

층류 동축류 제트 부상화염에서 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동 비교에 관한 실험적 연구

반규호* · 이원준* · 박 정† · 길상인** · 윤진한** · 임인권***

Experimental Study on Comparison of Buoyancy Driven and Lewis Number Induced Self-excitations in Laminar Lifted Coflow-jet Flames.

Gyu Ho Ban*, Won June Lee*, Jeong Park*,
Jin-Han Yun**, Sang-In Keel**, In Gwon Lim***

ABSTRACT

A study on laminar coflow jet flames diluted with helium and nitrogen has been conducted to investigate self-excitations. The stability map was provided with a function of nozzle exit velocity and fuel mole fractions of propane or methane. The results show that there exist three types of self-excitations; (1) buoyancy-driven self-excitation (BDSE), (2) Lewis number induced self-excitation coupled with buoyancy (LCB) and (3) Lewis number induced self-excitation (LISE).

Key Words : buoyancy driven self-excitation, Lewis number induced self-excitation, Damköhler number, Lewis number.

산업용 버너의 설계에 있어서 부상화염은 중요한 인자로서 그 특성 규명하기 위해 많은 연구가 진행중에 있다. 부상화염의 화염선단은 삼지화염의 구조로 희박, 과농, 예혼합화염과 확산화염이 공존하며, 예혼합 화염의 존재로 인해 화염은 전파한다. 부상화염은 삼중점에서 국부유동속도와 화염전파속도의 균형을 이루는 지점에서 화염은 위치하게되며 이 것이 부상화염의 메카니즘이다 [1-3]. 부상화염의 자기진동 역시 이러한 화염 안정화 메카니즘에 근거하여 설명이 가능 하여야 한다. 본 연구에서는 부력에 의한 자기진동[4,5]과 소화 근처에서의 물질-열 확산에 의한 진동 불안정성[6] 및 열손실에 의한 자기진동[7,8]을 실험적으로 규명하고, 또한, 선행연구 결과인 열손실에 의한 자기진동은 루이스 수에 의한 자기진동에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 실험적으로 규명하고자 한다.

Fig 1.은 직경 9.4mm, 프로판을 사용한 동축류

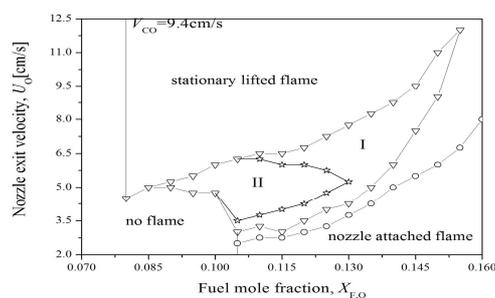


Figure 1. Flame stability maps as a function of nozzle exit velocity and fuel mole fraction for $D = 9.4\text{mm}$, $V_{co} = 9.4\text{ cm/s}$

제트화염에서의 화염 안정화선도이다.

I : 부력에 의한 자기진동 영역
II : I + 루이스 수에 의한 자기진동 영역

이는 Furi et al[6]의 연구결과에서 볼 수 있듯이 화염소화 근처에서 루이스 수에 의한 자기진동이 발생한다는 결과와 유사하다. 이를 보다 명확하게 하기 위해 Matalon[9] 연구그룹에서 제

* 부경대학교 기계공학과

** 한국기계연구원 환경 에너지 기계시스템

*** 명지대학교 기계공학과

† 연락처, jeongpark@pknu.ac.kr

TEL : (051)629-6140 : (051)629-6126

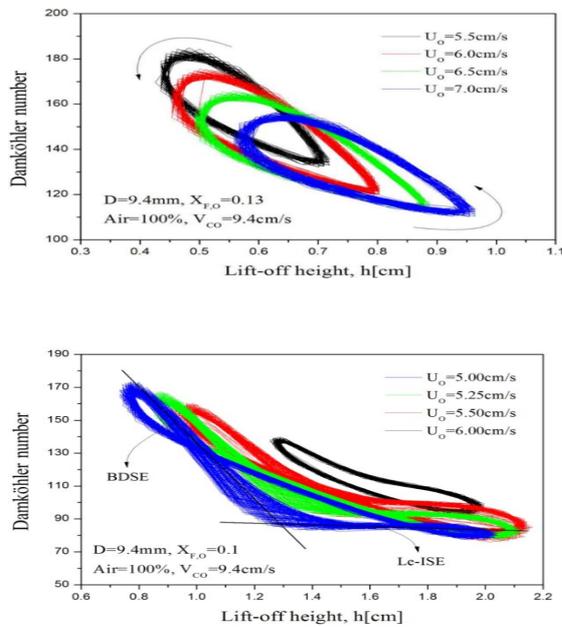


Figure 3. The functional dependency of Damkohler number on lift-off height for various nozzle exit velocities; (a) BDSE (b) LCB

