

〈논 문〉 SAE NO. 96370114

예혼합 화염이 벽면에 충돌시 열전달 및 연소특성에 관한 실험적 연구

The Experimental Study for Heat Transfer and Combustion Characteristics of Gaseous Impinging Jet Premixed Flame

정 은 규,* 조 경 민,** 김 호 영***
E. G. Chung, K. M. Cho, H. Y. Kim

ABSTRACT

In the present study, the structure and the characteristics of gaseous premixed flame impinging normal to the flat plate have been investigated experimentally. For the examination of the heat transfer and combustion characteristics, measurements of temperature, direct and schlieren photography were performed. The results of present study show that the length of inner flame becomes smaller as distance from nozzle exit to plate decrease. The width of flame becomes larger as air-fuel ratio decreases. The smaller Reynolds number at nozzle exit and the smaller distance from nozzle exit to plate lead to the higher heat transfer rate in the region of center of plate. As the air-fuel ratio decreases, the heat transfer at plate with moderate rate occurs on wide region.

주요기술용어 : Premixed combustion(예혼합연소), Flame(화염), Heat transfer(열전달), Gaseous fuel(기체연료), Impinging jet(충돌 제트), Direct photography(직접사진), Schlieren photography(슈리렌사진)

1. 서 론

기체연료의 연소에는 분사시 연료만을 분사시켜 확산화염(Diffusion flame)으로 연소하는 방법과 연료-산소의 혼합기를 분사시켜 예혼합 화염(Premixed flame)으로 연소하는 방법이 있

다. 예혼합 화염은 연료가 혼합실에서 산화제와 미리 혼합되고 노즐을 통하여 분출된 후 화염전파에 따라 연소하는 화염을 말하며, 이 화염의 연소속도는 연료와 산화제의 반응속도에 의존하게 된다.

현재 사용되는 열처리용 연소기, 가스용접기의 연소, 특수 보일러 연소기 및 가정용 주방기구의 연소기등은 기체연료와 공기를 혼합실에서 혼합시켜 예혼합기를 형성한 후, 노즐로부터 분출된 후에는 가열하려는 벽면이나 용기의 표면에 직접

* 아시아자동차

** 고려대학교 대학원 기계공학과

*** 정회원, 고려대학교 기계공학과

충돌하여 유동방향이 벽면이나 용기에 평행한 방향으로 바뀌어 유동하면서 연소하게 되는데, 이때 노즐과 가열표면 사이의 거리, 연료와 공기의 혼합비 및 혼합기 유량의 크기에 따라 연소효율과 열전달 특성 및 화염의 안정성이 크게 달라지게 되므로 이에 대한 정량적인 연구는 필수적이다.

연소가 일어나는 상태에서 충돌제트에 대한 연구로는 Marathe와 Jain¹⁾에 의한 에탄과 산소가 좌우로 마주보며 분사될 때의 연소상태에 대한 연구와 Liu 등²⁾에 의한 메탄의 예혼합화염이 상하로 마주보며 연소할 때의 연소상태에 대한 연구가 있다. 그리고 벽면에 직각으로의 충돌제트에 대한 연구로는 정³⁾에 의한 기체연료가 평판에 충돌하며 연소할 때의 연소 및 열전달 특성에 대한 이론적 연구와 Jaluria 등⁴⁾에 의한 밀폐공간에서의 충돌화염의 유동상태에 관한 연구 및 Cooper⁵⁾에 의한 2차원 평면에 화염이 충돌할 때의 열전달 현상에 대한 연구가 있다. 이상에서 살펴본 바와 같이 연소가 있는 상태에서의 벽면 충돌제트라 할지라도 정³⁾에 의한 기체 확산화염의 염소특성 및 평판으로의 열전달 특성에 대한 이론적연구가 있을 뿐, 아직까지 실험적 연구가 수반되지 않아 충돌제트 화염의 특성에 대해서 보다 자세한 이해를 도울 수 없을 뿐만 아니라, 기체연료를 사용하는 대부분의 연소기에서 볼 수 있는 예혼합 화염에 의한 충돌제트에 대한 연구는 없는 실정이다.

본 연구는 예혼합 화염에 의한 충돌제트의 화염구조 및 연소특성에 대한 연구로서, 각각의 중요변수가 화염의 안정성 및 최적연소에 미치는 영향을 분석하여 효율적인 연소기의 설계에 필요한 기본적인 자료를 제공함으로써 연소기 연소효율의 증대에 기여함을 목적으로 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 노즐과 평판사이의 거리(H), 혼합기의 유량(Re) 및 공기-연료비(A/F ratio)를 중요변수로 하고, 이 변수들에 다른 화염의 온도 및 평판 상하단부의 온도를 측정함으로써 화염의 구조와 연소특성 및 평판으로의 열전달 특성을 분석, 고찰한다. 또한 화염의 구조적인 특성을 가시화하기 위하여 직접사진 및 슈리렌

(Schlieren)사진을 촬영하여 충돌화염의 구조 및 특성을 고찰한다.

