

Twin-Jet 대향류에서 메탄 비예혼합화염의 소멸 특성

노태곤* · 양승연** · 류승관* · 정석호***

Extinction of Non-premixed methane Flame in Twin-Jet Counterflow

T. G. Noh, S. Y. Yang, S. K. Ryu and S. H. Chung

ABSTRACT

A two-dimensional "twin-jet counterflow" burner has been designed for the better understanding of the stability of turbulent flames. This flow system enables one to systematically investigate various effects on non-premixed flames, including the effects of curvature, negative strain, and non-premixed flame interactions. The objective of this study is comparing characteristics of extinction of non-premixed methane flames with that of non-premixed propane flames investigated previously. The extinction limit of non-premixed methane and propane flames can be extended compare to that for the conventional counterflow non-premixed flame because of the existence of petal shaped flame and have same structure. The hysteresis in transition between the petal shaped flame and the curved two-wing flames could be observed. We could find differences between non-premixed methane flame and non-premixed propane flame such as the position of one wing extinction and the regime of one wing extinction.

Key Words : Twin-jet counterflow, Petal-shaped flame, Extinction.

1. 서 론

대향류 유동장은 예혼합/확산 화염의 구조 해석[1] 및 속도와 농도 조건에 따른 화염에서의 소멸과 상호작용 특성[2]에 관한 연구 등에 많이 이용되어 왔다. 그러나 대향류 유동장에서 비예혼합 화염에 대한 기존의 연구들은 1차원적인 접근 방식이었기에 평면화염에 국한되었다. 따라서 난류 유동장에서 발생할 수 있는 곡률 효과 및 화염소 상호간의 상호작용에 의한 화염의 특성 연구에는 적합하지 않으며, 또한 음의 스트레인을 갖는 화염도 구현할 수 없다. 이러한 특성들을 살펴보기 위해서는 2차원적인 해석방법이 필요하다기 때문에 대향류 유동장의 특성을 그대로

유지하면서 2차원 혼합층이 형성될 수 있는 twin-jet 대향류 버너를 사용하여 실험을 수행하였다. 이 버너를 사용하면 곡률을 갖고 상호 작용을 하는 다양한 비예혼합 화염을 구현할 수 있고 이들 화염의 소멸 특성, 화염 상호작용과 관련한 화염 안정성등과 같은 연구가 가능하다.

프로판을 사용한 실험에서 crossed twin-jet 대향류 화염의 소멸 특성은 petal-shaped flame 이라는 독특한 화염의 존재로 인해서 소멸 한계가 기존의 대향류 화염보다 현저히 확장되고 petal-shaped flame이 점화원으로 작용하여 소멸과 재점화간의 이력현상(hysteresis)이 발생함을 보였다.[3,4]

이 petal-shaped flame은 edge flame[5]의 일종이라고 볼 수 있다. 이런 edge flame은 강한 난류 강도에 의한 국부적인 소멸에 의해서 발생하기도 하는데 안정한 edge flame에 대한 실험적 연구[3,4,6]는 매우 제한적이다.

Liñan[7]은 큰 활성화 에너지를 가진 대향류

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 현대,기아자동차 기술연구소

*** 서울대학교 기계항공공학부

† 연락저자, E-mail : shchung@snu.ac.kr

화산 화염에 대한 점근적인 구조 해석을 통해 연료와 산화제의 분포에 따라 생기는 각 영역에서의 화염 특성을 Da 수 (Damköhler number) 와 관련지어 이론적으로 유도하였는데, 소염 Da 수와 점화 Da 수 사이에는 이력현상이 존재함을 나타내었다. Yang 등 [3,4]의 실험에서는 이 이력현상을 프로판 crossed twin-jet counterflow에서 실험적으로 보였다.

