

# 부력을 최소화한 대향류 삼축 메탄-공기 비예혼합 화염 소화에서 에지화염의 거동

박진욱\* · 박 정\*\* · 윤진한\*\*\* · 길상인\*\*\*

## Behavior of the Edge Flame on Flame Extinction in Buoyancy minimized Methane-Air Non-premixed Counter Triple Co-flow Flames

Jin Wook Park\*, Jeong Park\*\*, Jin-Han Yun\*\*\*, Sang-In Keel\*\*\*

### ABSTRACT

A Experimental study on flame extinction behavior was investigated using He curtain flow with counter triple co-flow burner. Buoyancy force was suppressed up to a microgravity level of  $10^{-2} - 10^{-3}g$  by using He curtain flow. The stability maps were provided with a functional dependency of diluent mole fraction and global strain rate to clarify the differences in flame extinction behavior. The flame extinction curves had C-shapes at various global strain rates. The oscillation and extinction modes were different each other in terms of the global strain rate, and the flames extinction modes could be classified into five modes such as (I) and (II): an extinction through the shrinkage of the outmost edge flame forward the flame center after self-excitation and without self-excitation, respectively, (III): an extinction through rapid advancement of a flame hole while the outmost edge flame is stationary, (IV): self-excitation occurs in the outermost edge flame and the center edge flame and then a donut shaped flame is formed and/or the flame is entirely extinguished, (V): shrinkage of the outermost edge flame without self-excitation followed by shrinkage or survival of the center flame. These oscillation and extinction modes could be identified well to the behavior of edge flame. The result also showed that the edge flame was influenced significantly by the conductive heat losses to the flame center or ambient He curtain flow.

**Key Words** : Global strain rate, Flame oscillation, Heat loss

대향류 확산화염의 연구는 Tsuji[1] 등이 화염 구조와 화염소화거동을 정의하기 위해 수행하였으며, 특히 고신장률 화염소화 한계를 주요 다각으로 많은 양의 연구가 진행되었다[2-6].

대향류 확산화염에서 에지화염은 부분 예혼합 화염의 구조를 갖고 있으며, 에지화염의 전파속도는 반경방향의 유동속도와 균형을 이루고 있다. 그리고 에지화염의 전파속도는 혼합강도, 열손실, 연료농도구배, 그리고 부력에 의해 영향을 받는다. 이러한 사실을 바탕으로 본 연구 그룹에서는 에지화염의 안정화 혹은 불안정화 메커니즘을 규명함으로써 C-curve를 따라 나타나는 3가

지 화염 소화 모드의 메커니즘을 규명하였고, 유한한 버너직경의 대향류 확산화염에서 반경방향의 전도 열손실이 화염 소화에 지배적으로 작용한다는 사실을 밝혔다.[7-10]

하지만, 이러한 연구들은 일반적으로 지상에서 부력의 영향 하에 수행된 실험이기에 부력이 화염에 미치는 영향을 명확히 하기에 힘든 것이 사실이며, 이에 부력의 영향을 배제하고, 조금 더 명확한 결과를 얻기 위해 부력이 다음과 같은 식(1)에 의해 정의된다는 사실을 바탕으로 화염대형성하는 장막유동의 밀도 구배를 최소화 하여 부력의 영향을 최소화 하였다.

$$F_b = -(\rho - \rho_\infty)g \quad (1)$$

\* 부경대학교 의생명융합협동과정

\*\* 부경대학교 기계공학과

\*\*\* 한국 기계연구원 그린환경에너지기술본부

† 연락저자, jeongpark@pknu.ac.kr

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

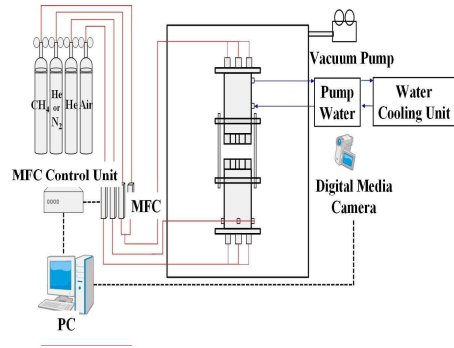


Fig. 1. schematic diagram of counter triple co-flow burner and flow systems.

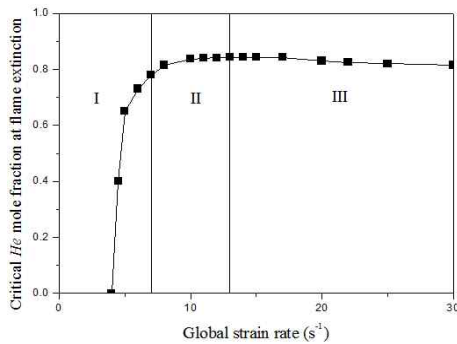


Fig. 2. Critical diluent mole fractions versus global strain rate at 40mm burner diameter.

