

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

이원준\* · 박정\*\*\* · 권오봉\*\* · 윤진한\*\*\* · 길상인\*\*\*

\*부경대학교 의생명융합공학협동과정 · \*\*부경대학교 기계공학과

\*\*\*한국기계연구원 그린환경에너지기계본부

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

Won June Lee\*, Jeong Park\*\*\*, Oh Boong Kwon\*\*, Jin Han Yun\*\*\* and Sang In Keel\*\*\*

\*Department of Interdisciplinary Program of Marine-Bio, Electrical & Mechanical Engineering, Pukyong National University

\*\*Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

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

(Received 24 February 2014, Received in revised form 17 June 2014, Accepted 19 June 2014)

### ABSTRACT

Experimental study in laminar propane coflow jet flames has been conducted to investigate self-excitations. For various propane mole fractions and jet velocities, two types of self-excitation were observed: (1) buoyancy-driven self-excitation (hereafter called BDSE) and (2) Lewis-number-induced self-excitation coupled with (1) (hereafter called LCB). The mechanism of Lewis-number-induced self-excitation (hereafter called LISE) is proposed. When the system Damköhler number was lowered, LISE was shown to be launched. The LISE is closely related to heat loss, such that it can be launched in even helium-diluted methane coflow-jet flame (Lewis number less than unity). Particularly, The LISE becomes significant as the Damköhler number decreases and heat-loss is excessively large.

**Key Words** : Buoyancy driven self-excitation, Damköhler number, Heat loss induced self-excitation, Lewis number, Lewis number induced self-excitation

### 1. 서론

산업용 버너의 설계에 있어서 부상화염은 중요한 인자이고 그 특성 규명하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 부상화염의 화염선단은 삼지화염의 구조로 희박, 과농, 예혼합화염과 확산화염이 공존하며, 예혼합화염의 존재로 인해 화염은 전파하는 특성을 가진다. 따라서 부상화염은 삼중점에서 국부유동속도와 화염전파속도가 균형을 이루는 지점에서 화염은 위치하게 되며 이것이 부상화염의 안정화 메

커니즘이 되겠다[1-3]. 부상화염에서 나타나는 진동 불안정성은 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 질소로 희석된 프로판 자유제트 부상화염에서 예혼합가지에서 꼬리확산화염으로의 전도 열손실로 인해 발생하는 열손실에 의한 자기진동을 규명하였다[7].

한편, 동축류 제트 부상화염에서  $O(1 \text{ Hz})$  범위에 해당하는 진동에 대하여 Won et al.[4]과 Füre et al.[6]은 주파수가 유사함에도 불구하고 상이한 연구결과를 도출하였다. 이후 Won et al.은 미소중력장에서  $O(1\text{Hz})$

† Corresponding Author, jeongpark@pknu.ac.kr

범위에 해당하는 진동이 발생하지 않는 것을 규명함으로써 이는 현재까지 부력에 의한 진동으로 인식되어지고 있다[4,5]. 한편, Kurdyumov et al[9-11]은 확산화염에서 과도한 체적 열손실과 낮은 당켈라 수를 동반하였을 때 화염진동에 대해 많은 연구 결과를 발표하였고 물질-열확산 모델을 도입하여 루이스 수에 의한 진동을 잘 묘사하였다. 하지만 이는 부력의 효과를 제거한 수치해석 결과이기 때문에 루이스 수에 의한 진동을 규명하기에는 한계가 있다.

부력에 의한 자기진동은 결과를 바탕으로 특성화 작업을 수행하여 완벽히 구분했다. 하지만 루이스 수에 의한 자기진동의 경우 실험적으로 규명하지 못한 채 수치해석에 의존하여 규명되고 있는 상태이다. 과연 실험적으로 구분 할 수 없는 것인지 혹은 루이스 수에 의한 자기진동을 관찰하고도 부력에 의한 진동과 주파수, 화염거동이 유사함으로 인해 부력에 의한 자기진동으로 규명하는 오류를 범하고 있는지에 대해 명확한 가이드라인(Guideline)이 필요한 시점이다. 또한 부력에 의한 진동과 루이스 수에 의한 자기진동이 상호간의 어떠한 영향을 미치는지 대한 연구도 필요하다. 따라서 본 연구는 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동을 구별하고 둘의 상호작용에 대해 규명하고자 한다. 아울러 루이스 수가 열손실에 의존적이라면 본 연구그룹의 선행연구 결과인 열손실에 의한 자기진동은 루이스 수에 의한 자기진동에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 실험적으로 규명하고자 한다.

