

## 층류 동축류 제트 부상화염에서의 자기진동에 관한 실험적 연구

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

### A study on 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.

난류강도가 크지않은 난류화염의 구조는 층류 소화염으로 연소하므로 층류소화염들의 앙상블로 구성되어 있다. 층류 부상화염은 난류화염을 파악하는 중요한 연소장으로 부상화염을 통한 많은 화염구조 연구가 진행 중에 있다. 층류 부상화염의 화염안정화 메카니즘은 화염전파속도와 국부 유동속도의 벡터 합으로 표현되며, 그 지점에서 이론당량비선을 따라 안정화된 부상화염이 존재한다. 화염선단은 회박, 과농 예혼합 및 확산화염이 동시에 존재하는 삼지화염(tribranchial flame)의 구조를 가지게 되며[1-3], 층류부상화염에서 나타나는 진동 불안정성은 앞선 안정화 메카니즘에 근거하여 설명이 가능하여야 한다. 예지 화염의 자기진동(self-excitation)은 부력에 의한 자기진동[4,5], 소화 근처에서의 물질-열 확산에 의한 자기진동[6], 열손실에 의한 자기진동[7,8]이 나타나는 것으로 알려져 있다.

동축류 제트 부상화염에서 Won et al.[4]와 Furi et al.[6]은 O(1 Hz) 진동에 대하여 상이한 연구결과를 도출하였다. Won et al.은 미소중력상태에서 O(1 Hz) 범위에 진동이 발생하지 않는 사실을 규명함으로써 현재까지 동축류 제트 부상화염에서 나타나는 자기진동은 부력에 의한 진동으로 인식되었다.[4,5].

Kudymov et al.[9-11]은 확산화염에서 과도한 체적 열손실과 낮은 당켈라 수를 가질 때, 화염 자기진동의 원인을 물질-열확산 모델을 제시하여 루이스 수에 의한 진동으로 묘사하였다. 하지만 이는 부력의 효과를 제거한 수치해석 결과이기 때문에 실험적으로 루이스 수에 의한 진동을 규명하기에는 한계가 있다. 물질 열확산에 의한 자기진동에 비해 부력에 의한 자기진동은 실험 결과를 바탕으로 명확히 구분하였다. 하지만 루이스 수에 의한 자기진동은 실험적으로 규명하지 못한 채 수치해석에 의존하고 있다.

본 연구 그룹에서는 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동을 구별하고 상호간의 영향에 대해 연구하였다. 또한 루이스 수가 열손실에 의존적이라면 선행연구 결과인 열손실에 의한 자기진동은 루이스 수에 의한 자기진동에 어떠한 영향을 미치는지 실험적으로 규명하고자 한다. 선행 연구결과인 지름 9.4mm 사용한 층류 동축류 제트화염에서 연료물분율에 따른 노즐출구속도로 화염 안정화 선도를 표현하였다. 실험 결과, 화염소화영역 근처에서 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동으로 추측되는 진동이 혼재되어 나타난 현상을 증명한 바 있다. 본 연구에서는 작은 노즐직경을 이용하여, 화염 체적 감소로 인한 열축적 감소 및 높은 노즐 출

\* 부경대학교 기계공학과

\*\* 한국기계연구원 환경 에너지 기계시스템

\*\*\* 명지대학교 기계공학과

† 연락저자, jeongpark@pknu.ac.kr

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

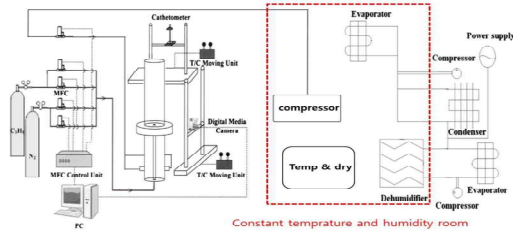


Figure 1. Schematic experimental setup and flow system about coflow-jet burner configuration.

