

# 슬롯버너를 이용한 예혼합화염의 안정성에 관한 연구

이원남\* · 서동규\*\*

## Study on Flame Stability Using a Slot Burner

Wonnam Lee, Dong Kyu Seo

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

### Abstract

The characteristics of flame stability have been studied experimentally using a slot burner. The blowout conditions of a fuel-lean premixed laminar flame, which is located in the middle of fuel-rich premixed laminar flames, are identified for propane, ethylene, and methane flames. The fuel-rich flames could stabilize the fuel-lean flame for the equivalence ratio as low as 0.2. The laminar flame speed along with the heat release rate is likely to be the important factor in stabilizing a fuel-lean flame. The increase of heat release rate on a fuel-rich flame lowers the equivalence ratio limit for the stable fuel-lean flames. The stability of fuel-lean flames, however, was not sensitive to the equivalence ratio of a fuel-rich flame.

### 1. 서론

연소과정에서 발생하는 질소산화물(NO<sub>x</sub>)을 줄이기 위한 연구는 자동차 엔진에서부터 산업용 보일러에 이르기까지 광범위한 분야에서 진행되고 있다. 이와 NO<sub>x</sub>의 저감을 위한 연구들은 NO 생성 메커니즘을 바탕으로 수행되고 있으며, 특히 가솔린, LPG, 도시가스 등을 사용하는 연소장치에서의 NO<sub>x</sub> 저감을 위한

연구는 thermal NO와 prompt NO에 대한 지식을 기초로 하고 있다. 이는 기체 또는 액체 상태의 탄화수소 연료에는 질소성분이 거의 포함되지 않으므로 연료로 공급된 질소의 산화 메커니즘은 무시할 수 있기 때문이다. 현재까지의 연구 결과로 예혼합화염에서의 NO 생성은 연료과농인 지역에서는 thermal NO와 prompt NO가 모두 중요하며, 희박연소과정에서는 thermal NO가 중요하게 된다고 알려져 있다.<sup>(1) (4)</sup> 이에 따라 초희박연소를 이용하는 엔진, 층상 구조의 연소장치 등이 도입되고 있으며, 이때 희

\* 단국대학교 기계공학과

\*\* 단국대학교 대학원

박연소를 이용하여 전체 NOx 배출량을 줄이고 있다.

회박연소의 경우 당량비의 감소에 따라 연소반응지역의 온도가 낮아지게 되어 thermal NO 메커니즘을 통하여 생성되는 NO를 억제하게 되므로 낮은 당량비에서의 안정된 화염형성이 중요하게 된다. 그러나 탄화수소 계열의 연료는 대기압에서 공기와 혼합될 경우 대부분 당량비 0.5 전후의 가연한계를 갖고 있고 층류화염전파 속도도 0.5 m/s 내외의 값을 갖고 있어 안정된 회박화염을 형성하기가 쉽지 않다.

Azzoni 등<sup>(5)</sup>은 슬롯버너에서 안정화시킨 삼중화염의 구조에 관한 연구를 수행하여 중앙의 과농화염에 의하여 외부에 형성되는 회박화염의 특성을 알아보았다. 이들은 과농화염이 존재하는 경우 당량비 0.33-0.39에서 회박화염이 존재하며 이는 과농화염으로부터의 C<sub>2</sub> 화학종들의 확산이 회박화염의 특성에 영향을 주고 있음을 보여주었다. 그러나 이 실험에서 회박화염은 일부 과농화염에 부착되어 삼중화염의 구조를 형성하고 있으나 외부에서는 화염이 열려있어 공급된 연료가 모두 산화 과정을 겪는지 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 당량비가 매우 낮은 조건에서 회박화염이 안정적으로 형성될 수 있는지를 알아보기 위하여, 2 개의 과농화염을 형성하고 그 사이에 회박화염을 위치시켜서 완전한 화염을 형성하도록 하였다. 특히 과농화염과 회박화염을 변화시키면서 회박화염의 날림(blowout)이 발생하는 조건에 대한 실험을 수행하였으며, 회박화염의 날림이 억제되는 메커니즘을 알아보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

