

研究論文

정상 초음파장의 간섭에 의한 메탄/공기 예혼합화염의 구조 변이

서항석* · 이상신** · 김정수***†

Structural Variation of Methane/Air Premixed Flame Caused by the Intervention of Ultrasonic Standing-wave

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

ABSTRACT

An experimental study has been conducted to scrutinize into the influence of ultrasonic standing wave field on the variation of methane/air premixed flame structure. Visualization technique utilizing the Schlieren method is employed for the observation of premixed flame propagation. The shape of flame front and local flame velocity are measured according to the variation of reactants pressure and chamber opening/closing condition. The flame fronts affected by the standing wave are clearly distorted but the vertical locations of frontal dents do not undergo any appreciable change. The influence of standing wave on the flame front becomes more prominent as the flame propagates downward. It is found that the propagation velocity of flame front with excitation of standing wave is greater than the case without the excitation. It is eventually revealed that the flame is deformed to lotus-shaped one by the vivid interaction of ultrasonic standing-wave with the reflected wave coming from the right side.

초 록

본 연구에서는 정상초음파장의 간섭에 의해 야기되는 예혼합화염의 구조 변이를 규명하기 위한 실험 결과를 제시한다. 화염전파를 관찰하기 위해 슬리렌 기법을 이용하였으며, 초기압력 및 연소챔버 개방 유무에 따른 화염전파의 형태 및 화염 전파속도를 고찰하였다. 정상초음파장에 의한 화염전파의 찌그러짐이 관찰되었고, 초음파장의 특성이 변하지 않는 한 그 수직방향으로의 위치는 일정하였다. 정상초음파의 영향을 받은 화염은 전파할수록 구조적 변화가 심해졌으며, 전파속도 또한 증가하였다. 반사파와 정상초음파의 영향으로 연꽃모양의 화염(lotus flame)이 형성되는 사실을 발견할 수 있었다.

Key Words: Combustion Instability(연소 불안정성), Premixed Flame(예혼합화염), Ultrasonic Standing-wave(정상초음파), Flame Structure(화염 구조), Lotus Flame(연꽃 화염)

접수일 2011. 11. 7, 수정완료일 2011. 12. 4, 게재확정일 2011. 12. 10

* 학생회원, 부경대학교 대학원 에너지시스템공학과

** 학생회원, 부경대학교 기계공학과

*** 종신회원, 부경대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

1. 서 론

자동차 엔진, 발전소 버너설비, 항공용 가스터빈엔진 등 대부분의 연소 및 추진시스템에서 발

생하는 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 loads)의 높은 증폭을 동반함으로써 나타나는데, 궁극적으로 화염과 압력파의 상호작용으로 귀결될 수 있다. 그와 같은 상호작용은 일반적으로 시스템의 효율을 저하시키고 구조적인 문제점을 발생시키지만, 인위적으로 추가된 압력파와 화염의 중첩이 연소반응을 촉진시키고, 연소 불안정성 해결에 기여할 수 있다는 사실도 보고되고 있다[1, 2]. 이에 따라 전기장 및 자기장, 음파장 등을 이용한 화염 변화의 정성적/정량적인 연구를 통해 전술한 연소 불안정성을 능동적으로 해결하기 위한 연구가 진행되고 있다.

최근, Shinoda 등[3]은 주변환경의 조건변화를 통하여 자기장이 제트화염에 가하는 영향을 관찰하였고, Won 등[4]은 전기장의 주파수, 전압 등의 조건별로 화염의 속도를 분석하여, 전기장에 의해 발생하는 화염의 거동 변화를 도출하였다. 음파를 이용한 연구로, Tanabe 등[5]이 정상파 유동장에 노출된 액적의 연소특성을 챔버압력, 음압, 액적의 위치, 중력유무에 따라 확인하였고, Dattarajan 등[6]은 음파 가진(excitation)된 액적의 연소율 변화를 액적 크기, 주파수, 음압, 음파장 내의 액적 위치 등의 조건별로 파악하였다. 국내에서는 한재섭 등[7]이 외부 교란을 통하여 특정 주파수와 진폭을 가진 음파가 연료액적의 증발 및 연소율 상수를 증가시키는 것을 관찰하였다. 또, 추가적인 음파로 가진된 제트화염의 거동변화를 알아보기 위하여 김승곤 등[8]은 연료관을 공진주파수로 가진시키는 실험을 수행하였다. 한편, 순수 관내 예혼합화염은 1800년대 후반부터 연구가 진행되어 그 형상이 관찰되어 왔음에도 불구하고, 압력파를 추가적으로 적용시킨 사례는 찾아보기 어렵다.

