

Twin-jet 대향류에서 메탄 비예혼합화염에 대한 수치적 연구

천 강 우* · 김 준 홍** · 정 석 호***

Numerical Study on Non-premixed Methane Flames in Twin-jet Counterflow

K. W. Chun, J. H. Kim, and C. H. Chung

ABSTRACT

A two-dimensional twin-jet counterflow system has been designed, in which two streams from two double-slit nozzles form a counterflow. This flow system enables one to systematically investigate various effects on non-premixed flames, including the non-premixed flame interaction, the edge flame behavior and the effect of curvature.

Non-premixed flame interaction in the twin-jet counterflow system has been investigated numerically for methane fuel diluted with nitrogen. Three types of non-premixed flame (conventional counterflow flame, crossed twin-jet flame and petal shaped flame) were simulated depending on the combination of fuel/oxidizer supply to each nozzle.

The extinction characteristics of non-premixed methane flame in the twin-jet counterflow have been investigated numerically. The boundary of the existence of petal-shaped flames was identified for the twin-jet counterflow flames. Due to the existence of the unique petal-shaped flames, the extinction boundary for the twin-jet counterflow can be extended significantly compared to that for the conventional counterflow non-premixed flames, through the interaction of two flames. Through the comparison of the crossed twin-jet flame and the conventional counterflow flame, structure of the crossed twin-jet counterflow flame is analysed. Through the comparison of the petal shaped flame and the conventional counterflow flame, the extension of the extinction boundary for the twin-jet counterflow is investigated.

Key Words : Non-premixed flame, Twin-jet counterflow flame, Crossed twin-jet flame, petal shaped flame, Extinction,

1. 서 론

대향류 유동장은 예혼합 확산화염의 구조해석 [1] 및 속도와 농도 조건에 따른 화염의 소멸과 상호작용 특성 [2]에 관한 연구에 이용되어져왔다. 그러나 대향류 유동장에서 비예혼합 화염에 대한 연구들은 1차원적인 접근방식에 국한되었다. 따

라서 난류 유동장에서 발생할 수 있는 화염소 상호간의 상호작용에 의한 화염특성 해석에는 적합하지 않았다. 이러한 특성들을 구현하기 위해서는 2차원적인 해석방법이 필요하다.

2차원적인 해석방법을 구현하기 위해서 대향류 유동장과 2차원 혼합층을 동시에 형성되는 twin-jet 대향류 유동장이 도입되었다. Twin-jet 대향류 유동장은 double-slit 노즐에 연료와 산화제를 독립적으로 공급할 수 있도록 설계되어졌다. 이 유동 시스템을 이용하여 곡률을 가지고 서로 상호 작용하는, 또한 음의 스트레인을 갖는 다양한 비예혼합 화염을 구현할 수 있었고 이

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 서울대학교 기계항공공학부

† 연락처, E-mail : shchung@snu.ac.kr

들 화염의 소염 특성, 화염 상호작용과 관련된 화염 안정성 등과 같은 연구가 진행되었다[3-6].

Twin-jet 대향류 유동장에서 서로 상호 작용하는 메탄 비에혼합 화염의 소염 한계는 대향류에서의 소염 한계보다 훨씬 확장됨을 보았는데, 이는 화염의 상호 작용 특성에 의해 꽃잎 모양의 독특한 꽃잎 모양 화염(petal-shaped flame)이 존재하기 때문이다[6]. 꽃잎 모양 화염은 edge flame[7]의 일종이라고 볼 수 있다. 이런 edge flame은 강한 난류 강도에 의한 국부적인 소염에 의해서 발생하며 이에 대한 연구는 매우 제한적이다.

본 연구에서 수치적 방법을 통하여 twin-jet 대향류 유동장에서 형성되는 crossed twin-jet(CTJ) 화염의 구조를 살펴보고, 대향류 화염의 소염영역에서 형성되는 꽃잎 모양 화염을 계산함으로써 Twin-jet 대향류 유동장에서 소염 한계의 확장을 확인하고자 한다. 또한 CTJ 화염과 꽃잎 모양 화염을 기존의 대향류 화염과 비교 분석함으로써 twin-jet 유동장에서 형성되는 화염의 소염특성은 열유동 효과에 의한 영향임을 분석하고자 한다.

2. 수치 기법

2.1 지배방정식과 물성치

본 연구에는 자체 개발된 2차원 코드를 사용하였으며, 계산 결과의 검증을 위해 1차원 상용 코드인 OPPDIF 코드를 사용하였다.

