

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.6.001>

프로판/공기 예혼합화염의 전파거동 및 구조안정화에 대한 정상초음파의 간섭효과

이상신* · 서항석* · 김정수**†

Interacting Effects of an Ultrasonic Standing-wave on the Propagation Behavior and Structural Stabilization of Propane/Air Premixed Flame

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

ABSTRACT

An experimental study has been conducted to scrutinize into the influence of ultrasonic standing wave on the propagating behavior and structural stabilization of propane/air premixed flame at various equivalence ratios in half-open rectangular duct. Evolutionary features of the flame fronts are caught by high-speed images, and the variation of flame structure and local flame velocities along the propagation are analyzed. It is revealed that the propagation velocity agitated by the ultrasonic standing wave is greater than that without the agitation: the velocity enhancement diminishes as the equivalence ratio approaches the stoichiometric. Influence of standing wave on the flame overwhelms that of the buoyancy which slants the flame front towards top of the duct, and thus the standing wave contributes to the structural stabilization of propane/air premixed flame.

초 록

본 연구에서는 정상초음파의 간섭에 의해 야기되는 프로판/공기 예혼합화염의 사각관내 전파거동 및 구조안정화를 규명하기 위한 실험결과를 제시한다. 전파화염의 이미지는 고속카메라를 이용하여 획득하였으며, 이미지 후처리를 통해 정상초음파 유무에 따른 화염전단의 구조변이와 전파속도를 상세히 관찰하였다. 전파속도는 정상초음파가 교반하는 경우 증가하였으며, 이론당량비에서 벗어남에 따라 초음파의 영향은 보다 크게 발현하였다. 정상초음파에 의한 화학반응과 혼합의 촉진은 화염전단의 형상에 대한 부력의 영향을 압도하여 화염의 구조적 안정화에 기여한다.

Key Words: Premixed Flame(예혼합화염), Propane/Air(프로판/공기), Ultrasonic Standing-wave(정상초음파), Flame Propagation(화염 전파), Flame Stabilization(화염 안정화)

접수일 2012. 10. 8, 수정완료일 2012. 11. 16, 게재확정일 2012. 11. 22

* 학생회원, 부경대학교 대학원 에너지시스템공학과

** 종신회원, 부경대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

자동차 엔진, 항공기 및 액체로켓 엔진 등 각종 연소시스템에서 빈번히 발생하는 연소불안정성은 연소기 내의 압력변동(pressure oscillation)이 열구조적 부하(thermal-structural loads)의 높은 증폭을 동반함으로써 나타나며, 궁극적으로 화염과 압력과의 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 예혼합화염의 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.

이러한 관내 예혼합화염에서 발생하는 연소불안정성은 크게 세 가지로 대별되는데, 수력학적 불안정성(hydrodynamic instability), 부력에 의한 불안정성(body-force instability), 확산-열 불안정성(diffusive-thermal instability)이 그것이다[5]. 수력학적 불안정성은 기연부(burned side)와 미연부(unburned side) 사이의 급격한 밀도차이에 의해 발현된 열팽창(thermal expansion)으로 인해 야기된다. 모든 예혼합화염은 열팽창을 동반한다는 점에서 수력학적 효과는 화염 불안정성에 가장 큰 영향을 미치는 인자이다[6]. 또, 부력에 의한 불안정성의 경우 연소기의 상·하부 밀도 차이에 의해 나타나며, 화염전파속도가 부력에 의한 효과에 비해 상대적으로 클 경우 그 영향은 무시할 수 있다[7]. 확산-열 불안정성은 화염으로부터의 열전달과 반응물의 물질전달의 불균형에 의해 일어난다. 이러한 불안정성은 루이스 수(Lewis number)로 나타낼 수 있으며, 그 값이 1 보다 작을 때 불안정성의 영향으로 셀화염이 생성된다[8].

