

다수 부분 예혼합 화염의 화염날림 유속 확대

이병준*† · 김진현**

Nozzle configurations for partially premixed interacting jet flame to enhance blowout limits

Byeong-Jun Lee*, Jin-Hyun Kim**

ABSTRACT

For the non-premixed interacting jet flames, it has been reported that if eight small nozzles are arranged along the circle of 40 ~ 72 times the diameter of single jet, the flames are not extinguished over 200m/s. In this research, experiments were extended to the partially premixed cases to reduce both flame temperature and NOx emission. Nine nozzles were used- eight was evenly located along the perimeter of the imaginary circle and one at the geometric centre. The space between nozzles, S , the equivalence ratio, Φ , the exit velocity and the role of the jet from the centre nozzle were considered. Normally, flame was lifted and flame base was located inside the imaginary circle made by the nozzle. As nozzles went away from each other, blowout velocity increased and then decreased. The maximum blowout velocity diminished with the addition of air to the fuel stream. When the fuel and/or oxidizer were not fed through the centre nozzle, the maximum blowout velocity obtained by varying S and Φ was around 160m/s. Optimum nozzle separation distance at which peak blowout velocity obtained also decreased with Φ decrease. Flame base became leaner as approaching to the blowout. It seemed that lots of air was supplied to the flame stabilizing region by the entrainment and partially premixing. To approve this idea and to enhance the blowout velocity, fuel was supplied to the centre region. With the small amount of fuel through the centre nozzle, partially premixed flame could be sustained till sonic velocities. It seemed that the stabilizing mechanism in partially premixed interacting flame was different from that of non-premixed case because one was stabilized by the fuel supply through the centre nozzle but the other destabilized.

Key Words : Flame Stability(화염 안정성), Flame Interaction(화염의 상호작용), Blowout(화염날림), Partially premixed flame(부분 예혼합화염)

기 호 설 명

S Distance between the nearest nozzles	$u_{b.o}$ Blowout Velocity
D Diameter of nozzle	Q Flowrate ml/min]

* 영남대 기계공학부

† Email : bjlee@yu.ac.kr

TEL : (053)810-3526 FAX : (053)810-4627

** 한국기계연구원

1. 서 론

최근 산업이 발달함에 따라 에너지의 수요가 급

격히 증가하여 고효율의 연소 장치가 요구되고 있으며, 환경오염 문제에 대한 사회적인 의식변화에 따라 저공해배출 연소장치에 대한 요구와 규제가 강화되고 있다. 이와 아울러 공간이용의 극대화를 위하여 소형 경량화의 요구 또한 급증하고 있다. 이러한 요구를 만족시키는 소형·고효율·고부하 연소기의 개발은 연소분야의 핵심사항 중의 하나로 부각 되고 있다.

또한 가정용 난방기나 보일러 등은 공간이용의 효율성을 높이기 위하여 크기를 소형화하는 방향으로 제품개발이 이루어지고 있다. 이를 위한 방법 중의 하나는 화염의 크기를 줄이는 것이다.

동일하게 요구되는 발열량(또는 연료량)에 대하여, 층류 화염의 크기는 노즐 출구 유속이 아닌 유량에 비례[1]하기 때문에, 연료를 다수의 노즐에 나누어 보내게 되면 화염의 길이를 줄일 수 있다. 난류 화염의 경우, 화염길이는 유량이 아닌 노즐직경에 비례[2]하기 때문에 작은 직경의 노즐을 쓰는 것이 화염크기 축소에 효과적이다. 그러나 난류 화염날림이 일어날 때의 속도, u_{bo} , 가 제트의 직경에 비례[3]하므로, 직경이 작은 노즐은 큰 것만큼 많은 양의 연료를 연소시킬 수 없게 된다. 따라서 화염의 크기를 줄이면서 필요한 난방 부하를 맞추기 위해선 난류화염의 경우에도 여러 개의 노즐을 사용하는 것이 효과적이다.

이와 같이 화염의 길이축소를 위해서 노즐직경을 줄이는 경우에 다수의 노즐이 필요하게 되므로, 연소실내에서 화염들은 서로 영향을 주고받는 화염상호작용[4~9]을 초래하게 되어 단일 화염과는 다른 특성을 나타내게 된다.

