

## 음향 가진 된 프로판 확산 화염의 부상 거동에 관한 실험적 연구

김승곤\* · 박정† · 김태권\*\* · 이기만\*\*\*

## Experimental Study on the Lift-off Behavior of Tone-excited Propane Jet Diffusion flames

Seung Gon Kim, Joeng Park, Tea Kwon Kim and Kee Man Lee

## ABSTRACT

An experimental study on flame lift-off characteristics of propane jet flame highly diluted with nitrogen has been conducted introducing acoustic forcing with a tube resonant frequency. A flame stability curve is attained according to forcing strength and nozzle exit velocity for N<sub>2</sub> diluted flames. Flame lift-off behavior with forcing strength and nozzle exit velocity is globally categorized into three; a well premixed behavior caused by a collapsible mixing for large forcing strength, a coexistent behavior of well-premixed and edge flames interacting with well-organized inner fuel vortices for moderate forcing strengths, and edge flame behavior for small forcing strengths. Special focus is concentrated on the coexistent behavior of the flame base in lifted flame since this may give a hint to a possibility which the flame base behaves like a well-mixed premixed flame in highly turbulent lifted flames. It is also shown that the acoustic forcing to self-pulsating laminar lifted flame affects flame lift-off behavior considerably which is closely related to downstream flow velocity, mixture strength, effective fuel Lewis number, and flame stretch.

## 기 호 설 명

 $U_o$  : Mean exit velocity $U_f$  : The peak-to-peak of the periodic velocity components $U_f / U_o$  : Forcing Strength

**Key Words** : blow-out, collapsible mixing, edge flame, flame stability curve, forcing strength, lift-off, self-pulsation, well-mixed premixed flame

## 1. 서 론

부상화염의 화염 안정화 기구에 대한 연구는 비예혼합 제트 화염에서 가장 중요한 논점중의 하나이고 수치적, 실험적으로 부상화염의 화염 안정화 기구의 규명을 위한 연구들에서 여러 가지 이론들이 제시되어왔다. 부상 화염의 선단부

가 예혼합되어 화염 전파 속도와 노즐 출구 유속이 일치하는 지점에서 부상 화염이 안정된다는 주장[1, 2, 3]과, 화염 부상에 층류 화염편 모델을 적용하여 부상된 화염의 기저가 스칼라 소산율의 임계 값을 초과하여 부상 화염의 기저가 소화된 것으로 간주하는 주장[4], 그리고 부상화염 선단이 난류 구조의 거대와동에 의해서 안정화된다는 주장들[5, 6]이 있었다. 한편 Müller 등은 부분 예혼합 연소를 다루기 위해 비예혼합 및 예혼합 층류 화염편 수식을 조합하였고, 최근에는 층류 비예혼합 부상화염의 화염선단은 내부 연구구조와의 상호 작용을 고려한 edge flame으로 명명된[9,

\* 순천대학교 기계 공학과 대학원

† 순천대학교 기계 공학과

\*\* 계명대학교 기계 자동차 공학부

\*\*\* 전남도립담양대학 기계 자동차 공학부

10, 11, 12] 삼지 화염(triple flame)의 특성을 통해 안정되어진다고 밝혀졌다. 보다 최근에 몇몇 연구자들은 이론적이고 실험적인 결과들로부터 난류 비예혼합 부상화염의 기저 역시 edge flame의 특성을 통해 안정된다고 주장하였다.[13, 14, 15] 그러나 기존 연구들을 세심하게 고찰 하여보면 난류 화염 속도에 대한 흥미로운 점을 발견할 수 있다. 난류 화염 속도는 Quickenboren[1] 등의 연구에서는  $0.9 \sim 5 S_L$ 이고, Kalghatgi[2] 등의 연구에서는  $1.5 \sim 25 S_L$ 이며, Reusch[14] 등의 연구에서는  $1.8 S_L$ , Múniz 와 Mungal[15]의 연구에서는  $3 S_L$ 이라고 보고되었다. 이것은 난류 비예혼합 부상화염의 기저가 예혼합 화염의 거동을 보이거나 또는 edge flame의 거동을 보일 수 있음을 묵시적으로 나타내고 있는 것이다. 더욱 최근 연구들은 난류 비예혼합 화염의 기저가 예혼합 화염의 거동을 보이는가 edge flame의 거동을 보이는가를 파악하는데 연구의 초점을 맞추고 있다. 부상화염의 안정화 기구를 명확히 파악하기 위한 흥미로운 방법 중의 하나는 연료 관 공명 주파수를 사용한 음향 가진 기술을 도입하여 유동장(flow field)과 농도장(concentration field)을 극적으로 변화시키는 것이다. 음향 가진에 대한 대부분의 기존 연구들은 가진 주파수로서 선호 모드(preferred mode)를 채택하였고, 연구의 주된 관심사는 내부 연료 구조와 화염간의 상호작용을 연구하는 것이었다. 그러나 선호 모드로 가진 하는 방법은 유동 장과 농도 장을 그다지 크게 변화시키지는 못하는 것처럼 보인다. 기존 연구들[22-25]에서는 연료 관 공명 주파수를 사용한 음향 가진이 화염거동에 상당히 큰 영향을 미치는 것을 보여주었다. Kim등은[22] 큰 진폭의 음향 가진이 노즐 출구에서 주기적인 음파 양의 순간 속도 반복을 주어 와동들 사이의 복잡한 상호 작용을 일으켜 붕괴혼합(collapsible mixing)이 일어나는 것을 보였고, 따라서 이러한 부상 화염의 기저는 잘 혼합된 예혼합 화염처럼 거동함을 추측할 수 있게 하였다. Oh등[23]은 음파가진이 주어진 비예혼합 화염에서 일반적으로 난류 화염하류 영역에서 나타나는 방위각 불안정성 내부 연료 구조가 노즐출구로 앞당겨져 혼합을 촉진시킴으로써 화염 길이가 급격히 짧아지는 과정을 잘 묘사하였다. Al-abdeli 와 Masri[24]는 축 방향 양의 압력 구배에 의해서 연료 관 안쪽에 화염 기저가 존재되는 특성을 갖는 in-burning 화염을 발견하였고, Lee 등[25]은 가진 강도와 연료 유속 변화에 따라 형태가 다른 두 가지 부상 화염이 존재하고, 가진 강도 증가에 따라 화염 부상에 앞서 in-burning 화염, 신장 화염, fat 화염과 같은 다양한 화염 모드들이 존재함과, 화염 모드들

