

부력 효과의 최소화를 통한 대향류 확산화염 소화거동에 관한 실험적 연구

정용호* · 박 정*** · 권오봉** · 윤진한*** · 길상인*** · 김영주****

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

Yong Ho Chung, Jeong Park, Oh Boong Kwon, Jin-Han Yun, Sang-In Keel and 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 : Curtain flow, Buoyancy, Flame oscillation, Heat loss, Lewis number

1. 서론

우주에서의 화재는 우주인의 생명과 직결되며 막대한 예산을 들인 미션의 성공이 걸린 중대한 사안이다. 화재 진압에 사용되었던 방법에는 water spray, Halon, 가스소화제 등이 있다. 하지만 water spray나 Halon의 경우 전자장치의 고장을 유발하거나 우주인에게 치명적인 점 때문에 사용에 제한이 따르기 때문에 주로 CO₂를 이용한 가스 소화제를 주로 이용하고 있다. 그리고 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 필요하다.

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

사용되고 있다.

대향류 화염의 연구는 Tsuji[1] 등이 화염 구조와 화염 소화 거동을 명확히 정의하기 위해 사용되었으며, 특히 고신장울 화염 소화 한계를 주요 타깃으로 화염 구조와 화염 소화에 대한 많은 양의 연구가 진행되었다[2-6].

최근의 몇몇 연구에는 저신장울 확산 화염의 소화 거동에 대해 연구가 진행되고 있다. Tien 연구그룹에서는 스트레인율이 2 s⁻¹일 때 확산화염의 두께는 2~3 cm가 될 수 있음을 보였고, 이는 화염을 다차원이 아닌 일차원 화염구조로 간주하고 해석하기 위해서는 버너직경이 최소 20 cm 이상에서 실험 수행되어야 함을 의미한다[7]. 실제로 23 cm 직경의 스키투에서 수행된 실험에서 저신장울과 고신장울 모두 화염 구멍을 통해 소화됨을 보고한 바 있으며[8], 1997년 Maruta[9] 등의 14 mm 노즐을 사용한 미소중력 실험에서 저신장울의 화염 소화는 복사 열손실에 기인하고, 고신장울의 화염 소화는 화염 스트레치에 기인함을 보고한 바 있다. 그 후 Park 등은[10-12] 유한한 버너직경에서의 화염은 다차원 효과를 고려해야 함을 시사하며, 실제로 18, 26, 46 mm의 버너를 사용하여 저신장울 화염의 소화는 반경방향으로의 전도열손실이 복사열손실에 비해 우세하게 기여함을 실

* 부경대학교 에너지시스템공학과

** 부경대학교 기계공학과

*** 한국 기계연구원 그린환경에너지기계본부

**** 한국전력연구원 수화력발전팀

† 연락처, jeongpark@pknu.ac.kr

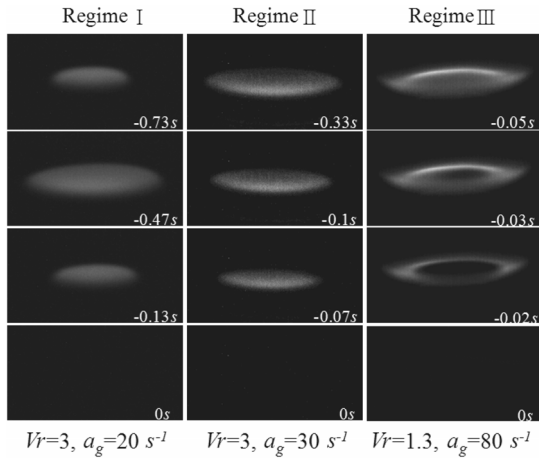


Fig. 1. Various flame extinction modes for the burner diameters of 26 mm.

험 및 수치해석으로 보였다. 그리고 Fig. 1과 같이 화염 소화거동을 전체신장율에 따라 반경방향으로 진동 후 수축하며 소화되는 모드부터 진동 없이 화염 중심부에 화염 구멍이 생기며 소화되는 모드까지 체계적으로 나타내었다.

