

관내 희박 예혼합 프로판/공기와 메탄/공기 화염의 거동에 관한 실험적 연구

곽영태*, 오광철**, 신현동**

Experimental Study on the Behaviors of Lean Premixed Flame of Propane/Air and Methane/Air in a Tube

Young Tae Guahk*, Kwang Chul Oh** and Hyun Dong Shin**

ABSTRACT

Behaviors of lean premixed flame of propane/air and methane/air flame anchored by a pilot flame in a tube were investigated experimentally varying the mean velocity from 10 to 140 cm/s and the equivalence ratio from 0.45 to 0.8. Behaviors of both flames are divided into five regions of stable, flash-back, tail-out, flickering and vibrating. General characteristics of each region and Le number effect are investigated. Two main instabilities, flickering and vibration, are both unstable but the instability mechanism, the frequency and the amplitude of pressure fluctuation are different. In the edge of the vibrating region, pressure fluctuation repeats generation and extinction. Repeated growth and decrease of the amplitude of pressure fluctuation are explained by Rayleigh's index.

Key Words : flickering flame(필럭임 화염), vibrating flame(진동 화염), Le number(루이스 수), Rayleigh index(레이레이 지수), vorticity(와도)

1. 서 론

희박 연소는 에너지 절약과 배가스 저감 측면의 장점이 있으므로 보일러나 가스 터빈 등에서 많이 쓰이고 있고, 이때 화염을 안정하게 고정하기 위하여 파일럿 화염이 쓰이는 경우가 많다. 그런데 희박 예혼합 화염 자체가 내재적인 불안정성(intrinsic instability)을 가지고 있고, 벽면에 의해 둘러싸여 있으므로 주위와 음향이 상호작용(acoustic interaction)을 할 수 있어 여러 가지 화염 불안정성이 나타날 수 있다. 따라서 벽면에 의해 둘러싸인 희박예혼합 화염의 작동 가능 영역과 작동영역 이외의 영역에서 나타나는 화염의 불안정성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 실제 연소기와 유사한 형태를 가지는 파일럿 화염에 의해 고정된 관내 희박 예

혼합 프로판/공기와 메탄/공기 화염의 일반적인 거동과 불안정성에 대해 연구하였다. 대표적인 두 가지의 화염 불안정성을 관찰하였는데, 하나는 화염의 내재적인 불안정성에 의해 나타나는 화염의 필럭임(flickering)이고, 다른 하나는 주위 형상과의 음향 상호작용에 의해 나타나는 화염의 진동(vibration)이다.

화염의 필럭임은 확산 화염에서 많이 관찰되는 현상[1,2]인데, 그 원인은 연료 제트(fuel jet)와 주위 공기(surrounding air) 사이의 속도 차이에 의해 생성된 와도(vorticity)라고 알려져 있다. 예혼합 화염에서도 화염의 필럭임이 관찰되는데 Park[3]은 파일럿 화염에 의해 고정된 희박예혼합 화염에 대한 연구를 수행하였고, 프로판 화염과 메탄 화염 모두에서 화염 필럭임을 관찰하였다. Lee[4]는 유동에 대해 기울어진 평면 화염에서 화염에 의해 생성된 와도가 화염의 안정성에 미치는 영향에 대한 해석적인 연구를 수행하였다. 섭동의 파수(wavelength of perturbation), 유동에 대한 화염의 기울기, 루이스 수와 점성을

* 한국과학기술원 기계공학과

** 자동차부품연구원, 환경부품연구부

† 연락처, hdshin@kaist.ac.kr

변수(parameter)로 안정성을 확인한 결과 기울기가 작을수록, 루이스 수가 1보다 작을수록 와도에 의해 화염이 불안정해짐을 보였다. 본 연구에서의 화염 필력임도 중심에서의 고온 기연 gas와 가장자리의 미연 gas와의 속도 차이에 의해 생성된 와도 때문에 라고 볼 수 있다. 이렇게 형성된 화염 필력임에 의한 화염굴곡(flame curvature)은 화염면 접선방향으로의 유동에 의해 접선방향으로 전파하게 된다. 이때 화염굴곡의 모양 변화는 연료가 프로판이나 메탄이나, 즉 루이스 수에 따라 달라지는데, Palm-Lewis[5]와 Groff[6]는 구형 화염의 전파시 화염이 작은 셀(cell)로 분해되는 현상을 루이스 수로 설명하였다.

