

정상초음파가 개재하는 메탄/공기 및 프로판/공기 예혼합화염의 동역학적 특성 비교

김민철^a · 배대석^b · 김정수^{b,*}

Comparison of Dynamic Characteristics of Methane/Air and Propane/Air Premixed Flames with Ultrasonic Standing Wave

Min Cheol Kim^a · Dae Seok Bae^b · Jeong Soo Kim^{b,*}

^aDepartment of Material Engineering, Undergraduate School, Pukyong National University, Korea

^bDepartment of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

ABSTRACT

An experimental results on the dynamic characteristics of hydrocarbon/air premixed flames with ultrasonic standing waves are presented and compared. Images of the propagating flames were acquired by using a high-speed camera, and the flame behavior of methane/air and propane/air premixed flame were closely scrutinized through the image post-processing. At the fuel-lean conditions, the flame propagation velocity increased due to the intervention of the ultrasonic standing wave and vice versa at the fuel-rich conditions.

초 록

정상초음파가 개재하는 탄화수소계 연료공기 예혼합화염의 동역학적 특성 비교에 대한 실험적 연구 결과를 제시한다. 전파화염의 이미지는 고속카메라를 이용하여 획득하였으며, 이미지 후처리를 통해 메탄/공기와 프로판/공기 예혼합화염의 화염거동을 상세히 관찰하였다. 이론당량비 이하의 연료희박조건에서 정상초음파 개재에 의한 연소반응 촉진으로 인해 화염전파속도는 증가되었다. 한편, 당량비가 1.2 인 메탄/공기 화염과 당량비 1.4 이상의 프로판/공기 화염의 전파속도에 대한 초음파의 영향은 연료희박조건과 반대되는 결과를 보였다.

Key Words: Combustion Reaction(연소반응), Premixed Flame(예혼합화염), Ultrasonic Standing Wave (정상초음파), Flame Propagation(화염전파)

Received 10 May 2017 / Revised 25 June 2017 / Accepted 29 June 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

산업발전의 핵심요소인 에너지의 대부분은 유체역학적인 거동과 화학반응의 상호작용이 존재하는 복합적인 현상인 연소를 이용하여 생산된다. 선박, 항공기, 우주 탐사 및 국방 등에 활용되는 연소 시스템은 제한된 공간에서 작동이 이루어지며, 이때 그 자체의 경계조건과 유체동역학적 특성이 연계하여 연소 불안정이 유발된다고 알려져 있다[1]. 예컨대 연소시 발생하는 열 방출에 의해 생성되는 아주 작은 섭동들이 연소실의 음향모드와 위상이 일치하면 연소실 내의 압력이 급격히 높아져 챔버의 파손이 일어나기도 한다.

예혼합화염에서 연소 불안정의 전형적인 징조로 알려져 있는 튜립화염은 Ellis와 De[2]에 의해 최초로 관찰되었으며(1928), Salamandra 등[3]에 의해 튜립화염으로 불리기 시작했다. 이 화염은 연소챔버의 종횡비(aspect ratio)가 2 이상일 때 반구형태의 화염선단이 역으로 뒤집히는 현상을 말하며, 종횡비가 20 이상이 되면 반구화염과 튜립화염이 반복하여 나타난다고 알려져 있다[4]. Kaltayev 등[5]은 전산모사 해석을 통해 메탄-공기 예혼합화염의 수력학적 구조(hydrodynamic structure) 변화를 챔버 길이별로 제시하였고, 최근에는 Xiao 등[6]이 수소-공기 예혼합화염의 전파 과정 중에 화염선단이 역전되어 나타나는 cusp에 부차적 굴절(secondary inflection)이 발생한다는 사실을 보고한 바 있다. 이와 같이 예혼합화염과 관련된 실험적, 해석적 연구는 오랜 기간 진행되어 왔지만, 현재까지도 예혼합화염에서 발생하는 연소불안정의 근원에 대해 명확한 결론을 내리지 못하고 있는 실정이다[7]. 한편 인위적으로 압력파를 조절함으로써 연소반응을 촉진시키고, 연소불안정성 해결에 기여할 수 있다는 사실이 보고됨에 따라[8,9], 본 연구진은 자동차, 항공기, 그리고 액체로켓엔진 등과 같은 연소 및 추진 시스템에서 발생하는 연소불안정성의 능동적 제어를 궁극적 목표로 하여, 정상초음파장(Ultrasonic Standing Wave, USW) 교반에 의한 관내 예혼합화염 연소장의 구조 및 거동 변화를 관찰한 바 있다. 그 결과, 정상초음파에 의한 화염선단의 찌그러짐과 기연부에서의 밀도