의 특성들을 보고하였다. 본 연구에서는 연료 관 공명 주파수로 가진되고, 질소로 과다 희석된 층류 비예혼합 부상화염에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. 특히 큰 가진 강도에서는 음향 가진에 의해 속도장과 농도장이 본래 유동의 속도장과 농도장에 비해 관이하게 변화되어 부상된 화염의 기저가 잘 혼합된 예혼합 화염과 유사한 거동을 보일 것이라는 가능성에 연구의 초점을 맞추었다. 그리고 층류 부상 화염에서 음향 가진에 의한 화염 기저의 응답과 화염 소화현상 역시 본 연구에서 토의되었다.

## 2. 실험

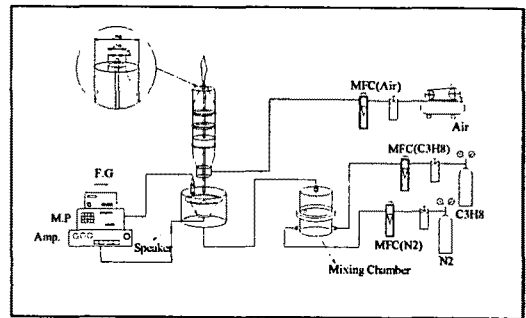


Fig. 1 Schematic of burner and flow system

실험 장치는 Fig.1 에서처럼 버너와 유동 조절 장치, 그리고 음향 가진 장치로 구성되었다. 연료 노즐은 내경 5.0mm인 파이렉스 관으로 제작하였고, flame-holding 영향을 배제하기 위하여 끝은 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, 실험 시 유동 교란을 최소화하기 위해  $500 \times 500 \times 1050$ mm인 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 주파수는 큰 가진 강도를 얻기 위해 연료관의 공명 주파수로 고정되었고, 159Hz이다. 주위 여건과 관계없이 실험을 수행하고자 가진실 상단에 마이크로 폰(Micro phone)을 장착하여 음압의 정도를 확인하였다. 노즐 출구에서 측정된 주기

적인 속도 성분의 peak-to-peak에 의해 정의되는 가진 진폭( $U_f$ )은 기존 연구[23]에서 보고된 것과 같이 유동 속도에 따른 음압 정도와 잘 연관되고, 따라서 무차원 속도인 가진 강도( $U_f/U_0$ )는 노즐 출구에서 측정된 주기적인 속도성분의 peak-to-peak와 노즐 출구 평균 유속( $U_0$ )의 비로 표현된다. 축방향 속도 성분은 연소 생성물의 대부분이 공기 성분이라는 가정 하에서 공기를 사용하여 연료 관 공명 주파수가 172Hz일 때 I-형 열선 probe와 등은 풍속계를 이용하여 측정하였다. 부상 높이는 ICCD 카메라를 사용하여 1/1000sec의 노출시간으로 매 경우 100장을 촬영하여 측정하였다. 내부 연료 구조와 화염간의 상호 관계를 규명하기 위해 Z-형태의 쉬리렌 기법을 사용하였고, 부상화염 기저 하단에서 연료와 산화제의 평균 농도 측정을 위해 가스 크로마토그래프(gas chromatograph)를 이용하였다.

## 2. 결과 및 분석

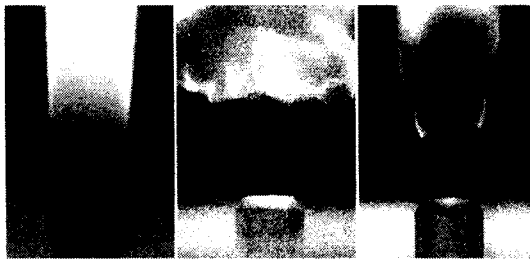


Fig. 2 Comparison of representative flame shapes with the forcing strength; (a) unforced flame, (b) collapsibly mixed flame, and (c) typical edge flame

본 연구에서 주된 관심사는 연료 관 공명 주파수로 가진 되어 다양한 화염 모드를 거쳐 화염 부상이 일어난다는 기존연구[25]의 보고로부터 음향 가진 되어 생성되는 내부 연료구조와 부상화염간의 상호 작용에 대한 문제에 있다. Fig. 2는 연료 관 공명 주파수로 가진되며, 가진 강도를 증가시키에 따라 나타나는 화염 형태 변화를 보여준다. 그림 2(a)의 화염은 가진 이 없는 상태에서의 전형적인 층류 비예혼합 부착화염이다. 관 공명 주파수로 음향 가진된 화염은 가진 강도에 따라 매우 다양한 거동을 보이는데 상대적으로 가진 강도가 큰 경우 화염은 Fig. 2(b)처럼 화염길이가 눈에 띄게 짧아지고 체트의 폭이 상당히 증가되며, 내부 연료구조와의 상호 작용으로 인해 화염 기저가 매우 찌그러지고 주름져 있음으로 특성 지어지는 난류 부상화염의 기저와

