

## 論文

## 층류 비예혼합 분류화염에서 음향가진에 의한 유동특성 연구

오광철\*, 이기만\*\*

## A Study of Flow Characteristics by Acoustic Excitation on the Laminar Non-premixed Jet Flame

Kwang Chul Oh\* and Kee Man Lee\*\*

## ABSTRACT

An experimental study has been conducted to investigate the effects of forcing amplitude on the tone-excited non-premixed jet flame of the resonance frequency. Visualization techniques are employed using the laser optic systems, which are RMS tomography, PLIF and PIV system. There are three lift-off histories according to the fuel flow rates and forcing amplitudes; the regime I always has the flame base feature like turbulent flame when the flame lift-off, while the flame easily lift-off in the regime II even if a slight forcing amplitude applied. The other is a transient regime and occurs between the regime I and regime II, which has the flame base like the bunsen flame of partial premixed flame. In the regime I and II, the characteristics of the mixing and velocity profile according to the forcing phase were investigated by the acetone PLIF, PIV system. Particular understanding is focused on the distinction of lift-off history in the regime I and II.

## 초 록

공명 주파수의 음파로 가진된 비예혼합 분류화염에서 가진 강도에 대한 영향을 실험적으로 조사하였다. 이를 위해 Mie 산란광 단면법, PLIF, PIV 등 광학적 가시화 방법이 사용되었다. 가진된 분류화염의 부상경로는 연료유량 및 가진 강도에 따라 크게 세 가지 영역으로 구분되는데, 비교적 큰 가진 강도에서 부상될 때 화염기저가 마치 난류화염처럼 부상되는 영역I과 작은 가진 강도에서 쉽게 부상되는 영역II 그리고 이 두 영역들 사이에서 부상된 화염기저가 부분 예혼합의 분젠화염과 같은 형태로 과도기적 영역이 존재함을 알았다. 본 연구에서는 영역I과 II로 구분되는 부상경로 차이에 대한 이해를 높이고자 가진 위상에 따른 노즐과 화염기저간의 유동 혼합과 속도 분포 특성을 아세톤 PLIF와 PIV 시스템을 사용하여 조사하였다.

**Key Words :** Acoustic Excitation(음향 가진), Forcing Phase(가진 위상), Lift-off Regime (부상 영역), PLIF(평면레이저 유도형광계), PIV(입자이미지 유속계)

## 1. 서 론

† 2009년 12월 28일 접수 ~ 2010년 1월 25일 심사완료

\* 정회원, 자동차부품연구원 환경시스템연구센터

\*\* 정회원, 순천대학교 기계우주항공공학부  
교신저자, E-mail : kmlee@sunchon.ac.kr  
전남 순천시 매곡동 315번지

가진되지 않은 층류 비예혼합 분류화염에 주  
기적인 가진을 주게 되면 분사되는 유량에 따라  
서로 다른 형태의 화염구조로 부상되는 것이 이

전의 연구를 통해서 관찰되었다.<sup>(1)-(3)</sup> 분류화염에서의 화염부상 현상은 분사노즐 팁 근처에 부착된 화염기저 부분이 이탈되어 나타나는 현상이고, 규칙적으로 가진된 비예혼합 분류화염은 가진에 의해서 주기적으로 밀고 당기는 속도 변동분이 더해지는 형태이므로 이러한 속도 변동분이 노즐근처 화염기저 부분인 화염에지(flame edge) 거동에 영향을 미치게 될 것이다.

이전 연구에 의하면 적은 연료 분사량 영역에서는 큰 가진 강도로 화염이 부상되는 반면에 큰 연료 유량 영역에서는 화염이 쉽게 부상되는 현상들이 가진에 의해 영향을 받는 연료 관 출구 근처 혼합 층에서 에지형태로 거동하는 화염기저 상태와 밀접한 관련이 있음을 예측하게 되었다.<sup>(3), (4)</sup>

따라서 본 연구에서는 이러한 영역 구분이 노즐 근처 화염 기저에서 가진 변수(강도 및 위상)에 따라 화염과 주위류 간 상호작용과 직접적으로 관련된 것으로 판단하여 이러한 상호작용에 의한 혼합성능을 PLIF 농도 결과와 PIV 속도분포 특성을 분석하여 가진된 분류 화염에서 부상 경로 차이에 대한 물리적 이해를 높이고자 한다.

## II. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치 및 계측시스템

본 연구에 사용된 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 버너는 축대칭 비예혼합 화염을 얻기 위해 가운데 파이프 형태의 분류관이 있고 관 주변으로 주위류가 흐르는 일반적인 동축류 버너로 제작하였다. 분류관은 내경 5mm, 길이 660mm인 스테인리스 관을 사용하였다. 연료는 상용 프로판을 사용하였으며 연료와 공기 유량은 습식 가스 메타와 버블 유량계로 검정된 질량 유량계(MFC)를 조정기로 정밀하게 조절하여 사용하였다. 가진 강도에 미치는 주위류 영향을 파악하고자 균일한 속도 형성을 위해 축소-확대 노즐과 함께 2개의 허니컴과 3장의 미세 메쉬를 이용한 축소비 4인 주위류 풍동을 제작하여 사용하였다.

음향진동을 발생시키는 가진장치는 정현파 발생의 함수발생기, 증폭기와 원형 아크릴 통 중앙에 100Watt 출력의 오디오 스피커가 설치된 가진 통으로 구성되어 있으며, 가진 강도를 정의하고자 가진 통 상부에 마이크폰을 설치하여 유동장에 가해지는 음압을 측정하여 가진 진폭( $u_f$ )을 산출하였다.

