

층류 동축류 제트에서 공기층 헬륨 희석이 화염진동에 미치는 영향

이원준* · 박 정** · 권오봉* · 백세현** · 고성호***

Helium-dilution Effect of Coflow Air on Self-excitation in Laminar Coflow Jet Flames

Won June Lee, Jeong Park, Oh Boong Kwon, Se Hyun Baek and Sung Ho Ko

ABSTRACT

Experimental study in coflow jet flames has been conducted to investigate the helium-dilution effect of coflow air on self-excitation. For various helium mole fractions and jet velocities, two types of self-excitation were observed: buoyancy-driven self-excitation and Lewis-number-induced self-excitation (here after called Le-ISE) coupled with buoyancy-driven one. The difference between buoyancy-driven and Le-ISE is clarified by using the Mie-scattering visualization as well as exploring the different features. The mechanism of Le-ISE is proposed. When the system Damköhler number was lowered, Le-ISE is shown to be launched. Le-ISE is closely related to heat loss, in that it can be launched in even methane jet flame (Lewis number less than unity) with helium-diluted coflow air. Particularly, Le-ISE becomes significant as the Damköhler number decreases and heat-loss becomes significant.

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

1. 서론

부상화염은 화염의 안정화 특성을 파악하기 위해 그동안 광범위하게 연구되어 왔다. 특히 부상화염은 과농 예혼합화염과 희박 예혼합화염, 그리고 확산화염이 공존하는 삼지화염의 구조를 갖고 있음을 밝혀진 바가 있으며, 부상화염의 안정화 메커니즘은 이론당량비선을 따른 국부유동속도와 화염전파속도가 균형을 이루는 지점에서 존재하는 것이다[1-3]. 부상화염에서 나타나는 진동 불안정성은 안정화 메커니즘에 근거하여 설명되어야 하며, 현재까지 알려진 바로 부력에 의한 자기진동[4,5], 소화 근처에서의 물질-열 확산에 의한 진동 불안정성[6] 및 열손실에 의한 자기진동[7,8]이 있다. 최근, Yoon은 자유제트 부상화염에서 질소로 희석된 프로판을 사용하여 예혼합가지에서 꼬리확산화염으로의 전도 열손실로 인해 발생하는 열손실에 의한 자기진동을 규명하였다[7]. 열손실에 의한 자기진동을 규명하는데 있어 본 연구팀은 자유제트에서 O(1 Hz) 범위에 해당하는 진동을 관

찰하였고 노즐을 수평 분사하는 실험기술을 도입하여 화염선단에서의 열 축적을 제거하여 진동O(1 Hz)을 억제시켜 부력에 의한 진동으로 규명하였다. 다음과 같이 O(1 Hz) 범위에 해당하는 진동을 본 연구 그룹에서 보다 이전에 다른 연구그룹에서 규명한 바 있다.

동축류 제트의 경우 Furi는 물질-열 확산에 의한 진동으로 규명하였는데 핵심은 화염소화근처에서 루이스 수가 1보다 클 때 혼합강도 또한 커지면서 O(1 Hz) 범위에 해당하는 진동이 발생된다고 보고한 바 있다[6]. 반면 동일한 동축류 제트에서 O(1 Hz) 범위에 해당하는 자기진동에 대하여 Won은 질소로 과다하게 희석된 프로판을 연료로 사용하였을 때 넓어진 화염선단에서 축적된 열로 인해 부력에 의한 진동이 유발된다고 보고한 바 있다[4]. 이후 Won[5]은 미소 중력환경에서 선행연구의 결과와 동일한 부력에 의한 화염진동을 제거하는데 성공함으로써 현재까지 부력에 의한 진동으로 인식되고 있다. 한편, Kurdyumov는 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[9-11]. 하지만 수치해석적으로 접근하여 부력을 배제한 결과이기 때

* 부경대학교 기계공학과

** 한국전력연구원 수화력발전팀

*** 충남대학교 기계공학과

† 연락처, jeongpark@pknu.ac.kr

문에 루이스 수에 의한 진동을 규명하기에는 한계가 있다.

부력에 의한 진동과 열손실에 의한 자기진동은 실험적 연구와 그 결과를 바탕으로 특성화 작업을 수행하여 완벽히 구분했다. 하지만 물질-열 확산에 의한 진동의 경우 실험적으로 규명하지 못한 채 수치해석에 의존하여 규명되고 있는 상태이다. 과연 실험적으로 구분할 수 없는 것인지 혹은 루이스 수에 의한 진동을 관찰하고도 부력에 의한 진동과 주파수, 화염 거동이 유사함으로 인해 부력에 의한 진동으로 규명하는 오류를 범하고 있는지에 대해 명확한 가이드라인(Guideline)이 필요한 시점이다. 또한 부력에 의한 진동과 물질-열 확산에 의한 진동이 상호간의 어떠한 영향을 미치는지 대한 연구도 필요하다.