층상화 현상을 발견하였으며, 화염전파속도가 증가한다는 사실을 확인하였다[10-14].

본 연구에서는 선행연구에 더하여, 메탄/공기 및 프로판/공기 예혼합화염에 정상초음파가 개재할 때 발생하는 화염의 전파거동을 정량적으로 비교, 고찰하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

화염의 전파속도는 예혼합 연소현상을 기술하는데 있어서 중요한 지표 중의 하나이다. 밀폐용기 내에서 화염이 전파하는 경우, 연소실의 압력 변동으로 인해 정확하게 전파속도를 측정하는 것은 쉽지 않아 화염사진과 압력데이터를 이용하여 구하는 방법[15] 등이 사용되고 있다.

정상초음파장이 관내에 국소적으로 작용할 때 연료별 예혼합화염에 미치는 영향을 관찰하기 위해 사용된 실험장치의 개략도가 Fig. 1에 도시된다. 실험장치는 연소챔버(combustion chamber), 고속카메라(high-speed camera), 그리고 DACS(Data Acquisition & Control System) 등으로 구성된다. 연소챔버는 연소 가시화를 위해 광학적 관찰이 가능한 PMMA (Polymethyl Methacrylate)를 사용하여 폭 0.15 m, 높이 0.06 m, 길이 1.00 m인 직육면체 형태로 설계/제작하였다. 직육면체 챔버는 원관형챔버와 화염 전파 특성이 질적으로 크게 다르지 않아, 본 실험목적에 적합하다고 판단하였다. 또한, 챔버 재질의 가압 한계로 인해 연소챔버의 후부 상단에 약

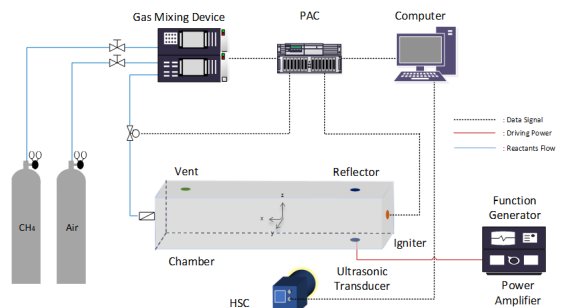


Fig. 1 Experimental setup.

2.5 bar에서 작동하는 기계적 개방시스템(discharge vent)을 설치하여 안전성을 확보하였다. 연료 및 산화제는 질량유량제어기(Mass Flow Controller, MFC)와 솔레노이드 밸브(solenoid valve)를 이용하여 초기 실험조건을 조성하였으며, 연료와 산화제의 혼합을 위해 고정식 연속 혼합기(static mixer)로 구성된 가스혼합장치(gas mixing device)를 사용하였다. 챔버 내부의 압력섭동은 정압센서(static pressure sensor) 및 동압센서(dynamic pressure sensor)를 이용하여 관찰하였으며, 챔버의 길이방향 0.30 m 지점에 30 kHz의 주파수를 지닌 PZT (lead zirconate titanate, $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$) 진동자(ultrasonic transducer)와 반사장치(reflector)를 설치하여 국소적 정상초음파장을 생성하였다. DACS는 함수발생기(function generator), 전압증폭기(voltage amplifier), PAC (Programmable

