

## 파일럿 화염에 의해 고정된 관내 예혼합 화염의 진동 특성

곽영태\*\* · 오광철\* · 신현동\*\*

### Vibration Characteristics of Lean Premixed Flame Anchored by a Hydrogen Pilot Flame in a Tube

Young Tae Guahk, Kwang Chul Oh and Hyun Dong Shin

#### ABSTRACT

Lean laminar premixed propane and methane flames which were anchored by a hydrogen-pilot flame in a tube were investigated experimentally. The flame shapes were observed by varying mean velocity from 10cm/s to 140cm/s and equivalence ratio from 0.45 to 0.8.

In this study, behaviors of flames are divided into five regions such as tail-out, flash-back, flickering, stable and vibrating flames with respect to the mean velocity and the equivalence ratio.

Although the flames are unstable in both the flickering and the vibrating region, they have different characteristics such as the frequency, sound generation and creation process of flame curvature. The flickering region exists near the flammability limit and the flame flickers in a frequency of about 10Hz. When flame front is bended, the propane flame front is straightened and the methane flame front is bended more by thermo-diffusive instability. In the vibrating region, the flame vibrates emitting audible sound in a frequency of about 100Hz. In the boundary of vibrating region, the vibration of flame changes between two modes such as single frequency vibration and dual frequency vibration. Increase and decrease of vibration in each mode are determined by thermo-acoustic instability.

**Key Words** : Stability diagram(안정화 선도), Vibrating flame(진동 화염), Thermo-diffusive instability(열-물질 확산 불안정성), Thermo-acoustic instability(열-음향 불안정성), Rayleigh's index

#### 기 호 설 명

P' : 압력 변동(pressure fluctuation)

Q' : 열발생 변동(heat release fluctuation)

#### 1. 서 론

회박 연소는 에너지 절약과 연소 배가스 저감 측면 등에서 많은 장점을 가지고 있지만 연료가 회박한 조건이기 때문에 화염 자체는 많은 불안정한 요소들을 가진다. 여러 불안정성 중에는 열확산과 물질확산의 차이에 의해 발생하는 열-물질 확산 불안정성(thermo-diffusive instability), 화염에서 발생하는 열과 연소기의 음향조건에 의

\* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처, E-mail: [guahk@kaist.ac.kr](mailto:guahk@kaist.ac.kr)

Tel : 042-869-3057 Fax : 042-869-8820

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 교수

해 발생하는 열-음향 불안정성(thermo-acoustic instability)등이 있다. 열-물질 확산 불안정성은 Le수와 스트레치에 의해 결정되는데, 많은 실험과 계산에 의해 연구되어왔다. Markstein[1], Matalon과 Matkowsky[2], Clavin[3], Law[4]등은 Le수와 스트레치에 의한 연소속도와 단열화염온도의 변화 등을 유도하였다.

Palm-Lewis[5]와 Groff[6]는 둥근 화염(spherical flame) 전파시에 화염면의 모양이 Le수에 따라 달라진다는 것을 보였다. Sung[7]은 희박한 경우와 과농한 경우의 프로판 화염에서 blow-off에 미치는 효과를 실험하였다. 분젠 화염에 대해서도 Mizmoto[8]가 화염 팁이 혼합기의 Le수에 따라 팁 열림(tip opening)이 발생하는 것이 스트레치에 의한 것임을 밝혔다.

Park[9]은 파일럿 화염(pilot flame)에 의해 고정된 관내 예혼합 화염에서 소염 한계 근처의 희박 또는 과농 조건에서 Le수에 따른 화염의 전파 특성을 밝혔다.

열-음향 불안정성은 Higgins[10]가 singing flame에 대해서 연구한 후 지금까지 많은 연구가 진행되어져 왔는데, Putnam[11]은 화염 진동의 한 주기에 대해 열발생과 압력 변동의 곱의 적분값인 Rayleigh's index를 도입하여 진동의 증폭과 감소를 설명하였다.