현재까지의 연구결과들을 고려해 볼 때 물질-열 확산에 의한 진동에 대한 연구의 필요성과 또한 부력에 의한 화염진동과 실험적으로 구분해야 할 당위성을 시사하고 있다. 본 연구는 부력에 의한 자기진동과 물질-열 확산에 의한 진동의 차별을 가지기 위해 물질-열 확산에 의한 진동이 열손실에 의존적인 점을 고려하여 열손실을 제어할 수 있도록 동축류 제트의 외부채널에 열 전도율이 높은 헬륨을 희석시켜 두 개의 진동에 대해 명확히 구분하고자 한다. 아울러 루이스 수가 열손실에 의존적이라면 본 연구그룹의 선행 연구 결과로 열손실에 의한 자기진동은 루이스 수에 의한 진동에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 실험적으로 규명하고자한다.

2. 실험방법

실험 장치는 유량 조절부, 노즐부, 측정부로 구성되어 있으며 그 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 부력에

의한 진동을 유도하기 위해 연료 측 노즐은 슈퍼드릴(SD-1M)로 가공된 직경 11 mm의 스테인리스 강관을 사용하였다. 노즐 출구에서 완전 발달된 유동장을 얻기 위하여 노즐 길이를 직경기준 레이놀즈수(Re_D)에 의존한 층류 입구길이보다 충분히 긴 1.1 m로 하였다. 또한 부력에 의한 진동을 유도하기 위해 순도 99.99% 프로판과 99.95%의 질소는 압력 조절기로 조절되고 유량 조절은 버블미터로 검증된 규격 500 mL/min 프로판, 1.5 L/min 질소 MFC를 사용하여 프로판 몰분율 0.08로 고정하여 연료노즐로 분사된다. 또한 본 연구그룹의 선행 연구결과에서 알 수 있듯이 제트의 후류에서 열손실에 의한 자기진동의 진폭이 상당히 크다는 점을 고려하여 노즐출구속도가 낮은 노즐 근처로 설정하였다. 외부채널에는 루이스 수에 의한 진동을 유도하기 위해 헬륨의 희석량을 2.5%씩 증가시키며 최대 7.5%까지 희석시켜 동축류 속도 5 cm/s로 고정하였다. 외부채널의 공기는 공기 압축기의 공기를 이용하였다. 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 22~24℃ 습도는 40%~44%로 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 100 L/min 규격의 공기 MFC를 통해 외부 노즐로 분사된다. 외부채널의 노즐부를 직경 10 cm, 높이 1 m 원형 아크릴 칸막이실 안에 위치시키고 동축류의 균일한 유

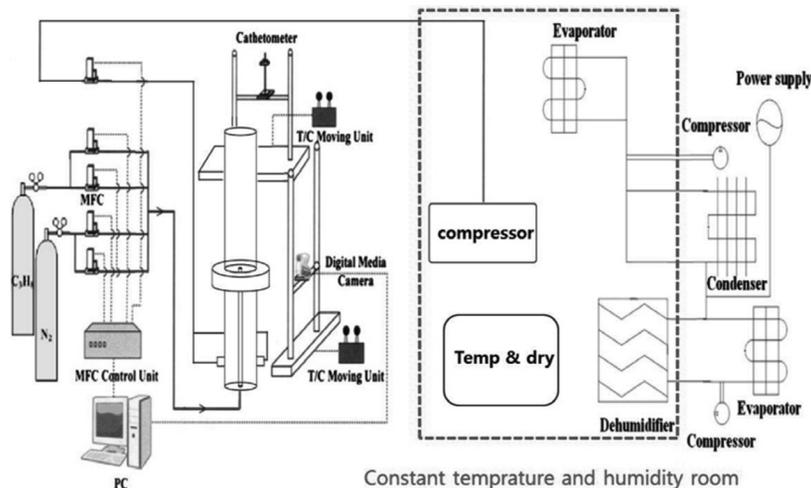


Fig. 1. Schematic drawing of experimental setup and flow system.

동장을 확보하기 위하여 메쉬와 허니컴을 설치하였다. 화염의 부상높이는 카세토미터와 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. 외부채널의 헬륨 희석량에 따른 화염 안정화선도

헬륨 희석량에 따른 부상화염의 특성을 파악하기 위해 외부채널의 공기 물분율에 따른 제트의 노즐출구속도를 변화시키며 실험을 수행하였다. 본 연구의 결과를 토대로 Fig. 2에 화염안정화선도를 제시하였고 아래와 같이 영역을 구분하였다.

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

화염안정화선도를 보면 알 수 있듯이 영역 1은 부력에 의한 진동만 발생하는 영역으로 $0.95 \leq X_{O_2} < 1$ 에 해당한다. 영역 2는 부력에 의한 진동과 루이스 수에 의한 진동이 혼재되어 발생하는 구간으로 $0.925 \leq X_{O_2} < 0.975$ 에 해당한다. 주목할 점은 $X_{O_2} = 0.975$, $U_0 = 7.5$ cm/s에서 부력에 의한 진동과 루이스 수에 의한 진동이 혼재되어 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구그룹의 선행연구결과에서 규명한 것으로 노즐출구속도가 증가함에 따라 화염 내 열손실이 증

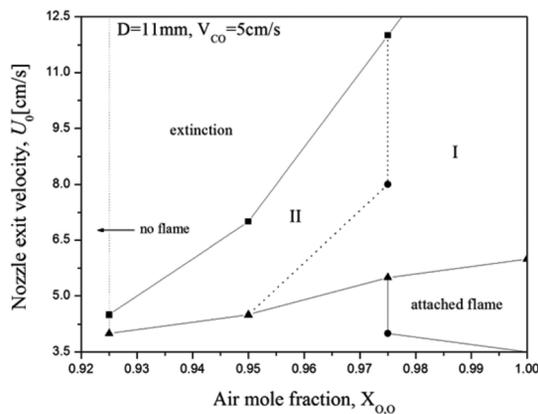


Fig. 2. Flame stability maps as a function of nozzle exit velocity and outer channel air mole fraction for $D = 11$ mm, $V_{CO} = 5$ cm/s.

