

메탄 과농-희박 예혼합화염의 안정화 메커니즘

이원남* · 서동규**

Stabilizing Mechanism for Methane Rich-Lean Flame

Wonnam Lee, Dongkyu Seo

ABSTRACT

Recent studies of a triple flame suggested that the presence of triple point (triple line in this planar configuration) could explain the mechanisms of stable fuel-lean premixed flames with equivalence ratio lower than the flammability limit. In the present study, for better understanding of the stability mechanisms of fuel rich-lean premixed flames, the fuel-rich flames were replaced with hot coils that will provide heat flux into the fuel-lean flames. It is found that the fuel-lean premixed flames could be stabilized without any triple point (triple line); however, the equivalence ratio limit for stable fuel-lean flame in this case is higher than that of the present work with the presence of fuel-rich flames. These results demonstrate that heat flux coming from fuel-rich flames should be considered in order to properly understand the roll of a triple flame for stable fuel rich-lean flames.

Key Words : Flame stability, Slot burner, Premixed flame, Triple flame.

기 호 설 명

Φ_{rich}	연료 과농 화염의 당량비	Φ_{lean}	연료 희박 화염의 당량비
U_{lean}	연료 희박 화염의 노즐 출구 평균 속도		

1. 서 론

희박연소를 위한 희박화염의 안정화 방법은 오랫동안 연구되어 왔다. 특히 Phillips[1]가 삼중화염에 대해서 보고한 이후 과농-희박화염 구조에 의한 안정화 방법이 연구되어 왔는데, 최근에는 Lee and Chung [2]이 부상화염의 특성을 삼중화염의 메커니즘으로 연구하였고, Puri 등 [3-6]은 Wolfhard Parker 형태의 슬롯 버너를 이용하여 과농-희박화염에 존재하는 비예혼합화염 지역을 확인하고 온도과 속도측정 등을 통하여 라디칼

확산과 전달된 열량에 의한 희박화염의 안정화 메커니즘을 설명하였다. Sandip 등[7]은 라운드 제트에서 부상 높이를 계산함으로써 삼중화염에 대하여 좀더 진보된 이론식을 제시하였다. 그러나 위의 연구들은 희박화염의 존재에 대해서 관심이 있을 뿐 연료가 모두 산화 되는지에 대해서는 관심이 없었다.

이원남 등[8]은 희박화염의 연료가 모두 산화되는 조건을 알아볼 수 있도록 고안된 슬롯버너를 이용하여 연료과농예혼합화염(이하 과농화염)을 통해 안정화 시킨 삼중화염 구조의 연료희박예혼합화염(이하 희박화염)의 안정성에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 과농화염을 통하여 희박화염의 안정화 한계 당량비(이하 희박한계 당량비)를 크게 낮출 수 있어서 총괄 당량비 0.6 이하에서 안정화가 가능함을 확인 하였다. 또한

* 단국대학교 기계공학과

† 연락저자, E-mail : wlee@dku.edu

** 단국대학교 대학원 기계공학과

과농화염의 연료유량을 변화시키면서 당량비를 일정하게 했을 경우의 실험과 당량비를 변화시키면서 연료유량을 변화시키지 않은 경우의 실험을 통해서 희박 화염의 안정화에 미치는 과농화염의 영향은 당량비에 의한 화학적 효과보다 공급 열량에 의한 열적 효과가 크다는 것을 암시한 바 있다.

삼중화염에 대한 지금까지의 연구는 무엇이 안정화를 시키는가에 관심이 있었는데 무엇이 얼마나 안정화 시키는가에 대해서는 보고된 연구가 충분하지 않다. 따라서 이 실험에서는 과농화염의 역할 중 열적 효과와 다른 효과로 나누는 실험을 수행하여 과농-희박 화염의 안정화 메커니즘 중 열적 효과의 크기를 알아보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