안한 낮은 당켈라 수는 임계 루이스 수를 낮추게 하는 효과로 인해 루이스 수 1보다 작을 때에도 진동한다는 주장을 기반으로 부상높이에 따른 당켈라 수를 아래와 같이 정의 하였다.

$$Da = \frac{\tau_d}{\tau_c} = \frac{w/U^*}{\delta_{f,t}/S_{L,st}^0}$$

$\delta_{f,t}$ 는 화염의 두께, $S_{L,st}$ 는 층류 화염전파속도로 USC Mechanism Premix code를 사용하였다. w 는 화염의 폭, U^* 는 삼중점에서의 국부유동속도를 나타낸다.

Fig 8(a), (b)는 각 경우에 해당하는 부상높이에 따른 당켈라 수를 나타내었고, 부상높이에 따라 폐구간의 거동을 보이며 지속적인 비정상 상태를 따른다. (b) 는 두진동이 혼재되어 나타나는 경우로써 후류로 밀려날 때의 당켈라 수 보다 화염이 상류로 전파할 때의 당켈라 수가 작은 것을 볼 수 있다.

선행연구를 기반으로 작은 노즐 직경을 이용하여, 화염 체적 감소로 인한 열축적 감소 및 높은 출구 속도를 얻기 위해 0.95mm의 노즐직경을 이용하여 실험을 진행하였다. 또한 보다 높은 축방향의 열손실을 유발하기 위해 동축류에 헬륨을

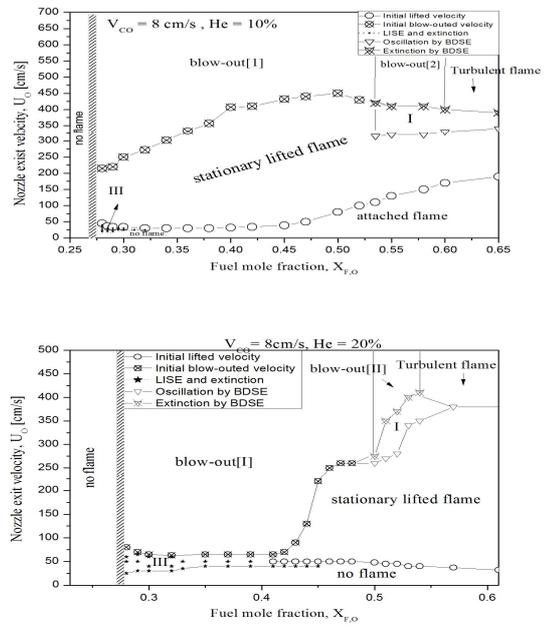


Figure 3. Stability map as a function of nozzle exit velocity and fuel mole fraction for propane, $D = 0.95$ mm, $V_{CO} = 8$ cm/s; (a) He = 10%, (b) He = 20%

희석하여 실험을 진행하였다.

Fig 3.은 노즐직경 0.95mm을 이용한 화염안정화 선도를 나타내었다.

I : 루이스 수에 의한 자기진동 영역

III : 루이스 수에 의한 자기진동 영역

40cm/s 이하의 노즐 출구속도와 $0.28 \leq X_{O,F} \leq 0.35$ 영역인 화염소화영역 근처에서 루이스 수에 의한 자기진동을 추측되는 진동이 발생함을 볼 수 있다. 이는 Furi et al[6]의 연구결과에서 볼 수 있었던 화염소화 근처에서 루이스 수에 의한 자기진동이 발생한다는 결과와 유사함을 알 수 있다. Regime III 영역의 진동은 선행 연구 결과에서 보였던 부력에 의한 자기진동이다. 화염이 제트의 상류로 전파함에 따라 더 많은 연료 flux가 내부로 공급되며 화염의 증가 및 반응률 증가를 유발한다. 따라서 화염의 크기는 증가하게 되며 보다 많은 부력의 영향을 받아 화염선도의 국부유동속도 증가를 유발한다. 후류로 밀려난 화염의 크기는 감소함과 동시에 부력의 효과가 감소하여 보다 낮은 국부유동속는 화염전파속도보다 낮아지며 다시 상류로 전파하게 된다[4, 5]. 하지만 선행 연구 결과에서 보였던, 루이스 수에 의한 진동과 부력에 의한 진동이 혼재되어

