

좁은 연소공간에서의 화염 안정화와 화염구조

김남일*†

Flame Stabilization and Structures in Narrow Combustion Space

Nam Il Kim*†

ABSTRACT

Combustion in a narrow space has been interested as a model of meso-scale combustors (or micro-combustors). Premixed flames have been used to overcome flame quenching in a narrow space and non-premixed flames have been used to improve flame stabilization. In this study, overall characteristics of premixed flame and non-premixed flame in narrow combustion spaces were reviewed. Various effects such as the flow velocity distribution, thermal interaction, enhanced mass diffusion were discussed and an eventual structure of the flame at the extinction limit was introduced.

Key Words : Narrow space, Premixed flame, Non-premixed flame, Flame stabilization, Flame quenching

좁은 연소공간에서의 화염의 안정화 특성과 화염의 구조에 관한 연구는 소형 연소기의 개발에 직접 관련될 뿐만 아니라 화염과 연소기의 상호작용에 관한 기본적인 연소공학 지식을 확립하는데 매우 중요하다. 기본적으로 화염의 특성은 연료의 조성과 열 및 유동에 의해 영향을 받는데, 제한된 좁은 공간에서의 유동은 공간의 형상에 의해 화염의 상하류 전체에서 특징적으로 변하게 된다. 이러한 공간에 형성된 화염은 일반적인 개방공간에서의 화염에 비해 유동과 열적 상호작용에 매우 민감하게 영향을 받게 되며, 그와 동시에 화염으로 인해 연소공간 내부 전체 유동과 온도의 변화가 야기된다. 최근에 와서는 이러한 좁은 공간에서의 화염의 거동을 통해 다양한 유동 및 열적 상호작용에 영향을 받는 난류화염의 특성을 이해하려는 노력이 수반되고 있다.

대표적인 경우로 마이크로 연소기 내부의 화염 안정화가 있다. Fig. 1의 (a)에 고온의 연소가스로부터 예혼합기로의 열 재순환을 이용한 Swiss-roll 연소기 내부에 안정화된 화염의 형상을 보였다[1]. 화염의 안정화 메커니즘은 (b)와 같이 단순화 하여 화염의 위치에 따른 열전달 크기의 변화와 그로 인한 화염전파속도의 변화로 설명할 수 있다.

본 논문에서는 좁은 연소공간에서의 화염 거동과 관련하여 좁은 연소공간의 기본 모델로서 다루어져 온 좁은 관 또는 좁은 채널 내부에서의 화염 거동에 관해 현재까지 수행한 연구를 기반

으로 개략적 특징을 소개하고자 한다. 이러한 목적으로 우선적으로 좁은 관 내부에서의 예혼합화염의 안정화 특성과 화염 구조 변화를 소개하고, 그 논의를 부분예혼합 화염과 비예혼합 화염으로 확대하기로 한다.

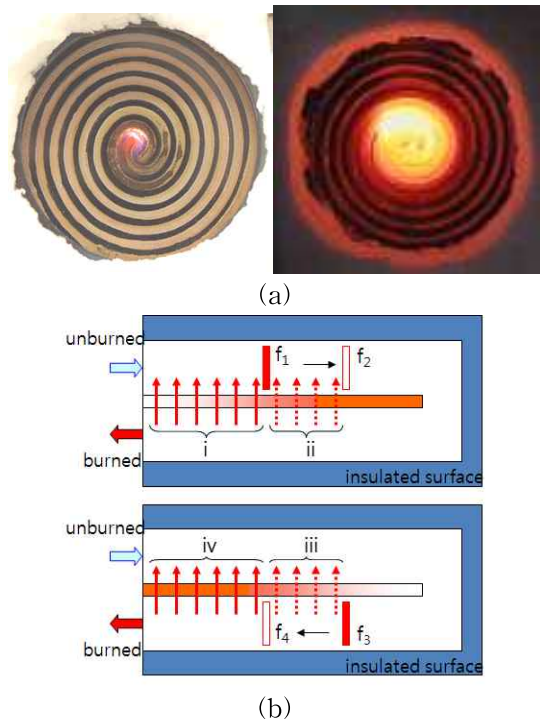


Fig. 1. Flame stabilization in micro-combustors; (a) flame stabilization in a Swiss-roll combustor [1], (b) thermal flame stabilization mechanism

