제23회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집 pp. 119~124

프로판 동축류 확산 화염에서 화염 부상과 재부착에 관한 실험적 연구

박성호*· 원상희*· 차민석**· 정석호***

An Experimental Study on Liftoff and Reattachment Characteristics in Concentric Burner

S. H. Park*, S. H. Won*, M. S. Cha**, and S. H. Chung***

Key Words: Concentric Burner (동축류버너), Lifted flame (부상화염), Liftoff (화염부상), Reattachment (재부착)

Abstract

Propane coflow diffusion flames have been experimentally studied to investigate the liftoff and reattachment characteristics. Flame properties such as velocity and density distribution were measured by LDV and shadowgraphy, respectively. It is shown that as the velocity of coflowing air increases, liftoff velocity decreases nonlinearly in turbulent jets and linearly in laminar jets, while reattachment velocity decreases nonlinearly. Meanwhile, as inner nozzle tip thickness increases, liftoff velocity increases with the reattachment velocity nearly unchanged. Liftoff phenomena in these flames can be categorized into three classes as a function of coflow velocity, such as laminar liftoff, turbulent liftoff, and transient liftoff.

기호설명

U_o : 내부 노즐 연료 질량유속

V_{co} : 동축류 공기 질량유속

Re : Reynolds 수

r : 반경방향 거리

r_o : 노즐 내경

u : 제트 축방향 속도

ID : 내부 노즐 내경

OD : 내부 노즐 외경

1. 서 론

부상 화염은 화염의 안정화 특성을 파악하기 위해 많은 연구가 이루어져 왔다. 화염의 전파 속도와 유동장의 속도가 일치하는 곳에서 화염이 안정화되며

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 한국기계연구원

*** 서울대학교 기계항공공학부

제트의 출구 속도에 따른 부상 높이의 변화 등은 이미 밝혀졌다.[1~2] Jongsoo Lee 등[10] 은 축대칭 층류 부상 화염에서 화염의 전파 속도와 유동 속도에 그거하여 재부착 현상에 대해 연구 하였다. 동축류 버너에서 부상 화염의 특성에 대해서도 여러 가지 연료에 대한 연구가 이루어져 왔다. Takahashi 등[3] 은 노즐의 두께에 따라 가연한계 (flame stability limits) 에 대해 연구 하였다. M.. S. Cha 등[8] 은 U-곡관에서 화염 부상이 일어날 때 노즐의 끝단에서 유동의 속도 기울기가 일정하다는 것을 연구하였다. 그러나 아직까지 화염 부상이 어떤 조건에서 일어나는지는 명확하게 밝혀지지 않았다.

본 연구에서는 동축류의 속도 변화에 따른 화염 부상시와 재부착시 속도 변화 특성을 고찰하고 화염의 구조에 대하여 연구하고자 한다.

2. 실험방법 및 장치

실험 장치는 동축류 버너, 유량계와 측정장치로 구성되어 있다. 내부 노즐은 스테인레스스틸의 직관으로 다양한 내경과 외경을 가지는 관을 이용할 수 있게 하였다. 내경은 2.5mm로 고정하고 외경이 3.0mm, 3.5mm, 4.5mm 관을 사용하였으며, 완전발달된 제트 출구의 속도 분포를 얻을 수 있도록 관 길이를 결정하였다. 연료는 C.P grade (>99%) 의 프로판 (C3H8) 을 사용하였다. 그리고 외부관은 균일한 유동장이 형성되도록 수축-확대 노즐 모양으로 스테인레스스틸로 제작되었다. 출구쪽 내경은 50mm, 입구쪽은 200mm로 면적 수축비 (contraction ration) 가 16으로 하였다.(4) 외부관으로는 공기가 공급되도록 하였다. 연료와 공기의 유량제어를 위해서는 질량유량계

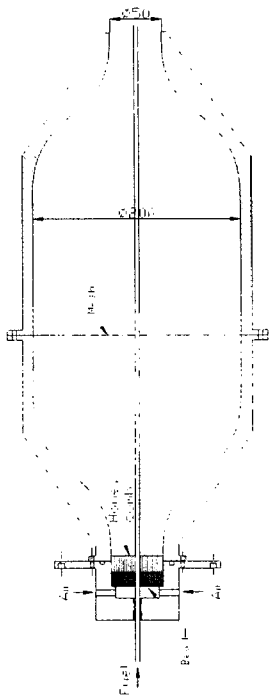


Fig. 1 Schematics of burner.

(mass flow controller, MKS) 를 사용하였다.

외부관으로 공급되는 동축 공기의 유속을 변화시켜 가면서 내부 노즐에서 화염 부상과 재부착이 일어나는 속도를 측정하였고, 카세토미터 (cathetometer) 를 이용하여 부상높이를 측정하였다.