Automation Controllers), 그리고 PC로 구성된다. 함수발생기와 증폭기를 사용하여 초음파진동자를 구동하였으며, PAC를 이용하여 획득한 데이터, 점화장치신호 그리고 화염이미지를 동기화하여 PC에 저장하였다. 주요 실험조건들을 Table 1에 요약한다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 다양한 당량비에서 메탄/공기 및 프로판/공기 예혼합화염의 선단형상을 8 ms 간격으로 중첩시킨 후처리 이미지이다. 정상초음파가 개재하지 않을 경우, 반구형상으로 전파하는 화염은 튕립화염으로의 천이과정에서 챔버의 상단부로 치우치는 모습을 확인할 수 있으며 전파가 진행될수록 기울어짐이 두드러지는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 화염의 전파속도가 부력의 영향에 비해 상대적으로 크지 않아 나타나는 것으로 알려져 있다[16]. 관내에 정상초음파를 개재할 경우, 화염의 전파속도는 연소실 전 구간에 걸쳐 증가함을 화염선단 간격으로부터 알 수 있다. 또한, 화염선단에서의 기울어짐이 현저히 줄었음을 관찰할 수 있으며, 전파속도의 증가로 인해 부력의 영향이 상대적으로 감소된 것을 Fig. 2(a), (b) 모두(또는 특정 그림)에서 관찰된다. 한편, 당량비가 증가함에 따라 메탄/공기의 연소는 프로판/공기의 경우보다 부력의 영향이

Table 1. Condition for experiment.

Parameter	Value	
Fuel	Gaseous Methane	
	Gaseous Propane	
Oxidizer	Air	
Initial Pressure, P	1 bar	
USW Frequency	30 kHz	
Equivalence Ratio, Φ	*M/A	0.7~1.2
	**P/A	0.9~1.7

*M/A: Methane/Air, **P/A: Propane/Air

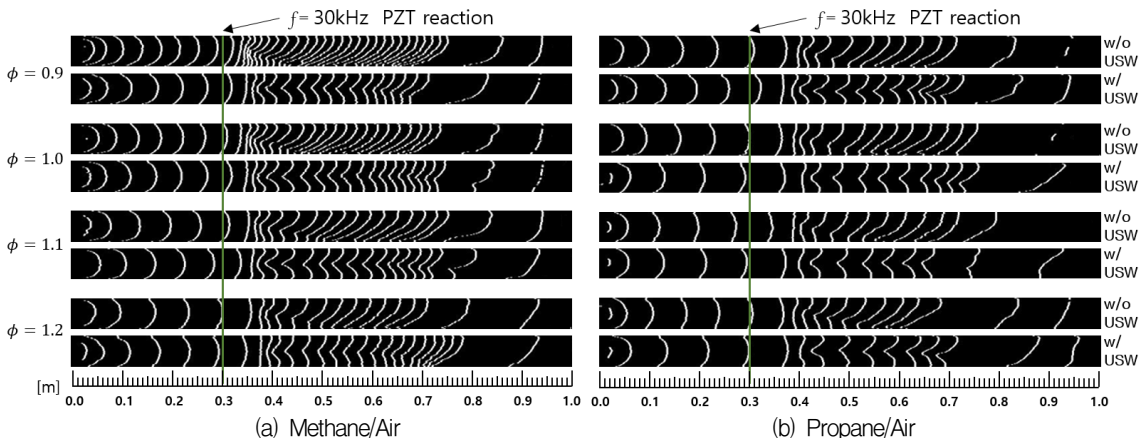


Fig. 2 Superposition of evolutionary flame fronts at various equivalence ratios (time interval: 8 ms).

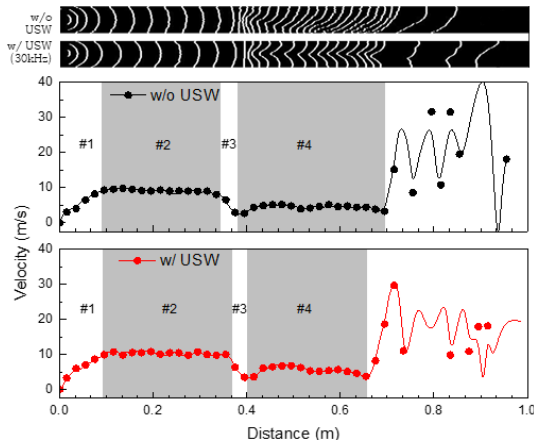


Fig. 3 Overlapped C₃H₈/Air premixed flame fronts at $\Phi = 1.1$ (time interval: 4 ms).

