

가진된 부착화염에서 거대와동의 거동

김대원* · 이기만†

(원고접수일 : 2009년 1월 30일, 원고수정일 : 2009년 2월 26일, 심사완료일 : 2009년 3월 6일)

Behavior of the Coherent Structure on the Attached Forced Flame

Dae-Won Kim* · Kee-Man Lee†

Abstract : An experimental study was conducted to investigate the effects of forcing amplitude on the flow structure near the nozzle exit of forced jet diffusion flames. The jet was excited up to the blowout occurrence by a considerable large amplitude with a periodic velocity fluctuation at the tube resonating frequency. In the attached flame regime, we disclosed the very interesting result newly that adding of a moderate forcing amplitude caused the jet flame to become longer in spite of being forced. Particular attention is focused on the turnabout mechanism of vortex roll-up around the elongated flame, which has not been reported previously, and on the inner coherent structure of the forced jet in the attached flame regime. From the velocity and flow visualization results, it was ascertained that the surrounding air due to the occurrence of negative velocity parts was suck into the fuel nozzle. To aid in understanding the rotating phenomenon of coherent structure, we present a schematic diagram of the turnabout mechanism of vortex roll-up. The mechanism of vortex turnabout phenomenon can be easily understood by considering the positive and negative velocity amplitudes about the instantaneous velocity of the forcing flow, as shown in this diagram.

Key words : Forced jet flame(가진된 제트 화염), Coherent structure(거대 와동 구조), Vortex roll-up(와동 말림), Phase averaged velocity(위상 평균 속도), Shear force(전단력)

1. 서 론

일반적으로 가진된 분류 화염은 가진 주파수, 가진 강도에 의해 변수화 되는데, 큰 가진 강도 효과를 얻기 위해 연료 관 공명주파수로 가진을 할 경우 분출 관 근처 혼합 층에 영향을 주어 걸보기 난류 혼합이 유도됨으로써 층류 화염에서도 작은 가

진 강도로도 화염이 부상되면서 짧아지는 단염화 효과가 있어 손쉽게 반응장을 제어하는 장점이 있는 것으로 알려졌다^{[1]-[3]}.

그러나 Oh 등은 관 공명주파수로 가진을 한 경우라도 가진 강도에 따라서 화염이 부상되어 단염화 되기 전에 오히려 화염이 길어지는 현상이 있다고 보고하였으나 이에 대한 구체적인 현상이나 분

† 교신저자(순천대학교 기계우주항공공학부, E-mail: kmlee@sunchon.ac.kr, Tel: 061)750-3828)

* 전남도립대학 조선기계과

석을 위한 연구는 진행시키질 못하였다^[4].

본 논문은 Oh와 같이 층류 분류 화염에서 연료 관 공명의 가진 주파수를 설정하였으나 이전의 연구들이 고정된 큰 가진 강도에서 화염이 부상되어 난류화에 의한 단열화 현상을 주 대상으로 수행한 것과는 달리 화염이 노즐에서 부상하질 않은 부착 화염 영역에서 가진 강도에 따른 분류 내 거대 와동들의 구조와 화염 간의 상호 작용에 관한 현상들을 주 연구 대상으로 삼았다.

본 논문에 의하면 화염이 부상하질 않은 노즐 부착 영역에서만 이전의 연구와 같은 화염이 길어지는 신장 영역이 존재함을 확인할 수 있었는데, 흥미로운 사실은 이러한 현상이 항상 화염 내 거대 와동들의 구조 변화와 함께 발생한다는 사실을 새롭게 알아냈다. 이를 위해 연료 관 출구 근처의 주요 물리량 측정에 초점을 두어 레이저 등의 광학적인 실험기법을 통해 정량적 및 정성적으로 얻은 결과를 토대로, 화염 내 거대 와동들의 회전 방향이 신장화염 영역을 중심으로 서로 역전되는 기구도 (mechanism diagram)를 제시하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 논문에 사용된 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 버너는 축대칭 비예혼합 화염을 얻기 위해 가운데 파이프 형태의 분류관이 있고 관 주변으로 주위류가 흐르는 일반적인 동축류 버너로 제작하였다. 연료 분류관은 내경 5.5mm의 노즐 형태로 관 두께 영향을 없애기 위하여 노즐 선단부를 날카롭게 가공하였으며, 노즐 내로 유입되는 화염 형상을 관찰할 수 있도록 투명한 파이렉스 관을 사용하였다. 연료는 상용 프로판을 사용하였으며, 연료와 공기 유량은 습식 가스미터와 포말 유량계 (bubble meter)로 교정된 질량 유량계와 MFC 조정기로 정밀하게 조절하여 사용하였다.