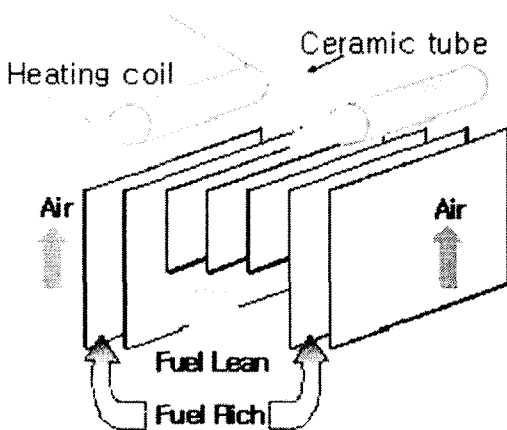


Fig. 1 Schematic of slot nozzles and heating coils

실험에 사용된 버너는 슬롯버너로써 Fig. 1은 슬롯버너 노즐의 기본 구조와 실험에 사용된 열선의 배치를 보여주고 있다. 노즐에 사용된 재질은 스테인레스 스틸 판(stainless steel plate)으로 열변형과 가공할 때의 변형을 막을 수 있도록 1 mm 두께로 사용하였다. 노즐과 노즐 사이의 간격 비율(opening ratio)을 1:1로 맞추어서 노즐 사이의 간격은 1 mm 이고 가로 길이는 길이 방향으로 속도분포에 변화가 없는 충분한 길이인 50 mm로 선정했다. 노즐의 깊이는 구조상 모든 슬롯에서 같게 할 수 없기 때문에 완전 발달된 층류 흐름을 만들 수 있는 길이를 선정하여 서로 다른 슬롯에서도 유속이 같으면 속도 분포가 같도록 설계하였다. 노즐 내부의 4개 슬롯에서 희박 예혼합기를 공급하고 그에 인접한 슬롯에서

과농 예혼합기를 공급하도록 되어있는데 혼합기가 버너몸체에 들어갈 때 포물선형 속도 분포를 막기 위해 흐름 완충제(flow buffer)를 설치하였으며 다시 직경 2 mm의 유리구슬 틈새를 통과하면서 동압은 소멸하고 정압만을 갖게 하여 압력차에 의한 균일한 속도 분포로 노즐에 들어가게 하였다.

실험에 사용된 열선(Kanthal LT wire)은 직경 0.32 mm, 저항 14.8 Ω /m인 철크롬선(Cr 20 %, Al 4 %, Fe 76 %)으로써 이것을 외경 0.9 mm인 세라믹 튜브에 감아서 만들었다. 세라믹 튜브는 열선이 처지거나 변형되는 것을 방지한다. 제작한 열선을 슬롯버너의 과농화염 자리에 노즐로부터 4 mm 되는 높이에 위치시키고 두께 1.5 mm인 구리판에 거치시켰다. Fig. 2는 이러한 개념으로 구성된 실제 장치를 보여준다.

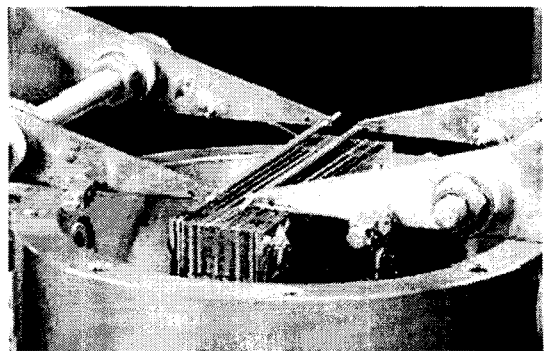


Fig. 2 Slot burner with heating coils

노즐로 공급되는 연료와 산화제의 유량 제어에는 교정된 4개의 질량흐름제어기(MFC, MKS 및 BROOKS)와 readout 장치(LOKAS, Gmate2000)가 사용되었다. 이 실험에 사용한 연료는 메탄(CH_4 , 순도 99.9% 이상)이고, 산화제는 압축공기를 제습기와 필터를 이용하여 수분과 먼지를 제거하여 사용하였다.

열선에서 원하는 열량을 일정하게 발생시키기 위해서 가변변압기(slidacs)를 이용하여 열선에 전류를 공급했다. 전압은 HP34970a data acquisition unit을 이용하여 측정하였고 전류는 YOKOGAWA 7541 digital multimeter를 이용하여 실시간으로 관찰하면서 원하는 열량으로 조절하였다.