상대적으로 크게 작용하는데, 이는 기연가스의 밀도차이에 기인한 것으로 판단된다.

관내 전파하는 예혼합화염의 구조와 구간별 속도변이를 Fig. 3에 도시한다. 화염선단은 과거에 연구된 화염전파 과정[17]과 유사하게, 다음의 4가지 구간으로 나뉜다. 1)점화 직후부터 화염이 챔버 벽면의 영향을 받기 전의 구간, 2)화염이 벽에 닿아 반구화염으로 전파하는 구간, 3) 화염선단이 반구화염에서 평면화염을 지나 튕립화염으로 활발히 전이하는 구간, 4)튕립화염의 형태를 유지하며 진행되는 구간 등이다. 본 실험 조건에서 화염전파 후반부에는 연소챔버의 개방으로 인해 화염전파속도(flame propagation velocity)가 급격히 빨라지는 구간이 확인된다.

정상초음파에 의한 화염의 속도변이를 면밀히 분석하기 위해 획득한 이미지에 후처리를 통해 도출한 정량적 결과를 Fig. 4에 도시한다. 화염선단 이미지로부터 전파방향(x)의 RGB데이터 평균값으로 화염의 위치를 지정하고, 해당 구간에서의 소요 전파시간을 적용하여 거리에 따른 속도를 도출하였다. Fig. 2와 함께 각 위치에서의 화염형상과 전파속도를 비교 관찰하였다. 전파속도는 메탄/공기 및 프로판/공기의 각 화염이 점화 후 벽면의 영향을 받기 전까지 전파속도는 점진적으로 증가하고, 화염이 벽면의 영향을 받아 반구화염으로 전파하기 시작하면 화염의 속

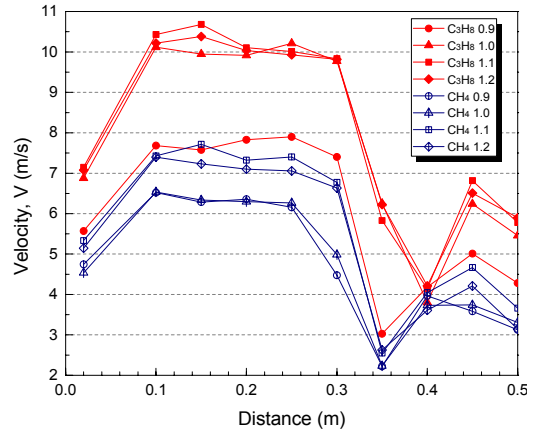


Fig. 4 Comparison of the propagation velocity of CH₄/Air and C₃H₈/Air flame with USW.

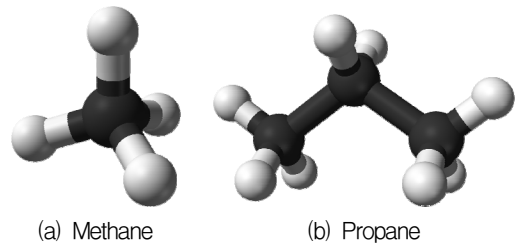


Fig. 5 Combination structure of methane and propane.

도는 일정하게 유지된다. 이후 화염선단이 펼쳐지기 시작하고 평면화염을 거쳐 튕립화염으로 전이하는 동안 화염속도는 지속적으로 감소하지만 완전한 튕립화염으로 변이되면서 약간의 속도상승을 동반한다.