정성적 분석과 효율적인 계산을 하기위해서, 적절한 가정들을 통해서 문제를 간략화 하였다. 화학종들의 전달계수들은 모두 동일하며, 온도만의 함수로 가정하였다. Soret-Dufour 효과는 무시하며, 복사열손실, 부력효과와 압력구배에 의한 확산효과는 무시하였다. 각 지배 방정식은 낮은 Mach수 가정(low Mach number approximation)을 적용하여 무차원화 하였다.

연소 반응을 묘사하기 위해서 1단 총체 반응을 적용하였다. 1단계 총체 반응에서 연료(F)와 산화제(O)가 반응하여 생성물(P)이 된다고 가정하면, 생성형은 다음과 같이 표현된다.

$$F + \nu O \rightarrow (1 + \nu) P$$

$$\omega_i = W_i \omega (v_i'' - v_i')$$

$$\omega_i \equiv AT^\alpha \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \left(\frac{\rho Y_i}{W_i}\right) \left(\frac{\rho Y_{O_2}}{W_{O_2}}\right) \quad \text{식(1)}$$

여기서, E_a 와 A 는 각각 총체 활성화 에너지와 충돌 빈도 인자이며, $\alpha = 0$ 로 하였다. 화염의 거동을 적절히 묘사하기 위해, E_a 는 Westbrook[8]등이 제시한 메탄/공기의 $E_a = 48.4$ kcal/mol 를 사용하였다. 또한 충돌 빈도 인자 A 를 결정하기 위하여 실험적으로 얻은 대향류 화염의 소염한계와 수치적 계산 결과와 비교하였다. 실험에서 얻은 대향류 화염의 소염한계는 산화제의 몰분율을 $X_{O_2} = 0.26$, 각 노즐의 출구속도가 $V = 10$ cm/s 로 동일할 때, 연료의 몰분율은 $X_{F,O} = 0.122$ 이었다. 실험에서 얻은 대향류 화염의 소염한계와 수치 계산 결과를 비교하여 얻은 A 값은 8.3×10^{16} cm/gmol-s 이었다.

1단계 총체 반응은 세부적인 화염구조의 설명에는 제한적이나, 열유동과 화염반응의 정성적인 성향은 적절하게 묘사 할 수 있다.

전달 및 열역학적 물성치들은 CHEMKIN-III[9]와 TRANSPORT Package[10]의 library 값을 이용하였다. 효율적인 계산 수행을 위해서 각 화학종들의 물성치들은 온도에 대해 3차 다항식으로 계수를 맞춘 식을 사용하여 모델링하였다.

2.2 수치해법

지배방정식의 차분화는 시간과 공간에 대하여 각각 4차 및 2차 정확도를 적용 하였다. 공간차분화는 중앙차분법을 적용하였고, 시간차분에 있어서는 6단계 Runge-Kutta 법을 적용하였다[11]. 운동량 방정식에서 압력항의 해법을 위해 fractional step method를 사용하였다[12,13]. 이런 Poisson 방정식을 풀기 위해 multi-grid 방법을 사용하였다

계산영역은 그림 2와 같이 직교좌표에 의한 2차원 계산 영역을 설정하였다. 계산영역의 크기는 2 cm x 1 cm 이며, 그리드 수는 256 x 128 개로써 각 그리드의 크기는 0.0078 cm x 0.0078 cm 이다. (연소 반응을 묘사하기 위해 각 셀의 가로 세로 길이가 0.01 cm 이하가 되도록 하였다). 격자는 균일 간격으로 설정하였다. 또한, 전 영역에서 staggered grid를 적용하였으며 공간적으로 2차 정확도의 중앙차분법을 경계에도 적용하기 위해 가상격자를 설정하였다. 따라서 운동량 방정식은 셀의 면에서 계산되며, 연속방정식, 에너지방정식, 그리고 화학종방정식은 셀의 중앙에서 계산된다. 각 노즐에서 출구속도는 균일 속도장으로 설정하였으며 유동방향은 그림 1 와 같이 대향류 유동으로 묘사되고 있다.

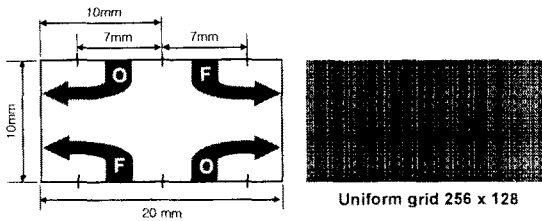


Figure 1 Calculation domain and Grid system
3. 결과 및 토의

3.1 Twin-jet 화염의 해석 방향(열적 관점)

기존의 실험적 연구[3-6]를 통하여 CTJ 화염이 대향류 화염의 소염한계 이하의 영역에서 꽃잎 모양 화염으로 변화하는 거동을 보았다. 또한, Twin-jet 화염이 꽃잎 모양 화염의 생성으로 인해 소염한계가 기존의 대향류 화염에 비해 현저히 확장되는 결과도 얻었다. 따라서 이러한 꽃잎 모양 화염의 생성은 화염간의 상호작용에 의한 영향으로 생각되어진다.