관내 예혼합 화염은 화염거동에 따라 여러 부분으로 나뉘지는데, 이 논문에서는 그 중 열-물질 확산 불안정성이 관찰되는 필립업 영역, 열-음향 불안정성이 관찰되는 진동 영역에서의 화염특성 연구에 중점을 두었다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 연소기와 계측장치의 개략도이다. 연료로는 프로판과 메탄을 사용하였고 산화제로는 공기를 사용하였다. 예혼합기의 평균 유속 범위는 10~140cm/s이고 이때 유리관 내경 50mm를 기준으로 Re수는 360~5050이다.

예혼합기는 허니콤(honey comb), 수축 노즐(contraction nozzle)을 통과해서 파일럿 노즐(pilot nozzle)에 형성된 수소 파일럿 화염에서 점화되어 뒤집어진 원뿔 모양(inverted conical)의 화염을 형성한다. 이때 주위의 영향을 배제하기 위해 직경 50mm, 길이 40cm의 유리관을 설치하였다. 허니콤은 가로, 세로 1mm의 격자 구조를 하고 있으며 유동을 고르게 해주는 역할을 하고, 수축 노즐은 버너 출구에서의 유속을 고르게 해주는 역할을 한다. 파일럿 노즐은 외경 0.7mm의 가는 모세관을 사용하여, 예혼합기 유동의 교란

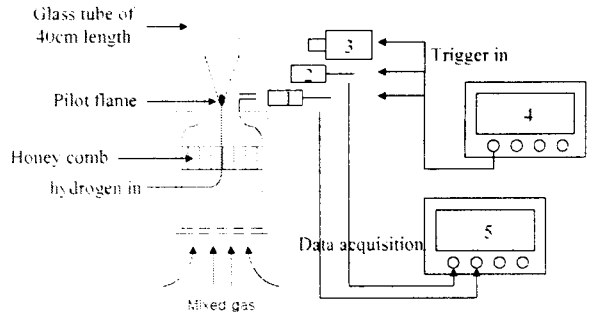


Fig.1 연소기와 계측기의 개략도

(1. Microphone 2. PMT 3. High speed camera 4. Delay generator 5. Oscilloscope)

을 최소화하였다. 파일럿 화염에 공급되는 수소의 양은 연료량에 비해 미소한 11.9ml/min으로 파일럿 노즐 직경 정도의 수소화염을 형성시켜 희박 예혼합화염을 안정화시키는데 사용하였다.

### 2.2 실험방법

먼저 파일럿 노즐에 수소연료를 공급하고 점화시킨 다음, 원하는 당량비에 맞게 공기와 연료의 양을 유량계를 조절하여 공급하면 화염이 파일럿 화염에 뒤집어진 원뿔 형태로 안정화된다.

화염의 순간상을 관찰하기 위하여 ICCD카메라(PI Instrument)를 사용하였고, 연속상을 관찰하기 위하여는 하이 스피드 카메라(high speed camera, Kodak Ektapro, 500frame/sec)를 사용하였다.

#### 2.2.1 열발생, 압력 변동 성분의 측정

진동 영역에서는 화염이 수십~수백 Hz로 화염이 진동하고 압력파가 발생한다. 이런 영역에서 음압과 열발생과의 관계를 살펴보기 위해 열발생 변동, 압력 변동, 그에 따른 화염 모양의 변화를 동시에 확인하였다. Microphone(type 4134, BRUEL&KJAER)은 버너 출구 위 1cm 부근에 도출관을 만들어 설치하였다. 이 때 주위에 수냉 자켓을 설치하여 열집중을 방지하였다. PMT(R212, Hamamatsu)는 전체적인 열발생의 변동을 측정하기 위하여 버너 출구로부터의 높이 5cm, 거리 30cm 부근에 설치하였다.

