

이중 동축류 버너에서 부분예혼합화염의 특성에 관한 연구

Characteristics of Partially Premixed Flames in Double Concentric Burner

권성준, 차민석, 정석호
서울대학교 기계공학과

S. J. Kwon, M. S. Cha, and S. H. Chung
Department of Mechanical Engineering, Seoul National University

Abstract

Flame characteristics in a double concentric burner has been studied experimentally. Air is supplied through a central nozzle, methane/air premixture is supplied in a inner annular part, and coflowing shield air is supplied to minimize outside disturbances. Depending on flow rate and concentration, various flame shapes can be observed. As the flow rate difference between central air jet and annular premixed jet is varied, several distinctive flames are observed. Conditions of partially premixed flames are further investigated; nozzle attached rich premixed flame, inner lifted flame, and outer lifted flame. Using the Abel transformation of digitized images of flames, cross-sectional images of flames can be obtained, from which overall structure of flames can be identified. PLIF measurement of OH radical was also conducted. OH radicals were mainly distributed in diffusion flame region. From the difference of OH distribution between nozzle attached and lifted flames, similarity of OH distribution between tribrachial flame and lifted flames in this study are observed.

1. 서론

부분예혼합화염 (partially premixed flame) 은 과농한 예혼합기와 주위 공기의 영향으로 예혼합화염 및 확산화염이 공존하게 된다. 최근에는 연소기에서 과농예혼합화염과 희박예혼합화염을 번갈아 배치하여 화염 안정성 및 배출물 특성에 관하여 연구하기도 하며, 과농예혼합기 주변에 공기를 공급하여 전체적으로는 희박한 연소상태를 유지하면서도 안정적으로 연소상태를 이루도록 하고 있다.

Puri 등 [1-3] 은 이중 동축류버너에서 부분예혼합화염의 화염구조에 대한 수치해석적 연구 및 확산화염지역에서의 Froude Number 의 Flame-Vortex 에 대한 영향에 관해 연구하였다. Zhan 등 [4] 은 NO_x 및 주요 화학종의 농도에 대하여 연구하였다. 정중수, 이교우 [5-6] 는 이중 동축류버너에서의 매연입자 성장에 대하여 연구하였다.

부상화염에서 화염부상이나 화염거짐의 메커니즘은 명확히 규명되지 않았으나, 화염부상의 특성 및 부상높이에 대해서는 많은 연구가 수행되었다 [7-11]. 이 중에서 층류부상화염에 대한 연구에는 확산화염, 과농예혼합화염 및 희박예혼합화염이 공존하는 삼중화염의 특성으로 설명하려는

노력이 있어왔다 [7-11]. Lee 등은 부분예혼합 자유제트에서 화염부상 및 화염날림등에 관하여 연구하여 층류제트이론으로부터 부상높이, 화염날림시의 속도 등의 관계식을 유도하여 실험결과를 정성적으로 예측할 수 있음과 아울러 화염부상에 미치는 Schmidt 수의 중요성을 밝혔다.

이중 동축류버너에서의 부분예혼합화염중 부분적으로 부상하는 화염은 화염이 주변의 유동에 대해 비교적 안정적일 뿐 아니라, 예혼합화염 및 확산화염간의 상호작용으로 인한 특징을 가지고 있다. 본 연구에서는 일정한 예혼합기체의 유속에 대해 중심공기의 공급으로 인한 화염의 부분적 부상 현상에 대해서 관심을 가지고 이에 따른 화염의 구조 및 화염의 전파특성에 대해 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

