

부력 효과의 최소화를 통한 소화 근처 대향류 확산화염 거동에 관한 실험적 연구

정용호* · 박정** · 권오봉** · 윤진한*** · 길상인*** · 김태형**** · 김영주****

Experimental Study on Behavior near Extinction in Buoyancy-minimized Counterflow Diffusion Flame

Yong Ho Chung*, Jeong Park**†, Oh Boong Kwon**, Jin-Han Yun***
Sang-In Keel***, Tae Hyung Kim****, Young Ju Kim****

ABSTRACT

Experimental study was conducted to elucidate flame extinction phenomena in counterflow flame. Using a curtain helium flow significantly reduced buoyancy such that the flame can be positioned at the center between the upper and lower nozzles even at the velocity ratio of 1.0. The curves of critical diluent mole fraction versus global strain rate have C-shapes. The flame oscillation was observed prior to low strain rate flame extinction at both flame conditions with and without minimizing buoyancy force. The results show that, at low strain rate flame, the self-excitation frequency with the order of 1.0 Hz in the case of utilizing pure helium gradually decreases in increase of N₂ mole fraction in the curtain flow, meaning that buoyancy suppresses the self-excitation of the outer edge flame.

Key Words : Global strain rate, Buoyancy, Flame oscillation, Lewis number, Heat loss

우주에서의 화재는 막대한 예산을 들인 미션이 실패하게 되는 중대한 사안이고, 아울러 경제적으로도 막심한 피해를 끼칠 수 있다. 기존에 화재가 발생하는 경우 사용되었던 water spray나 Halon은 전자장치의 고장을 유발하거나 우주인에게 치명적이기 때문에 가스 소화제를 통한 화재 진화를 연구가 많이 진행 중에 있다. 게다가 우주에서의 화염의 성상은 부력이 없다는 점에서 지상에서의 화염과 상이하기 때문에 미소중력 실험을 통한 화염 구조와 소화 거동 등의 연구를 통해 우주에서의 최적화된 가스 소화제 개발이 필요한 실정이다.

화재 연구를 위한 표준 버너로는 컵버너와 대향류버너가 있다. 대향류 버너는 1차원 화염구조를 갖고 있고 국제우주정거장에서 ventilation 유동을 모사할 수 있다는 장점으로 가스 소화제 개발에 주로 사용되고 있다.

대향류 화염의 연구는 Tsuji⁽¹⁾ 등이 화염 구조

와 화염 소화 거동을 명확히 정의하기 위해 사용되었으며, 특히 고신장을 화염 소화 한계를 주요 타깃으로 화염 구조와 화염 소화에 대한 많은 양의 연구가 진행 되었다.⁽²⁻⁶⁾

최근의 몇몇 연구에는 저신장을 확산 화염의 소화 거동에 대해 연구가 진행되었고, 본 연구그룹에서는 대향류 확산화염에서의 화염 소화거동을 전체신장에 따라 반경방향으로 진동후 수축하며 소화되는 모드부터 진동없이 화염 중심부에 화염 구멍이 생기며 소화되는 모드까지 체계적으로 나타낸 바 있다.⁽⁷⁾ 이후 확장된 연구에서 유한한 버너 직경에서의 대향류화염 응답특성은 다차원 효과를 고려해야함을 시사하고, 앞서 언급한 세 가지 화염 소화 모드의 메커니즘과 외곽 에지화염이 화염소화에 미치는 영향에 대해 설명하였다.⁽⁸⁾ 이에 본 연구그룹은 기존의 연구로 밝혀진 사실을 바탕으로 화염대와 주위 분위기와 의밀도 구배를 최소화하여 부력을 최소화하는 실험기법을 이용하여 화염구조와 소화거동 등을 알아보고자 연구를 진행하려고 한다.