레이저를 이용한 유동 및 화염의 단면 가시화 장치로는 연료 유로계 내에 사염화 티타늄($TiCl_4$) 증기발생기와 세라믹 열판의 가열에 의한 입자 발생기를 장착하여 사용하였다. 화염 안정화를 위한 저

속의 주위류는 허니컴과 미세 메쉬를 이용한 풍동을 사용하였으며 축소비가 4인 축소노즐을 통하여 버너 출구에서 균일한 속도장이 형성되도록 하였다. 가진장치는 오디오 스피커에 의한 음향 장치로, 정현파를 발생시키는 합수 발생기와 증폭기, 음향 스피커가 설치된 가진실로 구성된다.

2.2 실험방법 및 조건

Fig. 2에 화염 내 와동 및 속도장 가시화를 위한 광학 장치도를 나타내었다. 가진에 의한 화염과 와동 간의 상호작용(interaction)은 레이저 sheet beam에 의한 산란광 단면 가시화법으로 가시화한 후 ICCD와 고속카메라를 이용하여 취득한 연속된 영상을 이미지 프로세싱을 거쳐 분석하였다.

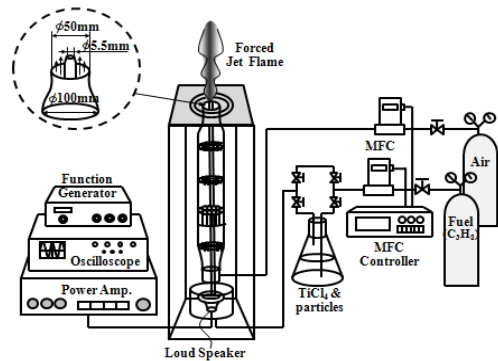


Fig. 1 Experimental Set-up

유동 속도는 산란광 단면촬영 광원과 동일한 레이저의 도플러 유속계를 사용하였으며, 가진된 유동장의 속도 분포 특성은 50mJ 출력의 Nd-Yag 레이저를 이용한 PIV 유속계를 사용하여 측정하였다.

분류 유동조건은 층류 완전발달 유동이며 가진 주파수는 큰 가진 강도 효과를 얻기 위하여 분류관의 공명주파수(resonance frequency)인 171Hz로 고정하였다. 가진 강도는 스피커에 입력되는 정현파의 전압 값(V_{p-p})으로 0에서 20V까지 조절하여 화염날림까지 전체적인 화염의 형태를 관찰한 후 일정 가진 강도 이하 값(0 ~ 5V)에서 존재하는 노즐에 부착된 화염 내 거대 와동들의 거동 특성을 주 연구 대상으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

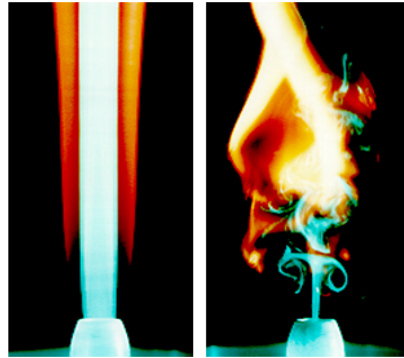
3.1 거대 와동의 거동 특징

3.1.1 화염길이 변화 및 거대 와동 형상

일반적으로 비예혼합 분류화염을 큰 가진 강도로 가진하는 경우 대개 Fig. 3에서와 같이 화염이 노즐에서 부상되어 난류화되면서 비가진된 화염보다 화염이 길이가 현저하게 짧아지는 것으로 알려져 왔다.^{[1],[3]}

그러나 본 연구에서는 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 가진 강도에 따라서는 화염이 부상하질 않는 영역이 존재하며, 이처럼 노즐에 화염이 부착된 영역에서는 화염의 길이가 오히려 늘어나는 신장영역이 존재함을 볼 수 있다. 그런데 흥미로운 것은 화염이 길어지는 영역을 중심으로 화염 내 거대 와동들의 와동 말림 방향이 서로 바뀌는 현상이 항상 나타나게 된다는 사실이다.

