

## 부력의 영향을 최소화한 조건에서 대향류 확산화염의 화염 소화에 관한 실험적 연구

정용호\* · 박진욱\* · 박정\*\* · 권오봉\* · 윤진한\*\* · 길상인\*\*

\*부경대학교 기계공학과 · \*\*한국 기계연구원 그린환경에너지기술본부

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

Yong Ho Chung\*, Jin Wook Park\*, Jeong Park\*\*, Oh Boong Kwon\*, Jin-Han Yun\*\* and Sang-In Keel\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University

\*\*Environment & Energy Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received 16 February 2014, Received in revised form 16 June 2014, Accepted 16 June 2014)

#### ABSTRACT

Experiments were conducted to clarify role of the outermost edge flame on low-strain-rate flame extinction in buoyancy-suppressed non-premixed methane flames diluted with He and N<sub>2</sub>. The use of He curtain flow produced a microgravity level of 10<sup>-2</sup>-10<sup>-3</sup>g in N<sub>2</sub>- and He-diluted non-premixed counterflow flame experiments. The critical He and N<sub>2</sub> mole fractions at extinction with a global strain rate were examined at various burner diameters (10, 20, and 25 mm). The results showed that the extinction curves differed appreciably with burner diameter. Before the turning point along the extinction curve, low-strain-rate flames were extinguished via shrinkage of the outermost edge flame with and without self-excitation. High-strain-rate flames were extinguished via a flame hole while the outermost edge flame was stationary. These characteristics could be identified by the behavior of the outermost edge flame. The results also showed that the outermost edge flame was not influenced by radiative heat loss but by convective heat addition and conductive heat losses to the ambient He curtain flow. The numerical results were discussed in detail. The self-excitation before the extinction of a low-strain-rate flame was well described by a dependency of the Strouhal number on global strain rate and normalized nozzle exit velocity.

**Key Words** : Edge flame, Fire suppression, Flame extinction, Heat loss

#### 1. 서론

ISS에서의 화재 진압에 관한 연구는 우주인과 장비들을 보호하기 위해 연구되어 왔다. 화재 진화 시 전자 장비들이 즐비한 우주선의 특성상 물을 분사하는 방식은 적절하지 못하며, Halon 또한 우주인에게 치명적인 영향을 미치므로 사용에 제한이 있다. 따라서 가스 소화제를 이용한 많은 화재 진화 연구가 진행 중에 있다.

화재 연구에 사용되는 대표적인 버너 중 대향류 버너는 화염이 1차원적 구조를 띠고 있고, 특히 저신장

률에서 ISS의 ventilation 유동을 잘 모사할 수 있기 때문에 우주에서 최적화된 가스 소화제 개발에 용이하여 많이 이용되고 있다.

대향류 확산화염의 연구는 Tsuji[1] 등이 화염 구조와 화염 소화거동을 명확히 정의하기 위해 사용되었으며, 주로 고신장률을 타깃으로 많은 양의 연구가 진행되었다[2-6].

Maruta 연구그룹에서는 Jamic drop tower와 14 mm 직경의 버너를 이용한 미소중력실험결과를 1차원 상사성 개념 하에서 해석하였고, 저신장률 화염 소화는 복사열손실, 고신장률 화염 소화는 화염 스트레치에 기인한다고 밝힌 바 있다[7]. 한편, Tien 연구그룹의 결과에서는 신장률 2 s<sup>-1</sup>의 확산화염 혼합층 두께는 약 2~3 cm 정도이며, 이것은 화염을 1차원 상사성 개념

† Corresponding Author, jeongpark@pknu.ac.kr

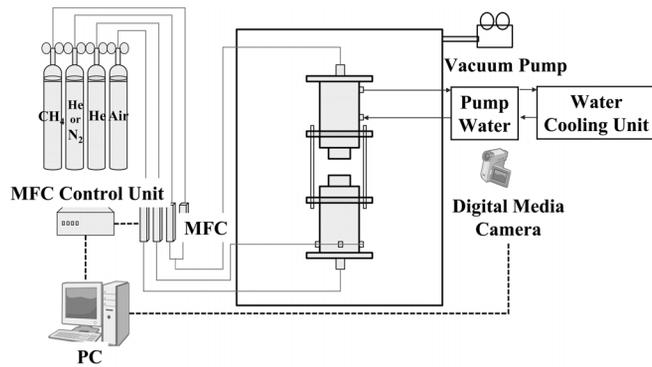


Fig. 1. Schematic diagram of counterflow burner and flow systems.

