

음향 가진된 층류 비예혼합 분류 화염에서 거대 와류 거동에 관한 가시화 연구

이기만[†] · 오세기^{*} · 박 정^{**}
(2001년 12월 18일 접수, 2003년 1월 26일 심사완료)

A Visual Investigation of Coherent Structure Behaviour Under Tone-Excited Laminar Non-Premixed Jet Flame

Kee-Man Lee, Sai-Kee Oh and Jeong Park

Key Words: Acoustic Excitation(음향가진), Fuel Tube Resonant Frequency(연료 관 공명주파수), Flame Length(화염 길이), Forcing Amplitude(가진 강도), Flame Stability Curve(화염 안정화선도), Fuel Stem(연료줄기), Fuel Branch(연료분지), Vortex Roll-up(와류 말림)

Abstract

A visualization study on the effect of forcing amplitude in tone-excited jet diffusion flames has been conducted. Visualization techniques are employed using optical schemes, which are a light scattering photography. Flame stability curve is attained according to Reynolds number and forcing amplitude at a fuel tube resonant frequency. Flame behavior is globally grouped into two from attached flame to blown-out flame according to forcing amplitude: one sticks the tradition flame behavior which has been observed in general jet diffusion flames and the other shows a variety of flame modes such as the flame of a feeble forcing amplitude where traditionally well-organized vortex motion evolves, a fat flame, an elongated flame, and an in-burning flame. Particular attention is focused on an elongation flame, which is associated with a turnabout phenomenon of vortex motion, and on a reversal of the direction of vortex roll-up. It is found that the flame length with forcing amplitude is the direct outcome of the evolution process of the formed inner flow structure. Especially the negative part of the acoustic cycle under the influence of a strong negative pressure gradient causes the shapes of the fuel stem and fuel branch part and even the direction of vortex roll-up to dramatically change.

1. 서론

분류에서 거대 와류 구조(coherent structure)들은

주기적으로 잘 구조화되어 있으나 분류가 하류로 전개되면서 공간적으로 불규칙한 진동(flickering)이나 떨림(jittering) 등으로 인해 구체적인 이해가 힘들어지게 된다. 그런데 작은 강도로 가진(excitation)을 가하면 거대 와류 구조들이 명확해지고 주기도 정확히 고정되어 와류의 전개에 대한 이해가 용이해져 가진을 분류에 가하여 불규칙한 진동을 감소시키는 방법이 도입되었다.^(1,3~5) 또한 가진은 장치로부터의 불규칙한 진동을 감소시킨다는 소극적인

† 책임지자, 회원, 전남도립담양대학 자동차공학부
E-mail : kmllee@damyang.ac.kr
TEL : (061)380-8601 FAX : (061)380-8604

* (주) LG전자 디지털어플라이언스연구소

** 회원, 순천대학교 기계·자동차공학부

관점 이외에 혼합을 제어하는 능동적인 관점을 갖게 되는데 혼합 제어를 목적으로 가진 주파수와 강도를 조절하여 유동의 발달 과정을 제어하는 연구들이 수행되었다.

화염이 있는 분류 연소장의 많은 연구들은 분류의 선호 모드(preferred mode, 분류 포텐셜 영역의 끝에서 나타나는 유동의 지배적 주파수)로 가진 하였기 때문에 상대적으로 큰 가진 강도를 구현하기가 어려웠으며 분류 화염에서 중요한 혼합을 조절하여 반응장을 제어한다는 측면보다는 분류의 전개를 다소 변화시키는 면이 강하였다. 이러한 기존의 관점과는 달리 Kim⁽⁸⁾은 연료관 관 공명주파수(resonant frequency)로 음파 가진(tone excitation)을 하였더니 층류 분류 화염에서 노즐 출구 근처 화염기저 부분이 난류화 되면서 화염이 현저하게 짧아짐을 보고하였다. 이러한 현상들은 연료 관 출구 바로 안에서 발생하는 유동 박리(separation)에 의한 주기적인 붕괴 혼합(collapsible mixing) 과정으로 유동이 부분 예혼합되면서 난류 유동화 되어 단염화 되는 것으로 분석되었다.

일반적으로 가진된 화염은 가진 주파수, 가진 강도에 의해 변수화 되는데 이처럼 연료관 관 공명 주파수로 가진을 할 경우 분출 관 근처의 혼합중에 영향을 주어 겉보기 난류 혼합이 유도됨으로써 층류 화염에서도 조그마한 가진 강도라도 단염화되는 효과가 있어 손쉽게 반응장을 제어하는 장점이 있다. 그러나 Oh⁽¹¹⁾는 Kim이 수행한 관 공명주파수로 가진을 한 경우라도 가진 강도 증가에 따라서 화염이 부상(lift-off)되어 단염화 되기 전에 오히려 화염이 길어지는 화염신장(flame elongation)이 발생한다고 보고하였으나 이에 대한 구체적인 현상이나 분석을 위한 연구는 진행되질 못하였다.

본 연구는 Kim과 Oh와 같이 층류 분류 화염에서 연료관 관 공명으로 가진 주파수를 선정하여 실험을 수행하였으나 Kim이 고정된 가진 강도에서 화염 부상되어 붕괴혼합에 의한 단염화 현상을 주 대상으로 수행한 것과는 달리 다양한 가진 강도에서 부상되기 전 엄밀한 현상 파악을 위해 분류 내부 구조와 화염간의 상호 작용에 초점을 맞추었다. 또한 넓은 가진 강도와 유동 조건으로 층류 가진 화염의 안정화 특성을 파악하였다.

본 연구에 의하면 같은 층류 화염 영역이라도 가진 조건에 따라 전혀 다른 형태의 화염 부상 특성을 보이는 두 영역으로 나뉘어지고 일부 영역에

서만 이전의 연구⁽¹¹⁾에서 보고된 화염신장 영역이 존재하는 것으로 파악되었는데 이러한 화염 신장 현상이 화염 내 거대 와동들의 회전 방향과 관련되어 발생된다는 사실을 새롭게 알아내었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 버너 및 광학 장치

버너는 축 대칭 비예혼합 화염을 얻기 위해 가운데 파이프 형태의 분류 관이 있고 주위류(co-flowing)가 흐르는 일반적인 동축류 버너로 제작하였다. 분류 관은 외경 10mm, 길이 715mm인 관 한쪽 끝을 내경 5.5mm의 노즐 형태로 가공하였으며 노즐 내로 유입되는 화염 형상을 관찰할 수 있도록 투명한 파이프를 사용하였다. 연료는 상용 프로판(C_3H_8)을 사용하였으며 연료와 공기 유량은 습식 가스미터(wet gas meter)와 포말 유량계(bubble meter)로 교정된 마노메타 눈금 조절로 사용하였다.

