

동축류 제트에서 동축류 속도에 따른 층류 부상화염의 특성 연구

이승재* · 김진남* · 원상희** · 정석호***

Characteristics of Laminar Lifted Flames in Coflow Jet with Various Coflow Velocities

S. J. Lee*, K. N. Kim*, S. H. Won** and S. H. Chung***

ABSTRACT

Characteristics of laminar lifted flames in coflow jet with various coflow velocities have been studied experimentally. Using the fuel nozzle with $d=0.254$ for the pure propane, liftoff heights are fitted by using power equation with jet velocity. As coflow velocity increases up to 60 cm/s, powers of fitting equation steeply decrease. From the result of numerical analysis using the FLUENT, the stoichiometry contour and the axial velocity nondimensionalized by initial jet velocity along the stoichiometry contour are changed with variations of coflow velocities. The change of axial velocity along stoichiometric contour is more sensitive than that of stoichiometric contour. For this reason, powers of fitting equation for liftoff height with jet velocity decreases with the increase of coflow velocity. Using the fuel nozzle with $d=4.35$ mm for the highly diluted propane by nitrogen, the liftoff height increases with the increase of coflow velocity when coflow velocity is less than the maximum value of initial jet velocity. But when coflow velocity is faster than that, the liftoff height decreases with the increase of coflow velocity.

Key Words : laminar lifted flame, coflow velocity, liftoff height

기 호 설 명

u	: 제트 축방향 속도	$X_{F,o}$: Fuel mole fraction
H_L	: Liftoff height	q	: 동축류의 상대적 강도
V_{co}	: Coflow velocity	하첨자	: nozzle 출구
U	: 무차원 속도 (= u/u_0)	0	: 화염 날림
R	: 무차원 반경 (= r/r_0)	$BOLO$: 화염 부상
R	: nozzle 직경	RA	: 화염 재부착
d	: Reynolds 수	st	: 이론 당량비
Re	: 무차원 축방향 거리	m	: 중심축 최대 지점
X	(= $x/Re/d$)		

1. 서론

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

† E-mail : cyrano21@snu.ac.kr

TEL : 02)880-1647 FAX : 02)889-1842

** 정밀 기계설계 공동 연구소

*** 서울대학교 기계항공공학부

층류 부상 화염에 관한 연구는 화염 안정화 메커니즘에 관련하여 널리 연구되어 왔다. 특히 층류 부상화염의 선단은 삼지 화염의 구조로 과농,

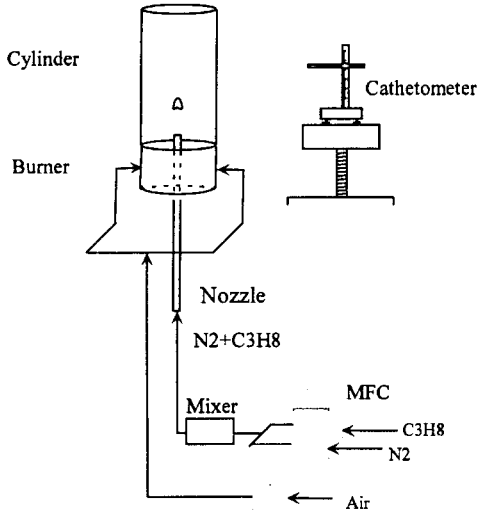


Fig. 1. Schematic of diagram of experimental setup

회박 예혼합 화염 및 확산화염이 공존하는 구조를 가지고 있음을 밝혀내야 있다. 또한 질소 희석 및 부분 예혼합과 같은 다양한 효과에 대하여도 연구되었다.^{[1]-[5]} 최근에는 실험적으로 안정화된 화염을 관찰하기 쉽고, 수치적 접근이 용이하기 때문에 동축류 제트에서 부상 화염에 관한 연구가 진행되었으며, 상대적으로 큰 노즐 ($O(10\text{mm})$)을 사용할 경우 화염의 안정성 측면에서 부력에 의한 영향이 중요함을 밝힌 바 있다.^{[6]-[8]}