2. 실험

2.1 실험장치

노즐과 평판사이의 거리, 혼합기의 유량 및 공기-연료비 등의 중요변수에 따른 화염의 온도와 평판 상하단부의 온도를 측정함으로써 화염의 구조와 특성 및 평판의 열전달 특성을 실험적으로 고찰하기 위하여 구성된 실험장치의 개략도를 Fig.1에 도시하였다.

본 실험에 사용한 노즐은 내경이 22.8mm인 동파이프를 사용하여 제작하였으며, 림(Rim) 부분은 유체의 유동 및 화염의 형상에 중대한 영향을 미치므로⁶⁾ 단면이 관의 축에 정확히 수직이 되도록 가공하였다. 노즐 출구부에는 화염의 역화를 방지하기 위하여 간격이 0.5mm인 철망을 씌웠다. 실험 도중에 노즐의 출구부위가 화염으로부터의 열전달에 의해서 가열되는 것을 방지하기 위하여 노즐주위에 냉각장치를 설치하였다.

가열 목적물은 수직 원통형 구조물이고 바닥은 원형의 평면으로서 노즐로부터 분출된 연료와 공기의 혼합기가 연소하면서 충돌하도록 노즐에 수직으로 설치하였으며, 그 바닥 면인 평판은 두께가 10mm, 직경이 420mm, 순도가 99%인 알루미늄을 사용하였다. 또한 평판의 윗 면을 동온으로 유지하도록 물을 담기 위하여 평판과 같은 직경을 가지며 높이가 450mm인 원통을 제작하였다. 이 때 원통의 옆면을 통한 열의 손실을 방지하기 위하여 원통의 외면을 유리섬유로 단열하고, 하단 부분은 석면 테이프로 감아서 고온의 연소가스에 의해서 타는 것을 방지하였다.

여러 변수에 따른 열전달 현상을 규명하기 위한 평판 각 위치에서의 온도를 측정하기 위하여 본 연구에서는 평판의 위 아랫표면에 열전대를 전체적으로 방사형으로 배치하여 열전대 설치로 인한 불균일한 전열이 배치되도록 설치하였다.

평판에 매설한 열전대는 측정 가능한 최고온도가 400℃이고 직경이 0.5mm인 동-콘스탄탄(T-type) 열전대이고, 전기적 절연을 위하여 세라

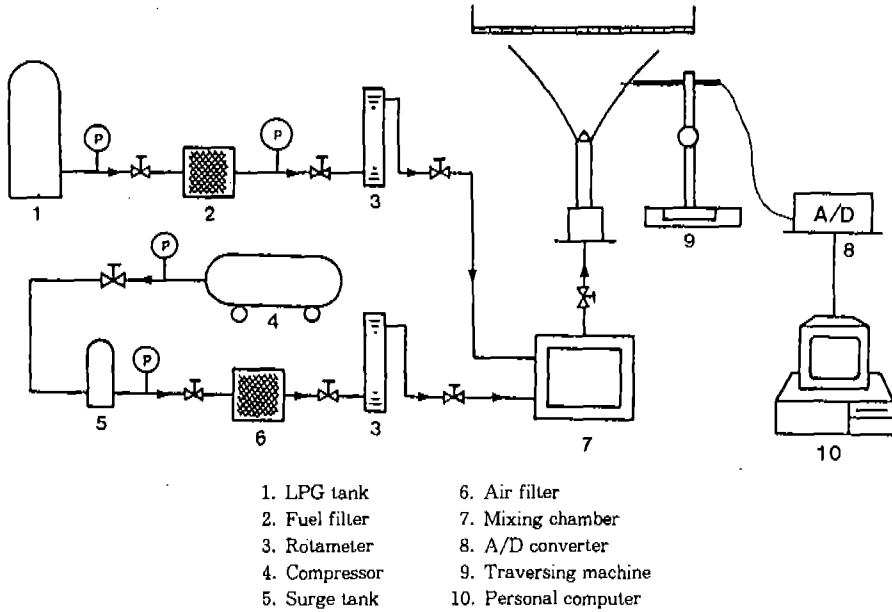


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

믹 튜브에 끼우고 스폿용접하여 접점을 만들었다. 또한 화염의 온도 측정에 사용한 열전대는 측정 최고온도가 2,033K인 Pt-Pt13%Rh(R-type) 열전대로서 직경 0.3mm의 가는 선을 스폿용접하여 접점을 만들었다. 화염온도 측정용 열전대는 접점 이외의 부분으로부터 접점에서의 전열을 방지하기 위하여 열전대 외부에 물을 순환시키는 냉각장치를 부착하였다.