화염 안정화를 위한 주위류는 압축 공기로 균일한 속도장 생성을 위해 풍동 상·하부에 축소 및 확대 노즐과 함께 2개의 허니컴과 3장의 화인 매쉬(#100)를 설치하였다. 버너 출구의 축소 노즐은 입구 경 100mm, 출구 경 50mm, 길이 150mm로 축소비는 4이다. 실험은 분류 화염 주위에 1.2m×1.2m×2.5m인 이중 망사 스크린을 사용하여 외부로부터의 교란을 최소화하였다. 음향 진동을 발생시키는 가진 장치는 정현파를 발생시키는 합수 발생기(HP 9400), 증폭기(Inkel AX-5400)와 오

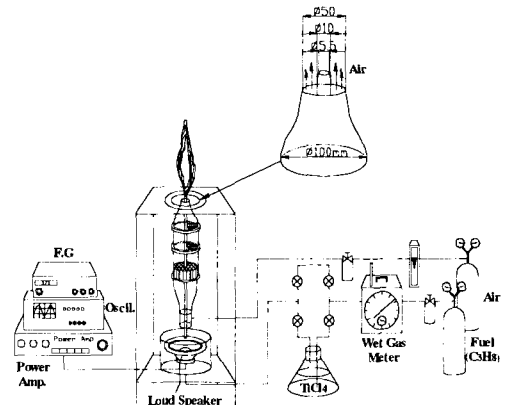


Fig. 1 Schematic of burner and flow system

실로스코프 그리고 내경 200mm, 높이 160mm의 원형 아크릴 통 중앙에 음향 스피커(Sammi co., 6", 100Watt)가 설치된 가진 실로 구성된다. 특히 가진 상태를 정확히 하기 위하여 주파수와 가진 강도 등 가진 입력 값은 오실로스코프로 측정된 값으로 결정하였다.

화염 내 와동 가시화는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 일차적으로 가진에 의한 화염과 와동간의 거시적인 운동은 쉘리렌 상으로 관찰하였으며 보다 명확한 상호 작용은 레이저 연속 광을 응용한 Mic 산란 광 단면 가시화법을 사용하였다. 산란 입자로는 연료인 프로판이 유로 계를 통과하면서 프로판 내에 존재하는 수분과 사염화 티타늄이 반응하여 생성된 TiO_2 고체 입자를 사용하였다. 또한 화염과 와동간의 순간적인 연속상은 ICCD 카메라와 고속운동분석기(Kodak Ekta Pro system)를 사용하여 VCR과 PC의 Image processing을 거쳐 분석하였다.

2.2 실험조건

본 실험에 주로 사용된 유동 조건은 관경 기준 Reynolds 수 720인 완전 발달 층류이며 외부 교란을 방지하기 위한 주위류 공기는 유동장에 영향을 미치지 않도록 0.1m/s의 저속으로 공급하였다. 가진 주파수는 큰 가진 강도 효과를 얻기 위하여 다음과 같은 이론 식으로 계산되는 관 공명주파수 (f_0)인 171Hz로 고정하여 사용하였으며 가진 강도는 함수 발생기에서 발생되어 음향 스피커에 입력되는 정현파의 전압 값 $V_{r, F}$ 를 0 ~ 20 volt로 가변 하였다.

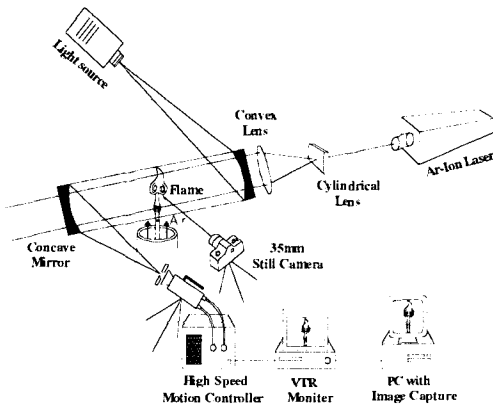


Fig. 2 Schematic of visualization system

$$f_0 = \frac{1}{2} \frac{c}{l + 4d_0/3\pi} \tag{1}$$

여기서 c 는 사용 연료의 음속이며 l 은 분류 관 길이, d_0 는 분류 관의 직경이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염 안정화 선도

Fig. 3은 화염 안정화 특성을 크게 화염 부상(lift-off)과 화염 날림(blow-out) 영역으로 나눈다면 본 실험에서 얻은 관 공명주파수로 가진된 층류 유동 범위에서 가진 강도와 레이놀즈 수를 증가시키에 따라 얻은 화염 안정화선도(flame stability curve)이다.

일반적으로 가진된 분류의 축 방향 속도는 분류 시간 평균 유동장에 음파 가진에 의한 정현파 변동분이 가해지는 형태로 다음과 같이 분할되어 정의된다.

$$u = u_m + u_r(\theta) + u \tag{2}$$

여기서 u 는 가진된 유동의 축 방향 순간 속도, u_m 은 분류의 시간 평균 속도, $u_r(\theta)$ 는 가진에 따른 변동 속도(fluctuating velocity), u 은 난류 변동 속도(phase incoherent fluctuation)를 나타내며 각각의 속도 성분은 위상 평균된 속도를 의미한다.

일반적으로 가진 유동장에서 이들 성분들은 각각 독립적으로 고려되는 분할 성분이다. 따라서 가진 강도 증가에 따른 각 속도 성분의 특징을 살펴보면 노즐 출구 중심에서 시간 평균 속도, u_m 은 강도 증가에 따라 선형적으로 감소하게 되며 변동 속도 분, $u_r(\theta)$ 는 그 크기가 같으나 방향이 정반대인 가속 위상에 의한 양의 속도 성분 $u_r'(\theta)$ 와 감속 위상의 음 속도 성분 $u_r(\theta)$ 로 나뉘어 이들 크기는 가진 강도에 비례하여 선형적으로 증가하는 특징을 갖는다. 또한 난류 변동 속도 분, u 도 가진 강도 증가에 따라 변동 속도 분의 영향으로 증가하나 그 오퍼는 다른 속도 성분에 비해 작은 것으로 알려져 있다.