Figure 3은 열선위에 안정된 희박화염과 같이 열린 희박화염을 보여준다. 화염의 구조는 과농화염으로 희박화염을 안정화시켰을 때[8]와 매우 유사하며 안정적으로 형성된 2차원 화염을 보여준다.

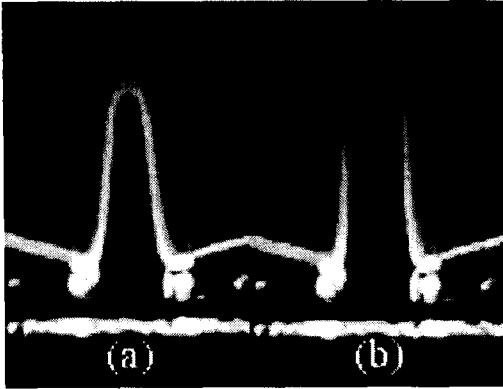


Fig. 3 Typical lean flames on heating coils

- (a) stable
- (b) flame-tip-open

2.2 실험 방법

실험은 연료 또는 열선으로 열량을 외부 슬롯에서 공급하고 내부 슬롯에 안정한 희박화염을 Fig. 3의 (a)처럼 형성한 후, 연료량을 고정된 상태에서 공기 유량을 증가시켜서 Fig. 3의 (b)처럼 희박화염의 끝이 열리는(flame-tip-open) 조건을 알아보았다.

Table 1 Heat flux supplied by heating coils (current) or/and fuel rich flames (fuel)

Case	Current (W)	Fuel (W)
1	0~120	x
2	x	0~120
3	60	0~120
4	0~120	60
5**	x	0~209

* Heat flux for 1 slot

** No heating coil

첫 번째 조건은 열선으로 공급한 전류만으로 열량을 공급한 경우이고, 두 번째 조건은 연료로 화염을 형성하여 열량을 공급한 경우이다. 세 번째와 네 번째 조건은 각각 열선에 일정한 전류를 공급한 상태에서 연료를 첨가하여 과농화염을 형성하는 경우와 연료를 일정하게 공급한 상태에서 전류를 첨가하는 경우이다. 그리고 다섯 번째 조건은 열선이 없는 상태에서 과농화염과 희박 화염만으로 실험한 경우이다. 모든 조건은 과농화염이 위치한 외부의 한 슬롯 기준이고 연료 유량

은 동일한 열방출량(저위발열량 기준)으로 환산하여 W로 표기하였다. 연료를 사용한 실험에서 당량비는 모두 1.6 으로 맞추었다. Table 1은 실험조건을 표로 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

