

층류 부상화염 구조의 해석

김후중* · 김용모** · 김세원***

(1998년 10월 8일 접수)

Analysis of the Laminar Lifted Flame Structure

Hoojoong Kim, Yongmo Kim and Sewon Kim

Key Words: Lifted Flame(부상화염), Detailed Chemistry(상세화학반응), Variable Transport properties(가변수송상태량), Triple Flame(삼지화염)

Abstract

A lifted laminar flame structure has been numerically analyzed. The present study employs the physical submodels including the detailed chemical kinetics and the variable transport properties. The validation cases include a lifted laminar CH₄/air flame with a central diluted fuel jet and a surrounding fuel-lean coflow. Numerical results indicate the present approach successfully simulate the detailed structure and mechanism of the triple flame in the lifted laminar methane flame.

1. 서론

확산화염은 많은 실용적인 연소기에서 적용되는 화염구조의 형태이며 이러한 유동장에서는 특히 화염 안정화에 중점을 두고 많은 연구가 진행되고 있다. 예혼합된 반응물에 온도의 확산을 통하여 미연가스로 화염이 전파되는 예혼합 화염과는 달리 확산화염의 경우에는 이러한 화염전파 메커니즘이 존재하지 않으므로 확산화염이 안정화되기 위해서는 부분적인 예혼합 영역을 필요로 하게된다.

부분 예혼합 유동장에서 화염은 화학양론적인 영역을 따라 전파되며 이러한 화염전파의 선단에서는 과농 예혼합 화염, 희박 예혼합 화염, 그리고 이 사이에 다 소모되지 못한 연료와 산화제로 형성되는 확산화염으로 구성된 삼지화염의 구조가 관측되며 이는 부상화염이나 비 예혼합 화

염의 점화과정 등에서 화염 안정화에 매우 중요한 역할을 한다.

메탄 혼합층의 화염전파 과정에서 삼지화염은 Phillipps⁽¹⁾에 의해 처음으로 관측되었으며 Chung과 Lee⁽²⁾에 의해 축 대칭 노즐로부터 형성되는 층류 부상화염의 전파와 구조에 대하여 실험 및 해석적 연구가 수행되었다. Kioni 등⁽³⁾은 대향류 모델을 이용하여 삼지화염의 구조에 변형률(strain)이 미치는 영향에 대해 살펴보았다. Ruetsch 등⁽⁴⁾은 열발생의 영향에 대해 연구하였으며 Domingo 등⁽⁵⁾은 난류 비 예혼합 연소 유동장에서 자발화 과정동안 발생하는 삼지화염의 구조에 대해 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 연구들은 계산상 편의를 위하여 많은 가정을 바탕으로 두고 있으며 특히 화학반응을 일 단계 비가역 반응으로 가정하였기 때문에 중간생성물이 화염 구조나 배출가스 구성 등에 미치는 영향을 제대로 예측하는데 많은 한계를 지니고 있다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 삼지화염의 구조를 가지는 부상화염을 형성하기 위하여 중심 원관에서 연료 혼합물이 분출되고 중심 원관 주위의 환형 원관에서 희박한 연료 혼합물이 분출되

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학과

*** 생산기술연구원

는 축 대칭 연소기에 대하여 상세화학반응 모델과 각 화학종에 대한 가변 수송 물성치를 이용하여 중간생성 화학종 및 라디칼의 농도분포가 부상화염의 구조에 미치는 영향, 과농 예혼합 화염 영역에서 좀 더 안정화된 연료인 CO와 H₂의 생성 메커니즘, 확산화염의 생성 메커니즘에 대해 살펴보았다.

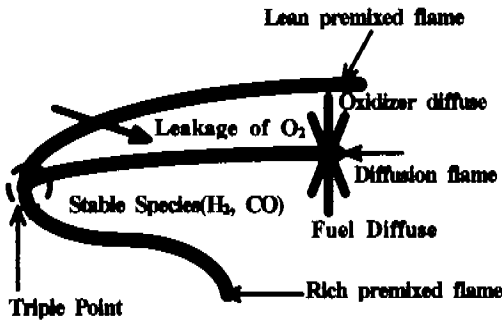


Fig. 1 Detailed structure of methane triple flame.

