

〈논 문〉

동축류 확산화염의 불안정성과 제어에 관한 실험적 연구

이현호* · 황준영* · 이원남** · 정석호***

(1996년 7월 25일 접수)

An Experimental Study on Instability and Control of Co-Flow Diffusion Flames

H.H. Lee, J.Y. Hwang, W. Lee and S.H. Chung

Key Words : Diffusion Flame(확산화염), Flame Instability(화염 불안정성), Flame Control(화염 제어), Natural Oscillation(고유진동), Buoyancy Driven Vortex(부력에 의한 와동), Excitation Driven Vortex(가진에 의한 와동)

Abstract

Flame oscillation phenomena in a co-flow diffusion flame was experimentally studied with periodic fuel supply using a solenoid valve. The degree of excitation was controlled by changing the volume flux of fuel passing through the valve. Flame oscillation frequencies were measured utilizing a photodiode, a spectrum analyzer, video and high speed movies. Laser planar visualization was employed to study the correlation between the flame oscillation and the toroidal vortices. Observed are three regimes of flame oscillation, where the oscillation frequencies are for the multiples of excitation, the excitation itself and the flame natural oscillation. Both periods of natural oscillation and of excitation induced oscillation exist over one cycle of the excitation in the frequency multiplied regime. It is considered as an effect of balancing the influence of buoyancy driven vortex with that of excitation induced vortex near the excitation rate of 0.2. Flame shapes are become monotonous as increasing the excitation frequency to the range of over two fold of the natural oscillation. The flame oscillation can be modulated to the frequency of either multiples of excitation or excitation itself under certain conditions. This implies that the flame oscillation could be modulated to avoid the resonance frequency of the combustor, and shows the possibility of active control of the flame oscillation.

기 호 설 명

V_F : 연료속도 (cm/s)	T_n : 고유진동 주기 (ms)
V_{air} : 동축류 공기속도 (cm/s)	T_s : 가진 주기 (ms)
f_f : 화염의 진동 주파수 (Hz)	그리스문자
f_n : 고유진동 주파수 (Hz)	ζ : 가진율
f_s : 가진 주파수 (Hz)	

하첨자

air : 동축류 공기
F : 연료

*서울대학교 대학원
 **단국대학교 기계공학과
 ***서울대학교 기계공학과

f	: 화염
n	: 고유진동
s	: 가진

I. 서 론

화산화염의 경우 특정유속조건에서 연료가 연속적으로 공급되어도 화염의 형태가 주기적으로 변동하는 화염진동(flame oscillation) 현상이 발생한다. 화염의 모양에 따라 이 현상을 화염명멸(flame flicker), 화염너울림(flame flare), 혹은 화염맥동(flame pulsation) 등으로 지칭하기도 한다.⁽¹⁾ 그러나, 대체로 명확한 구분 없이 혼용되고 있으며, 여기에서는 화염진동이라고 칭하기로 한다. 화염진동현상은 연소기내에서 주기적인 압력파나 와동의 생성 등에 의해 발생하며 기존의 연구는 크게 두 가지 방향으로 진행되어 왔다. 하나는 입력파와 연소시스템 고유진동 주파수의 공진에 따른 연소기 손상 및 파손을 방지하기 위해서 화염을 능동제어하려는 관점이고,^(2,3) 다른 하나는 화염과 와동의 상호작용 메커니즘을 규명하려는 노력이다.^(1,4-15) 본 연구에서는 제트화산화염을 대상으로 가진에 따른 화염진동특성을 파악하여 화염을 능동제어하기 위한 기초지식을 얻고자 한다.

제트화산화염은 상용 연소기에 널리 적용되고 해석이 비교적 용이하여 화염과 와동의 상호작용에 관한 연구에 자주 이용되어 왔다. 이 경우 화염의 진동은 연료유량이나 종류, 노즐의 크기에 거의 무관한 특성을 보이므로 고유진동(natural oscillation)이라고 부른다.^(1,4) 고유진동 주파수는 대개 10~20 Hz 범위이며⁽¹⁾ 버너직경의 제곱근에 반비례한다고 보고되어 있다.⁽⁶⁾ Peters와 Buckmaster⁽⁴⁾는 무한한 평면 화산화염을 모델링하여 상사해를 얻었으며 선형안정성 이론을 적용하여 17 Hz의 고유진동 주파수를 구했다. 그들은 Kelvin-Helmholtz 형태의 불안정성과 부력이 화염진동현상을 일으키는 원인임을 이론적으로 규명하였으며 고유진동 주파수가 Prandtl수만의 함수임을 보였다. 수치해석적 연구에서도 중력항이 화염진동현상을 모사하는데 필수적이므로⁽⁷⁾ 제트화산화염에서의 화염진동현상은 부력과 Kelvin-Helmholtz 형태의 불안정성이 원인이 되어 발생하는 것으로 볼 수 있다. 그리고 부력에 의해 주기적으로 발생하는 와동은 거의 일정한 속도로 대류되면서 화염에 영향을 주

므로 화염은 고유한 진동 주파수를 갖게 된다고 알려져 있다.⁽¹⁾

부력에 의한 와동의 성장과 발달은 반응성물질을 사용한 Mie 산란법으로 유동장을 가시화하면 비교적 상세히 살펴볼 수 있다.⁽¹⁶⁻¹⁹⁾ Chen 등⁽¹⁸⁾은 위상고정기법의 유동장 가시화를 이용하여 화염 외부에 형성된 와동이 화염과 상호작용하는 것을 관찰하고 수치해석의 결과와 비교하였으며, 부력과 Kelvin-Helmholtz 형태의 불안정성이 화염진동의 주요 원인임을 보여주었다. 그 밖에도 Yuan과 Durox⁽¹⁰⁾는 헬륨제트의 진동현상에서 화염진동과 유사한 구조가 나타나는 것을 관찰하여 부력과 Kelvin-Helmholtz 형태의 불안정성이 중요한 원인이 됨을 확인하였다.