시스템의 성능 저하 및 수명 단축을 야기하는

가장 큰 요소 가운데 하나인 연소불안정성으로 인해, 과거 연소기 개발 선진국에서는 이들 문제로 인한 시스템 개발일정의 지연과 추가비용 발생 등의 심각한 손실을 경험하였다[9, 10]. 때문에 많은 국가에서 연소불안정성을 해결하기 위해 대규모의 자원을 투자하고 있으며, 최근에는 자기장, 전기장, 음파장(acoustic wave) 등을 활용하여 연소반응 촉진 및 연소불안정성을 능동적으로 해결하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중, Shinoda 등[11]은 자기장이 체트화염에 가하는 영향을 주변환경의 변화에 따라 관찰하였고, Won 등[12]은 전기장의 주파수, 전압 등을 실험변수로 하여 화염의 속도를 분석하고, 전기장에 의해 야기되는 화염의 거동 변화를 조사하였다. 또, 음파 가진(excitation)에 의한 체트화염의 거동변화를 고찰하기 위하여 연료관을 공진주파수로 가진시키는 실험을 수행하기도 하였다[13].

본 연구팀[14-16]은 연소불안정성을 능동적으로 제어하기 위한 연구의 일환으로, 정상초음파(Ultrasonic Standing-wave, USW)와 교반하는 메탄/공기 예혼합화염의 거동 변이를 관찰한 바 있다. 그 결과, 정상초음파에 의한 화염선단의 구조적 변화를 발견하였으며, 화염전파속도(flame velocity)가 증가하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 선행연구에 더하여, 프로판/공기 예혼합화염의 전파거동과 정상초음파장의 교반 효과를 관찰하고, 이를 토대로 연소반응 촉진 및 화염 안정화에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

정상초음파가 개재하는 예혼합화염의 전파거동 및 구조변이를 관찰하기 위한 실험장치는 연소챔버, DACS (Data Acquisition & Control System), 그리고 고속카메라(high speed camera)로 구성된다. 챔버는 PMMA (Polymethyl Methacrylate)를 이용하여 폭 150 mm, 높이 60 mm, 길이 1,000 mm의 크기로 제작되었으며, 챔버 재질의 가압 한계로 인해 연소챔버 후단의

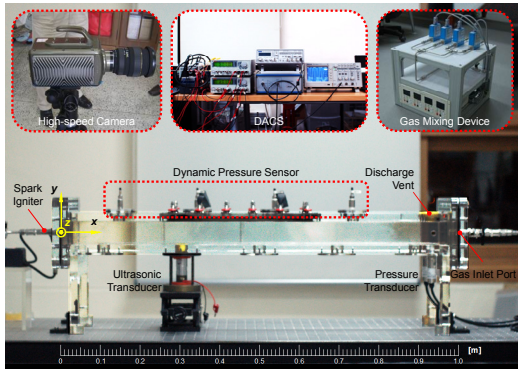


Fig. 1 Experimental apparatus

상부에는 개방시스템(discharge vent)을 설치하였다. 이때, 개방시스템은 압력상승에 기인하는 기계식 시스템으로 약 2.5 bar에서 작동한다. 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 0.3 m 지점에 40 kHz의 주파수를 지닌 PZT(lead

zirconate titanate, $Pb(Zr,Ti)O_3$) 진동자(ultrasonic transducer)를 설치하여 정상초음파를 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 고속카메라를 사용하여 획득하였다. 카메라 이미지 획득율(frame per second)은 2.5 kHz로, 노출시간(exposure time)은 0.4 ms로 설정하였다. 실험에 사용된 연소챔버와 그 주변장치를 Fig. 1에 도시한다.

3. 실험결과 및 고찰

당량비(equivalence ratio, ϕ)가 1.2인 프로판/공기 예혼합화염의 전파 이미지를 진행시간에 따라 Fig. 2에 도시한다. 화염은 과거 여러 연구자들[1-4]에 의해 수행된 연구와 동일하게 반구 화염, 평면화염, 튕립화염의 형태를 보이며 변화

