

<학술논문>

과농-희박연료가 교차로 공급되는 상호작용 화염의 화염날림에 관한 연구

이 병 준[†] · 박 경 옥^{*}

(2007년 7월 2일 접수, 2007년 10월 16일 심사완료)

Effect of Lean-rich Fuel Staging to the Multiple Jet Flames on the Blowout Velocity

Byeong-Jun Lee and Kyungwook Park

Key Words: Interaction(상호작용), Multiple Jet Flame(다수 화염), Lean-rich Fuel Staging(과농-희박 연료 스테이징)

Abstract

It has been reported that partially premixed interacting flame could be sustained till sonic exit velocities if eight small nozzles are arranged optimally and one nozzle on the center is fed small amount of fuel. But the equivalence ratios in this experiments were 20-60. In this research, experiments were conducted to know the effects of lean-rich staging in multiple jet flames on the blowout velocity. The fuel mole fractions in the fuel-air mixture, the nozzle exit velocity and the diameter between adjacent nozzles were alternatively changed. When the lower mole fraction fuel was fed to the nozzles located near the center and small amount of fuel to the center nozzle, flame was not extinguished even at the nozzle exit velocity of 200m/s. Also the interacting flame could be sustained till that velocity when four small size nozzles for lean mixture were located within the arrangement of four nozzles for rich mixture and configured optimally.

기호설명

- D : 노즐 직경
- S : 인접 노즐사이의 거리
- u : 노즐 출구 속도
- X : 연료-공기 혼합기에서 연료의 몰분율

하첨자

- R : 상대적으로 연료가 과농한 부분
- L : 상대적으로 연료가 희박한 부분

1. 서 론

시키면 화염은 서로 상호작용을 일으키게 되어

단일화염과 다른 특성을 나타낸다.

사용된 노즐의 형태와 배열 및 유동장 분포에 따라 상호작용 화염에서의 열 및 물질전달, 운동량전달 등이 변하게 되어 화염의 기울어짐, 화염의 합류 및 화염의 길이 변화 등의 가시적인 효과^(1,2)뿐만 아니라, NO_x, CO, O₂농도분포, 온도분포 및 화염날림유속 등에 영향을 미치게 된다.⁽²⁻⁴⁾ 또한 난류부상화염의 특성도 단일화염⁽⁵⁾과는 달리 일정한 경향⁽⁶⁾을 나타낸다.

노즐 8개를 노즐직경의 15-25배의 간격으로 원형이나 정사각형의 형태로 배열하고, 비예혼합 화염을 형성시키면 상호작용 및 유동내부의 재순환에 의하여 목막힘 유속에서도 화염날림이 발생하지 않는다.⁽⁷⁾

부분 예혼합 상호작용화염의 경우^(8,9)에는 다수의 외부노즐 중심부에 위치한 중앙노즐에 비예혼

[†] 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부
E-mail : bjlee@yu.ac.kr
TEL : (053)810-3526 FAX : (053)810-4627

^{*} 영남대학교, 현재 서울대학교 대학원

합 연료를 미량 공급하면 화염 날림 유속을 증가시킬 수 있고, NO배출 저감에 효과가 있다.⁽¹⁰⁾

이러한 상호작용화염에 대한 연구들은 동일직경의 여러 노즐을 사용하여, 모든 노즐에 동일 유속의 연료를 공급하여 실험을 수행하였다.

일반적으로 NO저감에 효과적인 과농-희박 연소방법⁽¹¹⁾과, 화염날림 유속을 증대시키는 다수노즐에 의한 화염의 상호작용 법을 접목시키게 되면, 화염의 안정화뿐만 아니라 환경문제 해결에도 도움이 될 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 이를 위한 기초연구로써 과농-희박 상호작용 화염의 안정성을 살펴보고자 한다. 희박연료와 과농한 연료를 노즐별로 교대로 공급하여 화염날림 유속의 변화를 살펴보았다. 교대로 변화하는 혼합기의 연료물분율, 노즐직경 및 각 노즐의 유속 비를 실험의 변수로 택하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용된 실험 장치는 기존의 연구⁽⁸⁾에 사용한 것과 유사하므로 개략적으로 설명하기로 한다.(Fig. 1참조)

연료(LPG)와 공기는 각각의 질량유량계(mass flow controller; MKS)에 의해 유량이 조절된 후 유량분배기(외경 25.4mm, 길이 508mm) 직전에 혼합되어, 유량분배기 선단부에 등원주각으로 놓인 개별노즐(내경 0.31mm, 길이 300mm, 스테인리스)로 공급된다. 본 실험에서는 노즐 4개씩을 동일 유량으로 제어할 필요가 있고, 노즐배열 외곽부에 총 8개의 노즐이 놓이므로 2개의 유량분배기를 사용하였다. 또한 중앙노즐에 의한 화염 안정화 특성을 살펴보기 위하여 노즐 배열의 중앙부에는 별도의 노즐을 설치하고 별도의 유량조절기로 유량을 제어하였다.