* 중앙대학교 기계공학부

† 연락저자, nikim@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5753, FAX : (02)-825-5753

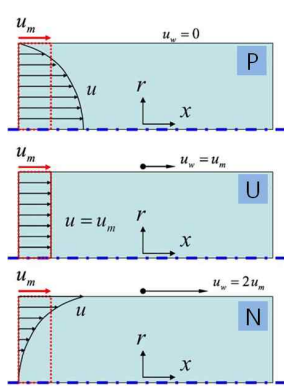
● 좁은 연소공간에서의 예혼합화염 안정화

연소공간의 특성 길이가 화염의 특성 길이에 비해 충분히 크지 않아서 화염의 특성에 직접 영향을 미치게 되는 경우를 좁은 연소공간으로 정의할 수 있다. 관점에 따라서 연소공간의 특성 길이 감소에 따라 화염의 형상구조에 관한 Markstein 길이 또는 셸 구조 크기에 근접하는 연소공간, 화염의 열적 구조에 관한 소염거리에 근접하는 연소공간, 화염의 반응 구조에 관한 화염 두께에 근접하는 연소공간들을 모두 좁은 연소공간으로 정의할 수 있다.

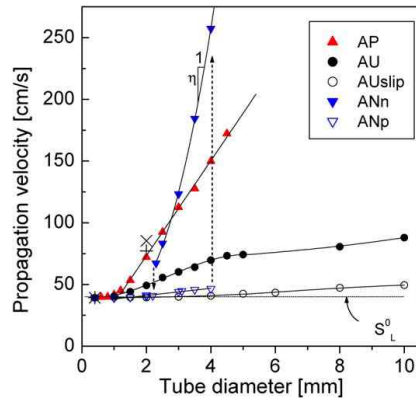
예혼합 화염은 고유의 전파속도를 가지고 있어서 전파속도와 일치하는 유속 조건에서 이론적으로 안정화 될 수 있지만 좁은 공간에서의 예혼합화염 안정화는 발달된 유속분포와 유속의 크기 뿐만 아니라 속도 및 온도 분포에 의해 매우 큰 변화를 가지게 된다. 예를 들어 관내 예혼합 화

염의 수치해석 결과를 Fig. 2에 보였다[2]. 동일한 평균유속에 대해 (a)와 같이 세 가지의 유속 분포를 가정하고 메탄의 이론혼합비 예혼합화염의 전파속도를 수치해석한 결과이다. 벽면 단열 조건에 대해서도 화염의 전파속도는 (b)와 같이 관 직경과 속도 분포에 따라 비선형적으로 변화하게 되는데, 관의 직경이 1 mm 보다 큰 조건에서는 벽면마찰에 의해 급격한 연소속도의 상승이 발생할 수 있음을 보여준다. 벽면의 온도가 상온인 조건에서도 (c)와 같이 화염전파속도의 비선형성과 이력(hysteresis) 현상이 발생함을 알 수 있다.

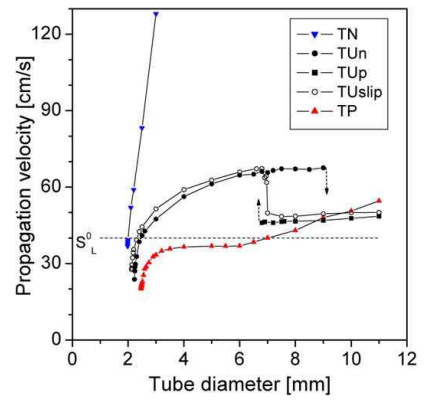
아울러 Fig. 3에는 입구경계에서의 동일한 평균온도를 유지하면서 온도의 분포가 다른 조건에 대해 화염 전파속도의 변화를 보여준다. 이러한 비선형 거동은 관내 화염의 거동에 대해 평균온도와 균일유속을 가정한 1차원적 해석 접근이 사실상 무용할 수 있음을 보여준다.