## 2. 실험방법

실험 장치는 유량 조절부, 노즐부, 측정부로 구성되어 있으며 그 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동을 구분하기 위해 두 개의 조건을 조성하여 실험을 수행하였다.

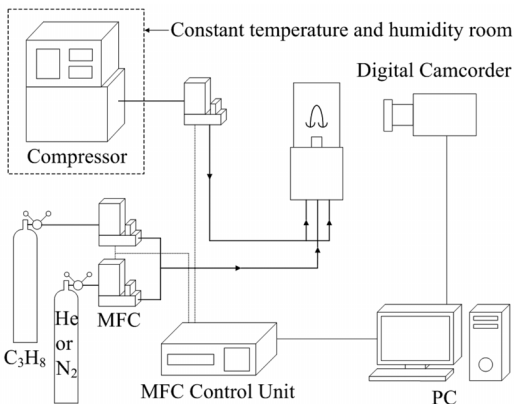


Fig. 1. Schematic experimental setup.

(1) 부력에 의한 진동을 유도하기 위해 연료 측 노즐은 직경 9.4 mm의 스테인리스 강관을 사용하여 상대적으로 낮은 노즐출구속도를 확보하였다. 노즐 출구에서 완전 발달된 유동장을 얻기 위하여 노즐 길이를 경기준 레이놀즈수( $Re_D$ )에 의존한 층류 입구길이보다 충분히 긴 1.1 m로 하였다. 연료는 순도 99.99% 프로판과 99.95%의 질소는 압력 조절기로 조절되고 유량 조절은 버블미터로 검증된 규격 100 ml/min 프로판과 질소 MFC를 통해 연료노즐로 분사된다. 외부채널의 경우 직경 10 cm, 높이 40cm 원형 아크릴 칸막이를 설치하여 외부교란을 억제하고 동축류의 균일한 유동장을 확보하기 위하여 메쉬, 허니컴 그리고 유리구슬을 설치하였다. 외부채널의 속도를 9.4 cm/s로 고정하였고 공기 압축기를 이용하여 순수한 공기를 분사시켰다. 공기 압축기의 특성상 대기의 공기를 이용하게 되는데 대기의 공기상태가 일정하지 않기 때문에 항온항습실 내부에 공기 압축기를 설치하여 항온항습실 내부 온도 22~24℃ 습도 40%~44%로 일정하게 유지하였다. 항온항습실 외부온도는 항온항습실 내부와 동일하게 설정하였는데 이는 동축류 공기가 공급되면서 주위로의 열전달을 막기 위하여 동일하게 설정하였으며 건구 온도계를 이용해 항온항습실 내부, 외부 온도와 습도 측정을 5분 간격으로 확인하였다. 공기 압축기의 압축공기로 인하여 공기의 습도가 생기게 되므로 수분제거제를 거쳐 버블미터로 검증된 200 l/min 규격의 공기 MFC를 통해 외부 노즐로 분사된다.

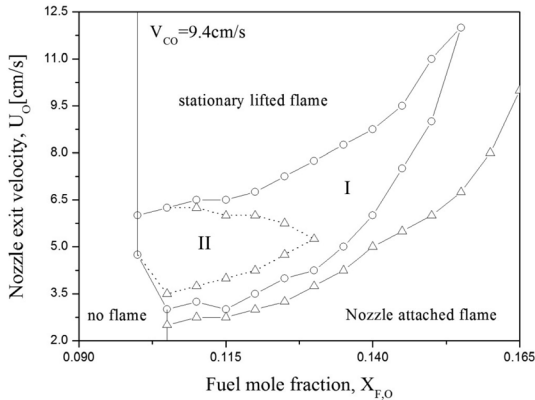
(2) 루이스 수에 의한 자기진동을 유도하기 위해 노즐 직경을 0.95 mm로 축소시켜 상대적으로 높은 노즐출구속도를 확보하였고 연료는 루이스 수가 1 근처인 메탄을 사용하였다. 루이스 수에 의한 자기진동이 열손실에 의존적이라는 점을 감안하여 외부채널에는 공기에 헬륨을 20% 희석시켜 화염내부의 열손실을 증가시키고 동축류 속도 5 cm/s로 고정하여 분사시켰다.

