

# 성층화된 예혼합화염에 대한 희석제 첨가의 영향

안태국\* · 이원남\*\*

## Fuel Dilution Effects for Stratified Premixed Flames

Taekook Ahn\*, Wonnam Lee\*\*

### ABSTRACT

The inert gas dilution effect for the stability of a stratified propane premixed flame has been experimentally studied. The addition of inert gases to a stratified premixed flame, which used to be very stable without dilution, makes a flame unstable. The lower equivalence ratio on the outer premixed flame and the lower fuel flow rate through the inner nozzle were observed to be the more stable conditions for the stratified premixed flame with nitrogen or argon dilution. It has been interpreted with the flame structure change such as shift of stoichiometric ratio region in a flame.

**Key Words** : Stratified premixed flame, Dilution effect, Flame stability

기체상 연료가 연소하는 과정에서 불활성기체의 첨가는 화염의 안정성에 영향을 미친다. 일반적으로 예혼합화염에 불활성기체가 첨가되면 화염이 안정되지 못하고 진동을 하거나 날립 현상이 발생한다. 따라서 파일릿 화염이나 부분예혼합화염 등을 이용하여 화염을 안정시켜야한다. Fig. 1은 불활성기체가 첨가된 경우의 예혼합 화염의 화염전파속도의 변화<sup>(1)</sup>를 보여주고 있다. 미연혼합기에 포함되는 불활성기체가 증가하면 화염전파속도가 줄어들어 화염의 날립이 발생하게 된다.

선박용 VOC 회수장치(SVRU)로 회수되는 유증기에는 일반적으로 질소 또는 이산화탄소와 같은 불활성 기체가 포함되며 이를 안정적으로 연소시키기 위해서는 불활성기체가 포함된 화염의 안정성에 대한 연구가 필요하다. 성층화된 예혼합화염이 형성되면 희박 예혼합 조건에서도 매우 안정적인 화염을 형성할 수 있음을 알 수 있다.<sup>(2)</sup> 따라서 본 연구에서는 질소와 아르곤을 사용하여 예혼합 혼합기에 포함되는 불활성 기체가 성층화된 예혼합화염의 안정성에 미치는 영향을 알아보았다.

실험에는 성층화된 예혼합화염을 형성할 수 있는 이중동축류 버너가 사용되었다. Fig. 2는 이중동축류 버너의 구조와 내부노즐에 연료를 공급하

였을 때 형성되는 화염을 보여주고 있다. 외부노즐로 프로판, 공기, 불활성기체가 공급되고 내부노즐로 소량의 프로판이 공급되었다. 이 때 공급되는 연료와 혼합기의 당량비 및 질소의 양에 따라 여러 가지 다른 형태의 화염이 형성된다. Fig. 3은 외부노즐로 프로판/공기 예혼합기가 2.3 m/s의 노즐 출구속도로 공급되고, 내부 노즐로 공급되는 프로판의 양을 10.1 sccm에서 41.9 sccm까지 증가시키는 과정에서 형성되는 화염을 보여주고 있다. 내부노즐의 연료량이 증가하면 내부에 형성된 파일릿화염이 사라지고 안정된 성층화된 예혼합화염이 발달하는 것<sup>(2)</sup>을 알 수 있다.

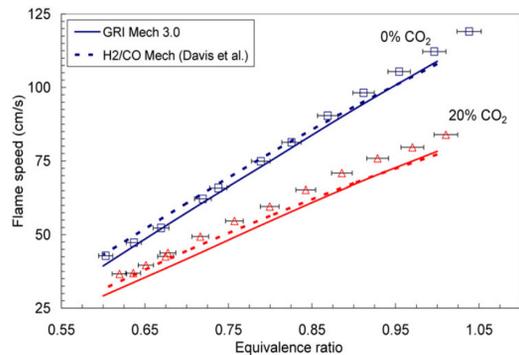


Fig. 1 Laminar flame speed of H<sub>2</sub>+CO(50:50) with 0 and 20% CO<sub>2</sub> dilution.<sup>(1)</sup>

