

Crossed Twin Jet Counterflow에서의 소염과 재점화 특성

이범기* · 양승연* · 정석호**

On the Characteristics of Extinction and Re-ignition in a Crossed Twin Jet Counterflow

B. K. Lee, S. Y. Yang and S. H. Chung

ABSTRACT

For the better understanding of the stability of turbulent combustion, more researches on extinction and re-ignition are needed. Flame interactions in non-premixed flame have also not been greatly researched. We made a hybrid twin jet flame, the combinations of diffusion flame and partially-premixed diffusion flame, in a twin jet counterflow configuration. The extinction limits of a crossed twin jet counterflow have been extended in comparison with those of a one-dimensional counterflow because of flame interactions through heat transfer and joint ownership of various radicals. Besides, we have obtain ignition Damköhler number by experimental method without external ignition source using the extinction characteristic in a crossed twin jet counterflow flame. From results, we can identify the hysteresis between extinction and ignition Damköhler number in S-curve.

Key Words : Twin Jet Counterflow, Extinction, Re-ignition, Flame interaction, Diffusion Flame(DF), Partially-Premixed Diffusion Flame(PPDF).

기 호 설 명

Da Damköhler number, the ratio of flow time to chemical reaction time
d Gap between lower and upper burner, mm
S Strain rate, sec^{-1}
V Jet exit velocity, cm/s

1. 서론

대향류 유동장은 예혼합/확산 화염의 구조 (scalar structure) 해석^[1], 속도와 농도 조건에 따른 화염에서의 소염 및 상호작용 특성^[2] 등 많은 이론적, 실험적, 수치적 연구에 이용되어져 왔다. 대향류 유동장을 이용한 연구는 대단히 많은 연

소 현상에 대한 이해를 높였으나, 1차원 접근방식이라는 해석 상의 한계를 가지고 있다. 이에 따라, 잘 정의된 유동 형상에 대한 다차원적인 접근이 필요하게 되었다. 이러한 목적에 따라 두 개의 정체 면이 직각으로 교차하는 유동장(Twin jet counterflow라 정의함)을 만들어 많은 연소 현상에 대해 2차원적인 해석을 시도하고자 한다. 이에 본 연구는 Twin Jet 대향류 버너를 이용하여 실험적인 연구를 수행하였다.

층류 화염과 난류 화염의 안정성과 관련하여 많은 소염에 관한 연구들이 이루어져 왔다. 그 중 난류화염의 안정성과 관련하여 edge flame^[3]

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

† 이범기, E-mail: bklee7@snu.ac.kr

** 서울대학교 기계항공공학부

에 대한 연구가 최근에 많이 이루어져 오고 있다. 강한 난류 강도에 의해 난류 화염은 국부적인 소염 현상이 일어난다. 이러한 국부적인 소염에 의해 생성되는 edge flame은 전파 또는 후퇴^[4] 하면서 전체 화염의 안정화에 크게 관여한다. 이러한 edge flame에 대한 이론적, 수치적 접근^[5]은 많이 이루어지고 있으나, 안정적 형태의 edge flame에 대한 실험적 연구^[6] 결과는 대단히 적다. 따라서, 본 연구는 노즐 출구에서 연료와 산화제가 서로 교차되게 twin jet 대향류 유동장에 공급하여(crossed twin jet counterflow or CTJ counterflow 라 정의함) 낮은 농도 범위에서 소염 특성에 관한 실험을 수행하였다. 이러한 CTJ 대향류 화염은 부분적인 전파 특성을 갖는 PPDF^[2]과 1차원 대향류 DF 꼬리(trailing)로 구성된다. 이를 통해 edge flame의 대한 이해를 높일 수 있으리라 기대된다. 또한, CTJ 대향류는 한 쌍의 화염이 서로 마주보는 형상이므로 확산 화염의 상호작용에 대한 이해를 높일 수 있었다. 본 실험에서 사용된 스트레인 $S=(V_{upper}+V_{lower})/d$ 값은 이상적인 potential plane strain flow에서의 정의되어진 값이다.