메탄/공기 화염의 최대 전파속도는 이론당량비($\Phi = 1.0$)가 아닌 $\Phi = 1.1$ 에서 나타나며, 프로판/공기 화염 또한 연료과농인 $\Phi = 1.1, 1.2$ 의 화염전파속도가 더 빠르다는 사실이 Fig. 2, 4에서 확인된다. 또한 메탄/공기와 프로판/공기의 화염전파속도의 차이가 명확히 구별되며 이는 메탄/공기 예혼합기와 프로판/공기 예혼합기가 가지는 결합력의 차이에서 비롯된다. 메탄은 1개의 탄소원자(Carbon, C)와 4개의 수소원자(Hydrogen, H)로 이루어져 C-H 결합(Fig. 5(a))하는 반면, 프로판은 C-C 결합과 C-H 결합(Fig. 5(b))을 이루고 있다. C-C 결합은 C-H 결합력보다 약하기 때문에 연쇄반응을 하는 연료의 경우

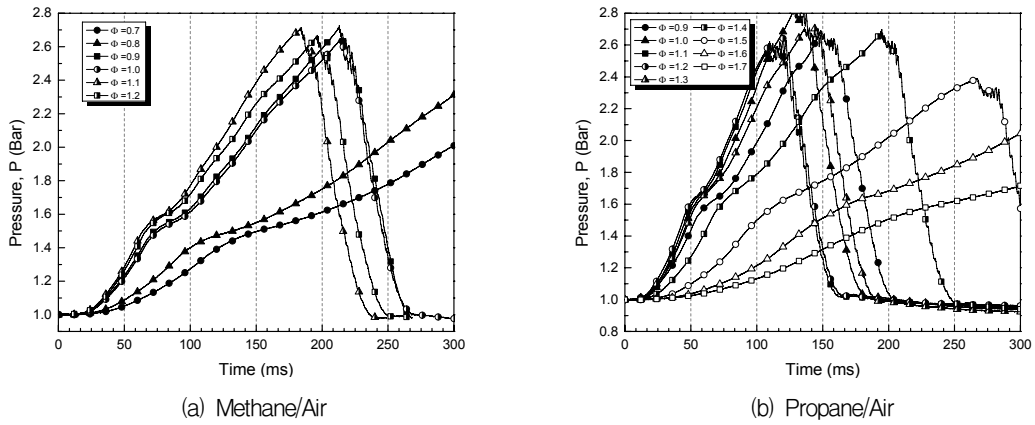


Fig. 6 Pressure variation in the premixed chamber at various equivalent ratios with USW.