화염의 상호작용은 노즐 형상, 노즐 직경, 노즐 간의 거리, 연료 유속 등에 따라 열 및 물질전달, 운동량전달에 영향을 주어 화염의 기울어짐, 화염의 합류 및 화염의 길이 변화 등의 가시적인 영향뿐만 아니라, NOx, CO, O₂ 농도분포, 온도 분포 등에 영향을 미치게 된다. 또한, 화염의 상호 작용은 단일 화염에서보다 화염이 꺼지는 유량을 증가시켜 화염을 안정화시키는 효과가 있다 [5~9].

이 등[8]은 동일 직경의 노즐 5개를 선형으로, 5개를 diamond 형으로, 4개를 cross 형으로 배열한 경우에 대하여 연구를 수행하였다. Q_{bo}이 노즐의 수와 배열에 따라 영향을 받으며, 5개의 노즐을 diamond 형태로 노즐직경의 28~32배로 노즐간격을 유지하면 화염날림의 유량이 동일면적의 단일 노즐보다 3.3배 증가함을 보였다.

김 등[9]은 동일 직경의 중앙부 노즐이 없는 8개의 원형 혹은 matrix 형으로 배열한 경우, 노즐거리(S/D)가 15.3~27.6 사이에서는 노즐출구에서 초경되어도 비예혼합 연료에 의한 화염의 화염날림이 일어나지 않음을 보였으며, 화염의 안정

화가 증가하는 것이 기연가스의 내부 재순환에 의한 것임을 슬리렌사진으로 보였다.

그러나 비예혼합 화염은, 화염이 이론당량비인 지점에서 형성되는 특성으로 인하여 NOx 저감면에서는 제한적인 제어만이 가능하다. 향후 연소장치의 배출가스에 따른 환경 문제는 경제문제로 직결되는 상황이 초래될 전망이다. 이에 대처할 수 있는 저공해·고부하 연소기의 개발도 필요하다.

본 연구에서는 다수 비예혼합 화염에서 형성된 것으로 가시화된 기연가스의 재순환영역을 온도계측으로 확인하고, 상호작용 화염의 연구를 NOx 저감에 효과적인 예혼합 상호작용화염으로 확장하기 위한 연구의 일환으로 부분예혼합 상호작용화염의 안정적인 노즐배열과 화염날림에 관해서 수행하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 1은 부분 예혼합 실험과 동축류 실험이 가능하도록 제작된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 연료(LPG, C₃H₈)와 공기는 각각의 질량유량계(Mass Flow Controller; MKS)에 의해 유량이 조절된 후 유량분배기 직전에 혼합된다. 유량분배기에 공급된 혼합기는 등원주각으로 접한 각각의 개별노즐로 공급된다. 개별노즐은 미리 천공된 노즐 배열형상을 가진 판에 삽입되어 수직이 유지된다. 유량분배기는 각각의 노즐로 연료를 균일하게 공급하기 위한 부분으로 직경 2.54cm 길이 25cm판으로 제작되었다. 이 유량분배기의 상단부에 동일한 원주각으로 내경 0.31mm(외경 0.55mm), 길이 300mm의 스테인리스 노즐을 부착하였다. 노즐들은 동축류버너의 중앙에 설치된 외경 36mm의 중앙부 파이프로 삽입된다. 중앙부 파이프의 윗면은 외경 0.55mm의 노즐들이 원형으로 배열될 수 있도록 미리 천공된 판으로 막혀있다. 중앙파이프의 선단면에는 내경 36mm이고 외경을 달리하는 와셔형태의 판을 부착하여, 외부에서 공급되는 공기에 의해 형성되는 재순환 영역의 영향을 파악할 수 있도록 하였다. 본 실험에서 사용한 와셔형 판의 외경은 51mm이다. 노즐은 중앙파이프의 윗면에서 6mm 돌출되게 설치하였다.

중앙파이프의 외부로 공급되는 공기의 균일한 출구 속도를 얻기 위하여 허니컴(1mm*1mm셀, 50mm두께, 외경94mm), 직경 2mm의 스테인레스 구슬층과 철망을 사용하였다.

