

# 대향류 예혼합 난류 연소 유동에서의 Coherent Flamelet Model 적용 및 검증에 관한 연구

최 창렬\*, 허 강열\*\*

## A Study on Application and Validation of the Coherent Flamelet Model in Counterflow Turbulent Premixed Combustion

C. R. Choi, K. Y. Huh

Key Words: coherent flamelet model, turbulent premixed flame, counterflow

### ABSTRACT

The coherent flamelet model(CFM) is applied to symmetric counterflow turbulent premixed flames. The flame source term is set proportional to the turbulence intensity to reproduce the experimental correlation of Abdel-Gayed et al.<sup>[1]</sup> for the turbulent burning velocity. Flame quenching by the turbulent rate of strain is modeled by an additional multiplication factor to the flame source term. A modified form of CFM is employed to consider coexistence of burned and unburned premixture with ambient air. The predicted flame position and turbulent flow field coincide well with the experimental data of Kostiuk et al.<sup>[2]</sup>, although there is some discrepancy in the radial rms velocity component and integral length scale near the symmetric plane.

### 1. 서론

대향류 예혼합 난류 연소유동은 소화(extinction) 되는 조건까지 쉽게 rate of strain을 변화시킬 수 있고 측정과 해석이 용이하기 때문에 많은 연구가 진행되어왔다. Kostiuk 등<sup>[2]</sup>에서와 같이 반대 방향에서 동일한 유동이 있을 때 대칭축에서 정지 유동을 형성한다. 이러한 형태에서의 화염은 평균적으로 거의 평면을 유지하고 단열상태에 있으며 균일한 속도장아래 있게된다. 대향류 연소는 간단한 형태와 유동조건 아래 있으나, 이론적 연구에서는 정량적 해석을 위해 몇가지 중요한 가정을 하게된다<sup>[3]</sup>. 본 연구에서는 화염형상, 위치, 유동분포를 예측하기위해 축대칭 2차원 단면에서의 상온과 반응 유동에 대해 전산 유체 해석을 수행하였다.

3차원 난류 연소 모델에 적용할 만한 모델에는

eddy breakup(EBU) 모델<sup>[4]</sup>, presumed probability density function(PDF) 모델<sup>[5,6]</sup>, coherent flamelet model(CFM)<sup>[7,8]</sup> 등이 있다. 많은 연소기에서 화학 시간 스케일이 난류 시간 스케일보다 작기때문에 laminar flamelet(층류 화염면) concept가 적용될 수 있다<sup>[9]</sup>. EBU 모델은 화학적 영향을 배제하고 평균 연소율이 난류 혼합 시간에 의해서 결정된다고 가정한다. Presumed PDF 모델은 난류 연소에 적용되기 위하여 혼합물이나 반응진행변수의 평균과 요동성분에 대한 천이방정식의 해를 구하여야 한다. CFM 모델은 난류 화염을 난류 유동내 화염면 조각의 집합으로 가정한다. 이 연구에서는 Abdel-Gayed 등<sup>[1]</sup>의 난류 연소속도 실험관계식에 대해 검증되었던 CFM 식<sup>[10]</sup>을 대향류 난류 예혼합 연소에 대하여 적용한다.

이 연구에서 특별히 고려할 점은 유동 경계에 주변 공기가 존재하기 때문에 난류 유입에 의해 공급가스와 주변 공기간에 난류 혼합이 생긴다는 것이다. 이러한 난류 유입을 고려하기 위해 회박해진 당량비에 따른 층류연소속도를 계산하며 화염밀도

\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

\*\* 포항공과대학교 기계공학과

천이 방정식의 소멸항에 대해 종래의 CFM 모델을 일부 수정하였다.

## 2. COHERENT FLAMELET MODEL

Laminar flamelet(층류 화염면) 영역은  $Da > 1$  이고  $K < 1$ 인 조건에서 존재한다. 여기서  $Da$ 는 Damkohler 수,  $K$ 는 Karlovitz 수이다. Laminar flamelet 영역에서 단위 공간당 질량연소율은 아래와 같이 주어진다.

$$\dot{w} = \rho_u I_0 U_L \Sigma \quad (1)$$

여기서  $\rho_u$ 는 미연가스 밀도,  $U_L$ 은 층류연소속도,  $\Sigma$ 는 단위공간당 화염면적을 나타내는 화염밀도이다.  $I_0 U_L$ 은 strained된 층류연소속도를 나타내며  $I_0$ 는 mean stretch factor이다. 화학과 분자운동 영향은  $U_L$ 로 나타나고 난류 영향은  $I_0$ 와  $\Sigma$ 에 의해 나타난다. 대향류 연소 유동에서는 주변 공기가 공급가스로 유입되기 때문에 미연가스의 당량비는 낮아지게 된다.  $U_L$ 은 공급가스와 주변 공기가 완전 혼합되는 것을 가정하여 계산된 당량비에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$U_L = 34.2 - 138.7(\phi - 1.08)^2 \quad (2)$$

식 (2)에서  $\phi$ 는 당량비이며 식 (2)는 미연가스 온도 298K, 1 기압 조건의 propane 연료에 대한 것이다. 각 상수는 Metghalchi 등<sup>[11]</sup>에서 주어지고 층류연소속도의 단위는 cm/s이다.