위 식에서도 알 수 있듯이 가진 강도 증가는 분류의 순간 최대 속도 증가를 의미하므로 가진된

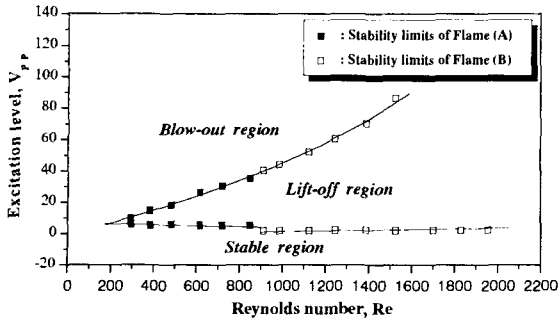


Fig. 3 Flame stability curve according to Reynolds number and forcing amplitude at resonant frequency

축 방향 속도는 비가진 분류보다도 큰 최대 속도 값을 갖음을 알 수 있다.

Fig. 3의 안정화 선도는 변동 속도 분에 비례하는 가진 강도를 입력 전원 값으로 분류 분출 속도 값을 레이놀즈 수로 표시하고 있음을 보여주고 있다. 관찰된 안정화 선도에서 화염 날림 영역인 상부 안정화 영역은 비가진 일반 분류 화염과 유사한 경향을 보이고 있으나 화염 부상이 일어나는 하부 안정화 영역에서는 일반 분류와는 다른 특성을 보이는 것으로 관찰되었다.

화염은 노즐에 부착된 상태에서 가진 강도 증가에 따라 부상 한계로 진행이 되는데 이 때 특정한 레이놀즈 수 값을 경계로 화염이 부상하는 현상이 전혀 다르게 나타나는 부상의 특이성 영역이 존재한다는 사실이다. 즉, 특정 레이놀즈 값 이하 영역에서는 가진 강도 증가와 함께 부상 전 화염 내 연료 분지 상·하부 양쪽의 와동 생성과 주 와류의 말림 방향이 역전(turnabout)과 재 역전이 되는 등 다양한 형태의 거대 와동들을 관찰할 수 있는 영역이 있는가 하면 영역 구분 값에서 유속을 조금만 증가시키면 별도의 천이 현상 없이 일반 분류 화염의 부상과 같이 전혀 다른 형태의 부상 특성을 보이는 영역이 나타난다는 사실이다. 이러한 종류 가진 화염에서 서로 상이한 부상 현상과 영역이 존재한다는 안정화 선도는 아직까지 보고된 바가 없다.

Fig. 4는 Fig. 3의 전체 안정화 선도에서 하부 화염 안정화 영역만을 초점으로 살펴본 화염 부상 선도로 레이놀즈 수와 가진 강도 증가에 따라 두 종류로 나뉘어 존재하는 화염 거동들의 직접 상을 보여주고 있다. 여기서 보여지는 직접 사진들은 조

리계 수 1.4, 노출시간 1/125 초의 촬영 조건으로 얻은 적분된 상(image)들이다.

특징적인 현상은 비교적 큰 가진 강도까지 여러 형태의 화염 거동을 보이다가 부상과 동시에 난류 화염과 같은 형태로 부상하는 영역과 조그마한 가진 강도에서 단순 부상 형태로 부상되는 영역으로 구분되어 짐을 알 수 있다. 이러한 영역 구분은 부상 임계 레이놀즈 값과 가진 강도 값뿐만 아니라 부상 형태 또한 다른 양상을 보이므로 전자 화염을 "A"형 화염으로 후자 화염을 "B"형 화염으로 구분하였다.

Fig. 4 선도에서 "A"형 화염은 검정 색으로 "B"형 화염은 흰색 데이터 값으로 표시되었다. 선도에서도 볼 수 있듯이 "A"형 화염에서는 레이놀즈 값이 증가함에 따라 부상 한계가 일어나는 가진 강도 값이 감소하는 경향을 보이거나 "B"형 화염에서는 레이놀즈 값과 가진 강도가 같이 증가하는 상반된 경향을 보이고 있으며 부상된 화염 형태도 서로 달라 두 영역에서 화염 거동기구가 다르게 작용되고 있음을 알 수 있다.

먼저 "B"형 화염은 약한 가진 강도로 식 (2)의 각 속도 성분에서 축 방향의 주기적인 변동 속도 값 $u_r(\theta)$ 가 분류의 시간 평균 속도 값 u_m 보다 작거나 영향이 상대적으로 미약함을 알 수 있다. 따라서 이 영역의 화염들은 Kim⁽⁸⁾ 등이 보고한 노즐 출구에서 주위 산화제를 노즐 안으로 유입시킬 만큼의 음 압력 속도 구배가 잘 나타나질 않게 되어 붕괴 혼합과 같은 급격한 유동 구조로 재편되지 못함에 따라 극적인 화염 형상 변화 없이 단순 부상하게 된다. 그러나 일반적으로 국부 스트레인이 증가되면 화염이 국부적으로 소화될 수도 있고 종류 분류 화염에서 부상은 노즐 선단의 조그마한 교란으로도 화염 부상이 가능하므로 이 영역에서는 약한 가진 강도에서도 증가된 국부 스트레인의 영향과 함께 가진에 의한 분류 가장 자리의 교란으로 단순 부상되는 것으로 파악된다. 이 영역에서 좀 더 자세한 관찰과 분석은 계속되는 연구 진행으로 추후 보고할 예정이다.

이에 비해 "A" 형태의 화염은 가진 강도의 증가에 따라 미약 가진 화염영역(Mode I), Fat 화염영역(Mode II), 신장 화염영역(Mode III), In-burning 화염영역(Mode IV) 등 4 가지 모드로 거동을 하다가 화염이 부상과 동시에 난류의 단연화 영역으로 부상하는 경우이다. 이러한 형태의 부상 경로는 "B"

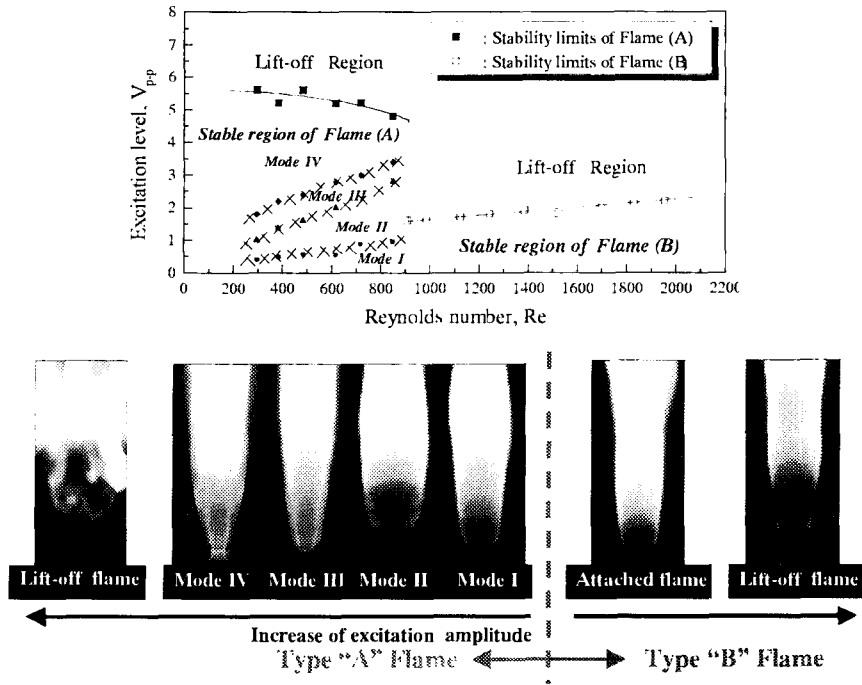


Fig. 4 Flame stability curve and flame modes with forcing amplitude and Reynolds number