으로 해석하기 위해서는 버너직경이 최소한 20 cm 이상이 되어야 함을 의미한다[8]. 또한, 실제로 23 cm의 충분히 큰 버너직경에서 저신장률과 고신장률의 화염이 화염 구멍을 통해 화염소화가 이루어지는 결과를 보였다[9]. 그러나 대부분 실험실 규모의 연구에서는 유한한 직경의 버너를 이용하므로 화염을 1차원으로 해석하기에는 무리가 따를 수가 있으며, 최근 본 연구그룹에서 수행된 18, 26, 46 mm의 유한한 버너직경을 이용한 연구에서 저신장률의 화염소화는 반경방향의 전도열손실이 지배적으로 작용하며, 신장률에 따라 화염 소화모드를 체계적으로 규명한 바 있다[10-12]. 또한, 화염 표면온도측정과 수치해석을 통해 각 소화 모드 별 화염 소화 메커니즘과 예지화염이 화염 소화에 미치는 영향을 규명하였다[13].

한편, 대항류 확산화염에서 예지화염은 부분 예혼합 화염구조를 갖고 있으며, 예지화염의 전파속도는 혼합강도, 열손실, 연료농도구배 그리고 부력에 의해 영향을 받는다. 이전까지의 연구결과는 일반적으로 부력이 작용하는 조건에서의 실험 결과로 부력의 영향을 규명하기가 힘든 것이 사실이었다. 본 연구에서는 화염대의 밀도와 주위 밀도를 최소화하여 부력의 영향을 최소화하는 방법으로 대항류 확산화염에서 화염 소화에 관해 연구해 보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 실험에 사용된 대항류버너와 유로계 시스템에 대한 개략도이다. 대항류 버너는 외부로부터 유동의 교란을 막을 수 있는 구조로 제작되었다. 버너 노즐간의 간격은 15.0 mm로 고정하였고, 버너 직경은 10, 20, 25 mm로 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

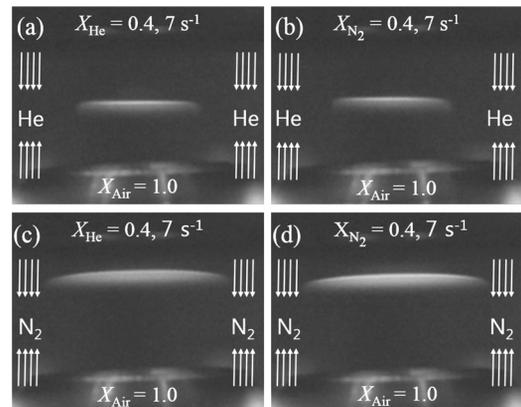


Fig. 2. Flame location in He and N<sub>2</sub> curtainflow.

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 마이크로미터를 이용하여 균일한 유동임을 검증하였다.

실험은 전체 신장률을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 전체 신장률의 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  $Vr$ 은 속도비,  $V$ 와  $\rho$ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내며,  $L$ 은 노즐간의 거리, 하첨자  $f$ 와  $a$ 는 각각 연료와 산화제를 나타낸다.

1 atm 298 K일 경우 화염대에서 전체 신장률  $a_g = 10 \text{ s}^{-1}$ 일 때, 비예혼합 순수 메탄과 공기의 연소에서 화염대의 밀도는  $0.165 \text{ kg/m}^3$ 이고, 헬륨을 희석하였을 경우와 질소를 희석하였을 경우엔 각각  $0.159\text{-}0.165$

$\text{kg/m}^3$ , 0.165-0.209  $\text{kg/m}^3$  영역대의 밀도를 가진다. 대기압 상온에서 헬륨과 질소의 밀도는 각각 0.164  $\text{kg/m}^3$ , 0.968  $\text{kg/m}^3$ 이며, 질소를 장막유동으로 사용하였을 경우 헬륨을 장막유동으로 사용하였을 경우보다 부력의 효과인  $-(\rho-\rho_\infty)g$ 의 영향이 더 크게 작용함을 알 수 있다.

