

# 정상초음파가 개재하는 프로판/공기 예혼합화염의 구조 거동

이상신\* · 서항석\* · 김정수\*\*† · 이도형\*\*

## A Structural Behavior of the Propane/Air Premixed Flame Interacting with an Ultrasonic Standing-wave

Sang Shin Lee\* · Hang Seok Seo\* · Jeong Soo Kim\*\*† · Do Hyung Lee\*\*

### ABSTRACT

An investigation into the influence of ultrasonic standing wave on the structural behavior of propane/air premixed flame has been made to get a clue to the combustion reaction acceleration and combustion instability, as well. Visualization technique utilizing the Schlieren method was employed for the observation of structural variation of the premixed flame. The flame shape and propagation velocity were measured according to the variation of equivalence ratio. It was found that the standing wave distorted the flame front and expedited a transition to the flame with turbulent nature.

### 초 록

연소기 내의 연소반응 촉진 및 연소불안정성 해결의 단초를 제공하기 위해, 정상초음파가 개재된 프로판/공기 예혼합화염의 구조거동을 고찰하는 연구를 수행하였다. 화염대의 구조 변이를 가시화하기 위해 솔리렌 기법을 이용하였으며, 당량비에 따른 화염전단의 형상 및 화염 전파속도의 변화를 확인할 수 있었다. 정상초음파는 화염전단을 찌그러뜨렸고, 난류 화염으로의 전이를 가속시켰다.

Key Words: Combustion Instability(연소 불안정성), Premixed Flame(예혼합화염), Propane/Air(프로판/공기), Ultrasonic Standing-wave(정상초음파), Flame Propagation(화염 전파), Cellular Instability(셀 불안정성), Schlieren Method(솔리렌 기법)

### 1. 서 론

밀폐된 연소기에서 빈번히 나타나는 연소불안정성은, 연소기 내의 압력변동(pressure oscillation)이 열구조적 부하(thermal-structural

loads)의 높은 증폭을 동반함으로써 나타나며, 궁극적으로 화염과 압력파의 상호작용으로 귀결될 수 있다. 이런 연소불안정성을 억제하기 위해 19세기 후반부터 밀폐된 연소기 내의 예혼합화염 전파에 대한 연구가 진행되어 왔다.

그 예로, Ellis와 De[1]는 관내 예혼합화염 전파과정에서 튜립화염을 처음으로 소개하였으며, 챔버 길이, 당량비, 점화방법에 따른 예혼합화염

\* 부경대학교 대학원 에너지시스템공학과

\*\* 부경대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

의 거동 변화가 Dunn-Rankin과 Sawyer[2]에 의해 관찰되었다. 또, Clanet과 Searby[3]는 관내 예혼합화염이 네 종류의 형태를 가지며 변화한다고 주장하였으며, 그 가운데 튜립화염에 대한 연구를 실험과 해석적 기법을 병행하여 수행하였다. 최근에는 Xiao 등[4]이 수소를 사용한 관내 예혼합화염의 튜립화염에서 2차 cusp 형상을 관찰하였다. Matalon 등을 포함하여 대부분의 연구자들은 Darrieus-Landau (D-L) 연소불안정성이 튜립화염 생성의 원인이라고 주장하였다[3, 5, 6].

이러한 연소불안정성은 시스템의 성능 저하 및 수명 단축을 야기하는 가장 큰 요소 가운데 하나로, 과거 연소기 개발 선진국에서는 이들 문제로 인한 시스템 개발일정의 지연과 추가비용 발생 등의 심각한 손실을 경험하였다[7, 8]. 때문에 많은 국가에서 연소불안정성을 해결하기 위해 대규모의 자원을 투자하고 있으며, 최근에는 자기장, 전기장, 음파장(acoustic wave) 등을 활용하여 연소반응 촉진 및 연소불안정성을 능동적으로 해결하기 위한 상당수의 연구가 진행되고 있다.

