



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

동축류 제트에서의 화염 불안정성

2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

반 규 호

공 학 석 사 학 위 논 문

동축류 제트에서의 화염 불안정성

지도교수 박 정

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

반 규 호

반규호의 공학석사 학위논문을
인준함.

2018년 2월



주 심 공학박사 권 오 봉 印
위 원 공학박사 이 창 용 印
위 원 공학박사 박 정 印

목 차

목차	i
요약	iii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 실험장치 및 데이터 분석.....	3
제 3 장 결과 및 논의.....	7
3.1 부상화염 메카니즘.....	7
3.2 부상높이감소 화염과 메카니즘.....	13
3.3 부력에 의한 화염 자기진동.....	35
3.4 물질-열확산에 의한 화염 자기진동	49
제 4 장 결론.....	66
감사의 글.....	69

참고문헌.....	33
-----------	----

Abstract	38
----------------	----



동축류 제트 부상화염에서의 화염 불안정성

반 규 호

부 경 대 학 교 대 학 원 기 계 공 학 과

요 약

중류 동축류 제트 부상화염에서 제트 상사성 이론으로 설명 되지 않는 노즐출구 속도 증가에 따라 감소하는 부상화염 현상과 소화영역 근처에서 나타나는 화염의 자기진동에 대한 현상을 규명하기 위해 수치해석적 그리고 실험적 연구를 수행하였다. 슈미트 수, Sc 가 $0.5 < Sc < 1$ 사이 값을 가질 경우, 노즐출구 속도 증가에 따라 감소하는 부상화염 현상을 규명하기 위해 화염구조와 화염전파속도, 그리고 연료와 산화제측의 속도장을 수치해석적으로 비교 분석 한 결과, 노즐 출구 속도에 따라 화염전파속도는 일정하였다. 노즐출구 속도가 증가할수록 부상높이 감소 구간에서는 반경방향으로의 연료 제트 모멘텀보다 부력에 의한 대류로 유입 효과를 나타내는 리차드슨 수, Ri 의 감소로 부상높이는 감소하였으며, 높은 노즐출구 속도에서는 연료 제트 모멘텀의 반경방향 속도가 지배적인 효과를 나타내며 다시 부상높이는 증가하였다. 이를 기반으로 연료 제트의 다양한 Sc 수에 대한 부상높이를 측정 하였으며 크게 세가지 영역이 관찰되었다: (1) 노즐출구속도 증가에 따라 부상높이가 증가하는 영역 (2) 부상높이가 감소하는 영역 (3) 자기진동 영역. 부상높이 증가 구간은 부력으로 인한 효과로 이전연구 결과로 규명된 반면, 부상높이 감소 구간은 Sc 수와 부력의 상호작용으로 인한 국부유동속도의 변화로 나타났다. 동일한 연료에 따라 임계 Sc 수가 존재하였으며, 임계 Sc 보다 작은 Sc 수를 가질 경우 부상높이 감소 현상이 관찰되었으며, 이보다 클 경우, 부상높이 감소구간은 나타나지 않았다. 이러한 현상은 임계 Sc 수와 Ri 수를 이용한 특성화 작업으로 잘 묘사되었다. 화염의 자기진동의 경우, Sc 수와 관계없이 연료와 산화제의 밀도차이와 관계를 가졌으며 여러 가지 연료와 희석제를 이용하여 연료와 산화제 제트의 밀도를 조정하였다. 화염의 자기진동은 미연과 기연의 밀도차로 유발되는 부력에 의한 대류보다 연료와 산화제 제트의 밀도차가 클 경우 나타나는 음의 부력효과로 인해 국부 유동속도는 감소하며 화염은 상류로 전파하게 된다. 상류로 전파된 화염은 다시 양의 부력효과로 인하여 미연과 기연의 밀도차로 인해 국부유동속도의 증가로 다시 화염은 후류로 밀려나게 되는 반복적인 자기진동의 현상을 규명하였다. 부력의 효과가 지배적인 조건의 화염진동뿐만 아니라 제트 모멘텀이 지배적인 조건에서의 화염 자기진동을 관찰하기 위해 작은 노즐직경을 이용하여 부력에 의한 자기진동과 다른 거동을 보인 자기진동을 관찰하였으며, 이는 이전 연구결과인 수치해석적으로 규명한, 물질-열확산에 의한 자기진동의 거동과 유사하였다. 이를 확증하기 위한 낙하탑 실험을 통하여 미소중력조건에서의 실험을 진행한 결과, 물질-열확산에 의한 자기진동으로 유추되는 자기진동을 실험적으로 관찰하였다.

Keywords: Shumidt number, Richadson number, negative buoyancy, Lewis number

제 1 장 서 론

난류강도가 크지 않은 난류화염의 구조는 층류소화염의 양상
블로 구성되어 있다. 층류 부상화염은 난류화염 제트의 구조를 파
악하기 위한 연소장으로 부상화염을 통한 많은 화염구조 연구가
진행되어 왔다. 층류 부상화염의 안정화 메카니즘은 화염전파속도
와 국부유동속도의 벡터합이 일치하는 지점에서 화염이 존재하며,
화염선단은 희박, 과농 예혼합 화염과 확산화염이 동시에 존재하는
삼지화염 구조 (tribranchial flame)를 가진다. 이러한 층류 부상화염
의 거동은 제트 상사성 이론으로 잘 묘사되었으며 부상화염은 슈
미트 수가 1보다 큰 조건에서만 존재한다고 보고된 바 있다. 이전
연구에 따르면 슈미트 수가 1보다 작은 경우, 속도장과 농도장의
교차점이 유량의 증가에 따라 감소하는 현상을 이론적으로 나타내
었고 부상화염이 존재하지 않는 원인을 제시하였다.

층류 부상화염에서 나타나는 진동 불안정성은 화염소화한계
근처에서 관찰되었으며 앞선 부상화염 안정화 메카니즘에 근거하

여 설명이 가능하여야 한다. 화염의 자기진동은 소화 근처에서의 물질-열 확산의 자기진동, 부력에 의한 자기진동이 나타나는 것으로 알려져 있으며, 두 자기진동의 명확한 구분과 자기진동의 메카니즘이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 제트 상사성 이론으로 설명되었던 유량증가에 따른 속도장과 농도장의 교차점 감소현상을 실험적으로 관찰하였고 이를 수치해석적 실험적 기법을 이용하여 규명하였다. 또한 소화근처에서 나타나는 자기진동을 구분하였다. 또한 부력에 의한 자기진동의 명확한 메카니즘과 낙하탑을 이용한 미소중력 실험을 통해 부력에 의한 자기진동과 물질-열 확산에 의한 자기진동을 구분하였다.

제 2 장 실험장치 및 데이터 분석

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험 장치의 개략도이다. 본 연구에서는 화염체적 감소로 인한 부력효과 억제와 높은 노즐출구 속도를 얻기 위해 다양한 노즐직경을 이용하였다. 실험 장치는 유량 조절부, 노즐부, 측정부로 구성되어 있으며, 연료는 메탄, 프로판, n-부탄을 사용하였으며, 희석제로는 질소와 헬륨, 그리고 아르곤을 사용하였다. 노즐 출구에서 완전 발달된 유동을 얻기 위해 레이놀즈 수에 따른 충분한 노즐길이를 확보하였다. 연료와 희석제의 순도는 모두 99.99%를 사용하였으며, 외부 교란을 방지하기 위해 직경 10, 높이 40 cm의 원형 아크릴 칸막이를 설치하였다. 동축류의 균일한 유동장을 얻기 위해 미세한 메쉬 스크린, 히너컴, 유리구슬을 설치하였다. 연료는 99.999% 고순도 메탄, 에탄, 프로판, 그리고 부탄을 사용하였으며, 희석제인 질소, 아르곤, 그리고 헬륨은 각각 99.95%를 사용하였다. 온도 및 습도에 영향을 받지않기 위해 항온항습실 내부에 공기 압축기를 설치하여 항온항습실 내부 온도

22-24도 습도 40-44%가 되도록 하였다. 화염의 길이와 폭을 측정하기 위해, 카세트미터와 디지털 VCR 카메라 (SONY-HDR-CX560)를 2차원 이송 장치 상단에 부착하여 측정하였고, 이미지 프로세싱을 이용하여 화염은 선단과 화염 너비 그리고 팁 높이를 매트랩 기반의 프로그램으로 분석하였다. 유동 가시화 및 유동속도(PIV, partial image velocimetry)를 측정하기 위하여 아르곤 레이저 (Coherent, Genesis 532-2000 S OPSL, 532 nm), 가시화용 입자는 oil mist를 사용하였다. 또한 OH* 화학종을 측정하기 위해 레이저 Nd:YAG(Continuum, Pwerlite 9010)를 사용하여 특정 화학종의 에너지를 높였으며, 저위상태로 전환시 파장을 ICCD 카메라(Princeton Instruments, PI-MAX2-1024i)와 고속 카메라로 측정하는 PLIF(planar laser-induced fluorescence)기법을 이용하였다. 마지막으로 미소중력상태에서의 자기진동 관찰을 위해 10m 높이의 낙하탑(Korean Maritime University)을 이용하였으며, 축소된 실험장치를 낙하탑 캡슐내에 설치하였다.

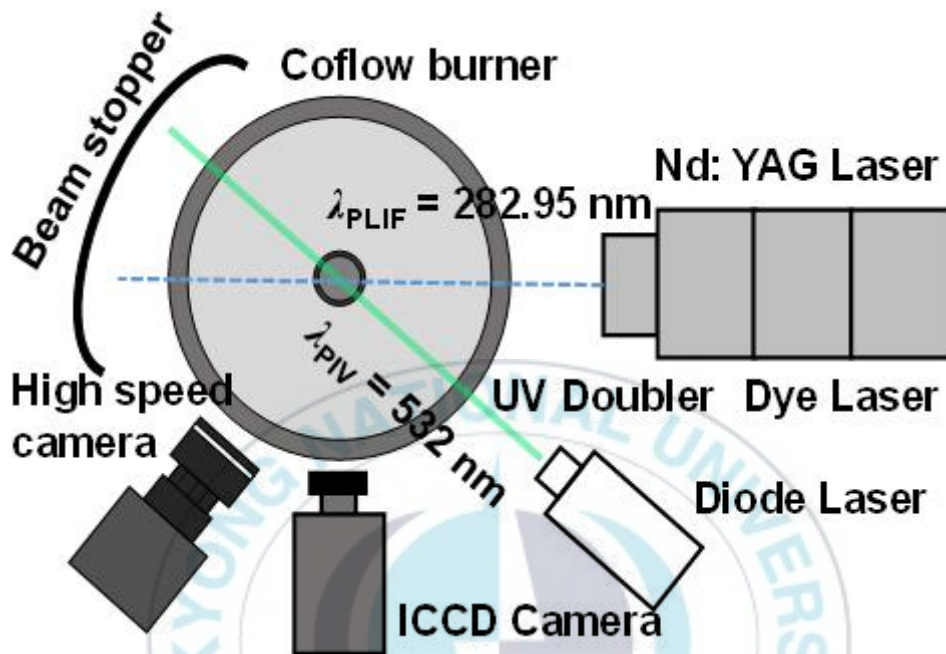


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup



Fig. 2 (left) overall facility of drop tower and (right) experimental setup in drop tower capsule.

제 3 장 실험결과 및 논의

3.1. 부상화염 메카니즘

층류 부상화염은 제트 상사성 이론에 근거하여 화염전파속도와 국부유동속도가 균형을 이루는 지점에서 이론당량비선을 따라 존재하며 화염선단은 희박, 과농 예혼합 및 확산화염이 동시에 존재하는 삼지화염(tribrachial flame)의 구조를 가진다. 제트 상사성 이론의 해와 관련하여 부상화염 높이는 아래와 같이 나타난다 [1, 2].

$$\frac{H_L}{d^2} \frac{\nu}{S_e} = \left(\frac{3}{32} \frac{3}{2Sc+1} \frac{Y_{F,st}}{Y_{F,0}} \right)^{\frac{1}{Sc-1}} \left(\frac{u_0}{S_e} \right)^{\frac{2Sc-1}{Sc-1}}$$

부상높이는 노즐출구 속도 U_0 와 슈미트 수 Sc , 그리고 노즐 직경과 관련되는 것을 알 수 있으며 자세한 속도와 농도장의 해는 참고문헌에 자세히 나타나 있다 [1, 2]. 앞서 언급한 바와 같이 속도장과 농도장의 교차점은 부상화염이 존재하는 위치이며, 슈미트 수에 따라 속도에 따른 부상높이는 달라진다. 이해를 돕기 위해 간

단한 도식을 Fig. 3에 나타내었다. 슈미트수가 1보다 큰 경우(a), 속도장이 외부에서 내부로 농도장과 교차하게 되며, 유량을 증가시킬수록 속도장과 농도장의 교차점, 즉 부상높이가 증가하는 것을 알 수 있다. 슈미트 수가 0.5와 1사이에 있는 경우(b), 앞선 경우와 반대로 농도장 선이 외부에서 내부로 속도장 선과 교차하며, 유량을 증가시킬수록 교차점은 감소하게 된다. 이는 물리적으로 설명될 수 없으므로 부상화염이 존재하지 않는다고 보고된 바 있다. 마지막으로 슈미트 수가 0.5보다 작을 경우(c), 농도장 선이 외부에서 내부로 속도장과 교차하며, 노즐 근처로 갈수록 반경방향으로 나아간다. 이는 back diffusion 효과로 층류조건에서는 부상화염이 나타나지 않는다고 보고하였다.

Figure 4는 슈미트 수에 따라 부상화염 안정화 메커니즘을 설명하기 위한 간략한 도식을 나타내었다. 슈미트수가 1보다 클 경우, 농도장이 내부에서 외부로 속도장선과 교차함을 알 수 있다. 이는 부상화염은 이론당량비선을 따르며 부상화염의 위치가 교차점보다 낮은 위치에 존재할 때, 보다 높은 국부유동속도로 후류로 밀려나

게 되며 교차점에서 화염이 위치하게 된다. 반면에 부상화염의 위치가 교차점보다 높은 위치에 존재할 경우, 보다 낮은 국부유동속도로 인해 화염은 상류로 전파하여 교차점에 위치하게 된다. 하지만 슈미트 수가 1보다 작은 두 경우, 농도장 선은 외부에서 내부로 속도장과 교차하게 되며, 부상화염의 위치가 교차점보다 낮은 위치에 존재할 때, 보다 낮은 국부유동속도로 화염은 노즐로 부착하게 되는 부착화염이 나타난다. 반면 부상화염의 위치가 교차점보다 높은 위치에 존재할 경우, 보다 높은 국부유동속도로 인해 화염날림이 발생한다. 따라서 슈미트 수가 1보다 작은 경우 부상화염은 존재할 수 없다 [1-6]. 하지만 제트 상사성 이론은 체적력을 무시한 지배 방정식을 기반으로 하였다.