화염의 부상높이는 카세트미터와 디지털 VCR 카메라(SONY, HDR-CX560)를 2차원 이송장치 위에 부착하여 이송시키며 측정하였고 화염의 선단과 노즐의 끝단을 측정하였다. FFT(Fast Fourier Transform)의 분석을 위해 주파수 분해능력을 고려한 충분한 샘플링 시간(약 80 sec) 및 샘플주파수 범위를 0.00183~15 Hz를 확보하여 얻어진 이미지들로부터 Matlab 기반의 프로그램을 이용하여 부상높이에 대한 정보를 획득하게 된다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1. 화염안정화선도

화염의 거시적인 특성을 파악하기 위해 연료 물분



**Fig. 2.** Flame stability maps as a function of nozzle exit velocity and fuel mole fraction for  $D = 9.4 \text{ mm}$ ,  $V_{CO} = 9.4 \text{ cm/s}$ .

울에 따른 노즐 출구속도를 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 본 연구의 결과를 토대로 Fig. 2에 화염안정 선도를 제시하였고 아래와 같이 영역을 구분하였다.

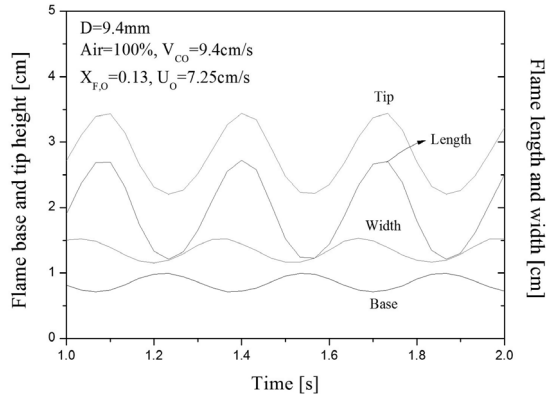
- I : 부력에 의한 자기진동 영역
- II : I + 루이스 수에 의한 자기진동 영역

그림에서 알 수 있듯이 부착화염, 진동화염, 안정된 부상화염이 존재한다.  $X_{F,O} > 0.095$ 일 경우 과도한 질소 희석으로 인해 화염이 존재하지 않고  $X_{F,O} < 0.160$ 에서는 낮은 출구속도에서 부착된 화염이 발생하였다가 이후 안정된 부상화염만 나타났다. 2~4 Hz를 가지는 화염은 두 개의 영역으로 구분할 수 있었다. 영역 I은 부력에 의한 자기진동만 나타나는 영역으로 연료 몰분율  $0.095 \leq X_{F,O} < 0.16$ 에 해당한다. 영역 II는 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동이 혼재되어 발생하는 영역으로 연료 몰분율  $0.095 \leq X_{F,O} < 0.135$ 에 해당한다. 주목할 점은 루이스 수에 의한 자기진동만 관찰되지 않는 점이다. 특히 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동이 혼재되어 나타나는 영역 II는 영역 I에 비해 더 낮은 몰분율에서 나타난다. 이는 Furi et al[6]의 연구결과에서 볼 수 있듯이 화염소화 근처에서 루이스 수에 의한 자기진동이 발생한다는 결과와 유사함을 유추할 수 있다.

**3.2. 진동하는 화염의 특성**

**3.2.1. 부력에 의한 자기진동**

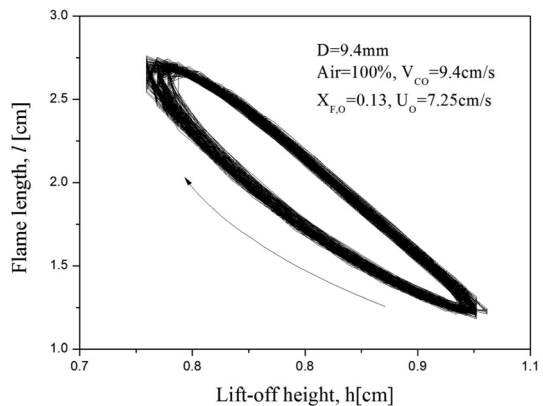
동축류 제트 부상화염에서 부력에 의한 자기진동 메커니즘은 현재까지 다음과 같이 정의되어 왔다. 화염이 제트의 상류로 전파함에 따라 더 많은 연료 flux가 화염내부로 공급되면서 화염의 강도 증가, 즉 반응율이 증가하게 된다. 따라서 화염의 크기가 증



**Fig. 3.** Various flame dimensions of BDSE at  $X_{F,O} = 0.13$ ,  $U_0 = 7.25 \text{ cm/s}$ , and  $V_{CO} = 9.4 \text{ cm/s}$ .