(a) P: positive velocity, U: uniform velocity, N: negative velocity

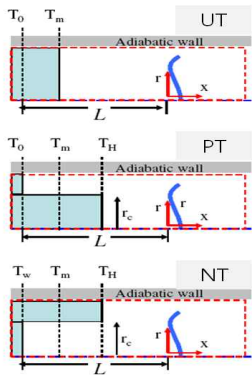


(b) Effects of velocity profiles on propagation velocities of the flames in adiabatic tubes (×, AP with uniform grid of 50 μm; +, AP with uniform grid of 25 μm).

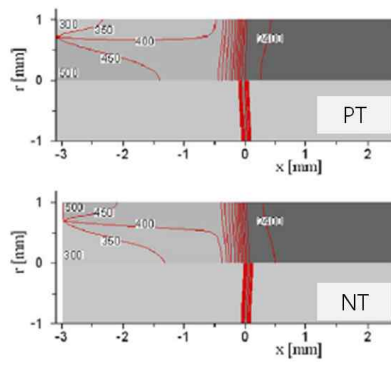


(c) Effects of velocity profiles on propagation velocities of the flames in isothermal tubes.

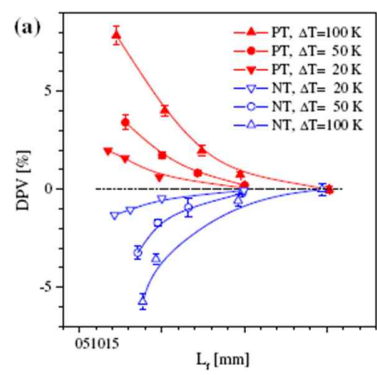
Fig. 2. Velocity and wall temperature effect on flame propagation velocity [2]



(a)



(b) Temperature distribution



(c) deviation in propagation velocity

Fig. 3. Temperature disturbance at the inlet on flame propagation velocity [3]

● 좁은 연소공간에서의 비예혼합화염 안정화

예혼합화염의 복잡한 전파특성은 화염제어에 어려움을 야기한다. 화염 안정화의 관점에서 비예혼합화염을 이용하려는 노력들이 수행되고 있다. 개방 공간이나 상대적으로 큰 연소공간에서의 기존의 연구를 통해 확산화염의 기본 안정화 특성은 화염전단의 예지화염의 전파 특성에 의해 크게 영향을 받음을 인지하고 있다. 그런데 좁은 연소공간에서의 예지화염의 거동 특성에 대한 연구는 상대적으로 부족하였다. 이에 대한 연구로 Fig. 4는 0.5 cm의 간격을 가지는 좁은 채널 내부에서의 확산화염의 구조를 보여준다. 다양한 유동 조건에서 화염의 구조와 안정화 위치 변화가 관찰되었는데, 기존의 예지화염 이론을 확장함으로써 대부분의 현상이 설명 가능함을 보인바 있다[4].

그에 반해 좁은 관 내부에서의 대향류 화염은 인상적인 안정화 특성을 보였다. 공기가 흐르는 좁은 채널 내부에 동축 대향류 관을 통해 연료를 분사하였을 때 화염의 형상을 Fig. 5에 제시하였다[5]. 내부 연료관의 직경이 큰 경우에는 연료관 출구 근처에 일반적인 대향류 화염과 유사한 확산화염이 형성되었다. 이에 반해 연료관의 직경이 작은 경우에 매우 낮은 유속 조건에서도 안정적인 화염을 형성할 수 있었으며 화염의 위치는 노즐로부터 수십 cm 이상 거리를 두고 존재할 수 있었다. 이러한 조건은 기존의 확산화염 이론으로는 매우 낮은 스트레치 조건에 해당한다.

