대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 D pp. 871~877 KSME 01S689

음향 가진 하에서 비예혼합 화염거동에 관한 가시화 연구

이기만*· 오세기**

A visual investigation of non-premixed flame behavior under acoustic excitation

Kee-Man Lee*, Sai-Kee Oh**

Key Words: acoustic excitation(음향가진), resonance frequency(공명주파수), phase average(위상평균)

Abstract

Experimental study was conducted to investigate the effects of axial forcing on the flame structures near the nozzle exit of non-premixed flame. The most notable observation is that the direction of vortical motions is changed at some ranges, according to the increase of excitation amplitude. Especially, the elongation flame and the phenomenon of In-burning are always occurred when the vortical motion turnabout. In an analysis of the flame/flow visualization by means of direct photography and RMS technique, a plausible explanation can be made that above phenomena are related only to the amplitude of phase average velocity between the instantaneous velocity elements of excited flow.

1. 서 론

유동 및 연소장을 제어하는 방법의 하나로 음향 가진에 의한 방법이 적용되어 왔는데 가진은 유동의 불규칙한 진동을 감소시킨다는 소극적인 관점과 혼합의 제어라는 능동적인 관점을 갖는다. 가진된 화염은 가진 주파수, 가진강도에 의해 변수화 되는데 연료관 관공명 주파수로 가진을 할 경우 분출관 근처의 혼합층에 영향을 주어 겉보기 난류 혼합이 유도됨으로써 층류 화염에서도 조그마한 가진 강도로 손쉽게 단염화 효과를 얻을 수 있게 된다. 이러한 혼합 성능 향상으로 대부분 가진된 비예혼합 화염 연구는 가진에 의해 부상되어 난류화 된 유동상태를 주 대상으로 삼아 왔다. 본 연구에 의하면 가진되지 않은 층류 비예혼합 분류 화염에 가진을 하면 유량에 따라 서로 다른 형태의 화염 거동이 관찰되었는데 작은 Reynolds의 분류 화염인 경우 노즐 부착 화염에서 가진 강도 증가에 따라 다양한 형태의 볼텍스 거동이 관찰되었다. 가진을 함에도 불구하고 화염이 신장되는 현상과 분출관 노즐 안에 화염이 빨려 들어와 있는 현상(In-burning)이 관측되었는데 이 경우 비반응에서는 나타나질 않는 화염 내부의 와동 역전 현상이 조사되었다. 이러한 와동의 역전 현상은 주기적으로 밀고 당겨지는 가진 유동장에서 가속위상과 감속위상의 속도 크기 차와 관련을 갖는 것으로 사료되며 반응에 의해 나타나는 화염신장이나 In-burning현상은 붕괴혼합으로 알려진 유동박리(flow separation)와 밀접한 관계가 있는 것으로 예견된다.