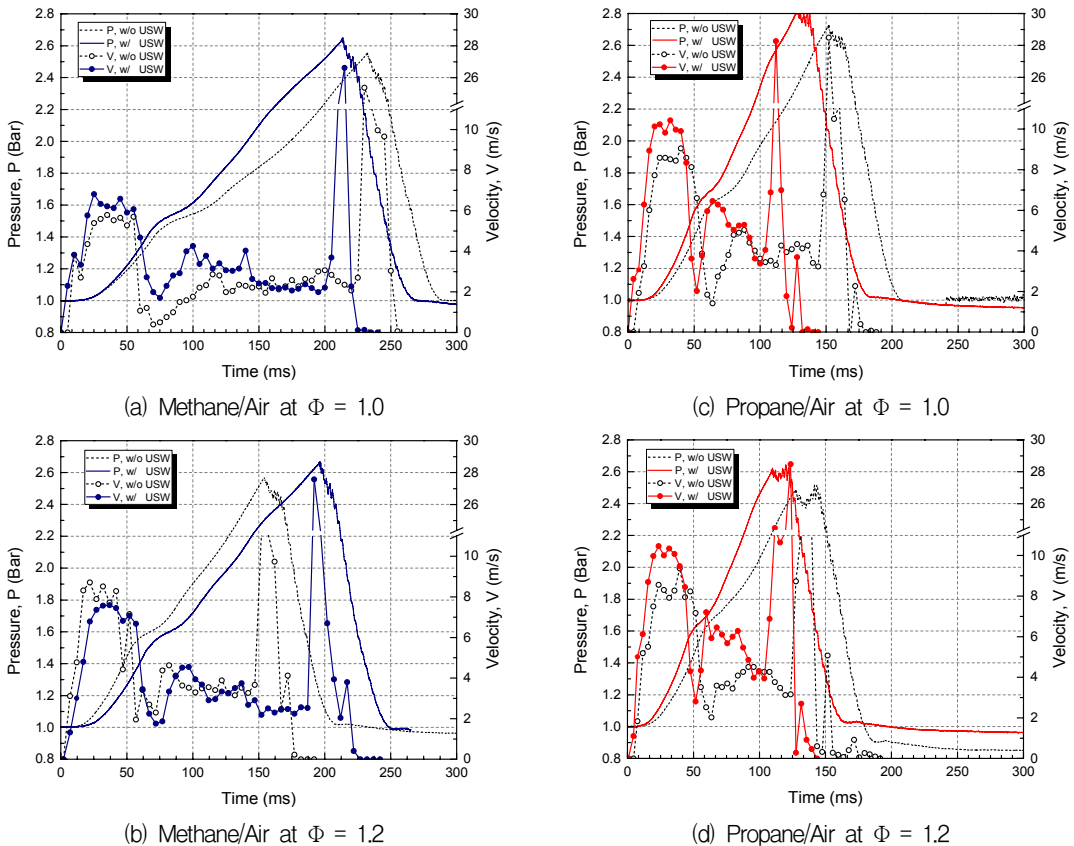


Fig. 7 Effect of ultrasonic standing wave on the variation of flame velocity and chamber pressure.

반응속도 차이가 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

실험 결과로부터 정적 연소실 내의 화염전파 속도는 공급되는 연료와 산화제의 양, 즉 당량비

변화에 따라서 현저한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 정상초음파가 가진될 때 다양한 당량비 조건에서 연료별 예혼합화염의 연소실내 압력변화를 Fig. 6에 도시한다. 연소 하한계(메탄/공기

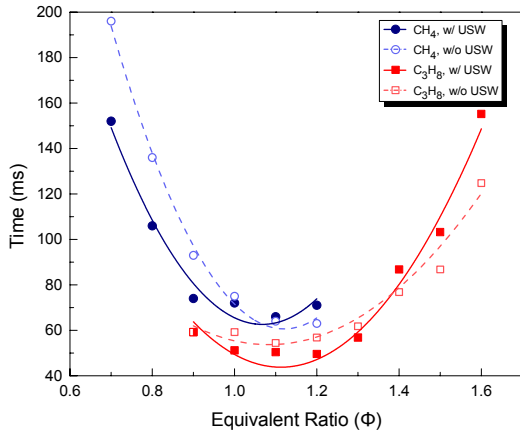


Fig. 8 Transition time reaching plane flame at various equivalence ratios.

$\Phi = 0.7$, 프로판/공기 $\Phi = 0.9$)로부터 당량비가 증가할수록 시간에 따른 압력상승률(dp/dt)은 증가하며, 최대 기울기에 도달한 후 점차 감소하게 된다. 점화 직후 벽면의 간섭을 받기 전에 화염은 점화플러그(spark plug)를 중심으로 구형면의 형태로 전파됨과 동시에 반응면적의 증가가 자유로워 압력이 증가하지 않지만, 벽면과 접촉한 후에 화염면적 증가의 제약으로 인해 압력은 상승하기 시작한다. 또, 평면화염으로 변하는 과정에서 벽면의 영향, 연소생성물의 감소 등으로 화염선단면적이 줄어들어 압력상승률이 감소하고, 튕립화염으로 천이 후 압력상승률은 다시 회복된다[11].

밀폐된 관내에서 예혼합화염이 전파하는 동안 미연 구간에서의 압력은 상승하기 때문에 압력변이를 통해 화염의 전파속도변이 또한 예측이 가능하다. 화염전파에 따른 속도 및 압력변화를 관찰하기 위해 Fig. 7에서는 시간에 따른 전파속도 및 압력선도를 도시하고 있다. 공통적으로 두 예혼합화염은 점화 직후 챔버의 내벽에 접촉할 때까지 속도가 지속적으로 증가하는 반면, 압력은 증가하지 않고, 이후 선단이 벽에 닿으면서 압력이 상승하고 속도가 유지되는 현상을 보인다. 이후 튕립화염으로 변화하면서 전파속도는 소폭 상승하게 된다. 챔버 후단에서는 챔버개방으로 인해 내부압력이 대기압에 순응한 결과 전파속도가 급격히 상승되었다.

