

질소로 희석된 프로판 층류 동축류 제트화염에서의 화염진동에 관한 실험적 연구

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

A study on Self-excitation in Laminar Lifted Propane Coflow-Jet Flames Diluted with Nitrogen

Won June Lee*, Jeong Park**, Oh Boong Kwon*, Jin Han Yun**, Sang In Keel**
Tae Hyung Kim***, Young Ju Kim***

ABSTRACT

Experimental study in coflow jet flames has been conducted to investigate effects of adding Helium to coflowing air-side in self-excitation. The Differences between buoyancy-driven and diffusive-thermal self-excitations with the same order of $O(1.0 \text{ Hz})$ in self-excitation are explored and discussed in laminar coflow jet flames.

Key Words : Buoyancy, Burning rate, Flame length, Heat-loss, Lewis number

부상화염은 산업용 버너의 설계에 있어 중요한 인자이므로 그 특성을 파악하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 부상화염은 국부유동속도와 화염전파속도가 균형을 이루는 지점에서 존재하게 되고 이는 부상화염의 안정화 메커니즘이 되겠다.[1-3] 부상화염에서 나타나는 진동불안정성은 안정화 메커니즘에 근거하여 설명이 가능하여야 하며, 현재까지 알려진 바로 부력에 의한 자기진동[4,5], 소화 근처에서의 물질-열 확산에 의한 진동 불안정성[6] 및 열손실에 의한 자기진동이 있다.[7,8] 최근, Yoon et al.은 자유제트 부상화염에서 질소로 희석된 프로판을 사용하여 예혼합가지에서 꼬리확산화염으로의 전도 열손실로 인해 발생하는 열손실에 의한 자기진동을 규명하였다.[7]

한편, 동축류 제트 부상화염에서 $O(1\text{Hz})$ 범위에 해당하는 자기진동에 대하여 Won et al.[4]과 Furi et al[6]은 주파수가 유사함에도 불구하고 상이한 연구결과를 도출하였다. 이후 Won et al.은 미소중력환경에서 선행연구의 결과와 동일한 부력에 의한 화염진동을 규명함으로써 이는 더 이상 반론의 여지가 없어 보인다.[4,5] 한편, Kurdyumov et al[9-11]은 확산화염에서 과도한 체적 열손실과 낮은 당켈라 수를 동반하였을 때 화

염진동에 대해 많은 연구결과를 발표하였고 물질-열확산 모델을 도입하여 루이스 수에 의한 진동을 잘 묘사하였다. 하지만 수치해석적으로 접근하여 부력을 배제한 결과이기 때문에 루이스 수에 의한 진동을 규명하기에는 한계가 있다. 따라서 현재까지의 연구결과들을 고려해 볼 때 루이스 수에 의한 진동 불안정성에 대한 연구의 필요성과 또한 부력에 의한 화염진동과 루이스 수에 의한 진동을 실험적으로 구분해야 할 당위성을 시사하고 있다.

본 연구는 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 진동 불안정성의 대별성을 가지기 위해 루이스 수가 열손실에 의존적인 점을 고려하여 열손실을 제어할 수 있도록 동축류 제트의 외부채널에 열 확산율이 높은 헬륨을 희석시켜 두 개의 진동에 대해 명확히 구분하고자 한다. 아울러 루이스 수가 열손실에 의존적이라면 본 연구그룹의 선행연구 결과로 열손실에 의한 자기진동은 두 진동에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 실험적으로 규명하고자 한다.

실험에서 사용된 연료는 루이스 수에 의한 진동 불안정성의 관찰에 용이하게 상대적으로 루이스 수가 1보다 큰 프로판에 질소를 희석하여 사용하였으며, 화염내부에서 발생하는 전도 열손실을 제어하기 위해 외부채널에 헬륨을 희석하여 실험을 수행하였다. 연료노즐은 화염구조의 공간적 분해능력을 증가시키기 위해 내경 11mm 스테인리스 강관을 사용하였으며 동축 직경은 80mm로 아크릴 소재의 버너를 제작하였다. 동축속

* 부경대학교 기계공학과
** 한국기계연구원 그린환경에너지기계본부
*** 한국전력연구원 수화력발전팀
† 연락처, jeongpark@pknu.ac.kr
TEL : (051)629-7911 FAX : (051)-629-6126