유사한 현상을 나타낸다. 이러한 현상은 기존 연구들[22, 23, 24, 25]에서 가진으로 인해 이미 증폭되어져 어떤 가진 위상에서는 음의 값을 갖는 순간적인 속도의 주기적인 반복으로 인해 나타난다고 이미 보고되었고, 이 현상을 붕괴 혼합(collapsible mixing)이라고 명명하였다. 붕괴 혼합에 대한 직접적인 증거는 노즐 출구 근처의 연료 줄기의 폭이 연료 관 안지름보다 상당히 줄어든다는 것이다. 따라서 주위 공기는 연료관 내부로 다량 유입된다. 이처럼 붕괴 혼합으로 인해 부상된 화염의 기저는 edge flame 이라기보다 잘 혼합된 예 혼합 화염처럼 보여진다. 위와는 다르게 Fig. 2(c)에서 보여지는 부상 화염은 작은 가진 강도에서 화염이 부상되며 전형적인 층류 부상화염의 형상을 보이고있다. 이 부상화염의 기저는 가진에 의해 형성되는 와동들과 상호 작용하는 edge flame 의 거동을 보이는 것으로 사료된다. 한편 최근의 연구들에서는 난류 부상화염의 기저 역시 edge flame의 거동이 관찰됨을 보고하고 있다. 그렇다면 현 연구의 거시적인 관찰로부터 Fig. 2(b)의 화염기저가 잘 혼합된 예혼합 화염형태의 거동을 보이는지 아니면 상당히 찌그러진 edge flame의 거동을 보이는지는 논란의 여지가 있다. 한편 Fig. 2(c)에 보여진 전형적인 edge flame에서도 층류 부상화염 기저가 극단적으로 큰 가진 강도에서도 edge flame의 특성을 유지할 것인지 아니면 잘 혼합된 예혼합 화염의 특성을 나타낼 것인지에 대한 주의 깊은 관찰이 필요하다고 생각한다.

Fig. 3은 노즐 출구 속도와 가진 강도 증가에 따른 순수 프로판에 대한 화염 안정화 선도이다. 노즐 출구 속도변화에 따라 화염 부상 시기의 가진 강도 값을 고체 기호로 표시하였다. Fig. 3에서 나타낸 사진들은 ICCD 카메라를 이용해 노출 시간 1/1000sec로 촬영된 각각의 화염모드들의

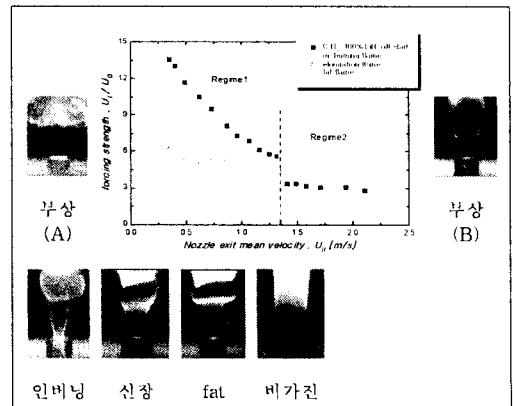


Fig. 3 Flame stability curve and flame modes according to forcing strength for pure propane.

순간 상이다. 상대적으로 큰 가진 강도에서(영역 1이라고 칭함) 부상된 화염은 가진 강도 증가에 따라 기존 연구[25]에서처럼 fat 화염, 신장화염, 인버닝(in-burning) 화염 등의 다양한 화염 모드를 거쳐 부상된다. 영역 2에서 화염은 영역 1보다 상대적으로 작은 가진 강도에서 화염이 부상하며, 영역 1에서처럼 다양한 화염 모드는 나타나지 않고, 부상 화염선단은 앞서 설명한 것처럼 전형적인 edge flame의 형상을 나타내고 있다. 영역 2의 100% 프로판인 경우 노즐 출구 속도가 2.1m/s 이상이면 천이 및 난류영역에 속하게 되어 본 실험에서는 제외되었다. Fig. 3에서 노즐 출구 속도 증가에 따라 화염 부상에 요구되는 가진 강도는 점차 감소함을 볼 수 있다. 이것은 가진 없이도 화염이 부상하는 임계 출구 속도가 존재함을 의미하고, 이것은 이미 기존 연구에 의해서 밝혀졌다[9-12]. 본 연구에서는 가진 없이 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 마이크로 폰(Micro Phone)의 측정 가능한 범위를 벗어나게 되는데, 측정 가능한 범위 내에서 가진 강도를 최대한 증가시켰음에도 불구하고 화염은 노즐에서 떨어지지 않는다. 이러한 현상은 화염이 결코 부상하지 않고 곧바로 소화될 것인가 부상한 후 소화될 것인가 하는 의문을 갖게 한다. Fig. 3의 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. 그림 4에서 보여지는 것처럼 가진 없이도 화염 부상이 일어나는 노즐 출구 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 화염 부상이 일어난다. 90% 질소희석 조건에서는 모든 경우의 노즐 출구 속도에서 화염 부상과 거의 동시에 화염 소화가 발생했다. 그러나 출구 유속이 0.4-1.0m/s 사이일 때 짧은 기간동안 부상화염의 oscillation[9-12]이 관찰되었고, 최종적으로 화염은 소화되었다. 부상 화염의 안정성은 노즐 출구 유속에 절대적으로 관련되므로 화염 소화까지 도달하는 시간은 노즐 출구 유속이 감소함에 따라 점차 길게 소요됐다. 앞서 언급한 결과들로부터 가진된 부상화염의 거동은 각각의 영역에서 매우 다를 것으로