회박 예혼합화염(회박화염)의 안정성에 대한 과농 예혼합화염(과농화염)의 영향을 알아보기 위한 실험에는 슬롯버너가 사용되었다. Fig. 1은 슬롯버너 노즐의 기본적인 구조를 보여주고 있다. 이 버너의 노즐은 두께 1mm의 스테인레스스틸 판을 겹쳐놓은 형상으로 중앙에 위치한 4개의 슬롯을 통하여 회박혼합기가 공급되고, 양옆의 슬롯으로는 과농혼합기가 공급되어 Wolhard-Parker 형태의 2차원 화염을 형성하게 된다. 이때 화염을 안정화시키기 위하여 과농혼합기 외부의 슬롯으로 shield 공기를 공급하였다.

Figure 2는 길이 50 mm 폭 1 mm의 슬롯이 반복되어 접친 구조를 갖고 있는 슬롯버너의 노즐을 보여준다. 이때 노즐에 공급되는 연료와 공기는 유리구슬(glass bead)과 스크린을 통과하며 충분히 혼합되어 균일한 조성을 갖도록 버너의 내부를 구성하였다. 이 때 유리구슬

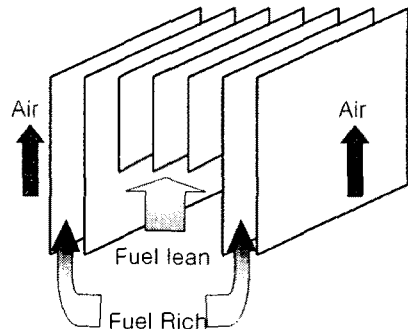


Fig. 1 Schematic of slot nozzles.

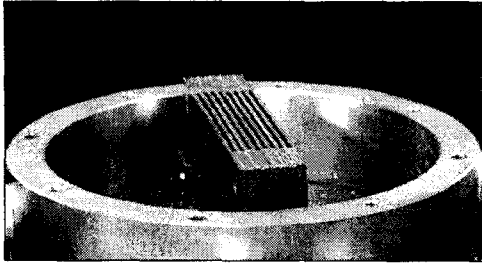


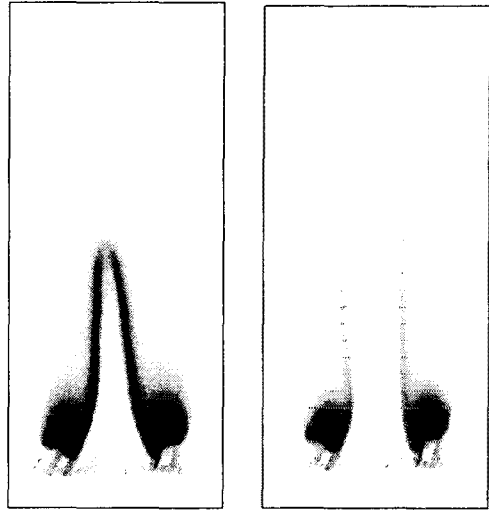
Fig. 2 Slot burner.



Fig. 3 Lean premixed flame stabilized by a couple of rich premixed flames

과 스크린은 연료와 공기의 혼합뿐만 아니라 노즐출구로 공급되는 혼합기의 유속이 균일하게 하는 역할도 하게 된다.

노즐로 공급되는 연료와 공기의 유량 제어에는 4 개의 질량흐름제어기(MFC, MKS 및 Brooks)와 readout 장치(LOKAS/Gmate2000)가 사용되었다. 본 실험에 사용된 연료는 프로판(순도 99.5%), 에틸렌(순도 99.5%), 메탄(순도 99.9%)이며, 과농화염과 희박화염이 동일한 연료로 형성되도록 하였다. Fig. 3 은 외부 슬롯에 과농화염이 내부의 슬롯에는 희박화염이 형성된 전형적인 안정



(a) (b)

Fig. 4 Typical lean flames (a) attached and (b) blown-out.

적인 과농/희박화염을 보여주며, 비교적 안정적인 2 차원 화염이 형성되는 것을 알 수 있다.