개별노즐은 미리 천공된 노즐 배열형상을 가진 노즐고정용 판(guide plate, 150mm * 150mm, 두께 6mm)에 삽입되어 수직이 유지되며, 노즐 선단부는 이 판의 윗면으로 6mm돌출하여 설치하였다.

실험은 NO저감을 위한 방법 중의 하나인 staging법 혹은 lean-rich법을 변형하여 도입하기 위하여 기존에 사용되던 8개(혹은 9개) 노즐에 공급되는 혼합기의 연료물분율의 비, 노즐직경 및 각 노즐의 유속 비를 변화시키면서 화염의 특성을 살펴보는 것이다.

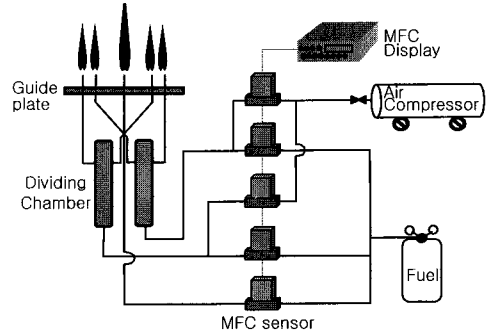


Fig. 1 Experimental apparatus

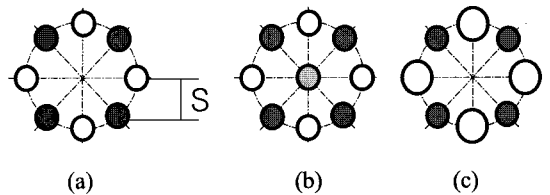


Fig. 2 Top view of nozzle arrangement (a) type A, (b) type B, (c) type C, white color represents fuel lean and orange fuel rich

Fig. 2는 사용되는 노즐의 배열 형태를 나타낸다. type A는 상대적으로 연료의 양이 많은 노즐과 연료량이 적은 노즐을 교대로 배열한 경우이고, type B는 type A의 중앙에 노즐을 하나 더 둔 경우이고, type C는 type A의 배열에서 상대적으로 연료의 양이 적은 노즐의 직경을 크게 한 경우이다. 작은 노즐의 내경은 0.31mm이고, 큰 노즐직경은 0.51mm이다. 과농한 연료용 노즐 혹은 희박한 연료용 노즐은 각기 배열 중심에서 동일한 거리에 위치시켰다.

본 실험에서 과농한 연료는 적은 노즐에 공급되므로 무차원화, 속도 등의 자료정리에서 대표 값은 작은 노즐의 것으로 하였다. Fig. 2(a)와 같이 배열의 중앙에서 모든 노즐의 중심점이 동일한 거리에 놓여있을 때, 인접한 노즐중심 사이의 거리를 S로 정의하였다. 하첨자 L은 상대적으로 희박(lean)한 쪽을, R은 상대적으로 과농(rich)한 쪽을 의미한다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 각 노즐의 연료 농도 변화가 화염의 안정성에 미치는 영향

기존의 연구⁽⁸⁾에서는 부분예혼합 화염의 상호

작용을 이용하는 경우에 화염이 안정화되고 NO 배출이 저감됨을 보였다. 즉, type B형태의 노즐 배열 중심부에 놓인 노즐을 제외한 모든 노즐에 당량비 60(혹은 40, 20)의 연료/공기 혼합기를 공급하고, 중심노즐에는 외부에 공급되던 연료의 5%만을 공급하면 유속 200m/s에서도 화염이 꺼지지 않고 NO가 저감됨을 보였다. 이 경우 혼합기에 공급되는 공기의 양이 증가하면 NO가 감소하나, 당량비 20아래에서는 화염이 저 유속에서도 꺼지게 되어 NO저감에는 한계가 있었다. 또한 중앙노즐로부터 공급되는 연료에 의하여 배열 중앙에 매연이 발생하는 영역이 넓게 존재하였다. 이를 극복하기 위한 방법으로 기존에 알려진 fuel staging혹은 lean-rich법을 상호작용화염에 도입하기 위하여 각 노즐에 공급되는 연료의 물분율 비를 변화시키면서 실험을 수행하였다.

