

# 메탄/공기 예혼합화염의 동역학적 거동에 대한 정상초음파의 교반 효과

서항석\* · 이상신\* · 김정수\*\*†

## Agitation Effects of an Ultrasonic Standing Wave on the Dynamic Behavior of Methane/Air Premixed Flame

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

### ABSTRACT

This study is conducted to scrutinize agitation effects of an ultrasonic standing wave on the dynamic behavior of methane/air premixed flame. The propagating flame is caught by high-speed schlieren images, through which flame front and local flame velocity are analyzed and obtained, too. It is revealed that the propagation velocity with ultrasonic standing wave is larger than the case without excitation except around the flammability limits. Also, vertical locations of distortions and depth of dents of the front are constant, unless the ultrasonic standing wave characteristics are not changed.

### 초 록

본 연구에서는 정상초음파와 교반하는 메탄/공기 예혼합화염의 동역학적 거동을 규명하기 위한 실험 결과를 제시한다. 슐리렌 기법을 이용하여 전파하는 화염을 가시화하였고, 이미지 후처리를 통해 정상 초음파 유무에 따른 화염선단의 형상 및 전파속도를 관찰하였다. 전파속도는 연소한계를 제외한 당량 비에서 정상초음파장이 가진되는 경우에 더욱 증가하였으며, 화염선단의 찌그러지는 위치는 초음파 특성이 변하지 않는 한 일정하였다.

Key Words: Combustion Instability(연소불안정성), Premixed Flame(예혼합화염), Ultrasonic Standing Wave(정상초음파), Flame Dynamics(화염 동역학), Flame Structure(화염구조)

### 1. 서 론

연소불안정성은 자동차 엔진, 발전소 버너설비, 항공용 가스터빈 등 연소 및 추진시스템의 성능저하 및 수명단축을 야기하는 가장 큰 요소 가운데 하나로 반드시 해결해야 할 문제이다. 이러한 연소불안정성의 원인은 크게 세 가지로 대별될 수 있는데, 내재적 불안정(intrinsic

\* 부경대학교 대학원 에너지시스템공학과

\*\* 부경대학교 기계공학과

† 교신저자, jeongkim@pknu.ac.kr

instability), 연소실 불안정(chamber instability), 그리고 시스템 불안정(system instability) 등이 그것이다. 내재적 불안정은 다시 Diffusive-Thermal (D-T) 불안정, Darrius-Landau (D-L) 불안정 등이 있으며, 연소실 불안정은 연소기의 형상과 연소현상이 결합하여 발생하는 것으로 음향-연소 불안정, 충격파 유도 불안정 등이 있다. 마지막으로 시스템 불안정은 연소반응물의 출입에 기인하는 것으로 연료 공급장치에 의한 연소 불안정, 연소생성물 배기와 연소가 관련되어 발생하는 불안정 등이 있다.

예혼합화염은 전술한 연소불안정성 중 내재적 불안정성을 통하여 층류에서 난류로 스스로 천이한다. 그 중 관내 예혼합화염은 1800년대 후반에 처음 소개되었으며, 수많은 연구자들에 의해 조사되어 왔다. 대표적인 예혼합화염 선단의 형태 중 하나로, D-T 불안정 및 D-L 불안정과 관련이 깊은 튜립화염은 Ellis와 De[1]에 의해 처음으로 관찰되었다. 또, Guénoche[2]는 챔버의 종횡비(aspect ratio)가 2 이상일 때 튜립화염이 형성되고, 종횡비가 20 이상이 되면 반구화염과 튜립화염이 반복적으로 나타난다고 주장하였으며, 최근 많은 연구자들은 다양한 압력과 유동에서 그와 관련된 연구결과들을 제시하고 있다[3]. 그 중 Gonzalez[4]는 수치해석을 통하여, 전파하는 셀 모양의 예혼합화염과 반대방향으로 음파를 발산하여 연소불안정성의 억제를 시도하였다. Clanet과 Searby[3]는 개방된 관에서의 예혼합화염 형상변이를 관찰하였고, Matalon과 Metzener[5]는 짧은 관 내에서의 예혼합화염 전파과정을 연구하였다. 또, Kaltayev 등[6]은 수치해석을 통해 메탄/공기 예혼합화염의 수력학적 구조(hydrodynamic structure) 변화를 챔버 길이별로 관찰하였다. Dunn-Rankin과 Sawyer[7]는 관내 예혼합화염에서 챔버 길이, 당량비, 전파방향의 벽면 모양 변이에 따른 실험적 연구를 통해 이미지를 획득하여 제시하였고, 국내에서는 강상훈 등[8]이 초소형 연소시스템에 적용시키기 위해 예혼합화염의 연소불안정성을 수치적으로 연구하였다. 수많은 예혼합화염의 실험적, 해석