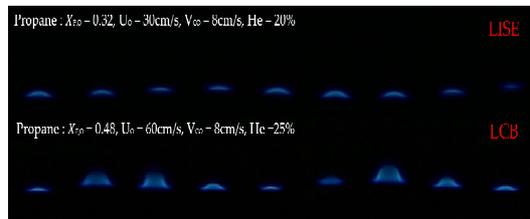


Figure 4. Comparison of LISE(a) and LCB(b) with the time step of 0.033s.

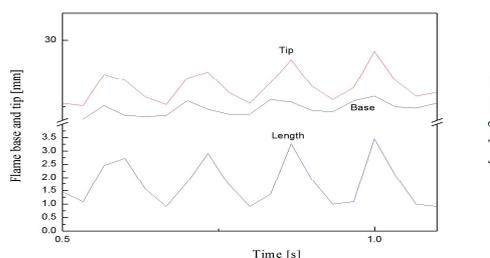


Figure 5. Various flame dimensions of LCB at $X = 0.48$, $U_0 = 60\text{cm/s}$ and $V_{co} = 8$

나타나는 자기진동은 나타나지 않았다.

동축류에 헬륨희석률을 증가시킬 경우 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동의 영역이 확대되는 연구결과를 기반으로 헬륨희석률을 25%로 증가시켜 실험을 진행하였다. 그 결과, 선행 연구 결과와 마찬가지로 진동과 부력에 의한 진동이 혼재된 자기진동이 나타남을 알 수 있었다. Fig 4.는 LISE : $X_{F,O}=0.32$, $U_0=30\text{cm/s}$, $V_{co}=8\text{cm/s}$, He=20%, LCB : $X_{F,O}=0.48$, $U_0=60\text{cm/s}$, $V_{co}=8\text{cm/s}$, He=25%에서 나타난 루이스 수에 의한 자기진동과 부력과 루이스 수에 의한 진동이 혼재된 자기진동을 시간에 따른 화염의 치로 나타내었다(a). 상류로의 전파 및 후류로 밀려날 경우, 같은 부상높이에서 화염길이는 동일한 것으로 보이는 반면 (b)는 화염높이에 따라 화염길이는 상당히 다른 것을 볼 수 있다. 또한 화염이 후류에 위치할 경우, 화염 크기가 더욱 증가함을 볼 수 있는데 이는 상류에서 보다 부력의 영향을 더욱 크게 받는 것을 알 수 있다.

Fig 5.는 루이스 수에 의한 자기진동과 부력에 의한 자기진동이 혼재된 진동을 시간에 따라 부상높이, 팁을 도시화한 것이다. 선행 연구 결과와 마찬가지로 부력에 의한 자기진동은 팁과 화염선단이 같은 위상을 가짐과 달리 루이스 수에 의한 자기진동은 팁과 화염선단의 위상차가 어긋나는 것을 볼 수 있다.

후 기

이 곳에 후기를 작성해 주시면 됩니다. 예) 본 연구는 지식경제부 에너지자원기술개발사업의 일환(20102030200051)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 Tribrachial 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., "Normal and Microgravity Experiment of Oscillating Lifted Flames on Coflow," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, 2002, 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 nearwake of a fuel injector", *Proc. Comb. Inst.*, Vol. 31, 2007, 909-917.
- [10] Kurdyumov, V. and Matalon, M., "Dynamics of an edge flame in a mixing layer", *Comb. Flame*, Vol. 139, 2004, pp. 329-339.
- [11] Kurdyumov, V. and Matalon, M., "Radiation losses as a driving mechanism for flame oscillations", *Proc. Comb. Inst.*, Vol. 29, 2002, pp. 45-52.