화염 진동은 관 형상(geometry)에 의한 음향, 유동, 화염이 상호 작용하여 발생한다(열-음향 불안정성, thermo-acoustic instability). 이러한 현상은 보일러, 가스 터빈 등의 산업 현장에서 자주 발생하며 강한 압력 변동 때문에 성능 저하, 더 나아가서 연소벽이나 터빈 블레이드의 파괴로 이어져 시스템이 작동 불능이 되기도 한다. 그 때문에 열-음향 불안정성에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다. Higgins[7]의 singing flame 이후로 여러 가지 실험적 연구가 있어왔고, Putnam[8]은 열-음향 불안정성의 발생 여부를 판단할 수 있는 레일레이 지수(Rayleigh Index)를 도입하였다. 레일레이 지수는 열발생 변동(heat release fluctuation)과 압력 변동(pressure fluctuation)의 곱을 시간에 따라 적분한 값으로, 음향 에너지(acoustic energy)값의 증가를 나타낸다. 열발생율의 변동을 일으키는 요인으로는 화학반응율에 직접적인 영향을 주는 압력, 유동변화에 의한 화염면적의 변화, 당량비의 변화[9] 등이 있다. 본 연구에서는 압력 변동이 유속 변동을 일으키고, 유속 변동이 화염면적을 변화시켜 열발생율이 변동하게 된다.

본 연구에서는 평균 유속과 당량비를 바꾸어 가면서 연료에 따른 화염의 거동, 불안정성을 관찰하여 안정화 선도(stability map)를 얻었고, 연료에 따라 다른 점을 관찰하여 이유를 밝혔다. 열-음향 불안정성에 대해서는 레일레이 지수를 계산하여 화염 진동 변동의 증가와 감소를 설명하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Figure 1은 본 연구에서 사용한 연소기와 측정 장치의 개략도이다. 연료로는 프로판과 메탄을 사용하였고 산화제로는 공기를 사용하였다. 예혼합기의 평균 유속 범위는 10 cm/s에서 140 cm/s 이고, 당량비 범위는 0.45에서 0.8이었다. 이때 유리관 내경 50 mm를 기준으로 하면 Re

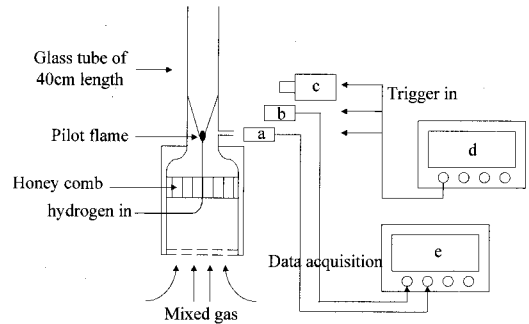


Fig. 1 Experimental setup. (a) Microphone (b) Photomultiplier tube (c) High speed camera (d) Delay generator (e) Oscilloscope

수는 360에서 5050이다. 유동의 축방향 속도를 균일하게 맞추기 위해 예혼합기가 허니콤(honeycomb)과 수축 노즐(contraction nozzle)을 차례로 통과하도록 하였다. 수소 파일럿 화염을 사용하여 뒤집어진 원뿔 형태의 화염(inverted conical flame)을 노즐 출구에 고정하였다. 이때 사용된 수소의 양은 20 cc/min 으로 발열량은 232 J/min 이다. 이는 평균 유속 30 cm/s, 당량비 1인 프로판/공기 혼합기의 발열량 130kJ/min 보다 아주 작은 값이므로 파일럿 화염이 원뿔 형태의 화염에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 또한 파일럿 노즐의 직경이 0.7 mm로 유동의 교란을 최소화하였다. 직경 50 mm, 길이 40 cm의 유리관을 사용하여 주위 공기의 유입을 막았는데, 이는 음향 에너지가 보존되게 하는 역할을 하여 열-음향 불안정성을 야기하게 된다.