Won et al은 슈미트수가 1보다 작은 질소가 희석된 메탄 화염일 경우, 부력으로 인한 국부유동속도의 증가로 화염전파속도가 유동속도보다 클 조건일 때 존재할 수 있다는 연구 결과를 보고한 바 있다 [7]. 앞선 연구를 기반으로 본 연구에서는 슈미트 수가 1보다 작은 조건일 경우 부상화염이 존재한다면 노즐출구속도의 증가에

따른 부상높이 감소 현상의 실험적 관찰과 만약 존재한다면 이에
따른 메카니즘을 제시하려 한다.



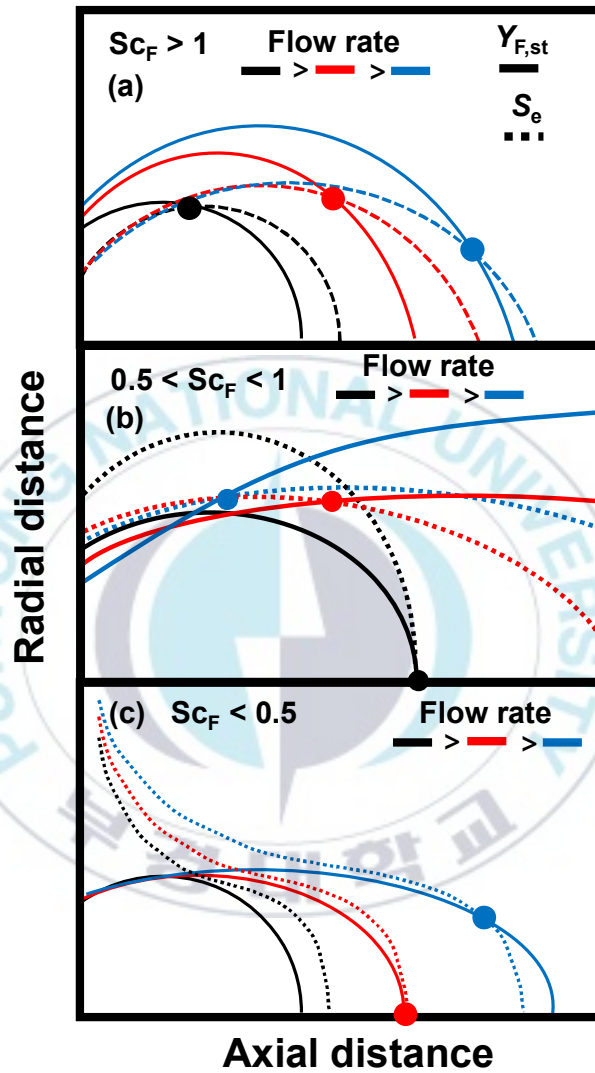


Fig. 3. The diagram of constant velocity and concentration contour for varied Sc

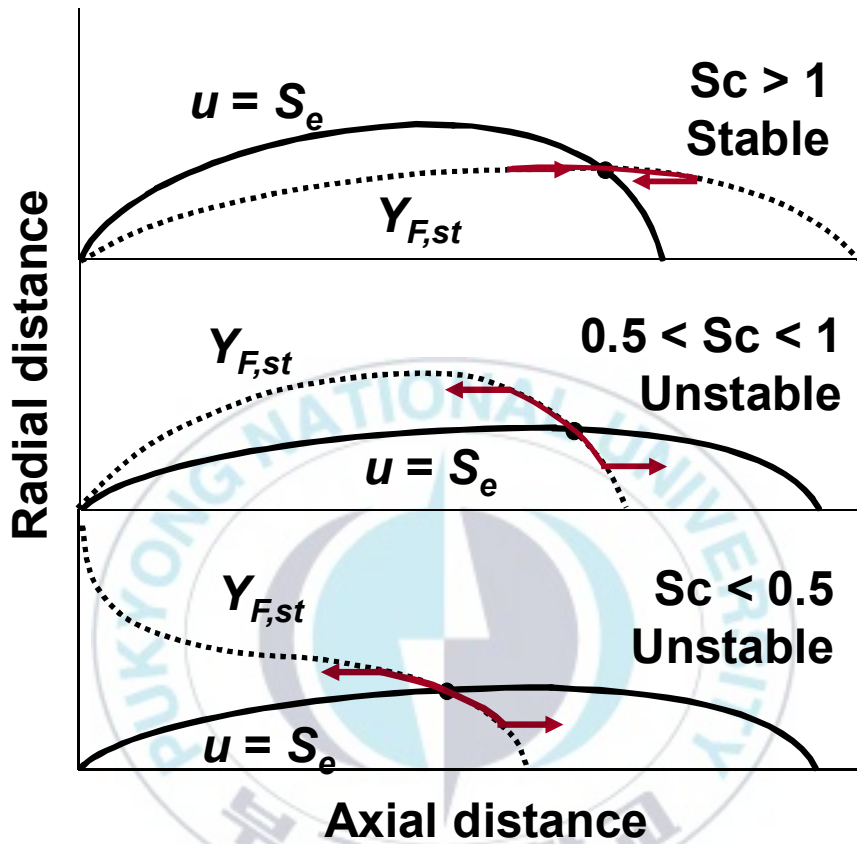


Fig. 4. The illustration of stabilization mechanism on lifted flame with varied Sc .

3.2. 부상높이 감소 화염과 메카니즘

Figure 5는 슈미트 수가 1보다 작은 질소가 희석된 메탄화염 조건에서 대표적인 물분을 $X_{F,0} = 0.32(a)$ 과 $0.3(b)$ 일 경우, 노즐출구속도 증가에 따른 부상화염의 거동의 직접 이미지를 나타낸 사진이다. Fig 5(a)는 노즐출구속도 증가에 부상높이가 증가하는 화염으로 이전 연구에서 보고되었다. 부력이 지배적인 조건에서 슈미트 수가 1보다 작은 연료에서도 부상하는 화염을 보고하였으며, 부상높이가 증가할수록 화염 곡률 증가로 인한 전파속도 감소로 부상높이는 증가한다는 결과가 있다. 반면, Fig 5(b)에서는 노즐출구속도 증가에 따라 부상높이가 감소하였다 증가하는 U-형태의 부상높이를 나타내며 이는 이전연구에서 보고된 바 없다. 본 연구에서는 이러한 특이한 거동을 보이는 화염의 영향은 부력과 복사 열손실 두 가지로 가정하였다. 부력의 효과는 노즐출구속도로 대표되는 대류 모멘텀과 밀도차로 나타나는 부력의 비로 표현되는 리차

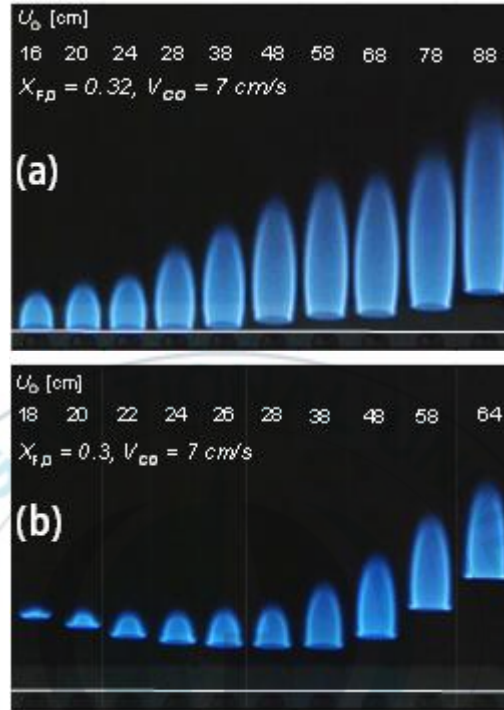


Fig. 5 Direct photographs of typical lifted flames with jet velocities; $X_{F,0} = 0.32$ (a) and 0.32 (b)

드른 수로 나타내었으며 복사 열손실의 가정값은 Burke-Shumann 해를 이용하였다 [7]. Burke-Shumann 해는 부착화염에서의 확산 화염 거동을 나타낸다. 따라서 노즐출구속도가 0에 가까운 값을 가질 경우 확산화염길이는 연료의 확산으로만 존재하는 Streamwise

diffusion length값으로 수렴하게 된다. 이는 대류가 0 에 가까운 값을 가질 경우 화염은 지배적인 복사열손실로 인해 화염은 소화하게 된다. 복사 열손실의 증가는 화염전파속도를 감소시키므로 부상화염의 높이가 Streamwise diffusion length 근처에 존재한다면 부상높이 감소 현상은 복사 열손실에 의한 영향으로 유추해볼 수 있다. 이전 연구를 기반으로 Burke-Shumann 해는 아래와 같다 [8].

$$B_s = [c(1 + \tilde{Y}_{o0}) - \tilde{Y}_{o0}] + 2(1 + \tilde{Y}_{o0}) \sum_{n=1}^{\infty} (\sin n\pi c)(\cos n\pi x) \exp\left[\frac{(Pe - a_n)Z_f}{2}\right]/(n\pi)$$

$$B_T = [c + \tilde{T}_0] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (\sin n\pi c)(\cos n\pi x) \exp\left[\frac{(Pe - a_n)Z_f}{2}\right]/(n\pi)$$

$$where B = \frac{\tilde{Y}_F}{Le_F} - \frac{\tilde{Y}_O}{Le_O} and B = \frac{\tilde{Y}_F}{Le_F} + \tilde{T}, Le_F = Le_O = 1$$

루이스 수는 1로 가정하였으며, 여기서 $Pe \rightarrow 0$ 일 경우, Z_f 의 값을 구한다면 streamwise diffusion length를 구할 수 있다. Figure 6은 노즐출구 속도에 따른 부상높이를 여러 연료 물분율에

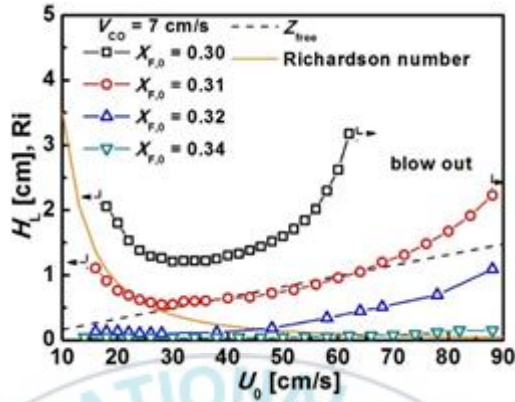


Fig. 6 Liftoff height versus fuel jet velocity at various mole fractions

따라 나타낸 그래프이다. 연료몰분율 0.30 이하로는 화염이 존재하지 않았으며 0.34 이상의 연료몰분율 조건에서는 모두 부착화염을 보였다. 검은색 점선은 완전발달된 영역과 발달영역을 구분하는 Z_{free} 선으로 $Z_{free}/D = 0.0165 \times Re_d$ 로 계산하였다. 이는 Poiseuille 유동을 가정할 때 제트 중심 속도인 U_{CL} 을 $2U_0$ 로 자유제트 이론에서 추정된 관계식이다 [9]. 낮은 노즐출구속도 조건에서는 부력의 효과가 유동의 대류보다 지배적이기 때문에 이를 리차드슨 수 ($Ri = (\rho_F - \rho_b)gDU_0^2$)로 표현하였으며 노란색 실선으로 표시하였다. 붉은색 점선은 앞서 언급한 Burke Shumann해로 streamwise diffusion length는 0.11 cm이다. 이전 연구와 다르게 부상화염은

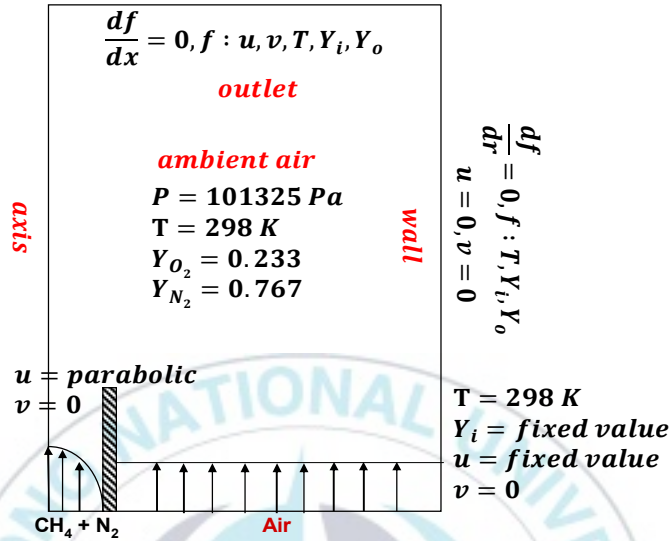


Fig. 7. numerical geometry and boundary conditions.

발달된 영역에서도 존재함을 알 수 있으며, 부상높이 감소 구간 역기 발달된 영역에서 존재하였다. 이는 이전 연구결과인 발달영역에서 부력에 의한 부상화염 존재와는 다른 결과를 나타내었다. 연료물분을 0.30과 0.31 조건에서 최소부상높이는 1.21 그리고 0.55 cm로 diffusion length의 범위를 벗어나므로 복사열손실에 의한 영향은 미미하다고 예측할 수 있는 반면, 노즐출구속도가 감소할수록 리차드슨 수는 급격히 증가하므로 부력에 의한 효과로 예측할 수 있다. 하지만 복사열손실과 부력의 효과를 보기 위

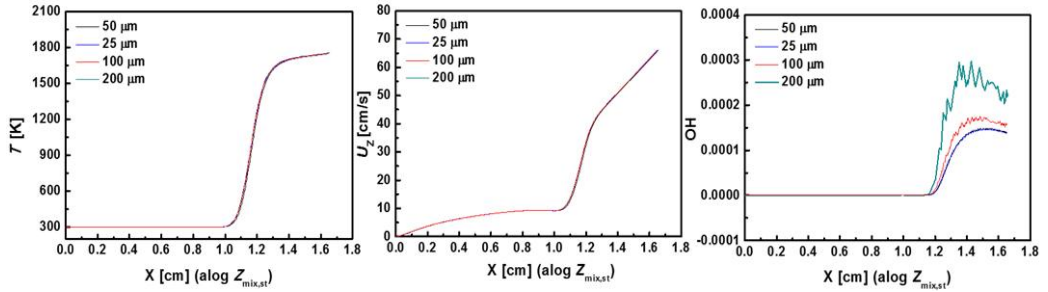


Fig. 8. The performance of grid convergence at $X_{F,0} = 0.30$ $U_0 = 16$ cm/s.