\* 단국대학교 기계공학과

\*\* 연락처, wlee@dku.edu

TEL : (051)8005-316.4 sccm3 FAX : (031)-8005-4003

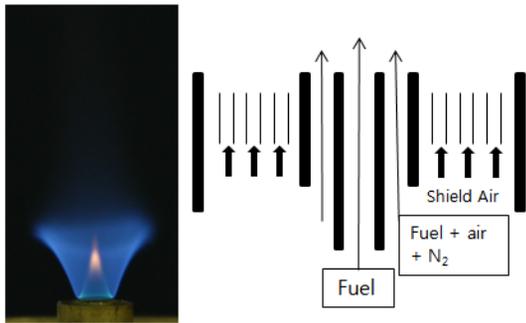


Fig. 2 Double concentric co-flow burner and flame.

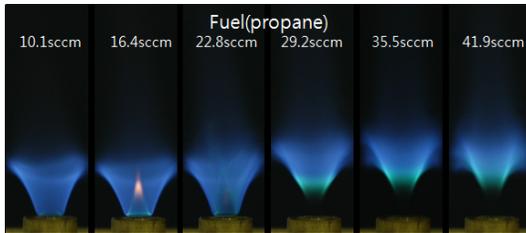


Fig. 3 A stratified premixed flame could be developed when fuel flow through the inner nozzle increases.

성층화된 예혼합화염의 안정성에 미치는 희석제 첨가의 영향을 알아보기 위한 실험은 외부노즐로 공급되는 혼합기 노즐출구속도가 2.3 m/s로 일정한 조건에서 수행되었다. 이때 내부노즐로 공급되는 연료유량과 외부노즐로 공급되는 혼합기의 당량비 조건을 설정한 후 외부노즐에 질소 또는 아르곤을 추가하면서 화염의 날림 특성을 알아보았다. 외부노즐로 공급되는 예혼합기의 당량비는 0.2에서 0.9 범위에서, 내부노즐로 공급되는 연료유량은 10.1 - 41.9 sccm 범위에서 다양한 조건으로 설정하였다. 이 조건에서 내부노즐로 공급되는 연료와 외부노즐로 공급되는 혼합기의 전체 당량비는 0.27 - 0.91이며 외부노즐에 불활성기체를 첨가하면서 화염날림이 발생하는 조건을 찾아내었다.

외부노즐의 당량비가 0.9인 조건에서 형성된 성층화된 예혼합화염은 내부노즐로 공급되는 연료유량이 증가하면 더 적은 양의 질소가 첨가되어도 화염의 날림이 발생하였다. Fig. 4로부터 가장 안정된 화염이 형성되는 연료 유량은 16.4 sccm이며 이보다 더 적은 유량으로 공급되면 화염 중앙에 작은 파일럿 확산화염이 형성되면서 화염은 오히려 더 쉽게 불안정해졌다.

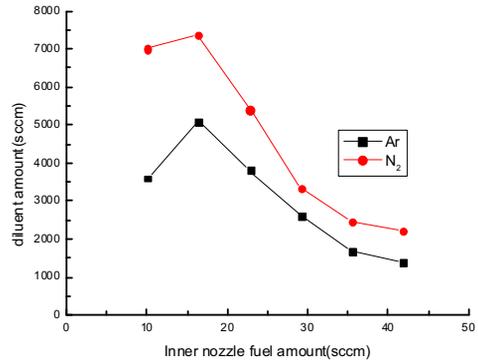


Fig. 4 Flame blow-out limits with nitrogen dilution.