2.2 실험 방법

화염 각 부위의 온도 측정은 평판의 온도가 화염의 크기에 영향을 미칠 수 있으므로 평판을 가열한 후 정상상태에 도달했는지를 디지털 온도계로 점검하고, 화염의 모양이 축대칭인지 먼저 확인한 후, 열전대의 접점을 노즐의 정확한 중심부에 위치시킨 후 측정하고자 하는 높이까지 이송시켜 멈춤 나사로 높이를 고정하고, 열전대를 좌우 이송장치로 0.5~1.0mm 간격으로 화염 중심축으로부터 평판 끝지점까지 이송하면서 측정하였다. 측정시 고온부에서 저온부로 이송하면서 측정하기 때문에 열전대를 새로운 위치에 이송한 후 수분간 적용시켜 더 이상의 온도변화가 없을

때의 온도를 선택하였다.

열전대에서 발생한 전기력은 A/D변환기를 거친 뒤 온도로 환산되어 컴퓨터에 저장된다. 샘플링 횟수는 한 측정 위치에서 각각 5천번씩으로 하였고, 이를 평균한 후 온도 보상회로를 통해 수정하였다.

온도 측정평면은 Fig.2에 도시한 바와 같이 중심축에 대하여 축대칭형이므로 r-y 평면을 선택하였고, H 및 $L_r(r)$ 은 각각 노즐출구와 평판간의 거리 및 평판 아랫면으로부터 외부 화염면까지의 거리를 표시한다.

평판의 온도측정은 노즐의 중심이 평판의 중심과 일치하도록 2차원 이송장치를 움직여 조정한다. 다음 노즐의 높이를 평판으로부터 원하는 곳까지 내리고 평판 아랫부분의 온도를 측정하기 위한 열전대를 A/D변환기에 연결하여 가열을 시작하였다. 가열을 시작한 후 평판 아랫부분의 온도가 수분간 동안 변하지 않을 때 정상상태에 도달한 것으로 보고 측정한 후, 평판 윗부분의 열전대를 A/D변환기에 연결하여 같은 방법으로 온도를 측정하였다. 30개의 열전대에서 발생한 기전력을 순서대로 온도 보상회로를 통해 수정하고 1

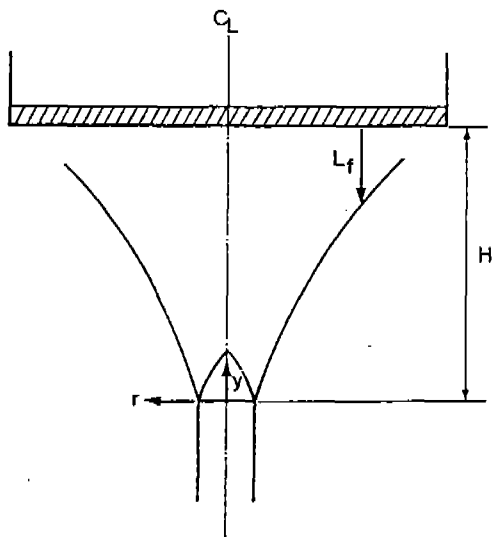


Fig.2 Coordinate system and distance from nozzle exit to plate

천번씩 샘플링한 것을 평균하여 컴퓨터에 결과를 저장하였다.

유체의 유동을 가시화하는 방법에는 여러 가지가 있지만 예혼합 화염과 같이 고온에 의한 큰 밀도차이가 있는 유동장이나 난류화염과 같이 흐트러진 화염을 가시화 하는 데에는 슈리렌 사진촬영이 적절한 방법이다. 본 연구에서는 직접 사진촬영과 슈리렌 사진촬영을 동시에 수행하였다. 슈리렌 촬영은 카메라의 조리개를 완전히 개방한 상태에서 뒷덮개를 열고 필름이 감광되는 부분에 우유빛 유리를 대어 상을 보면서 정확한 초점부에 나이프 에지로 적절하게 광선을 차단하여 뚜렷한 명암대비가 형성되도록 하였고, 파인더를 통해 화염을 보면서 카메라 렌즈의 초점을 화염에 맞추고 필름을 끼우고 셔터속도를 1/250~1/500초로 하여 촬영하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서는 연료로 상용 프로판을 사용하였으며 산소 공급원으로는 공기압축기를 사용하여 주위공기를 일정한 압력으로 공급하며 실험을 수행하였다. 실험시 중요변수로는 공기연료비, 노즐출구와 평판간의 거리 및 혼합기의 공급유량을

백하였다. 각각의 변수를 변화시키면서 측정된 온도, 직접 사진촬영과 슈리렌 사진촬영 결과를 정리 분석하면 다음과 같다.