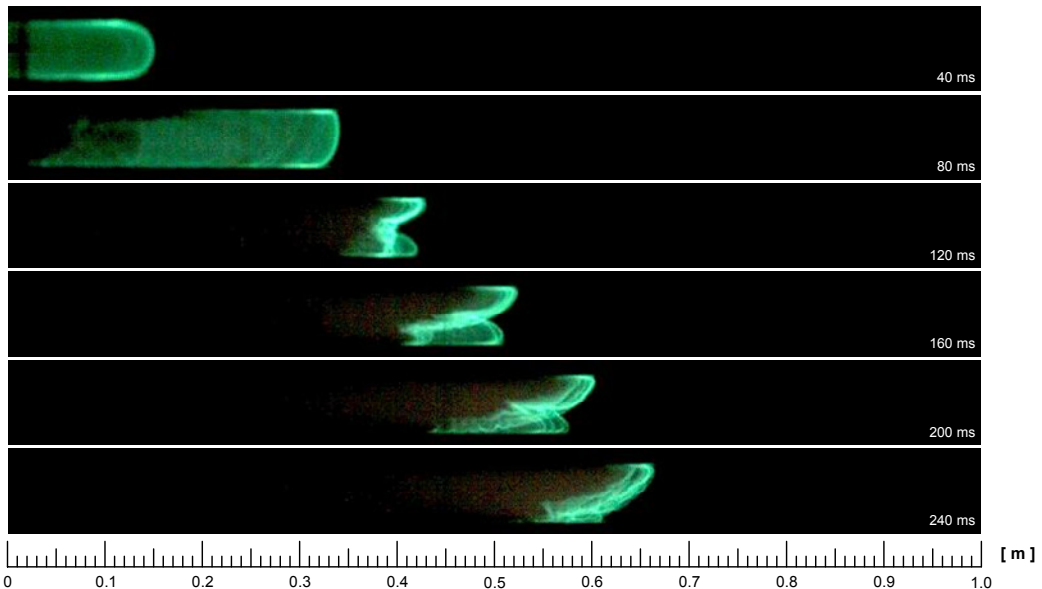


Fig. 2 Sequential images of premixed propane/air flame at $\phi = 1.2$ (without USW)

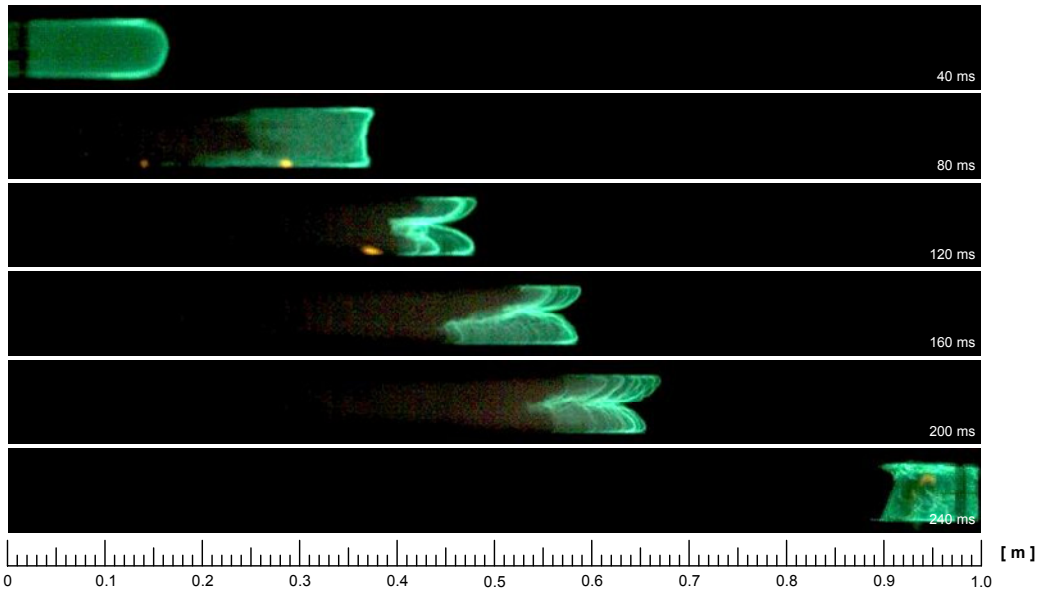


Fig. 3 Sequential images of premixed propane/air flame at $\phi = 1.2$ (with USW)

한다. 반구화염일 때는 화염의 형상이 상하 대칭을 이루고 있으나, 화염이 평면화염으로 전환됨에 따라 챔버의 상단부로 치우치는 모습을 확인할 수 있으며 전파가 진행될수록 기울어짐이 도드라지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 부력에 의한 불안정성에 기인하는 것으로 화염의 전파속도가 부력의 영향에 비해 상대적으로 크지 않아 나타나는 것으로 알려져 있다[7].