이 후 계속된 가진 강도 증가에도 화염은 부상하질 않고 있다가 일정 가진 강도 이상에서는 화염이 부상되면서 전형적인 난류화염으로 바뀌면서 화염 길이가 짧아지게 되며, 임계 가진 강도 이상의 매우 큰 강도에서는 화염 날림 현상이 발생되는 것으로 나타났다.



(a) unforced (attached flame) (b) forced flame (lift-off flame)

Fig. 3 Excitation effect on the jet flame

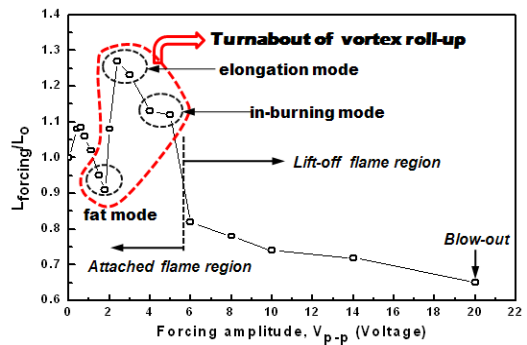


Fig. 4 Normalized flame length

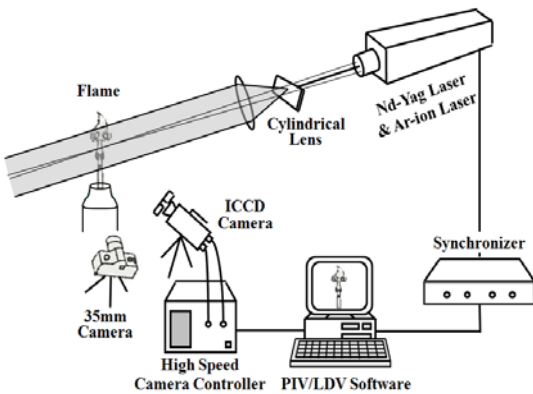


Fig. 2 Velocity measurement & visualization system

Fig. 5는 Fig. 4에서 보여진 화염길이 변화에서 가진 강도를 화염이 부상할 때까지 증가시킬 경우 화염 내 거대 와동들의 구조를 산란광 단면 가시화 기법으로 관찰한 화염 단면 사진들이다.

먼저, 가진하질 않은 일반 분류 화염에 가진을 하여 강도를 서서히 증가시키면 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 처음에는 화염 길이가 약간 증가하다가 다시 감소를 하는데, 이때 화염 형상은 Fig. 5의 세 번째 이미지처럼 노즐에 부착된 화염기저 부분이 불룩해지면서 화염길이가 다소 줄어들게 된다 (fat mode). 여기에 가진 강도를 증가시키면 화염 길이는 다시 증가를 하여 다섯 번째 이미지처럼 신장화염 형태에서 화염길이가 최대가 되었다가 (elongation mode), 가진 강도를 더욱 증가시키면 여섯 번째 이미지처럼 화염기저 부분이 노즐 안으로 빨려 들어와 육안으로는 화염이 항상 노즐 안에 존재하는 in-burning 화염형태의 형상을 갖게 되는데 이들 화염의 상세한 기저 부분은 Fig. 8에서 볼 수 있다. 이후 가진 강도를 더욱 더 증가시키면 마지막인 일곱 번째 이미지처럼 앞서 설명한

대로 화염부상과 동시에 난류화염이 되어 화염길이
가 현저하게 짧아지게 된다.

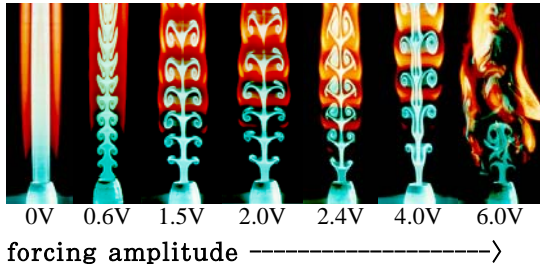


Fig. 5 Visual images according to the forcing amplitude(vertical cross-cut images by the Mie-scattering method)

이처럼 가진된 유동장은 가진 강도에 따라 민감하게 변화하는 것으로 나타났는데, Fig. 5의 두 번째 이미지처럼 조그마한 가진 강도 값이라도 분류 내부에 거대 와동이 형성되어 화염 외측의 부력에 의한 와동 구조와는 별도로 거동하고 있으며, 내부 와동들의 거동이 화염 길이에 변화를 초래하고 있음을 볼 수 있다. 이는 비예혼합 분류 화염에서 길 보기 연소상태를 나타내는 화염 길이가 내부 와동의 생성과 전개에 밀접한 관계가 있음을 말해 주고 있다.

