

정상초음파장이 메탄/공기 예혼합화염의 거동에 미치는 영향

서항석* · 이상신** · 김정수**† · 이도형**

Effects of an Ultrasonic Standing-wave Field on the Behavior of Methane/Air Premixed Flame

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

ABSTRACT

An experimental study has been conducted to investigate the effects of an ultrasonic standing-wave field to the behavior of methane/air premixed flame. Visualization technique utilizing the schlieren method was employed for the observation of premixed flame behavior. The shape of flame front and local flame velocity were measured according to the variation of reactants pressure and chamber opening/closing condition. The flame front was distorted and severely deformed to a lotus-type flame by the interaction of ultrasonic standing-wave and the reflection wave coming from an end wall of reactor.

초 록

본 연구에서는 연소 불안정성의 능동적 제어를 위해 정상초음파장이 예혼합화염의 거동에 미치는 영향을 규명하기 위한 실험 결과를 제시한다. 화염구조변이를 관찰하기 위해 슈리렌 기법을 이용하였으며, 초기압력 및 연소챔버 개폐 유무에 따라 화염전단의 형태 및 화염 전파속도를 고찰하였다. 정상초음파장에 의한 화염전단의 찌그러짐이 관찰되었고, 반사파와 정상초음파의 영향으로 연꽃모양의 화염(lotus flame)이 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words: Combustion Instability(연소 불안정성), Premixed Flame(예혼합화염), Ultrasonic Standing-wave(정상초음파), Flame Propagation(화염 전파), Schlieren Method(슈리렌 기법), Lotus Flame(연꽃 화염)

1. 서 론

자동차 엔진, 발전소 버너설비, 항공용 가스터

빈엔진 등 대부분의 연소 및 추진시스템에서 발생하는 연소불안정 현상은 시스템의 성능 저하 및 수명 단축을 야기하는 가장 큰 요소 가운데 하나로 반드시 해결해야 할 문제이다. 이런 연소 불안정성은 연소기 내의 압력변동(pressure oscillation)이 열구조적 부하(thermal-structural

* 부경대학교 대학원 에너지시스템공학과

** 부경대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

loads)의 높은 증폭을 동반함으로써 나타나는데, 궁극적으로 화염과 음파의 상호작용으로 귀결될 수 있다. 그와 같은 상호작용은 일반적으로 시스템의 효율을 저하시키고 구조적인 문제점을 발생시키지만, 인위적인 음파가진에 의한 화염과의 중첩이 연소반응을 촉진시키고, 연소 불안정성 해결에 기여할 수 있다는 사실이 보고되고 있다 [1, 2]. 이에 따라 음파 가진된 화염의 변화를 정성적/정량적으로 연구하여 전술한 연소 불안정성을 능동적으로 해결하기 위한 연구가 진행되고 있다. 최근에는 Tanabe 등[3]이 정상과 유동장에 노출된 액적의 연소특성을 챔버압력, 음압, 액적의 위치, 중력유무에 따라 관찰하였고, Dattarajan 등[4]은 음파가진된 액적의 연소율 변화를 액적 크기, 주파수, 음압, 음파장 내의 액적 위치 등의 조건별로 파악하였다. 또, 김승곤 등 [5]은 연료관을 공진주파수로 가진하여, 그 정도에 따른 제트화염의 거동변화를 실험적으로 수행하였다. 그러나 관내 예혼합화염과 음파의 상호작용을 연구한 사례는 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 연소 불안정성의 능동적 제어를 궁극적 목표로 하여 정상초음파장이 예혼합화염의 거동에 미치는 영향을 알아보려고 한다.