동축류 실험에서는 동축류 버너 외부에 길이 60cm의 석영관을 설치하여 외부유동의 영향을 제거하였다. 또한 노즐 직경이 비예혼합 화염의 상호작용에 미치는 영향을 파악하기 위하여 내경

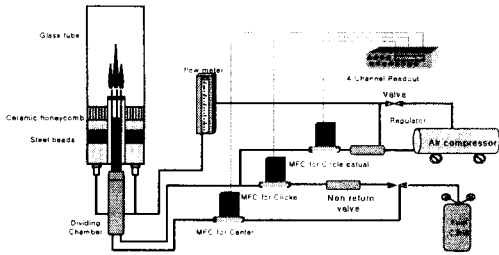


Fig. 1 Experimental apparatus

0.7mm의 노즐 8개를 사용한 원형배열에서의 화염날림 유량의 측정도 수행하였다.

노즐간의 거리 S와 노즐직경 D를 무차원한 S/D를 변화시키면서 비예혼합연료의 화염날림 특성을 연구한 김등[9]의 선행연구에서, 8개의 노즐을 배열의 중앙에 노즐이 없이 원형이나 matrix 형태로 배열하고, 노즐간격을 15.3-27.6D로 하면 노즐출구에서 목막힘(choking) 일어나도 화염날림이 발생하지 않음을 보였다. 이 때의 형성된 화염은 청염이며, 내부 재순환이 화염을 안정화시킨다는 것을 보였다. 따라서 본 연구에서는 선행연구에서 안정하다고 밝힌 8의 원형배열을 기본으로 하여 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 상호작용하는 비예혼합 화염의 특성

3.1.1 노즐 직경의 효과

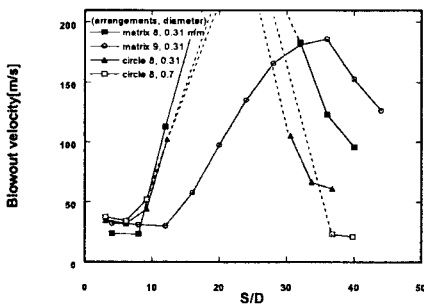


Fig. 2 Nozzle size effects on the blowout velocity of the non-premixed interacting jet flames for circular 8 nozzle.

노즐직경에 따른 화염날림 유속의 변화를 고찰하기 위하여, 선행연구의 0.31mm노즐에비하여 면적이 4배 이상이면서 구입 가능한, 내경0.7mm의

노즐8개를 사용하여 실험한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. S/D로 무차원화하는 경우에 두 노즐 모두 서로 유사한 경향임을 볼 수 있다. 중앙부에 노즐이 없는 원형배열에서 화염의 상호작용효과가 큰 영역(노즐 출구에서 목막힘 현상이 일어나도 화염날림이 일어나지 않는 영역)이 S/D=12~30로 노즐직경과 무관하게 나타나는 것은 본 연구를 scale up 하여도 적용이 가능하다는 것을 보여준다.

화염날림 유속은, 노즐이 서로 인접한 경우에는 직경이 커짐에 따라 약간 증가하나, 노즐이 서로 멀리 떨어진 경우에는 직경이 작은경우가 더 크음을 볼 수 있다. 단일 노즐의 화염날림 유속은 직경에 비례한다는 것으로는 이러한 경향을 설명할 수 없으므로 이에 대한 연구가 향후 필요하다.

3.1.2 재순환 영역의 온도 측정

상호 작용하는 비예혼합 화염에 대하여 실험을 수행한 선행 연구[9]에서는, 노즐배열의 중앙부에 노즐이 없는 경우가 있는 경우에 비하여 안정한 이유가 내부재순환 때문임을 Schlieren 기법을 사용하여 보였다. 그러나 Schlieren에서 나타나는 명암이 광로에 대한 적분이므로 재순환의 효과가 어디까지 미치며 어느 경로를 따라오는지에 대한 것은 밝힐 수 없었다. 이를 밝히기 위하여는 온도장과 속도장의 계측이 필요하나, 본 연구에서는 화염 밀면의 온도장 계측으로부터 재순환영역의 범위를 보이고자 한다.