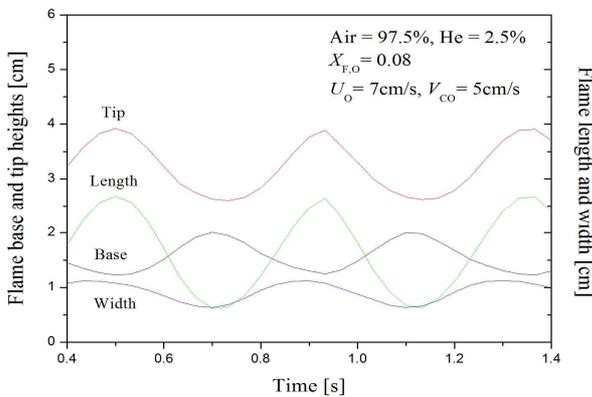


Fig. 1 Various flame dimensions of oscillating lifted flame for $U_o = 7 \text{ cm/s}$ and $V_{CO} = 5 \text{ cm/s}$.

도는 동축 직경과 공기유량을 고려하여 5cm/s로 고정하였다.

[1]부력에 의한 자기진동

동축류 제트 부상화염에서 부력에 의한 자기진동메커니즘은 다음과 같이 정의되어 왔다. 화염이 제트의 상류로 전파함에 따라 더 많은 연료 flux화염내부로 공급됨에 따라 화염의 강도 증가, 즉 반응률이 증가하게 된다. 이러한 반응률의 증가로 인해 화염의 크기가 증가하게 되고 화염에 의한 부력이 증가하게 되면, 화염면 상단의 국부 유동속도 증가를 유발한다. 이로 인해 화염전파속도보다 커지게 되고 화염은 재차 하류로 밀려나게 된다. 하류로 밀려난 화염은 다시 화염의 크기가 감소하여 부력의 효과가 감소하게 되므로 국부유동속도는 화염전파속도보다 낮아지게 되어 화염은 다시 상류로 전파하게 된다. 다음과 같은 부력에 의한 화염진동 메커니즘은 Won에 의해 언급되었다.

Fig. 1은 직경 11mm, $U_o=7\text{cm/s}$, 외부채널에 헬륨을 2.5%를 희석한 화염으로 부력에 의한 자기진동을 시간에 따른 부상높이, 팁, 길이, 폭을 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 화염이 신장과 수축을 반복하는 것을 알 수 있고 화염의 부상높이에 대해 길이, 폭은 180도 위상차를 나타내고 있다. 이는 부상높이가 낮아지게 되면 연료 flux 증가로 인해 반응률이 상승하고 화염의 길이와 폭이 증가하게 되어 부력의 효과가 커지게 된다. 반면에 후류로 밀려나게 되면 화염의 길이와 폭이 감소하게 되면서 부력의 효과가 작아지게 되는 것으로 Won의 결과와 동일한 것을 알 수 있다.

[2]루이스 수에 의한 자기진동

루이스 수에 의한 자기진동에 대해 현재까지

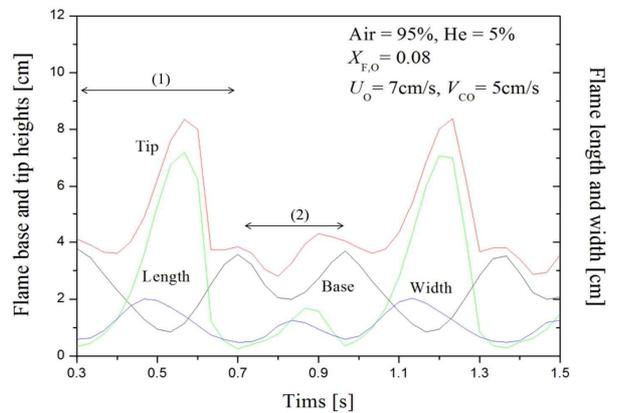


Fig. 2 Various flame dimensions of oscillating lifted flame for $U_o = 7 \text{ cm/s}$ and $V_{CO} = 5 \text{ cm/s}$.