3.1 공기-연료비의 영향

Fig.3은 노즐출구와 평판간의 거리를 50mm로, 노즐출구의 레이놀즈수를 1,600으로 고정하고 공기-연료비를 24로부터 감소시켜 20, 15, 10순으로 변화시킨 경우 축방향의 여러 위치에서의 화염내의 반경방향 온도분포를 나타낸 것이다. (a)는 공기-연료비가 24인 경우의 온도분포를 나타낸 것이다. 내부화염 길이내의 축방향 위치에서의 반경방향 온도분포는 외부화염 바깥쪽의 낮은 온도로부터 중심축으로 접근함에 따라 외부화염이 형성된 영역부근에서 온도가 급격히 상승하여 내부화염면의 위치에서 최고 온도에 도달한 후 제트의 중심축 부근에서는 상대적으로 낮은 온도를 갖는 미연 혼합기의 존재로 인해 감소하는 경향을 나타낸다. 최고 온도가 나타나는 반경방향의 위치는 하류로 진행함에 따라 점차 중심축으로 접근하므로 이로부터 내부화염의 형태가 원추형 형상임을 알 수 있다. 이 때 내부화염이란 예혼합화염을 나타내며 외부화염이란 예혼합 화염면에서 완전히 연소하지 못한 연료성분이 형성하는 확산화염을 의미한다. 한편 내부화염이 끝나는 이후의 위치에서는($y=25\text{mm}$) 중심축에서 멀어질수록 온도는 증가하여 외부화염 부근에서 최고온도에 도달한 후 급격히 감소한 뒤 평판의 영향으로 인해 약간의 온도상승이 있는 것을 볼 수 있다. 고온영역의 폭은 노즐출구 근처의 상류에서 보다 평판근처의 하류에서 크게 확장됨을 알 수 있는데, 이는 하류로 갈수록 평판의 영향으로 인한 정체점에서의 압력 상승에 의해 주유동 방향의 속도가 감소하는 반면에 반경방향의 속도가 증가함으로써 제트유동의 폭이 넓어져서 고온의 연소가스가 반경방향으로 전달되기 때문으로 해석된다.

(b)는 공기-연료비가 20인 경우로 연료가 약간 농후한 상태이며 이 때의 연소속도가 혼합기의 유출속도보다 다소 빠르기 때문에 화염면이 함몰되어 상류부분의 중심축 근처의 두점에서 온

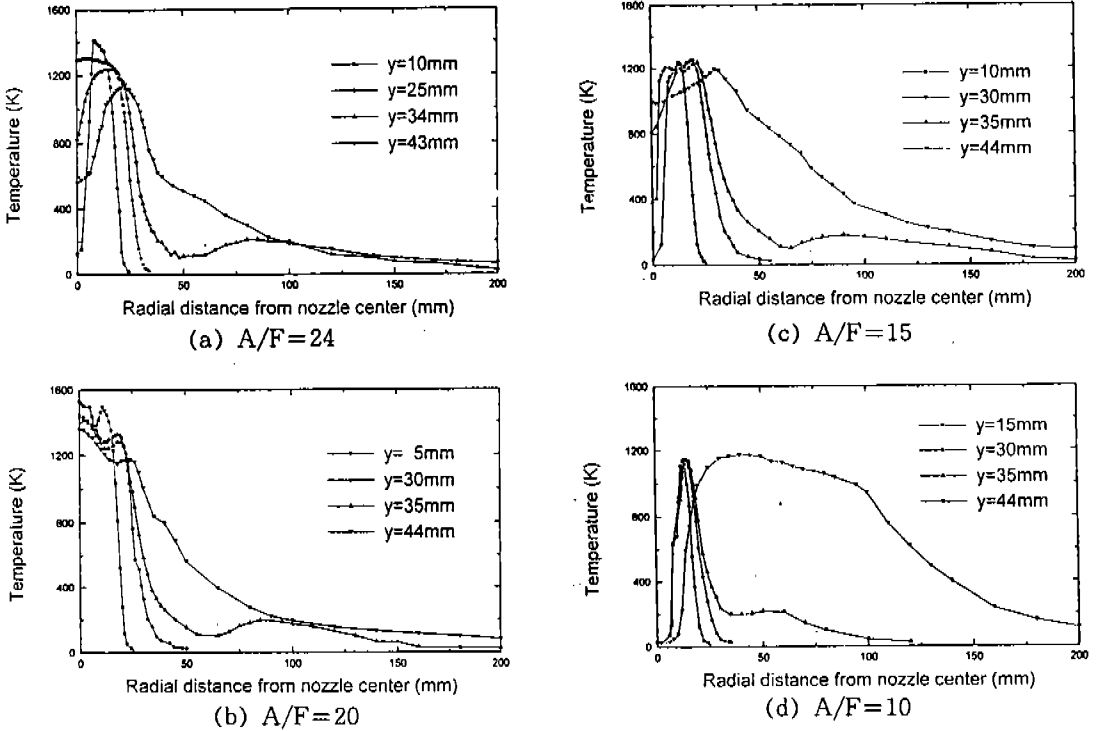


Fig.3 Distribution of temperature for various axial locations(H=50mm, Re=1,600)

