

음향 가진된 프로판 비예혼합 제트 화염의 부상 거동에 대한 실험적 연구

김승곤*·김강태*·박 정†

(2004년 1월 8일 접수, 2004년 3월 11일 심사완료)

An Experimental Study on the Lift-off Behavior of Tone-Excited Propane Non-premixed Jet Flames

Seung Gon Kim, Kang Tae Kim and Jeong Park

Key Words: Collapsible Mixing(붕괴혼합), Edge Flame(에지화염), Triple Flame(삼지화염), Weakly Varying Partially Premixed Flame(미약하게 변화하는 부분예혼합화염), Forcing Strength(가진강도), Flame Stability curve(화염안정화선도), Lift-off Flame(부상화염), Mixture Fraction(혼합분율)

Abstract

The lift-off characteristics of lifted laminar propane jet flames highly diluted with nitrogen are investigated introducing acoustic forcing with a fuel tube resonance frequency. A flame stability curve is obtained according to forcing strength and the nozzle exit velocity for N2 diluted flames. Flame lift-off behavior is globally classified into three regimes; 1) a weakly varying partially premixed behavior caused by a collapsible mixing for large forcing strength, 2) a coexistent behavior of the edge flame and a weakly varying partially premixed behavior for moderate forcing strength, and 3) edge flame or triple flame behavior for small forcing. It is shown that the laminar lifted flame with forcing affects flame lift-off behavior considerably, and is also clarified that the flame characteristic of flame base is well described with the penetration depth of the degree of mixing, r_d . It is also confirmed that the weakly varying partially premixed flame caused by a collapsible mixing for large forcing strength behaves as that just near flame blow-out in turbulent lift-off flame.

기호설명

U_f/U_0 : 가진강도

U_0 : 노즐 출구 유동속도

H : 부상높이

ξ : 혼합분율

ϕ : 부분예혼합분율

r_d : 혼합정도의 침투깊이

r_{st} : 이론적 화염 안정 위치

r_{real} : 실제 화염 안정 위치

χ : 스칼라 소산율

Y_F : 연료의 질량분율

Y_O : 산화제의 질량 분율

ξ_{st} : 이론적 화염안정위치에서의 혼합분율

ξ_{CL} : 노즐 중심선상에서의 혼합분율

Re_d : 관경기준 레이놀드 수

† 책임저자, 회원, 순천대학교 기계자동차공학부
E-mail : jeongpark@sunchon.ac.kr
TEL : (061)750-3533 FAX : (061)750-3530

* 순천대학교 기계자동차공학부

1. 서론

난류화염의 화염 두께를 난류의 최소 단위인 Kolmogoroff 길이 크기보다 두껍다고 간주하는 분포반응 모델(distributed reaction model)⁽¹⁾과 Kolmogoroff 길이 크기보다 작다고 가정하는 층류 화염편 모델(laminar flamelet model)⁽²⁾간의 개념적 논쟁 이후 난류 강도에 따라 층류화염편 영역, 분포반응 영역, 그리고 잘 섞여진 영역(well-stirred reactor)등 크게 세 영역으로 분류된다는 의견이 일반화 되었다.⁽³⁾ 한편 부상화염의 화염 안정화 기구에 대한 연구는 비예혼합 제트 화염에서 가장 중요한 논점 가운데 하나이고 수치계산 및 실험을 통하여 여러 가지 이론들이 제시되어왔다. 부상 화염의 선단부가 예혼합되어 화염 전파 속도와 노즐 출구 유동 속도가 일치하는 지점에서 부상 화염이 안정된다는 주장^(4,5)과 화염 부상에 층류 화염편 모델을 적용하여 부상된 화염의 기저가 스킨라 소산율의 임계값을 초과하여 부상 화염의 기저가 소화된 것으로 간주하는 주장,⁽²⁾ 그리고 부상 화염 선단이 난류 구조의 거대 와동에 의해서 안정화된다는 주장들^(6~8)이 제시되어졌다. 한편 층류화염편 모델의 적용시 부상화염은 화염 선단 상류가 주위류의 유입에 따라 연료와의 혼합이 이루어져 경계조건 적용에 어려움이 따르게 되어 Müller 등⁽⁹⁾은 비예혼합 및 예혼합 층류화염편 수식을 조합하여 수식화 함으로써 층류화염편 모델의 부분예혼합화염으로 확장이 가능하게 하였다. 최근에는 층류 비예혼합 부상화염의 화염선단은 삼지화염(triple flame)에 의해 안정된다는 많은 이론적 실험적 증거들이 제시되고 있다.^(10~13) 보다 최근의 몇몇 연구에서는 난류 비예혼합 부상화염의 기저 역시 edge flame의 특성을 통해 안정된다는 이론적 실험적 결과들이 제시되고 있다.^(14~16) 그러나 소염 한계 근처에서 부상화염 기저가 삼지화염으로 안정화 된다는 개념에 있어서는 잘 설명되지 못하는 몇 가지 현상들이 있다. 즉, 노즐 출구 근처의 부상화염의 기저에서 스킨라 소산율이 실제로 소화 한계를 초과하는 큰 값을 갖는다는 실험적 증거들이 있다.⁽⁹⁾ 그러나 노즐 출구 유속을 증가시키기에 따라 난류 강도가 증가하고 부상 높이도 증가하여 극단적으로 화염날림(blow-out)한계까지 부상 높이가 증가할 경우 화염 선단은 연료와

산화제의 혼합이 부분 예혼합의 범주를 넘어설 가능성이 높게 된다. 이것은 층류 부상화염에서 출구 유속증가에 따라 부분예혼합 화염의 확산화염꼬리가 화염 날림 근처에서 사라지고 예혼합날개들이 평평하게 변하다가 화염 날림이 발생함을 실험적으로 보여준 기존의 연구⁽¹³⁾로부터 유추할 수 있다. 따라서 화염날림 근처에서는 화염 선단이 부분 예혼합연소 개념으로 설명하는 데는 무리가 따를 수 있다.