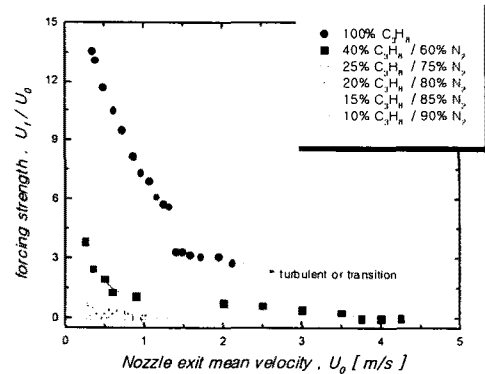


Fig. 4 Flame stability curve according to forcing strength and nozzle exit velocity for a variety of N<sub>2</sub>-diluted flames

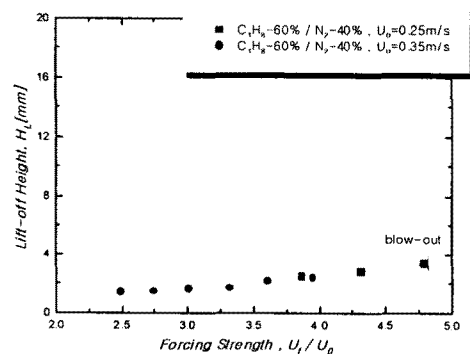


Fig. 5(a) Variation of flame lift-off height with forcing strength in regime 1.

기대된다.

Fig. 5는 영역 1에서 가진된 부상화염의 거동을 나타내고 있다. Fig. 5(a)는 화염 부상 높이이고 Fig. 5(b)는 슈리렌 이미지이다. Fig. 5(a)에서 보여지는 것처럼 화염 부상 높이는 모든 출구 속도에서 가진 강도 증가에 따라 조금씩 증가하고, 출구 유속 0.25m/s에서 가진 강도가 4.85일 때 화염 소화가 일어난다. Fig. 5(b)의 슈리렌 가시화는 화염소화가 일어나는 이유를 명확히 설명해준다. Fig. 5(b)에서 보여지는 것처럼 가진되지 않은 화염은 전형적인 층류 부착화염이다. 화염 안쪽의 내부 연료 구조는 가진 강도 증가에 따라 잘 조직된 와동들이 다양하게 변화되며, 와동들의 형상에 따라 가진 강도( $U_f / U_0$ ) 1.40에서 fat 화염이, 가진 강도 1.72에서 신장 화염이 그리고, 가진 강도 2.97에서 인버닝(in-burning) 화염이 각각 관찰된다. 가진 강도 3.39에서 vortex braid와

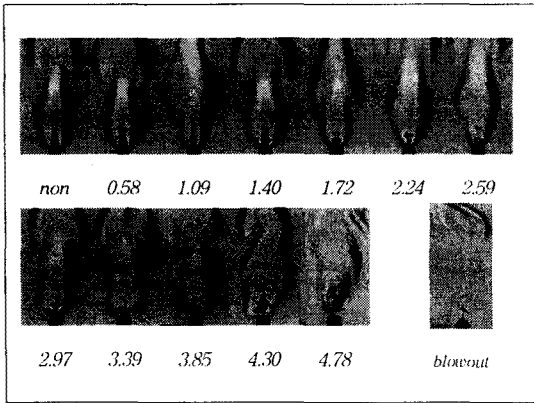


Fig. 5 (b) Representative schlieren images with forcing strength in regime 1 ; 40%  $C_3H_8/60\% N_2$ ,  $U_0 = 0.25m/s$

상호작용 할 경우 화염은 노즐에서 부상되며, vortex의 rolling-up부분과 상호 작용 할 경우에는 다시 노즐에 부착된다. 가진 강도 3.85에서 화염은 완전히 부상되고, 가진 강도 4.30에서 내부 연료 구조는 vortex들 사이의 복잡한 상호작용으로 인하여 상당히 일그러지고 작은 규모의 eddy들로 변하게 된다. 가진 강도 4.78에서는 작은 규모의 연료 eddy들이 관찰되고 주위 공기유입으로 인한 혼합 촉진으로 잘 혼합된 예혼합 화염처럼 보인다. 마지막 화염 소화 사진은 가진 강도 4.78에서 화염 소화 거동을 나타내고 있다. Fig. 5(b)에서 가진 강도 4.78일 때의 보여지는 것처럼 화염소화 현상은 화염 기저의 국부적인 화염 stretch의 증가로 인해 초래되는 화염 소화 현상이라고 판단된다.