구 속도를 얻기 위해 0.95mm의 노즐직경을 이용하여 실험을 진행하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장비 개략도이다. 실험장치는 유량 조절부, 노즐부, 측정부로 구성되어 있으며, 부력에 의한 자기진동, 루이스 수에 의한 자기진동을 구분하기 두 가지 조건인 프로판과 메탄, 동축류에 헬륨을 희석함에 따라 실험을 수행 하였다. 노즐 출구에서 완전 발달된 유동을 얻기 위해 레이놀즈 수( $Re_b$ )에 따른 충분한 노즐 길이를 설정 하였다. 연료는 99.999% 고순도 메탄과 프로판을 사용하였으며, 질소와 헬륨은 각각 99.999%와 99.9%의 고순도 희석제를 사용하였다. 급격한 열 손실을 방지하기 위해 목표 헬륨희석 몰 분율의 50% 주입 후 서서히 증가시켰다. 외부교란을 방지하기 위해 외부채널 직경 10cm, 높이 40cm 원형 아크릴 칸막이를 설치하였고, 동축류의 균일한 유동장을 얻기 위해 미세한 메쉬 스크린, 허니컴, 유리구슬을 설치하였다. 공기 압축기의 특성상 대기의 공기를 이용하게 되는 데, 대기의 공기상태가 일정하지 않기 때문에 항온항습실 내부에 공기 압축기를 설치하여 항온항습실 내부 온도 22~24도 습도 40~44%로 일정하게 유지되었다.

화염의 길이와 폭을 측정하기 위해, 카세토미터와 디지털 VCR 카메라(SONY,HDR-CX560)를 2차원 이송장치 상단에 부착하여 측정하였고, 화염의 선단과 노즐 끝단을 측정하였다. FFT(Fast Fourier Transfom)의 분석을 위해 주파수 분해능력을 고려한 충분한 샘플링 시간 및 주파수 범위를 확보하여 얻었고, 이를 Matlab기반의 프로그램으로 분석하였다.

Fig 2.는 직경 0.95mm, 프로판과 동축류에 10% 헬륨을 희석하여 나타낸 화염 안정화 선도이다.

- 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

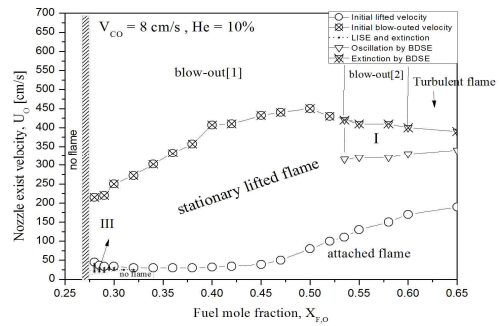


Figure 2. Stability map as a function of nozzle exit velocity and fuel mole fraction for propane,  $D = 0.95$  mm,  $V_{co} = 8$  cm/s

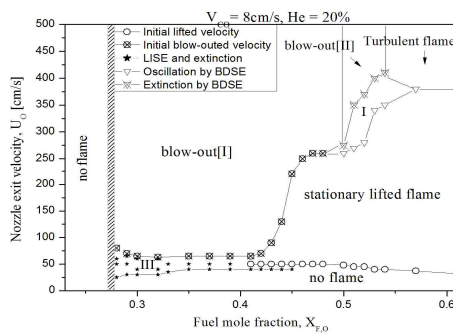


Figure 3. Stability map as a function of nozzle exit velocity and fuel mole fraction for propane,  $D = 0.95$  mm,  $V_{co} = 8$  cm/s

의한 자기진동을 추측되는 진동이 발생함을 볼 수 있다. 이는 Furi et al[6]의 연구결과에서 볼 수 있었듯이 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 반응물 증가를 유발한다. 따라서 화염의 크기는 증가하게 되며 보다 많은 부력의 영향을 받아 화염전도의 국부유동속도 증가를 유발한다. 후류로 밀려난 화염의 크기는 감소함과 동시에 부력의 효과가 감소하여 보다 낮은 국부유동속은 화염전파속도보다 낮아지며 다시 상류로 전파하게 된다[4, 5]. 하지만 선행 연구 결과에서 보였던, 루이스 수에 의한 진동과 부력에 의한 진동이 혼재되어 나타나는 자기진동은 나타나지 않았다.