가한다는 것을 밝힌 바 있다. 이는 루이스 수에 의한 진동이 화염 내에서 발생하는 축 방향 전도 열손실과도 상관관계가 있다는 것을 암시하는 바이다. $0.975 \leq X_{O_2} < 1$ 에서 노즐출구속도가 상대적으로 낮을 때 부착된 화염이 발생한다. 하지만 공기 물분율 $X_{O_2} < 0.975$ 에서는 부착된 화염이 발생하지 않고 진동하는 부상화염이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 헬륨 희석을 통해 부상시점이 앞당겨 졌음을 알 수 있다. 공기 물분율 $X_{O_2} < 0.925$ 에서는 화염이 존재하지 않는 영역이다. 화염안정화선도를 보면 알 수 있듯이 열전도도가 높은 헬륨의 특성상 헬륨 희석량이 증가함에 따라 화염 내에서의 열손실을 증가시키고 열손실에 의존적인 루이스 수에 의한 진동이 발생하는 것으로 판단된다. 이점을 미루어 보아 거시적으로 열손실이 루이스 수에 의한 진동에 영향을 미치는 다는 것을 알 수 있다.

3.2. 부력에 의한 진동

동축류 제트 부상화염에서 부력에 의한 자기진동 메커니즘은 다음과 같이 정의되어 왔다. 화염이 제트의 상류로 전파함에 따라 더 많은 연료flux가 화염내부로 공급됨에 따라 화염의 강도 증가, 즉 반응물이 증가하게 된다. 이러한 반응물의 증가로 인해 화염의 크기가 증가하게 되고 화염에 의한 부력이 증가하게 되면, 화염면 상단의 국부유동속도 증가를 유발한다. 이로 인해 화염전파속도보다 커지게 되고 화염은 재차 하류로 밀려나게 된다. 이후 화염은 다시 화염의 크기가 감소하여 부력의 효과가 감소하게 되므로 국부유동속도는 화염전파속도보다 낮아지게 되어 화염은 다시 상류로 전파하게 된다. 다음과 같은 부력에 의한 화염진동 메커니즘은 Won[4,5]에 의해 언급되었다.

Fig. 3은 직경 11 mm, $U_0 = 7$ cm/s, 외부채널에 헬

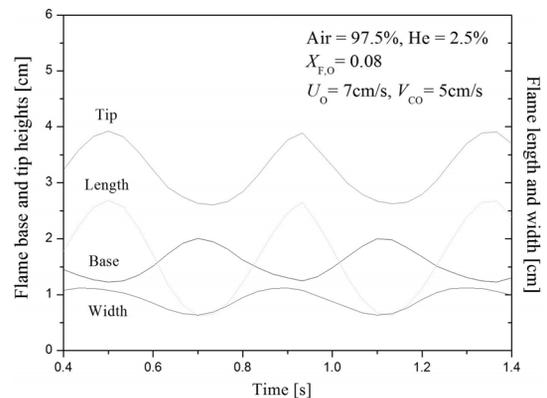


Fig. 3. Various flame dimensions of oscillating lifted flame for $X_{F,O} = 0.08$, $U_0 = 7$ cm/s, $V_{CO} = 5$ cm/s.

를 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 Won[4]의 결과와 동일한 것을 알 수 있다.

3.2. 루이스 수에 의한 진동

루이스 수에 의한 자기진동에 대해 현재까지 보고된 바가 없기 때문에 물리적으로 명확한 메커니즘이 제시될 필요가 있다. Fig. 4는 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. 부력에 의한 진동 구간의 보게 되면 Won[4]의 결과와 상당히 유사한 형태를 이루고 있다. 반면 루이스 수에 의한 자기진동의 거동을 보게 되면 부력에 의한 자기진동에 비해 부상높이에 대해 화염선단, 팁, 길이, 폭의 위상차가 어긋나게 되는 것을 볼 수 있다. 즉, 화염의 진동형태가 상이하다는 것을 거시적으로 확인할 수 있다. 이를 더 명확하게 구분하기 위해 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동의 한 주기 사진을 Fig. 5(a), (b)에 도시하였다.

