

# 급격한 평균유속 변동에 의한 관내 Air/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 예혼합 화염의 소화 특성에 관한 실험적 연구

김남일<sup>†</sup> · 이은도\* · 신현동\*\*

(2000년 9월 8일 접수, 2001년 2월 27일 심사완료)

## An Experimental Study on the Flame Characteristics of the Air/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> Premixed Flame Using Large Axial Mean Velocity Variation

Nam Il Kim, Uen Do Lee and Hyun Dong Shin

**Key Words :** Premixed Flame(예혼합 화염), Flame Propagation in a Tube(관내 화염 전파), Stretch(스트레치), Velocity Variation(유속변동), Extinction Boundary Layer(소화경계층)

### Abstract

Many previous researches on the premixed flame in a tube have treated the unsteady flame behaviors in which the shape, position and intensity of the flame varied, but more detail and fundamental research has been necessary. The flame stabilization condition in a tube, a unique steady state, and the unsteady behaviors, using the stabilization condition as an initial condition, were carried out in recent years. In this paper, propane-air premixed flame was stabilized in a tube and the flame behavior was observed when the mean velocity variation was imposed into the opposite direction of the initial mean velocity. The velocity variation is larger than the burning velocity and longer than the reaction time scale. During the period of the velocity variation flame is not extinguished. But after the period of the mean velocity variation the flame could be re-stabilized or be extinguished depending on the experimental conditions: equivalence ratio, period of velocity variation and magnitude of velocity variation. The extinction mechanisms were classified into the two cases, one is caused by the flame stretch in the shear layer near the wall, and the other is caused by the vortices and vortexes, which are generated by the acoustic waves.

### 기호설명

- $D_i$  : tube 내경
- $D_o$  : tube 외경
- $V_f$  : 화염 전파 속도
- $x$  : 축방향 좌표
- $x_i$  : 화염 초기 위치
- $r$  : 반경방향 좌표
- $\phi$  : 당량비
- $V_m$  : 초기 평균 유속
- $\Delta t$  : 유속변동의 지속시간
- $\Delta V_m$  : 유속변동의 크기
- $\Delta L$  : 스트로크(관 기준)

### 1. 서론

관내 예혼합 화염의 전파에 관한 연구의 대표적인 사례는 소멸거리(quenching distance)의 측정과 역화(flash back)의 조건에 관한 실험 등이 있다. 이러한 연구는 화염의 공간상의 비정상 전파를 다루고 있으며 화염은 열전달, 화염 근처의 유동, 경압 불안정(hydrodynamic instability)과 압력의 변화 등에 영향을 받는다. 이 같은 화염 전파의 특성을 가장 극명하게 보여준 실험의 예가 밀폐되거나 한쪽 끝이 열린 관내를 전파하는 화염에 관한 연구이다. 많은 연구자들이 finger flame, tulip flame 등 특이한 모양의 화염전파 형태를 관찰하고 그 현상을 설명하기 위해 많은 실험과 수치해석을 행하였다.<sup>(1-6)</sup> 특히 화염면 근처에서의 유동장의 특성에 의한 화염 전파 특성을 다루기 위해 스피커(loud speaker), 충격파(shock) 등을 이용한 추가적인 유

<sup>†</sup> 책임저자, 한국과학기술원 기계공학과

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hdshim@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3017 FAX : (042)869-3090

속변동을 가한 실험들이 행해지기도 하였다.<sup>(7-11)</sup> 그러나 기존 연구자들의 경우 유속변동의 크기가 큰 경우 지속시간이 반응시간 스케일에 비해 상대적으로 작고, 지속시간이 큰 경우에는 유속변동의 크기가 연소속도에 비해 충분히 크지 않아서 관내 평균유속의 변화에 따른 화염의 비정상 거동 특성을 다루기에는 부족한 면이 많았다.

본 연구에서는 연소속도보다 충분히 크고 반응시간 스케일 보다 충분히 긴 유속변동을 관내에 정지한 화염에 가함으로써 흥미로운 결과들을 도출할 수 있었다.