예혼합화염은 연소챔버의 반지름, 길이, 속도 등의 변수에 의해 그 형태가 바뀌나, 전체적 변화 양상은 전파 초기 점화장치를 둘러싼 반구모양의 화염이 전파되다가 화염선단이 역전되는

현상을 보인다[9, 10]. 이런 cusp 형태를 가진 화염을 튕립화염이라 하는데, 튕립화염은 Ellis 등[11]이 관내 예혼합화염 전파과정에서의 화염 형태를 관찰하면서 처음으로 소개하였으며, 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다[12, 13]. 그러나 추가적인 음파에 의한 관내 예혼합화염과의 상호작용에 관한 연구는 아직 수행되지 않은 바, 본 연구에서는 연소 불안정성의 능동적 제어 및 연소 효율 증대를 궁극적 목표로 하여 정상초음파장이 예혼합화염의 거동에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Figure 1은 실험에 이용된 연소챔버 및 주변장치이다. 연소챔버는 PMMA를 사용하여 폭 150 mm, 높이 60 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. 또, 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. 그리고 예혼합가스의 균질혼합 상태(well stirred)를 담

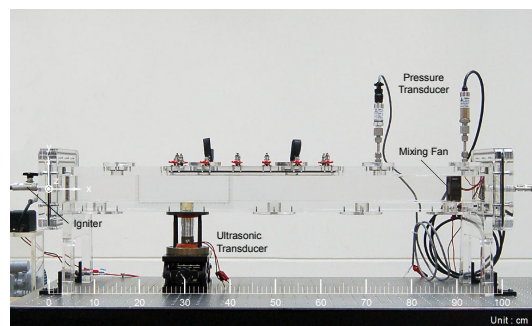


Fig. 1 Experimental Apparatus

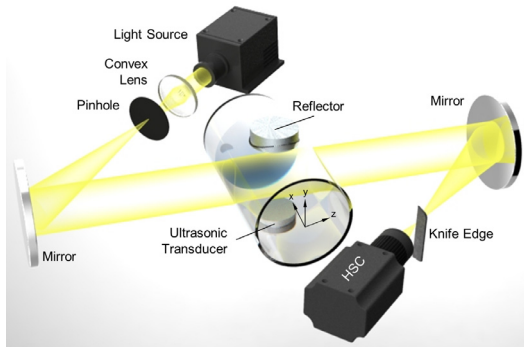


Fig. 2 Schematic of Schlieren Method

보하기 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 Fig. 2와 같이 할로겐 램프, 한 쌍의 구형 오목거울, 나이프에지(knife edge)를 사용하였으며, Fig. 1의 $x/L = 0.3$ 과 $x/L = 0.6$ 위치에서 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.

Figure 3은 정상초음파장의 유무에 따른 예혼합화염의 특성 관찰을 위한 예비실험으로 다양

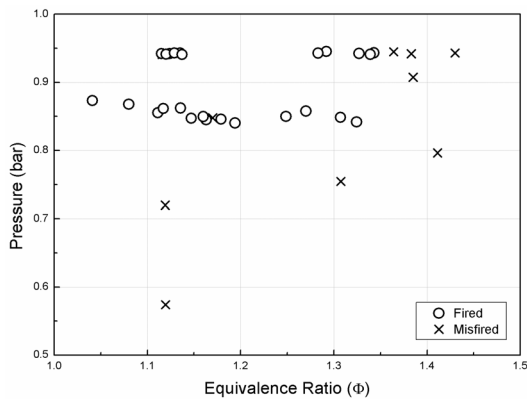


Fig. 3 Pre-test Result for the Determination of Experimental Conditions, Pressure vs. Equivalence Ratio