본 실험은 메탄 연료에 대해 crossed twin-jet 대향류 화염의 소염 특성을 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 Twin-jet 대향류 버너

2차원 Twin-jet 대향류 버너는 상/하부 버너가 각각 이중 슬릿 노즐로 구성되어 각 슬릿에 독립적으로 연료와 산화제가 공급될 수 있도록 설계되었다. 이중 슬릿 노즐은 2개의 직사각형 슬릿 (30 mm × 15 mm) 으로 구성되어 있고 두 슬릿 사이에는 0.4 mm 두께의 얇은 판을 설치하였다. 버너 안쪽에 honeycomb 과 steel wool 을 두어 연료/산화제가 슬릿으로 공급되는 과정에서 생길 수 있는 불균일성을 최소화하였다. 외부 교관을 최소화하기 위해 노즐의 가장자리에 폭 6 mm 의 질소 동축류 채널을 설치하였다. 각 슬릿에서의 균일한 출구 유속을 보장하기 위해 슬릿 출구에 두께 4 mm 의 다공 판 (porous plate) 을 설치하였다. 다공 판이 화염에 의해 가열되어 소염 특성에 영향을 주는 것을 방지하기 위해 버너의 상/하부에 각각 water jacket을 설치하였다. water jacket 의 설치는 소염 특성 실험에 있어서 재현성이 보장되는 장점이 있다. 2차원 Twin-jet 대향류 버너의 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다.

하부 버너는 지지대로 고정하고 상부 버너는 마이크로미터가 있는 이송장치를 사용하여 상/하부 버너사이의 간격을 조절하였다. 상/하부 노즐 사이의 간격 (L) 은 10 mm로 고정하였다. 실험에 사용된 연료는 메탄이고 산화제는 산소이며 질소를 희석제로 사용하였다. 연료/산화제 공급 장치에 의해 각 슬릿으로 공급되는 연료/산화제를 조절할 수 있어 쉽게 다양한 형태의 비예혼합 화염을 만들 수 있었다.

Twin-jet 대향류에서 소염 한계를 결정할 때 연료/산화제 농도, 출구 유속 등이 변수가 될 수 있다. 소염 한계를 관측하는 실험 방법으로는 주어진 연료/산화제 농도에 대해 출구 유속을 변화시키는 방법과 주어진 속도에 대해 연료/산화제 농도를 변화시키는 방법이 있는데, 후자의 방법

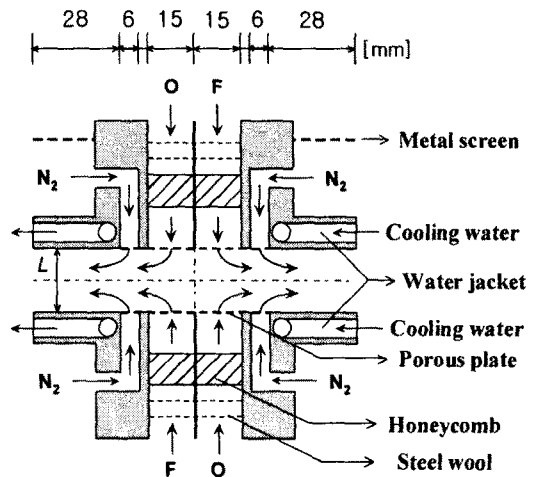


Fig. 1 Schematic of twin-jet counterflow burner [8].

이 정확도가 높고 실험이 용이하다[3]. 본 실험에서는 각 슬릿의 출구 유속($V_{O,F}$)과 산화제 농도($X_{O,O}$)를 고정하고 연료 농도($X_{F,O}$)를 변화시키면서 소염특성을 관찰하였다. 여기서 X 는 몰분율, 첨자 F 와 O 그리고 O 는 각각 연료, 산화제, 그리고 노즐 출구에서의 상태를 나타낸다.

각 슬릿에 공급되는 유량은 습식 가스 미터로 보정된 질량 유량계 (mass flow controller) 를 사용하여 조절하였다. 화염의 직접 사진을 얻기 위하여 ICCD 카메라 (Princeton Instrument, EEV 02-06) 를 사용하였으며 이를 통해 얻어진 디지털 이미지로부터 화염의 모양과 위치를 측정하였다.

2.2 다양한 형태의 비예혼합화염

각 슬릿에 공급되는 연료와 산화제의 조합에 따라 형성되는 화염들을 Fig. 2에 나타내었다. 하부 버너로는 연료를 공급하고 상부 버너로는 산화제를 공급한 경우 Fig. 2(a)와 같은 기존의 대향류 비예혼합화염이, 상/하부 버너의 좌측 슬릿으로는 연료를 공급하고 우측 슬릿으로는 산화제를 공급한 경우 Fig. 2(b)와 같은 수직 화염 (near-vertical flame)이, 연료와 산화제를 서로 교차되게 공급한 경우 Fig. 2(c)와 같은 crossed twin-jet (CTJ) 대향류 화염이, 그리고 연료(산화제)를 한 쪽 슬릿으로만 공급하고 나머지 슬릿으로는 산화제(연료)를 공급한 경우 Fig. 2(d) (Fig. 2(f)) 와 같은 single curved flame 이 형성 된다.