자유 제트 유동장에 대해서 그동안 속도 및 농도의 상사해를 통해 많은 연구가 이루어져 왔다. 동축류 제트의 경우 동축류 속도와 제트의 출구 속도의 차이에 의해 상사성이 존재함을 밝혔으며, 동축류의 출구 속도가 제트 속도보다 상대적으로 낮은 영역에서 ($V_{co} < 15 \text{ cm/s}$), 동축류 제트에서의 부상화염의 거동 및 특성을 연구하였다.^{[9], [10]}

본 연구는 기존 연구에 비해 동축류 속도가 큰 영역에서 동축류 속도 변화에 따른 부상화염의 거동과 냉간 제트의 속도 및 농도장 변화에 대한 연구를 실시하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

실험장치는 동축류 버너, 유량조절 장치, 그리고 측정 장치로 구성되어 있으며, 그 개략도는 Fig. 1 과 같다. 동축류 버너의 내부 노즐은 $d=0.254 \text{ mm}$ 와 4.35 mm 인 두 종류로 실험을 수행하였다. 순수 프로판 연료를 사용할 경우 일정 노즐 직경 이상에서는 층류 부상화염을 관찰할 수 없

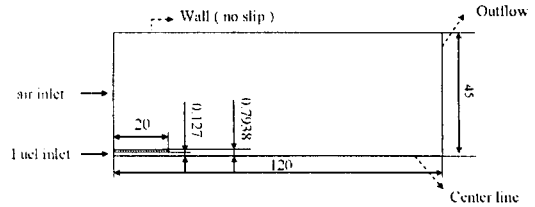


Fig. 2. Diagram of computational domain

고, 난류 영역에서 부상화염이 관찰된다. 따라서 질소 희석 영향 및 부력 효과를 배제한 실험을 수행하기 위해서, 0.254 mm 의 노즐을 사용하였다. 또한 동축류 속도가 연료제트 속도보다 큰 영역에서 층류 부상화염 거동 특성을 살펴보기 위하여 4.35 mm 의 노즐을 사용하였다. 이 때, 층류 부상화염을 관찰하기 위하여 과다 질소 희석된 프로판 연료를 사용하였다.^[5]

두 연료 노즐의 길이는 모두 완전 발달된 유동장을 얻기 위하여 각각 10 cm , 50 cm 의 스테인레스 스틸로 하였고, 동축류를 구성하는 외부관의 직경은 90 mm 이다. 내부 노즐은 약 20 mm 정도 도출되도록 설치하였다. 주변 공기의 교란을 최소화하기 위하여 직경 90 mm , 길이 500 mm 아크릴 실린더를 설치하였다. 균일한 속도장을 가지는 동축류를 얻기 위하여 메탈 화이버 필터 (Fecralloy mat, $t=1 \text{ mm}$), 세라믹 비드, 그리고 세라믹 하니콧을 사용하였다. 연료는 99.99% 의 순도를 가지는 프로판을 사용하였으며, 희석제로는 질소를 사용하였다. 연료, 희석제 및 동축류 공기의 유량은 질량 유량계를 통해 제어하였다.

층류 부상화염의 높이를 측정하기 위하여 카세토미터 (cathetometer)를 사용하였으며, 디지털 카메라 (Nikon D-100)를 사용하여 화염을 가시화하였다.

수치해석을 위하여 상용 코드인 FLUENT를 사용할 때, 2차원 Axisymmetric 해석모델을 실험과 동일한 조건에서 수행하였으며 그 개략도는 Figure 2 와 같다. 외벽조건은 no slip 조건이며, 축방향 길이는 120 mm 로 설정하였다. 전체 도메인 크기 및 grid size 를 변경하였을 때, 속도장 및 농도장 결과의 오차범위가 1% 미만이다. 이를 통해 수치 해석적 모델이 유효함을 확인할 수 있었다. 노즐 출구 속도는 6 m/s 로 고정했으며, 이 때 동축류 속도를 $0.06, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 \text{ m/s}$ 로 점차 증가시키며 이론 당량비 및 이론 당량비를 따르는 축방향 속도분포를 조사하였다.

