

정상초음파가 인가된 탄화수소계 연료/공기 혼합물의 당량비에 따른 연소특성

김민철* · 배성훈** · 홍준열** · 김정수**†

Combustion Characteristics According to the Equivalence Ratio of Hydrocarbon Fuel/Air Premixture Excited by Ultrasonic Standing Wave

Min Cheol Kim* · Seong Hun Bae** · Joon Yeol Hong** · Jeong Soo Kim**†

ABSTRACT

An experimental study of the combustion characteristics according to the equivalence ratio of hydrocarbon fuel/air premixture excited by ultrasonic standing wave are presented. The image of the propagating flame was acquired using a high-speed camera, and the combustion characteristics of each fuel were closely observed through image processing. it was conformed that ultrasonic standing wave has been found to stimulate the combustion reaction in the stoichiometric ratio.

초 록

정상초음파가 인가된 탄화수소계 연료별/공기 혼합물의 당량비에 따른 연소특성 비교를 실험적 연구 결과로 제시한다. 전과화염의 이미지는 고속카메라를 이용하여 획득하였으며, 이미지 후처리를 통해 연료별 연소특성을 면밀히 관찰하였다. 정상초음파를 인가하면 탄화수소계 연료/공기 예혼합기의 이론당량비조건에서 연소반응을 촉진시킨다는 점을 확인하였다.

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

1. 서 론

연소시 발생하는 열방출에 의해 생성되는 아

주 작은 섭동들이 연소실의 음향모드와 위상이 일치하면서 연소실내의 압력이 급격히 높아져 챔버의 파손을 유발하기도 한다. 이는 연소기의 안정적인 운용을 불가능하게 하고 더 나아가 연소기의 파괴를 유발할 수 있으므로 국내·외 관련 연구진은 연소 불안정성을 적절히 제어 또는

* 부경대학교 재료공학과

** 부경대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

제거할 수 있도록 기술 개발하기 위한 투자와 연구를 진행하고 있다.

연소 불안정성의 전형적인 형상으로 알려져 있는 튜립화염은 Ellis와 De[1]에 의해 최초로 관찰되었으며, Salamandra 등[2]에 의해 튜립화염으로 불리기 시작했다. 이 화염은 연소챔버의 종횡비(aspect ratio)가 2 이상일 때 반구형태의 화염 선단이 역으로 뒤집히는 현상을 말하며, 종횡비가 20 이상이 되면 반구화염과 튜립화염이 반복하여 나타난다고 알려져 있다[3].

본 연구에서는 선행연구에 더하여, 정상초음파가 인가된 탄화수소계 연료/공기 예혼합화염을 당량비에 따라 전파하는 화염의 특성을 비교분석하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

화염의 전파속도는 예혼합연소를 기술하는데 있어서 중요한 파라메타중 하나이다. 밀폐용기내에 전파되는 화염의 경우, 전파하는 동안 압력이 상승하기 때문에 정확하게 전파속도를 측정하는 것은 쉽지 않지만, 현재까지도 화염사진촬영과 압력데이터를 이용하여 구하는 방법[4] 등이 사용된다.

연소챔버는 연소 가시화를 위해 광학적 관찰이 가능한 PMMA (Polymethyl Methacrylate)를 사용하여 폭 0.15 m, 높이 0.06 m, 길이 1.00 m인 직사각형 형태로 설계/제작하였다. 구형챔버와 화염 전파특성이 질적으로 크게 다르지 않아, 본 실험목적에 적합하다고 판단하였다. 또한, 챔버

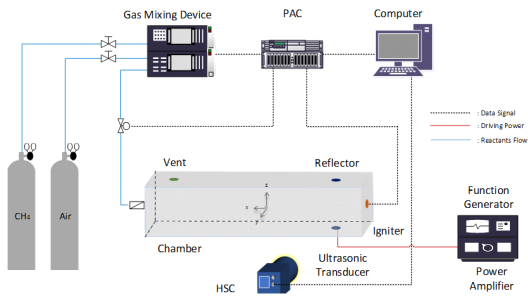


Fig. 1 Experiment setup.