한편, 대향류 확산화염의 에지 부분은 전형적인 부분 예혼합이며, 바깥 에지화염이 만일 정지화염이라면 화염 전파속도와 국부 유동속도와 균형을 이루며 안정화된다. 에지화염의 전파속도는 혼합강도, 연료 농도, 부력, 루이스 수, 선평 확산 등에 의해 결정된다 [13]. 게다가 확산화염과 에지 부분의 예혼합 가지와의 전도열전달도 에지화염 전파 속도와 화염 안정화를 제어하는 요소가 될 수 있다[14-15], 따라서 앞서 언급한 화염 소화모드에서의 진동 역시 에지화염의 안정화 메커니즘에서 찾을 수 있음을 판단하고, 이에

확장된 연구에서[16] 실험 및 수치해석을 통해 에지화염의 안정화 메커니즘이 화염 소화에 미치는 영향에 대해 보고한 바 있다.

그러나 이러한 연구들은 부력의 영향에서 자유로울 수 없기 때문에 앞선 언급한 연구들을 명확하게 하기 위해서는 부력을 제거한 조건에서의 실험이 필요하다. 지상에서의 미소중력 실험에는 drop-tower나 parabolic flight를 이용한 실험정도가 있는데 이러한 방법은 경제적인 측면이나 미소중력 조건의 유지 시간 등의 제한사항이 있는 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는 화염 대와 주위 분위기와 밀도 구배를 최소화하여 부력을 최소화하는 실험기법을 이용하여 화염구조와 소화거동 등을 알아보고자 연구를 진행하려고 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 실험에 사용된 대향류버너와 유로계 시스템에 대한 개략도이다. 대향류 버너는 외부로부터 유동의 교란을 막을 수 있는 구조로 제작되었다. 버너 노즐간의 간격은 15.0mm로 고정하였고, 버너 직경은 26mm로 하였다.

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

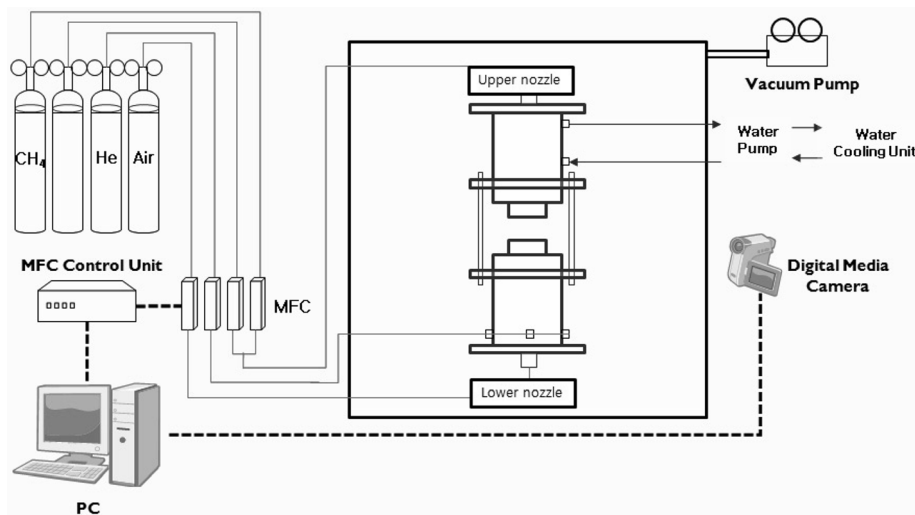


Fig. 2. Schematic diagram of counterflow burner and flow systems.

실험은 전체 신장율을 변화시키면서 실험을 수행하였으며, 전체 신장율의 범위는 4.7에서 50 s⁻¹이다. 전체 신장율의 정의는 식 (1)과 같다[4].