화염밀도  $\Sigma$ 에 대한 보존식은 아래와 같다.<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (U_i \Sigma) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_i}{\sigma_\Sigma} \frac{\partial \Sigma}{\partial x_i} \right) + \alpha f(KLe) e_i \Sigma - \beta \frac{\rho_u}{\rho} \frac{U_L}{F_u F_b} \Sigma^2 \quad (3)$$

식 (3)의 오른쪽 두 번째 항은 난류 strain에 의한 화염면 생성을 나타내고 세 번째 항은 화염면의 상

호 충돌에 의한 화염면 소멸(annihilation)을 나타낸다. 식 (3)에서  $\alpha, \beta$ 는 상수( $\alpha=2.0, \beta=0.1$ ),  $\nu_i$ 는 난류 점성계수,  $\sigma_\Sigma$ 는 화염밀도에 대한 Schmidt 수( $\sigma_\Sigma=1$ ),  $Le$ 는 Lewis 수,  $e_i$ 는 평균 rate of strain,  $\rho$ 는 평균가스밀도이다.  $f(KLe)$ 는 유동의 과도한 stretch에 의한 화염면의 quenching을 나타내기 위한 factor로서 다음과 같이 정의된다.

$$f(KLe) = 1.0, \quad 0.0 < KLe < 0.3$$

$$f(KLe) = 1.25 - 0.8333KLe, \quad 0.3 < KLe < 1.5 \quad (4)$$

$$f(KLe) = 0.0, \quad 1.5 < KLe$$

$f(KLe)$ 는  $KLe$ 가 0.3의 값을 넘어가면서 화염의 지역적인 flamelet quenching<sup>[12]</sup>을 나타내다가 1.5 이상에서는 화염면이 완전 quenching<sup>[13]</sup>되는 것을 나타내기 위하여 도입되었다.  $f(KLe)$ 는 지역적인 flamelet quenching이 일어나는 때부터 화염면의 완전 quenching이 일어나는 때까지 선형적으로 감소한다. 식 (3)의 생성항의 평균 rate of strain은 난류강도(turbulence intensity)  $u'$ 에 비례하며 아래와 같다.

$$e_i = u' / l_k \quad (5)$$

임의의 길이 상수  $l_k$  ( $l_k=0.126\text{cm}$ )는 차원을 맞추기 위해 도입되었다. 식 (5)에 의하면 난류연소속도는 고정된  $K$ 에 대하여  $u'$ 에 따라 선형적으로 증가한다<sup>[10]</sup>. 만약  $l_k$ 를 적분 길이 스케일  $l$ 로 대체하면 평균 rate of strain은 적분 시간 스케일의 역수인  $1/\tau_i$ 가 되며 이로인해 벽면 근처에서 화염전파가 오히려 빨라지는 문제가 생기게 된다<sup>[14]</sup>. 이것은 벽면근처에서 난류 시간 스케일이 작아지는데 rate of strain이  $1/\tau_i$ 가 되므로 벽면근처에서 오히려 화학반응이 빨라지게 되기 때문이다. 이러한 문제는 천이 방정식의 생성항이 식 (5)와 같이  $u'$ 에 의해 제어될 때 발생하지 않는다. 그림 1에는 본 연구의 CFM 모델로 예측한 난류 연소 속도와 Abdel-Gayed 등<sup>[11]</sup>의 난류연소속도 실험 관계식을 비교하여 나타내었다.  $F_u$ 와  $F_b$ 는 전체 혼합가스

중 미연가스와 기연가스의 질량분율(mass fraction)이다. 소멸항의 분모에  $F_u$ 와  $F_b$ 의 곱을 사용하게 되면 생성항과 소멸항이 평형을 이루는 조건에서 CFM이 EBU 모델 형태와 같아지게 된다<sup>[10]</sup>.  $F_u$ 와  $F_b$ 의 합은 주변 공기의 존재에 따라 1과 같거나 작을 수 있다.