가하게 되고 화염에 의한 부력이 증가는 화염선단의 국부유동속도 증가를 유발한다. 이로 인해 화염 전파속도보다 커지게 되고 화염은 재차 후류로 밀려나게 된다. 이후 화염은 다시 화염의 크기가 감소하여 부력의 효과가 감소하게 되므로 국부유동속도는 화염전파속도보다 상대적으로 낮아지게 된다. 이로 인해 화염은 다시 상류로 전파하게 된다. 다음과 같은 부력에 의한 화염진동 메커니즘은 Won[4,5]에 의해 언급되었다.

Fig. 3은  $D = 9.4 \text{ mm}$ ,  $X_{F,O} = 0.13$ ,  $U_0 = 7.25 \text{ cm/s}$ ,  $V_{CO} = 9.4 \text{ cm/s}$ 에서의 영역 I에 해당하는 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. Fig. 4는 부상높이에 따른 화염길이를 도시한 것으로 그림에서 보면 알 수 있듯이 화염이 상류로 전파할 때의 화염길이와 후류로 밀려날 때의 화염길이 차이가 거의 없다는 것을 볼 수 있다. 폐곡선의

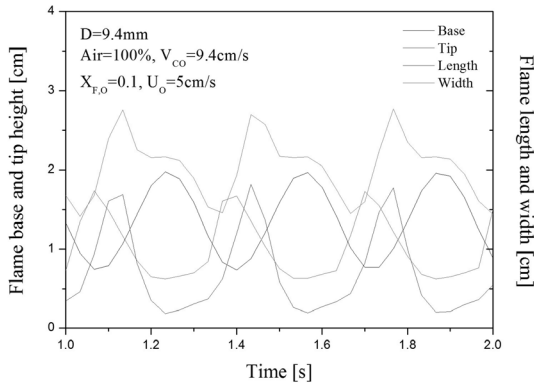


**Fig. 4.** Phase diagram of lift-off height versus flame length at  $X_{F,O} = 0.13$ ,  $U_0 = 7.25 \text{ cm/s}$ , and  $V_{CO} = 9.4 \text{ cm/s}$ .

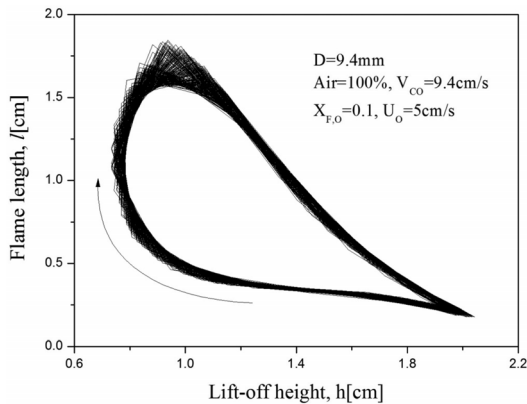
회전방향은 시계방향으로 나타났다. 부상높이가 낮아지게 되면 연료 flux 증가로 인해 반응물이 상승하고 화염의 길이와 폭이 증가하게 되어 부력의 효과가 커지게 된다. 반면에 후류로 밀려나게 되면 화염의 길이와 폭이 감소하게 되면서 부력의 효과가 작아지게 되는 것으로 Won[4,5]의 결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

**3.2.2. 부력에 의한 자기진동과 혼재되어 발생하는 루이스 수에 의한 자기진동**

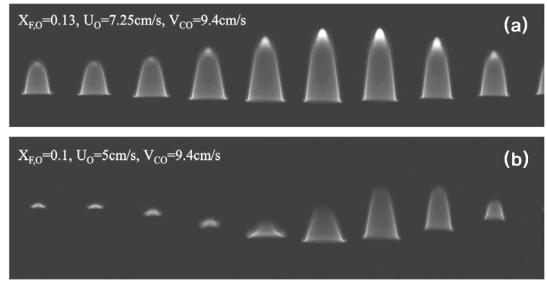
루이스 수에 의한 자기진동에 대해 현재까지 보고된 바가 없기 때문에 물리적으로 명확한 메커니즘이 제시될 필요가 있다. Fig. 5는 영역 II에 해당하는 화염으로 루이스 수에 의한 자기진동이 부력에 의한 진동과 혼재된 진동을 시간에 따라 부상높이, 팁, 길이, 폭을 도시한 것이다. 루이스 수에 의한 자기진동은 단독으로 발생되지 않고 혼재되어 발생되기 때문에 시간에 따른 부상높이에 대해 팁, 폭의 위상차가 어긋나게 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 3과 비교해보면