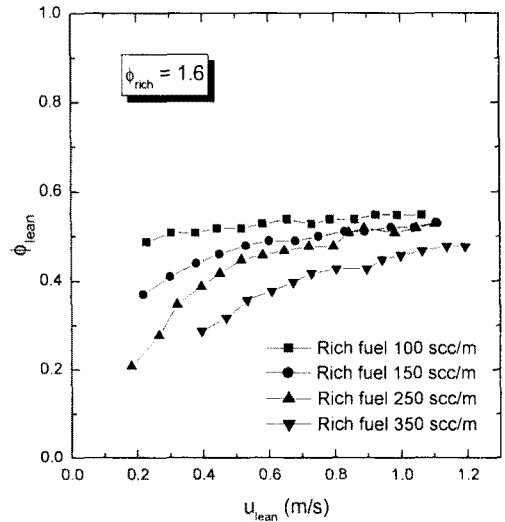


Fig. 4 Effect of fuel flow rate in fuel-rich flames

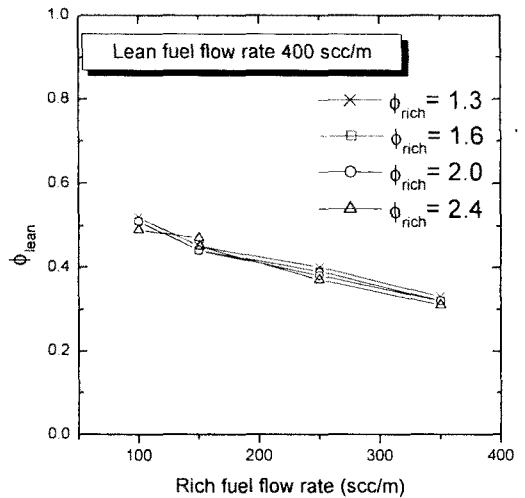


Fig. 5 Effect of equivalence ratio in fuel-rich flames

3.1 과농화염에 의한 안정화 특성 변화

Figure 4는 과농화염의 당량비를 1.6으로 유지하고 연료유량을 1 슬롯 당 100, 150, 250, 350 scc/m 으로 증가 시킨 경우 희박 한계 당량비와 출구 속도를 나타낸 것이다. 이 결과에서 과농화염의 연료유량을 증가시키면 희박 한계 당량비가 낮아져서 안정화 범위가 넓어지는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5의 결과는 연료유량 증가에 의하여 희박 한계 당량비가 약 30 % 낮아지지만 당량비 변화에 의해서는 약 5 % 가량 변화하는 것으로 나타나 당량비 변화에 의한 희박 한계 당량비의 변화는 적다는 것을 알 수 있다. 연료유량을 증가 시키면 화염의 크기가 커지고 열방출량이 증가한다. 그러나 당량비를 변화 시키면 열방출량은 변화하지 않는다.

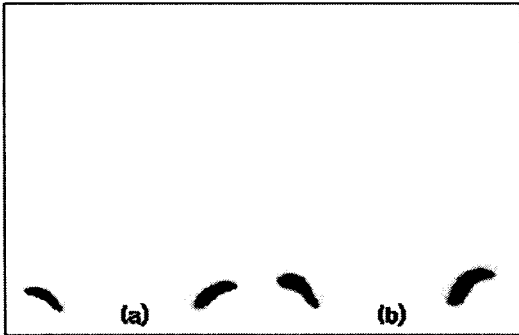


Fig. 5 C₂ Spontaneous emissions for varying rich flames equivalence ratio
 (a) $\Phi_{rich} = 1.5$
 (b) $\Phi_{rich} = 2.0$

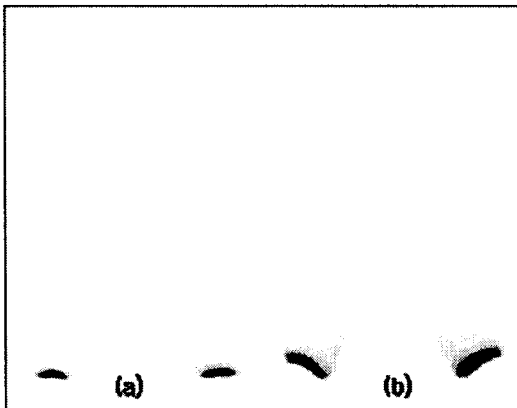


Fig. 6 C₂ Spontaneous emissions for varying rich fuel flow rates
 (a) 150 scc/m
 (b) 250 scc/m

Figure 6은 희박화염의 조건과 과농화염의 연료유량을 고정된 채 과농화염에 공기 유량을 늘려서 당량비를 변화시킨 경우이고 Fig. 7은 희박 화염의 조건과 과농화염의 당량비를 고정하면서 연료유량과 공기유량을 증가시킨 경우의 C₂ 라디칼의 자발광 이미지이다. Fig. 6에서는 당량비가 변화하면서 화염의 모양이 변하지만 자발광의 강도(intensity)는 별 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7에서는 과농화염에서 C₂ 라디칼의 분포와 강도가 모두 상승되었음을 알 수 있다. C₂는 열방출률과 반응지역을 나타내는 훌륭한 지표라고 알려져 있다[4]. 따라서 당량비 변화보다는 연료유량을 증가 시키는 경우 열과 라디칼의 확산이 모두 잘 이루어졌다고 생각할 수 있다.

