

FGM기반 Multi-Environment PDF 모델을 이용한 메탄/공기 부상화염장의 Large Eddy Simulation

김남수* · 김재현* · 김용모**

Large Eddy Simulation of a Lifted Methane/Air Flame using FGM-based Multi-Environment PDF Approach

Namsu Kim*, Jaehyun Kim*, Yongmo Kim**

ABSTRACT

The multi-environment PDF model coupled with flamelet generated manifolds(FGM) has been developed for a large eddy simulation of turbulent partially premixed lifted flame. This approach has a capability to realistically account for the transport and evolution of probability density function for mixture fraction and progress variable with the manageable computational burden. Using the tabulated chemistry, it is possible to track radical distributions which is important to predict autoignition process with the vitiated coflow environment. Numerical results indicate that the present yields the good agreement with experimental data in terms of mixture fraction, temperature, and species mass fractions.

Key Words : Large eddy simulation, Multi-environment PDF model, Chemistry tabulation, Flamelet generated manifold, Turbulence-chemistry interaction, Autoignition

효율적인 연소와 공해물질 저감을 위해서 연료와 공기의 묽은 혼합물을 이용한 연소시스템이 개발되고 있다. 이러한 연소시스템에서 연료와 산소의 혼합물은 보편적으로 연소생성물을 이용하여 연소된다. 연소생성물을 이용하게 되면 연소온도를 낮출 수 있어 질소산화물의 생성물이 저감된다. 또한 뜨거운 연소생성물이 연료, 산소와 함께 섞이기 때문에 화염의 안전성을 높일 수 있다. 안정적인 묽은 혼합물의 연소를 예측하기 위해서는 여러 문제들을 해결해야만 한다. 특히 기존의 확산화염과는 달리 연료나 산소가 연소생성물과 섞이면서 생기는 묽은 혼합물의 화학반응은 혼합과정이 지배한다고 볼 수 없기 때문에 화학반응속도도 함께 고려해야 한다. 연소혼합물의 안정성은 연료의 조성, 연료와 함께 섞이는 연소생성물의 조성, 그리고 연소실 내의 조건에 따라서 크게 달라질 수 있다.

본 연구에서는 Cabra와 그의 동료들에 의해 실험된 메탄/공기 제트 부상화염[1]에 대해 LES 수치해석을 진행하였다. Cabra의 실험은 중앙의

제트에서 메탄과 공기의 혼합물($X_{CH_4} = 0.33$, $X_{O_2} = 0.15$, $X_{N_2} = 0.52$)이 분사되며 중앙의 제트 주위로 수소/산소의 연소생성물($\phi = 0.4$) 동축류가 흐른다. 이 동축류의 온도는 1350K이며 화염이 안정화되는 위치는 노즐로부터 약 30 노즐지름 만큼 유동방향으로 진행된 거리이다.

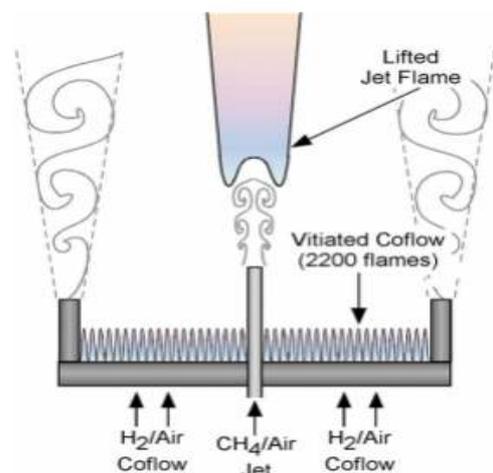


Fig. 1 Burner Schematic of a lifted CH₄/air jet flame in vitiated coflow.[1]

* 한양대학교 기계공학과

† 연락처, ymkim@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0428 FAX : (02)-2297-0339

본 연구에서는 직접모멘트구적법(DQMOM)을 사용하여 수치격자 내부의 혼합물상태와 화학반응과정을 확률적으로 모델하였다. 또한 1차원 예혼합화염을 이용한 라이브러리를 만들어 상세 화학반응 메커니즘을 적용하면서 동시에 계산시간을 줄이는 접근법을 선택하였다. 이와 같은 접근법을 통해서 자발화 과정(autoignition)을 적은 계산량으로 정확하게 모사할 수 있었다.