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

where, $Vr = \frac{V_f}{V_a}$ (= 속도비)

여기서 V_r 은 속도비, V 와 ρ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내며, L 은 노즐간의 거리, 하첨자 f 와 a 는 각각 연료와 산화제를 나타낸다.

일반 중력장에서 부력은 식 (2)와 같이 정의된다.

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

여기서 ρ 는 화염대의 밀도, ρ_0 는 주위 분위기의 밀도이며, g 는 중력가속도를 의미한다. 화염대의 밀도는 약 0.15~0.16 kg/m³이며 상온에서의 헬륨의 밀도는 약 0.17 kg/m³이다. 따라서 대항류 확산화염의 실험 구조에서 장막유동을 헬륨으로 선택하여 주위분위기를 헬륨으로 조성하게 된다면 식 (2)에 따라 부력은 10² g 정도가 되어 공기 중으로 낙하는 낙하탑 실험 수준의 효과를 가지게 될 것이라 기대되며, Fig. 3은 장막유동을 헬륨과 질소를 선택하였을 때의 화염 모습이다. 장막유동이 헬륨일 경우 화염 대와 주위 분위기와 밀도구배가 매우 낮아져서 부력이 10² g 정도가 되기 때문에 장막유동을 밀도가 1.25 kg/m³ 정도인 질소를 선택한 경우와 비교해서 부력의 영향을 많이 받는 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%)을 사용하였다. 실험은 화염의 점화 후에 연료 측에 희석제의 물분율을 증가시키는 형식으로 진행되었고, 장막유동에 질소를 첨가하는 형식으로 주위분위기를 형성하는 혼합기체의 밀도를 조정함으로써

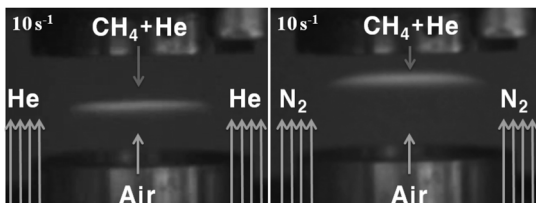


Fig. 3. The comparison of counterflow flame between both different curtain flow as helium and nitrogen.

부력의 크기를 점차 증가시키며 수행되었다. 이에 따른 화염의 거동을 관찰하기 위해 정면에서 디지털 미디어 카메라로 촬영하고, 취득된 화염거동들은 Matlab 기반의 프로그램을 통해 분석하였다.

3. 결과 및 논의

Fig. 4는 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 화염소화 임계물분율이 낮았고, 질소를 첨가함에 따라 단계적으로 높아졌다. 여기서 부력의 크기가 낮아짐에 따라 부력에 의한 화염 불안정성이 억제되어 화염 소화 임계물분율이 다소 높아 질수도 있을 것이라 생각되나 상반되는 결과가 나타났는데, 이는 화염 소화에 부력의 제거를 통한 화염의 안정화보다 주변으로의 열손실이 더 우세하게 작용한다는 것으로 판단된다. 또한 고신장율에서는 부력과 열손실에 의한 효과를 무시할 수 있으므로 하나의 곡선으로 일치함을 알 수 있다. 그리고 본 연구에 사용된 26 mm에서는 순수 메탄화염일 경우 전체신장율 4.7 s⁻¹가 화염이 유지되는 임계값이었으며, 전체신장율이 더 낮은 경우에는 주변으로의 열손실로 인해 화염이 소화되는 현상을 보였고, 좀 더 직경이 큰 버너의 경우에는 더 낮은 신장율에서도 화염이 유지될 것이라 판단된다.

