한국화재소방학회 논문지, 제23권 제1호, 2009년
[논 문]

J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 23, No. 1, 2009

규칙적인 진동 하에서 노즐 부착된 제트화염의 연소특성

A Combustion Characteristics of Attached Jet Flame under the Regular Oscillation

김대원* · 이기만†

Dae-Won Kim* · Kee-Man Lee†

*전남도립대학 조선기계과, 순천대학교 기계우주항공공학부

(2008. 12. 23. 접수/2009. 2. 13. 채택)

요 약

층류영역의 분출유량에서 큰 가진강도 효과를 얻기 위해 연료관 관 공명주파수로 가진된 비예혼합 분류화염의 일반적인 가진 연소특성을 실험적으로 조사하였다. 화염 안정화 특성에서는 두 가지 형태의 부상특성이 존재하는 사실을 알았는데, 화염이 부상되는 가진강도 크기에서 한 쪽은 감소, 다른 영역에서는 증가하는 것으로 나타나 각각 서로 다른 부상기구가 존재함을 확인할 수 있었다. 특히 부상되지 않고 노즐에 부착된 분출유량 영역에서의 가진 연소특성을 가진강도에 따른 화염 길이와 형상, 유동장 응답 특성 그리고 노즐 출구에서의 유속 분포를 중심으로 집중 조사하였다. 특이한 현상으로는 가진 강도 증가에 따라 화염의 신장과 in-burning 현상 그리고 화염 내 거동 와동들의 말림방향이 서로 역전되는 현상 등이 발견되었다. 노즐 출구의 유속분포와 가시화 기법을 통해 이러한 현상들이 노즐관 관벽 안쪽서부터 음의 속도가 발생하기 시작함에 따라 주변 산화제인 공기가 노즐관 안으로 유입되는 현상과 관련되는 것으로 파악되었다.

ABSTRACT

A general combustion characteristics of forcing nonpremixed jet in laminar flow rates have been conducted experimentally to investigate the effect of forcing amplitude with the resonant frequency of fuel tube. There are two patterns of the flame lift-off feature according to the velocity increasing; one has the decreasing values of forcing amplitude on the lift-off occurrence when a fuel exit velocity is increasing, while the other has the increasing values. These mean that there are the different mechanisms in the lift-off stability of forced jet diffusion flame. Especially, the characteristics of attached jet flame regime are concentrically observed with flame lengths, shapes, flow response and velocity profiles at the nozzle exit as the central figure. The notable observations are that the flame enlogation, in-burning flame and the occurrence of a vortical motion turnabout have happened according to the increase of forcing amplitude. It is understood by the velocity measurements and visualization methods that these phenomena have been relevance to an entrainment of surrounding oxygen into the fuel nozzle as the negative part of the fluctuating velocity has begun at the inner part of the fuel nozzle.

Keywords : Forcing jet flame, Attached jet flame, Resonance frequency, Forcing amplitude, Negative part of fluctuating velocity

1. 서 론

유동 및 연소장을 제어하는 방법의 하나로 주기적인 진동(가진)에 의한 방법이 응용되어 왔는데, 가진은 유동의 불규칙한 진동을 감소시킨다는 소극적인 관점과 혼합성능을 제어할 수 있다는 능동적인 관점을 갖는다.[2-4] 가진된 화염은 가진 주파수, 강도 등으로 변수화 되는데, 가진 시 연료관 관 공명주파수로 가진을 할 경우 작은 가진강도로도 큰 가진강도 효과를 얻을 수 있게 된다. 관 공명주파수의 가진은 제트 분출관 근처의 혼합층에 영향을 주어 겉보기 난류혼합이 유도됨으로써 층류화염에서도 조그마한 가진강도로도 손쉽게 단염

†E-mail: kmlee@sunchon.ac.kr

(short flame)화 되는 효과를 얻을 수 있게 된다. 이러한 혼합성능 향상으로 대부분 가진된 비예혼합 화염연구는 가진에 의해 화염이 부상되어 난류화되는 혼합기구 규명에 주로 이루어져 왔다.[6-8]

그런데 본 연구에 의하면 가진되지 않은 층류 비예혼합 분류화염에 주기적인 가진을 주게 되면 분사되는 유량 증가에 따라 서로 다른 경로로 화염이 부상되는 것이 새롭게 관찰되었다. 특히 작은 가진강도에서도 화염이 쉽게 부상되는 상대적으로 큰 분사유량 영역과는 달리, 적은 분사유량 영역에서는 비교적 큰 가진강도까지도 화염이 부상하질 않고 분사노즐에 부착된 상태에서 다양한 형태의 화염과 와동구조를 갖는 화염거동이 관찰되었다.