한편, 가진된 유동장은 가진 강도가 증가함에 따라 분류 연료관 관 벽 안쪽에서부터 Fig. 6과 같은 음의 속도가 발생하게 되는데 가진 강도가 증가할수록 관벽 측으로부터 관 중심으로 음의 속도 영역이 넓어지게 된다. 따라서 Fig. 5를 자세히 관찰하면 가진 강도가 증가함에 따라 화염기저에서 부분 예혼합 특성을 나타내는 청염영역이 증가함을 볼 수가 있다.

이러한 현상은 가진되는 분류 관 안에서 충분히 큰 음의 압력 구배가 존재한다는 사실을 의미하며, 이렇게 되면 음/양의 주기적인 가진 사이클에서 음의 사이클 동안 주위 산화제인 공기가 노즐 내부로 빨려 들어와 화염이 부상되기 직전의 in-burning 화염과 같은 모드에서는 이미 연료 관 출구서부터 상당히 예혼합된 상태로 존재하고 있음을 말해 주고 있다.

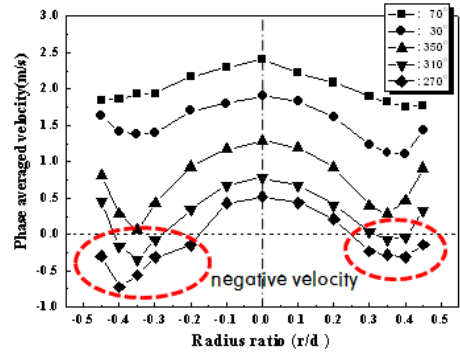


Fig. 6 Velocity profiles at the nozzle exit

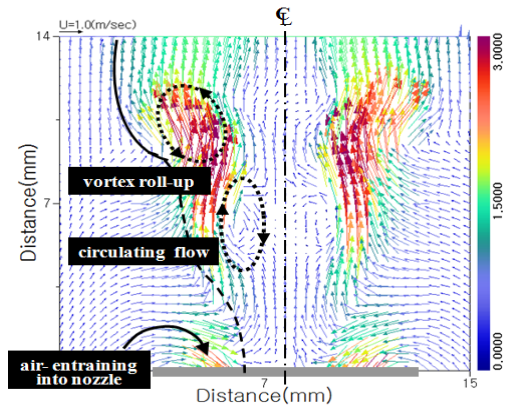


Fig. 7 Air entrainments and velocity fields of the in-burning flame mode by PIV system

Fig. 7은 PIV 유속계를 이용하여 이러한 현상을 정량적으로 가시화한 이미지로, 주변 산화제인 공기가 노즐 안으로 유입되는 현상과 이에 따른 속도 분포 특성을 잘 보여주고 있는데 이에 대한 특성들은 별도의 연구결과로 보고하기로 한다.

3.1.2 와동 말림(vortex roll-up)의 역전 현상 앞 절에서 가진 강도에 따른 화염길이 변화를 조사하면서 화염이 길어지는 영역을 중심으로 화염 내 거대 와동들의 와동 말림 방향이 항상 바뀌는 특이한 현상을 발견하였다. 즉, 화염과 유동간의 상호작용을 가시화한 Fig. 5에서 화염 길이가 길어지는 신장 화염 모드를 중심으로 fat 모드에서 신장 화염 모드로, 다시 in-burning 모드로 바뀌면서 거대 와동들의 말리는 회전방향이 서로 바뀌는 역전 현상을 확인 할 수 있었다.

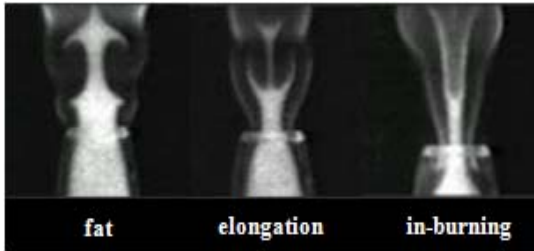


Fig. 8 Phase synchronized Mie-scattering images by the high speed camera with 2000⁻¹ frame rate

Fig. 8은 이러한 와동말림의 역전 현상을 좀 더 정밀하게 관찰하고자 단면 가시화한 화염을 초당 2,000장의 고속 카메라로 연속 촬영한 이미지를 보여주고 있다. 연료 관을 투명한 파이프스 관으로 제작하여 노즐 출구 전후로 분류인 연료의 줄기와 가지 부분과 이를 둘러싸고 있는 화염 형태를 관찰할 수가 있었으며, 특히 in-burning 모드에서는 화염기저 부분이 항상 노즐 안으로 땡겨져 들어와 있음을 명확하게 보여주고 있다.

