

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.5.505

미소 농도구배 조건에서 열손실 및 가연한계가 삼지화염의 확산화염에 미치는 영향에 대한 기초 연구

조상문* · 이민정* · 김남일*†

* 중앙대학교 기계공학부

Basic Study on Diffusion Branch of Tribrachial Flame with the Variation of Flammability Limits and Heat Loss Under Small Fuel Concentration Gradient

Sang Moon Cho*, Min Jung Lee* and Nam Il Kim*†

* School of Mechanical Engineering, Chung-Ang Univ.

(Received December 21, 2009 ; Revised March 2, 2010 ; Accepted March 2, 2010)

Key Words : Edge Flame(에지화염), Mixing Layer(혼합 경계층), Flammability Limits(가연한계), Flame Stabilization(화염안정화)

초록: 삼지화염 구조는 화염 선단의 구조로서 다루어져 왔으며, 많은 연구자들에 의해 해석적인 방법과 실험적인 방법으로 연구가 되어왔다. 그러나 연료의 종류에 따른 가연한계의 차이가 삼지화염의 구조에 미치는 영향에 대한 연구는 깊이 있게 다루어지지 않았다. 본 연구에서는 화염 구조에 대한 비대칭 가연한계의 영향을 예혼합화염과 확산화염에 관한 몇 가지 층류화염 이론에 근거한 간단한 수치 기법을 통해 연구하였다. 고정된 유동장이 사용되었으며, 예혼합 화염 가지에서의 경계조건이 연계되었다. 예혼합 화염 후류의 확산화염의 형성과 소멸을 성공적으로 모사할 수 있었다. 비대칭 가연한계 조건과 열손실에 따른 확산화염의 변화가 연구되었다. 본 연구는 화염의 기초 구조에 대한 이해를 도울 수 있으며, 이후의 연구를 위한 기초로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract: The tribrachial flame has attracted interest as a basic structure of the flame edge. This flame structure helps understand stabilization of laminar flames and re-ignition of turbulent flames. A number of analytical and experimental studies have been carried out on the tribrachial flame. However, the effect of the variation of the flammability limits on the structure of the tribrachial flame has not been studied in detail. In this study, the effect of non-symmetric flammability limits on the flame structure was investigated by adopting a simple numerical scheme based on several laminar flame theories. A fixed velocity field was considered and boundary matching algorithm was used on the premixed branch. The variation of the diffusion branches under the non-symmetric flammability limits and heat loss was investigated. The formation and extinction of the diffusion branch behind the premixed branch were successfully described. This basic study can help understand the fundamental structure of the flame and can form the basis of subsequent detailed studies.

- 기호설명 -

$PVTF$: 삼지화염 전파속도
 S_L^0 : 층류화염 연소속도
 S_L : 국부 화염 연소속도
 Y : 질량분율
 T : 온도
 h : 대류열전달 계수
 LL : 희박가연한계
 RL : 과농 가연한계

b : 무차원 채널 간격
 ρ : 밀도
 ϕ : 당량비
 $\dot{\omega}$: 반응률
 θ : 예혼합화염 각도
 α : 열확산 계수
 ν : 이론 혼합비율

하첨자

F : 연료
 L : 연료 희박
 R : 연료 과농

† Corresponding Author, nikim@cau.ac.kr

1. 서 론

연료와 산화제의 혼합 경계층에 형성된 화염의 선단은 삼지화염(tribrachial or triple flame)의 구조를 가지는 것이 널리 알려져 있다.⁽¹⁻⁸⁾ 이러한 삼지화염은 화염 선단이 희박예혼합화염과 과농예혼합화염으로 이루어지며 그 하류에 희박예혼합화염 후단의 잔류 산화제와 과농예혼합화염 후단의 잔류 연료가 만나 확산화염을 형성하는 구조를 가지고 있다. 이러한 삼지화염은 층류화염의 부상 특성이나 난류 화염의 재점화 특성 등을 설명하는데 매우 중요하다.

삼지화염의 구조는 Phillips⁽¹⁾에 의해 메탄-공기 성층 구조에서 최초로 확인된 이후 Dold⁽²⁾에 의해 물리적 중요성이 제시됨으로써 많은 연구가 이루어졌다. Kinoi 등⁽³⁾은 채널 내부에 인위적인 혼합층을 형성하고 화염의 특성을 실험하였다. 특히 Chung⁽⁴⁻⁷⁾의 연구그룹에서는 연료 및 산화제 분류 조건에서의 부상화염 및 비정상 화염 등에 대해 다양하고 방대한 연구를 수행하였다. 기존의 연구들에 따르면 삼지화염의 구조 및 화염 전파 속도는 화염 상류에서의 연료의 농도구배에 의해 크게 변화한다. 일반적으로 연료 농도구배가 증가할 때 삼지화염의 전파속도는 감소한다. Ruetch 등⁽⁸⁾은 삼지화염의 전파속도가 농도 구배의 감소에 따라 점차 증가하여 농도구배가 없어지는 조건에서 아래의 식과 같은 크기를 가짐을 이론적으로 보였다.

$$PVTF_{FCG=0} \approx S_L^0 \sqrt{\rho_u / \rho_b} \quad (1)$$

이후 Kim 등^(9,10)은 농도구배가 0 이 되는 조건에서는 확산화염이 형성되지 못하고 예혼합화염만 존재하게 되어 화염전파속도의 감소가 발생하게 될 것이므로, 삼지화염의 전파속도는 특정 속도에서 최대값을 가지게 됨을 채널 내부의 화염⁽⁹⁾과 외부 화염⁽¹⁰⁾에 대해 실험적으로 보였다. 또한 화염 형성에 있어 가연한계 전체에 걸쳐 화염이 존재하는 이상적인 삼지화염을 구현하지 못할 경우 화염의 전파속도가 감소함을 보였다. 이러한 결과는 화염의 가연한계 크기 및 가연한계의 비대칭 특성이 전파속도에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

