

## 층류 동축류 제트화염에서의 화염진동에 관한 실험적 연구

윤성환\* · 박 정\*\*\* · 윤진한\* · 길상인\* · 권오봉\*\*

### A Study on Self-excitations in Laminar Coflow Jet Flames

Sung Hwan Yoon\*, Jeong Park\*\*\*, Jin Han Yun\*, San In Keel\*, Oh Boong Kwon\*\*

#### ABSTRACT

Experimental study in coflow jet flames has been conducted to investigate the effects of adding  $N_2$ ,  $CO_2$  and He to coflowing air-side in self-excitations. Differences in the behaviors between buoyancy-driven and diffusive-thermal self-excitations with similar frequency range are explored and discussed in laminar coflow jet flames.

**Key Words** : Buoyancy, Flame extinction, Flame oscillation, Lewis number, Soot radiation

확산화염에서 화염진동은 잘 알려진 부력에 의한 진동[1,2], 소화 근처에서의 물질-열 확산에 의한 진동 불안정성[3], 열손실에 의한 자기진동[4] 및 응축된 연료에서의 소화직전의 진동[5]이 그동안 광범위하게 연구되어 왔다. 특히, Katta et al.[6]는 화염 팁 부근의 부력에 의해 야기되는 매연(soot)의 점멸현상[7]을 복사 열손실에 의해 억제시킬 수 있음을 규명한 바 있다. 한편 Yoon et al.[7]은 이러한 매연에 의한 진동현상이 복사열손실에 의해 억제될 때, 화염 선단의 영향을 주며 이러한 영향은 매우 낮은 주파수 ( $O(1.0 Hz)$ ) 형태를 가지는 진동현상으로 야기될 수 있음을 보였다. 하지만 이러한 진동형태는 열손실에 의한 자기진동[4]과 매우 유사한 형태를 띠고 있어 명확히 구분될 필요성이 있으며 외부채널에서 다양한 대기조성에서 실험적 연구가 진행된 바 없어 논의가 필요한 상황이다.

한편, Won et al.[1]과 Furi et al.[3]는 동축류에서 화염진동 주파수가 유사함에도 불구하고 다른 결과를 도출하였다. 이후 Won et al.[2]이 미소중력환경에서 실험을 수행하여 이전 결과[1]와 동일한 부력에 의한 화염진동을 규명함으로써 이보다 이상 반론의 여지가 없어 보인다. 하지만 이런 사례는 루이스 수(Lewis number)에 의한 진동 불안정성에 대한 연구의 필요성을 시사하고

있다.

본 연구는 동축류 제트에서 부력에 의해 야기되는 매연 점멸현상이 외부채널에 다양한 희석제를 첨가 시 미치는 영향을 주파수 분석을 통해 분석하였으며, 이때에 화염선단에 나타나는 저주파수 형태의 진동과 축방향 전도열손실에 의해 나타나는 진동을 명확히 구분하고자 한다. 아울러 이전까지 수치해석을[9] 통해 연구되었던 제트 확산화염에서 루이스 수에 의한 진동을 실험적으로 보여, Won et al.[1]이 규명한 화염 선단면 내에 발생하는 부력에 의한 진동과 엄밀히 다름을 보이고, 루이스 수에 의한 진동이 부력에 의한 진동과 혼재되었을 때 화염 내 미치는 상관관계에 대해 실험적으로 규명하고자 한다.

실험에서 사용된 연료는 매연의 관찰에 용이한 프로판 60%, 질소 40%를 희석하여 사용하였으며, 복사 강도를 조절하기 위하여 동축류에 질소, 이산화탄소 및 헬륨을 공기에 희석하여 실험을 수행하였다. 연료 노즐은 외경 4.5 mm, 내경 0.95 mm의 스텐인리스 강관을 사용하였으며 동축 직경은 80 mm로 아크릴 소재의 관을 사용하였다. 또한 동축류 속도는 5 cm/s로 고정하였다. 또한 부력에 의한 진동현상과 루이스 수에 의한 진동을 구분하고자 노즐직경을 10배로 확대하여 추가실험을 수행하였다.