본 연구에서는 유동장과 농도장을 극적으로 변화시키고 극단적으로 화염 날림 조건 근처에서 부상화염의 거동을 관찰하고자 음향 가진 기법을 도입하였다. 음향 가진에 대한 대부분의 기존 연구들^(17~22)은 가진 주파수로써 선호 모드를 채택하였고, 주된 관심사는 내부 연료 구조와 화염간의 상호작용을 규명하는 것이었다. 그러나 선호 모드로 가진하는 방법은 유동장과 농도장을 크게 변화시키지는 못하는 것으로 보인다. 한편 또 다른 연구 그룹들^(23~26)에서는 연료 관 공명 주파수를 사용한 음향 가진이 화염거동에 상당히 큰 영향을 미치는 것을 보여주었다. Kim 등⁽²³⁾은 큰 진폭의 음향 가진이 노즐 출구에서 주기적인 음파 양의 순간 속도 반복을 주어 와동들 사이에 복잡한 상호 작용을 일으키고 거대 구조가 노즐 출구 근처에서부터 연료와 산화제의 작은 에디들이 잘 혼합된 형태인 붕괴혼합(collapsible mixing)이 일어나는 것을 보였고, 따라서 이러한 부상 화염의 기저는 잘 혼합된 예혼합 화염처럼 거동함을 추측할 수 있다. Oh 등⁽²⁴⁾은 음파 가진이 주어진 비예혼합 화염에서 일반적으로 난류 화염 하류 영역에서 나타나는 방위각 불안정성 내부 연료 구조가 노즐출구로 앞당겨져 혼합을 촉진시킴으로써 화염길이가 급격히 짧아지는 과정을 잘 묘사하였다. Al-abdeli 와 Masri⁽²⁵⁾는 축방향 양의 압력 구배에 의해서 연료관 안쪽에 화염 기저가 존재되는 특성을 갖는 in-burning 화염을 발견하였고, Lee 등⁽²⁶⁾은 가진 강도와 연료 유속변화에 따라 형태가 다른 두 가지 부상 화염이 존재하고, 가진이 우세한 영역에서 가진 강도증가에 따라 화염 부상에 앞서 in-burning 화염, 신장 화염, fat 화염과 같은 다양한 화염 모드들이 존재함을 보였다. 본 연구에서는 연료관 공명 주파수로 가진되고, 질소로 과다 희석된 층류 비예혼합 부상화염에 대한 실험적인 연구를 수행하

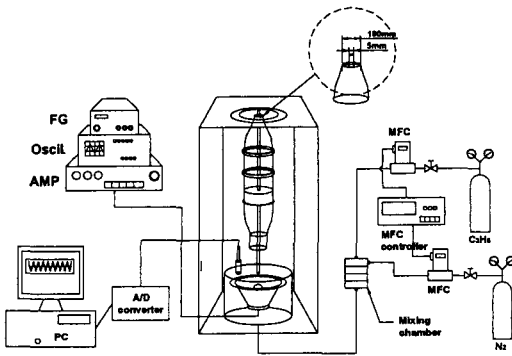


Fig. 1 schematics of burner and flow system

였다. 특히 큰 가진 강도에서는 부상된 화염의 기저가 노즐 출구와 가진없이 원거리에서 나타나는 화염날림 조건의 부상화염과 유사한 거동을 보일 가능성에 연구의 초점을 맞추었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 버너 및 가진계

실험 장치는 Fig. 1에서 보인 바와 같이 버너, 유동 조절장치 및 음향 가진 장치로 구성되었다. 연료 노즐은 내경 5.0mm인 파이렉스 관으로 제작하였고 flame-holding 영향을 배제하기 위하여 끝을 날카롭게 가공하였다. 연료관과 동축인 주위류 노즐은 출구에서 균일한 속도 성분을 얻기 위하여 출구 직경이 100mm이고 수축비가 4가 되도록 고안하였다. 연료는 스피커가 안착된 가진실을 지나 연료 관으로 유입되어 주위 공기로 분사된다. 주위류인 공기의 분사속도는 본래 연료 유동에 영향을 주지 않고 주위 교란을 최소화하여 안정된 화염을 얻기 위해 매우 낮은 속도인 0.1m/s로 고정 시켰고, 실험시 유동 교란을 최소화하기 위해 500×500×1050mm인 mesh 스크린을 설치하였다. 연료관 길이는 모든 실험 조건에서 노즐 출구에서 완전 발달된 속도 성분을 얻기 위하여 920mm로 정하였다. 실험에 사용된 연료는 순도 99.5%의 상용 프로판이고, 질소는 순도 99.95%이고 희석제로 사용되었다. 음향 가진 장치는 함수 발생기, 오디오 앰프, 그리고 30Watt 지름 6inch의 음향 스피커로 구성된다. 가진 주파

수는 큰 가진 강도를 얻기 위해 연료관의 공명 주파수로 고정되었고, 159Hz이다. 주위 조건과 관계없이 재현성있는 가진 실험을 수행하고자 가진실 상단에 마이크로 폰(Micro phone)을 장착하여 음압의 정도를 확인하였다. 노즐 출구에서 측정된 주기적인 속도 성분의 peak-to-peak에 의해 정의되는 가진 진폭(U_i)은 기존 연구⁽²⁴⁾에서 보고된 것과 같이 유동 속도에 따른 음압 정도와 잘 연관되고, 따라서 무차원 속도인 가진강도(U_i/U_0)는 노즐 출구에서 측정된 주기적인 속도 성분의 peak-to-peak와 노즐 출구 평균 유속(U_0)의 비로 표현된다. 측방향 속도 성분은 연소 생성물의 대부분이 공기 성분이라는 가정 하에서 공기를 사용하여 연료 관 공명 주파수가 172Hz 일 때 I-형 열선 프로브와 등온 풍속계를 이용하여 측정하였다. 내부 연료 구조와 화염간의 상호 관계를 규명하기 위해 z-형태의 쉘리렌 기법을 사용하였고, 부상화염 기저 하단에서 연료와 산화제의 평균 농도를 가스 크로마토그래프를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 음향 가진된 부상화염의 특성