형태의 화염에서는 전혀 나타나질 않으며 일부 화염 모드에서는 아직까지 보고되지 않은 특이한 화염 내 거대 와류들의 거동을 보이고 있다.

일반적으로 분류 화염에서 노즐 출구의 경계조건은 분류 혼합에 직접적인 영향을 주어 거시적으로 화염 길이에 변화를 갖게 한다. 따라서 Fig. 4의 "A" 형 화염에서 보여 준 여러 가지 모드의 화염 거동은 노즐 근처에서 이러한 혼합 특성에 현저한 변화가 있음을 보여 주어 이 영역에서의 화염과 거대 와류들의 거동특성에 대해서 집중 조사하게 되었다.

3.2 "A" 형 화염의 길이 및 형상

가진된 분류 화염들은 주로 비가진 된 화염보다 단염화 되는 것으로 알려져 있으나 $Oh^{(11)}$ 는 가진된 화염이라도 부상 전에 오히려 화염 길이가 증가되는 영역이 존재한다는 것을 보고하였다.

Fig. 5는 레이놀즈 값 720인 유동 조건에서 Fig. 4의 "A"형 화염 모드에 해당되는 화염 길이 변화 값을 가진 하질 않은 화염 길이와의 비 값으로 표시하였다. 이 값은 이전 보고자⁽¹¹⁾의 화염 길이 변화와 동일하며 특히 부상되어 단염화 되기 전에 화염이 길어짐

을 다시 한번 확인 할 수 있었다. 그런데 이전의 보고는 이러한 화염 신장 영역이 존재한다는 사실만 발견하였을 뿐 화염 신장과 연관된 어떠한 현상 발견이나 이유에 대해서는 언급하지 못하였다. 본 연구에서는 "A"형 화염 모드에서 보다 면밀한 관찰을 통해 화염 신장에 관련된 현상을 포함하여 새로운 사실들을 발견할 수 있었으며 이에 대한 자세한 설명은 3.4절에서 언급된다.

Fig. 5에서 가진 하질 않은 일반적인 분류 화염은 Anthony⁽¹²⁾ 등이 분석한대로 연소의 고온 생성물로 유도된 부력에 의해 화염이 분류 바깥 부분에서 거동하는 거대 와류 구조에 지배받아 진동하고 있음을 볼 수 있다. 여기에 가진을 가하여 강도를 서서히 증가시키면 처음에는 화염 길이가 약간 증가하다가(Mode I) 다시 감소를 하는데 이때 화염 형상은 노즐 출구에 걸려 있는 화염 기저 부분이 불룩해 지면서 화염 길이가 다소 줄어들게 된다(Mode II). 여기에 가진 강도를 증가시키면 화염 길이는 다시 증가를 하여 신장 화염(elongated flame) 형태로 화염 길이가 최대가 되었다가(Mode III) 가진 강도를 더욱 증가시키면 화염 기저 부분이 노즐 안으로 빨려 들어와 육안으로는 화염이 항상 노즐 안에 존재하는 in-burning flame 형상을

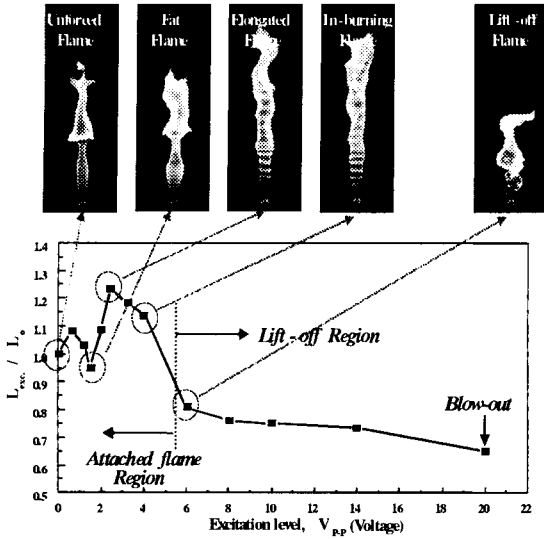


Fig. 5 Correlation of flame length to flame mode according to forcing amplitude

갓게 된다(Mode IV). 이후 가진 강도를 더욱 더 증가시키면 앞서 설명한대로 화염이 부상됨과 동시에 난류 화염처럼 되면서 화염길이가 현저하게 짧아지게 된다.

그런데 흥미로운 현상은 조그마한 가진 강도 값(여기서는 0.6 volt)이라도 분류 내부에 거대 와류 구조가 형성되어 바깥 부분의 와류 구조와는 별도로 거동하고 있으며 가진 강도에 따라 이러한 거동이 화염 길이에 변화를 초래한다는 것이다. 이는 화염 길이가 내부 와동의 생성과 전개에 밀접한 관계가 있음을 암시하고 있다. 또한, Fig. 4의 Mode IV에서 연료 노즐 안에서 화염이 존재하는 in-burning flame 현상은 음파 가진된 분류 화염만의 특징으로 연료 관 안에서 연소가 이루어지고 있음을 의미한다. 이것은 가진 분류 관 안에서 충분히 큰 음의 압력 구배가 존재하게 되며 이렇게 되면 음의 사이클 동안 주위 산화제가 노즐 내부로 빨려 들어와 이미 연료 관 출구부터가 상당히 예혼합 상태로 되어 있음을 보여 주고 있다.