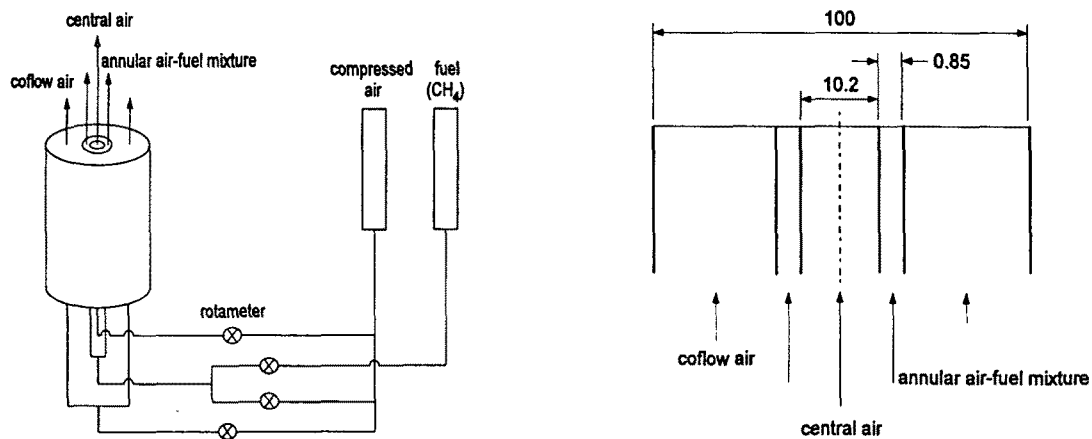


Figure 1 버너의 개략도

실험 장치는 버너, 유량조절부 및 측정부로 구성되어 있다 (Fig. 1 참고). 버너의 중심관의 내경은 10.2 mm이고, 중심관을 둘러싸고 있는 환의 안쪽 지름은 11 mm, 바깥쪽 지름은 12.7 mm 이다. 가장 바깥쪽에 있는 관의 직경은 100 mm이다. 중심관 및 바깥쪽 관은 황동으로, 그 사이의 관은 steel 로 제작되었다. 중심관의 경우 유체가 출구에 나올때 완전발달 (fully developed) 되도록 관의 길이를 설계하였고, 가장 바깥쪽에 있는 관의 경우 균일한 유동장이 형성되도록 유리구슬 (glass bead) 및 세라믹 하니콤 (honeycomb) 을 출구쪽에 설치하였다. 연료로는 C.P. 등급의 메탄이 쓰였고 산화제로는 공기가 쓰였다. 연료 및 공기의 유량을 제어하기 위해 보정된 rotameter 를 사용하였다. 환부분으로 예혼합기가 공급되기 직전의 관에 유리구슬을 채워서 예혼합가스가 잘 섞이도록 하였으며, 측정부로는 화염의 직접사진을 찍기 위한 35 mm 카메라 (Nikon, FM2) 와 ICCD 카메라가 사용되었다.

중심관에는 공기가, 환부분에는 예혼합가스가 공급되고, 최외각에서는 외부의 교란을 막기 위하여 유량 45.16 l/min 의 공기가 모든 경우에 일정하게 공급된다. 먼저 환부분의 당량비 및 예혼합가스의 유량, 중심 공기 유량을 변화시키면서 화염 모양의 변화를 관찰하였고, 다음으로는 중심 공기의 공급없이, 환부분의 당량비와 속도를 바꾸면서 화염의 모양을 관찰하였다. 각 화염 중 특징적인 몇가지 화염에 대해서는 일반카메라 및 ICCD 카메라를 사용하여 화염의 모양을 관

찰하였다. 평면 레이저유도 형광법 (PLIF) 의 적용을 위한 레이저 광원으로는 Nd:YAG 레이저 (Continuum, Powerlite 8000), 색소 (dye) 레이저 (Continuum, ND6000) 및 주파수 배가기 (frequency doubler, Continuum, UVX) 를 사용하였다. OH 라디칼 여기파장으로 $A^2\Sigma^+ - X_2\Pi_i$ (1, 0) 밴드 $Q_1(6)$ 라인 (283 nm) 을 선정하였으며, 이를 실린더렌즈 ($f = 50$ mm) 와 볼록렌즈 ($f = 500$ mm) 를 이용하여 노즐출구와 수직하게 입사되는 폭 5 cm 의 평면광으로 변화하였다. LIF 신호의 계측을 위하여 입사광과 90° 위치에 ICCD 카메라를 설치하였으며, 105 mm UV렌즈 및 산란 신호를 줄이기 위한 WG-305와 OH 형광신호 부분을 받아들이기 위한 UG-11 광학 필터가 사용되었다.