3.1.1 인접한 노즐에 상이한 연료/공기 혼합기를 공급하는 경우 (type A 노즐)

이웃하는 두개의 노즐에서 분출되는 공기/연료 혼합기 중에 연료의 물분율이 0.5가 되도록, 즉 한 노즐의 연료:공기비가 2:1이면 이웃하는 노즐은 1:2가되도록 한 경우의 LPG연료의 화염안정성을 Fig. 3에 나타내었다. 이 경우 노즐에서 공급되는 혼합기의 전체적인 당량비는 23.8이다. $9.2 < S/D < 12.3$ 인 경우를 제외한 영역에서는, 층류화염날림이 일어 난 후 유속이 증가하여도 더 이상 착화되지 않았다. 당량비 20인 부분 예혼합기를 외부 8개의 노즐에 공급하고 중앙에 소량의 연료를 공급할 때 화염이 안정하였던 결과와 비교하면, 이는 화염으로 유입되는 공기와 노즐로부터 공급되는 공기의 양이 화염을 안정시키는데 필요한 공기량보다 더 많기 때문인 것으로 판단된다. 화염의 상호작용으로 층류 화염날림 이후에 재착화된 화염도 최대 80m/s에서 소멸되고, 과농한 쪽의 연료물분율이 큰 경우가 더 안정함을 볼 수 있다. 이는 각 노즐에서 나오는 제트에 의하여 유입되는 공기의 양은 분출유속에 의존하기 때문에 유사한 속도로 분출되는 두 노즐의 경우, 분출연료의 농도가 과농한 제트가 일정높이의 단면에서 가연한계영역이 희박분출노즐에 비하여 더 넓어져 저속 지역으로 더 넓게 퍼지게 되어 국부적으로 화염을 안정화시킬 수 있기 때문인 것으로 사료된다. 과농한 제트에서 나온 연

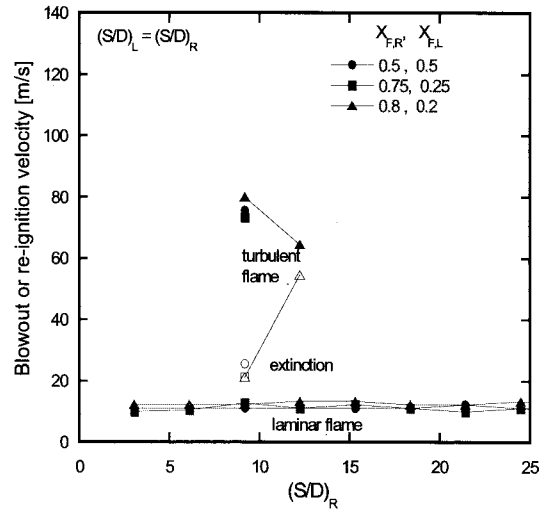
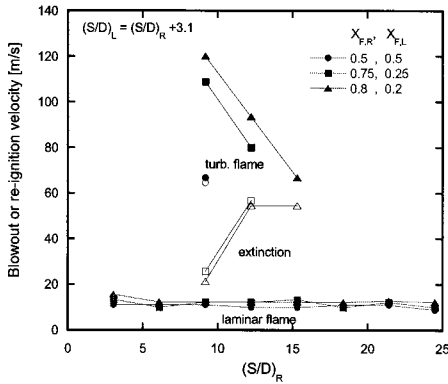


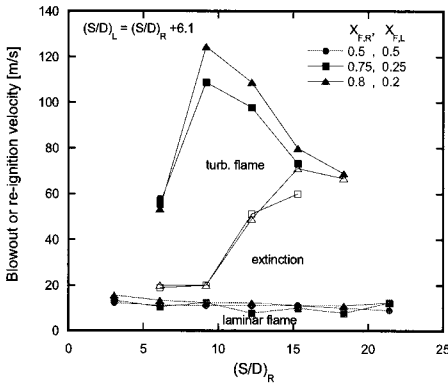
Fig. 3 Effects of nozzle separation distances and initial mixture compositions on blowout and re-ignition velocities when all nozzles are located at the periphery of imaginary circle

료가 화염을 안정화시키는데 중요한 역할을 한다는 앞의 추론으로부터 과농한 제트로 유입되는 공기를 일부 차단하기위하여 과농제트와 희박제트의 위치를 변경하며 실험을 수행하여 Fig. 4(a) - (c)에 나타내었다. 상대적으로 희박한 노즐을 과농한 노즐로부터 외부로 보낼수록 재착화로부터 난류화염날림이 일어날 때까지의 영역이 넓어지다가 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 또한 그 효과가 과농한 노즐로부터 공급되는 연료의 물분율이 증가할수록 더 커짐을 볼 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 외부에 있는 노즐에 의한 주위공기의 유입으로 과농한 노즐로의 공기유입이 영향을 받아 감소하는 것에 기인한다. 과농-희박 노즐들 사이의 거리가 멀어지면 외부노즐들 사이의 거리도 멀어지게 되어 외부노즐에 의한 과농노즐로의 공기유입 차폐효과가 감소하게 되어 Fig. 4(b)에 비하여 (c)의 난류화염 영역이 감소한 것으로 사료된다. 층류화염 날림 유속은 노즐들 사이의 거리나 희박-과농 노즐사이의 거리에 큰 영향을 받지 않음을 볼 수 있다. 이는 층류영역에서는 분출되는 제트의 운동량이 적어 유입공기량도 적어 상호 작용효과가 감소하는 것에 기인한다.