이 영역에서는 가진을 줄 경우 일반적으로 화염이 단염화 되는 것과 달리 오히려 화염이 신장되는 현상과 분출관 노즐 안에 화염이 빨려 들어와 있는 현상들이 관측되었다. 또한 비반응 유동장에서는 나타나질 않는 화염 내 거대와동들이 말려서 회전하는 방향이 특정 화염을 중심으로 서로 역전되는 등 특이한 현상들이 발견되었다.

따라서 본 연구에서는 아직까지 보고된 바가 없는 적은 분사유량의 층류 영역에서 비교적 큰 가진강도까지도 부상하질 않고 노즐에 부착되어 다양한 화염거동을 보이는 음파로 가진된 분류 화염의 연소특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 버너 및 가진시스템

본 연구에 사용된 실험장치를 Figure 1에 나타내었다. 버너는 축대칭 비예혼합 화염을 얻기 위해 가운데 파이프 형태의 분류관이 있고 관 주변으로 주위류가 흐르는 일반적인 동축류 버너로 제작하였다. 분류관은 외경 10mm, 길이 715mm인 관 한쪽 끝을 내경 5.5mm의 노즐 형태로 가공하였으며 노즐 내로 유입되는 화염 형상을 관찰할 수 있도록 투명한 파이렉스 관을 사용하였다. 또한 관 두께 영향을 없애기 위하여 노즐 선단 부분은 날카롭게 가공하였다.

연료는 상용 프로판(C_3H_8)을 사용하였으며, 연료와 공기 유량은 습식 가스메터와 포말 유량계(bubble meter)로 교정된 질량 유량계(MFC)를 MFC 조정기로 정밀하게 조절하여 사용하였다.

레이저를 이용한 유동 가시화 경우에는 연료 유로계내에 사염화 티타늄 증기($TiCl_4$)발생기와 세라믹 열판의 가열에 의한 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 메세메쉬를 설치하였다. 버너 출구의 축소 노즐은 입구직경 100mm, 출구직경 50mm, 길이 150mm로 축소비는 4로 하였다.

음향진동을 발생시키는 가진장치는 정현파를 발생시키는 함수발생기, 증폭기(Inkel AX-5400)와 오실로스코프 그리고 내경 200mm, 높이 160mm의 원형 아크릴통 중앙에 음향 스피커(6", 100Watt)가 설치된 가진실로 구성된다. 특히 가진 상태를 정확히 하기 위하여 주파수와 가진강도 등 가진변수 값들은 오실로스코프로 측정된 값으로 결정하였다.

2.2 계측시스템

Figure 2에 화염 내 와동 가시화를 위한 광학 장치

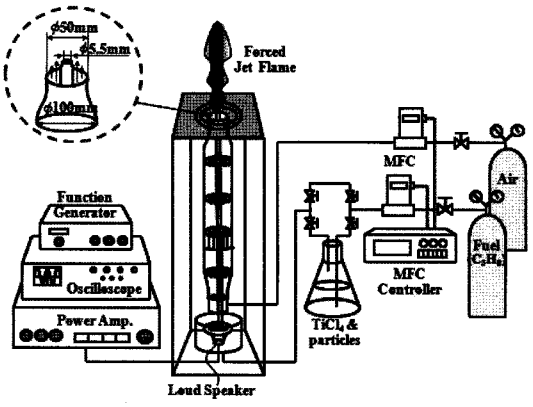


Figure 1. Experimental set-up.

