정상초음파가 개재하는 프로판/공기 예혼합화염의 솔리렌기법에 의한 가시화

이상신* · 김정수† · 이도형**

A Visualization of the Propane/Air Premixed Flame Interacting with an Ultrasonic Standing-wave by Schlieren Photography

Sang Shin Lee, Jeong Soo Kim and Do Hyong 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. Visualization technique utilizing the Schlieren photography was employed for the observation of structural variation of the flame reaction zone. Evolutionary characteristics of the flame front were caught by the high-speed Schlieren image, through which local flame velocity of the moving front were analyzed in detail.

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

자동차 엔진, 발전소 버너설비, 항공기용 가스터빈 엔진 등 대부분의 연소 및 추진시스템에서 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 연소 불안정성을 억제하기 위해 19세기 후반부터 관내의 예혼합화염 전파에 대한 연구가 진행되어 왔다.

그 예로, Ellis와 De⁽¹⁾는 관내 예혼합화염 전파과정에서 튜립화염을 처음으로 소개하였으며, 챔버 길이, 당량비, 점화방법에 따른 예혼합화염의 거동 변화가 Dunn-Rankin과 Sawyer⁽²⁾에 의해 관찰되었다. 또, Gunoche⁽³⁾는 챔버의 종횡비(aspect ratio)가 2 이상일 때 튜립화염이 형성되고, 종횡비가 20 이상이 되면 반구화

염과 튜립화염이 반복적으로 나타난다고 주장하였으며, Clanet과 Searby⁽⁴⁾는 관내 예혼합화염이 네 종류의 형태를 가지며 변화한다고 주장하였다. 최근에는 Xiao 등⁽⁵⁾이 수소를 사용한 관내 예혼합화염의 튜립화염에서 2차 cusp 형상을 관찰하였다. Matalon 등을 포함하여 대부분의 연구자들은 Darrieus-Landau (D-L) 연소불안정성이 튜립화염 생성의 원인이라고 주장하였다^(4, 6, 7).

이러한 연소불안정성은 시스템의 성능 저하 및 수명 단축을 야기하는 가장 큰 요소 가운데 하나로, 과거 연소기 개발 선진국에서는 이들 문제로 인한 시스템 개발 일정의 지연과 추가비용 발생 등의 심각한 손실을 경험하였다^(8, 9). 때문에 연소기기 개발분야에서 연소불안정성을 해결하기 위해 대규모의 자원이 투자되고 있으며, 최근에는 자기장, 전기장, 음파장(acoustic wave) 등의 추가적인 힘을 활용하여 연소반응 촉진 및 연소 불안정성을 능동적으로 해결하기 위한 상당수의 연구가 진행되고 있다.

그 중, Shinoda 등⁽¹⁰⁾은 주변환경의 조건변화를 통하여 자기장이 제트화염에 가하는 영향을 관찰하였고, Won 등⁽¹¹⁾은 전기장의 주파수, 전압 등을 실험변수로 하여 화염의 속도를 분석하고, 전기장에 의해 야기되

†부경대학교 기계공학과

E-mail : jeongkim@pknu.ac.kr

*부경대학교 대학원 에너지시스템공학과

**부경대학교 기계공학과

는 화염의 거동 변화를 조사하였다. 또, 음파 가진(excitation)에 의한 제트화염의 거동변화를 고찰하기 위하여 연료관을 공진주파수로 가진시키는 실험을 수행하기도 하였다⁽¹²⁾.

서항석 등^(13, 14)은 연소불안정성을 능동적으로 제어하기 위해 정상초음파의 교반이 야기하는 메탄/공기 예혼합화염의 구조 및 거동 변이를 관찰하는 실험을 수행하였다. 그 결과, 정상초음파에 의한 화염전단의 구조적 변화를 발견하였으며, 화염전파속도가 증가하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 선행연구에 더하여, 프로판/공기 예혼합화염에 정상초음파를 부가하여 솔리렌기법에 의해 화염의 구조 변화를 관찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 이용된 실험장치는 연소챔버, DACS(Data Acquisition & Control System), 솔리렌 장치(Schlieren apparatus)로 구성되며, Fig. 1에 그 개략도를 도시한다. 연소챔버는 폭 150 mm, 높이 60 mm, 길이 1,000 mm의 크기로, PMMA(Polymethyl Methacrylate)를 이용하여 제작되었으며, 챔버 재질의 가압 한계로 인해 연소챔버 후단의 상부에는 개방시스템(discharge vent)을 설치하였다. 연료 및 산화제는 질량유량제어기(Mass Flow Controller, MFC)와 고정식연속혼합기(static mixer)로 구성된 가스혼합장치(gas mixing device)를 이용하여 실험 초기조건을 완성하였으며, 정압센서(static pressure sensor) 및 동압센서(dynamic pressure sensor)를 이용하여 챔버의 압력섭동을 관찰하였다. 챔버의 길이방향 300 mm 지점에 정상초음파를 부가하기 위해 40 kHz의 주파수를 지닌 PZT(lead zirconate titanate, $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$) 진동자(ultrasonic transducer)를 설치하여 정상초음파를