해서는 실험적 한계가 존재하기 때문에 수치해석을 진행하였다. 동축류 제트 부상화염을 수치적으로 확인하기 위해, 비정상, 축대칭, 원통 좌표계(r, x)를 기준으로 OpenFOAM 기반의 laminarSMOKE 코드 [10-12]를 사용하여 질량, 모멘텀, 화학종 및 에너지 방정식을 계산하였다. time integration과 spatial discretization method는 각각 implicit Eulerian scheme과 second-order Gaussian central difference scheme을 사용하였다. 계산은 Fickian과 Soret 효과를 포함시켰으며 복사열손실은 주요 화학종인 CH_4 , CO_2 , H_2O 와 CO 로 Optical-thin model을 이용하였다 [13]. 계산에 이용된 Geometry와 경계조건은 Fig. 7에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 원통좌표

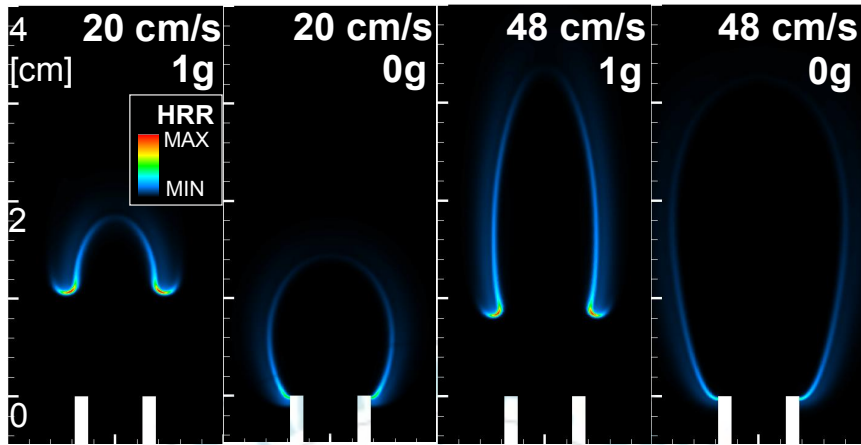


Fig. 9. Heat release rate contours with (1g) without (0g) considering buoyancy at $U_0 = 20$ and 48 cm/s for $X_{F,0} = 0.30$.

계를 기반으로 축대칭으로 계산을 하였으며 벽면에서는 no slip condition로 설정하였다. Mesh 사이즈를 결정하기 위하여 $X_{F,0} = 0.3$, $U_0 = 16$ cm/s 조건에서 25, 50, 100, 그리고 200 μm 를 수행하였으며 이를 Fig. 8에 나타내었다. 그 결과, 50 μm 일 경우 지배방정식의 해가 수렴하므로 50 μm 로 결정하였다. 실제 유동과 유사한 속도 profile을 나타내기 위해 1.3 cm 아래에서부터 parabolic profile로 연료속도를 주입시켰으며, 동축류 속도는 uniform flow로

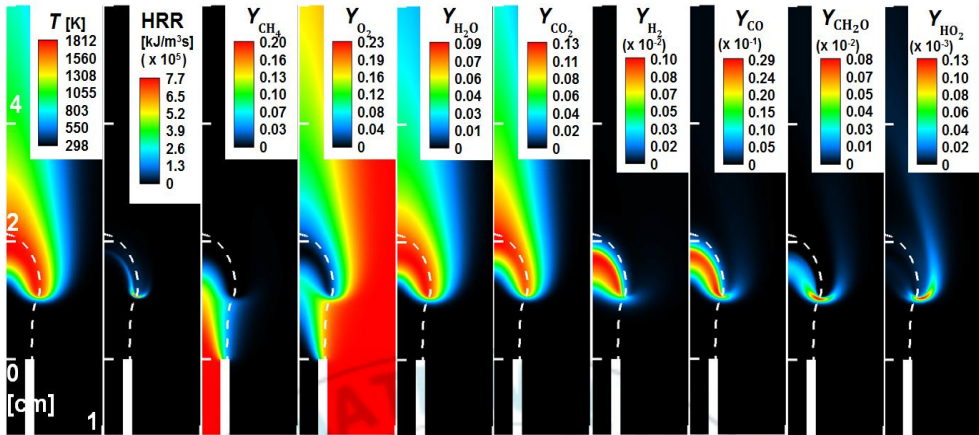


Fig. 10. Temperature, heat release rate, and mass fraction profiles of a lifted flame for $U_0 = 20$ cm/s and $X_{F,0} = 0.30$.

설정하였다. 사용된 화학반응 메카니즘은 GRI v3.0을 기반으로 한 skeletal reaction mechanism으로 30가지 화학종과 184 화학반응을 채택하였다. 앞서 실험결과를 기반으로 낮은 노즐출구속도 조건일 경우, 높은 리차드슨 수를 나타내었으며, 부력의 효과가 지배적임을 유추할 수 있었다. 부력의 효과를 알아보기 위해, 대표적인 조건인 $U_0 = 20$ 과 48cm/s에서 중력과 무중력 상태에서의 화염거동을 Fig. 9에 나타내었다. 그 결과, 낮은 노즐출구속도에서 부상화염은 부력의 효과가 상당히 중효한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 따

라서 본 연구의 주제인 노즐출구속도 증가에 따라 부상높이가 감소 후 증가하는 U-형태의 화염에 대해서 화염구조를 살펴보았다. 대표적인 조건, $X_{F,0} = 0.3$, $U_0 = 20$ cm/s에 대해서 온도와 열방출량(HRR), 그리고 몇 가지 화학종 질량분율을 Fig. 10에 나타내었다. 흰색 점선은 이론당량비선을 나타내었다. 온도와 OH의 최대값은 이론당량비선을 따라 존재함을 알 수 있으며 열방출량은 희박 과농 예혼합 화염을 따라 형성되며 이론당량비선을 따라 최대값을 가진다. 또한 열방출량과 OH profile을 통해 화염은 삼지화염구조(tribranchial edge flame)를 가진다는 것을 알 수 있다. 메탄은 혼합층을 따라 희석되고 CO와 H₂로 부분적으로 산화된다. CH₄의 소비는 반응영역 근처에서 H의 추출되어 CH₃가 형성되는 반면, OH 라디칼은 H와 O라디칼과 함께 고온영역에서 지배적인 chain-branching reaction ($H + O_2 \rightarrow O + OH$)에 의해 형성된다. 또한 CHO형성된 후, CO와 H₂로 전환된다. H, OH 및 O의 주요 라디칼은 확산화염 근처에서 최대값을 가진다. 산소는 혼합층을 통해 연료 스트림으로 확산되고, 이후 확산 화염을 형성하기 위해 예혼합 화염 축 방향 영역으로 확산된다. CH₂O, HO₂ 및 H₂O₂의 저

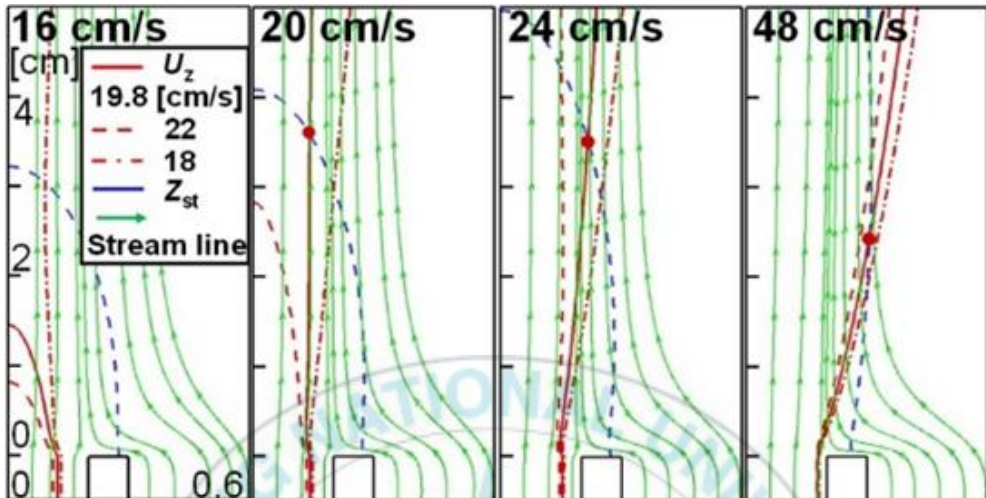


Fig. 11. Streamlines (green), stoichiometric mixture fraction contour (dashed blue), and iso-velocity contours corresponding to the stoichiometric laminar burning velocity at various fuel jet velocities for a cold jet with $X_{F,0} = 0.30$.

온 kinetics와 관련된 화학종은 예혼합 화염 근처에서 나타나며, 이것은 산화제 스트림으로부터의 과농한 O_2 효과로 알 수 있다. 마지막으로, H_2O 및 CO_2 의 주요 생성물의 profile은 온도선과 유사하다. 앞서 언급한 바와 같이, 부상화염은 화염 전파속도와 국부유동속도 벡터합으로 표현된다. 따라서 cold flow 상태에서의 국부유동

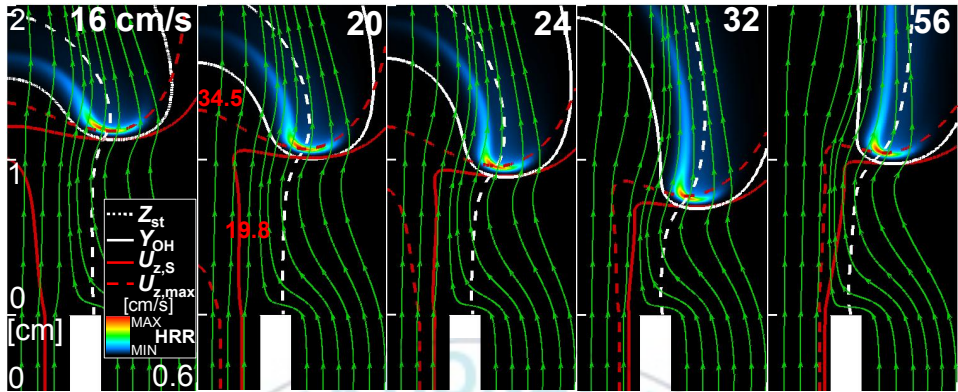


Fig. 12. Behavior of a lifted flame with nozzle exit velocity simulated numerically in a nitrogen-diluted methane jet flame with $X_{F,0} = 0.30$ for $D = 4.0$ mm.

속도와 reacting flow에서의 화염전파속도 및 국부유동속도를 검토할 필요가 있다. Figure 11는 cold flow 상태에서의 노즐출구속도에 따른 속도장과 유선을 나타낸 그래프이다. 질소가 희석된 메탄물분을 0.30 일 경우 이론당량비 조건에서의 전파속도 19.80 cm/s로 GRI v3.0 기반의 PREMIX code로 계산하였다. 따라서 18, 19.8, 그리고 22 cm/s 속도장을 붉은선으로 표현하였으며, 파란선은 이론당량비선을 나타내었다. 노즐출구속도 16 cm/s일 경우, 속도장(S_L^0

= 19.8 cm/s) 과 농도장(Z_{st})의 교차점이 나타나지 않는 반면, 20, 24, 그리고 48 cm/s 조건일 경우 교차점이 존재하며 노즐출구속도가 증가할수록 교차점의 높이는 감소하였다. 이는 이전 연구 결과인, 슈미트 수가 0.5와 1사이의 값을 가지는 연료는 노즐출구속도 증가에 따라 교차점이 감소한다는 제트 상사성 이론 해의 결과와 일치하였다. 하지만 cold flow의 관점으로는 안정화된 부상화염의 메커니즘을 유추할 수 없다. 따라서 U-형태의 화염거동을 설명하기 위해, 화학반응과 부력 그리고 복사열손실이 포함된 reacting flow를 수치해석적으로 계산하였으며 이를 Fig. 10에 나타내었다. Figure 12는 color-code로 나타낸 열방출량(HRR), 유선 (green), 이론당량비 선(dashed white), 그리고 OH 질량분율 (white solid, $Y_{OH} = 6.5 \times 10^{-7}$)을 노즐출구속도에 따라 나타내었으며 화염전과 속도와 같은 속도장(red solid, $U_0 = S_L^0$)과 최대 열방출량 점을 지나는 속도장(red dotted, $U_{z,s}$)을 함께 표현하였다. 와의 contour line은 적합하게 삼지화염의 삼지점을 지나는 것을 알 수 있다. $U_0 = 16$ cm/s일 경우, $U_{z,s}$ 등고선이 연결되지 않음을 볼 수 있다. 이는 낮은 노즐출구속도로 인해 연료제트로부터의 축 방향 속도는

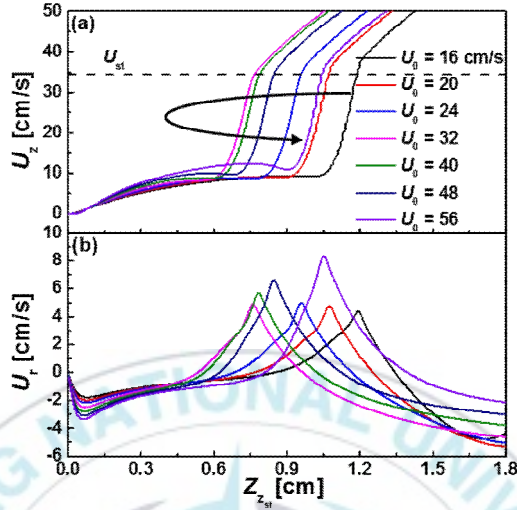


Fig. 13. Axial (a) and radial (b) flow speeds with axial distance along the stoichiometric mixture fraction contour in terms of jet velocity.