특히, Fig. 2(c)에 나타낸 CTJ 대향류 화염은

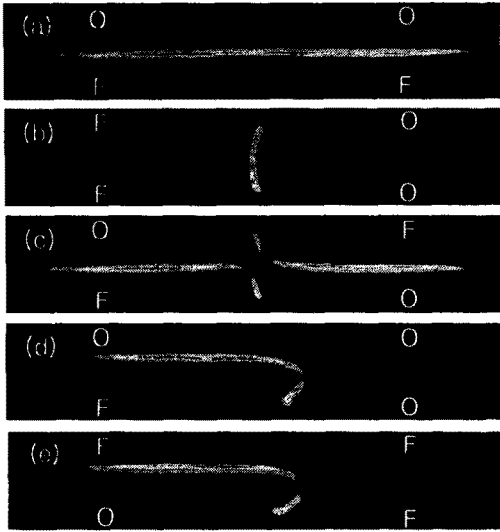


Fig. 2 Direct photographs of typical non-premixed flames in twin-jet counterflow burner for $X_{F,0} = 0.15$, $X_{O,0} = 0.30$ and $V_0 = 7$ cm/s.

기존의 대향류 화염 (Fig. 2(a)) 의 특성을 나타내는 수평 날개 부분 (wing), 수직 화염 (Fig. 2(b)) 의 특성을 나타내는 수직 부분 (stem), 그리고 이 두 화염을 연결하는 곡률을 가진 화염 등 세 부분으로 구성된다. 본 실험에서는 CTJ 대향류 화염에 대하여 주로 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 $X_{O,0} = 0.21$ 에서 프로판과 메탄 CTJ 대향류 화염의 소멸 특성 비교

$X_{O,0} = 0.21$ 의 조건에서 프로판과 메탄의 CTJ 대향류 화염의 소멸한계 및 재점화 조건을 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다.

메탄 CTJ 대향류 화염의 경우에도 프로판 CTJ 대향류 화염의 경우처럼 스트레인율이 커질수록 높은 $X_{F,0}$ 에서 소멸되며, 전체적으로 메탄 CTJ 대향류 화염의 소멸 한계가 프로판 CTJ 대향류 화염의 소멸 한계보다 상대적으로 더 큰 값의 $X_{F,0}$ 에서 결정됨을 알 수 있다.

한편, 그림에 나타난 것처럼 소멸 특성에 따라 CTJ 대향류 화염 영역 (Regime A), 한 쪽의 확산 화염이 소멸된 영역 (Regime B), 양쪽의 확산 화염이 모두 소멸된 영역 (Regime C), 그리고 완전히 소멸된 영역 (complete extinction)으로 나눌 수 있다.

영역 A, 영역 B, 그리고 영역 C에 해당하는

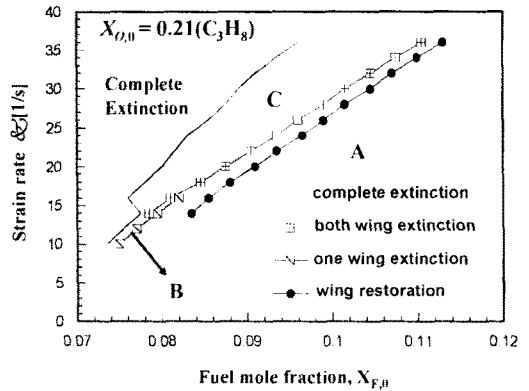


Fig. 3 Extinction limits and wing restoration conditions of non-premixed propane flame in twin-jet counterflow for $X_{O,0} = 0.21$ [3].