화염 부상이 일어날 때 때 외부관으로 공급되는 공기의 유속을 측정하기 위해 후방산란 (backward scattering) 방식의 2-빔 (beam), 1 성분 레이저 Doppler 속도계 (laser Doppler velocimetry; LDV, TSI) 를 사용하였다. LDV 시스템은 아르곤 이온 레이저 (Coherent, INNOVA 70, 4W), 주파수 변조기 (frequency shifter), 광 프로브 (optical probe), 광증배관 (photomultiplier tube), 카운터 방식의 신호처리기와 데이터를 처리하는 컴퓨터로 구성되어 있다. 산란 입자는 직경이 0.3

㎛인 산화알루미늄 (Al2O3, Buehler, micropolish II) 을 사용하였다.

또 내부 노즐에서 연료유동이 층류에서 난류로 바뀌는 천이 영역을 관찰하기 위해서 연료의 밀도 구배를 측정하는 그림자 기법 (shadowgraphy) 을 적용하여 고속도 카메라 (Kodak, Ekta Pro SRULTRA) 로 촬영한 후 이미지를 PC를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 토론

3.1. 화염 부상과 재부착의 속도 변화

동축류의 출구 유속 변화에 따라 내부 노즐의 내경 2.5mm, 외경 3.0mm, 3.5mm, 4.0mm 에서의 화염 부상과 재부착시 속도 변화를 나타내면 Fig. 2 와 같다.

화염 부상시에는 내부 노즐의 두께가 증가함에 따라 동일한 동축류 속도 V_{co} 에 대해 부상 속도 U_o가 증가함을 알 수 있다. 이는 내부 노즐의 두께가 두꺼울수록 노즐로의 열전달에 의한 가열된 고온 부분의 확대 및 노즐 림 (rim) 근처에서 생성되는 재순환 (recirculation) 에 의한 보염 증대 효과 때문으로 사료된다. 그리고 중심 노즐에서의 유동이 난류일 때는 부상시 속도가 동축류 속도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하다가 층류로 바뀌면서 비선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

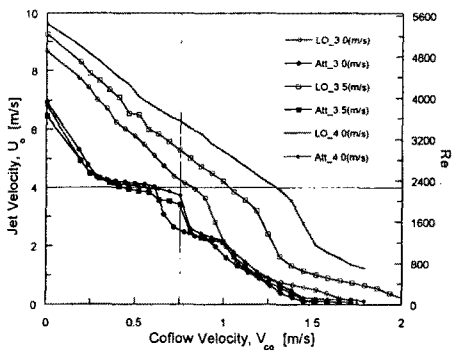
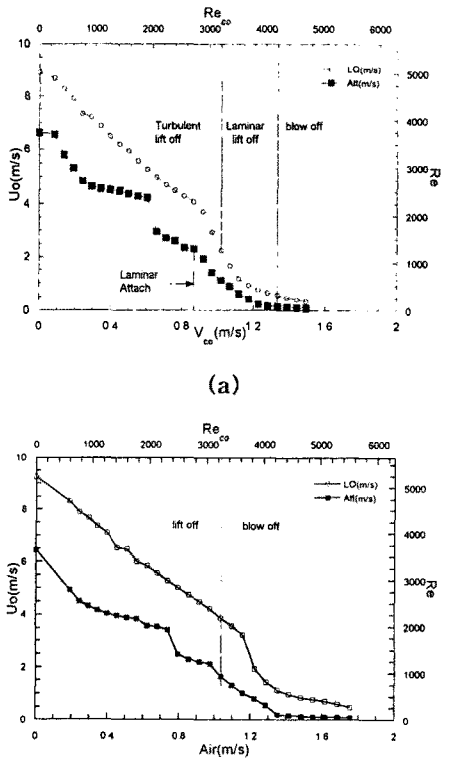


Fig. 2 Liftoff and Reattachment Velocity for ID=2.5mm, OD=3.0, 3.5, 4.0mm

화염 재부착시의 그래프를 보면 부상시에 비해 내부 노즐의 두께에 따른 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 재부착 현상이 유동속도와 화염전파속도 간의 관계에 기인하는 기존 연구 결과를 고려할 때(10) 노즐 림 두께 변화에 대한 전체 유동장의 변화는 무시할 수 있음을 알 수 있다.

동축류의 속도 변화에 따른 화염 부상과 재부착 현상에 대해 더 자세히 알아보기 위해 내경 2.5mm, 외경 3.0mm,



(a)

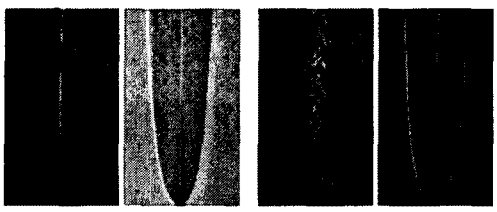
(b)

Fig. 3 Liftoff and Reattachment Velocity (a) ID=2.5mm, OD=3.0mm, (b) ID=2.5mm, OD=3.5mm.