Fig. 5(a)는 직경 11 mm, $U_0 = 7$ cm/s, 외부채널에 헬륨을 2.5%를 희석한 조건에서의 부력에 의한 진동

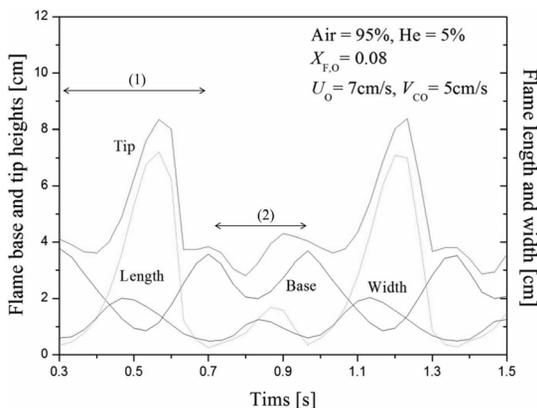


Fig. 4. Various flame dimensions of oscillating lifted flame for $X_{F,O} = 0.08$, $U_0 = 7$ cm/s and $V_{CO} = 5$ cm/s.

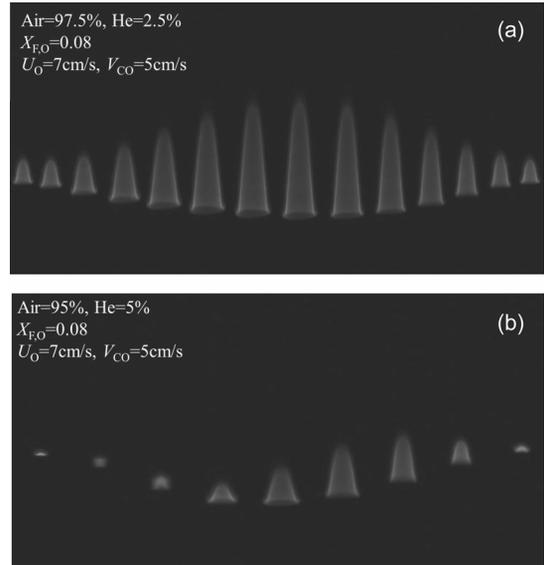


Fig. 5. Flame images of oscillation of one cycle lifted flame with time step of 0.033 s.

한주기 사진을 나타내었고 현재의 화염 거동을 바탕으로 FFT 분석 결과 2.23 Hz가 도출되었다. 화염이 제트의 상류로 전파할 때 화염의 길이가 신장하고 후류로 밀려 날 때 수축하는 것을 알 수 있는데 이는 앞서 언급한 부력에 의한 진동 메커니즘을 상이해 볼 때 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 부상높이에서 같은 화염길이를 가지는 것을 알 수 있다. 반면 Fig. 5(b)는 동일한 노즐 직경과 노즐출구 속도에 외부채널의 헬륨의 희석량을 5%로 증가시켰다. 현재의 진동주파수는 FFT분석 결과 2.90 Hz로 도출되었고 사진을 보게 되면 부력에 의한 자기진동과는 상이한 거동을 나타내는데 동일한 부상높이에서 상이한 화염의 길이를 가지는 것을 알 수 있으며 특히 주목할 점은 화염이 제트의 상류로 전파할 때 화염의 길이는 거의 신장하진 않는 것을 볼 수 있다. (a)의 조건에 비해 (b)의 조건은 헬륨의 희석량이 증가하여 화염내부에서의 전도 열손실이 상대적으로 크게 된다. 또한 진동이 시작할 때의 화염구조를 보게 되면 화염 길이 또한 (b)가 상당히 짧은 것으로 보아 축방향 전도 열손실이 더 과도하다는 것을 알 수 있다. Matalon 연구그룹[11]에서 규명하였듯이 과도한 열손실이 발생하면 임계 루이스 수를 낮추는 효과로 인해 루이스 수가 1보다 작음에도 불구하고 루이스 수에 의한 진동이 발생한다고 보고한 바 있다. 따라서 (b)의 화염은 과도한 열손실이 발생하게 되면서 루이스 수에 의한 진동이 발생하게 된다. 또한 현재의 루이스 수가 1.96인 점을 고려하였을 때 미연가스의 예열효과가 상당한 크게 되어 화염은 급격하게 상류로 전파하게 된다. 전파하는 동안 팁의 위치가 화염의 거동

을 결정하는 에지화염에 상당히 가깝기 때문에 화염 강도를 증진시킴으로 인해 화염의 길이는 증가하지 않는 것으로 판단된다. 화염이 최소부상높이에 도달하게 되면 계속적으로 연료 flux가 증가하기 때문에 화염의 길이와 폭은 신장하게 되고 신장된 길이로 인해 화염 팁은 상대적으로 후류로 형성되면서 미연가스 영역으로의 열확산은 상류로 전파할 때보다 상대적으로 낮게 된다. 또한 팁의 형태가 완벽한 곡률을 이루지 못하고 열려있게 되어 핫 포커싱이 발생되지 않고 에지화염의 거리가 멀어짐에 따라 예열효과가 감소되면서 화염강도는 감소로 인해 후류로 밀려나게 된다. 이후 팁은 완전한 곡률을 이루고 핫 포커싱으로 인해 팁은 상류로 전파하게 되고 화염길이의 감소를 유발하고 에지화염에 영향을 주게 되면서 최대부상높이에 도달하게 된다. 이것이 루이스 수에 의한 진동 메커니즘이 되겠다.