이러한 관점에서 화염으로부터 발생하는 열량에 대한 외부로의 열손실의 비를 증대시키고자 간격이 좁은 채널 내부에 농도구배를 형성하고 화염의 거동을 살펴보는 실험을 수행한 바 있다.⁽¹¹⁾ 열손실이 큰 채널 내부에서의 화염 거동 역시 삼지화염의 이론을 이용하여 설명 가능하며 농도구배에 따라 다양한 화염 구조가 발생함을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 화염이 존재하는 채널의 간격감소로

Table 1 Asymmetric flammability limits of methane and propane fuels⁽¹²⁾

Fuel	Flammability limits		Burning Velocity [cm/s]
	Lean Limit (LL), ϕ_L	Rich Limit (RL), ϕ_R	
Methane	0.46	1.64	40
Ethane	0.50	2.72	43
Propane	0.51	2.83	44

인해 화염으로부터 발생한 열의 상당부분이 외부로 손실됨으로 인해 예혼합화염 및 확산화염의 형성이 억제된 결과이다. 그런데 이러한 특성들은 연료 별로 조금씩의 차이를 가질 것으로 예상되는데, 그 원인의 하나가 연료의 가연한계 차이로 생각된다.

대표적인 연료의 가연한계의 범위를 Table 1 에 제시하였다. 메탄의 경우 희박가연한계와 과농가연한계가 각각 당량비 0.46, 1.64 로 이론혼합비를 기준으로 당량비 값이 대칭적으로 존재하는 것을 알 수 있다. 하지만 에탄과 프로판의 경우 희박가연한계는 0.5 정도인데 반해 과농가연한계는 3 에 가까운 큰 값을 가져서 이론혼합비를 기준으로 대칭적인 구조로 볼 수 없다. 많은 연료들이 가연한계가 대칭적이지 않아서 이에 대한 효과를 검토할 필요가 있다. 또한 기존의 이론 연구는 선단의 예혼합 영역에 대해서만 한정되어 이루어졌기 때문에 하류 확산화염의 형성에 대한 이론적 연구는 아직 부족하다.

화염 선단의 예혼합화염과 하류의 확산화염에 대한 전반적인 거동특성을 연구하기 위해서는 반응 모델을 도입한 Navier-Stokes 식의 해석이 불가피한 현실이다. 하지만 이러한 해석에 있어 상세 반응 모델은 실존하는 연료에 근거하고 있어서 가연한계의 변화를 자유롭게 조절할 수 없다는 단점과 미소농도 조건에서의 화염 크기 증가로 인해 해석에 요구되는 계산 부하가 부담스럽다는 단점을 가지고 있다. 총괄 반응 모델의 경우 계산 부담은 다소 감소하지만 희박 및 과농 영역에서의 가연한계를 적절히 모사하지 못하는 단점이 있다.

본 연구는 예혼합화염 하류에 형성된 확산화염이 열손실과 비대칭적인 가연 범위 조건에서 어떻게 거동하는지에 대해 관심을 가지고 수행되었다. 이러한 목적으로 확산화염의 특성을 간단히 평가할 수 있는 단순 모델을 이용하게 된다. 확산화염 상류에 위치하는 예혼합화염에 대한 정보는 예혼합화염에 대한 일반적인 지식을 활용하여 경계조건으로 부과하고 후류의 열 및 물질 확산과 반응을 평가하였다. 이러한 연구 방법을 통해

가연한계를 변화시키고 예혼합화염의 형상 및 예혼합화염 하류에서의 온도 및 농도의 이론적 변화 등 화염 구조에 대한 기본 특성을 살펴보고, 추가적으로 대칭 및 비대칭 가연한계의 화염에 대해 화염 선단에서의 농도구배 변화의 효과 및 화염으로부터의 열손실의 효과를 검토하고자 한다.

2. 해석 방법

해석 방법은 기본적으로 유동 방향으로 질량 유속이 일정한 평행 혼합경계층을 가정하고 있는데, 이는 화염을 지나는 유선관(stream-tube) 내부의 유속은 화염에 따라 변하지만 질량유속은 변하지 않는다는 예혼합화염의 기초 이론 모델에 근거하고 있다. 실제 화염을 통한 유동은 화염면의 수직방향뿐만 아니라 접선방향으로도 유속 변동을 일으키므로 보다 복잡한 해석이 요구되지만, 문제를 간단히 하면서 화염의 특성을 이해하기 위해 고정된 유동장 가정 하에서 예혼합화염의 형상과 반응 특성을 연구하였다.

본 연구에서는 사용된 좌표계는 Fig. 1(a)와 같다. 세 개의 화염가지(flame branch)가 만나는 삼중점을 기준으로 아래와 같이 우측방향을 x, 상방향을 y, 연료의 농도구배를 ∇Y_F 혹은 $\nabla \phi$ 로 두었다. 그리고 화염의 기울기를 수평축을 기준으로 θ 로 표시하였다.

가연 한계 범위를 포함한 모든 농도 조건에서 선형적으로 연료의 당량비가 증가하는 조건을 가정하였다. 농도구배 구간에서 당량비 1에 해당하는 조건에서의 연소속도가 최대가 되고 가연한계

근처에서의 연소속도가 최소가 된다. 이러한 연소 속도의 당량비별 변화를 가장 간단하면서도 적절히 묘사할 수 있는 분포함수로 정현함수를 선택하였다. 그런데, 화염의 가연한계에서 최소 연소속도는 대략 5 cm/s 정도의 크기를 가지는 것이 알려져 있는데, 본 연구에서는 가연한계에서의 연소속도를 해석의 편의를 위해 이론혼합비 조건에서의 화염의 최대 연소속도의 10% 정도로 충분히 작게 임의로 설정하였다. 그 결과 연소속도는 이론 혼합비 $Y_{F,st}$ 에서 최대 속도 S_L^0 를 가지고 가연한계 $Y_{F,L}$ 과 $Y_{F,R}$ 에서 $S_L^0/10$ 을 가진다.