적, 이론적 연구가 100년 넘게 진행되어 왔지만, 지금까지도 예혼합화염과 연소불안정성의 관계에 대해 명확한 결론을 내리지 못하고 있는 실정이다[2, 9-11].

본 연구팀은 연소불안정성의 능동적 제어를 궁극적 목표로 하여, 관내 예혼합화염 연소장에 정상초음파장(ultrasonic standing wave)을 더할 때 화염구조의 근본적 변화가 발생한다는 사실을 확인하였다. 그들은 정상초음파에 의해 화염 전파속도가 증가하는 현상도 관찰하였고, 초음파의 영향으로 인하여 연꽃모양으로 변하는 화염 선단 영역을 발견하였다[12, 13].

본 연구에서는 선행연구에 더하여, 정상초음파장에 의한 연소 불안정성의 촉진 및 억제와 같은 능동적 제어를 궁극적 목표로 하여, 예혼합화염의 동역학적 거동에 미치는 정상초음파의 교반효과에 대해 규명하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

정상초음파가 교반하는 예혼합화염의 동역학적 거동 변이를 관찰하기 위해 사용한 연소챔버와 주변장치를 Fig. 1에 보인다. 연소챔버는 광학적 관측이 가능한 PMMA 재질이며, 폭 15 cm, 높이 6 cm, 길이 100 cm로 설계, 제작하였다. 또, 길이방향 30 cm 지점에 정상초음파장 형성을 위한 40 kHz의 주파수를 갖는 PZT(lead zirconium ceramic) 진동자(ultrasonic

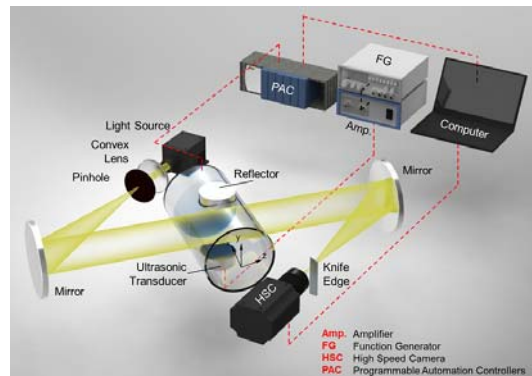


Fig. 1 Schematic of experimental set-up

transducer)와 반사장치(reflector)를 설치하였다. 메탄/공기 당량비는 압력센서(pressure transducer)와 솔레노이드 밸브(solenoid valve)를 이용하여 정밀 조절하였으며, 예혼합가스의 균질혼합 상태(well-stirred)를 담보하기 위하여 혼합용 팬을 활용해 실험 요구 환경을 구성하였다. 스파크 점화장치를 이용하여 발화시키고, 연소 후 급격한 압력증가를 피하기 위해 연소챔버 후단의 상부에는 개폐시스템(half-open system)을 설치하였다. 전파하는 화염의 영상을 획득하기 위해 할로겐 램프, 한 쌍의 구형 오목거울, 나이프에지(knife edge)등으로 구성된 솔리덴 기법을 이용하였으며, 고속카메라(High Speed Camera, HSC)를 사용하여 이미지를 획득하였다. 고속카메라의 이미지 획득율(frame per second)은 30 kHz이며, 노출시간(exposure time)은 2  $\mu$ s로 설정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