2. 이론적 배경

2.1 지배방정식

N_s개의 화학종을 포함하는 화학반응이 수반된 축대칭 유동장의 지배방정식을 원통좌표계에서 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v)}{\partial r} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma^{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) - \frac{\rho v \phi}{r} + \frac{\Gamma^{\phi}}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + S^{\phi} \tag{2}$$

여기서, ρ는 밀도, u, v는 각각 속도벡터의 축방향과 반경방향의 속도, p는 압력을 나타낸다. 식 (2)는 ϕ의 위치에 들어가는 변수에 따라 운동량, 화학종, 에너지 방정식을 나타내며 Γ^ϕ와 S^ϕ는 각각 수송상태량과 생성항을 나타내고 있으며 이 생성항에는 중력에 의한 부력효과, 각 화학종의 Lewis수와 영향이 포함되어 있다.⁽⁶⁾

2.2 화학반응식

매탄과 공기의 연소 현상을 기술하기 위하여 본 연구에서 사용된 화학반응모델 CH₄, O₂, CO₂, H₂O, CO, H₂, H, OH, O, HO₂, CH₃, HCO, CH₂O, H₂O₂, CH, CH₂, N₂와 같은 17개의 화학종과 51

개의 기본적인 반응식들로 구성되어 있다.⁽⁷⁾ 각각의 반응에 대하여 순반응율은 Arrhenius 형태를 따랐으며 역반응 상수는 화학평형상수와 순반응상수를 이용하여 계산하였다.

화학반응식의 영향을 살펴보기 위하여 다음과 같은 일단계 비가역 반응모델을 적용하였다.



이 반응식에 의한 연료의 생성율은 다음과 같다.

$$\omega_{F_u} = -1.3 \times 10^9 \exp\left(\frac{-24358}{T}\right) [CH_4]^{-0.3} [O_2]^{1.3} \tag{4}$$

여기서 [CH₄]와 [O₂]는 각각 연료와 산소의 농도를 나타낸다.

2.3 복사열전달모델

본 연구에서는 다음과 같은 단순한 복사열전달 모델을 적용하였다. 광학적으로 얇다는 가정하에서 에너지방정식에 나타나는 복사열유속은 다음과 같이 나타낸다.

$$\nabla \cdot q_R = 4k_p \sigma T^4 \tag{5}$$

여기서, k_p는 평균 Plank 흡수계수를 나타내며 σ는 Stefan-Boltzmann 상수이다. 평균 Plank 흡수계수는 CO₂와 H₂O의 영향만을 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$k_p = p [X_{CO_2} k_{p,CO_2}(T) + X_{H_2O} k_{p,H_2O}(T)] \tag{6}$$

여기서 p는 atm단위로 나타나는 압력이며 k_{p,i}와 X_i는 각각 화학종 i의 평균 흡수계수와 몰분율을 나타낸다. 식 (6)의 우변에 나타나는 CO₂와 H₂O의 평균흡수계수는 다음식과 같은 다항식으로부터 계산된다.

$$\log_{10} \left(\frac{k_{p,i}}{k_{p,i,ref}} \right) = \sum_{n=0}^6 A_{i,n} \left(\frac{T}{300} \right)^n \tag{7}$$

Table 1 Polynomial coefficients for the evaluation of the mean absorption coefficient.

	Polynomial Coefficient	
	CO ₂	H ₂ O
A ₀	0.22317E+01	0.38041E+01
A ₁	-0.15829E+01	-0.27808E+01
A ₂	0.13296E+01	0.11672E+01
A ₃	-0.50707E+00	-0.28491E+00
A ₄	0.93334E-01	0.38163E-01
A ₅	-0.83108E-02	-0.26292E-02
A ₆	0.28834E-03	0.37774E-04

여기서 T 는 온도이며 $k_{P, i, w} = 1$ [atm] 이다. 식 (7)에서 다항식의 계수, $A_{i, n}$ 는 Table 1에 나타나 있다.