화염진동을 능동제어하기 위해서는 연료의 공급에 가진하는 방법이 이용된다. 가진을 주면 화염진동현상이 증폭 혹은 감쇠되므로⁽¹¹⁻¹³⁾ 응용적인 관점에서 최근에 관심이 제고되고 있다.^(2,3,14) 가진을 주는 방법으로는 스피커를 이용한 음향가진(acoustic excitation)이 널리 이용되어 왔으며,^(11-13,15) 플레퍼밸브나 노즐플러그를 이용하여 유량을 단속하는 방법도 연구되어 왔다.^(2,3) 음향가진 방법은 연료공급계통에 스피커가 장착될 공간이 필요하고 가진강도의 조절범위가 작은 단점이 있다. 반면에 솔레노이드밸브는 장착공간이 유로 중에 위치하므로 소형이고^(20,21) 가진강도가 크다는 장점이 있으며, 유량의 일부분만 밸브를 통과시키면 가진강도의 조절이 가능하다. 따라서 본 실험에서는 솔레노이드밸브를 사용하여 유동에 가진을 주었으며, 가진강도와 가진진동 주파수에 따른 화염의 진동 주파수 특성변화를 측정하고, 비디오 분석 및 유동장 가시화를 이용하여 가진과 화염 진동 특성의 관계를 알아보았다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치는 동축류 버너, 연료가진 시스템, 계측 및 유동장 가시화 시스템 등으로 구성되어 있으며 그 개략도는 Fig. 1과 같다. 축대칭의 층류화산화염을 얻기 위해서는 일반적으로 널리 사용되는 형태의 동축류 버너를 사용하였으며, 그 구조는 Fig. 2에서 보여주고 있다. 연료는 중심부에 위치한 내경 10.6 mm, 외경 12.7 mm, 길이 180 mm인 노즐을 통하여 공급되고, 내경 101.0 mm의 외측 관을

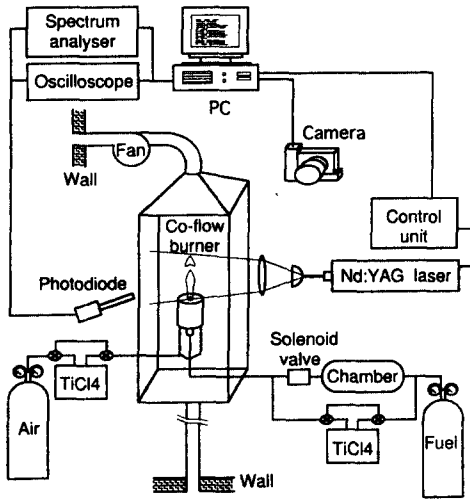


Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

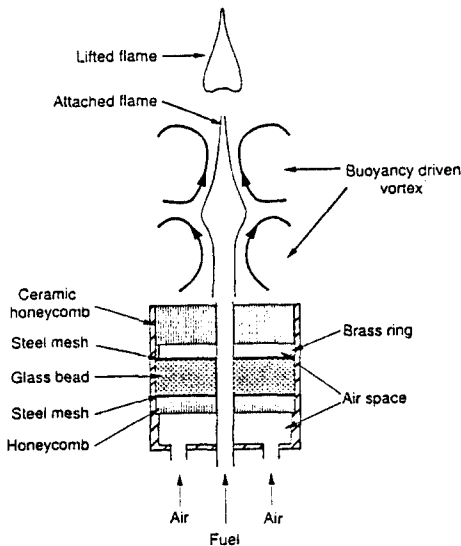


Fig. 2 Details of the co-flow burner.

통하여 공기가 분사되어 외부공기의 섭동을 방지하였다. 공급되는 공기는 직경 3mm의 유리구슬, 하니콤 및 스크린을 통과하여 층류를 형성하게 된다.

연료로는 C. P. 등급의 프로판(C₃H₈)을 사용하였으며 솔레노이드밸브로 단속하는 양을 조절하기 위해 유로를 둘로 분리하여 공급하였다. 하나의 유로에는 솔레노이드밸브를 두어 유량을 단속하였으며 다른 하나에는 필요에 따라 유동장 가시화를 위한 TiCl₄를 공급할 수 있도록 하였다. 압축공기에는 수분이 다량 함유되어 있으므로 가시화 실험에는

상용압축공기와 흡습제 실리카겔을 사용하여 건조한 공기가 공급되도록 하였으며, 공기 라인에서 TiCl₄가 수분과 반응하여 TiO₂를 형성하지 못하도록 하였다. 연료와 공기의 유량 조절을 위해 습식 가스미터(wet-test gas meter)와 버블 유량계(bubble flow meter)로 교정된 로터미터를 사용하였다. 연료 라인에는 체적 1 리터의 챔버를 솔레노이드밸브와 로터미터 사이에 설치하여 밸브 작동시 로터미터에 대한 압력과의 영향을 최소화하고, 가진에 관계 없이 연료유량이 일정하게 유지되도록 하였다. 솔레노이드밸브는 직류 24 V로 구동되는 소형 2/2 way 밸브(FESTO)로 응답 시간은 약 10 ms이며 함수 발생기의 사각파 신호에 따라 구동되도록 하였다.

화염의 진동 주파수는 일정한 높이에서 광다이오드로 얻어진 화염 밝기 변화 신호를 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer, HP 3561A)를 이용하여 측정하였다. 광다이오드 전면에는 내경 8 mm, 길이 115 mm의 금속관을 부착하여 입체각을 제한하였으며, 화염 밝기가 가장 많이 변하는 화염 중앙부에서 신호 변화를 측정하였다. 이 실험에서는 화염 진동의 검출에 일반적으로 사용되는^(15,18) 기법인 화염의 중심부를 통과하는 He-Ne 레이저의 광굴절을 이용하는 방법도 시도되었다. 두 가지 방법을 모두 사용하여 측정된 신호를 분석한 결과 직접 화염의 신호 특성이 더 우수하였다. 이는 본 실험에서는 화염의 폭이 가진 주파수에 따라 변하기 때문에 생각되며, 따라서 레이저의 광굴절을 이용하는 방법은 적절하지 않았다. 스펙트럼 분석기로 구한 값의 정확도를 판명하기 위하여 고속도 카메라(Hitachi 16 HM)를 이용하여 초당 500 장의 속도로 촬영된 고속사진과 비교검토한 결과 그 타당성을 검증할 수 있었다.

화염과 와동의 발달을 살펴보기 위해서 Nd:YAG 레이저와 35 mm 카메라를 이용하여 유동장을 가시화 하였다. 주파수가 배가된 532 nm의 Nd:YAG 레이저광은 원통형 렌즈와 구형 렌즈를 통하여 화염 지역에서 평면광을 형성하고, 화염 부근에서 생성된 TiO₂에 의한 레이저 산란광은 532 nm 파장의 필터를 통하여 평면광의 직각 방향에서 35 mm 카메라로 촬영되었다. 광다이오드에서 발생한 신호를 이용하여 화염의 주기와 동일한 5 V의 사각파 동기 신호를 만들었다. 이 동기 신호는 화염의 동일한 위상에서 형성되므로 시간지연장치를 통

하여 레이저의 트리거 신호로 사용되었으며, 지연되는 시간을 조절하여 가시화된 화염의 위상을 변화시킬 수 있었다. 이러한 위상 고정기법(phase-locking method)은 고속사진과의 비교하여 타당성을 확인하였으며, 화염의 비디오 사진 분석에도 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

진동하지 않는 안정된 화염을 가진다면 화염은 단지 가진 진동 주파수 f_s 와 일치되는 진동을 보이게 된다. 따라서, 화염의 불안정성 제어에 대한 메커니즘을 알아보기 위해서 고유진동이 있는 화염의 연료 속도를 부분적인 단속으로 가진하며 화염의 진동 특성을 알아보았다. 가진에 의한 화염진동특성 변화는 그 화염의 고유진동특성과 밀접한 관련이 있으므로, 본 연구에서는 화염의 고유진동특성을 함께 살펴보았다.