그런데, 해석의 편의를 연소속도가 0이 되는 임의의 확장된 가상가연한계를 정의할 수 있는데, 희박조건과 과농조건에서 각각 Y_{FL0} 와 Y_{FR0} 로 나타내었다. 실제 가연한계 $Y_{F,R}$ 와 가상 가연한계 Y_{FR0} 를 Fig. 1(b)에 나타내었으며 관계식은 아래와 같다.

$$\cos \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{Y_{F,R} - Y_{F,st}}{Y_{FR0} - Y_{F,st}} \right) \right] = 0.1 \quad (2)$$

$$Y_{FR0} - Y_{F,st} \approx 1.068(Y_{F,R} - Y_{F,st})$$

가상 가연한계와 실제 가연한계는 선형적인 관계에 있음을 알 수 있고 그 차이는 크지 않다.

앞서 도입한 가상의 가연한계 구간에 대해 연소속도를 정현과 함수를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$S_L(Y_F \leq Y_{F,L}) = 0$$

$$S_L(Y_{F,L} \leq Y_F \leq Y_{F,st}) = S_L^0 \cos \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{Y_{F,st} - Y_F}{Y_{F,st} - Y_{FL0}} \right) \right] \quad (3)$$

$$S_L(Y_{F,st} \leq Y_F \leq Y_{F,R}) = S_L^0 \cos \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{Y_F - Y_{F,st}}{Y_{FR0} - Y_{F,st}} \right) \right]$$

$$S_L(Y_{F,R} \leq Y_F) = 0$$

당량비의 변화가 0.1/mm ($\nabla Y_F = 0.00552/\text{mm}$)인 조건에서 가연한계가 $Y_{FL} = 0.5$, $Y_{FR} = 1.5$ 인 조건에 대해 연소속도의 분포 예를 Fig. 2(a)에 나타내었다.

이러한 조건에서 화염이 존재한다면 화염의 위치는 화염의 국부적인 연소속도와 일정한 상부 유속간의 관계식으로부터 구할 수 있다. 일반적으로 층류 연소속도와 동일한 속도로 상류 유속이 공급될 때 연료 농도에 따라 변화하는 국부적인 화염의 기울기의 관계식을 분젠 버너를 이용한 연소속도 측정 방법과 마찬가지로 다음과 같이 간단히 표시할 수 있다.

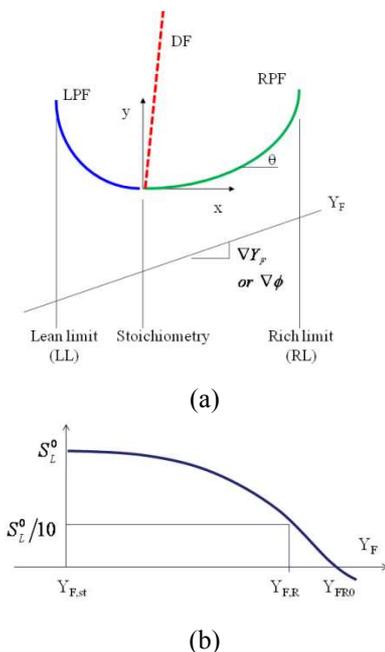


Fig. 1 Analytical domain

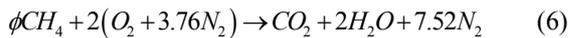
$$S_L(Y_F)/S_L^0 = \cos \theta \quad (4)$$

식 (3)와 식 (4)로부터 화염면의 위치에 대해 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\theta(Y_{F,L} \leq Y_F \leq Y_{F,st}) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{Y_{F,st} - Y_F}{Y_{F,st} - Y_{FL0}} \right) \quad (5)$$

$$\theta(Y_{F,st} \leq Y_F \leq Y_{F,R}) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{Y_F - Y_{F,st}}{Y_{FR0} - Y_{F,st}} \right)$$

이제 화염면에서의 화염 후류에서의 새로운 농도장과 화염면에서의 온도를 화염면을 따라 강제적인 경계조건으로 부과할 필요가 있다. 화염 후류의 농도는 각각의 x 지점에 대해 연료, 산화제, 질소의 질량 분율의 분포를 아래의 이론연소 반응식에 근거하여 예측할 수 있다.



연료희박 조건과 연료과농 조건에서 각각 연료와 산화제가 모두 소진된다고 가정하고, 연소 생성물을 모두 반응에 참여하지 못하는 희석가스로 생각하면 각각 화염 직후에서의 산화제, 연료, 희석제의 질량 분율을 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$Y_{O,lean} = \frac{(2-2\phi)M_{O_2}}{\phi M_{CH_4} + 2(M_{O_2} + 3.76M_{N_2})}$$

$$Y_{F,rich} = \frac{(\phi-1)M_{CH_4}}{\phi M_{CH_4} + 2(M_{O_2} + 3.76M_{N_2})} \quad (7)$$

$$Y_{inert} = 1 - Y_{O_2} - Y_F$$

이 식을 이용하여 Fig. 2(a) 조건에 대해 화염 후단에서의 농도 분포를 도시한 결과가 Fig. 2(b)이다. 이러한 조건에서 가연한계는 x 방향으로 -5 mm~5 mm 범위에 해당한다. 우선, 화염 이전의 연료 질량 분율은 우측으로 갈수록 증가하고 있다. 연료의 질량분율의 나머지가 산화제부분이 되며 그 중 일부가 산소에 해당한다. 우측으로 갈수록 산소의 질량분율은 서서히 감소하고 있다. 가연한계 범위 내에서 희박에혼합화염 후류에서 연료의 질량 분율은 0 이 되고 마찬가지로 과농에혼합화염 후류의 산소의 질량 분율은 0 이 된다.