2.4 열역학적 상태량과 수송상태량

지배방정식을 풀기 위해서는 열역학적 상태량과 전달 상태량에 대한 정보를 필요로 하게되며 이러한 상태량들은 온도나 화학종의 조성비에 따라 결정된다. 엔탈피와 정압비열은 JANAF 데이터⁽⁸⁾를 이용하여 구하며 개개의 화학종에 대하여 점성계수와 열전도계수는 Chapman-Enskog의 충돌이론으로 혼합물에 대한 점성계수와 열전도계수는 Wilke의 공식으로 구한다. 또한 Chapman-Enskog의 이론과 Lennard-Jones 포텐셜을 이용하여 상호확산계수(binary diffusion coefficient)를 계산한다.⁽⁹⁾

2.5 수치모델링

Eulerian 좌표계에서 기상보존방정식들은 개선된 PISO알고리즘⁽¹⁰⁾과 유사한 유동해석법으로 다루어지나 본 연구에서 사용된 수치모델은 분리오차(splitting error)를 줄일수 있는 알고리즘을 사용하였다. 밀도, 온도, 그리고 질량분율에 있어서의 급격하고 큰 변화를 반영하기 위해 화학종 질량분율과 에너지에 대한 보존방정식은 속도-압력-밀도장의 결합을 다루기 위해 예측/복수교정 계산 절차내에서 계산하였다. 수치확산의 영향을 최소화하기 위해 대류항은 공간에 대한 2차정확도를 가지는 TVD(Total Variation Diminishing) 풍상차분법⁽¹¹⁾을 사용하였다. 수치안정성과 정확성에 큰 영향을 미치는 화학반응 생성항은 유체역학적 연산자와 화학반응 연산자가 동일한 예측 및 복수교정 수치절차내에서 처리되게하여 두 연산자간의 강한 수치적 결합을 갖게 하였다.

3. 결과 및 고찰

메탄 부산화염을 해석하기 위해 적용된 버너의 형상은 Plessing동⁽¹²⁾이 실험에 사용한 형상을 이용하였으며 직경 2mm의 중간 노즐과 이를 둘러싸는 직경 20mm인 관과 150mm의 출구직경을 가지는 노즐로 구성되어 있다. 이는 세가지 분류를 형성하는데 첫 번째는 질소에 의해 희석된 연료 제트가 노즐을 통해 분출되고 두 번째는 바깥쪽

Table 2 Mean inlet velocity and compositions for 3-feed burner⁽¹²⁾

	Diluted fuel stream	Lean CH ₄ -air coflow stream	Outer air coflow stream
Mean inlet velocity (m/s)	1.178	0.650	0.634
CH ₄ mass fraction	0.679	0.0149	0
Mixed with	N ₂	Air	Air

관을 통해 희박한 연료혼합물이 분출된다. 이러한 형상은 안쪽의 과농 예혼합 반응영역, 바깥쪽의 희박한 예혼합 반응영역, 이 둘사이에 형성되는 확산화염으로 구성되는 화염을 안정화 시키기 위하여 실험적으로 채택되었다. 바깥쪽 노즐에서는 세 번째 분류로서 균일한 속도로 공기가 분출되며 이것은 외부로부터 화염의 교란을 방어하며 수치적으로 확실한 경계조건을 제공한다. 이 세 분류의 분출속도와 질량분율을 Table 2에 나타내었다.

반경방향의 수치적 확산을 줄이기 위하여 연료 노즐 근처($\Delta r=0.1\text{mm}$)와 화염이 존재하는 축방향 위치 근처($\Delta z=0.5\text{mm}$)에서 밀집시킨 108×90 비균일 격자계를 이용하여 계산을 수행하였다. 입구조건은 Table 2에 주어진 값을 이용하였으며 첫 번째 분류와 두 번째 분류의 속도분포는 포물선 형태로 가정하였고 세 번째 분류에서의 속도분포는 균일한 분포로 가정하였다. 중심축에서는 모든 변수의 구배가 0이 되도록 하였으며 출구조건은 외압조건을 이용하였다. 또한 반경 35mm인 지점에서 유선이 연소에 의한 열팽창에 의해 변형되지 않고 또한 화염장으로부터 충분히 떨어져 있다고 가정하여 이 위치에서 반경방향의 속도성분은 0이며 축방향 속도, 온도, 화학종의 농도등의 구배도 0이 되도록 하였다.