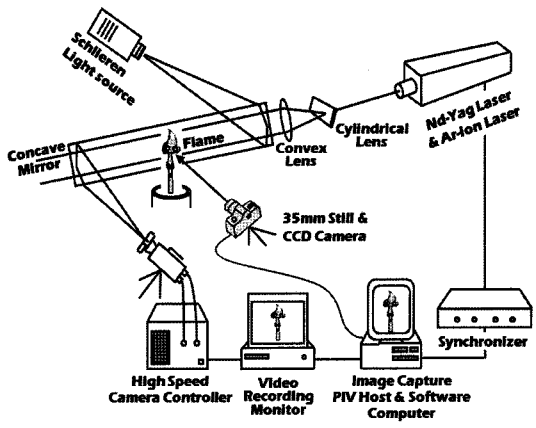


Figure 2. Optic and visualization system.

Table 1. Experimental Conditions

분류 Reynolds수	720	1,050
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"

도를 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 ICCD Camera와 고속카메라를 이용하여 관찰하였으며, 측정된 연속상은 VCR과 PC를이용한 이미지 프로세싱을 거쳐 분석 처리하였다.

한편 음향가진에 대한 유동장 응답성(주파수 분석)은 고속카메라에서 얻은 이미지 상과 화염온도특성 조사를 위해 사용된 0.01" R-type 열전대의 변동 신호값을 A/D Board로 받아 FFT 처리를 통하여 분석하였다.

2.3 실험조건

본 가진 연구에 사용된 유동조건은 층류 완전 발달의 분류유동이며 다음 3.1절에서 설명되는 "A"형태의 화염으로, 연료노즐 평균유속 기준의 Reynolds 값이 720인 화염을 주 대상으로 하였다. 또한, 동축의 주위류 공기는 유동장에 영향을 미치질 않도록 0.1m/s의 저속으로 공급하였다.

가진 주파수는 큰 가진강도 효과를 얻기 위하여 다음과 같은 이론식으로 계산한 분류관 관공명주파수(Resonance frequency, f_0)인 171Hz로 고정하였으며, 가진강도는 함수 발생기에서 발생되어 음향 스피커에 입력되는 정현파의 전압값, V_{P-P}으로 정하였다.

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

여기서 C는 프로판 연료의 음속이며 l은 분류관 길이, d_0는 분류관의 직경이며 Table 1에 본 연구에 사용된 실험조건을 간략하게 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염 안정화 특성

화염 안정화 현상을 크게 화염부상(lift-off)과 화염날

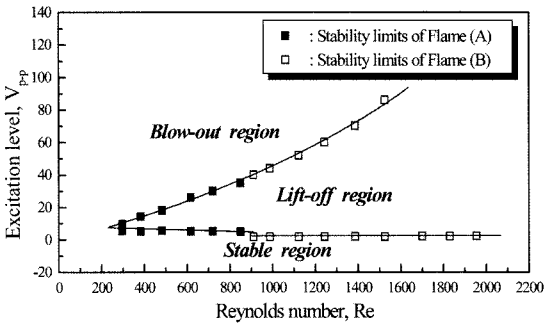


Figure 3. Flame stability curve.

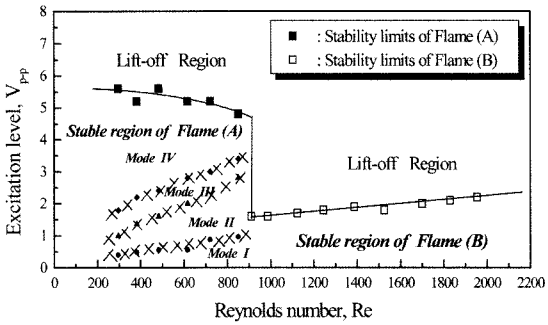


Figure 4. Lift-off curve with two patterns.

림(blow-out)으로 나눈다면 Figure 3은 본 연구에서 얻은 가진된 화염 안정화 선도이다.

일반적으로 가진된 분류의 축 방향 속도는 가진이 없는 분류 평균 유동장에 가진에 의한 변동분이 가해지는 형태로 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 u는 가진된 유동의 순간속도, u_m은 분류의 시간 평균속도, u_f는 가진에 따른 위상평균 변동속도, u'은 난류 변동속도를 나타낸다.

위 식에서도 알 수 있듯이 가진된 분류의 순간 최대속도는 비가진 분류보다도 큰 값임을 알 수 있고 따라서 가진된 분류화염 안정화 특성은 특히 화염날림 현상에서 비가진 분류화염과 유사한 경향을 보이고 있다.