Figure 5는 내부노즐에 공급되는 연료량이 각각 10.1과 16.4 sccm 일때 형성되는 화염을 보여주고 있다. 연료가 10.1 sccm이 공급되는 경우에는 내부에 과농 예혼합화염이 형성되며 외부에 질소를 첨가하면 화염이 길어지고 궁극적으로 화염이 날아가게 된다. 반면에 내부노즐에 16.4 sccm의 연료가 공급되면 내부에 확산화염이 생성된다. 이 조건에서 외부노즐에 질소가 첨가되면 화염이 부상하면서 성층화된 예혼합화염이 형성되고 연료 유량 10.1 sccm의 경우보다 더 많은 질소가 추가되어도 화염이 유지되었다. 그러나 내부노즐의 연료량이 16.4 sccm보다 더 증가하면 더 적은 양의 질소 첨가라도 화염의 날림 현상이 발생하였다.

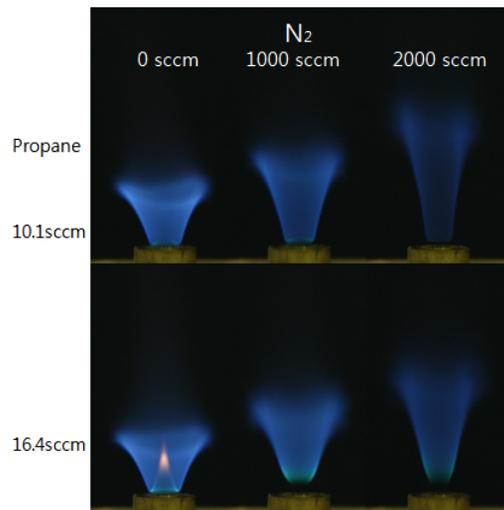


Fig. 5 Flames with inner nozzle fuel flow rates of 10.1 and 16.4 sccm and nitrogen dilution effects.

외부노즐에 첨가되는 불활성기체를 질소에서 아르곤으로 대체하여 실험을 반복하였다. Fig. 6은 아르곤 첨가에 따른 화염 형상의 변화를 보여준다. 더 많은 양의 아르곤이 첨가되어야 동일한 체적유량의 질소가 첨가된 화염과 비슷한 화염 특성을 나타낸다. 이는 아르곤의 비열이 질소의 비열보다 낮으므로 더 많은 양의 아르곤이 첨가되어야 질소의 첨가로 발생하는 화염진과속도와 단열화염온도의 저하 효과와 유사한 영향이 나타나기 때문이라고 해석된다.

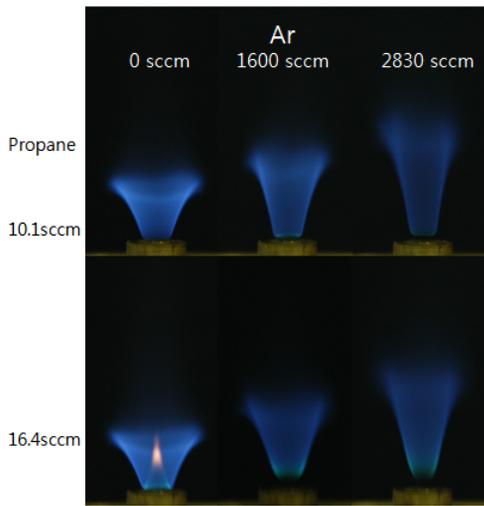


Fig. 6 Flames with inner nozzle fuel flow rates of 10.1 and 16.4 sccm and argon dilution effects.

내부노즐로 공급되는 연료유량을 고정하고 외부노즐로 공급되는 연료의 당량비를 변화시키면 화염날림이 발생하는 조건의 희석제 첨가량이 달라진다. Fig. 7은 화염날림이 일어나는 불활성기체의 유량을 보여주고 있다. 이때 첫 번째 숫자는 내부노즐로 공급된 연료의 유량조건을 두 번째 기호는 질소 또는 아르곤을 나타낸다. 내부노즐로 공급되는 연료의 양이 증가할수록 그리고 외부혼합기의 당량비가 높을수록 화염이 적은 불활성기체의 첨가로 화염날림이 발생하였다. 아르곤을 첨가하는 경우 동일한 조건에서 첨가된 질소보다 더 많은 유량에서 화염날림이 발생하였으며 이는 앞서 설명한 비열의 차이로 해석될 수 있다. 또한 내부노즐로 공급되는 연료의 유량과 외부노즐로 공급되는 혼합기의 당량비가 낮을수록 화염이 더 안정적인 것을 알 수 있었다.