쇠퇴되며 노즐 외부 유선의 내부 방향으로 나타나는 것과 같이 부력에 의해 다시 가속화 됨을 알 수 있다. U_0 가 증가함에 따라 제트 운동량을 증가시키고 부력의 효과를 상대적으로 감소키며 Z_{st} 와 $U_{z,s}$ 사이의 교차점은 상류로 이동하며 화염의 부상높이를 감소시킨다. U_0 를 더 증가시킬 경우, 제트 모멘텀에 대한 부력의 상대적 효과는 감소하며, 제트 모멘텀의 지배적인 효과로 다시 부상높이는 증가하게 된다. 또한 Z_{st} contour line은 제트 모멘텀의 증가함에

따라 반경방향 외부로 이동하게 되는데 이는 삼지화염의 반경 방향 위치가 내부로 들어오는 부력의 유동과 외부로 나아가는 제트 유동과 가스 팽창의 경쟁으로 인해 조정되는 것을 의미한다. 이를 기반으로 이론당량비선을 따르는 축방향에 따라 축 및 반경방향의 유동속도를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13(a)와 (b)는 삼지점 근처의 축 및 반경방향 속도를 나타내며 화살표는 U_0 가 증가함에 따라 유동속도의 경향성을 나타낸다. 변곡점에 대한 축 방향 위치는 $U_0 = 32 \text{ cm/s}$ 까지 감소하였다가 U_0 값이 더욱 클수록 증가한다. 모든 경우에 있어서, 최대 및 최소 U_z 변곡점이 존재하며, 최소 변곡점은 S_L^0 보다 작은 값을 가진다. Fig. 13(b)의 경우, 노즐근처인 Z_{zst} 가 작은 값을 가질 때, 부력의 효과로 내부로 들어오는 유동에 의해 음의 값을 가지며, 이후 가스 팽창에 의해 외부방향으로 반경 방향의 속도가 증가하게 된다. 이론당량비선을 따르는 최소 변곡점의 속도는 약 10 cm/s 이며, 이는 화염전파속도인 19.8 cm/s 보다 작은 것을 알 수 있다. 삼지점 앞에 예열층인 zone thickness는 $\delta_T = (T_{ad} - T_u) / (dT/dx)_{MAX}$ 로 계산하였으며, 값은 0.68 mm 이다. 이는 최대 열방출량 점에서부터 S_L^0 와 일치하는 속도장까지의 거리

가 유사하다. Figure 14는 수치해석적 결과인 복사열손실을 고려한 결과는 실선, 고려하지 않은 결과는 점선으로 나타내었으며 이를 실험값과 비교한 그래프이다. 수치해석과 실험값의 차이는 존재하지만 비슷한 경향성을 나타내며, 복사열손실은 부상높이 감소 효과에 영향은 주지만 미미한 것을 알 수 있다. 따라서 슈미트 수가 0.5와 1사이의 값을 가지는 화염은 부력에 의해 부상하게 되며 노즐출구속도를 증가시킬수록 모멘텀과 부력의 경쟁으로 인해 부상

$X_{F,diluents}$	Ar	He	N2
$X_{F,O}$	0.3	0.3	0.3
D_F (cm ² /s)	0.225	0.225	0.225
$\frac{\mu}{\rho}$ (cm/s)	0.154	0.202	0.159
Sc (mm)	0.699	0.868	0.713
$(\rho_f - \rho_{co})$	0.0002099	-0.001135	-0.0002366
$(\rho_b - \rho_{co})$	0.173478	0.134418	0.167918
Ω_i	$X_{Ar} + X_{N_2} = 1$	$X_{He} + X_{N_2} = 1$	-

Table 1. Diluents property

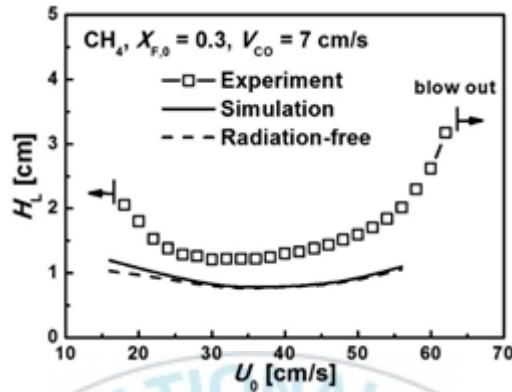


Fig. 14. Experimental and simulated liftoff heights with jet velocity for $X_{F,0} = 0.30$.

높이감소 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 기반으로 여러 가지 슈미트 수에 따라 부상높이를 확인하려 한다. 연료 물분율은 0.30으로 고정시킨 채 다양한 희석제를 이용하여 슈미트 수를 조정하였다. 희석률은 $X_i + X_{N2} = 0.1$ ($i = \text{He or CO}_2$)로 정의하였다. 표 1과 같이 희석제는 Ar, He, 그리고 N_2 를 사용하였으며, 그에 따른 property들을 나타내었다. Figure 15는 다양한 희석제를 희석하여 노즐출구속도에 따른 부상높이를 나타낸 그래프이다. 질소 100% 희석한 검정색 scatter를 기준으로 붉은색은 헬륨 그리고 파

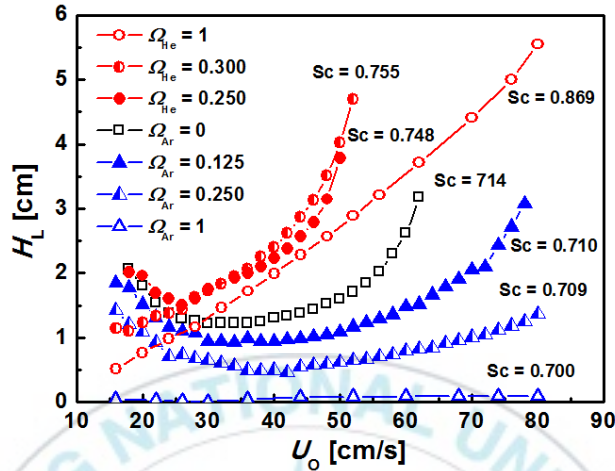


Fig. 15. liftoff heights as a functional dependency of nozzle exit velocity with a variety of Sc.

란색은 아르곤을 희석한 화염을 나타낸다. 헬륨을 희석한 $Sc = 0.755$ 를 기준으로 그 이상 슈미트 수를 가지는 화염은 U-형태의 화염거동을 나타나지 않았다. 또한 아르곤을 희석한 경우 슈미트 수 0.709 이하의 값에서는 진동하는 화염과 부착화염이 나타났다. 이는 분자량이 큰 아르곤을 희석할 경우 음의 부력이 연료 스트림에 영향을 주는 것으로 추측할 수 있다. 따라서 임계 슈미트 수 0.755를 기준으로 그 이상의 슈미트 수를 가지는 화염은 U-형태의

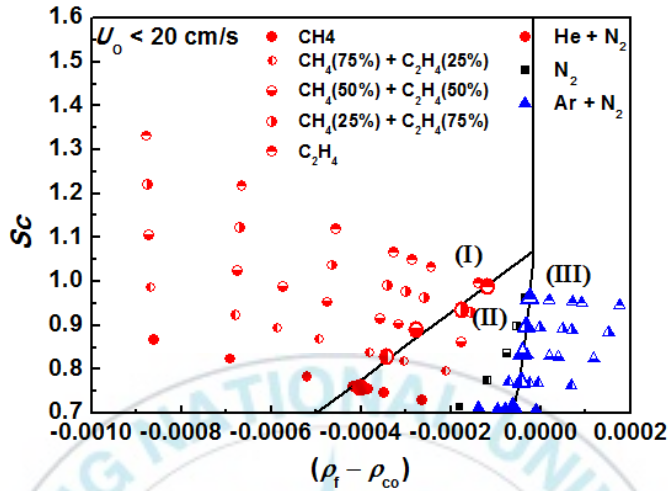


Fig. 16. The stability map with Sc versus $(\rho_f - \rho_{co})$ with varied fuels and diluents.

화염거동을 나타내는 것을 알 수 있다. 여러 가지 화염 거동을 구분하기 위해 여러 가지 연료를 이용하여 밀도차에 따른 슈미트수를 Fig. 16에 나타내었다. 크게 세가지 화염거동을 볼 수 있다. (I) 노즐출구속도 증가에 따라 부상높이가 증가하는 구간, (II) 부상높이가 감소하는 구간, 그리고 (III) 화염 자기진동 구간. Regime I은 이전 연구결과에서 보고한 바 있으며 Regime III의 자기진동 화염은 동축류 산화제와 연료와 밀도차가 작아질수록 또는 연료의 밀

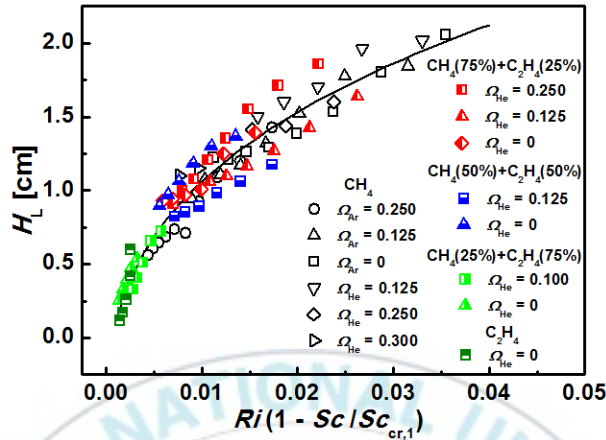


Fig. 17. Functional dependence of the Strouhal number on related Ri and Sc for decreasing- H_L

도가 클수록 화염이 진동하는 것을 알 수 있다. 밀도차의 효과를 보기 위해 cold flow와 reacting flow 일때의 가시화 사진을 Fig. 17에 보였다. 먼저 cold flow 조건일 경우, 연료의 무거운 분자량으로 인해 축 방향의 속도가 쇠퇴되며 반경방향으로 연료의 스트림이 퍼져 나감을 알 수 있는 반면, reacting flow 조건일 경우, 부력의 효과로 외부의 유동이 화염 내부로 침투하는 것을 알 수있다. 따라서 이러한 화염의 자기진동은 부력의 효과로 추후에 자세히 다룰 예정이다.

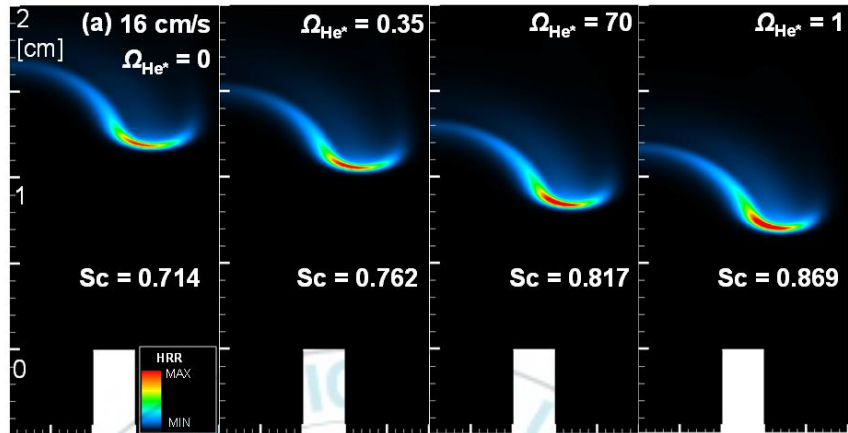


Fig. 18. Behavior of lifted flame with nozzle exit velocity simulated numerically in constant buoyant effect with varied Sc .

Regime II에서는 노즐출구속도 증가에 따른 부상높이 감소 구간으로 이는 앞서 부력의 효과로 설명한 바 있다. 따라서 리차드슨 수와 임계 Sc 를 이용하여 특성화 작업을 진행하였으며 이를 Fig. 18에 나타내었다. 부상높이감소 구간에서 부력의 효과를 나타내는 리차드슨 수가 증가할수록 부상높이는 증가하며 상관계수는 0.935로 관계식은 아래와 같다.

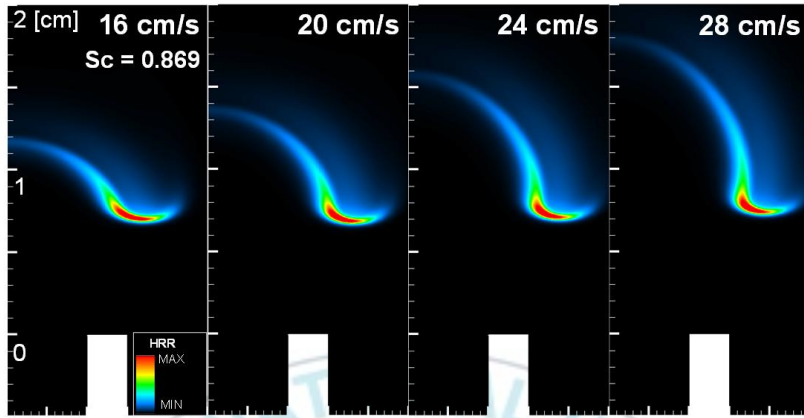


Fig. 19. Behavior of lifted flame simulated numerically in constant Sc as U_0 .

$$H_L = -0.74 + 0.84 Ri \left(1 - \frac{Sc_i}{Sc_{cr}}\right)^{0.33}$$

여러 슈미트 수에 따라 부상높이감소 구간의 존재 여부를 확인하였다. 현재까지 결과를 기반으로 같은 노즐출구속도에서 슈미트 수의 효과를 보기 위해서 수치해석 기법을 이용하였다. 인공적인 화학종, 헬륨의 transport property를 가지며 질소의 thermodynamic

property를 지닌 He^* 를 만들어 이를 희석제로 이용하였다. Figure 19는 $U_0 = 16 \text{ cm/s}$ 조건에서 인공적 화학종 He^* 첨가에 따른 부상높이를 나타낸 그래프이다. 이는 슈미트 수가 증가할수록 부상높이는 감소하는 것을 알 수 있으며, 부력의 효과를 억제하고 연료제트의 모멘텀이 지배적인 부상화염이 나타나는 것을 알 수 있다. $Sc = 0.869$ 를 고정시킨채 노즐출구속도를 증가 시켰을 경우, 부상높이 감소는 나타나지 않았으며 부상높이가 증가하는 화염거동만 나타났으며 이를 Fig. 17에 나타내었다.

3.3. 부력에 의한 자기진동

충류부상화염에서 나타나는 진동 불안정성은 안정화 메커니즘에 근거하여 설명이 가능하여야 하며 에지화염의 화염전파속도는 몇가지 요인들에 의해 영향을 받으며 진동하게 된다. 대표적으로 동축류 제트 부상화염에서 일어나는 자기진동은 부력의 효과로 보고된 바 있으며 그 외에도 여러 가지 효과로 자기진동이 발생한다 [7, 14, 15-19]. 이를 기반으로 앞선 Regime III에서는 진동하는 화염거동을 관찰할 수 있었다. 이는 연료와 산화제의 밀도차가 작을수록, 즉 연료의 밀도가 커질수록 Regime III 영역이 나타났으므로 기연과 미연의 밀도차로 인한 부력과 연료와 산화제의 밀도차로 인한 음의 부력의 효과를 확인할 필요가 있다.