당량비가 1일 때 메탄/공기 예혼합화염전단의 후처리된 중첩 이미지와 챔버거리에 따른 화염 전파속도 선도를 Fig. 2에 도시한다. 과거 연구된 예혼합화염 전파과정[1-7, 12, 13]과 마찬가지로, 기 보유한 실험장치에서 수행된 화염 전파형상 역시 반구화염, 평면화염, 튜립화염의 형태로 변화한다. 또, 반구화염으로 완전히 성장하기 까지 전파속도는 증가하다가 완전 성장 후 평면화염을 거쳐 튜립화염으로 변화하면서 속도는 지속적으로 감소하였으며, 거리가 0.7 m인 지점

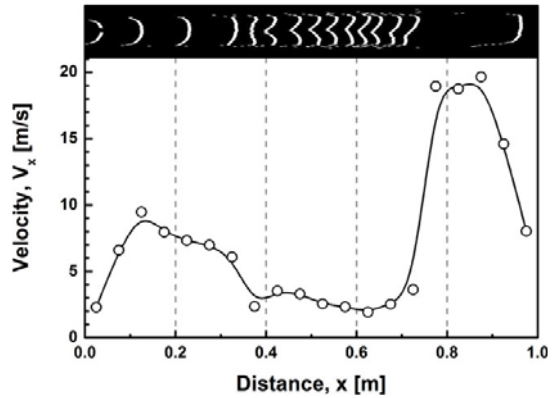


Fig. 2 Overlapped flame fronts (time interval: 15 ms) and flame velocity variation at  $\phi = 1.0$

이후에는 개폐시스템의 개방으로 인해 속도가 급격히 증가함을 관찰할 수 있다. 본 연구에서는 화염의 형상 변화가 활발하고, 속도 값이 다양한 구간인  $x = 0.3$  m 전후를 솔리덴 관측구간으로 설정하였으며, 이를 통해 예혼합화염의 동역학적 거동에 대한 관찰, 분석을 수행하였다.

Figure 3은 고속촬영한 솔리덴 이미지로서, 정상초음파장의 유무에 따른 예혼합화염의 전파형상 변이를 비교한다. Fig. 3(a)는 정상초음파장이 존재하지 않는 경우로, 매끈한 화염선단이 관찰되는 반면, 정상초음파장이 교반할 때는 Fig. 3(b)에 보인 것처럼 화염의 선단이 찌그러지며, 생성물 영역에 횡방향의 줄무늬 패턴이 생성되는 것을 확인할 수 있다[12, 13].

줄무늬가 발생하는 위치를 알아보기 위해 40 kHz 주파수를 지닌 정상초음파장의 압력선도를 화염 이미지와 함께 Fig. 4에 보인다. 예혼합화염의 생성물 영역에서 발견되는 줄무늬의 위치

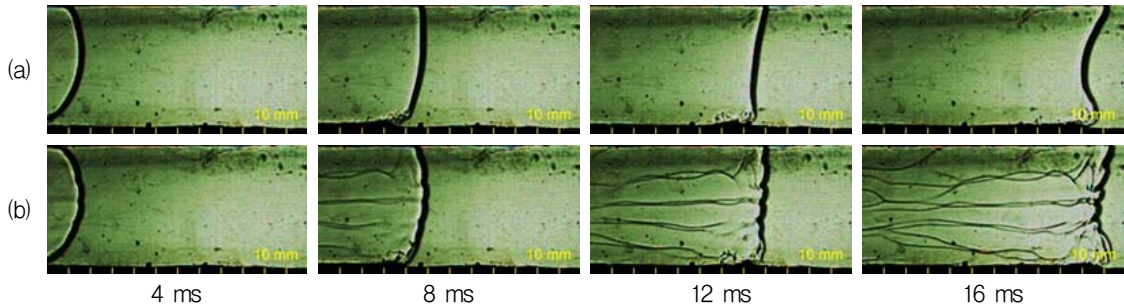


Fig. 3 Evolution of flame: (a) without standing wave, (b) agitated by standing wave[12]

