 제시된 Dynamic 과정에 따라 얻어진다. Dynamic sub-grid 연소모델에 의하면, Grid필터 조작을 한 화염 전파 속도 \widetilde{S}_T 와 Test 필터조작을 행한 화염전파 속도 \widehat{S}_T 는 다음과 같은 형식으로 모델화한다.

$$\widetilde{S}_T / S_L^0 = 1 + C_\alpha (q / S_L^0)^n \quad (12)$$

$$\widehat{S}_T / S_L^0 = 1 + C_\alpha (Q / S_L^0)^n \quad (13)$$

따라서 Im 등[6]에 의해 제시된 Dynamic 과정에 따라 미지의 모델상수 C_α 는 다음과 같이 얻어진다.

$$C_\alpha = \frac{(S_L^0)^n [|\widehat{\nabla G}| - |\nabla \widehat{G}|]}{Q^n [|\widehat{\nabla G}| - q^n |\nabla \widehat{G}|]} \quad (14)$$

여기서, n은 모델정수로, 본 계산에서는 1로 하였다. q와 Q는 각각 Grid 필터와 Test 필터의 Sub-grid Scale 난류강도로, 이하에 표시하는 Bardina의 Scale 상사모델을 이용하여 주어진다.

$$q^2 = \widetilde{u_i} \widetilde{u_i} - \widehat{u_i} \widehat{u_i}, \quad Q^2 = \widehat{u_i} \widehat{u_i} - \widetilde{u_i} \widetilde{u_i} \quad (15)$$

그러나 위 모델은 sub-grid 스케일의 난류강도를 산정하는 데에 있어서 너무 민감하기 때문에, 보다 일반적인 모델을 필요로 한다.

(b) Model B

통상적인 LES 연소모델의 난류 화염 전파 속도 S_T 는 sub-grid 난류 강도에 대한 모델링을 필요로 하지만, 실험에 의해 이를 확인할 수 없기 때문에, 모델링의 정도를 확인하기 어렵다. 본 연구에서는 화염 특성 스케일을 보다 많이 반영한 모델을 개발하기 위하여, 층류 화염 두께를 고려한 새로운 모델을 제안하였다.

$$\frac{S_T}{S_L} = \sqrt{\frac{D_t}{D}} \approx \sqrt{\frac{\nu' l}{S_L l_F}} \quad (16)$$

여기서, D_t 는 난류확산, D 는 층류확산, ν' 은 난류 강도, l 은 길이 스케일, l_F 는 층류화염 두께를 나타낸다. 따라서 층류화염 두께와 sub-grid 난류 확산에 의해 도입된 새로운 모델은 아래와 같이 모델화 된다.

$$\frac{\widetilde{S}_T}{S_L^0} = 1 + C_\beta \left(\frac{D_{SGS}}{S_L^0 l_F} \right)^m \quad (17)$$

여기서 m은 상수, D_{SGS} 는 sub-grid 난류 강도를 나타낸다. 본 연구에서는 $m=0.5$ 를 사용하였으며, D_{SGS} 는 아래와 같이 모델화하였다.

$$D_{SGS} \approx \Delta^2 |\bar{S}| \quad (18)$$

모델상수는 Im 등[6]에 의한 Dynamic 절차에 따라 얻을 수 있으며, 결과적으로 다음과 같다.

$$C_\beta = \frac{(S_L^0 l_F)^m [|\nabla \hat{G}| - |\nabla \bar{G}|]}{[D_{SGS}^m |\nabla \hat{G}| - D_{SGS}^m |\nabla \bar{G}|]} \quad (19)$$

3. 수치해석의 개요

본 연구에서 대상으로 한 Sjunesson[1]에 의한 실험체계를 Figure 1에 나타내었다. 입구로부터 유속 40[m/s], 온도 600 [K], 당량비 0.6의 프로판, 공기 예혼합 기체가 공급된다. 출구압력은 0.1 [MPa] 이다. 여기에서 z 방향으로 48mm를 해석영역으로 하여, 그 경계에는 주기 경계조건을 부과하였다.