3. 실험결과 및 검토

3.1. 중심공기유량에 따른 화염모양

Figure 2 는 환부분의 조건이 $\phi = 2.0$, 유속 1.23 m/s 일때 중심공기의 유량을 증가시키면서 화염의 모양을 직접 촬영한 것이다. 과농예혼합화염에서 중심공기의 유량이 늘어남에 따라 화염은 안쪽의 역확산화염이 바깥쪽화염과 만나 Fig. 2a 와 같은 환형고리모양의 화염이 형성된다. Fig. 2b 는 중심공기의 유량증가에 따라 안쪽화염면이 부상된 화염의 모양을 띠고 있다. Fig. 2c 는 안쪽에 부상된 화염이 날아가고 전체적인 화염은 바깥쪽의 화염에 의해 노즐에 부착되게 된다.

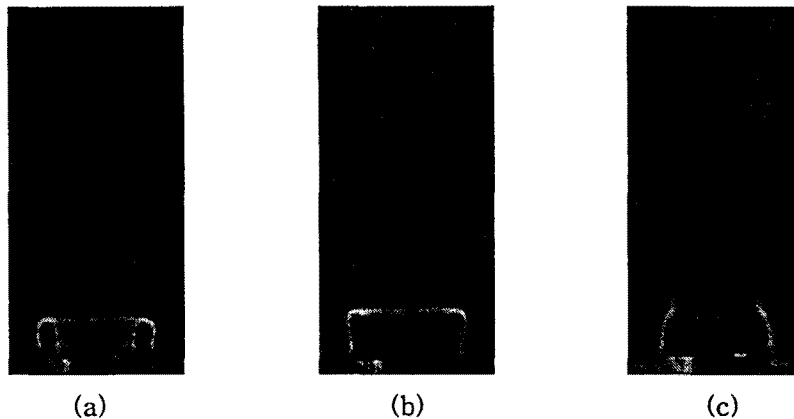


Figure 2 중심공기유량에 따른 화염사진

환형고리모양화염 (Fig. 2a) , 안쪽부상화염 (Fig. 2b) 을 ICCD 카메라로 촬영하여 얻은 이미지의 한 화소 (pixel) 에 기록된 화염의 강도는 화소에 이르기까지 각 지점화염의 강도가 시선적분 (line of sight integration) 된 것으로 대략 생각할 수 있다. 따라서 엄밀한 의미에서 선적분된 경우는 아니지만 이들 축대칭인 화염의 이미지를 Abel 변환하여 중심을 지나는 단면에 대한 화염의 이미지를 얻을 수 있고 이를 Fig. 3 에 나타내었다. Figure 3a 에서 볼 수 있듯이 이 화염은 안쪽 및 바깥쪽 예혼합화염이 만나서 형성된 화염이고 이것은 한쪽 단면만 보았을 때 과농예혼합화

염의 단면과 유사하다고 생각할 수 있다. 이 예혼합화염 바깥쪽에 확산화염이 형성되어 있으며 반대편의 확산화염과 상호작용하여 후류로 갈수록 중심축으로 모이고 있음을 알 수 있다. Figure 3b 에서는 안쪽의 예혼합화염이 부상된 것을 확인할 수 있으며, 측면의 예혼합화염면 바깥쪽에는 확산화염이 형성되어 안쪽의 화염에서 생긴 확산화염과 만나 후류까지 이르고 있다. 안쪽의 부상 화염이 약간 아래쪽으로 내려가 이곳에서 화염이 안정화되었고, 이곳의 화염의 강도가 매우 강한 것을 볼 수 있다. 이 지점까지 예혼합기가 도달할 때 과농한 예혼합기는 중앙에서 공급되는 공기와 혼합하게 되고, 반경방향 어느 지점에서든 이론 당량비를 이루게 된다. 이 지점에서 확산화염이 존재하고 있고 환부분에 형성된 예혼합화염은 과농예혼합화염으로 생각할 수 있으므로 이 지점에 과농, 희박예혼합화염과 확산화염이 공존하는 삼중점이 존재한다고 생각되며, 이후 OH 라디칼 계측을 통하여 좀 더 논의해 보겠다.