3.5mm 인 노즐을 사용했을 때의 속도 변화는 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 (a)에서 보면 화염 부상시 V_{co} <1.02m/s 일 때 난류화염에서 부상이 일어나고 1.02m/s< V_{co}<1.33m/s 일 때 층류 부상 화염을 관찰할 수 있다. 그리고 V_{co} >1.33이면 부상화염이 존재하지 않고 화염날림이 일어나는 것을 볼 수 있다.

그러나 내부 노즐의 두께가 두꺼워진 Fig. 3의 (b)를 보면 낮은 동축류 속도에서 난류 화염으로 부상하다가 동축류의 속도가 증가하면 바로 부상 화염이 존재하지 않는 구간이 나타나게 된다. 또한 내부 노즐의 두께가 두꺼워 질수록 부상시 부상 화염이 존재하지 않는 구간이 적어지는 것을 볼 수 있다. 이는 내부 노즐의 두께가 두꺼워지면 내부 노즐 림 근처에서 연료와 공기의 재순환 공간이 커지게 되는데 이 때 유동의 교란이 커져서 유동이 불안정해지기 때문에 층류로 부상하는 구간이 존재하지 않게 되고, 나아가 부상화염이 존재하는 구간이 적어지는 것이라 사료된다.

재부착 현상을 살펴보면 동축류의 속도 V_{co} <0.2m/s 일 때는 V_{co}의 증가에 따라 재부착시의 속도가 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 구간에서는 부상 화염이 노즐에 재부착될 때 동축류의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 그리고 내부 노즐의 출구 속도 U_o가 3.18m/s에서 4.10m/s 사이일 때 재부착시 속도가 급격히 변하는 천이 영역이 나타나는데 그림자 기법을 이용하여 실험한 결과 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 내부 노즐의 유동이 층류에서 난류로 천이하는 구간임을 확인할 수 있었다. 이 때 동축류의 속도를 변화시켜 가면서 측정한 결과 동축류의 속도 변화에는 관계없이 U_o =3.18m/s (Re=1801) 일 때 유동이 깨지기 시작하여 U_o=4.10m/s (Re=2320) 가 되면 완전히 난류로 바뀌는 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 4에서 각각의 경우 왼쪽은 화염이 없을 경우이고 오른쪽은 화염이 있을 경우의 유동장의 모양이다.



(a) (b)

Fig. 4 Shadowgraphy, Vco=0.761m/s, (a)Uo=3.18m/s, Re=1801, (b)Uo=4.10m/s, Re=2320.

3.2. 부상 높이 변화

몇 가지 경우의 동축류 유속에서 내부 노즐의 출구 유속 변화에 따른 부상 높이를 카세토미터를 이용하여 내부 노즐이 내경 2.5mm, 외경 3.0mm 인 경우에 대하여 측정한 결과가 Fig. 5 와 같다.

화염이 노즐에 부착되어 있는 상태에서 노즐 출구 유속을 증가시켜 부상 유속에 도달하면 화염 부상이 발생하여 부

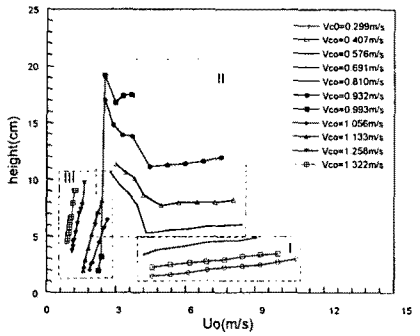


Fig. 5 Liftoff height, ID=2.5mm, OD=3.0mm,

상 화염이 형성된다. 여기서 출구 유속을 더 증가시키면 부상 화염의 부상 높이가 증가하다가 화염 날림이 발생하고 출구 유속을 계속 줄이면 부상 높이가 감소하다가 다시 노즐에 재부착 된다. 이 때 부상 높이 변화를 세 영역으로 나누어 관찰할 수 있는데 난류 부상 화염이 형성될 때 부상높이의 변화는 Fig. 5의 Ⅰ영역으로 U_o가 증가함에 따라 선형적으로 완만하게 증가한다. 그런데 Ⅱ영역인 V_{co}≈0.691, 0.810, 0.932m/s 일 때는 중심 노즐에서 연료의 유동이 층류에서 난류로 변하는 천이 구간을 포함하고 있는데 부상 후 중심 노즐 출구 유속을 줄이면 오히려 부상 높이가 증가하다가 어느 순간 노즐에 재부착되는 현상이 나타났다. 천이 구간에서 부상 높이가 중심 노즐의 속도를 줄이는데도 증가하는데 이는 냉간 제트 유동 (cold jet flow)의 붕괴길이 (breakup length) 와 관계가 있는 현상이다.(7) 그리고 층류 부상 화염 구간인 Ⅲ영역에서는 난류 부상 화염에 비해 U_o가 증가함에 따라 부상 높이가 선형적으로 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