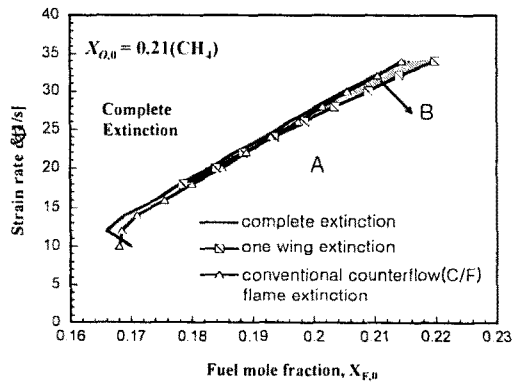


Fig. 4 Extinction limits of non-premixed methane flame in twin-jet counterflow for $X_{O,0} = 0.21$.

화염 모양을 프로판과 메탄의 경우에 대하여 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. 특히, 영역 C에서 관측되는 꽃잎 모양의 화염을 “petal-shaped flame” 이라고 한다.

메탄을 연료로 사용한 경우 $X_{O,0} = 0.21$ 의 조건에서는 CTJ 대향류 화염 영역 (Regime A) 과 한쪽의 확산 화염이 소멸된 영역 (regime B) 은 관측되었지만 프로판의 경우와는 달리 양쪽의 확산 화염이 모두 소멸된 영역 (regime C), 즉 petal-shaped flame 영역은 나타나지 않았다. 이는 곡률을 가진 두 비예혼합화염 사이의 거리가 멀어서 열 교환 및 Radical 공유 등과 같은 화염의 상호작용 (flame interaction) 이 일어나기 힘들기 때문이라고 생각된다.

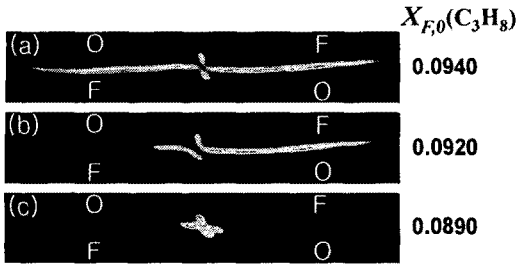


Fig. 5 Direct photographs of non-premixed propane flame in twin-jet counterflow for $\kappa = 20 \text{ s}^{-1}$, $X_{O,0} = 0.21$; (a) regime A, (b) regime B, and (c) regime C [3].

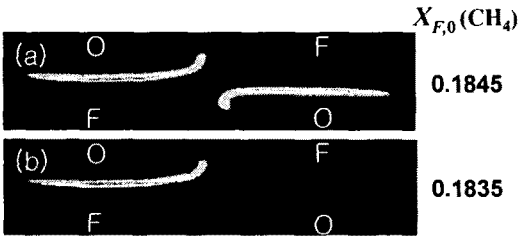


Fig. 6 Direct photographs of non-premixed methane flame in twin-jet counterflow for $\kappa = 20 \text{ s}^{-1}$, $X_{O,0} = 0.21$; (a) regime A, and (b) regime B.

한편, 프로판의 경우 영역 B가 스트레인을 $\kappa < 16 \text{ s}^{-1}$ 에서 존재하고 이보다 큰 스트레인을 위해서는 사라지는 반면 메탄의 경우 B영역이 $\kappa > 18 \text{ s}^{-1}$ 에서 존재하고 이보다 낮은 스트레인을 위해서는 존재하지 않는다. 즉 한쪽 확산화염만이 꺼지는 영역은 프로판 CTJ 대향류 화염에서는 상대적으로 낮은 스트레인을 울에서 존재하고 메탄의 경우에는 상대적으로 높은 영역에서 존재한다.

메탄의 경우 매우 낮은 스트레인을 ($\kappa < 12 \text{ s}^{-1}$)에서 C-shape 소염 한계가 나타나는데 이는 대류 또는 복사 열 손실의 영향 때문이라고 생각된다 [9].

본 실험에서 스트레인을 κ 는 $V_0/(L/2)$ 로 나타내었다.