Delay generator(Model555, BNC)를 이용하여 PMT, 마이크로폰, 하이 스피드 카메라를 동기시켰다. 오실로스코프(DL 1640L, YOKOGAWA)를 사용하여 2kHz의 sampling rate로 데이터를 얻었고, FFT를 통해 주파수를 측정하였다.

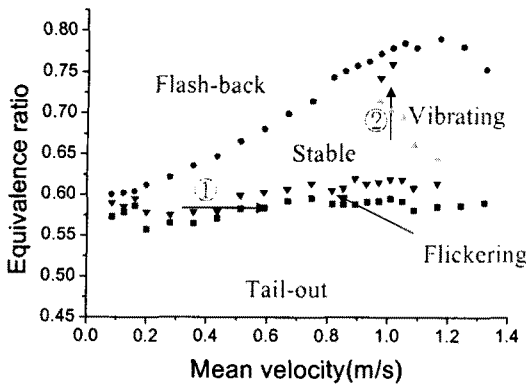


Fig.2a 프로판 화염의 안정화 선도

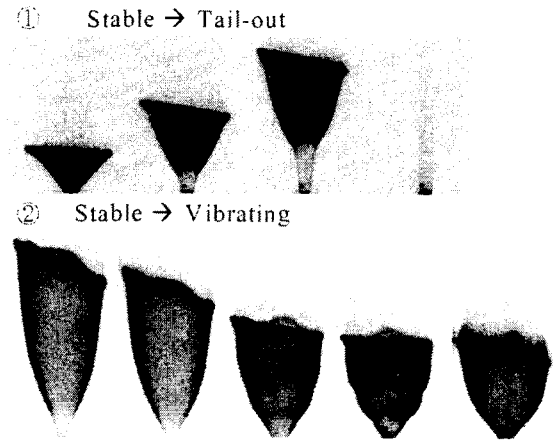


Fig.3a 프로판 화염의 모양 변화

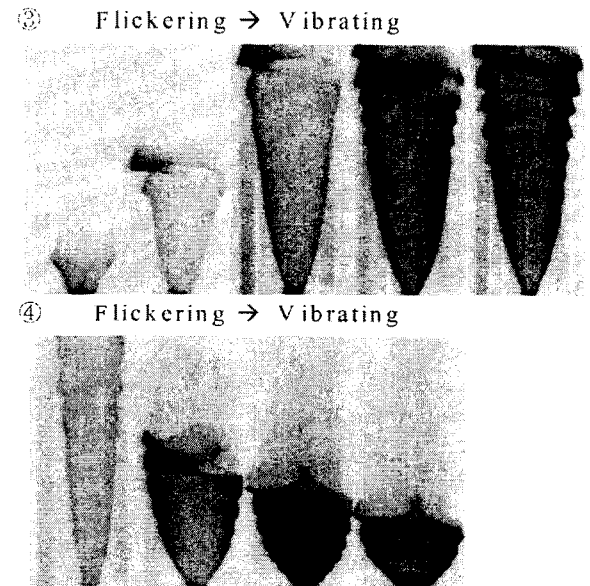
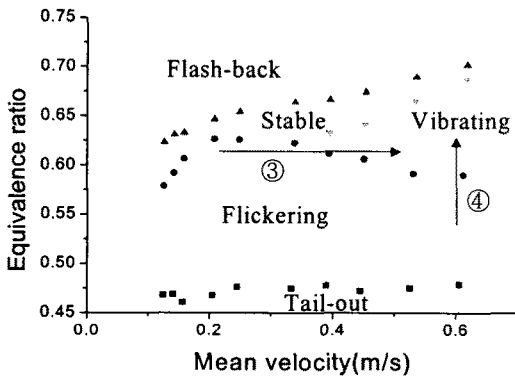