3. 실험 결과

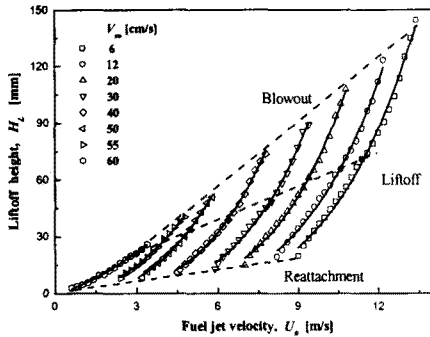


Fig. 3. Liftoff height variation with jet velocity at various coflow velocities (line indicate best fits of data and dash-line indicate Reattachment, Liftoff and Blowout velocity, $d=0.254$ mm, $X_{F,o}=1$)

3.1 동축류 속도에 따른 순수 프로판 제트 부상 높이 변화

0.254 mm 의 노즐에서 순수 프로판 연료를 사용할 경우, 동축류 속도를 증가시키며 제트의 속도 변화에 따른 부상 높이를 측정하고, 이를 Figure 3 에 나타내었다. 부상 높이는 각각의 동축류 속도에 대하여 제트 속도에 따라 증가하는 경향을 보인다.

노즐 출구 유속의 증가에 따라, 노즐에 부착되어 있는 화염이 노즐에서 떨어져 안정화된 화염을 이루는 화염부상 속도 (Liftoff velocity, u_{LO}) 가 존재하고, 이후 화염이 꺼지는 화염날림 속도 (blowout velocity, u_{BO}) 가 존재한다. 또한 화염이 부상된 상태에서 노즐로 다시 부착되는 재부착 속도 (Reattachment velocity, u_{RA}) 가 존재하며, 화염부상 속도와 재부착 속도 사이에는 hysteresis 가 존재한다^[11]. Fig. 3 의 closed symbol 은 u_{LO} 인 지점을 나타낸다.

$V_{co} = 60$ cm/s 까지 증가할 때, u_{RA} , u_{LO} 그리고 u_{BO} 는 동축류 속도 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 동축류 속도가 증가함에 따라 이론 당량비에서의 축방향 유동속도가 증가한다^[10]. 따라서 화염부상이나 재부착이 일어나는 지점에서의 유동속도가 일정하다고 가정할 때, 동축류 속도가 증가함에 따라 u_{RA} , u_{LO} 및 u_{BO} 는 감소한다.

자유 제트의 부상 특성은 $H_L \sim au_0^b$ 의 경향을 보인다.^[2] 따라서 각각의 동축류 속도에 대하

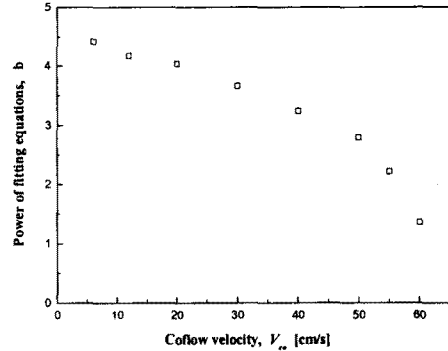


Fig. 4. Power of fitting equation with coflow velocity

여 $y = ax^b$ 로 부상높이를 커브 피팅하고 이때의 b 값을 Fig. 4 에 나타내었다.

$V_{co} < 15$ cm/s 인 강한 제트의 경우, 기존의 연구 결과 (J. Lee, 2003) 와 마찬가지로, 동축류 제트의 상사관계를 통해 유도한 상사해와 유사한 거동을 나타냈다. 그러나 동축류 속도가 커짐에 따라, b 값이 점차 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 동축류 속도가 증가함에 따라, $u - V_{co}$ 를 이용한 상사해가 존재하