도의 최고점이 나타난다. (c)는 공기-연료비가 15인 경우로 하류로 갈수록 중심축상의 온도는 증가하고 온도의 최고점이 나타나는 반경방향 위치는 (a)에 비해 중심축으로부터 더 먼 속에 위치하는데, 이는 공기-연료비가 낮아 연료 과농인 혼합기가 내부화염면에서 완전 연소되지 못하고 평판에 충돌한 후 반경방향으로 진행하면서 미연 소된 연료가 주위의 공기와 접하여 상당한 크기의 외부화염이 형성되기 때문이다. (d)는 공기-연료비가 10인 경우로 평판에서 가까운 높이에서의 반경방향 온도분포를 공기-연료비가 15인 (c)와 비교하여 볼 때 고온부의 영역이 훨씬 넓어진 것으로 보아 더 농후한 혼합기로 인해 미연 소된 연료가 주위의 공기와 접하여 평판부근에 형성되는 외부화염의 직경이 증가함으로 보여준다. 또한 여러 높이에서 노즐 중심축상의 온도는 거의 상온임을 알 수 있는데, 이는 혼합기 중에 연료의 양이 공기의 양에 비하여 매우 많기 때문에 아주 소량의 연료만이 혼합기 중의 공기와 반

응하여 원통형의 내부화염을 형성하고 나머지의 연료는 미연의 상태로 평판에 충돌되어 반경방향으로 확산되면서 큰 외부화염을 형성하므로 중심축으로의 대류열전달은 거의 없게 된다. 따라서 하류로 진행하여도 중심축상의 온도는 노즐로부터 분출할 때의 온도인 상온을 유지하게 된다. Fig.4는 공기-연료비에 따른 내부화염길이의 변화를 나타낸 것이다. 대체적으로 공기-연료비가 작을수록 내부화염의 길이가 길어지거나 공기-연료비가 20인 경우는 화염면의 함몰로 내부화염의 길이가 짧아진다.

Fig.5는 노즐출구에서의 레이놀즈수를 1,600으로 고정하고 공기-연료비를 변화시켜 화염의 형상을 직접사진 촬영한 것으로서, 공기-연료비가 낮아짐에 따라 내부화염 및 외부화염의 크기가 변화되는 형상을 관찰할 수 있는데 이는 연소속도가 공기-연료비에 따라 다르기 때문이다. 또한 공기-연료비에 따라 화염의 색깔이 변화되었음을 볼 수 있는데, 화염의 색깔은 연료가 희박

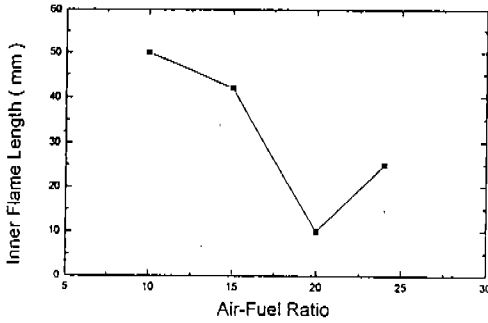
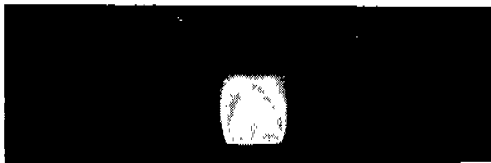
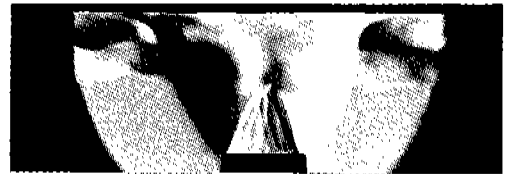


Fig.4 Relation of air-fuel ratio and inner flame length($H=50\text{mm}$, $Re=1,600$)

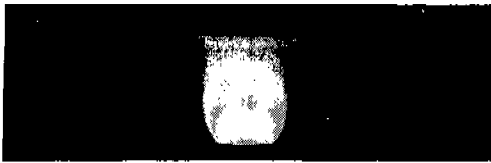
하게 되면 활성화된 CH 라디칼(Radical)에 의하여 보라색에 가깝게 되고, 연료가 농후하게 될수록 C_2 분자에 의하여 초록색을 띠게 된다^{7),8)}. 공기-연료비가 24인 경우 연료가 희박한 상태가 되는 외부화염의 상층부에서 비교적 보라색의 외부화염을 볼 수 있으며, 연료가 과농한 상태인 대부분의 경우에서 초록색의 화염이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 특히 공기-연료비가 15, 10인 경우 진한 초록색의 내부화염이 존재함을 보아 내부 화염면 부근에서 연료가 매우 과농한 것을 알 수 있다.