열손실은 루이스 수에 의한 자기진동에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해, 헬륨 희석률을

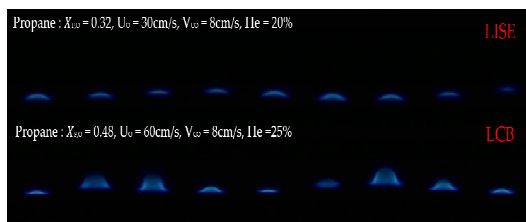


Figure 4. Comparison of LISE(a) and LCB(b) with the time step of 0.033s.

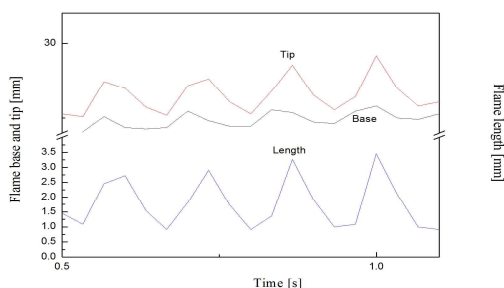


Figure 5. Various flame dimensions of LCB at  $X_{F,O} = 0.48$ ,  $U_0 = 60\text{cm/s}$  and  $V_{CO} = 8$

증가시킨 상태에서 실험을 진행하였다. Fig 3.은 직경 0.95mm, 프로판과 동축류에 20%헬륨을 희석하여 나타낸 화염 안정화 선도이다. 그림에서 알 수 있듯이, 헬륨희석율을 증가시켰을 경우  $0.28 \leq X_{O,F} \leq 0.45$ 에 해당하는 루이스 수에 의한 진동으로 추측되는 자기진동의 영역인 Regime I 이 헬륨희석률 10% 보다 높은 연료물분율로 확대되었음을 볼 수 있다. 마찬가지로,  $0.55 \leq X_{O,F}$ 에서 나타나는 부력에 의한 자기 진동이 보다 낮은 연료물분율인  $0.50 \leq X_{O,F}$ 으로 확대되었음을 볼 수 있다. 하지만 동축류에 10% 헬륨을 희석한 실험결과와 마찬가지로 진동과 부력에 의한 진동이 혼재된 자기진동 영역이 나타나지 않음을 알 수 있었다.

동축류에 헬륨희석율을 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 루이 수에 의한 진동이 혼재된 자기진동을 시간에 따른 화염의

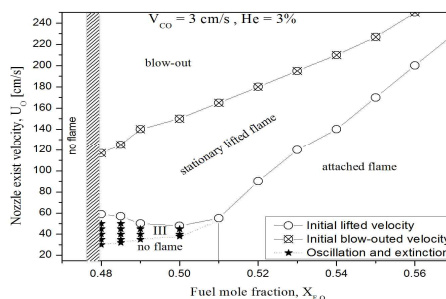


Figure 6. Stability map as a function of nozzle exit velocity and fuel mole fraction for Methane,  $D = 0.95\text{mm}$ ,  $V_{CO} = 3\text{cm/s}$

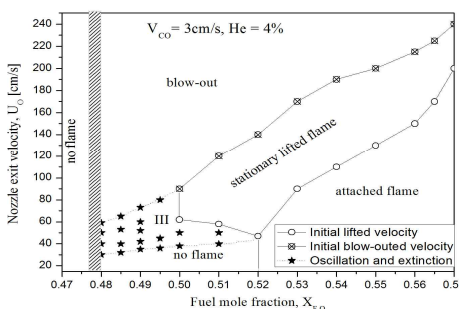
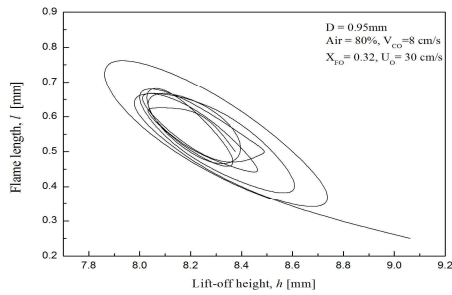