Fig. 1은 열손실에 의한 진동과 부력에 의해 야기되는 매연점멸현상이 복사열손실에 의해 억제될 때 발생하는 저주파수의 진동을 구분하고자 직경 0.95 mm,  $U_0 = 500 cm/s$ , 외부채널에 헬륨을 10%를 희석한 화염을 시간에 따른 매연의

\* 한국기계연구원 그린환경에너지기계본부

\*\* 부경대학교 기계공학과

† 연락처자, [jeongpark@pknu.ac.kr](mailto:jeongpark@pknu.ac.kr)

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

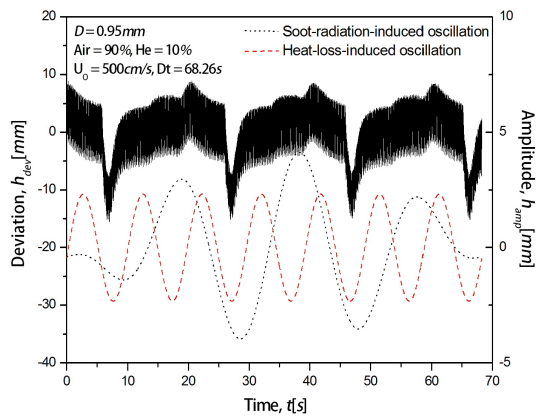


Fig. 1 Temporal lift-off height with the filtered signal in the soot-radiation-induced oscillation and heat-loss-induced oscillation.

끝 상단의 부상높이 변화를 편차로 나타내었다. 그림에서 보듯 매우 낮은 주파수 범위를 띄는 2개의 화염거동을 관찰할 수 있으며 이를 알아보기 위해 FFT 분석을 한 결과, 0.0494 Hz와 0.101 Hz가 도출되었고 이를 밴드패스 필터링하여 매연 끝 상단의 부상높이 편차와 비교하였을 때 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 여기서 0.0494 Hz에 해당하는 진동은 상대적으로 진폭과 파장이 크며, 부력에 의한 매연 점멸현상을 억제하는 것을 알 수 있다. 이에 반해, 0.101 Hz의 진동은 상대적으로 진폭과 파장이 작고 매연 점멸현상에 영향이 미치지 않는 것을 알 수 있다. 이는 이전 Katta et al.[6]의 연구에 따르면 복사열손실에 의해서 매연 점멸현상이 억제될 수 있음을 보인 바 있고, 이에 따라 매연 점멸현상을 억제하는 0.0494 Hz의 진동이 복사열손실에 의해 야기되는 진동이라 판단할 수 있다. 이러한 복사열손실에 의한 진동은 화염선단에도 동일한 주파수 형태로 영향을 미치는 것이 실험결과 확인되었다. 한편, Yoon et al.[4]에 따르면 에지화염에서 확산화염 가지로의 축방향 전도 열손실에 의해 화염 선단에 저주파수 형태의 진동을 규명한 바 있고 열손실 인자와 스트라홀 수로 특성화 작업을 수행한 바 있다. 이와 마찬가지로 현재의 0.101 Hz의 진동도 특성화 작업을 수행한 결과 Yoon이 제안한 결과와 일치하는 것으로 확인되었다.

Fig. 2는 직경 0.95 mm,  $U_0 = 380 \text{ cm/s}$ , 외부채널에 헬륨을 30%를 희석한 화염을 시간에 따른 화염 상단의 팁과 에지화염의 선단 및 화염너비를 나타내었다. 그림에서 보듯 화염이 비대칭적으로 신장과 수축을 반복하는 것을 알 수 있다. 이러한 진동원인을 확인하기 위하여 Fig. 3에 화염 팁과 에지화염 선단의 최저 높이와 최고 높

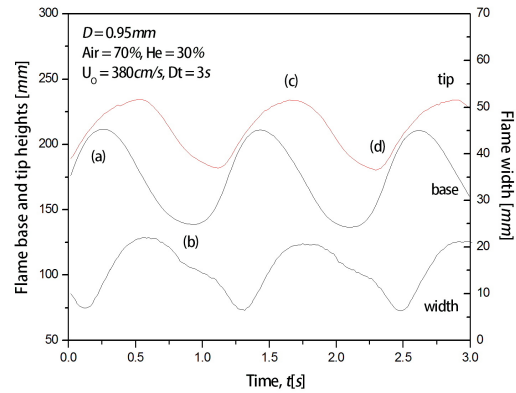


Fig. 2 Various flame dimensions of oscillating lifted flame for  $X_{O_2} = 0.7$  and  $U_0 = 380 \text{ cm/s}$  (a, b, c and d correspond to pictures in Fig. 3).