Fig. 6은 영역 2에서 가진 강도에 따른 부상화염의 거동을 묘사하고 있다. Fig. 6(a)는 화염 부상 높이, (b)는 슈리렌 이미지를 보여주고, (c)는 이 영역에서 나타난 특이한 화염의 직접 상을 나타내고 있다. 영역 2는 Fig. 4에서 보여진 화염 부상을 위해 필요한 가진 강도가 영역 1에 비해 상대적으로 작고 노즐 출구 유속이 증가함에 따라 부상에 요구되는 가진 강도가 점차 감소하는 특성을 보이는 영역이다. Fig. 6(a)에서 보여지는 것처럼 화염 부상 높이는 가진 강도 증가에 따라 조금씩 증가하다가 어느 지점부터는 거의 변화가 없음을 관찰할 수 있다. 세부적인 설명은 Fig. 6(b)의 가시화 결과와 비교를 통해 설명하겠다. Fig. 6(b)는 영역 2에서 가진 강도 증가에 따른 부상화염의 슈리렌 상이다. Fig. 6(b)에서 보듯이 가진 강도 증가에 따라 가진 되지 않은 층류 연료 줄기(stem)로부터 잘 조직화된 와동들이 점차 형성된다. 가진 강도 증가로 인해 국부적 화염

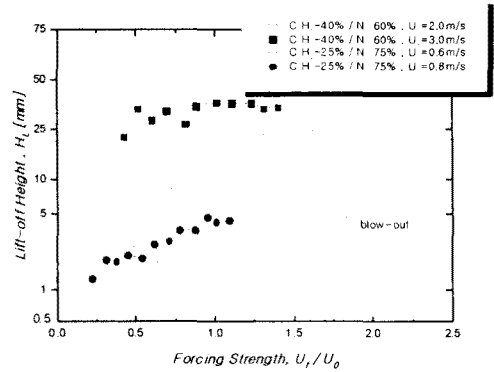


Fig. 6 (a) Variation of flame lift-off height with forcing strength in regime 2.

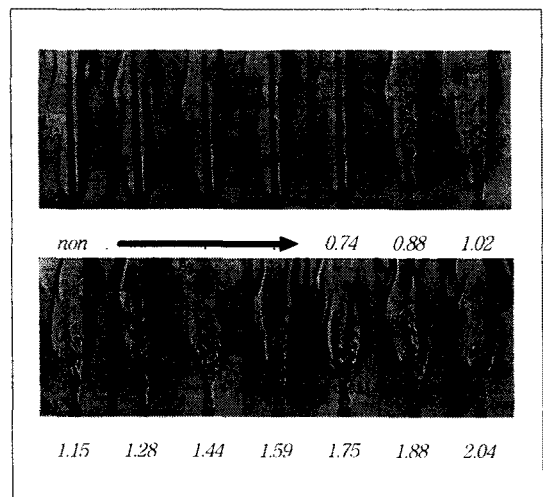


Fig. 6(b) Representative schlieren images with forcing strength in regime 2 ; 40%  $C_3H_8/60\% N_2$ ,  $U_0 = 2.0m/s$

stretch가 증가되어 가진 강도( $U_f/U_0$ ) 0.88에서 화염은 부상된다. 어떠한 순간 내부 연료구조는 좌우로 불균형을 이루며 화염을 회전하게 만든다. 이러한 화염 회전 현상은 기존 연구[7]에서 난류 부상화염의 화염 깜박거림과 관련된다고 언급되었다. 화염 회전은 비정규적으로 시계방향으로 회전하다가 시계 반대 방향으로도 회전하며 상류 유동이 앞서나간 연료 구조에 접근하는 동안 앞서나간 연료 구조가 감속되도록 한다. 상류 구조가 꼬여져 있어서 가진 강도가 1.15에서 화염 회전이 상류 유동 구조에 영향 받고 있는 것을 잘 보여주고 있다. 가진 강도가 1.28에서는 와동들간의 복잡한 상호 작용을 통해 내부 연료구조는 상당히 찌그러지고 하류 연료 구조는 작은

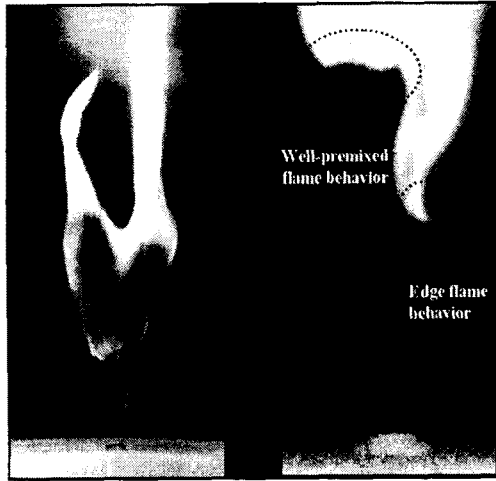


Fig. 6 (c) Direct photos of coexistent behavior of well-premixed and edge flames interacting with inner well-organized vortices; forcing strength = 1.15 ;  
40%  $C_3H_8$  / 60%  $N_2$ ,  $U_0 = 2.0\text{m/s}$

규모의 와동들로 변하게 된다. 가진 강도가 1.15~1.88인 지점 내에서는 두 가지 화염 거동이 천이적으로 공존하고 있다. 이러한 천이적인 거동을 직접 상을 통해 나타낸 Fig. 6(c)는 가진 강도 1.88에서 묘사된 것처럼 상류화염은 잘 조직된 와동과 상호 작용하는 edge flame의 거동을 보이며, 하류의 화염은 잘 혼합된 예혼합 화염의 거동을 보이고 있다. Fig. 6(a)에서 보여지는 것처럼 거의 변화 없는 화염 부상 높이는 연소 속도와 유동의 평균 속도가 일치하는 지점에서 화염이 정체되는 잘 혼합된 예 혼합 화염의 거동과

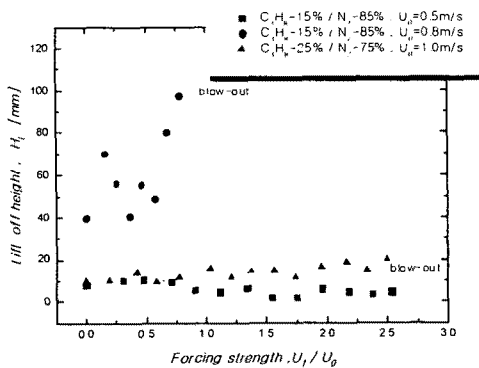


Fig. 7(a) Variation of flame lift-off height with forcing strength in regime 3.

