

# Bunsen Burner 난류 예혼합 화염장의 해석

조지호\* · 김후중\* · 김용모\*\*†

## Prediction of Turbulent Premixed Flamefield in Bunsen Burner

Ji-Ho Cho, Hoojoong Kim and Yongmo Kim

### ABSTRACT

The stoichiometric methan/air premixed turbulent flames at the axisymmetric Bunsen burner situation are numerically investigated. To account for the chemistry-turbulence interaction in the turbulent premixed flames, the steady laminar flamelet library method has been adopted. The flame front is tracked by using the Level-Set Approach. Turbulence is represented by the  $k-\epsilon$  modeling with a Pope's correction. The detailed comparison between prediction and measurement has made for the flame field in terms of velocity, turbulent kinetic energy, and normarlized temperature.

**Key Words** : Turbulent, Premixed, Flamelet Model, Level-Set Approach, Bunsen Burner

### 1. 서 론

난류 예혼합 화염은 가스터빈, 연소로, 내연기관 등과 같은 다양한 연소 장치에 응용되어지고 있다. 이와 같은 연소 기계의 설계와 운용을 보다 효과적으로 하기 위하여 난류 예혼합 화염에 대한 다양한 종류의 연구가 이루어지고 있다. 난류 유동장을 묘사하는 가장 정확한 방법인 DNS(Direct Numerical Simulation)는 수치 비용이 커서 실제 연소 장치에 적용하기는 거의 불가능하다.

난류 유동해석을 위한 차선의 방법인 LES (Large Eddy simulation), RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes' equation) 등을 이용해 예혼합 화염장을 해석할 경우, 난류와 화학 반응의 상호작용을 적절히 표현하는 모델이 요구

되어진다. 특히 예혼합 화염장에서 난류와 상호작용을 제대로 반영할 수 있는 난류연소모델의 개발은 실제적인 연소기의 화염안정성 및 공해물질 배출특성을 정확히 예측하는 데 있어서 매우 중요하다. 난류예혼합 화염장의 화학반응과 난류의 상호작용을 고려할 수 있는 난류연소 모델로는 PDF Transport 모델[2], CMC모델[3], Linear Eddy 모델[4], 그리고 Flamelet 모델[5] 등이 있다.

본 연구는 난류연소모델의 예측정확도와 수치 계산소요시간등을 고려하여 Flamelet model기반의 Level Set Approach를 이용하여 난류 예혼합 화염장을 해석하였다. 이러한 Flamelet-Level Set Approach에서는 비예혼합 화염장과 달리 예혼합화염의 경우에는 이와 같은 보존 스칼라가 존재하지않기 때문에 존재하지않기 때문에 화염면에 부착된 층류화염편의 1차원 좌표를 유동장에서 표현하기 위해 Level-set G 방정식을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 난류연소 모델의 예측능력을 검증하기 위해서 Chen등[7] 수행한 Bunsen버너 난류 예혼합 화염장에 대한 실험결

† 연락처자, ymkim@hanyang.ac.kr

\* 한양대학교 대학원

\*\* 한양대학교 기계공학과

과를 사용하였다. 수치계산은 2개의 입구조건에 대해 수행하였으며 이러한 화염들의 연소영역은 Corrugated Flamelet Zone and Thin Reaction Zone에 걸쳐 존재한다. 계산결과를 바탕으로 Bunsen Burner의 난류예혼합 화염구조 및 사용된 물리모델의 결합에 대해 자세한 논의를 하였다.

## 2. 물리 및 수치 모델

본 연구에서는 상세화학반응과 난류에 의한 스칼라 수송을 효과적으로 모델링하기 위해 층류화염면 모델을 사용하였다.

층류화염면 모델은 난류의 와유동이 미세화염의 근본적 1차원구조를 훼손하지 않는다고 보고, 화학반응에 관여하는 스칼라들을 유동과 분리하여 화염면에 수직하는 1차원 좌표계에서 수송방정식을 계산함으로써 수치적 노력을 극소화 시키면서도 상세화학반응과 유동의 상호작용을 적절히 묘사할 수 있다.

이와 같은 층류화염면 모델을 이용한 난류화염의 수치해석은 이미 비예혼합화염과 부분 예혼합화염에 대하여 성공적으로 수행되어졌다.