Figure 3 중심공기 유량에 따른 화염의 단면사진

중심공기유량에 따른 화염모양의 변화를 나타낸 것이 Fig. 4a 이다. 고정된 환부분속도에 대해 중심공기를 증가시키기에 따라 고리모양화염, 안쪽부상화염, 안쪽화염이 날아가는 화염이 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 이때 과농예혼합화염의 각 당량비에 대해 중심공기 및 예혼합가스의 속도에 따른 화염모양의 변화 경향은 유사하다.

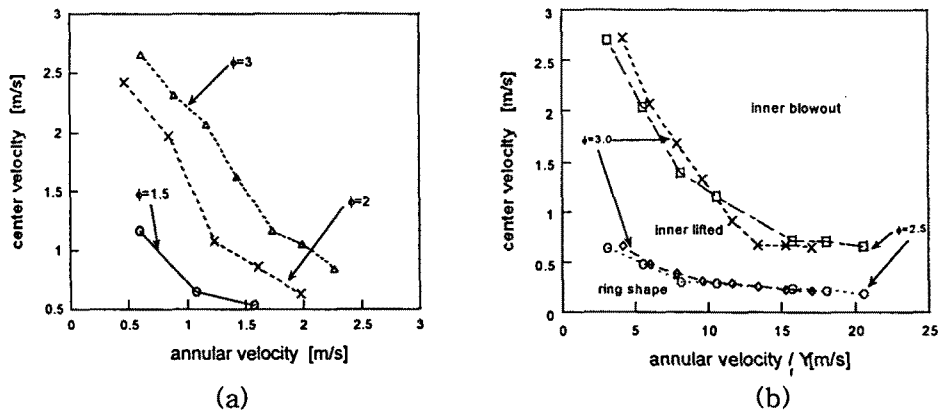


Figure 4 중심공기 유량에 따른 화염선도

안쪽부상화염중 화염의 모양이 'ㄱ'자 형태가 될때(안쪽화염이 날아가기 직전)에 대한 자료

(Fig. 4b) 를 보면 고정된 당량비에 대해 환부분의 속도가 늘어남에 따라 중심속도는 감소하는 것을 알 수 있다. 또 고정된 중심속도에 대해서는 당량비가 높아질수록 환부분 속도도 늘어나게 된다. 이에 대해서는 화염주변의 농도장 및 유동장의 변화에 대한 고찰이 필요하다고 생각된다.

위 실험에서 당량비가 낮은 경우 ($\phi = 1.5, 2.0$), 예혼합가스의 속도가 빠르면 중심공기의 공급이 없더라도 화염이 안정되지 않고 화염날림이 일어나게 된다. 그러나 이 경우 중심공기를 어떤 유량으로 공급하느냐에 따라 화염이 안정되어 노즐에 부착될 수도 있고 화염날림이 일어날 수도 있다. Figure 5 는 환부분 조건이 $\phi = 1.5$ 이고 유속이 2.52 m/s 일때에 대한 사진이다.