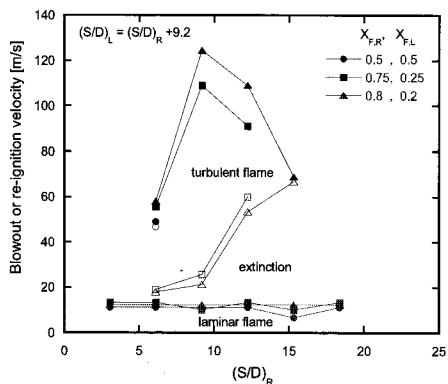
과농한 노즐에서 분출된 혼합기에 의하여 화염이 안정화 된다면, 외부에 있는 희박 혼합기를



(a)



(b)



(c)

Fig 4. Effects of nozzle separation distances and initial mixture compositions on blowout and re-ignition velocities when lean nozzles are located outwardly from rich nozzle about (a) 3.1D, (b) 6.2D, (c) 9.2D

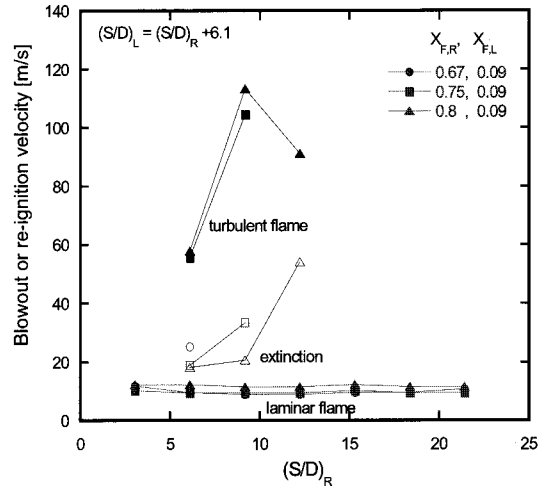


Fig. 5 Effects of nozzle separation distances and initial mixture compositions on blowout and re-ignition velocities when fuel mole fraction of outer lean nozzles is 0.09

더욱 희박하게 하여도 화염의 안정화에 큰 영향을 받지 않을 것이므로 외부 희박노즐에 공급되는 연료의 물분율을 0.09로 한 경우를 Fig. 5에 나타내었다. 각 노즐의 속도는 일정하게 유지하였다. 전체적인 당량비 변화는 19.1~14.5이다. 과농한 노즐의 물분율과 희박한 노즐의 물분율이 (0.8, 0.09)인 경우를 Fig. 4(b)와 비교할 때 최대 화염날림 유속과 최대화염날림이 일어나는 S/D가 동일하나, 난류화염 영역이 줄어든 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 외부노즐의 물분율이 0.063인 경우에도 유사하게 나타났다.

3.1.2 공기/연료비가 상이한 노즐 군에서 중심 노즐에 의한 화염 안정화(type B 노즐)

동일한 유속의 공기/연료 혼합기를 공급하면서 각 노즐의 당량비만을 변화시킨 경우에는 화염을 안정화시키는데 한계가 있으므로, 부분예혼합기를 모든 노즐에 공급하는 경우에 중심 노즐의 소량의 연료로 화염을 안정화시켰던 기존의 방법을 도입하여 Fig. 5의 화염안정성을 높이려는 연구를 수행하였다. Fig. 6과 7은 중앙노즐에 공급되는 연료량의 변화에 따른 화염의 형상 변화와 화염 안정성을 나타낸다. 상대적으로 희박한 연료가 공급되는 노즐은 과농노즐에 비하여 노즐배열의 중심부로부터 6.1D만큼 외부에 놓여있으며 각 노즐

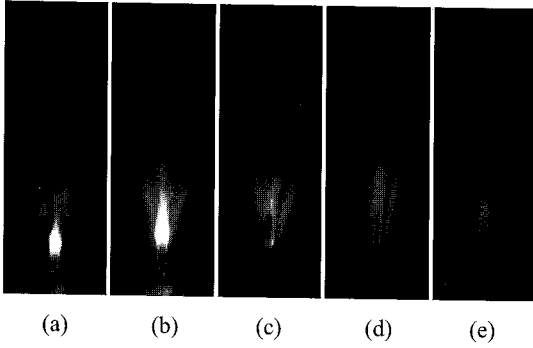
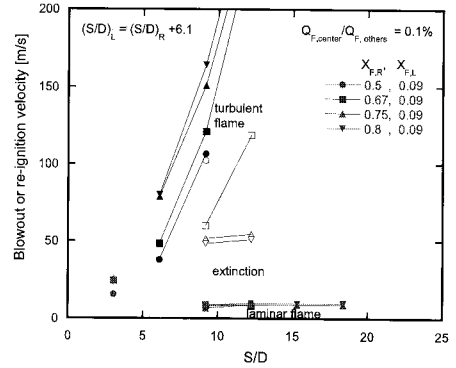