2. 실험장치 및 방법

Figure 1은 실험에 이용된 연소챔버와 슐리렌 장치(schlieren apparatus)를 도시한다. 연소챔버는 아크릴을 사용하여 폭 150 mm, 높이 60

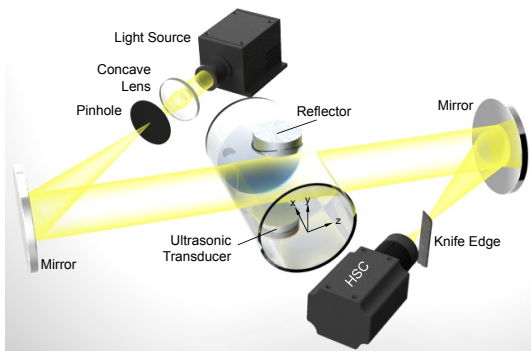


Fig. 1 Schematic of Experimental Set-up

mm, 길이 1,000 mm로 제작되었으며, 길이방향 300 mm 지점에 정상초음파장 형성을 위한 40 kHz의 주파수를 가진 PZT(lead zirconium ceramic) 진동자(ultrasonic transducer)와 반사장치(reflector)를 설치하였다.

동일한 조건에서의 실험을 위해 챔버를 저진공으로 만든 후, 메탄과 공기를 사용하여 반응물 (Table 1 참조)을 조성하였다. 이때 당량비 (equivalence ratio)는 압력센서(pressure transducer), 솔레노이드 밸브(solenoid valve), 그리고 DACS(Data Acquisition & Control System)의 피드백제어로 정밀 조절된다. 또, 예혼합가스의 균질혼합 상태(well stirred)를 담보하기 위하여 혼합용 팬을 활용해 일정시간 이상 혼합하여 요구 실험 조건을 형성하였다. 스파크 점화장치를 이용하여 발화시키고, 연소 후 급격한 압력증가를 피하기 위해 연소챔버 후단의 상부에는 개폐시스템을 설치하였다.

슐리렌 기법에 의한 영상 획득을 위해 할로겐 램프, 한 쌍의 구형 오목거울, 나이프에지(knife edge)를 사용하여, $x/L = 0.3$ (초음파 진동자 위치), $x/L = 0.6$ 인 두 지점에서 전파하는 화염을 고속카메라(High Speed Camera, HSC)로 촬영하였다. 고속카메라의 이미지 획득율(frame per second)은 30 kHz이며, 노출시간(exposure time)은 2 μ s로 설정하였다.

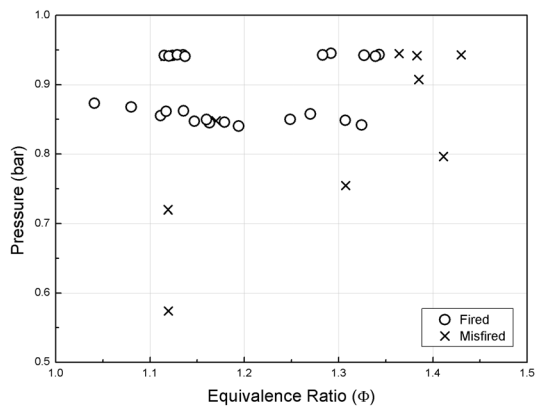


Fig. 2 Pre-test Result for the Determination of the Experimental Conditions, Pressure vs. Equivalence Ratio

Table 1. Experimental Condition

Case	P _{Tot} (bar)	P _{CH4} (bar)	P _{Air} (bar)	*	Standing Wave**	Open/Closed***
a	0.94	0.10	0.84	1.12	N	Open
b	0.94	0.10	0.84	1.12	Y	Open
c	0.94	0.10	0.84	1.12	N	Close
d	0.94	0.10	0.84	1.12	Y	Close
e	0.86	0.09	0.77	1.11	N	Close
f	0.86	0.09	0.77	1.11	Y	Close

*Equivalence Ratio **Ultrasonic Standing-wave Field
 ***Chamber Open/Closed System

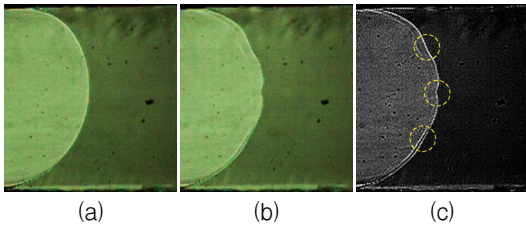


Fig. 3 Still Images of Temporal Evolution of Flame Fronts: (a) without Standing Wave, (b) with Standing Wave, and (c) Image-processed View of that with Standing Wave