Twin-jet 화염의 소염한계의 확장과 꽃잎 모양 화염의 형성에 대한 해석은 수치적 방법에 의해 두 가지 방향으로 이루어지고 있다.

첫 번째 해석은 화염의 상호작용에 의해 twin-jet 대향류 유동장의 중심부에 단열지역 생성됨으로써 열유동 효과가 수평화염부에 영향을 끼쳐 수평화염이 완전히 소염되지 않는 것으로 보는 것이다. 두 번째 해석은 화염에서 생성되는 라디칼(radical)들의 중심부에서의 상호작용을 통해 수평화염이 완전히 소염되지 않는 것으로 보는 것이다. 그러나 실제적으로 꽃잎 모양 화염의 생성은 위의 두 현상 모두 작용하여 생성되는 것으로 생각되어진다.

본 연구에서는 CTJ 화염의 소염한계 확장과 꽃잎 모양 화염 생성을 1 단계 총체반응을 고려한 수치해석을 통해 단열지역 형성에 의한 열유동 효과에 의한 것으로 해석하고 있다.

3.2 Twin jet 대향류에서 형성되는 화염

Twin-jet 대향류의 계산 영역은 4개의 노즐로 구성되었으며, (그림 1) 각 노즐에서 공급되는 연료와 산화제의 조합에 따라 형성되는 화염들은 그림 2에 나타내었다.

하부 노즐에서는 연료를 공급하고 상부 노즐에서는 산화제를 공급한 경우, 그림 2(a)와 같이 대향류 비예혼합화염이 형성된다.

연료와 산화제를 교차되게 공급한 경우 그림 2(b)와 같이 CTJ 화염이 형성된다. 특히, CTJ 화염은 수직화염(①) 부분과 수평화염(②) 부분

으로 구분할 수 있다. 수직화염(vertical flame)은 부분 예혼합 화염의 특성을 갖는 edge flame 이며, 수평화염(horizontal flame)은 대향류 화염(그림 2(a))의 특성을 나타내는 확산화염이다. 따라서 CTJ 화염은 비예혼합 화염과 부분 예혼합에 의한 edge 화염의 특성을 동시에 갖는다.

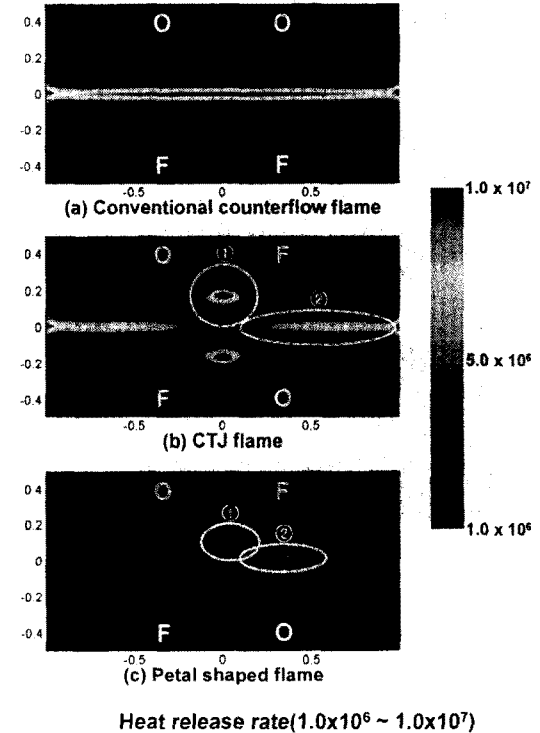


Figure 2 Three types of flame in the twin-jet counterflow system

CTJ 화염을 산화제의 물분율과 각 노즐의 출구 속도를 고정하고 연료의 물분율을 변화시켜, 대향류 화염의 소염 한계 영역이하에서 계산하면 수평화염이 소염되어 그림 2(c)와 같이 꽃잎 모양 화염을 형성한다. 꽃잎 모양 화염은 수직화염(①) 부분과 수평화염이 부분 소염된 날개 화염(②) 부분으로 구분할 수 있다. 날개 화염은 확산 화염의 특성을 갖고 있으나 화염 끝부분은 edge flame의 거동을 보임을 실험을 통해 보인 바 있다[6].