그런데 특이한 사항은 화염이 부상되는 형태가 Figure 3과 4에서 보는 바와 같이 크게 두 종류로 나뉘어 존재한다는 것이다. 즉, 가진강도가 증가함에 따라 여러 형태의 화염거동을 보이다가 비교적 큰 가진강도에서 부상과 동시에 난류화염과 같은 형태(like turbulent flame)로 부상되는 영역이 있는가 하면("A"형 화염으로 명함), 조그마한 가진강도에서 일반 분류와 유사한

형태로 쉽게 부상되는("B"형 화염으로 명함) 두 가지 부상경로로 나뉘어 존재한다는 사실이다.

"A"형태의 부상경로를 갖는 가진화염에서는 부상되기 전까지 가진강도 증가에 따라 미약가진 화염(Mode I), fat화염(Mode II), 신장화염(Mode III), in-burning화염(Mode IV) 등 다양한 모드의 화염거동을 보이고 있으며 이들 화염에 대한 특성에 대해서는 거대와동의 거동을 중심으로 다음 절에서 설명하기로 한다.

반면에 "B"의 부상경로를 갖는 화염에서는 "A"형태 화염의 큰 특징인 화염신장이나 주위 산화제 유입에 의한 분류관 노즐 안으로 화염이 형성되는 in-burning 현상(이하 in-burning 화염이라 함)이 전혀 나타나질 않는다.

여기서 "A"형 가진화염의 부상특성을 보면 노즐 출구속도가 증가함에 따라 화염이 부상하는데 요구되는 가진강도가 점차 감소함을 볼 수 있다. 이는 가진없이도 화염이 부상하는 임계 출구 속도가 존재함을 의미하게 된다. 그런데 "B"형 화염에서는 화염이 부상되는 가진강도가 출구속도 증가와 함께 조금씩 증가하는 경향이 있어 두 개 영역에서 화염의 부상기구(mechanism)가 서로 다르게 적용되고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 노즐부착 가진화염의 일반적 특성

3.2.1 화염길이 및 형상(화염 모드)

일반적으로 가진된 분류 화염인 경우 주로 비가진된 화염보다 단염화되는 것으로 알려져 왔다. 그러나 Figure 5에서 보이는 바와 같이 가진강도에 따라 화염의 길이가 오히려 늘어나는 신장영역이 존재함을 보여 주고 있다.

이 경우 계속된 가진강도 증가에서도 화염은 부상하질 않고 있다가 일정 가진강도 이상에서는 김 등[6]이 밝힌 붕괴혼합(collapsable mixing)과 비슷한 구조로 부상과 동시에 난류화가 되면서 화염이 급격히 짧아지고 있음을 보여 주고 있다.

Figure 6은 노출시간 1000^{-1}초로 가진강도 증가에 따른 "A"형 화염에 대한 직접사진을 보여주고 있으며 Figure 7은 그 중에서 대표적인 4가지 화염의 쉴리렌 상을 보여주고 있다.

직접사진에서도 볼 수 있는 것과 같이 비가진된 화염(Figure 6-a, 7-a)에서 가진을 주게 되면 화염길이가 약간 증가하다가(Figure 6-b, mode I) 분류노즐에 부착된 화염 선단이 뚱뚱해지면서 일시적으로 화염이 작아지게 된다.(Figure 6-c, 7- b, mode II) 가진강도를 더욱 증가시키면 화염이 가늘어지면서 화염이 길어지게 되며(Figure 6-e, 7-c, mode III) 이 후 가진강도를 더욱 증가시키면 육안으로 관측되기를, 노즐선단에 부착된 화염이 노즐관 안으로 빨려 들어와 항상 노즐 안에 화염이 존재하고 있는 것(in-burning)처럼 보인다(Figure 6-f, 7-d, mode IV).