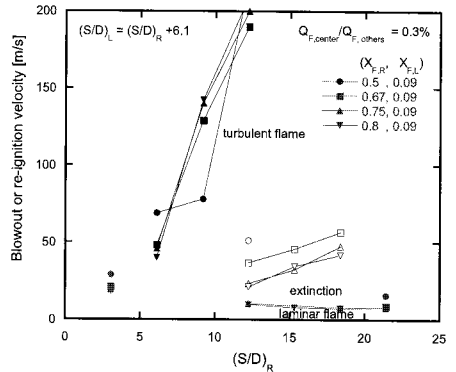
Fig. 6 Flame shapes for $(S/D)_R=15.3$, $(S/D)_L=21.5$, $X_{F,L}=0.09$, $X_{F,R}=0.8$, $Q_{F,center}/Q_{F,other}$ nozzles = 0.3% and u_0 = (a) 45, (b) 70, (c) 100, (d) 130, (e) 160m/s

의 출구유속은 일정하게 하였다. 중앙노즐로는 외부 8개의 노즐에 공급되는 총 연료량의 0.1, 0.3 혹은 0.5%를 공급하였으므로 중심노즐에는 저속에서 화염이 존재하게 된다. Fig. 7에서 층류 화염날림과 재착화 유속은 외부화염을 기준으로 층류에서 화염이 날아가는가, 꺼진 화염이 재착화되었는가에 따라 구분하였다.

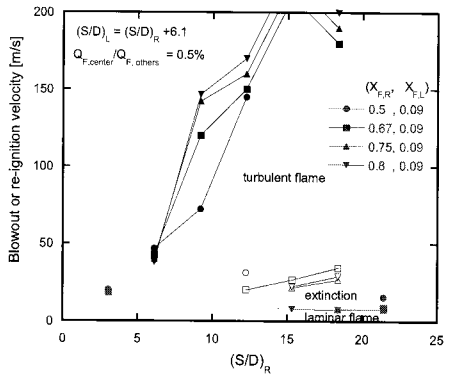
저속에서 재착화된 외부화염은 노즐부착화염인 중앙화염에 부착되어 형성된다[Fig. 6(a), (b), (c)] 화염은 외부노즐 유속 증가에 따라 중앙노즐의 유속도 증가하여 중앙 화염이 부상한 경우이다. (a), (b)화염의 상단 중앙부에 매연입자가 방출되고, (c)화염의 밑면에 과농한 영역에서 형성되는 매연이 형성되는 것으로부터 노즐 배열의 중앙부는 공기가 적은(혹은 유속이 적은) 영역임을 추론할 수 있다. 일반적으로 직경 0.31mm노즐의 경우 층류 부상높이가 수 cm이나 (c)화염은 부상높이가 적음을 볼 수 있다. 이는 중앙노즐에서 공급된 연료에 의해서 형성된 화염이 재착화된 전체 화염을 보지하는 것이 아니라, 중앙노즐로부터 공급된 연료와 외부노즐에서 분출되어 확산된 연료가 노즐배열의 중앙 저속부에 과농한 영역을 만들어 화염을 보지한 것임을 알 수 있다. 부상높이는 일반적인 상호작용화염과 동일하게 유속 증가에 따라 큰 변화가 없이 일정함을 볼 수 있다. 또한 화염의 폭이 유속 증가에 따라 감소함을 볼 수 있다. 이는 유속 증가에 따라 외부 희박 노즐에 의해 유입되는 공기량과 속도구배가 증가하여 화염이 형성되지 못하는 것에 기인하는



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Effect of nozzle separation distances and mixture compositions on the blowout and re-ignition velocities for $(S/D)_L=(S/D)_R+6.2$ and $Q_{F,center}/Q_{F,other}$ nozzles = (a) 0.1%, (b) 0.3, (c) 0.5

것으로 판단된다.