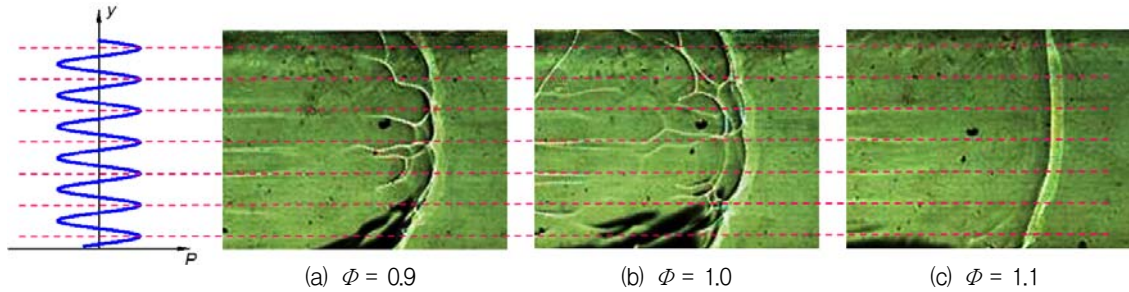


Fig. 4 Pressure diagram of the standing wave at 40 kHz and distortions of flame fronts at various equivalence ratios

는 정상파의 압력선도에서 나타나는 양의 파복(positive anti-nodes)과 부합하는 것을 관찰할 수 있다. 정상초음파장이 형성되면 양의 파복에서 인접한 음의 파복(negative anti-nodes)으로 종방향(수직방향)의 수직압력구배가 형성되고 그로 인해 국부적으로 밀도구배가 발생하여 횡방향(수평방향)의 줄무늬 패턴으로 나타나게 된다. 이때, 이들의 수직방향 위치는 정상파의 주파수와 관계하며, 당량비와는 무관한 것으로 확인된다.

정상초음파 유무에 따른 화염선단의 형상을 3 ms 마다 중첩시킨 후처리 이미지를 Fig. 5에 도시한다. 화염은 좌측에서 우측으로 전파하면서 반구화염에서 튜립화염으로 천이하고 있으며, 진행될수록 속도가 줄어들음을 확연히 관찰할 수 있다. 또, 정상초음파장이 연소영역에 개재할 경우, Fig. 5(b)와 같이 화염선단에서 찌그러짐이 확인된다. 특히 화염전파속도가 초음파 가진에 의해 상대적으로 빨라지는 것을 화염선단간 거리로부

터 알 수 있으며, 이러한 속도차이는 정상초음파에 의한 반응물의 활발한 혼합과 추가적인 반응에너지를 공급이 연소반응속도를 증가시키는데 기인하는 것으로 사료된다.

Figures 6-8에 당량비 변화에 따른 예혼합화염의 구조와 거동을 전파속도 변이와 함께 보인다. 화염전파속도는 이론당량비에서 가장 빨랐으며, 정상초음파의 교반효과에 의해 화염전파속도가 향상됨을 알 수 있다. Fig. 7과 같이 연소 하한계(Lower Flammability Limit, LFL)에 도달하게 되면 전파속도는 현저히 떨어지고, 부력의 효과는 일찍 발현하게 되어 튜립화염으로의 천이가 발생하지 않고 챔버상단으로 기울게 된다. 또, 정상초음파에 의한 화염 구조의 변화는 선단의 좁은 영역에 집중되어 있고, 부력에 의해 감소되는 생성물 영역의 변화는 매우 작은 것으로 보아 초음파 가진이 화염전파속도 증대에 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 한편, Fig. 8과 같이 연소 상한계(Upper Flammability Limit, UFL)에 도달하면 화염 전파속도는 이론당량비와 큰 차이를 보이지 않으나, 정상초음파에 의한 속도변화가 연소 하한계와 마찬가지로 미미하다는 사실이 확인된다.

정상초음파의 교반에 의해 찢어지고 변화하는 예혼합화염의 동적 거동을 연소장의 난류천이, 카오스 변이, 그리고 연소불안정성 등과 상관되는 징후로 해석할 수 있다면, 예혼합화염의 그와 같은 특성을 정상초음파장에 의해 능동적으로 제어할 수 있는 방법론이 존재한다는 사실을 시사하는 것이다.

