

# 플레임렛 모델을 적용한 파일럿 확산 화염의 LES 해석

김정은\* · 이복직\*\* · 임홍근\*\* · 정인석\*†

## Large Eddy Simulation of a Piloted Diffusion Flame with a Flamelet Approach

Jung Eun Kim\*, Bok Jik Lee\*\*, Hong G. Im\*\*, In-Seuck Jeung\*†

난류 화염의 수치적 연구를 실질적인 어플리케이션에 적용할 때의 막대한 계산 비용을 절감하기 위해, 난류-연소 상호작용을 적절한 모델로 대체하기 위한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 그 방법으로는 Transported probability density function (TPDF) [1, 2], conditional moment closure (CMC) [3, 4], linear eddy modeling [5, 6], flamelet approach [7-9] 등이 있으며, 그 중 flamelet approach는 모델링을 통한 계산비용의 많은 절감과 적절한 난류화염의 모사를 가능하게 하여 난류화염 수치해석 모델로써 활발히 사용되어 지고 있다.

Flamelet Approach는 난류화염을 층류 화염으로 모사하여 나타낼 수 있다는 가정을 기본으로 하며, Peters [7]에 의해 처음 난류화염으로의 도입이 이루어졌다. 이는 SLFM (steady laminar flamelet model)으로 불리며, 이후 비정상상태의 효과를 고려한 LFM (largrangian flamelet

model) [8], progress variable을 모델링 변수로 도입한 FPV (flamelet progress variable approach)[9] 등으로 발전되었다.

본 연구에서는 OpenFOAM을 기반으로 개발한 코드를 사용하여 파일럿 확산화염에 대한 LES 해석을 수행하였다. 전반적인 계산 과정의 도식도는 Figure 1 과 같다. 엠버 [10] 와 칸테라 [11] 모듈을 활용하여 1D 층류 화염 솔버를 개발하였으며, 확률밀도함수(probability density function, PDF) 콘볼루션으로 플레임렛 라이브러리에 난류영향을 추가하였다. 지배방정식으로는 Favre-filtered Navier-Stokes equation에 혼합분률의 스칼라 수송 방정식, Progress variable의 수송 방정식, 혼합분률 분산의 대수 방정식이 추가로 계산되어졌다.

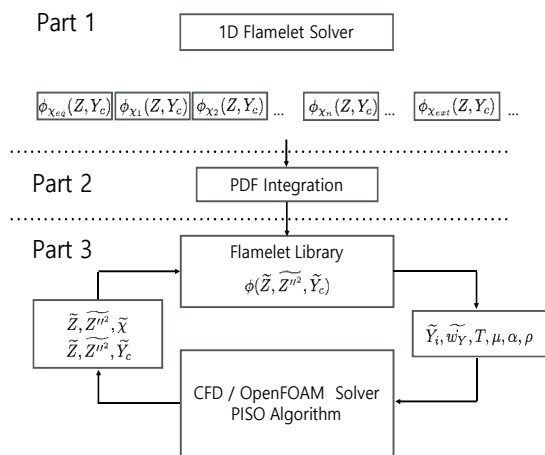


Fig. 1 Procedure of numerical simulation with a flamelet approach

\* 서울대학교, 기계항공공학부  
 \*\* Clean Combustion Research Center, King Abdullah University of Science and Technology  
 † 연락처, enjis@snu.ac.kr  
 TEL : (02)880-1905 FAX : (02)880-1718