이후 부력을 최소화 한 조건에서 연구가 수행되었고, 유한한 버너직경의 대향류 확산화염에서 반경방향의 전도 열손실이 화염 소화에 지배적으로 작용함을 밝혔다.

이에 본 연구그룹은 대향류 확산화염에서 화염 중심부와 에지부분의 연료농도를 다르게 하여 연료농도구배가 화염의 소화와 소화거동에 어떠한 영향을 미치는 알아보고, 열손실에 의해 발생하는 화염진동을 다양한 연료농도구배에서 평가하기 위해 삼축 대향류 버너를 이용하여 연구를 진행하였다.

Fig 1.는 이번 연구에 사용된 대향류 삼축 버너와 실험장치의 개략도이다. 노즐간의 간격은 15mm로 고정하였고, 외부 버너 직경은 40mm, 내부 버너 직경은 10mm로 하였다. 버너의 상부 노즐과 하부노즐에서는 각각 헬륨으로 희석한 메탄과 산화제를 분사하였고, 에지화염의 거동을 살펴보기 위해 내부와 외부 노즐에의 헬륨 희석물분율을 변화시키며 실험을 진행하였다. 실험에서는 부분적인 외부의 화염 교란을 막고 후류(wake flow)에 의해 생성되는 외부 화염을 제거

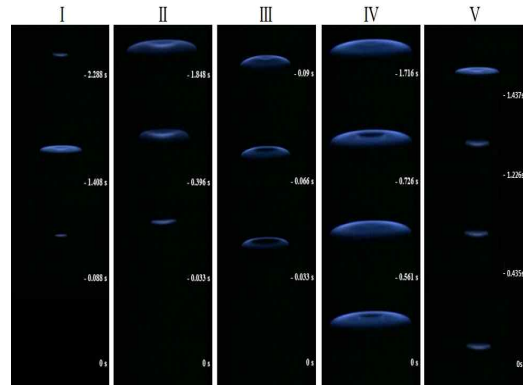
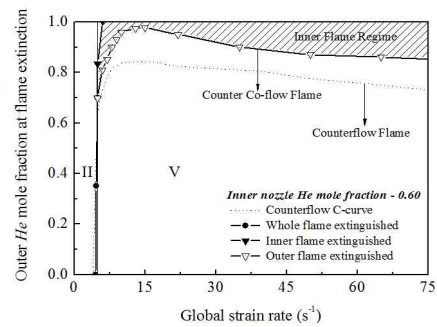
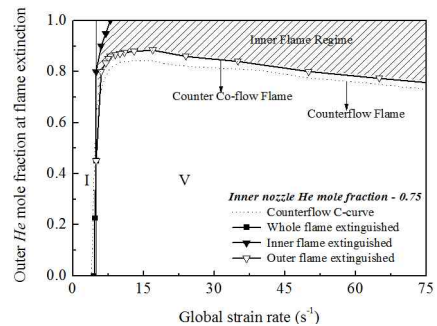


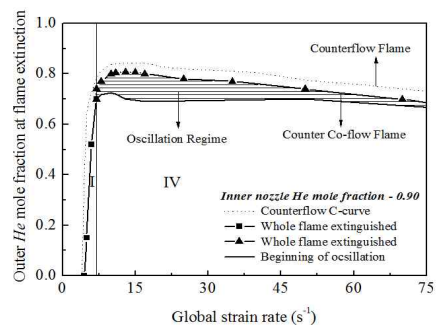
Fig. 3. Representative flame extinction modes.



(a) Inner nozzle He mole fraction - 0.60



(b) Inner nozzle He mole fraction - 0.75



(c) Inner nozzle He mole fraction - 0.90

Fig. 4. Outer He diluent mole fractions versus global strain rate at 40mm burner diameter.

하기 위해 장막유동을 공급하였으며, 장막유동은 헬륨을 사용하여 부력의 효과를 최소화 하였다. 연료 및 산화제 노즐 내부에 미세한 메쉬 스크린(mesh screen)을 다단으로 설치하여 노즐 출구에서 균일한 유동속도를 갖게 하였고, 화염의 위치를 상하부 버너의 중심에 유지하기 위해 상하부 노즐의 출구 속도비를 1로 고정시켰다. 장막유동의 속도를 상하부노즐의 출구속도와 동일하게 분사하여 저신장률에서 예지화염의 진단층에 대한 불안정성을 제거하였다. 실험을 수행한 전체 신장률의 범위는  $4s^{-1}$ 에서  $80s^{-1}$ 이며, 전체 신장률의 정의는 식 (2)과 같다.[4]