실험은 외부에 형성된 2 개의 과농화염을 일정하게 유지하며, 가운데에 형성된 희박화염의 당량비와 유속을 변화시켜 화염의 날림이 발생하는 한계조건을 알아보는 방법으로 진행하였다. Fig. 4는 희박화염이 과농화염에 부착되어 안정되어있는 경우(a)와 화염의 날림이 발생하는 경우(b)의 예를 보여주고 있으며, 화염의 날림이 발생하는 한계조건에서는 화염 부착/날림의 전환이 비교적 급격하게 이루어졌다.

첫 번째 실험은 연료를 프로판, 에틸렌, 메탄으로 변경하며 수행되었다. 이때 과농화염에 공급되는 혼합기는 당량비 2.0으로 일정하고, 300 J/s의 동일한 열 방출율(저위발열량 기준)을 갖도록 Table 1과 같이 설정하였다. 두 번째

Table 1 Experimental condition 1.  
(rich mixture flow rate)

Fuel	Fuel (sccm)	Air (sccm)	EQ ratio
CH <sub>4</sub>	500	2384	2.0
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	303	2165	2.0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	196	2336	2.0

Table 2 Experimental condition 2.  
(rich mixture flow rate)

Case	CH <sub>4</sub> (sccm)	Air (sccm)	EQ ratio
1	500	0	$\infty$
2	0	2000	0
3	500	2004	2.38
4	500	3002	1.59
5	300	2004	1.43
6	500	2384	2.0

실험은 메탄을 연료로 사용하였으며, 과농화염의 당량비와 연료유량 Table 2와 같이 변화시켰다.

### 3. 결과 및 고찰

과농 예혼합화염(과농화염)은 희박 예혼합화염(희박화염)을 과농화염에 부착시켜 희박화염의 날림(blowout) 현상의 발생을 억제하였다. 이와 같은 희박화염 날림현상의 억제 특성은 연료의 종류와 과농화염 조건에 따라 변화하였다.

Figure 5는 프로판, 에틸렌 및 메탄 화염에서 양단에 과농화염이 존재하는 조건에서, 희박화염에 공급되는 연료의 유량에 따른 날림이 발생하는 희박화염의

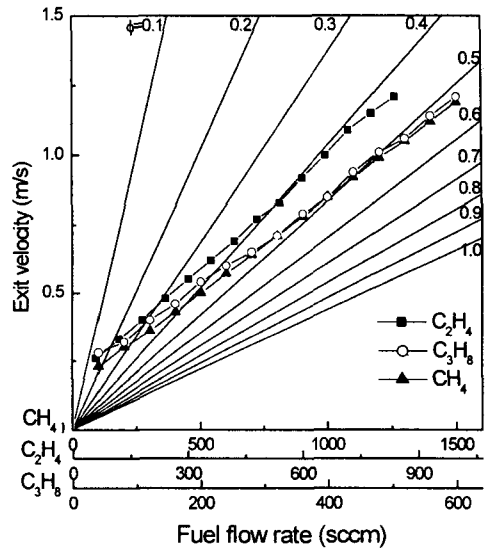


Fig. 5 Blowout conditions of lean flames for different fuel.

유속과 당량비를 보여주고 있다. 이 때 과농화염의 연료 유량은 프로판, 3.27 scc/s, 에틸렌, 5.05 scc/s, 메탄 8.33 scc/s 이므로, 모든 과농화염은 당량비가 2.0으로 일정하고 300 J/s의 동일한 열방출율(저위발열량 기준)을 갖는다. 대기압 상온에서 가연한계 당량비는 프로판 0.49, 에틸렌 0.56, 메탄 0.46 이므로, 과농화염의 작용으로 희박화염의 날림이 효과적으로 억제되고, 가연한계 값보다 낮은 당량비에서도 안정된 화염이 형성되는 것을 알 수 있다. 에틸렌의 경우 당량비가 0.45 인 희박화염이 노즐 출구속도 1.25 m/s 에서도 과농화염에 부착된 안정적인 화염이 관찰되었다. 희박화염에 공급되는 연료의 유량이 줄어들면 노즐 출구 속도가 느려지고, 희박화염이 과농화염에 안정적으로 부착되는 한계 당량비가 더욱 낮아지는 것을 알 수 있다. 연료에 관계 없이 희박 예혼합화염의 출구속도가