ICCD 카메라(intensified CCD camera, PI Instrument) 고속 카메라(high-speed camera, Kodak Ektapro, 1000 frames/sec)를 사용하여 화염 모양을 관찰하였고, 파일럿 노즐 출구에서 10 mm 높이에 관벽면에 도출관을 만들고 냉각 자켓(water jacket) 내부에 마이크로폰(microphone, type 4165, 50 mV/Pa, BRRUEL&KJAER)을 설치하여 압력 변동을 측정하였다. 파일럿 노즐 출구에서 50 mm 높이, 관에서부터 200 mm 거리에 PMT(Photo multiplier tube, R212, Hamamatsu)와 CH filter(431.5 nm)를 설치하여 CH 자발광을 측정하였다. 화염면의 변동이 가장 큰 원뿔의 끝자락에서 자발광의 변동이 가장 커서 PMT의 측정 높이를 화염 높이와 비슷한 70 mm로 하였다. 고속 카메라, 마이크로폰과 PMT를 delay generator(Model 555, BNC)를 사용하여 동기시켰고, 각각의 신호를 오실로스코프(Oscilloscope, DL1640L, YOKOGAWA)로 측정하였다.

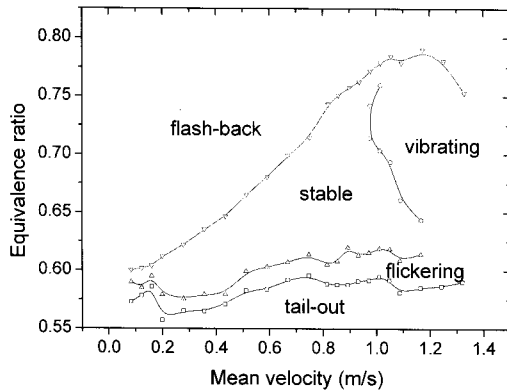


Fig. 2 Stability map of propane flame

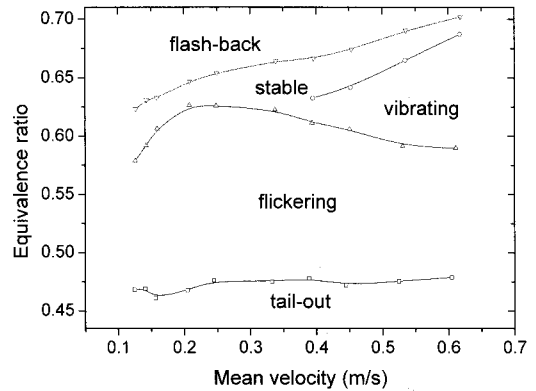


Fig. 3 Stability map of methane flame

3. 실험결과 및 고찰

3.1 프로판 화염과 메탄 화염의 안정화 선도(Stability map)

화염의 거동은 안정 영역(stable region), 역화 영역(flash-back region), tail-out 영역, 펄럭임 영역(flickering region), 진동 영역(vibrating region)의 5가지 영역으로 나뉜다. Fig. 2와 Fig. 3는 각각 프로판 화염과 메탄 화염의 안정화 선도를 나타내고, Fig. 4에서 Fig. 7에 걸쳐 각 영역에서의 화염 모양을 나타내었다. 이때 실선은 유리관 벽면을 나타낸다.

3.1.1 안정화 선도와 각 영역의 특징

tail-out 영역은 가연 한계에 가까운 당량비 조건으로 유속이 연소 속도에 비해 아주 크기 때문에 긴 원통형 화염만 존재한다. 프로판 화염과 메탄 화염의 가연한계 당량비는 각각 0.51과 0.46으로 Fig. 2와 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 tail-out 영역 경계의 당량비와 비슷하다.

안정화 영역에서 프로판 화염과 메탄 화염 모두 뒤집어진 원뿔 모양으로 안정하게 유지된다. 특별히 프로판 화염이 펄럭임 영역 근방에서 흥미로운 모양을 가지는데 Fig. 4(a, b)에서 볼 수 있듯이 밑부분은 직경이 작은 원통 모양이고 윗부분은 원뿔 모양을 가진다.

역화 영역에서는 화염이 뜨거워진 파일릿 노즐 표면을 따라 역화한다. 화염에 의해 노즐이 달궈져 화염이 점점 아래로 내려가게 되고, 화염의 위치가 수축 노즐보다 낮아지면 유속이 연소속도보다 낮아져 역화하게 된다.