Linan^[7]은 활성화 에너지가 큰 대향류 확산 화염에 대한 접근적 전개 방법에 의해 초기 연료와 산화제의 농도 분포에 따른 각 영역(regime)에서의 Da 수에 따른 화염의 특성(burning temperature, burning rate)을 이론적으로 유도하였고, 이는 S-곡선의 형태로 나타난다. 그 중, 화염 극한(critical) 현상에 해당하는 소염과 재점화에 대한 이해를 위해 많은 연구들이 이루어져 왔다. 수치적 접근(inverse method)에 의해 소염 Da 수는 결정할 수 있으나 재점화 Da 수는 결정할 수 없다. 또한, 레이저 점화를 이용한 실험적 접근은 비교적 희박한 확산 화염에 대한 점화가 어렵고, 레이저 파워 변동에 영향을 받게 된다는 단점이 있다. 이에, 본 연구에서는 CTJ 대향류 화염의 소염 특성을 이용하여 외부의 점화원이 없이 재점화 Da 수를 결정할 수 있었다. 이를 통해, S-곡선의 소염과 재점화 Da 수의 hysteresis를 실험적으로 확인 할 수 있었다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 Twin Jet Counterflow

Figure 1은 Twin jet 대향류 버너에 대한 개략적인 그림으로 4개의 직사각형 slot(15 mm × 30 mm)으로 구성되어 있다. 상/하부 버너는 0.6mm의 얇은 판으로 분리되어져 있으며 연료와 산화제는 각 slot를 통하여 독립적으로 공급될 수 있도록 하였다. 버너 가장자리에는 외부 교란을 최소화하기 위해 6mm의 co-flow channel이 설치되어 있다. channel에서 질소의 출구속도는 Kelvin-Helmholtz's instability가 발생하지 않도록 적절히 조절하였다. 각 slot에서 균일한 속도 분포를 얻기 위해 Slot 출구 쪽에 4mm두께의 porous plate을 설치하였고, 연료 라인에서 각 slot으로 공급 되는 과정에서 생길 수 있는 불균일성을 최소화 하기위해 honeycomb, steel wool 등을 사용하였다. 잘 정의된 두 개의 정채면이 직 교차하는 twin jet 대향류 속도장을 형성하기 위해 각 slot의 출구속도는 같도록 실험을 하였다. 모든 실험에서의 버너 간격은 10mm로 고정하였다.

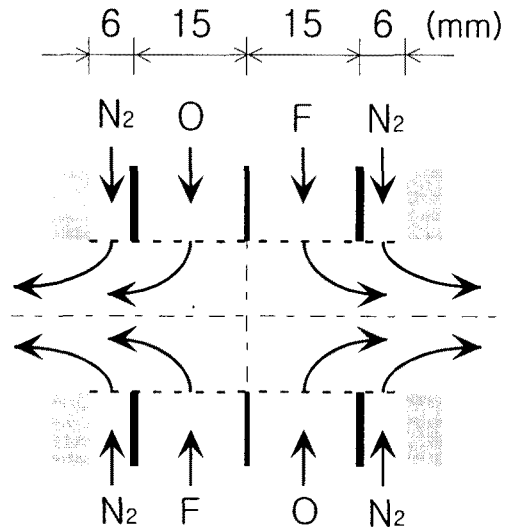


Fig. 1 Schematic of flow configuration in a twin jet counterflow.

각 slot에 공급되는 연료와 산화제의 조합에 따라 형성될 수 있는 화염의 형상들을 Fig. 2에

나타내었다. twin jet 대향류 형상에서 연료와 산화제가 서로 교차되게 공급되는 경우에는 Crossed twin jet 대향류 화염(Fig. 2a), 연료와 산화제가 버너의 상단과 하단이 서로 마주보며 공급되는 경우에는 통상적인 1차원 대향류 화염(Fig. 2b), 연료가 한 쪽 slot에서만 공급되고 나머지 slot들에서 산화제가 공급되는 경우에는 곡률을 가진 edge flame(Fig. 2c)이 형성된다.