3.1 화염의 고유진동 특성

Fig. 3은 일정한 동축류 공기 속도 V_{air} 에서 프로판의 평균 노즐출구속도 V_F 의 증가에 따른 화염 고유진동 주파수 f_n 의 변화를 보여준다. 층류화염은 연료 속도 V_F 의 증가에 따라 진동하기 시작하며, 이때 화염의 고유진동 주파수는 V_{air} 에 거의 무관하게 $V_F \approx 4$ cm/s에서 시작되어 대체로 일정한 값으로 유지되다가 $V_F \approx 5$ cm/s 이상에서 급격히 감소하였다.

진동 초기와 천이후의 화염은 고유진동 주파수뿐만 아니라 진동형태 또한 다르게 된다. 진동이 시

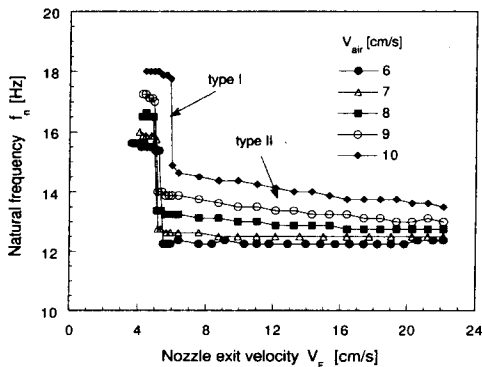


Fig. 3 Natural frequencies of the co-flow flame as a function of fuel nozzle exit velocity.

작되는 초기에는 화염의 선단만 잘려나가는 화염진동형태를 보이지만, 천이후에는 화염 중간면이 수평방향으로 볼록해지는 벌지(flame bulge : FB)가 형성되면서 화염이 진동하게 된다. 진동 초기와 천이후의 화염진동은 고유진동 주파수뿐만 아니라 진동형태 또한 다른 양상을 보이므로, 초기에 발생하는 진동을 type I, 천이후의 진동을 type II로 구분하였다. 각 유형의 진동이 발생하는 영역 내에서는 f_n 이 V_F 에 따라 크게 변하지 않았으며, 측정된 화염의 f_n 은 11~18 Hz로 Buckmaster와 Peters⁽⁴⁾의 이론적 예측치와 유사함을 보여주었다. Fig. 3은 또한 V_{air} 에 따라 f_n 이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 화염의 고유진동 주파수 f_n 은 부력에 의한 환형와동(buoyancy-driven toroidal vortex : BTV)과 FB의 상호작용으로 설명될 수 있으며,^(8,11) 이때 V_{air} 의 증가는 BTV의 대류 속도를 변화시키고 따라서 f_n 이 증가된다고 생각된다.

가진 없이 고유진동이 발생하는 대부분의 확산화

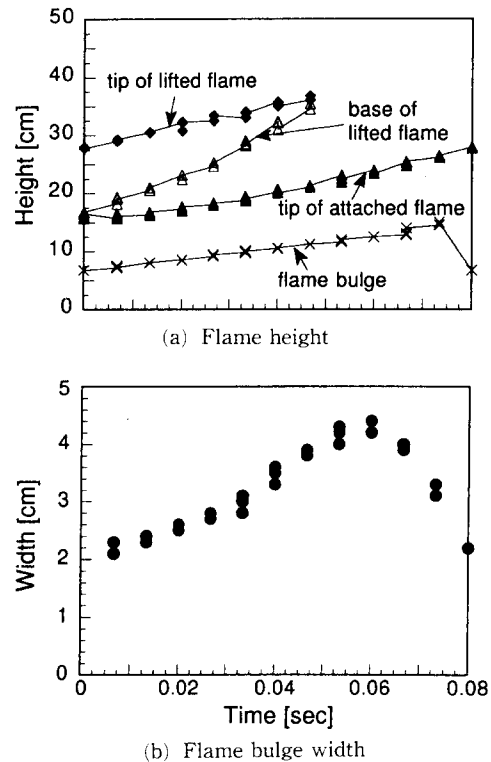


Fig. 4 Time histories of Flame height and flame bulge width for the naturally oscillating flame. ($V_F=10$ cm/s, $V_{air}=7$ cm/s, $f_n=12.5$ Hz)

염은 FB가 형성되는 type II 형태의 진동을 보이고 있으므로, type II 화염에서 화염 높이 및 벌지 크기가 시간에 따라 변화하는 것을 살펴보았다. Fig. 4는 $V_F=10$ cm/s, $V_{air}=8$ cm/s의 조건에서 진동하는 화염 높이 및 벌지 크기의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 화염의 길이 및 FB 높이의 변화를 보면 중심부에서 FB의 발달은 규칙적이고 거의 직선적으로 변화하며, FB 폭이 시간에 따라 성장하는 것을 알 수 있다. 이 경우 화염이 두 개로 분리되어 날림이 일어나기 전까지는 FB 최대 폭을 측정하였으며, 날림이 일어난 후에는 부착화염의 FB 최대 폭을 측정하였다. 화염진동은 현상

적으로 FB가 생성되어 화염이 분리되는 과정이 반복적으로 나타나는 것이므로, 이후로는 FB의 중심부만을 대상으로 화염의 진동특성을 측정하였다.

화염진동에 대한 BTV와 FB의 상호작용을 이해하기 위하여 유동장 가시화를 이용하여 화염 주위에서의 와동구조를 살펴보았다. 유동장 가시화에는 $TiCl_4$ 와 레이저 평면광을 이용한 반응성 광산란법을 사용하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 위상 고정 기법을 사용하여 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 의 위상에서 가시화된 화염의 유동장으로 고유진동하는 화염과 와동의 발달을 보이고 있다. 화염의 중심축으로부터 화염 반경방향으로, 화염면 및 내부에 생성된 매연(화염

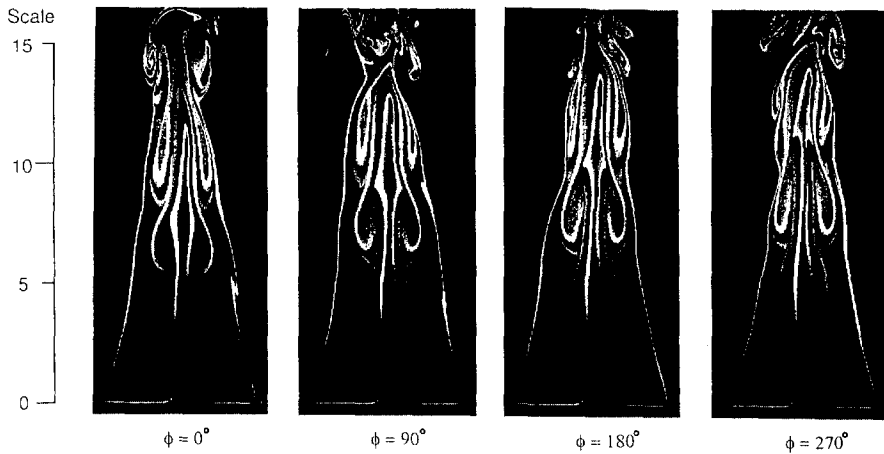


Fig. 5 Flow visualization of the naturally oscillating flame of type I. ($V_F=4.8$ cm/s, $V_{air}=7$ cm/s, $f_n=15.5$ Hz)