메탄/공기와 프로판/공기의 화염은 연료희박 조건에서 정상초음파에 의한 영향이 화염의 전파속도의 증가로 이어졌으며 압력상승률 또한 증가하였다. 그 효과는 이론당량비(Fig. 7(a), (c))에서도 적용된다. 하지만 연료과농($\Phi = 1.2$)인 메탄/공기 화염전파과정은 프로판/공기 화염과 다르게 초음파 개재로 인해 부정적인 효과를 보인다(Fig. 7(b)).

Fig. 8은 점화 시점부터 평면화염으로 천이되기까지의 시간을 정상초음파 존재 유무와 다양한 당량비 조건에 따라 나타낸 것이다. 메탄/공기 화염이 평면화염으로 변화하기까지 걸리는 시간은 당량비 $\Phi = 1.1$ 에서 가장 짧으며, 연료희박구간($\Phi = 0.7 \sim 0.9$)에서 정상초음파의 영향이 명확히 나타나고 있는데, 이는 정상초음파 개재에 의한 연소반응 촉진으로 인해 야기된 결과이다.

한편, 프로판/공기 화염이 전파할 때 연소 하한계인 $\Phi = 0.9$ 부터 $\Phi = 1.3$ 이까지는 정상초음파의 영향이 화염의 천이시간을 앞당기고 있으나, 그 차이는 크지 않다. 이는 화학반응강도가 포화상태에 이르러 정상초음파에 의한 반응강도의 증대효과가 상대적으로 감소하게 되므로 나타는 결과로 보인다. $\Phi = 1.4$ 이상의 구간에서는 오히려 정상초음파의 존재가 천이시간의 지연을 유발하였다. 이는 메탄/공기의 $\Phi = 1.2$ 조건에서도 볼 수 있듯이, 연료과농상태에서 정상초음파의 교반이 화학반응강도 증대에 역작용하여 전파속도의 감소를 야기하기 때문인 것으로 사료된다. 프로판/공기의 $\Phi = 1.7$ 에서는 부력의 효과가 조기에 작용하여 평면화염으로 전환되지 못해 정상초음파에 의한 천이시간을 분석하지 못하였다.

4. 결 론

본 연구는 정상초음파가 개재할 때 발생하는 예혼합 메탄/공기와 프로판/공기 화염의 전파거동에 대한 당량비의 영향을 정량적으로 고찰한 실험적 연구로 다음과 같이 내용을 요약할 수

있다.

- (1) 메탄/공기 및 프로판/공기 예혼합화염은 반구화염, 평면화염, 튜립화염의 형태로 전파되며, 화염의 전파속도가 느릴수록 부력의 상대적인 영향이 커져 화염이 챔버 상단부로 치우치는 현상이 관찰되었고, 연료 회박 구간에서 정상초음파의 존재가 전파속도의 증가를 유발하여 부력의 효과를 상쇄시키는 것을 확인하였다.
- (2) 메탄/공기 및 프로판/공기의 연료회박 조건에서 정상초음파에 의한 연소반응의 증대효과를 확인할 수 있었으며, 이론당량비 구간에서도 그 효과는 유효함을 보였다. 당량비가 1.2인 예혼합 메탄/공기 화염과 연료과농($\Phi \geq 1.4$) 프로판/공기 화염에서 초음파의 화염전파속도에서 영향은 역전되는 현상을 보인다.
- (3) 프로판/공기 화염이 전파할 때 $\Phi = 1.3$ 이하까지는 정상초음파의 영향이 화염의 천이시간을 앞당겼으나 그 영향은 미미하며, 메탄/공기 화염의 $\Phi = 1.1$ 조건에서도 유사한 현상이 관찰된다. 이는 화학반응강도가 포화상태에 이르러 정상초음파에 의한 반응강도의 증대효과가 상대적으로 감소하기 때문이다.