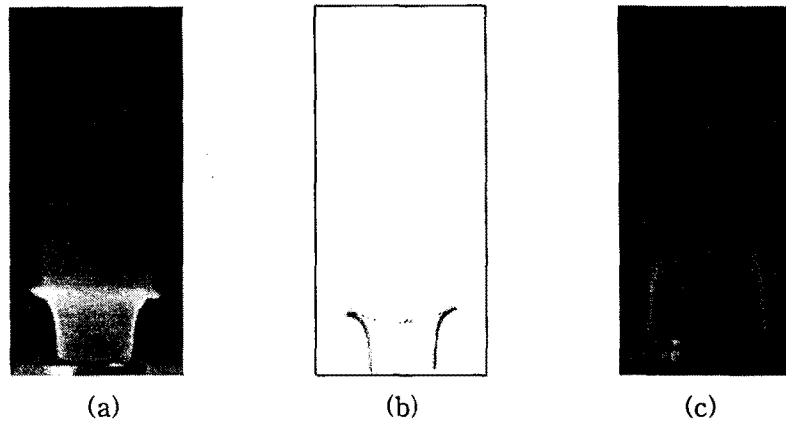


Figure 5 소염이후 중심공기 첨가에 따른 화염변화

중심공기의 유량이 없을 경우에 화염날림이 일어난다. 중심공기를 약간만 공급해주고 (0.19 m/s), 노즐가까이에서 점화시키면 화염은 안쪽부분이 노즐에 부착되어 안정화된다. 바깥쪽의 부상된 부분의 화염은 소리를 내며 위아래로 떨리는 것을 관찰할 수 있다. 이에 대한 화염의 모양이 Fig. 5a 이다. 이 화염에 대한 ICCD 이미지를 Abel 변환한 것이 Fig. 5b 이다. 이 화염의 경우 예혼합화염 및 확산화염지역의 강도는 다른 화염에 비해 더 강하며, 바깥쪽의 부상된 화염면의 강도는 이 화염의 다른 곳에 비해 매우 강하다. Fig. 5a 를 보면 안쪽에 아주 약한 화염이 있다고 생각할 수 있고, 단면 Fig. 5b 를 보면 안쪽에 화염이 형성된 것을 확인할 수 있다. 이것은 확산화염으로 생각되며 전체화염을 화염이 날아가지 않도록 노즐에 부착시키는 역할을 하는 것으로 추정된다. 중심공기의 유량을 더욱 증가시키면 안쪽의 화염이 날아가게 되고 유량을 매우 많이 증가시킨 후(중심부분의 유량 22 l/min 이상, 유속 4.48 m/s 이상) 재점화하게 되면 화염은 바깥쪽에서 노즐에 부착되어 Fig. 5c 의 모양을 하게 되고, 더 이상 화염모양의 변화는 없다. 이 화염은 앞의 Fig. 2c 의 화염과 매우 유사한 것으로 생각된다.

3.2. 당량비 및 유속에 따른 화염모양

Figure 6 은 중심공기의 공급없이 환부분의 당량비 및 유량조건을 변화시키면서 화염의 모양을 관찰한 것이다. 환부분에서 연료의 유량을 고정하고, 환부분의 공기유량을 증가시키기에 따라 화염은 Fig. 6a-c 의 모양으로 변화한다. 처음에는 확산화염에서 과농예혼합화염의 형태로 바뀌

고, 공기가 더 많이 공급되면 연료는 아래쪽에서 모두 반응하게 되고, Fig. 6a 의 모양을 하게 된다 ($\phi = 1.2, v = 1.30 \text{ m/s}$). 이 화염은 Fig. 2a 의 경우와 같이 환의 한 단면이 각각 과농예혼합화염의 형태를 띤다고 생각된다. 공기를 증가하면 Fig. 6b 와 같이 안쪽이 노즐에 부착되고 바깥쪽은 부상된 화염의 형태를 띤다 ($\phi = 0.9, v = 1.57 \text{ m/s}$). 이 화염은 앞에서의 Fig. 5a 와 형태가 유사하지만, 이 화염의 경우 안쪽의 순환구역 (recirculation zone) 에 의해 안쪽의 화염이 노즐에 붙어 있는 것으로 생각된다. 공기를 더 증가하면 Fig. 6c 와 같이 바깥쪽의 화염은 날아가고 안쪽의 화염이 길게 늘어나서 관과 같은 형태를 띤다 ($\phi = 0.69, v = 2.18 \text{ m/s}$). 이 이상의 유량이 공급되면 화염의 중간부분이 오목해지면서 화염이 날아가 더이상 화염은 존재하지 않는다. 이외에 당량비 1.5, 2 인 경우 유속이 빠른 경우에는 환형고리모양의 화염이 나타나지 않고 불안정한 바깥쪽부상화염이 발생하고 이후 안쪽이 날아가는 화염날림이 발생한다.