**Fig. 5.** Various flame dimensions of LCB at  $X_{F,O} = 0.1$ ,  $U_0 = 5 \text{ cm/s}$ , and  $V_{CO} = 9.4 \text{ cm/s}$ .



**Fig. 6.** Phase diagram of lift-off height versus flame length at  $X_{F,O} = 0.1$ ,  $U_0 = 5 \text{ cm/s}$ , and  $V_{CO} = 9.4 \text{ cm/s}$ .



**Fig. 7.** Comparison of BDSE (a) with LCB (b). They were displayed with time step of 0.033 s in a one cycle.

화염거동이 상이한 것을 알 수 있다. 부상높이에 따른 화염길이를 Fig. 6에 도시하였다.

주목할 점은 같은 부상높이에서 화염이 상류로 전파할 때와 후류로 밀려 날 때의 화염길이가 극단적으로 다른 두 개의 해를 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 부력에 의한 자기진동이 발생하면서 루이스 수에 의한 자기진동이 혼재되어 발생하기 때문이다. 이를 더 명확하게 구분하기 두 진동의 한 주기 사진을 Fig. 7 (a), (b)에 도시하였다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 두개의 진동이 확실히 다르다는 것을 육안으로 확인할 수 있다.

Fig. 7(a)는  $D=9.4 \text{ mm}$ ,  $X_{F,O}=0.13$ ,  $U_0=7.25 \text{ cm/s}$ ,  $V_{CO}=9.4 \text{ cm/s}$ 에서 진동 한 주기 사진을 나타내었다. 화염이 전파하고 후류로 밀려 날 때 같은 부상높이에서의 화염길이는 거의 동일한 것을 알 수 있다. 통상적으로 화염의 폭은 상류에서 작지만 현재의 경우 화염의 폭은 상류로 전파할 때가 더 크게 되는데 이는 화염 곡률이 증가되면서 혼합층 두께의 증가를 유발하게 되어 부력의 효과를 증가시키기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 7(b)는  $D=9.4 \text{ mm}$ ,  $X_{F,O}=0.1$ ,  $U_0=5 \text{ cm/s}$ ,  $V_{CO}=9.4 \text{ cm/s}$ 에서의 화염사진으로 신장하고 수축할 때의 화염 길이와 폭은 상당히 차이를 알 수 있고 본 연구그룹은 화염이 전파할 때의 화염 길이에 주목하였다. 이때의 화염 체적이 상당히 작기 때문에 부력의 효과는 상대적으로 작고 루이스 수가 1보다 큰 조건이다. 또한 화염은 거의 예혼합화염의 구조를 가지고 있어 축방향으로의 전도열손실이 심각하게 발생하게 된다. 게다가 화염전단에서의 연료 농도구배가 거의 없기 때문에 화염전파속도의 증가로 화염의 체적은 일정하게 유지되면서 상류로 전파하게 된다. 화염이 최소부상높이까지 전파하게 되면 연료 flux의 증가로 삼중점을 투과하는 양이 증가되면서 확산화염이 신장하게 되고 아울러 화염의 폭도 증가하게 된다. 이때의 예지화염 반응물은 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. 따라서 루이스 수에 의한 자기진동에서 후류로 밀려나게 될 때 열손실에 의한 자기진동이 혼재되어 발생하게 되면서 화염에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

이를 보다 명확하게 하기 위해 Matalon[9] 연구그룹에서 제안한 낮은 당켈라 수는 임계 루이스 수를 낮추게 하는 효과로 인해 루이스 수 1보다 작을 때에도 진동한다는 주장에 착안하여 본 연구의 결과에서도 이와 동일한 현상이 도출되는지 확인하기 위해 부상높이에 따른 당켈라 수를 나타내었고 당켈라 수는 아래와 같이 정의된다.

