



난류 예혼합연소 화염의 LES 및 산업용 연소기 개발을 위한 LES 응용 해석 기술

박 남 섭,^{*1} 류 종 혁²

LES OF TURBULENT PREMIXED COMBUSTION FLAME AND LES APPLICATION FOR THE INDUSTRIAL COMBUSTOR DEVELOPMENT

Namseob Park^{*1} and Jonghyuk Ryu²

LES results of turbulent premixed combustion flows are introduced by using the dynamic sub-grid scale model based on G-equation describing the flame front propagation. The turbulent premixed combustion flows around bluff body and over backward facing step are analyzed to validate present formation. LES of swirling partially premixed combustion flame is also performed to conform the predictive capabilities of LES model and to prompt our understanding for the combustion flows over double cone swirl burner combustor by using CFD-ACE+ commercial code.

Key Words : 대와동모사(Large Eddy Simulation), 예혼합연소(Premixed Combustion), 화염편모델(Flamelet Model), 스월유동(Swirl Flow), 유동특성(Flow Characteristics), 가스터빈연소기(Gas Turbine Combustor)

1. 서 론

최근 환경 규제가 강화됨에 따라 가스터빈, 버너 등 대부분의 실용연소기에 희박 예혼합 연소방식의 적용이 활발히 시도되고 있다. 일반적으로 예혼합화염은 연료와 공기를 예혼합 시켜 국부적인 이론연소를 피함으로써 희박한 연료조건에서 낮은 화염온도로 연소가 가능하여 Thermal NOx 생성을 억제할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나, 예혼합화염은 혼합기조성 및 난류강도에 의해 결정되는 난류 연소속도에 의해 지배되기 때문에 확산 혼합과정에서 의해 지배되는 비예혼합화염과는 다르게 연소실 내의 유동변화에 매우 민감하게 반응한다[1]. 그 결과 화염은 매우 불규칙한 거동을 보이며, 부적절한 설계 및 운전으로 인하여 연소기 내부의 소음, 과도한 압력과 및 열전달을 발생시켜 성능저하 및 연소기의 파손을 일으키는 연소 불안정성을 초래할 수 있다[2]. 연소기 내

의 난류유동은 다양한 크기와 강도를 가지는 에디(Eddy)들로 구성되며, 난류화염은 이러한 난류유동과 화학반응간의 시간 및 공간 스케일의 상관계에 의해 화염구조의 특징이 결정된다. 이러한 화염과 유동의 상호작용의 해석은 화염안정화 및 연소실의 설계에 있어 매우 중요하다.

일반적으로 화염안정성의 개선을 위해 가스터빈 연소, 버너 연소 등에 적용되는 선회유동은 화염기부 근처에 재순환 영역을 형성하여 축방향 유속을 낮추기 때문에 화염부상을 억제하며, 재순환영역의 고온 생성물이 미연혼합기를 예열함으로써 반응을 보다 촉진시키는 특징을 가지고 있다.

난류연소 화염을 수치 시뮬레이션 할 경우, 선택할 수 있는 계산 수법으로 DNS(Direct Numerical Simulation), LES, RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)를 들 수 있다. DNS는 저레이놀즈수 유동에 제한되는 국소영역의 연소 해석에 限定되어 있고, RANS는 실용 연소기내 유동에서 공학상 중요한 화염의 blow up, 熄灭, 연소진동 등의 연소유동의 非定常 거동을 해석하기가 곤란하다. 이에 비해, LES는 高레이놀즈수 비정상 유동장의 해석이 가능하며 계산 격자 스케일 성분만을 계산 대상으로 하고 격자 스케일 이하의 아격자(sub-grid) 성분에 대해 모델을 도입하므로, DNS에 비해 계산 부하가 적

1 정희원, 유한대학 기계공학과

2 (주)경원이앤씨

* Corresponding author, E-mail: nspark@yuhan.ac.kr



으며, 비약적인 발전을 보이는 현재의 계산기 능력을 고려할 때 실용 연소유동에 대한 신뢰성 높은 수치해석 방법으로서 LES 해석에 기대하는 바가 크다. LES의 기본 개념은 대부분의 에너지를 포함하고 난류수송의 역할을 담당하는 큰 에디(eddy)는 모델 없이 직접 계산하고, 비교적 등방성의 성격을 갖는 아격자 성분은 모델로 처리하는 것이다. 따라서 LES는 모든 스케일의 유동구조에 영향을 주는 RANS 난류모델 보다는 좀 더 보편적이고 형상과 경계조건에 보다 적게 의존한다. 또한 시간 평균화된 물리량을 이용하여 난류현상을 묘사하는 RANS와는 다르게, LES는 유동의 비정상 효과는 물론 연소유동에서의 연소 불안정성 및 소음 등의 현상을 해석할 수 있는 매우 유용한 접근방법이다[3].