Fig. 2는 속도장과 온도장을 나타낸 것이다. 상류의 혼합층 영역부터 화염이 안정화되는 영역 근처까지 유동장이 반경방향으로 퍼지며 축방향 속도가 감소하는 것을 살펴볼 수 있으며 이는 화학반응으로 인한 열팽창 효과로 비롯된다. 화염면 뒤쪽에서는 부력에 의한 유동장의 급 가속으로 공기가 유입되어 속도가 중심축 방향으로 향하는 것을 살펴볼 수 있다.

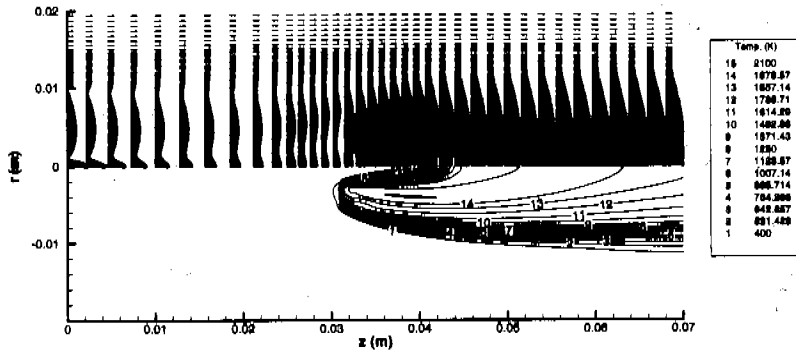


Fig. 2 Velocity vectors and temperature contour.

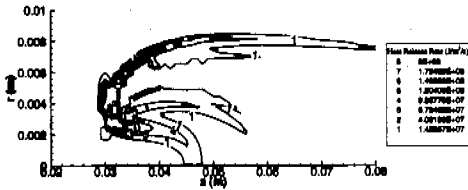


Fig. 3 Distribution of heat release rate.

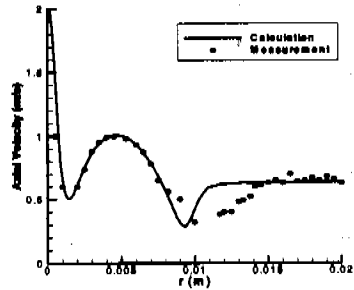


Fig. 4 Radial profile of axial velocity at z=4mm.

Fig. 3은 본 연구에 적용된 수치모델을 이용하여 예측한 열발생률의 분포를 나타낸 것이다. 여기서 본 연구에 적용된 형상이 삼지화염(중심축 근처에 존재하는 파동 예혼합 화염과 바깥쪽에 존재하는 희박 예혼합 화염, 그리고 이 둘 사이에 존재하는 확산화염)의 구조를 갖는다는 것이 확연히 드러나며 열발생률의 최대값은 세 화염이 공존하는 삼중점에서 존재함을 알 수 있다.

Fig. 4는 입구와 가까운 영역인 축방향 4mm인 지점에서 축방향 속도분포를 반경방향을 따라 비교한 것이다. 비교적 실험치와 잘 일치하고 있음을 나타내고 있으나 $0.01m < r < 0.015m$ 인 지점에서 실험치와 상당한 차이를 나타내고 있다. 이는 실험에서 발생하는 두 번째 분류와 세 번째 분류 사이에 존재하는 벽 효과, 즉 노즐 림(rim)의 존재를 본 계산에서 고려하지 않은 결과로 사료된다.

Fig. 5는 삼중점의 반경방향 위치에서 축방향 속도분포의 계산치와 실험치⁽¹²⁾를 비교한 것이다. 삼중점의 축방향 위치는 실험치와 비교할 때

15mm정도 상류쪽에서 발생하게 되는 것으로 예측하고 있으며 이는 Fig. 4에서 보여진 바와 같이 입구조건외 불확실성과 C2와 thermal NOx 및 Prompt NOx 등을 포함하는 화학반응의 결여, soot 입자들로 인한 복사열손실의 무시 등의 결과로 사료된다. Fig. 5에서는 측정된 삼중점의 위치를 상류쪽으로 15mm 이동하여 삼중점 부근의 속도분포를 예측치와 비교하였다. 그러나 이를 제외하면 실험치와 예측치는 거의 일치하고 있으며 하류에서의 속도는 부력에 의해 가속되고 있음을 알 수 있다. 일단 화염면이 존재하면 그 화염면에 수직인 속도성분은 증가하지만 접선 속도는 변하지 않고 유지된다. 그러므로 화염면이 Fig. 2 처럼 곡선인 경우 화염면 상류영역에서 유동장의 방향이 바뀌며 유선이 반경방향으로 퍼지게 되어 화염면 앞에서 축방향 속도는 감소하게 된다. 그 결과 화염이 발생하는 영역에서 축방향 속도는