유사한 형상에 대한 수치해석이 수행되었으며

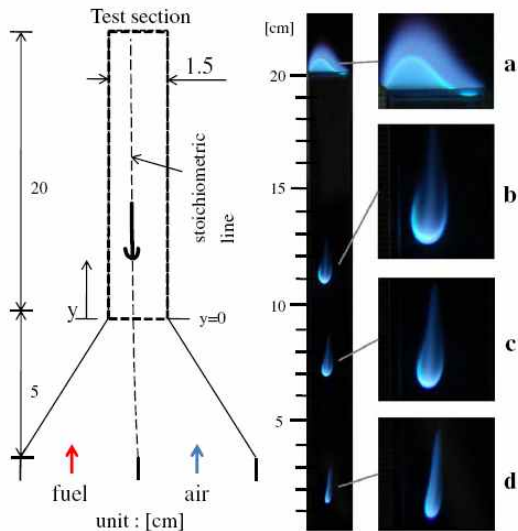


Fig. 4. Test burner and superposed photos of overall flame behavior: (a) $V_m = 12.59$ cm/s, $FA = 0.19$; (b) $V_m = 35.21$ cm/s, $FA = 0.06$; (c) $V_m = 44.25$ cm/s, $FA = 0.047$; and (d) $V_m = 48.78$ cm/s, $FA = 0.042$. [4]

[6], 동일 조건에 대한 실험 및 수치해석을 비교한 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 연료와 공기의 유량에 따른 가연한계 범위는 공기유량이 크거나

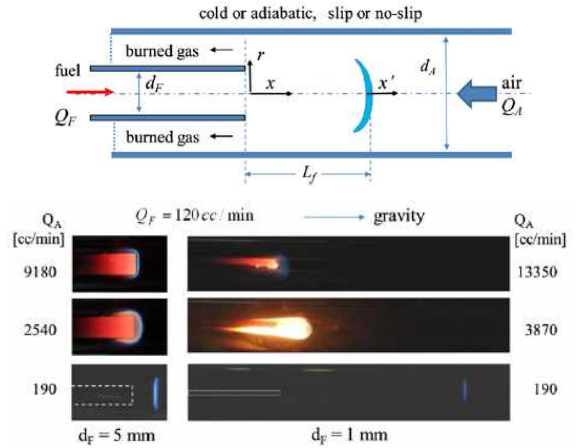


Fig. Direct photos of flames with an increase in the air flow rate $Q_F = 120$ cc/min, $d_A = 16$ mm [5]

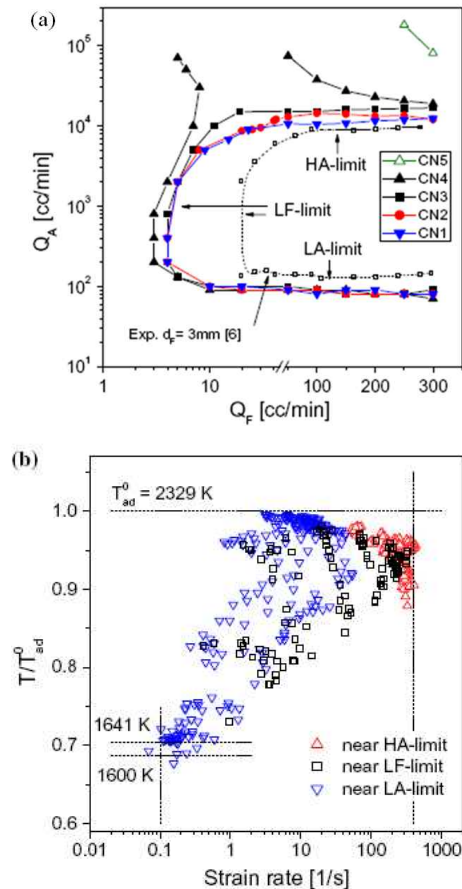


Fig. 6. Stabilization of opposed coaxial non-premixed flame in a narrow air tube [6], (a) flame stabilization map, (b) flame stretch and maximum temperature

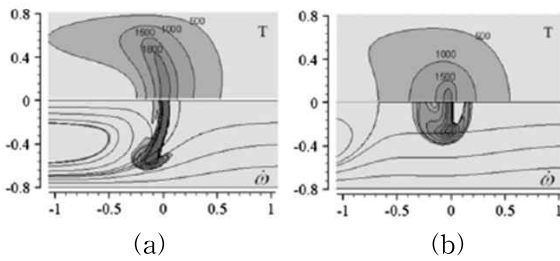


Fig. 7. Structure variation at the nearest to the LA flame stabilization limits [6]