Fig.3b 메탄 화염의 모양 변화

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1.1 화염의 안정화 선도

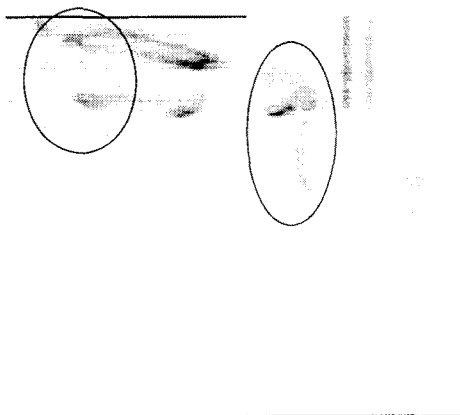
평균유속, 당량비 조건의 변화에 따라 화염의 모양과 특징을 관찰하였다. 그 결과 화염의 안정화에 따라 안정영역(stable region),역화영역(flash-back), tail-out 영역, 펄럭임(flickering) 영역, 진동영역(vibration region)의 다섯 가지 영역으로 나눌 수 있었다.

안정영역에서는 예혼합 화염이 뒤집어진 원뿔 형태로 파일롯 화염에 안정되게 부착되어 있다. 역화영역에서는 화염이 파일롯 노즐을 타고 버너 안쪽으로 들어가 화염이 역화한다. Tail-out 영역에서는 예혼합 화염이 blow-off되어 파일롯 화염만 존재한다. 펄럭임 영역에서는 tail-out 영역 근처에 존재하고 10Hz정도로 화염이 펄럭인다. 진동영역에서는 100Hz정도로 화염이 진동하고 소리를 발생시킨다.

#### 3.1.2 프로판 화염과 메탄 화염의 안정화 선도 비교

Fig.2a와 Fig.2b는 프로판 화염과 메탄 화염의 안정화 선도이다. 두 선도에서 각 영역의 위치는 다르지만 전체적인 모양은 비슷함을 볼 수 있다.

당량비를 기준으로 살펴보면 메탄 화염의 경우 프로판 화염에 비해 보다 희박 조건에서 tail-out 영역이 나타났으며 안정영역이 좁은 당량비 범위에서 존재함을 알 수 있었다. 안정 영역과 tail-out 영역 사이의 펄럭임 영역은 프로판 화염의 경우 매우 좁은 영역에서 나타났으나 메탄 화염에서는 넓은 영역에서 나타났다. 진동영역의 경우 메탄 화염의 경우가 프로판 화염보다 작은



(a)프로판 화염 (b)메탄 화염  
Fig.4 필릭임 영역에서 프로판 화염과 메탄 화염의 진파 모양 비교

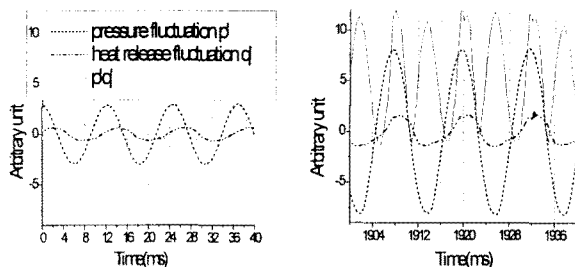
평균유속에서 존재하며 역화영역이 나타나는 당량비 조건은 거의 차이가 없었다.