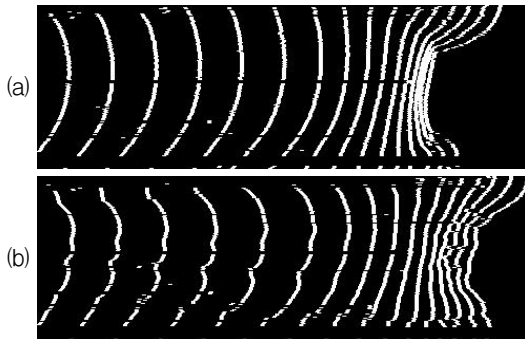


Fig. 5 Superposition of evolutionary flame fronts (time interval: 3 ms): (a) without standing wave, (b) with standing wave



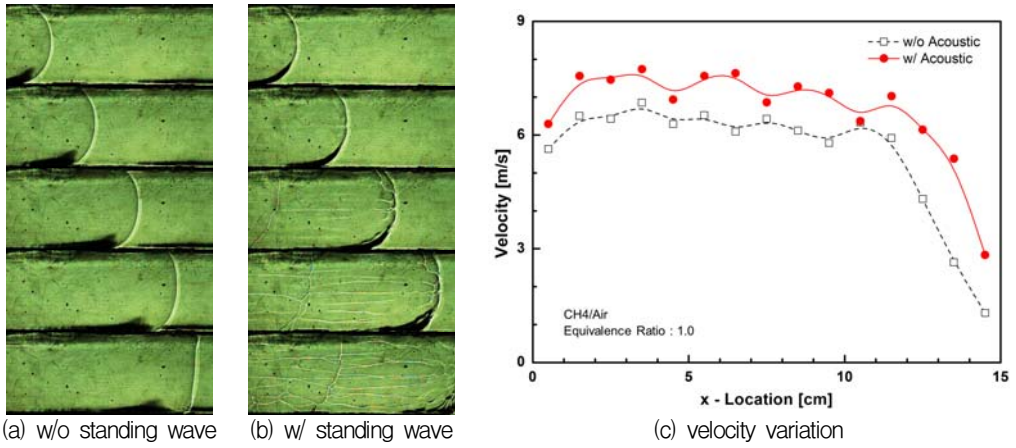


Fig. 6 Sequential images of propagating flame (time interval: 5 ms) and flame velocity variation at  $\phi = 1.0$

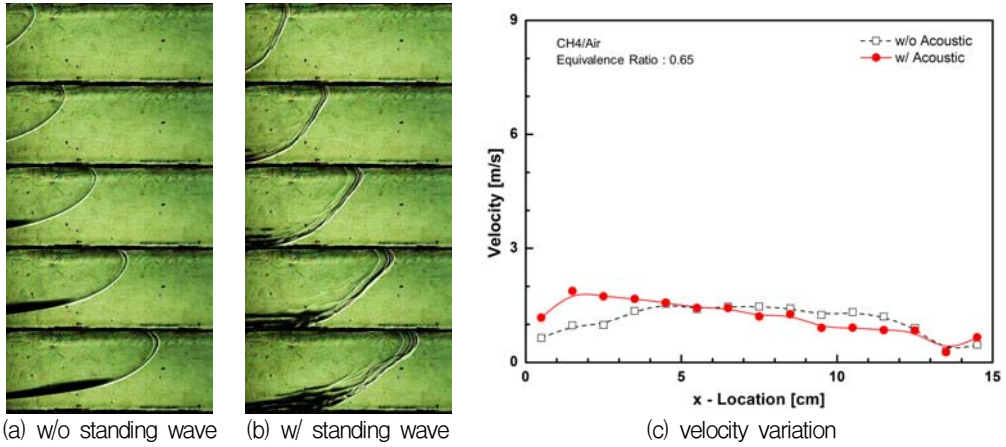


Fig. 7 Sequential images of propagating flame (time interval: 15 ms) and flame velocity variation at  $\phi = 0.65$  (LFL)