* 전남도립담양대학 기계자동차공학부
** (주)LG전자 디지털연구소

2. 실험장치 및 방법

2.1 버너 및 가진계

버너는 축대칭 비예혼합 화염을 얻기 위해 가운데 파이프 형태의 분류관이 있고 주위류가 흐르는 일반적인 동축류 버너로 제작하였다. 분류

관은 외경10mm, 길이 715mm인 관 한쪽 끝을 내경 5.5mm의 노즐 형태로 가공하였으며 노즐 내로 유입되는 화염 형상을 관찰할 수 있도록 투명한 파이렉스 관을 사용하였다. 연료는 상용 프로판(C_3H_8)을 사용하였으며 연료와 공기 유량은 습식 가스메터(wet gas meter)와 포말 유량계(bubble meter)로 교정된 마노메타 눈금 조절로 사용하였다. 레이저를 이용한 유동 가시화 경우에는 연료 유로계 내에 사염화 티타늄 증기($TiCl_4$)발생기와 세라믹 열판의 가열에 의한 등유 입자 발생 장치를 장착하여 사용하였다. 화염 안정화를 위한 주위류는 압축 공기로 균일한 속도장 생성을 위해 풍동 상하부에 축소 및 확대 노즐과 함께 2개의 허니컴과 3장의 화인메쉬(#100)를 설치하였다. 버너 출구의 축소 노즐은 입구경 100mm, 출구경 50mm, 길이 150mm로 축소비는 4이며 Morel이 제안한 방정식으로 가공하여 사용하였다. 음향진동을 발생시키는 가진 장치는 정현파를 발생시키는 함수발생기(HP 9400), 증폭기(Inkel AX-5400)와 오실로스코프 그리고 내경 200mm, 높이 160mm의 원형 아크릴 통 중앙에 음향 스피커(Sammi co., 6", 100Watt)가 설치된 가진실로 구성된다. 특히 가진 상태를 정확히 하기 위하여 주파수와 가진강도 등 가진 입력값은 오실로스코프로 측정된 값으로 결정하였다.

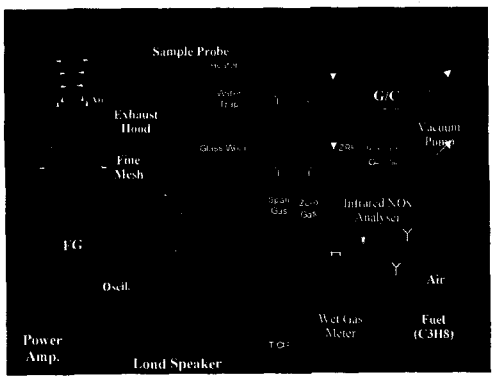


Fig. 1 Experimental set up

2.2 광학장치계

Fig. 2에 화염 내 와동 가시화를 위한 광학 장치도를 나타내었다. 일차적으로 가진에 의한 화염과 와동 간의 거시적인 운동은 쉴리렌 상으로 관찰하였으며 보다 명확한 상호작용은 레이저 연속광을 응용한 0.5mm의 sheet beam의 Mie 산란광 단면 가시화법을 사용하였다. 화염과 와동 간의 순간적인 연속상은 Intensified CCD Camera와 High speed motion analyser(Kodak Ekta Pro system)를 이용하여 관찰하였다. 측정된 연속상은 VCR과 PC를이용한 Image processing을 거쳐 분석 처리하였다. 한편 음향가진에 대한 유동장의 응답성(주파수 분석)은 Motion analyser에서 얻은 이미지 상과 화염온도 특성을 조사하고자 사용된 0.01" R-type 열전대로 4096개 변동 신호값을 A/D Board로 받아 FFT를 통하여 처리, 분석하였다.

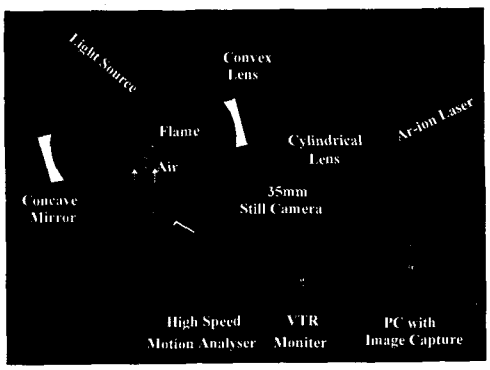


Fig. 2 Optical setup for visualization

2.3 실험조건

본 가진 실험에 사용된 유동조건은 층류 완전발달 유동이며 3.절에서 설명되는 바와 같이 "A"형 화염 조건인 분출관경 기준의 Re 720인 화염을 주 대상으로 하였다. 동축 주위류 공기는 유동장에 영향을 미치질 않도록 0.1m/s의 저속으로 공급하였다. 가진 주파수는 큰 가진 강도 효과를 얻기 위하여 다음과 같은 이론 식으로 계산되는 분류관 공명 주파수(Resonance frequency, f_0)인 171Hz로 고정하여 사용하였으며 가진 강도는 함수 발생기에서 발생되어 음향 스피커에 입력되는 정현파의 전압값, V_{P-P} 로 정하였다.

$$f_0 = \frac{1}{2} \frac{c}{l + 4d_o/3\pi} \quad (1)$$

c는 프로판 연료의 음속이며 l 은 분류관 길이, d_0는 분류관의 직경이며 표 1에 본 실험에 사용된 실험 조건을 간략하게 나타내었다.