Fig. 2는 가진된 비예혼합 분류화염의 농도와

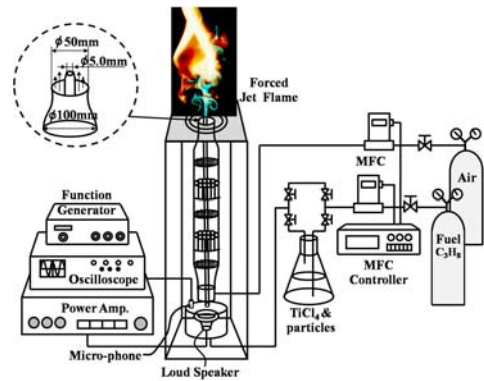


Fig. 1. Experimental set-up

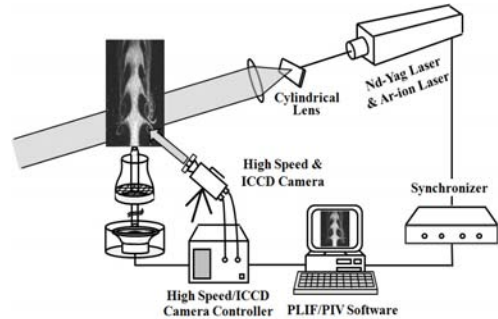


Fig. 2. Laser optic measurement system

유동장 특성을 파악하고자 본 연구에 사용한 레이저를 이용한 광 계측 시스템을 보여주고 있다. 먼저 가진된 분류화염의 거시적 형태를 이해하기 위해 가진 위상신호에 따른 화염과 분류관 거대 와류의 거동은 레이저 연속광과 원통형 렌즈로 가시화된 Mie 산란광 단면 영상을 고속 카메라(Photron, FASTCAM)를 사용하여 분석하였다. 또한 연료관 관 공명 주파수에서 가진 강도에 의해 재편되는 유동장을 50mJ Nd-Yag 펄스 레이저의 PIV 유속계를 이용하여 연료관 노즐 근처의 속도분포를 측정하여 분석하였다.

또한 가진에 의한 화염 내부구조와 혼합특성을 파악하고자 사용된 연료와 분자량과 물성이 유사한 아세톤 PLIF 기법을 사용하였는데, Fig. 3은 PLIF 계측으로 얻어진 대표적인 이미지로 그림에서 보이는 것처럼 가진된 화염장에서 분사노즐 근처의 화염기저 부분인 에지화염과 연료의 분포가 명확하게 관찰되어 짐을 볼 수 있다.

### 2.2 실험조건

본 가진 연구에 사용된 연료량은 완전 발달된 층류유동에 해당되는 유속 범위이며 연소용 산화

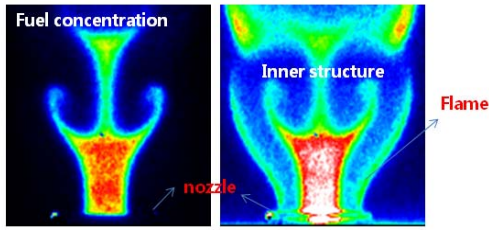


Fig. 3. Conventional images from acetone PLIF and flame luminescence

제로 사용되는 주위류는 0.15m/s에서 0.3m/s까지 가변시켜 주위류 속도가 화염부상에 미치는 영향을 파악하도록 하였다.

가진 주파수는 큰 가진 강도 효과를 얻기 위하여 다음과 같은 이론식으로 계산한 연료관 공명주파수(Resonance frequency,  $f_0$ ) 이론값을 마이크로폰으로 검정하여 185Hz임을 확인하였다.<sup>(6)</sup>

$$f_0 = \frac{n}{2} \cdot \frac{c}{\ell + 4d_0/3\pi}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 공명모드 차수,  $c$ 는 연료의 음속으로 245m/s,  $\ell$ 은 연료관 길이로 본 실험에서는 660mm이며,  $d_0$ 는 연료관 직경으로 5mm이다.

가진 강도( $I_0$ )는 가진 통 상단에 설치된 마이크로폰의 음압을 측정하여 음압에 따른 가진 속도의 진폭( $u_f$ )을 I-형 프로브와 열선 유속계로 측정하여 노즐 출구 평균유속( $u_0$ )과의 비로 표시되는 다음 식으로 가진 강도  $I_0$ 를 정의하였다.

$$I_0 = \frac{u_f}{u_0} \quad (2)$$

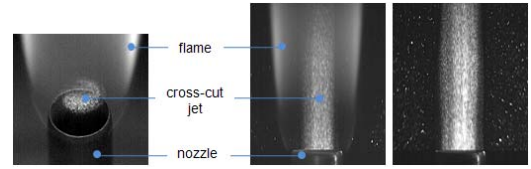
$I_0$ 는 가진 강도,  $u_0$ 는 노즐 출구 평균유속이며 가진 진폭속도  $u_f$ 는 크기는 같으나 방향이 반대인 정현파 가진 신호에 의한 변동 속도 분으로 다음과 같이 정의되는 속도 값이다.

$$u_f = \frac{(u_{f,max} - u_{f,min})}{2} \quad (3)$$

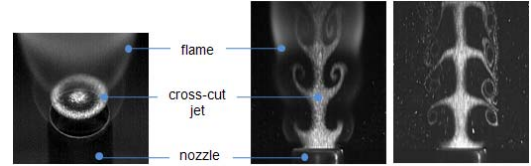
### III. 결과 및 고찰

#### 3.1 가진된 분류 화염 거동 형상

주어진 노즐 직경의 부상임계 이하 분출 유량으로 분사되는 비예혼합 분류 화염에서 외부로부터 주기적인 가진을 주는 경우와 주지 않는 경우 비반응 연료분류와 반응이 있는 분류화염에서 각각의 형상들을 Fig. 4에 나타내었다.