Fig. 1. Schematic of the experimental set-up.

Fig. 2. Experimental apparatus.

생성하였다.

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 솔리렌 기법에 의해 촬영되었으며, 그 시스템은 할로겐 램프, 한쌍의 구형 오목거울, 나이프에지(knife edge), 그리고 고속카메라(High Speed Camera, HSC)로 이루어진다. 고속카메라 이미지 획득율(frame per second)은 25 kHz로, 노출 시간(exposure time)은 $2 \mu\text{s}$ 로 설정하였다. 실험에 사용된 연소챔버와 그 주변장치를 Fig. 2에 보인다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 프로판/공기 예혼합화염 전파

관내에서 전파하는 프로판/공기 예혼합화염전단의 중첩이미지와 화염전파거리에 따른 전파속도를 Fig. 3에 도시한다. 예혼합화염의 전파과정의 구조변이는 크게 네 단계로 정의된다⁽⁴⁾. 첫 번째 단계에서는 점화 후 생성된 반구화염이 벽면에 접할 때 까지를, 두 번째는 벽면에 영향을 받으며 진행되는 반구화염을, 세 번째는 평면화염으로 변이하는 과정을, 네 번째 단계에서는 튜립화염의 형태를 확인할 수 있다. 초기에 생성된 반구화염은 완전히 성장하기까지 전파속도가 증가하다가 벽면에 접촉 후 속도가 크게 변하지 않는 것이 관찰된다. 화염은 평면화염을 거쳐 튜립화염으로 변화하면서 속도가 지속적으로 감소하며, 전파가 진행됨에 따라 챔버 내부압력이 한계압력에 도달하여 개방시스

Fig. 3. Overlapped flame-front and flame-velocity variation at $\phi = 1.0$.

템이 작동되고, 챔버 내·외부의 압력차로 인해 연소가스가 빠르게 배출되어 화염 전파속도가 급격히 증가한다. 본 연구에서는 반구/평면/튤립 형상의 화염을 모두 관찰할 수 있는 $x/L = 0.4$ 위치를 중심으로 전파화염의 슬리렌 이미지를 획득하였다.

Figure 4는 당량비 변이에 따른 프로판/공기 예혼합 화염의 대표적인 전파형상을 나타낸다. 첫 번째 열은 반구형태의 화염을 보이며, 두 번째 열에서는 화염 끝단의 속도가 빨라져 convex 형태의 평면화염을, 세 번째 열에서 약간의 concave 형태를 갖는 평면화염으로 발달해 있고, 네 번째 열에서는 튤립화염으로 변이된 형상을 보인다. 당량비 1.2에서는 모든 화염형상이 상하 대칭을 이루고 있음을 확인할 수 있으나, 이를 제외

한 당량비에서는 화염구조가 평면화염으로 천이함에 따라 챔버의 상단부로 치우치는 현상을 관찰할 수 있다. 또, $0.8 < \phi < 1.4$ 구간에서는 전형적인 튤립화염을 확인할 수 있으나, 당량비가 1.4보다 큰 경우 변형된 형상의 튤립화염이 나타난다. 이는 부력에 의한 불안정성에 기인한 것으로 화염의 전파속도가 부력의 영향에 비해 상대적으로 작아서 나타나는 것으로 알려져 있다⁽¹⁵⁾.

당량비 1.2 ~ 1.5 사이에서는 셀 불안정성에 의해 생성된 갈라진 화염이 관찰되며, 이 구간에서는 당량비가 증가할수록 셀 구조가 생성되는 위치가 빨라지는 것이 확인된다. 이러한 셀 구조는 난류로의 가속화를 유발하여 화염전파속도를 급격히 증가시키는 원인이 된다⁽¹⁵⁾.