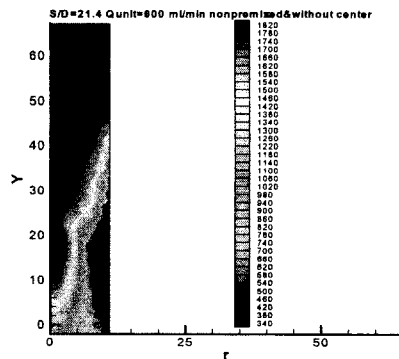


Fig. 3 Temperature distribution for s/d=21.4 and without center-nozzle

온도측정을 위하여 직경 0.127mm의 백금/백금로듐 10%의 합금인 S-type 열전대를 사용하였으며, 각 점은 500개의 측정값을 평균하였다. 인접한 노즐의 중앙과 원형배열의 중심을 이은 선 및 원형배열의 중심선이 이루는 평면에서 온도측정을 수행하였다. Fig 3은 S/D=12.4 이고 중앙부 노즐이 없는 경우에 대하여 주연소영역과 하부

꼬리화염의 온도분포를 나타낸다. 내부 재순환 영역이 있는 부분인 꼬리화염으로부터 주화염 영역으로 이동하면서 높이 약 24mm 부근에서 화염의 온도가 감소하였다가 증가함을 볼 수 있다. 이로부터 하부에 존재하는 꼬리화염이, 내부 재순환에 의해 미연 영역으로 기연가스를 공급하고 주 화염으로 고온 생성물과 에너지를 공급하여 전체적인 화염을 안정화시키는 것을 유추할 수 있다.

3.2 동축류 공기의 흐름이 있는 경우의 화염안정화 특성

본 실험장치에서 단위노즐당 최대 공급되는 프로판유량이 900ml/min이고 9개의 노즐을 사용한다고 가정할 때, 이론적으로 필요한 최대 공기량은 193 l/min 이다. 여기에 여분의 공기 30%를 추가한 250 l/min을 공급하는 경우의 화염날림 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 노즐배열 중심에 노즐이 없는 경우의 최대화염 날림유량은 노즐거리(S/D)가 12까지는 서서히 증가하고, S/D가 18~24의 영역에서는 실험에서 공급할 수 있는 프로판의 최대압력인 계기압력 3.8기압에서도 화염날림현상이 발생하지 않았다. S/D=18에서 화염은 매우 안정적이었으나, S/D=12, 21, 24인 경우에는 천이 영역을 지나 고유량의 난류 화염날림유량 근처에서 섭동이 다소 있으며, S/D가 27에서는 단위 노즐당 유량 800ml/min에서 화염날림이 발생하였다. 노즐거리 S/D가 12이하의 영역에서는 동축류 유동이 있는 경우가 없는 경우에 비하여 더 높은 유량에서 화염날림이 발생하였으나,

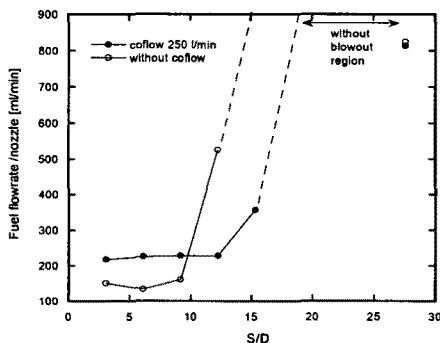


Fig 4 Effect of coflowing air on the blowout velocity of non-premixed interacting jet flame

S/D=18~24의 영역에서는 동축류의 존재와 무관하게 목막힘 조건에서도 화염날림이 발생하지 않음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 동축류버너 중앙부에 놓인 끝이 막힌 파이프와 그 외부에 장착한 와셔형 판에 의해 외부공기유동이, 뭉툭한면(blunt body)을 가지는 물체 후단에 형성되는 것

과 유사한 재순환 영역을 형성하고, 이것과 노즐 출구 제트의 상호작용에 기인한다고 사료된다. 일반적으로 동축류가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 화염의 섭동이 더 심하였다.