(a) Unforced isothermal jet and flame



(b) Forced isothermal jet and flame ( $I_0 = 3.2$ )

Fig. 4. Comparison of the inner structures

Fig. 4의 좌측 이미지들은 노즐출구 약  $1d_0$  정도 위치에서 Mie 산란광 단면가시화 기법에 의한 수평(horizontal) 방향의 분류단면을 가시화한 것으로 가진에 의한 반경방향의 거동을 이해할 수 있으며, 우측 이미지들은 수직(vertical) 방향으로 가진이 분류의 분출방향에 미치는 영향에 대한 정보를 얻을 수 있는 이미지들이다.

먼저 가진되지 않는 일반 비예혼합 분류화염의 형상을 살펴보면 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 노즐출구에서부터 형성된 연료분류는 노즐직경 크기 정도 그대로 하부로 전개되면서 연료분류 바깥 영역에서 산화제인 주위류 공기와의 확산혼합으로 이론 당량비 근처 지점에서 화염이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이 경우 외부로부터 별도의 가진이 없는 관계로 수평방향의 분류 단면 이미지에서 볼 수 있듯이 분류직경과 같은 원형의 내부 연료분류 단면이 형성되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 (a)와 동일한 유량조건에서 외부로부터 일정한 크기의 가진 강도로 가진되는 경우의 비반응 연료분류 및 화염의 거동에 대한 이미지들이다. 그림에서 보이는 바와 같이 연료분류와 화염이 분류 반경뿐만 아니라 분류 및 상분류 방향으로 가진의 영향을 받아 매우 다른 형태로 거동하고 있음을 볼 수 있다.

가진된 화염에서는 가진 신호에 따라 비교적 잘 구조화된 내부 와류들이 주기적으로 생성되면서 분류와 화염에 영향을 미치게 되는데, 반경방향의 수축-팽창과 같은 분류운동이 분류 분출 방향으로 일정한 와류 진행거리를 확보해 줌에 따라 주름진 형태의 화염이 주기적으로 노즐 출구에서부터 형성됨을 알 수 있다. 이러한 와류들의 주기적인 거동은 비예혼합 분류화염에서 혼합 성능 향상으로 나타나는데 노즐 출구 근처 화염

대에서 가진이 없는 (a)번에 비해 청염부위가 넓게 형성되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5는 가진된 분류화염 거동에 대한 이해를 높이기 위해 정현파의 가진 강도로 가진 하는 경우 위상에 따라 대응하는 분류와 화염의 거동현상들을 보여주는 이미지들이다.

Fig. 5-(a)는 연소가 없는 비반응 상태에서 연료 분류들이 가진되는 위상에 따라 거동하는 모습을 수평과 수직방향의 단면 가시화로 보여주는 이미지들이며, Fig. 5-(b)는 동일 유량과 가진 조건에서 연소반응이 있는 화염장에서 내부 연료의 거대 와류거동과 이에 따른 화염형상을 보여주고 있다. 각 이미지들은 185Hz의 가진 주파수에서 33.5° 위상각격에 해당되는 2000<sup>-1</sup> 초 간격의 고속카메라로 촬영된 영상으로, 보여지는 각 이미지들은 2장 간격으로 위상각(phase angle)은 67° 간격의 이미지들을 보여주고 있다.

수평방향의 단면 이미지에서 보인 가운데 원형 단면은 연료분류 줄기(stem)에 해당되며, 외측 원형 테두리 단면은 연료줄기에 연결되어진 와류 형태의 연료분지(branch)로서 수직방향의 단면 가시화 이미지에서 보면 와동에 의한 와류 말림 부위에 해당되게 된다. 본 연구처럼 연료 측에 주기적인 가진을 주면 노즐출구에서 가진 신호에 따른 주기적인 섭동이 발생하여 앞서 설명한 바와 같이 반경방향과 수직방향으로 분사되는 분류의 확대와 축소운동에 의해 노즐출구서부터 주름진 형태의 화염이 주기적으로 형성됨을 확인 할 수 있다.

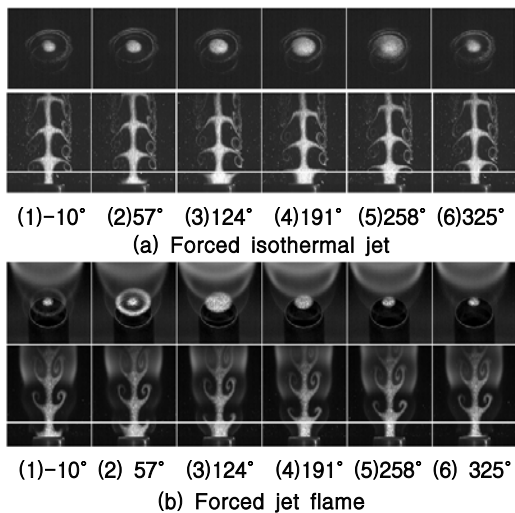


Fig. 5. Phase synchronized images of the forced isothermal jet and jet flame(upper : horizontal, lower : vertical cut)

또한 본 이미지에서는 판독하기는 힘들으나 초당 2000장의 고속카메라로 연속 촬영된 동 영상에서는 PIV 속도 측정을 위해 주위류와 같은 속도로 흘러가는 0.5 $\mu$ m의 산화규소 입자들이 주기적으로 노즐 안쪽으로 유입되었다가 다시 분출되는 현상을 볼 수가 있다. 이러한 현상은 가진 강도가 비교적 큰 경우, 감속위상에 해당되는 90°~270° 위상구간에서 노즐 안까지 주위 산화제가 깊숙이 파고 들어갔다가 가속위상인 270°~90° 위상구간에서 다시 노즐 밖으로 분출되는 주기적인 운동이 이루어지고 있음을 보여주고 있다.