3.2 $X_{O,0} = 0.26$ 에서 메탄 CTJ 대향류 화염의 소염 특성

메탄 CTJ 대향류 화염의 경우 $X_{O,0} = 0.21$ 의 조건에서는 petal-shaped flame 영역 (Regime C) 이 나타나지 않았다. 메탄 CTJ 대향류 화염에서 petal-shaped flame 영역을 찾기 위해서는 두 곡률을 가진 화염사이의 거리를 줄여주어야

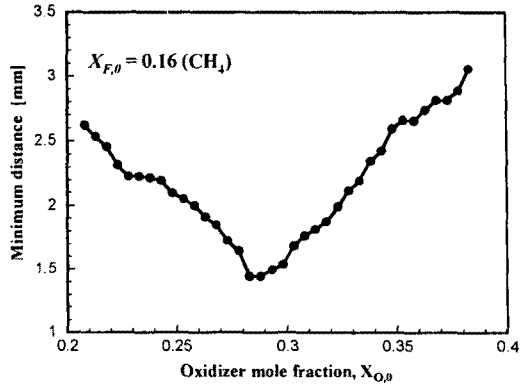


Fig. 7 Minimum distance of two interacting curved flames for $\kappa = 20 \text{ s}^{-1}$, $X_{F,0} = 0.16$.

한다.

Fig. 7은 노즐 출구 속도 $V_0 = 10 \text{ cm/s}$, 연료 농도 $X_{F,0} = 0.16$ 으로 고정시키고 산화제 농도를 변화시키면서 관측된 메탄 CTJ 대향류 화염 사이의 최소 거리를 측정된 그림이다.

그림에서 볼 수 있듯이 $X_{O,0} = 0.285$ 일 때 두 화염 사이의 거리가 최소가 되고 $X_{O,0} = 0.285$ 에서 멀어질수록 두 화염사이의 거리는 멀어진다 는 것을 알 수 있다. $X_{O,0} = 0.21$ 인 경우 메탄 CTJ 대향류 화염의 소염 특성에서는 나타나지 않은 petal-shaped flame 영역을 관측하기 위해 두 화염간의 거리를 화염 상호작용(flame interaction)이 일어날 만큼 줄여주어야 하는데, 이를 위해서 산화제 농도를 $X_{O,0} = 0.26$ 로 높여서 실험하였다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 $\kappa = 20 \text{ s}^{-1}$, $X_{F,0} = 0.19$ 일 때 각각 $X_{O,0} = 0.21$, $X_{O,0} = 0.26$ 의 메탄 CTJ 대향류 화염 모습이다. 그림에서 볼 수 있듯이 산화제 농도 $X_{O,0}$ 를 높여주었을 때 두 곡률을 가진 화염사이의 간격이 줄어들었음을 알 수 있다.



Fig. 8 Direct photographs at $\kappa = 20 \text{ s}^{-1}$, $X_{F,0} = 0.19$; (a) $X_{O,0} = 0.21$, and (b) $X_{O,0} = 0.26$.

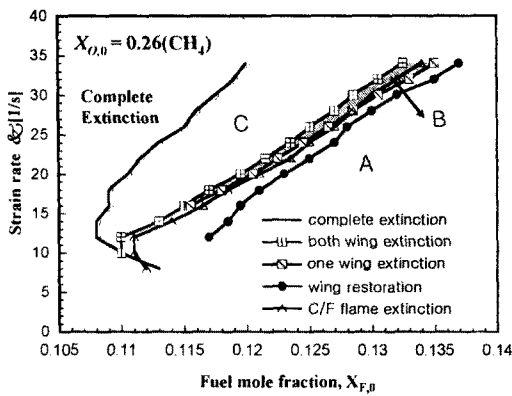


Fig. 9 Extinction limits and wing restoration conditions of non-premixed methane flame in twin-jet counterflow for $X_{O,0} = 0.26$.

Fig. 9는 $X_{O,0} = 0.26$ 일 때 메탄 CTJ 대향류 화염의 소멸 한계를 나타낸 그림이다. Fig. 9 역시 Fig. 3과 마찬가지로 메탄 CTJ 대향류 화염 영역 (Regime A) 과 한 쪽의 확산 화염이 소멸된 영역 (Regime B), 양쪽의 확산 화염이 모두 소멸된 영역 (Regime C), 그리고 완전히 소멸된 영역 (complete extinction) 으로 나눌 수 있다.

Fig. 10은 $X_{O,0} = 0.26$ 일 때 각 영역에서의 화염의 모양을 나타낸 것이다. $X_{O,0} = 0.26$ 일 때에는 $X_{O,0} = 0.21$ 일 때 볼 수 없었던 양쪽의 확산 화염이 완전히 소멸되어 나타나는 petal-shaped flame 영역이 나타났다.