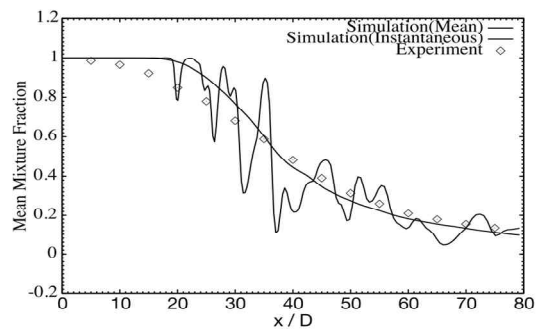


Fig. 2 Mixture fraction profile along the centerline

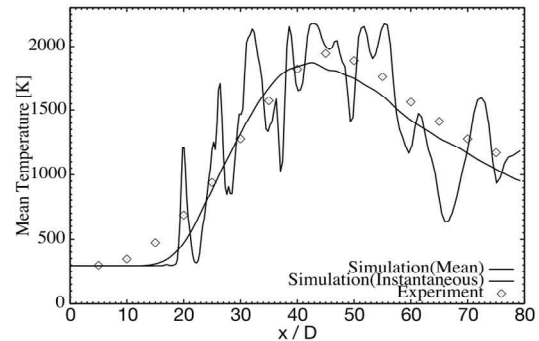


Fig. 3 Temperature profile along the centerline

수치연구 대상으로 Sandia D flame [12] 을 설정하였으며, 총 340만개의 3D 격자를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석 결과로 대칭축을 따른 혼합분율과 온도 분포, 그리고 순간 온도 분포 모습을 Figure 2-4 에 각각 제시하였다.

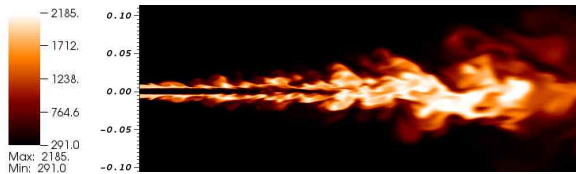


Fig. 4 Instantaneous temperature contours from simulation

## 후 기

This work was supported by Advanced Research Center Program (NRF-2013R1A5A1073861) through the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) contracted through Advanced Space Propulsion Research Center at Seoul National University, and by the King Abdullah University of Science and Technology (KAUST).

## 참고 문헌

- [1] R. P. Lindstedt, S. A. Louloudi, E. M. Váos, "Joint Scalar Probability Density Function Modeling of Pollutant Formation in Piloted Turbulent Jet Diffusion Flames With Comprehensive Chemistry," *P. Combust. Inst.*, Vol. 28, 2000, pp. 149-156.
- [2] Q. Tang, J. Xu, S. B. Pope, "Probability Density Function Calculations of Local Extinction and No Production in Piloted-Jet Turbulent Methane/Air Flames," *P. Combust. Inst.*, Vol. 28, 2000, pp.133-139.
- [3] M. R. Roomina, R. W. Bilger, "Conditional Moment Closure (CMC) Predictions of a Turbulent Methane-Air Jet Flame," *Combust. Flame*, Vol. 125, 2001, pp. 1176-1195.
- [4] A. Kronenburg, M. Kostka, "Modeling extinction and reignition in turbulent flames," *Combust. Flame*, Vol. 143, 2005, pp. 342-356.
- [5] A. R. Kerstein, "Linear-Eddy Modeling of Turbulent Transport. Part 4. Structure of Diffusion Flames," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 81, 1992, pp. 75-96.
- [6] A. R. Kerstein, *J. Fluid Mech.*, "Linear-eddy modelling of turbulent transport. Part 7. Finite-rate chemistry and multi-stream mixing," Vol. 240, 1992, pp. 289-313.
- [7] N. Peters, "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion," *Prog. Energ. Combust.*, Vol. 10, 1984, pp. 319-339.
- [8] H. Pitsch, M.Chen, N.Peters, "Unsteady flamelet modeling of turbulent hydrogen-air diffusion flames," *Symposium (international) on combustion*. Vol. 27. No. 1. Elsevier, 1998.
- [9] C. D. Pierce and P. Moin, "Progress-variable approach for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 504, 2004, pp. 73-97.
- [10] R. L. Speth, Ember, <http://github.com/speth/ember>, 2015.
- [11] D. G. Goodwin, H. K. Moffat, R. L. Speth, <http://www.cantera.org>, 2015.
- [12] R. S. Barlow, J. H. Frank, "Piloted CH<sub>4</sub>/Air Flames C, D, E, and F," <http://www.ca.sandia.gov/TNF>