이러한 현상은 이전 연구에서는 관찰되질 않은 새로운 현상으로 Kim 등⁽⁸⁾이 보고한 부상된 상태에서 관찰된 노즐 출구 근처의 붕괴 혼합 기구와 비슷하나 부상 전에 이미 노즐 출구 안에서 화염이 부분 예혼합 상태로 거동을 하고 부상된 상태가 아니므로 붕괴 혼합과는 다른 현상으로 파악된다. 여기에 가진 강도를 더욱 더 증가시키면 가진

강도의 증가는 화염 스트레치 증가를 의미하기 때문에 화염의 국부적인 소멸(extinction)으로 화염이 부상하게 된다.

3.3 모드별 와동 구조와 화염 거동

앞 절에서 나타난 다양한 화염 모드에 따라 거대 와동이 화염 거동에 미치는 영향을 보다 명확히 파악하기 위하여 사염화 티타늄을 이용한 Mic 산란 단면 가시화를 수행하였다.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 유동 조건에서 가진 강도에 따른 내부 거대 와류 구조 변화를 보여 주고 있다. 단면 사진들은 1/4000 노출 시간으로 얻은 직접 사진들로 분석에 의하면 Fig. 4의 모드 II ~ IV처럼 항상 2중 화염으로 보이나 순간 상으로 보면 Fig. 6과 같이 한 개의 화염 구조로 보이게 된다. 가진이 없는 분류의 단면은 원형을 유지하고 있으나 가진 강도가 증가되면서 축 대칭의 와류 말림(vortex roll-up)이 발생하여 주름지게 된다. 각 단면 사진들의 후류 영역에서는 부력에 의한 영향으로 와류들(vortices)이 축 방향으로 스트레칭된 현상들을 볼 수가 있다.

앞서 지적한 바와 같이 아주 약한 가진 강도(0.6volt)에서도 잘 구조화된 내부 거대 와류들이 노즐 출구 근처에서 생성되어 하류로 전개되어 가는 것을 알 수가 있다. 일반적으로 음파의 정현파로 가진된 화염장의 유동 특성은 가진이 없는 일반 분류 화염 장에 가진에 의해 밀고(가속 위상속도) 댕겨지기(감속 위상속도)를 반복하는 변동 유동 장이 더해져 나타나게 된다. 이에 따른 유동 특성은 이전의 연구자들^(8,11)에 의해서 가진 강도가 증가함에 따라 노즐 출구 속도에 음의 속도가 나타나기 시작하며 이 크기는 가진 강도에 비례해서 증가하여 노즐 관 벽에서 노즐 중심으로 이동하는 것으로 알려져 있다.

따라서 화염 내 와동의 생성 구조도 비 가진된 화염과는 다르게 생성될 것으로 예상된다. 즉, 변동속도 영향, 특히 감속 위상속도 분의 영향이 어느 특정 가진 강도 이하에서는 미비하여 내부 유동 구조에 변화가 안 나타나게 되나 음 속도가 나타나게 되는 강도 이상에서는 Fig. 7의 이해도와 같이 댕겨주는 감속 위상에 의한 유동구조가 무시될 수 없어 분류 내부 연료 분지(fuel branch)에 기존의 하부와동(lower vortex)뿐만 아니라 상부에도 당연히 와동이 형성되어야만 할 것이다.

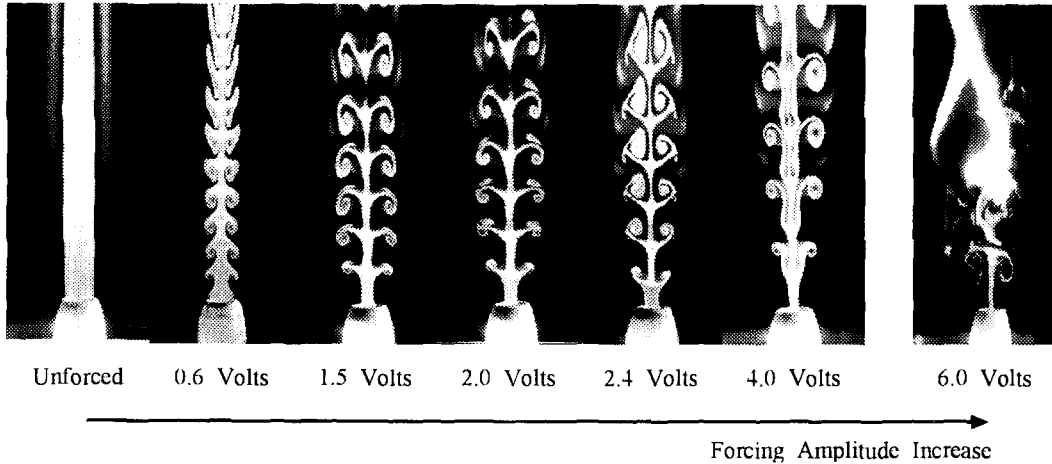


Fig. 6 Inner vortex structure according to forcing amplitude

이와 같은 현상은 Fig. 6에서 보여지는 단면 가시화 사진에서도 잘 나타나 있는데 가진 강도가 미약한 가진 초기(0.6 volt)에는 일반 분류화염과 동일한 하부와동만 형성되나 가진 강도가 증가된 1.5와 2.0 volt에서는 노즐 분출 근처에 연료 분지를 따라 상·하 양쪽으로 와동이 생성됨을 알 수 있다. 또한 이들 와류들은 회전방향이 반대 방향으로 회전하는 볼텍스쌍(counter-rotating vortices pair)으로 상부와 하부와의 회전방향이 각각 반대임을 볼 수 있다. 따라서 가진 사이클에서 음 속도 변동분 영향이 화염 내 거대 와류들 거동에 직접적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

그런데 가진 강도가 증가된 2.4 volt에서는 이러한 상·하부 볼텍스 쌍의 회전방향이 전체적으로 상부 와류가 말리는 방향으로 회전하고 있어 와류 말림 회전방향이 역전(turnabout)되었음을 알 수 있다. 여기서 연료 분지 아래에 약하게나마 하부 와류들이 매달려 있는 구조를 볼 수 있다.

이런 상태에서 가진 강도를 4.0 volt로 좀 더 증가시키면 걸보기 와류들의 말림 방향이 다시 재역전되어 회전하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 와동 회전의 역전과 재역전 현상은 본 연구에서 얻은 가장 팔목할 만한 발견 중의 하나이며 화염이 부상되기 직전까지 나타나게 된다.

화염 부상이 일어나는 가진한계(threshold) 이상으로 가진을 하면 가진 강도 증가와 함께 안정적인 와류들은 진동하기 시작하고 연결되었던 와류들은 서로 분리가 되면서 와류 말림 없이 노즐 출구에서 Kim이 보고한 와동 붕괴에 의한 붕괴 혼합

(collapsible mixing)과 유사한 형태로 화염이 부상하게 된다(6.0 volt). 가진 강도 1.5에서 2.4 volt에서는 연료 줄기와 연료 분지 형상이 십자가와 같은 형상(shape like holy cross)을 하고 있는 것에 비해 가진 강도 4.0 volt에서는 이들이 서로 평행한 구조를 하고 있음을 알 수 있다.