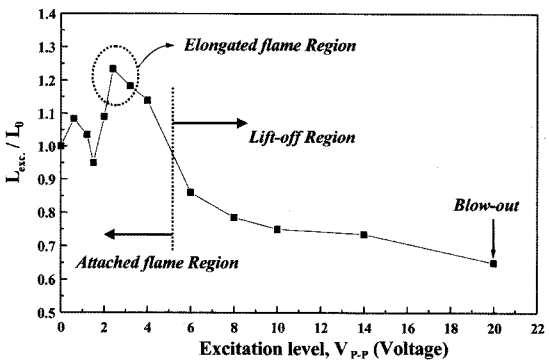
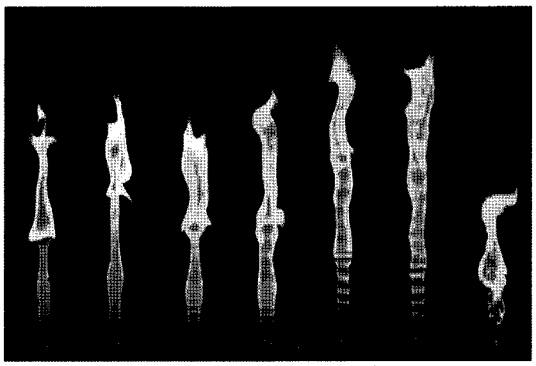
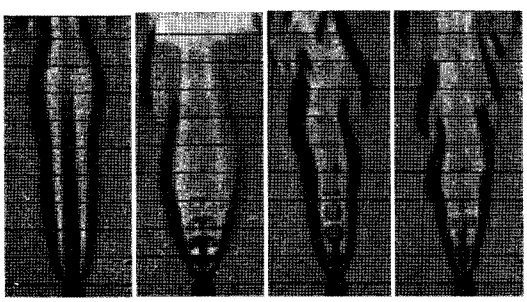


Figure 5. Normalized flame length.



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

Figure 6. Flame shapes according to the forcing amplitude with a fixed frequency. (a) unforcing (b) feeble (c) fat (d) middle (e) elongation (f) In-burning (g) lift-off flame.



(a)unforcing (b)fat (c)elongation (d)in-burning

Figure 7. Schlieren image of typical flames.

이러한 in-burning 현상에 대한 자세한 설명은 음의 속도 발생과 관련하여 3.3절에서 기술된다.

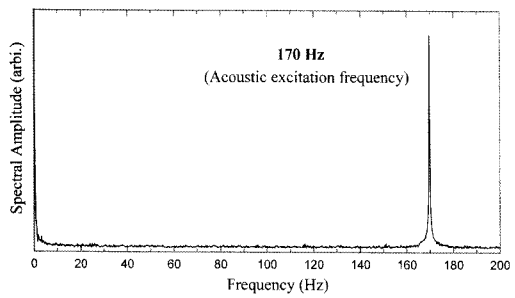
3.2.2 가진에 의한 응답 특성

본 연구에 의하면 비가진 된 화염을 저 주파수(~20Hz)로 가진하면 강도에 따라 약간의 차이를 보이나 화염이 진동하게 되는 주기는 가진신호와 동일한 주파수로 응답함을 확인할 수 있었다.

그런데 본 연구의 가진 조건인 관 공명주파수와 같이 상대적으로 높은 주파수인 경우에서는 화염은 가진 주파수만큼 빠르게 추종하지는 못함을 확인하였다. 그러나 비반응의 유동장은 fat 화염 예인 Figure 8에서 볼 수 있듯이 열전대 신호 주파수 분석값과 쉴리렌 상 분석에서 수 d_o까지 가진신호(가진 주파수)와 거의 동일한 주기로 추종되고 있음을 알 수 있다. 또한 여기서는 나타내질 않았으나 가진강도가 증가할수록 상당한 화염영역까지 유동은 가진신호로 지배되고 있음을 볼 수 있었다.

3.2.3 분류관 출구의 유속분포 특성

가진된 유동장은 분류 자체유동에 가진에 의해 밀고 댕기는 속도 변동분이 더해지는 형태이므로 노즐 선단

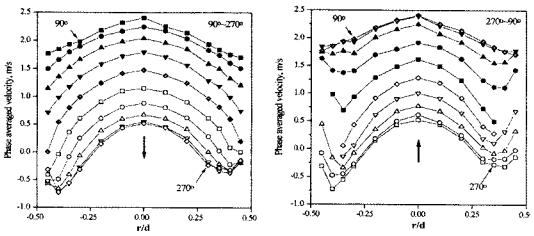


(a) Frequency characteristic(at x/d_o = 8)

270° 330° 30° 90° 150° 210° 270°

(b) Continuous schlieren images(each images have a 1000^{-1} sec interval time)

Figure 8. Flow response characteristic of forcing frequency with 171Hz.