분류Reynolds수	720	1050
분류 유속, m/s	0.55	0.8
주위류 유속, m/s	0.1	0.1
가진 주파수, Hz	171	171
가진 강도, V_{P-P}	0 ~ 20	0 ~ 5
화염 유형	"A"	"B"

Table 1 Test conditions

3. 3 결과 및 고찰

3.1 화염 안정화 선도

Fig. 3은 화염 안정화 현상을 크게 화염 부상(lift-off)과 화염 날림(blow-out)으로 나눈다면 본 실험에서 얻은 화염 안정화 선도이다. 일반적으로 가진된 분류의 축방향 속도는 가진이 없는 분류 평균 유동장에 가진에 의한 변동분이 가해지는 형태로 다음과 같이 정의된다.

$$u = u_m + u_f + u' \qquad (2)$$

여기서 u 는 가진된 유동의 순간속도, u_m 은 분류의 시간 평균속도, u_f 는 가진에 따른 위상평균 변동속도, u' 은 난류 변동속도를 나타낸다.

위 식에서도 알 수 있듯이 가진된 분류의 순간속도는 비가진 분류보다도 큰 값임을 알 수 있고 따라서 가진된 분류화염 안정화 특성은 특히 화염날림 현상에서 비가진 분류화염과 유사한 경향을 보이고 있다. 그런데 본 실험에서는 화염이 부상되는 형태가 Fig. 3과 4에서 보는 바와 같이 크게 두 종류로 나뉘어 존재함을 알 수 있었다. 즉, 가진강도 증가에 따라 여러 mode의 화염 형태를 보이다가 부상과 동시에 난류화염과 같은 형태(like turbulent flame)로 부상되는 "A"형 화염과 일반 분류의 부상화염 형태로 부상되는 "B"형 화염으로 구분된다.

"A"형 화염은 화염이 부상되기 전에 가진강도 증가에 따라 미약가진 화염(Mode I), Fat 화염(Mode II), 신장화염(Mode III), In-burning 화염(Mode IV) 등 4 가지 영역으로 구분된다. 반면에 "B"형 화염에서는 "A"형 화염의 큰 특징인 화염 신장이나 주위 산화제 유입에 의한 분류관 노즐 안으로 화염이 형성되는 In-burning 현상(이하 In-burning 화염이라 함)이 전혀 나타나질 않는다. 따라서 본 연구는 종래 주로 다루었던 "B"형태의 화염보다 아직까지 보고된 바가 거의 없는 "A"형태에서 가진 화염과 와동 간의 상호작용에 대한 관찰로 국한하고자 한다.

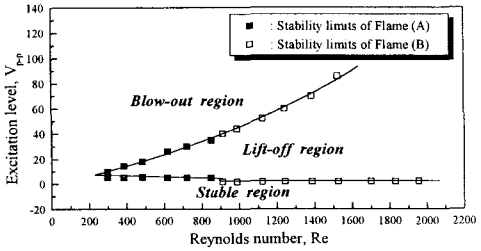


Fig. 3 Stability curve of a forced flame

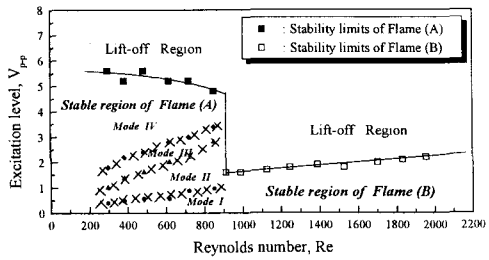


Fig. 4 Typical 2 kinds of stability domain according to the lift-off pattern

3.2 가진 화염의 일반적 특성

3.2.1 화염길이 및 형상

가진된 분류 화염인 경우 주로 비가진 된 화염보다 단염화 됨을 보고하고 있다. 그러나 오등[2]은 가진된 화염의 길이가 Fig. 5와 같이 화염신장 영역이 존재하는 등 몇 가지 영역으로 나뉘어지며 일정 가진 강도 이상에서는 김 등[3]이 밝힌 붕괴혼합(collapsable mixing)에 의해 단염화가 이루어지고 있음을 보고하고 있다.