펄럭임 영역은 가연한계 근처로서 주위 교란에 의해 쉽게 영향을 받는 영역이다. 화염이 10 Hz로 펄럭이는데 이때 압력 변동은 거의 존재하지

않는다. 화염과 유동의 각도가 작아질수록 와도가 증가하여 화염이 더욱 불안정해지는데[4], Fig. 6(b, c)에서 볼 수 있듯이 화염과 유동의 각도가 작을수록 화염에 생기는 굴곡이 깊어짐을 알 수 있다. Tail-out 영역에 가까워지면 화염이 불규칙적으로 펄럭이게 되는데 이 조건도 펄럭임 영역으로 정의하였다. Fig. 2와 Fig. 3을 보면 회박 메탄/공기 예혼합기의 루이스 수가 1보다 작으므로, 화염이 교란에 의해 쉽게 영향을 받아 루이스 수가 1보다 큰 회박 프로판/공기 화염보다 펄럭임 영역이 넓을 알 수 있다. 그러나 펄럭임이 발생하는 경계영역을 결정짓는 변수에 대하여는 좀 더 많은 연구가 요구된다.

진동 영역에서는 화염이 음향이 상호 작용하여 100 Hz 근방의 주파수로 소리를 내면서 진동하고 이때의 관내의 압력 변동은 실험범위 내에서는 최대 200 Pa 정도였다. Fig. 2와 Fig. 3을 보면 메탄 화염의 진동 영역이 프로판 화염 진동 영역보다 속도가 낮고, 당량비도 낮은 조건에서 존재한다.

3.1.2 펄럭임 화염과 진동 화염의 차이점

펄럭임 화염과 진동 화염 모두 불안정하지만, 불안정성의 생성 원리(mechanism), 변동 주파수, 압력 변동의 여부 등의 다른 특성을 가진다.

펄럭임 화염은 화염에 의해 생성된 와도가 원인으로 내재적인 불안정성에 의한 것이다. 이에 반해 진동 화염은 화염과 음향의 상호작용이 원인으로 외부에서 기인한 불안정성이다. 따라서 유리관이 존재하지 않으면 펄럭임 화염은 존재하지만 진동 화염은 존재하지 않는다. 진동 화염의 불안정화 과정을 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 안정영역의 조건에서 당량비를 증가시켜 진동영역으로 넘어가면 원뿔 화염에서 벽면과 닿는 끝자락 부분이 미세하게 위아래로 움직임을 반복한다. 시간이 지날수록 압력 변동이 커져 큰

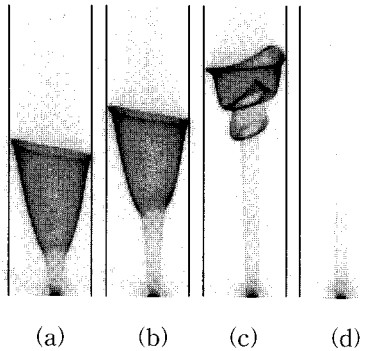


Fig. 4 Shapes of propane flame. The equivalence ratio decreases keeping mean velocity 31cm/s. (a, b) stable region, (c) flickering region, (d) tail-out region ; Black solid line shows tube wall.

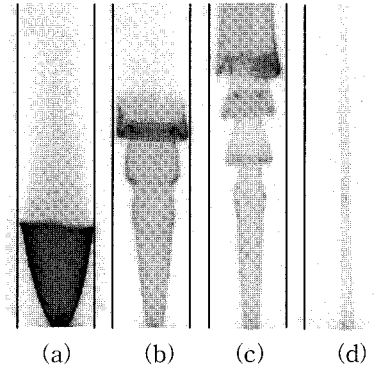


Fig. 6 Shapes of methane flame. The equivalence ratio decreases keeping mean velocity 31cm/s. (a) stable region, (b, c) flickering region, (d) tail-out region

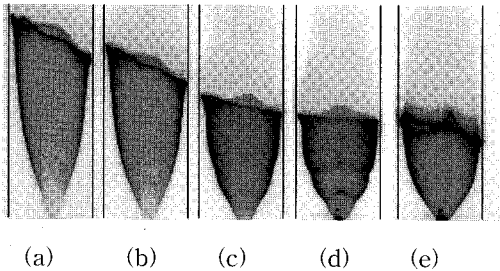


Fig. 5 Shapes of propane flame. The equivalence ratio increases keeping mean velocity 100cm/s. (a, b, e) stable region, (c, d) vibrating region

속도 변동을 유발하여 화염면 전체가 위아래로 움직임을 반복한다. 이때 화염면 접선 방향으로 화염 끝자락까지 섭동이 전파하는 데 걸리는 시간이 압력 변동의 주기보다 커서 결과적으로 화염에는 여러 개의 굴곡이 존재하게 된다.