### 3.2 부상임계선도 및 부상화염 이력도

화염 안정화 현상을 크게 화염부상(lift-off)과 화염날림(blow-out)으로 나눈다면 Fig. 6은 본 연구에서 얻은 가진된 비예혼합 분류화염에서 주위류 속도( $u_\infty$ )와 가진 강도( $I_0 = u_f/u_c$ )에 따라 화염이 부상되는 부상 임계선도와 구간별 부상화염 경로가 다르게 나타나는 부상화염 이력 도를 나타낸 선도이다.

선도에서 볼 수 있는 바와 같이 연료출구의 평균유량(속)에 따라 해당되는 부상 임계값이 존재하는 것을 알 수 있는데, 작은 연료유량 범위에서는 화염이 부상하려면 매우 큰 가진 강도 값이 요구되나 유량(속)이 증가함에 따라 낮아지게 되는데 과도기적 현상을 거치면서 급격하게 낮아짐을 볼 수 있다.

또한 동일한 분사유량에서는 주위류 속도가 증가함에 따라 부상 임계값이 작아짐을 알 수 있었으며 연료 분사유량이 증가함에 따라 화염이 부상하는데 요구되는 가진 강도 값은 점차적으로 감소됨을 알 수 있다. 이는 외부로부터 가진이 없어도 분류량 자체 증가만으로도 화염이 부상되는 출구 속도가 존재함을 의미하게 되는데, 본 연구인 경우 주위류가 속도가 없는 경우 가진 강도 0에서 부상 임계 속도 값은 약 9.42m/s로 나타났다.

한편, 가진된 분류화염에서는 화염이 부상되는 경로가 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 크게 세 가지 종류로 나뉘어 존재한다는 사실을 알았다. 즉, 가진 강도가 증가함에 따라 여러 형태의 화염거동을 보이다가 비교적 큰 가진 강도에서 부상과 동시에 화염기저가 난류화염과 같은 형태(like turbulent flame)로 부상되는 영역이 있는가 하면 ("Regime I"형 화염), 조그마한 가진 강도에서 일반 층류 분류화염과 유사한 형태로 쉽게 부상되는("Regime II"형 화염) 영역이 존재하게 되는데, 이들 부상영역에 대한 존재는 이전 연구에서 보고된 것과 동일한 현상이다.<sup>(2), (3)</sup>

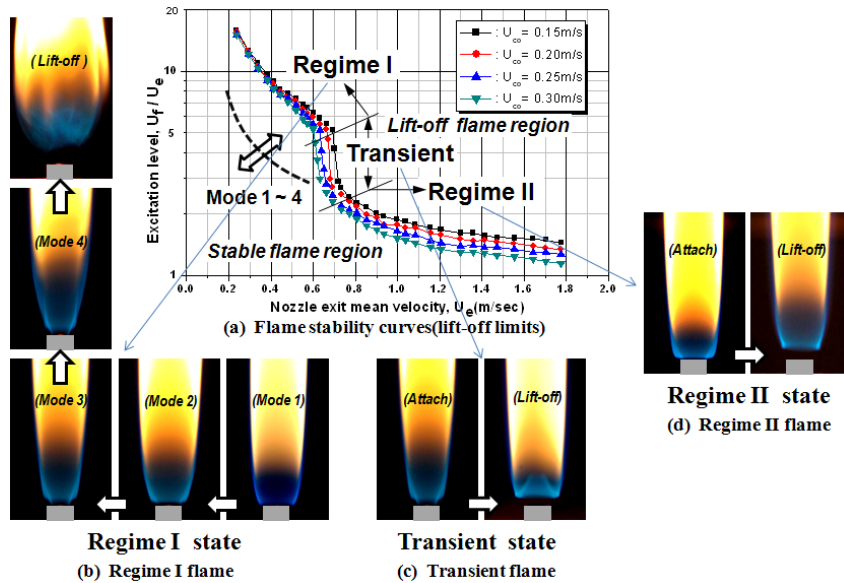


Fig. 6. Flame lift-off limit curves and lift-off histories with three patterns in the forced jet flames

그런데 이 두 영역 사이 좁은 유량조건에서 과도적 형태로 화염기저 부분에서 부분 예혼합 형태의 분진 화염과 같은 형태("Transient"형 화염)로 부상되는 화염대가 존재한다는 사실을 새롭게 발견하였는데, 이러한 과도적 화염부상 현상을 포함하여 전체적으로 세 가지 형태의 부상경로로 나누어 존재함을 알 수 있었다. 과도 형태 화염 부상은 Regime I에서 모드 3 형태의 부착화염에서 모드 4 형태의 부착화염을 거치지 않고 부상되면서 나타나는 현상으로 이에 대한 상세한 현상 규명과 물리적 이해는 추후 계속되는 연구를 통해 보고할 예정이다.

### 3.3 영역별 부상화염 거동 특성

Fig. 7과 8은 앞 절 Fig. 6의 부상 임계선도에서 큰 가진 강도 영역과 작은 가진 강도 영역으로 나누어 나타난 가진된 분류화염에서 가진 위상에 따른 부상화염의 거동 특성을 나타낸 대표 이미지들이다. 양측 그림에서 (a)번 이미지는 두 영역에서 임계 가진 강도 이상으로 가진될 경우 화염이 부상되어 노즐출구로부터 일정 거리 공간에서 부상되어 있는 화염의 직접 사진들을 보여주고 있다. (b)번 이미지는 노즐출구 근처에서 부상된 예지화염 형태의 화염기저 하단으로 주위류인 산화제 공기가 유입되는 속도분포 특성과 이에 따른 혼합정도를 파악할 수 있는 농도분포 특성을 나타내는 이미지들이다. 또한 (c)번 이미지

에서는 가진 위상에 따라 주기적으로 작용하는 화염과 내부 와류간 상호작용을 파악할 수 있는 이미지들을 나타내었다.