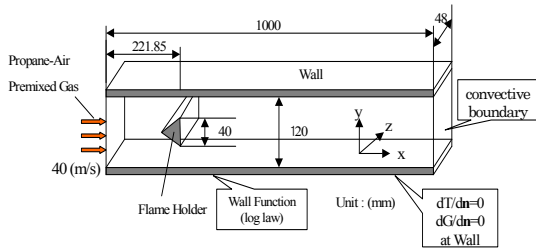


Figure 1: Computational domain

계산코드는 직교 좌표계에 Staggered 격자를 이용하여 구성하였으며, 대류항과 확산항의 공간차분에 대해서는 2차 정도의 중심차분, 시간차분에 대해서는 Adams-Bashforth 스킴을 이용하였다. 단, 계산의 안정화를 위해 G 방정식의 대류항에는 QUICK 스킴을 사용하였다. 압력해법에는 HSMAC법을 사용하여 계산을 수행하였다.

계산격자수는 각각 주류방향(x), 벽면 수직방향(y), Span방향(z)의 해석영역에 대해서 120×60×16의 격자점을 사용하였다.

계산시간은 Time Step ΔT를 0.0025로 주어 초기상태로부터 실제흐름 시간으로 0.1초(무차원 계산시간은 40,000 ΔT)까지 계산하였다. 이것은 예혼합 기체가 해석영역 내를 4회 통과하는 시간이다. 시간 평균에 관한 처리는 더욱이 시간 0.1~0.15

초까지 계산을 수행하여, 그 사이의 0.05초에 대해 행하였다.

해석에서는 난류장의 해석에 있어서 Dynamic SGS 모델을 이용하여 모델계수 Cs를 동적으로 결정한다. 연소모델에 관해서는 어느 경우에 대해서도 Dynamic Sub-grid 연소모델을 적용하여 수치계산을 수행하였으며, Dynamic SGS 연소모델의 난류화염 전파 속도 모델의 검증을 위해, Table 1에 표시한 2가지 경우(LES A, LES B)에 대하여 수치해석을 수행하였다.

Table 1: Calculation cases

	combustion model	Turbulent SGS model	SGS Turbulent Prandtl No.
LES A	Model A	Dynamic	Pr _t =0.9
LES B	Model B	Dynamic	Pr _t =0.9

Table 2: Model parameters

Re	Pr	Φ	S _L ⁰	l _F	T _b
31,300	0.7	0.6	0.45 [m/s]	0.3 [mm]	1854 [K]

한편, 본 계산에 이용된 모델계수를 표 2에 나타내었다. Muller 등[8]에 의한 단일 화염 반응을 고려한 경우, 예혼합 프로판 혼합기의 당량비는 Φ=0.6 이고, 층류 화염 속도 S_L⁰=0.45 [m/s], 층류 화염 두께 l_F=0.3 [mm], 기연가스 온도 T_b=1854 [K]를 부여하여 계산을 수행하였다.

4. 계산결과 및 검토

Figure 2에는 각각의 해석결과에 있어서 시간평균 온도분포를 나타내었으며, Figure 3에 시간평균 반응률(열 방출률) 분포를 나타낸다. 각각의 난류 화염 전파 속도 모델을 사용한 경우의 해석결과에 큰 차이가 보이지 않음을 알 수 있다. 한편, 연소에 의한 화염면에서의 열방출을 조사하기 위한 시간평균 반응률(열 방출율) 분포에서 알 수 있는 바와 같이, 열이 방출되는 위치는 화염면(온도가 급변하는 영역)과 일치하고 있음을 알 수 있다.

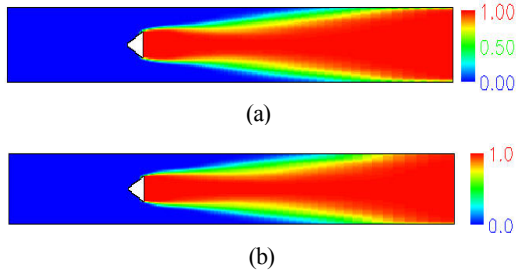


Figure 2: Normalized time-averaged temperature distribution (a) LES A (b) LES B ; zero means fresh gases (600K) and one means burnt gases (1854K)