특히, 본 저자들은 선행 연구<sup>(12)</sup>에서 관내 화염의 정지조건에 대해 희박한계 근처에서의 화염이 1 차원 구조를 가짐을 보였으며, 화염정지를 위해 공급된 초기유속과 동일한 방향의 유속변동의 경우 화염이 벽면근처에서부터 소화되어 시간이 경과함에 따라 관의 중심부까지 소화영역이 성장하는(경계층의 성장과 유사한) 소화경계층(extinction boundary layer)의 존재를 확인하였다. 그리고 소화경계층의 성장에 의한 관내 화염의 완전 소화에는 일정속도 이상의 시간과 유속변동 크기가 요구됨을 보였으며, 그 원인이 큰 유속변동에 의해 반응시간 스케일보다 짧은 시간 내에 변화한 벽면근처에서의 화염 스트레치의 비정상(unsteady) 변화로 설명될 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 주로 초기유속과 반대방향의 유속변동을 가했을 때 발생하는 완전소화 조건과 완전소화에 이르는 과정에 대한 원인을 다루었다. 이러한 연구는 예혼합 화염의 전파특성에 대한 새로운 이해를 도울 뿐 아니라 평균유속이 있는 관내에 역화가 발생할 때 최소한의 유동 증감으로 역화를 제어하는데 기본적인 이론으로 쓰일 수 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 실험부인 석영관(quartz tube)과 유속 변동부로 구성된다. 석영관의 내경( $D_i$ )은 46mm, 외경( $D_o$ )은 50mm, 길이 1200mm 이다. 유속변동부는 직경 120mm 의 작동피스톤(working piston)과 유속변동의 크기와 지속시간을 조절하기위해 압력실, 니들 밸브, 솔레노이드 밸브, 스톱퍼를 포함하는 가동부로(actuator)로 구성된다. 사용된 연료는 99% 이상의 순수 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)과 공기의 혼합기이며 당량비( $\phi$ )는 0.54-0.62 이다.

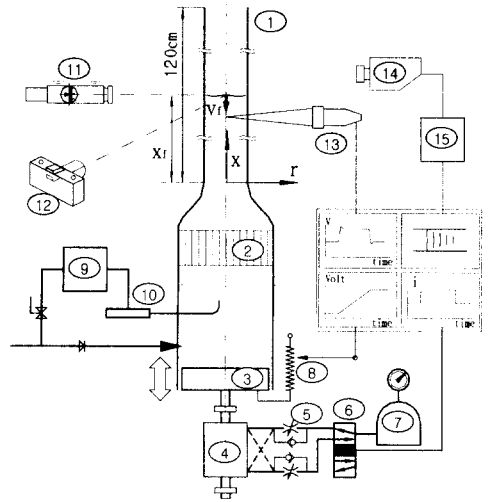


Fig. 1 Experimental setup (1. quartz tube ( $D_i = 46\text{mm}$ ,  $D_o = 50\text{mm}$ ) 2. flow straighter, 3. working piston, 4. actuator, 5. speed controller, 6. solenoid valve, 7. pressure tank, 8. linear potentiometer, 9. particle generator, 10. particle seeding nozzle, 11. cathetometer, 12. camera, 13. LDV, 14. High speed ICCD, 15. image processor)

### 2.2 실험방법

화염의 질량소모량과 동일한 유량의 예혼합기를 관내에 공급함으로써 예혼합 화염을 관내의 일정한 위치( $x \approx 60\text{cm}$ )에 정지시킬 수 있다. 이러한 조건에 대한 고찰은 선행 연구에서 자세히 다루었다. 그 결과 본 장치에서는 당량비 0.54-0.60 사이에서 1 차원 화염으로 가정이 타당한 조건임을 보였다.

본 연구에서는 정지한 화염 상류의 예혼합기와 벽면의 온도분포를 열전대를 이용해 측정하고, 유속변동을 가했을 때 화염의 거동을 고속 고감도(high speed intensified) CCD 카메라를 이용해 관찰하고, 비반응 유동장의 유속변화를 LDV 를 이용해 측정하였다. 초기 평균 유속의 방향과 동일한 방향의 유속변동을 정방향 유속변동( $\Delta V_m > 0$ )이라고 하고 반대방향의 유속변동을 역방향 유속변동( $\Delta V_m < 0$ )이라고 하였다.

유속 변동의 크기( $\Delta V_m$ )와 스트로크( $\Delta L$ )는 작동피스톤의 이동속도와 변위를 측정하여 피스톤과 관의 단면적 비를 고려해 관에 대한 값으로 환산하여 실험 변수로 사용하였다.