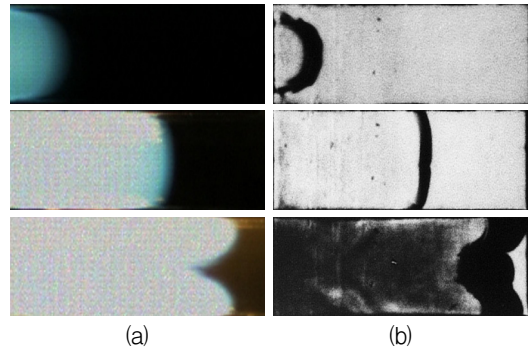


Fig. 4 Evolution of Flame Shape: (a) Pre-test Results of Present Study, (b) Flame Propagation Adopted from Dunn-Rankin's[12]

한 당량비 및 압력 조건에서의 점화여부를 보이는 결과이다. 실험은 연소챔버의 설계규격에서 오는 작동한계로 인하여 저압에서 수행되었고, 최대 당량비 1.35에서 최소 압력 0.84 bar가 실험 조건의 점화한계임을 확인할 수 있었다. 점화에 성공한 예비실험 결과를 Fig. 4에 도시하며, 이를 선행연구와 비교하였다. Fig. 4(a)는 본 연구의 예비실험 결과이며, Dunn-Rankin 등[12]이 튕립화염을 관측하기 위해 수행한 실험결과를 Fig. 4(b)에 보인다. 두 실험 결과는 반구화염, 평면화염, 튕립화염의 형태로 변화하는 모습이 일치하였고, 기 보유한 실험장치에서의 예혼합화염 전파과정 관찰에 적합하다고 판단하여, 이 실험 결과를 토대로 Table 1에 명시한 조건의 실험을 수행하였다.

Table 1. Experimental Condition

Case	P_{Tot} (bar)	Φ^*	Standing Wave	Open/Closed***
a	0.94	1.12	N	Open
b	0.94	1.12	Y	Open
c	0.94	1.12	N	Close
d	0.94	1.12	Y	Close
e	0.86	1.11	N	Close
f	0.86	1.11	Y	Close

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

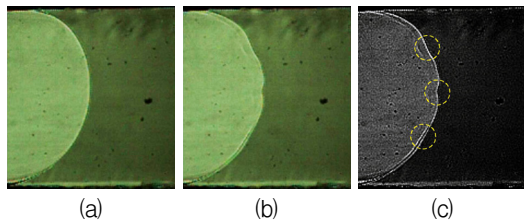


Fig. 5 Schlieren Images of the Flame Fronts: (a) without Standing Wave, (b) with Standing Wave, and (c) Contrasted View of that with Standing Wave

3. 실험결과 및 고찰

정상초음파장의 유무에 따라 예혼합화염이 전파되는 형태의 변이를 Fig. 5에 보인다. Fig. 5(a)는 정상초음파장이 존재하지 않는 경우로, 반구 형태의 매끈한 화염전단이 관찰된다. 반면, 정상초음파장의 간섭이 존재할 때는 Fig. 5(b)에 보인 것처럼 화염의 선단이 찌그러지는 것이 확인되며, 명확한 관찰을 위해 후처리된 이미지를 Fig. 5(c)에 나타낸다. 이러한 현상은 동일한 주파수 및 음압 조건을 가진 정상초음파장을 형성시킬 경우, 초기압력, 개폐시스템의 개폐유무와 관계