이러한 와류 말림 방향과 연료 줄기의 형상 그리고 반경 방향의 연료 분지들에서 급격한 변화들은 앞서 언급한 바와 같이 변동 속도 분의 영향이 화염 내 거대 와류 거동에 직접적인 영향을 미치고 있는 것으로 가진 사이클에서 가진 강도 증가에 따라 강해지는 음의 압력 구배 영향과 관련되어 다음과 같이 설명될 수 있다.

먼저, 가진 강도가 약한 가진 초기(Fig. 6의 0.6 volt)에는 변동 속도 분의 영향이 미미해 분류의 시간 평균 속도가 가진의 주기적인 변동 속도 분에 비해서 상대적으로 크므로 유동 특성은 일반적인 분류의 특성과 큰 차이를 보이지 않을 것이다. 따라서 연료 분지의 방향은 자연적으로 아래 방향(downward)이 되어 와류 말림이 연료 분지의 아래 부분에서 형성됨을 알 수 있다.

그러나 가진 강도가 증가가 되어 1.5와 2.0 volt로 가진 되는 경우 연료 줄기가 노즐경보다 가늘어져 있어 주변의 산화제가 음의 압력으로 인해 노즐 안으로 빨려 들어와 있음을 알 수 있다. 이는 가진 강도가 증가하여 전반적으로 유동 속도가 증가해졌음을 의미하며 연료 분지가 연료 줄기에 거의 수직으로 되어 감을 알 수 있다.

주변 산화제가 이런 상황에서 와류간으로 유입

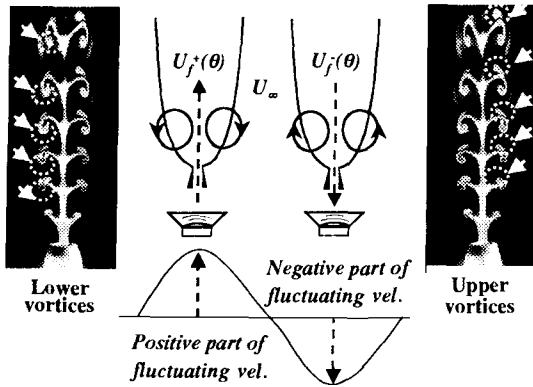


Fig. 7 The direction of vortex roll-up with considering fluctuating velocity only

이 된다고 할 때 유입된 산화제는 와류 말림 작용에 의해 연료 분지의 상·하부간으로 유입이 되는데 아래 방향의 말림 방향은 일반적인 유동 구조이나 위 방향(upward)의 말림 구조는 Fig. 7의 변동 속도 분의 와동 형성 이해도에서 알 수 있는 가진 사이클에서 강한 음의 압력 구배에 의해 빨려지는 유동구조이다. 따라서 왜 연료 분지 위 부분(upper part)에도 와류 말림 구조가 존재하는 가를 이해 할 수가 있게 된다.

가진 강도를 좀더 증가시켜 2.4 volt가 되면 연료 분지 방향이 위 방향을 하고 있으며 연료 줄기도 대단히 좁아져 있음을 볼 수 있다. 이는 비록 유동이 축 방향으로 분출되어 일반 분류와 같이 대류 유동에 의해 아래 방향으로의 와류 말림 작용이 존재하나 그 영향은 상대적으로 미약하며 강해진 가진의 맹김(감속)위상으로 유동이 노즐 안으로 빨리는 상태가 되어 분류가 분출 초기서부터 주 와동 회전방향이 상부 볼텍스의 회전방향으로 역전되어 위 방향으로 향하고 있음을 보여주고 있다. 또한 역전 와동의 크기와 강도가 상당히 증가되었음을 알 수 있으며 회전 중심도 분류 가장자리에서 분류 중심 쪽으로 많이 이동해져 있음을 볼 수 있다.

따라서 이러한 걸보기 주 와류 말림 방향이 주변 산화제 유입에 불리한 방향으로 회전됨에 따라 산화제 유입율이 저하되어 확산화염에서 혼합 능력이 떨어질 때 나타나는 현상처럼 화염이 길어지게 되어 Fig. 5에서 보여지는 화염 신장영역이 이에 해당된다. 결과적으로 와동 회전방향이 역전되는 현상은 가진 강도가 증가함에 따라 충분히 강

해진 가진 사이클의 음의 속도 변동분 때문이며 이는 와류 말림 방향이 가진 사이클에서 가속 위상과 감속 위상 부분의 강도가 분류에 미치는 크기에 따라 결정됨을 의미한다.

그런데 가진 강도를 더욱 증가시키면(Fig. 6의 4.0 volt) 이러한 걸보기 주 와류의 회전방향이 아래 방향으로 향하는 하부 볼텍스의 회전방향으로 재 역전됨을 볼 수 있다. 연료 줄기 폭이 대단히 가늘어져 있고 연료 줄기와 분지간의 간격도 대단히 좁아져 분지의 방향이 거의 연료 줄기에 평행해져 있으며 웨딩하는 와동간의 거리도 길어져 가진 강도 증가에 따라 유동 속도가 상당히 증가해졌음을 알 수 있다. 이 경우 주의해서 관찰해 보면 2.4 volt에서 보여진 걸보기 주 와동의 상부 볼텍스가 연료 분지에 평행하게 존재하나 그 강도가 상당히 약해져 마치 분지에 머징(merging)된 것처럼 보여진다.

이는 가진 강도 증가에 따라 상부 와동의 회전 중심이 거의 분류 중심에 가까워지고 분류 줄기와 분지간의 간격이 좁아짐에 따라 오히려 와동의 회전강도가 약해져 연료 분지에 합체된다. 이렇게 됨으로서 상대적으로 강해진 하부 볼텍스로 걸보기 와류 말림의 주 회전방향이 다시 바뀌는 재 역전 현상이 나타나는데 하부 볼텍스 회전방향은 주변 산화제 유입에 유리한 방향으로 회전하게 되므로 이러한 재 역전 현상으로 화염의 길이가 Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 다소 감소하게 된다.