한편, 부력을 제거하였을 경우 전체 신장율과 관계없이 항상 화염이 진동하는 현상이 나타났으며, 기존에 저신장율 화염의 소화모드에 관찰되었던 진동과는 다른 진동으로 판단되며 부력을 제거한 조건에서의 저신장율 화염소화에서는 이러한 두진동이 혼재되어 나타나는 것을 확인하였다. 좀 더 자세한 논의

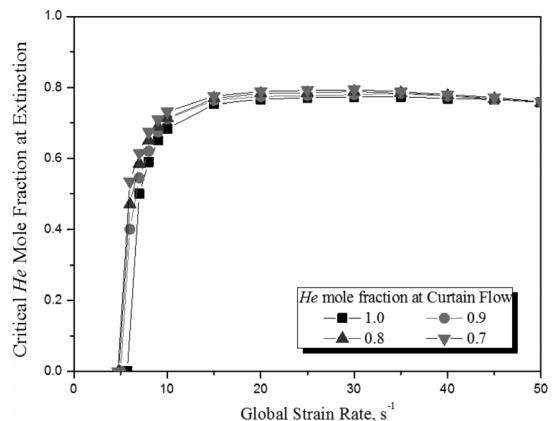


Fig. 4. Variations of critical mole fractions at flame extinction with global strain rate.

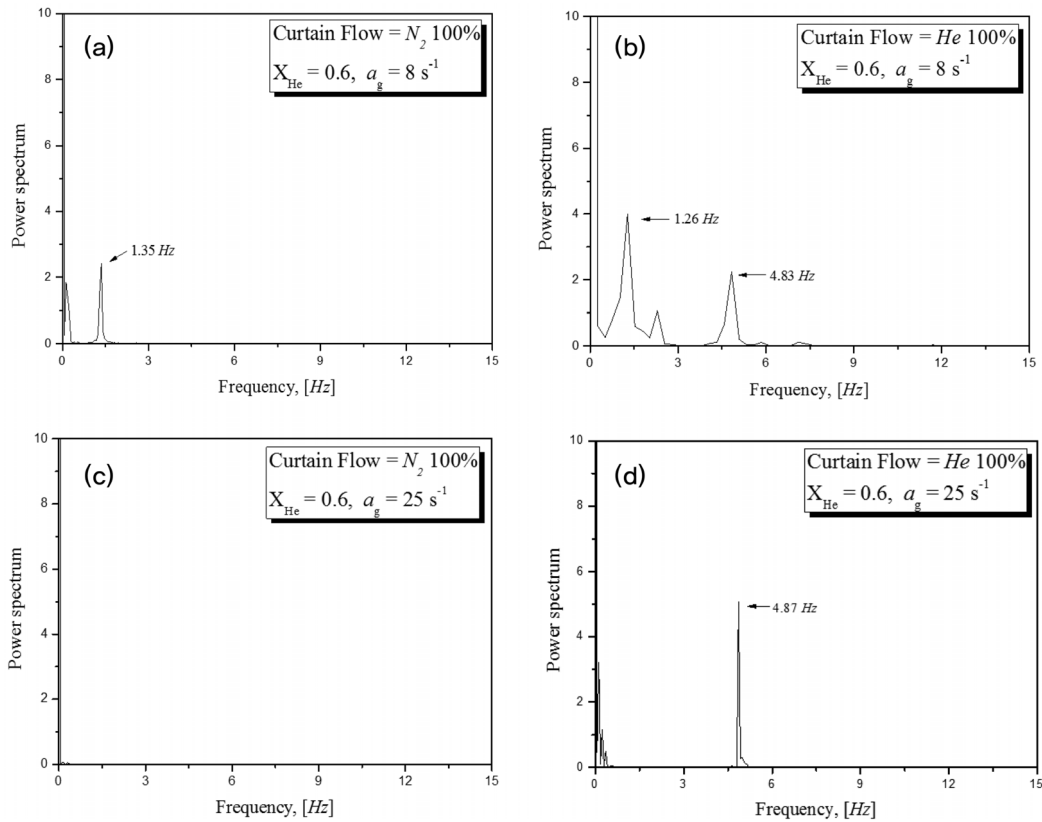


Fig. 5. Various of flame oscillation frequency in terms of both global strain rate and buoyancy.