Figure 3은 정상초음파가 개재하는 예혼합화염의 전파 이미지를 나타낸 것으로, 정상파의 존재

가 화염 구조 및 거동에 미치는 영향을 거시적으로 확인할 수 있다. 정상초음파가 존재하지 않을 경우에 나타났던 화염전단에서의 기울어짐이 상당히 줄었음을 관찰할 수 있으며, 전파속도가 초음파 가짐에 의해 상대적으로 빨라지는 것을 시간에 따른 화염전단의 위치로부터 알 수 있다. 따라서, 전파속도의 증가로 인해 부력의 효과가 상대적으로 감소된 것으로 판단된다.

정상초음파 유무에 따른 당량비 1.2인 프로판/공기 예혼합화염전단의 후처리된 중첩 이미지와

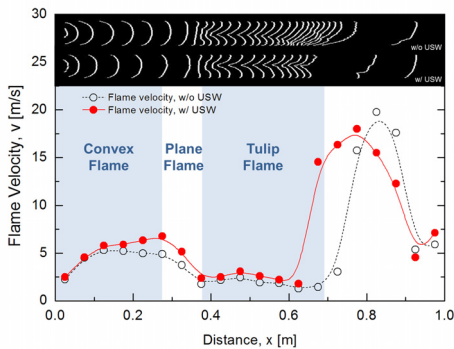


Fig. 4 Overlapped flame fronts (time interval: 10 ms) and flame velocity variation at $\phi = 1.2$

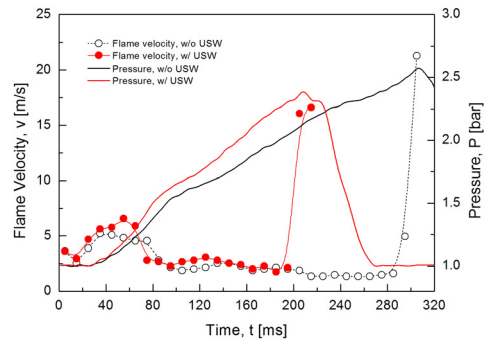


Fig. 5 Effects of ultrasonic standing wave on the variation of flame velocity and chamber pressure ($\Phi = 1.2$)

전파거리에 따른 화염 전파속도 선도를 Fig. 4에 도시한다. 관내 예혼합화염의 전파과정은 크게 네 단계로 정의된다[3]. 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 속도가 증가하다가 벽면에 접촉 후 전파속도가 일정하게 유지되는 것이 관찰된다. 그러나 정상초음파가 존재하는 경우, 화염 선단이 초음파 개재구간에 접근 할수록 전파속도가 증가하는 것을 그래프에 보인다. 이는 초음파가 미연영역에서부터 영향을 미쳐 연소반응을 촉진시키는 것으로 해석할 수 있다. 화염은 평면화염을 거쳐 튜립화염으로 변화하면서 속도가 지속적으로 감소하며, 전파가 진행됨에 따라 챔

버 내부압력이 한계압력에 도달하여 개방시스템이 작동되고, 챔버 내·외부의 압력차로 인해 연소가스가 빠르게 배출되어 화염 전파속도가 급격히 증가한다.

Figure 5는 시간에 따른 화염전파속도와 연소실의 압력변이를 보인다. 이때의 속도선도는 거리에 따른 속도선도(Fig. 4)와 그 경향이 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 토대로 화염전파 및 구조변화가 압력변이에 어떻게 작용하는지 유추하는 것이 가능하다. 반구화염이 생성된 후 벽면의 간섭을 받기 전에는 반응대의 면적증가가 자유로워 압력이 증가하지 않다가, 접촉(~30 ms) 후 챔버의 유한한 크기로 인한 반응대 면적증가의 제약으로 압력상승이 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 또, 평면화염을 거쳐 튜립화염으로 변이하는 과정(~90 ms)에서 압력증가율은 감소하는데, 이러한 화염형상에 따른 압력변동은