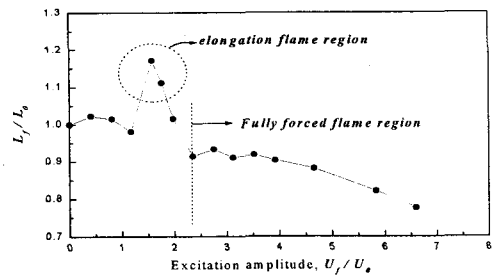
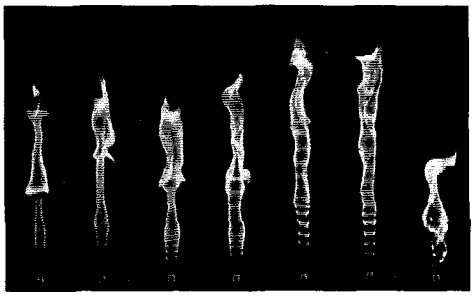


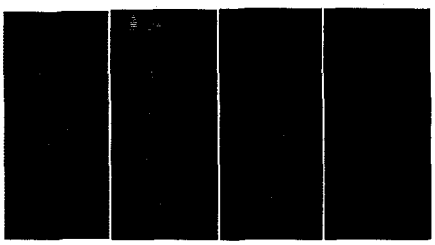
Fig. 5 Flame length variation as a function of forcing amplitude[2]

Fig. 6은 노출시간 1/1000초로 촬영한 가진 강도 증가에 따른 "A"형 화염에 대한 직접 사진을 보여주고 있고 있으며 Fig. 7은 이 중 대표적인 4가지 화염의 쉴리렌 상을 보여주고 있다. 사진에서도 보이는 바와 같이 비가진 화염(Fig. 6-a, 7-a)에서 가진을 주게 되면 화염길이가 약간 증가하다가(Fig. 6-b, mode I) 분류 노즐에 부착된 화염 선단이 뚱뚱해지면서 일시적으로 화염이 작아 지게 된다(Fig. 6-c, 7-b, mode II). 가진강도를 더욱 증가시키면 화염이 가늘어지면서 화염이 길어지게 되며(Fig. 6-e, 7-c, mode III) 이 후 가진강도를 더욱 증가시키면 육안으로 관측되기를 부착된 노즐 선단의 화염이 노즐 안으로 빨려 들어와 항상 노즐 안에 화염이 존재하고 있는 것(In-burning)처럼 보인다(Fig. 6-f, 7-d, mode IV). In-burning 화염의 자세한 사진은 3.3절에서 소개한다.



(a)0V (b)0.6V (c)1.5V (d)2V (e)2.4V (f)4V (g)6V

Fig. 6 Flame shape with a various amplitude at resonant frequency

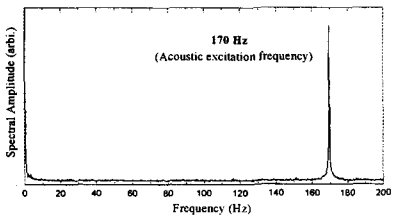


(a) 비가진 (b) Fat (c) 신장 (d) In-burning

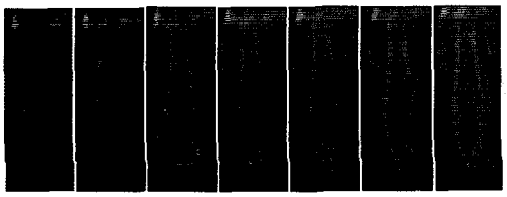
Fig. 7 Flame front shape(Schlieren image) (a) unexcited flame (b) Fat flame (c) elongation flame (d) In-burning flame