떨림 화염은 10 Hz 근방에서 압력 변동 없이 떨리고, 진동 화염은 100 Hz 근방에서 최대 200 Pa의 압력 변동을 가지고 진동한다.

프로판 화염에서 떨림 화염과 진동 화염의 구분은 실험 조건에 의해 결정되고 압력 발생의 크기와 변동 주파수에 의해 특징지어진다. 안정 화염을 이루는 평균 유속과 당량비 조건에서 당량비를 증가시키면 진동 화염이 되고 감소시키면 떨림 화염이 된다. 메탄 화염에서는 떨림 화염과 진동 화염 영역의 경계가 불어있어, 판단 기준은 오직 압력 변동과 CH 자발광 변동이 된다. 진동 화염 영역은 압력 변동이 급격하게 증가하고 진동수가 크게 바뀌는 조건으로 하였다.

3.1.3 각 영역에서의 화염 모양

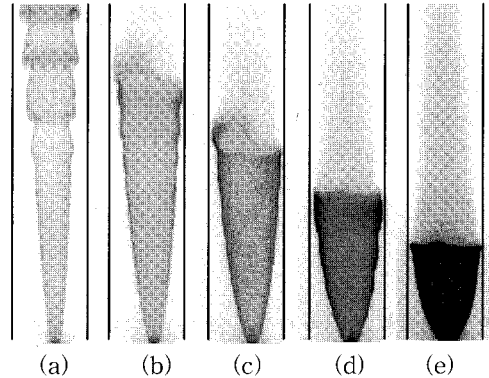


Fig. 7 Shapes of methane flame. The equivalence ratio increases keeping mean velocity 51cm/s. (a) flickering region, (b, c, d) vibrating region, (e) stable region

Figure 4는 평균 유속을 31 cm/s로 유지하고 당량비를 감소시켰을 때의 프로판 화염 모양으로 각각 안정화 영역(a, b), 떨림 영역(c), tail-out 영역(d)에서의 화염이다. 당량비가 감소함에 따라 유동과 화염 사이의 각도가 감소하면서 (a)와 같이 윗부분은 원뿔 형태를 유지하고 밑부분은 원통 모양으로 바뀌게 된다. 당량비가 더욱 감소하면 원통 모양의 화염 길이가 더 증가하고(b), 화염이 떨리고(c), 결국 원통형 화염만 남게 된다(d). Fig. 5는 평균 유속을 100 cm/s로 유지하고 당량비를 증가시켰을 때의 프로판 화염 모양으로 각각 안정화 영역(a, b, e), 진동 영역(c, d)에서의 화염이다. 당량비가 증가함에 따라 화염이 짧아지다가(a, b), 진동 영역에 이르면 화염이 진동하기 시작하고(c) 당량비가 더욱 증가하면 압력 변동이 커지고 화염의 굴곡도 커지게 된다

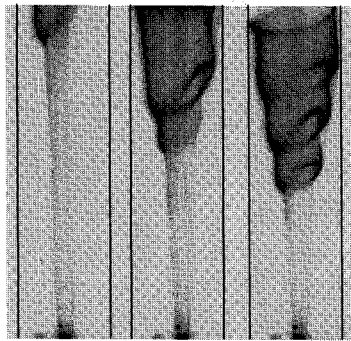


Fig. 8 propagation towards upstream of irregularly flickering propane flame

(d). 당량비가 임계치보다 커지면 화염은 다시 안정하게 존재한다(e).

Figure 6은 평균 유속을 31 cm/s로 유지하고 당량비를 감소시켰을 때의 메탄 화염 모양으로 각각 안정화 영역(a), 필러임 영역(b, c), tail-out 영역(d)에서의 화염이다. 당량비가 감소함에 따라 유동과 화염의 각이 작아져 와도가 커져 화염이 필러임이고(b, c) 결국 원통형 화염만 남게 된다(d). Fig. 7은 평균 유속을 51 cm/s로 유지하고 당량비를 증가시켰을 때의 메탄 화염의 모양으로 각각 필러임 영역(a), 진동 영역(b, c, d), 안정 영역(e)에서의 화염이다. 필러임은 화염(a)에서 당량비가 증가하면 안정화염이 존재하지 않고 바로 진동 화염이 된다(b, c, d). 그리고 당량비가 임계치보다 커지면 화염은 다시 안정하게 존재하게 된다(e).