(a) deceleration (b) acceleration

Figure 9. Velocity profile of radial direction at the nozzle exit.

의 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 이해되고 있다.[3)]

Figure 9는 가진강도 0.6V인 비교적 작은 가진 상태에서도 분류관 벽 부근에서 음의 속도가 존재하는 것을 알 수 있는 노즐관 출구에서의 위상 별 속도분포 특성을 나타낸 그림이다.

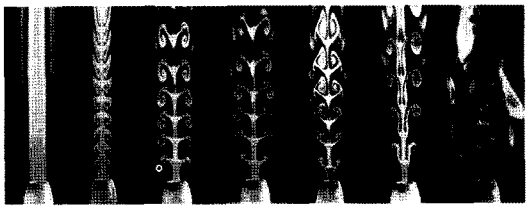
(a) 경우는 가진에 의한 유동이 댕겨져 $du/dt < 0$되는 감속위상 구간에서의 속도 분포를, (b)는 밀려서이 $du/dt > 0$되는 가속위상 구간에서의 반경방향 속도분포를 나타낸다. 두 경우 공히 180° 부근에서 관 벽으로부터 음의 속도가 발생하기 시작하여 관 중앙을 향하여 확대됨을 알 수 있다.

관 내 음의 속도는 관(노즐) 외부에 존재하는 산화제의 노즐 내 유입을 유발시키게 되는데 가진 강도 증가에 따라 더욱 더 많은 산화제가 유입되게 된다. 산화제 유입증가는 붕괴혼합에 의해 화염부상이 발생하기 전에 화염신장과 in-burning 화염 형태로 나타나게 된다. 이러한 화염의 또 다른 특징으로는 휘염의 증가와 함께 soot가 증가되는 것이 정성적으로 목측되었다.

3.3 부착 가진화염의 와동구조와 화염거동

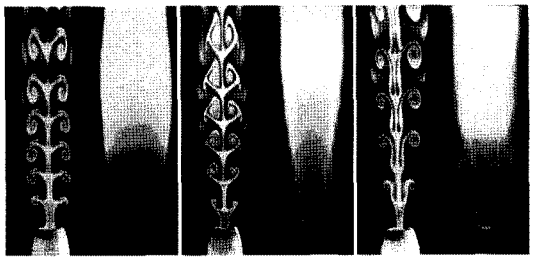
본 연구는 앞서 설명한 대로 기존의 가진화염에서 보고되질 않은 신장화염과 in-burning 화염에 대해서 집중적으로 조사되었다. Figure 10은 가진강도 증가에 따른 화염 내 와동의 구조를 나타낸 것이다. Figure 10 좌측서부터 우측으로의 사진은 Figure 6-a~g과 동일한 유동조건으로 분출관 근처의 와동 구조를 나타낸 것이다. 전체적으로 가진 운동량 증가에 따라 상하 와동간의 간격이 증가하는 것을 볼 수 있다.

그런데 여기서 주목할 만한 특이한 현상은 Figure 11에서 자세히 보이는 바와 같이, 화염이 신장되어 가늘



forcing amplitude ---------->

Figure 10. Visual images according to the forcing amplitude (vertical cross-cut images by the Mie-scattering method).



(a) fat flame (b) elongation flame (c) In-burning

Figure 11. Visual images of the turnabout phenomenon of vortex roll-up around an elongated flame.

어지기 전에 일시적으로 화염 기저(flame base)부분이 뚱뚱해지면서 와동말림(vortex roll-up)이 바깥방향으로 말리다가 신장화염이 되면서 와동이 안쪽방향으로 말리게 되며, in-burning 화염이 되면서 다시 원래 방향인 바깥방향으로 와동이 말리는 겉보기 와동들의 회전방향에서 역전현상이 나타난다는 사실이다.