화염의 온도는 화염에서 소모되는 연료의 양과 단위 질량의 연료로부터 발생하는 발열량의 크기를 감안하여 아래와 같이 간단히 가정할 수 있다.

$$T_{ad} = (LHV)\dot{m}_F / c_p + T_0 \quad (8)$$

그런데, 화염의 온도는 화염 전후의 기체의 정

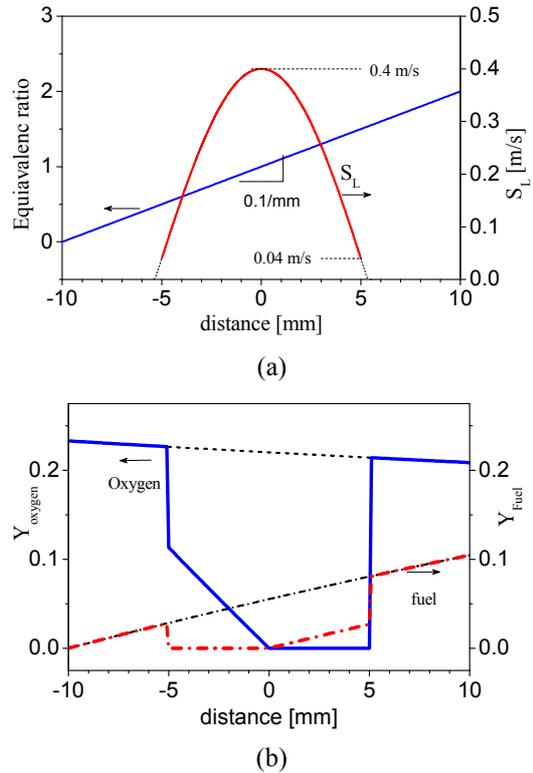


Fig. 2 boundary conditions along the premixed flame branches; (a) burning velocity and fuel concentration, (b) conditions on the premixed flame front

압비열에 따라 바뀌게 되며, 기체의 정압비열은 기체 분자의 구조와 온도에 따라 변화하는 값이다. 본 연구에서는 화염 후류의 확산화염의 구조의 기본 특성에 관심을 가지고 수행되었으며, 열손실 및 가연한계 변화의 상대적 비교를 목표로 하고 있으므로 일정한 정압 비열을 가정하였다. 가정한 정압 비열은 연료와 산화제가 모두 일정한 값으로 이론 혼합비 조건에서 실제 메탄-공기 화염의 단열화염 온도와 유사한 결과를 도출하기 위해 50000 kJ/kg 의 값을 사용하였다. 또한, 본 해석에서는 1 단계 비가역 완전반응을 고려하였는데, 이는 연료 과농 조건에서 일반적으로 발생하는 CO, H₂ 의 생성을 모사하지 못하므로 과도한 화염 온도를 예측함이 알려져 있지만, 삼지화염의 구조적 특성으로 인한 열적 효과 및 가연범위 변화의 효과를 검토하는 목적에서 상세 반응의 효과를 배제하고 별도의 수정 없이 수용하였다. 이후 본 연구의 심화 과정에서 보다 상세한 반응을 고려할 수 있을 것으로 기대된다.

추가적으로, 화염 후류에서 발생하는 열적 효과가 확산화염의 구조에 미치는 영향을 고려하기 위해 에너지 방정식을 해석하였다. 본 연구에서는

예혼합화염에 대해서는 별도의 온도 상승을 경계 조건으로 부과하고 있으므로 그 외의 조건에 대해 아래와 같은 에너지 방정식을 적용하였다. 예혼합 화염 후류에서 확산화염은 상류에서 발생한 열의 직접적인 유입을 받게 되며, 채널을 통한 외부로의 대류 열손실을 겪게 된다. 해석의 편의를 위해 수정된 대류 채널을 통한 외부로의 대류 열전달 계수 $h^* \equiv h/\rho c_p$ 를 일정하게 정의하고 채널의 온도는 상온으로 가정한 조건이다. 이러한 간단한 해석을 통해 열손실이 있는 공간에 위치한 삼지화염의 확산화염의 특성을 고찰하고자 하였다.

$$S_L^0 \frac{dT}{dy} = \alpha \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} \right) - \frac{2h^*}{b} (T - T_0) \quad (9)$$

단, 대류 열손실 항은 좁은 채널 전후면을 통해 발생하고 기타 항들은 단위 깊이의 채널에 대해 정의된 식이므로 채널의 무차원 간격 $b=0.005$ 를 이용하여 보정하였다. 이제, 예혼합화염면에 부과된 강제적인 농도분포로부터 화염 후류에서의 연료와 산화제의 농도장의 변화를 해석함으로써 확산화염의 구조를 예측하게 된다. 본 연구에 사용된 유동 방향의 농도 보존식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S_L^0 \frac{dY_i}{dx} = \frac{\alpha}{Le} \left(\frac{d^2Y_i}{dx^2} + \frac{d^2Y_i}{dy^2} \right) + v_i \dot{m}_F \quad (10)$$

여기서 연료와 산화제의 확산 계수는 일정하고 그 값은 루이스 수(Le)를 1로 두어 열 확산계수와 동일하게 부과하였다. 마지막으로 확산화염의 반응을 모델화 함으로써 전체적인 해석이 가능하게 된다. 본 연구에서는 삼지화염의 확산화염 가지에 집중하기 위해 연료와 산화제의 확산은 반대방향에서 이루어지는 조건에 대해서만 해석을 하였다. 확산화염의 반응은 특정 공간의 온도가 점화온도(T_{ig}) 이상을 유지할 때 그 공간으로의 연료와 산화제의 확산 정도에 의해 결정된다고 가정하였으며, 아래와 같이 표현된다.

$$\text{if, } T \geq T_{ig} = 900K$$

$$\dot{m}_F = \mathcal{D} \min \left(|\nabla Y_F|, -\frac{v_F}{v_O} \nabla Y_O \cdot \frac{\nabla Y_F}{|\nabla Y_F|}, 0 \right) \quad (11)$$

세 개의 항 중 최소값을 선택하는 식에서 두 번째 항의 경우 산화제의 농도 구배가 연료 구배의 방향과 반대방향을 가질 때에 양의 값을 가지며 그 외에는 음의 값이 된다. 따라서 연료와 산화제가 반대방향을 가질 때 확산화염을 나타내게 된다.