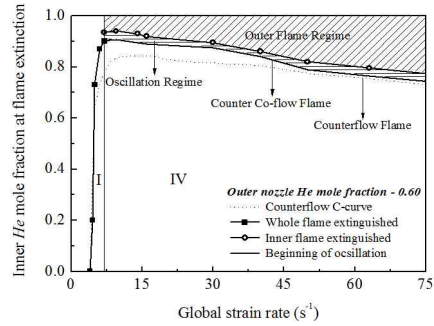
$$a_g = \frac{2V_a}{L} \left(1 + V_r \frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{\rho_a}}\right) \quad (2)$$

where,  $V_r = \frac{V_f}{V_a}$  (= 속도비)

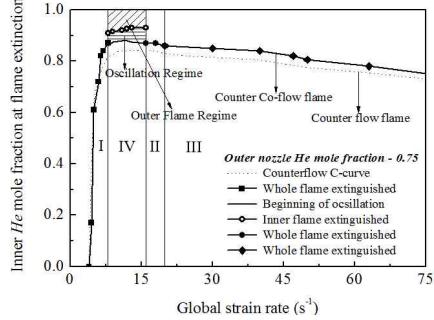
여기서  $V$ 와  $\rho$ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내며,  $L$ 은 노즐간의 거리, 하첨자  $f$ 와  $a$ 는 연료와 산화제를 나타낸다.

대향류 삼축 버너에서 화염 안정화 선도를 얻기에 앞서 동일한 환경에서 연료농도구배를 변화시키지 않은 화염의 안정화 선도를 Fig. 2에 나타내었고, C-curve의 형태를 보였다. 화염의 소화거동 역시 이전 연구와 마찬가지로 전체신장률에 따라 3가지로 나타났다.

이러한 사실을 바탕으로 삼축 대향류 버너에서 바깥 노즐과 내부 노즐의 희석제 몰분율을 다르게 하여 실험을 수행하였다. 먼저 Fig 4.은 안쪽 노즐의 희석제 몰분율을 고정시킨 상태에서 바깥 노즐의 희석제 몰분율을 증가시키며 얻은 화염안정화선도이다. 안쪽 노즐의 헬륨 몰분율이 0.60인 (a)를 살펴보면 II영역에서 예지화염의 반경방향 진동 없이 수축하며 소화되는 거동을 보였다. V 영역의 전체신장률 6이하에서는 바깥 화염이 수축을 통해 소화 된 후에 안쪽 화염이 수축하며 소화되고, 전체신장률 6이상에서는 바깥 화염만 소화 되고 안쪽 화염은 꺼지지 않고 유지 된다. 안쪽 노즐의 헬륨 몰분율이 0.9인 (c)는 I영역에서 예지화염이 반경방향으로 진동 후 수축하며 소화된다. 그리고 IV영역에서 화염 중심부에 화염 구멍이 생기고 안쪽, 바깥쪽 예지화염이 확장 과 수축을 반복하며 진동하다가 화염 구멍이 확장되며 화염 전체가 소화되는 거동이 나타났다. Fig 5.은 바깥 노즐의 희석제 몰분율을 고정시킨 상태에서 중간 노즐의 희석제 몰분율을 증가시켜 얻은 화염안정화선도이며, 바깥 노즐의 헬륨 몰분율이 0.60인 (a)를 살펴보면 저신장률에서는 I영역이 나타난다. 전체신장률 7 이후 실선부터 안쪽 예지화염과 바깥쪽 예지화염이 동시에 진동



(a) Outer nozzle He mole fraction - 0.60



(b) Outer nozzle He mole fraction - 0.75

Fig. 5. Inner He diluent mole fractions versus global strain rate at 40mm burner diameter.

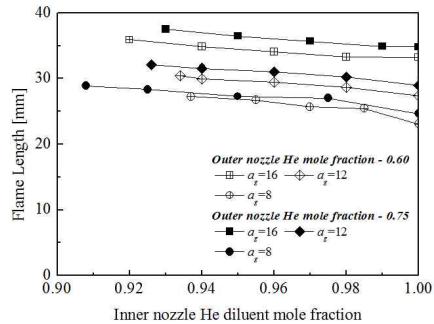


Fig. 6. Normalized flame length versus Inner nozzle He diluent mole fraction.

하며, 안쪽 노즐의 헬륨 희석률을 더욱 증가시키면 진동이 멈추고 도넛모양 화염을 생성한다. 이후 영역에서 안쪽 노즐의 헬륨 희석률이 1이 되더라도 도넛모양 화염이 유지된다. 바깥 노즐 헬륨 몰분율이 0.75인 (b)에서 저신장률에서 I영역이 나타나며, 전체신장률 8-16까지 안쪽 예지화염과 밖의 예지화염이 동시에 진동 후 도넛모양 화염의 생성하는 IV영역이 나타났다. 전체신장률 16-20에서 반경방향 진동 없이 수축하며 소화하는 II영역이 나타났고, 고신장률 영역에서는 기존 연구들과 동일하게 스트레치에 의해 flame hole로 소화가 이루어지는 III영역이 나타났다.