먼저 상대적으로 작은 연료량 범위에서 비교적 큰 가진 강도로 부상되는 Regime I에서의 화염부상 현상은 Fig. 7-(a)번 이미지에서 보는 바와 같이 부상과 함께 화염기저가 마치 난류화염과 같은 형상으로 부상되는데, 이전 연구<sup>(5)</sup>에서는 붕괴혼합의 기구로 설명되어진 현상이다. 저자의 별도 보고에 의하면<sup>(6)</sup> 큰 가진 강도로 인해 주위류 산화제가 출구 연료관 안쪽과 바깥쪽을 주기적으로 유입-분출되는 혼합운동에 의해 노즐 출구 근처에 있는 부상화염 기저의 예지화염이 가진 주파수 주기로 노즐 안과 바깥을 왕복으로 전파하는 화염전파 거동을 하다가 가진 한계 이상의 가진 강도에서 임계 전파거리 이상으로 왕복거리가 멀어짐에 따라 더 이상 노즐 내에서 in-burning flame 형태로 노즐 부착화염 형태를 취하지 못하고 부상되는 것으로 분석되었다.

Fig. 7-(b)에서는 앞서 설명한 부상화염 현상을 이해할 수 있는 정량적 분석 값들로서, 8.6의 비교적 큰 가진 강도로 가진되어 부상된 화염기저 부분으로 다량의 주위류 산화제가 유입되는 현상을 볼 수 있으며 연료관 가진 영향으로 역시 노즐 안으로 계속해서 유입되는 주위류 속도분포 특성을 보여주고 있다. 속도 분포도에서 알 수 있는 바와 같이 부상된 화염기저 반응대에서 주



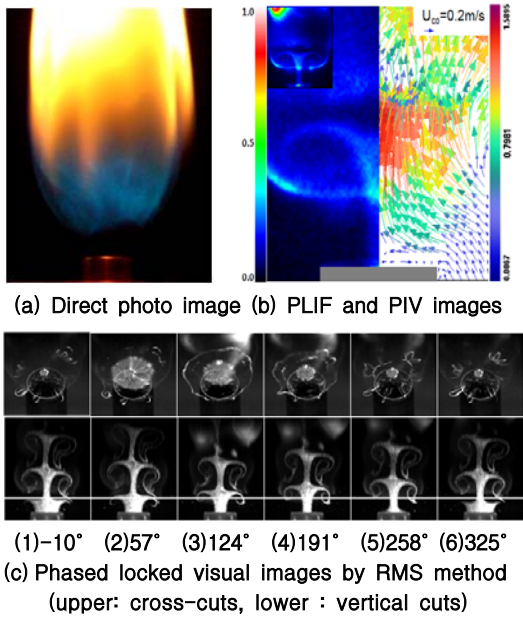


Fig. 7. Typical images of the lift-off flame in Regime I (forcing amplitude is 8.6)

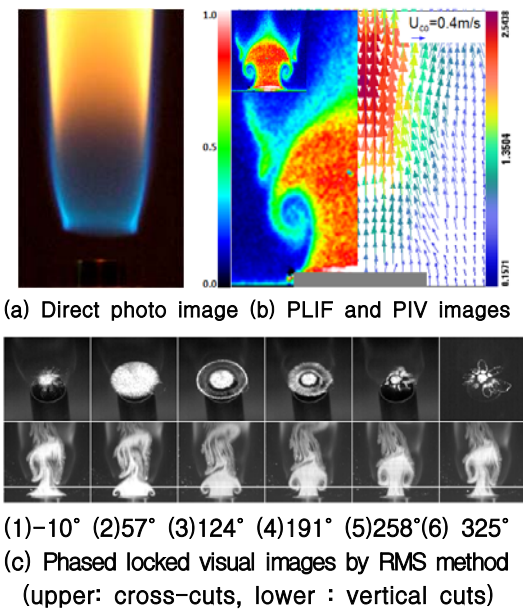


Fig. 8. Typical images of the lift-off flame in Regime II (forcing amplitude is 1.3)

위류 속도가 2배 이상의 속도로 가속되어 부상에 따른 혼합성능이 증대됨을 알 수 있으며 이러한 혼합성능 향상은 화염기저 부분에서 청염부위 면적이 넓게 분포하고 있는 것과 화염이 단열화 되는 현상으로 나타나게 된다.

또한 혼합정도를 나타내는 PLIF 농도분석 값을 파악하여도 Fig. 8-(b)의 이미지에서 보이는 바와 같이 화염기저 대부분이 연료인 프로판의 이론 당량비 물 분율에 해당되는 값 근처로 잘 혼합되어 있음을 알 수 있다.

한편 Fig. 7-(c)는 Regime I 영역의 부상화염에서 가진 위상에 따른 연료분류의 거대 와류들과 화염간 상호작용을 보여주는 이미지들로 화염기저 부분에서 다수의 거대와류 로브(lobe) 구조가 원주 방향으로 형성되어 있음을 수평방향 단면 이미지들에서 보여주고 있다. 이처럼 연료분류의 로브와 화염간 상호작용에 의해 일정한 부상높이 이상에서 에지화염 형태의 화염기저가 상하운동과 반경방향의 왕복운동을 주기적으로 하면서 비교적 안정된 부상화염 형태를 취하고 있는 것으로 판단된다. 이에 비해 다른 형태의 부상이력을 갖는 Regime II에서의 화염 부상특성을 살펴보면 이전의 큰 가진 강도에 의해 난류화염과 같은 부상특성을 갖는 Regime I 영역에서의 부상 현상과는 매우 다른 특성으로 화염이 부상됨을 관찰할 수 있다.