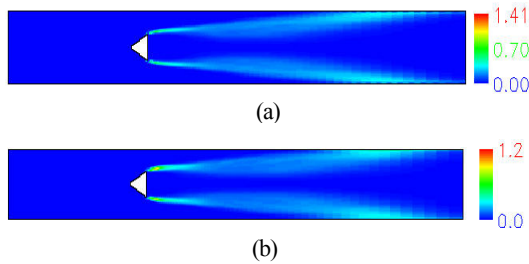


Figure 3: Time-averaged reaction rate distribution $\langle \dot{\omega} \rangle = \langle S_T | \nabla \bar{G} \rangle$ for LES (a) LES A (b) LES B

Figure 4와 Figure 5에 각각 보이기 후방 3위치(150 mm, 350 mm, 550 mm)에서의 시간평균 온도분포와 반응률(열 방출율) 분포를 나타낸다. 그림 4의 시간평균 온도분포 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 난류 화염 전파속도에 대한 모델 A와 모델 B의 경우 모두 화염 전파 특성을 잘 예측하고 있어 Sjununsson 등[1-3]의 실험결과와 잘 일치하는 결과가 얻어졌다. 특히, 난류 확산과 화염두께에 기초한 새로운 난류 화염전파 속도 모델을 도입한 LES B의 경우가 LES A에 비하여 전체적으로 화염면에서의 열 방출을 나타내는 반응률에 대한 피크값을 다소 적게 평가하고 있어, 실험결과에 더욱 잘 일치하는 경향을 보여준다.

Figure 6은 각 단면에서 x 방향 속도의 시간평균값을 나타내었으며, Figure 7과 8에 각각의 단면에서 x 방향의 변동속도, y 방향 변동속도의 시간 평균치를 나타내었다. 속도의 예측에 관해서는, 보이기 후방 각 지점에서 LES해석결과는 어느 경우에도 실험결과와 잘 일치하는 결과가 얻어졌다. 한편 변동속도에 관해서도, 피크치의 예측 등을 포

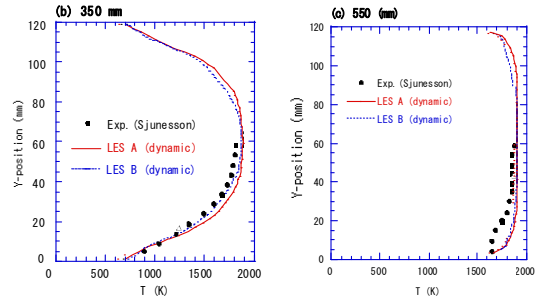
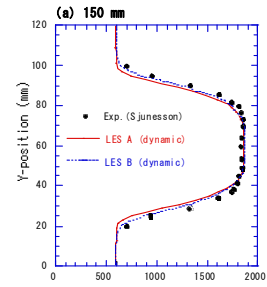


Figure 4: Comparison of time averaged temperature distributions in the three cross sections downstream the flame holder (a) 150 mm (b) 350 mm (c) 550 mm

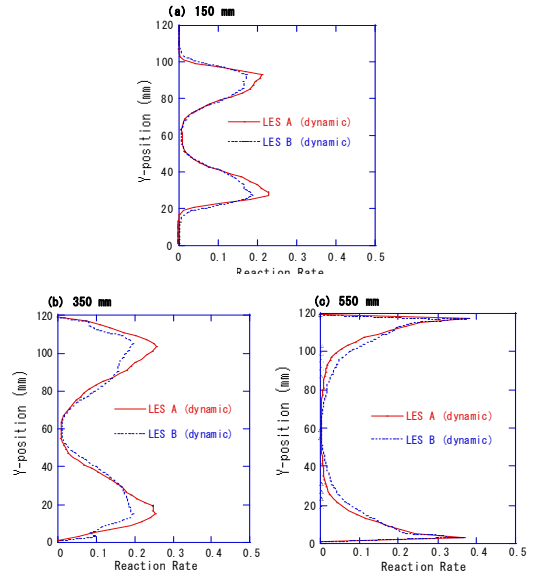


Figure 5: Comparison of Time-averaged reaction rate distributions, for LES in the cross sections downstream the flame holder (a) 150 mm (b) 350 mm (c) 550 mm

함하여 비교적 실험결과와 잘 일치하는 결과가 얻어졌다.