3.2 프로판 화염의 거동과 메탄 화염의 거동의 차이점

프로판/공기 예혼합기와 메탄/공기 예혼합기의 물성치 차이 때문에 두 화염은 안정화 선도의 각 영역에서 서로 다른 거동을 보인다.

Tail-out 영역의 경우 메탄 화염의 길이는 관의 길이인 40 cm를 넘어섬에 반해 프로판 화염의 길이는 10 cm 정도였다. 이러한 화염 길이 차이는 총엔탈피(total enthalpy) 개념으로 생각할 수 있다[10]. 원통형 화염이 존재하면, 관 중량의 속도가 빠르므로 예혼합기가 중앙으로 연속적으로 공급되어 화염이 유지되는데, 메탄 화염의 경우 루이스 수가 1보다 작아 메탄 분자의 질량 확산에 의한 화학적 에너지 이득이 열확산에 의해 화염이 잃는 에너지를 능가하여 총엔탈피가 증가하는 반면, 프로판 화염의 경우는 반대로 총엔탈피가 감소하게 된다. 결과적으로 프로판 화염면의 온도는 계속 감소하여 일정 이상 높이에서는 화염이 존재하지 않게 된다.

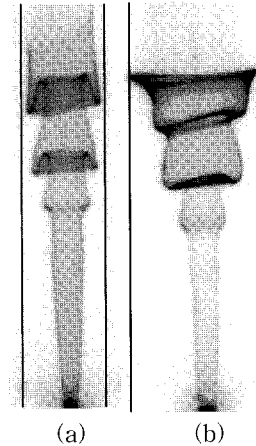


Fig. 9 flickering flame of methane(a) and propane(b)

Tail-out 영역 근처의 필러임 영역에서는 화염이 tail-out 영역의 원통형 화염 모양과 필러임 화염 모양을 번갈아가면서 가지게 된다. 원통형 화염 모양에서 필러임 화염 모양으로의 천이할 때를 살펴보면, 원통형 화염 길이가 증가와 감소를 반복하다가 임계 길이 이상이 되면 필러임 영역으로 넘어가게 된다. 이때 프로판 화염의 경우 임계 길이 이상이 되면 Fig. 8처럼 상류로 빠르게 전파하고 일정 시간 동안 화염이 필러임이다가 다시 원래의 원통형 화염으로 되돌아가게 된다. 메탄 화염의 경우는 프로판 화염과 같은 과정을 거치지만, 원통형 화염에서 필러임 화염으로 넘어갈 때 상류로 빠르게 전파하는 모습은 보이지 않는다.

필러임 영역에서는 생성된 화염굴곡이 화염면 접선방향으로의 유동에 의해 접선방향으로 대류되는데, 연료의 종류에 따라 화염 굴곡의 변화가 다르게 된다. 이는 스트레치와 루이스 수로 설명될 수 있는데, 이때 필러임 화염이 발생하는 당량비 범위에서 루이스 수의 범위는 미연 가스와 기연 가스 온도의 중간값인 1000 K의 온도에서 프로판/공기 화염의 경우 약 1.71 ~ 1.72, 메탄/공기 화염의 경우 0.91 ~ 0.92이다. 희박 메탄 화염의 경우 루이스 수가 1보다 작고 유동에 대해 불룩한 굴곡의 화염은 양의 스트레치(stretch)값을 가지므로 메탄 분자의 질량 확산에 의한 화학적 에너지 이득이 열확산에 의해 화염이 잃는 에너지를 능가하여 총엔탈피의 증가, 화염면 온도 증가, 연소 속도 상승으로 이어지게 된다. 결국 화염면이 화염면의 평균 위치보다 상류로 당겨지게 된다. 유동에 대해 오목한 굴곡의 화염은 음의 스트레치 값을 가져 총엔탈피의 감소, 화염면 온도 감소, 연소 속도 하강으로 이어진다. 결국 화염면이 화염면의 평균 위치보다 하류로 밀리게