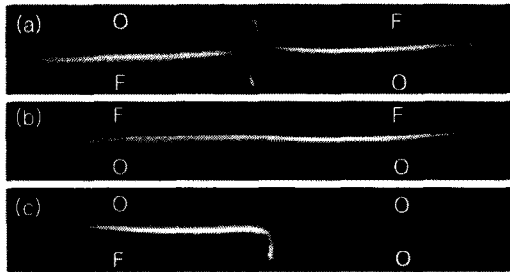


Fig. 2 Direct photographs using ICCD camera showing the various flame shapes in a twin jet counterflow configuration.

상/하부 버너 slot들의 정확한 정렬을 위해 하부 버너를 지지대에(optical post) 고정된 후, 상부 버너를 마이크로미터가 부착된 3 축 이송장치에 고정하여 이송하였다. 4개 slot에서 분사되는 연료와 산화제의 조합이 교차 되도록 화염을 형성한 후(Fig. 2a), 마이크로미터를 0.01 mm 간격으로 이동하며 ICCD 이미지들을 얻었다. 그 후, 좌우 연료와 산화제의 위치를 바꾸어 똑같은 작업을 반복하였다. 이렇게 얻어진 각 위치에서의 두 세트의 화염 이미지들로부터 간단한 프로그래밍을 통해 화염의 대칭성 테스트를 했다. 따라서, 버너의 정렬은 화염의 대칭성을 기준으로 하였고, 이 때 상하 버너의 정렬의 정확도는 10 μm 이다.

2.2 Experimental procedures

실험에 사용된 연료와 산화제는 C.P.급의 프로판과 산소이다. 희석제로는 질소가 사용되었다. 각 slot에 공급되는 유량은 습식 가스 미터(wet test gas meter)로 보정된 질량 유량 조절장치(MFC, MKS)로 조절하였다.

소염 한계를 결정하기 위한 실험 방법으로는

주어진 농도에 대해 속도를 변화시키는 방법과 주어진 속도에 대해 농도를 변화시키는 두 가지의 방법이 있다. Fig. 3은 Twin jet 대향류 유동 형상에서 1차원 대향류 화염을 만들어(Fig 2b) 두 실험 방법을 비교한 결과이다. 공급되는 유량을 조절하는 장치와 관련하여 농도를 조절하는 방법이 실험의 정확도(Resolution)가 더 높다. 그리고, 농도를 변화시키는 방법이 상대적으로 실험이 더 용이하다. 따라서, 차후에 논의되어지는 실험 결과들은 모두 속도를 일정하게 고정한 후 농도를 변화시키면서 얻은 실험 결과들이다.

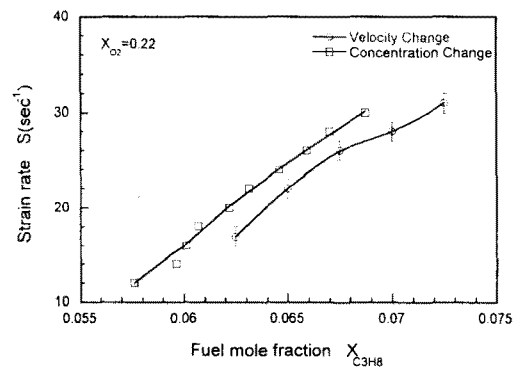


Fig. 3 Extinction strain rates as a function of fuel concentration in the fuel stream showing the difference of experimental methods in a one-dimensional counterflow configuration.

화염의 상호작용을 관측하기 위해 평면 레이저 유도 형광법을(PLIF ; planar laser induced fluorescence) 이용해 OH radical의 농도 분포를 측정하였다. ND:YAG 레이저(Continuum, PL8000)와 Dye 레이저(continuum, ND6000)를 사용하였으며, $A^2 \Sigma^+ - X^2 \Pi(1,0)$ 밴드 $Q_1(6)$ 라인을(282.95nm) OH 여기 파장으로 선택하고, 광학 필터로(UG-11, WG-305) 선별된 파장만을 레이저와 동기된 ICCD(Princeton Instrument, PIMAX)카메라를 이용하여 OH 농도의 정성적 분포를 얻었다.