화염진동을 관찰하기 위해, 보다 무거운 연료인 C_2H_4 , C_3H_8 , 그리고 C_4H_{10} 연료를 이용하였으며, 동축류측의 산화제의 밀도를 조절하기 위해 희석제를 조정하였다. 실험에 사용된 연료와 희석제는 아래 표 2에 나타나있다. 다양한 동축류 가스의 밀도를 조정하기

Fuel	Fuel mole fraction X_F	Fuel-stream density ρ_f [kg/m ³]	Coflow gas density ρ_{fco} [kg/m ³]	T_{ad} [K]* (min – max)
C_3H_8	0.120	1.22		1820 – 1930
	0.135	1.23		1850 – 1960
	0.150	1.24		1880 – 1990
	0.235	1.30		1970 – 2090
C_3H_8/C_2H_6 (1:1)	0.157	1.20	1.07 (at $X_{He} = 0.1$)	1850 – 1960
	0.174	1.21	– 1.23	1880 – 1990
	0.268	1.25	(at $X_{CO_2} = 0.1$)	1970 – 2090
	0.112	1.24		1820 – 1930
$C_3H_8/n-C_4H_{10}$ (3:1)	0.126	1.25		1850 – 1960
	0.141	1.26		1880 – 1990
	0.218	1.32		1970 – 2090

Table 2. Experimental conditions

위해 질소와 헬륨 그리고 이산화탄소를 공기 스트림에 희석하였으며 희석 체적 분율은 다음과 같이 정의하였다. $X_i + X_{N_2} = 0.1$ ($i = \text{He or CO}_2$), $X_{\text{air}} = 0.9$ (X_i and X_{N_2} were systematically varied between($X_i = 0, X_{N_2}=0.1$) and ($X_i = 0.1, X_{N_2}=0$)). 따라서, 동축류가스의 밀도(ρ_{co}) 는 $1.07(X_{He} = 0.1)$ 에서 $1.23 (X_{co_2} = 0.1)$ kg/m³으로 조절하였다. 전체적인 실험 조건에서 산소의 몰분율은 0.189로 고정되어 있으며 동축류 속도는 8.46 cm/s로 역시 고정하였다. 다양

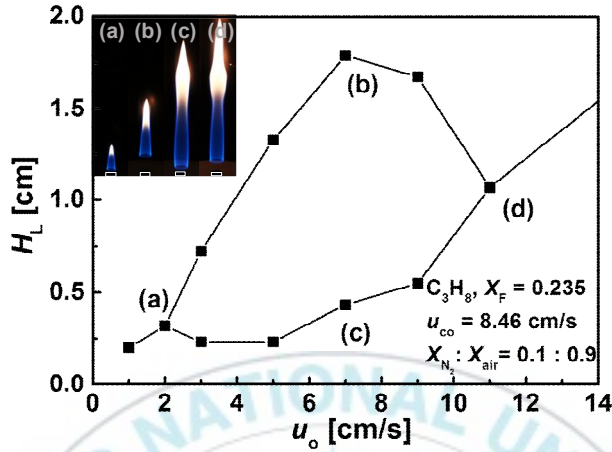


Fig. 20. Typical flame behavior in terms of the jet velocity and the flame base position at $X_{F,0} = 0.235$; $X_{N_2} = 0.1$ and $X_{air} = 0.9$ in the coflow with $V_{CO} = 8.46$ cm/s

한 연료 물분율 조건은 USC Mech II를 기반으로 한 PREMIX code를 이용하여 같은 단열화염온도 영역을 가지는 화염조건으로 채택하였다 (Table 2).

화염진동의 대표적인 조건을 나타내기 위해 연료 물분율 0.235, 동축류측에는 질소 물분율 0.1 희석된 프로판 화염에서의 자기진동을 노즐출구속도에 따른 부상높이를 Fig. 20에 나타내었다. 이전

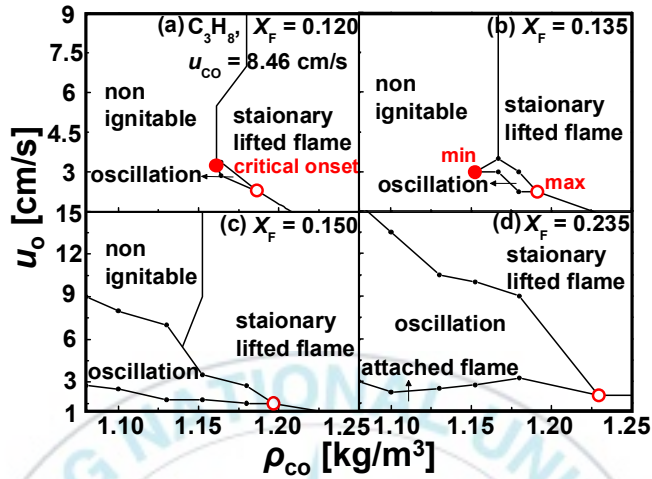


Fig. 21. Domains of the flame oscillation in terms of coflow density and jet velocity for propane at $V_{CO} = 8.46$ cm/s: a) $X_{F,0} = 0.120$, b) 0.135, c) 0.150, and d) 0.235.

연구결과 [7, 14]와 유사한 결과를 보였으며, $U_0 = 2$ cm/s에서 화염은 진동하기 시작하였으며 $U_0 = 11$ cm/s에서 안정화 되는 것을 알 수 있다. 노즐출구속도 $2 < U_0 < 11$ cm/s인 경우, 그래프의 상단가지에서는 진동하는 동안 노즐 림으로부터 화염베이스 최대높이를 나타내며 하단가지는 최소를 나타낸다. 이러한 화염진동은 이전 연구결과에서 부력에 의한 불안정성을 기인하는 진동으로 보

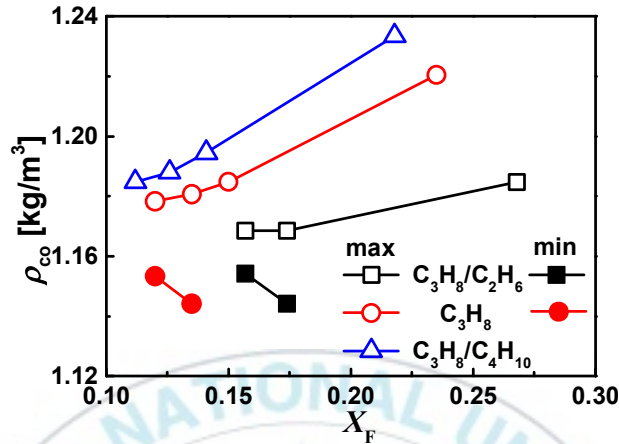


Fig. 22. Critical onset conditions for oscillation: open and closed symbols for the maximum and minimum coflow densities, respectively, at a given X_{F0} .

고된 바 있으며 이를 미소중력실험으로 증명한 바 있다. 하지만 이러한 시스템에서 부력은 두 가지의 체적력이 존재한다. 기연과 미연 밀도차로 인한 양의 부력과 화염선단 및 순수 연료와 산화제 스트림의 밀도차로 발생하는 음의 부력이 있다. 따라서 본 연구에서는 양의 부력과 음의 부력의 관계와 부력에 의한 자기진동의 면밀한 메카니즘을 분석하고자 하였다.

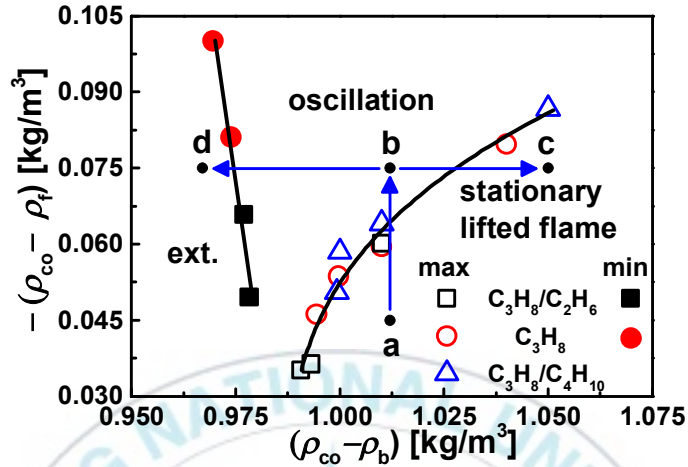


Fig. 23. Relations among critical onset conditions in terms of density differences; $\rho_f - \rho_{co}$ representing positive buoyancy and $\rho_{co} - \rho_b$ negative buoyancy on the fuel stream.

Figure 21는 대표적인 프로판 화염에 대한 여러 물분율에 따른 노즐출구속도와 동축류 밀도로 나타낸 화염 안정화 선도이다. 전체적으로, 연료 불분율이 증가할수록 노즐출구속도와 동축류 제트 밀도에 따른 화염진동 영역이 증가함을 알 수 있다. 여기서, 최대 임계 ρ_{co} 이하로 화염이 불안정 하였으며, 최대 임계 ρ_{co} 는 $X_{F,0} = 0.120, 0.135, 0.150$, 그리고 0.235 에 대해 각각 $0.178, 0.181, 1.185$,

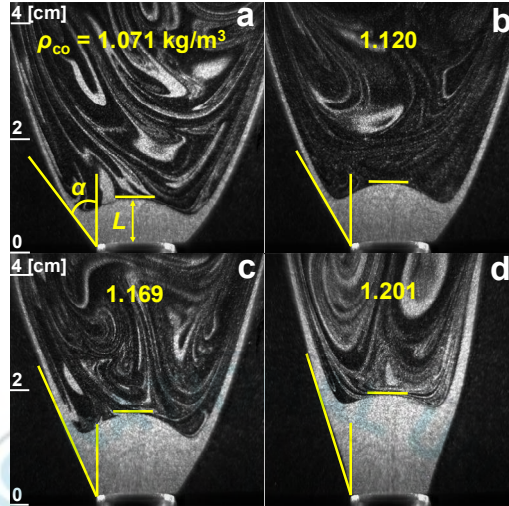


Fig. 24. Effects of coflow density on cold flow field with oil mist seeded into the fuel stream at $X_{F,0} = 0.150$ and $U_0 = 3$ cm/s: a) $\rho_{co} = 1.071$, b) 1.120, c) 1.169, and d) 1.201 kg/m³, at $V_{CO} = 8.46$ cm/s.

그리고 1.221 kg/m³로 연료 물분율이 증가할수록 증가하였다. 반면에 최소 임계 동축류 밀도는 본 연구에서 제한된 동축류 밀도 범위로 연료 물분율 0.120, 0.135 조건에서만 존재하였다.

각 연료 물분율에 대한 임계 동축류 밀도가 화염진동에 지배적인 영향을 미친다고 가정하여, 표 2와 마찬가지로 C₂H₄와 C₄H₁₀

을 이용하여 연구를 진행하였다. 프로판보다 가벼운 프로판 에탄 혼합물을 선택하여 낮은 밀도 조건과 프로판보다 분자량이 무거운 프로판과 n-부탄 혼합물을 이용하여 프로판과 비교하여 높은 밀도 조건을 각각 실험하여 이러한 임계 ρ_{co} 를 Fig. 22에 나타내었다. 연료 혼합물에 대해 연료 몰분율이 증가함에 따라 임계 ρ_{co} 또한 증가하였으며 무거운 분자량 혼합물을 사용할 경우 역시 증가하였다. 이러한 결과를 기반으로 본 연구에서 실험된 모든 조건에서의 임계 ρ_{co} 는 앞서 언급한 부력의 두 가지 물리적 효과로 상관 관계를 가짐을 알 수 있었으며 이를 Fig. 23에 보였다. 부상화염에서의 부력 효과는 순수 연료 스트림에 작용하는, 즉 동축류와 연료

의 밀도차 $(\rho_{co}-\rho_f) < 0$ 로 음의 부력을 초래하며 힘의 방향은 상류측으로 작용한다. 반면, $(\rho_{co}-\rho_b) > 0$ 는 화염이 존재할 경우 기연과 미연의 밀도차로 힘의 방향은 하류측으로 작용하게 된다. 체적은 화염진동 시 시간에 의존적인 함수이기 때문에 제외시켰다. Fig. 21에 도시된 바와 같이, 유사한 단열화염온도 조건을 가지는 다양한 연료혼합물과 연료 몰분율에 대해 안정한 부상 화염은 음

의 부력 효과로 인해 불안정하게 되는 것을 알 수 있다 $\sim (\rho_f - \rho_{co}, a \rightarrow b)$. 반면에 양의 부력이 증가는 화염의 안정화에 기여하는 것을 알 수 있으며 $\sim (\rho_{co} - \rho_b, b \rightarrow c)$, 여기서 양의 부력을 감소시키면 화염소화가 일어남을 알 수 있다 $\sim (b \rightarrow d)$.

그러므로, 부상화염의 자기진동은 화염과 유동장에 작용하는 두 가지 상대적인 힘의 효과에 기인한다는 것을 알 수 있다. 기연가스의 양의 부력은 유동장에 기인하는 음의 부력으로 인한 화염의 불안정을 안정화 시켜준다. 또한, Fig. 20에서 알 수 있듯이 제트 모멘텀은 진동범위에 영향을 주나 임계 동축류 밀도조건에서의 최소 최대 노즐출구속도의 차이는 $2 \sim 3.5$ cm/s이므로, 각각의 임계 조건에 대한 제트 모멘텀의 효과는 비비한 것을 알 수 있다. 마지막으로 음의 부력이 연료 스트림에 대한 효과를 관찰하기 위해, $X_{F,0} = 0.150$, $U_0 = 3$ cm/s에서 질소가 희석된 프로판 제트를 이용하여 다양한 ρ_{co} 에 대하여 유동장을 시각화 하였다. 동축류 밀도 조건은 $\rho_{co} = 1.071$ (a), 1.120 (b), 1.169 (c), 그리고 1.201 (d) kg/m³에 대해 cold flow 유동장을 Fig. 24에 나타내었다. 연료 제

트 모멘텀의 중심부에 형성된 코어 높이(L)의 길이가 동축류의 밀도가 높을수록 길어졌으며, 동시에 동축류 속도가 연료제트의 속도보다 높기 때문에 연료는 동축의 모멘텀에 의해 하류로 운반되는 것을 볼 수 있다. 마찬가지로, 동축류 밀도가 증가함에 따라 연료 혼합물의 spread angle은 감소한다. 이는 동축류 밀도가 증가함에 따라 감소된 밀도차이에 의해 음의 부력이 감소되는 것을 볼 수 있다. 이는 국부적인 산화제와 연료의 혼합거동에 영향을 미치는 것으로 추측된다. 그러나, cold flow 조건에서는 양의 부력이 존재하지 않으므로 reacting flow에서의 유동장 가시화가 필요하다.

Figure 25과 26는 각각 $\rho_{co} = 1.169$ ($X_{N_2} = 0.1$) 과 $\rho_{co} = 1.071$ kg/m³ ($X_{H_2} = 0.1$)에 대한 화염진동 주기 동안의 프로판 화염의 다양한 유동 및 화염특성을 $\rho_{co} = 1.071$ kg/m³에 대해 화염 베이스의 거동을 관찰할 수 있으며 화염 베이스가 최대 높이에 존재할 경우, 22a-i의 어두운 구역으로 표시되는 노즐에서 화염 베이스까지의 연료 스트림 칼럼은 더욱 얇아지게 되며, OH 존의 화염 크기 또한 주기 동안에 가장 작게 나타났다. 화염이 최대 높이

에 위치할 경우 화염부력의 최소효과가 예상되며, 이때 음의 부력은 화염으로 인해 연료의 스트림을 아래로 당김으로써 화염은 상류로 이동하게 된다. 결과적으로, Fig. 25a-ii를 보면 알 수 있듯이 음의 부력 효과로 인해 축방향의 제트 모멘텀을 잃고 노즐 위의 12 mm 높이에서 재순환 구역이 표시되는 것을 알 수 있다. 화염원 국부적인 거동은 화염전파속도 (u_p)와 국부유동속도 (u_u)에 의해 결정되기 때문에 화염은 상류로 이동하게 된다 ($u_d = u_p + u_u$, $|u_p| > |u_u|$). 상류로 전파하는 경우 점차적으로 증가하는 화염면은 상류에서 열팽창 효과로 상류로 전파하는 속도를 일시적으로 감소시킨 것을 23b-ii로 알 수 있다.