Fig. 8은 가진 강도 1.3의 비교적 작은 강도로 가진된 Regime II 영역에서의 대표적 부상화염으로, Fig. 8-(a) 직접사진에서 나타난 바와 같이 작은 가진 강도 값에서도 쉽게 부상되어 화염기저 부분이 전형적인 에지화염 형태로 노즐근처 일정 높이에서 안정적으로 부상되어 있음을 볼 수 있다. 이 영역에서는 작은 가진 강도로도 화염이 부상되는 관계로 Fig. 8-(b)의 PIV 속도 값에서도 알 수 있는바와 같이 주위류인 산화제가 Regime I 영역에 비해 훨씬 낮은 비율로 유입되고 있으며 더욱이 노즐 안으로는 주위 산화제가 유입되지 못하고 있음을 볼 수 있다.

따라서 Fig. 8-(b)의 PLIF 정보에서 알 수 있듯이 연료농도가 화염기저에서 매우 높게 분포하고 있어 Regime I 영역에서 화염기저 밑으로 전개되는 분류의 혼합 상태가 당량비가 1인 이론 당량비 근처의 매우 양호한 혼합성능을 보이는 것과는 매우 대조적임을 볼 수가 있다.

Fig. 8-(c)은 가진 위상에 따른 Regime II 영역에서 연료분류의 거대 와류들과 화염간 상호작용을 보여주는 이미지들이다. 이 경우에도 미약하나마 화염기저 부분에서 와류 거동에 의한 원주방향의 로브 구조가 형성되나 약한 가진 강도로 인해 산화제인 주위류 공기가 연료 분류 깊숙이 침투하질 못하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 와동말림이 약해짐에 따라 주위 산화제를

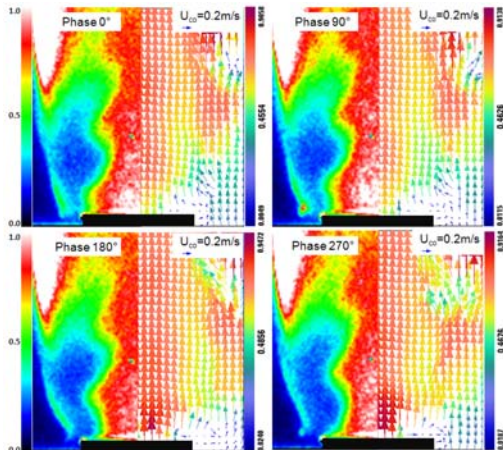
잘 유입시키질 못하게 되어 수직방향의 이미지들에서 나타난 바와 같이 연료출기 부위가 상대적으로 굵고 노즐 출구에서 전개되는 연료 와류의 선단이 매우 크게 형성됨을 볼 수 있다.

결국 이들 두 영역을 비교하여 보면 Regime I 영역과 같이 큰 가진 강도로 가진될 경우 부상과 동시에 화염이 단엽화 되면서도 비교적 양호한 연소 상태를 유지하기 때문에 많은 연구자들의 가진 연구가 층류 분류화염이라도 가진으로 혼합 성능이 향상되어 손쉽게 화염을 단엽화 시킬 수 있는 효과를 얻을 수 있는 시도임을 확인하였다.

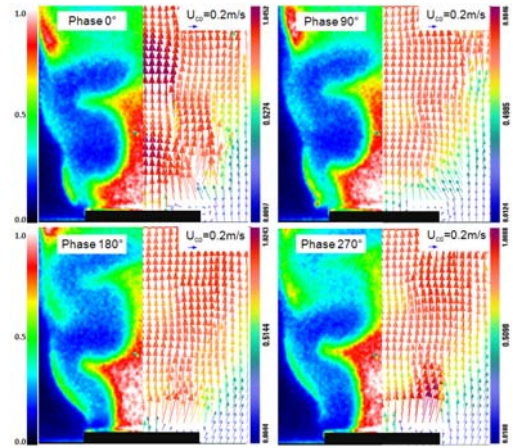
### 3.4 영역별 화염의 유동 및 혼합 특성

Fig. 9와 10은 Regime I과 II에서 가진 위상에 따라 가진된 화염에서 혼합과 속도분포 특성을 보여주는 데이터들이다. 특히 Regime I 영역은 앞 절의 부상 임계선도에서 살펴 본 바와 같이 화염이 부상되기 전 노즐 부착상태에서 가진 강도에 따라 네 가지 형태(모드)의 화염 형상을 보이는 구간으로 Fig. 9에서는 이러한 네 가지 모드에서 화염 내 농도와 속도분포 특성을 살펴보았다. 여기서 가진 강도가 가장 작은 경우가 모드 1에 해당되며 가진 강도 증가에 따라 모드가 2, 3, 4 순으로 된다.

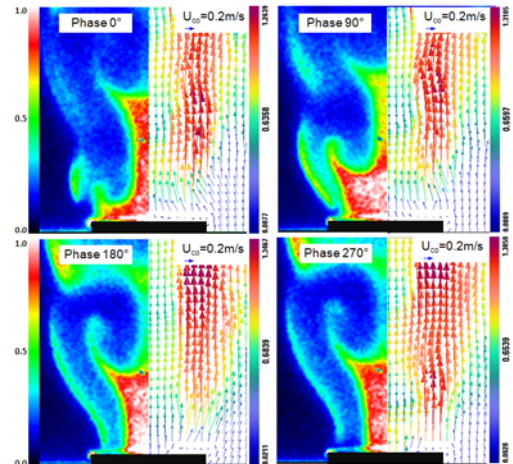
좌측 반은 혼합정도를 파악할 수 있는 PLIF로 측정된 결과들이며 우측 반은 동일 위상에서 연료 분사속도와 주위류 공기의 유동특성을 파악할 수 있는 PIV로 측정된 속도분포를 나타내었다. 여기서 좌, 우 측 오른쪽 양 끝단에는 해당되는 기준 농도 값과 속도 벡터 값의 단위 크기를 보여 줌으로써 해당 물리량의 정량적인 정보를 제공하고 있다.