그 중, Shinoda 등[9]은 자기장이 제트화염에 가하는 영향을 주변환경의 변화에 따라 관찰하였고, Won 등[10]은 전기장의 주파수, 전압 등을 실험변수로 하여 화염의 속도를 분석하고, 전기장에 의해 야기되는 화염의 거동 변화를 조사하였다. 또, 음파 가진(excitation)에 의한 제트화염의 거동변화를 고찰하기 위하여 연료관을 공진 주파수로 가진시키는 실험을 수행하기도 하였다[11].

서항석 등[12, 13]은 연소불안정성을 능동적으로 제어하기 위해 정상초음파의 교반이 야기하는 메탄/공기 예혼합화염의 구조 및 거동 변이를 관찰하는 실험을 수행하였다. 그 결과, 정상초음파에 의한 화염선단의 구조적 변화를 발견하였으며, 화염전파속도가 증가하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 선행연구에 더하여, 연소기 내의 연소반응 촉진 및 연소불안정성 해결의 단초를 제공하기 위해, 프로판/공기 예혼합화염에 정

상초음파를 부가하여 화염의 구조 변화를 관찰하고, 당량비 변이에 따른 화염의 동역학적 거동과 그 변이를 확인하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에 이용된 실험장치는 연소챔버, DACS(Data Acquisition & Control System), 쉐리렌 장치(Schlieren apparatus)로 구성되고, Fig. 1에 그 개략도를 도시한다. 연소챔버는 폭 150 mm, 높이 60 mm, 길이 1,000 mm의 크기로, PMMA(Polymethyl Methacrylate)로 제작되었으며, 챔버 재질의 가압 한계로 인해 연소챔버 후단의 상부에는 개폐시스템(half-open system)을 설치하였다. 챔버의 길이방향 300 mm 지점에 정상초음파를 부가하기 위해 40 kHz의 주파수를 지닌 PZT(lead zirconium ceramic) 진동자(ultrasonic transducer)와 반사장치(reflector)를 설치하였다.

DACS는 함수발생기(function generator), 증폭기(amplifier), PAC(Progressive Automation Controllers), 그리고 PC로 구성된다. 함수발생기와 증폭기를 사용하여 초음파진동자를 구동하였으며, PAC를 이용하여 획득한 데이터와 이미지를 동기화하고, 이를 PC에 저장하였다. 전파하는 화염영상은 쉐리렌 기법을 사용하여 고속카메라(High Speed Camera, HSC)로 촬영하였다. 고속카메라 이미지 획득율(frame per second)은 25

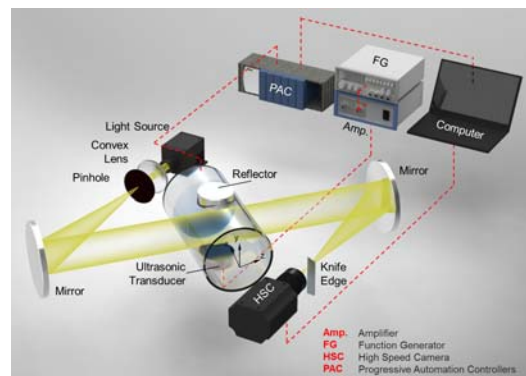


Fig. 1 Schematic of experimental set-up

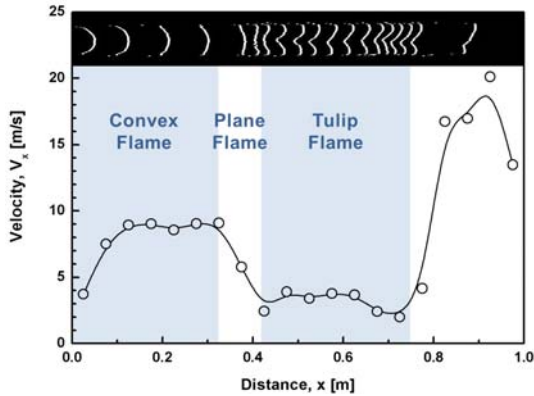


Fig. 2 Overlapped flame front and flame velocity variation at  $\phi = 1.0$

kHz로, 노출시간(exposure time)은  $2 \mu\text{s}$ 로 설정하였다.