식 (3)을 계산코드에 입력하기 위해서  $(\rho\Sigma)$ 를 변수로 도입하는 것이 편리하다.  $(\rho\Sigma)$ 를 가상 밀도로 간주하면 화학종(species) 보존식에 대한 식과 동일한 형태가 되므로 대류와 확산항에 대해 기존의 프로그램을 수정없이 사용한다.  $(\rho\Sigma)$ 를 변수로 하여 식 (3)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\Sigma)}{\partial t} + \frac{\partial U_i \rho \Sigma}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho \frac{\nu_i}{\sigma_\Sigma} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{(\rho\Sigma)}{\rho} \right] \right) \\ &+ \alpha f(KLe) e_i(\rho\Sigma) - \frac{\beta \rho_u U_L (\rho\Sigma)^2}{\rho^2 F_u F_b} \\ &- \frac{\partial U_i}{\partial x_i} (\rho\Sigma) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\partial U_i / \partial x_i (\rho\Sigma)$ 는 변수 변환의 결과로 생긴 항이다. 식 (1), (5), (6)과 층류 연소 속도에 대한 식 (2)와 난류 모델이 난류 예혼합 연소에 대한 coherent flamelet model을 이룬다.

주변 공기와 혼합에 의한 영향을 고려하는 방안에는 식 (2)에서와 같이 유입된 주변 공기와 공급 가스의 완전 혼합을 가정하여 실제적인 층류 연소 속도를 구하는 방법과 유입된 주변 공기와 공급 가스가 분리하여 존재한다고 가정하는 방법이 있다<sup>[15]</sup>. 후자의 경우 공급된 가스와 주변 공기의 분자운동 혼합은 일어나지 않고 계산격자안에 분리되어 존재한다고 가정하며 이에 따른 실제적 질량연소율은 다음과 같다.

$$w = \rho_u I_o U_L \Sigma_T \quad (7)$$

$$\Sigma_T = \Sigma \frac{V_b}{V_T} \quad (8)$$

여기서  $\Sigma$ 는 식(3)의 천이 방정식에서 계산된 화염 밀도이다. 계산격자내에 존재할 수 있는 모든 기체는 공급된 미연가스, 기연가스, 유입된 주변 공기가

다.  $V_b$ 는 공급된 미연가스와 기연가스 부피의 합이고  $V_T$ 는 계산격자 부피이다.  $V_T$ 는 계산격자내  $V_b$ 와 유입된 주변 공기 부피의 합이다. 화염밀도  $\Sigma_T$ 는 식 (7)에서 질량연소율을 계산하는데 사용된다. 식 (8)와 같은 방법은 미연가스의 층류연소속도가 항상 노즐 출구 상태와 같으므로 난류연소속도가 과도하게 예측되어 화염의 위치가 실험결과보다 대칭축에서 더 먼 곳에 위치할 가능성이 있다. 본 연구에서는 식 (2)와 같이 유입된 주변 공기와 미연가스가 완전히 혼합되는 것을 가정하고 희박해진 미연가스의 층류연소속도를 계산하여 사용한다.

$I_o$ 는 여러 형태가 있으나 Bray<sup>[16]</sup>의 실험적 관계식이 Abdel-Gayed 등<sup>[1]</sup>의 난류연소속도 결과에 가장 잘 일치되며 이 식에 따르면  $K$ 가 1이상 일 때 quenching이 일어난다. 본 연구에서의  $I_o$  형태는 Bray의 실험적 관계식을 사용하였으며 그 형태는 다음과 같다.

$$I_o = \frac{0.117}{1+\tau} K^{-0.784} \quad (9)$$

여기서 각 변수는 아래와 같이 정의 된다.

$$\tau = \frac{T_b}{T_u} - 1 \quad (10)$$

$$K = \frac{u'}{\lambda} \left( \frac{\delta_L}{U_L} \right) = 0.157 \left( \frac{u'}{U_L} \right)^2 R_L^{0.5} \quad (11)$$

$$R_L = \frac{u' l_t}{\nu} \quad (12)$$

$T$ 는 온도, 아래첨자  $b$ 와  $u$ 는 기연가스와 미연가스 상태를 나타낸다.  $\lambda$ 는 Taylor microscale,  $\delta_L$ 는 층류 화염 두께,  $R_L$ 는 난류 Reynolds 수,  $l_t$ 는 적분 길이 스케일,  $\nu$ 는 층류 점성계수이다. 식 (11)의 Karlovitz 수 관계는 Abdel-Gayed 등<sup>[17]</sup>에서 주어졌다.

### 3. 계산 조건

대향류 유동은 선회유동이 없는 간단한 유동형태이므로 난류 유동계산에는 표준형태의  $k-\epsilon$  모델을 사용하고 KIVA-II<sup>[18]</sup>를 수정하여 아래의 계산을 수행하였다. 유동은 그림 2에서와 같은 축대칭 형태이다. 계산 격자는 그림 3에 나타내었으며 격자수는 축과 반경 방향으로 65x75이다. Jet 주변에서의 난류 유입과 recirculation을 허용하기 위해 계산 영역을 확장하였다. 계산 영역의 상부에서는 벽 경계 조건, 왼쪽에서는 대기압에서의 continuative outflow 경계조건으로 하였다. 이러한 경계조건은 jet 주변의 주요한 관심영역에 영향을 주지 않는다.