를 위해 진동 주파수를 FFT분석을 통해 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5는 부력을 최소화한 경우와 일반적으로 부력이 있는 환경에서의 대향류 화염에서 도출되는 화염 진동을 FFT분석을 통해 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 5의 (c)와 (d)를 보면 부력이 작용하는 조건에서 나타나지 않는 약 4~5 Hz의 진동이 부력을 제거하였을 때 관찰되는 것을 알 수 있으며, 저신장을 영역에도 역시 부력을 제거하였을 때 약 4~5 Hz의 진동을 확인할 수 있다. 특히, 저신장을 영역에는 기존의 연구에서 보고되었던 소화모드인 반경방향의 전도열손실에 기인하는 약 1.2~1.3 Hz의 진동이 나타나는데 부력을 제거한 경우에는 두 진동이 혼재되어 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상이 부력과 관계있을 것이라 판단하고, 이를 명확하게 하기위해 장막유동에 분사되는 혼합기체의 밀도를 달리하여 부력의 크기를 조절하여 화염 거동을 FFT분석을 통해 Fig. 6과 같이 나타내었다.

Fig. 6은 연료 측의 희석제로 쓰인 헬륨의 몰분율을 0.7과 0.75로 고정하고, 장막유동의 질소를 조금씩 첨가하여 부력의 크기가 점차 증가하였을 때 나타나는 화염 거동을 FFT분석을 통해 도출한 그래프이다.

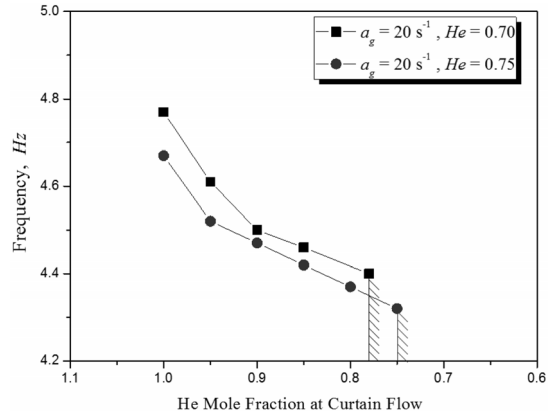


Fig. 6. Various of flame oscillation frequency with helium mole fraction at curtain flow.

Fig. 6을 보면 알 수 있듯이 장막유동의 질소 몰분율이 증가할수록 즉, 부력의 크기가 증가할수록 진동 주파수는 감소하는 것을 알 수 있으며, 장막유동의 질소 몰분율이 임계값보다 커지면 진동 주파수는 사라지게 된다. 즉 부력의 크기가 어느 임계값보다 초과 되면 앞선 보았던 약 4~5 Hz의 진동이 멈추는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 관찰된 약 4~5 Hz의

진동이 일반적으로 부력에 작용하는 조건에서는 부력에 의해 억제되어 관찰되지 않고, 부력의 크기가 임계값 이상으로 낮춰진 조건에서 비로소 관찰됨을 알 수 있다. 또한, 이러한 진동을 유발하는 요인에 대해서는 본 연구그룹에서는 루이스 수라고 판단하고 있으나, 이를 명확하게 하기 위해서 본 연구그룹에서 추가적인 실험과 DNS코드를 이용한 수치해석을 수행 중에 있으며, 그 결과를 토대로 좀 더 면밀히 살펴볼 필요가 있다.

4. 결론

대향류 확산화염의 화염 거동에 대해 진행된 기존의 연구들을 명확히 하기 위해 부력을 제거한 조건에서의 실험이 진행되었다. 상온에서의 헬륨의 밀도와 화염대 밀도의 차이가 매우 적은 것에 주목하여 대향류 환경에서 화염 교란 방지와 주위 분위기 형성에 사용되는 장막유동을 헬륨으로 선택하여 부력을 제거하는 실험기법이 사용되었다. 실험은 화염의 접착 후에 연료 측에 희석제의 물분율을 증가시키는 형식으로 진행되었고, 장막유동에 질소를 첨가하는 형식으로 주위분위기를 형성하는 혼합기체의 밀도를 조정함으로써 부력의 크기를 점차 증가시키며 수행되었다.