3.3. 부력에 의한 진동과 루이스 수에 의한 진동의 구분

부력에 의한 진동 메커니즘은 Won[4,5]에 의해 잘 묘사되었고 앞서 루이스 수에 의한 진동 메커니즘은 본 연구그룹에서 제안하였다. 두 진동을 명확하게 구분하기 위해 Mie 산란을 이용한 가시화와 당켈라 수를 도입하여 정리하고자 한다. Fig. 6(a)를 보게 되면 부력에 의한 진동과 루이스 수에 의한 진동 시작점에서의 유동장을 나타낸 사진이다. 좌측은 부력에 의한 진동의 경우로 Fig. 6(b)의 Won[4]의 결과와 동일한

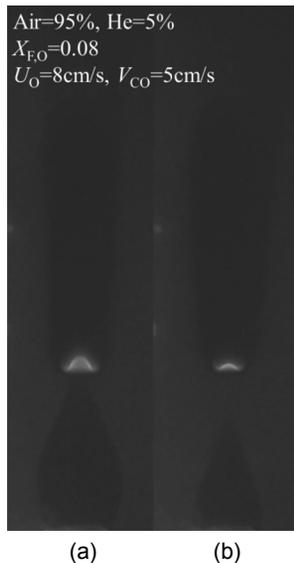


Fig. 6. Planar Mie scattering images for $X_{O,0}=0.05$, $U_0 = 8 \text{ cm/s}$: (a) initial point of oscillation by buoyancy and (b) initial point of oscillation by Lewis number with lifted flame.

다는 것을 알 수 있다. 반면 루이스 수에 의한 진동의 경우를 보게 되면 흥미롭게도 화염선단에서의 연료 농도구배가 거의 없다는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 루이스 수에 의한 진동 메커니즘에서 언급하였듯이 화염이 상류로 급격하게 전파하는 요인이라 판단된다. 즉 연료농도구배로의 감소와 미연가스로의 예열 효과로 인해 화염은 급격하게 전파할 수 있는 것으로 사료된다. 주목할 점은 화염이 진동하게 되면서 화염선단의 유동장을 변화시키면서 이론 당량비선 또한 변화되는 것을 알 수 있는데 이는 비정상 상태의 현상으로 차후에 논의하겠지만 냉각제트유동에 의거하여 묘사된 부상화염의 안정화 메커니즘과는 상당한 차이가 있음을 주지하였다.

한편, Matalon[9] 연구그룹에서 제안한 낮은 당켈라 수는 임계 루이스 수를 낮추게 하는 효과로 인해 루이스 수 1보다 작을 때에도 진동한다고 보고한 바 있다. 그렇다면 본 연구의 결과에서도 이와 동일한 현상이 도출되는지 확인하기 위해 부상높이에 따른 당켈라 수를 나타내었다. 당켈라 수는 아래와 같이 정의된다.

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

당켈라 수는 물질확산시간과 화학반응시간의비를 나타내는 척도이다. $\delta_{f,t}$ 는 화염의 두께[12], $S_L|_{st}$ 는 층류 화염전파속도로 USC Mechanism Premix code를 사용하였다. w 는 화염의 폭, U^* 는 삼중점에서의 국부 유동속도를 나타낸다. Lee[1,2]은 냉각제트유동에 의거하여 삼지화염의 삼중점(tribranchial point)이 이론 당량비선을 따라 화염이 전파한다는 가정 하에 비반응 제트 상사이론을 아래와 같이 제안하였다.

$$u = \frac{3}{8\pi\nu x} \frac{J}{\rho} \frac{1}{(1+\eta^2/8)^{2Sc}}$$

$$Y_F = \frac{(2Sc+1)}{8} \frac{I_F}{\rho} \frac{1}{(1+\eta^2/8)^{2Sc_F}}$$

$$H_I/d^2 \propto (Y_F^*/Y_{F,0})^{1/(Sc-1)} u_o^{(2Sc-1)/(Sc-1)}$$

$$u_{CL} = \frac{1}{8\nu} \frac{u_o d^2}{x}$$

여기서 u 는 축 방향 속도, Y_F 는 연료의 질량분율을 나타내고 x 는 축 방향 거리, d 는 노즐직경, ρ 는 밀도, ν 는 동점성 계수를 나타낸다. 위와 같은 비반응 제트 상사이론으로 Chung의 연구그룹을 포함한 대부분의

연구들이 층류 부상화염의 메커니즘을 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 연료농도를 측정함으로써 근사해를 검증한 바 있다[13]. 현재의 경우 비정상 상태의 유동장으로 이론 당량비선이 변하기 때문에 제트상사이론을 적용하기에는 상당한 차이가 있음을 앞서 Fig. 6에서 확인할 수 있었다. 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. 7(a), (b)는 부상높이에 따른 당켈라 수를 나타내었고 부상높이에 따라 폐구간의 거동을 보이며 수렴과 발산하지 않고 지속적인 비정상상태를 이루는 것을 알 수 있다. Fig. 7(a)는 부력에 의한 진동하는 화염으로 화염이 전파할 때 당켈라 수가 후류로 밀려 날 때에 비해 크다는