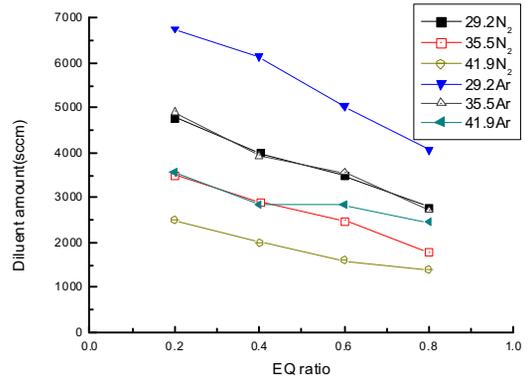


Fig. 7 Flame blow-out limits with nitrogen or argon dilution.

외부노즐로 공급되는 혼합기에 불활성기체가 첨가되는 경우 외부화염의 당량비가 낮고 내부노즐로 공급되는 연료유량이 작을수록 더 화염의 날림이 억제되는 것이 관찰되었으며 그 이유를 화염의 형상 변화와 관련하여 Fig. 8과 같이 이해하고자 하였다. 이중동축류 버너에서 형성된 성층화염의 구조 특성상 외부화염의 당량비가 낮아지거나 내부노즐로 공급되는 연료 유량이 증가하면 화염진과속도가 가장 빠른 당량비 1.0 - 1.1 지역이 반경방향으로 외부 또는 화염의 상부로 이동하게 된다. 따라서 비교적 유속이 빠른 외부노즐의 영향을 더 받게 되고 이에 따라 화염의 날림이 더 쉽게 발생한다고 생각할 수 있다.

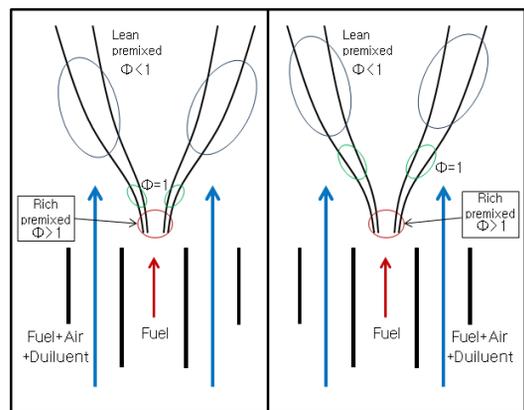


Fig. 8 The effects of equivalence ratio or fuel flow rate through an inner nozzle.

비교적 간단한 불활성기체인 질소와 아르곤을 첨가하는 실험으로부터 불활성기체의 첨가가 성층화된 예혼합화염의 안정성을 크게 저하시키는 것을 알 수 있었다. 추가적으로 이산화탄소 또는 연소가스 등과 같이 다양한 불활성기체를 첨가하는 실험을 수행하여 실제로 응용되는 연소기의 연소 특성을 이해를 돕기위한 자료를 얻을 예정이다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부의 연구장비 개발 및 인프라구축사업의 “선박 유증기 회수설비(SVRU) 개발 및 회수제품 연료화 사업”지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] C. Prathap, Anjan Ray, M.R. Ravi, “Investigation of nitrogen dilution effects on the laminar burning velocity and flame stability of syngas fuel at atmospheric condition”, *Combustion and Flame.*, Vol. 155, 2008, pp. 145-160.
- [2] 이원남, 안태국, 남연우, “성층화된 화염을 이용한 희박 예혼합화염의 날림 특성 제어,” *한국연소학회논문집*, 2012, pp. 11 - 20.
- [3] J. Natarahan, T. Lieuwen, J. Seitzman “Laminar flame speeds of H<sub>2</sub>/CO mixtures: Effect of CO<sub>2</sub> dilution, preheat temperature, and pressure”, *Combustion and Flame.*, Vol. 151, 2007, pp. 104-119.