Figure 7. Stability map as a function of nozzle exit velocity and fuel mole fraction for Methane,  $D = 0.95\text{mm}$ ,  $V_{CO} = 3\text{cm/s}$

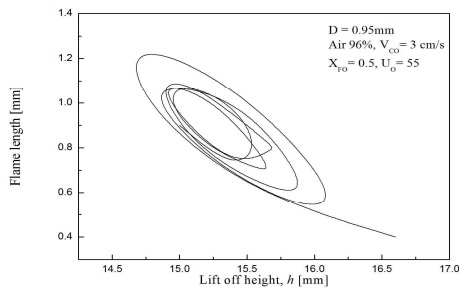
위치로 나타내었다(a). 상류로의 전파 및 후류로 밀려 날 경우, 같은 부상높이에서 화염길이는 동일한 것으로 보이는 반면 (b)는 화염높이에 따라 화염길이는 상당히 다른 것을 볼 수 있다. 또한 화염이 후류에 위치할 경우, 화염 크기가 더욱 증가함을 볼 수 있는데 이는 상류에서 보다 부력의 영향을 더욱 크게 받는 것을 알 수 있다. Fig 5.는 루이스 수에 의한 자기진동과 부력에 의한 자기진동이 혼재된 진동을 시간에 따라 부상높이, 팁을 도시화한 것이다. 선행 연구 결과와 마찬가지로 부력에 의한 자기진동은 팁과 화염선단이 같은 위상을 가짐과 달리 루이스 수에 의한 자기진동은 팁과 화염선단의 위상차가 어긋나는 것을 볼 수 있다.

열손실이 과도하게 작용하였을 경우, 루이스 수가 1보다 작더라도 루이스 수에 의한 진동이 발생한다는 사실을 바탕으로, 연료 메탄을 이용하여 실험을 진행하였다.

Fig 6.과 Fig 7.은 직경 0.95mm, 메탄과 동축류에 각각 3%,4%를 희석하여 나타낸 화염 안정화



**Figure 8.** Phase diagram of lift-off height versus flame length for propane at  $X_{F,0}=0.32$ ,  $U_0=30\text{cm/s}$  and  $V_{co}=8\text{cm/s}$ ,  $He = 20\%$



**Figure 9.** Phase diagram of lift-off height versus flame length for propane at  $X_{F,0}=0.50$ ,  $U_0=55\text{cm/s}$  and  $V_{co}=3\text{cm/s}$ ,  $He = 4\%$

선도이다. 프로판을 사용한 연구 결과와 마찬가지로 열손실을 증가시킬수록  $0.28 \leq X_{O,F} \leq 0.32$  영역이  $0.28 \leq X_{O,F} \leq 0.45$  로 regime 영역이 확대됨을 볼 수 있다. 이는 외부 채널의 헬륨으로 인해 전도 열손실이 커지게 되고 이로 인해 임계 루이스 수를 낮추게 되는 효과로 인해 루이스 수가 1보다 작은 메탄에서도 루이스 수에 의한 진동이 발생되는 것을 볼 수 있다. 이는 Matalon [9]의 수치해석 결과와 마찬가지로 과도한 열손실을 가했을 경우 1보다 작은 루이스 수를 가진 화염도 역시 루이스 수에 의한 자기진동을 가짐을 보였다.

메탄과 프로판을 이용한 층류 동축류 제트화염에서 루이스 수에 의한 자기진동을 비교하기 위해 시간에 따른 화염의 길이를 그래프로 나타내었다. Fig 8.과 Fig 9.는 화염 소화 직전의 프로판과 메탄을 사용한 부상높이에 따른 화염길이를 도시화한 그래프이다. 메탄의 경우는 부상이 일어나지 않음으로 부상높이에 따른 화염길이의 변화는 프로판에 비해 상당히 작을지라도 비교적 같은 진동의 형태를 보임으로, 메탄을 사용한

자기진동 역시 루이스 수에 의한 자기진동으로 판단된다.

## 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.