본 연구에서 주된 관심사는 연료 관 공명 주파수로 가진 되어 다양한 화염 모드를 거쳐 화염 부상이 일어난다는 기존연구⁽²⁶⁾의 보고로부터 음향 가진 되어 나타나는 부상 화염이 어떠한 거동 및 특성을 보이며 화염 날림 근처의 부상화염과 어떻게 연관되는지를 밝히는 것이다. Fig. 2는 연료 관 공명 주파수로 가진되며, 가진 강도를 증가시키에 따라 나타나는 화염 형태 변화를 보여 준다. Fig. 2(a)의 화염은 가진이 없는 상태에서의 전형적인 층류 비에혼합 부착화염이다. 관공명주파수로 음향 가진된 화염은 가진 강도 증가에 따라 매우 다양한 거동을 보이는데 상대적으로 가진 강도가 큰 경우 화염은 Fig. 2(b)처럼 화염길이가 눈에 띄게 짧아지고 제트의 폭이 상당히 증가되며, 내부 연료구조와의 상호 작용으로 인해 화염 기저가 매우 찌그러지고 주름지는 특성을 갖는 난류 부상화염의 기저와 유사한 형상을 나타낸다. 붕괴 혼합(collapsible mixing)으로 표현된 이 현상은 기존 연구⁽²³⁾에서 이미 제시되

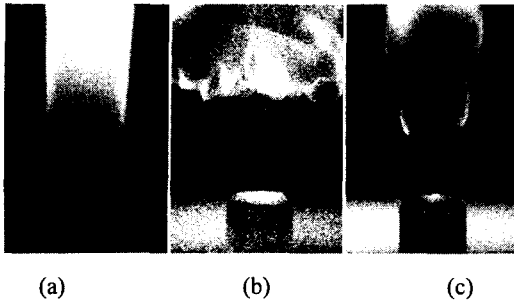


Fig. 2 Comparison of representative flame shapes with the forcing strength; (a) unforced flame, (b) collapsibly mixed flame, and (c) typical edge flame

었고 가진으로 증폭된 어떤 위상에서는 음의 값을 갖는 순간적인 속도의 주기적인 반복으로 인해 연료 제트가 노즐출구의 관 벽으로부터 박리되어 나타난다고 밝혀졌다. 따라서 주위 공기는 연료관 내부뿐만 아니라 화염 기저로 다량 유입되는데 이처럼 붕괴 혼합으로 인해 부상된 화염의 기저는 연료와 산화제가 매우 잘 혼합되어 있다고 볼 수 있다. 위와는 다르게 Fig. 2(c)에서 부상 화염은 작은 가진 강도에서 화염이 부상되며 전형적인 층류 부상화염의 형상을 보인다. 이 부상화염은 부상 위치가 노즐 근거리이고 내부 와동들과 상호 작용하여 전형적인 edge 화염의 형상을 보이고 있다. 이처럼 이 두 부상화염을 비교하여 보면 두 부상화염 모두 노즐 근거리에서 위치하지만 상당히 다른 형상을 나타냄을 볼 수 있다. 즉 서로 다른 형태의 부상화염의 특성 및 거동 또한 상이할 것으로 기대된다. 한편 최근의 연구들에 의하면 난류 부상화염의 기저 역시 edge 화염이 관찰된다고 주장하고 있다. 그렇다면 본 연구의 거시적인 관찰로부터 Fig. 2(b)의 화염기저가 내부 와동과 상호 작용하는 edge 화염의 특성을 보일지 또 다른 특성을 보일지는 논란의 여지가 있을 수 있다. 따라서 이러한 점에 착안하여 Fig. 2(b)의 부상화염의 특성 및 거동을 주의 깊게 관찰 하였다.

3.2 화염 안정화선도

Fig. 3 은 노즐 출구 속도와 가진 강도 증가에 따른 순수 프로판에 대한 화염 안정화 선도이다. 노즐 출구 속도변화에 따라 화염 부상 시기의

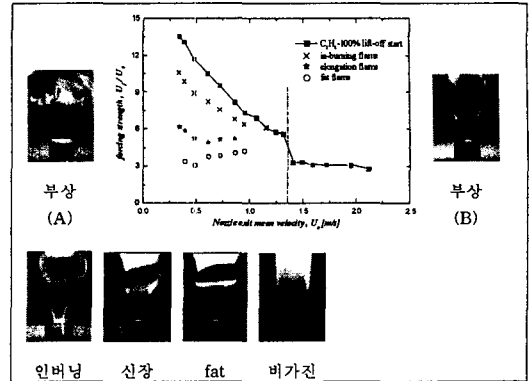


Fig. 3 Flame stability curve and flame modes according to the forcing strength for pure propane

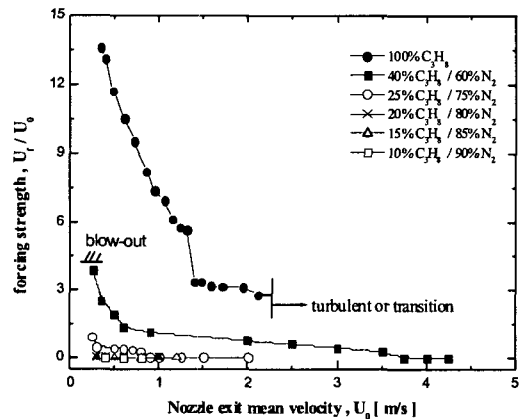


Fig. 4 Flame stability curve according to forcing strength and nozzle exit velocity for a variety of N₂-diluted flames

가진 강도 값을 속이 찬 기호로 표시하였고 제시된 사진들은 ICCD카메라를 이용하여 1/1000초로 촬영된 화염모드들의 순간 상이다. 상대적으로 큰 가진 강도에서(영역 1이라고 칭함) 부상된 화염은 가진 강도 증가에 따라 기존 연구⁽²⁶⁾에서처럼 fat화염, 신장화염, 그리고 인버닝(in-burning) 화염 등의 다양한 화염모드를 거쳐 부상된다. 영역 2에서는 영역 1보다 상대적으로 작은 가진 강도에서 화염이 부상하며, 영역 1에서처럼 다양한 화염 모드는 나타나지 않고 부상 화염의 기저가 앞서 설명한 것처럼 전형적인 edge 화염의 형상