보고 된 바가 없기 때문에 물리적으로 명확한 메커니즘이 제시 될 필요가 있다. Fig. 2는 루이스 수에 의한 자기진동을 시간에 따라 부상높이, 팁, 길이 폭을 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 루이스 수에 의한 자기진동은 독단적으로 발생되지 않고 혼재되어 나타난다. (1)는 부력에 의한 자기진동 구간이고 (2)는 루이스 수에 의한 자기진동 구간이다. 루이스 수에 의한 자기진동의 거동을 보게 되면 부력에 의한 자기진동에 비해 부상높이에 대해 팁, 폭의 위상차가 어긋나게 되는 것을 볼 수 있다. 이를 더 명확하게 구분하기 위해 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동의 한 주기 사진을 Fig. 3 (a), (b)에 도시하였다.

Fig. 3(a)는 직경 11mm, $U_o=7\text{cm/s}$, 외부채널에 헬륨을 2.5%를 희석한 화염의 사진을 나타내었다. 사진을 보게 되면 화염이 전파하고 후류로 밀려 날 때 같은 부상높이에서의 화염길이는 거의 동일한 것을 알 수 있다. 하지만 화염의 폭은 상류로 전파 할 때가 더 크게 되는데 이는 부력에 의한 효과가 증대되면서 부력에 의한 유동이 화염의 폭을 증가시키는 원인으로 판단된다. Fig. 3(b)는 동일한 노즐 직경과 노즐출구 속도에 외부채널의 헬륨의 희석량을 5%로 증가시켰다. 현재의 진동주파수는 FFT분석 결과 2.903Hz로 도출되었고 사진을 보게 되면 부력에 의한 자기진동과는 상이한 현상이 나타나는데 이는 화염길이와 폭은 부력에 의한 자기진동에 비해 작다는 것을 알 수 있다. 루이스 수에 의한 자기진동에서 특히 주목 할 점은 화염의 길이와, 폭이 후류로 밀려 날 때가 상류로 전파 할 때가 더 크다는 것이다.

두 진동간의 진동형태의 대별성을 명확하게 알아보기 위해 미세한 입자들의 Mie 산란을 He

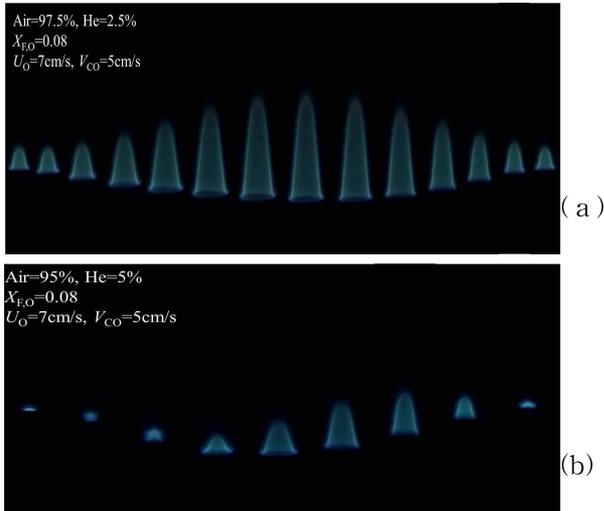


Fig. 3 Flame images of oscillation of one cycle lifted flame with time step of 0.033 s.

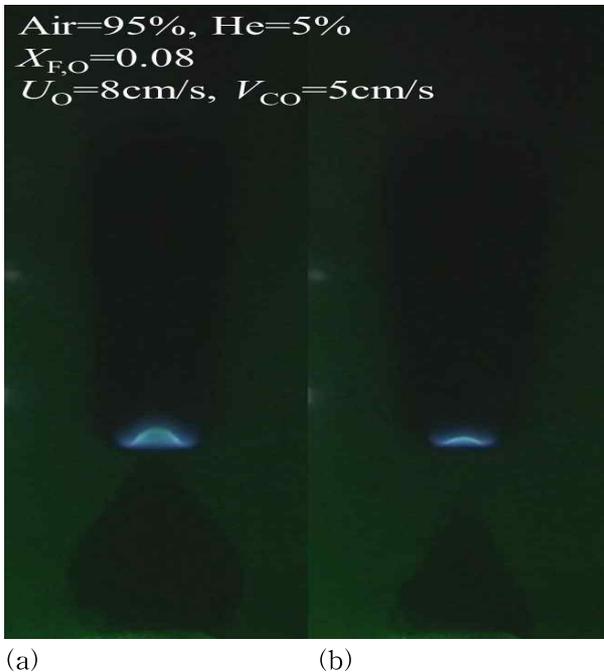


Fig. 4 Planar Mie scattering images for $X_{O,0}=0.05$, $U_0 = 8 \text{ cm/s}$: (a) maximum lift-off height of oscillation by buoyancy and (b) maximum lift-off height of oscillation by lewis number with lifted flame.