소염에 이르는 화염의 비정상적(unsteady) 거동을 관찰하기 위해 고속도 카메라(motion analyzer; Kodak, Ekta Pro SR-ULTRA)를 이용하였다. 이때, 촬영 속도는 화염의 강도(total luminosity)를 고려하여 순간적인 화염의 변화를

충분히 관찰 할 수 있도록 125 FPS(frame per second)로 촬영하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Extinction

3.1.1 Flame extinction

Figure 4는 CTJ 대향류 화염(Fig. 2a)의 소염 특성을 1차원 대향류 화염(Fig. 2b)의 소염한계와 비교하여 나타낸 그림이다.

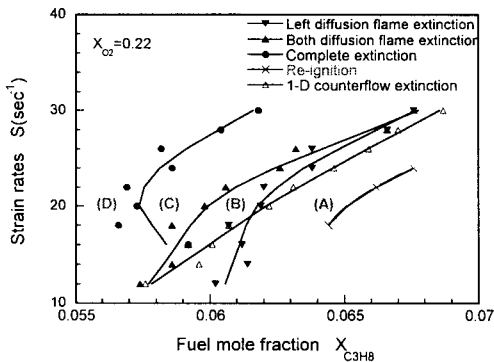


Fig. 4 Extinction and re-ignition strain rates as a function of fuel concentration in the fuel stream in a cross twin jet counterflow configuration.

Fig. 4에 의하면 CTJ 대향류 화염은 소염 특성에 따라 크게 4개의 영역으로 구분될 수 있다. Fig 5a와 같은 crossed twin jet 대향류 화염 영역(Regime A), Fig 5b와 같이 왼쪽의 확산 화염이 완전히 소염된 영역(Regime B), Fig 5c와 같이 양쪽의 확산 화염이 모두 소염된 영역(Regime C), 그리고 완전히 소염된 영역(Regime D)으로 구분 할 수 있다.

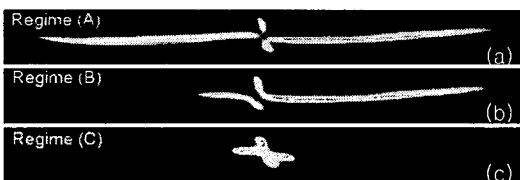


Fig. 5 Direct photographs using ICCD camera for varying fuel concentration in the fuel stream at fixed $S=24 \text{ sec}^{-1}$ in a crossed twin jet counterflow configuration.

Figure 6은 CTJ 대향류 화염의 강도와 1차원 대향류 화염의 강도를 나타낸 그림이다.

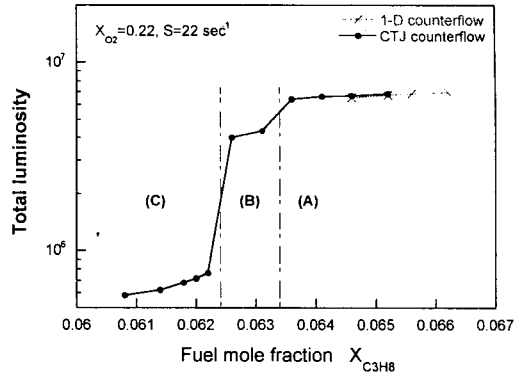


Fig. 6 Total luminosity with fuel concentration in the fuel stream.

Fig. 4에서 분류된 영역은 Fig. 5에서와 같이 화염의 형상 뿐만 아니라 Fig. 6과 같이 화염 강도 면에서도 확연히 구분된다. 이러한 영역의 구분은 CTJ 대향류 화염이 양쪽 수평의 DF과 노즐 근처의 PPDF이 결합된 복합적인 특성과 연관되어진다.