Fig. 2는  $X_{\text{N}_2} = 0.4$ ,  $X_{\text{He}} = 0.4$ ,  $V_r = 1$ ,  $a_g = 7 \text{ s}^{-1}$ 인 조건에서 장막유동을 헬륨과 질소를 사용하였을 경우를 비교한 사진이다. 장막유동을 헬륨과 질소를 사용하였을 조건에서 Oppdif code를 이용한 수치해석을 통하여 도출한 화염대 영역의 밀도는 각각 0.168  $\text{kg/m}^3$ , 0.183  $\text{kg/m}^3$ 으로 나타났다. 일반적으로 부력의 크기는 다음과 같이 정의된다.

$$F_b = -(\rho - \rho_\infty)g \quad (2)$$

위 식을 차용하여 장막유동으로 헬륨을 사용하였을 경우와 질소를 사용하였을 경우, 부력의 크기는 각각  $5.0 \times 10^{-3} \text{g}$ ,  $4.5 \times 10^{-2} \text{g}$ 로 나타났다. 이는 Fig. 2에서도 알 수 있듯이 헬륨을 장막유동으로 사용한 경우 질소의 경우보다 부력의 크기가 줄어들어 화염이 버너 상부에 치우치지 않고 가운데에 위치하는 현상으로 나타난다.

연료는 99.5%의 고순도 메탄을 사용하였으며, 질소와 헬륨은 각각 99.999%와 99.99%의 고순도 희석제를 사용하였다. 또한 산화제로 99.995%의 고순도 공기를 사용하였다. 실험에서는 외부의 부분적인 교란을 방지하기 위해 장막유동을 사용하였으며 장막유동은 헬륨을 사용하여 부력의 효과를 최소화하였다. 그리고 연료와 희석제의 혼합기체와 산화제는 각각 상부노즐과 하부노즐에서 분사되었다. 또한 하부 버너의 중심에 화염의 위치를 선정하기 위해 상하부 노즐의 출구 속도비를 1로 고정시켰으며, 장막유동의 속도를 상하부노즐의 출구속도와 동일하게 분사하여 저신장률에서의 최외각 예지화염의 전단층에 대한 불안정성을 제거하였다. 진동하는 화염의 거동과 화염길이를 관찰하기 위하여 디지털 미디어 카메라로 촬영하였고, 이를 Matlab기반의 프로그램으로 분석하였다.

### 3. 결과 및 논의

Fig. 3은 다양한 버너직경 조건에서 화염 소화 임계 희석제 몰분율을 전제신장률에 따라 나타낸 것이다. 같은 버너 직경인 조건에서 헬륨을 희석한 경우가 질소를 희석한 경우보다 그래프가 낮게 나타나는 것을 알 수가 있는데, 이는 헬륨의 열전도율이 질소보다 높기 때문으로 판단된다.

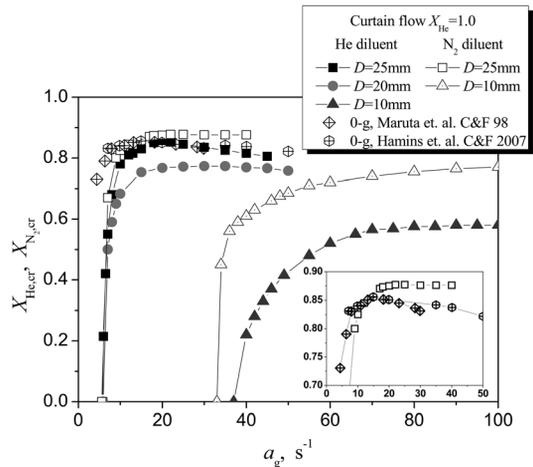
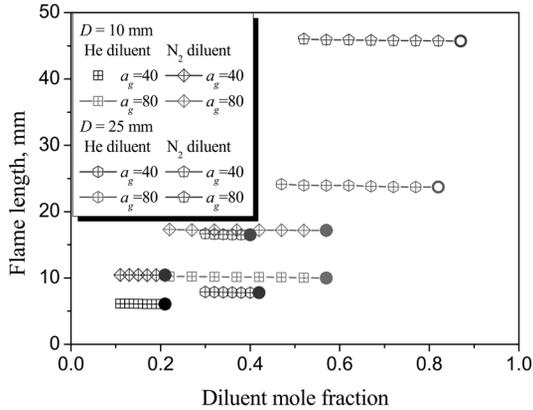


Fig. 3. Critical diluent mole fractions versus global strain rate at various burner diameter.