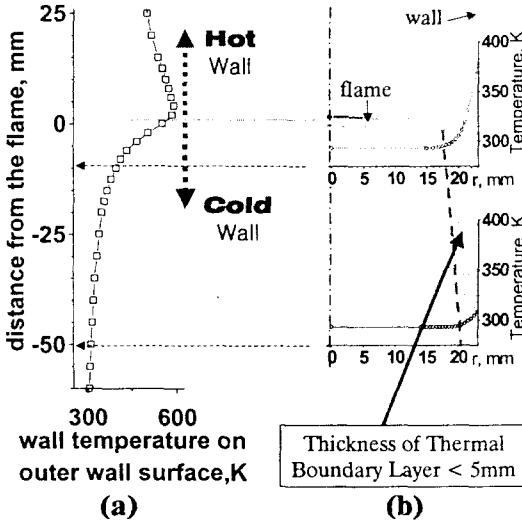


Fig. 2 Wall temperature and thermal boundary layer

3. 실험 결과

3.1 온도 측정

열전대를 이용하여 화염근처에서의 벽면의 온도와 반경방향으로의 온도분포를 측정된 것이 Fig. 2이다. Fig. 2(a)는 정지한 화염으로부터 상대거리에 따른 외벽 표면의 온도분포이다. 화염이 관내에 정지하였을 때 연소가스에 의해 화염 후류쪽의 벽면의 온도는 상승하며 벽면을 통해 상류로 전도된 열에 의한 벽면의 온도상승은 화염으로부터 50mm 이상 떨어진 상류에서는 무시할 수 있다. Fig. 2(b)는 화염으로부터 상류쪽으로 각각 10mm, 50mm 지점에서의 반경방향 미연가스의 온도 분포이다. 온도가 상승하는 열경계층의 두께는 화염의 위치에서 대략 5mm 이하의 두께를 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 다루는 관내 화염의 상당부분에 대해 반경 방향으로의 열손실을 무시할 수 있다.

3.2 유속변동에 의한 화염 소화

정지한 화염에 정방향 혹은 역방향 유속변동을 가할 때 화염은 각각 하류와 상류로 강제적으로 움직이게 되는데, 저자들은 선행 연구<sup>(12)</sup>에서 두가지 화염전파 형태에서 뚜렷한 차이점을 발견하였다.

Fig. 3 과 같이 정방향 유속 변동의 경우 화염이 뜨거운 벽면 내로 움직이므로 역방향에 비해 벽면으로의 열손실이 적음에도 불구하고 벽면 근처에서의 소화 영역이 발생하는 것을 발견하였다. 이

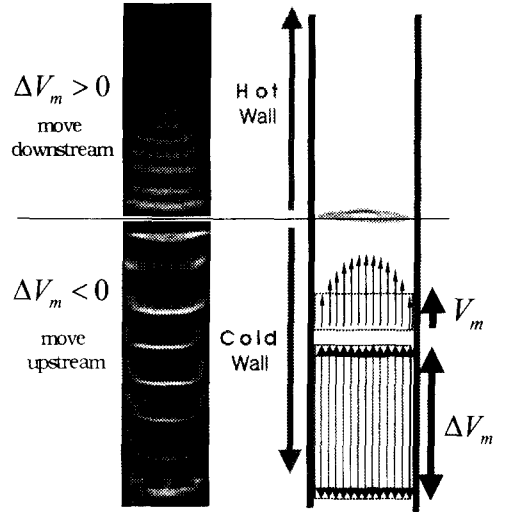


Fig. 3 Characteristics of the flame propagation for the direction of the velocity variation

러한 소화영역은 시간이 경과함에 따라 관의 중심부까지 소화영역이 성장하고 결국 관내에 화염이 모두 소화 되기도 하는데, 이를 소화 경계층(extinction boundary layer)이라 명하였다. 그리고 이러한 현상을 벽면근처의 전단류에 의한 화염면 방향의 스트레치로 설명하였다. 반면에 역방향 유속변동의 경우 화염이 차가운 벽면 내를 전파하게 되지만 유속변동이 가해지는 동안 벽면근처에서의 소화는 발생하지 않았다. 그러나 역방향 유속변동이 종료된 이후에 화염이 강한 진동을 겪게 되는데, 이러한 과정에서 유속변동의 지속시간, 유속변동의 크기, 당량비 등에 따라 화염은 소화되기도 하고 안정화 되기도 한다. 그리고 소화되는 화염의 경우에도 소화 과정에서 발생하는 화염의 거동 특성에 뚜렷한 차이가 발견되었다. 본 연구에서는 그 특성과 원인에 대해 주로 살펴 보았다.