그림 3은 대향류 화염, CTJ 화염 그리고 꽃잎 모양 화염의 온도장을 나타낸 것이다. CTJ 화염과 꽃잎 모양 화염은 대향류 화염과 달리 유동장의 중심부에서 마름모 꼴 형태의 국부적으로 온도가 높은 영역이 나타난다. 이는 수직화염에 의해 예열(preheat) 된 유동이 화염 간에 형성된 단열지역에 열을 축적함으로써 생기는 현상으로 예측된다. 이러한 단열 지역의 생성은 twin-jet

화염의 소염한계의 확장과 꽃잎모양 형성에 주요한 요인으로 예측되어진다.

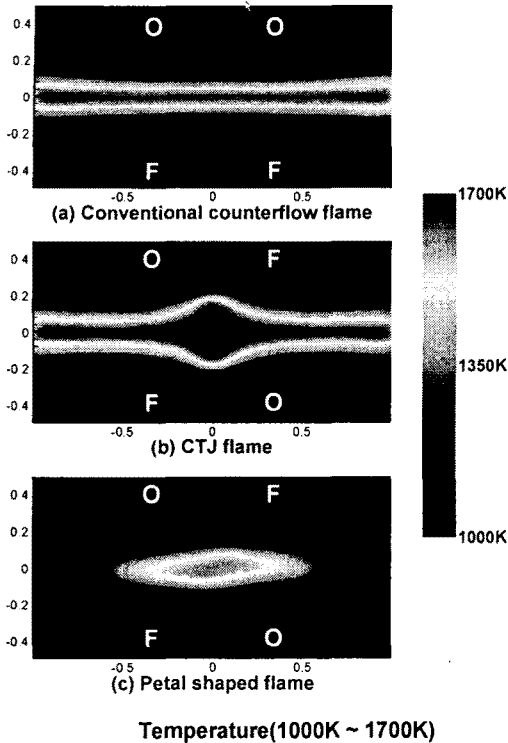


Figure 3 Temperature field for conventional counterflow flame, crossed twin-jet flame and petal shaped flame

3.2 대향류 화염과 CTJ 화염의 소염 특성

그림 4는 산화제의 몰분율이 $X_{O_2} = 0.26$, 각 노즐의 출구속도가 $V = 10 \text{ cm/s}$ 로 동일할 때, 연료의 몰분율의 변화에 따른 화염장의 최대 온도의 변화를 보이고 있다. 대향류 화염과 Twin-jet 화염에 대하여 2차원 계산을 하였고 이를 검증하기 위해 대향류 화염에 대한 1차원 상용 코드인 OPPDIF를 사용하였다.

메탄 대향류 화염과 CTJ 화염은 연료의 몰분율이 감소함에 따라 최대온도가 감소하는 경향을 보이며, 소염한계 이후에는 화염이 소염되는 동일한 경향을 보인다. 그러나 연료 몰분율이 같을 때, CTJ 화염의 온도는 대향류 화염보다 100K 이상 높다. 이는 CTJ 화염이 상호작용하는 두 개의 화염으로 인해 화염 사이에서 단열 지역이 형성되고 있기 때문이다.

대향류 화염이 소염되는 조건인 연료 몰분율 $X_{F,0} = 0.122$ 이하에서 CTJ 화염은 수평 화염만이 부분 소염되어 꽃잎 모양 화염을 형성한다. 이러한 꽃잎 모양 화염의 생성으로 인해 그림 4

에서 보이듯이 Twin-jet 화염의 소염한계는 $X_{F,0} = 0.112$ 까지 확장된다.

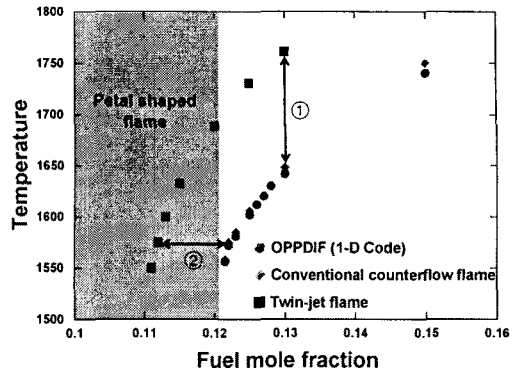


Figure 4 S-curve for conventional counterflow and twin-jet flame(crossed twin-jet flame and petal shaped flame)

위의 결과를 통해 “CTJ 화염은 화염간의 상호작용에 의해 단열 지역을 생성하고 부분 예혼합된 수직화염에 의해 단열 지역으로의 열축적이 일어난다. 또한 단열지역에 형성된 열은 수평화염에 영향을 줌으로써 꽃잎 모양 형성을 유도한다.” 라는 메커니즘(mechanism)을 고려할 수 있다.