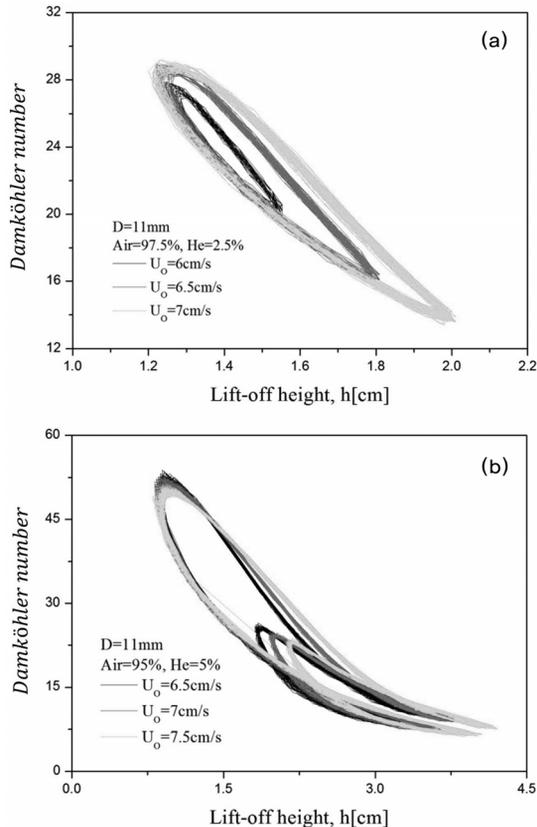


Fig. 7. Phase diagram of lift-off height and Damköhler number for various helium mole fraction and jet velocity.

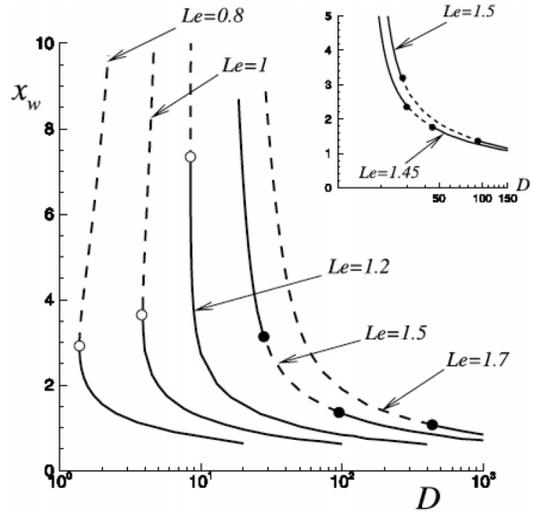


Fig. 8. Response curve showing the dependence of the flame standoff distance as a function of the Damköhler number D , for several values of the Lewis numbers $Le = Le_F = Le_O$. The Solid segments correspond to stable states, the dashed segments to unstable states, black-filled circles (●) to the marginally stable states, and circles (○) to extinction states.

것을 알 수 있는데 이는 부력의 효과로 인해 화염강도가 증가되는 물리적 의미를 잘 표현하고 있다. Fig. 7(b)는 두 진동이 혼재되어 나타나는 경우로써 부력에 의한 진동구간은 Fig. 7(a)와 동일하다. 루이스 수에 의한 진동은 부력에 의한 진동에 비해 낮은 당켈라 수에서 발생하는데 Fig. 8은 Matalon[9] 연구그룹의 수치해석 결과로 낮은 당켈라 수일 때 임계 루이스 수를 낮추는 효과로 인해 진동이 발생한다는 결과와 일치하는 물리적 의미를 상당히 잘 묘사하고 있다.

3.4. 열손실이 루이스 수에 의한 진동에 미치는 영향

루이스 수에 의한 진동이 열손실에 의존적인 점을 감안하여 열손실에 의한 자기진동은 어떠한 영향을 미치는지에 대해 명확하게 규명 할 필요성이 있다.

Fig. 9는 부상높이에 따른 변위속도와 화염 폭을 도시하였다. (a), (b), (c)의 그림에서 알 수 있듯이 비정상 상태의 원형 폐곡선 거동을 보이며 헬륨의 희석량을 증가시키거나 노즐출구속도를 증가시킬 때 작은 원형의 폐곡선이 파생되어 발생하게 된다. 이는 루이스 수에 의한 진동에 해당하는 것으로 노즐출구속도와 헬륨 희석량에 의존하는 것으로 보아 본 연구그룹에서 규명한 예지화염에서 확산화염으로의 전도 열손실에 의존적임을 확인할 수 있다. 열손실이 루이스 수에 의한 진동에 미치는 영향을 상세히 고찰