3.3 역방향 유속변동

3.3.1 속도의 시간 응답

역방향 유속변동이 가해질 때 비반응 유동장의 시간에 따른 속도변동을 LDV 를 이용하여 측정된 결과가 Fig. 4이다. 측정 위치는  $r=0, x=60\text{cm}$  지점이며 중심에서의 측방향 유속의 초기 측정값이 평균 유속의 2 배의 값을 가지는 완전 발달된 유동이다. 평균유속변동( $\Delta V_m$ )이 가해지면 관 중심에서 측정된 실제 유속은 평균유속의 값보다 더 큰 변화를 겪게 되는데, 이는 벽면근처에서의 속도 경계층의 성장의 결과이다.

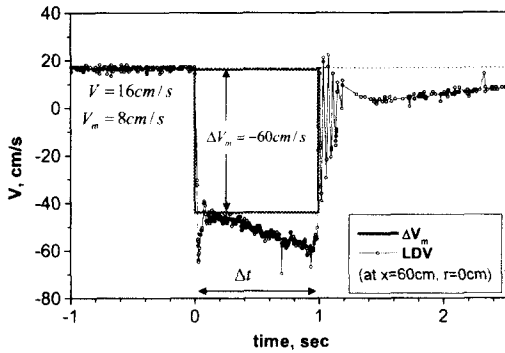


Fig. 4 Measured velocity at the center of the tube in a cold flow

임의로 가한 평균유속 변동이 종료될 때 급격한 유속 변동으로 인한 음향파(acoustic wave)가 관내에 지배적으로 발생한다. 음향파에 의한 유속변동의 크기가 평균 유속의 값보다 큰 기간을 음향파 기간이라 하였다. 본 장치의 특성상 대략적인 음향파의 주파수는 약 30Hz 정도이다.

3.3.2 역방향 유속변동과 소화 특성

역방향 유속변동이 가해지면 유속변동이 발생하는 기간( $\Delta t$ ) 동안에는 본 연구의 실험범위 내에서 소화가 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 하지만 강제적인 유속변동이 종료되면 화염은 음향파에 노출되게 되고 경우에 따라서는 음향파가 존재하는 동안에 소화가 발생한다. 유속변동의 크기가 클수록 유속변동 이후에 발생하는 음향파의 크기도 증가한다. 만일 화염이 음향파가 존재하는 동안 소화되지 않으면 화염은 관내 유동이 초기의 평균유속으로 회복되는 동안 후류로 밀리며 소화되기도 하지만, 이 기간동안 소화되지 않은 화염은 초기위치 근처로 돌아가서 다시 안정화 된다. 관내 화염면이 국부적으로 소화되는 경우와 대별하여 관내 화염이 모두 소화되는 경우를 완전소화라(eventual extinction) 하였다.

역방향 유속변동이 가해질 때 화염의 완전소화 조건을 행정거리와 유속변동의 크기에 대해 당량비 별로 나타낸 것이 Fig. 5 이다. 각각의 선은 정해진 당량비에 대한 소화한계선으로 그 오른쪽 영역에서는 소화가 발생하고 왼쪽 영역에서는 소화가 발생하지 않는다. 특히 낮은 당량비의 경우(0.55-0.56) 실험 영역에서 확연히 다른 두 가지 소화모드가 존재하는 것을 관찰 할 수 있었다. 이는 앞서 언급한 것처럼 화염이 음향파에 의해 소화되는 경우와 음향파가 종료된 이후 하류로 이동하면서 발생하는 소화경계층의 성장에 의해 소화되는

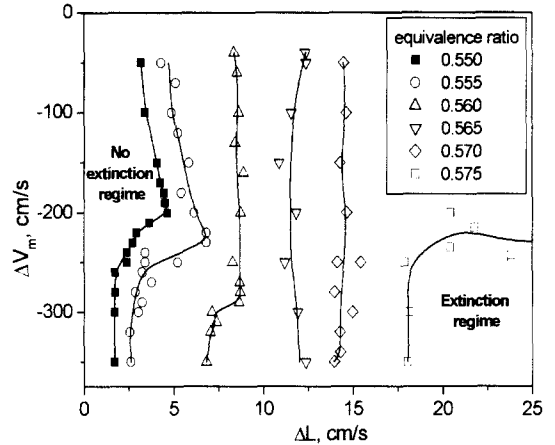


Fig. 5 Characteristics of the eventual extinction for the negative velocity variation

경우로 구분되어 진다.