화염의 최외각부분은 예지화염의 전파속도와 국부 유동속도가 균형을 이루는 지점에 있으며, 예지화염의 전파속도가 어떠한 요인으로 인해 불안정해진다면 화염 길이의 변화가 생기거나 화염이 소화하게 된다. 한편 예지화염은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 전형적인 삼지화염의 형태를 가지지 않으며 뿔뿔한(blunt) 예지화염의 구조를 갖는다. 이러한 뿔뿔한(blunt) 예지화염은 매우 높은 연료농도구배와 국소신장률을 가진다[14,15]. 그리고 예지화염의 전파속도는 연료 농도구배와 비례관계에 있는 것으로 알려져 있다. 한편, 화염 소화 그래프를 저신장률과 고신장률로 나누어 살펴보면, 신장률에 따른 화염 소화 그래프의 변화가 저신장률일 경우에 급격히 변하는 반면에 고신장률에서는 비교적 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 이는 신장률이 화염소화에 지배적으로 작용하는 요인이 아님을 의미하며, 신장률과 비례관계에 있는 연료농도구배 또한 화염 소화에 미비한 영향을 미친다는 것을 뜻한다.

본 실험에서 루이스 수의 범위는 0.956~1.498이며 헬륨과 질소를 희석하였을 경우, 각각 0.956, 0.972를 가진다. 일반적으로 단일상태의 예지화염에서 루이스 수에 의한 자기진동은 루이스 수가 1보다 큰 경우, 또는 매우 큰 유량을 가질 때 나타난다. 또한 M. Matalon 등의 연구결과에[16] 따르면 과도한 열손실이 작용하는 조건에서 루이스 수에 의한 자기진동이 나타날 수 있음을 보고 한 바 있다. 예지화염의 진동은 예지화염 전파속도와 연관 지을 수 있으며, 예지화염은 전파속도와 국부유동속도와 균형을 이루는 지점에서 안정화되기 때문에 화염 길이와 연관 지을 수 있다.

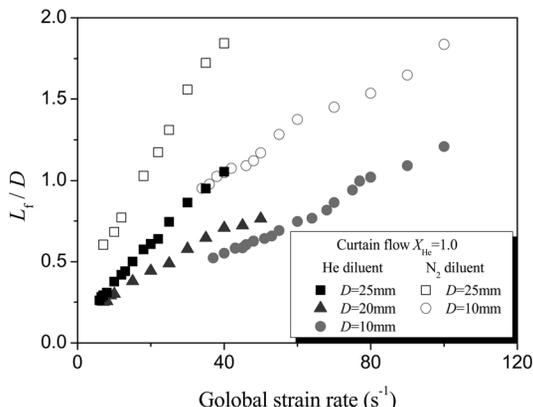
Fig. 4는 각 조건에서 희석제를 첨가함에 따라 혼합강도를 다르게 하였을 때 화염 길이의 변화를 그



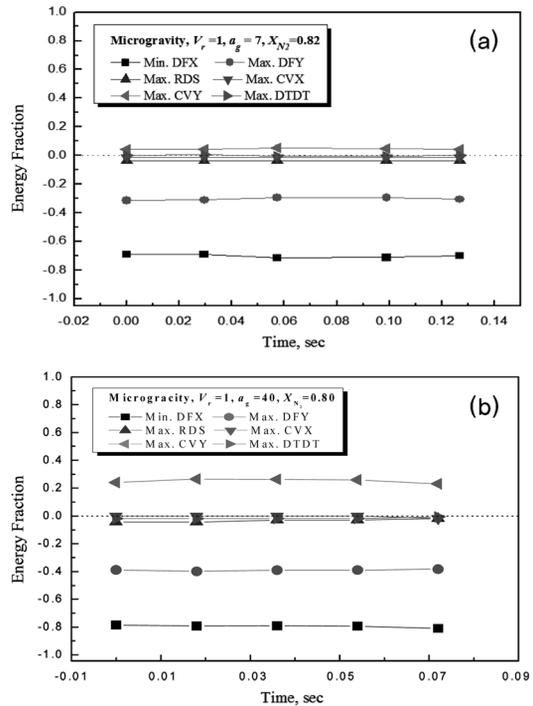
**Fig. 4.** Normalized flame length versus global strain rate at various burner diameters in He- and N<sub>2</sub>-diluted flames.