### 3.1 상온 유동

노즐 출구 속도는 900 cm/s, 대칭축과 노즐의 거리는 3.5 cm, 노즐 직경은 3.5 cm, 노즐 출구에서의 적분 길이 스케일은 실험<sup>[19]</sup>으로부터 측정된 0.2 cm이다. 노즐 출구에서의 난류강도는 평균속도의 13.9 %이다. 계산은 유동장의 압력 변화가 대기압의  $10^{-6}$  이내까지 수렴하는 정상상태까지 수행한다.

### 3.2 연소 유동

연소 유동조건은 Kostiuk 등<sup>[19]</sup>에서의 상온유동조건과 다르다. 그림 2에서와 같이 대칭축의 양쪽에 대칭되는 두 개의 화염이 생성된다. 이 화염은 평균 rate of strain을 증가시키면서 jet 속도가 증가할 때 하나의 화염으로 만나게 되고 결국에는 소화된다. 노즐 출구 속도는 750 cm/s, 대칭축에서 노즐까지의 거리는 2.75 cm, 노즐 직경은 3.5 cm, 노즐 출구에서의 적분 길이 스케일은 측정 값으로부터 0.2 cm로 하였다. 노즐 출구에서의 난류 강도는 평균유동의 13.9 %로 한다. 상온 유동 계산이 수렴한 후에 대칭축에서 점화를 일으키며 유동장 압력이 정상상태에 도달할 때까지 반응 유동 계산을 수행한다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 상온 유동

상온 유동에서 평균 축방향 속도는 그림 4에서와

같다.  $W_0$ 는 노즐 출구 속도, H는 노즐간 거리, d는 실험<sup>[2,19]</sup>에서 난류를 제어하기위해 노즐 출구 위에 설치된 구멍난 판의 직경이다. 계산결과는 그림 4에서와 같이 계산과 실험이 잘 일치하였다. 축방향 속도는 노즐 출구에서 부터 감소하여 대칭축에서는 0이 된다. 그림 5는 대칭면에서 1.4 cm위의 위치에서 반경방향에 대한 평균 축방향속도이다. 축에서 약 1.5 cm떨어진 jet 경계를 넘어서는 실험과 계산간에 축방향속도의 감소율에 약간의 차이를 보인다. 실험결과는 정체된 주변공기와와의 더 활발한 혼합에 의해 계산보다 빠른 감소를 보인다. 이는 계산상의 수치적 확산에 의한 영향과 실험에서 난류 intermittency에 의한 영향일 것으로 보인다. 그림 6은 대칭면에서 0.6 cm의 위치에서 반경방향으로의 평균 반경방향 속도이다. 반경방향속도는 축에서 2 cm까지 반경방향으로 선형적으로 증가하며 계산과 실험이 잘 일치한다.

그림 7에서 축방향을 따라 측정한 축방향 rms 속도 성분과 반경반향 성분을 계산과 비교하여 나타내었다.  $k-\epsilon$  모델은 등방성 난류에 기초하고 있으며 실험 결과는 난류 성분의 실제적인 비등방성을 나타낸다. 대칭면에서 축방향 성분은 반경방향 성분의 약 2배정도가 되며, 계산에 의한 한 방향 rms 속도는 축방향 성분과 일치하고 있다. 그림 8에서 측정된 적분 길이 스케일은 대칭면부근에서 축방향으로 증가하다가 감소하는 경향을 보이나 계산 결과는 계속 감소하는 경향을 보인다. 축방향 rms 속도성분과 적분 길이 스케일에서 계산결과와 실험결과의 차이는 대칭면부근에서  $k-\epsilon$  모델이 오차를 보이며 이는 impinging jet 경우에  $k-\epsilon$  모델 적용의 한계를 나타낸다<sup>[20]</sup>.

### 4.2 반응 유동

전체적인 속도분포는 연소가 일어남에도 큰 차이가 없다. 그림 9와 10은 상온 유동과 반응 유동에서의 유선 분포이다. 그림 10에서 반응 유동의 유선이 대칭축부근에서의 연소 반응으로 인한 가스의 팽창으로 상온 유동보다 바깥 쪽으로 밀려나간다<sup>[2]</sup>. 공기와 접한 노즐 출구 부근에서 유선이 노즐쪽으로 구부러지는 것은 주변 공기가 공급 가스로 유입되는 것을 나타낸다.

그림 11은 화염밀도의 분포이다. 실험<sup>[2]</sup>에서와 같이 화염 영역은 거의 대칭면상에 존재한다. 화염은 실험에서와 마찬가지로 같은 연소 조건에서 직경 약 80 mm인 disk 형태의 화염이 생성된다. 그림 12는 온도분포이며 최고 온도는 화염면이 위치한 대칭면에서 생기고 있다. 그림 13은 burned mass fraction(BMF) 분포이며, 최고 BMF는 최고 온도위치에서 형성된다. 그림 14는 연료( $C_3H_8$ ) 농도의 분포이며 연료는 노즐 출구에서 나오면서 공기로 확산되기 시작하고 있다. 화염이 위치한 대칭면에서 연료 농도가 급격히 줄어들며 연료가 소모되고 있다. 그림 15는  $CO_2$  분포이며 화염영역에서 연소가스가 생기고 있다.