화염이 최소 위치에 존재할 경우, 화염면의 전파 속도와 국부 유동속도 사이의 순간 균형이 0 ($|u_p| < |u_u|$)으로 만족된 것을 알 수있으며, 이후 속도 크기의 변화 ($|u_p| < |u_u|$)가 발생하며, 화염은 하류로 이동하게 된다. 증가 된 양의 부력이 연료측으로 들어오는 유입속도를 증가시키는 효과로 볼 수 있다 (Fig. 25c-ii). 음의 부력이 화염진동에 대해 중요한 요소이므로, $\rho_{co} = 1.071 \text{ kg/m}^3$ 조

건에서 실험을 계속 진행하였다. 동축류 밀도가 더욱 가벼워진 경우, 흥미로운 화염진동 거동을 보였다. Fig 26a-ii를 보면 알 수 있듯이 연료 스트림은 음의 부력 효과로 인해 반경방향으로 퍼져나가 W형 거동을 나타내었다. 또한 이 경우, 화염은 삼지화염의 구조를 잃고 예혼합 화염의 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 일반적인 삼지화염과 상류방향으로 볼록한 모양을 갖는 전파화염은 OH 사진을 보면 알 수 있듯이, OH의 최대값들은 화염베이스의 센터에 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 음의 부력의 증가는 부상화염의 삼지화염 구조를 벗어나 예혼합 화염의 형태를 가지며 상류로 전파하는 것을 볼 수 있다. 예혼합 형태의 화염은 노즐에서부터 연료 코어 길이까지 전파하게 되고, 이후 변형된 이론당량비선을 찾아 반경방향 외부로 퍼져 확산화염을 이룬다. 그러므로 본 연구에서는 화염의 자기진동은 화염전파속도와 국부유동속도 사이의 불균형에 기인하며 부력의 역할은 크게 음의 부력과 양의 부력으로 화염 진동의 시작을 야기 시키는 것을 알 수 있다

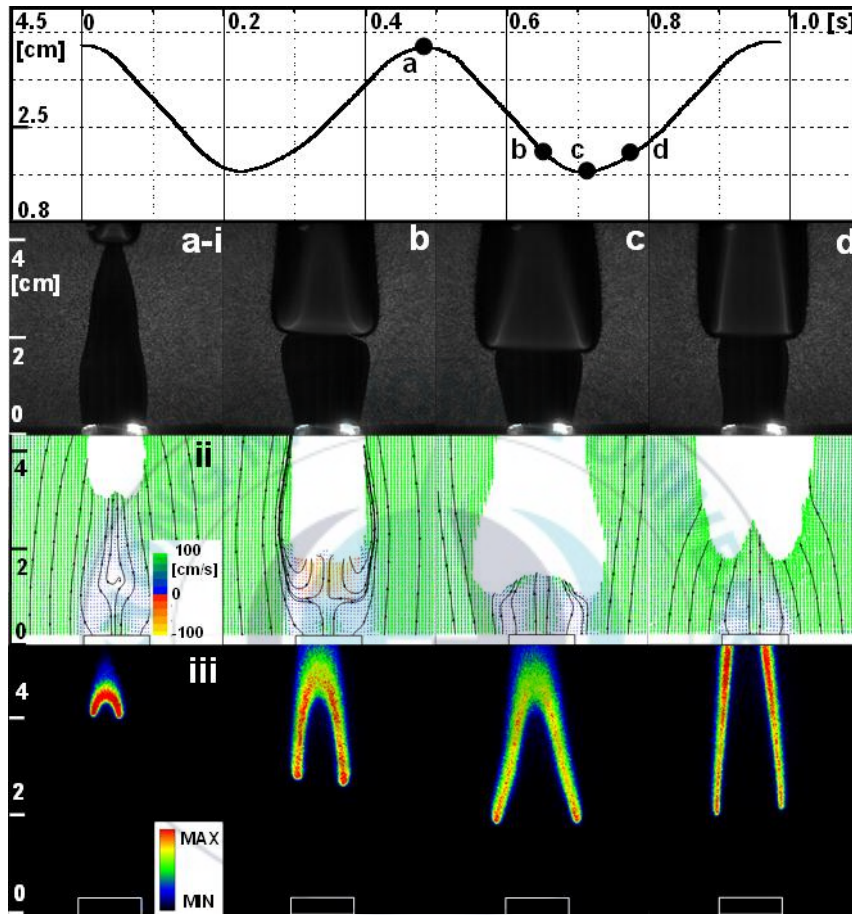


Fig. 25. Characteristics of the oscillating lifted flame for $XF_0 = 0.150$, $U_0 = 3$ cm/s, $V_{CO} = 8.46$ cm/s, and $\rho_{co} = 1.169$ kg/m³; history of flame-base height (top row), Mie-scattering images (i), PIV results (ii), and OH PLIF images (iii).

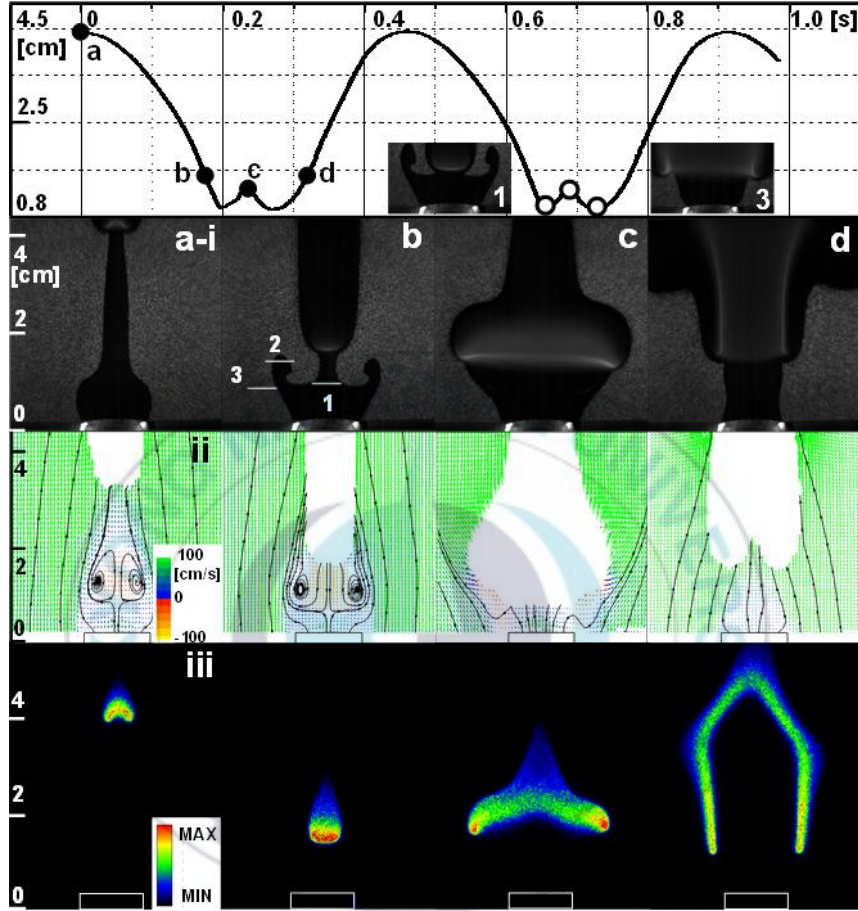


Fig. 26. Characteristics of the oscillating lifted flame for $XF_0 = 0.150$, $U_0 = 3$ cm/s, $V_{CO} = 8.46$ cm/s, and $\rho_{co} = 1.071$ kg/m³; history of flame-base height (top row), Mie-scattering images (i), PIV results (ii), and OH PLIF images (iii).

3.4. 물질-열확산에 의한 화염 자기진동

층류부상화염에서 나타나는 진동 불안정성은 안정화 메커니즘에 근거하여 설명이 가능하여야 한다. 따라서 에지화염은 몇가지의 요인들에 의해 영향을 받으면 화염은 진동하게 된다. 에지 화염의 자기진동은 부력에 의한 자기진동 [7, 14], 화염 소화 근처에서 일어나는 물질-열 확산에 의한 자기진동 [15-17], 그리고 열손실 [18, 19]에 의한 자기진동이 보고되어 왔다.

동축류제트 부상화염에서 Won et al과 Furi et al은 $O(1)$ 진동에 대해 상이한 연구결과를 도출하였다. Won et al은 미소중력 상태에서 동축류 버너를 사용하여 자기진동이 발생하지 않는 사실을 규명함으로써 현재까지 동축류 제트 부상화염의 자기진동은 부력에 의한 자기진동으로 인식되어 왔다 [7, 14]. 하지만 Kurdyumov et al은 확산화염에서 과도한 체적 열손실과 작은 담켈라 수를 가질 경우, 화염자기진동의 원인을 물질-열확산 영향으로 제시하여 루이스 수에 의한 진동을 규명하였다 [15, 16]. 하지만

이는 부력의 효과를 제거한 수치해석 결과이기 때문에 실험적으로 루이스 수에 의한 진동을 규명한 예는 극히 제한되어 왔다. 따라서 현재까지 루이스 수에 의한 자기진동을 실험적으로 규명하지 못한 채 수치해석에 의존하여 규명되고 있는 시점이다. 따라서 층류 동축류 제트 부상화염에서 두 자기진동에 대한 명확한 구분이 필요한 시점이다. 본 연구에서는 동축류 부상화염에서 부력에 의한 자기진동과 루이스 수에 의한 자기진동을 구별하고 상호간의 영향에 대해 연구를 계속해서 진행하였다.

Figure 27는 질소가 희석된 프로판 화염에 대하여 노즐직경 $D = 9.4 \text{ mm}$, $V_{CO} = 9.4 \text{ cm/s}$ 조건에서 노즐출구속도 U_0 에 따른 연료 물분율 $X_{F,0}$ 에 대한 화염 안정화선도를 나타내었다. 크게 세가지 유형의 화염거동이 관찰되었다: 노즐 부착 화염, 안정화된 부상화염, 그리고 화염자기진동은 regime I로 표기하였다. Regime I의 자기진동은 $2.73 < f < 4.00 \text{ Hz}$ 의 범위의 주파수를 가지며 이는 앞서 언급한 부력에 의한 자기진동 (hereafter, called BDSE, Buoyancy Driven Self-Excitation)이다. 여기서 cold flow 제트의

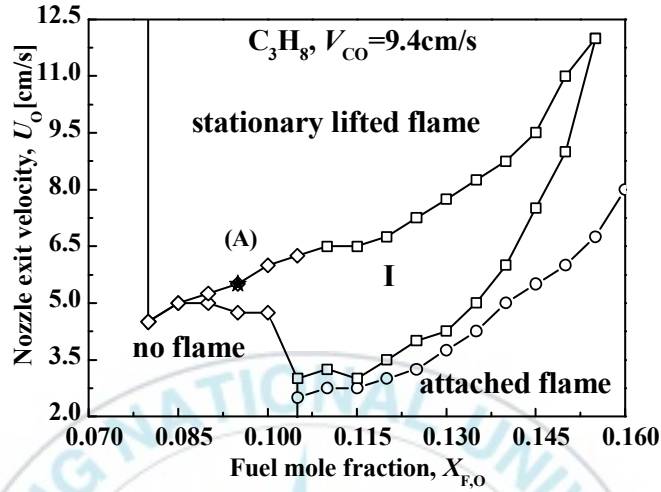


Fig. 27. Flame stability map with functional dependence on U_o and $X_{F,0}$ for a 9.4-mm-diameter nozzle for nitrogen-diluted coflow jet flames. The star symbol shows the flame conditions that were also used in the microgravity experiments.

대표적인 영상을 평면 Mie scattering 기법을 이용하여 가시화 하여 이를 Fig. 28(a) 그리고 (b)에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 연료 스트림은 대기에 비해 프로판의 분자량이 크기 때문에 축 방향에 따라 하류에서 제트 모멘텀이 쇠퇴하게 되어 반경방향으로

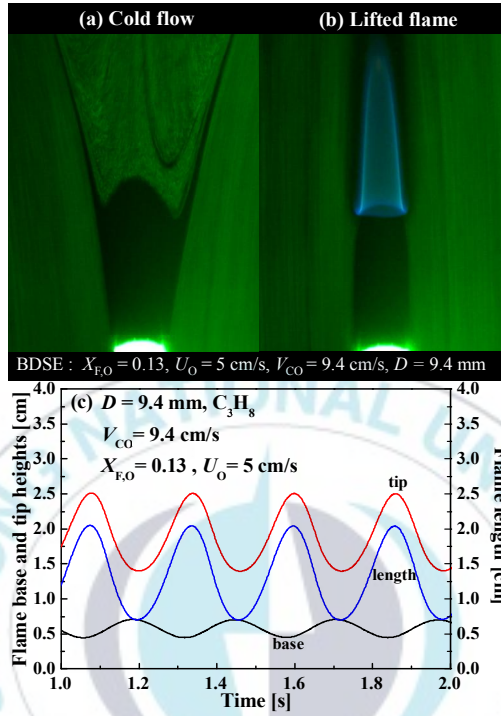


Fig. 28. Self-excited characteristics of laminar-lifted nitrogen-diluted propane coflow jet flames. Mie scattering images of (a) cold and (b) reacting jets. (c) The flame dimensions as a function of time with $X_{F,0} = 0.13$, $U_0 = 5$ cm/s, $V_{CO} = 9.4$ cm/s, and $D = 9.4$ mm.

퍼지게 된다. 또한 동축류 속도가 연료 노즐출구속도보다 크기 때

문에 연료의 스트림은 동축류 유동에 따라 하류로 운반되는 원뿔
 모양의 유동이 형성된다. 하지만 화염의 자기진동 사진에서 보면
 알 수 있듯이, 연료의 스트림은 화염 베이스 근처에서 수축되었으
 며 확산각은 cold flow 조건보다 작다. 이 것은 상당한 양의 공기
 가 부력으로 인해 화염내부로 유입되며, 축 방향의 유동 속도가 가
 속화 된 것을 알 수 있다. Fig 28(c)는 시간에 따른 BDSE의 화염
 거동을 나타낸 그래프이다. 화염 팁과 화염 길이는 같은 위상으로
 진동하며, 화염 베이스의 높이와는 180도 위상 차이를 보였다. 이
 를 기반으로 부력의 효과를 비교적 억제하기 위해 노즐직경 $D =$
 0.95 mm 를 사용하여 반복적인 실험을 진행하였다. 또한 동축류 측
 에 헬륨의 희석하여 화염으로부터 주변공기로의 전도 열손실을 제
 어하였으며 이에 관한 화염 안정화 선도를 Fig. 26에 도식화 하였
 다. Figure 29는 $X_{\text{He,coflow}} = 0.1$ (a)과 0.2 (b)에 대한 화염안정화 선
 도를 나타낸 그래프이다. $0.28 < X_{\text{F},0} < 0.32$, 그리고 $24 < U_0 <$
 40 cm/s 조건에서 이전연구에서 볼 수 없었던 자기진동이 나타났
 으며 이를 regime II로 표기하였다. 이러한 자기진동은 낮은 연료

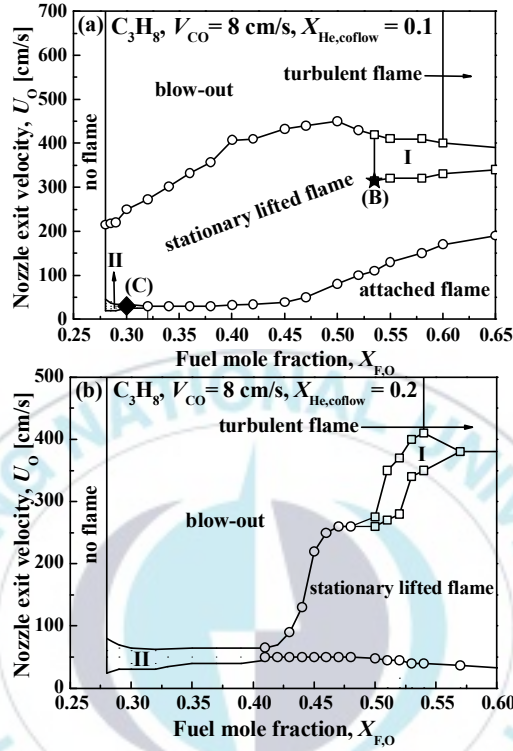


Fig. 29. Flame stability maps with a functional dependence on U_0 and $X_{F,O}$ with $D = 0.95$ mm in nitrogen-diluted coflow jet flames: (a) $X_{He,coflow} = 0.1$ and (b) $X_{He,coflow} = 0.2$.