여기에서도 화염 내 거대 와동들의 걸보기 와동 말림방향이 신장화염을 중심으로 역전되다가 다시 재 역전되는 현상을 볼 수가 있다. 즉, 화염이 신장되어 가늘어지기 전에 일시적으로 화염 기저부분이 땡땡해지면서 분류가지(jet branch)인 와동의 말림이 바깥방향으로 말리다가 화염이 신장되면서 와동이 안쪽 방향으로 말리고 있으며 화염이 부상되기 직전에는 다시 원래 방향인 바깥방향으로 말리는 현상을 볼 수 있다.

3.2 와동 회전방향 역전 기구

3.2.1 가진된 분류의 속도 특성

일반적으로 정현파로 가진된 분류의 순간 속도는 분류의 시간 평균 유동장 속도에 가진에 의한 정현파 속도 변동분이 가해지는 형태로 다음과 같이 정의된다^[1].

$$u = u_m + u_f(\theta) \tag{1}$$

여기서 u는 가진된 유동장의 축 방향 순간속도, u_m은 가진된 분류의 시간 평균속도, u_f(θ)는 가진에 의한 변동속도(fluctuating velocity)를 나타

내며 각각의 속도 성분은 위상 평균된 속도를 의미한다. 이는 가진된 유동장이 분류 자체 유동에 정현파 가진에 의해 밀고 당기는 속도 변동분이 더해지는 형태이므로 이들 성분들은 각각 독립적으로 고려되는 분할 성분의 특징을 갖게 됨을 의미한다. 가진 강도 증가에 따른 각 속도 성분의 변동 특성을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 가진 분류의 대표적 유동 특성으로는 Fig. 6의 관 출구 유속 분포에서 볼 수 있듯이, 일정한 가진 강도 이상에서는 분류관 벽 안쪽 부근서부터 음의 속도가 나타나게 되고 이러한 음의 속도 영역은 강도 증가에 따라 점점 넓어짐을 알 수 있다.

따라서 가진된 분류의 시간 평균속도 값은 일정한 크기를 갖는 가진하질 않은 일반 분류와는 다르게, 가진 강도가 증가함에 따라 노즐 출구로부터 생성된 음의 속도성분이 커지는 관계로 Fig. 9에서 보이는 바와 같이 선형적으로 감소하는 특성을 보인다. 여기서 u_o는 분류의 분출 속도를 나타낸다.

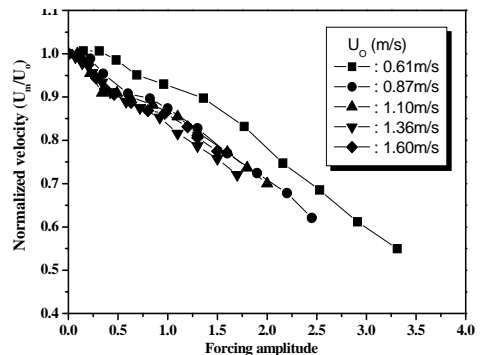


Fig. 9 Normalized axial velocity profiles according to the forcing amplitude at nozzle exit

한편, 정현파로 가진하여 발생되는 변동 속도 성분인 u_f(θ)는 그 크기는 같으나 방향이 정반대인 u_f⁺(θ) 성분과 u_f⁻(θ) 성분으로 분할되어 각각 유동에 영향을 미치는 특성을 갖는다. u_f⁺(θ) 성분은 분류 유동장을 미는(push) 효과의 가속 위상으로 양의 속도 값을 갖으며, u_f⁻(θ) 성분은 유동장을 잡아당기는(pull) 효과의 감속 위상으로 음의 속도 값을 갖게 되는데 이들 크기는 가진 강도에 비례하여 선형적으로 증가하게 된다.