이러한 CTJ 대향류 화염에 대한 보다 자세한 소염 특성을 살펴보기 위하여 스트레인율이 14, 20, 30 sec^{-1} 인 경우, 주어진 속도에서의 연료 농도 감소에 따른 소염 과정을 살펴보았다.

(i) $S = 24 \text{ sec}^{-1}$

CTJ 대향류 화염에서 연료 농도를 서서히 감소시키면 부력 효과(buoyancy effect)에 의해 왼쪽의 확산 화염이 먼저 소염(Regime B)된다. 이는 상대적으로 분자량이 큰 프로판의 경우 연료를 위에서 아래방향으로 분사해주는 것이 중력에 이득(positive) 방향이므로 화염이 더 안정적으로 유지될 수 있다. 농도를 더 감소시키면 왼쪽의 확산 화염이 소염(Regime C)되고, 더 농도를 감소시키면 완전히 소염(Regime D)된다.

(ii) $S = 14 \text{ sec}^{-1}$

(i)보다 상대적으로 스트레인율이 작은 경우, 농도를 감소시키면 왼쪽의 확산 화염이 먼저 소염(Regime B)되고, 더 농도를 감소시키면 오른쪽의 확산 화염의 소염과 거의 동시에 화염이 완전

히 소염(Regime D)된다. 영역 B에서 영역 D로의 직접적인 전이에 대한 엄밀한 이해를 위해 고속도 카메라 촬영한 이미지들을 Fig. 7에 나타내었다.

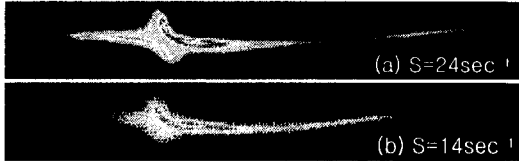


Fig. 7 Direct photographs using highspeed camera showing the instant of right diffusion flame extinction for varying strain rates in a crossed twin jet counterflow configuration.

스트레인률이 24 sec^{-1} 인 경우(Fig. 7a), 오른쪽 확산 화염이 소염 직전에도 좌측 하단에 위치한 화염은 독립적으로 유지될 수 있을 정도의 충분한 화염 강도를 갖는다. 따라서, 오른쪽의 확산 화염이 소염되면 Fig. 5c와 같이 새로운 형태의 안정적인 화염이 형성된다. 이에 비해, 스트레인률이 14 sec^{-1} 인 경우(Fig. 7b), 화염 하단에 위치한 화염은 독립적으로 유지될 수 있을 정도의 충분한 강도를 갖지 못하므로 오른쪽의 확산 화염의 소염과 동시에 완전히 소염된다.

(iii) $S = 30 \text{ sec}^{-1}$

(i), (ii)에 비해 상대적으로 스트레인률이 큰 경우, 각 Slot에서 화염으로 공급되는 미연가스(unburned)의 운동량(momentum)이 부력(buoyancy force)에 비해 상대적으로 크기 때문에 농도를 감소시키면 양쪽의 확산 화염이 동시에 소염된다. 여기에서 더 농도를 감소시키면 완전히 소염된다.

3.1.2 Extinction limits extended

Figure 4로부터 CTJ 대향류 화염의 소염 한계는 1차원 대향류 확산 화염의 소염 한계에 비해 더 확대됨을 살펴볼 수 있었다. 그러나, Fig. 6에서 살펴볼 수 있듯이 농도와 속도가 동일한 경우 두 화염의 전체 강도가 거의 비슷하다. 그렇다면 CTJ 대향류 화염의 소염 한계가 확대되는 원인은 무엇일까? 실험을 결과들을 통해 추론되어진 원인은 다음과 같다.

화염에서의 열 전달은 화염 면에 수직방향(out normal)으로 이루어진다. 따라서, 곡률을 가진 두 화염이 서로 마주보고 있는 경우 곡면에서 전도에 의해 상호 열 교환이 활발히 이루어진다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 CTJ 대향류 화염은 곡률이 크다는 것을 알 수 있다. 이 때, 만일 한 개의 화염이 다른 화염에 비해 상대적으로 화염 강도가 약하면 상대적으로 강도가 강한 화염으로부터 열을 공급받게 된다. 이때 상대적으로 온도가 높은 상태의 화염은 저단열 상태(sub-adiabatic condition)로 열 손실이 생기고, 온도가 낮은 쪽은 초단열 상태(super-adiabatic condition)로 열이득이 생긴다. 특히, 이러한 열 전달에 의한 화염의 안정화는 스트레인률이 상대적으로 낮은 화염에서 대단히 중요한 역할을 한다.