-Ne 레이저를 이용하여 Fig. 4에 나타내었다. 현재의 조건은 직경 11mm, $U_0=8\text{cm/s}$, 외부채널에 헬륨을 5%를 희석시킨 화염으로 화염이 진동할 때의 화염전단의 유동장에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다. Fig. 4 오른쪽 사진을 보게 되면 부력에 의한 자기진동의 최대부상높이 사진이고

왼쪽 사진은 루이스 수에 의한 자기진동의 최대부상높이 사진이다. 두 사진을 비교해보면 화염전단의 유동장이 다르다는 것을 알 수 있다. 오른쪽 사진을 보게 되면 화염전단의 유동장을 보게 되면 삼각형의 발달영역이 보이고 그 후에 완전 발달영역이 형성된다. 완전 발달된 영역에서는 연료와 산화제의 혼합분율 구배는 거의 없는 것으로 예혼합 상태에 이르게 되는 것으로 판단된다. 이때의 화염크기는 미소스케일이지만 에지화염의 루이스 수가 1.96인 점을 감안하면 미연가스 영역의 열확산 효과로 인해 화염은 급격하게 전파하게 된다. 에지화염이 발달영역 상단부까지 전파하게 되면 연료 flux의 증가로 삼중점을 투과하는 양이 증가되면서 확산화염이 신장하게 되고 아울러 화염의 폭도 증가하게 된다. 이때의 에지화염 반응률은 상당히 크기 때문에 화염의 길이가 신장하는데 제한적인 요소가 된다. 즉 화염의 길이가 짧게 되면 화염내부에서의 축방향 전도열손실이 증가되는 구조를 가지게 되는데 이때의 화염은 전도열손실 상대적으로 크기 때문에 열손실에 의한 자기진동을 동반하여 후류로 밀려나게 된다. Yoon et al.의 연구에 따르면 열손실에 의한 자기진동에서 큰 진폭을 가지나 에지화염의 변화는 거의 없다고 규명한 바 있다. 이를 고려 해볼 때 루이스 수에 의한 자기진동에서 후류로 밀려나게 될 때 열손실에 의한 자기진동이 상생하여 화염에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 일반연구자지원_기분유형1의 일환(CD20120842)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Chung, S. H. and Lee, B. J., "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combust. flame*, vol. 86 , 1991, pp. 62-72
- [2] Lee, B. J. and Chung, S. H., "Stabilization of Lifted Tribraichial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, vol. 109, 1997, pp. 163-182
- [3] Chen, Y. C. and Bilger, R. W., "Stabilization Mechanisms of Lifted Laminar Flames in Axisymmetric Jet Flows," *Combust. Flame*, Vol. 122, 2000, pp. 377-399.
- [4] Won, S. H., Chung, S. H., Cha, M. S. and Lee, B. J., "Lifted Flame Stabilization in Developing and Developed Regions of Coflow Jets for Highly Diluted Propane," *Proc.*

- Combust. Inst., Vol. 28, 2000, pp. 2093~2099.
- [5] Won, S. H., Kim, J., Shin, M. K., Chung, S. H., Fujita, O., Mori, T., Choi, J. H. and Ito, K., 2002, "Normal and Microgravity Experiment of Oscillating Lifted Flames on Coflow," Proc. Combust. Inst., Vol. 29, pp. 37-44.
- [6] M. Furi, O. Papas, P. A. Monkewitz, "Non-premixed jet flame pulsations near extinction", Proc. Combust. Inst. vol. 28, 2000, pp. 831-838
- [7] 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, vol. 158, 2011, pp. 1960-1969
- [8] S. H. Yoon, J. Park, O. B. Kwon, J. H. Yun, 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", *Proc. Comb. Inst.* 31:909-917(2007).
- [10] Kurdyumov, V. and Matalon, M., "Dynamics of an edge flame in a mixing layer", *Comb. Flame.* 139:329-339(2004).
- [11] Kurdyumov, V. and Matalon, M., "Radiation losses as a driving mechanism for flame oscillations", *Proc. Comb. Inst.* 29:45-52(2002).