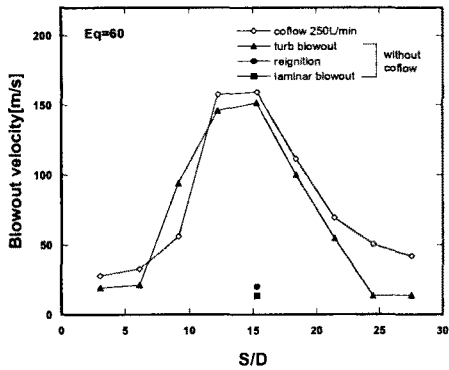
3.3 상호작용하는 부분 예혼합화염의 화염안정화 특성

3.3.1 중심부 노즐이 없는 경우

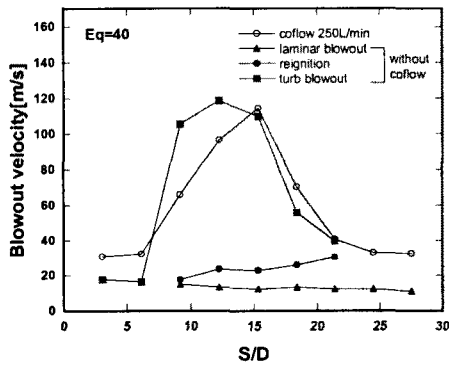
본 실험의 경우 각 노즐에 공급되는 연료와 공기량의 비를 나타내는 척도로서 당량비를 사용하였으며 계산에 사용된 산화제량은 연료에 혼합된 공기량만을 사용하였다. Fig 5(a)는 당량비가 60인 경우로 동축류가 없을 경우 화염날림은, 노즐거리(S/D)가 3~9까지는 점차 증가하다가 노즐거리(S/D) 12~15에서 최대값을 갖는다. S/D=15에서는 층류 화염날림과 재착화(reignition)가 일어난 후 난류화염에서 날림이 일어났다. 동축류가 있는 경우의 화염날림 특성은 동축류가 없는 경우와 유사한 특성을 나타낸다. 당량비가 40인 화염(b)의 경우는 동축류의 영향으로 최대 화염날림이 있어오는 노즐거리(S/D)가, 동축류가 없는 경우는 15일 때, 동축류가 있는 경우는 12일 때 나타난다. 층류 화염날림과 재부착이 일어나는 영역은 혼합공기량 증가에 따라 증가하여 S/D= 9~21 사이의 영역에서 나타난다. (c)는 당량비 20일 때의 경우를 나타낸다. 다른 당량비에 비하여 최대 화염날림 유량이 저유량, 작은 노즐거리에서 일어난다. 즉, 동축류가 없는 경우는 S/D=9에서, 동축류가 있는 경우는 S/D=6에서 나타난다. 연료측에 공기를 많이 혼합하여 당량비가 낮아질수록 화염날림이 저 유속에서 나타나고, 최대화염날림은 노즐간 거리가 작은 영역으로 이동함을 알 수 있다. 이는 화염이 안정화되는 영역에서, 당량비가 감소할수록 공기량이 많아져서 희박 가연한계에 도달하기 때문인 것으로 사료된다. 예혼합되는 공기가 많아질수록 노즐간의 거리가 가까워야(S/D의 감소), 화염안정화 지역으로 공급되는 외부 공기량이 차단되므로 적은 S/D에서 최대 화염날림 유량이 발생하는 것으로 사료된다.

3.3.2 중심부 노즐이 있는 경우

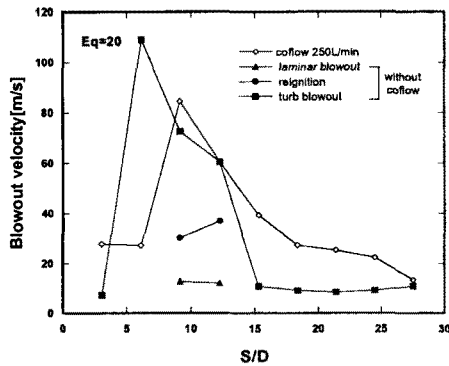
예혼합 하는 공기의 양이 증가할수록, 적은 노즐거리에서 화염이 날아간다는 결과로부터, 공기를 예혼합시킬 때 노즐배열의 중앙부에서 연료를 공급하면 화염을 안정화시킬 수 있을 것이라는 결론을 추론할 수 있다. 그러나 중심노즐로 공급하는 연료의 양이 증가하면 윗 방향으로 향하는