$$Da = \frac{\tau_d}{\tau_c} = \frac{w/U^*}{\delta_{f,t}^+ / S_L^+ |_{st}}$$

당켈라 수는 물질확산시간과 화학반응시간의비로써 화염강도를 나타내는 척도이다.  $\delta_{f,t}^+$ 는 화염의 두께 [12],  $S_L^+ |_{st}$ 는 충류 화염전파속도로 USC Mechanism Premix code를 사용하였다.  $w$ 는 화염의 폭,  $U^*$ 는 삼중점에서의 국부유동속도를 나타낸다. Lee[1,2]는 냉각제트유동에 의거하여 삼지화염의 삼중점(tribranchial point)이 이론 당량비선을 따라 화염이 전파한다는 가정 하에 비반응 제트 상사이론을 제안하였다. Chung의 연구그룹을 포함한 대부분의 연구들이 충류 부상화염의 안정화 메커니즘을 근간으로 잘 설명해왔다[1,2]. 또한 동축류 제트에서도 동축류 속도와 제트의 출구 속도차로 정의 되는 상대속도가 상사성을 가진다는 실험 결과를 근거로 동축류 제트에서의 근사해를 유도하여 Rayleigh 산란법을 이용하여 연료 농도를 측정함으로써 근사해를 검증한 바 있다[13]. 현재의 경우 비정상 상태의 유동장으로 이론 당량비 조건이 연속적으로 변하기 때문에 제트상사이론을 적용하기에는 상당한 무리가 있다고 사료된다. 하지만 Ko[14]는 비반응 제트 상사이론과 비정상 상태의 실험결과가 상당히 높은 상관계수를 가진다는 결과를 보고한 바 있다[14]. 따라서 현재의 경우에서도 비정상 상태이지만 Ko[14]의 결과를 토대로 냉각제트유동에 의거한 제트 상사이론을 도입하여 삼중점에서의 국부유동속도를 구하였다. Fig. 8(a), (b)는 각 경우에 해당하는 부상높이에 따른 당켈라 수를 나타내었고 부상높이에 따라 폐구간의 거동을 보이며 수렴과 발산하지 않고 지속적인 비정상상태를 이루는 것을 알 수 있다. Fig. 8(a)는 부력에 의한 진동하는 화염으로 화염이 전파할 때 당켈라 수가 후류로 밀려 날 때에 비해 크다는 것을 알 수 있는데 이는 부력의 효과로 인해 화염내부로의 유입되는 유동을

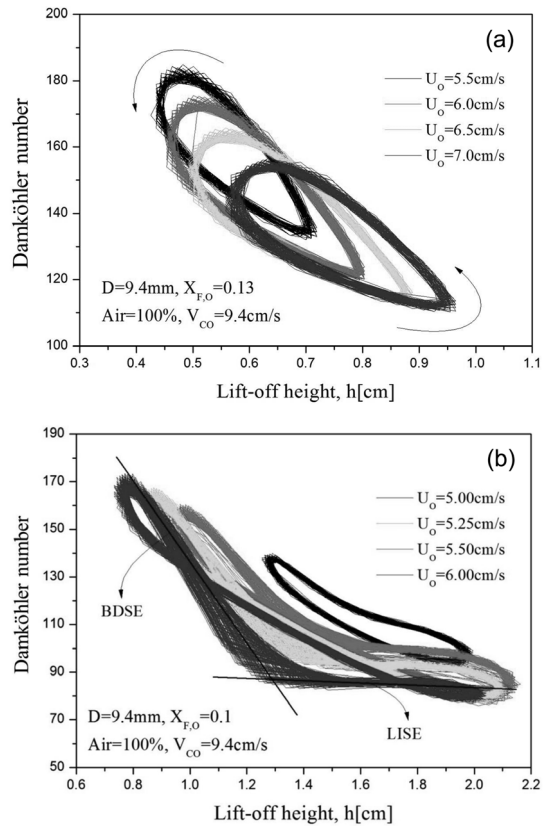


Fig. 8. The Functional dependency of Damköhler number on lift-off height for various nozzle exit velocities; (a) BDSE at  $X_{F,O} = 0.13$  and (b) LCB at  $X_{F,O} = 0.1$ .