Fig. 1은 실험에 사용된 대향류버너와 유로계 시스템에 대한 개략도이다. 대향류 버너는 외부로부터 유동의 교란을 막을 수 있는 구조로 제작되었다. 버너 노즐간의 간격은 15.0mm로 고정하

* 부경대학교 에너지시스템공학과

** 부경대학교 기계공학과

*** 한국 기계연구원 그린환경에너지기계본부

**** 한국전력연구원 수화력발전팀

† 연락처, jeongpark@pknu.ac.kr

TEL : (051)629-7911 FAX : (051)-629-6126

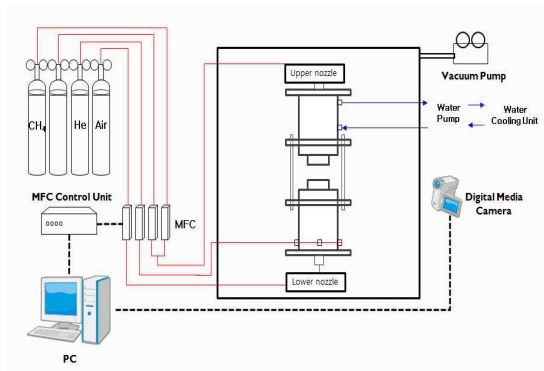


Fig. 1 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems.

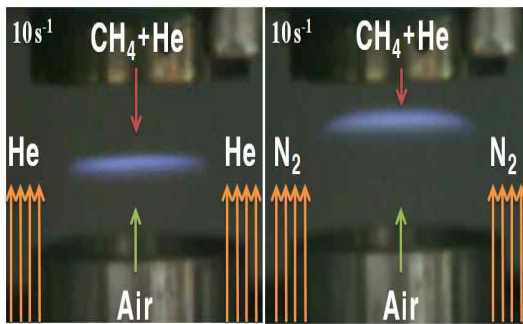


Fig. 2 The comparison of counterflow flame between both different curtainflow as helium and nitrogen.

였고, 버너 직경은 26.0mm로 하였다.

버너의 상부노즐에는 희석제로 희석한 메탄을 연료로 분사하였고, 하부노즐에는 산화제를 분사하였다. 외부의 화염 교란을 막고 후류(wake flow)에 의해 생성되는 외부 화염을 제거하기 위해 장막유동을 공급하였으며, 연료 및 산화제 노즐 내부에 미세한 매쉬 스크린(mesh screen)을 다단으로 설치하여 노즐 출구에서 균일한 유동속도를 갖게 하였다. 이를 마이크로마노미터를 이용하여 균일한 유동임을 검증하였다.

실험은 전체 신장율을 변화시키면서 실험을 수행하였으며, 전체 신장율의 범위는 4.7에서 50s⁻¹이다. 전체 신장율의 정의는 식 (1)과 같다.⁽⁹⁾

$$a_g = \frac{2V_a}{L} \left(1 + Vr \frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{\rho_a}}\right) \quad (1)$$

where, $Vr = \frac{V_f}{V_a}$ (=속도비)

여기서 V 와 ρ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내며, l 은 노즐간의 거리, 하첨자 a 와 f 는

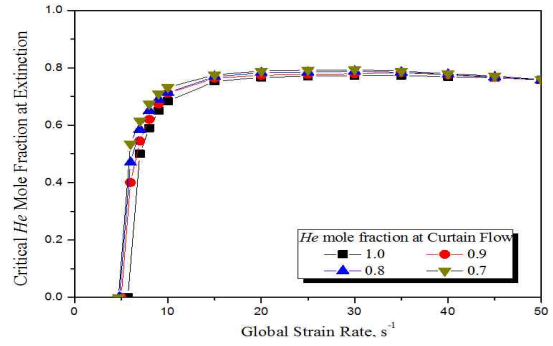


Fig. 3 Variations of critical mole fractions at flame extinction with global strain rate

각각 연료와 산화제를 나타낸다.

일반 중력장에서 부력은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$F_b = (\rho - \rho_0)g \quad (2)$$

여기서 $V_r = V_f/V_a$ 는 속도비, V 와 ρ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내며, L 은 노즐간의 거리, 하첨자 f 와 a 는 각각 연료와 산화제를 나타낸다. 여기서 ρ 는 화염대의 밀도, ρ_0 는 주위 분위기의 밀도이고, g 는 중력가속도를 의미한다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 화염대의 밀도는 0.15~0.16 kg/m³이며 상온에서의 헬륨의 밀도는 0.17 kg/m³이다. 따라서 대항류 확산화염의 실험구조에서 장막유동을 헬륨으로 선택하여 주위 분위기를 헬륨으로 조성하게 된다면 식(2)에 따라 부력은 10⁻²g 정도가 되어 JAMIC drop-tower 설비수준의 효과를 가지게 될 것이라 기대되며, 실제로 Fig. 2에서 알 수 있듯이 장막유동을 헬륨과 질소를 선택하였을 때의 화염 모습이 장막유동이 헬륨일 경우 화염대와 주위 분위기와 밀도구배가 거의 없기 때문에 부력이 10⁻²g 정도가 되어 장막유동이 질소일 경우와 비교해서 매우 낮은 전체 신장율임에도 불구하고 부력의 영향이 거의 없이 화염대가 버너 정 가운데에 위치함을 알 수 있다.