### 3.1.3 화염면의 모양

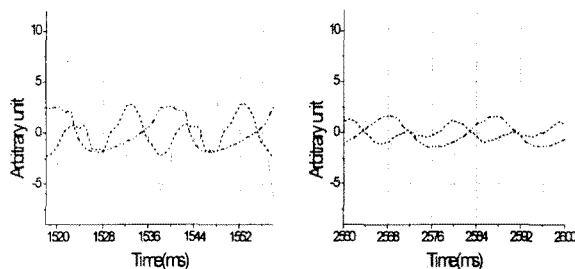
Fig.3a와 Fig.3b에 안정화 선도 상에서 평균 유속이나 당량비가 바뀔 때의 대표적인 화염면의 모양을 도시하였다. Fig.3a는 프로판 화염의 경우이고 ①은 당량비를 고정한 상태에서 평균 유속을 증가시켜 갈 때의 화염 모양의 변화를 나타내고 있다. 초기 원뿔 형태로 안정하게 존재하다가 평균 유속이 커지면 화염의 각도가 작아지고 파일롯 화염 근처에 원통형 화염이 생기게 된다. 이때 원통형 화염 하류에는 다시 원뿔 형태의 화염이 생성된다. 원통형 화염이 길어지다가 원뿔 화염에서 필릭이고 그 이후 blow-off되는 모습을 보인다. ②는 평균 유속을 고정한 상태에서 당량비를 증가시켜 갈 때의 모양으로 안정영역에서 진동영역으로 전이하는 과정이다. 당량비가 증가함에 따라 화염의 전체적인 길이가 짧아지며 진동영역에 이르게 되면 소리를 발생하면서 화염이 진동한다.

Fig.3b는 메탄 화염의 경우로, ③은 당량비를 고정한 상태에서 평균 유속을 증가시켜 갈 때 화염모양의 변화를 나타내고 있다. 필릭임 영역에서 유속이 증가하면서 진동영역으로 전이하며 유속이 증가함에 따라 화염 전체 길이가 증가하며 진동에 의해 화염면이 심하게 굴곡져 있음을 확인할 수 있다. ①과 같은 경향을 가지지만 원통형 모양의 화염이 생성되지 않는다. ④는 평균 유속을 고정하고 당량비를 증가시킨 경우이고 ②와 같은 경향을 가진다. 진동영역에서 프로판 화염의 굴곡수가 프로판 화염의 경우보다 많음을 볼 수 있다.

### 3.1.4 필릭임 화염과 진동 화염의 차이



(a) 초기 (b) 후기  
Fig.5 단일 주파수 진동화염의 압력 변동, 열발생 변동, Rayleigh's index



(a) 초기 (b) 후기  
Fig.6 이중 주파수 진동화염의 압력 변동, 열발생 변동, Rayleigh's index

필릭임 화염과 진동 화염 모두 불안정하지만 두 화염은 다른 특성을 가지고 있다. 첫번째로 화염 진동의 주파수가 다르다. 필릭임 화염의 경우 10Hz 부근, 진동 화염의 경우 100Hz 부근의 를 가진다. 두 번째로 소리의 생성 유무이다. 진동 화염의 경우 소리가 나고 필릭임 화염의 경우 소리가 나지 않는다. 이 사실은 진동 화염의 생성 원인이 음향과 관계가 있음을 뜻한다. 마지막으로 화염에 굴곡이 형성되는 과정이 다르다. 진동 화염의 경우, 화염 끝부분에서 화염의 진동이 시작되고 시간이 지나면 화염이 전체적으로 진동한다. 필릭임 화염의 경우, 파일롯 화염 근처에서 굴곡이 형성되어서 그 굴곡이 하류로 전파된다.

필릭임 영역, 진동 영역 각각의 특징은 다음 3.3과 3.4에 기술하였다.

### 3.3 열-물질 확산 불안정성

필릭임 영역에서의 프로판 화염과 메탄 화염의 전파에서 Le수의 영향을 볼 수 있었다. 유동 교란에 의해 화염에 굴곡이 생기면, Fig.4(b)에서처럼 Le수가 1보다 작은 희박 메탄 화염에서 상류에 대해 볼록한 화염면에 대해서는 화염대가 없는 열보다 예열대가 받는 메탄의 확산에 의한 화학적 에너지가 더 우세해서 화염면의 온도가 증