본 연구에서 Fig 3.과 같이 5가지 화염 소화거동을 관찰하였다. I은 에지화염이 신장과 수축을 반복하며 진동 후에 화염 중심부로 수축하며 소화하는 소화 거동이며, II는 에지화염의 진동 없이 화염 중심부로 수축하며 소화하는 소화모드이다. 그리고 III은 화염 중심부에 화염 구멍이 생겨 급격히 커지며 화염이 소화되는 거동이다. IV는 화염 중심부에 화염 구멍이 생기고 안쪽, 바깥쪽 에지화염이 확장과 수축을 반복하며 진동하다가 도넛 모양의 화염을 형성하거나 화염 구멍이 확장되며 소화되는 거동이며, V는 바깥쪽 화염이 수축하며 소화된 후에 중심부의 화염만 유지되다가 중심부의 화염이 수축하며 소화되거나 유지되는 거동이다.

여기서 화염 소화모드 IV, V는 이전 연구에서 볼 수 없었던 소화 거동으로, 더 면밀히 조사해볼 필요가 있다. V는 중심 노즐의 연료농도를 고정시킨 상태에서 수행한 실험에서만 나타난 영역이며, 연료농도구배를 주지 않은 화염 안정화 선도에서 II의 영역에 해당된다. 반경방향 진동 없이 수축을 통해 소화가 이루어지지만, 연료 농도구배 때문에 바깥 노즐과 중심 노즐의 화염이 분리되어 소화되는 거동이다.

Fig 6.은 IV에서 헬륨 희석 물분율에 따른 도넛 모양 화염의 길이 변화를 나타낸 그래프이다. 대향류 삼축 화염에서는 안쪽 노즐의 헬륨 희석 물분율을 바깥 노즐의 헬륨 희석 물분율 보다 높이면 안쪽 에지화염의 연료농도 구배가 커져서 화염 전파속도가 감소하게 된다. 바깥 에지화염과 다르게 안쪽 에지화염은 기연측에서 미연측으로 화염이 전파하는 즉, 양의 전파속도를 가지기 때문에 헬륨 희석 물분율이 증가할수록 화염의 중심부의 구멍이 커지면서 Fig 6.과 같이 화염의 길이가 작아지게 된다. 또한, 바깥 노즐의 헬륨 희석률 0.75인 조건보다 0.60인 조건이 안쪽 에지화염의 연료 농도 구배가 크기 때문에 중심부의 구멍이 크고 화염의 길이가 작은 것을 알 수 있다. 따라서 연료농도 구배가 에지화염 거동에 지배적인 요인이라고 판단되며, 에지화염 거동의 메커니즘을 더욱 명확히 밝혀내기 위해 실험과 수치해석을 통한 추가적인 연구가 계속 진행 중에 있다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단 우주핵심기술개발사업의 일환(CD20130942)으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] H. Tsuji, Prog Energy Combust Sci 9 (1982) 93-119.
- [2] M.D. Smooke, I. K. Puri, K. Seshadri, Proc Combust Inst 21 (1986) 1783-1792.
- [3] N. Peters, R. J. Kee, Combust Flame 68 (1987) 17-29
- [4] H. K. Chelliah, C. K. Law, T. Ueda, M. D. Smooke, F. A. Williams, Proc Combust Inst 23 (1998) 503-511.
- [5] C. -J. Sung, J. B. Liu, C. K. Law, Combust Flame 102 (1995) 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, Proc Combust Inst 28 (2000) 2013-2020.
- [7] D. G. Park, J. H. Yun, J. Park, S. I. Keel, Energy & Fuels 23 (2009) 4236-4244.
- [8] J. S. Park, D. J. Hwang, J. Park, J. S. Kim, S. C. Kim, S. I. Keel, T. K. Kim, D. S. Noh, Combust. Flame 146 (2006) 612-619.
- [9] C. B. Oh, Hamins A, Bundy M, J. Park, Combust. Theory Modeling 12 (2008) 283-302.
- [10] Y. H. Chung, D. G. Park, J. H. Yun, J. Park, O. B. Kwon, S. I. Keel, Fuel, 105 (2013) 540-550.
- [11] Y. H. Chung, K. H. Bahn, J. Park, O. B. Kwon, J. H. Yun, S. I. Keel, Combust. Sci. Technol, Submitted (2014).