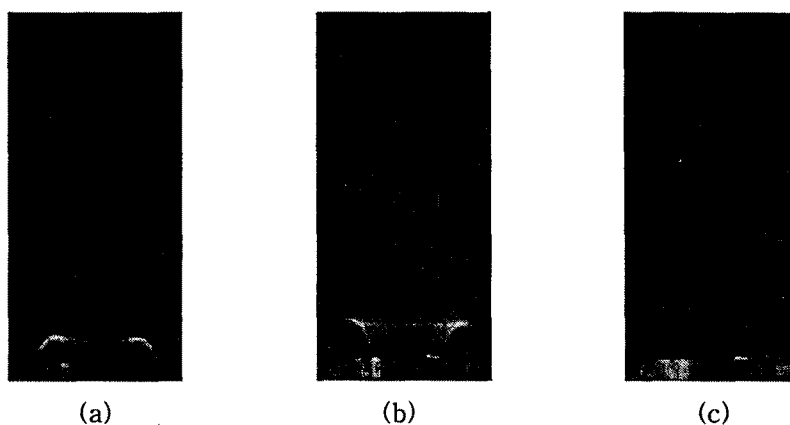


Figure 6 환부분 당량비 및 유속의 변화에 따른 화염

위의 화염중 Fig. 6b 의 경우에 대해 유량-당량비의 관계를 Fig. 7 에 나타내었다. 당량비가 높아질수록 Fig. 6b 의 화염이 나타나는데 필요한 유속이 크다는 것을 알수 있다.

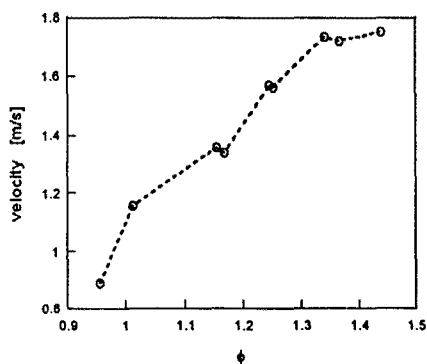


Figure 7 바깥쪽 부상된 화염의 유량-당량비 선도

3.3. OH 라디칼의 농도

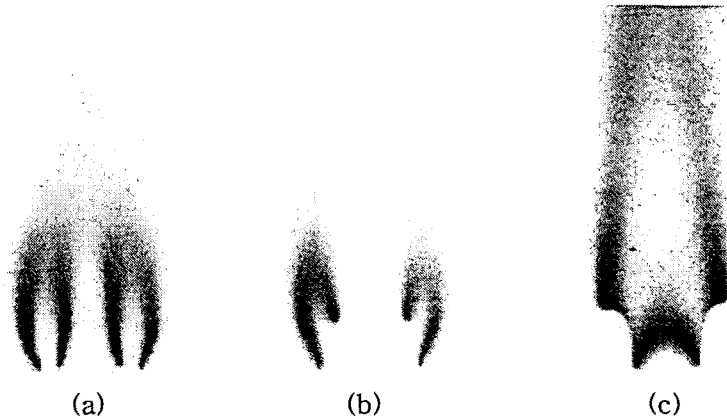


Figure 8 OH 라디칼의 분포

Figure 8 은 앞의 Fig. 2a, Fig. 2b, Fig. 5a 의 화염에 대해 PLIF 에 의한 OH 라디칼의 농도 분포를 측정한 것이다. Fig. 8a 를 보면 과농예혼합화염에서는 OH 라디칼이 거의 보이지 않고 확산화염지역에서 OH 라디칼이 매우 많이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 한 단면에 대해 안쪽과 바깥쪽 화염의 OH 라디칼이 예혼합화염 위쪽에서 만나게 되고 그 후류에서는 양 단면의 OH 라디칼이 만나게 되는 것을 볼 수 있다. 중심공기를 더 공급한 Fig. 8b 를 보면 OH 라디칼은 바깥쪽 확산화염 중간지역과 안쪽의 부상화염 지역에서 매우 많이 분포하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 OH 라디칼의 분포를 보면, 부상화염의 경우 삼중점 부근에서 많이 분포하고 확산화염의 경우 노즐부근보다는 화염중간지역에서 많이 분포하는 경향을 보인다 [11]. 따라서 Fig. 8b 화염의 경우 안쪽 부상화염 지역에 삼중점이 존재한다는 근거가 될 수 있으며, 중심공기유속의 증가로 화염의 상호작용이 차단되어 중심축부근에 OH 라디칼이 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. Fig. 8c 를 보면 앞에서 예측한대로 안쪽에 OH 라디칼이 다량 분포하여 확산화염이 존재하는 것을 확인할 수 있으며 이로 인하여 화염이 날아가지 않고 안정화됨을 알 수 있다.