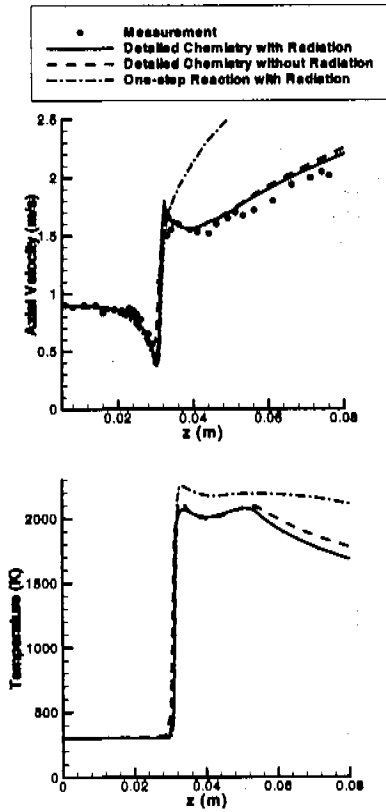


Fig. 5 Axial profiles of axial velocity and temperature at $r=3.2\text{mm}$.

최소값을 가지며 이 값은 메탄화염의 층류화염속도와 비슷한 값을 가지게 되어 이 지점에서 화염이 안정화 된다. 만약 상류에서 속도가 증가하게 되더라도 열발생으로 인한 flow redirection 현상이 발생하게 되면 화염면 앞에서 속도는 감소하게 되고 국부적으로 층류화염속도와 비슷한 속도값을 가지게 되는 위치에서 화염이 안정화 될 것이다. 또한 Fig. 5에서는 일단계 비 가역 반응모델과 상세화학 반응모델을 적용하여 계산한 결과를 비교하였다. 일단계 비 가역 반응모델을 이용한 계산 결과가 상세화학 반응모델을 이용하여 계산한 결과보다 높은 온도를 예측하였으며 이로 인해 삼중점 하류영역에서 큰 축방향 속도를 예측하였다. 단순한 복사열전달 모델을 고려한 결과는 그렇지 않은 모델보다 낮은 온도를 예측하였으며 이로 인해 삼중점 하류영역에서 낮은 축방향 속도를 예측하였고 이는 실험치와 훨씬 근접한 결과를 보여주고 있다.

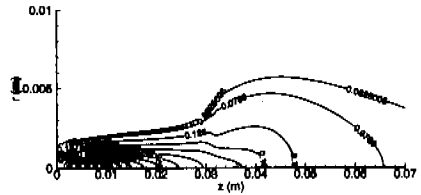


Fig. 6 Mixture fraction distribution

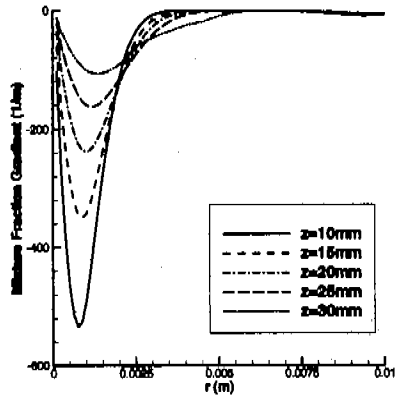


Fig. 7 Radial profiles of mixture fraction gradient.

혼합분율에 따르는 여러 가지 분포특성을 살펴보기 위하여 본 연구에서는 다음과 같이 혼합분율을 정의하였다.

$$Z = \frac{(2Y_C/W_C) + (0.5Y_H/W_H) + ((Y_{O_0} - Y_O)/W_O)}{(2Y_{C,F}/W_C) + (0.5Y_{H,F}/W_H) + (Y_{O,O}/W_O)} \quad (8)$$