프로판/공기 예혼합화염의 당량비에 따른 압력변이를 Fig. 5에 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.

3.2 정상초음파에 의한 화염전파 거동변이

Figure 6은 정상초음파의 유무에 따른 예혼합화염

Fig. 4. High-speed Schlieren images of the premixed propane/air flame propagating in half-open chamber at various equivalence ratios.

Fig. 5. Pressure variation of the premixed chamber at various equivalence ratios.

Fig. 6. Schlieren image of the flame front at $\Phi = 1.2$: (a) without standing wave, (b) with standing wave.

선단의 형상변이를 보인다. Fig. 6(a)는 정상초음파가 존재하지 않은 상황으로, 반구형태의 매끈한 화염선단

이 확인된다. 반면, 정상초음파가 개재된 경우에는 Fig. 6(b)에 보인 바와 같이 화염선단이 일그러지는 것이 관찰되며, 기연 부(burned side)에서는 횡방향으로 갈라지고 있는 것이 분별된다. 이는 정상초음파장의 증상화된 압력구배에 기인하는 것으로, 정상파에 의해 만들어진 압력 분포의 파복(anti-node)에서 화염선단으로 간섭을 일으키기 때문이다⁽¹⁴⁾.

다양한 당량비에서 정상초음파의 유무에 따른 화염 전파의 형상변이를 Fig. 7에 도시한다. $\Phi = 0.8$ 의 조건에서도 앞서 언급한 바와 같이 정상초음파의 존재로 인한 화염선단의 찌그러짐이 나타나며, 부력의 영향으로 관찰되던 화염선단이 기울어지는 현상이 감소하였다.

또, 당량비 1.2의 경우 정상초음파 존재 시 평면화염과 튕립화염으로 전이하는 위치가 초음파가 존재하지 않는 경우보다 후단부에 있음을 관찰할 수 있었으며, 초음파의 존재 유무와 상관없이 셀 구조를 확인할 수 있으나, 초음파에 의해 형성된 셀 구조의 모양/크기는 판이한 것을 확인할 수 있다. 이는 정상파가 개재되는 경우 종방향으로 일정한 간격을 두고 나열된 셀을 찾을 수 있으며, 이는 40 kHz 주파수를 가진 정상파의 수직압력구배와 화염의 상호작용에 기인한다⁽¹⁴⁾. 연소 상한계(Upper Flammability Limit, UFL) 조건인 당량비 1.7일 때는 부력의 효과가 다른 당량비 조건에 비해 상대적으로 일찍 발현되어 관내 예혼합화염 전파에서 일반적으로 나타나는 반구/평면/튕립 형태의 화염이 전

Fig. 7. Sequential images of the propagating flame at various equivalence ratios.

Fig. 8. Velocity variation of the propagating flame.

개되지 않으며, 초음파 개재에 따른 화염구조의 차이가 명확하지 않다. 이러한 결과는 정상초음파 영향에 의한 화염구조 변화가 이론당량비에서 벗어날수록 미미해지기 때문인 것으로 판단된다.

예혼합화염의 전파위치에 따른 속도를 Fig. 8에 보인다. $\phi = 1.2$ 에서 초음파 가진 유무에 따른 전파속도의 변화가 확연히 나타난다. 정상초음파가 존재할때

화염전파속도가 향상되는 것을 확인할 수 있고, 이로 인해 점화지점으로부터 평면화염으로의 천이거리도 멀어지는 것을 관측할 수 있으며, 기존의 연구와 부합하는 결과를 보인다⁽⁴⁾. 당량비 0.8에서 초음파 가진에 의한 전파속도의 차이를 또한 구분할 수 있으나, $\phi = 1.2$ 에 비교해 그 영향이 크지 않다. 또, 연소 상한계에도 달하면 화염 전파속도는 당량비 0.8, 1.2의 전파속도에 비해 현저히 떨어지고, 정상초음파의 영향도 미약하게 나타난다. 즉, 정상초음파의 존재가 특정 당량비 구간에서 화염의 전파속도를 증대시키고 있다는 사실이 확인되는데, 이는 정상파에 의한 반응물의 활발한 혼합과 추가적인 반응에너지의 공급으로 인해 해당조건에서 화학반응 강도가 증대하기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

4. 결 론

솔리덴 기법을 이용하여 정상초음파의 간섭에 의한 프로판/공기 예혼합화염의 구조/거동 변이를 관찰한 실험적 연구로 그 주요 결과는 다음과 같다.