재질의 가압 한계로 인해 연소챔버의 후부 상단에 약 2.5 bar에서 작동하는 기계적 개방시스템(discharge vent)을 설치하여 안전을 확보하였다. 챔버 내부의 압력섭동은 정압센서(static pressure sensor) 및 동압센서(dynamic pressure sensor)를 이용하여 관찰하였으며, 챔버의 길이 방향 0.30 m 지점에 PZT (lead zirconate titanate, $Pb(Zr, Ti)O_3$) 진동자(ultrasonic transducer)를 설치하여 국부적 정상초음파장을 생성하였다. DACS는 함수발생기(function generator), 증폭기(power amplifier), PAC (Programmable Automation Controllers), 그리고 PC로 구성된다. 함수발생기와 증폭기를 사용하여 초음파진동자를 구동하였으며, PAC를 이용하여 획득한 데이터와 이미지를 동기화하고, 이를 PC에 저장하였다. 주요 실험조건들이 Table 1에 정리된다.

Table 1. Experiment condition.

Parameter	Value	
Fuel/Oxidizer	Gaseous, Premixed methane/air & propane/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

*USW : Ultrasonic Standing Wave, **M/A: Methane/Air, ***P/A: Propane/Air

3. 실험 결과 및 고찰

밀폐된 관내에서 예혼합화염이 전파하면서 기 연구간에서 압력은 상승하기 때문에 압력변이를 통해 화염의 속도 또한 예측할 수 있다. 예혼합 화염의 전파에 따른 속도 및 압력변화를 관찰하기 위해 Fig. 1에서는 시간에 따른 속도 및 압력 선도를 나타낸다. 예혼합화염은 점화 직후 연소 챔버의 벽에 접촉할 때까지 속도가 꾸준히 증가하는 반면, 압력은 증가하지 않고, 이후 선단이 벽에 닿으면서 압력이 상승하고 속도가 유지되

는 현상을 보인다.

점화 직후 벽면의 간섭을 받기 전에는 점화플러그를 중심으로 구형면의 형태로 전파됨과 동시에 반응면적의 증가가 자유로워 압력이 증가하지 않지만, 벽면에 접촉 후 화염면적 증가의 제약으로 인해 압력이 상승하기 시작한다. 또, 평면화염으로 변하는 과정에서 벽면의 영향, 연소생성물의 감소 등으로 화염선단면적이 줄어들어 압력상승률(dp/dt)이 감소하며, 튐립화염으로 천이 후 압력상승률이 다시 회복된다[4].

또한, 정상초음파의 영향에 따른 전파속도 및 압력의 증가가 명확히 관찰되는데, 이는 정상초음파에 의한 추가적인 압력효과가 화염선단의 연소반응을 촉진시킴으로써 전파속도의 증가로 인해 나타난다[5].

메탄/공기의 경우 당량비가 1.0인 이론당량비

에서는 정상초음파의 영향이 확연히 나타나는 것을 Fig. 1(a)에서 확인할 수 있다. 반면 당량비 1.2 인 과농영역에서 오히려 정상초음파의 영향이 화학반응강도의 증대효과가 상대적으로 감소하므로 연료-산화제 혼합물의 종류에 따라 연소반응에 역효과를 줄 수 있다.

프로판/공기 화염의 압력변이는 점화 후 80 ms이전까지 이론당량비에서 가장 높지만, 80 ms 이후에는 당량비 1.2에서 더 높아진다. 이는 화염의 전파과정에서 생성되는 튐립화염이 전파속도의 증가에 직접적인 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

두 연료의 이론당량비 조건에서 예혼합화염은 정상초음파의 영향을 받아 전파속도 증가와 관내 압력상승을 동반함으로써 정상초음파의 개입이 연소반응을 촉진한다는 것을 확인하였다.