일반적으로 가스터빈 연소기나 로켓추진기관과 같은 실용 연소기 내의 난류 예혼합화염은 층류 화염면(laminar flamelet) 영역으로 분류된다. 이 영역에서는 화염의 두께는 최소 에디 크기보다 작기 때문에 반응은 얇은 면으로 국한되고 반응물과 생성물은 화염면의 양쪽에 각각 존재하며, 층류화염의 구조를 유지하지만 난류 섭동에 의하여 화염띠가 주름진 형상으로 왜곡된다고 간주하면 이로 인하여 화염면이 넓어지고 연소 반응률이 증가하는 주름상 층류화염(wrinkled laminar flame)을 형성한다고 볼 수 있다. 이러한 영역에서 연소는 난류 에디가 뒤엉켜 있는 층류 화염면의 전파로 표현 될 수 있는데, 화염면 모델에 기초한 난류 화염면 전파모델(G-방정식)을 적용할 수 있다[4].

한편, 공학적 응용을 고려한 LES 해석의 경우 화염면의 두께는 LES 해석 격자보다 작기 때문에 아격자(sub-grid) 스케일에서 일어나는 화학반응을 묘사하기 위하여 다양한 모델이 제안되었는데, 주로 화염전파 모델에서는 공간 격자에서 여과(filtering)된 화염전파속도(filtered-front speed)를 묘사하기 위해 여과된 G-방정식을 도입한다. 난류 예혼합화염을 LES로 近似的으로 해석할 시에는 화염전파 항에 대한 난류 난동성분의 영향이 정확히 반영되도록 정교하게 모델링해야 한다.

LES에서는 난류 난동에 의해 미세하게 주름진 화염면을 공간 평균하여 平滑하게 근사하므로 화염면의 외관상의 면적이 減少하여, G-방정식에서는 필터링 조작을 거친 화염면이 過小평과 되기 때문이다. 즉, G-방정식을 적용한 난류 예혼합화염의 LES 계산에서는 화염전파속도에 아격자 스케일(SGS) 난류의 영향을 적절히 고려한 난류화염속도 모델을 선택해야 한다.

본 논문에서는 복잡한 연소실 형상을 가지는 실용 난류 예혼합 연소기의 LES 해석을 위해, 지금까지 개발된 연소모델 가운데 LES에 적용이 비교적 용이하다고 판단되는 G-방정식을 도입하여, 후향 계단 및 保炎器(bluff body) 주위 선회류에 의해 保炎하는 예혼합 연소기에서의 화염전파 거동과 비정상

유동 특성을 해석한 결과를 소개한다[10].

한편, 과거 10년 전만 해도 LES 해석 기술은 방대한 계산 시간과 슈퍼컴퓨터 계산 환경의 요구, 소스 코드 개발 및 확보의 어려움 등으로 인해 특정 유명 대학 및 연구소의 LES 연구자를 위한 전문분야의 작업으로 보여 졌고, 일반 산업체 개발 현장에 종사하는 CFD 엔지니어에게는 개발 현업에 적용하기에는 효율과 비용에서 거리감이 있는 분야로 평가되었다. 그러나 최근에는 컴퓨터의 연산속도와 메모리 성능의 비약적인 발전, 복잡한 형상에 대한 자동격자 생성기술, 그리고 LES 계산 기법의 안정성 향상에 고무되어 LES 해석 모델이 주요 상용 코드에 기본 모델로 제공되기 시작하면서, 기존 RANS 모델의 적용에 있어 한계를 보이는 연소해석을 중심으로 하여 LES를 활용한 고급 해석에 대한 관심과 요구가 증가되는 추세에 있다.