그림 16은 축방향으로의 intermittency를 실험치와 비교하여 나타내었다. Intermittency는 유동내에서 한 점이 전체 시간중 기연가스안에 있는 시간으로서 격자내 공급가스중 기연가스의 공간비로 계산하였다. 위의 intermittency에 대한 두 가지 정의는 ergodic theorem에 의해 정상상태 난류 조건에서 서로 일치한다. 계산으로 부터 최고 intermittency는 대칭면에서 약 0.62이며, 실험에서는 약 0.9이다. 화염영역이 대칭면에서 약 0.5 cm까지 인 것이 서로 일치하고 있다.

그림 17의 평균 축방향속도와 그림 18의 rms 속도 성분은 상온 유동의 결과와 비슷한 결과를 보인다. 전체적으로 난류 연소 유동장의 계산 결과와 실험결과는 잘 일치한다.

## 5. 결론

- 1) 계산된 상온과 반응 유동장의 평균 속도분포는 실험 결과와 잘 일치한다. Jet 경계에서의 평균 축방향 속도, 대칭면 부근에서의 반경방향 rms 속도, 대칭면 부근에서의 적분 길이 스케일에서 차이가 있으며, 이는  $k-\epsilon$  모델이 impinging jet problem에서의 적용에 한계를 갖는데 기인한다.
- 2) CFM에 의해 계산된 화염위치와 화염형상은 실험 관측과 일치한다. 기존의 CFM 계산을 jet 경계에서의 주변 공기의 존재를 고려하기 위해 수정하였다. 계산결과는 이러한 영향을 적절히 나타낼 수 있게되어 CFM 계산결과가 실험결과의 유동과 화

염형상, 위치와 일치하였다.

- 3) 대향류 난류 예혼합 화염은 실험과 이론적 관측에서 뿐 아니라 전산 유체 역학 해석의 CFM 모델 검증에도 이상적으로 적용 될 수 있다. 전산 유체 역학 해석은 질량, 모멘텀, 에너지 보존식에 대한 해를 직접 구하기 때문에 몇가지 중요한 가정을 도입해야하는 이론적 해석보다 실제에 가까운 결과를 얻을 수 있다.

## 참고문헌

- [1] Abdel-Gayed, R. G., Bradley, D., and Lawes, M. (1987). Turbulent burning velocities : a general correlation in terms of straining rates. *Proc. R. Soc. Lond. A* **414**, 389.
- [2] Kostiuk, L. W., Bray, K. N. C., and Cheng, R. K. (1993). Experimental study of premixed turbulent combustion in opposed streams. part II-reacting flow field and extinction. *Combust. Flame* **92**, 396.
- [3] Bray, K. N. C., Champion, M., and Libby, P. A. (1991). Premixed flames in stagnating turbulence : part I. the general formulation for counterflowing streams and gradient models for turbulent transport. *Combust. Flame* **84**, 391.
- [4] Spalding, D. B. (1971). Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames. *Thirteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 649-657.
- [5] Bray, K. N. C., and Moss, J. B. (1977). A unified statistical model of the premixed turbulent flame. *Acta Astronautica* **4**, 291.
- [6] Borghi, R., Argueyrolles, B., Gauffie, S., and Souhaite, P. (1986). Application of a "presumed p.d.f." model of turbulent combustion to reciprocating engines. *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1591-1599.
- [7] Marble, F. E., and Broadwell, W. (1977). *The coherent flame model for turbulent chemical*

reactions, Project SQUID, Technical Report TRW-9-PU.

[8] Duclos, J. M., Veynante, D., and Poinso, T. (1993). A comparison of flamelet models for premixed turbulent combustion. *Combust. Flame.* **95**, 101.

[9] Peters, N. (1986). Laminar flamelet concepts in turbulent combustion. *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1231-1250.

[10] Choi, C. R., and Huh, K. Y. (1996). Development and validation of a coherent flamelet model for a spark-ignited turbulent premixed flame in a closed vessel. *Combust. Flame.* submitted.

[11] Metghalchi, M., and Keck, J. C. (1982). Burning velocities of mixtures of air with methanol, isooctane, and indolene at high pressure and temperature. *Combust. Flame.* **48**, 191.

[12] Abdel-Gayed, R. G., Bradley, D., and Lung, F. K-K. (1989). Combustion regimes and the straining of turbulent premixed flames. *Combust. Flame.* **76**, 213.

[13] Abdel-Gayed, R. G., and Bradley, D. (1985). Criteria for turbulent propagation limits of premixed flames. *Combust. Flame.* **62**, 61.