3.3. 내부 노즐과 동축류의 속도 해석

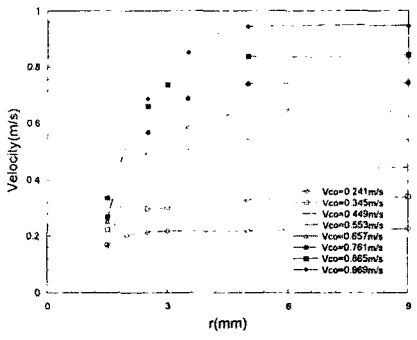


Fig. 6 LDV measurement for Coflow

동축류에서 나오는 유동을 균일하게 하기 위해서 버너를 수축-확대 노즐 모양으로 제작하였는데 LDV 실험을 통해서 균일한 유동이 나오는지 확인한 결과가 Fig.6 와 같다. 내부 노즐 끝단에서 0.2mm 높이에서부터 동축류의 공기 유속은 측정한 결과를 나타내고 있는데 내부 노즐의 중심에서 바깥쪽으로 5mm까지 속도가 급격하게 변하고 그 뒤로는 균일한 유동장을 가지는 것을 확인할 수 있다. U-곡관에서 화염 부상이 일어날 때 노즐의 끝단에서 유동의 속도 기울기가 일정하다는 기존의 연구 결과[8]를 토대로 하여 동축류 버너에서 화염 부상이 일어날 때 내부 노즐의 유동 속도와 동축류의 유동 속도와의 관계를 밝혀 보려고 하였으나 잘되지 않았다.

4. 결론

동축류버너에서 내부 노즐의 내경은 일정하게 하고 외경을 달리하여 화염 부상과 부상 화염의 재부착 특성을 살펴보았다. 동축류의 속도를 변화시키면서 화염 부상과 재부착시 속도를 측정하였으며, 각 화염의 특성을 그림자 기법과 LDV 기법을 이용해 알아보았다. 일반적으로 동축류의 속도가 증가함에 따라 화염 부상과 재부착시의 내부 노즐의 연료 속도는 감소하며 내부 노즐의 두께가 증가함에 따라 화염 부상시 속도는 증가하는데 비해 재부착 속도는 변하지 않았다. 그리고 내부 노즐의 두께가 두꺼워지면 층류인 상태로 부상이 일어나는 화염은 존재하지 않았다. 동축류의 속도 변화에 따라 부상 화염의 높이 변화는 세 가지 영역으로 나눌 수 있었다. 층류 부상 화염과 난류 부상 화염의 높이 변화가 달랐으며 특히 천이 영역에서는 화

염을 부상시키고 내부 노즐은 속도를 줄이면 오히려 부상 높이가 증가하는 현상을 볼 수 있었다.

참고문헌

(1) B. J. Lee, M. S. Cha, and S. H. Chung, "Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Partially Premixed Jet," Combust. Sci. and Tech., Vol. 127, pp. 55-70, 1997

(2) B. J. Lee, J. S. Kim, and S. H. Chung, "Effect of Dilution on the Liftoff of Non-Premixed Jet Flames," Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1175-1181, 1994

(3) Fumiaki Takahashi and W. John Schmoll, "Lifting Criteria of Jet Diffusion Flames," Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 677-683, 1990

(4) T. Morel, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions," Journal of Fluids Engineering, 1975

(5) G. W. Rankin and K. Sridhar, "Developing Region of Laminar Jets With Uniform Exit Velocity Profiles," Journal of Fluids Engineering, Vol. 100, 1978

(6) S. H. Won, S. H. Chung, M. S. Cha, and B. J. Lee, "Lifted Flame Stabilization in Developing and Developed Regions of Coflow Jets for Highly Diluted Propane," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, pp. 2093-2099, 2000

(7) M. S. Cha, D. S. Lee, and S. H. Chung, " Effect of Swirl on Lifted Flame Characteristics in Nonpremixed Jets," Combust. Flame 117, pp. 636-645, 1999

(8) M. S. Cha, H. G. Kim, and S. H. Chung, " Effect of Secondary Flow on Bunsen Flame in a U-Bend Tube," The Third Asia-Pacific Conference on Combustion, pp. 421-424, 2001

(9) 권성준, 차민석, 최만수, 정석호, "이중 동축류 버너에서의 예혼합화염 특성에 관한 연구,", 대한기계학회논문집 B권, 제24권 제12호, pp. 1662-1669, 2000

(10) 이종수, 정석호, "축대칭 층류부상화염에서 재부착현상에 관한 연구,", 한국연소학회지, 제5권 제2호, pp. 69-78, 2000