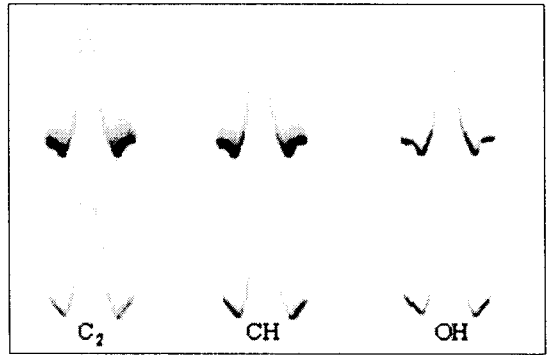


Fig. 7 Spontaneous emissions of a fuel rich-lean (upper) and fuel lean-lean (lower) premixed flame.

화염의 끝이 열리고 닫히는 것은 반응률(reaction rate)로 설명할 수 있다. 반응률이 작아지면 화염 끝에서 반응이 지속되지 못하고 연료는 날아가 버린다. Fig. 8은 과농-희박 화염과 희박-희박 화염의 라디칼 이미지를 비교한 것이다. 과농화염의 경우 희박화염에 비해서 삼중점 부근에서 라디칼이 다량으로 분포하며 이것이 화염을 붙잡아(anchor)주는 역할을 하여 결국 화염 끝에까지 반응률을 상승 시키는 역할을 한다.

3.2 열선에 의한 안정화 특성 변화

열선을 이용하여 열량만으로도 희박화염은 안정화가 가능하였다. Fig. 9에서 case 2와 case 5는 매우 흡사한 경향을 보이는데 case 2는 열선을 장착하되 전력을 공급하지 않고 과농화염을 형성 시킨 경우이고 case 5는 열선을 완전히 제거하고 과농화염을 형성시킨 경우이다. 두 경우 모두 연료공급에 의한 화염으로 안정화 시켰지만

안정화 특성에 차이가 나는 것은 열선에 의한 유동장 변화와 열전달 때문이다. 열선의 위치는 회박화염의 특성에 매우 민감하게 작용하기 때문에 슬롯버너에 장착하는 위치가 상당히 중요하다. 본 실험에서는 열선 없이 연료만 공급한 경우(no coils)와 열선은 있지만 전류를 공급하지 않고 연료를 공급한 경우(cold coils)가 같은 경향을 갖는 위치에 열선을 장착했다. 따라서 본 논문에서는 절대적인 값보다 상대적인 경향의 변화를 중심으로 회박화염의 특성을 알아보았다.

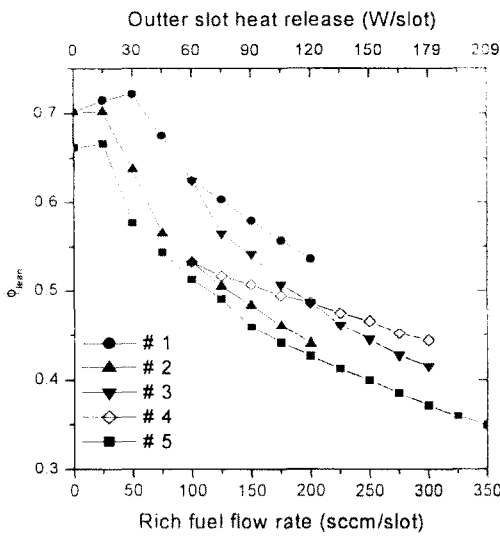


Fig. 8 Stabilities of lean premixed flames for adding heat release

Figure 10은 Fig. 9의 관심영역을 재구성 한 것이다. 연료공급량을 100 % 증가 시켜서 회박화염을 안정화 시켰을 때 case 1과 case 3의 저열량 영역에서 회박 한계 당량비는 22 % 가량 낮아졌고 공급 열량을 100 % 증가 시킨 경우는 회박 한계 당량비가 14 % 가량 낮아졌다. 마찬가지로 case 4와 case 2의 저열량 영역에서 연료유량 증가에 의한 회박한계 당량비 변화는 17 %이고 열량 공급 증가에 의한 회박 한계 당량비 변화는 9 %, case 4와 case 3의 고열량 부근에서는 연료공급에 의한 회박 한계 당량비 변화는 10%, 열량 공급 증가에 의한 것은 6 % 가량으로 나타났다. 따라서 화염의 안정화에 기여하는 열량만의 효과는 안정화에 미치는 모든 영향중 50 % 가량을 차지하는 아주 큰 역할을 하는 것으로 관찰 되었다.