또한, 연료와 산화제의 각각의 확산 질량 중 이론 혼합비를 기준으로 부족 성분이 전체 확산화염 반응을 결정하는 것으로 두었다. 이러한 연료 소모율은 화염으로 확산된 연료가 화염면에서 소진되는 양을 의미하게 되며, 확산화염의 구조를 해석할 때 자주 사용되는 스킈라 소산율의 제공과 유사한 물리적 의미를 가지는 것으로 생각된다.

3. 해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 앞서 서술한 바와 같이 간단한 가정을 통해 확산화염 상류의 예혼합화염을 새로운 경계 조건으로 부과하고 연료 소모량을 기준으로한 가상의 확산화염면 주위에서의 온도 및 농도 변화와 확산화염면의 거동 특성을 단일 조건에서 농도구배의 변화, 열손실 조건에서의 농도구배의 변화, 그리고 가연범위의 변화 조건에 대해 살펴보았다.

3.1 단일 조건 농도구배 변화

가연범위가 당량비 0.5~1.5 로 이론혼합비 조건에 대해 대칭적인 경우에 대해 당량비의 구배가 0.1/mm 로 주어졌을 때 단일 조건에 대해 수치 해석 결과를 Fig. 3 에 제시하였다. Fig. 3(a)는 예혼합화염 후류의 온도 변화로서 대류 열손실이 없는 조건이지만 후류쪽으로 가면서 확산에 의해 온도가 서서히 감소하는 것을 알 수 있다.

그리고 확산화염에 의한 추가적인 열의 공급으로 인해 확산화염대에서 온도의 급격한 변화가 발생하고 있다. Fig. 3(b)는 연료의 질량분율의 분포를 보여준다. 연료는 $x=0$ 에서의 이론 혼합비를 기준으로 우측으로 갈수록 선형적으로 증가하고 있다. 계산 조건은 당량비의 구배가 0.1/mm 인 조건이므로 $x < -10\text{mm}$ 조건에서는 연료가 투입되지 않는다. 화염으로 인해 연료가 소모되면서 화염 후류에서의 연료 감소를 보이고 있다. Fig. 3(c)는 산화제의 분포를 보였다. 산화제는 연료의 유무에 무관하게 전체 공간에서 상당량이 분포하고 있으며, 화염으로부터 발생하는 열은 산화반응을 통해 형성되며, 본 연구에서는 루이스 수를 1 로 가정하였으므로 산화제의 감소가 화염의 온도 증가를 유사하게 묘사하는 것을 알 수 있다. Fig. 3(d)는 식 (11)을 통해 확산화염의 반응이 최대가 되는 지점을 도시한 것이다. 전체적으로 수직에 가까운 형상이지만 산화제 쪽으로 조금 기울어진 것을 알 수 있다. 하지만, 총괄반응을 고려한 현재의 모델에서는 이러한 산화제 방향의 기울어짐 자체보다는 이후의 다른 조건과의 비교를 통한 상대적인 변화를 관찰하는 것이 중요할 것이다.

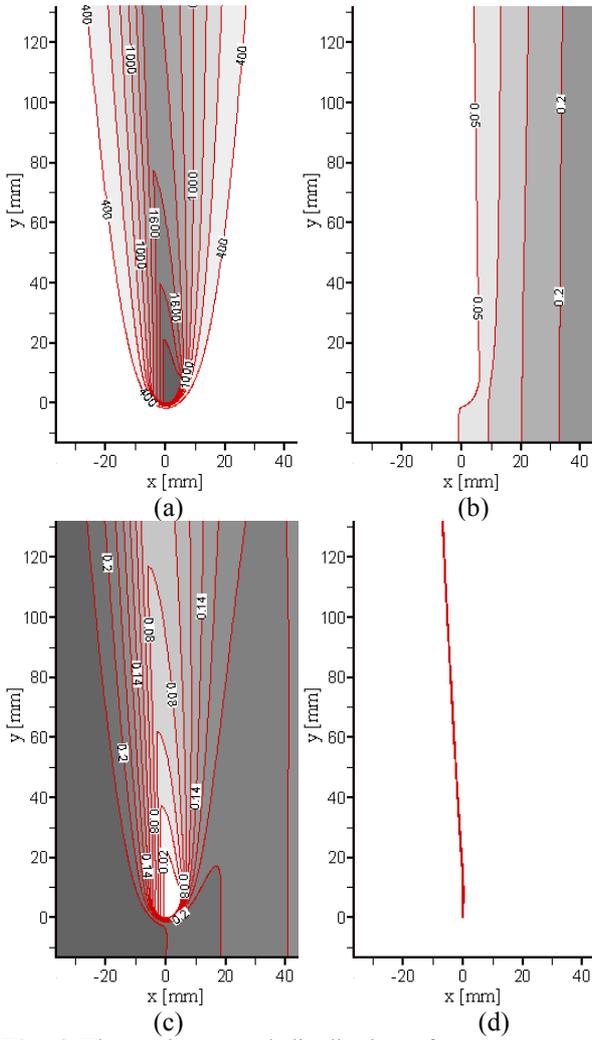


Fig. 3 Flame shapes and distribution of temperature and species concentrations ($h^*=0$, $LL=0.5$, $RL=1.5$, $\nabla\phi=0.1/\text{mm}$); (a) Temperature distribution, (b) fuel concentration, (c) Oxygen concentration, (d) diffusion flame location