본 논문에서는 더블콘(double cone) 스웰 버너 연소기 개발에 있어 연소 화염 안정화 및 低NOx용 연소기 설계를 위해 상용 코드 CFD-ACE+의 연소 LES 모델을 사용하여 해석한 결과를 소개 한다. 버너 연소기는 화염 안정화를 위해 스웰 인젝터를 채용하고 있다. 스웰 연소기에서 발생하는 Vortex 구조 및 NOx 생성량은 인젝터의 유량 및 배치 위치, 스웰의 세기, 연소기 형상, 입구조건에 의해 크게 영향을 받은 것으로 알려져 있다. 해석 결과, 반응 시 나타나는 열방출은 속도 크기의 변화와 유동 구조에 영향을 미치고 있으며 LES로 상세한 유동구조 및 화염특성을 재현할 수 있었다.

2. 난류 예혼합화염 전파모델

2.1 화염전파방정식

연소기내 유동장에서는 유속이 음속에 비하여 상당히 작기 때문에 밀도의 온도의존성을 고려하면 低Mach수 近似가 성립한다. 低Mach수 근사를 적용한 질량보존식, 운동량보존식, 에너지보존식 및 화염전파를 나타내는 G-방정식을 적용했다. LES에 대한 G-방정식의 정식화는 다음 식으로 주어진다[5].

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{G}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{G} \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \gamma_j^{SGS}}{\partial x_j} + \overline{\rho_u S_L^0 |\nabla G|} \quad (1)$$

우변의 SGS 스칼라流束 γ_j^{SGS} 와 $\overline{S_L^0 |\nabla G|}$ 는 모델링해야 한다. 여기서, \sim 는 Favre 필터가 적용된 변수의 그리드성분(GS)을 나타낸다.

2.2 난류화염전파속도 모델링

화염전파항 $\overline{S_L^0 |\nabla G|}$ 에 대해서는 아격자 스케일에 대한 난류

화염속도로 다음의 定式을 적용하고 모델링한다[5].

$$S_L^0 |\nabla \tilde{G}| = \tilde{S}_T |\nabla \tilde{G}| \quad (2)$$

한편, 층류화염속도에 대한 난류화염속도의 비는 난류확산과 층류확산의 관계식으로부터 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{S_T}{S_L} = \sqrt{\frac{D_T}{D}} \approx \sqrt{\frac{v' l}{S_L l_F}} \quad (3)$$

여기서, D_T 는 난류확산(turbulent diffusivity), D 는 층류확산(laminar diffusivity), v' 는 난류 강도(turbulent intensity), l 은 적분길이(integral length scale), l_F 는 층류화염두께(laminar flame thickness)이다. 본 해석에서는 層流火炎두께와 아격자(sub-grid) 난류 확산을 導入한 (4)식의 난류화염속도모델을 적용했다[10].

$$\tilde{S}_T / S_L = 1 + C_\beta (D_{sgs} / S_L l_F)^m \quad (4)$$

$$C_\beta = \frac{(S_L^0 l_F)^m \left[|\nabla \tilde{G}| - |\nabla \hat{G}| \right]}{\left[\hat{D}_{sgs}^m |\nabla \hat{G}| - D_{sgs}^m |\nabla \tilde{G}| \right]} \quad (5)$$

여기서, l_F 는 층류화염두께, D_{sgs} 는 아격자 난류확산(subgrid turbulent diffusivity)으로, $D_{sgs} \approx \Delta^2 |\tilde{S}|$ 로 모델링했다. 이때 지수는 $m=0.5$ 로 했다. 단, \wedge 는 Dynamic SGS 모델링에 적용하는 테스트필터를 나타낸다[7].

3. 保炎器 주위 예혼합연소화염의 LES

3.1 해석 대상

연소모델 평가를 위한 계산 대상으로 Sjuneson[6]에 의한 채널 내 三角柱형상의 保炎器(bluff body)에 의해 安定化된 예혼합화염의 실험조건을 사용하였다. 입구에서 유속 40 [m/s], 온도 600[K], 당량비 0.6의 propane-air 예혼합기가 공급된다. 출구 압력은 0.1[MPa]이다. Re수는 31,300 이다. 스펀와이즈 방향에 대해 등방성이라 가정하고 반복 주기 경계조건을 부여했다.