이상에서와 같이 챔버내부에 정상초음파장이 개재하면 탄화수소계 연료/공기 예혼합기의 연료회박조건에서 연소반응을 촉진시킨다는 점을 확인하였고 연소 하한계 당량비를 낮추어 예혼합화염의 생성과 전파를 가능케 하는 당량비 범위를 확장시키는 방법으로 연소효율 증대를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Ducruix, S., Schuller, T., Durox, D. and Candel, S., "Combustion Dynamics and Instabilities: Elementary Coupling and Driving Mechanisms," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 5, pp. 722-734, 2003.
2. Ellis, O.C. and De, C., *Fuel in Science and Practice 7, Colliery Guardian Company*, London, U.K., pp. 502-508, 1928.
3. Salamandra, G.D., Bazhenova, T.V. and Naboko, I.M., "Formation of Detonation Wave during Combustion of Gas in Combustion Tube," *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 7, Issue 1, pp. 851-855, 1958.
4. Guénoche, H., *Nonsteady Flame Propagation*, Pergamon, New York, N.Y., U.S.A., Vol. 75, pp. 107-176, 1964.
5. Kaltayev, A.K., Riedel, U.R. and Warnatz, J., "The Hydrodynamic Structure of a Methane-Air Tulip Flame," *Combustion Science Technology*, Vol. 158, No. 1, pp. 53-69, 2000.
6. Xiao, H., Wang, Q., He, X., Sun, J. and Shen, X., "Experimental Study on the Behaviors and Shape Changes of Premixed Hydrogen-Air Flames Propagating in Horizontal Duct," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, Issue 10, pp. 6325-6336, 2011.
7. Bychkov, V.V. and Liberman, M.A., "Dynamics and Stability of Premixed Flames," *Physics Reports*, Vol. 325, Issues 4-5, pp. 115-237, 2000.
8. Annaswamy, A.M. and Ghoniem, A.F., "Active Control of Combustion Instability: Theory and Practice," *IEEE Xplore: Control System Magazine*, Vol. 22, Issue 6, pp. 37-54, 2002.
9. Hayashi, A.K., Sato, H., Endo, T., Yasunami, Y., Yoshimi, S., Ogawa, S.,

- Ikame, M., Kishi, T., Hiraoka, K., Harumi, K. and Oka, H., "Analysis of Unstable Phenomena in Premixed Flame Burners and Their Active Control," *Proceeding 4th Symposium Smart Control of Turbulence*, Tokyo, Japan, pp. 173-182. Mar. 2003.
10. Seo, H.S., Lee, S.S. and Kim, J.S., "Effect of the Equivalence Ratio on Propagation Characteristics of CH₄-Air Premixed Flame Intervened by an Ultrasonic Standing Wave," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 2, pp. 16-23, 2013.
 11. Bae, D.S., Seo, H.S. and Kim, J.S., "Effects of Driving Frequency on Propagation Characteristics of Methane-Air Premixed Flame Influenced by Ultrasonic Standing Wave," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No. 2, pp. 161-168, 2015.
 12. Lee, S.S., Seo, H.S. and Kim, J.S., "Propagation Behavior and Structural Variation of C₃H₈-Air Premixed Flame with Frequency Change in Ultrasonic Standing Wave," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 2, pp. 173-181, 2014.
 13. Lee, S.S., Seo, H.S. and Kim, J.S., "Interacting Effects of an Ultrasonic Standing-wave on the Propagation Behavior and Structural Stabilization of Propane/Air Premixed Flame," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 1-8, 2012.
 14. Seo, H.S., "An Investigation of the Premixed Flame Propagation Characteristics by the agitation of Ultrasonic Standing Wave," Master's Thesis, Graduate School, Pukyong National University, Department of Mechanical Engineering, 2013.
 15. Woodard, J.B., Hirvo, D.H., Greif, R. and Sawyer, R.F., "Wall Heat Transfer and Flame Propagation in a Constant-Volume Duct," *Western States Section/The Combustion Institute*, paper No. 81-51 and LBL Report No. LBL-13021, 1981.
 16. 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, pp. 39-57, 2008.
 17. Clanet, C. and Searby, G., "On the 'Tulip Flame' Phenomenon," *Combustion and Flame*, Vol. 105, Issues 1-2, pp. 225-238, 1996.