비예혼합화염의 경우 혼합상태를 대표하는 보존 스칼라량인 혼합분율을 이용하여 화염의 1차원적 구조를 나타내었다. 반면, 예혼합화염의 경우에는 이와 같은 보존 스칼라가 존재하지 않기 때문에 화염면에 부착된 층류화염면의 1차원 좌표를 유동장에서 표현하기 위해 Level-set  $G$  방정식을 사용하였다.

난류 화염장에서 화염면 위치의 불규칙적 변화에 의한 영향을 고려하기 위해 본 연구에서는  $G$  값의 평균과 분산을 이용한 통계학적 접근을 이용하였다.

### 2.1 Level set approach

예혼합 화염의 상세 화학 구조에 대하여 이야기하기 이전에 화염 전파 특성과 안정화에 관하여 적절한 모델을 제시하는 것이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 Williams [1]에 의해 제안된 Level set approach를 이용하였다.

예혼합 화염의 경우, 화염면의 전파속도와 화염면으로 유입되는 유동속도의 평형으로 화염면은 안정화된다. 본 연구에서는 이와 같은 화염면의 동역학적 관계를 표현한 Level Set  $G$ -방정식을 이용하여 화염 전파를 모델링하였다. 다음은 화염면으로 부터의 거리를 나타내는 스칼라  $G$ 의 평균값에 대한 동역학적 균형 방정식이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}G) + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{v}G) \\ = \bar{\rho} s_{T,\rho} |\nabla G| - \bar{\rho} D_t \chi |\nabla G| \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\tilde{\chi}$ 는 평균화염면의 곡률이고  $D_t$ 는 난류 확산률(Turbulent Diffusivity)이다. 난류 확산률은 Integral length scale,  $l_t$ 와 난류강도  $v'$ 으로 다음과 같이 모델한다.

$$D_t = a_4 l_t v', \quad a_4 = 0.78 \quad (2)$$

난류의 통계학적 특성을 표현하기 위해 다음과 같은  $G$  값의 분산( $G$ -variance),  $\overline{G'^2}$ 의 수송방정식이 위의 평균값 수송방정식과 동시에 풀어주어야 한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \overline{G'^2}) + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{v} \overline{G'^2}) \\ = \nabla_{\parallel} \cdot (\bar{\rho} D_t \nabla_{\parallel} \overline{G'^2}) \\ + 2\bar{\rho} D_t (\nabla G)^2 - c_s \bar{\rho} \frac{\tilde{\epsilon}}{k} \overline{G'^2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\nabla_{\parallel}$ 는 벡터 미분을 평균화염면에 수직 한 성분과 접하는 성분으로 분리하였을 때 접하는 성분만을 나타내는 것이다.

### 2.3 난류 화염 속도

식 (1)을 통해 난류 상황에서 화염면의 동역학적 균형을 정확하게 모델링하기 위해서 난류화염 속도 (Turbulent burning velocity)를 정절히 모델링하여야 한다.

본 연구에서는 Peters가 제안한 다음 관계를 이용하여 난류 화염 속도,  $s_{T,L}$ 를 모델하였다.

$$\begin{aligned} \frac{s_{T,L} - s_L}{v'} = - \frac{a_4 b_3^2}{2b_1} Da \\ + \left[ \left( \frac{a_4 b_3^2}{2b_1} \right)^2 + a_4 b_3^2 Da \right]^{0.5} \end{aligned} \quad (4)$$

위 식의 모델 상수들은 ..와 동일하게 사용하였다.

### 2.4 Reinitialization

위의 식 (1)과 (3)은 화염면의 동역학적 관계를 나타내는 미분 방정식이다. 다시말해, 이 두 방정식의 해는 화염면, 즉,  $G = G_0$ 인 iso-surface를

제외하고는 물리적 의미를 갖지 못한다.

하지만  $G=G_0$ 인 경우를 제외한 나머지 영역에서 다음과 같은 관계가 성립한다면,

$$|\nabla G|=1 \quad (5)$$

$G-G_0$ 는  $G_0$ 로부터의 거리를 나타내게 된다.

앞에서 설명한 층류화염면 모델을 이용한 예혼합 화염장의 상세구조 예측 과정에서 이 값이  $g=G$ 로 사용 되어진다.