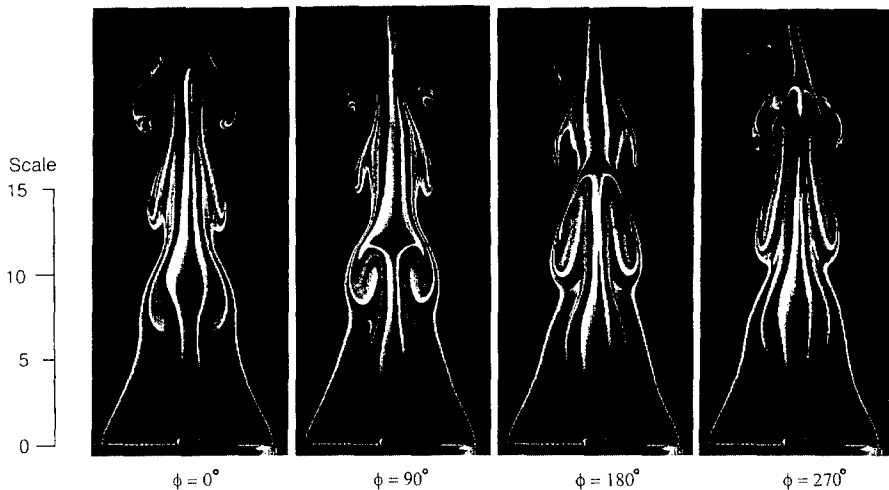


Fig. 6 Flow visualization of the naturally oscillating flame of type II. ($V_F=10$ cm/s, $V_{air}=6$ cm/s, $f_n=12$ Hz)

의 구조를 나타냄), 화염면에서 발생한 H_2O 가 공기로 확산되며 $TiCl_4$ 와 반응하여 생성된 TiO_2 , 외부의 수분과 반응하여 발생한 TiO_2 의 유동을 볼 수 있으며, 화염외부에 와동이 생성되어 있음을 알 수 있다. 화염면 부근에서는 고온으로 TiO_2 의 수 밀도가 낮아져서 화염과 와동이 구분되며, 와동이 선회합에 따라 TiO_2 입자들이 와동 전체의 형상을 보여주고 있다. 이 가시화 결과로부터 type I 과 type II 화염의 고유진동 주파수와 진동 형태에 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 5의 type I 화염진동에서는 와동(BTV)이 화염상부에 형성되어 화염선단을 분리하여 화염진동을 초래하는 것을 볼 수 있다. 이때 BTV는 부력경계층에서 Kelvin-Helmholtz 형태의 불안정성에 의해 발생하는 것으로, 부력경계층이 발달한 일정 높이 이상에서 형성된다. 화염의 길이가 와동의 생성한계 이상이 되면 와동이 화염선단에 영향을 주어 화염이 주기적으로 분리되는 현상이 발생한다. 이 경우에는 BTV에 의한 FB가 생성되지 않는다. V_F 가 증가됨에 따라 화염이 길어져 BTV에 의해 FB가 생성되며 화염과 와동이 상호작용을 하게 된다.^(8,11) 화염의 목(flame neck; FN) 부분의 와동은 화염을 수평 방향으로 늘어나게 하고, FB 상부의 와동은 화염을 중심축 방향으로 견인하여 FB가 형성되는 것으로 이해할 수 있다. Fig. 6은 FB가 형성된 type II의 경우로 큰 BTV가 형성되고 있으며, 이때 BTV와 화염의 상호작용이 type I 과 다르게 된다. Type II에서는 BTV가 FB로부터 지속적으로 열을 공급받아 성장하고 화염에 의해 일종의 저항을 받아 새로운 BTV의 성장을 지연시키므로, 화염의 주기가 길어져 type I에 비해 낮은 진동 주파수를 갖게된다고 생각된다.

3.2 가진에 따른 화염의 진동특성

기초 실험결과, 화염의 진동 주파수 f_f 가 연료 라인의 가진 듀티비 변화에 크게 영향을 받지 않았으므로, 듀티비를 50%로 일정하게 유지하며 화염의 진동특성을 알아보았다. 가진강도를 조절하기 위해서 총공급유량 중 일부를 솔레노이드밸브로 단속하였고, 이때 총 공급유량에 대한 가진 유량비를 가진율 ζ 로 정의하였다. 화염진동특성은 $\zeta=0.2$ 부근에서 가장 복잡한 양상을 보이며 ζ 의 증가에 따라 점차 단순해지는 경향을 보여 주었다.

가진에 따른 화염진동은 크게 3 영역으로 구분될

수 있다. Fig. 7은 $V_F=10$ cm/s, $V_{air}=7$ cm/s 및 $\zeta=0.2$ 인 조건에서, 가진진동 주파수 f_s 와 화염진동 주파수 f_f 의 관계에 따른 3영역을 보여주고 있다. f_s 가 작은 경우 f_f 는 f_s 의 배수가 되거나 f_n 이 되는 복잡한 특성이 나타나고(영역 I), f_s 가 증가하면 $f_f=f_s$ 로 되며(영역 II), f_s 가 더 증가하면 f_s 값과는 무관하게 $f_f=f_n$ 이 되는 것(영역 III)을 알 수 있다. Fig. 8은 $V_F=10$ cm/s, $V_{air}=7$ cm/s의 조건에서, 가진율 ζ 와 화염 진동 주파수 f_f 의 관계를 보여주고 있다. 가진율의 증가에 따라 화염 진동이 가진 주파수를 따르는 “영역 II”가 넓어지고 가진 주파수의 배수가 되는 “영역 I”이 축소되어, 가진의 직접적인 영향이 커지는 것을 알 수 있다.