따라서 우리는 CTJ 화염과 대향류 화염을 2차원으로 비교함으로써 단열 영역에 대한 정성적 분석을 하고자 한다. 또한, CTJ 화염으로부터 형성되는 꽃잎 모양 화염과 대향류 화염의 소염 직전의 화염 구조 해석을 통하여 꽃잎 모양 화염의 형성에 대한 정성적 분석을 하였다.

3.3 대향류 화염과 twin-jet 화염의 비교

CTJ 화염의 단열지역 생성, 대향류 화염의 소염영역에서 CTJ 화염의 꽃잎 모양 화염으로의 변화, 그리고 그에 따른 twin-jet 화염의 소염한계의 확장에 대하여 열유동 관점으로 해석하기 위하여 수치계산의 지배방정식 중 에너지 방정식의 각 항에 대하여 분석하였다. 에너지 방정식은 다음 식 (2)과 같이 온도의 함수로 정리 할 수 있다. 전체 온도 변화율(total differential temperature) 대류 온도 변화율(convection differential temperature), 확산 온도 변화율(diffusion differential temperature), 생성 온도 변화율(reaction differential temperature)로 구성된다. 즉, 전체 열변화는 열의 유동, 확산, 생성과 관련이 있다. 정상해(steady solution)의 경우는 식 (2)과 같이 전체 온도 변화는 대류 온도 변화율과 같다. 따라서 전체 온도 변화율은 확산 온

도 변화율과 생성 온도 변화율로 구성된다.

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T$$

$$= \frac{1}{\rho c_p} [\nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \rho \mathbf{Z} \cdot \nabla T + \omega_i]$$

식(2)

$$\omega_i = -\sum_{k=1}^N h_k \omega_k,$$

$$h_k = h_k^u + \int_{V_k} c_{p,k} dT,$$

$$\mathbf{Z} = \sum_{k=1}^N (c_{p,k} Y_k \mathbf{V}_k)$$

그림 5, 6, 7은 대향류 화염과 CTJ 화염 그리고 꽃잎 모양 화염에 대한 열유동(대류 온도 변화율, 전체 온도 변화율), 열확산(확산 온도 변화율), 열생성(생성 온도 변화율)에 대하여 분석이다.

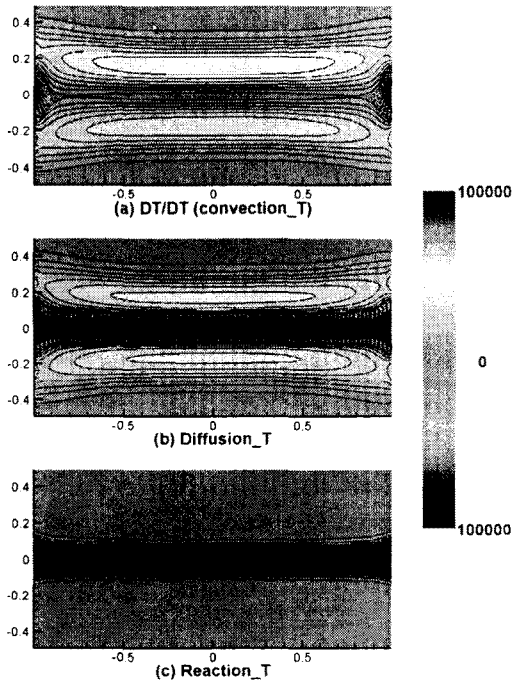


Figure 5 Temperature fields of each term in the energy equation for conventional counterflow flame. (convection_T, diffusion_T and reaction_T field)

각 결과에서 붉은색 영역(실선)은 양(+)의 값을 푸른 색 영역(점선)은 음(-)의 값을 갖는다.

즉, 양의 값을 갖는 지역은 열이 유동, 확산, 생성에 의해 각 셀로 유입됨을 뜻하며, 음의 값을 갖는 지역은 열이 유동, 확산, 생성에 의해 각 셀로 유출됨을 뜻한다.

그림 5는 대향류 화염의 열의 유동, 확산, 생성에 대한 분석이다. 유동장의 중심부에서 x축을 따라 화염이 분포하므로 화염장의 주위에서 열 유동 및 확산이 일어나는 거동이 보이고 있다.