Fig. 6 은 당량비 0.550 에 대한 실험 결과를 영역별로 구분한 것이다. 소화한계선의 왼쪽에서는 소화가 발생하지 않고 화염이 다시 초기 위치에 안정화 된다. 소화한계선의 오른쪽에서는 완전소화가 발생하는데, 역방향 유속변동의 특정 크기를 경계로 소화의 주된 원인과 소화과정에서의 화염의 거동에 차이를 볼 수 있다. 특정속도의 위쪽 영역에서는 화염이 하류로 움직이며 가장자리부터 소화가 발생하는 경계층 소화영역이며 그 아래쪽은 강한 음향파 기간에 소화가 발생하는 음향파 소화영역이다. 각각의 영역을 경계로 표시된 a-g 의 일곱 개의 실험조건에 대해 고속 고감도 CCD 카메라와 영상처리 시스템을 이용하여 화염 이미지를 나타낸 것이 Fig. 7 이다.

가장 왼쪽의 이미지와 c, d 의 가장 오른쪽의 이미지는 시간 변화하는 화염의 이미지를 중첩하여 나타낸 것이며, 나머지 이미지들은 임의의 순간에 대한 것들이다. 각각의 경우에 대한 이미지는 왼쪽부터 시간순서이며 다양한 이미지 중에서 모양이 특이한 것들을 도시한 것으로 시간간격은 일정하지 않다.

화염거동의 특성은 유속변동 측정, 완전소화조건, 그리고 고속촬영된 화염모양으로부터 비소화(no extinction), 경계층소화(boundary layer extinction), 음향파에 의한 소화(acoustic wave extinction)로 구분될 수 있다.

비소화: a, b 의 조건에서 화염은 역방향 유속변동이 가해지는 동안 상류로 전파(그림에서 아래쪽)하고 유속변동 기간 이후에는 관내에 발생하는 음향파에 의해 복잡한 유속변동에 노출되게 된다.

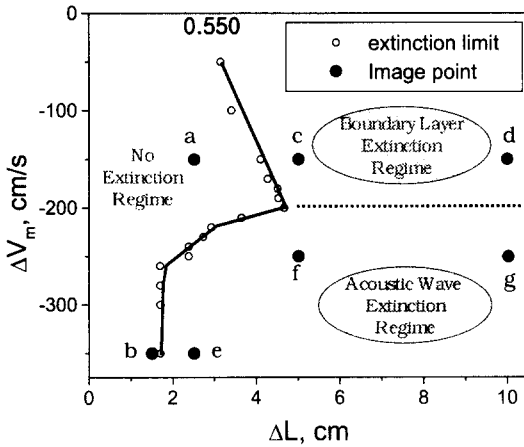


Fig. 6 Classification of the characteristics of the eventual extinction for a negative velocity variation when the equivalence ratio is 0.550

화염은 음향파가 지배적인 시간동안 비교적 강한 자발광을 가지는 다양한 화염형상을 거친 후 음향파 감소에 따라 하류로 전파하여 다시 초기의 화염위치에 동일한 모양으로 안정화 된다.

경계층 소화: c, d 의 조건에서 화염은 마찬가지로 유속변동의 기간동안 상류로 전파하고, 음향파에 의해 교란 받지만 그 이후에 화염이 초기의 위치로 이동하는 동안 벽면 가장자리부터 소화가 발생하여 결국 화염이 완전히 소화되게 된다. 앞서 언급한 소화경계층의 성장에 의한 소화가 이에 해당한다. 이는 유속변동에 의해 상류로 이동한 화염이 비교적 저온의 벽면에 노출되면서 화염면의 평균 온도가 떨어지고 그 결과 전체적인 예혼합기의 질량 소모량이 감소하므로 화염이 하류로 이동하는 과정에서 하류로의 전파 속도가 충분히 큰 경우에 해당한다.