3.2 해석 방법

계산코드는 Cartesian 좌표계 개발 코드로 staggered 격자를 이용하고 대류항과 확산항의 공간 이산화에 2차정도 중심차분, 시간 이산화에는 2차정도 Adams-Bashforth 스킴을 적용했다. 계산안정을 위해 G-방정식 대류항의 공간 차분에는

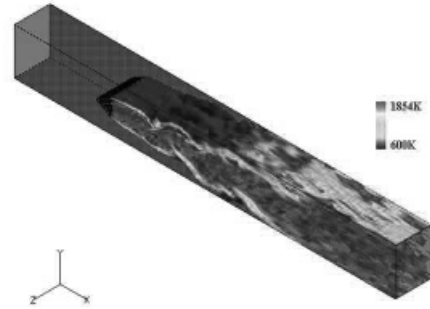


Fig.1 Instantaneous temperature distribution of turbulent premixed combustion flame around bluff body

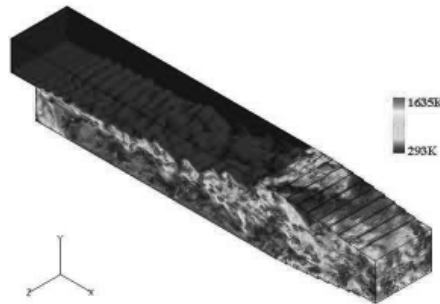


Fig.2 Instantaneous temperature distribution of turbulent premixed combustion flame over backward facing step

QUICK 스킴을 적용했다. 압력 해법에는 HSMAC 법을 이용했다. 난류유동의 계산에는 Dynamic SGS모델을 적용하였다.

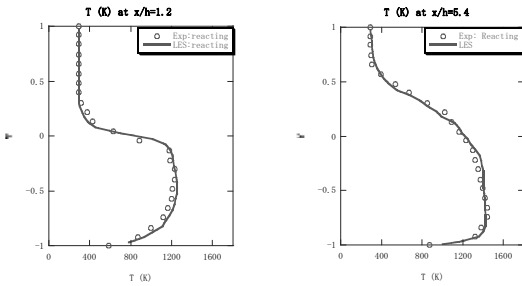
3.3 계산 결과

순간의 연소유동장의 온도분포를 그림1에 나타낸다. 화염은 bluff body 下流에 保炎되어 고온영역을 형성하고 있다. Dynamic SGS 연소모델은 온도 및 속도분포를 잘 재현하고 있어 실용 연소기 해석을 위한 LES 모델로써 유용함을 확인했다. 또한, 연소유동장에서 열방출이 속도크기의 변화와 유동 구조에 미치는 영향을 관찰할 수 있었다[10].

4. 후향 계단 연소기의 예혼합연소화염의 LES

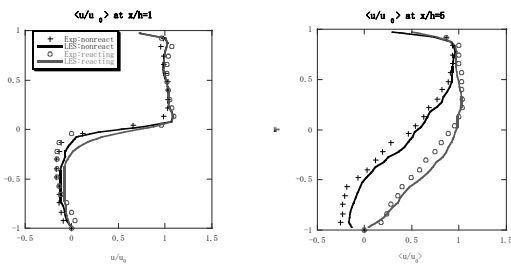
4.1 해석 대상

후향 계단 연소기 유동에 安定된 난류 예혼합연소의 LES 해석은 Pitz 등(1983)[7]에 의한 실험조건을 사용하였다. 입구로부터 流速 13.3[m/s], 온도 293[K], 당량비 0.57의 propane-air의 예혼합기가 공급된다. 출구압력은 0.1[MPa]이다. Re수는



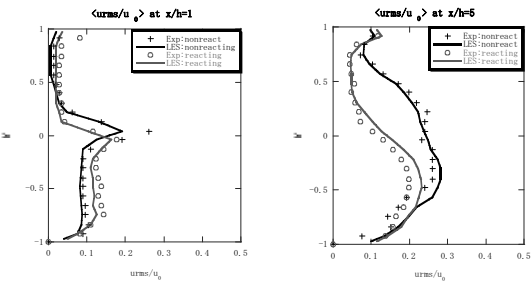
(a) $x/h=1.2$ (b) $x/h=5.4$

Fig.3 Time averaged temperature profiles for the reacting flow



(a) $x/h=1$ (b) $x/h=5$

Fig.4 Time averaged streamwise velocity component profiles for the non-reacting and reacting flows



(a) $x/h=1$ (b) $x/h=5$

Fig.5 Time averaged streamwise u-rms velocity fluctuation profiles for the non-reacting and reacting flows

22,100 이다. 계산격자는 $251 \times 52 \times 20$ 의 격자점을 사용하였다. 난류유동의 계산에는 Dynamic SGS모델을 적용하였다.