(a) $A/F=24(V_{\text{nozzle}}=0.711\text{m/s})$



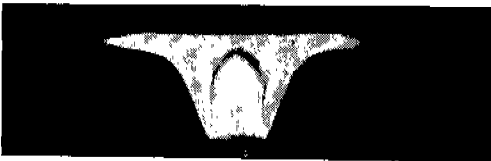
(a) $A/F=24(V_{\text{nozzle}}=0.711\text{m/s})$



(b) $A/F=20(V_{\text{nozzle}}=0.707\text{m/s})$



(b) $A/F=20(V_{\text{nozzle}}=0.707\text{m/s})$



(c) $A/F=15(V_{\text{nozzle}}=0.700\text{m/s})$



(c) $A/F=15(V_{\text{nozzle}}=0.700\text{m/s})$



(d) $A/F=10(V_{\text{nozzle}}=0.686\text{m/s})$



(d) $A/F=10(V_{\text{nozzle}}=0.686\text{m/s})$

Fig.5 Direct photographs of flame for various A/F ratios($H=50\text{mm}$, $Re=1,600$)

Fig.6 Schlieren photographs of flame for various A/F ratios($H=50\text{mm}$, $Re=1,600$)

Fig.6은 공기-연료비에 따른 화염의 형상변화 및 주위의 유동상태를 가시화하기 위하여 슈리렌 사진촬영을 한 것으로서 내부화염의 형상을 뚜렷하게 볼 수 있으며 화염으로부터의 열전달에 의한 밀도변화로 인하여 직접사진에서 볼 수 없는 외부 화염주위의 유동장상이 명확히 나타나 있다.

3.2 노즐출구와 평판간 거리의 영향

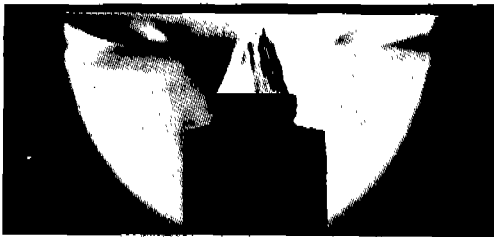
Fig.7은 공기-연료비를 24로, 노즐출구에서 혼합기의 레이놀즈수를 1,600으로 고정하고 노즐출구와 평판간의 거리를 30, 50, 70mm로 변화시켰을 때 노즐출구와 평판간의 거리변화에 따른 화염의 형상변화를 슈리렌 사진 촬영한 것으로서 화염 주위의 온도구배로 인하여 형성된 밀

도 변화에 의하여 가시화된 화염면 주위의 유동 형상이 명암대비로 나타나 있다. 특히 온도구배가 큰 내부 화염면과 외부 화염면이 뚜렷하게 나타난 것으로 보아 화염면 주위의 밀도구배도 또한 매우 큼을 알 수 있고 노즐출구와 평판간의 거리가 가까울수록 평판의 영향으로 인해 내부화염의 길이는 약간 감소하고 증가된 반경방향의 전달에 의해 외부화염의 폭이 증가되는 예혼합 충돌제트 화염의 형상변화를 나타낸다. 또한 평판의 길이가 70mm인 경우는 평판 부근에서의 유동이 난류로 천이됨을 보여준다.

3.3 노즐출구의 혼합기 유량변화의 영향

Fig.8은 공기-연료비를 24로, 노즐출구와 평판간의 거리를 50mm로 고정하고 노즐출구에서 혼합기의 레이놀즈수를 1,200, 1,400, 1,600, 1,800으로 변화시켰을 때 노즐출구 유량의 변화에 대하여 화염들을 슈리렌 사진 촬영한 것이다. 대체적으로 레이놀즈수가 증가할수록 유동의 폭이 넓어지며, 하류 쪽에서 평판에 충돌 후 반발력에 의한 영향이 레이놀즈수가 증가함에 따라 조금씩 커지며 그 영역도 넓어지고 있음을 볼 수 있다. 또한 내부화염 즉 예혼합화염의 길이가 레이놀즈수가 증가할 수록 커짐을 볼 수 있다.