강하게 만들어 화염강도가 증가되는 물리적 의미를 잘 표현하고 있다. 이때의 폐곡선 회전 방향은 반시계 방향이다. Fig. 8(b)는 두 진동이 혼재되어 나타나는 경우로써 후류로 밀려날 때의 당켈라 수 보다 화염이 상류로 전파할 때의 당켈라 수가 작은 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 화염사진에서 볼 수 있었던듯이 화염이 전파할 때 체적이 변하지 않고 급격하게 전파하게 되기 때문인 것으로 사료된다. 이로 인해 화염이 전파할 때의 당켈라 수가 후류로 밀려 날 때의 당켈라 수보다 작아지면서 일시적으로 회전방향이 시계방향으로 바뀌었다가 최소부상높이에 도달하게 되면 부력에 의해 화염강도가 강해지면서 회전방향이 다시 반시계방향으로 변화하게 된다. 따라서 앞서 언급한 낮은 당켈라 수에서 루이스 수에 의한 진동이 발생되고 이는 루이스 수에 의한 자기진동이 발생하는 원인의 물리적인 의미를 잘 묘사하고 있다.

### 3.2.3. 루이스 수에 의한 자기진동

부력에 의한 자기진동으로 인해 루이스 수에 의한 진동이 발생되기 어려운 조건이라고 가정하고 부력

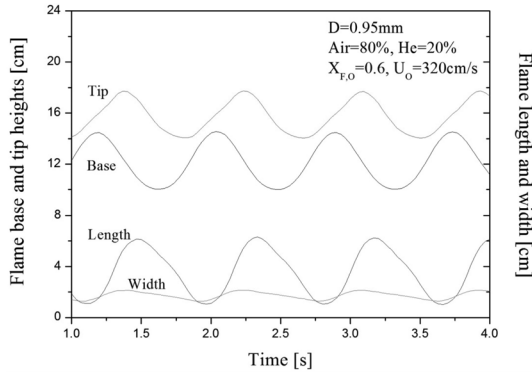


Fig. 9. Various flame dimensions of LISE at  $X_{F,O} = 0.6$ ,  $U_o = 320$  cm/s, and  $V_{CO} = 5$  cm/s.

에 의한 효과를 줄이기 위해 상대적으로 높은 노즐 출구 속도를 유도 할 수 있는 연료 노즐 직경을 0.95 mm를 사용하였고 루이스 수가 1 근처인 메탄을 사용하였다. 루이스 수에 의한 진동이 열손실에 의존적인 점에 착안하여 외부채널에 헬륨 20%를 희석시켜 실험을 수행하였다.

Fig. 9는  $D=0.95$  mm,  $X_{F,O}=0.6$ ,  $U_o=320$  cm/s,  $V_{CO}=5$  cm/s에서의 화염거동을 시간에 따른 부상높이, 길이, 폭을 도시하였다. 부상높이에 대한 길이와 폭의 위상차는 Fig. 5와 유사한 거동을 보인다. Fig. 10은 부상높이에 따른 화염길이를 도시한 것으로 앞서 언급한 부력에 의한 자기진동의 폐곡선 회전방향과는 반대로 반시계방향으로 돌아가는 것을 볼 수 있다. 이는 루이스 수에 의한 자기진동과 부력에 의한 자기진동의 진동모션이 상이하다는 것을 방증하는 것으로 루이스 수에 의한 진동을 명확하게 하기 위해 부상높이에 따른 당켈라 수를 Fig. 11에 도시하였다. Fig. 11을 보면 프로판 부상화염에 비해 당켈라 수가 작고 화염이 상류로 전파할 때 축방향 당켈라 수의 구배가 상당히 작은 것을 알 수 있다. 즉 상류

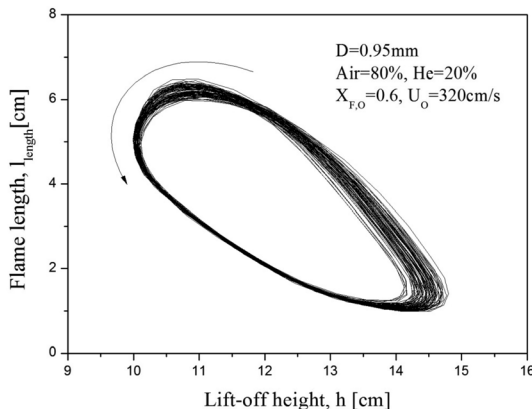


Fig. 10. Phase diagram of lift-off height versus flame length at  $X_{F,O} = 0.6$ ,  $U_o = 320$  cm/s, and  $V_{CO} = 5$  cm/s.