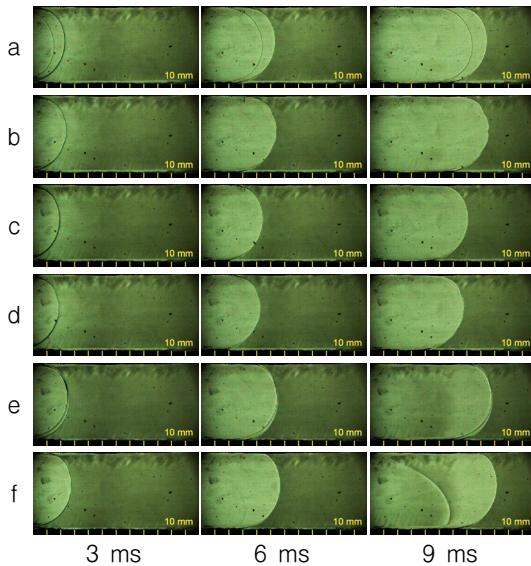


Fig. 4 Still Images of Temporal Evolution of Flame Fronts at $x/L = 0.3$ according to the Case of Table 1

3. 실험결과 및 고찰

Figure 2는 정상초음파장의 유무에 따른 예혼합화염의 특성 관찰을 위한 예비실험으로 다양한 당량비 및 압력 조건에서의 점화여부를 보이는 결과이다. 실험은 연소챔버의 설계규격에서 오는 작동한계로 인하여 저압에서 수행되었고, 당량비 1.35 이하, 압력 0.84 bar 이상이 본 실험 조건의 점화한계임을 확인할 수 있었으며, 그에 따라 결정된 실험수행 조건을 Table 1에 요약하고 있다.

정상초음파장의 유무에 따라 예혼합화염이 전파되는 형상의 변이를 Fig. 3에 보인다. Fig. 3(a)는 정상초음파장이 존재하지 않는 경우이며, 반구형태의 매끈한 화염선단이 관찰된다. 반면, 정상초음파장의 간섭이 존재할 때는 Fig. 3(b)에 보인 것처럼 화염의 선단이 찌그러지는 것이 확인되며, 명확한 관찰을 위해 후처리된 이미지를 Fig. 3(c)에 나타낸다. 음파장이 존재하는 실험 조건에서 화염선단의 찌그러지는 부분이 일관된 위치에서 확인되며, 이는 정상초음파장이 형성되어 있음을 반증한다.

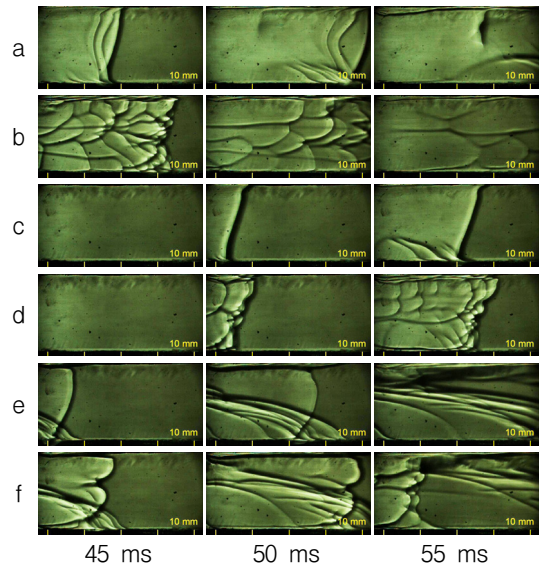


Fig. 5 Still Images of Temporal Evolution of Flame Fronts at $x/L = 0.6$ according to the Case of Table 1