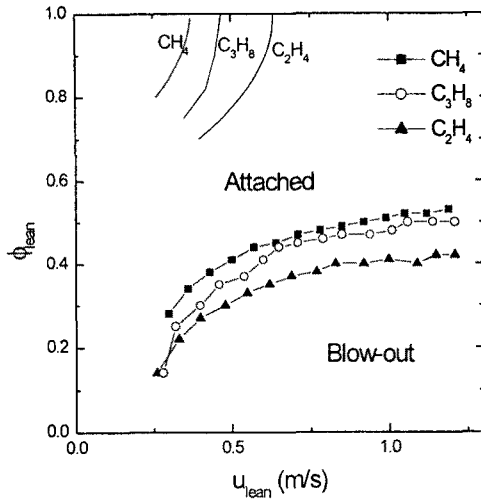


Fig. 6 Stability of lean premixed flames for different fuel.

0.25 m/s 이하일 경우 당량비 0.2 이하에서도 화염의 날림이 발생하지 않았다.

Figure 6은 희박화염의 노즐 출구속도에 따른 날림이 발생하는 희박화염의 당량비를 보여준다. 대부분의 영역에서 에틸렌 희박화염이 가장 안정적이었으며 메탄 희박화염에서 화염의 날림이 발생하는 당량비가 가장 크게 나타났다. 이와 같은 차이는 연료간의 층류화염전파속도의 차이로 설명될 수 있다. 대기압에서 공기와 혼합된 예혼합화염의 층류화염전파속도는 Fig. 6에서 나타낸 것과 같이 당량비가 1.0 인 경우, 에틸렌이 0.67 m/s으로 가장 빠르고, 프로판 0.44 m/s, 메탄 0.40 m/s의 순서로 느려지며, 당량비의 감소에 따라 더욱 느려지게 된다. 이는 희박화염의 날림이 발생하는 당량비가 에틸렌화염에서 가장 낮고 메탄화염에서 가장 높게 관찰된 것과 경향이 같으며, 층류화염전파속도와 희박화염의 날림 특성이 관련되어 있다는 것을

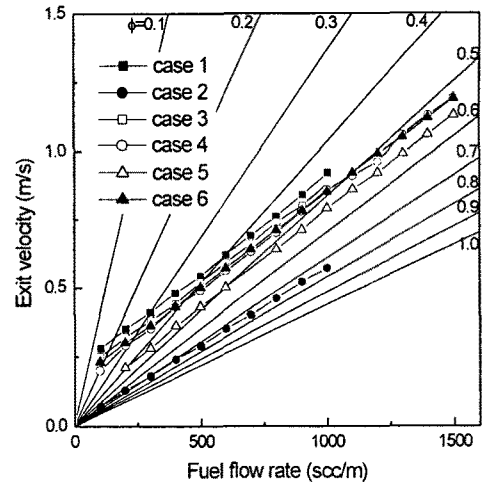


Fig. 7 Blowout conditions for lean premixed flames.

의미한다고 할 수 있다.

Figure 7은 메탄 예혼합화염에서 과농화염 조건에 따른 희박화염의 날림 특성을 보여준다. 과농화염에 대한 메탄 공급 유량이 8.33 scc/s(500 scc/m)로 일정한 case 1, 3, 4, 6의 경우, 희박화염의 날림이 발생하는 당량비가 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 이때 과농화염의 당량비는  $\infty$  (case 1)에서 1.59 (case 6)로 넓은 범위에서 변화했으나 열방출율은 일정하였다. 그러나 과농화염의 메탄 유량이 5.0 scc/s(300 scc/m)이고 당량비가 1.43 인 경우(case 5) 열방출량은 180 J/s로 감소하였으며 메탄 유량이 500 scc/m인 경우에 비하여 희박화염의 날림이 더 높은 당량비에서 발생하였다. 특히 과농화염이 순수 공기로 대체된 case 2의 경우 (열방출률 0 J/s), 희박화염의 날림은 메탄/공기 혼합기의 가연한계인 0.46보다 훨씬 높은 당량비인 0.7-0.8에서 발생하였다. 따라서 과농화염에 의한