4.2 계산 결과

Fig. 2에 해석에서 얻어진 순간유동장의 온도분포를 나타낸다. Fig. 3-5에는 온도, 다운스트림 방향 속도, 난류강도분포

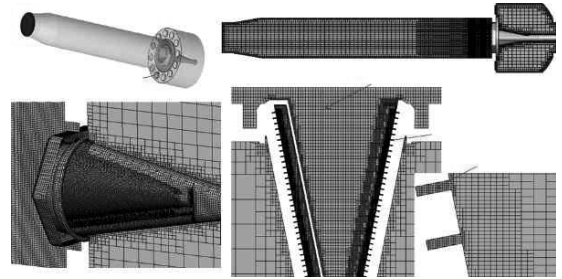


Fig.6 스월 버너 연소기 LES 해석 격자 (by CFD-VisCART)

의 시간 평균 프로파일을 나타낸다. LES 해석결과 속도, 난류 강도 및 온도분포는 실험결과를 잘 재현하였으며, 후향 계단背後에서의 난류 예혼합화염의 구조 및 비정상 유동특성을 파악할 수 있었다[10].

5. 스월 버너 연소기의 부분예혼합연소 LES

5.1 해석 대상

상용코드 CFD-ACE+(Version 2009.0)를 이용하여 더블콘(double cone) 스월 버너 연소기에서의 난류 부분예혼합연소의 LES 해석을 수행하였다. NOx 저감을 위한 fuel 공급 방식 변경에 따른 혼합특성을 파악하기 위함이다. 당량비 0.36의 메탄-공기 혼합기가 공급된다. 해석격자는 CFD-VisCART를 사용하여 Cartesian base body fitted polyhedral 격자를 생성하였으며 격자수는 약 100만 개이다.

5.2 해석 방법

아격자 스케일(sub-grid scale)의 화학반응을 모사하기 위해 PDF model을 사용하였다. 부분예혼합 상태를 모사하기 위해 mixture fraction 및 progress variable에 대한 PDF를 적용하였다.[11] 난류유동해석에는 LDKM(localized dynamic kinetic energy model) 모델을 적용하였다. 화학반응 생성물 예측을 위해 CH_4 에 대한 1단계 반응식, CO농도의 경우 산화 단계를 고려한 반응식, NOx 예측에는 확장 Zeldovich 반응, N_2O 중간생성반응 기구를 적용하였다.

5.3 해석 결과

Fig. 7에 스월 버너 연소기 내부의 유동 특성을 나타낸다. 더블콘(double cone)으로부터 강한 스월이 발생되어 연소기의 중심부에 재순환 영역이 나타났다. 재순환 영역의 평균 길이는 콘 길이의 1.5배 정도 되었으며 콘 안쪽 내부의 절반까지 재순환 영역이 나타나는 것으로 예측된다. Fig. 8에 연소기 내

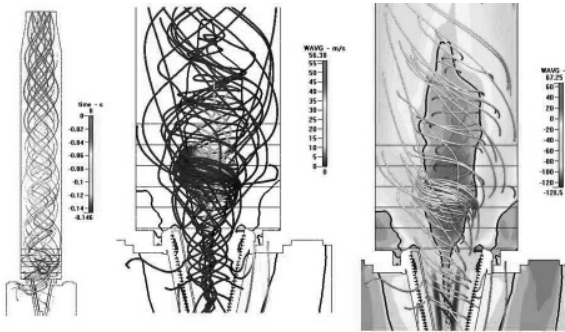


Fig.7 스윙 버너 연소기 내부 유동 형태 (LES 해석)

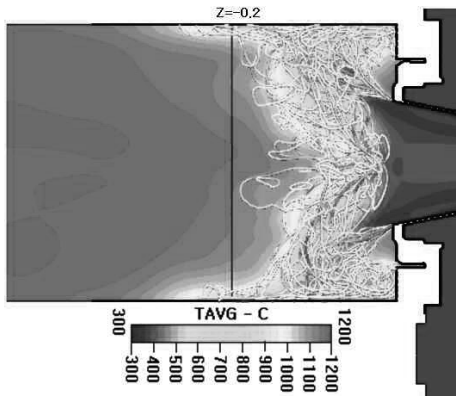


Fig.8 스윙 버너 연소기 내부 평균온도 분포 및 reaction progress variable(0.5) 시간 분포 (LES 해석)