을 보인다. 안정화 선도에서 노즐출구속도가 2.1m/s 이상이면 천이 및 난류영역에 속하게 되어 본 실험에서는 제외되었다. Fig. 3에서 노즐출구 속도 증가에 따라 화염 부상에 요구되는 가진 강도는 점차 감소함을 볼 수 있다. 이것은 가진이 없이도 화염이 부상하는 임계 출구 속도가 존재함을 의미하고 이미 기존 연구에 의해서 밝혀졌다.^(9~12) 본 연구에서는 가진없이 화염이 부상되는 구간을 영역 3으로 명명하였다. 영역 1에서 화염 부상에 필요한 가진 강도는 노즐 출구 속도의 감소에 따라 급격히 증가한다. 노즐 출구 속도가 0.34m/s에서 가진 강도를 더욱 크게 증가시키면 마이크론의 측정 가능한 범위를 벗어나게 되는데 측정 가능한 범위 내에서 가진 강도를 최대한 증가시켰음에도 불구하고 화염은 부상하지 않았다. 이러한 현상은 화염이 결코 부상하지 않고 곧바로 소화될 것인가 부상한 후 소화할 것인가 하는 의문을 갖게 한다. Fig. 4의 안정화 선도의 화염 거동을 정확히 밝히고, 이러한 의문을 해결하기 위해 연료를 다양한 체적 비율의 질소로 희석시킨 화염에 대한 안정화 선도를 작성하였고, Fig. 4에 표현하였다. Fig. 4는 노즐 출구 속도와 가진 강도에 따라 질소로 희석된 화염에 대한 화염 안정화 선도이다. Fig 3에서 보이는 것처럼 가진 없이도 화염 부상이 일어나는 노즐출구 속도는 희석량이 증가할수록 점점 감소되는데 이는 희석량이 증가할수록 반응에 참가하는 반응 화학종이 줄어들어 따라 화염 강도가 감소하기 때문이다. 질소 희석량이 80% 이상에서는 화염은 모든 출구 속도의 경우에서 가진 없이 부상하고, 90% 질소희석 조건에서는 모든 경우의 노즐 출구 속도에서 화염 부상과 거의 동시에 소화되었다. 그러나 출구 유속이 0.4-1.0m/s 사이일 때 짧은 시간 동안 부상화염의 자체진동^(10,12,27)이 관찰되었고, 최종적으로 화염은 소화되었다. 이런 조건에서 부상 화염의 안정성은 노즐 출구 유속에 절대적으로 관련되므로 화염 소화까지 도달하는 시간은 노즐 출구 유속이 감소함에 따라 점차 길게 소요됐다. 60% 희석 조건에서 노즐 출구 유속이 0.25m/s인 경우에 화염소화가 관찰되었고 화염은 부상과 거의 동시에 소화되었다. 앞서 언급한 결과들로부터 가진된 부상화염의 거동은 각각의 영역에서 매우 다르다는 것을 알 수 있다.

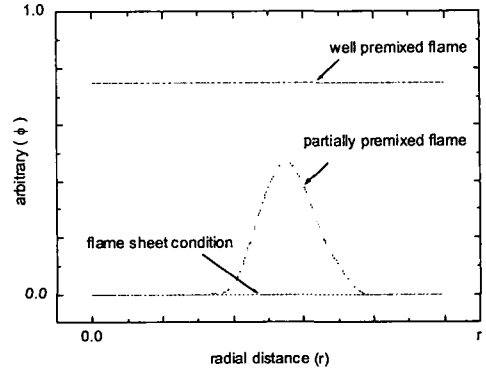


Fig. 5(a) Sketch of the behavior of partially premixed fraction

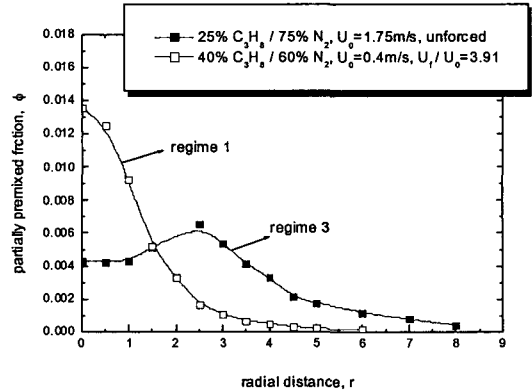


Fig. 5(b) Comparison of the partially premixed fraction profiles at the bases of lift-off flames in regime 1 and regime 3

3.3 부분예혼합분율(partially premixed fraction)

부분예혼합 화염에서 연료와 산화제의 국소적 혼합정도를 나타내기 위해 기존의 연구⁽³¹⁾에서 예혼합화염과 확산화염 및 부분예혼합화염을 구분 지을수 있는 변수로서 도입된 부분예혼합분율 (ϕ)을 사용하여 음향 가진된 부상화염의 거동을 살펴보았다. 부분예혼합분율은 연료와 산화제의 농도의 곱으로 정의되며($\phi = Y_F Y_O$), flame sheet 조건의 확산화염에서 $\phi=0$ 의 값을 갖는다. Fig 5(a)는 혼합정도에 따른 부분예혼합분율의 거동을 잘 보여주고 있다. Fig. 5(a)에서 보듯이 flame sheet 조건에서는 화염면을 기점으로 연료

와 산화제의 화염면 투과가 없으므로 ϕ 는 0이다. 한편 완전 예혼합상태에서 ϕ 는 모든 지점에서 일정한 값을 가진다. 그러나 화학반응 속도가 유한해지면서 화염면을 투과하는 연료와 산화제의량이 증가되면 ϕ 는 Fig. 5에서 dot 선으로 표현된 것처럼 포물선이 되고 삼지 화염과 같이 부분예혼합 상태에서는 포물선의 정점이 더욱 커지고 폭도 증가하게 된다. 또한 화염 날림 근처에서와 같이 연료와 산화제의 혼합이 큰 경우는 ϕ 의 구배는 감소하고 스칼라 소산을 역시 감소한다.