3.2.2 가진에 의한 유동 응답성

본 실험에 의하면 비가진 된 화염을 저 주파수(~20Hz)로 가진하면 강도에 따라 약간의 차이를 보이나 화염은 가진 신호와 동일한 주파수로 응답하게 된다. 그러나 본 조건인 관 공명주파수와 같이 비교적 고주파인 경우에서는 화염이 유동을 추종하질 못하나 유동장은 Fig. 8 Fat flame를 예로 든 열전대 신호의 주파수 분석값과 쉴리렌 상에서 보여진 바와 같이 수 d_0 까지 가진 주파수로 응답함을 알 수 있다. 또한 여기서는 나타내질 않았으나 가진 강도가 증가할수록 상당한 화염 영역까지 유동은 가진 신호로 지배되고 있음을 보이고 있다.



(a) Frequency response (at x/ d_0 = 8)



270° 330° 30° 90° 150° 210° 270°

(b) Schlieren images(1/1000s interval, 167Hz)

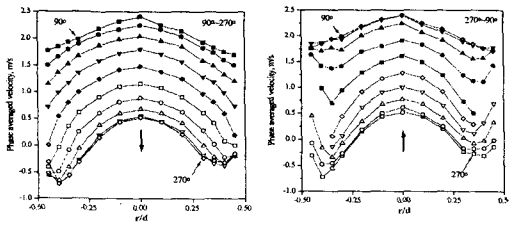
Fig. 8 Flow response of a resonant frequency

3.2.3 분류관 출구의 유속 분포

가진된 유동장은 분류 자체 유동에 가진의 밀고 댕기는 속도 변동분이 더해지는 형태이므로 노즐 선단의 혼합 구조가 일반 분류 화염과 상당한 차이를 보이게 된다. 특히 큰 가진 강도에서는 분류관 출구에서 음의 속도가 나타나게 되고 이러한 음의 속도 발생이 급격한 붕괴혼합으로 나타나 분류의 부분적 예혼합을 유도하여 화염이 짧아지는 원인으로 보고되고 있다.[3)]

Fig. 9는 오 등[2)]이 측정한 가진 강도가 0.6인 비교적 작은 가진 상태에서도 분류관 벽 부근에 음의 속도가 존재하는 것을 알 수 있는 위상 별 속도 분포 결과이다. (a)의 경우는 가진에 의한 유동이 댕겨져 $du/dt < 0$ 되는 감속위상 구간에서 속도 분포를, (b)는 밀려 $du/dt > 0$이 되

는 가속위상 구간에서의 반경방향 속도 분포를 나타낸다. 두 경우 공히 180° 부근에서 관벽부터 음의 속도가 발생하기 시작하여 관 중앙을 향하여 확대됨을 알 수 있다. 관 내 음의 속도는 관 외부에 존재하는 산화제의 관내 유입을 유발시키게 되는데 가진 강도 증가에 따라 더욱 많은 산화제가 유입되게 된다. 산화제 유입증가는 붕괴 혼합의 화염 부상이 발생하기 전에 화염신장과 In-burning 화염 형태로 나타나게 되는데 이러한 화염의 또 다른 특징으로는 휘염의 증가와 함께 soot가 증가되는 것이 정성적으로 목측되었다.



(a) 감속구간 (b) 가속구간

Fig. 9 Radial velocity profile at nozzle exit

3.3 모드별 와동구조와 화염거동

본 연구는 앞서 설명한 대로 기존의 가진된 층류 비예혼합 화염에서 보고되질 않은 신장화염과 In-burning 화염에 대해서 집중적으로 조사되었다. Fig. 10은 가진강도 증가에 따른 화염 내 와동의 구조를 나타낸 것이다. Fig. 10 좌측서부터 우측으로의 사진은 Fig. 6-a ~g 과 동일한 유동조건으로 분출관 근처의 와동 구조를 나타낸 것이다. 전체적으로 가진의 운동량 증가에 따라 와동 간의 간격이 증가하는 것을 알 수 있다.