Table 2.. Local Flame Velocity and its Augmentation Rate by Ultrasonic Excitation where $x/L = 0.3$ and $x/L = 0.6$

Case	$x/L = 0.3$		$x/L = 0.6$	
	V_f (or $V_{f,u}$) (m/s)	Aug. Rate of V_f^* (%)	V_f (or $V_{f,u}$) (m/s)	Aug. Rate of V_f^* (%)
a	10.053	1.7	4.477	16.0
b	10.224		5.192	
c	8.613	-3.2	3.422	5.0
d	8.335		3.593	
e	10.195	3.8	3.924	7.4
f	10.584		4.214	

* $(V_{f,u}-V_f)/V_f$

Figure 4는 $x/L = 0.3$ 에서 각 조건별로 동일한 시간에 획득한 이미지다. 전술한 바와 같이 정상초음파장이 존재하는 조건에서 화염선단의 미세한 찌그러짐 현상이 Fig. 4b, d, f에서 확인 되었으며, 화염이 전파됨에 따라 화염대 선단의 생성물 영역이 종방향(x방향)으로 갈라지고 있는 사실이 Fig. 5에 관찰된다. 이와 같은 갈라짐은 음파장이 유발하는 횡방향(y방향)의 압력 구배에 따른 국부적인 소염현상으로 해석할 수 있다. 또한, 정상초음파장이 존재할 때 $x/L = 0.3$ 에서는 반구형태의 층류화염이 전파되고 있으나, $x/L = 0.6$ 지점에서는 반사파와 음파장의 영향으로 연꽃모양의 화염(lotus flame)이 관찰되고 있다.

화염의 전파속도는 초기압력 및 연소챔버 개폐유무에 따라 차이가 있음이 Fig. 4에서 관찰되며, Table 2는 각 구간 및 조건별 화염속도를 측정 한 값으로 정상초음파장의 유무에 따라 $x/L = 0.3$ 에서는 속도 차이가 크지 않지만, $x/L = 0.6$ 으로 진행함에 따라 그 정도가 증가한다. 이는 음파장이 국부적으로 소염을 유발하기도 하지만, 가진에 의한 반응물의 활발한 혼합과 추가적인 반응에너지의 공급을 통하여 화염의 전파속도를 증가시키는 요인으로 작용하는 것으로 사료된다.

4. 결 론

메탄/공기 예혼합화염의 거동에 정상초음파장이 미치는 영향을 고찰하기 위해 솔리렌 기법을

이용하여 초기조건을 변화시키며 수행한 실험적 연구로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 정상초음파장의 존재에 의해 화염선단의 구조적 변화가 확인되고, 전파가 진행될수록 화염선단의 생성물 영역이 증상화된 압력장과 동일한 방향으로 갈라지는 현상이 관찰된다.
- (2) 화염전파에 의한 반사파와 정상초음파의 영향으로 연꽃모양의 화염이 관찰된다.
- (3) 정상초음파장은 예혼합화염의 전파속도를 증가시키는 요인으로 작용한다.

참 고 문 헌

1. Annaswamy, A. M. and Ghoniem, A. F., "Active control of combustion instability: Theory and Practice," IEEE Control Syst, Mag., Vol. 22, No. 6, 2002, pp.37-54
2. 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," Proc. 4th Symp. Smart Control of Turbulence, 2003, pp.173-182
3. Tanabe, M., Kuwahara, T., Satoh, K., Fujimori, T., Sato, J., and Kono, M., "Droplet combustion in standing sound waves," Proc. Combust. Inst., Vol. 30, Issue 2, 2005, pp.1957-1964
4. Dattarajan, S., Lutomirski, A., Smith, O. I., and Karagozian, A. R., "Acoustic excitation of droplet combustion in microgravity and normal gravity," Combustion and Flame, Vol. 144, Issues 1-2, 2006, pp.299-317
5. 김승곤, 김강태, 박 정, "음향 가진된 프로판 비예혼합 제트 화염의 부상 거동에 대한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제5호, 2004, pp.569-579