그리고, 마주보는 두 화염은 화염 사이에 Radical을 공유함으로써 주어진 스트레인률에서 보다 낮은 농도에서도 소염되지 않고 안정될 수 있다. CTJ 대향류 화염은 OH Radical이 두 화염 사이에도 넓게 분포함을 OH-PLIF⁽⁸⁾을 통해 확인할 수 있다.

상호작용이 없는 경우의 화염(Fig. 2c)에 대한 별도의 소염 실험을 통해 이들이 CTJ 대향류 화염보다 더 잘 소염된다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, CTJ 대향류 화염이 1차원 대향류 확산 화염에 비해 소염 한계가 확대되는 것은 곡률을 갖는 두 화염의 열 교환과 Radical 공유와 같은 화염의 상호작용(flame interaction)의 결과라 생각할 수 있다.

3.2 Re-ignition

CTJ 대향류 화염에서 양쪽의 확산 화염이 소염된 Fig. 5c에서부터 속도를 고정한 후 농도를 서서히 증가시켜 양단의 확산 화염을 재점화할 수 있다. 재점화 순간을 125 FPS로 고속도 카메라로 촬영한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에 따르면 왼쪽의 화염이 오른쪽 화염에 비해 순간적으로 먼저 전파된다. 이는 버너 제작 상/하 각 버너의 2개의 Slot에서의 기밀(sealing)을 위해 porous plate에 홈을 내고 O-ring를 삽입하게 되면서 조립 시 출구가 완전한(perfect) 평면이 아닌 아주 미묘한 경사를 갖기 때문이다. 이러한 원인은 실험의 전체적인 소염이나 재점화 스트레인률에는 거의 영향을 미치지 않지만 지금

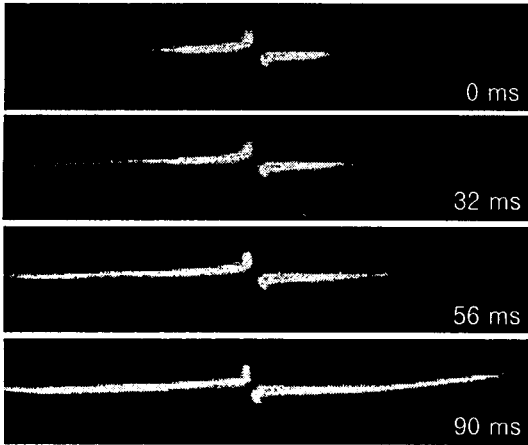


Fig. 8 Direct photographs using highspeed camera showing the process of re-ignition with $S=24\text{sec}^{-1}$ in a crossed twin jet counterflow configuration.

과 같은 재점화 실험의 경우 약간의 시간차의 요인으로 작용할 수 있다. 또한, 재점화 실험은 대단히 엄밀한(critical) 현상이므로 노즐로의 연료 공급과정에서 유량 공급장치에서의 미소한 맥동(pulsation)불안정성에 의하여 재점화가 되지 않도록 대단히 유의했다.

Fig. 4에 이러한 방법에 의해 얻어진 재점화 특성을 나타내었다. 만일 유동의 화학적 반응 시간이 비슷하다고 가정한다면, Da 수를 스트레인의 역수($Da \sim 1/S$)라 생각할 수 있다. 따라서, 대향류 확산 화염의 유동 형상에 대한 점근적 전개 방법으로 구해진 S-선도 상의 소염 Da 수와 재점화 Da 수로 치환하여 생각해 보면 점화 Da 수가 소염 Da 수에 비해 크다는 hysteresis를 실험적으로 확인할 수 있다.