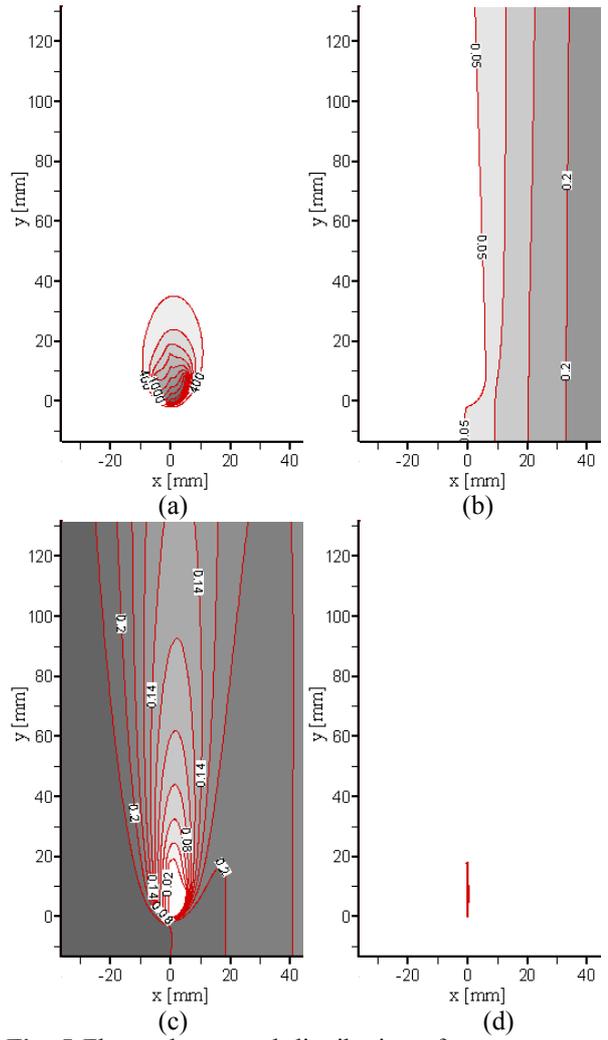


Fig. 5 Flame shapes and distribution of temperature and species concentrations ($h^*=0.1$, $LL=0.5$, $RL=1.5$, $\nabla\phi=0.1/\text{mm}$); (a) Temperature distribution, (b) fuel concentration, (c) Oxygen concentration, (d) diffusion flame location

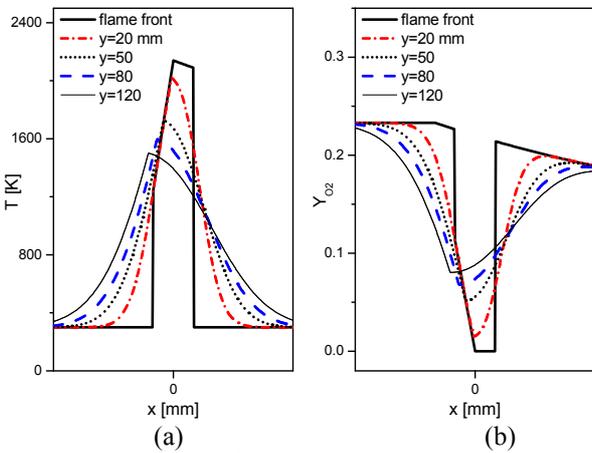


Fig. 4 Distribution of temperature and oxygen with the variation of height; (a) temperature distribution, (b) oxygen distribution

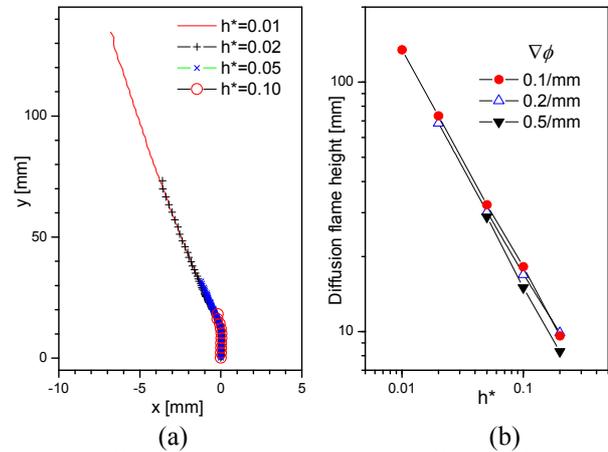


Fig. 6 Effect of heat loss on the diffusion flame: (a) location of the diffusion flame, (b) the maximum height of the diffusion flame ($\nabla\phi=0.1/\text{mm}$)

화염의 영역을 비교적 잘 보여주는 온도 변화와 산화제 농도변화를 높이에 따라 나타낸 것이 Fig. 4이다. Fig. 4(a)는 화염면과 그 후류에서의 온도변화를 보여준다. 앞서 언급하였듯이 연료의 소모량을 기준으로 한 총괄 모델에서는 과농영역에서 과도한 예혼합화염 온도가 예측된다. 화염의 후류로 감에 따라 열의 확산에 의해 온도가 감소하는 것을 알 수 있다. 최고 온도 지점은 왼쪽으로 서서히 이동하는데 이는 후류에서의 확산화염의 위치에 해당한다. 또한 확산화염에서 발생한 추가적인 열에 의해 최고온도 지점에서는 열의 확산에도 불구하고 급격한 온도구배를 유지한다. Fig. 4(b)는 화염면과 화염 후류의 산화제의 변화를 보여준다. 전체적으로 온도 변화와 유사한 분포를 보이고 있다. 다만 산화제는 입구 경계에서 구배를 가지고 있으며, 그 값의 감소가 온도 증가에 해당한다는 것이 차이점이다.

3.2 열손실 조건 농도구배 변화

화염 주위에서의 대류열손실의 효과를 살펴보았다. Fig. 5에는 앞서 Fig. 3과 동일한 조건에서 대류 열손실을 $h^*=0.1$ 로 설정한 결과를 제시하였다. Fig. 5(a)는 예혼합화염 후류의 온도 변화로서 $y=40$ mm 이전에 400K 이하로 온도의 급격한 감소가 발생함을 보여주고 있다. Fig. 5(b)는 연료의 질량분율의 분포인데, 온도의 감소에 크게 영향 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 산화제의 변화이다. 대류 열손실이 없는 조건인 Fig. 3(c)와 비교했을 때 Fig. 5(c)의 산화제 감소가 상대적으로 적고 중앙 부분에서의 급격한 산화제의 변화도 없음을 알 수 있다. 이는 열손실로 인한 확산화염의 소멸에 의한 결과로 생각된다. Fig. 5(d)에 확산화염의 위치를 도시하였다. 현재 모델에서는 점화온도 이하의 조건에서 확산화염이 형성되지 못하므로 대류 열손실로 인한 온도의 감소와 함께 확산화염의 길이가 감소한 것을 알 수 있다.