연료는 99.95%의 고순도 메탄을 사용하였으며, 희석제로는 고순도 질소(99.999%)와 고순도 헬륨(99.99%)를 사용하였다. 화염의 거동을 관찰하기 위해 정면에서 디지털 미디어 카메라로 촬영하고, 취득된 화염거동들은 matlab기반의 프로그램을 통해 분석하였다.

Fig. 3은 기본적으로 장막유동을 헬륨을 선택하고 질소를 10%씩 추가로 첨가하여 실험을 수행하여 도출된 전체신장율에 따른 화염소화임계물분율이다. 헬륨이 질소에 비해 열전도도가 높기 때문에 주위분위기를 헬륨 100%로 조성하였을 때 가장 화염소화임계물분율이 낮았고, 질소를 첨가함에 따라 단계적으로 높아졌다. 또한 고신

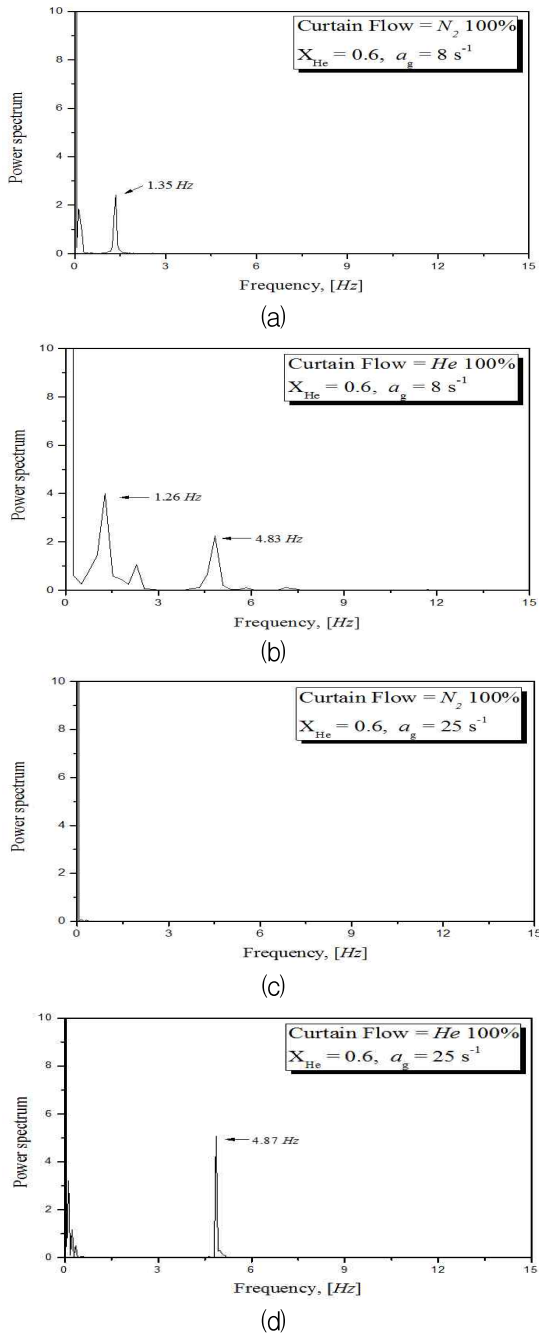


Fig. 4 Various of flame oscillation frequency in terms of both global strain rate and buoyancy.

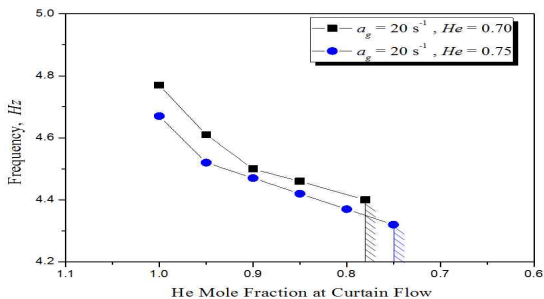


Fig. 5 Various of flame oscillation frequency with helium mole fraction at curtain flow

장율에서는 부력과 열손실에 의한 효과를 무시할 수 있으므로 하나의 곡선으로 일치함을 알 수 있다.