4. 결론

2개의 정제 면이 직각으로 교차하는 Twin Jet 대향류 유동장은 실험적, 수치적, 이론적 접근성에 있어 대단히 유용하게 이용될 수 있는 모델이다. 이러한 유동장에서 연료와 산화제를 교차하게 공급하여 형성한 화염의 특성을 살펴본 결과는 다음과 같다.

1. CTJ 대향류는 출구에서 연료와 산화제의 혼합에 의해 생성되는(mixing layer) 부분적인

전파 특성을 갖는 PPDF 선단(leading edge)과 1차원 대향류 형상을 갖는 DF 꼬리(trailing)로 구성된다. 이러한 안정적인 형태의 edge flame에 대한 실험은 flame edge에 대한 보다 깊은 이해를 끌어낼 수 있을 것이고, 더 나아가 난류 화염의 안정성에 대해 보다 깊은 이해를 제공할 수 있으리라 기대된다.

2. CTJ 대향류는 주어진 속도에서의 소염 한계는 1차원 대향류 확산 화염의 소염 한계에 비해 확대된다. 이는 곡률을 가지 두 화염이 열 전달과 Radical 공유에 의한 상호작용(flame interaction)의 결과라 여겨진다. 이를 통해 화염에 상호 작용에 대한 보다 깊은 이해를 얻을 수 있으리라 기대되어진다.

3. CTJ 대향류는 화염의 소염 특성을 이용하여 외부의 에너지원이 없이 재점화 실험이 가능하다. 그 결과, 소염 스트레인은(소염 Da 수) 재점화 스트레인에(점화 Da 수) 비해 더 작다(크다)는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 S-선의 소염과 재점화 Da 수의 hysteresis를 실험적으로 확인할 수 있었다.

이러한 극한 조건(extinction, ignition) 실험은 정상(steady) 상태에서의 결과도 물리적으로 중요한 의미를 갖지만, 이러한 현상이 일어나는 과정에 대한 비정상(unsteady) 상태에 대한 연구 또한 연소 현상 이해에 대단히 중요한 의미를 갖는다. 즉, CTJ 대향류 화염에서 양쪽의 확산 화염의 소염은 후퇴하는 edge flame에 대한 이해 [4]를 넓힐 수 있다. 또한, 국부적인 소염상태에서 외부의 점화원 없이 안정적인 농도 장에서의 전파 속도를 결정할 수 있다. 이러한 비정상 상태에 대한 연구들은 현재 진행 중에 있다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원과 연소기술센터(CERC)의 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] C. J. Sung, J. B. Liu and C. K. Law, "Structure Response of Counterflow Diffusion Flames to Strain Rate Variation," *Combust. 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] J. Buckmaster, "Edge-flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, pp. 435~475.
- [4] H. G. Im and J. H. Chen, "Effects of Flow Strain on Triple Flame Propagation," *Combust. Flame*, Vol. 126, pp. 1384~1392
- [5] R. W. Thatcher and J. W. Dold, "Edges of Flame that do not exist : Flame Edge Dynamics in a Non-Premixed Counterflow ," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 4, pp.435~457.
- [6] M. L. Shay and P. D. Ronney, "Nonpremixed Edge Flames in Spatially Varying Straining Flows," *Combust. Flame*, Vol. 112, pp. 171~180.
- [7] A. Linan, " 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 and S. H. chung, "Twin Jet Counterflow 버너에서의 확산 화염," *2002년도추계학술대회논문집*.
- [9] S. H. Sohrab, Z. Y. Ye and C. K. Law, "An Experimental Investigation on Flame Interaction and the Existence of Negative Flame Speed ," *Twentieth Symposium (International) on combustion*, The Combustion Institute, pp. 1957~1965.
- [10] S. H. chung, J. S. Kim and C. K. Law, "Extinction of Interacting Premixed Flame; Theory and Experimental Comparisons," *Twentieth Symposium (International) on combustion*, The Combustion Institute, pp. 1845~1851.