그런데 여기서 주목할 만한 특이한 현상은 Fig. 11에서 자세히 보이는 바와 같이 화염이 신장되어 가늘어지기 전에 일시적으로 화염 선단이 뚱뚱해지면서 시계방향(clockwise)으로 회전하였던 와동이 신장화염이 되면서 반 시계방향으로 회전

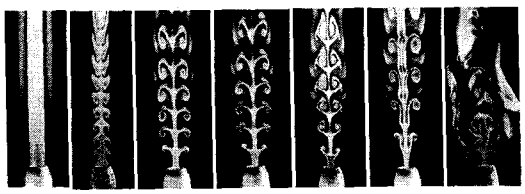
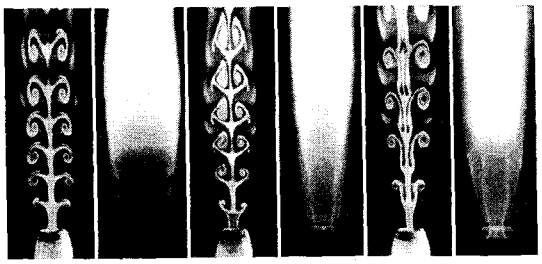


Fig. 10 Cross-cut images with amplitude

(counter clockwise)하다가 In-burning 화염에서는 다시 원래 방향인 시계방향으로 회전한다는 사실이다. 이렇듯 겉보기 와동 역전 현상은 본 연구에서 얻은 가장 괄목할 만한 발견 중의 하나이다. 또한 In-burning화염(Fig. 11-c)에서는 주위 산화제가 분류관 안 깊숙이 유입되어 육안으로는 항상 화염이 노즐 안으로 댕겨 들어와 있는 모습을 하고 있다. 이러한 현상은 가진된 유동장만의 특징으로 Fig. 9에서 보여진 바와 같이 분류관 내 음의 속도가 존재한 결과이다. 사진에서 단면상은 1/4000 초의 노출 시간이며 적분 직접상은 1/125 초로 목측에 의하면 2중 화염으로 보이게 된다.

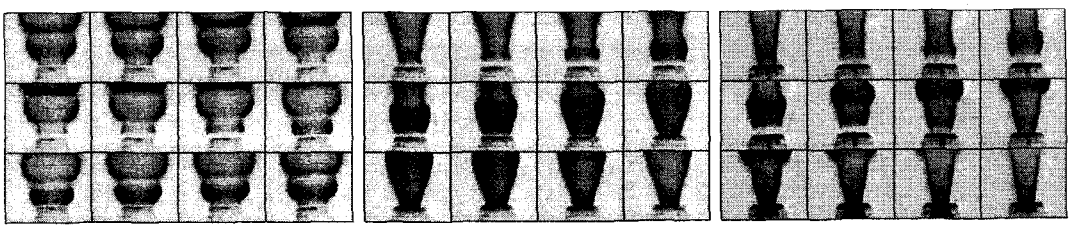


(a) Fat flame (b) Elongation flame (c) In-burning

Fig. 11 Reversion of vortices rotation at a resonant frequency, (a) 1.5V, (b) 2.4V, (c) 4V