평균온도 분포 및 반응진행도(reaction progress variable, 0.5)의 시간 분포를 나타낸다. 예혼합화염의 위치는 반응진행도의 iso-surface로 표현한다. 화염은 더블콘 끝단 근처에서 V자 형태로 존재하며 $z=0-0.2$ 사이에서 분포하고, 콘 내부에는 화염이 존재하지 않는 것으로 보인다.

LES 해석을 통하여 연소유동의 비정상 거동을 파악하고, 재순환 유동영역의 위치와 거리를 예측하였다. PDF 모델을 이용하여 난류 연소 해석을 수행하여 화염 온도 및 NO_x, CO의 배출 특성을 예측할 수 있었다.

6. 결 론

난류 예혼합 연소기 내의 연소 LES 해석에 적합한 연소모델과 해석방법을 소개하고, 후향 계단 및 保炎器(bluff body) 주위 선회류에 의해 保炎하는 예혼합 연소기에서의 화염전파 거동과 비정상 유동 특성을 해석한 결과를 소개하였다. G-방정식 연소모델을 이용한 난류 예혼합연소 화염에 대한 LES 해석 결과로 부터 화염안정화에 있어 중요한 순환유동 영역

의 크기 및 위치에 대한 상세한 정보를 정확히 예측할 수 있었다. 그리고 속도와 난류강도 및 온도분포도 실험결과를 정확히 재현하고 있음을 확인했다. 또한, 복잡한 형상을 가지는 더블콘 스윙 버너 연소기에 대해 상용 코드인 CFD-ACE+의 연소 LES 모델을 사용하여 수행한 해석 방법 및 해석 결과를 소개하였다. 해석 결과로 부터 LES는 산업용 연소기의 설계 및 개발에 있어 유용하게 적용되고 있음을 확인하였다. 향후 LES의 해석기술이 산업분야의 응용에도 보다 적극적으로 활용되어 발전되어 가기를 기대한다.

참고문헌

- [1] 1995, Keller, J.J., "Thermoacoustic oscillations in combustion, chambers of gas turbine," *J. AIAA*, Vol.33, No.12, pp.2280-2287.
- [2] 1989, Poinsit, T.J., Bourienne, F., Candel, S., Esposito, E. and Lang, W., "Suppression of combustion instabilities by active control," *J. Propulsion and Power*, Vol.5, pp.14-20.
- [3] 2001, Poinsit, T. and Veynamte, D., "Theoretical Numerical Combustion," *Edwards*.
- [4] 1988, Kerstein, A.R., Ashurst, W.T. and Williams, F.A., "Field Equation for Interface Propagation in an Unsteady Homogeneous Flow Field," *Physical Review A*, Vol.37 No.7, pp.2728-2731.
- [5] 1997, Im, H.G. and Lund, T.S., "Large eddy simulation of turbulent front propagation with dynamic subgrid models," *Phys. Fluids*, Vol.9, No.12, pp.3826-3833.
- [6] 1993, Ryden, R., and Eriksson, O., "Large Eddy Simulation of Bluff Body Stabilized Turbulent Premixed Flame," *ASME-93-GT-157*.
- [7] 1991, Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W.H., "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model," *Phys. Fluids A*, Vol.3, p.1760.
- [8] 1983, Pitz, R.W. and Daily, J.W., "Combustion in a Turbulent Mixing Layer formed at a rearward-Facing Step," *AIAA. J.*, Vol.21, No.11, pp.1565-1570.
- [9] 2000, Park, N., Kobayashi, T. and Taniguchi, N., "LES of turbulent premixed combustion flow around bluff body based on the G-equation with dynamic subgrid model," *JSME*.
- [10] 2000, Park, N.S., "Study for LES of turbulent premixed combustion flows by using dynamic subgrid G-equation flamelet models," *Ph. D. Thesis*, The University of Tokyo.
- [11] *ACD-ACE+ user manual*, Version 2009.0.