음향파 소화: e, f 의 조건에서 화염은 상류전파, 음향파 교란 기간동안 화염의 자발광 강도가 급격히 저하되면서 넓은 공간에 번지듯이 소화되는 현상을 보인다.

#### 4. 고찰

경계층 소화의 경우 역방향 유속변동이 종료된 후 화염이 초기의 화염위치로(하류로) 이동하는 과정에서 발생한다. 관내 예혼합 화염에서 화염대 근처의 벽면의 온도는 화염으로 공급되는 예혼합기의 온도 상승과 화염으로부터의 열손실에 영향을 미쳐 화염의 질량소모량을 결정한다. Fig. 4 와 같은 벽면의 온도분포에서 화염이 역방향 유속변동에 의해 상류로 움직이면 화염은 상대적으로 많

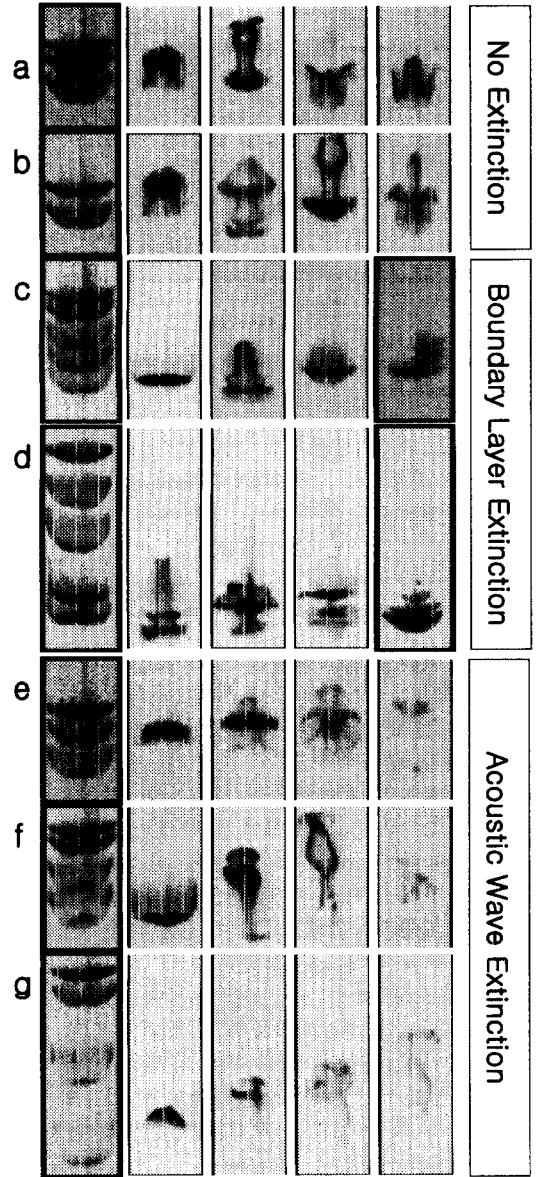


Fig. 7 Classification of the flame propagation and extinction modes

은 열손실과 예혼합기의 온도 감소로 질량소모량이 감소하고 유속변동이 종료되면 초기의 화염위치로 전파하게 된다. 따라서 화염이 초기 위치에서 상류쪽으로 보다 멀리 움직일수록(스트로크가 클수록) 강제 유속변동이 종료된 이후 하류로의 전파 속도가 증가하게 된다. 이러한 과정에서 경계층 소화에 의한 완저소화가 발생하기 위해서는 하류로 움직이는 화염 속도가 특정 속도이상이어야 하는데, 당량비가 높을수록 더 큰 소화 임계

속도를 요구하게 되고 벽면 온도차에 의한 하류방향으로의 화염전파속도에는 한계가 있으므로 일정 당량비 이상에서는 경계층 성장에 의한 완전소화를 관찰할 수 없었다. Fig. 6 에서 당량비 0.575 일 때의 조건이 이에 해당한다. 이 같은 소화 경계층의 성장은 유속변동에 의해 발생한 벽면 근처의 강한 속도 전단층이 화염을 소화시키고 이 영역이 시간이 지남에 따라 관 중앙까지 전파해 가는 것으로 설명된다.