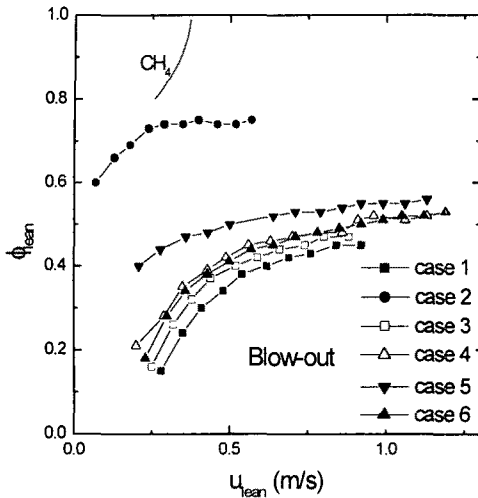


Fig. 8 Stability of lean methane flames.

희박화염의 날림 억제 특성은 과농화염의 열방출률과 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

Figure 8은 메탄화염에서 희박화염의 노즐 출구속도에 따른 날림의 발생 특성을 보여주고 있다. 과농화염이 존재하지 않는 경우, 노즐 출구 속도가 느리면 희박화염의 형성은 층류화염전파속도에 의존하는 것을 알 수 있다. 노즐 출구속도가 증가하면 재순환 영역이 발달하게 되어 화염이 안정되는 범위가 약간 확대되었다. 그러나 과농화염이 존재하는 경우에는 화염의 날림이 발생하지 않는 안정된 영역이 매우 넓어지며 따라서 낮은 당량비를 갖는 희박화염을 유지할 수 있다. 이와 같은 희박화염의 날림의 억제는 과농화염으로부터 공급되는 열에너지의 영향으로 판단된다.

혼합기의 온도가 증가되면 화염전파속도는 증가하게 된다. Dugger 등<sup>(6)</sup>은 당량비가 1.0인 메탄/공기 예혼합화염의 경

우 300 K에서 0.4 m/s인 화염전파속도는 온도가 400 K로 증가하면 0.6 m/s, 500 K와 600 K로 증가하면 각각 0.9 m/s와 1.2 m/s로 증가한다고 하였다. 그러므로 과농화염에서 방출되는 열에너지는 희박화염의 화염전파 속도를 증가시키고 결과적으로 희박화염의 날림을 억제한다고 생각되며, 실험적 결과와 일관성을 보여주었다. 과농화염의 열방출률이 증가하면 화염의 날림이 더 효과적으로 억제되었으며, 이때 과농화염의 당량비 변화는 희박화염의 날림 특성에 큰 영향을 미치지 않았다.

#### 4. 결론

슬롯버너를 이용하여 과농화염이 희박화염의 날림(blowout)을 억제하는 특성을 실험적으로 알아보았다.

과농화염은 희박화염을 과농화염에 부착시켜 희박화염의 날림 현상의 발생을 억제하였다. 동일한 유속에서 화염의 날림이 발생하는 당량비는 메탄, 프로판, 에틸렌의 순으로 크게 나타났으며, 층류화염전파속도와 희박화염의 날림 특성이 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 메탄 예혼합 화염의 경우, 과농화염의 열방출률의 증가는 화염의 날림을 더 효과적으로 억제하지만 당량비의 증가의 영향은 크게 나타나지 않았다.

#### 참고문헌

- (1) Dupont, V. and Williams, M., Combust. and Flame, 114, 103-118, 1998.
- (2) Belvins, L. G. and Gore, J.,

- Combust. and Flame, 116, 546-566,  
1999.
- (3) 이원남, 이용재, 한국연소학회지, 4,  
2, 63-74, 1999.
- (4) Nishioka, M. et. al, Combust. and  
Flame, 98, 127-138, 1994.
- (5) Azzoni, R. et. al, Combust. and  
Flame, 119, 23-40, 1999.
- (6) Dugger, G. L. et al., Ind. and  
Engg. Chem. 47, 114, 1955.