Fig. 7은 중앙노즐에 공급되는 연료량에 따른

Fig. 6 화염의 안정성을 나타낸다. $S/D > 12.5$ 인 영역에서 재착화 유속(open symbol로 표시)이 있고, 난류화염날림 유속이 없는 영역의 화염은 200m/s에서도 안정하게 존재하는 경우를 나타낸다. 0.1 ~ 0.5%의 연료를 중앙노즐로 공급하는 모든 경우에 화염이 200 m/s에서도 꺼지지 않는 영역이 존재함을 볼 수 있다. 또한 중앙 노즐에 공급되는 연료의 양이 증가할수록 재착화 유속이 감소함을 볼 수 있다. 화염이 꺼지지 않는 영역에서도 중앙노즐의 연료량이 외부노즐 전체의 0.1%인 경우에는 재착화 유속이 커서 안정한 난류화염 영역이 적고, 0.5%인 경우에는 재착화 유속은 낮으나 꺼지지 않는 화염 영역이 0.3%에 비하여 줄어들 수 있다. 층류화염날림과 재착화 현상이 없이 난류화염날림이 일어나는 영역도 $5 < S/D < 10$ 영역에서 발생하였다.

3.1.3 노즐 직경이 상이하고 노즐에 공기 혹은 연료를 공급하는 경우 (type C)

NO를 저감시키기는 가장 일반적인 방법이 희박연소 혹은 과농-희박 교대 연소에 의한 화염온도 저감법이다. 공기의 혼합량이 증가할수록, 부분 예혼합 상호작용화염의 색은 녹색에서 옅은 보라색으로 변하고, NO배출량이 감소함을 이전의 연구⁽⁸⁾에서 확인하였으므로 상호작용화염에 공기를 많이 공급하면서 안정성을 넓히고자 한다. 이를 위하여 type C노즐과 같이 서로 다른 두 종류의 직경을 갖는 노즐 8개를 교대로 배열하고, 과농-희박 연료의 극한개념인 연료 혹은 공기를 공급하는 경우를 살펴보았다. 관심의 대상이 되는 난류상호작용화염 영역은 부상화염이므로, 화염밀면에 도달하기 이전에 연료와 공기는 혼합될 시간적 공간적 여유가 존재하므로 연소는 부분예혼합화염의 형태이고 국부적으로 과농-희박의 상태가 될 것으로 예상된다. 작은 직경의 노즐 4개에는 연료를 공급하고, 큰 직경의 노즐에는 공기를 공급하여 실험을 수행하였다.

Fig. 8은 공기가 공급되는 큰 노즐들을 연료노즐들보다 6.1D만큼 외부로 한 경우의 화염 형상을 나타낸다. 안쪽의 4개에만 연료가 공급되므로, 저속에서는 기저부에 반경방향으로 돌출하여 연소되는 부분이 존재하나, 유속이 증가함에 따라 이 돌출부가 하류로 이동하고 또한 감소됨을 볼 수 있다. 이는 노즐 배열 안쪽에 형성된 저속의

기저부에서 화염을 보지하나, 연료의 분출유속이 증가하면 연료노즐 중심축 외부에는 속도구배가 증가하게 되어 동일 높이에서 화염이 형성되지 못하고 속도구배가 감소하는 후류에서 형성되는 것에 기인한다. 상호작용 비예혼합 난류부상화염과 유사하게 난류 부상높이는 유속 증가에도 불구하고 거의 일정함을 볼 수 있다.

Fig. 9는 이웃한 노즐에 연료와 공기를 각각 공급한 경우에 노즐의 위치변화에 따른 화염의 안정성을 나타낸다. 이 경우 전체적인 당량비는 8.8이다. 공기 공급 없이 연료만을 4개의 작은

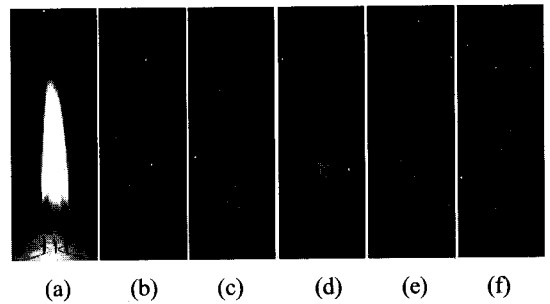


Fig. 8 Flame shapes when 4 nozzles are supplied fuel and the other four nozzles air, $(S/D)_R=12.3$, $(S/D)_L=18.4$, and $u_R = u_L =$ (a) 10 m/s, (b) 30, (c) 45, (d) 70, (e) 100, (f) 160