3.4 화염 신장과 와동 역전 기구

Oh는 이전의 보고에서 분류 화염에서 가진을 가함에도 불구하고 화염 길이가 화염 부상이 일어나기 전에 오히려 증가함을 보고하였으나 현상과 관련된 새로운 정보는 얻을 못하였다. 본 연구에 의하면 앞 절에서도 설명한 바와 같이 화염 내부의 주 와동 회전방향이 바뀌면서 화염이 신장되며 노즐 안으로 화염이 빨려 들어와 있는 in-burning 현상에서 와동 회전이 재 역전됨을 새롭게 알아내었다. 이러한 현상은 Mic 산란 광 단면상인 Fig. 6에서도 확인할 수 있었으나 다음의 Fig. 8에서 보여지는 쉘리렌 상의 적분 상에서도 명확히 보여주고 있다.

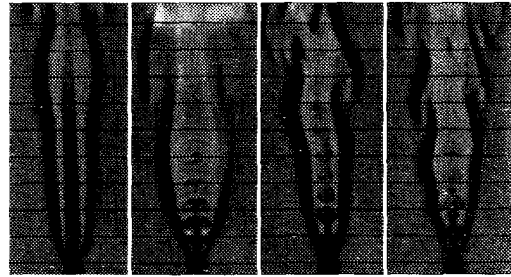
Fig. 8의 적분 상에서도 볼 수 있듯이 화염이 신장하는 영역을 경계로 화염 내 주 와동의 회전 방향이 서로 달라짐을 알 수 있다. 즉, 가진 강도가

증가함에 따라 fat 화염에서 신장 화염으로 바뀌면서 화염 내 와류의 회전방향이 바뀌는 역전 현상을 볼 수 있으며 강도 증가에 따라 in-burning 화염이 되면서 다시 제 역전 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 새롭게 확인된 화염신장과 관련된 길보기 주 와류 회전역의 역전과 제 역전 현상은 본 연구에서 얻은 가장 관측할 만한 발견 중의 하나이다.

여기서도 가진이 없거나 강도가 비교적 약한 불꽃한 화염의 후류에서 무력에 의해 분류 마찰부분에서 거동하는 거대 와류들을 볼 수가 있으나 가진 강도가 증가함에 따라 분류가 분류 초기시부터 거동하는 내부 거대 와류 구조가 화염의 폭과 길이 등 화염 형상에 직접적인 영향을 주고 있는 것을 볼 수가 있다. 이러한 와류의 회전방향 역전 현상은 분류의 시간 평균 속도에 정현파로 가진 되는 변동 속도 분이 가해져 나타나는 특징 중 하나로 가진 강도에 따라 증가되고 감소하는 식(2)에 표시된 각 속도 성분의 분할 특성을 Fig. 9에서 나타낸 와류 역전 기구도로 설명된다.

일반적으로 분류의 와류 형성은 유동간의 속도 차에 의한 전단력으로 발생되는데 음파 가진된 화염장에서 전단력은 가진에 의해 밀고 댕기는 변동 분이 가해져 나타나게 되므로 전단력도 밀 때와 댕길 때로 나뉘어 작용되게 된다. 즉, 연료 분출 방향으로 밀 때의 전단력은 양의 속도 성분만을 갖는 분류의 시간 평균속도 u_m 과 역시 양의 가속 위상을 갖는 변동 속도분 $u_i(\theta)$ 와 주위류 u 와의 속도 차에 비례하여 작용하게 되며 반대로 댕길 때 전단력은 음의 가속 위상을 갖는 변동 속도분 $u_i(\theta)$ 와 주위류 u 와의 속도 차로 발생하게 된다. 그런데 주위류 속도 u 가 일정하다고 가정하면 밀 때의 전단력은 가진의 분할 특성 상 분류 평균 속도 성분과 양의 변동 속도분 간의 속도가 같은 방향으로 마치 동축류 같이 상호 작용하므로 이들 크기의 자가 전단력의 크기로 나타나게 된다.

이에 비해 댕길 때의 전단력은 가속 위상을 갖는 변동 속도분 $u_i(\theta)$ 의 크기로만 결정되게 된다. 여기서 노즐 중심에서 분류의 시간 평균속도 u_m 은 가진 강도 증가에 따라 층류 완전 발달 속도 분포에서 난류 속도 분포화 됨에 따라 감소하게 되고 변동 속도 $u_i(\theta)$ 의 크기는 방향과 상관



(a) unforcing (b) fat (c) elongation (d) in burning
Fig. 8 Inner vortex structure according to flame mode by Schlieren image

없이 선형적으로 비례하게 된다. 이는 밀 때 작용하는 두 속도(u_m 과 $u_i(\theta)$)간의 자인 전단력의 크기가 감소하다가 다시 증가하는 변곡점이 존재함을 의미하며 댕길 때의 속도 차($u_i(\theta)$)는 가진 강도 증가와 함께 선형적으로 커짐을 알 수 있다. 따라서 Fig. 9에 도시한 바와 같이 가진 강도가 미약한 가진 초기의 화염 내 거대 와류 형성은 변동 속도 분의 영향보다는 분류 분출 방향의 속도 성분에 의한 와류 형성으로 길보기 주 유동 회전 방향은 일반 분류화염의 와류 탈립과 동일하게 나타나게 된다.

이 상태에서 가진 강도가 증가하게 되면 분류 평균 속도는 점차 감소하나 변동 속도 분의 크기는 점점 커지게 되는데 분출 방향의 속도 차와 반대 방향의 속도 차 크기가 비슷한 경우에서 화염 내 와류의 형상은 Fig. 6의 가진 강도 2.0 volt에서 전형적으로 볼 수 있듯이 회전 방향이 서로 정반대인 볼텍스 쌍의 형태로 연료 분지 상·하부 양쪽 모두에서 존재하게 된다. 이 경우를 Fig. 9의 와류 역전 기구도에서 보면 cycle time 축 선상에서 좌/우 양측에 나타낸 양의 방향 속도분과 음의 속도분 크기를 나타낸 값들에서 그 크기가 서로 비슷한 각각의 중간 값 경우가 이에 해당되게 된다.

