채널 간격에 따른 대향류 확산화염의 가연 영역의 변화

이민정* · 김남일**†

Flammability Limits Variation of Opposed Flow Diffusion Flames for Different Channel Gap

Min Jung Lee*, Nam Il Kim**†

ABSTRACT

Flammability limits of opposed flow diffusion flame in a narrow channel was investigated experimentally and theoretically. There were three different extinction modes corresponding to high strain rate (HSR), low strain rate (LSR) and dilution ratio (DR) limits. To investigate these limits, a theoretical study was followed by focusing on flow and heat transfer characteristics. Consequently, a dead space concept that has been used for premixed flames was important to reveal the heat loss mechanism in a narrow channel especially for LSR conditions even in the case of diffusion flames.

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

좁은 공간 내부에 안정화된 화염에 관한 연구는 소형 연소기개발 뿐만 아니라 화염과 연소기와의 상호 작용 이해를 위해서도 중요하다[1-2]. 소형 연소기 개발에 있어 핵심사항은 공간적인 제약을 극복하고 화염을 좁은 공간 내부에 안정화시키는 것이다. 공간적인 제약의 극복을 위해서 예혼합 화염을 주로 사용하며, 안정된 화염 유지를 위해서는 확산화염을 주로 이용하게 된다. 이러한 특성을 이용하여 연소기를 소형화시키고 다양한 목적에 활용하고 있다[1].

하지만 좁은 공간에 형성된 화염의 안정화 특성은 연소기의 형상이나 구조에 매우 민감하므로 특정 연소기에 대한 실험 결과를 일반화하기에는 무리가 따른다. 따라서 좁은 공간 내부에서의 화염 안정화 특성에 대한 일반적인 데이터 베이스를 확보하는 것이 필요하며, 이를 위한 연소기 개발 역시 중요하다. 이러한 상황에서 가연한계, 전파속도, 화학 반응 기구와 같은 화염의 기본적인 특성에 대한 데이터 확보에 사용된 전통적인 대향류 구조의 화염 및 연소기에 대해 생각해 볼 필요가 있다. 본 연구에서는 기초 연소기로서 대향류 구조의 연소기를 설계하였으며, 좁은 채널 내부에 설치하여 채널 간격 조절이 용이하도록 제작하였다. 또한 형상이 간단하여 수치 및 이론적 접근 분야로의 연구 확대가 유리하도록 하였다. 실험적으로 화염의 안정화 특성 파악을 위해 채널 간격뿐만 아니라 노즐 거리, 입구 유속, 질소 희석률 등을 변화시켰으며, 이론적으로 확산 방정식을 이용하여 입구 경계조건 변화에 따른 농도 및 유동 특성을 파악하였다. 또한 열전달 방정식을 활용하여 가연한계 특성을 살펴보았다.

그림 1은 본 연구에 사용된 연소기를 위에서 바라본 그림이다. 지면과 수평으로 설치되어 부력의 효과를 최소화시킬 수 있었다. 연소기의 왼쪽에는 산화제가 오른쪽에는 연료가 투입되며 경우에 따라 질소를 혼합하였다. 그림 2는 기존 실험

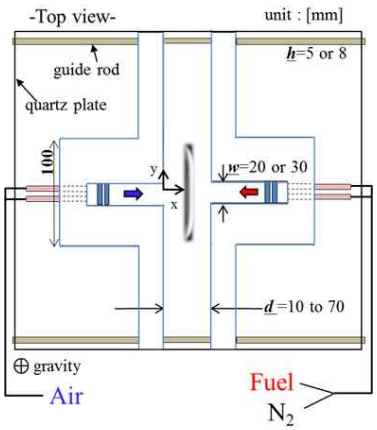

Fig. 1 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems

* 중앙대학교 기계공학부 대학원
** 중앙대학교 기계공학부
† 연락저자, nikim@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5753 FAX : (02)825-5753

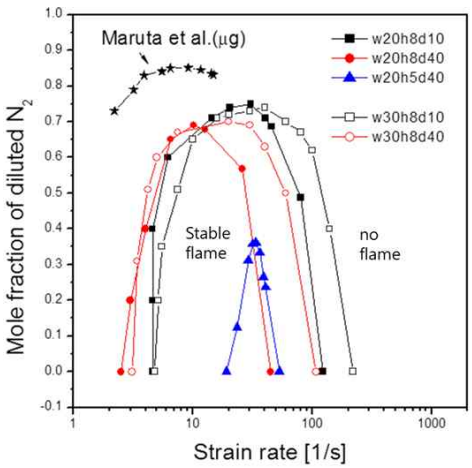

Fig. 2 Flammability limits for various experimental parameters[3]