3.2.2 와동 회전방향의 역전기구

대부분의 분류에서 와동들의 생성은 노즐에서 분출되는 분류 속도와 주위류와의 속도 차에 의한 전단력으로 발생하게 된다. 그런데, 가진된 유동장은 위상에 따라 유동장을 밀고, 당기는 속도 변동분이 가해져서 나타나게 되므로 가진 전단력도 앞에서 설명한 바와 같이 가속 위상과 감속 위상으로 분할되어 각각 작용되게 된다.

이 경우 연료 분출 방향으로 유동장을 미는 경우(위 방향)의 전단력은 양의 속도 성분만을 갖는 분류의 시간 평균속도인 u_m 과 역시 양의 속도 성분으로 가속위상의 변동 속도분인 $u_f^+(\theta)$ 와 주위류인 u_∞ 간의 속도 차에 비례하여 커지게 된다. 반대로 유동장을 잡아당기는 경우(아래 방향)의 전단력은 음의 속도성분으로 감속위상을 갖는 변동 속도분 $u_f^-(\theta)$ 와 주위류인 u_∞ 간의 속도 차로 발생하게 된다. 따라서 이러한 상관관계를 수식으로 표시하면 다음과 같게 된다.

$$\text{Positive part : } [u_m - u_f^+(\theta)] - u_\infty \quad (2)$$

$$\text{Negative part : } u_f^-(\theta) - u_\infty \quad (3)$$

Fig. 10과 11은 가진 강도에 따라 음/양의 주기

적인 가진 신호에 의해 유동장에 양의 부분과 음의 부분으로 각각 작용하게 되는 전단력의 크기 변화와 이러한 전단력 변화에 따라 화염 모드별로 거대 와동이 말리는 회전 방향이 역전되는 기구를 알기 쉽게 표현한 이해도이다.

먼저 Fig. 10에서와 같이 가진 강도가 증가하게 되면 변동 속도분인 $u_f(\theta)$ 의 크기는 비례하여 증가하게 되는데, 양의 변동 속도분인 $u_f^+(\theta)$ 와 음의 변동 속도분인 $u_f^-(\theta)$ 의 크기는 같으나 방향은 서로 반대가 된다. 그런데 가진된 분류의 시간 평균속도인 u_m 은 앞 절에서 설명한 바와 같이 분류관 내 발생한 음의 속도 영역이 가진 강도 증가에 따라 넓어짐에 따라 Fig. 9에서 나타낸 것과 같이 가진 강도에 따라 선형적으로 감소하게 된다. 그러므로 주위류 속도가 일정하므로 가진된 유동장에서 유동을 미는 가속 위상에서의 전단력은 양의 속도 성분 값을 갖는 두 속도인 u_m 과 $u_f^+(\theta)$ 간의 차가 되므로 전단력의 크기는 감소하다가 다시 증가하는 변곡점이 존재하게 됨을 알 수 있다. 이에 비해 유동을 잡아당기는 감속 위상의 변동 속도성분인 $u_f^-(\theta)$ 는 가진 강도 증가에 따라 선형적으로 증가하게 되며 강도에 비례하여 전단력도 커지게 됨을 알 수 있다.

따라서 Fig. 11의 와동 역전 이해도에서 볼 수

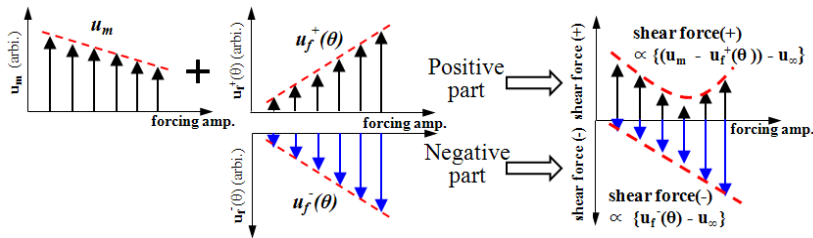


Fig. 10 Schematic showing the positive and negative velocity parts

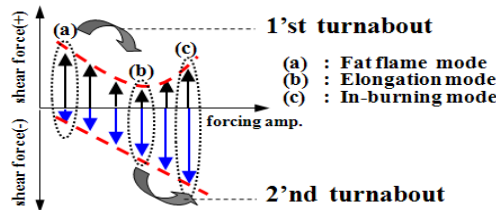


Fig. 11 Schematic diagram of the mechanism of the vortex turnabout phenomenon

있듯이 이러한 양과 음의 부분으로 나뉘어 작용하는 전단력 변화의 특성으로 화염 내 거동하는 거대 와동들의 궤보기 와동 말림 회전 방향이 역전되는 현상으로 나타나게 되는 것이다. 그런데 신장화염 모드에서 in-burning 모드로 바뀌는 경우는 화염이 부상될 만큼 상당한 크기의 가진 강도로 가진되는 경우로서, Fig. 8에서 볼 수 있듯이 유동을 잡아당기는 음의 속도 성분에 의한 와동은 분류 줄기에 합쳐지게 되어 궤보기 거대 와동의 회전 방향은 양의 속도 성분에 의해 지배되어 바깥방향으로 말리는 구조로 나타나게 된다.