주기적인 연료공급은 연료 노즐 출구 부위의 화염면을 반경 방향으로 반복적으로 팽창수축시키며, 이에 따라 부력경계층에서 주기적인 excitation driven vortex (EDV)가 발생하게 된다. 발생된

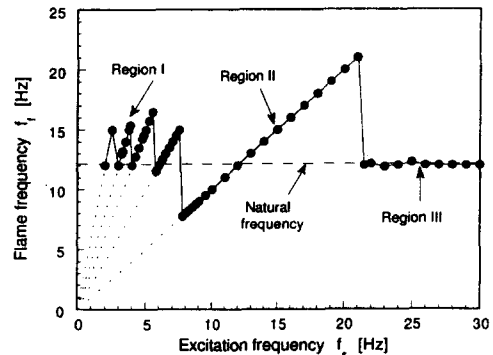


Fig. 7 Flame oscillation frequency as a function of the excitation frequency. ($V_F=10$ cm/s, $V_{air}=7$ cm/s, $\zeta=0.2$, $f_n=12.5$ Hz)

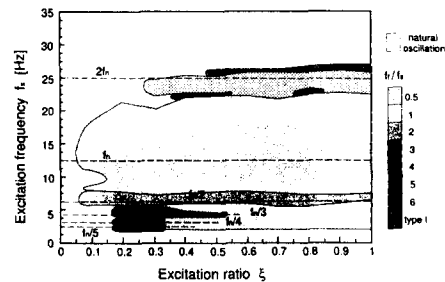


Fig. 8 Flame oscillation characteristics for various excitation ratio and excitation frequency f_s . ($V_F=10$ cm/s, $V_{air}=7$ cm/s, $f_n=12.5$ Hz)

EDV는 화염의 조건에 따라 계속하여 발달하거나 또는 소멸되어, 결과적으로 가진에 따른 다양한 화염진동특성을 보여주게 된다. 가진율의 증가는 발생되는 EDV가 계속하여 발달되는 것을 돕게 되고, 따라서 화염진동이 가진 주파수를 따르는 영역이 확장되는 것으로 생각된다. 또한 EDV/BTV의 생성과 대류속도는 화염의 진동 주파수에도 영향을 주게 된다. Fig. 9에서 V_{air} 가 10 cm/s로 변할 때, V_{air} 가 7cm/s인 Fig. 8과 비교하면, f_n 뿐만 아니라 f_f 특성도 달라진 것을 알 수 있다.

3.2.1 화염진동 주파수 배가 현상

Fig. 7은 “영역 1”에서 $f_f = m f_n$ ($m=2,3,4,5$) 이 존재하고 각각의 m 영역 사이에 f_n 이 나타나는, 진동 주파수 배가 현상을 보여주고 있다. 진동 주파수 배가 현상을 알아보기 위하여 화염의 비디오 및 고속 사진을 분석하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 가진에 따라 진동 주파수가 2 배 및 3 배가된 화염 ($V_F=10$ cm/s, $V_{air}=7$ cm/s, $\zeta=0.2$, $f_n=12.5$ Hz) 의 FB 높이 및 폭의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 10으로부터 $f_f=2f_n$ 가 되는 가진 영역에서는 가진 주기내에서 FB가 2번 생성되고 있음을 알 수 있다. 그림에서 5.75, 6.5, 7.25 Hz로 가진할 경우 가진주기는 각각 174, 154, 138 ms이며, 이는 고유진동 주기인 80 ms의 두 배와 근접된 값을 보이고 있다. 이처럼 고유진동 주기의 2배수와 근접된 주기로 가진하게 되면 가진의 영향으로 노즐출구 부분에 FB가 형성되고 EDV가 성장하게 된다. 이때 EDV에 의한 화염진동은 가진에 종속되므로 밸브가 열린시점부터 시작되는 것으로 생각할 수 있다. 가진주기는 고유진동 주기의 약 2 배가 되므로 생성된 EDV가 부력에 의해 대류된 후, 이차적으

로 가진에 관계 없는 BTV가 발생하게 된다. FB의 성장주기는 고유진동의 경우와 유사하며, FB 폭은 180°의 위상을 경계로 전반부(EDV)는 고유진동과 비슷하고, 후반부(BTV)는 약 30~40% 정도 작아지는 것을 알 수 있다. BTV가 발생하는 후반부의 FB 폭 감소는 밸브가 180°에서 닫히기 때문이라고 생각된다.

진동 주파수가 3배수되는 Fig. 11의 경우, 가진 주기 동안 FB가 3번 생성되는 것을 알 수 있다. 5.25 및 5.5Hz로 가진될 때 가진주기는 각각 190.5, 180 ms가 되며, 화염의 진동은 고유진동 형태의 진동이 두 번 일어난 후, 세번째 진동이 진행 도중에 가진에 의해 중단된다. 따라서, 한 번의 가진주기 동안 두 개의 완전한 FB (EDV 및 BTV)와 한 개의 불완전한 FB (BTV)가 생성된다. 반면에 4.5 Hz로 가진을 할 경우에는 주기가 222 ms로 고유진동 주기가 거의 세 번 겹쳐지게 되어 비교적 완전한 FB가 세 번 생성되는 것을 알 수 있

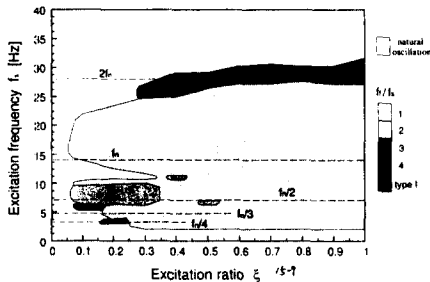
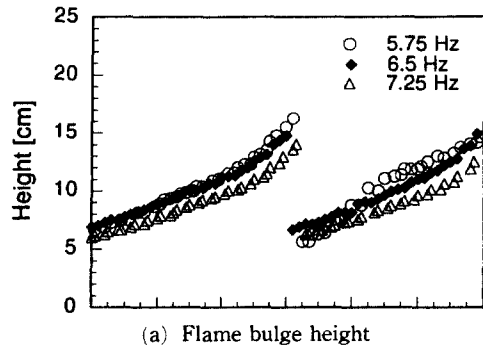
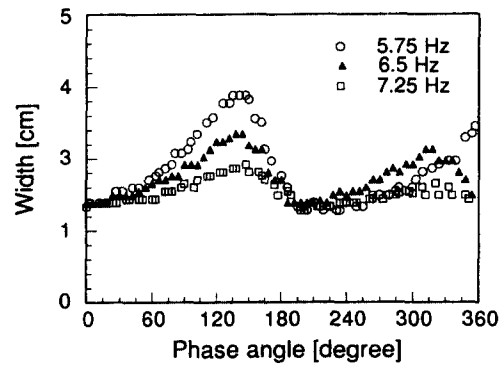


Fig. 9 Flame oscillation characteristics for various excitation ratio ζ and excitation frequency f_s . ($V_F=10$ cm/s, $V_{air}=10$ cm/s, $f_n=14$ Hz)



(a) Flame bulge height



(b) Flame bulge width

Fig. 10 Time evolution of bulge at the frequency doubling region. ($V_F=10$ cm/s, $V_{air}=7$ cm/s, $\zeta=0.2$, $f_n=12.5$ Hz)