[14] Choi, C. R., and Huh, K. Y. (1996). Development of a coherent flamelet model for turbulent premixed flames. *Proceedings of the Third KSME-JSME Thermal Engineering Conference*. The Korean society of mechanical engineers & the Japan society of mechanical engineers. **3**, 51.

[15] 최 창렬, 허 강열. (1996). 대향류 예혼합 난류 연소 유동에서의 coherent flamelet model 적용 및 검증에 관한 연구, 제14회 KOSCO Symposium 논문집, 한국연소학회, pp. 79-86.

[16] Bray, K. N. C. (1990). Studies of the turbulent burning velocity. *Proc. R. Soc. Lond. A.* **431**, 315.

[17] Abdel-Gayed, R. G., Al-Khishali, K. J., and Bradley, D. (1984). Turbulent burning velocities and flame straining in explosions. *Proc. R. Soc. Lond. A.* **391**, 393.

[18] Amsden, A. A., O'Rourke, P. J., and Butler, T. D. (1989). *KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays*, Los Alamos National Laboratory.

[19] Kostiuik, L. W., Bray, K. N. C., and Cheng, R. K. (1993). Experimental study of premixed turbulent combustion in opposed streams. part I-nonreacting flow field. *Combust. Flame.* **92**, 377.

[20] Bray, K. N. C., Champion, M., and Libby, P. A. (1994). Flames in stagnating turbulence. In Libby, P. A., and Williams, F. A. (Ed.) *Turbulent Reacting Flows*, Academic Press, San Diego, Chap. 9, pp. 582-584.

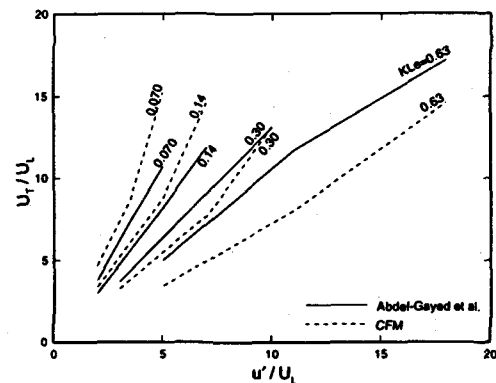


그림 1 CFM의 난류연소속도와 Abdel-Gayed 등[1]에 의한 난류연소속도 비교.

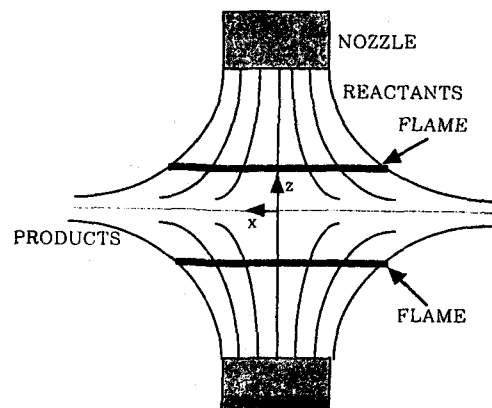


그림 2 대향류 난류 예혼합 연소에서의 유동 및 화염형태.

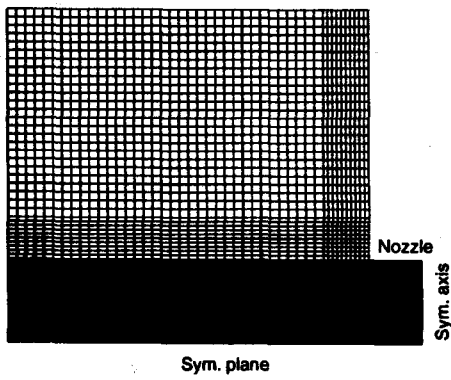


그림 3 계산격자.

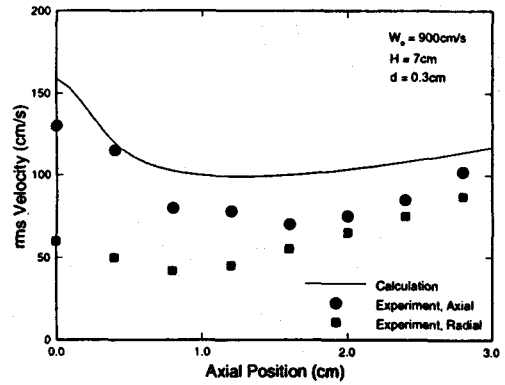


그림 7 축방향으로의 rms 속도 변화.

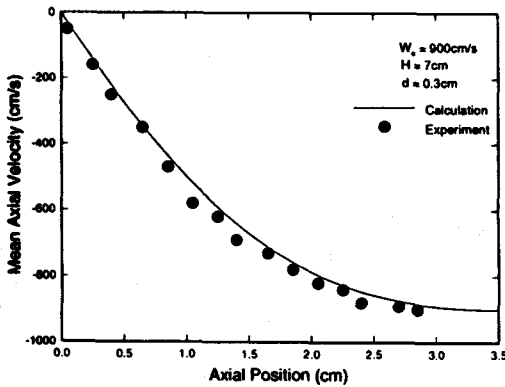


그림 4 상온 유동에서 축방향으로의 평균 축방향 속도.