Fig. 4는 부력을 최소화한 경우와 일반적으로 부력이 있는 환경에서의 대향류 화염에서 도출되는 화염 진동을 FFT분석을 통해 나타낸 것이다. 먼저 (a),(b)를 보면 부력에 상관없이 저신장율화염에서 기존의 연구결과와 동일하게 반경방향의 전도열손실에 기인하는 약 1.2~1.3 Hz의 주파수가 나타난 것을 알 수 있고, (b)와 (d)의 경우인 부력을 최소화한 상태에서는 전체신장율과 관계없이 약 4~5 Hz의 주파수가 도출되었다. 이 진동은 저신장율에서 화염소화 직전에 나타나는 기존의 진동과는 달리 부력을 최소화한 상태에서 항상 나타났다. 이러한 현상이 부력에 원인이 있는 것으로 판단하여 장막유동에 질소를 조금씩 첨가함으로써 부력의 효과를 점차 증가시키며 추가적으로 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 희석제로 쓰인 헬륨의 몰분율을 0.7과 0.75로 고정하고, 장막유동에 질소를 조금씩 첨가하여 나타나는 진동을 FFT분석을 통해 도출한 그래프이다. Fig. 5를 보면 알 수 있듯이 장막유동의 질소 몰분율이 증가 할수록 즉, 부력의 효과가 커질수록 진동 주파수는 감소하는 것을 알 수 있으며, 장막유동의 질소 몰분율이 임계값보다 커지면 진동이 멈추게 된다. 부력이 있는 조건에서는 나타나지 않고, 부력이 최소화 되면 나타났다가 부력의 효과가 줄어들수록 진동 주파수가 점점 감소하는 것으로 보아 부력의 효과가 이러한 진동을 억제하는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 우주핵심기술개발사업의 일환(CD20120844)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] H. Tsuji, "Counterflow Diffusion Flames", Energy Combust., Vol. 9, 1982, pp. 93-119.
- [2] M.D. Smooke, I.K. Puri, K. Seshadri, "A comparison Between Numerical Calculations and Experimental Measurements of the Structure of a Counterflow Diffusion Flame Burning Diluted Methane in Diluted Air", Combust. Inst. 1986, pp. 1783-1792.
- [3] N. Peters, R.J. Kee, "The Computation of Stretched Laminar Methane-Air Diffusion Flames Using a Reduced Four-Step

- Mechanism", *Combust. Flame.*, Vol. 68, 1987, pp. 17-29.
- [4] H.K. Chelliah, C.K. Law, T. Ueda, M.D. Smooke, F.A. Williams, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames", *Combust. Inst.* Vol. 23, 1990, pp. 503-511.
- [5] C.-J. Sung, J.B. Liu, C.K. Law, "Structural Response of Counterflow Diffusion Flames to Strain Rate Variations", *Combust. Flame.*, Vol. 102, 1995, pp. 481-492.
- [6] M. D. Smooke, R.A. Yetter, T.P. Parr, D.M. Hanson-Parr, M.A. Tanoff, M.B. Colket, R.J. Hall, "Computational and experimental study of ammonium perchlorate/ethylene counterflow diffusion flames", *Combust. Inst.*, Vol. 28, 2000, pp. 2013-2020.
- [7] D. G. Park, J. H. Yun, J. Park, S. I. Keel, "A Study on Flame Extinction Characteristics along a C-curve", *Energy and Fuels.*, vol. 23, 2009, pp. 4236-4244.
- [8] Y. H. Chung, D. G. Park, J. H. Yun, J. Park, O. B. Kwon, S. I. Keel, "Role of outer-edge flame on flame extinction in nitrogen-diluted non-premixed counterflow flames with finite burner diameters", *Fuel* in press.
- [9] Chelliah, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smooke, M. D., and Williams, F. A., "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-field Effects on the Extinction Condition of Methane-air-nitrogen Diffusion Flames", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 23, p503, 1990.