이와 같이 확산화염의 위치는 예혼합화염 이후의 연료와 산화제의 확산과 온도 감소의 효과를 동시에 보여줄 수 있다는 점에서 이를 비교하여 전반적인 확산화염의 특성을 이해할 수 있을 것으로 기대된다. Fig. 6(a)는 대류 열손실에 따른 확산화염의 위치와 길이를 비교한 것이다. 열손실의 변화에도 불구하고 동일한 입구조건에서는 확산화염이 형성되는 위치는 변화하지 않음을 알 수 있다. 다만 대류열손실의 증가로 인해 화염 후류의 온도 감소가 급격히 발생하면서 확산화염의 최대 높이가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 확산화염의 최대높이 변화를 Fig. 6(b)에 비교하였다. 당량비구배가 $\nabla\phi = 0.1/\text{mm}$ 인

조건에서 화염의 높이가 대류 열손실 계수에 대해 로그 스케일로 표시된 그래프에서 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 따라서 대류 열손실에 대해 반비례하여 지수적으로 확산화염의 높이가 감소한다고 할 수 있다.

3.3 가연범위 변화

가연범위의 비대칭적 변화에 따른 확산화염의 형성에 대해 살펴보았다. Fig. 7에는 대류열손실 $h^*=0$ 이고 당량비 구배가 $0.1/\text{mm}$ 인 조건에 대해 화염의 과농가연한계가 2.5로 확대된 조건에 대한 해석 결과이다. Fig. 7(a)는 온도 변화로서 예혼합화염의 형상이 비대칭적으로 존재하는 경계조건이 부과되었다. 그 결과 화염 후류에 고온부가 상당히 넓게 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 확산화염의 길이 증가가 예상된다. Fig. 7(b)와 Fig.

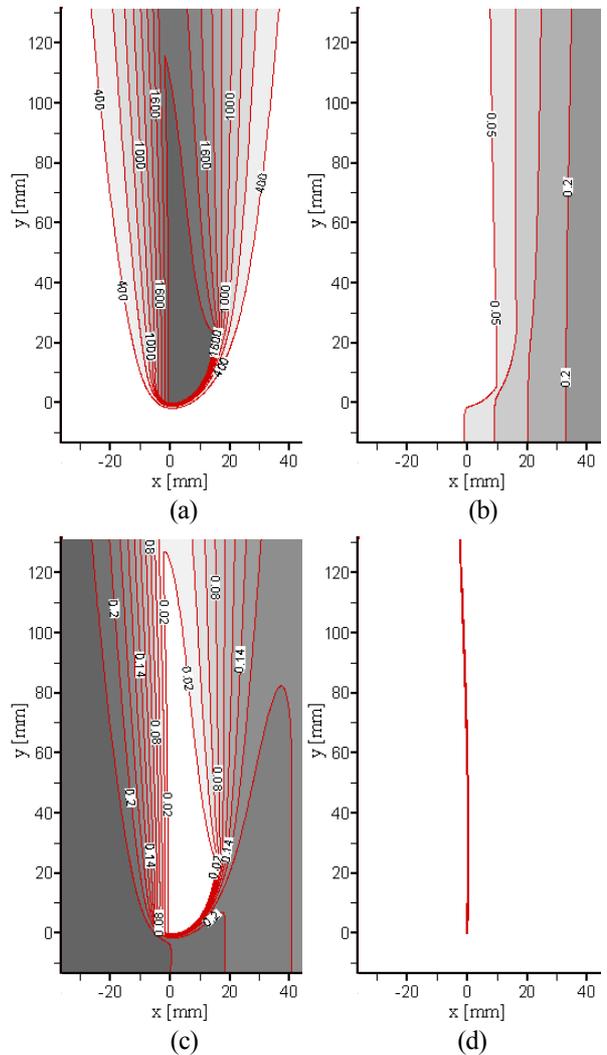


Fig. 7 Flame shapes and distribution of temperature and species concentrations ($h^*=0$, $\nabla\phi = 0.1/\text{mm}$, $LL=0.5$, $RL=2.5$); (a) Temperature distribution, (b) fuel concentration, (c) Oxygen concentration, (d) diffusion flame location

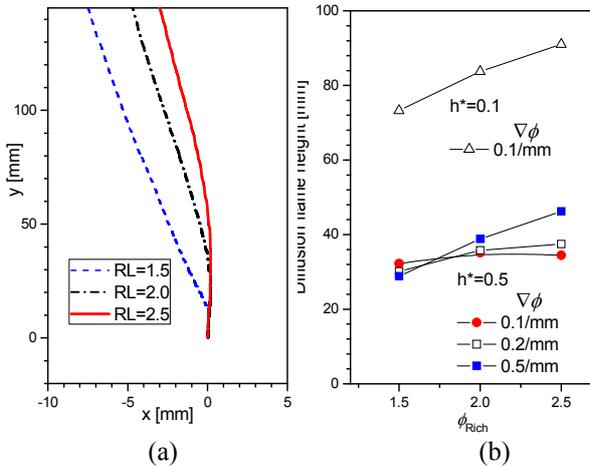


Fig. 8 Effect of the variation of rich flammability limits; (a) location of diffusion flame ($\nabla\phi = 0.1/\text{mm}$, $h^* = 0$), (b) the maximum height of diffusion flame ($h^* = 0.1$ or $h^* = 0.5$)

7(c)는 각각 연료와 산화제의 농도분포를 보여준다. 전체적인 경향은 이전의 결과들과 유사한 특성을 보여준다. Fig. 7(d)는 확산화염의 위치를 보여주는데 이전의 대칭 가연한계를 가지는 조건들에 비해 상대적으로 중심축에 가까이 위치하는 것을 알 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 가연한계가 비대칭적으로 존재하는 조건에 대해 확산화염의 위치 변화를 Fig. 8(a)에 제시하였다. 과농가연한계(RL)가 당량비 1.5에서 2.0, 2.5로 확대됨에 따라 확산화염의 위치가 상대적으로 연료과농 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이는 과농가연한계의 확대에 따라 과농 예혼합화염에서 연료 소모가 증가하고 그 결과 예혼합화염대 외부에 해당하는 x 축 거리가 증가하기 때문으로 생각된다.