또한 Fig. 4에서처럼 비교적 높은 스트레인을 ($\kappa > 16 \text{ s}^{-1}$)에서 영역 B가 보였고 스트레인이 높아질수록 영역 A와 영역 B사이의 경계와 영

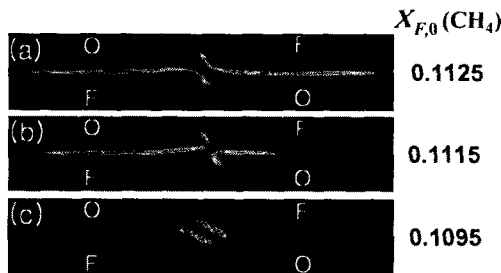


Fig. 10 Direct photographs of non-premixed methane flame in twin-jet counterflow for $\kappa = 20 \text{ s}^{-1}$, $X_{O,0} = 0.26$; (a) regime A, (b) regime B, and (c) regime C.

역 B와 영역 C사이 경계의 폭이 커진다.

Twin-jet 대향류에서 곡률을 가진 두 화염의 소멸 한계는 petal-shaped flame의 존재로 인하여 기존의 대향류 화염의 소멸 한계 보다 확장되고 이 petal-shaped flame은 재점화원으로 이용될 수 있다. 영역 C의 어느 주어진 스트레인을의 petal-shaped flame 상태에서 연료 농도 $X_{F,0}$ 을 점점 증가시키면 어느 순간 petal-shaped flame의 소멸되었던 수평 날개 부분의 확산 화염이 복원되는데, 이 복원되는 지점을 "wing restoration" 이라고 하고 Fig. 9에 함께 나타내었다. 유동의 화학적 반응 시간을 일정하다고 가정한다면, Da 수는 스트레인의 역수라고 생각할 수 있으므로 대향류 확산 화염의 유동현상에 대한 접근적 전개 방법으로 구해진 S-선도상의 소멸 Da 수와 재점화 Da 수로 바꿔 생각해보면, 소멸 스트레인율이 점화 스트레인율 보다 크므로, 점화 Da 수가 소멸 Da 수보다 커지는 이력 현상을 이 실험에서 살펴볼 수 있었다. 이는 프로판 CTJ 대향류 실험에서도 마찬가지로 결과로 나타났었다.

프로판 CTJ 대향류 화염의 경우 영역 B에서 하부 slit에서 연료를 공급하고 상부 slit에서 산화제를 공급해준 쪽 수평 날개 부분의 화염이 먼저 꺼지는 반면 메탄 CTJ 대향류 화염의 경우 영역 B의 화염 모양은 그 반대로 상부 slit에서 연료를 공급하고 하부 slit에서 산화제를 공급해준 쪽 수평 날개 부분의 화염이 먼저 꺼지는데, 이러한 현상에 대한 원인은 아직까지는 밝혀지지 않았으며 단지 부력 효과(buoyancy effect)와 preferential (secondary) diffusion 등의 영향 때문이라고 여겨진다. 이에 대한 자세한 연구는 차후에 수행되어야 할 것이다.

한편, Fig. 9에서 볼 수 있듯이 메탄 CTJ 대향류 화염의 경우에서도 Fig. 3에 나타낸 프로판 CTJ 대향류 화염의 경우와 같이 petal-shaped flame영역과 완전 소멸 영역 사이의 경계에서 C-shaped 소멸 한계가 보인다. petal-shaped flame은 짧은 날개 화염을 가지고 있어 날개 화염으로부터의 전도 열 손실은 크지 않을 것이므로 여기서는 복사 열손실이 주요한 요인일 거라고 생각된다.

3.3 $X_{O,0} = 0.23$ 에서의 CTJ 대향류 화염의 소멸 특성

Fig. 11은 $X_{O,0} = 0.23$ 일 때 메탄 CTJ 대향류 화염의 소멸 특성을 나타낸 그림이다.