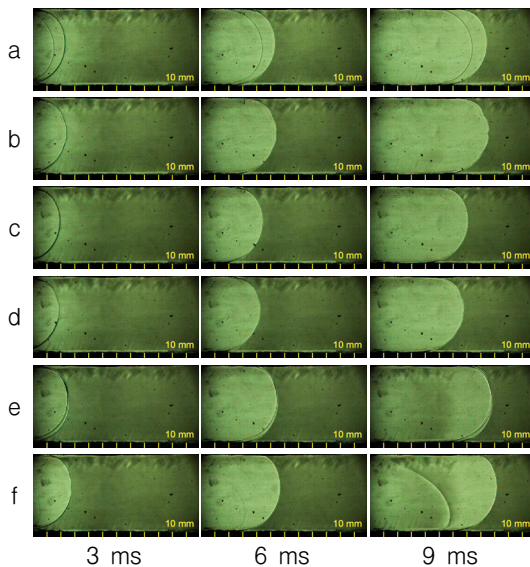


Fig. 7 Evolution of Flame Fronts at $x/L = 0.3$ according to the Case of Table 1

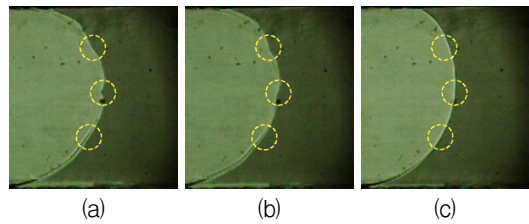


Fig. 6 Distortions of Flame Fronts: (a) Case b, (b) Case d, and (c) Case f

없이 일정한 높이에서 나타남을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 이는 정상초음파장의 증상화된 압력 구배에 기인한 것으로 판단되며, 정상파에 의해 만들어진 마디(node) 혹은 배(loop)가 화염전단에 간섭을 일으켜 화염이 찌그러지는 것으로 사료된다. 또한, 그 찌그러짐의 정도는 초기 실험 조건에 따라 차이를 보이는데, 챔버 개폐시스템의 상관관계보다 초기압력이 지배적인 것으로 관찰된다. Fig. 6(c)에서 확인되는 바와 같이 저압상태에서는 정상초음파장에 의한 반응대 압력의 증상화 정도가 상대적으로 작아, 선단의 찌그러지는 정도가 덜하다.

Table 2는 각 구간 및 조건별로 화염전파속도를 측정된 값을 보이는 것으로 정상초음파장의

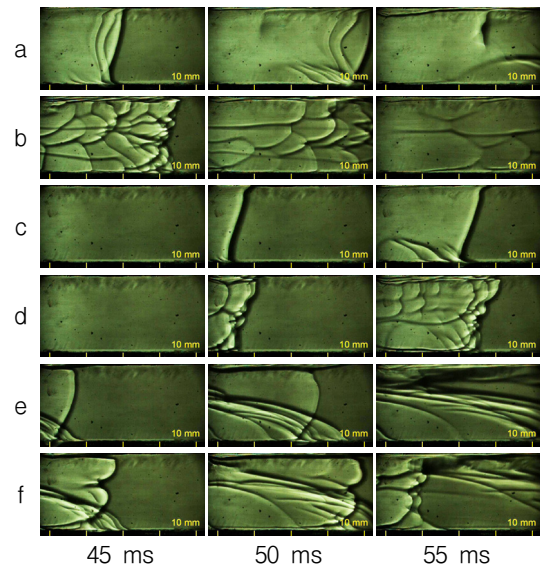


Fig. 8 Evolution of Flame Fronts at $x/L = 0.6$ according to the Case of Table 1

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	

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

유무에 따라 $x/L = 0.3$ 에서는 속도 차이가 크지 않지만, $x/L = 0.6$ 으로 진행함에 따라 그 정도가 증가한다. 이와 같은 사실은 Fig. 7, 8에서도 관찰되는데, 이러한 속도차이는 음파가진에 의한 반응물의 활발한 혼합과 추가적인 반응에너지의 공급이 화염의 전파속도를 증가시키는데 기인하는 것으로 판단된다.

Figure 7은 $x/L = 0.3$ 에서 각 조건별로 시간 변화에 따른 화염의 전파를 도시한다. 전술한 바와 같이 정상초음파장이 존재하는 조건에서 화염선단의 미세한 찌그러짐 현상이 Fig. 7b, d, f에서 확인되었으며, 화염이 전파됨에 따라 화염대 선단의 생성물 영역이 종방향(x방향)으로 갈라지고 있는 사실이 Fig. 8에 관찰된다. 이와 같은 갈라짐은 음파장이 유발하는 횡방향(y방향)의 압력 구배의 영향으로 해석할 수 있다.

Figure 9는 화염 형상의 변이 과정을 알아보기 위해 수행한 실험으로, Fig. 7에서 보인 것과 같이 화염 선단의 찌그러짐이 관찰되며, 화염 전파가 진행될수록 튕립화염으로 천이되는 것을 알 수 있다. 예비실험에서 보인 것과 같이 Fig. 4에서 확인된 반구화염, 평면화염, 튕립화염이 Fig. 9에서도 보이며, 특히 Fig. 9(b)에서는 Fig. 9(a)의 화염구조에 더하여 횡방향으로의 갈라짐이 중첩된 형상으로 관측되고 있다. 화염이 진행됨에 따라 그 현상은 점진적으로 발달하는데, 이는 정상