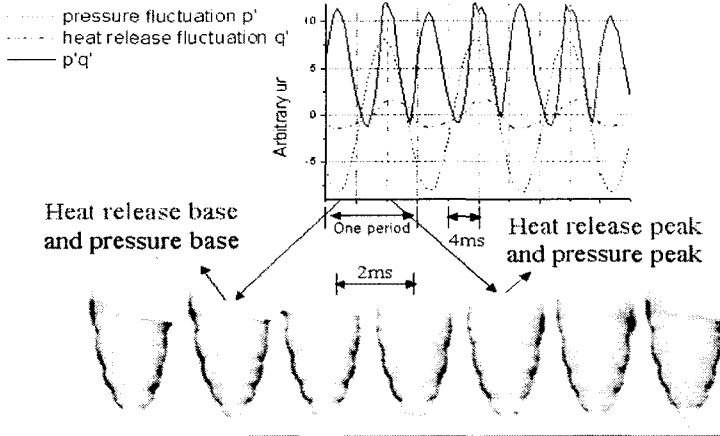


Fig.7 단일 주파수 진동화염의 모양

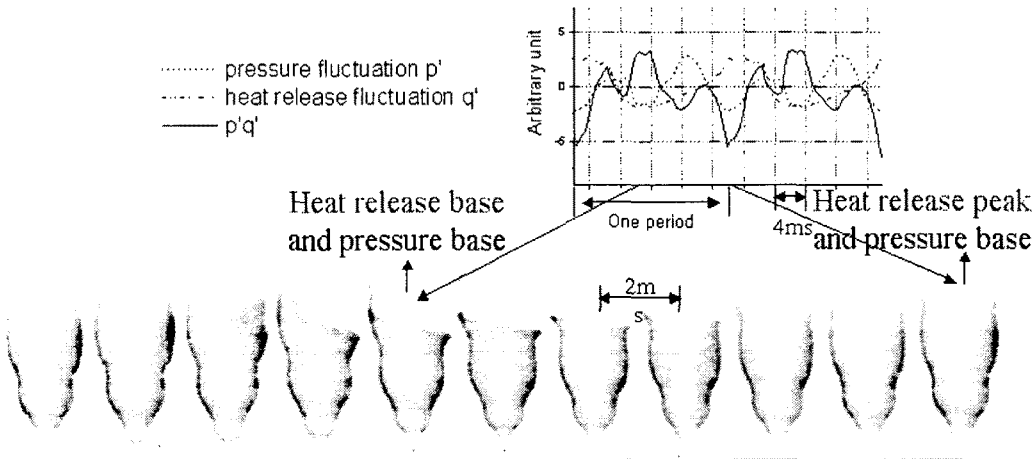


Fig.8 이중 주파수 진동화염의 모양

가한다. 그래서 연소속도가 증가하고 화염면이 상류로 전파하게 된다. 상류에 대해 오목한 화염면에서는 화염대가 잃는 열이 더 우세해서 온도가 감소해서, 연소속도가 감소하고 화염면이 하류로 전파하게 된다. 그 결과 유동에 교란이 있어 화염면에 굴곡이 생길 경우, 그 굴곡은 더 커지게 된다. Le수가 1보다 큰 회박 프로판 화염에서는 메탄의 경우와 반대의 경향이 나타나 유동에 교란이 있어 화염면에 굴곡이 생길 경우, 그 굴곡은 작아지게 되어 Le수가 화염의 안정화에 기여하게 된다.

**3.4 열-음향 불안정성**

열-음향 불안정성은 Rayleigh's index에 의해 대표된다.

$$\int_t^{t+T} P' \times Q' dt$$

여기서 P'은 압력 변동(pressure fluctuation), Q'은 열발생 변동(heat release fluctuation)을 나타낸다. 진동의 한 주기(T)동안 압력과 열발생의 변동의 곱이 양의 값을 가지면 그 진동은 증폭되고, 음의 값을 가지면 감소됨을 뜻한다.