4. 결론

이중 동축류버너에서 환부분의 당량비, 속도, 중심공기속도가 변함에 따라 나타나는 화염의 특성에 대해서 알아보았다. 중심공기의 공급이 없고, 환부분의 당량비, 유속을 변화시켰을 때 나타나는 화염중 바깥쪽이 부상하는 화염은 당량비가 높아짐에 따라 부상에 필요한 유속이 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이 경우 화염은 안쪽의 순환구역에 의해 노즐에 붙어 안정화된다. 환부분의 당량비, 속도를 고정하고 중심공기의 속도를 증가시킴에 따라 나타나는 화염중 안쪽이 부상하는 화염의 경우, 직접사진 및 단면사진, OH 라디칼의 분포를 통해 안쪽의 부상된 화염지역에 삼중점이 존재할 가능성을 확인할 수 있었다. 이 경우 환부분의 유속이 증가함에 따라 안쪽화염이 부상하는데 필요한 중심공기의 유속은 줄어든다는 것을 알 수 있었다. 이때 중심공기의 유속 변화에 따른 그 주변의 농도장 및 유동장의 변화등이 화염의 부상에 영향을 줄 것으로 생각되는데 이에 대한 것이 앞으로의 과제라고 생각한다. 또 유량이 큰 경우 화염날림이 일어날때 중심공기의 공급에 따라 화염이 형성되기도 하였는데 이러한 경우의 고찰를 통한 화염의 구조에 대한

연구가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. SHU, Z., Aggarwal, S. K., Katta, V. R., and Puri, I. K., "A Numerical Investigation of the Flame Structure of an Unsteady Inverse Partially Premixed Flame", *Combust. Flame*, Vol. 111, pp. 296-311, 1997
2. SHU, Z., Aggarwal, S. K., Katta, V. R., and Puri, I. K., "Flame-Vortex Dynamics in an Inverse Partially Premixed Combustor : The Froude Number Effects", *Combust. Flame*, Vol. 111, pp. 276-295, 1997
3. Aggarwal, S. K. and Puri, I. K., "Flame Structure Interactions and State Relationships in an Unsteady Partially Premixed Flame", *AIAA*, Vol. 36, No 7, 1998
4. GORE, J. P. and ZHAN, N. J., "NO_x Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-flow Jet Flames", *Combust. Flame*, Vol. 105, pp. 414-427, 1996
5. 정종수, 이교우, "동축 이중 확산화염에 대한 중앙 공기제트 유동의 영향", 대한기계학회 춘계 학술대회논문집B, pp. 37-42, 1997
6. 정종수, 이교우, 고범승, 강경태, "동축 이중 확산 화염의 매연 생성 특성", 대한기계학회 춘계 학술대회논문집B, pp. 674-679, 1998
7. Chung, S. H. and Lee, B. J., "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet", *Combust. Flame*, Vol 86, pp. 62-72.
8. Lee, B. J., Kim, J. S., and Chung, S. H., "Effect of Dilution on the Liftoff of Non-Premixed Jet Flames", *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1994, pp. 1175-1181.
9. Lee, B. J., Cha, M. S., and Chung, S. H., "Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Partially Premixed Jet", *Combust. Sci. Technol.*, Vol 127, pp. 55-70.
10. Lee, B. J., and Chung, S. H., "Stabilization of Lifted Tribachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet", *Combust. Flame*, Vol 109, pp. 163-172.
11. 이병준, 정석호, 한재원, "평면 레이저유도 형광법을 이용한 부상화염의 특성 연구", 대한기계학회논문집(B), 제 21권 제 11호, pp. 1393-1402, 1997.