

좁은 채널 내부의 대향류 화염 거동에 관한 실험적 연구

이민정* · 김남일**†

An Experimental Study on the Flame Behavior of Opposed Flow Flames in Narrow Channels

Min Jung Lee*, Nam Il Kim**†

ABSTRACT

In this study, opposed flow combustion was re-visited in a narrow channel. Various flame behaviors were observed. Due to the confined structure of the combustor in this study, flame structures at very narrow strain rate could be stabilized and their characteristics were investigated. This study will be helpful to understand overall flame behavior of non-premixed flame in a narrow combustion space, and will also be useful to develop small combustors.

Key Words : Micro-combustor, Opposed flow burner, Narrow channel, Flammability limits, Low strain rate

최근 좁은 공간에서의 연소현상에 관한 연구가 증가되고 있다[1,2]. 이러한 연구는 높은 에너지 밀도를 가지는 화석연료를 직접 사용하여 열 또는 동력을 발생하는 소형 연소기 개발뿐만 아니라 연소기와 화염간의 직접적인 상호작용에 대한 관심이 증가되면서 활발히 수행되고 있다[1,2]. 소형 연소기에 있어서 가장 중요한 개념은 좁은 공간에 화염을 안정화시키는 것이다. 소형 연소기의 크기는 화염의 소멸거리에 의해 제약 받게 되므로 많은 경우 이를 극복하기 위해 예혼합화염을 주로 이용된다. 한편, 화염의 안정화 측면에서 보다 안정적으로 연소기를 운전하기 위해서 확산화염을 이용한 소형 연소기 개발도 이루어지고 있다. 따라서 좁은 채널 내부의 확산화염 거동에 대한 연구가 수행될 필요가 있다.

고전적으로 확산화염 뿐만 아니라 예혼합화염 및 부분예혼합화염의 기본적인 거동을 파악하기 위해 대향류 구조의 연소기를 채택하여 연구되어 왔다[3]. 이로부터 가연한계, 전파속도, 화학 반응 기구와 같은 화염의 기본적인 특성에 대한 데이터베이스를 확보하였다. 따라서 대향류 구조의 연소기는 연소공학 측면에서 기본적이면서도 중요한 역할을 하고 있다고 할 수 있으며, 좁은 공간 내부에서의 이러한 대향류 구조는 동일한 맥

락으로 그 중요성이 인지될 수 있다.

하지만 좁은 채널 내부에서의 확산화염 거동 연구를 살펴보면, 주로 예지화염을 기본으로 입구 경계조건에 따른 화염 거동 또는 안정화에 집중되어 있었다[4-6]. 따라서 좁은 채널 내부에서의 대향류에 관한 연구는 매우 드문 실정이다[7-11]. 최근 Kim등[7,8]은 실험과 수치해석을 통해 좁은 튜브 내부의 확산화염은 두 가지 소멸(flame extinction) 형태를 나타낼 수 있음을 밝혔는데, 첫 번째는 기존의 열린 공간에서와 유사한 높은 신장율에 의한 소멸(high strain rates, HSR)이며, 다음은 아주 낮은 신장율(low strain rate, LSR)에서 소멸(thermal quenching)에 의한 화염 소멸이다.

여기서 LSR 소멸 현상은 부력에 의한 영향이 크게 작용하므로 열린 공간에서는 그 연구가 상대적으로 부족하였으며, 주로 무중력 실험 조건에서만 관찰되어 왔다[9]. 하지만 좁은 공간에 화염이 존재하는 경우 보다 효과적으로 부력에 의한 영향을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 좁은 공간 내부의 거동을 바탕으로 채널 내부에 삽입된 대향류 구조의 연소기를 이용하여, HSR 및 LSR 조건에서의 화염 안정화 및 질소 희석에 대한 영향과 화염 거동에 관한 기본적인 자료를 제공하고자 한다. 이를 위해 노즐 크기 및 채널 간격과 신장율에 따른 연구를 수행하였다.