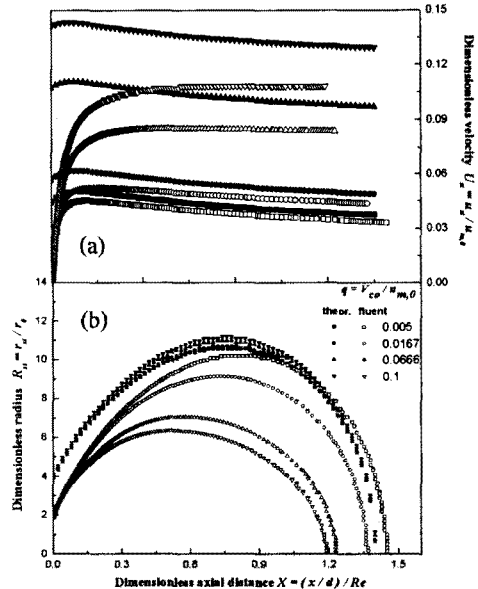


Fig. 5. Profiles of (a) stoichiometric contour, (b) axial velocity along stoichiometric contour (closed symbols : theoretical data, open symbols : FLUENT data)

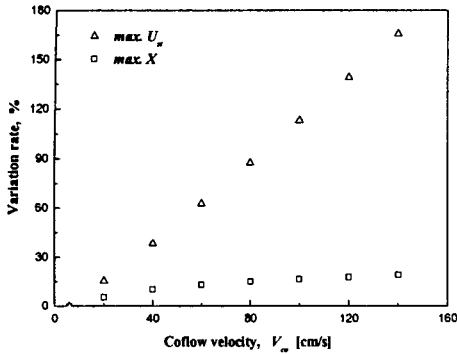


Fig. 6. Sensitivity of maximum dimensionless axial distance and dimensionless velocity

는 영역을 벗어나기 때문이다.^[9]

3.2 동축류 속도에 따른 냉간 제트 특성

$u - V_{co}$ 를 이용한 상사해가 존재하지 않는 영역에서 ($q = \frac{V_{co}}{u_m} \sim 1$) 동축류 속도 변화에 따른 유동장 특성을 살펴보기 위해 상용 수치해석 코드인 FLUENT를 이용하였다.

속도와 농도의 가상 원점에 대하여 계산한 이론식 및 수치해석 결과로부터, 무차원화된 이론 당량비선 (R_{st}) 와 이론 당량비 선을 따르는 무차원화된 속도 ($U_{st} = u_{st}/u_{m,0}$) 를 Figure 5 에 나타내었다.

FLUENT를 이용하여 구한 R_{st} 와 U_{st} 는 동축류 속도가 작을 경우, ($q < 0.0167$) 이론식으로 구한 상사해와 비슷한 결과를 나타낸다. 노즐 근처 R_{st} 및 U_{st} 의 차이는, 이론식의 경우가상원점을 이용하였기 때문에 생기는 출구의 속도분포 차이로 볼 수 있다. 동축류 속도가 증가함에 따라 R_{st} 와 U_{st} 가 이론식 결과와 다르게 나타나는 이유는 이론식에서 나타난 $u - V_{co}$ 의 상사성이 동축류 속도 증가에 따라 감소하기 때문이다.

동축류 속도변화에 따라 R_{st} , U_{st} 의 변화율을 살펴보기 위하여 R_{st} 의 축방향 최대 지점과 최대 U_{st} 의 변화율을 Figure 6 에 나타내었다. 변화율은 $V_{co} \approx 0$ 일 때를 기준으로 동축류 속도 증가에 따른 변화 값을 백분율로 나타내었다.

V_{co} 가 140 cm/s 일 때 U_{st} 의 변화율은 약

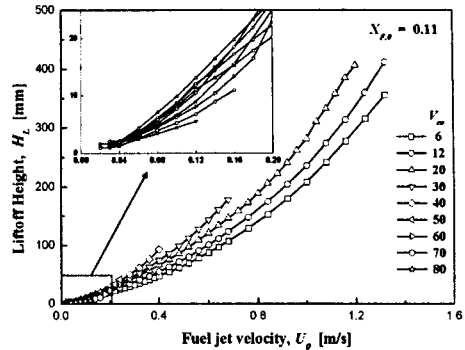


Fig. 7. Liftoff height variation with jet velocity at various coflow velocities. ($d=4.35$ mm, $X_{F,o}=0.11$)

170 % 인 반면에 R_{st} 는 20 % 미만의 변화율을 보인다. 따라서 Fig. 4 에서 나타난 곡선 맞춤식의 지수 값의 변화는 U_{st} 변화가 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다.