다시 말해, 가연한계의 증가는 예혼합화염으로부터 충분히 후류에 위치하는 확산화염의 형성에 도움을 주는 외부로부터의 연료의 확산이 지연될 것이기 때문이다. Fig. 8(b)에서는 과농가연한계의 변화에 따른 확산화염의 최대 높이의 변화를 보여준다. 과농가연한계의 증가에 따라 확산화염의 최대 높이는 20% 이내의 증가를 보여준다. 이러한 확산화염의 길이 증가는 대류 열전달의 영향이 상대적으로 적은 조건에서 상대적으로 증가하며, 이는 입구조건에서의 연료 당량비구배 증가에 따라서도 그 증가 폭이 증대하는 것을 의미한다. 다만, 가장 낮은 입구 농도구배를 가지는 조건에서 가연한계 2.0 과 2.5는 확산화염의 길이에서 약간의 역전 현상을 보이고 있는데, 그 차이는 1% 미만으로 제한된 수치해석 영역으로 인한 오차로 생각된다. 가연한계의 확대는

전체적으로 고온영역의 확대를 의미하며, 공간 내에서 반응에 의한 체적증가가 확대된다고 볼 수 있다. 비록 본 연구에서는 고정된 질량유속의 조건에 대해 해석을 하였지만, 본 연구의 결과로 미루어 볼 때, 실제 화염의 경우에도 가연한계의 증가는 전체적인 체적 팽창의 증가를 유도할 것으로 기대되며, 결국 예혼합화염 상류쪽의 유동 재편에 의해 화염의 전파속도의 증가를 예측할 수 있다.

4. 결론

화염 선단 예지화염의 대표적인 구조로서의 삼지화염을 구성하는 확산화염에 대한 열손실 및 연료의 비대칭적인 가연한계의 효과를 이론적으로 연구하였으며, 다음의 결과를 도출하였다.

균일 유동장에 대해 이론총괄반응 모델을 이용하여 예혼합화염의 이론적 경계조건을 부과하고 이후의 확산화염을 해석하는 방법을 통해 확산화염의 거동 특성을 고찰할 수 있었다.

대류열손실의 증가는 확산화염의 생성 경로에는 영향을 미치지 않았으며, 확산화염의 길이를 감소시켰다. 확산화염의 최고높이는 대류 열전달 계수에 지수적으로 반비례하였다.

연료의 과농가연한계의 비대칭적 증가는 확산화염의 위치를 연료 쪽으로 이동시키는 결과를 보였으며, 확산화염의 최고높이는 연료 과농한계의 증가에 따라 증대되었다. 또한, 연료 농도구배의 증가에 따라 확산화염의 최고높이는 미약하게 증가하는 것을 알 수 있었다.

이러한 단순화된 이론을 통해 삼지화염 구조 내의 확산화염의 형성에 대한 기본 특성을 이해할 수 있었다. 이러한 결과는 이후 예혼합화염 및 확산화염의 통합 해석 모델의 개발을 위한 기초연구로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성 사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2007-331-D00052).

참고문헌

- (1) Phillips, H., 1965, Flame in a Buoyant Methane Layer, Proceedings of the Combustion Institute 10, pp. 1277~1283.
- (2) Dold, J.W., 1989, Flame Propagation in a Non-

- Uniform Mixture: Analysis of a Slowly-Varying Triple-Flame, *Combustion and Flame* 76, pp. 71~88.
- (3) Kioni, P.N., Rogg, B., Bray, K.N.C. and Liñán, A., 1993, Flame Spread in Laminar Mixing Layers: the Triple Flame, *Combustion and Flame* 95, pp. 276~290.
- (4) Chung, S.H. and Lee, B.J., 1991, On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet, *Combustion and Flame* 86, pp. 62~72.
- (5) Lee, B.J. and Chung, S.H., 1997, Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet, *Combustion and Flame* 109, pp. 163~172.
- (6) Ko, Y.S. and Chung, S.H., 1999, Propagation of Unsteady Tribrachial Flames in Laminar Nonpremixed Jets, *Combustion and Flame* 118, pp. 151~163.
- (7) Chung, S.H., 2007, Stabilization, Propagation and Instability of Tribrachial Triple Flames, *Proceedings of the Combustion Institute* 31, pp. 877~892.
- (8) Ruetsch, G.R., Vervisch, L. and Liñán, A., 1995, Effect of Heat Release on Triple Flames, *Physics of Fluids* 7(6), pp. 1447~1454.
- (9) Kim, N.I., Seo, J.I., Oh, K.C. and Shin, H.D., 2005, Lift-off Characteristics of Triple Flame with Concentration Gradient, *Proceedings of the Combustion Institute* 30, pp. 367~374.
- (10) Kim, N.I., Seo, J.I., Guahk, Y.T. and Shin, H.D., 2006, The Propagation of Tribrachial Flames in a Confined Channel, *Combustion and Flame* 146, pp. 168~179.
- (11) Lee, M.J. and Kim, N.I., 2010, The Stabilization of a Methane-Air Edge Flame Within a Mixing Layer in a Narrow Channel, *Combustion and Flame* 157, pp. 201~203.
- (12) Turns, S.R., 2000, "An Introduction to Combustion," McGraw-Hill co., 2nd Edit, p.287.