여기서 Y_C 는 탄소원자의 질량분율, Y_H 는 수소원자의 질량분율, Y_O 는 산소원자의 질량분율을 각각 나타내며 $Y_{F,C}$ 와 $Y_{F,H}$ 는 연료에서 탄소와 수소의 질량분율을 나타내고 있다. W_C , W_H 와 W_O 는 각각 탄소, 수소, 그리고 산소의 원자량을 나타내며 $Y_{O,0}$ 는 공기에서 산소분자의 질량분율을 나타낸다. 위와 같은 정의를 가지고 본 연구에 사용된 형상에 대하여 화학양론적인 혼합분율을 계산하면 그 값은 0.0789이다. Fig. 6과 Fig. 7은 이러한 혼합분율의 분포와 여러 축방향 위치에서 혼합분율의 구배 분포를 나타낸 것이다. 출구근처의 상류에서는 매우 큰 구배를 가지고 있으나 하류 쪽으로 갈수록 반경방향으로 확산되는 영향으로 구배가 점점 감소하고 있으며 혼합두께 (mixing thickness)는 점점 증가되고 있음을 알 수 있다. 화염면 근처에서는 열발생으로 인한 팽창

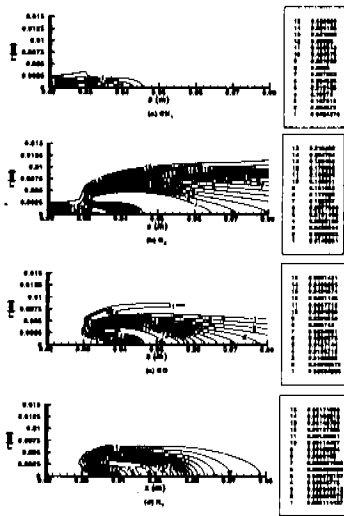


Fig. 8 Major species distribution.

효과로 발생하는 자체적인 변형률(strain)로 인해 반경방향으로 넓은 영역까지 혼합분율의 구배가 분포되며 또한 축방향속도의 감소를 가져오고 있음을 알 수 있다. 이러한 혼합분율 구배의 감소와 화염면 근처에서 반경방향으로 넓은 영역까지 혼합분율의 구배가 분포되는 특성은 확산화염의 크기를 줄이는 동시에 회박 예혼합 화염 영역을 증가시킨다. 이로인해 화염영역 앞에서 flow redirection을 생성하고 또, 이러한 flow redirection 현상은 혼합분율 구배의 감소와 화염면의 변형률의 증가를 초래하게 되며 이런 자생적인 파정을 통해 화염은 안정화된다.

Fig. 8은 주요 화학종인 CH₄, O₂, CO, H₂의 분포를 나타낸 것이다. 연료인 CH₄는 파동 예 혼합 화염 영역에서 거의 대부분 소모되며 좀 더 안정된 연료인 CO와 H₂를 생성하게 된다. 반면 O₂는 파동 예혼합 화염영역 까지 확산되어 존재하고 있음을 알 수 있다. 메탄의 산화과정은 다음 단계를 통해 이루어 진다. CH₄→CH₃→CH₂O→HCO→CO→CO₂. 파동 예 혼합 영역에서 메탄의 산화는 HCO 단계 까지 이루어지며 그 이후에 CH₄의 산화과정의 탄화수소계 중간 생성물들에 의해 주요 라디칼인 H, OH가 소멸되면서 형성된 H₂와 CO가 확산화염 영역으로 확산되어 이루어 진다. 확산화염장의 CO는 OH와 결합하여 확산화염장의 전체적인 열 발생과 관련된 반응, CO+OH⇌

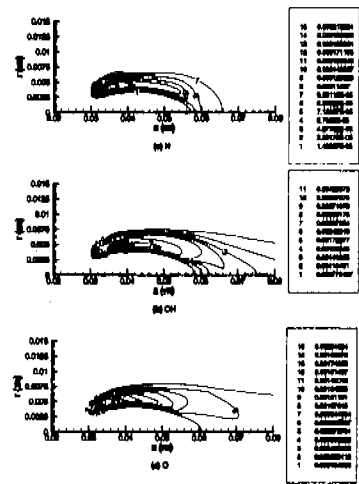


Fig. 9 Minor species distribution.

CO₂+H을 통해 소멸된다. H는 O보다 확산 속도가 크며 이러한 이유로 두 예혼합 영역 사이에서 화학양론적인 위치가 회박 예혼합 영역쪽으로 치우치게 되어 확산화염이 중심축과 평행하게 형성되지 않고 회박 예 혼합 화염 영역으로 치우쳐 굽어 있는 형상을 갖게됨을 Fig. 2를 통해 알 수 있다.