(a)



(b)



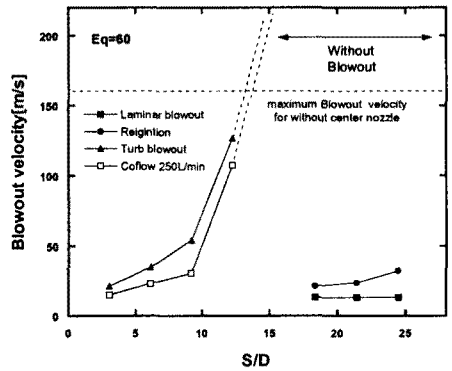
(c)

Fig. 5 Effects of premixing and coflow air on the blowout characteristics for circular 8 nozzle configuration and (a) equivalence ratio = 60 (b) 40 (c) 20.

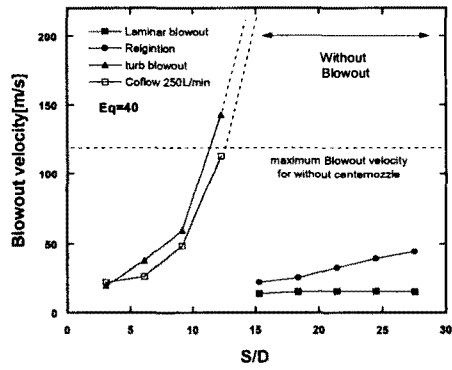
중심노즐의 유동이, 상호 작용하는 비예혼합 화염을 안정화시켜주던 재순환유동을 방해하게 되어 화염이 불안정해 질 것을 예측할 수 있다. 따라서 주위에 있는 노즐에 비하여 중심노즐에 공급하는 연료의 양을 줄여가면서 실험을 수행하여, 화염을 안정화시킬 수 있는 최소 연료의 양

을 외부노즐에 공급하는 총연료량의 5%로 하였다.

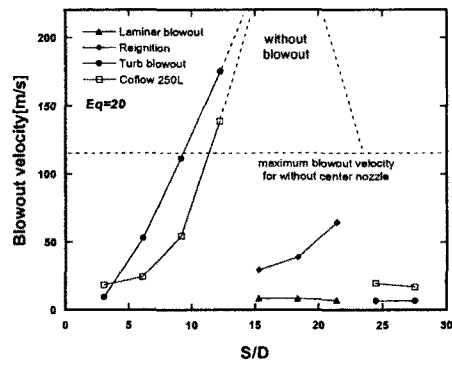
3.3.3 중심부 노즐이 있는 경우의 부분 예혼합화염의 안정성



(a)



(b)



(b)

Fig. 6 Effects of nozzle separation distance and coflowing air on the blowout velocities of the partially premixed interacting flames. (a) equivalence ratio = 60 (b) 40 (c) 20

Fig 6은 9개의 노즐을 중심과 원주에 배열한

경우의 화염날림 특성을 나타낸다. 전술한 바와 마찬가지로 원주를 돌아가며 배열한 노즐에는 연료와 공기의 예혼합기를 공급하고, 중심노즐에는 외부노즐 하나에 공급되는 연료의 45%만을 공급한 경우이다. 비교를 위하여, 중심노즐이 없는 경우의 최대 화염날림 유속을 수평선으로 나타내었다. 당량비 60이고 무차원 노즐 거리(S/D)가 3~12 인 경우의 화염날림 유속은 노즐간 거리가 멀어질수록 증가하였다. S/D=15~24까지는 본 실험장치에서 얻을 수 있는 최대유속(노즐에서 목막힘이 일어나는 유속)에서도 화염날림이 일어나지 않았으며 18~24 영역에서는 층류 날림과 재착화(reignition) 현상이 일어났다. 당량비 40과 20에서도 60인 경우와 유사하게 S/D가 12 이하에서는 S/D 증가에 따라 화염날림 유속이 증가하다가 15이상에서는 노즐출구에서 초킹(choking)이 되어도 화염날림이 일어나지 않았다. 중심노즐이 있을 때에는 화염날림이 일어나지 않는 노즐 거리가 존재하지 않았으나, 중심노즐로 소량의 연료를 공급할 때 화염날림이 일어나지 않는 영역이 존재하므로 중심 노즐의 연료량 제어로 고부하 연소가 가능할 수 있음을 보여준다. 또한 당량비가 감소할수록 화염으로 공급되는 산소량이 증가하여 NO_x 생성을 감소시킬 수 있는 가능성을 제공하게 된다.