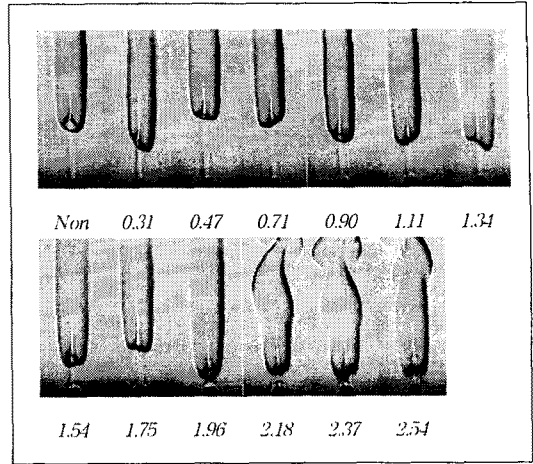


Fig. 7(b) Representative schlieren images with forcing strength in regime 3 ; 15%  $C_3H_8$  / 85%  $N_2$ ,  $U_0 = 0.5\text{m/s}$

밀접하게 관련되는 것처럼 보인다. Fig. 6(a)에서 화염 소화는 노즐 출구 속도가 0.6m/s에서 일어나며 국부 화염 stretch가 매우 커서 화염 소화가 일어나는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 영역 3에서 가진 강도에 따른 화염 부상 거동을 나타내고 있다. Fig. 7(a)는 화염 부상 높이이고 Fig. 7(b)는 큰 가진 강도에서 화염 자기 진동(flame self-oscillation)에 대한 슈리렌 상이며, (c)역시 큰 가진 강도에서 화염 자기 진동(flame self-oscillation)에 대한 슈리렌 상이다. 영역 3은 화염이 가진 없이도 노즐 출구 속도만에 의해서 자발적으로 부상하는 영역이다. Fig. 7(a)는 두 가지 유형의 화염 부상 거동을 가진 강도증가에 따라 표현하였다. 하나는 가진 강도 증가에 따라 화염 부상 높이가 약간 변하고 부상 화염이 노즐 근 거리에 위치하는 경우이다. 다른 하나는 화염 부상 높이가 가진 강도 증가에 따라 초기에 증가하다가 최소가 된 후 다시 증가하며 화염은 노즐 원거리에서 존재한다. 기존연구[26]에 따르면 층류 부상 화염에서 화염 자기 진동은 화염 소화점 근처에서 나타나며 Lewis 수가 1보다 크고, 열손실 과 작은 Damköhler 수와 밀접한 관련이 있음을 보고하였다. Fig. 7에서 연료의 effective Lewis 수는 85% 질소 희석 조건에서 1.75이고, 75% 질소 희석 조건에서 1.64으로 이러한 희석 조건들에서는 자기 진동이 발생하는 것은 기존 연구에서 이미 보여진 바 있다[9, 26]. Fig. 7(b)에서 보여지는 것처럼 화염 기저는 음향 가진으로 인해 잘 조직된 vortex들로부터 영향을 거의 받지 않기 때문에 작은 가진 강도에서 가진 강도가 0.90에 이르기까지 고유의 자기 진동

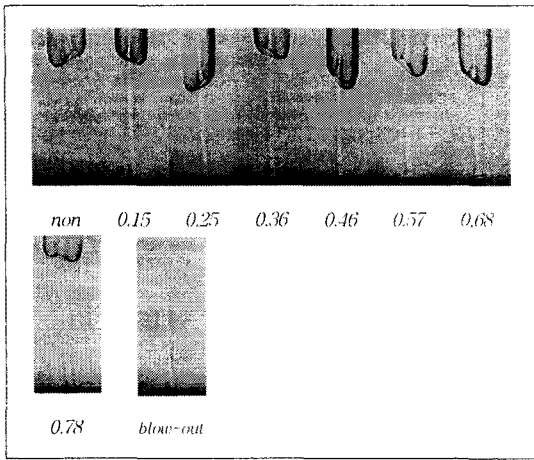


Fig. 7(c) Representative schlieren images with forcing strength in regime 3 ; 15%  $C_3H_8$  / 85%  $N_2$  ,  $U_0 = 0.8m/s$