가진 강도가 증가되면 이러한 균형에서 밀 때의 속도 자가 댕길 때의 속도 차 값 보다 작아짐에 따라 길보기 주 와류의 회전 방향이 Fig. 6의 2.4 volt와 Fig. 8의 elongation 적분 상에서와 같이 연료 분지 상·하부 양쪽에서 상부 와류 회전 방향으로 역전되어 설명한 대로 주변 산화제 유입에 불리한 방향이 되므로 화염이 길어지게 되는 것이다. 여기에 가진 강도가 더욱 더 증가하게 되면 댕길 때의 속도 차는 더욱 더 커지거나 앞 절에서 설명한 대로

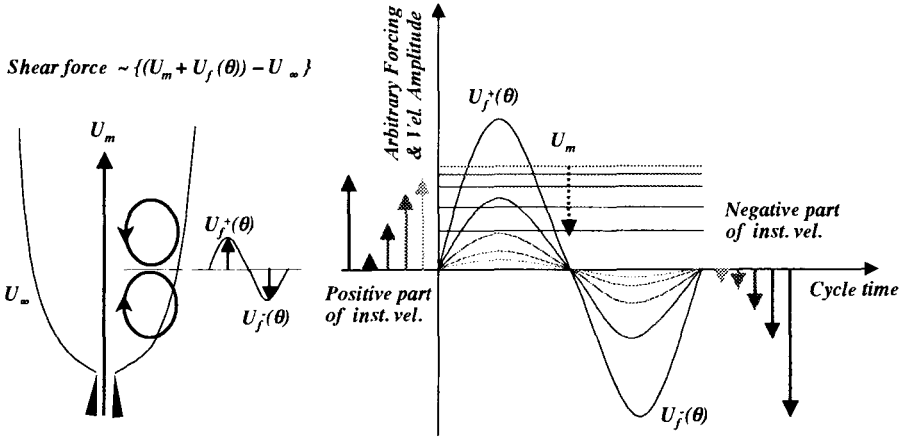


Fig. 9 Schematic showing the mechanism of vortex turnabout phenomenon as forcing amplitude increase

연료 줄기와 분지간의 간격이 너무 좁아져 상부 와동의 회전 중심이 노즐 축 중심 쪽으로 옮겨짐에 따라 오히려 회전 강도는 약해지므로 연료 분지에 머징되게 된다.

따라서 가진 강도 증가로 인해 상대적으로 강해진 하부 와동이 주위 산화제 유입에 유리한 방향으로 걸보기 주 와류 말림 방향이 다시 역전되면서 화염의 길이가 약간 짧아지게 되고 다른 보고⁽¹⁵⁾에서 알 수 있듯이 미연성분인 일산화탄소(CO)의 배출이 화염 신장영역보다 작게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

고정된 관 공명주파수로 가진한 층류 비예혼합 화염에서 가진 크기에 따른 가시화 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 같은 층류 화염 영역에서 가진 강도와 유동 조건에 따라 전혀 다른 화염 부상 경로와 형태를 갖는 두 가지 영역이 존재한다는 사실을 화염 안정화 선도와 함께 처음으로 제시하였다.
- (2) 가진 강도와 레이놀즈 수에 따라 일부 영역에서 가진에 의해 잘 구조화된 내부 와동들의 전개로 feeble forcing flame과 fat flame, elongated flame 그리고 in-burning flame 등과 같은 다양한 화염 거동을 보였으며 이전 연구의 화염 신장 영역 존재를 다시 한번 확인할 수 있었다.
- (3) 가진 강도에 따른 내부 와동 구조의 변화는 분류 혼합에 직접적인 영향을 주어 거시적으로 화

염 길이에 변화를 갖게 한다. 가진 사이클 음의 부분은 연료 줄기와 분지 형상뿐만 아니라 와류 말림 방향에도 영향을 주어 화염 내 와동의 회전 방향을 극적으로 바뀌게 해 준다는 새로운 사실을 발견하였다. 이러한 현상은 가진 사이클에서 강해진 음 압력 구배에 의한 와동의 역회전 현상으로 화염 내 걸보기 주 와류 말림 방향이 주변 산화제 유입에 불리한 회전 방향으로 바뀔 때 따라 화염 신장 영역이 나타나는 것으로 분석되었다.

후 기

“이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단 신진교수 사업 연구비(KRF-99-E00020-E1103)에 의하여 지원되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.”

참고문헌

- (1) Yule A. J., 1978, "Large-Scale Structure in the Mixing Layer of a Round Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 89, pp. 413~432.
- (2) Anthony W. S. and Brian J. C., 1985, "Visualization of the Structure of a Pulsed Methane-Air Diffusion Flame," *Phys. Fluids*, Vol. 28, No. 8, pp. 2317~2330.
- (3) Hussain A.K.M.F., 1986, "Coherent Structures and Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 173, pp. 303~356.
- (4) Vermeulen P. J., Ramesh V. and Yu W. K., 1986.

- "Measurements of Entrainment by Acoustically Pulsed Axisymmetric Air Jets." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 108, pp. 479~484.
- (5) Pearson L. G., Gabelli A., Shepherd I. G. and Hamilton N. B., 1989, "Structures in Diffusion Flames - An Acoustic Viewpoint." *Joint International Conference Australia New Zealand and Japanese Section of The Combustion Institute*, University of Sydney, Sydney, pp. 24~27.
- (6) Gutmark E., Parr T. P., Hanson-Parr D. M. and Schadow K. C., 1989a, "Planar Imaging of Vortex Dynamics in Flames." *J. Heat Transfer*, Vol. 111, Feb., pp. 148~155.
- (7) K.R. McManus, T. Poinsot and S.M.Candel, 1993, "A Review of Active Control of Combustion Instabilities." *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 19, pp. 1~29.
- (8) Kim T. K., Park J. and Shin H. D., 1993, "Mixing Mechanism Near the Nozzle Exit in a Tone Excited Non-Premixed Jet Flame." *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 89, pp. 83~100.
- (9) Charon O., Jouvaud D. and Genies B., 1993, "Pulsated O₂/Fuel Flame as a New Technique for Low No_x Emission." *Combustion Science and Technology*, Vol. 93, pp. 211~222.
- (10) Chao, Y.C. and Jeng, M.S., 1994, "Behavior of the Lifted Flame Under Acoustic Excitation." *24th Sym.(Int.) on Combustion*, pp. 333~340.
- (11) 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.
- (12) Yasir M. Al-Abdeli and Assaad R. Masri, 1999, "Laminar Flame Characteristics Under Acoustic Excitation." *The Second Asia-Pacific Conference on Combustion*, Taiwan, pp. 214~217.
- (13) Sai Kee Oh, 1997, "An Experimental Study on the Structure of Forced Jets and Jet Diffusion Flame s." Ph. D. Thesis, KAIST, Taejeon.
- (14) Kee Man Lee and Sai Kee Oh, 2001, "A Visual Investigation of Non-premixed Flame Behavior under Acoustic Excitation." *'01 Spring Annual Conference, KSAE*, pp. 871~877.
- (15) Kee Man Lee, Jeong Park and Han Chang Cho, 2001, "Effects of Acoustic Excitation on the Combustion Emission Characteristics of a Non-premixed Flame." *'01 Spring Annual Conference, KSAE*, pp. 878~884.