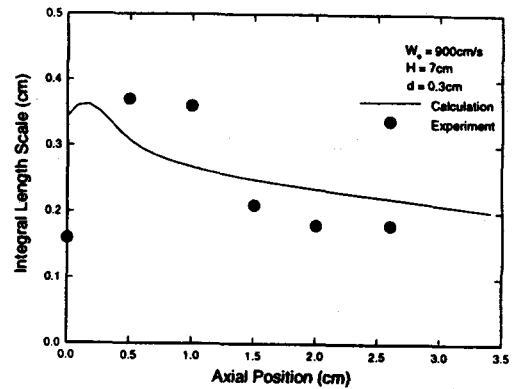


그림 8 축방향으로의 적분 길이 스케일 변화.

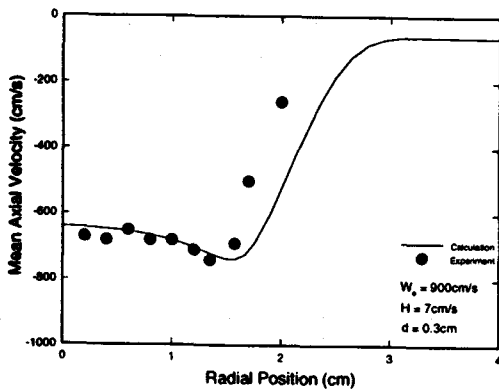


그림 5 대칭면에서 1.4 cm 거리에서의 반경방향으로의 평균 축방향 속도.

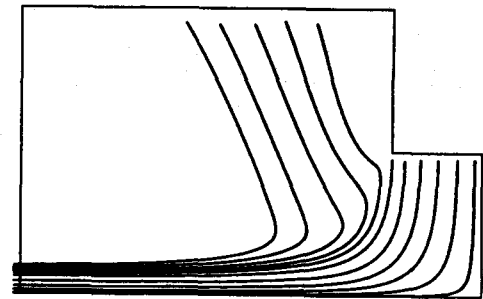


그림 9 상온 유동의 유선 ( $W_0=750$  cm/s,  $H=5.5$  cm,  $d=0.3$  cm,  $\phi=0.9$ ).

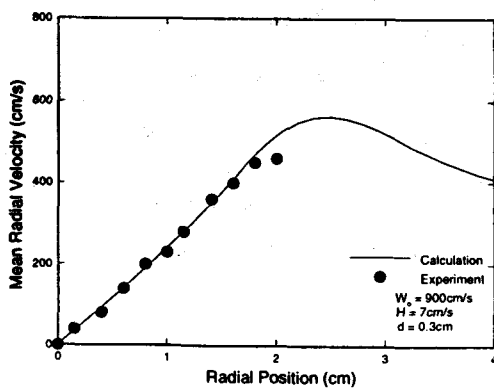


그림 6 대칭면에서 0.6 cm 거리에서의 반경방향으로의 평균반경방향 속도.

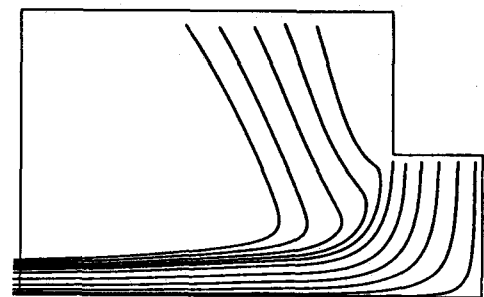


그림 10 반응유동의 유선 ( $W_0=750$  cm/s,  $H=5.5$  cm,  $d=0.3$  cm,  $\phi=0.9$ ).

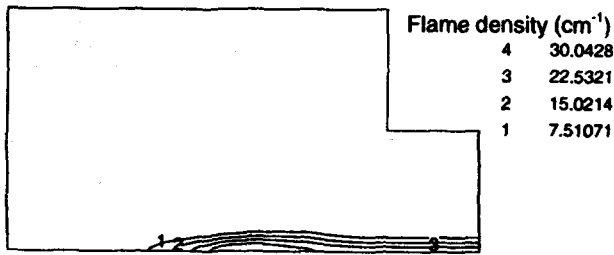


그림 11 반응 유동의 화염밀도 분포 ( $W_o=750$  cm/s,  $H=5.5$  cm,  $d=0.3$  cm,  $\phi=0.9$ ).