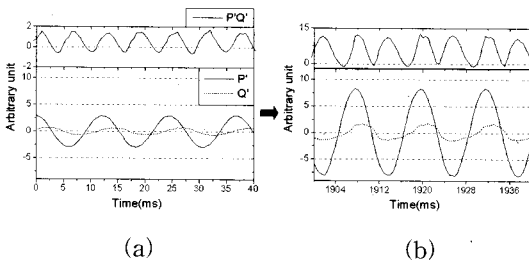


Fig. 10 Pressure(P'), heat release fluctuation (Q') and $P'Q'$ in single-frequency vibrating mode

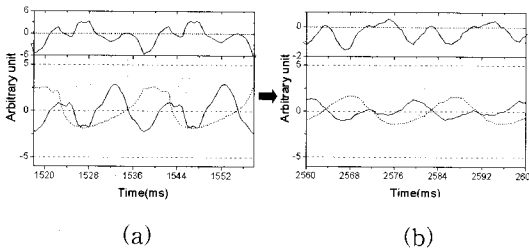


Fig. 11 Pressure(P'), heat release fluctuation (Q') and $P'Q'$ in dual-frequency vibrating mode

된다. 종합적으로 보면 불룩한 화염면은 더욱 불룩해지고 오목한 화염면은 더욱 오목해져 화염면이 더욱 구부러지게 된다(Fig. 9 (a)). 프로판 화염의 경우 메탄 화염과 반대로 화염의 굴곡이 작아짐을 볼 수 있다(Fig. 9 (b)).

3.3 레일레이 지수를 이용한 진동 영역 경계에서의 화염 거동 해석

안정 영역과 진동 영역의 경계 조건에서는 압력 변동이 생성·증가와 감소·소멸을 반복하고, 결과적으로 화염은 진동 화염 모양과 안정한 원뿔 모양을 번갈아 가진다. 원뿔 모양의 안정한 화염이 자연적인 섭동에 의해 교란되어 압력 변동이 발생한다. 압력 변동은 속도 변동을 유발시켜 파일럿 화염 근처에서 화염의 굴곡을 유발하고, 생성된 굴곡은 모양을 유지하면서 화염면에 대해 수직 방향 유속을 가지고 하류로 대류된다. 결과적으로 화염면적이 변동하여 CH 자발광 또한 변동하게 된다(Fig. 10 (a)). 시간이 지날수록 열발생 변동이 압력 변동이 상호 작용하여 섭동이 증폭된다(Fig. 10 (b)). 이와 같은 압력의 생성·증가가 하나의 주파수로 발생하여 단일 주파수 진동 모드라고 부른다. 압력 변동이 증가하다가 그 값이 임계값에 이르면, 압력 변동이 두 개의 주파수를 가지면서 압력 변동 크기가 감소하고 그에 따라 유속, 화염면적의 변동이 감소하여 결국 사라져서 원뿔 모양의 안정한 화염이 된다

(이중 주파수 모드, Fig. 11).

압력 변동의 증가와 감소는 다음의 레일레이 지수로 설명할 수 있다.

$$\int_0^T \int_0^L \int_0^R P'(r, x, t) \times q'(r, x, t) 2\pi r dr dx dt > 0 \quad (1)$$

왼쪽의 적분값은 음향 에너지의 발생값으로 P' 은 압력 변동, q' 는 열발생 변동, T 는 진동의 주기, L 은 화염의 길이, R 은 유리관의 반경이다. 본 연구에서 q' 은 화염면적에 의해 지배되므로, q' 이 발생하는 길이는 5 cm 정도이다. 이에 반해 P' 이 발생하는 거리는 관경이와 버너 내부 길이를 합치면 80 cm가 되어 실제 음향 에너지를 발생시키는 5cm 내에서 P' 의 위상 차이는 무시할 수 있다. 결국 P' 은 계산영역 내에서는 시간만의 함수가 되어, (1)식은 다음과 같이 변환된다.