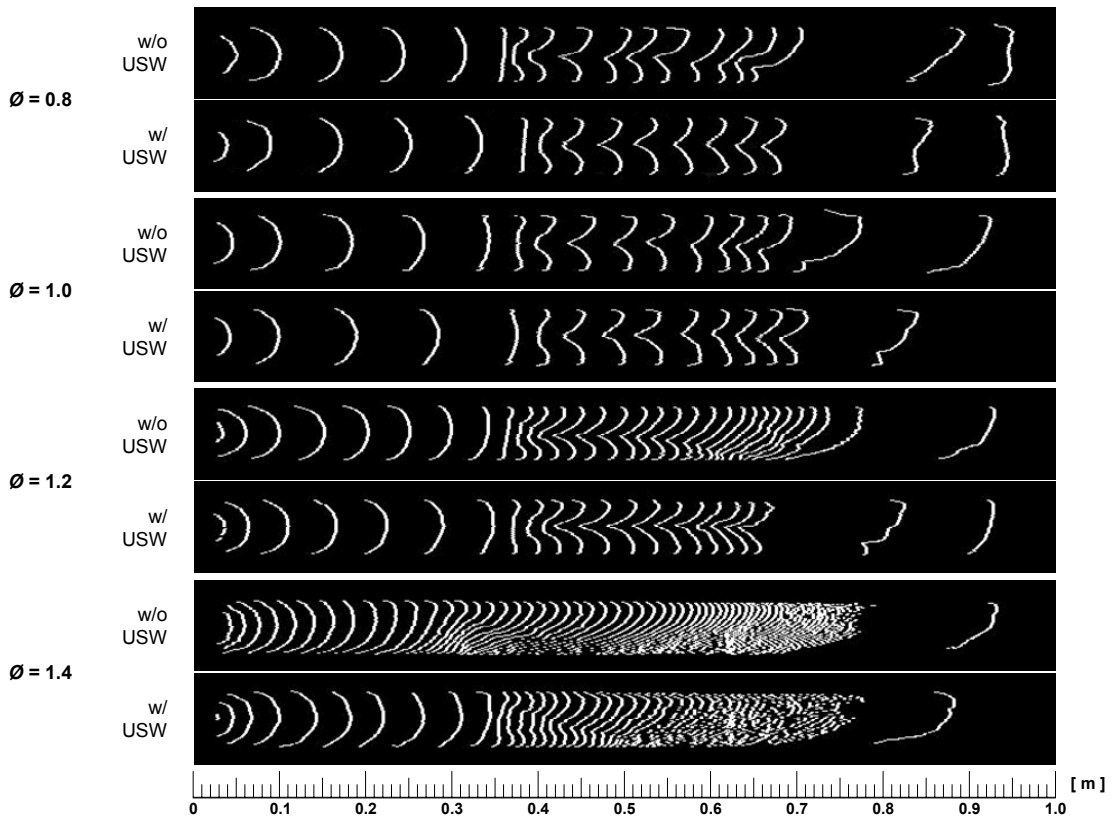


Fig. 6 Superposition of evolutionary flame fronts (time interval: 10 ms)

기존연구의 결과와 일치하는 것이기도 하다[2]. 정상초음파에 의한 화염전파거동의 차이는 이상의 압력변이를 통해서도 짐작할 수 있다. 점화 초기에, 반구화염이 벽면의 영향을 받기 전에는 압력차이가 근소하나, 벽면에 접촉한 반구화염은 전파가 진행될수록 그 압력차이가 점점 커지는 사실이 관찰된다. 이는 정상초음파의 효과가 평면화염 및 튜립화염으로의 천이를 가속시키고, 전파속도를 증대시키는 것으로 추론할 수 있게 한다.

다양한 당량비에서 정상초음파 유무에 따른 화염선단의 형상을 10 ms 간격으로 증첩시킨 후 처리 이미지를 Fig. 6에 도시한다. 화염은 좌측에서 우측으로 전파하면서 반구화염에서 튜립화염으로 천이하는 과정을 보인다. 전술한 바와 같이 정상초음파가 개재하지 않는 조건에서는 부

력에 의해 화염선단이 상단부로 기울어지는 것이 관찰된다. 또, $\phi = 1.4$ 의 경우에는 튜립화염의 형상을 찾을 수 없는데, 이는 당량비가 증가할수록 전파속도가 현저히 떨어져 부력의 효과가 상대적으로 커지기 때문이다.

반면에 정상초음파가 존재하는 경우, 부력에 의한 화염의 치우침 현상이 현저히 줄어든다. 이는 정상초음파가 연소반응의 촉진을 통하여 화염 전파속도를 증대시킬 뿐만 아니라 화염 형상에 대한 부력의 효과를 감쇄시켜 화염안정화에 기여한다는 사실을 논증하는 것이다. 그림에서는 정상초음파에 의한 화염전파속도의 영향이 연료과잉조건($\phi \geq 1.2$)에서 점점 크게 발현한다는 사실도 관찰된다($0 < x \leq 0.3$).