본 실험에서는 열발생 변동 대신 CH radical 신호를 측정하여 Rayleigh's index를 계산하였다. 실험 결과 하이 스피드 카메라로 측정한 화염의 진동수와 CH radical신호의 주기가 일치함을 확인하였고, 기존의 연구결과(Price[12], Keller[13])에서도 전체적인 열 발생(global heat release rate)이 전체적인 CH radical 신호(global spontaneous emission of CH radical)와 비례한다는 것이 밝혀져 있으므로 열발생 변동 대신 CH radical 신호를 사용하여 Rayleigh's index를 계산하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

### 3.4.1 진동역역 경계에서의 화염의 진동

진동역역의 경계에서 열-음향 불안정성을 관찰할 수 있었다. 진동역역의 경계에서는 두 가지의 진동모드가 존재한다. 단일 주파수 화염진동(single frequency vibration) 모드와 이중 주파수 화염진동(dual frequency vibration) 모드로 나눌 수 있다. Fig.5와 Fig.6은 각각 단일 주파수 화염진동과 이중 주파수 화염진동 모드에서의 압력 변동, 열발생 변동, 압력 변동과 열발생 변동의 곱을 나타낸다. 한 주기에 대해 압력 변동과 열발생 변동의 곱을 적분하면 Rayleigh's index를 계산할 수 있다.

화염이 안정영역에서 진동영역으로 천이되면 먼저 단일 주파수의 화염진동이 발생한다. 단일 주파수 진동 초기에는 변동은 작지만, 열발생 변동과 압력 변동의 위상이 거의 일치함을 볼 수 있었다.(in phase) 이때 Rayleigh's index를 계산해보면 양의 값을 가지며, 시간이 지남에 따라 단일 주파수 진동의 진폭이 증가함을 관찰할 수 있었다. 화염의 진폭이 더 커지면 맥놀이 형태의 진동을 거치고 이중의 주파수를 가지는 진동형태로 변화한다. 이중 주파수 진동의 초기에는 진폭이 크지만, Rayleigh's index를 계산해보면 음의 값을 가지게 되며, 시간이 지남에 따라 진폭이 감소함을 볼 수 있다.

진폭의 감소가 계속되어 진동이 멈춘 후에는 다시 단일 주파수 진동 모드가 시작되어 앞의 과정을 반복한다.

### 3.4.2 단일 주파수 진동 모드와 이중

#### 주파수 진동 모드에서의 화염 모양

단일 주파수 진동 모드와 이중 주파수 진동 모드에서의 화염모양을 고속 카메라로 관찰한 결과를 Fig.7과 Fig.8에 도시하였다. 단일 주파수 진동 모드를 관찰해 보면, 초기에는 화염의 끝단(유리관과 닿는 부분)에서 작은 진폭으로 화염면이 진동하고, 시간이 지나면 진폭이 증가하고 파일럿 화염 근처에서도 화염이 진동함을 볼 수 있었다. Fig.7은 단일 주파수 진동 모드 후기의 화염 모양이다. 압력이 최소점일 때 유속 변동이 최고점이 되어 파일럿 화염 근처의 에혼합 화염이 하류로 밀리게 되고, 압력이 최고점일 때 유속 변동이 최저점이 되어 상류로 당겨짐을 볼 수 있다.

Fig.8은 이중 주파수 진동 모드의 화염 모양이다. 파일럿 화염 근처에서 화염의 굴곡 크기가 균일하게 생성되는 단일 주파수 진동 모드와는 다르게 화염 굴곡이 생성됨을 알 수 있다. 압력 변동을 보면 큰 peak와 작은 peak가 있으므로

속도 변동에도 큰 peak와 작은 peak가 생성된다. 속도 변동이 큰 peak에서는 큰 굴곡의 화염, 작은 peak에서는 작은 굴곡의 화염이 생성된다. 작은 굴곡의 화염은 하류로 갈수록 큰 굴곡의 화염에 합치게 되어 열발생의 변동은 압력의 큰 peak의 주거나 작은 peak의 주기와 일치함을 볼 수 있다.