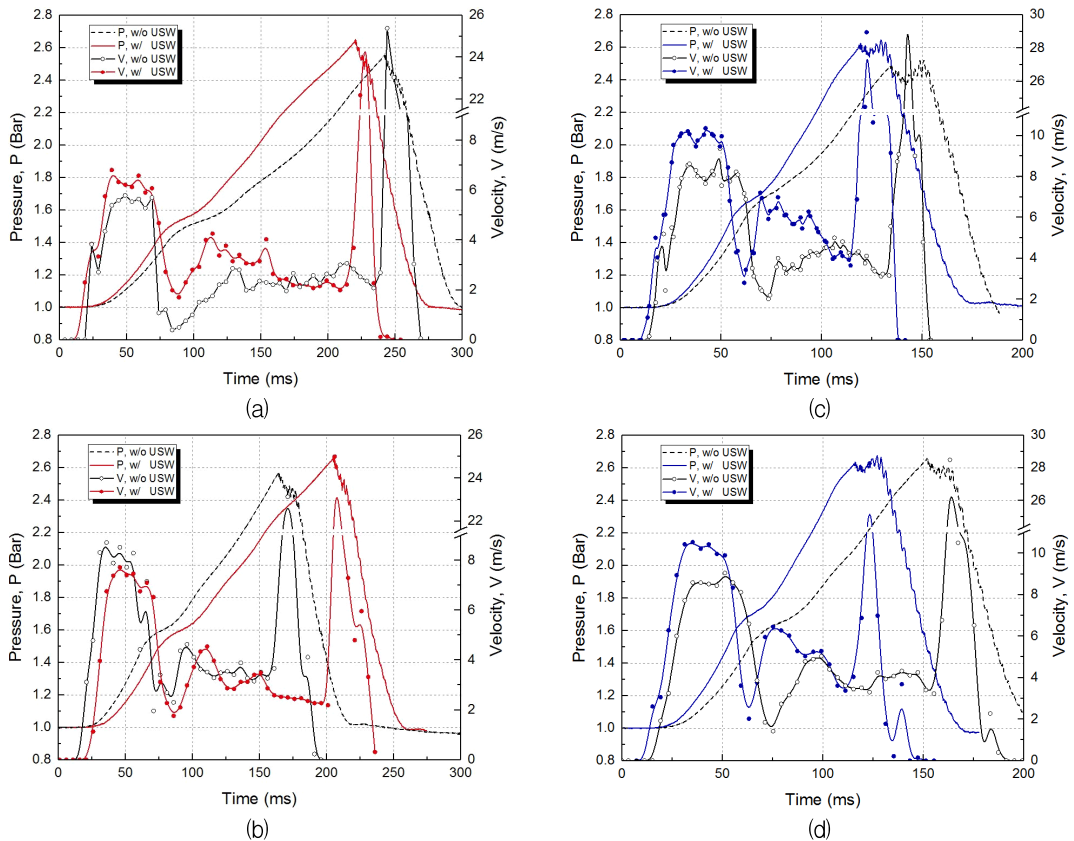


Fig. 1 Effect of ultrasonic standing wave on the variation of flame velocity and chamber pressure. (a) M/A $\Phi=1.0$, (b) M/A $\Phi=1.2$, (c) P/A $\Phi=1.0$, (d) P/A $\Phi=1.2$

4. 결 론

참 고 문 헌

본 연구는 정상초음파가 인가할 때 발생하는 탄화수소계 연료별 예혼합화염의 전파거동에 대한 당량비의 영향을 정량적으로 고찰한 실험적 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 메탄 및 프로판/공기 $\Phi = 1.1 \sim 1.2$ 근처의 연료과농 조건에서는 초음파 영향에 의한 화염거동의 변화가 미미한데, 이는 화학반응강도가 포화상태에 이르러 정상초음파에 의한 반응강도의 증대효과가 상대적으로 감소하므로 연료-산화제 혼합물의 종류에 따라 연소반응에 역효과를 줄 수도 있다.

챔버 관내에 정상초음파를 인가하면 탄화수소계 연료/공기 예혼합기의 이론당량비조건에서 연소반응을 촉진시킨다는 점을 확인하였고 연소하한계 당량비를 확장시키는 방법으로 연소효율 증대를 가져올 수 있을 것으로 예측된다.

후 기

이 논문은 정부(교육부, 미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2016R1D1A3B01012622)과 우주핵심기술개발사업(NRF-2016-2016M1A3A3A02018009)의 연구결과임.

1. Ellis, O.C. and De, C., Fuel in Science and Practice 7, Colliery Guardian Company, London, UK, pp. 502-508, 1928.
2. Salamandra, G.D., Bazhenova, T.V. and Sevastyanova I.K., "Formation of Detonation Wave during Combustion of Gas in Combustion Tube," Symposium (International) on Combustion, Vol. 7, Issue 1, pp. 851-855, 1959.
3. Guénoche, H., Nonsteady Flame Propagation (Markstein, G.H. Ed.), Macmillan, NY, pp. 107-176, 1964.
4. 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.
5. Seo, H.S., Lee, S.S. and Kim, J.S., "Agitation Effects of an Ultrasonic Standing Wave on the Dynamic Behavior of Methane/Air Premixed Flame," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 16, No. 3, pp. 16-23, 2012.