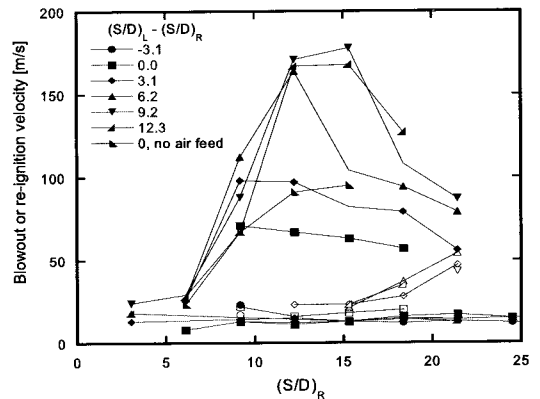


Fig. 9 Effect of nozzle separation distances and nozzle positions on the blowout and re-ignition velocities when air is supplied to large diameter nozzles and fuel to small ones

노즐에 공급한 경우는 화염이 100m/s 부근에서 소멸되었다. 각 노즐들을 배열 중앙으로부터 같은 거리에 위치시키고 연료 혹은 공기를 교대로 공급한 경우 ($(S/D)_R - (S/D)_L = 0$)는 화염의 안정성이 많이 감소함을 볼 수 있다. 이 경우 연료와 공기가 함께 배열 중앙부로 확산되어 나가 화염을 보지하여야 할 부분의 당량비가 낮아지는 것에 기인한다고 사료된다. 연료노즐로부터 공기노즐의 거리가 멀어짐에 따라, 9.2D차이가 날 때까지는 화염의 안정성이 증가하나 그 이후는 감소함을 볼 수 있다. 공기노즐이 연료노즐보다 안쪽에 배열되는 경우에는 난류영역에서 거의 화염이 존재하지 못함을 볼 수 있다. 이는 배열 중앙부로 확산되는 연료의 일부가 고속으로 분출되는 공기에 의해 공기제트 쪽으로 유입되며 공기제트에서 공기가 중앙부로 확산되는 것에 기인한다.

3.1.4 노즐당 조성비와 속도 비를 달리하는 경우 (type C 노즐)

지금까지의 결과에서 상대적으로 과농한 노즐과 희박한 노즐을 배열 중앙부로부터 서로 다른 위치에 위치시키고 출구유속을 동일하게 한 경우의 화염이 동일한 위치의 화염에 비하여 안정함을 보였다. 또한 이 경우에도 중앙노즐에 약간의 연료를 공급하면 화염이 안정화됨을 확인하였다. 중앙부에 하나의 노즐이 아니라 여러 개의 노즐

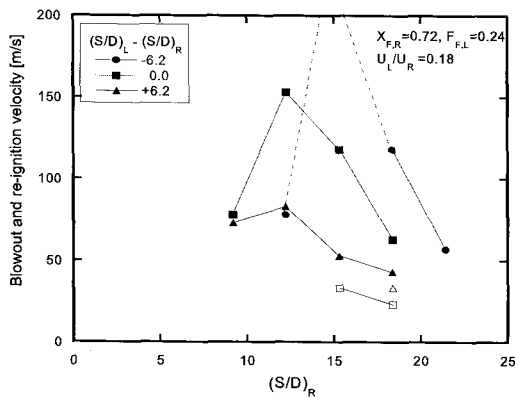


Fig. 10 Effect of nozzle separation distances and nozzle positions on the blowout and re-ignition velocities when the ratio of relatively lean and rich side ejection velocity is 0.18

을 사용하여 연료/공기 혼합기를 저속으로 공급하고 이들이 서로 상호작용을 일으키게 한다면 화염을 안정화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10은 중앙노즐이 없고, 상대적으로 희박한 혼합기용으로 내경 0.5mm의 노즐을 사용하고, 상대적으로 과농한 혼합기용으로 내경 0.3mm의 노즐을 사용한 경우의 화염날림 유속을 나타낸다. 전체혼합기의 평균 당량비는 39이다. 상대적으로 희박한 혼합기를 저속으로 공급하는 노즐을, 과농한 혼합기를 고속으로 분출하는 노즐의 외부에 놓는 경우가 내부에 놓는 경우에 비하여 난류화염의 영역이 좁아짐을 볼 수 있다. 저속 노즐이 내부로 놓인 경우에는 화염날림이 일어나지 않는 영역이 존재함을 볼 수 있다.

중앙노즐에 순수한 연료를 공급하고, 이 노즐로부터 동일한 거리에 놓인 8개의 노즐에 당량비 40인 혼합기를 공급하는 경우의 상호작용화염⁽⁸⁾은, 중앙 노즐에서 분사된 연료에 의하여 국부적으로 과농한 부분을 만들어 NO의 발생량이 증가될 수 있다. 그러나 본 방법은 안쪽으로 배열된 노즐로도 공기가 혼합된 연료를 분출하기 때문에 국부적으로 과농한 부분이 발생할 확률이 줄어들어 기존의 방법에 비하여 NO발생을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 11은 화염의 형상을 나타낸다. 난류부상 화염의 부상높이가 난류 비예혼합 상호작용의 특성과 같이 일정함을 볼 수 있다. 또한 화염의 면적이 유속 증가에 따라 넓어지며, 색이 희박 프로판 화염의 색과 유사해짐을 볼 수 있다. 이러한 화염 상태로부터 NO발생이 감소될 것으로