Figure 2는 프로판/공기 예혼합화염의 기준 특성을 관찰한 실험결과로, 당량비(equivalence ratio,  $\phi$ ) 1인 화염의 전파거리에 따른 단면의 형상과 전파속도를 나타낸다. 화염형상이 반구화염에서 평면화염으로 변화 후, 튜립화염으로 천이하는 과정을 그림에서 확인할 수 있으며, 이를 근거로 세 가지 형태를 모두 관찰할 수 있는  $x/L = 0.4$  위치에서 화염의 슬리렌 이미지를 획득하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

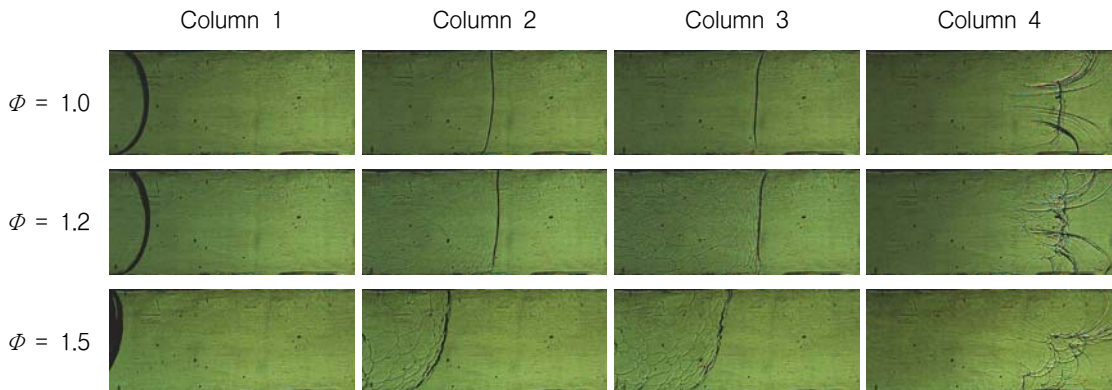


Fig. 3 High-speed schlieren images of flame premixed propane/air shape changes during propagation in half-open chamber at various equivalence ratios

Figure 3은 당량비 변이에 따른 프로판/공기 예혼합화염의 대표적인 전파형상을 나타낸다. 첫 번째 열은 반구형태의 화염을 보이며, 두 번째 열에서는 화염 끝단의 속도가 빨라져 convex 형태의 평면화염을, 세 번째 열은 concave 형태의 평면화염으로 발달하며, 네 번째 열에서는 튜립 화염으로의 변이하는 과정을 확인할 수 있다. 실험결과에 의하면,  $0.9 < \phi < 1.4$  구간에서는 전형적인 튜립화염을 확인할 수 있으나, 당량비가 1.4보다 큰 경우 화염전파속도의 감소로 인해 부력의 영향이 상대적으로 증가하여 변형된 형상의 튜립화염이 나타난다. 또, 당량비 1.2 ~ 1.5 사이에서는 셀 불안정성에 의해 생성된 갈라진 화염을 관찰할 수 있다. 이런 셀 구조는 난류로의 가속화를 유발하여 화염전파속도를 급격히 증가시키는 원인이 된다[14].

프로판/공기 예혼합화염의 당량비에 따른 압력변이를 Fig. 4에 도시한다. 압력은 점화 후 80 ms 이전까지는 이론당량비에서 가장 높지만, 80 ms 이후에는  $\phi = 1.2$ 에서 더 높아진다. 이는 후자의 경우 화염 전파과정에서 생성되는 셀 구조가 전파속도의 증가에 직접적인 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로, 이론당량비에서 벗어날수록 화염전파속도가 상대적으로 줄어들고, 그에 따라 압력증가율이 감소하는 것으로 관찰된다.