주어진 노즐 간격에서 노즐배열 외부에 동축류 공기를 공급하는 경우에는 동축류가 없는 경우에 비하여 화염날림 유속이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 단일 노즐을 이용한 실험에서 동축류 유동이 있으면 화염날림 유속이 감소하는 것과 같은 현상이다. 동축류가 있는 경우에는 층류화염날림과 재부착현상이 일어나지 않았다. 이는 본 실험장치에서 동축류가 노즐배열이 고정된 판 바깥으로 흐르므로, 동축류에 의하여 독특한 물체 주위에 형성되는 재순환영역이 형성되고 이 재순환영역이 층류화염에 영향을 주어 층류 화염날림이 일어나지 않는 것으로 사료된다.

4. 결론

NO_x 배출을 감소시키며 고부하연소를 실현시키기 위한 연구의 일환으로, 원형 다수노즐을 이용한 상호작용하는 부분 예혼합화염의 안정성 확보에 관한 연구를 실험적으로 수행하였으며, 본 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 원형 노즐배열 중심부에 노즐이 없는 다수노즐에 연료와 공기를 혼합하여 공급하는 경우의 화염은 노즐 간격을 조절하여도 화염날림이 존재하였다. 이 경우 공기를 많이 혼합할수록, 더 적은 노즐 간격에서 최대화염날림이 일어났다.

(2) 원형 다수노즐배열에서 중심노즐에 연료를 소량 공급하고 외부 노즐에 공기연료 혼합기를 공급하면 화염이 안정화되어 화염날림이 없는 배열을 얻을 수 있다.

(3) 비예혼합 상호작용화염에서 형성된 재순환영역의 존재를 온도장 측정으로부터 확인하였다.

후기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Roper, F. G., 1977, "The Prediction of Laminar Jet Diffusion Flame Size: Part I. Theoretical Model," *Combust. Flame*, Vol. 29, pp. 219~226.
- [2] Turns, S. R. An introduction to combustion, McGraw Hill, 2ed, 1996.2.
- [3] Broadwell, J. E., Dahm, W. J., and Mungal, M. G., 1984, "Blowout of Turbulent Diffusion Flames," *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 303~310.3.
- [4] Kim, H.Y., Chun, C.K., 1991, "The Interaction of Gaseous Diffusion Flames" *Trans. of KSME*, Vol. 15, No. 1, pp. 355~365.
- [5] Chun, C.K., 1993, "Production of NO in Interacting Laminar Diffusion Flames," *Trans. of KSME*, Vol. 17, No. 1, pp. 190~199.
- [6] Menon R. and Gollahalli S. R., 1985, "Multiple Jet Gas Flames in Still Air," *In Heat Transfer in Fire and Combustion Systems*, ASME publication HTD Vol. 45, pp 127~136.
- [7] Menon R. and Gollahalli S. R., 1988, "Combustion Characteristics of Interaction Multiple Jets in Cross Flow," *Combustion. Science and Technology*. Vol. 60, pp 375~389.
- [8] Lee, S., Lee, B.J., 2001, "Characteristics of Interacting Lifted Flames", *Trans. of KSME (B)*, Vol. 25, No. 4, pp. 461~466.
- [9] Kim, J.S. and Lee, B.J., 2003, "Stability enhancement by the interaction of diffusion flames", *Trans. of KSME(B)*, Vol. 27, NO. 5, pp. 1420~1426.