관내 예혼합화염 전파에서 평면 혹은 튜립화염으로 천이하는 시간 및 거리는 실험조건에 따

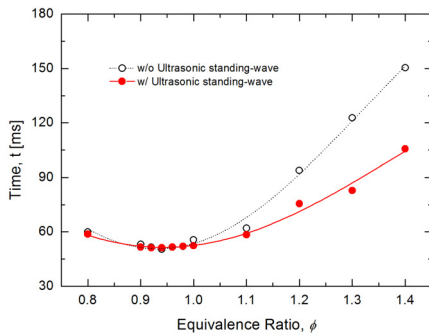


Fig. 7 Time for formation of plane flame at various equivalence ratios

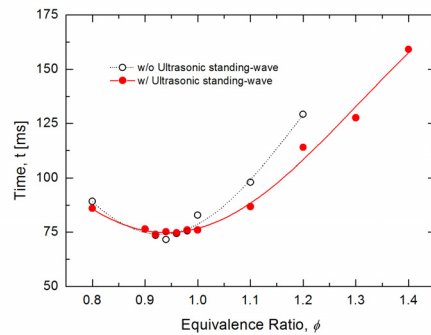


Fig. 9 Time for formation of tulip flame at various equivalence ratios

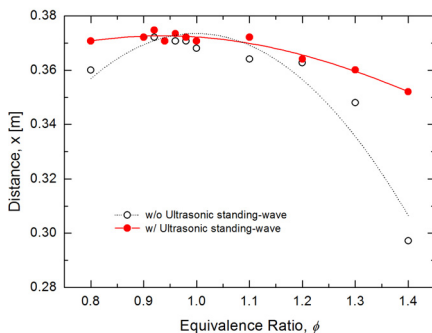


Fig. 8 Effects of USW on the distance of plane flame formation

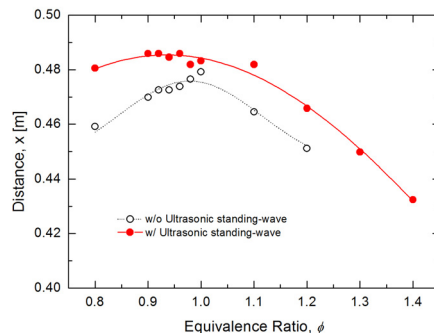


Fig. 10 Effects of USW on the distance of tulip flame formation

라 일정한 특성을 보인다. 이러한 천이특성은 화염의 전파거동을 이해하는데 매우 중요하다. Figs. 7, 8은 다양한 당량비에서 초음파장의 존재 유무에 따라 평면화염 혹은 그 형태가 유사한 준 평면화염으로 변이하는 시간과 거리를 나타낸다. 전파화염이 평면화염으로 전환하는데 걸리는 시간은 당량비 0.9 - 1.0에서 가장 짧으며, 이 구간을 벗어날수록 평면화염 형성에 소요되는 시간이 길어지는 것을 확인할 수 있다. 또, 평면화염으로 변화가 일어나는 거리 역시 $0.9 \leq \phi \leq 1.0$ 에서 제일 먼 것을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 연소속도가 증가하면 평면/튠립형태의 화염으로 변이가 일어나는 거리가 점화지점으로부터 멀어진다는 기존연구와 부합한다[3].

이러한 평면화염으로 천이하는 시간과 거리는 정상초음파의 존재로 인해 다른 결과를 보이는데, 평면화염으로 전환하는 시간은 감소하고, 천이가 일어나는 거리는 멀어지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 정상초음파에 의한 화염의 전파속도 증대에 기인하는 것이다. 당량비 0.9 - 1.0의 조건에서 초음파장에 의한 변화가 미약해 보이는 것은, 연소반응이 포화상태에 이른 이론당량비 영역에서 정상초음파에 의한 연소반응 강도의 증대효과가 상대적으로 줄어들기 때문이다. 저당량비인 $\phi = 0.8$ 의 경우, 평면화염으로 변이시간은 크게 바뀌지 않지만 그 거리는 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 정상초음파의 영향은 가연한계 내에서 이론당량비로부터 벗어날수록 뚜렷해진다는 사실을 $\phi = 1.4$ 에서의 평면화염 천이특성으로 부터 확인할 수 있다.