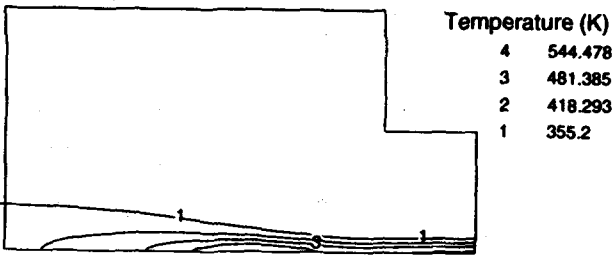


그림 12 반응 유동의 온도분포 ( $W_o=750$  cm/s,  $H=5.5$  cm,  $d=0.3$  cm,  $\phi=0.9$ ).

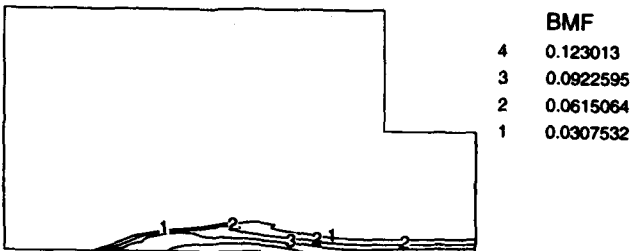


그림 13 반응 유동의 burned mass fraction(BMF) 분포 ( $W_o=750$  cm/s,  $H=5.5$  cm,  $d=0.3$  cm,  $\phi=0.9$ ).

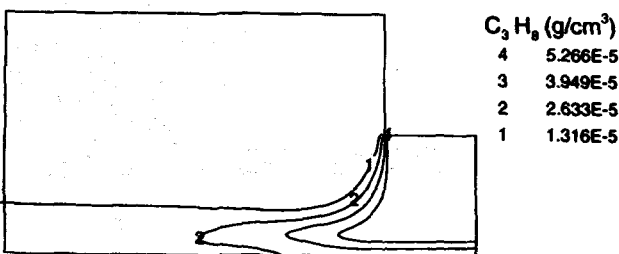


그림 14 반응 유동의 연료(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) 농도 분포 ( $W_o=750$ cm/s,  $H=5.5$  cm,  $d=0.3$  cm,  $\phi=0.9$ ).

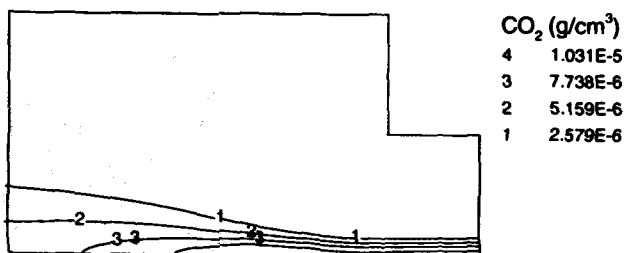


그림 15 반응 유동의 CO<sub>2</sub>분포 ( $W_o=750$  cm/s,  $H=5.5$  cm,  $d=0.3$  cm,  $\phi=0.9$ ).

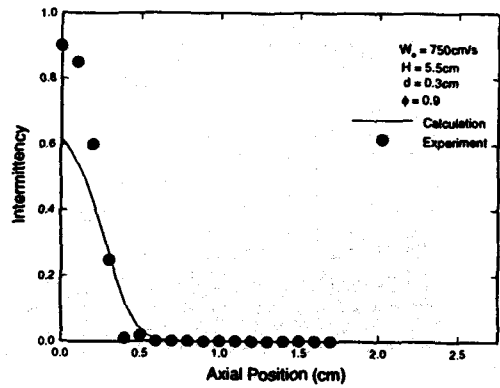


그림 16 축상에서의 intermittency 변화.

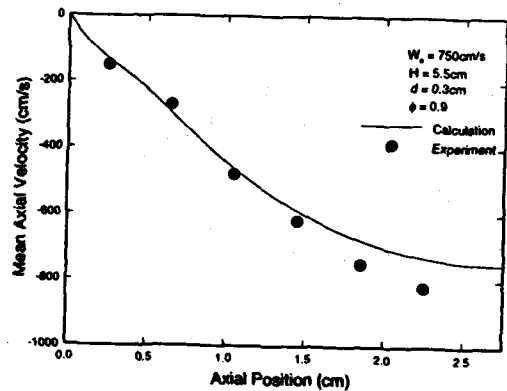


그림 17 반응 유동에서 축방향으로의 평균 축방향 속도.

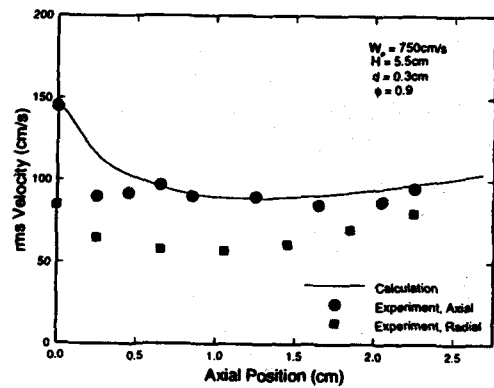


그림 18 반응 유동에서 축방향으로의 rms 속도.