Fig. 9는 주요 라디칼인 H, OH, O의 분포를 나타낸 것이다. 라디칼의 대부분은 확산화염장 부근에서 생성되며 예 혼합 화염장 쪽으로 확산하여 탄화수소계 중간생성물과 결합하여 H₂를 생성하게 되며 이렇게 생성된 H₂는 주요생성물인 H₂O와 라디칼 H를 형성하는 반응, H₂+OH⇌H₂O+H, 라디칼 형성에 중요한 역할을 하는 chain branching반응, H₂+O⇌OH+H에 의해 라디칼 생성 영역에서 소모된다. H₂는 H, OH의 상호관계로 인해 확산화염장 부근에 풍부한 라디칼들을 형성하여 확산화염이 안정화되는 역할을 하게된다. O와 H는 삼중점에서 최대값을 가지는 반면 OH는 삼중점과 비교적 느린 재결합 반응으로 인해 확산화염장에서 최대값을 가짐을 알 수 있다. 삼중점에서 라디칼은 최고 농도를 가지며 이 부근에서 라디칼과 결합하는 CO와 H₂가 최대 농도를 가짐으로 말미암아 삼중점에서 열 발생률이 최대 값을 갖게되고 이로 인해 부상화염이 안정화 된다. Fig. 10은 세가지 화염 영역이 공존하는 z=40mm인 지점에서 혼합분율에 따른 CO, H₂, 주

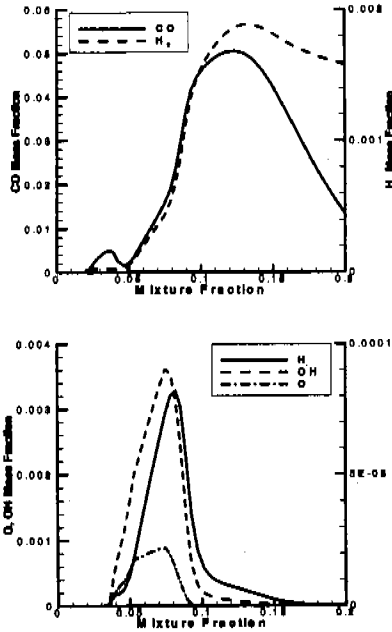


Fig. 10 Axial profiles of major and minor species in mixture fraction space at $z=40\text{mm}$.

요 라디칼의 분포를 나타낸 것이다. CO와 H₂는 파동 영역에서 생성되어 확산화염 영역, 화학양론적인 지점 부근에서 소멸되며 주요 라디칼은 대부분 확산화염 영역에 분포하며 H 라디칼은 파동 영역까지 분포하여 H₂와 CO 생성에 도움을 주고 있음을 알 수 있다.

열 발생률의 분포를 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 $z=31.4, 34, 42\text{mm}$ 인 위치에서 혼합분율의 함수로 열발생률과 온도분포를 Fig. 11에 나타내었다. 31.4mm인 지점에서는 연료와 산화제가 완전히 소모되지 않았기 때문에 온도도 상당히 낮은 값을 가지며 열발생률도 화학양론적인 점 근처에서 한 개의 peak를 가지는 반면 34mm인 지점에서는 연료와 산화제가 거의 소모되어 온도는 최고온도에 가깝게되며 열발생률의 분포도 희박예혼합 영역과 파동 예혼합 영역에서 각각 peak를 가짐을 알 수 있다. 축방향 42mm인 지점에서는 온도는 두 경우보다 낮게 분포되며 열발생률의 peak도 각각의 예혼합 반응영역과 확산 반응영역에서 3개가 형성되어 있음을 알 수 있다.