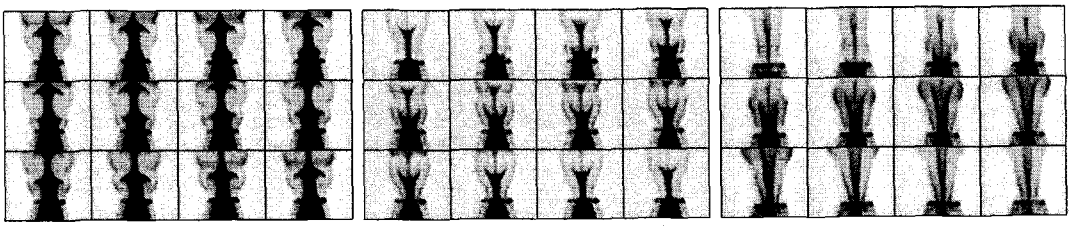
이러한 현상을 정밀 분석하고자 ICCD 카메라가 장착된 High speed motion analyser로 각 화염의 적분상과 단면상 그리고 비반응 유동장의 단면상을 위상 동기 촬영을 하여 분석하였다. Fig. 12은 위 3가지 화염의 위상 동기 적분상을 나타낸다. 각 영상 정보는 1/2000 초 노출시간에 1/2000 초 간격의 연속상으로 좌측 상단이 0° 위상으로 30° 위상 간격으로 배열되어 있다. 연속상에서 알 수 있다시피 연료 와류 함께 형성된 화염은 가속 구간인 0° ~ 180° 에서 와환 하나를 기준으로 할 때 60~70%의 와류가 전개되며 감속구간인 180° ~ 360° 에서 나머지 와류가 전개됨을 볼 수 있다. Fig. 12-b의 경우 다른 두 화염에서 볼 수 있는 볼록한 부분이 없는 것으로 보아 화염신장이 발생하는 경우에서는 다른 두 화염과 다른 유동 구조로 화염이 형성되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13에 동일한 유동조건과 측정조건의 Mie 산란광 단면가시화를 나타내었는데 Fig. 12와 마찬가지로 좌측상단이 0° 이고 이후 30° 위상 간



(a) Fat flame (b) Elongation flame (c) In-burning flame

Fig. 12 Chronological images of vortices reversion flames (From left-top 0° , 30° increse to the right)



(a) Fat flame (b) Elongation flame (c) In-burning flame

Fig. 13 Chronological Mie-scattering images of upper flames (From left-top 0° , 30° increse to the right)

격의 연속상이다. 단면 연속상에서도 보이는 바 같이 화염신장을 전후로 하여 와동 회전이 역전되는 현상을 분명하게 볼 수 있다. 이러한 와동의 역전현상은 비반응 유동장에서는 나타나질 않게 되는데(Fig. 14) 반응에 의해 형성된 부력에 의해 유동이 가속화되는 현상과 연관되어 있음을 알 수 있다.

3.4 와동역전 모델

앞서도 설명한 바와 같이 가진된 화염장은 일반 분류 화염장에 가진에 의해 밀고(가속위상 속도) 당겨지는(감속위상 속도) 유동장이 가해져서 나타나게 되는데 가진강도의 증가와 함께 가속위상 속도와 감속위상 속도의 차가 더욱더 커지게 된다. 즉, 식 (2)에서 알 수 있다시피 첫 번째 분류의 평균 속도는 가진강도와 무관하게 동일하며 세 번째 항인 난류 변동 속도도 부상되어 난류화