Figure 5는 정상초음파의 유무에 따른 예혼합

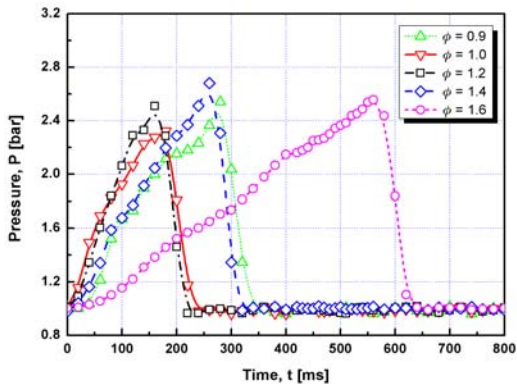


Fig. 4 Pressure variation of the propagating flame at various equivalence ratios

화염 선단의 형상변이를 보인다. Fig. 5(a)는 정상초음파가 존재하지 않은 상황으로, 반구형태의 매끈한 화염선단이 확인된다. 반면, 정상초음파가 개재된 경우에는 Fig. 5(b)에 보인 바와 같이 화염선단이 일그러지는 것이 관찰되며, 기연 부(burned side)에서는 횡방향으로 갈라지고 있는 것이 분별된다. 이는 정상초음파장의 층상화된 압력구배에 기인하는 것으로, 정상파에 의해 만들어진 파복(anti-node)이 화염선단에 간섭을 일으키기 때문이다[13].

Figure 6은  $x/L = 0.4$ 에서 정상초음파의 유무에 따른 화염전파의 형상변이를 5 ms 간격으로 도시한다. 전술한 바와 같이 정상초음파가 존재할 시 화염의 선단이 찌그러지는 현상을 관찰할 수 있으며, 평면화염과 튜립화염의 생성위치가 정상초음파가 존재하지 않는 경우보다 후단부에 있음을 확인할 수 있다. 또, 초음파의 존재와 상관없이 셀 구조를 확인할 수 있으나, 초음파에

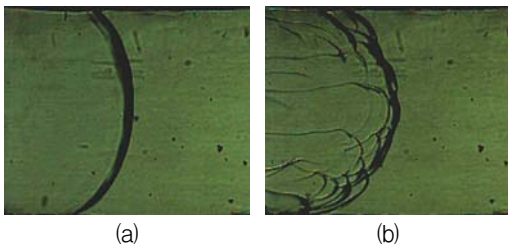


Fig. 5 Schlieren image of the flame front at  $\Phi = 1.2$ : (a) without standing wave, (b) with standing wave

의해 형성된 셀 구조의 모양/크기는 판이한 것을 관찰할 수 있다. 정상파가 개재되는 경우 종방향으로 일정한 간격을 두고 나열된 셀을 찾을 수 있으며, 이는 40 kHz 주파수를 가진 정상파의 수직압력구배와 화염의 상호작용에 기인한다 [13].

예혼합화염의 전파거리에 따른 속도를 Fig. 7에 도시한다. 정상초음파의 존재가 화염의 전파속도를 전반적으로 증대시키고 있다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 정상파에 의한 반응물의

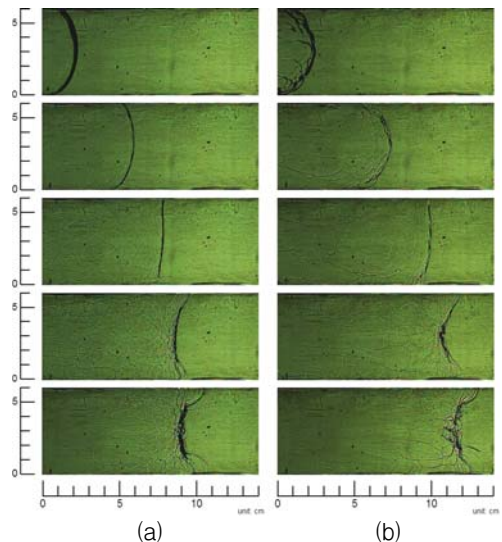


Fig. 6 Sequential images of propagating flame (time interval: 5 ms) (a) without standing wave, (b) with standing wave at  $\Phi = 1.2$

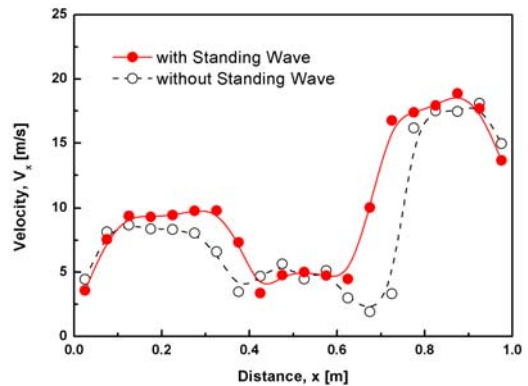


Fig. 7 Velocity variation of the propagating flame at  $\Phi = 1.2$

활발한 혼합과 추가적인 반응에너지의 공급으로 인해 화학반응 강도가 증대하기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 또, 튜립화염의 생성은 정상초음파의 부가에 의해 지연되며, 그의 지속구간 또한 짧은 것으로 관찰된다.