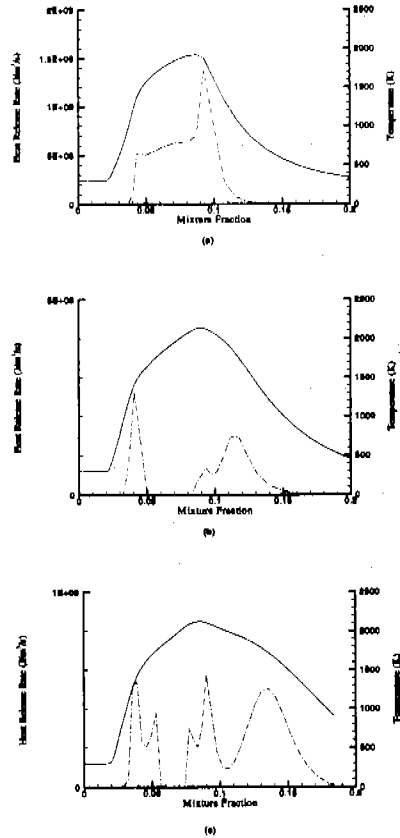


Fig. 11 Radial profiles of temperature and heat release rate in mixture fraction space at (a) $z=31.4\text{mm}$, (b) $z=34\text{mm}$, and (c) $z=42\text{mm}$ (solid : temperature, dashdot : heat release rate).

4. 결론

상세화학반응 및 가변수송물성치를 고려한 수치모델을 메탄화염에 적용한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 적용한 수치모델은 화염의 안정화에 중요한 역할을 하게되는 flow redirection 현상을 예측하였으며 축방향 속도분포에 대한 실험치를 비교적 정확히 예측하였으나 입구조건외 불확실성, C2 와 thermal NOx 및 Prompt NOx 등을 포함하는 화학반응의 결여, soot 입자들로 인

한 복사열손실의 무시 등의 결과로 화염이 안정화되는 위치를 예측하는데 있어서 다소 차이가 있음을 알 수 있었다.

(2) 일단계 비가역 반응 모델이 상세 화학반응 모델 보다 높은 온도분포를 예측하였으며 복사열손실을 고려한 경우가 실험치의 속도분포에 가장 근접한 결과를 가짐을 알 수 있었다.

(3) 열 발생으로 인하여 화염 안정화 위치 상류에서 유동장이 반경방향으로 퍼지는 flow redirection 현상으로 화염 안정화에 중요한 역할을 하는 축방향 속도의 감소와 혼합분율 구배의 감소를 초래함을 알 수 있었다.

(4) 연료인 CH₄는 과농 확산화염 영역에서 거의 대부분 소모되며 좀 더 안정된 연료인 CO와 H₂를 생성하게 되며 CO는 확산화염 영역의 열 발생 반응에 의해 소멸되고 H₂는 주요 라디칼 형성을 위해 소멸되어 확산 화염장을 안정화 시킴을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Phillips, H., 1965, *10th Symposium (Int.) on Combustion*, pp. 1227~1283.
 (2) Chung, S. H. and Lee, B. J., 1991, *Combustion and Flame*, Vol. 86, pp. 62~72.
 (3) Kioni, P. N., Rogg, B., Bray, K. N. C. and Linan, A., 1993, *Combustion and Flame*, Vol. 95,

pp. 276~290.
 (4) Veyante, D., Vervisch, L., Linan, A. and Ruetsch, G. R., 1994, "Triple Flame Structure and Diffusion Flame Stabilization," In *Proc. of Summer Prog., Center of Turbulence Research*, Stanford University.
 (5) Domingo, P. and Vervisch, L., 1996, *26th Symposium (Int.) on Combustion*, p. 233
 (6) 김후중, 김용모, 안국영, 1997, 대한기계학회논문집(B) 제21권 제9호, pp. 1126~1138.
 (7) Djavdan, E., Darabiha, N., Giovangigli, V. and Candel, S. M., 1991, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 76, pp. 287~309.
 (8) Chase, M., 1986, *JANAF Thermodynamic Tables*, 3rd edition, American Chemical Society and American Institute of Physics for the National Bureau of Standards.
 (9) Kee, R. J., Warnatz, J. and Miller, J. A., 1983, Sandia Report, SAND83-8920.
 (10) Kim, Y. M., Chen, C. P., Ziebarth, J. P. and Chen, Y. S., 1994, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 25, pp. 21~42.
 (11) Chakravarthy, S. R. and Osher, S., 1985, AIAA-85-0363, 23rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV.
 (12) Plessing, T., Terhoeven, P., Peters, N. and Mansour, M. S., 1998, to be appeared in *Combustion and Flame*.