Fig. 5(b)는 음향가진된 부상화염 기저에서 반경 방향으로 측정된 ϕ 의 거동을 나타내고 있다. 영역 3에서 가진없이 화염이 층류 부상된 화염의 거저에서 측정된 ϕ 는 속이찬 기호로 표시되었고, 큰 가진강도에서 화염부상이 일어나는 영역 1에서 관찰되는 부상화염의 기저에서 측정된 ϕ 는 속이 빈 기호로 표시되었다. Fig. 5(b)에서 보듯이 영역 1과 영역 3에서 나타나는 부상화염의 기저에서 측정된 ϕ 의 거동은 상이하게 나타낸다. 뿐만 아니라 영역 3에서 관찰되는 층류 부상을 일으키는 부상화염은 앞서 Fig. 5(a)에서 보인 부분예혼합 상태의 ϕ 거동을 보여야 함에도 불구하고 다소 차이를 보이는 것은 연료제트의 중심에 산화제가 이미 침투하여 ϕ 의 값이 영이 아님을 의미한다. 뿐만 아니라 ϕ 는 연료제트의 노즐 출구 조건(희석조건)에 따라 그 절대값이 큰 차이를 보인다. 따라서 ϕ 는 부상화염의 거동을 설명하기에는 다소 미흡하므로 혼합기의 혼합정도를 잘 설명할 수 있는 인자로 혼합분율(ξ)을 통하여 다음 절에서 설명하도록 하겠다.

3.4 삼지화염의 구조와 혼합분율

Fig. 5는 일반적인 삼지화염의 구조와 기저에서 예상되는 연료와 산화제 및 혼합분율의 거동을 잘 보여준다. 기존 연구⁽²⁸⁾에서 부상화염의 안정화 거동을 설명하기 위한 중요한 인자로 혼합을 잘 표현할 수 있는 혼합분율을 사용하였고, 혼합분율은 Bilger's formular⁽²⁹⁾에 근간하여 다음과 같이 표현된다.

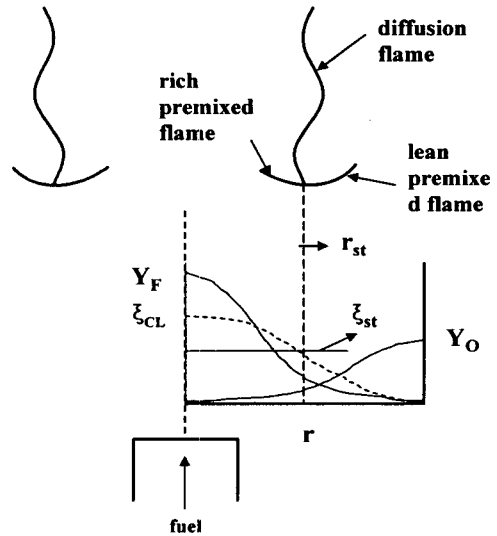


Fig. 6 Sketch of the triple flame structure

$$\xi = \frac{\gamma Y_F - Y_O + Y_{O,\infty}}{\gamma Y_{F,j} - Y_{O,j} + Y_{O,\infty}}$$

여기서 $Y_{O,\infty}$ 는 공기인 경우 0.233이고, 하첨자 j 는 노즐 출구 조건을 의미하며, γ 는 산화제-연료의 이론 당량질량비이다. ξ 는 순수 프로판을 사용한 경우 연료제트에서 1의 값을 갖고 주위 공기에서는 0의 값을 갖는다. 노즐출구 중심선에서 ξ 값인 ξ_{CL} 은 노즐 출구 조건을 잘 반영한다. ξ_{st} 는 $\xi = \xi_{st}$ 가 되는 지점의 혼합분율 값이며, 이 지점의 r 값은 r_{st} 로 표현한다. r_{real} 는 실제 화염안정위치를 나타내며, 1/1000s로 촬영된 순간 사진에서 화염 선단부 최하단의 반경 길이를 측정하여 1/2로 취하였고, 2000장에 대한 양상불 평균으로부터 얻었다. r_{real} 의 증가는 화염 기저폭 증가를 의미한다. 따라서 이상적인 부분 예혼합 구조를 가지는 삼지화염의 기저에서 r_{real} 은 r_{st} 와 일치하여야 한다. 실제 화염안정화 위치와 이론적인 화염 안정화 위치의 차를 나타내는 $r_d = r_{real} - r_{st}$ 는 물리적으로 산화제의 연료제트로의 침투깊이(r_d)가 증가됨을 의미하며, 혼합의 촉진과 혼합분율의 반경방향 구배의 감소를 뜻한다. 이러한 해석은 일반적으로 혼합분율의 구배($\nabla \xi$)가 혼합에 관련된 길이 크기에 반비례하는 물리적 의미를 가지므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

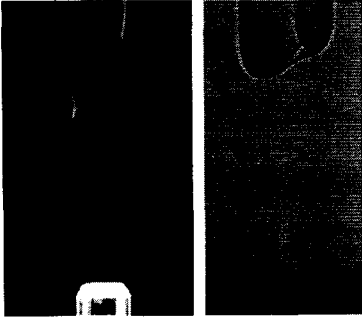


Fig. 7(a) Representative direct photo and schlieren image in regime 3; 25% C₃H₈ / 75% N₂, U₀=1.75m/s

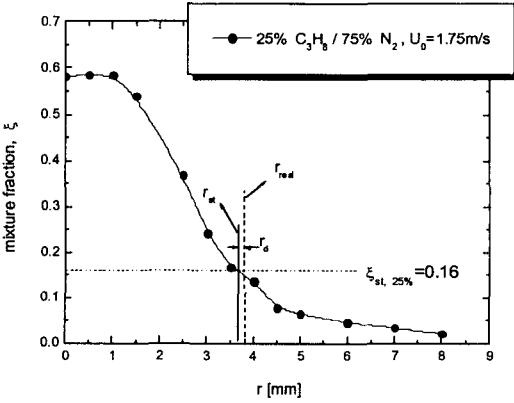


Fig. 7(b) Variation of the mixture fraction at the base of lifted flame in regime 3

$$\chi \sim (\nabla \xi)^2 \sim (1/r_d)^2$$

즉, 산화제의 연료제트로의 침투깊이, r_d 의 증가는 혼합분율의 구배를 감소시키고 결과적으로 스칼라 소산율(χ)의 감소를 의미한다.