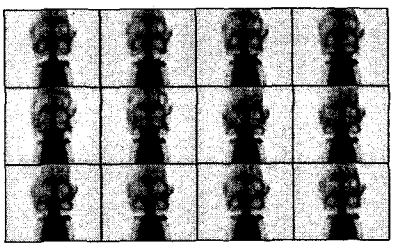


Fig. 14 Mie-scattering images of non-reaction of elongation flame

되기 전이므로 동일하다고 가정하면 가진강도 증가에 따른 가진분류의 순간속도는 결국 위상 변동속도인 u_f의 크기에 따라 달라짐을 알 수 있다. 그리고 가진분류인 경우는 일반 분류의 와구조와 다르게 위상 변동에 의해 상(감속위상)·하(가속위상) 볼텍스 쌍의 와환 구조를 갖는다. 따라서 분류평균 속도와 난류 변동 속도성분이 일정하다고 한다면 이 상하 볼텍스 쌍의 회전력은 가진 강도크기에 따라 달라지게 된다. 보다 선명한 직접 단면가시화 상인 Fig. 11을 자세히 보면 (a)에서는 상·하 볼텍스 쌍에서 하부 볼텍스가 주된 거동을 하고 있고 (b)에서는 상부 볼텍스가 주 거동으로 보이나 하부 볼텍스 거동도 미약하나마 존재함을 알 수 있다. 또한 (c)에서는 마치 하부 볼텍스가 주 거동을 하는 것으로 보이나 자세히 들여다보면 상부 볼텍스 거동이 강하여 와동 줄기(stem)에 합쳐져 버려 안보이고 가진강도 증가에 비례해 커진 상부볼텍스가 겉보기에 주 거동 와류로 존재하고 있는 것처럼 보임을 알 수 있다. 즉, (a)와 (b)사이는 와동 역전이 발생되었으나 (b)와 (c)사이는 와동 역전 현상이 아니고 역전된 와동의 강도가 증가되는 현상으로 이해된다. 그러나 이 경우 증가된 상부볼테스가 주위 산화제 유입 역할을 하게 되므로 다른 보고에서 알 수 있듯이 미연성분인 일산화탄소(CO)의 배출이 (b)보다 작게 나타난다.

4. 결론

부상되질 않은 가진된 층류 비예혼합 분류화염의 화염신장과 In-burning 현상 그리고 와동역전 현상이 단면 직접상과 순간 연속상의 가시화로부터 다음과 같이 분석되었다.

반응에 의해 나타나는 와동역전 현상은 화염부력으로 인해 상부볼테스의 가속화가 원인임을 알았고 신장화염 전후로 바뀌는 와동역전 현상은 가진 위상 변동 속도분의 크기에 따라 달라지게 되며 신장화염과 In-burning화염은 와동역전이 아니라 역전된 와동의 강도 증가에 따라 겉보기 역전 현상으로 이해되었다. 따라서 화염이 신장되는 경우는 겉보기 주 와동방향이 주변 산화제 유입에 불리한 방향으로 회전함에 따라 나타난 결과로 이해할 수 있다. 이에 비해 In-burning현상은 상부볼텍스 운동이 매우 강해졌으나 가진 특성상 상대적으로 강해진 하부볼텍스가 산화제 유입에 도움을 주고 있으며 관내 화염이 존재하는 것은 이전에 보고된 유동박리 기구로 이해된 분류관 내 음의 속도로 인해 주위 산화제가 다량 유입된 것 보인다.

후기

"이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 신진교수 사업 연구비(KRF-99-E00020-E1103)에 의하여 지원되었으며 관계자 여러분께 감사를 드립니다."

참고문헌

(1) Yasir M. AI-Abdeli and Assaad R. Masri, 1999, "Laminar flame characteristics under acoustic excitation" The Second Asia-Pacific Conference on Combustion, pp. 214-217, Taiwan

(2) Sai Kee Oh and Hyun Dong SHIN, 1998, " A visualization study on the effect of forcing amplitude of tone-excited isothermal jets and jet diffusion flames", Int. J. of Energy Resource, Vol. 22, pp. 343-354

(3) Kim T.K., Park J. and Shin H.D., 1993, "Mixing mechanism near the nozzle exit in a ton excited non-premixed jet flame", Comb. Sci. and Tech., Vol. 89, pp. 83-100

(4) Lovett J.A. and Turns S. R., 1989, "Experiments on axisymmetrically pulsed turbulent jet flame", AIAA J., Vol. 28, pp. 38-46

(5) Putnam, A.A., Belles, F.E. and Kentfied, J.A.C., 1986, "Pulsed combustion", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 12, pp 43

(6) Chao, Y.C. and Jeng, M.S., 1994, "Behavior of the lifted flame under acoustic excitation", 24th Sym.(Int.) on combustion, pp. 333-340

(7) K.R. McManus, T. Poinsot and S.M.Canddell, 1993, "A review of active control of combustion instabilities", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 19, pp 1-29