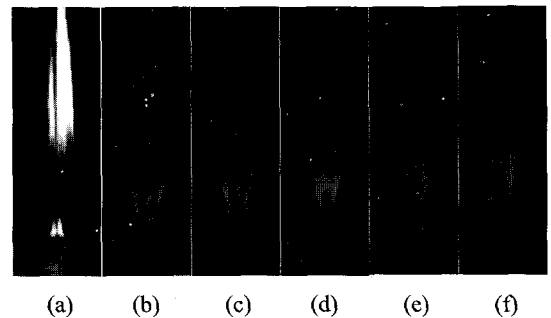


Fig. 11 Flame shapes for $(S/D)_L=9.2$, $(S/D)_R=15.3$, $X_{F,L}=0.24$, $X_{F,R}=0.72$, $u_L/u_R = 0.18$ and $u_R =$ (a) 10, (b) 45, (c) 70, (d) 100, (e) 130, (f) 160 m/s

판단되므로 향후 이에 대한 연구를 수행할 예정이다.

4. 결 론

프로판 부분 예혼합 상호작용 화염의 안정한 연소영역을 확대시키기 위하여 노즐 간격, 유속, 노즐간의 속도 비, 노즐의 직경, 노즐당 공기/연료의 혼합비 등을 변화시키며 연구를 수행하였다.

상대적으로 연료의 양이 많은 노즐과 적은 노즐을 교대로 배열하여 실험을 수행하고, 중심 노즐이 이러한 배열에 어떠한 효과를 미치는지 알아보았다. 또한 연료가 적게 공급되는 노즐의 직경을 크게 한 경우에 화염안정성에 미치는 영향에 대해서도 살펴보았다. 이러한 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일 직경의 노즐을 사용하고 서로 다른 연료/공기 혼합비를 동일 유속으로 공급하는 경우에, 상대적으로 희박한 노즐을 외부로 배치하고, 중심노즐로 0.1%~0.3%의 연료를 공급하면 출구 유속 200m/s에서도 화염이 꺼지지 않는 영역이 존재한다.

(2) 상이한 연료/공기의 혼합비가 공급되는 두 직경의 노즐을 교대로 배열하고 과농한 혼합기 내부에 상대적으로 희박한 혼합기를 저속으로 분출하면, 과농한 혼합기의 유속이 목막힘 유속이 되어도 화염이 꺼지지 않는 영역이 존재한다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Kim, H. Y. and Chun, C. K., 1991, "The Interaction of Gaseous Diffusion Flames," *Trans. of*

the KSME, Vol. 15, No. 1, pp. 355~365.

- (2) Chun, C. K., 1993, "Production of NO in Interacting Laminar Diffusion Flames," *Trans. of the KSME*, Vol. 17, No. 1, pp. 190~199.
- (3) Menon R. and Gollahalli S. R., 1985, "Multiple Jet Gas Flames in Still Air," *In Heat Transfer in Fire and Combustion Systems, ASME publication HTD*, Vol. 45, pp 127~136.
- (4) Menon R. and Gollahalli S. R., 1988, "Combustion Characteristics of Interaction Multiple Jets in Cross Flow," *Combustion. Science and Technology*. Vol. 60, pp 375~389.
- (5) Lee, S. and Lee, B. J., 2001, "Characteristics of Interacting Lifted Flames," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 25, No. 4, pp. 461~466.
- (6) Kim, J. S. and Lee, B. J., 2003, "Stability Enhancement by the Interaction of Diffusion Flames," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 27, NO. 5, pp. 1420~1426.
- (7) Lee, B. J. Kim, J. S. and Lee, S., 2004, "Enhancement Of Blowout Limit By The Interaction Of Multiple Nonpremixed Jet Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 176, 481~497.
- (8) Lee, B. J. and Kim, J. H., 2005, "Nozzle Configurations for Partially Premixed Interacting Jet Flame to Enhance Blowout Limits," *Trans. of the KSME(B)* Vol. 29, pp. 71~79.
- (9) Lee, B. J. and Kim, J. H., 2005, "Characteristics of Methane Non-Premixed Multiple Jet Flames," *Trans. of the KSME(B)* Vol. 29, pp. 349~355.
- (10) Lee, B. J. and Kim, J. H., 2005, "Effect of Flame Interaction on the NO Emission," *Trans. of the KSME(B)* Vol. 29, pp. 730~736.
- (11) Turns, S. R. *An Introduction to Combustion*, McGraw Hill, 2ed, 1996.