래프로 나타낸 것이다. 가장 우측의 속이 찬 심별은 화염이 중심부로 수축하며 소화가 이루어진 경우이고, 속이 빈 심별은 화염구멍을 통해 소화한 조건이다. 그래프에서 알 수 있듯이 혼합강도가 달라짐에 따라 화염 길이는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 예지화염의 위치가 국부 유동속도와 예지화염의 전파속도가 균형을 이루는 점에서 안정화된다는 사실로 미루어 볼 때, 이는 혼합강도가 예지화염의 전파속도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 해석 할 수 있다. 따라서 부력이 억제된 현재 실험 환경에서 혼합강도와 연료 농도 구배가 화염 소화에 지배적인 요인이 아니라고 한다면, 지배적인 영향을 주는 요인으로는 열손실만을 생각할 수 있게 된다.

Fig. 5는 각 조건에 대해 전체 신장률에 따른 버너 직경과 화염길이의 비를 나타낸 그래프이다. 이전에도 언급한 바와 같이 화염을 1차원 상사성 개념 하에서 해석을 하려면 화염길이가 매우 길어야 함을 알 수가 있다. 6 s<sup>-1</sup>일 때 화염길이는 D = 0.570D이



**Fig. 5.** Flame length versus diluent mixture fraction at D = 20 and 25 mm in He- and N<sub>2</sub>-diluted flames.



**Fig. 6.** Fractional contribution of each term normalized by the chemical source term in the energy equation: (a)  $V_r = 1$ ,  $a_g = 7 \text{ s}^{-1}$ ,  $X_{N_2} = 0.82$  and (b)  $V_r = 1$ ,  $a_g = 40 \text{ s}^{-1}$ ,  $X_{N_2} = 0.80$ .

며, 이는 화염을 일차원의 형태로만 볼 수가 없음을 의미하고 다차원의 효과를 고려해야한다는 것을 말한다. 따라서 반경방향의 영향을 고려해야만 한다. 이를 다차원적 효과를 명확히 하기위해 미소 중력 조건에서 수치해석을 실시하였다. 수치해석 결과는 Fig. 6에 나타내었으며, 수치해석은 C. B. Oh 등과 F. L. Dryer 등이[17,18] 계산한 방법과 동일한 방법으로 진행되었다. (a)는 저신장률 영역인  $a_g = 7 \text{ s}^{-1}$ 인 조건이며, (b)는 고신장률 영역인  $a_g = 40 \text{ s}^{-1}$ 일 때 이다. 지난 연구의 미소중력장과 일반중력장에서 수행된 수치해석결과에[19,13] 따르면 고신장률 화염에서는 예지화염으로부터 대기로의 반경방향과 축 방향 전도 열손실과 반경 방향의 꼬리 확산 화염으로부터 예지화염으로의 대류열전달로서 유지되는데, Fig. 6의 그래프에도 같은 경향으로 나타나는 것을 알 수 있고, 고신장률과 저신장률 조건 모두 축 방향과 반경 방향의 전도 열손실 항이 모두 우세하게 나타났으며, 특히 고신장률 영역에서는 반경방향의 대류항이 추가적으로 우세하게 나타남을 알 수가 있다. 하지만 복사 열손실 항은 매우 작은 수치를 보이고 있는데, 이는 다차원의 효과를 고려한 경우에는 화염에 복사 열손실보다는 전도 열손실이 지배적으로 작용한다는 것을 의미한다. 따라서 유한한 버너

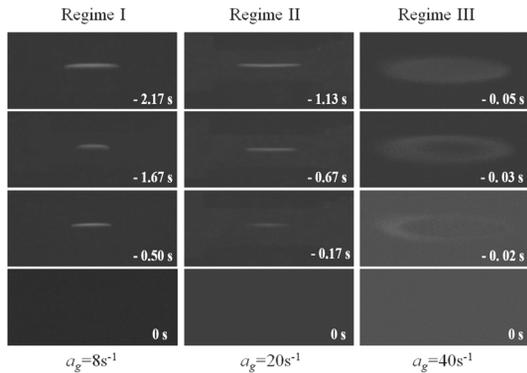


Fig. 7. Representative flame extinction modes.