전체 신장율에 따른 연료 희석제의 화염소화임계 물분율은 C 커브 형태로 나타났으며, 순수 메탄화염에서 화염이 소화되는 임계 전체신장율은 4.7 s^{-1} 이며, 이는 본 연구에 사용되었던 26 mm 직경의 버너보다 큰 버너를 사용하였을 경우 임계 전체신장율은 더 낮은 값을 가질 것이라 판단된다.

한편, 부력을 제거하였을 경우 화염은 전체 신장율과 희석제의 물분율에 관계없이 약 4~5 Hz의 주파수로 진동하였다. 특히, 저신장율의 화염 소화 시에는 기존의 화염 소화에 나타났던 반경방향의 전도 열손실에 기인하는 진동과 혼재되어 나타남을 확인하였다. 이러한 약 4~5 Hz의 진동이 부력과 관계있는 것으로 판단하고 장막유동에 질소를 첨가하는 형식으로 밀도를 달리하여 부력의 크기를 조절한 결과 부력의 크기가 증가할수록 진동 주파수는 감소하는 것을 알 수 있었으며, 부력의 크기가 임계값보다 커지면 진동 주파수는 사라지게 되며, 이는 부력에 의해 진동이 억제되고 있다가 임계값 이상으로 부력이 제거되면 진동이 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한, 이러한 진동을 유발하는 요인에 대해서는 본 연구그룹에서는 루이스 수라고 판단하고 있으나, 이를 명확하게 하기 위해서 본 연구그룹에서 추가적인 실험과 DNS코드를 이용한 수치해석을 수행 중에 있으며, 그 결과를 토대로 좀 더 면밀히 살펴볼 필요가 있다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 우주핵심기술개발사업의 일환(CD20120844)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [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] F. C. Frate, H. Bedir, C. J. Sung, J. S. Tien, "On flammability limits of dry CO/O₂ opposed-jet diffusion flames", Proc. Combust. Inst., Vol. 28, 2000, pp. 2047-2054.
- [8] Han, B., Ibarreta, A.F., Sung, C.J., Tien, J.S., "Experimental low-stretch gaseous diffusion flames in buoyancy-induced flowfields", Proc. Combust. Inst. Vol. 30, 2005, pp. 527-535.
- [9] Maruta K, Yoshida M, Guo H, Ju Y, Niioka T., "Extinction of Low-Stretched Diffusion Flame in Microgravity", Combust. Flame, Vol. 112, 1990, pp. 181-187.
- [10] J. S. Park, D. J. Hwang, J. Park, J. S. Kim, S. C. Kim, S. I. Keel, T. K. Kim, D. S. Noh, "Edge fla-

- me instability in low-strain-rate counterflow diffusion flames”, *Combust. Flame*, Vol. 146, 2006, pp. 612-619.
- [11] C. B. Oh, Hamins A, Bundy M, J. Park, “The Two-Dimensional Structure of Low strain rate Counterflow Nonpremixed-Methane Flames in Normal and Microgravity”, *Combust. Theory Modeling*, Vol. 12(2), 2008, pp. 283-302.
- [12] 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.
- [13] S. H. Chung, Proc. “Stabilization propagation and instability of tribachial triple flame”, *Combust. Inst.*, Vol. 31, 2007, pp. 877-892.
- [14] G.R. Ruetsch, L. Vervisch, A., Liñán, “Effects of heat release on triple flames”, *Phys. Fluids*, Vol. 7 1995, pp. 1447-1454.
- [15] S.H. Yoon, J.K. Han, J. Park, J.H. Yun, S.I. Keel, “Self-excitation in laminar free-jet propane flames diluted with nitrogen”, *Combust. Flame*, 2011
- [16] 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.

접수일 : 2012. 12. 05
심사완료일 : 2012. 12. 07