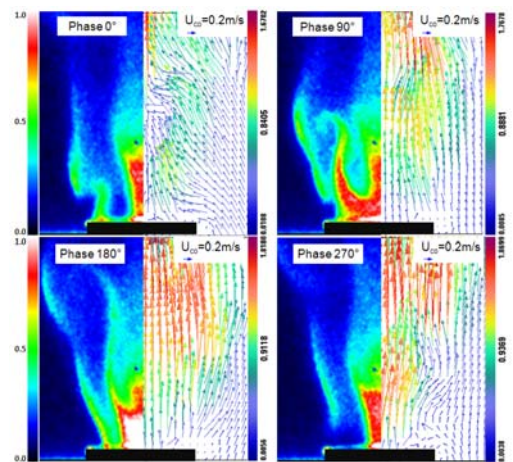
(a) Mode 1 flame at the regime I



(b) Mode 2 flame at the regime I



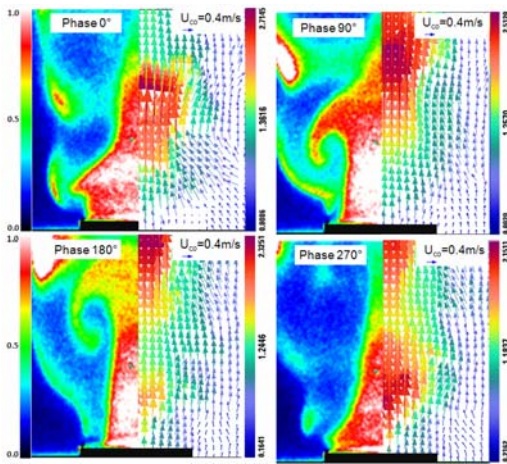
(c) Mode 3 flame at the regime I



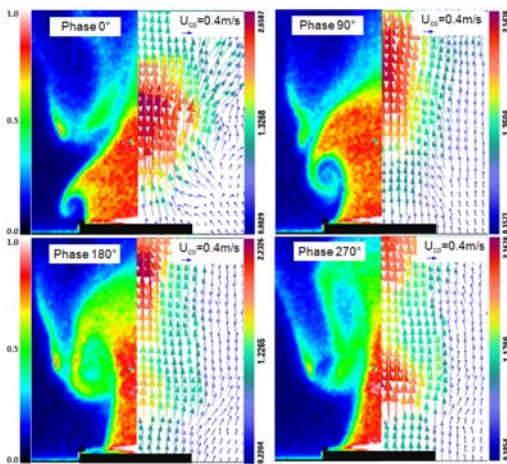
(d) Mode 4 flame at the regime I

Fig. 9. Concentration and velocity profile in regime I





(a) Just before lift-off flame at the regime II



(b) Lift-off flame at the regime II

Fig. 10. Concentration and velocity profile in regime II

우선 두드러진 특징으로는 가진 강도 증가에 따라 주위류 속도가 함께 증가되어 화염기저 하단 부분으로 유입되는 주위류 속도가 증가되는 것을 가장 큰 감속위상 점인 270° 위상각도 부근에서 볼 수 있다. 이처럼 가진 강도에 비례하여 증가된 주위류 유입에 따라 혼합성능이 양호해 지는데 좌측 이미지들에서 볼 수 있는 바와 같이 가진 강도에 비례하는 모드번호 증가에 따라 연료 분류의 크기 작아지고 기준 농도 크기도 작아짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 6의 직접 사진에서 나타난 바와 같이 화염기저 부분에서 청염 면적이 가진 강도 증가에 따라 넓게 분포하는 것으로도 확인될 수 있다.

가진 위상에 따른 노즐 근처 예지화염의 거동을 살펴보면 가진에 따라 분류 반경방향으로 분

류가 확대-축소되는 현상을 볼 수 있는데, 화염 모드에 무관하게 가속위상 구간의 중간 위상 점인 0°에서 화염에지가 노즐 출구에서 가장 멀리 위치하고 있어 분사되는 분류가 가속위상으로 가진되어 확대되고 있음을 알 수 있다. 또한 감속 위상 구간의 중간 위상점인 180°에서 가장 가까이 위치하고 있어 감속위상에 의한 분류의 축소 운동이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

이러한 예지화염의 거동을 자세히 살펴보면 모드 1, 2에서는 상대적으로 가진 강도가 작아 화염에지가 출구 노즐에 가까이 위치하는 180° 위상에서도 화염기저가 노즐 밖에 위치하고 있는 것에 비해, 가진 강도가 증가하여 모드 3, 4 가 되면 화염에지가 노즐 안쪽까지 이동되는 것을 볼 수 있는데 특히 모드 4에서는 노즐 안 깊숙이 화염기저가 파고 들어가 있음을 볼 수 있다.

또한 분류 혼합 상태를 알 수 있는 연료분지에서 PLIF 농도 값들을 살펴보면 가진 강도 증가에 따라 주위류와의 혼합이 활발하게 진행되어 연료 분류의 물 농도 값이 작아짐을 볼 수 있다. 특히 부상 직전에 해당되는 모드 4 화염에서는 화염 내 연료 분류 혼합 상태가 상당히 부분 예 혼합된 상태에 있음을 보여 주고 있는데, 270° 위상에서는 화염기저 부분이 노즐에서 상당히 이탈되어 있음에도 불구하고 화염은 예혼합 화염에서 나타나는 전형적인 화염 전파특성을 보임에 따라 부상하질 않고 노즐에 부착된 상태로 유지되어 있음을 볼 수 있다.