(self-pulsation)을 보이고 있다. 그러나 더욱 가진 강도가 증가되면 화염 기저는 음향 가진으로 인해 형성된 vortex들과 상호 작용하게 된다. 일반적으로 관 공명 주파수를 이용한 큰 가진 강도는 어떠한 위상에서 상류 속도가 증폭되는 반면 후류 유동 속도가 음의 순간 속도로 인해 감소되는 것처럼 유동장을 극적으로 변화시킨다[23]. 가진 강도가 1.96에서 내부 연료 줄기(stem)의 끝 부분이 가진되지 않은 화염의 내부 연료 줄기의 끝 부분에 비해 상당히 짧아져 있는 것은 앞서 설명한 공명 주파수로 음향 가진 된 화염의 극적인 유동장 변화를 확실히 하는 것이다. 기존연구 [12]에서는 Lewis 수 효과에 덧붙여 혼합기 강도 (mixture strength)는 진동 안정(pulsating stability)을 위한 독립적인 중요한 제어 인자라고 보고하며, 혼합기 강도의 증가는 자기 진동을 억제시킴을 보고한 바 있다. Fig. 7(b)에서 큰 음향 가진은 하류의 유동 속도를 감소시키고 화염 기저는 상류로 이동하게 되며, 결과로 혼합기 강도는 노즐 출구에서 증가하여 화염 자체 진동이 억제된다고 사려된다. 이것은 Fig. 7(a)에서 화염 자체 진동이 없이 거의 부상 높이가 변하지 않는 점으로부터 확신되어진다. 화염 소화는 가진 강도가 2.54보다 큰 가진 강도에서 발생하며 이것은 강한 가진이 effective Lewis 수와 화염 stretch를 증가시켜서 발생된다고 판단된다. 한편, Fig. 7(c)에서 보여지는 것처럼 큰 가진 진폭에서 자체 진동에 대한 두 가지 효과는 서로 경합하고 있다. 즉, 음향적으로 큰 가진 강도는 하류 유동 속도의 감소를 초래하고 반면에 주위 공기들의 유입을 증가시켜 혼합기 강도를 감소시킨다. 결

과적으로 화염 부상 높이는 가진 강도가 0.68에 이르기까지 하류와 상류를 반복하여 이동한다. 가진 강도의 증가는 혼합기 강도의 감소 효과를 우세하게 하여, 부상 높이는 증가하고 결과적으로 화염은 소화된다.

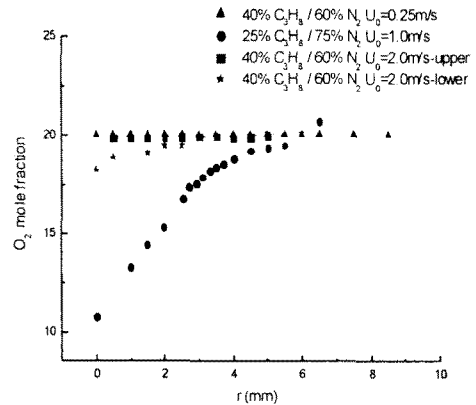


Fig. 8 Comparison of Oxygen mole fraction profiles at the bases of lift-off flames in each regime.

영역 1,2,3에서 관찰되는 부상 화염의 부상 거동 특성을 부상 높이 측정과 내부 연료 가시화를 통해 관찰하여 보았다. 앞서 설명한 각 영역들에서 나타나는 부상 거동들을 더욱 명확히 밝히기 위하여 가스크로마토 그래프를 이용하여 서로 다른 부상 거동을 보이는 부상화염 기저 하단에서 반경 방향으로 산소 농도를 측정하여 보았고, Fig. 8에 표현하였다. Fig. 8에 표현된 농도는 각 경우 특정 부상 거동을 보이는 부상 화염의 최적 조건과 속도 조건 그리고 가진 조건을 모두 고정하고 반경 방향으로 측정된 평균 농도이다. 영역 1의 기저가 잘 혼합된 형태를 갖는 부상화염의 기저는 반경방향으로 산소 농도가 거의 일정함을 나타낸다. 이러한 결과는 영역1의 잘 혼합된 형태를 갖는 부상화염의 기저는 예 혼합 화염의 거동을 보이고 있음을 명확히 보여주는 것이다. 이와는 다르게 영역 3의 가진 없이도 화염이 부상하는 경우의 반경 방향으로 산소 농도 분포는 노즐 바깥쪽으로 벗어날수록 증가한다. 이러한 결과는 영역 3의 가진 없이도 부상하는 화염의 기저는 부분 예 혼합연소를 하는 edge flame의 거동을 보이고 있음을 나타낸다. 잘 혼합된 형태의 화염 구조와 와동과 상호 작용하는 edge flame의 구조가 공존하는 천이적인 거동을 보이는 영역2의 부상화염 기저 역시 노즐로부터 상류에 위치한 edge flame의 거동을 보이는 화염기저에서는

반경방향으로 산소 농도 구배가 존재하고 상대적으로 하류에 위치한 잘 혼합된 형태의 화염 구조를 갖는 화염의 기저는 반경 방향으로 산소 농도가 거의 일정함을 관찰 할 수 있다.

#### 4. 결 론

연료 관 공명 주파수로 음향 가진되고 질소로 과다 희석된 프로판 제트에서 화염 부상 거동에 대한 실험적 연구가 수행되었고 다음과 같은 결론을 얻었다.