본 연구를 위해 제작된 연소기를 Fig. 1에 나타내었다. 연소기는 2개의 석영 관(300mm×400

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

** 중앙대학교 기계공학부

† 연락처, nikim@cau.ac.kr

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

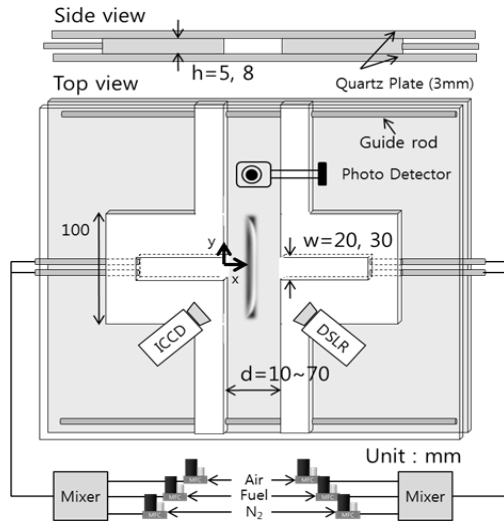


Fig. 1 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems.

mm×3mm)과 2개의 노즐 판으로 구성되어 있으며, 노즐 출구의 크기(w)는 20 또는 30mm를 가질 수 있으며, 채널 간격은 노즐 판의 두께(h)를 이용하여 5 또는 8mm를 가지게 된다. 노즐 내부에는 균일 유동을 위해 별도의 장치를 삽입하였으며, 연소기 출구에는 외부 유동 교란 방지 장치를 설치하였다. 이와 같이 구성된 연소기는 부력의 효과를 최소화하고자 지면과 평행하게 설치하였다. 본 연구의 주요 변수인 전체 신장율(a)을 제어하기 위해 두 노즐의 간격(d)은 광학이송대를 이용하여 조절하였고, 두 노즐 출구 평균 유속(V)는 항상 동일하게 제어되었다. 따라서 전체 신장율은 다음과 같이 정의하였다.

$$a = 2V/d \quad (1)$$

비교적 간단히 정의된 (1)식은 두 곳의 노즐을 통해 연료 및 공기의 다양한 조성 변화를 시도하는 본 연구의 간략화를 위해 적용되었으나, 향후 좁은 채널 내부에서의 신장율에 대한 정의는 재평가 되어야 할 것이다. 한편, 두 노즐에 공급되는 연료와 산화제 및 희석제는 각각 MFC를 통해 제어되었으며, 연료로써 메탄(>99.995%)과 프로판(>99.95%)을 사용하였으며, 산화제로 수분이 제거된 공기(<1% humidity), 희석제로 고순도 질소(>99.999%)를 이용하였다. 화염 거동 파악을 위해 CCD카메라와 ICCD가 부착된 초고속 카메라를 이용하였으며, 진동화염의 주파수는 광검출기를 이용하여 분석하였다. 그 외에도 화염이 존재하는 채널의 벽면의 온도는

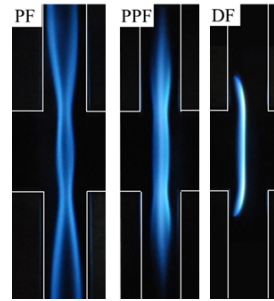


Fig. 2 Direct images for various inlet fuel composition(PF : Premixed Flame, PPF : Partial Premixed Flame, DF : Diffusion flame, methane)

열전대로 보정된 적외선카메라를 이용하여 측정하였다.

먼저 입구 경계의 혼합 조건에 따른 화염 거동을 실험하고 직접사진을 Fig. 2에 나타내었다. 양단의 노즐에 동일한 당량비의 혼합물을 투입하였을 때, 한 쌍의 대칭 예혼합화염(PF)이 안정적으로 형성되었다. 상대적으로 노즐의 거리가 멀어지면 예혼합화염간의 상호작용은 감소하게 되며, 반대로 거리를 점차 감소시키게 되면 Fig. 2의 첫 번째 그림과 같이 출구방향으로 화염의 길이가 증가하게 된다. 이러한 조건에서 평균 유속을 점차 증가시키게 되면 화염은 소멸된다. Fig. 2의 두 번째는 부분예혼합화염(PPF)을 나타내며, 이때 양단 혼합물의 당량비는 메탄의 희박 및 과농 가연한계 조건에 해당된다. 이러한 조건에서 화염은 왼쪽에서부터 희박 예혼합 화염, 확산화염, 과농 예혼합 화염의 3단 화염을 구성하게 된다. 다음으로 Fig. 2의 마지막 그림은 왼쪽

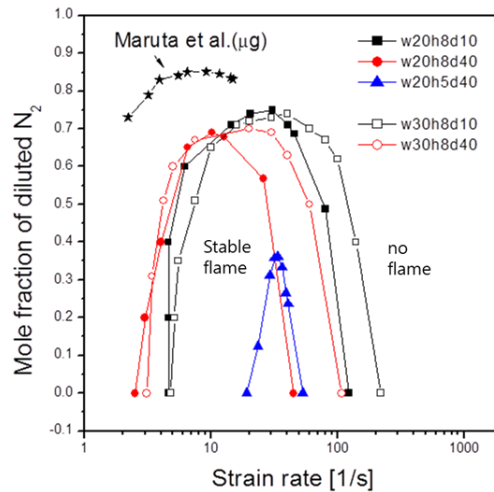


Fig. 3 Flammability limits for various experimental parameters.