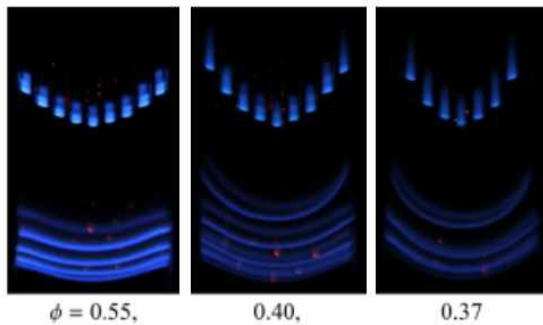


Fig. 8. Flame stabilization in a narrow multi-channel (upper images: front view, lower images: side view)

작은 조건에서 연료에 무관한 HA 한계와 LA 한계의 존재를 확인하였으며, 수치해석과 실험이 매우 유사한 결과를 보임을 알 수 있다. 이에 반해 연료유량이 적을 때 발생하는 LF 한계에서는 실험에 비해 차가운 벽면을 강제로 설정한 수치해석에서 더 낮은 연료유속의 한계를 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 좁은 관내의 대향류 조건에서 실제 화염의 경우에 발생하는 열재순환에 의해 투입연료 노즐에서 경계조건이 영향을 받기 때문으로 이해되었다. 추가적으로 수치해석의 모든 조건에 대해 화염면에서의 스트레치 값과 화염의 최고 온도를 Fig. 6(b)에 제시하였다. 특히 LA 한계 근처에서는 매우 낮은 스트레치 조건이 발생하며 화염의 최고온도 역시 평균 1641 K 정도로 매우 낮을 수 있음을 확인할 수 있었다.

이처럼 낮은 스트레치 조건은 일반적인 대향류 화염에서는 관찰되기 힘든 조건으로 일부 무중력 실험을 통해 근접할 수 있었던 조건이지만, 좁은 관 내부에서는 실제 실험에서도 매우 낮은 스트레치 조건으로 근접할 수 있었다. 따라서 이처럼 낮은 스트레치 조건에서의 화염의 구조 변화를 수치해석을 통해 살펴본 결과 Fig. 7과 같이 스트레치 감소에 따라 화염면 끝단이 전형적인 에지화염의 구조를 가지다가 소화 한계 근처에서는

유동 정체점으로부터 상당히 떨어진 거리에서 매우 특징적인 구조를 가지는 것을 알 수 있었다. 다시 말해서 모든 LA 한계 조건에서 공통적으로 확산화염 주위에 에지화염의 예혼합화염면이 연속적인 구형으로 형성되는 구조를 발견할 수 있었다. 이러한 구조는 확산화염의 가연한계가 예혼합화염의 가연한계와 직접 연관될 수 있음을 의미한다. 이와 관련하여 현재 본 연구그룹에서는 좁은 연소공간에서의 가연한계 근처 조건에서의 화염의 구조와 Fig. 8에 보인 바와 같이 다중 채널 내부에서의 화염 상호작용에 관한 추가적인 연구를 진행하고 있다.

후 기

본 연구는 일부 교육과학기술부 일반연구자지원사업의 일환 (KRF-2010-0013598)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] N.I. Kim, S. Kato, T. Kataoka, T. Yokomori, S. Maruyama, T. Fujimori, K. Maruta, "Flame stabilization and emission of small Swiss-roll combustors as heaters," *Combustion and Flame*, Vol. 141(3), 2005, pp. 229-240.
- [2] N.I. Kim, K. Maruta, "A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes," *Combustion and Flame*, Vol. 146(1-2), 2006, pp. 283-301.
- [3] N.I. Kim, "Effect of an Inlet-Temperature Disturbance on the Propagation of Methane-Air Premixed Flames in Small Tubes," *Combustion and Flame*, Vol. 156, 2009, pp. 1332-1338.
- [4] M.J. Lee, N.I. Kim, "The stabilization of a methane - air edge flame within a mixing layer in a narrow channel," *Combustion and Flame*, Vol. 157, 2010, pp. 201-203.
- [5] N.I. Kim, Y.M. Yun, M.J. Lee, "Non-premixed Flame Characteristics of Opposed Methane Jets in Coaxial Narrow Air-stream Tubes," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, 2010, pp. 680-688.
- [6] N.I. Kim, "Numerical Study of Opposed Non-premixed Jet Flames of Methane in a Coaxial Narrow Air Tube," *Combustion and Flame*, Vol. 159, 2012, pp. 722-733.