#### 4. 결 론

프로판/공기 예혼합화염의 전파에 대한 정상초음파의 간섭효과를 규명하기 위하여 솔리덴기법을 이용하여 화염의 구조 및 거동을 고찰하였으며, 그 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 프로판/공기 예혼합화염은 반구화염, 평면화염, 튜립화염의 형태로 전파되며, 당량비가 1.4보다 클 때는 화염전파속도의 감소와 함께 부력의 효과가 관찰된다.
- (2) 정상초음파가 개재된 경우에 화염선단이 일그러지는 것이 관찰되며, 기연 부에서는 횡방향으로 갈라지고 있는 것을 확인할 수 있다.
- (3) 정상초음파는 예혼합화염의 전파속도를 증가시켜 셀 불안정성 촉진하고, 난류로의 천이를 가속화하는 것으로 판단된다.
- (4) 화염의 셀 구조는 부가되는 정상초음파의 특성에 의해 제어될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. Ellis, O. C. and De, C., "Flame Movement in Gaseous Explosive Mixtures (Part 7)," Fuel in Science and Practice 7, 1928, pp.502-508
2. Dunn-Rankin, D. and Sawyer, R. F., "Tulip Flames: Change in Shape of Premixed Flames Propagating in Closed Tubes," Exp. Fluids, Vol. 24, No. 2, 1998, pp.130-140
3. Clanet, C. and Searby, G., "On the "Tulip Flame" Phenomenon," Combustion and Flame, Vol. 105, Issues 1-2, 1996, pp.225-238
4. Xiao, H., Makarov, D., Sun, J., and Molkov, V., "Experimental and Numerical Investigation of Premixed Flame Propagation with Distorted Tulip Shape in a Closed Duct," Combustion and Flame, Vol. 159, Issue 4, 2011, pp.1523-1538
5. Matalon, M. and Metzener, P., "The Propagation of Premixed Flames in Closed Tubes," J. Fluid Mech., Vol. 336, 1997, pp.331-350
6. Bychkov, V. V., Golberg, S. M., Liberman, M. A., and Eriksson, L. E., "Propagation of Curved Stationary Flames in Tubes," Phys. Rev. E, Vol. 54, Issue 4, 1996, pp. 3713-3724
7. Harrje, D. J. and Reardon, F. H. (Eds.), "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability," NASA SP-194, 1972
8. Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-propellant Rocket Engines," Vol. 147, AIAA, Washington D. C., 1992
9. Shinoda, M., Yamada, E., Kajimoto, T., Yamashita, H., and Kitagawa, K., "Mechanism of Magnetic Field Effect on OH Density Distribution in a Methane-air Premixed Jet Flame," Proc. Combust. Inst., Vol. 30, Issue 1, 2005, pp.277-284
10. Won, S. H., Ryu, S. K., Kim, M. K., Cha, M. S., and Chung, S. H., "Effect of Electric Fields on the Propagation Speed of Tribachial Flames in Coflow Jets," Combustion and Flame, Vol. 152, Issue 4, 2008, pp.496-506
11. 김승곤, 김강태, 박정, "음향 가진된 프로판 비예혼합 제트 화염의 부상 거동에 대한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제5호, 2004, pp.569-579
12. 서항석, 이상신, 김정수, "정상 초음파장의 간섭에 의한 메탄/공기 예혼합화염의 구조

- 변이," 한국추진공학회지, 제15권, 제6호, 2011, pp.1-6
13. Seo, H. S., Lee, S. S., and Kim, J. S., "Influence of an Ultrasonic Standing Wave on Spreading of Methane/Air Premixed Flame," AJCPP2012-111, 2012
14. Williams, F. A., Combustion Theory, 2nd ed., Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1985, pp.349