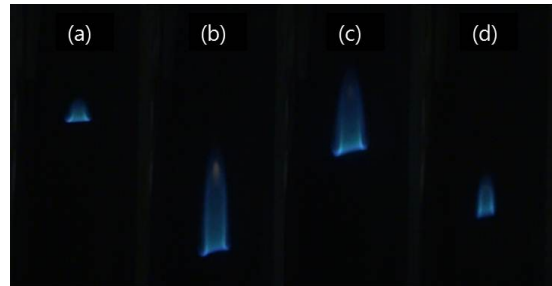


Fig. 3 Flame images of oscillating lifted flame for  $X_{O_2} = 0.7$  and  $U_0 = 380 \text{ cm/s}$  with time step of 2.05 s.

이에 해당하는 화염 이미지를 나타내었다. 그림에서 보듯 에지화염 선단의 높이가 가장 낮은 (b) 지점에서 꼬리 확산화염의 축 방향으로의 전도 열손실이 발생하게 된다. 특히 같은 속도 조건에서 헬륨을 25%를 희석한 조건에서 열손실로 인한 진동 주파수가 0.3 Hz로 나타났고 동일한 속도 조건에서 외부채널에 순수 공기일 때가 0.05 Hz인 점을 감안한다면 현재의 조건은 열손실이 상당하다고 판단된다. 이러한 조건에서 화염선단은 급격한 전도열손실로 인해 후류로 밀려나게 된다. 화염 팁의 높이가 가장 낮은 (d) 지점에서 화염이 밀려나게 되면 화염 팁 상단은 상대적으로 큰 곡률로 인해 에지화염 선단보다 후류로 덜 밀려나게 되고, 또한 현재의 연료조건이 루이스 수가 2.8 이상인 점을 감안한다면 화염 팁의 열확산 효과로 인해 미연 가스를 예열하게 된다. 이때 화염길이는 (a) 지점과 같이 신장하게 되고 에지화염 선단은 후류에 위치하게 되므로 스칼라소산을 감소와 더불어 에지화염 곡률의 증가로 인해 화염은 다시 상류로 복귀하게 된다.

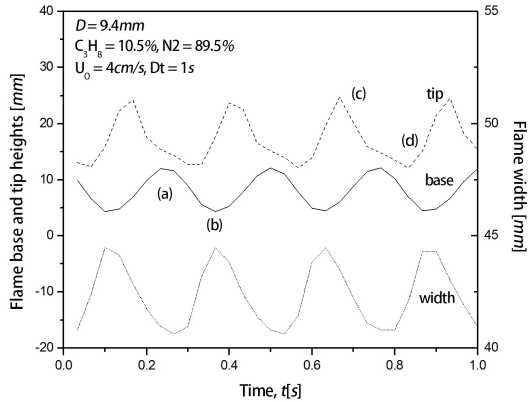


Fig. 4 Various flame dimensions of oscillating lifted flame for  $X_{F,o} = 0.105$  and  $U_o = 4 \text{ cm/s}$  (a and b correspond to pictures in Fig. 5).