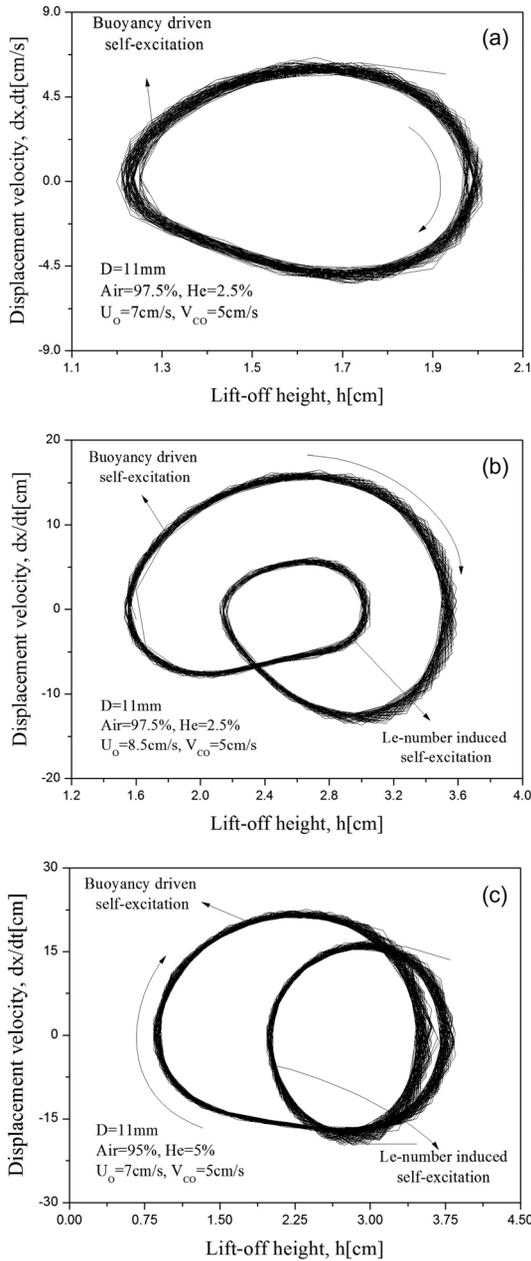


Fig. 9. Phase diagram of lift-off height and displacement velocity for various helium mole fraction and jet velocity.

하기 위해 부상높이에 따른 화염 폭을 Fig. 10(a), (b), (c)에 도시하였다. (a)는 열손실이 상대적으로 낮은 영역이다. 헬륨의 희석량을 증가시키거나 노즐출구 속도를 증가시켰을 때 상대적으로 열손실이 증가하게 되어 (b)에서 볼 수 있듯이 루이스 수에 의한 진동이 발생되고 (c)와 같이 발달하게 된다. (b)의 루이스 수에 의한 진동에 비해 (c)의 진동이 진폭이 크고 부

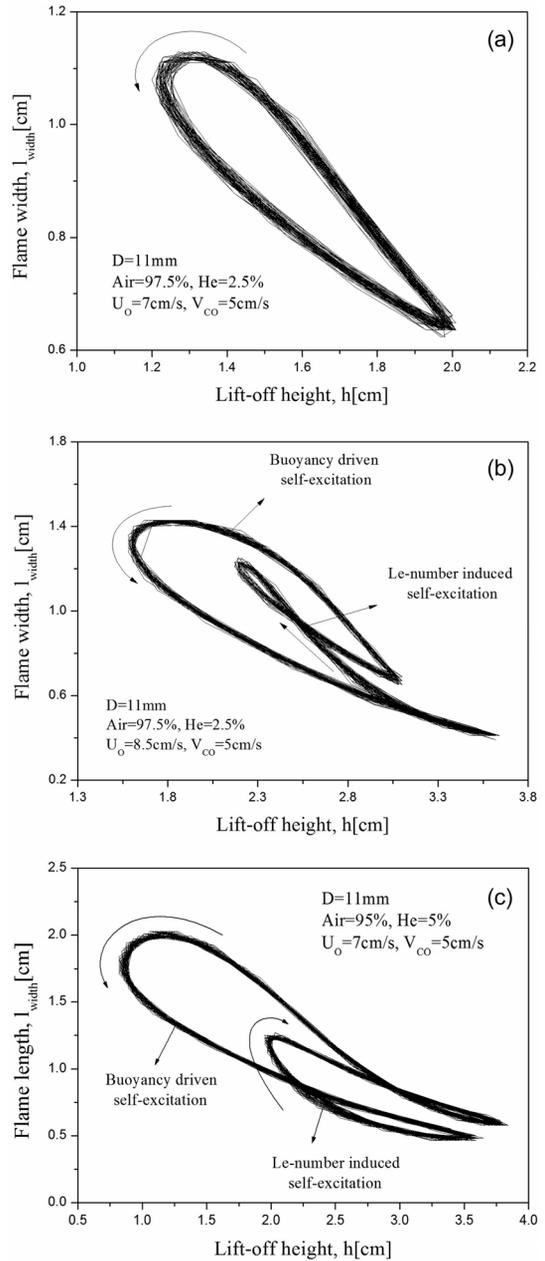


Fig. 10. Phase diagram of lift-off height and flame length for various helium mole fraction and jet velocity.

력에 의한 진동이 시작하는 부상높이 보다 더 후류로 밀려나게 되는데 이는 열손실이 루이스 수에 의한 진동을 활성화시키는 것으로 사료된다. 주목할 점은 두 진동의 화염폭 폐곡선 회전방향이 다르다는 점로 루이스 수에 의한 진동의 경우 상류로 전파할 때 미연가스의 예열효과와 화염선단에서의 연료농도구배의 감소로 인해 화염 폭이 신장하지 않고 전파하기 때문이다.