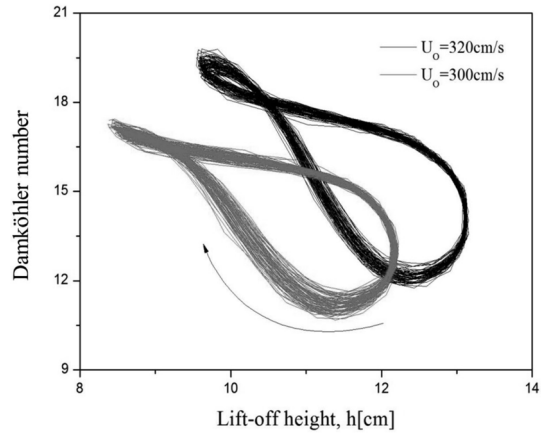


Fig. 11. The Functional dependency of Damköhler number on lift-off height for various nozzle exit velocities; LISE at  $X_{F,O} = 0.6$ .

로 전파하게 되면서 부력에 의한 효과가 화염에 미치는 영향이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 게다가 화염이 전파할 때의 당켈라 수가 후류로 밀려날 때보다 상대적으로 작은 것을 볼 수 있는데 이는 외부채널의 헬륨으로 인해 전도 열손실이 커지게 되고 이로 인해 크리티컬 루이스 수를 낮추게 되는 효과로 인해 1보다 작은 메탄에서도 루이스 수에 의한 진동이 발생하는 것을 볼 수 있으며 Matalon[9]의 수치해석 결과와 잘 일치하였다. 또한 회전방향은 시계방향으로 앞서 프로판을 사용한 동축류 제트에서 루이스 수에 의한 자기진동이 발생되었을 때의 회전방향과 동일하다는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

동축류 제트에서 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동을 구분하기 위해 연료, 연료 노즐직경과 외부채널 희석조건을 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

연료 직경 9.4 mm인 질소로 희석된 프로판 동축류 제트에서 부착화염, 진동화염, 안정된 부상화염을 발견하였다. 진동화염의 경우 화염선단에서의 열축적으로 인한 부력에 의한 자기진동을 관찰하였다. 또한 상대적으로 연료 몰분율이 더 낮은 화염소화 근처영역에서 루이스 수에 의한 자기진동이 부력에 의한 자기진동이 혼재되어 발생하는 것을 관찰하였다. 두 진동모션을 구분하기 위해 진동 한주기의 화염사진을 통해 육안으로 상이함을 관찰하였고 이를 명확하게 하기 위해 당켈라 수를 차용하여 루이스 수에 의한 자기진동이 발생 할 때 더 낮은 당켈라 수를 가지는 것을 확인하였고 이에 대한 메커니즘을 제안하였다.

루이스 수에 의한 자기진동만 유도하고자 직경 0.95 mm, 루이스 수 1 근처인 메탄을 연료로 사용하였고 외부채널에 20% 헬륨을 희석시켜 실험을 수행하였다. 그 결과 루이스 수에 의한 자기진동만 유도하는데 성공하였고 이를 부력에 의한 자기진동과 비교하여 진동모션이 상이하다는 것을 규명하였다. 또한 화염이 상류로 전파할 때 당켈라 수가 더 작음을 확인하였고 루이스 수에 의한 자기진동 메커니즘과 잘 일치하는 것을 규명하였다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 전력산업원천기술개발사업의 일환(CD20140007)으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [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 near-wake 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.
- [12] Tran Manh Vu, Jeong Park, Oh Boong Kwon, Dae Seok Bae, Jin Han Yun, Sang In Keel, "Effects of diluents on cellular instabilities in outwardly propagating spherical syngas-air premixed flames", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 3868-3880
- [13] J. Lee, S.H. Won, S.H. Jin, S.H. Chung, "Lifted flames in laminar jets of propane in coflow air", *Combust. flame*, Vol. 135, 2003, pp. 449-462
- [14] Y.S Ko, S.H Chung, "Propagation of unsteady tribrachial flames in laminar non-premixed jets", *Combust. flame*, Vol. 118, 1999, pp. 151-163