Figure 6(b)의 보염기 후방 $x=38$ mm 지점에서의 속도 예측정도에 관해서는, $y=60$ mm의 중심단면에서 LES A 및 LES B의 경우 모두 보염기 배면의 순환 속도 예측이 다소 과대평가 되어 있다. Figure 9(c)의 보염기 후방 61 mm 지점에서의 해석결과에서도 순환영역에서 순환유속이 실험결과에 비해 다소 크게 평가 되어있음을 알 수 있으며, LES A의 경우가 LES B의 경우에 비해 보염기 배면의 순환 유속을 좀 더 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 반면에, 보염기 후방 $x=150$ mm 지점에서는 반대의 경향이 나타나, LES B인 경우의 해석결과가 LES A인 경우에 비해 순환속도의 예측을 과대평가 하고 있다.

이상의 결과에서 보면, 전반적으로 LES 해석 결과는 실험결과에 비해 보염기 배면의 재순환 영역을 약간 작게 평가하고 있음을 알 수 있으며, LES B를 사용한 경우의 해석결과가 LES A인 경우의 해석결과에 비해 보염기 후방에서의 재순환 영역의 회복속도가 다소 빠르다는 사실을 알 수 있다.

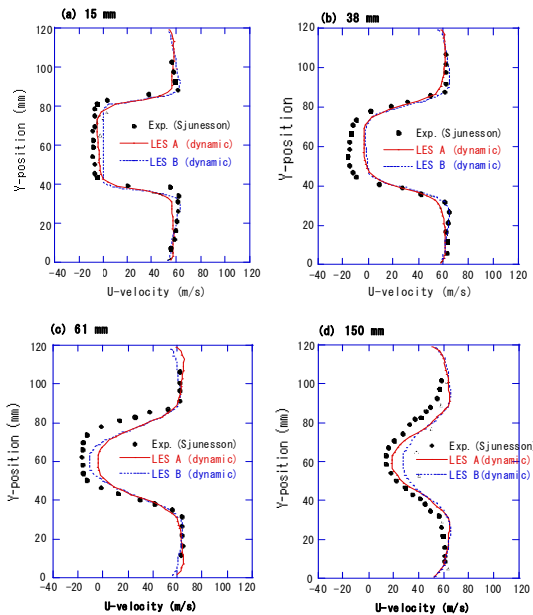


Figure 6: Time-averaged u-velocity profiles in four cross sections downstream the flame holder (a) 15 mm (b) 38 mm (c) 61 mm (d) 150 mm

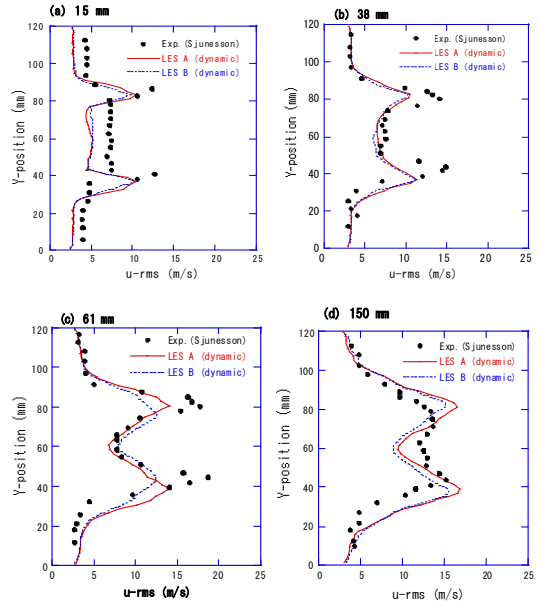


Figure 7: u-rms. profiles in the cross section downstream the flame holder (a) 15 mm (b) 38 mm (c) 61 mm (d) 150 mm