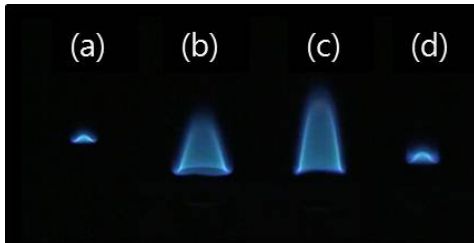


Fig. 5 Flame images of oscillating lifted flame for  $X_{F,o} = 0.105$  and  $U_o = 4 \text{ cm/s}$  with time step of  $0.33 \text{ s}$

하지만 화염의 팁은 여전히 큰 곡률을 이루고 있고 열확산 효과가 나타나기 때문에 후류로 화염은 신장하게 되고 (c) 지점과 같이 화염은 유동상, 하류 측으로 신장하게 된다. 이와 같은 현상이 루이스 수에 의한 진동 메커니즘으로 이해될 수 있다. 현재의 진동 주파수는 FFT 분석을 한 결과  $0.87 \text{ Hz}$ 로 도출되었다.

Fig. 4는 루이스 수에 의한 진동과 부력에 의한 진동을 구분하기 위해 Won et al.[1]이 실험한 조건과 유사한 직경  $9.4 \text{ mm}$ ,  $U_o = 4 \text{ cm/s}$ ,  $V_{CO} = 9.4 \text{ cm/s}$ , 연료는 질소를 89.5%을 희석한 프로판 부상화염을 시간에 따른 화염 상단의 팁과 에지화염의 선단 및 화염 너비를 나타내었다. 그림에서 보듯 루이스 수에 의한 진동과 달리 동일 위상에서 에지화염의 선단과 화염의 팁이 신장과 수축을 반복하는 것을 알 수 있다. 이는 명확히 진동이 다르며 보다 고찰하기 위해 Fig. 5에 에지화염 선단의 최저 높이와 최고 높이에 해당하는 화염 이미지를 나타내었다. 그림에서 보듯 화염이 일정한 유동높이에서 신장과 수축을 반복하는 것을 알 수 있다. 이러한 진동은 Won et al.[1]이 언급하였듯이 화염 선단 면에서의 열 축

적으로 인해 부력이 작용해 화염이 후류로 밀려나다 화염 곡률증가로 인한 화염전파속도의 증가로 말미암아 화염이 재차 상류로 복귀하는 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단 일반연구자지원사업에 의해 지원받았고 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] S. H. Won, S. H. Chung, M. S. Cha, B. J. Lee., "Lifted flames stabilization in developing and developed regions of coflow jets for highly diluted propane", Proc. Combust. Inst. vol. 28, 2000, pp2093 - 2099.
- [2] S. H. Won, J. Kim, M. K. Shin, S. H. Chung, O. Fujita, T. Mori, J. H. Choi, K. Ito., "Normal and microgravity experiment of oscillating lifted flames in coflow", Proc. Combust. Inst vol. 29, 2002, pp37-44.
- [3] M. Fűri, O. Papas, P. A. Monkewitz, "Non-premixed jet flame pulsations near extinction", Proc. Combust. Inst. vol. 28, 2000, pp831 - 838.
- [4] S. H. Yoon, J. K. Han, J. Park, J. H. Yun, S. I. Keel., "Self-excitation in laminar lifted flames diluted with nitrogen", Combust. Flame. In press.
- [5] W. Y. Chan, J. S. T'ien., "An Experiment on Spontaneous Flame Oscillation Prior to Extinction", Combust. Sci. vol. 18, 1978, pp139 - 143.
- [6] V. R. Katta, W. M. Roquemore, A. Menon, S. Y. Lee, R. J. Santora, T. A. Litzinger, "Impact of Soot on Flame Flicker," Proc. Combust. Inst. Vol. 32, 2009, pp. 1341-1350.
- [7] B. M. Cetegen, K. D. Kasper, "Experiments on the oscillatory behavior of buoyant plumes of helium and helium-air mixture," Phys. Fluids, Vol. 8, 1996, pp. 2974-2984.
- [8] S. H. Yoon, J. Park, O. B. Kwon, J. H. Yoon, S. I. Keel, J. S. Kim, D. S. Bae, "Experimental study on self-excitations in nitrogen-diluted laminar lifted butane flames" Fuel, vol. 91, 2012, pp. 51-60
- [9] Kurdyumov, V. and Matalon, M., "Stabilization and onset of oscillation of an edge-flame in the near-wake of a fuel injector", Combust. Ins t. vol 31, 2007, pp909-917.