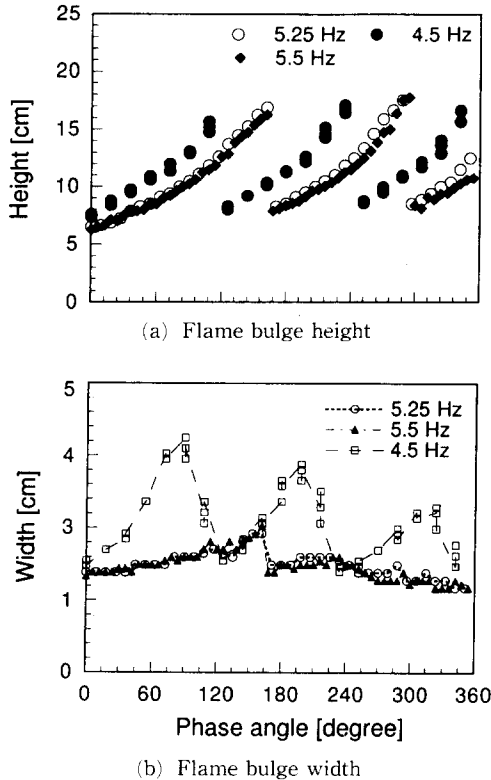


Fig. 11 Time evolution of bulge at the frequency tripling region. ($V_f=10\text{cm/s}$, $V_{air}=7\text{cm/s}$, $\zeta=0.2$, $f_n=12.5\text{Hz}$)

다. 주기가 2배수되는 경우와는 달리 3배수의 경우에는 FB의 주기와 폭의 성장이 일정하지 않았다. 5.5 Hz의 경우 첫번째 진동은 0-165°의 위상 사이에서, 두번째 진동은 165-300° 사이에서 일어나므로 첫번째 진동은 83 ms, 두번째 진동은 68 ms의 시간이 소요됨을 알 수 있다. 초반의 두 주기가 일치하지 않는 것은 솔레노이드밸브가 90 ms 후에 닫혀 유량이 20% 줄어들어 두번째 진동에 영향을 주기 때문이며, 이 경우 FB 폭도 감소하고 있다. 반면에 4.5 Hz로 가진한 경우에는 고유진동 주기의 3배수와 가진 주기가 거의 비슷하여 FB가 충분히 발달하고 각각 77, 71, 74 ms의 주기를 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 가진 주기의 중간에 유량이 20% 줄어들기 때문에 FB의 폭은 줄어드는 경향을 보인다.

가진 주파수가 5.75 Hz인 경우 화염진동 주파수는 두 배수($f_f=2f_n$)를 보여준 반면, 5.5 Hz로 가

진하는 경우에는 3 배수($f_f=3f_n$)의 경향을 보여주었다. 따라서, 화염 진동 주파수가 가진 주파수에 매우 민감한 영역이 존재하는 것을 알 수 있으며, 화염진동은 Fig. 7 및 Fig. 8에서 보여주는 것과 같이 일반적으로 가진주기가 고유진동 주기 또는 그 배수보다 짧은 영역에서 가진 주파수 또는 그 배수를 더 잘 따르는 경향을 보여주었다. 이것은 가진과 고유진동이 함께 일어날 경우 FB, EDV 및 BTV 사이에 복잡한 상호작용이 발생하기 때문이라고 생각된다.

진동 주파수 배가현상은 화염의 고유진동과 가진 주기의 비교로 이해될 수 있다. Fig. 12는 고유진동에 대하여 각각 1/2 및 1/3의 주파수로 가진하는 경우(예로 12 Hz에 대하여 6 및 4 Hz), 가진주기 T_s 와 고유진동주기 T_n 이 중복되는 것을 나타내고 있다. EDV의 발생은 가진에 종속되어 있으므로 T_s 와 T_n 의 시점이 일치된다고 가정하였다. 고유진동주기의 배수와 가진주기가 어긋나는 정도가 커지면 화염이 불안정해지다가 3 배수에서 2 배수로 전환되는 현상이 발생하는 것으로 이해할 수 있다. 각 배수 사이에서는 가진율 ζ 가 작은 경우 가진의 효과가 나타나지 않고 고유진동이 발생하며 ζ 가 커지면 가진의 효과가 화염을 지배하여 가진 주기의 2 배수 또는 3 배수와 화염의 진동주기가 일치하게 된다. 즉 ζ 가 작아지면 EDV가 계속하여 발달하지 못하고, ζ 가 너무 크면 연료유량의 변화가 심해져서 BTV의 성장이 억제되기 때문이라고 생각된다. 본 연구의 실험조건에서는 $\zeta=0.2$ 에서 화염진동 주파수 배가현상이 가장 두드러지게 나타

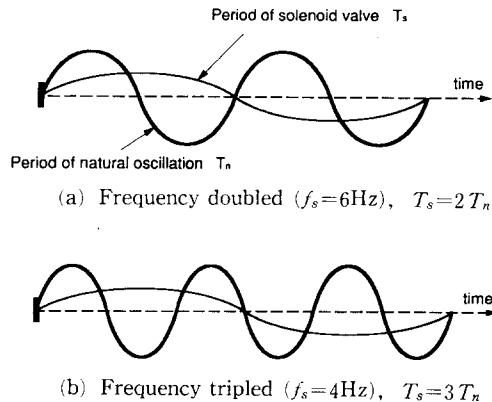


Fig. 12 Schematic showing the mechanism of frequency multiplication. ($f_n=12\text{Hz}$)

났으며, 이때 EDV와 BTV가 균형을 이루고 있는 것으로 보인다.

3.2.2 가진을 따르는 화염진동

화염의 고유진동주기와 유사한 주기로 가진이 이루어질 경우 화염진동은 가진을 따르게 된다. 이때 화염의 진동 주파수는 가진 주파수와 일치하게 되며, 이와 같은 화염진동의 예는 Fig. 7의 “영역 II”에서 볼 수 있다. 비디오 화염사진으로부터, 가진에 따르는 진동을 하는 화염은 가진 주파수의 증가에 따라 화염의 FB 폭이 감소하며 화염이 분리되는 현상도 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. Fig. 13은 비디오 화염사진을 분석한 가진

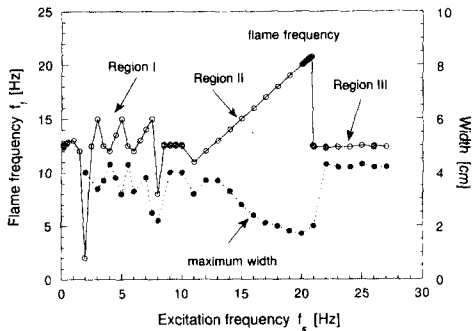


Fig. 13 The relation of flame frequency and width. ($V_F=10\text{cm/s}$, $V_{air}=7\text{cm/s}$, $\zeta=0.2$, $f_n=12.5\text{Hz}$)

주파수 증가에 따른 FB 폭의 변화를 보여주고 있다. 이 경우 화염조건은 $V_F=10\text{cm/s}$, $V_{air}=7\text{cm/s}$ 및 $\zeta=0.2$ 으로 f_n 은 12.5 Hz였다. 이 결과에서 “영역 II”에서는 f_s 가 증가함에 따라 FB 폭이 계속하여 감소하다가, “영역 III”에 도달하면 고유진동과 같아지는 것을 알 수 있다. 이후 “영역 III”의 화염은 고유진동의 경우와 동일하게 되며 f_s 변화에 무관하게 된다.