ξ 의 물리적 고찰을 통해 부상화염의 거동을 설명하는 중요한 인자임을 알았고 본 연구에서는 음향 가진된 부상화염의 거동을 설명하고자 혼합분율을 측정하여 부상거동을 설명하였다.

3.5 음향 가진된 부상화염의 거동특성

Fig. 7은 영역 3에서 관찰되는 부상화염의 거동을 나타낸다. Fig 7(a)은 부상화염의 직접상과 쉐리렌 상이고 Fig. 7(b)은 부상화염 기저에서 측정된 ξ 의 거동을 나타낸다. r_{reat} 은 dash 선으로 표시하였고 r_{st} 는 solid 선으로 표시하였다.



Fig. 8(a) Representative direct photo and schlieren image in regime 1; 40% C₃H₈ / 60% N₂, U₀=0.4m/s, U_f/U₀=3.904

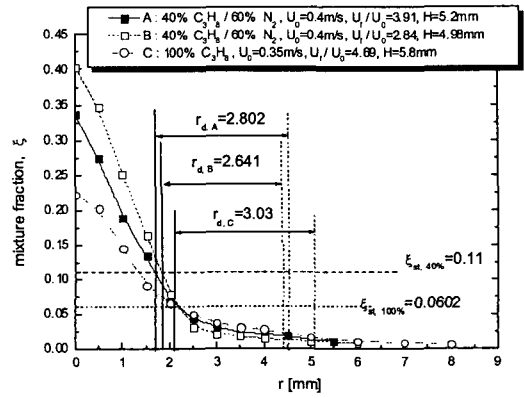


Fig. 8(b) Variation of the mixture fraction at the base of lifted flame in regime 1

전술하였듯이 영역 3은 가진 없이도 화염이 층류 부상하는 영역으로 부상된 화염은 edge 화염 또는 삼지화염의 특성을 나타낼 것이 자명하고 Fig. 7(a)에서 보듯이 부상화염의 직접 상 및 쉐리렌 상 모두 전형적인 삼지화염의 형상을 나타내고 있다. Fig. 7(b)에서 ξ 의 반경방향 거동은 Fig. 5(a)에서 보인 전형적인 삼지화염의 거동을 잘 따르고 있다. 또한 r_{reat} 과 r_{st} 가 거의 일치하고 r_d 가 매우 작은 것으로 보아 영역 3에서 부상화염은 삼지화염의 거동을 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 영역 1에서 관찰되는 부상화염의 거동을 보여준다. Fig. 8(a)은 가진강도 3.91인 조건에서 부상화염의 직접사진과 쉐리렌 상이고



Fig. 9(a) Representative direct photo and schlieren image in regime 2 ; 40% C₃H₈ / 60% N₂, U₀=1.5m/s, (left) U_f/U₀=0.88 (right) U_f/U₀ =1.88

Fig. 8(b)은 부상화염 기저에서 측정된 ξ 의 거동을 나타낸다. Fig. 8(a)에서 보듯이 큰 가진강도에서 부상된 화염은 부상 높이가 4~6mm 정도 노즐 근거리에서 위치함에도 불구하고 기저 폭이 상당히 증가되었으며 내부 연료구조가 붕괴혼합에 의해 작은 규모의 에디들로 변화되어 부상화염의 기저는 매우 잘 혼합되어 있음을 알 수 있다. 한편 Fig. 8(b)의 ξ 의 거동을 살펴보면 가진강도가 증가할수록 ξ 의 구배는 점점 감소됨을 볼 수 있고, 가진강도 증가에 따라 r_d 은 증가한다. 뿐만 아니라 가진강도 증가에 따라 ξ_{CL} 값은 감소하는데 그 이유는 앞서 설명한 것처럼 r_d 의 증가와 더불어 혼합의 촉진으로 인해 연료제트의 산화제유입이 증가했기 때문이다. 따라서 가진강도가 증가하면 $\nabla \xi$ 는 감소되고 실제 화염이 안정되는 반경방향 위치에서 χ 는 급격히 감소된다. 한편, Fig. 8(b)에서 A와 C의 조건은 화염 날림이 발생된 조건들에서 측정된 결과임에 주목할 필요가 있다. 기존연구들^(30,31)에서 화염날림 한계까지 부상 높이가 증가한 경우에 $\nabla \xi$ 는 매우 작아지게 되고 χ 역시 매우 작은 값을 갖는다고 보고되었고, 이러한 화염날림 한계 근처의 부상화염은 미약하게 변하는 부분에혼합 화염(weakly varying partially premixed flame)⁽³¹⁾으로 거동하게 된다. 이러한 관점에서 볼 때 영역 1에서 관찰되는 부상화염은 부상 높이가 노즐로부터 원거리에서 나타나는 화염날림 근처의 부상거동과 매우 흡사한 결과를 보이고 있다. 즉, 영역 1에서 큰 가진 강도에서 붕괴혼합에 의해 부상된 화염

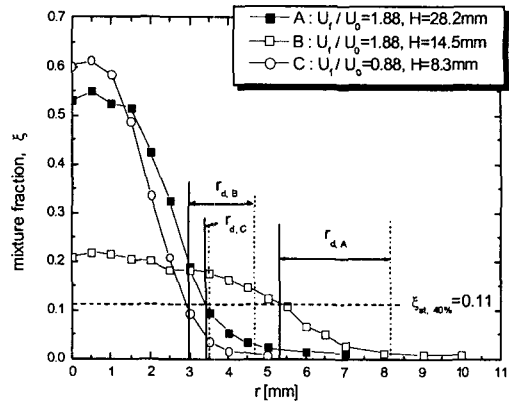


Fig. 9(b) Variation of the mixture fraction at the base of lifted flame in regime 2; 40% C₃H₈ / 60% N₂, U₀=1.5m/s