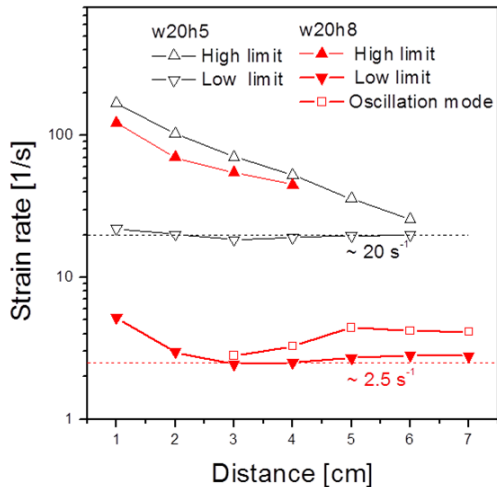


Fig. 4 Two flame extinction modes and oscillation mode for variation of nozzle distances(without dilution, $Y_{N_2}=0$)

의 산화제와 오른쪽의 연료가 투입되는 조건에서 형성된 전형적인 확산화염 화염을 나타낸다. 이러한 입구 경계에서의 다양한 혼합 조건에 따른 화염 안정화는 본 실험 연소기의 특성을 잘 나타낸다고 할 수 있다. 하지만 좁은 채널에서의 대향류 화염에 대한 기본적인 이해를 돕기 위해 본 연구에서는 확산화염만을 대상으로 하였다.

좁은 채널 내부에 형성된 확산화염에 대한 안정화 실험을 수행하여 Fig. 3과 4에 나타내었다. 먼저 Fig. 3는 노즐 크기와 높이 및 거리에 따른 화염 거동을 나타낸다. 동일 질소 농도 조건에서 살펴보면 2곳의 소멸 지점을 확인할 수 있으며, 이는 앞서 설명한 Kim 등[7,8]의 연구와 유사하게 설명 될 수 있는 LSR과 HSR 소멸에 해당한다. 전반적으로 넓은 범위에서 화염이 안정화 되는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 LSR영역은 기존의 미소 중력 실험 조건[9]과 비교하였을 때, 전반적인 값의 차이는 발생하였으나 보다 넓은 영역에서 실험 결과를 도출할 수 있었다. Fig. 4는 노즐 거리에 따른 화염 거동을 살펴보기 위해 비희석 조건에서의 결과를 나타낸다. 특징적으로 채널의 높이가 8mm인 경우 화염 진동이 발생하였으며, 이에 대한 자세한 설명은 이후에 이어질 것이다.

Figure 3과 4를 통해 전반적인 경향을 살펴보면, 노즐의 간격 및 질소 희석비율 클수록 노즐 크기와 채널 높이가 작을수록 화염 안정화 영역이 감소함을 알 수 있다. 하지만 HSR영역에서의 거동은 신장율에 의해 특성화되지 않음을 보여주는데 이는 채널 내부의 유동 발달 과정이 영향을 준 것으로 판단된다. 하지만 LSR영역에서는

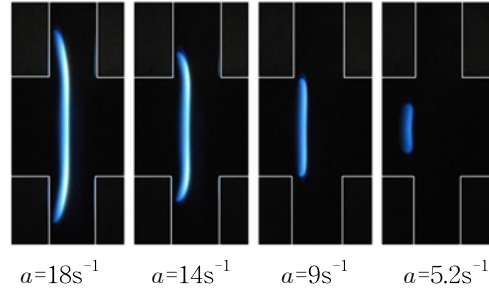


Fig. 5 Direct flame images of DF at LSR ($w20h8d10$, methane, without dilution).

신장율에 대해 비교적 일정한 특성을 나타내고 있다. 따라서 좁은 채널 내부에서는 평균 유속이 낮은 조건에 대해서만 포텐셜 유동을 가정할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 LSR 조건에서의 거동을 Fig. 5에 나타내었다. 신장율이 감소할수록 화염은 보다 편평해지며, 화염의 길이가 노즐의 크기보다 작은 화염을 형성하게 된다. 이러한 화염은 연료 또는 유속 조건에 따라 노즐 내부에 화염이 형성되기도 하였다.