Fig. 14는 화염진동이 가진주기를 따르는 “영역 II”에서 가진 주파수가 각각 14, 16, 18 및 20Hz일 때 위상 180°에서 가시화된 유동장을 보여주고 있다. 이때 화염 조건은 $V_F=9\text{cm/s}$, $V_{air}=7\text{cm/s}$ 및 $\zeta=0.5$ 로 f_n 은 약 12.5 Hz이다. 이 그림에서 EDV의 생성 및 발달을 명확히 볼 수 있으며, 고유진동의 경우에 비해 와류의 생성이 노즐출구 가까이에서부터 시작되는 것을 알 수 있다. 가진을 하는 경우에는 노즐출구부분에서 화염에 FB가 형성되고 EDV의 발생이 촉발되는 것으로 이해되며, 이때의 와동생성 메커니즘은 Fig. 15로 설명될 수 있다. 고유진동의 경우에는 부력과 Kelvin-Helmholtz 형태의 불안정성에 의해 와동이 형성되어 FB를 형성하지만, 가진을 하는 경우에는 가진에 의해 형성된 FB에 의해 와동이 형성된다. 가진을 하면 유속의 변화로 인해 노즐출구부분에서 화염면이 수평방향으로 불거지는 변형, 즉 FB가 생긴다. 가진에 의해 생성된 FB는 와동의 생성을 촉진하게 되며 부력경계층의 성장과 더불어 와동이 성장한

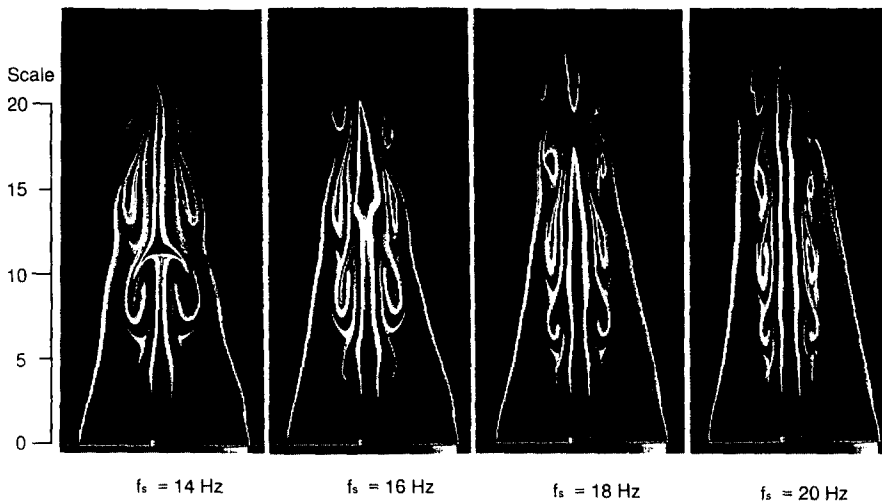


Fig. 14 Flow visualization of oscillating flames with various excitation frequencies at the phase angle 180°. ($V_F=9\text{cm/s}$, $V_{air}=7\text{cm/s}$, $\zeta=0.5$, $f_n=12.5\text{Hz}$)

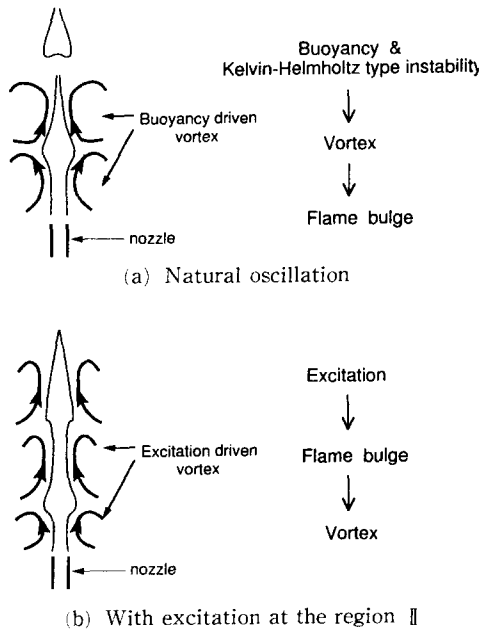


Fig. 15 Schematic showing the vortex motion.

다. 따라서 BTV의 경우보다 EDV의 생성 높이가 낮아지며 크기도 작아진다. 고유주기보다 가진주기가 작은 경우에는 BTV는 생성되지 않으며 EDV만이 생성되어 화염은 가진에 동기되어 진동을 하게 된다.

Fig. 14로부터 가진을 따르는 경우 f_s 가 증가함에 따라 EDV의 크기와 FB 폭이 작아지고 있음을 알 수 있으며, 이는 유체 자체의 관성에 의한 응답 지연과 와동의 대류속도의 관계로 이해될 수 있다. 와동의 대류속도는 거의 변함이 없으므로 생성 주기가 단축될수록 EDV의 크기가 줄어들게 되고 유체의 관성에 의해 화염의 변형도 줄어들어 와동의 성장이 억제된다. 또한 EDV와 FB의 속도 차이에 의해 FB가 와동열 사이를 통과하면서 EDV의 성장을 억제하기도 한다.

가진 주파수 f_s 가 계속 증가하면 화염의 진동이 f_s 를 추종하지 못하게 되고 EDV가 발생하지 못하는 한계에 이르게 된다. 이때 f_s 를 더 증가시키면 가진은 Kelvin-Helmholtz 형태의 불안정성을 증폭하는 역할을 하여 화염이 고유진동을 하게 된다. 이것은 유체의 관성으로 가진에 의한 화염의 변형이 미소하게 되어 EDV가 발생하지 않고 BTV만이 생성되기 때문이라고 생각된다. 고유진동을 시

작하는 f_s 값은 Fig. 8과 Fig. 9에서 보여준 것과 같이 가진율 ξ 에 크게 영향을 받지 않는다. 본 실험의 유속조건에서는 가진의 효과가 사라지고 다시 고유진동모드로 전환되는 f_s 값은 20-30 Hz 범위 내에 있으며 그 이상에서는 가진의 효과가 관찰되지 않았다.

4. 결 론

동축류 확산화염이 고유진동을 하는 영역에서 연료에 유동가진을 주는 경우 화염의 진동특성을 살펴보았다.