직경에서 대향류 확산화염의 화염 소화는 전도 열손실이 지배적으로 작용하다는 결론을 얻을 수 있다.

Fig. 7은 본 연구를 통해 얻어진 전체 신장률에 따른 대표적인 화염 소화모드를 나타낸 것이다.

이전 연구와 마찬가지로 화염 소화모드는 세 가지로 나눌 수가 있었다. 영역 I은 화염소화 직전 에지화염의 자기진동 후 화염중심으로 수축하며 소화되는 소화모드, 영역 II은 에지화염의 진동 없이 수축하며 소화되는 소화모드, 영역 III은 에지화염이 정지된 상태에서 화염 중심부에 화염구멍이 생기면서 소화되는 소화모드이다. 각 소화 모드의 소화 메커니즘은 이전 연구에서 규명하였으며[13], 부력의 영향이 배제된 본 연구의 실험과 수치해석 결과가 일치하는 사실을 알 수 있다.

Table 1은 각 조건 별로 화염 소화모드 영역을 표시한 표이다. 먼저 희석제를 질소와 헬륨을 사용하였을 경우를 비교해보면 헬륨을 희석제로 사용한 경우에 저신장률 화염 소화모드영역이 넓게 나타나는 것을 알 수가 있는데 이는 헬륨의 비교적 높은 열전도율로 인해 주변으로의 열손실이 커지게 되면서 열손실이 지배적으로 작용하는 소화모드인 영역 I과 영역 II이 넓게 나타나는 것을 의미한다. 그리고

Table 1. Classification of flame extinction modes.

Burner Diameter	Regime	He diluent	N <sub>2</sub> diluent
10 mm	I	≤ 59	≤ 42
	II	60 ≤	43 ≤
	III	-	-
	T.P	-	-
20 mm	I	≤ 12	
	II	13-30	
	III	31 ≤	
	T.P	31	
25 mm	I	≤ 10	≤ 10
	II	11-25	11-22
	III	26 ≤	23 ≤
	T.P	22	22

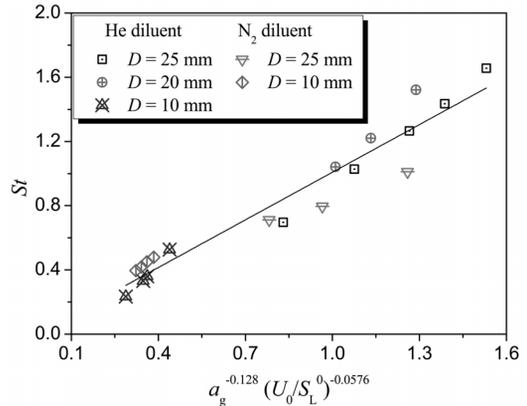


Fig. 8. Characterization of self-excitation before flame extinction in a low-strain-rate flame.

동일한 희석제를 사용한 경우 버너 직경의 변화에 따라 비교를 해보면, 버너 직경이 커짐에 따라 영역 I과 영역 II이 좁게 나타나는 것을 알 수가 있는데, 이는 버너 직경에 따라 화염 길이도 변화하므로 버너 직경이 작을 때 반경 방향의 전도 열손실이 크다고 생각할 수 있으며, 이에 따라 버너직경이 작은 조건에서 열손실이 지배적으로 작용하는 소화모드인 영역 I과 영역 II이 넓게 나타나는 것으로 이해할 수 있다.

한편, 저신장률의 소화모드인 영역 I에서 나타나는 화염 진동 주파수는 희석제의 종류와 버너직경의 변화에 따라 1.0~8.37 Hz로 상이하게 나타났으며, Fig. 8에 전체신장률과 노즐출구속도와 화염전파속도의 비와 Strouhal 수로 나타내었다. 화염의 진동 주파수는 반경 방향의 열손실이 커짐에 따라 높아지는 경향으로 나타났으며, 상관계수는 0.93으로 나타났다.

#### 4. 결론

대향류 확산화염의 화염 소화에 대해 버너 직경 10, 20, 25 mm에 대해 부력의 영향을 최소화한 조건에서 연구가 진행 되었다.