Figures 9, 10은 튠립화염이 형성되는 시간 및 거리를 정상초음파의 존재 유무와 당량비 조건에 따라 도시한다. 튠립화염의 생성시간은 평면화염과 유사하게 당량비 0.9 - 1.0에서 제일 빨랐으며, 변이거리 또한 동일한 당량비 구간에서 가장 멀었다. 또, 당량비가 1.2 보다 큰 경우에는 전술한 바와 같이 부력의 영향이 전파속도의 그것에 비해 비교적 커서 튠립형상이 발현하지 않았다. 이에 반해, 초음파장이 개재된 화염에서는 $\phi = 1.4$ 의 조건에서도 튠립화염이 관찰되고 있

다. 이는 정상초음파의 존재가 화학반응이 낮은 영역에서 열전달과 생성물 기체의 혼합을 증대 시킴으로써, 부력효과를 극복하고 튠립화염 형상을 회복시키는 화염구조의 안정화효과에 기인하는 것으로 사료된다.

4. 결 론

정상초음파의 간섭에 의한 프로판/공기 예혼합화염의 구조 및 거동 변화를 관찰한 실험적 연구를 기술하였으며, 그 주요결과는 다음과 같다.

- (1) 프로판/공기 예혼합화염은 반구화염, 평면화염, 튠립화염의 형태로 전파하며, 전파가 진행될수록 화염선단은 부력의 효과로 인해 상단부로 기울어지는 현상이 관찰된다.
- (2) 정상초음파가 존재하는 경우 화염전파속도는 증가하였으며, 예혼합조건이 이론당량비 영역에서 벗어날수록 초음파의 효과가 크게 나타난다.
- (3) 정상초음파에 의해 평면/튠립화염으로 전환하는 시간은 빨라지며, 천이하는 거리 또한 멀어지는 사실이 관찰된다. 그러나 당량비 0.9 - 1.0의 조건에서 초음파에 의한 거동의 변화가 미미해 보이는데, 이는 연소반응이 포화상태에 이른 이론당량비 영역에서 정상초음파에 의한 연소반응 강도의 증대효과가 상대적으로 줄어들기 때문이다.
- (4) 정상초음파는 연소반응을 촉진시킬 뿐만 아니라 화염구조의 안정화에도 작용하는 사실을 발견할 수 있다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2012014086).

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. Williams, F. A., *Combustion Theory*, 2nd edition, Addison - Wesley, Redwood, CA: 1985, p.349
6. Bechtold, J. K. and Matalon, M., "Hydrodynamic and Diffusion Effects on the Stability of Spherically Expanding Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 67, Issue 1, 1987, pp.77-90
7. Huzayyin, A. S., Moneib, H. A., Shehatta, M. S., and Attia, A. M. A., "Laminar Burning Velocity and Explosion Index of LPG-Air and Propane-Air Mixtures", *Fuel*, Vol. 87, Issue 1, 2008, pp.39-57
8. Jomaas, G., Law, C. K., and Bechtold, J. K., "On Transition to Cellularity in Expanding Spherical Flames," *J. Fluid Mech.*, Vol. 583, 2007, pp.1-26
9. Harrje, D. J. and Reardon, F. H. (Eds.), "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability," NASA SP-194, 1972
10. Huzel, D. K. and Huang, D. H., *Modern Engineering for Design of Liquid-propellant Rocket Engines*, Vol. 147, AIAA, Washington D. C., 1992
11. 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
12. 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 Tribrachial Flames in Coflow Jets," *Combustion and Flame*, Vol. 152, Issue 4, 2008, pp.496-506
13. 김승곤, 김강태, 박정, "음향 가진된 프로판 비예혼합 제트 화염의 부상 거동에 대한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 B권*, 제28권, 제5호, 2004, pp.569-579
14. 서항석, 이상신, 김정수, "정상 초음파장의 간섭에 의한 메탄/공기 예혼합화염의 구조 변이," *한국추진공학회지*, 제15권, 제6호, 2011, pp.1-6
15. 서항석, 이상신, 김정수, "메탄/공기 예혼합 화염의 동역학적 거동과 정상초음파의 교반," *한국추진공학회지*, 제16권, 제3호, 2012, pp.16-23
16. Kim, J. S., Seo, H. S., and Lee, S. S., "An Evolution of the Premixed Flame Precipitated by Ultrasonic Standing Wave," *AIAA 2012-4032*, 2012