그림 6은 CTJ 화염의 열의 유동, 확산, 생성에 대한 분석이다. 그림 6(a)에서 CTJ 화염장은 대향류 유동장과 달리 수직화염의 선단부분에서 열 축적이 일어나고 있음을 보이고 있다. 또한, 그림 5(b)에서 보이듯이 열축적은 열확산에 의하여 일어나고 있음을 알 수 있다. 따라서 CTJ 화염은 대향류 화염과 비교하여 부분 예혼합된 수직화염에 의해 예열 효과가 일어남을 알 수 있다. 이러한 예열 효과에 의해 유동장 중심부로의 열축적이 일어난다.

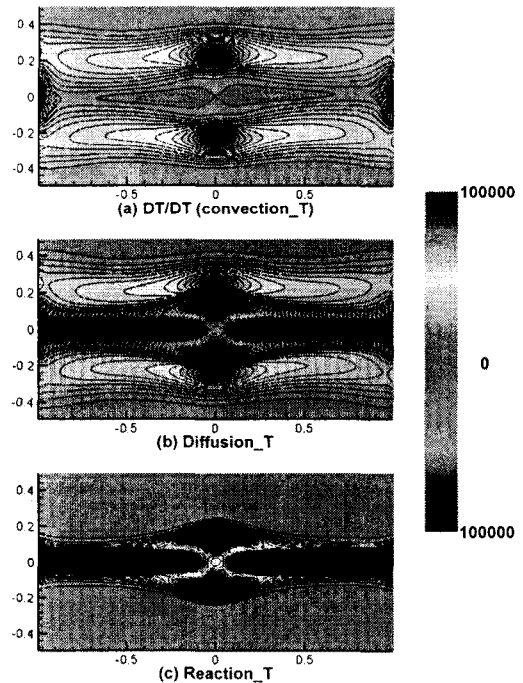


Figure 6 Temperature fields of each term in the energy equation for crossed twin-jet flame. (convection_T, diffusion_T and reaction_T field)

그림 7은 꽃잎 모양 화염의 열의 유동, 확산, 생성에 대한 분석이다. 꽃잎 모양 화염은 CTJ 화염과 마찬가지로 부분 예혼합된 수직화염에 의해 수직화염 선단에 열축적에 의해 예열이 생기 고 유동장 중심부로의 열축적이 일어난다.

꽃잎 모양 화염은 CTJ 화염에서 수평화염이

부분 소멸되어 날개 화염을 형성하는데, 그림 (a)에서 날개 화염의 끝단에서 전체 온도 변화율이 음의 값을 보이고 있다. 이는 날개 화염의 끝단이 음의 전파속도를 갖는 edge flame 구조를 갖고 있음을 설명한다.

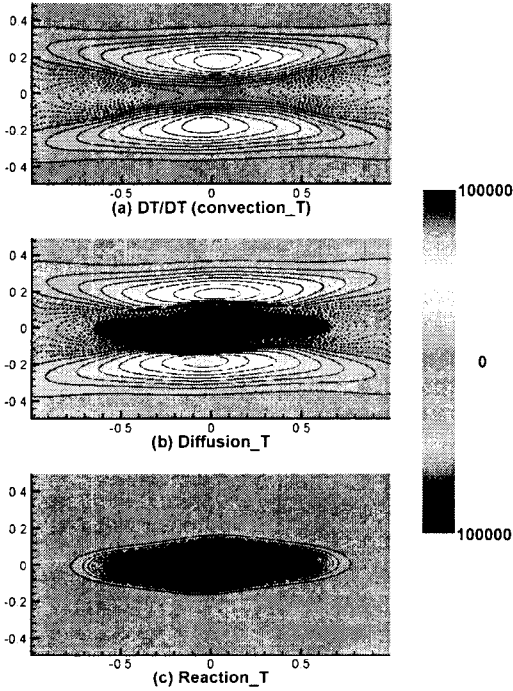


Figure 7 Temperature fields of each term in the energy equation for petal shaped flame. (convection_T, diffusion_T and reaction_T field)

3.3.1 대향류 화염과 CTJ 화염

- 초기조건이 같은 경우($X_{F,0} = 0.130$)

그림 8은 유동장의 중심을 지나가는 유선을 따라 에너지 방정식의 여러 항들을 추출한 것이다. 실선은 대향류 화염을, 점선은 CTJ 화염을 나타낸다. 그림 8(a)에서 CTJ 화염장의 온도와 전체 온도 변화율(DT/Dt)의 변화는 대향류 화염 앞선 영역에서 일어난다. 이는 CTJ 화염은 수직 화염이 존재하기 때문이다. CTJ 화염의 전체 온도 변화율 값은 대향류 화염에 비해 대략 2배 정도이며, 온도는 CTJ 화염이 대향류 화염보다 100K 이상 높다. 이것은 부분 예혼합 화염인 수직화염에 의해 나타나는 현상으로써 그림 8(b)에 보이듯이 수직화염 선단에서 일어나는 열확산에 의한 열축적에 기인한다. 이렇게 축적된 열은 예열 효과를 일으키고 화염장 중심부의 온도를 높이는 역할을 한다. 이러한 일련의 과정을 통하여

CTJ 화염장의 중심부는 마름모 꼴 형태의 단열 지역이 형성된다.(그림 3(b) 참조.)