장막유동을 헬륨으로 사용함에 따라 부력의 영향이 10<sup>-2</sup> g~10<sup>-3</sup> g 정도로 최소화 할 수 있었다.

대향류 확산화염에서 에지화염의 전파속도는 부력, 혼합강도, 연료농도구배, 열손실 등에 영향을 받으며, 혼합 강도, 연료농도구배는 에지 화염의 전파속도에 미소한 영향을 끼치는 것으로 판단되며, 부력의 영향이 최소화된 본 연구에서 열손실이 에지화염의 전파속도에 지배적으로 작용한다는 것을 알 수 있었다. 또한 미소중력 상태에서의 수치해석 결과를 통해 이전 연구 결과와[13] 마찬가지로 복사 열손실은 미비한 영향을 미치며 전도 열손실이 지배적인 역

할을 한다는 것을 알 수가 있었다.

화염 소화모드는 전체 신장률에 따라 대표적으로 세 가지 영역으로 나타났으며, 영역 I은 화염소화 직전 에지화염의 자기진동 후 화염중심으로 수축하며 소화되는 소화모드, 영역 II은 에지화염의 진동 없이 수축하며 소화되는 소화모드, 영역 III은 에지화염이 정지된 상태에서 화염 중심부에 화염구멍이 생기면서 소화되는 소화모드이다. 또한 각 조건에 따라 화염 소화 영역을 나눠서 살펴 본 결과 전도 열손실이 커짐에 따라 저신장률의 화염 소화모드인 영역 I과 영역 II이 넓게 나타나는 것을 알 수가 있었고, 이 역시 저신장률에서 화염소화가 전도 열손실에 지배적인 영향을 받는다는 것에 대한 근거가 되었다.

화염소화 직전 에지화염의 자기진동 후 화염중심으로 수축하며 소화되는 소화모드인 영역 I에서 화염 진동 주파수는 각 조건에 따라 상이하게 나타났는데, 이를 전체신장률과 노즐출구속도와 화염전파속도의 비에 따라 Strouhal 수로 나타낸 결과 반경 방향의 열손실이 커짐에 따라 높아지는 경향으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 전력산업원천 기술개발사업의 일환(CD20140007)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] Maruta K, Yoshida M, Guo H, Ju Y, Niioka T, "Extinction of low-stretched diffusion flame in microgravity", *Combust Flame*, Vol. 112, 1997, pp. 181-187.
- [8] F. C. Frate, H. Bedir, C. J. Sung, J. S. Tien, "On flammability limits of dry CO/O<sub>2</sub> opposed-jet diffusion flames", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, 2000, pp. 2047-2054.
- [9] Han B, Ibarreta AF, Sung CJ, Tien JS, "Experimental low-stretch gaseous diffusion flames in buoyancy-induced flowfields", *Proc. Combust. Inst.* Vol. 30, 2005, pp. 527-535.
- [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 flame instability in low-strain-rate counterflow diffusion flames", *Combust. Flame*, Vol. 146, 2006, p. 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] 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.
- [14] S. H. Chung, "Stabilization, propagation and instability of tribrachial triple flames", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, 2007, pp. 877-892.
- [15] G.R. Ruetsch, L. Vervisch, A., Liñán, "Effects of heat release on triple flames.", *Phys. Fluids.*, Vol. 7, 1995, pp. 1447-1454.
- [16] V.N. Kurdyumov, M. Matalon, "Stabilization and onset of oscillation of an edge-flame in the near-wake of a fuel injector", *Proc. Combust. Inst.*, Vol.

- 31, 2007, pp. 909-917.
- [17] C.B. Oh, C. Lee, J. Park, "Numerical investigation of extinction in a counterflow nonpremixed flame perturbed by a vortex", *Combust. Flame*, Vol. 138, 2004, pp. 225-241.
- [18] F.L. Dryer, I. Glassman, "High-temperature oxidation of CO and CH<sub>4</sub>", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 14, 1972, pp. 987-1003.
- [19] J.H. Yun, D.G. Park, S.I. Keel, J. Park, "Experimental Study on the Behavior of Low Strain Rate Flame Disks in Counterflow Diffusion Flame", *Int J Spray Combust Dynamics* Vol. 1(4), 2009, pp. 473-496.