음향파 소화의 경우 기본적으로 유속변동의 크기가 매우 중요한 것을 알 수 있다. 이는 결국 일정한 관내 고유 주파수(본 장치에서는 30Hz 정도)에 대해 유속변동의 크기가 결국 임펄스의 크기를 결정하기 때문이다. 이는 음향적 임펄스에 의해 발생하는 축방향 유속의 반경방향 불균일이 vortices 와 vortex 를 형성하고 이것이 화염면을 굴곡 시키거나 찢고, 이로 인해 화염대 전후의 유동장 전체가 보다 복잡한 형태로 바뀌고 화염대가 강한 스트레치에 노출되므로 특정속도 이상에서는 완전 소화를 발생시키게 된다. 이때 유속변동의 스트로크가 증가는 유속변동의 지속시간의 증가와 역방향 유속변동에 대한 입구영역으로부터의 거리 증가를 의미하며 화염은 상류방향으로 보다 더 불룩한 형태가 되고 화염 강도의 저하가 예상된다. 이는 결국 음향파가 발생하는 기간에 대해서만 생각할 때 초기조건으로서의 화염의 강도 저하를 의미하므로 특정 스트로크 이상에서 보다 확실히 화염의 소화를 관찰할 수 있다.

## 5. 결론

관내에 안정화된 화염에 초기유속과 반대방향의 유속변동을 가하고 화염의 전파 특성과 완전소화를 일으키는 조건을 실험하였다. 완전소화를 일으키는 조건은 소화경계층의 성장에 의한 경우와 음향파에 의한 소화로 구분될 수 있다. 소화경계층의 소화는 화염의 이동에 따른 열손실과 그로 인한 하류로의 전파 과정에서 발생하는 벽면 근처에서의 전단류에 의한 소화경계층의 성장으로 설명된다. 음향파에 의한 소화는 스트로크의 증가에 의한 음향파 기간의 초기조건으로서의 화염강도의 감소와 유속변동크기의 증가에 의한 vortices, vortex 의 생성이 화염면을 굴곡 시키고 궁극적으로 완전소화를 일으키는 것으로 설명된다.

## 후 기

본 연구를 위한 연소기술연구센터의 연구비 지원에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Lewis, B., Elbe, G., (1987) "Combustion, Flames and Explosions of Gases," ACADEMIC PRESS, INC.
- (2) Salamandra, G. D., (1958), "Formation of Detonation Wave During Combustion of Gas in Combustion Tube," *Proc. Combust. Inst.* 7: 851~855.
- (3) Starke, R., Roth, P., (1986) "An Experimental Investigation of Flame Behavior During Cylindrical Vessel Explosions," *Combust. Flame*, 66, 249~259.
- (4) Dold, J. W., Joulin, G., (1995) "An Evolution Equation Modeling Inversion of Tulip Flames," *Combust. Flame*, 100, 450~456.
- (5) Clanet, C., Searby, G., (1996) "On the 'Tulip Flame' Phenomenon," *Combust. Flame*. 105, 225~238.
- (6) Hackert, C. L., Ellzey, J. L., Ezekoye, O. A., (1998) "Effects of Thermal Boundary Condition on Flame Shape and Quenching in Ducts," *Combust. Flame*, 112, 73~84.
- (7) Markstein, G., (1956) "A Shock Tube Study of Flame Front Pressure Wave Interaction," *Proc. Combust. Inst.* 6: 387~398.
- (8) Kaskan, W. E., (1953) "An Investigation of Vibrating Flames," *Proc. Combust. Inst.* 4: 575~591.
- (9) Clavin, P., Pelcé, P., He, L., (1990) "One-Dimensional Vibratory Instability of Planar Flames Propagating in tubes," *J. Fluid Mech.* 216, 299~322.
- (10) Searby, G., Rochwerger, D., (1991) "A Parametric Acoustic Instability in Premixed Flames," *J. Fluid Mech.* 231, 529~543.
- (11) 최병일, 신현동, "원관내에서 진동하는 예혼합 화염의 거동에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 1998년도 춘계학술대회논문집 B, pp. 308~313.
- (12) Kim, N. I., Lee, U. D., Shin, H. D., (2000) "Laminar Premixed Flame Propagation Using Large Axial Velocity Variation," *Proc. Combust. Inst.* 28: to be published.