3.3 동축류 속도에 따라 질소 과다 희석된 프로판 제트의 부상 높이 변화

상대적으로 동축류 속도와 연료 제트의 속도가 비슷한 영역을 살펴보기 위하여, 내경이 4.35 mm 인 노즐을 사용하였고, 연료로는 질소 희석된 프로판을 사용하였다.

Figure 7 은 $X_{F,o} = 0.11$ 에서 $V_{co} = 6 \sim 80$ cm/s 의 경우, 제트 출구 속도에 따른 부상화염 높이를 나타낸 것이다. 또한 제트 속도가 0.2 m/s 이하 부분을 상세히 나타내었다. 세부그림에서 일반적인 경우와는 다르게 동축류 속도 증가에 따라 부상화염의 높이가 증가했다가 다시 감

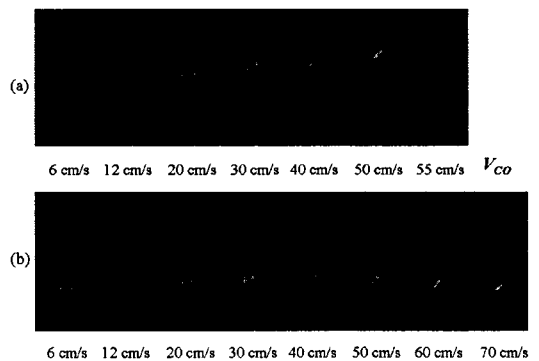


Fig. 8. Direct photographs (a) $u_o = 0.14$ m/s, (b) $u_o = 0.24$ m/s

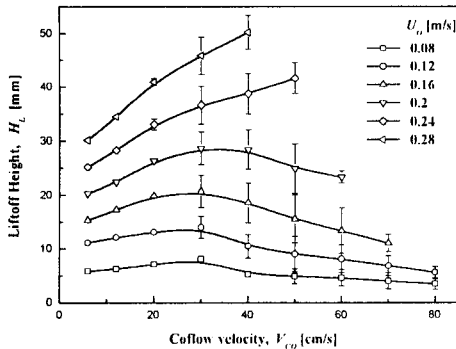


Fig. 9. Liftoff height with coflow velocity at various fuel jet velocities.

소하는 영역이 존재하는 것을 살펴볼 수 있다. 이 결과를 자세히 살펴보기 위하여 Figure 8의 직접 사진을 통하여 비교하여 보았다. 동축류 속도의 증가에 따라 화염이 기울어져 있지만, 화염이 불안정하게 움직이지 않고 안정된 자세를 유지하고 있다. Fig. 8의 (a)는 $u_0 = 0.24$ m/s로 V_{co} 증가에 따라 부상 높이도 같이 증가하고 있으나, (b)의 경우 $u_0 = 0.14$ m/s로 부상 화염이 V_{co} 증가에 따라 점차 증가했다가 다시 감소하는 것을 살펴볼 수 있다.

이러한 영역의 특성을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여, u_0 가 0.3 m/s 이하인 영역에서 동축류 속도 증가에 따른 부상 높이를 Figure 9에 나타내었다. Fig. 9에서의 오차범위는 Fig. 8에서의 기울어진 화염에서 최대 높이와 최소 높이를 나타내고 이때의 평균값을 부상 높이로 정하였다. $u_0 \geq 0.24$ m/s인 경우에 화염이 존재하는 영역에서 $u_m > V_{co}$ 이고 동축류 속도 증가에 따라 부상 높이가 증가하는 경향을 살펴볼 수 있다. 이는 J. Lee 등에 의해서 밝혀진 동축류 속도에 따른 부상화염 특성과 잘 부합한다. 그러나 $u_0 \leq 0.2$ m/s인 경우에 $u_m > V_{co}$ 인 경우에는 부상 높이가 동축류 속도에 따라 증가하지만 $u_m < V_{co}$ 인 영역에서 Fig. 8(b)에서의 사진처럼 V_{co} 증가에 따라 부상 높이가 감소하는 것이 나타난다. 이는 동축류 속도의 증가에 따라 $u_m < V_{co}$ 영역에서 이론 당량비를 따르는 유동속도가 급격하게 변하기 때문이라고 예측되어진다.