이러하듯 겉보기에 와동이 말리는 방향이 신장화염을 전후로 해서 서로 바뀌는 와동말림 역전현상은 본 연구에서 얻은 가장 괄목할 만한 발견 중의 하나이다.

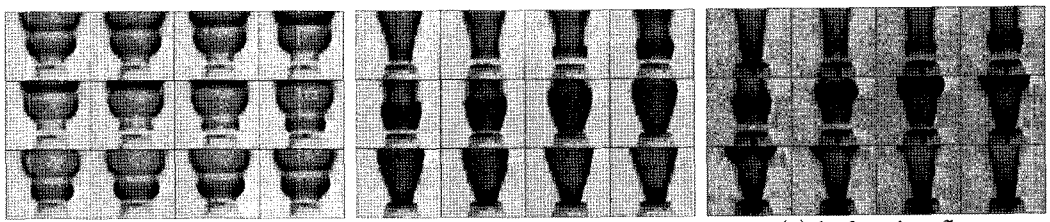
또한 in-burning화염(Figure 11-c)에서는 주위 산화제가 분류관 안 깊숙이 유입되어 육안으로는 항상 화염이 노즐 안으로 댕겨 들어와 있는 모습을 하고 있다. 이러한 현상은 가진된 유동장 만의 특징으로 Figure 9에서 보여진 바와 같이 분류관 내 음의 속도가 존재한 결과이다.

Figure 11의 사진에서 단면상은 4000^{-1}초, 적분된 직접상은 125^{-1}초의 노출시간이며 목측에 의하면 청염의 화염 기저부분은 이중 화염으로 보이게 된다. 이러한 현상을 정밀 분석하고자 ICCD 카메라가 장착된 고속운동 분석기로 각 화염의 적분상과 단면상 그리고 비반응 유동장의 단면상을 위상 동기 촬영을 하여 분석하였다.

Figure 12은 위 세 가지 화염의 위상 동기 적분상을 나타낸다. 각 영상 정보는 2000^{-1}초 노출시간에 2000^{-1}초 간격의 연속상으로 좌측 상단 0° 위상에서 30° 위상 간격으로 배열되어 있다. 연속상에서 알 수 있다시피 거대 와류와 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.

여기서 Figure 12-b인 신장화염의 경우 fat와 in-burning 두 화염에서 볼 수 있는 볼록한 부분(vortex bulge)이 없는 것으로 보아 화염신장이 발생하는 경우에서는 이들 두 화염과 다른 유동 구조로 화염이 형성되고 있음을 알 수 있다.

Figure 13은 Figure 12와 동일한 유동조건과 측정조건에서 Mie 산란광에 의한 분류의 단면가시화 상을 나타내었는데 Figure 12와 마찬가지로 좌측상단이 0°이고 이후 30° 위상간격의 연속상을 보여주고 있다. 단면 연속상에서도 보이는 바 같이 화염이 신장되는 영역을 전후로 하여 와동의 말림방향이 서로 바뀌게 되는 현상을 분명하게 볼 수 있다. 이러한 와동말림의 역전현상은 화염이 존재하질 않는 비반응 유동장에서는 신장화염에 해당되는 유동장인 경우에도 나타나질 않게 되는데, 이는 반응에 의해 형성된 부력에 의해 유



(a) fat flame (b) elongation flame (c) in-burning flame

Figure 12. Phase synchronized instantaneous images; phase increases with 30° from the left-upper corner and time interval between images is 2000^{-1}sec.

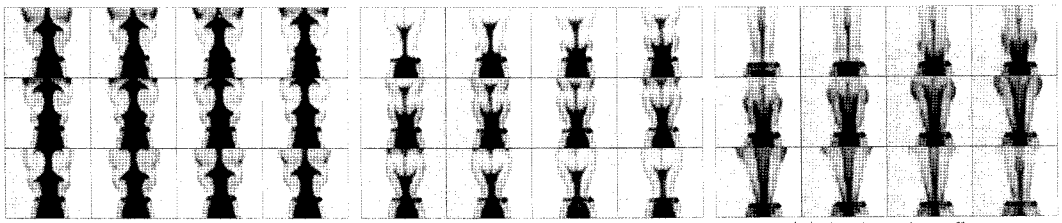


Figure 13. Phase synchronized Mie-scattering images; phase increases with 30° from the left-upper corner and time interval between images is 2000^{-1}sec.