식 (5)의 조건은 다음과 같은 편미분 방정식의 정상상태 해를 구함으로써 만족되어진다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \text{sign}(G(x, \tau) - G_0)(1 - |\nabla \phi|) \quad (6)$$

위 편미분 방정식은 해밀톤-야고비 방정식의 형태를 가지고 Hyperbolic 특성을 갖는다. 이를 안정적으로 풀기 위해 ENO scheme (Essentially Non-Oscillatory scheme)과 3rd order Runge-Kutta time evolution을 이용하였다.[6]

## 2.5 화염신장(Flame stretch)의 영향

화염신장은 화염면의 상대변화율로 다음과 같이 정의 되어진다.

$$K = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \quad (7)$$

이와 같은 화염신장은 화염면에 접하는 방향으로의 열,물질 전달현상을 대표한다.

그림 1은 예혼합 대항류 화염의 계략도이다. 그림과 같이 속도  $u$ 로 화염면으로 유입되는 반응물들은  $s_L$ 의 속도로 타들어가기도 하고  $u_f$ 의 속도로 대류되기도 한다. 이는 화염면에 부착된 화염편들의 1차원 구조에 큰 영향을 준다.

이와 같은 예혼합화염의 화염신장에 대한 의존성을 고려한 앙상블 평균은 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\phi} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(g, K) p_{gK}(g, K) dg dK \quad (8)$$

여기서 Joint PDF,  $p_{gK}(g, K)$ 는 PDF 수송방정식을 풀거나 Monte-Carlo 기법을 이용하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 이 Joint PDF를 통계적으로 독립적인 것으로 가정하여 아래와 같이 모델하였다.

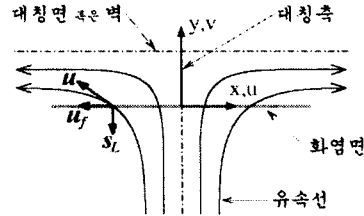


그림 1 대항류화염의 계략도

$$p_{gK}(g, K) = p_g(g) p_K(K/g) \quad (9)$$

Joint PDF를 Single PDF,  $p_g(g)$ 와 Conditional PDF,  $p_K(K/g)$ 로 분리하여 이 두 PDF를 모델함으로써 구했다. 여기서  $p_K(K/g)$ 는 난류 등방성 때문에 근거한 비예혼합화염의 스칼라 소산률과 유사하게 Log-normal 분포를 갖는 것으로 가정하였다. LIF 등과 같은 실험을 통해 OH 밀도 분포를 구하고 그 값이 극값을 갖는 위치를 화염면의 위치로 정의 할 수 있다. Y.S. Chen 등 [7]은 이와 같은 방법으로 위의 확률밀도 함수가 다음과 같은 Gaussian 분포를 갖는다는 사실을 밝혀냈다.

$$p_g(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_g^2}} e^{-\left(\frac{g-G_0}{\sqrt{2}\sigma_g}\right)^2} \quad (10)$$

여기서  $G_0, \sigma_G$ 는 각각 평균화염의 Level-set과 그 값의 표준편차를 나타낸다.

## 2.6 Flamelet library

화염신장률,  $K$ 에 의한 영향을 고려하기 위해 1차원으로 모델된 대항류화염의 화염구조로 층류화염면 라이브러리를 구성하였다. 이 과정에서 Sandia 연구소에서 개발한 OPPDIF 코드를 이용하였고, 메탄/공기 혼합기의 화학반응 메카니즘으로는 GRI-Mech 3.11을 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 해석 조건

본 연구의 모델을 검증하기 위해서 Chen [7]의 실험과 같은 구성의 이론혼합상태의 메탄-공기 난류 축대칭 분젠버너 화염을 계산하였다.