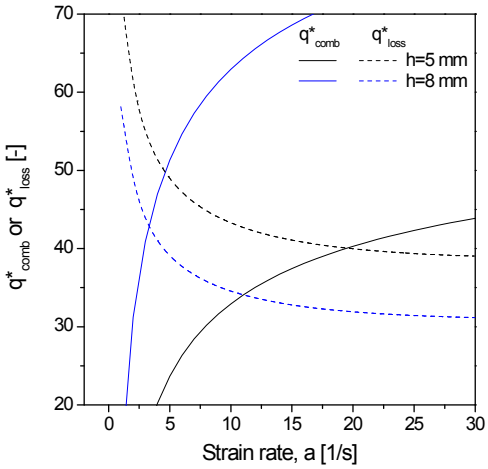

Fig. 4 Heat generation and heat loss variation with a strain rate

연구[3]를 통해 수행된 결과를 나타낸다. 동일 질소 희석률에서 고신장률 한계와 저신장률 한계를 가지게 되며, 화염은 그 경계 내부에서 안정화된다. 동일 노즐 거리에서 채널 간격이 감소할수록 저신장률 화염 안정화 영역이 감소하는 것을 알 수 있다. 채널 간격의 감소는 열손실의 증대를 야기하게 되며, 화염의 발열량과 동일하게 되면 화염은 소염된다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$-\rho_F D l_f \triangle H_c \frac{dX_F}{dx} = 2\left[-k\delta_f \frac{dT}{dz} + \rho_A c_{p,A} \overline{V}_{st,d} l_d (T_{avg} - T_o)\right] \quad (1)$$

식(1)에서 좌변은 발열량을 나타내며 화염길이(l_f)와 농도구배(dX_f/dx)에 비례한다. 또한 우변은 열손실을 나타내는데 그림 3에 나타낸 바와 같이 채널 내부의 화염은 연소기 벽면으로의 전도열손실과 화염과 벽면에 존재하는 dead space(l_d)를 통한 대류 열손실을 겪게 된다. 여기서 화염 두께(δ_f)와 dead space 및 평균 유속($\overline{V_{st,d}}$)은 신장율의 함수로 나타낼 수 있다. 식(1)은 상수항

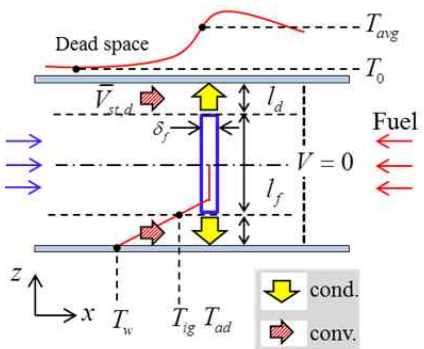

Fig. 3 Schematic of heat transfer mechanism in a channel

과 온도항을 정리하고, Lewis number(Le)와 Peclet number(Pe)를 이용하여 무차원된 식으로 정리할 수 있다. 정리된 식을 그림 4를 통해 실선의 발열량과 점선의 열손실량을 신장률의 함수로 나타내었다. 신장률의 감소에 따라 발열량은 감소하지만 열손실량은 증가하게 된다. 이 때 두 선이 만나는 신장률 조건에서 소염이 발생하게 되며, 그림 2의 저신장률 한계에 해당하는 실험값을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 기존의 실험결과를 바탕으로 채널 간격에 따른 저신장율 조건에서의 화염 안정화특성에 대해 열전달관점에서 이론적 해석을 시도하였다. 그 결과 좁은 채널 내부의 화염은 전도뿐만 아니라 dead space를 통한 대류열손실도 반드시 고려해야 함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단 일반연구지원사업의 일환(KRF-2009-0069570)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] K. Maruta, "Micro and mesoscale combustion," , Proc. Combust. Inst., Vol. 33, 2011, pp. 125-150.

[2] 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.

[3] M. J. Lee and N. I. Kim, "An experimental study on the flame behavior of opposed flow flames in narrow channels", Proceeding of 44th KOSCO symposium, 2012, pp. 9-12.