은 화염날림 근처에서 관찰되는 미약하게 변하는 부분에혼합 화염의 거동을 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 영역 2에서 가진 강도에 따른 부상화염의 거동을 보여주고 있다. Fig. 7(a)은 가진강도 증가에 따라 나타나는 부상화염들의 직접상과 쉐리렌 상이고, (b)는 부상화염 기저에서 측정된 ξ 의 거동을 나타내고 있다. 영역 2는 영역 1에 비해 상대적으로 작은 가진 강도에서 화염이 부상되는 영역이다. Fig. 9(a)에서 보듯이 가진 강도가 0.88인 조건에서 화염은 부상하게 되고 전형적인 삼지화염의 형상을 보인다. 한편 가진강도가 1.88인 조건에서 화염은 마치 두개의 제트에서 생성된 화염처럼 기저가 나뉘어져 보이는 특이한 형상의 부상화염을 관찰할 수 있다. 이러한 특이한 화염은 Fig. 9(a)의 우측에서 관찰되듯이 내부 연료구조의 좌우방향으로의 불균형이 가진강도가 커질수록 심화되면서 상류 유동이 앞서 나간 연료 구조에 접근하는 동안 앞서 나간 연료 구조가 감속하여 와동들 간의 복잡한 상호작용에 의해 나타난다. 주목할 점은 분리된 두개의 기저가 각각 서로 다른 거동을 나타내고 있다는 점이다. Fig. 9(a)의 우측 쉐리렌 상에서 관찰 되듯이 상류에 위치한 화염 기저는 내부 와동과 상호작용 하는 삼지화염의 형상을 나타내고 있고 후류에 위치한 화염 기저는 영역 1의 부상화염과 유

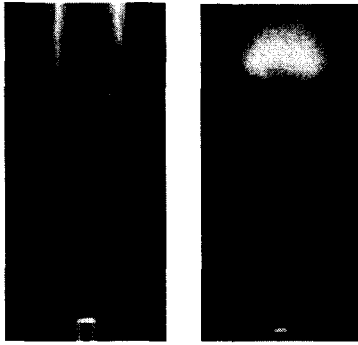


Fig. 10(a) Representative direct photos of turbulent flames ; 40% C₃H₈ / 60% N₂, (left) U₀=10m/s, (right) U₀=17m/s

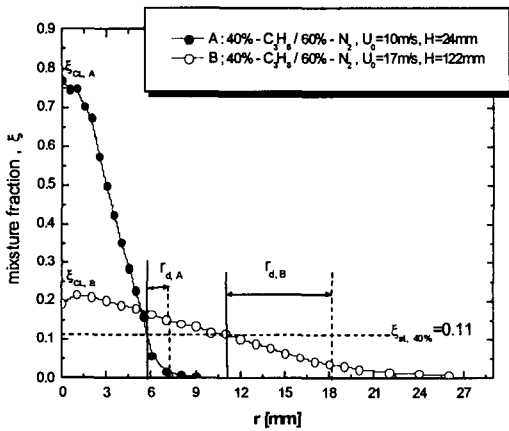


Fig. 10(b) Variation of the mixture fraction at the bases of turbulent lifted flames

사한 형태를 보이고 있다. 뿐만 아니라 Fig. 9(b)에서처럼 두 화염기저의 ξ 거동 역시 서로 다른 거동을 보이고 있다. 먼저 상대적으로 노즐 근 거리에 위치한 화염 기저에서 r_d 는 매우 작은 것으로 보아 전형적인 edge 화염 또는 삼지화염의 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 한편 상대적으로 노즐로부터 원거리에 위치한 기저에서는 r_d 가 매우 크며 ξ profile의 구배역시 매우 평탄해져 있는 것으로 보아 삼지화염의 거동보다는 앞서 영역 1에서 나타나는 미약하게 변하는 부분예혼합 화염의 거동을 나타낸다.

앞서 보인 각 영역에서의 부상화염 거동을 더욱 명확히 하기 위해 가진을 가하지 않은 난류 부상화염의 거동을 관찰하였고 각 영역에서 관찰

되는 부상화염 거동과 비교하여 보았다.

Fig. 9(a)는 각각 (좌측) $Re_d=5337$, (우측) $Re_d=9073$ 인 조건에서 촬영한 난류 부상화염의 직접상이다. $Re_d=9073$ 난류부상화염은 측정 중 화염날림이 수회 관찰된 화염날림 한계근처의 부상화염으로 영역 1에서 관찰된 부상화염처럼 기저 폭이 상당히 증가되어있음을 볼 수 있다. Fig. 10(b)에 표시된 각 조건의 난류 부상화염의 기저에서 측정된 혼합분율의 거동을 살펴보면, $Re_d=5337$ 인 난류 부상화염은 r_d 가 상대적으로 작고 따라서 $\nabla\xi$ 가 큰 전형적인 삼지화염의 거동을 보이고 있다. 한편 $Re_d=9073$ 인 조건인 화염날림 한계 근처의 부상화염은 r_d 가 상당히 크며 반경 방향으로 ξ profile의 구배가 매우 작으며 앞서 보인 영역 1에서의 부상화염 거동과 매우 흡사하다. 따라서 큰 가진강도에서 나타나는 영역 1의 부상화염은 미약하게 변하는 부분예혼합 화염으로 거동한다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

료관 공명주파수로 음향 가진되고 질소로 과다 희석된 층류 프로판 제트에서 부상 거동에 대한 실험적 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

노즐 출구 유속과 가진 강도 증가에 따라서 화염 안정화 선도를 작성하였고, 가진 강도와 노즐 출구 유속에 따라 음향 가진 된 부상화염의 부상 거동을 크게 세 가지로 구분된다.

(1) 큰 가진 강도에서 발생된 붕괴 혼합에 의해 부상된 화염의 기저가 미약하게 변하는 부분예혼합 화염(weakly varying partially premixed flame)의 거동을 보인다.

(2) 적절한 가진 강도에서 부상된 화염은 전형적인 삼지화염 또는 edge 화염의 거동과 weakly varying partially premixed flame의 거동이 천이적으로 공존한다.

(3) 작은 가진 강도 또는 가진이 없이 화염이 부상하는 경우는 부상 화염의 기저가 edge flame 또는 삼지화염의 거동을 나타낸다.