$$\int_0^T P'(t) \times Q'(t) dt > 0 \quad (2)$$

$$\text{where } Q'(t) = \int_0^L \int_0^R q'(r, x, t) 2\pi r dr dx$$

본 연구에서 열발생 변동 $Q'(t)$ 은 CH 자발광 변동으로 대체하였다[11, 12]. Fig. 10과 Fig. 11에서 $P' \times Q'$ 의 한 주기에 대한 적분값이 레일레이 지수가 되는데, 단일 주파수 모드에서는 $P' \times Q'$ 값이 0 보다 큰 부분의 면적이 0 보다 작은 부분의 면적보다 크므로 레일레이 지수가 0보다 크게 된다. 이중 주파수 모드에서는 $P' \times Q'$ 값이 0 보다 작은 부분의 면적이 0 보다 큰 부분의 면적보다 크므로 레일레이 지수가 0보다 작게 된다. 결과적으로 단일 주파수 모드에서는 음향 에너지가 증가하여 압력 변동이 증가하고 이중 주파수 모드에서는 음향 에너지가 감소하여 압력 변동이 감소하게 되어, 진동 영역 경계에서 화염 진동이 생성·증가와 감소·소멸을 반복하게 된다.

4. 결론

본 연구는 파일럿 화염에 의해 고정된 관내 회박 예혼합 프로판/공기와 메탄/공기 화염의 일반적인 거동과 불안정성에 대해 연구하였다. 예혼합기의 평균 유속 범위는 10 cm/s에서 140 cm/s 이고, 당량비 범위는 0.45에서 0.8이었다.

1. 화염의 거동은 안정 영역, 역화 영역, tail-out 영역, 필러임 영역, 진동 영역의 5가지 영역으로 나뉜다.

2. 대표적인 두 가지의 화염 불안정성을 관찰하였는데, 하나는 화염에 의해 생성된 와도에 의해 나타나는 화염의 필릭임이고, 다른 하나는 주위 형상과의 음향 상호작용에 의해 나타나는 화염의 진동이다. 필릭임 화염과 진동 화염 모두 불안정하지만, 불안정성의 생성 원리, 변동의 주파수, 압력 변동의 여부 등의 다른 특성을 가진다.

3. 진동 영역과 안정 영역의 경계 조건에서는 압력 변동이 생성과 소멸을 반복하고, 결과적으로 화염이 진동 화염 모양과 안정한 원뿔 모양을 번갈아가면서 가진다. 이는 레일레이 지수로 설명된다.

4. 필릭임 영역에서 생성된 화염굴곡이 화염면 접선방향으로의 유동에 의해 접선방향으로 진파할 때, 루이스 수 효과에 의해 메탄 화염인 경우 화염의 굴곡이 더욱 깊어짐을 볼 수 있다.

후 기

이 연구는 과학재단 지정 우수연구 센터인 연소기술연구센터(CERC)와 BK21 사업의 지원으로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Kimura, I. "Stability of Laminar-Jet Flame," 10th Symposium on Combustion, 1965, pp.1295.
 [2] Toong *et al.*, "Mechanisms of Combustion

Instability," tenth Symposium on Combustion, 1965, pp.1301.

[3] Park, P. M., "Experimental Study on the Pilot Flame Anchored Lean Laminar Premixed Flame," Ph.D. Thesis, KAIST, 2001.

[4] Lee, D. G., "Local Stability analysis of laminar premixed curved flames," Ph.D. Thesis, KAIST, 2004.

[5] Palm-Lewis, A. and Strehlow, R. A., "On the Propagation of Turbulent Flames," Combustion and Flame Vol.13, 1969, pp.111.

[6] Groff, E. G., "The Cellular Nature of Confined Spherical Propane-Air Flames," Combustion and Flame, Vol.48, p.51, 1982

[7] Higgins, B. J. Natural Phil. Chem. Arts, Vol.1, 1802, pp.129.

[8] Putnam, A. A. & Dennis, W. R., "Organ-pipe Oscillations in a flame-filled tube," Proc. Comb. Inst., Vol.4, 1953, pp.566.

[9] Gaydon, A. G. & Wolfhard, H. G., "Flames : Their Structure, Radiation and Temperature," Chapman and Hall, 1979

[10] Zeldovich, Ya. B., "The Mathematical Theory of Combustion and Explosions," Consultants Bureau, 1979

[11] Price, R. B. & Hurler, I. R. & Sugden, T. M., Proc. Comb. Inst., Vol. 12, 1968, pp. 1093.

[12] Keller, J. O. and Saito, K., Combustion Science and Technology, Vol. 53, 1987, pp. 137.