혼합기의 노즐출구 레이놀즈수가 각각 1,200, 1,400인 경우, 이론혼합비로 혼합되는 상태로 분출되는 혼합기에 의해 형성되는 내부화염은 분출 유량이 적기 때문에 평판의 영향을 거의 받지 않으며 내부화염의 전파속도에 비해 혼합기의 공급속도가 작아서 중심축 부근의 내부화염이 함몰된다. 혼합기의 출구 레이놀즈수가 각각 1,600, 1,800인 경우는 앞의 두 경우와는 달리 충분한 혼합기 공급속도에 의해 내부화염의 함몰이 일어나지 않는다. 또한 두 경우를 비교해 보면 축방향의 여러 위치에 있어서 외부화염의 위치는 출구 레이놀즈수가 1,800인 경우가 1,600인 경우에 비해 더 먼 곳에 존재함을 알 수 있는데 이는 분출속도가 클수록 평판의 영향을 크게 받기 때문이다.



(a) H=30mm



(b) H=50mm



(c) H=70mm

Fig.7 Schlieren photographs of flame for various distance from nozzle exit to plate (Re=1,600, A/F=24, $V_{nozzle}=0.711m/s$)

(a) $Re=1,200(V_{nozzle}=0.533m/s)$ (b) $Re=1,400(V_{nozzle}=0.622m/s)$ (c) $Re=1,600(V_{nozzle}=0.711m/s)$ (d) $Re=1,800(V_{nozzle}=0.800m/s)$

Fig.8 Schlieren photographs of flame for various reynolds numbers at nozzle exit ($H=50mm, A/F=24$)

3.4 평판에서의 열전달 특성

화염으로부터 평판으로의 열전달 특성을 고찰하기 위하여 측정된 화염의 온도와 평판의 온도로부터 국소 누셀트(Nusselt)수를 다음과 같이 계산하였다.

$$Nu = \frac{h\bar{x}}{k_g} \quad (1)$$

$$h = \frac{k_g \frac{\partial T}{\partial x}|_{wall}}{(T_w - T_{avg})} \quad (2)$$

$$T_{avg} = \frac{\int_0^{L'} T dx}{\int_0^{L'} dx} \quad (3)$$

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{L'} T x dx}{\int_0^{L'} T dx} \quad (4)$$

여기서 k_g 는 가스의 열전도율, T_w 은 평판 표면에서의 온도이며 x 는 평판으로부터 노즐방향으로 화염의 거리이다.

Fig.9는 반경방향에 따른 누셀트수를 노즐출구와 평판간의 거리에 따라 도시한 것이다. 노즐출구와 평판간의 거리가 30mm인 경우에는 중심부에서 열전달이 잘 이루어짐을 볼 수 있는데 이는 중심축상에서의 화염면이 평판에 근접하기 때문에 나타나는 현상으로 풀이되며, 50mm인 경우에는 평판의 영향으로 유동이 확산되어 중심축상의 정체영역에서는 열전달이 잘 이루어지지 않는 것으로 생각된다. 한편 노즐출구와 평판간의 거리가 70mm인 경우에는 중심부에서의 열전달이 다시 활발해짐을 볼 수 있는데, 이는 Fig.7에서 알 수 있듯이 중심축상에 화염의 하류가 모여져 열전달이 이루어지기 때문으로 생각된다.

Fig.10은 유량의 변화에 따른 누셀트수의 반경방향 분포를 도시한 것으로 레이놀즈수가 큰 1,800인 경우에는 중심축 부근에서 비교적 넓게 열전달이 이루어짐을 볼 수 있는데 이는 평판의 영향으로 인하여 화염의 폭이 넓어진 것으로 생각되고, 이 때 누셀트수가 낮은 분포를 가지는 이유는 중심축상의 하류에 형성되는 상대적으로 낮은 온도를 갖는 외부화염의 영향으로 인해 충분히 열전달이 이루어지지 않기 때문으로 해석된다. 레이놀즈수가 점점 감소하여 1,200인 경우에는 분출유량이 적음으로 인하여 유동의 속도가 느리고 하류의 중심축상으로 화염이 모아짐으로써 중심축 주위에서 평판으로의 집중적인 열전달이 일어남을 볼 수 있다.

Fig.11은 혼합기의 공기-연료비에 따른 누셀

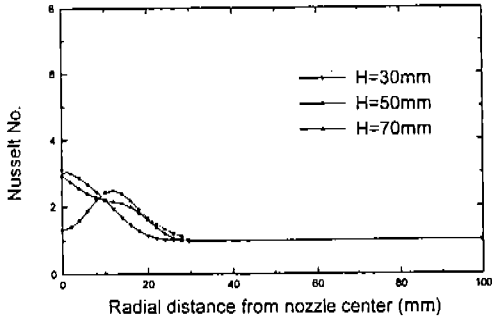


Fig.9 Distribution of local Nusselt number for various distance from nozzle exit to plate below the flat plate ($Re=1,600, A/F=24$)