후 기

본 연구는 2003년 한국과학재단 목적 기초연구 사업인 지역대학우수과학자 연구지원과 2004년도 두뇌한국21사업에 의해 지원되었고 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Schefer, R.W., Namazian, M. and Kelly, J., 1988, "Structural Characteristics of Lifted Turbulent Jet Flames," *Twenty-Second Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, p. 1099.
- (2) Peters, N. and Williams, F. A., 1983, "Lift-off Characteristics of Turbulent Jet Diffusion Flames," *AIAA Journal*, Vol. 21, pp. 423~429.
- (3) Borghi, R., 1988, "Turbulent Combustion modeling," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 14, pp. 245~292.
- (4) Vanquickenborne, L. and van Tiggelen, A., 1966, "The Stabilization Mechanism of Lifted Diffusion Flames," *Combust. Flame*, Vol. 10, pp. 59~69.
- (5) Kalghatgi, G.T., 1981, "Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air," *Combust. Sci. Technol.* Vol. 41, pp. 17~29.
- (6) Miake-Lye, R.C. and Hammer, J.A., 1988, "Lifted Turbulent Flames : A Stability Criterion Based on the Jet Large-Scale Structure," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 22, pp. 817~824.
- (7) Chao, Y.C. and Jeng, M.S., 1992, "Behavior of the Lifted Jet Flame under Acoustic Excitation," *Proc. Combust. Inst.* Vol. 25, p. 333.
- (8) Park, J.W. and Shin, H.D., 1993, "Effect of Large-scale Turbulent Structures on the Lift-off Behaviour of Turbulent Jet Diffusion Flames," *J. Institute of Energy*, Vol. 66, pp. 198~206.
- (9) Müller, C.M., Breitbach, H. and Peters, N., 1994, "Partially Premixed Turbulent Flame Propagation in Jet Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 25, pp. 1099~1106.
- (10) Chung, S.H. and Lee, B.J., 1991, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 86, pp. 62~72.
- (11) Ko, Y.S. and Chung, S.H., 1999, "Propagation of Unsteady Tribanchial Flames in Laminar Non-premixed Jets," *Combust. Flame*, Vol. 118, pp. 151~163.
- (12) Lee, B. J. and Chung, S. H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribanchial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 109, pp. 163~172.
- (13) Füre, M., Papas, P. and Monkewitz, P.A., 2000, "Non-Premixed Jet Flame Pulsations Near Extinction," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, pp. 831~838.
- (14) Veynante, D., Verisch, L., Poinot, T., Linan, A. and Ruetsch, G., 1994, "Triple Flame Structure and Diffusion Flame Stabilization," *Proc. of the Summer Program*, Stanford/Ames center of Turbulence Research, pp. 55~73.
- (15) Ruetsch, G. R., Verisch, L. and Linan, A., 1995, "Effects of Heat Release on Triple Flames," *Phys. Fluids*, Vol. 7, pp. 1447~1454.
- (16) Muñoz, L. and Mungal, M.G., 1997, "Instantaneous Flame Stabilization Velocities in Lifted-Jet Diffusion Flames," *Combust. Flame*, Vol. 111, pp. 16~31.
- (17) Yule A.J., 1978, "Large-scale Structure in the Mixing Layer of a Round Jet," *J.of Fluid Mech.* Vol. 89, pp. 413~432.
- (18) Hussain, A.K.M.F., 1986, "Coherent Structure and Turbulence," *J.of Fluid Mech.*, Vol. 173, pp. 303~356.
- (19) Vermeulen, P.J., Ramesh, V. and Yu, W.K., 1986, "Measurements of Entrainment by Acoustically Pulsed Axisymmetric Air Jets," *Journal of Engineering for Gas turbines and Power* Vol. 108, pp. 479~484.
- (20) Anthony, W.S. and Braid, J.C., 1985, "Visualization of the Structure of a Pulsed Methane-Air Diffusion Flames," *Phys. Fluids*, Vol. 208, pp. 2317~2330.
- (21) Pearson, L.G., Gabelli, A., Shepherd, I.G. and

- Hamilton, N.B., 1989, "Structure in Diffusion Flames an Acoustic View Point," *Joint International Conference Australia/New Zealand and Japanese of The Combustion Institute*, University of Sydney, Sydney, pp. 24~27.
- (22) Gutmark, E., Parr, T.P., Hanson-Parr D.M. and Schadow. K.C., 1989, "Planar Imaging of Vortex Dynamics in Flames," *J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 148~155.
- (23) Kim, T.K., Park, J. and Shin, H.D., 1993, "Mixing Mechanism Near the Nozzle Exit in a Tone Excited Non-premixed Jet Flame," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 89, pp. 83~100.
- (24) Oh, S.K., Shin, H.D., 1998, "Visualization Study on the Effect of Forcing Amplitude on Tone-excited Jets and Jet diffusion Flames," *Int. J. Energy Res.*, Vol. 22, p. 343.
- (25) Al-abdeli, Y.M. and Masri, A.R., 1999, "Laminar Flame Characteristics under Acoustic Excitation," *The second Asia Pacific Conference on Combustion*, Tainan, Taiwan, p. 214.
- (26) Lee, K.M., Kim, T.K., Kim, W.J., Kim, S.G., Park, J. and Keel, S.I., 2002, "A Visual Study on Flame Behaviour in Tone-excited Non-premixed Jet Flames," *Fuel*, Vol. 81, pp. 2249~2255.
- (27) Won, S.H., Kim, J., Shin, M.K., Chung, S.H., Fujita, O., Mori, T., Choi, J.H. and Ito, K., 2002, "Normal and Microgravity Experiment of Oscillating Lifted Flames in Co-flow," *Proc. Combust. Inst.* Vol. 29, pp. 37~44.
- (28) Chen, Y. C. and Bilger, R. W., 2000, "Stabilization Mechanisms of Lifted Laminar Flames in Axisymmetric Jet Flows," *Combustion and Flame*, Vol. 122, pp. 377~399.
- (29) Bilger, R. W., 1988, "The Structure of Turbulent Non-premixed Flames," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh, pp. 475~488.
- (30) Im, H. G. and Chen, J. H., 2001, "Effect of Flow Strain on Triple Flames propagation," *Combustion and Flame*, Vol. 126, pp. 1384~1392.
- (31) Favier, V. and Vervisch, L., 2001, "Edge Flame and Partially Premixed Combustion in Diffusion Flame Quenching," *Combustion and Flame*, Vol. 125, pp. 788~803.