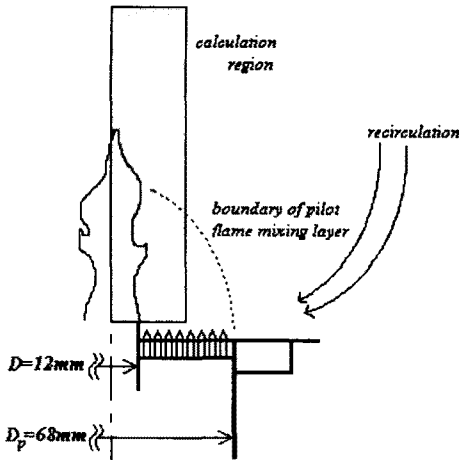


그림 2 분젠버너 실험의 구성과 계산영역

그림 2는 실험의 구성과 본 연구에서 수행된 수치 계산의 영역을 도시하고 있다.

위 그림과 같이 본 수치 계산에서는 문제의 대칭성을 이용하여 축방향 단면의 절반만을 계산하였다. 그리고, 재순환에 의한 영향을 고려하지 않았기 때문에 계산 영역의 우측 면을 slip 경계조건을 이용하여 처리하였다.

입구단에서의 속도, 난류에너지, 난류에너지 소산률 등은 실험값[7]을 이용하였다.

### 3.2 난류 등은 유동장 해석

Fig. 3에서는 입구조건이 F2화염과 같고 화학반응이 일어나지 않는 난류 등은 유동장에 대하여 해석결과를 실험치를 여러 축방향 위치에서 무차원화한 축방향 속도의 반경방향 분포를 비교하였다.

축방향 속도는 전영역을 통해 근접한 해석결과를 얻을 수 있었다. 반면 난류 에너지의 경우 속도 구배가 전체적으로 비교적 근접한 값을 얻을 수 있으나, 속도 구배가 작은 영역에서는 다소 과소 예측하는 경향을 보이고 있다.

### 3.3 난류 예혼합 화염장 해석

그림 4와 그림 5는 각각 F2화염과 F3화염의 해석 결과를 실험치와 비교한 것이다. F2와 F3화염의 예측된 속도분포는 실험치와 대체로 잘 일치하나 난류에너지는 입구근방의 전단경계층 부근에서 크게 과대예측하고 있음을 알 수 있다. 이러한 실험치와 해석결과의 오차는 난류의 비등

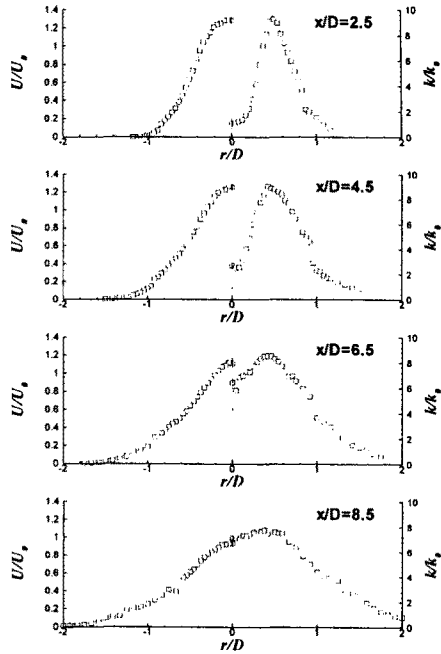


그림 3 F2 난류 등은 유동장의 속도 및 난류에너지 분포; 실험결과(○), 해석결과(-)

방성이 큰 입구근방의 전단경계층에서 등방성 가정을 기반으로 하고 있는 k-e난류 모델의 결합에 기인한 것으로 사료된다. 또한 화염실험에서는 화염면의 난동성분중 비교적 그 길이척도가 큰 것들은 시간평균의 과정을 거치면서 주변으로 퍼지게 되고 순간적 화염면의 불안정성에 의해 화염면이 끊어지기도 하고 미연가스의 덩어리가 기연영역 안에 생성되기도 한다. 본 연구에서 사용한 RANS기반의 난류 모델은 이러한 영향을 고려할 수 없는 한계를 가지고 있기 때문에 그림 4에서 볼 수 있듯이 실험치와 수치 해석 결과의 난류 에너지 decay특성이 크게 다르다는 것을 알 수 있다.