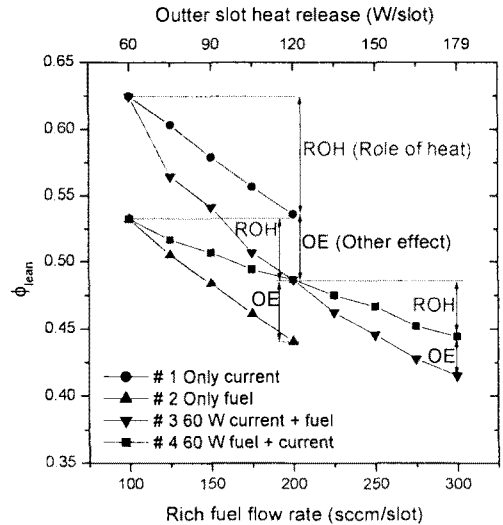


Fig. 10 Stability role of heat and chemistry

4. 결론

슬롯버너를 이용하여 과농화염으로 회박화염을 안정화 시키듯이 열선으로 열량을 공급하여 회박화염의 화염 끝이 열리는 특성을 실험적으로 알아보았다. C₂ 자발광 이미지를 획득한 결과 과농화염의 당량비를 증가시키는 것은 화염의 모양에만 영향을 주었으나 연료유량을 증가시키면 라디칼과 열발생 모두 증가하여 회박화염을 안정시키는 중요한 두 가지 메커니즘이 존재함을 확인할 수 있었다.

회박화염은 과농화염으로 안정화 시킬 때와 마찬가지로 열선으로 열량을 공급해도 안정화 범위가 넓어지는 효과가 있었다. 열량 공급에 의한 안정화 범위의 향상은 연료 공급의 경우에 비교해서 약 50 % 정도로 나타났다. 따라서 본 실험에 사용된 슬롯버너에서는 과농화염으로 회박화염을 안정화 시키는 메커니즘은 열량에 의한 것과 화학적 효과로 나눌 때 둘 다 비슷한 크기의 기여도를 갖는 것으로 판단되었다.

참고문헌

[1] Phillips H., "Flame in a Buoyant Methane Layer", Tenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1965, pp. 1277-1283

- [2] B. J. Lee and S. H. Chung, "Stabilization of Lifted Tribranched Flames in a Laminar Nonpremixed Jet", *Combust. and Flame*, 109, 1997, pp. 163-172
- [3] Azzoni, R., Ratti, S., Aggarwal, S. K., and Puri, I. K., "The Structure of Triple Flames Stabilized on a Slot Burner", *Combust. and Flame*, 119, 1999, pp. 23-40
- [4] Xudong Xiao, Chun W. Choi, and Ishwar K. Puri, "Temperature Measurements in Steady Two-Dimensional Partially Premixed Flames Using Laser Interferometric Holography", *Combust. and Flame*, 120, 2000, pp. 318-332
- [5] Chun W. Choi and Ishwar K. Puri "Flame Stretch Effects on Partially Premixed Flames", *Combust. and Flame*, 123, 2000, pp. 119-139
- [6] Ishwar K. Puri, Suresh K. Aggarwal, Stefano Ratti, and Riccardo Azzoni, "On the Similitude Between Lifted and Burner-Stabilized Triple Flames: A Numerical and Experimental Investigation", *Combust. and Flame*, 124, 2001, pp. 311-325
- [7] Sandip Ghosal and Luc Vervisch, "Stability Diagram for Lift-Off and Blowout of a Round Jet Laminar Diffusion Flame", *Combust. and Flame*, 123, 2001, pp. 646-655
- [8] 이원남, 서동규, "슬롯버너를 이용한 예혼합 화염의 안정성에 관한 연구", 제23회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 2001, pp. 97-103