수치해석에는 250만개의 수치격자를 사용하였다. 노즐의 지름은 4.57mm 이고 해석영역의 크기는 길이방향으로 150D, 반경방향으로 80D 로 결정하였다. OpenFOAM 코드를 이용하여 해석하였으며 사용된 경계조건은 다음과 같다.

Table 1 Boundary conditions

Name	Type	Value
fuel	fixedValue(U), zeroGradient(P)	100m/s
coflo w	fixedValue(U), zeroGradient(P)	5.4m/s
Outlet	zeroGradient(U), waveTransmissive(P)	101325Pa
wall	noSlip	

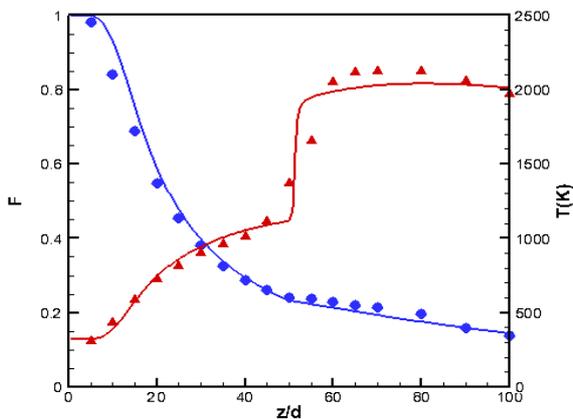


Fig. 2 Axial profiles of time averaged mixture fraction(blue line: simulation results, blue circle: experiment data) and temperature(red line: simulation results, red triangle : experiment data)

Fig. 2에 축방향의 온도와 혼합분율 실험측정 값과 수치모사결과를 함께 나타내었다. 혼합분율의 분포뿐만 아니라 화염부상 위치와 화염의 온도가 실험치와 유사하다. $z/d=35$ 이후 화염의 온도를 과소 예측하는 것은 progress variable의 micro-mixing 모델이 부정확하여 이 부분에서 반응이 화학적 평형상태에 도달하지 못한 결과이다.

실험결과와 비교를 통해 FGM Multi-Environment PDF 접근법이 수치격자

내부에서 확률분포함수변화와 난류-화학반응 상호작용을 제대로 예측하고 있음을 확인하였다. 특히 노즐 근방에서의 혼합, 자발화 과정, 그리고 화염부상의 높이를 정확히 예측할 수 있으므로 앞으로 공해물질 저감을 위한 희박연소 시스템의 화염을 예측에 효율적으로 사용될 수 있을 것이다.

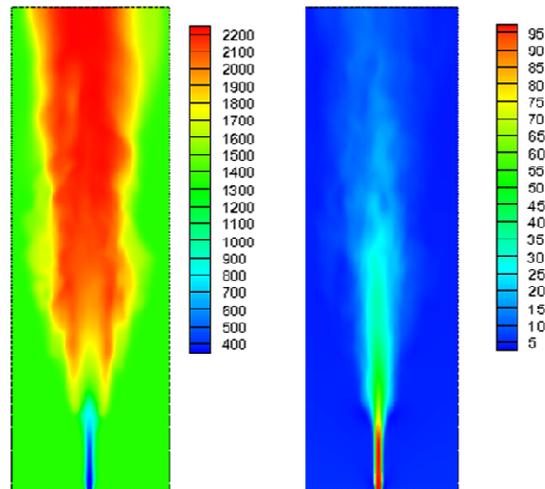


Fig. 3 Contours of time averaged temperature (left) and velocity magnitude(right)

후 기

본 연구는 2015년 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KEPTEP)의 지원을 받아 수행한 한국형 300MW급 IGCC 실증플랜트기술개발사업 연구과제입니다.

참고 문헌

[1] R. Cabra, J.Y. Chen, R.W. Dibble, A.N. Karpetis, R.S. Barlow, "Lifted methane - air jet flames in a vitiated coflow", Combustion and Flame, Vol. 143, 2005, pp. 491 - 506.
 [2] Matthias Ihme, Yee Chee See, "Prediction of autoignition in a lifted methane/air flame using an unsteady flamelet/progress variable model", Combustion and Flame, Vol. 157, 2010, pp. 1850-1862.
 [3] P.Domingo, L. Vervisch, D. Veynante, "Large-eddy simulation of a lifted methane jet flame in a vitiated coflow", Combustion and Flame, Vol. 152, 2008, pp. 415-432.
 [4] Rodney O. Fox, "Computational Models for Turbulent Reacting Flows", Cambridge Univ. Press, 2003.