그림 4와 그림 5에 도시된 무차원화된 온도, c 값을 통해 알 수 있듯이 실험에서는 pilot 버너 외부로부터 유입되는 차가운 공기의 유입으로 인해 하류로 갈수록 화염 외부로부터 점점 온도가 떨어져간다. 하지만, 본 연구는 이러한 영향을 고려하지 않았기 때문에 반경방향이 증가함에 따라 온도는 평형상태 온도에 접근하게 된다. 이와 같은 본 연구에서 사용한 모델의 한계에도 불구하고 화염면의 위치를 비교적 근사하게 예측하고 있고 이에 대응하는 화염면 부근의 농도장, 밀도장등이 실험치에 근사한 값을 예측하였다.

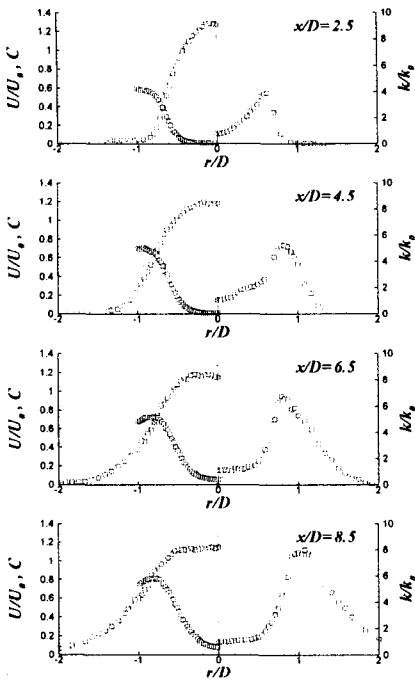


그림 5 F2 화염의 속도, 난류에너지, 온도 분포; 실험결과(○) 및 해석결과(—)

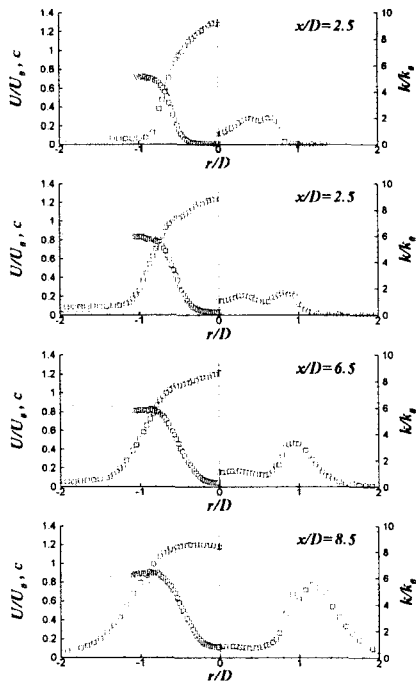


그림 4 F3 화염의 속도, 난류에너지, 온도 분포; 실험결과(○) 및 해석결과(—)

#### 4. 결론

본 연구에서 사용된 예혼합 난류연소 모델은 난류 모델링의 제약조건에 의한 오차를 고려할 때, 비교적 정확한 결과를 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 Flamelet model 기반의 Level-set Approach를 모델을 LES등과 같은 보다 개선된 난류 모델을 이용하여 계산할 경우 난류화염장의 예측능력을 현저히 개선시킬 수 있으며 실제 연소 장치에서 일어나는 난류 예혼합 연소 현상을 시뮬레이션 하는 적절한 방법이 될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 후 기

"이 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화 탄소 저감 및 처리 기술 개발)의 일환으로 수행되었습니다."

#### 참고문헌

- [1] Williams, F. A. Turbulent Combustion. In The Mathematics of Combustion (ed. J. D. Buckmaster), pp.197-1318, 1985.
- [2] Pope, S. B. Pdf methods for turbulent reactive flows, Prog. Energy Comb. Sci. 11, pp119-192, 1985
- [3] Bilger, R.W. Conditional moment closure for turbulent reacting flows, Phys. Fluids A5, pp436-444, 1993
- [4] Menon, S. and Kerstein, A. R. Stochastic simulation of the structure and propagation rate of turbulent premixed flames, 24th Sym. (int.) on Comb., pp 443-450, 1992
- [5] Peters, N., Turbulent Combustion, Cambridge University Press., 2000.
- [6] Sethian, J. A. Level Set Methods and Fast Marching Methods, Cambridge Univ. Press., 2002.
- [7] Chen, Y. S. The Detailed Flame Structure of Highly Stretched Turbulent Premixed Methane-Air Flames. Combustion and Flame vol. 107 n.3 ,pp223-244, 1996.