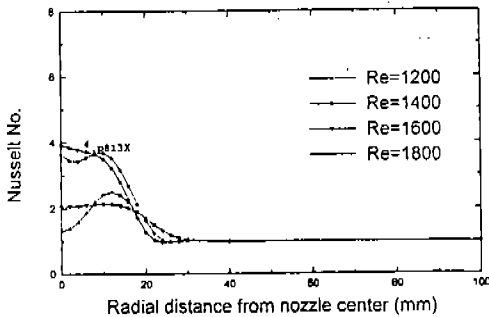


Fig.10 Distribution of local nusselt number for various reynolds numbers below the flat plate ($H=50mm, A/F=24$)

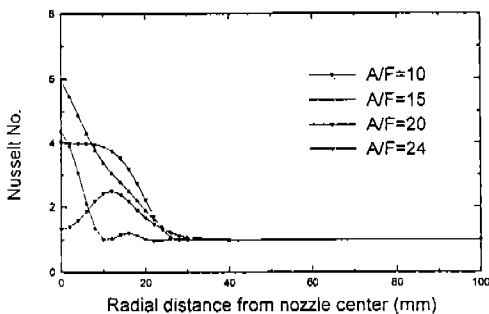


Fig.11 Distribution of local nusselt number for various A/F ratios below the flat plate ($Re=1,600, H=50mm$)

트수의 반경방향 분포를 도시한 것으로 공기-연료비가 24인 경우는 중심축으로부터 멀어질수록 증가하다 감소하나 공기-연료비가 낮아질수록 중심축 부근의 높은 누셀트수로부터 감소함을 알 수 있는데 이는 Fig.6의 화염의 형상으로부터 잘 알 수 있다.

4. 결 론

예혼합 화염이 벽면에 충돌연소시 연소특성 및 열전달 특성을 실험적으로 규명하기 위하여 화염 및 평판의 온도를 측정하고, 직접사진 및 슈리렌 사진을 촬영하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 노즐출구와 평판간의 거리가 가까울수록 평판의 영향으로 인하여 원추형의 내부화염의 길이는 작아지고 폭은 넓어지므로 고온영역이 폭넓게 형성된다.
- 2) 노즐 출구에서 혼합기의 분출유량이 감소할수록 혼합기의 분출속도가 작아져 더 빠른 연소속도에 의해 내부화염의 중심부가 함몰되면서 점차 작아지며 화염에 미치는 평판의 영향도 점차 감소하여 외부화염이 중심축 부근으로 접근하므로 중심축상에서 온도의 최고점이 형성된다.
- 3) 공기-연료비가 낮아질수록 과농한 연료에 의해 내부화염에서 미연소된 연료가 평판에 충돌한 후 반경방향으로 전달되어 대기 중의 산소와 접하여 연소하는 확산화염의 형태가 되므로 전체적으로 화염의 폭이 커진다.
- 4) 예혼합 충돌제트 화염의 형상에 미치는 공기-연료비의 영향은 노즐출구와 평판간의 거리나 분출유량에 의한 영향보다 훨씬 크다.
- 5) 화염으로부터 평판으로의 열전달은 분출유량이 클수록 평판의 영향으로 넓은 영역에 걸쳐 이루어지며 공기-연료비가 낮을수록 넓은 영역에서 열전달이 이루어지나 크지는 않다.

참 고 문 헌

1. A. G. Marathe and V. K. Jain, "Some studies on opposed-jet diffusion flame considering general Lewis numbers", *Combustion Science and Technology*, Vol. 6, pp. 151~157, 1972.
2. G. E. Liu, J. Y. Ye and S.H. Sohrab, "On radiative cooling and temperature profiles of counterflow premixed flames", *Combustion and Flames*, Vol. 64, pp. 193~201, 1986.
3. 정진택, "기체 확산화염이 벽면에 충돌연소시 열전달 및 연소특성", 고려대학교 석사학위논문, 1985.
4. Y. Jaluria and K. Kapoor, "Importance of wall flows at the early stages of fire growth in the mathematical modeling of enclosure fires", *Combustion Science and Technology*, Vol. 59, pp. 355~369, 1988.
5. L. Y. Cooper, "Heat Transfer in Compartment Fires Near Regions of Ceiling-jet impingement on a Wall", *J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 455~460, 1989.
6. S. H. Shorab and C. K. Law, "Influence of burner aerodynamics on polyhedral flames and flame stabilization", *Combustion and Flame*, Vol. 62, pp. 243~254, 1985.
7. Irvin Glassman, *Combustion*, Academic Press Inc., Orlando, pp. 107~196, 1987.
8. B. Lewis and G. von Elbe, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, Academic Press Inc., Orlando, pp. 215~417, 1987.