한편, Fig. 10은 상대적으로 작은 가진 강도로 쉽게 화염이 부상되는 Regime II 영역으로 부상 직전과 직후의 화염장 특성을 나타낸 이미지들이다. 이 영역은 Regime I 영역에 비해 상대적으로 작은 가진 강도와 큰 분사유량에서 나타나는 현상으로 Fig. 10-(a),(b)에서 나타난 부상 전후의 화염장 농도와 속도분포를 보면 Regime I 영역에서 보여 준 극적인 변화는 없는 것을 알 수 있다. 다만 Fig. 10-(a)에서 부상 전 노즐에 부착된 화염의 영향으로 화염기저 하단으로 약한 주위류 유입에 의해 와류말림이 약해짐에 따라 분류의 혼합 상태가 여전히 연료 과잉상태로 유지되고 있음을 볼 수 있다.

반면에 노즐직경 정도( $1d_0$ ) 위치로 부상된 Fig. 10-(b) 이미지를 보면 부상 전과는 달리 부상된 화염기저 밑으로 주위류인 산화제 유입이 증가되어 와류분지가 화염기저에 도달하기 전인 0°와 90° 위상에서 말려진 와류분지 안으로 주위류인 산화제가 같이 말려 들어와 혼합 상태가 양호해지고 있음을 볼 수 있다.



계속 전개되는 와류거동을 보면 180° 위상에서 와류말림이 상당히 넓어지면서 화염기저의 예지 화염이 전파하여 270° 위상에서는 화염기저 선단이 노즐 앞으로 많이 내려와 있음을 볼 수 있다. 이후 부상된 화염은 가속위상에서 연료 과잉상태의 와류전개로 뒤로 밀려나가면서 멀어지다가 다시 감속위상 구간에서 화염전파로 앞으로 당겨지는 예지화염의 상하운동을 계속하면서 일정거리의 부상높이를 유지하게 된다.

주위류의 속도분포를 살펴보면 부상된 화염에서 가속위상 구간에서 주위류가 화염기저 부분으로 유입되는 현상을 볼 수 있는데 이러한 유입 성능 향상은 앞서 설명한 바와 같이 부상된 화염에서 혼합성능 향상으로 나타나 Fig. 6의 Regime II 영역에서도 부상된 화염기저 부분에서 청염 부분이 노즐에 부착된 화염 보다 넓게 분포하고 있음을 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

연료관 공명주파수로 가진되는 비예혼합 분류 화염에서 분사유량과 가진 강도에 따라 다른 경로의 부상화염이 발생하는 영역들이 존재하는데 이들 영역에서 가진 위상에 따른 화염 내 혼합과 유동특성을 조사하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 가진된 화염의 거동은 가진 위상에 따라 비교적 잘 구조화된 와류들이 반경방향으로 확대-축소되면서 상하방향으로 일정한 와류 진행거리를 확보하게 됨에 따라 노즐출구서부터 주름진 형태의 화염이 주기적으로 형성되고 있음을 파악할 수 있었다.

2) 가진된 분류화염에서 부상화염 형태가 이전에 보고된 영역 사이에서 화염기저가 마치 분젠 화염과 같은 형태로 부상되는 과도 부상현상을 새롭게 알아냈으며 이 현상을 포함하여 세 가지 부상형태로 발생함 알았다.

3) 큰 가진 강도로 부상된 화염에서는 화염기저의 연료 분류가 이론 당량비 근처로 잘 혼합되어 있음을 농도장 분석으로 확인하였으며, 예혼합 화염 특징인 화염 전파특성으로 노즐에 부착된 예지화염이 분사 노즐 안과 밖을 주기적으로 이동하다가 임계 가진 강도 이상에서는 전파할 수 있는 거리 이상으로 멀어짐에 따라 국부적인 소염과 함께 화염이 부상되는 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한국연구재단의 2009년 기초연구사업 지원으로 수행된 연구결과 일부입니다.

#### 참고문헌

- 1) Kee-Man Lee and Sai-Kee Oh, "A Visual Investigation of Non-Premixed Flame Behavior under Acoustic Excitation", Spring Annual Conference of the KSME, 2001, pp. 871~877.
- 2) Kee-Man Lee, Sai-Kee Oh and Jeong Park, "A Visual Investigation of Coherent Structure Behaviour Under Tone-Excited Laminar Non-Premixed Jet Flame", Trans. of the KSME(B), Vol. 27, March 2003, pp. 275~285.
- 3) Kee-Man Lee, "A Visual Study on the Turnabout Phenomenon of Vortex Roll-up in forced Jet Diffusion Flames", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 21, Dec. 2007, pp. 2221~2228.
- 4) Seung-Gon Kim, Kang-Tae Kim and Jeong Park, "An Experimental Study on the Lift-off Behavior of Tone-excited Propane Nonpremixed Jet Flames", Trans. of the KSME(B), Vol. 28, May 2004, pp. 569~579.
- 5) Tae Kwon Kim, Jeong Park and Hyun Dong Shin, "Mixing mechanism near the nozzle exit in a tone excited Non-premixed Jet Flame", Combustion Science and Technology, Vol. 89, 1993, pp. 83~100.
- 6) Kinsler et al., "Fundamentals of acoustics", 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1982.
- 7) Ju Yong Park, Ki Joog Kang, Kwang Chul Oh and Kee Man Lee, "Flame edge behavior under tone-excited laminar nonpremixed jet flame", Autumn Annual Conference of the KSME, 2009.
- 8) W.S. Anthony and J.C. Brain, "Visualization of the Structure of a Pulsed Methane-air Diffusion Flame", Phys. Fluids, Vol. 28, No. 8, 1985, pp. 2317~2330.
- 9) Y.C. Chao and M.S. Jeng, "Behavior of the Lifted Flame under Acoustic Excitation", 24th Sym. on Combustion, 1994, pp. 333~340.
- 10) D. Demare and F. Baillot, "Acoustic Enhancement of Combustion in Lifted Non-premixed Jet Flames", Combustion and Flame, Vol. 139, 2004, pp. 312~328.