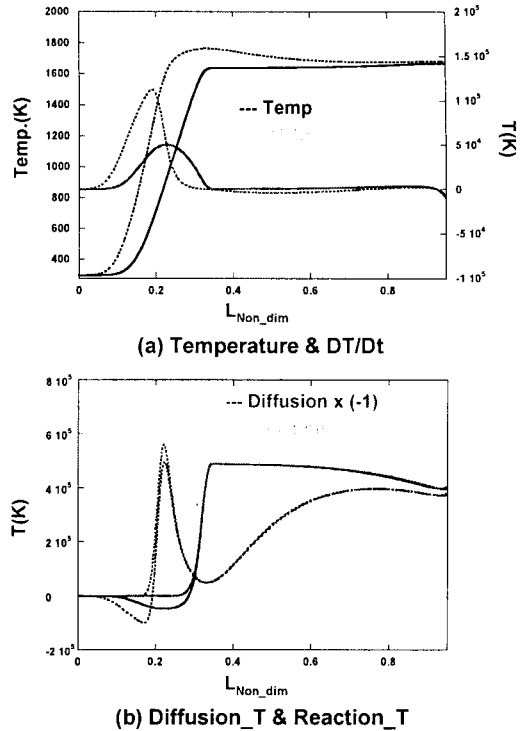


Figure 8 Comparison between conventional counterflow flame and crossed twin-jet flame stream-tracing data of each term in the energy equation

3.3.2 대향류 화염과 꽃잎 모양 화염

- 화염장의 최대 온도가 같을 경우

그림 9는 유동장의 중심을 지나가는 유선을 따라 에너지 방정식의 여러 항들을 추출한 것이다. 실선은 대향류 화염을, 점선은 꽃잎 모양 화염을 나타낸다. 그림 9(a)에서 꽃잎 모양 화염장의 온도와 온도의 전미분의 대향류 화염과 비슷한 값을 갖는다. 대향류 화염의 소멸영역(연료 물분율 $X_{F,0} = 0.122$ 이하)에서 twin-jet 화염이 소멸되지 않는 이유는 유동장에서 중심부의 온도가 대향류 유동장의 소멸영역 이전의 온도값과 비슷하게 유지되기 때문이다. 이는 수직화염의 존재에 따른 예열효과와 화염 상호 작용에 의해 유동장 중심부에 형성된 단열지역 때문이다. 즉 예열된 열이 단열 지역으로 축적되어 수평화염에 영향을 끼침으로써 날개화염이 형성되어 꽃잎 모양 화염이 생기게 되며 꽃잎 모양 화염은 twin-jet 대향류 화염의 소멸한계를 확장시킨다.

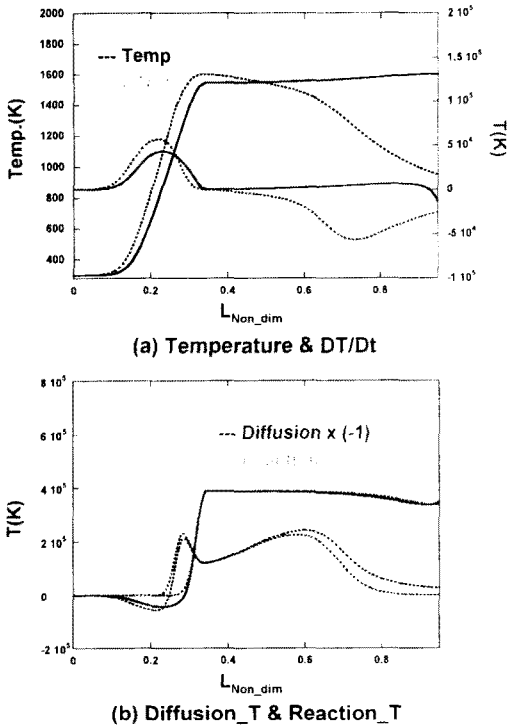


Figure 9 Comparison between conventional counterflow flame and petal shaped flame stream-tracing data of each term in the energy equation

4. 결론

난류 유동장에서 발생할 수 있는 화염소 상호간의 상호작용에 의한 화염특성 해석을 위하여 대향류 유동장과 2차원 혼합층을 동시에 형성되는 twin-jet 대향류 유동장이 도입되었다.