몰분율과 노즐출구속도에서 나타나며, Furi et al의 연구결과인 화염소화영역 근처에서 루이스 수에 의한 자기진동이 나타난다는 연

구결과와 유사하다 [18]. 자기진동의 거동을 파악하기 위해 시간에 따른 화염의 거동을 분석하여 이를 Fig. 30에 나타내었다. 부력에 의한 자기진동(a)와 regime II에 나타나는 자기진동(b)를 시간에 따른 화염의 팁 높이, 화염길이, 그리고 부상높이로 나타내었다. 부력에 의한 자기진동일 경우(a), 화염의 팁높이와 화염의 길이가 같은 위상을 가지는 반면, 부상높이와는 180도의 위상차이를 나타내었다. 이는 Won et al의 연구결과와 같은 거동을 보였다. 하지만 regime II에 나타난 자기진동일 경우, 앞서 보였던 진동과 상이한 거동을 보였다. 화염의 팁 높이와 화염의 부상높이가 같은 위상을 가지는 반면, 화염의 길이와 180도 위상 차이를 보였다. Krudyumov et al의 연구결과로, 과도한 열손실이 동반될 경우 임계 루이스 수를 낮추는 효과로, 자기진동을 유발한다는 연구결과를 보인 바 있다. 동축류 측에 열전도율이 높은 헬륨의 회석률을 증가시킨 결과, 자기진동의 영역이 확장되었음을 볼 수 있다. 화염의 주파수를 관찰하기 위해 노즐출구속도에 따른 주파수를 부력에 의한 진동(a) 과 regime II에 나타난 진동(b)을 Fig. 31에 나타내었

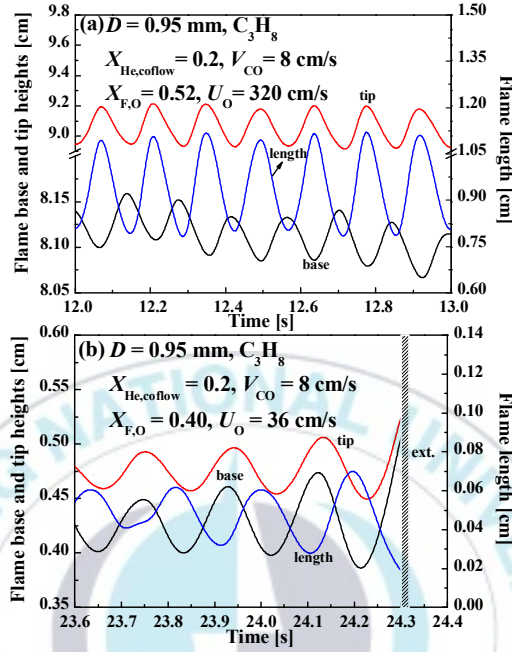


Fig. 30. Flame dimensions as a function of time for two self-excited flames and $D = 0.95$ mm: (a) $X_{F,O} = 0.52$, $U_0 = 320$ cm/s, $V_{CO} = 8.0$ cm/s and $X_{He,coflow} = 0.2$ (regime I) and (b) $X_{F,O} = 0.41$, $U_0 = 36$ cm/s, $V_{CO} = 8.0$ cm/s and $X_{He,coflow} = 0.2$ (regime II). The hatched line at 24.3s corresponds to flame extinction.

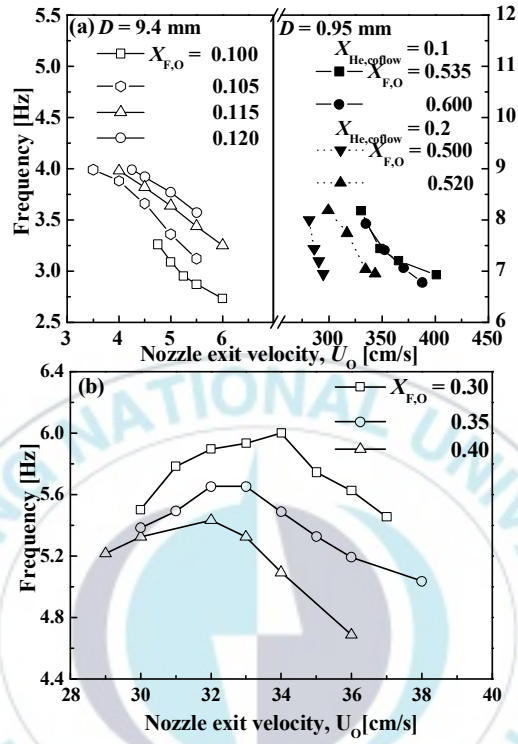


Fig. 31. Self-excitation frequency as a function of the nozzle exit velocity: (a) regime I and (b) regime II.

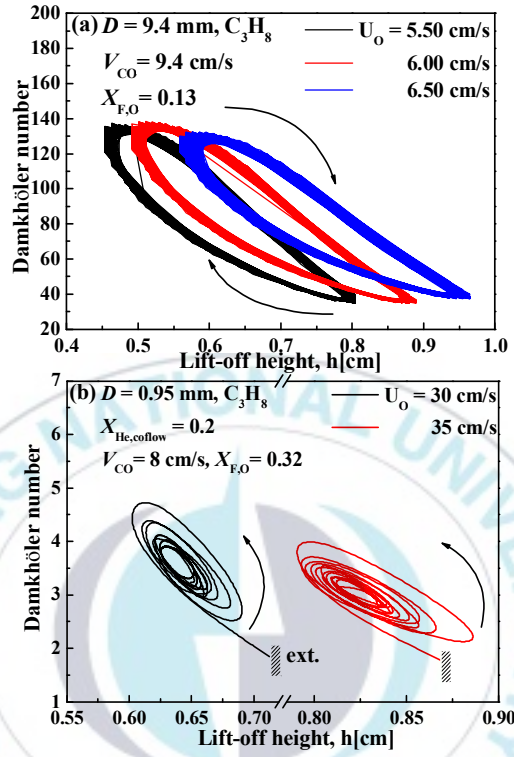


Fig. 32. Phase diagram showing the Damkohler number as a function of the liftedoff heightL (a) regime I and (b) regime II.

다. 부력에 의한 자기진동인 regime I의 진동은 노즐출구 속도에 따라 주파수가 단순히 감소하는 결과를 보인 반면, regime II 자기진동은 주파수가 증가한 후 감소하는 경향을 보였다. 이전연구결과 [15-17]에서는 물질-열확산에 의한 자기진동은 낮은 담 낮은 담 켈

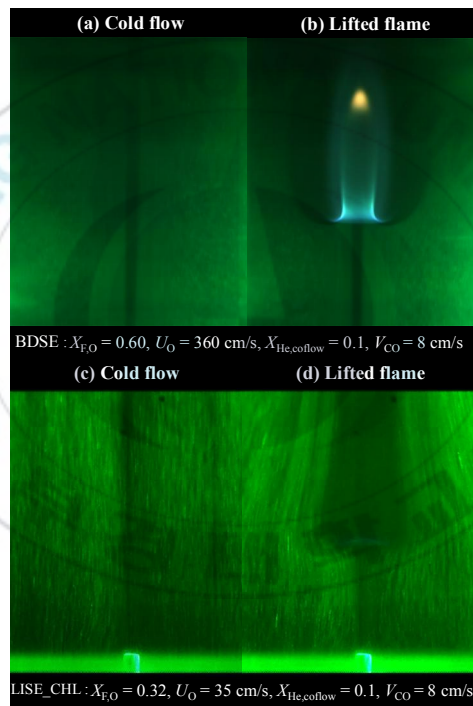


Fig. 33. Mie-scattering images for two self-excited flames: (a) regime I and (b) regime II.

라 수에서 나타나는 결과를 기반으로 담켈라 수를 $Da = (\omega/U_0)/(\delta_{f,t}/S_L^0)$ 로 정의하였다. 여기서, $\delta_{f,t}$ 는 화염두께로 $\delta_{f,t} = (\lambda/C_p)/(\rho_u S_L^0)$ 이다. Figure 32는 부상높이의 따른 담켈라 수로 regime I에 나타난 자기진동(a), regime II에 나타난 자기진동(b)를 각각 그래프로 표현하였다. 부력에 의한 자기진동은 화염이 상류로 전파할 경우의 담켈라 수가 후류로 밀려날 경우의 담켈라 수보다 크다. 이는 부력의 효과로 인해 화염내부로 유입되는 연료의 flux 증가를 유발하여 화염강도가 증가하는 물리적 의미를 나타낸다. 화염진동시 담켈라 수는 부상높이에 따라 시계방향으로 위상을 나타낸다. 하지만 regime II의 자기진동일 경우, 부력에 의한 자기진동과 상이하게 부상높이에 따라 반시계방향 위상을 나타내며 담켈라 수 또한 부력에 의한 자기진동과 비교하여 작은 값을 가진다.

Figure 33은 regime I(a)과 regime II(b)에 해당하는 cold와 reacting flow Mie-scattering 이미지를 나타낸 사진이다. $U_0 < S_L^0$ 인 부력에 의한 자기진동과는 다르게 cold와 reacting flow의 유동장의 차이가 미미하다. 따라서 앞서 언급한 음의 부력에 의한 또

는 분자량 차이로 유동장의 변화는 거의 없다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 regime II에서의 자기진동의 경향은 이전 연구의 수치해석결과 [16]와 유사한 결과를 미루어 볼 때 물질-열확산에 의한 자기진동(hereafter called to LISE, Lewis-number induced self-exciation) 을 유추해 볼 수 있다. 앞선 연구결과를 기반으로 regime I과 regime II의 자기진동에 대해 특성화 작업을 진행하였다. 스트라홀 수는 fD/S_L^0 로 정의하였으며, 먼저 BDSE 경우, St 수는 노즐출구속도에 따라 단순히 감소하는 경향을 나타내는 반면, LISE의 진동수는 노즐출구 속도에 따라 증가하다 감소하는 경향을 보인 바 있으며 크게 두 가지 특성화 관계식을 따르며 이를 아래에 표기하였다.

$$St_{BDSE} = 1.60 - 13.56 \left[\log \left(\frac{U_0}{X_{F,0}} \right) \right]^{0.15}$$

$$St_{LISE,b} = 0.0145 + 7.8 \times 10^{-5} X_{F,0}^{-4.2} (U_0/S_L^0)^{-3.5}$$

$$St_{LISE,c} = 0.130 - 0.115 X_{F,0}^{0.047} (U_0/S_L^0)^{-0.10}$$

Figure 34는 스트라홀 수에 따른 물리적으로 연관된 성분으로 특성화를 진행한 그래프를 나타내었다. 또한 삽입 그림은 OH^* 이미지와 축 방향 거리에 따른 무차원화 된 OH^* 라디칼 그래프이다. Fig. 34(b)를 보면, 스트라홀 수가 증가함에 따라 화염길이가 감소하고 후류의 확산화염이 희미해진 것을 알 수 있다. 이를 입증하기 위해서, 열방출량의 지표인 OH^* 를 삼중점을 지나는 축방향 거리에 따라 나타내었다. 마이너스 기호는 삼중점에서 후류 확산화염까지 열이 손실 되었음을 나타낸다. 음의 최대점은 스트라홀 수가 증가함에 따라 증가하였으며, 이는 LISE 자기진동은 열손실이 증가할수록 활발해진다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 이전 결과인 방대한 열손실은 임계 루이스 수를 감소시켜 물질-열확산의 자기진동을 촉진한다는 연구결과와 일치하였다.

현재까지 연구는 부력이 존재하는 조건이기 때문에, 부력의 영향을 무시할 수 없다. 따라서 본 연구결과의 물리적 입증을 위해 1.5s 미소중력 실험을 진행하였으며 축소화된 실험장치는 앞선, 실험장치 및 데이터 분석 차트에 잘 나타나 있다.

Figure 35는 시간에 따른 부상높이를 여러 실험조건에 따라 나타낸 그래프이다. 0초를 기점으로 캡슐이 낙하는 시간을 표시한다. regime I과 II의 자기진동은 각각 BDSE와 LISE에 기인한다. 지금까지의 논의 된 데이터를 뒷받침 하기 위해 세가지 조건으로 미소중력 실험을 수행하였다. 세가지 실험 조건은 다음과 같다: (A) $U_0 = 5.5 \text{ cm/s}$, $XF_0 = 0.095$, $D = 9.4 \text{ mm}$, (B) $U_0 = 315 \text{ cm/s}$, $XF_0 = 0.535$, $D = 0.95 \text{ mm}$, 그리고 (C) $U_0 = 40 \text{ cm/s}$, $XF_0 = 0.3$, $D = 0.95 \text{ mm}$. 정상 중력 상태에서 BDSE는 캡슐의 낙하와 동시에 상류로 이동하며 결국 노즐 림에 부착하는 부착 화염을 나타낸다. 정상 중력 상태에서의 LISE는 진동후 화염소화가 이루어 지기 때문에 자기진동을 시작함과 동시에 캡슐을 낙하하는 방식으로 연구를 진행하였다. 중력이 감소함에 따라, 부상높이는 NG에서 MG로 전환하는 급격히 감소한 후, 자기진동을 보였다.