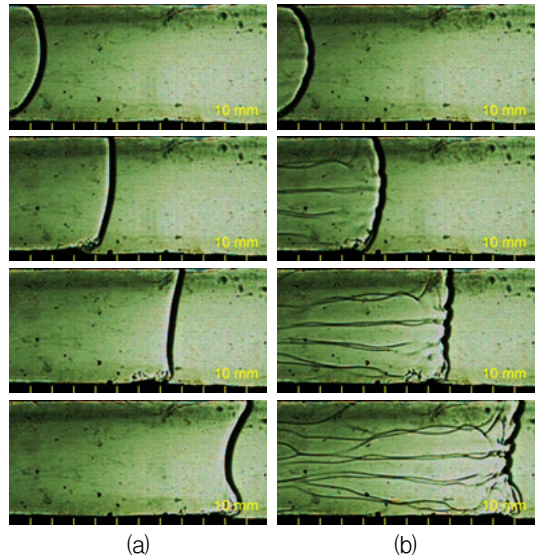


Fig. 9 Comparison of Burnt Zone Encompassing the Flame Fronts. Time Interval of Image-to-image is 4 ms: (a) without Standing Wave, (b) with Standing Wave

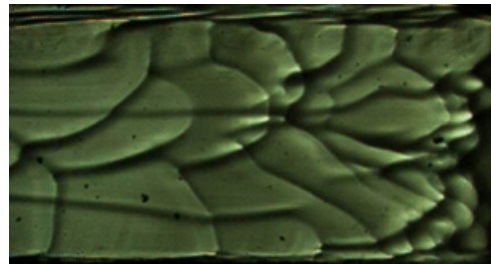


Fig. 10 Lotus-shaped Flame

초음파장에 의해 생성되는 수직압력구배가 화염 선단 및 생성물 영역 내부까지 영향을 끼쳐 국부적인 밀도변이를 유발하는데 그 원인이 있다.

이러한 수직압력구배에 의해 종방향으로 늘여지는 국부적인 밀도 층상화와 연소챔버의 후단에서 되돌아오는 반사파에 의한 영향으로 인해 화염대는 수직 및 수평 방향으로 잘게 찢어져, Fig. 10과 같은 연꽃모양의 화염으로 변하게 된다.

4. 결 론

메탄/공기 예혼합화염의 거동에 정상초음파장이 미치는 영향을 고찰하기 위해 솔리렌 기법을 이용하여 초기조건을 변화시키며 수행한 실험적 연구로 그 주요결과는 다음과 같다.

- (1) 정상초음파장의 존재에 의해 화염전단의 구조적 변화가 확인되고, 초음파의 특성에 따라 그 위치가 일정함을 알 수 있었다.
- (2) 정상초음파장에 의해 예혼합화염의 전파속도는 증가하였으며, 이는 활발한 혼합과 추가적인 반응에너지의 공급이 그 원인이다.
- (3) 예혼합화염의 전파가 진행될수록 정상초음파장에 의한 구조적 변화는 커졌으며, 화염전단 및 생성물 영역의 국부적인 밀도층상화를 유발하는 것으로 판별된다.
- (4) 연소챔버의 끝단에서 되돌아오는 반사파의 영향과 정상초음파장의 영향으로 인해 화염영역이 종횡으로 찢어져, 연꽃모양의 화염으로 변하는 사실을 발견할 수 있었다.

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, Issue 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. 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
4. 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
5. 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
6. Dattarajan, S., Lutomirski, A., Lobbia, R., 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
7. 한재섭, 김선진, 김 유, "음파가 고정액적의 증발/연소에 미치는 영향에 관한 연구," 한국추진공학회지, 제6권, 제3호, 2002, pp.53-60
8. 김승곤, 김강태, 박 정, "음향 가진된 프로판 비예혼합 제트 화염의 부상 거동에 대한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제5호, 2004, pp.569-579
9. Guénoche, H., Nonsteady Flame Propagation, Marksteijn, G. H. Ed., Pergamon, New York, 1964, pp.115-119
10. Matalon, M. and Metzener, P., "The propagation of premixed flames in closed tubes," J. Fluid Mech., Vol. 336, 1997, pp.331-350
11. Ellis, O. C. and De, C., "Flame movement in gaseous explosive mixtures (Part 7)," Fuel in Science and Practice 7, 1928, pp.502-508
12. 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
13. Clanet, C. and Searby, G., "On the "tulip flame" phenomenon," Combustion and Flame, Vol. 105, Issues 1-2, 1996, pp.225-238