앞서 언급한 바와 같이 LSR영역에서 화염 소멸이 발생하기 전에 진동모드가 관찰되었는데, 이에 대해 보다 자세히 살펴보기 위해 진동하는 화염을 ICCD와 초고속 카메라를 이용하여 촬영하였고, 이를 Fig. 6에 나타내었다. 진동의 한 주기를 살펴보면 화염은 크게 그 형태가 변하지 않는 코어 영역과 출구방향으로 전과후 소멸되고 다시 재전과하는 화염의 두 가지 구분되는 구조를 가지고 있었다. 이때 전과하는 화염의 주파수는 5~6 Hz 사이값을 가졌으며 신장율에 따라서는 변화가 적었다. 이러한 2차원적 거동은 기존 연구에서 수행된 확산화염에서의 에지화염 전과특성으로 판단되나 현재의 시점에서는 전과의 시작점에 대한 원인 분석 및 전과 길이에 대한 한계 및 재점화 과정에 대한 분석이 명확하지 않

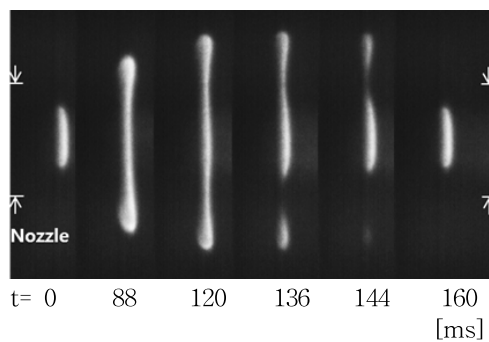


Fig. 6 Transient ICCD images for one period at the oscillation mode ($w20h8d50$, $a=2.8s^{-1}$, methane)

으므로 향후 연구로 진행되어야 할 것이라 판단된다.

본 연구에서는 좁은 채널 내부의 대향류 연소기를 이용하여 다양한 경계 조건 및 연소기 형상에 따른 화염 안정화 특성을 실험적으로 수행하였다. 특히 확산화염을 기본으로 LSR영역과 HS R영역에 대한 소멸 특성을 살펴보았으며, 기존 연구에 비해 넓은 영역에 대한 안정화 특성을 확보할 수 있었다. 또한 LSR영역에 안정화 특성을 제공하였으며, 2차원 화염 거동을 확인하였다. 현재의 연구는 기초연구로써 좁은 채널 내부에 형성된 화염의 기본적인 이해를 그 목적으로 하였으며, 대향류 연소기의 다양한 특성을 이용하여 화염과 연소기와의 상호작용에 대한 이해를 넓힐 수 있을 것으로 판단된다. 특히 LSR영역에서의 화염 안정화 메커니즘을 미소 중력상태와 비교하여 그 특성을 명확히 설명한다면, 비용 절감뿐만 아니라 보다 다양하고 효과적으로 LSR영역에 대한 실험을 수행할 수 있을 것이라 판단된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단 신진교수 연구지원사업의 일환(2009-0069570)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] K. Maruta, "Micro and mesoscale combustion," Proc. Combust. Inst., Vol. 33, 2011, p. 125-150.
- [2] Y. Ju and K. Maruta, "Microscale combustion: Technology development and fundamental research," Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 37, 2011, pp. 669-715.
- [3] H. Tsuji, "Counterflow diffusion flames," Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 8, 1982, pp. 93-119.
- [4] M. J. Lee and N. I. Kim, "The stabilization of a methane-air edge flame within a mixing layer in a narrow channel," Combust. Flame, Vol. 157, 2010, pp. 201-203.
- [5] N. I. Kim, et al., "The propagation of tribrachial flames in a confined channel," Combust. Flame, Vol. 146, 2006, pp. 168-179.
- [6] B. Xu and Y. Ju, "Studies on non-premixed flame streets in a mesoscale channel," Proc. Combust. Inst., Vol. 32, 2009, pp. 1375-1382.
- [7] N. I. Kim, et al., "Non-premixed flame characteristics of opposed methane jets in coaxial narrow air stream tubes," Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 31, 2010, pp. 680-688.
- [8] N. I. Kim, "Numerical study of opposed non-premixed jet flames of methane in a coaxial narrow air tube," Combust. Flame, Vol. 159, 2011, pp. 722-733.
- [9] K. Maruta, et al., "Extinction of low-stretched diffusion flame in microgravity," Combust. Flame, Vol. 112, 1998, pp. 181-187.
- [10] J. S. Park, et al., "Edge flame instability in low-strain-rate counterflow diffusion flames," Combust. Flame, Vol. 146, 2006, pp. 612-619.
- [11] C. B. Oh, et al., "The two-dimensional structure of low strain rate counterflow nonpremixed-methane flames in normal and microgravity," Combust. Theory Model., Vol. 12, 2008, pp. 283-302.