Twin-jet 대향류의 계산 영역은 4개의 노즐로 구성되었으며, 각 노즐에서 공급되는 연료와 산화제의 조합에 따라 형성되는 화염들은 대향류 화염, CTJ 화염, 꽃잎 모양 화염이 있다.

CTJ 화염은 수직화염 부분과 수평화염 부분으로 구분할 수 있다. 또한 CTJ 화염은 대향류 화염의 소멸 한계 영역이하에서 수평화염이 소멸되어 꽃잎 모양 화염을 형성한다. 꽃잎 모양 화염은 수직화염 부분과 날개 화염 부분으로 구분할 수 있다.

Twin-jet 대향류 유동장의 서로 상호 작용하는 메탄 비예혼합 화염의 소멸 한계는 대향류에서의 소멸 한계보다 훨씬 확장됨을 보았는데, 이는 화염의 상호 작용 특성에 의해 꽃잎 모양의 독특한 꽃잎 모양 화염(petal-shaped flame)이 존재하기 때문이다.

CTJ 화염은 수직화염 선단에서 예열 효과가 발생하고 화염간의 상호작용에 의해 유동장의 중

심에 단열지역이 형성된다. 이러한 일련의 과정을 통하여 CTJ 화염장의 중심부는 마름모 꼴 형태의 단열 지역이 형성된다.

대향류 화염의 소멸영역에서 twin-jet 화염이 꽃잎 모양 화염을 형성하며 소멸되지 않는 이유는 수직화염의 존재에 따른 예열효과와 화염 상호 작용에 의해 유동장 중심부에 형성된 단열지역에 의해 중심부의 온도가 대향류 유동장의 소멸영역 이전의 온도값과 비슷하게 유지되기 때문이다.

후 기

이 연구(논문)은 연소기술센터(CERC)와 서울대 기계항공공학부 BK-21에 의하여 진행되었습니다. 본 연구의 계산자원은 한국과학기술정보연구원 '제 5차 슈퍼컴퓨팅 응용연구 전략지원 프로그램'을 통해 지원 받았습니다.

참고문헌

- [1] C. J. Sung, J. B. Liu and C. K. Law, "Structure Response of Counterflow Diffusion Flame to Strain Rate Variation," *Combustion and Flame*, Vol 102, pp.481-492.
- [2] H. G. Im and S. H. Chung, "On the Characteristics of Partially-Premixed Diffusion Flame in a Strained Flow Field," *KSME journal*, Vol. 3, pp. 139-145.
- [3] S. Y. Yang, B. K. Lee, S. H. Chung, "Observation of Various Non-premixed Flames in Twin-jet Counterflow," *Combustion and Flame*, (2003)
- [4] S. Y. Yang, "Interaction, Extinction and Propagation of Non-premixed Flames in Twin-jet Counterflow," *서울대학교박사학위논문*, (2003)
- [5] 이범기, "비예혼합 Twin-Jet Counterflow에서의 화염 상호작용과 소멸에 관한 연구," *서울대학교 석사학위논문*, (2002).
- [6] 노태곤, "Extinction of Non-premixed Methane Flames in Twin-jet Counterflow," *서울대학교 석사학위논문*, (2003).
- [7] Buckmaster, J., "Edge-Flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, 28:435475, (2002)
- [8] Westbrook, C. K., and Dryer, F. L., "

- Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 27 , pp 31-43 , (1981)
- [9] Kee, R. J., Rupley, F. M., and Miller, J. A., "CHEMKIN-II : A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics," Report No. SAND89-8009, Sandia National Laboratories, (1989).
- [10] Kee, R. J., Warnatz, J., and Miller, J. A., "A FORTRAN Computer Code Package for the Evaluation of Gas-phase Viscosities, Conductivities and Diffusion Coefficients," Report No. SAND83-8209, Sandia National Laboratories, (1983).
- [11] Najm, H. N., Wyckoff, P. S. and Kino O. M., "A Semi-implicit Numerical Scheme for Reacting Flow (I. Stiff Chemistry)," *Journal of Computational Physics*, Vol. 143, pp.381-402, (1998).
- [12] Kim, J., Moin, P., "Application of a Fractional-Step Method to incompressible Navier-Stokes Equations," *Journal of Computational Physics*, Vol. 59, pp.308-323, (1985).
- [13] McMurrtry, P. A., Jou, W. H., Riley, J. J. and Metcalfe, R. W., "Direct Numerical Simulations of a Reacting Mixing Layer with Chemical Heat Release," *AIAA Journal*, Vol.24, pp.962-970, (1985).