결론

동축류 제트에서 프로판 연료의 동축류 속도 증가에 따른 부상화염의 특성에 대하여 살펴보았다.

$d=0.254$ 노즐을 사용하여 동축류 속도를 60 cm/s 까지 증가시켰을 때, 모두 동축류 속도에 따라 비선형적인 증가를 하며 이를 $y = ax^b$ 에 곡선 맞춤을 했을 때 $V_{co} < 15$ cm/s 이하에서는 기존 연구 (J. Lee, 2003) 과 잘 일치하는 것을 볼 수 있으나, 동축류 속도가 15 cm/s 에서 60 cm/s 까지 증가할 때는 b 값이 급격히 감소하였다. 이때의 유동장 변화를 보기 위한 FLUENT를 통한 수치해석 결과는 동축류 속도에 따라 유동장의 R_{st} 및 U_{st} 의 변화를 가져오며, U_{st} 가 민감하게 반응하는 것을 살펴보았고, 실험을 통해 V_{co} 의 변화에 따라 b 값의 변화는 U_{st} 변화에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 상대적으로 동축류 속도와 연료 제트의 속도가 비슷한 영역을 살펴보기 위해, 내경이 4.35 mm인 노즐을 사용하였고, 연료로는 질소 희석된 프로판을 사용하여 부상 높이 변화를 살펴보았다. 이 때 $u_m > V_{co}$ 인 영역에서는 동축류 속도에 따라 부상화염의 높이가 증가하는 것을 볼 수 있었고, $u_m < V_{co}$ 인 경우 동축류 속도에 따라 부상 높이가 감소하는 것을 살펴보았다.

후기

이 연구는 연소기술센터 (CERC)와 서울대 기계항공공학부 BK-21에 의하여 지원되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] Phillips, H., "Flame in a buoyant methane layer", *10th Proc. Combust. Inst.* 10:1277-1283 (1965)
- [2] Chung, S. H. and Lee, B. J., "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet", *Combust Flame* 86:62-72 (1991)
- [3] Lee, B. J. and Chung, S. H., "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar

- Nonpremixed Jet", *Combust Flame* 109:163-182 (1997)
- [4] Lee, B. J., Cha, M. S., and Chung, S. H., "Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Partially Premixed Jet", *Combust Sci. Technol* 127:55-70 (1997)
- [5] Lee, B. J., Kim, J. S., and Chung, S. H., "Effect of dilution on the liftoff of non-premixed jet flames", *26th Proc. Combust. Inst.* 25:1175-1181 (1994)
- [6] 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", *28th Proc Combust. Inst.* 28:2093-2099 (2000)
- [7] 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 in coflow", *29th Proc. Combust. Inst.* 29, (2002)
- [8] Kim, J., Won, S. H., Shin, M. K., and Chung, S. H., "Numerical simulation of oscillating lifted flame coflow jets with highly diluted propane", *29th Proc. Combust. Inst.* 29 (2002)
- [9] Rajaratnam, N., *Turbulent Jets*, Elsevier Scientific Publishing Company (1976)
- [10] Lee, J., Won, S. H., Jin, S. H., Chung, S. H., "Lifted flames in laminar jets of propane in coflow air", *Combust. Flame* 135:449-462 (2003)
- [11] J. Lee and S. H. Chung, "Characteristics of reattachment and blowout of laminar lifted flames in partially premixed propane jets", *Combust. Flame* 127:2194-2204 (2001)