노즐 출구 유속과 가진 강도 증가에 따라서 화염 안정화 선도를 작성하였고, 가진 강도와 노즐 출구 유속에 따라 음향 가진 된 부상 화염의 부상 거동은 크게 세 가지로 구분된다. 첫째 큰 가진 강도로 인해 발생된 붕괴 혼합에 의해 부상 화염의 기저가 잘 혼합된 예혼합 화염처럼 거동하는 경우, 둘째 적절한 가진 강도에서 잘 조직된 내부 연료 와동들과 상호 작용하는 edge flame과 잘 혼합된 예혼합 화염이 천이적으로 공존하는 경우, 셋째 작은 가진 강도 또는 가진이 없는 경우 부상 화염의 기저가 edge flame의 거동을 보이는 경우로 구분된다. 노즐 출구 유속을 고정하고 가진 강도 증가에 따라 부상 화염을 관찰한 것로부터 영역1에서 부상 거동은 큰 가진 강도에서 붕괴 혼합에 의해 잘 혼합된 예혼합 화염의 거동을 보이며, 영역 2에서 와동 상류로의 주위 공기의 유입과 화염 회전으로 인해 하류 연료 구조의 감속의 복잡한 상호 작용은 내부 연료 구조가 작은 규모의 연료 eddy들로 바뀌게 되어 이 부분의 화염 기저는 잘 혼합된 예혼합 화염의 거동으로 간주된다. 이것의 직접적인 증거는 화염 기저에서 산소 농도 측정 결과가 반경 방향으로 거의 일정하다는 것이다. 그러나 내부 연료간의 상호작용이 없는 상류 와동의 경우 화염 기저는 순간적으로 잘 조직된 상류의 와동으로 이동하고, 이때의 화염기저는 절대적으로 edge flame의 형상을 보인다. 결과적으로 영역 2에서는 edge flame과 예혼합 화염 거동이 천이 적으로 공존함을 알 수 있다. 이러한 현상은 상당히 난류 강도가 큰 난류 부상화염에서는 화염 기저가 잘 혼합된 예혼합 화염과 유사한 거동을 보일 가능성을 제안하고 있다. 영역 3에서 화염 부상 거동은 하류의 유동 속도의 감소와 혼합기 강도의 감소 즉 가진 강도 증가에 따른 effective Lewis 수의 증가와 화염 stretch의 증가 효과사이의 복잡한 결합에 크게 영향 받는다. 결국 이 영역에서 부상 화염은 자발 진동을 반복하게 되고 자발 진동의 진폭이 커지게 되면 노즐 근거리에만 유효한 가진의 영향력으로부터 멀어지게 되어 부상된 화염의 기저는 전형적인 edge flame의

거동을 보임을 알 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 2003년도 두뇌 한국 21 사업에 의하여 지원되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] Vanquickenborne, L. and van Tiggelen, A. *Combust. Flame* 10:59, 1966.
- [2] Kalghatgi, G.T., *Combust. Sci. Technol.* 26:233, 1981.
- [3] Schefer, R.W., Namazian, M., Filtopoulos, E.E.J., and Kelly, J. *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, p.1223, 1994.
- [4] Peter, N. and Williams, F.A. *AIAA J.* 21:423, 1983.
- [5] Miake-Lye, R.C. and Hammer, J.A. *Proc. Combust. Inst.* 22:817, 1988.
- [6] Chao, Y., C., Jeng, M., S. *Proc. Combust. Inst.* 25:333, 1992.
- [7] Park, J.W. and Shin, H.D. *J. Institute of Energy*, 66:198, 1993.
- [8] Muller, C.M., Breitbach, H., and Peters, N. *Proc. Combust. Inst.* 25:1099, 1994.
- [9] Chung, S.H. and Lee, B.J. *Combust. Flame* 86:62, 1991.
- [10] Ko, Y.S. and Chung, S.H. *Combust. Flame*, 118:151, 1999.
- [11] Won, S.H., Kim, J., Shin, M.K., Chung, S.H., Fujita, O., Mori, T., Choi, J.H., and Ito, K. to be appear in *Proc. Combust. Inst.* Vol. 29, 2002.
- [12] Furi, M., Papas, P. and Monkewitz, P.A. *Proc. Combust. Inst.* 28:831, 2000.
- [13] Veynante, D., Verisch, L., Poinso, T., Linan, A., and Ruetsch, G. *Proc. of the Summer Program*, Stanford/Ames center of Turbulence Research, 1994.
- [14] Ruetsch, G. R., Verisch, L., Linan, A. *Phys. Fluids* 7:6:1447, 1995.
- [15] Muoiz, L. and Mungal, M.G. *Combust. Flame* 111:16, 1997.
- [16] Yule A.J. *J. of Fluid Mech.* 66:35, 1978.
- [17] Hussain, A.K.M.F. *J. fluid Mech.*, 173:303, 1986.
- [18] Vermeulen, P.J., Ramesh, V. and Yu, W.K. *Journal of Engineering for Gas turbines and*



*Power* 108:479, 1986.

[19] Anthony, W.S. and Braid, J.C. *Phys. Fluids*, 208:2317, 1985.

[20] Pearson, L.G., Gabelli, A., Shepherd, I.G. and Hamilton, N.B. *Joint International Conference Australia/New Zealand and Japanese of The Combustion Institute*, University of Sydney, Sydney, pp24-27, 1989.

[21] Gutmark, E., Parr, T.P., Hanson-Parr D.M. and Schadow. K.C. *J. Heat Transfer*, 111:148, 1989.

[22] Kim, T.K., Park, J. and Shin, H.D. *Combust. Sci. Tech.*, 89:83., 1993.

[23] Oh, S.K., Shin, H.D. *Int. J. Energy Res.*, 22:343, 1998.

[24] Al-abdeli, Y.M. and Masri, A.R. *The second Asia Pacific Conference on Combustion*, Tainan, Taiwan, p.214, 1999.

[25] Lee, K.M., Kim, T.K., Kim, W.J., Kim, S.G., Park, J. and Keel, S.I., *Fuel* 81:2249, 2002.

[26] MARC FURI, PAUL PAPAS AND PETER A. MONKEWITZ *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 28, 2000/pp.831-838