관내 프로판/공기 예혼합화염은 반구/평면/투립 형태의 화염형상을 보이며 전파하며, 전파가 진행될수록 화염선단은 부력의 효과로 인한 상단부로 기울어지는 현상이 관찰된다. 또, $1.2 \leq \phi \leq 1.5$ 에서는 셀 불안정성에 의해 생성된 갈라진 화염이 나타난다.

정상초음파가 개재하는 경우 화염선단이 찌그러지는 현상이 관찰되며, 기원부에서는 횡방향으로 갈라지는 셀 구조가 확인되나, 정상초음파가 존재하지 않는 조건에서의 셀 구조와는 그 모양과 크기가 다르다.

정상초음파는 특정당량비 구간에서 예혼합화염의 전파속도를 증가시키는 요인이 된다.

후 기

본 연구는 부산테크노파크의 2012 산학공동기술혁신사업 “연소효율 증대를 위한 탄화수소계 연료 예혼합화염의 연소특성 연구”의 일환으로 수행 되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Ellis, O. C. and De, C., 1928, “Flame Movement in

- Gaseous Explosive Mixtures (Part 7)", Fuel in Science and Practice 7, pp. 502-508.
- 2) Dunn-Rankin, D. and Sawyer, R. F., 1998, "Tulip Flames: Change in Shape of Premixed Flames Propagating in Closed Tubes", Exp. Fluids, Vol. 24(2), pp. 130-140.
 - 3) Guénoche, H., 1964, Nonsteady Flame Propagation, Markstein, G. H. Ed., Pergamon, New York, pp. 107-176.
 - 4) Clanet, C. and Searby, G., 1996, "On the "Tulip Flame" Phenomenon", Combustion and Flame, Vol. 105(1-2), pp. 225-238.
 - 5) Xiao, H., Makarov, D., Sun, J., and Molkov, V., 2011, "Experimental and Numerical Investigation of Premixed Flame Propagation with Distorted Tulip Shape in a Closed Duct", Combustion and Flame, Vol. 159(4), pp. 1523-1538.
 - 6) Matalon, M. and Metzener, P., 1997, "The Propagation of Premixed Flames in Closed Tubes", J. Fluid Mech., Vol. 336, pp. 331-350.
 - 7) Bychkov, V. V., Golberg, S. M., Liberman, M. A., and Eriksson, L. E., 1996, "Propagation of Curved Stationary Flames in Tubes", Phys. Rev. E, Vol. 54(4), pp. 3713-3724.
 - 8) Harje, D. J. and Reardon, F. H. (Eds.), 1972 "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability", NASA SP-194.
 - 9) Huzel, D. K. and Huang, D. H., 1992, "Modern Engineering for Design of Liquid-propellant Rocket Engines", Vol. 147, AIAA, Washington D. C.
 - 10) Shinoda, M., Yamada, E., Kajimoto, T., Yamashita, H., and Kitagawa, K., 2005, "Mechanism of Magnetic Field Effect on OH Density Distribution in a Methane-air Premixed Jet Flame", Proc. Combust. Inst., Vol. 30(1), pp. 277-284.
 - 11) Won, S. H., Ryu, S. K., Kim, M. K., Cha, M. S., and Chung, S. H., 2008, "Effect of Electric Fields on the Propagation Speed of Tribachial Flames in Coflow Jets", Combustion and Flame, Vol. 152(4), pp. 496-506.
 - 12) Kim, S. G., Kim, K. T., and Park, J., 2004, "An Experimental Study on the Lift-off Behavior of Tone-Excited Propane Non-premixed Jet Flames", Trans. of the KSME(B), Vol. 28(5), pp. 569-579.
 - 13) Seo, H. S., Lee, S. S., and Kim, J. S., 2011, "Structural Variation of Methane/Air Premixed Flame Caused by the Intervention of Ultrasonic Standing-wave", J. the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 15(6), pp. 1-6.
 - 14) Seo, H. S., Lee, S. S., and Kim, J. S., 2012, "Agitation Effect of an Ultrasonic Standing Wave on the Dynamic Behavior of Methane/Air Premixed Flame", J. the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 16(3), pp. 16-23.
 - 15) Williams, F. A., 1985, Combustion Theory, 2nd ed., Addison-Wesley, Redwood City, CA, p. 349.