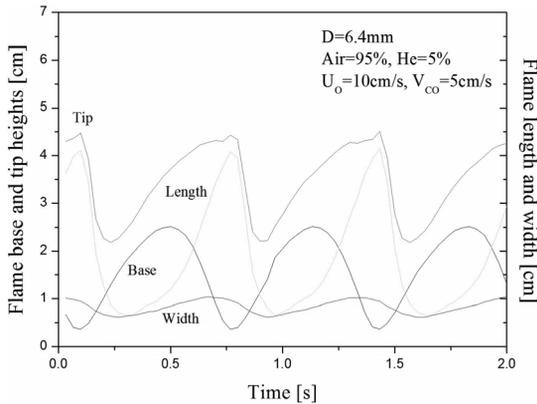


Fig. 11. Various flame dimensions of oscillating lifted flame for $D = 6.4$ mm, $X_{F,O} = 1$, $U_o = 10$ cm/s and $V_{co} = 5$ cm/s in methane flame.

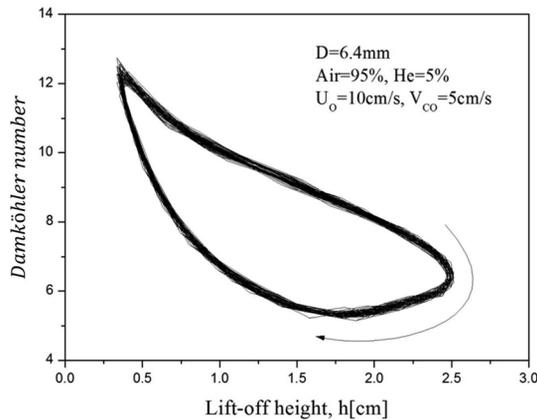


Fig. 12. Phase diagram of lift-off height and Damköhler number.

본 연구그룹에서 제안한 루이스 수에 의한 자기진동 메커니즘에서 과도한 열손실이 루이스 수에 의한 진동을 유발한다고 언급하였다. 이를 확인하기 위해 루이스 수가 1보다 작은 메탄을 사용하였다. 부력에 의한 효과를 최소화하기 위해 상대적으로 직경이 작은 6.4 mm로 설정하였고 루이스 수에 의한 진동을 유도하기 위해 외부채널에 헬륨 5%를 희석하여 실험을 수행하여 루이스 수에 의한 진동만 관찰할 수 있었고 이를 부상높이에 따른 화염선단, 팁, 길이, 폭을 Fig. 11에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 앞서 본 루이스 수에 의한 진동과 유사하게 화염선단과 화염길이의 위상차가 어긋나 있는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 부상높이에 따른 당켈라 수를 나타낸 것으로 Fig. 7(b)와 비교할 때 당켈라 수가 더 낮은 것을 알 수 있다. 이는 당켈라 수가 낮을 때 루이스 수에 의한 진동이 발생되는 물리적 의미를 잘 표현하고 있다.

4. 결론

동축류 제트에서 질소를 과다하게 희석시킨 프로판을 사용하고 외부채널에 헬륨을 희석시켜 부력에 의한 진동과 루이스 수에 의한 진동을 유도하여 실험적인 방법으로 관찰하였다. 상대적으로 큰 직경 11 mm를 사용하여 화염선단에서의 열축적으로 인한 부력에 의한 진동을 관찰하였으며 또한 헬륨 희석을 통한 화염 내 열손실을 증가시켜 루이스 수에 의한 진동을 유도하여 관찰하였다. 루이스 수에 의한 진동 메커니즘을 제안하여 부력에 의한 진동과 구분하였고 실험적 방법을 동원하여 두 진동의 상이함을 규명하였다. 또한 당켈라 수를 도입하여 당켈라 수가 낮을 때 루이스 수에 의한 진동이 발생한다는 것을 관찰하였다. 루이스 수에 의한 진동이 열손실에 의해 발생, 발달하는 거동을 보였다. 이를 더 명확하게 하기 위해 루이스 수 1보다 낮은 메탄을 사용하고 직경을 6.4 mm, 외부채널에 헬륨을 희석시켜 실험하였고 부력이 제거된 루이스 수에 의한 진동만 발생하는 것을 관찰하였고 루이스 수에 의한 진동은 열손실에 많은 영향을 받는 것으로 규명하였다.

후기

본 연구는 한국연구재단 일반연구자지원 기본유형 1의 일환(CD20120842)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., 2002, "Normal and Microgravity Experiment of Oscillating Lifted Flames on Coflow", *Proc. Combust.*

- Inst., Vol. 29, pp. 37-44.
- [6] M. Fri, 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, 909-917(2007).
- [10] Kurdyumov, V. and Matalon, M., "Dynamics of an edge flame in a mixing layer", Comb. Flame. Vol. 139, 329-339(2004).
- [11] Kurdyumov, V. and Matalon, M., "Radiation losses as a driving mechanism for flame oscillations", Proc. Comb. Inst. Vol. 29, 45-52(2002).
- [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 tri-brachial flames in laminar non-premixed jets", Combust. flame, Vol. 118, 1999, pp. 151-163

접수일 : 2012. 12. 07
 심사완료일 : 2012. 12. 11