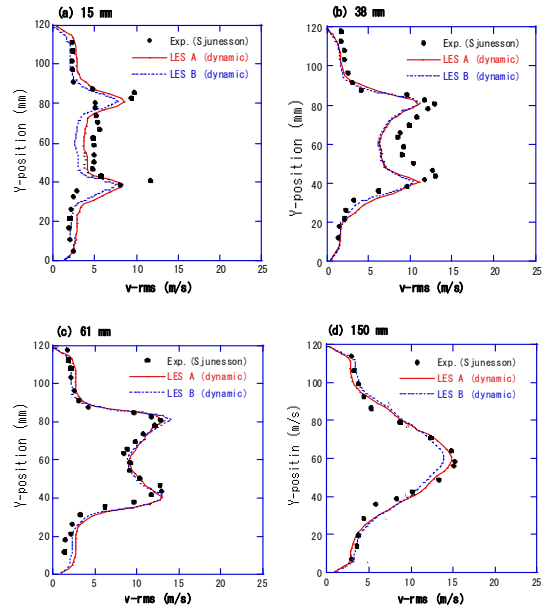


Figure 8: v-rms. profiles in the cross section downstream the flame holder (a) 15 mm (b) 38 mm (c) 61 mm (d) 150 mm

5. 결 론

Dynamic Sub-grid G-방정식을 이용하여 보염기 주위의 예혼합 연소유동에 관한 LES 수치해석을 수행하였다. 난류 확산과 화염두께에 기초한 새로운 난류 화염전파 속도 모델을 도입하였으며, 난류강도를 이용한 기존 모델과의 비교, 검증을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

난류화염 전파속도 모델에 관계없이, Dynamic 연소모델을 이용한 해석결과는 실험결과와의 비교를 통해 온도 및 속도분포, 속도 변동성분등을 잘 예측하고 있어, LES 수치해법을 이용한 안정된 예혼합 화염의 해석에 유용하다는 사실을 확인하였다.

본 해석결과에 따라 실용 연소기내 연소 LES에 있어서, 난류 확산과 화염두께에 기초한 새로운 난류 화염전파속도 모델(LES B)을 이용한 해석결과는 Sub-grid 난류강도를 이용한 기존 모델(LES A)에 비하여 화염면에서의 열 방출을 나타내는 반응률에 대한 피크값을 다소 적게 평가하고 있어, 실험결과에 더욱 일치하는 결과가 얻어졌다.

참고문헌

- [1] A. Sjunnesson, S. Olovsson and B. Sjöblom, "Validation Rig - A tool for flame studies", proceedings of 10th Int. Sympo. on Air Breathing Engines (ISABE), Nottingham, England, 1991.
- [2] A. Sjunnesson, C. Nelson and E. Max, "LDA measurements of velocities and turbulence in a bluff body stabilized flame", proceedings of the 4th Int. Conf. Laser Anemometry Advances and Applications, ASME, Cleveland, USA, 1991.
- [3] A. Sjunnesson, P. Henriken and C. Löfström, "CARS measurements and visualization of reacting flows in a bluff body stabilized flame", proceedings of the 28th Joint Propulsion Conf., AIAA-92-3650, 1992.
- [4] S. Olovsson, "Combustion calculations

on a premixed system with a bluff body flame holder", proceedings of the 28th Joint Propulsion Conf., AIAA-92-3470, 1992.

- [5] A. R. Kerstein, Wm. T. Ashurst and F. A. Williams, "Field equation for interface propagation in an unsteady homogenous flow field", Phys. Rev. A. 37, pp. 2728, 1988.
- [6] H. G. Im and T. S. Lund, "Large eddy simulation of turbulent front propagation with dynamic subgrid models", Phys. Fluids 9(12), pp. 3826-3833, 1997.
- [7] Paul E. Des Jardin, Large Eddy Simulation of Strongly Radiating Nonpremixed Turbulent Jet Flames, Purdue University, Doctor's Thesis, 1988.
- [8] U. C. Müller, M. Bollig, and N. Peters, "Approximations for burning velocities and Markstein numbers for lean hydro carbon and methanol flames", Combustion and Flame 108, pp. 349-356, 1997.

저 자 소 개



박남섭(朴南燮)

1989년 한양대학교 기계공학과 (공학사), 1995년 일본 동경대학 기계공학과(공학석사), 2000년 일본 동경대학 기계공학과(공학박사), 2001-2007년 현대자동차 연구개발본부, 2007년-현재 유한대학 기계과(교수). 관심분야: 전산유체역학



고상철(高相喆)

1985년 부산대학교 기계설계공학과 (공학사), 1999년 일본 동경대학 기계공학과(공학박사), 1999-2000년 동경대학 국제 산학 연구센터, 2000-2002년 삼성전자, 2002년-현재 전주대학교 기계자동차공학과(교수). 관심분야: 전산유체역학