동이 가속화되는 현상과 연관되어 있음을 알 수 있다. 이러하듯 유독 화염이 존재하는 연소장인 경우에서만 와동의 말림 방향이 역전되는 현상의 이유에 대해서는 다음번의 연구결과로 보고하기로 한다.

4. 결 론

층류영역의 분출유량에서 큰 가진강도 효과를 얻기 위해 연료관 관 공명주파수로 가진된 비예혼합 분류화염의 일반적인 가진 연소특성을 실험적으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저 화염 안정화 특성에서는 분출유량 구간에 따라 가진강도와 유동조건에 의해서 부상경로와 부상된 화염형태가 서로 전혀 다른 두 가지 형태의 부상 특성이 존재한다는 사실을 처음으로 발견하였다. 두 형태의 화염은 노즐 출구속도가 증가함에 따라 각각 화염이 부상하는데 요구되는 가진강도 크기에 있어서도 한 쪽은 감소, 다른 쪽은 증가함을 보이고 있어 각각 서로 다른 부상기구가 존재함을 확인할 수 있었다.

부상되지 않고 노즐에 부착된 분출유량 구간에서의 가진 연소특성을 가진강도에 따른 화염 길이와 형상, 가진신호에 의한 화염과 유동장 응답 특성 그리고 노즐 출구에서의 유속 분포를 중심으로 분석되었다.

가진강도 증가에 따른 특성에서는 일반적으로 화염이 단염화 되는 것과 달리 오히려 화염이 길어지게 되는 현상과 분출관 노즐 안에 화염이 빨려 들어와 있는 현상들이 관측되었다. 이러한 현상들은 노즐 출구의 유속분포 분석을 통해 노즐 관 관벽 안쪽서부터 음의 속도가 발생하기 시작함에 따라 주변 산화제(공기)가 노즐 관 안으로 유입되는 현상과 관련되는 것으로 파악되었다.

이처럼 가진강도 증가에 따른 음의 속도 크기 증가는 연료 줄기와 분지 형상뿐만 아니라 와류 말림 방향에도 영향을 주어 화염 내 거대 와동의 말림 방향이 서로 반대로 바뀌는 등 특이한 화염거동 현상들로 나타나는 것으로 이해되었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 교육과학기술부의 지방대학혁신역량강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. L. Vanquickenborne and A. Van Tiggelen, "The Stabilization Mechanism of Lifted Diffusion Flames", Combustion and Flames, Vol.10, pp.59-69(1966).
2. A.J. Yule, "Large Scale Structure in the Mixing Layer of a Round Jet", J. Fluid Mech., Vol.89, pp. 413-432(1978).
3. 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).
4. A.K.M.F. Hussain, "Coherent Structures and Turbulence", J. Fluid Mech., Vol.173, pp.303-356 (1986).
5. Y.C. Chao and M.S. Jeng, "Behavior ot the Lifted Flame under Acoustic Excitation", 24th Sym. on Combustion, pp.333-340(1994).
6. T.K. Kim, J. Park, and H.D. Shin, "Mixing Mechanism Near the Nozzle Exit in a Tone Eecited Nonpremixed Jet Flame", Combustion Science and Technology, Vol.89, pp.83-100(1993).
7. S.K. Oh, "An Experimental Study on the Structure of Forced Jets and Jet Diffusion Flames", Ph. D. Thesis, KAIST(1997).
8. 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).

9. 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).
10. 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).
11. K.M. Lee, "Effects of Flow Excitation on the Nitrogen Oxide Emission of a Nonpremixed Flame", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.18, No.2, pp.34-40(2004).
12. D. Demare and F. Baillot, "Acoustic Enhancement of Combustion in Lifted Nonpremixed Jet Flames, Combustion and Flame, Vol.139, pp.312-328(2004).
13. M. Suzuki, T. Atarahi and W. Masuda, "Behavior and Structure of Internal Fuel-jet in Diffusion Flame under Transverse Acoustic Excitation", Combustion Science and Technology, Vol.179, pp.2581-2597 (2007).