## 4. 결론

본 연구는 수소 파일럿 화염에 의해 고정된 희박영역의 프로판, 메탄 에혼합 화염을 평균유속  $10 \sim 140 \text{ cm/s}$ , 당량비  $0.45 \sim 0.8$ 의 범위에서 열-물질 확산 불안정성, 열-음향 불안정성을 관찰하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 프로판 화염과 메탄 화염을 안정화 모드에 따라 안정영역(stable region), 역화염영역(flash-back region), tail-out영역, 필럭임 영역(flickering region), 진동영역(vibrating region)의 다섯 가지 영역으로 나눌 수 있었다.

2. 필럭임 영역과 진동 영역은 모두 불안정하지만 화염 진동 주파수, 소리의 생성 유무, 화염의 굴곡 생성 과정 등과 같은 서로 다른 특성을 가진다.

3. 필럭임 영역에서의 프로판 화염과 메탄 화염의 전파에서 Le수의 영향을 볼 수 있었다. 유동 교란에 의해 화염에 굴곡이 생겼을 때 Le수가 1보다 작은 희박 메탄 화염에서는 Le수가 화염을 불안정하게 하는 역할을 하여 화염의 굴곡이 커지면서 하류로 전파하지만 Le수가 1보다 큰 희박 프로판 화염에서는 Le수가 화염의 안정화에 기여하여 화염 굴곡의 변화없이 하류로 전파한다.

4. 진동영역의 경계에서 열-음향 불안정성을 관찰할 수 있었다. 진동영역의 경계에는 단일 주파수 화염진동(single frequency vibration) 모드와 이중 주파수 화염진동(dual frequency vibration) 모드가 존재한다. 이 두 모드는 루프를 형성하여 계속 반복되는데 단일 주파수 화염진동 모드에서는 Rayleigh's index가 양의 값을 가져서 진폭이 증폭되고 이중 주파수 화염진동 모드로 전환된 후 Rayleigh's index가 음의 값을 가져서 진동이 감소하고 사라지게 된다.

## 후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원을 받았습니니다.

## 참고문헌

- [1] Markstein, G. H., "Nonsteady Flame Propagation", Pergamon, 1964
- [2] Matalon, M. and Matkowsky, B. J., "Flames in Fluids : Their interaction and stability", Combustion Science and Technology, Vol.34, p.295, 1983
- [3] Clavin, P., "Dynamic Behavior of Premixed Flame Fronts in Laminar and Turbulent Flows", Prog. Energy Combust, Sci., Vol.11, p.1, 1985
- [4] Law, C. K., "Dynamics of Stretched Flames", Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, p.1381, 1988
- [5] Palm-Leis, A. and Strehlow, R. A., "On the Propagation of Turbulent Flames", Combustion and Flame Vol.13, p.111, 1969
- [6] Groff, E. G., "The Cellular Nature of Confined Spherical Propane-Air Flames", Combustion and Flame, Vol.48, p.51, 1982
- [7] Sung, C. J. and Law, C. K., "On Adiabatic Stabilization of Inverted Flames", Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, p.205, 1992
- [8] Mizmoto, M., Asaka, Y., Ikai, S. and Law, C.K., "Effects of Preferential Diffusion on the Burning Intensity of Curved Flames", Twentieth Symposium (International) on Combustion, p.1944, 1984
- [9] Park, P. M., "Experimental Study on the Pilot Flame Anchored Lean Laminar Premixed Flame", Ph.D. Thesis, KAIST, 2001
- [10] Higgins, B., J Natural Phil Chem Arts, Vol.1, p.129, 1802
- [11] Putnam, A. A. and Dennis, W. R., "Organ-pipe Oscillations in a flame-filled tube", Proc. Comb. Inst., Vol.4, p.566, 1953
- [12] Price, R. B., Hurle, I. R. and Sugden, T. M., Proc. Comb. Inst., Vol.12, p.1093, 1968
- [13] Keller, J. O. and Saito, K., Combustion Science and Technology, Vol.53, p.137, 1987