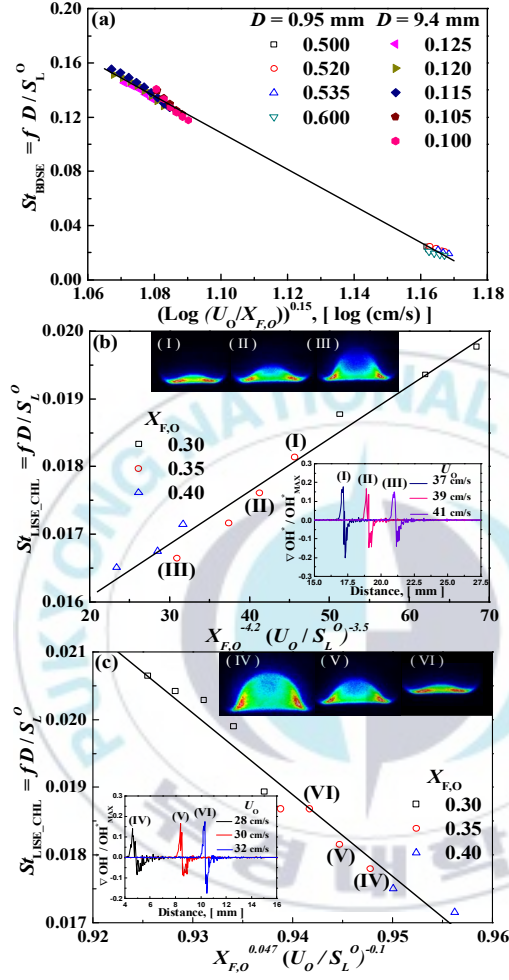


Fig. 34. Functional dependence of the Strouhal number on related physical parameters for two self-excitations: (a) regime I and (b) regime II.

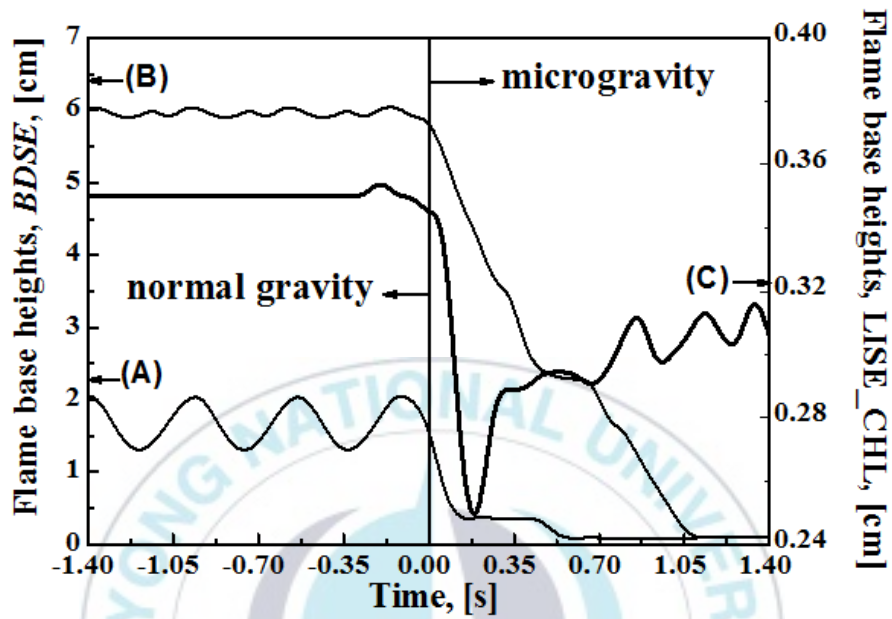


Fig. 35. History of the flame base heights for two types of self-excited flames during the transition from normal gravity to microgravity.

제 4 장 결 론

동축류 제트 부상화염에서 질소가 희석된 메탄 제트 화염의 부상화염을 노즐출구속도 변화에 따라 관찰하였다. 두 가지 화염거동이 관찰되었다. 노즐이 부착된 화염과 노즐출구속도 증가에 따라 부상높이가 증가하는 화염, 그리고 부상높이가 감소하는 화염이 나타났다. 결과는 슈미트 수가 1보다 작으며 연료몰분율 0.30에서 노즐출구속도에 따라 U-형태의 부상높이를 보였다. U-형태 화염거동을 묘사하는 물리적 메커니즘을 알아내기 위해 수치해석을 진행하였다. 작은 노즐출구 속도에서 연료의 대류 모멘텀에 대한 부력의 효과가 상대적으로 중요하였으며, 하류지역에 유동장이 가속되어 안정화된 부상화염을 보였다. 노즐출구속도가 증가함에 따라 부력의 상대적인 중요성이 감소하고 부상높이가 감소되었다. 이를 실험적으로 증명하기 위해 여러 연료 비율과 희석제를 이용하여 U-형태의 부상거동을 보이는 임계 슈미트 수를 관찰할 수 있었다. 하지만 연료와 동축류측 산화제의 밀도차가 커질수록 진동하는 화염이 나타났다. 이를 기반으로 연료측 무거운 연료인 에탄, 프로판,

그리고 부탄을 혼합하여 실험한 결과, 화염에 대한 양의 부력과 다른 연료와 산화제 제트의 밀도차에 의한 음의 부력이 자기진동 개시에 영향을 미치는 사실을 발견하였다. 이를 특성화 작업을 진행한 결과 부력에 의한 자기진동은 양과 음의 부력의 상관관계를 가졌으며 이를 증명하기 위해 유동장 가시화와 OH PLIF를 이용하여 화염의 특성을 확인하였다. 그 결과, 연료와 산화제의 밀도차인 음의 부력이 지배적인 조건에서는 자기진동의 크기가 커졌으며 상류측으로 볼록한 예혼합 화염의 형태가 나타났다.

현재까지 연구에 따르면 부상화염의 자기진동은 부력뿐만 아니라 화염소화영역 근처에서 발생하는 물질-열확산에 의한 자기진동도 수치해석적으로 보고된 바 있다. 따라서 이를 기반으로 부력의 효과를 줄이기 위해 보다 작은 노즐직경을 사용하여 화염소화영역 근처에서의 부력에 의한 진동과 다른 거동의 화염을 발견하였다. 보다 명확한 부력과 소화영역 근처에서의 자기진동의 구분을 위해 낙하탑을 이용한 미소중력실험결과, 미소한 부력조건에서도 소화영역 근처에서의 화염은 진동하는 것을 알 수 있었으며 이는

이전 연구 결과인 물질-열확산에 의한 자기진동의 거동을 따르는
것을 알 수 있었다.



감사의 글

먼저 학사 및 석사 과정 동안 학업 및 연구에 매집한 수 있도록 지도해주신 박정 교수님께 진심으로 감사드립니다. 글로 모든 것을 표현할 수 없을 만큼, 연구와 지식뿐만 아니라 인격적인 부분과 보이지 않았던 진로를 가르쳐 주셨습니다. 또한 제가 하고 싶은 연구들도 아낌없이 지원해 주셔서 좋은 결과를 얻을 수 있었습니다. 교수님 덕분에 공부라는 것에 재미를 알 수 있었으며 보이지 않았던 미래를 밝혀주셨습니다. 앞으로도 교수님의 가르침을 기반으로 나라에 그리고 다른 사람들에게 모범이 되며 또한, 필요한 사람이 되어 살아가겠습니다. 다른 학생과 다른 시작점이지만 지치지 않고 끝까지 노력하며 살 것입니다. 또한 KAUST 차민석 교수님께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 저에게 있어서 Symposium을 준비하면서 많은 가르침은 저의 부족한 부분을 정확히 깨우쳐 주셨습니다. 차교수님 가르침을 기반으로 연구에 대한 저의 관점이 바뀌었습니다. 기계공학과 공부를 처음 시작할 때 많은 조언을 해주신 이창용 교수님께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 학부 2학년 때 이창용 교수님의 공업수학을 들으면서 기계공학에 대한 관심이 생겼으며 교수님의 소개로 박정 교수님 연구실에서 많은 가르침을 받을 수 있었습니다.

교수님의 첫 번째 제자이신 에기연의 김승곤 박사님께서서는 저희의 연구를 위해 다양한 실험장비를 제공해주셔서 조금 더 좋은 환경에서 연구에 몰두할 수 있었

습니다. 그리고 KAUST에서 포닥을 하시고 계신 윤성환 박사님께 배웠던 다양한 실험장치 조작법과 아이디어로 인해 이번 Symposium에서 좋은 평가를 받을 수 있었으며, 그 뿐만 아니라 화염 불안정성에 대한 가르침인 화염 불안정성 요소는 부상화염 뿐만 아니라 구형 예혼합 화염에도 적용하여 희준이와 연구를 계속해서 진행하고 있습니다. 현재 KITECH에 계신 박대근 박사님께도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 항상 후배들의 진로를 함께 고민하여 주시고 후배들의 조언을 항상 받아주셨습니다. 그리고 저의 사수인 이원준 형님에게 연구 테마 뿐만 아니라 저에게 이 길을 가게 기회를 주신 점 잊지 않고 열심히 살아가고 있습니다. 대향류연구에서 아무것도 모르는 저에게 실험방법부터 가르쳐 주신 정용호 형님, 그리고 예혼합 화염부터 확산화염을 가르쳐 주시면서 구형 예혼합 화염에 대한 실험을 가르쳐 주신 송원식 형님께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 그리고 현재는 다른 길을 가고 있지만 항상 웃는 얼굴로 함께하였던 정승욱 형님께도 감사하다는 말을 꼭 전하고 싶습니다. 그리고 저에게 항상 천재였던 습재, 수학부터 역학까지 항상 물어볼때마다 친절하게 가르쳐 주었던 점 계속해서 감사의 말을 간직하고 있습니다. 또한 미소중력 낙하탑 실험까지 계속해서 옆에서 실험셋팅뿐만 아니라 상담하면서 항상 힘이되어준 김경택 형님께는 꼭 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 그리고 현재까지 저와 함께하고 있는 동생들 순호, 희준, 수현, 그리고 순형이에게 고맙다는 말을 전하고 싶으며 특히 바쁠 때 항상 연구실 일을 대신 처리해주던 순호에게 특히 감사의 말을 전하고 싶습니다.

니다.

마지막으로 항상 저에게 큰 힘이 되어주고 버팀목이 되어 주시는 부모님에게 감사드립니다. 말씀은 안하셔도 항상 걱정하시고 잘되기를 기도해주시는 마음 항상 감사하게 생각합니다. 저를 항상 응원해주는 누나에게도 항상 감사하게 생각합니다. 이외에 힘이 되어준 친구들 (후준, 재영, 강민, 품바, 우치, 대동, 토이, 권열, 정균)에게 감사의 말을 올립니다. 감사합니다.

2018.02. 06. 반규호 올림



참고문헌

- [1] S.H. Chung, B.J. Lee, Combust Flame 86 (1991) 62-72.
- [2] B.J. Lee, S.H. Chung, Combust Flame 109 (1997) 163-172.
- [3] B.J. Lee, M.S. Cha, S.H. Chung, Combust Sci Technol 127 (1997) 55-70.
- [4] Y.S. Ko, S.H. Chung, Combust Flame 118 (1999) 151-163
- [5] S.H. Chung, Proc Combust Inst 31 (2007) 877-892
- [6] Y.C. Chen, R.W. Bilger, Combust Flame 122 (2000) 377-399
- [7] S.H. Won, S.H. Chung, M.S. Cha, B.J. Lee, Proc Combust Inst 28 (2000) 2093-2099
- [8] S. H. Chung, C. K. Law 37 (1984) 21-46.
- [9] D.S. Lee, K.D. Kihm, S.H. Chung, J Fluid Eng Trans ASME 119 (1997) 716-718
- [10] B. C. Choi, S. H. Chung, Combust Flame 159 (2012) 1481-1488
- [11] A. Cuoci, A. Frassoldati, T. Faravelli, E. Ranzi, Energy Fuels 27(12) (2013) 7730-7753

- [12] A. Cuoci, A. Frassoldati, T. Faravelli, E. Ranzi, *Combust Flame* 160(5) (2013) 870-886
- [13] Y. Ju, H. Guo, K. Maruta, F. Liu, *J Fluid Mech* 342 (1997) 315-334.
- [14] S.H. Won, J. Kim, M.K. Shin, S.H. Chung, O. Fujita, T. Mori, J.H. Choi, K. Ito, *Proc Combust Inst* 29 (2002) 37-44
- [15] V.N. Kurdyumov, N. Matalon, *Proc Combust Inst* 31 (2007) 909-917
- [16] V. Kudymov, M. Matalon, *Proc Combust Inst* 29 (2002) 45-52
- [17] M. Furi, P. Papas, A. Monkewitz, *Proc. Combust. Inst.* 28 (2000) 831-838
- [18] S.H. Yoon, J.K. Han, J. Park, J.H. Yun, S.I. Keel, *Combust Flame* 158 (2011) 1960-1969
- [19] W. J. Lee, J. Park, O. B. Kwon, J. H. Yun, S. I. Keel, *Combust. Inst.* 35 (2015) 1007-1014.
- [20] G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach, N. W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C. T. Bowman, R. K. Hanson, S. Song, W. C. Gardiner Jr., V. V. Lissianski, Z. Qin, *GRI-MECH 3.0*, 1999, <http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/>.
- [21] H. Wang, X. You, A. V. Joshi, S. G. Davis, A. Laskin, F. Egolfopoulos, C. K. Law, available at

http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm.



Flame Instability in Laminar Lifted Coflow-jet Flames

Kyu Ho Van

Department of Mechanical, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The study on laminar lifted coflow-jet flames has been carried out to investigate the peculiar lifted flame phenomena such as decreasing lifted off heights as nozzle exit velocities and flame oscillation near the extinction limit, reporting that it was successfully not described in jet similarity solution. Based on them, three types of flame behaviors were observed: (1) decreasing lifted off heights with increasing nozzle exit velocity (hereafter called decreasing-HL), (2) increasing lifted off heights (hereafter called increasing-HL), (3) flame oscillation. The increasing-HL was due to effect of buoyancy, whereas decreasing-HL was effected by balance between Sc number and buoyant convection. Critical Sc numbers existed for varied fuels, and if the Sc number was smaller than critical Sc, the decreasing-HL was existed. Those of phenomena was well characterized using related physical parameter with critical Sc and Richardson number. However, oscillating flame was occurred in enhancement of density variation of between fuel and oxidizer stream, regardless of the Sc number. To elucidate those of effects, density of the fuel and oxidizer was adjusted using varied fuel and diluents to coflow-oxidizer. The density of the coflow was also varied within a certain range by adding either helium or carbon dioxide to air, to study how it affected the positive and negative buoyancies at the same time. As a result, we found that the range of oscillation was well-correlated with the positive and the negative buoyancies; the former stabilized the oscillation while the latter triggered instability and became a source of the oscillation. Further measurements of the flow fields and OH radicals evidenced the important role of the negative buoyancy on the oscillation, detailing a periodic variation in the unburned flow velocity that affected the displacement of the flame. Additionally, the jet instability occurred for the applied frequency less than 80 Hz corresponding to a characteristic collision response time. The effect of AC electric fields on overall map of jet flow characteristics was also reported.