4. 결 론

연료 관 공명 주파수로 층류 비예혼합 분류 화염을 가진 경우 가진 강도 증가에 따른 화염 내 거대 와동들의 구조 변화에 대한 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 화염이 노즐에 부착된 화염 영역 안에서는 이전의 연구와 마찬가지로 가진 강도에 따라서 화염이 길어지는 영역이 존재함을 확인할 수 있었다. 그런데 특이하게도 이러한 화염신장 현상은 신장화염 모드를 중심으로 이전과 이후의 화염 모드에서 화염 내 거대 와동의 회전 방향이 서로 바뀌면서 발생한다는 사실을 새롭게 알아내었다. 이러한 현상들이 일정 가진 강도 이상에서는 항상 연료 노즐 관 안에서 존재하는 음의 속도 성분에 기인됨을 PIV 유속계 등 정밀한 광학적 계측방법에 의한 유속 분포 특성을 통해 확인할 수 있었다.

2) 거대 와동들의 발생을 위상 평균 순간 속도와 마찬가지로 정현파의 가진 신호로 작용되는 가진된 유동장의 전단력과 연관하여 양과 음의 값을 갖는 성분으로 나누어 분석하였으며, 화염 신장을 중심으로 한 거대 와동들의 회전 방향 역전 기구를 알기 쉬운 이해도로 제시하여 설명하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부·지식경제부·노동부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업

의 연구결과입니다.

참고문헌

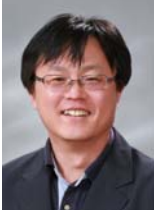
- [1] W. S. Anthony and J. C. Brian, "Visualization of the structure of a pulsed methane-air diffusion flame", *Phys. Fluids*, Vol. 28, No. 8, pp. 2317-2330, 1985.
- [2] Y. C. Chao and M. S. Jeng, "Behavior of the lifted flame under acoustic excitation", 24th Sym. on Combustion, pp.333-340, 1994.
- [3] T. K. Kim, J. Park and H. D. Shin, "Mixing mechanism near the nozzle exit in a tone excited nonpremixed jet flame", *Combustion Science and Technology*, Vol. 89, pp.83-100, 1993.
- [4] S. K. Oh and H. D. Shin, "A visualization study on the effect of forcing amplitude of tone excited isothermal jets and jet diffusion flames", *Int. J. of Energy and Resource*, Vol. 22, pp. 343-354, 1998.
- [5] K. M. Lee and S. K. Oh, "A visual investigation of nonpremixed flame behavior under acoustic excitation", '01 Spring Annual Conference, KSME, pp. 871-877, 2001.
- [6] F. Baillot and D. Demare, "Physical mechanisms of a lifted nonpremixed flame stabilized in an acoustic field" *Combustion Science and Technology*, Vol. 174, No. 8, pp. 73-98, 2002.
- [7] D. Demare and F. Baillot, "Acoustic enhancement of combustion in lifted nonpremixed jet flames" *Combustion and Flame*, Vol. 139, pp. 312-328, 2004.

저 자 소 개



김대원(金大源)

1960년생, 1983년 부산대학교 기계공학과(공학사), 1994년 창원대학교 기계공학과(공학석사), 1998년 창원대학교 기계공학과(공학박사), 1985년 07월~1999년 02월 기아정기 기술연구소 실험팀장, 1999년 2월~현재 전남도립대학 부교수



이기만(李起萬)

1960년생, 1983년 인하대학교 기계공학과(공학사), 1986년 인하대학원 기계공학과(공학석사), 1998년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사), 1986년 1월~1987년 12월 한국에너지기술연구소 연구원, 1988년 1월~1998년 1월 LG전자(주) 생활시스템연구소 팀장, 1998년 2월~2007년 3월 전남도립대학 부교수, 2007년 3월~현재 순천대학교 부교수