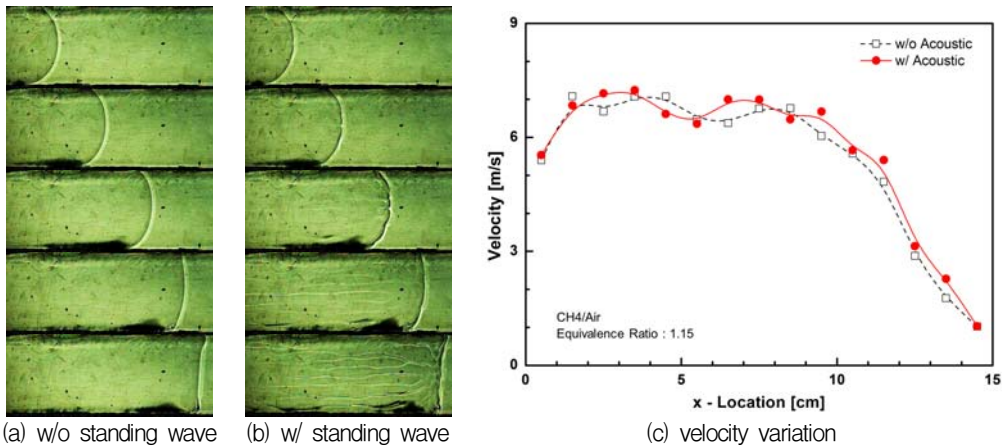


Fig. 8 Sequential images of propagating flame (time interval: 5 ms) and flame velocity variation at  $\phi = 1.15$  (UFL)

#### 4. 결 론

메탄/공기 예혼합화염의 동역학적 거동에 대한 정상초음파장의 교반효과를 고찰한 실험적 연구로 그 주요결과는 다음과 같다.

- (1) 정상초음파장의 교반에 의해 화염전단의 구조적 변화가 확인되고, 생성물 영역의 국부적인 밀도변이가 발생함을 알 수 있었다.
- (2) 정상초음파장의 특성이 동일한 경우, 생성물 영역의 밀도변이 거동은 당량비에 상관없이 일정함을 확인하였다.
- (3) 정상초음파장에 의한 반응물의 활발한 혼합과 추가적인 반응에너지의 공급으로 인해 화염전파속도는 증가하였다.
- (4) 동일 당량비에서 정상초음파장의 교반이 존재할 때 화염전파속도가 더 빨랐으며, 연소한계에 다다르면 정상파의 영향이 미미하였다.
- (5) 연소 하한계에 다다르면 느린 화염전파속도로 인해 부력의 효과가 일찍이 발현하여 화염이 챔버 상부로 기우는 현상을 확인할 수 있었다.

#### 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. Guénoche, H., *Nonsteady Flame Propagation*, Markstein, G. H. Ed., Pergamon, New York, 1964, pp.107-176
3. Clanet, C. and Searby, G., "On the 'Tulip Flame' Phenomenon," *Combustion and Flame*, Vol. 105, Issues 1-2, 1996, pp.225-238
4. Gonzalez, M., "Acoustic Instability of a Premixed Flame Propagating in a Tube," *Combustion and Flame*, Vol. 107, No. 3, 1996, pp.245-259
5. Matalon, M. and Metzener, P., "The Propagation of Premixed Flames in Closed Tubes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 336, 1997, pp.331-350
6. Kaltayev, A. K., Riedel, U. R., and Warnatz, J., "The Hydrodynamic Structure of a Methane-Air Tulip Flame," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 158, No. 1, 2000, pp.53-69
7. 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
8. 강상훈, 백승욱, 임홍근, "열 및 운동량 손실이 예혼합화염의 연소불안정성에 미치는 영향에 관한 연구," *한국추진공학회지*, 제9권, 제3호, 2005, pp.101-119
9. Bychkov, V. V. and Liberman, M. A., "Dynamics and Stability of Premixed Flames," *Physics Reports*, Vol. 325, Issues 4-5, 2000, pp.115-238
10. Bychkov, V. V. and Liberman, M. A., "Stability of a Flame in a Closed Chamber," *Physical Review Letters*, Vol. 78, No. 7, 1997, pp.1371-1374
11. Matalon, M., "Flame Dynamics," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 32, Issue 2, 2009, pp.57-82
12. 서항석, 이상신, 김정수, "정상 초음파장의 간섭에 의한 메탄/공기 예혼합화염의 구조변이," *한국추진공학회지*, 제15권, 제6호, 2011, pp.1-6
13. Seo, H. S., Lee, S. S., and Kim, J. S., "Influence of an Ultrasonic Standing Wave on Spreading of Methane/Air Premixed Flame," *AJCPP2012-111*, 2012