동축류 버너에 유량이 일정하게 공급되는 경우에도 화염 진동현상이 발생하는데 이 경우 진동특성이 다른 두 가지 유형의 고유진동이 있다. 레이저 평면광을 이용한 유동가시화를 통해 부력에 의한 와동이 화염외부에 형성되는 것을 확인하였으며 고유진동에 두 가지 유형이 나타나는 원인을 알아보았다. 화염의 길이가 작으면 화염의 선단만이 와동에 의해 잘려나가는 진동을 하는 반면 화염이 길어지면 와동에 의해 FB가 형성되기 때문이다.

화염을 가진하는 방법으로 솔레노이드밸브를 이용하였으며, 연료의 일부분만 밸브를 통과시키는 방법으로 가진강도를 조절하였다. 화염은 가진율과 가진 주파수에 따라 가진에 동기되어 진동하기도 하고 고유진동을 하기도 하였다. 그리고 낮은 가진 주파수에서 화염의 진동 주파수가 가진 주파수의 배수가 되는 현상을 발견하였다.

가진 주파수를 변화시킬 때의 화염진동특성은 크게 세가지 영역으로 나타났다. "영역 I"에서는 가진 주파수가 고유진동 주파수보다 작은 영역으로 화염진동은 가진 주파수의 배수가 되었다. 이러한 진동 주파수 배가현상은 가진 주기내에서 고유진동이 발생하여 나타난 것임을 확인하였다. "영역 II"에서는 화염이 가진 주파수에 동기되어 진동하며 가진 주파수의 증가에 따라 화염의 폭과 와동의 크기가 감소함을 알 수 있었다. 이 영역에서는 가진에 의해 FB가 형성되고 화염이 진동을 하게되는데 유체 자체의 관성에 의해 가진 주파수 증가에 따라 화염의 변형이 적어지게 된다. "영역 III"에서는 가진 주파수가 고유진동 주파수보다 훨씬 높은 영역으로 화염은 고유진동을 하게 된다. 이는 가진에 의해 발생하는 화염면의 변화가 미소하기 때문이다.

화염의 고유진동 주기와 비슷한 범위에서는 가진에 의해 화염의 진동을 가진에 동기되도록 변화시킬 수 있었다. 이는 적절한 가진율과 가진 주파수를 적용할 경우 화염의 진동 주파수를 변화시킬 수 있음을 보여주는 것으로, 연소기의 공진 주파수를 피할 수 있는 능동제어의 가능성을 제시하였다. 또한 제한적이지만 고유진동 주기의 배수로 가진 할 경우에도 화염진동 주파수의 변화가 가능하며 고유진동 주파수를 피할 수 있음을 보여 주었다.

후기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME95-F-05)에 의하여 연구되었으며 관계자 여러분께 감사할 드립니다.

참고문헌

- (1) Chen, L. -D., Seaba, J. P., Roquemore, W. M. and Goss, L. P., 1988, "Buoyant Diffusion Flame," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, pp. 677~684.
- (2) McManus, K. R., Poinsot, T. and Candel, S. M., 1993, "A Review of Active Control of Combustion Instabilities," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 19, pp. 1~29.
- (3) Candel, S. M., 1992, "Combustion Instabilities Coupled by Pressure Waves and Their Active Control," *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, pp. 1277~1296.
- (4) Buckmaster, J. and Peters, N., 1986, "The Infinite Candle and Its Stability-A Paradigm for Flickering Diffusion Flames," *Twenty-First Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, pp. 1829~1836.
- (5) Cetegen, B.M. and Ahmed, T.A., 1993, "Experiments on the Periodic Instability of Buoyant Plumes and Pool Fires," *Combust. Flame*, Vol. 93, pp. 157~184.
- (6) Zukoski, E. E., Cetegen, B. M. and Kubota, T., 1984, "Visible Structure of Buoyant Diffusion Flames," *Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, pp. 361~366.
- (7) Davis, R. W., Moore, E. F. and Santoro, R. J. and Ness, J. R., 1990, "Isolation of Buoyancy Effects in Jet Diffusion Flame Experiments," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 73, pp. 625~635.
- (8) Katta, V. R. and Rooquemore, W. M., 1993, "Role of Inner and Outer Structures in Transitional Jet Diffusion Flame," *Combust. Flame*, Vol. 92, pp. 274~282.
- (9) Lasheras, J. C., Liñán, A., Lecuona, A. and Rodriguez, P., 1992, "Vorticity Dynamics in Three-Dimensional Pulsating Co-Flowing Jet Diffusion Flames," *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, pp. 325~332.
- (10) Yuan, T., Durox, D. and Villermaux, E., 1994, "An Analogue Study for Flickering," *Experiments in Fluids*, Vol. 17, pp. 337~349.
- (11) Lewis, G. S., Cantwell, B. J., Vandsburger, U. and Bowman, C. T., 1988, "An Investigation of a Laminar Non-Premixed Flames in an Unsteady Vortical Flow," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, pp. 515~522.
- (12) Lin, C. K., Jeng, M. S. and Chao, Y. C., 1993, "The Stabilization Mechanism of the Lifted Jet Diffusion Flame in the Hysteresis Region," *Experiments in Fluids*, Vol. 14, pp. 353~365.
- (13) Kim, T. K., Park, J. and Shin, H. D., 1991, "An Experimental Study on Mixing Mechanism of Tone Excited Non-Premixed Jet Flame," 한국연소학회 제 7 회 학술강연회 초록집, pp. 44~54.
- (14) Schadow, K. C. and Gutmark, E., 1992, "Combustion Instability Related to Vortex Shedding in Dump Combustors and Their Passive Control," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 18, pp. 117~132.
- (15) Davis, M. R. and Jumppanen, P. C., 1993, "Optical Detection of the Response of a Diffusion Flame to Excitation," *Combust. and Flame*, Vol. 93, pp. 349~374.
- (16) Chen, L.-D. and Rooquemore, W. M., 1986, "Visualization of Jet Flames," *Combust. Flame*,

Vol. 66, pp. 81~86.

- (17) Davis, R. W., Moore, E. F., Roquemore, W. M., Chen, L. -D. and Goss, L. P., 1991, "Preliminary Results of a Numerical-Experimental Study of the Dynamic Structure of a Buoyant Jet Diffusion Flame," *Combust. Flame*, Vol. 83, pp. 263~270.
- (18) Chen, L. -D., Vilimpoc, V., Goss, L. P., Davis, R. W., Moore, E. E. and Roquemore, W. M., 1992, "Time Evolution of a Buoyant Jet Diffusion Flame," *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, Pittsburgh, pp. 303~310.
- (19) Vands burger, U., Seitzman, J. M. and Hanson, R. K., 1988, "Visualization Methods for the Study of Unsteady Non-Premixed Jet Flame Structure," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 59, pp. 455~461.
- (20) 이태원, 1991, "주기적인 연료공급에 따른 화염거동에 관한 실험적 연구," 석사학위논문, 서울대학교, 서울.
- (21) 이동혁, 1993, "주기적 연료공급에 따른 비예혼합 제트화염의 특성에 관한 실험적 연구," 석사학위논문, 서울대학교, 서울.