Fig. 4, Fig. 9, 그리고 Fig. 11를 비교해보면 산화제 농도 $X_{O,0}$ 가 증가할수록 소멸 한계가 확장되고 petal-shaped flame의 영역은 줄어드는 것을 알 수 있다. 이런 경향은 프로판 CTJ 대향

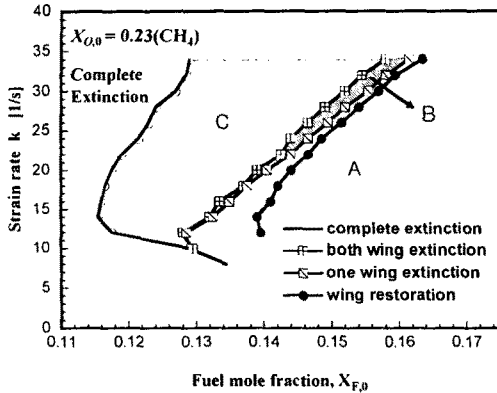


Fig. 11 Extinction limits and wing restoration conditions in twin-jet counterflow for $X_{O_2} = 0.23$.

류 화염의 소멸 특성에서도 마찬가지로 나타난다.

4. 결론

Twin-jet 대향류 유동장에서의 메탄 CTJ 대향류 화염의 소멸 특성을 살펴보고, Yang과 Lee에 의해 실험되었던 프로판 CTJ 대향류 화염의 소멸 특성과 비교해 보았다.

- 1) 프로판 CTJ 대향류 화염은 한쪽의 확산화염이 꺼지는 영역인 영역 B가 상대적으로 낮은 스트레인율에서 나타나서 스트레인율이 커지면 사라지지만 메탄 대향류 화염의 경우에는 이와는 반대로 상대적으로 높은 스트레인율에서 나타나고 스트레인율이 커질수록 영역 A와 영역 B사이의 경계와 영역 B와 영역 C사이 경계의 폭이 커짐을 알 수 있다.
- 2) 한쪽의 확산화염이 꺼지는 영역 B에서 메탄 CTJ 대향류 화염은 프로판 CTJ 대향류 화염과 반대로 상부 slit에서 연료를 하부 slit에서 산화제를 공급해준 쪽 수평 날개 부분의 화염이 먼저 꺼졌는데, 이것은 부력의 효과(buoyancy effect)와 preferential (secondary) diffusion의 영향일 거라 생각된다.
- 3) 메탄 CTJ 대향류 화염의 소멸 한계가 프로판 CTJ 대향류 화염의 소멸 한계보다 더 축소됨을 알 수 있었다.
- 4) 메탄과 프로판 CTJ 대향류 소멸 한계는 공통적으로 대향류 화염의 소멸 한계보다 확장된 모습을 보이며 이는 petal-shaped flame의 존재로 인한다. 그리고 이 둘은 확산화염이 양쪽 모두 있는 영역 A와 한쪽 확산화염의 꺼지는 영역 B,

양쪽 확산화염이 모두 꺼지는 영역 C으로 구성되고 petal-shaped flame 영역과 완전 소멸 영역 사이의 경계에서 C-shape 소멸 한계가 보인다. 5) 프로판 CTJ 대향류 소멸 한계 특성에서와 마찬가지로 메탄 CTJ 대향류 소멸 한계 특성에서도 소멸과 재점화 사이의 이력현상을 발견 할 수 있었다.

후 기

이 연구는 연소기술센터(CERC)와 서울대 기계항공공학부 BK-21에 의하여 지원되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] C. J. Sung, J. B. Liu and C. K. Law, "Structure Response of Counterflow Diffusion Flame to Strain Rate Variation," *Combustion 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, "Interaction, Extinction and Propagation of Non-premixed Flames in Twin-jet Counterflow," *서울대학교 박사학위논문*, (2003).
- [4] 이범기, "비예혼합 Twin-Jet Counterflow에서의 화염 상호작용과 소멸에 관한 연구," *서울대학교 석사학위논문*, (2002).
- [5] J. Buckmaster, "Edge flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, pp. 435-475.
- [6] M. L. Shay and P. D. Ronney, "Nonpremixed Edge Flames in Spatially Varying Straining Flows," *Combustion Flame*, Vol. 112, pp. 171-180.
- [7] A. Liñan, "The Asymptotic Structure of Counterflow Diffusion Flames for Large Activation Energies," *Acta Astronautica*, Vol. 1, pp. 1007-1039.
- [8] S. Y. Yang, B. K. Lee, S. H. Chung, "observation of various non-premixed flames in twin-jet counterflow," *Combustion and Flame*, (2003) in press.
- [9] Williams, F. A., "Progress in knowledge of flamelet structure and extinction," *Prog. Energy Combust. Sci.* 26:657-682, (2000).