

〈論 文〉

유선형 스텝에 의해 안정화된 예혼합화염의 구조와
연소특성에 관한 연구(II)
—화염의 미세구조에 대하여—

이 재 득* · 최 병 루**
(1990년 4월 30일 접수)

A Study on the Flame Structure and Combustion Characteristics
of a Premixed Flame Stabilized by a Streamline Step (II)
—On a Fine Flame Structure—

Jae Deuk Lee and Byeong Ryun Choi

Key Words : Coherent Eddy(코히런트 와(渦)), Wrinkled Laminar Flame(주름상 층류화염),
Distributed Reaction Zone(분산반응영역) Mixing Layer(혼합층), Recirculation
Zone(재순환영역) Unburned Mixture(미연혼합기), Burned Gas(연소가스),
Entrainment(유인(誘引)), Flamelets(화염편)

Abstract

In a turbulent premixed flame stabilized by the streamline step, and dominated by a coherent eddy, a flame micro-structure was investigated with analyzing the signals of temperature, the ion current, and schlieren photographs simultaneously. Generally the contours of large scale coherent eddies of schlieren photographs was considered as the flame front, however, the main reaction can be occurred within the eddy as a structure of fine flamelets scale. The surrounding burned gas of flamelets could not propagate to a unburned mixture, obstructing flamelets from propagating to a unburned mixture. Consequently, it could restrain flashback. The main reaction region was found to be located at higher temperature of the burned gas rather than at maximum rms of fluctuating temperature. The peak probability of higher temperature was 6 times greater than that of lower temperature. As it was difficult to infer a flame structure from PDF distribution of the fluctuating temperature in form of bimodal shape, it should be taken into consideration with other informations related to the sensitive flame front, for instance, ion current.

기 호 실 명

I : 이온 전류
 i' : 이온 전류의 rms치
 p' : 압력맥동강도

T : 온도(K)
 t' : 온도 변동의 rms
 u : 난류강도
 X : 유동방향 좌표(mm)
 Y : 유동방향 직각 좌표(mm)
 ϕ : 당량비
 ψ_0, α, β : 임의변수

* 정회원, 부산대학교 대학원

** 정회원, 부산대학교 공과대학 기계공학과

1. 서 론

예혼합 화염을 안정화 시키기 위해 스텝후류의 순환류를 이용하는 방법이 있다. 이때 유동저항을 감소시키기 위해서는 유선형 스텝이 유효한 수단이며, 이러한 스텝후류에 안정화되는 화염구조는 그 대부분이 코히런트 와(coherent eddy)에 지배되는 경우가 많은 것으로 알려졌다^(1,2). 이때 혼합층의 발달은 이러한 큰 스케일의 와(large scale eddy)들의 유동에 지배되는데, 와끼리의 합체나, 경계층 양측으로부터의 유인(entrainment)에 의해 혼합층이 발달되어간다. 한편, Ballal과 Lefebvre⁽³⁻⁵⁾는 난류 예혼합화염에 대하여 3영역 모델을 제안하였다. 난류 예혼합화염은 분자수송 과정에 지배되는 “주름상 층류화염(wrinkled laminar flame)⁽⁶⁾과 난류수송과정에 지배되는 “분산반응영역(distributed reaction zone)^(7,8)으로 대별된다. 전자는 Damköhler수가 큰 경우, 즉 난류가 비교적 약하고, 그 스케일이 큰 경우에 나타난다. 후자는 Damköhler수가 작은 경우, 즉 난류가 강하고 그 스케일이 대단히 작은 경우에 나타난다. 그러나 이러한 난류화염의 미세구조는 난류와 연소 반응의 상호간섭에 의해 영향을 받아서, 그 형태는 물론이고 지배인자까지 변화하고, 측정상의 어려움 때문에 아직까지 그 구조가 명확하게 밝혀지지 않고 있다. 그러나 최근 측정기술의 향상에 따라 실험적 조사 연구가 많이 보고되고 있다.⁽⁹⁻¹³⁾ 그런데 이들이 실험대상으로 한 화염안정화방법은 예혼합기 분류 중심축에 파일럿(pilot)화염을 이용한 것이어서, 본 연구에서 순환류를 이용하는 것과는 유동특성이나 화염구조가 다르다고 생각된다. 특히 비유선형 물체(bluff body)등에 의해 안정화되는 화염에서는 미연혼합기와 고온의 순환류와의 유동특성이 혼합층의 발달이나 와끼리의 합체, 유인(entrainment)에 영향을 주게되고, 따라서 화염구조와 연소특성도 달라지게 된다. 한편 주름상 층류화염이나 분산반응영역을 판정하는 방법에는 밀도(온도)차이로 인해 나타나는 슐리엔사진의 윤곽의 형상, 온도변동의 확률밀도함수(PDF)분포로부터 중간온도 확률의 크기, Kovaszny 수에 의한 것 등이 있다. 그러나 위와같은 판정법에는 다음과 같은 문제점이 있다. 첫째, 슐리엔사진의 윤곽은 반드시 반응면과 일치 하지 않고, 둘째, 상온의 미

연혼합기와 고온 연소가스의 중간온도 크기는 중간 단계의 반응강도를 나타낼 수도 있지만, 기연가스의 확산, 전도, 복사등에 의한 예열로 인해서도 그 존재의 가능성이 있게 된다. 그러므로 중간온도의 값은 여러 인자에 지배된다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 코히런트 와(渦)에 지배되는 난류 예혼합화염의 미세구조를 밝히기 위해 슐리엔사진과 온도, 이온전류의 3가지를 동시에 측정하고, 그 변동량을 통계처리, 분석하여, 미시적인 화염구조 모델을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같으며 관측부의 크기는 50×219mm인 광학유리로 되어 있고 폭은 97mm이다. 연료는 상용 프로판을 사용하였다. 또한 스텝선단으로부터 1230mm 상류에서 연료와 공기가 혼합되어 길이가 1100mm이고 단면이 97×50mm인 직사각형 유로를 통해 연소실로 유입된다. 유선형 스텝은 Libby등⁽¹⁴⁾의 식에서 $W_0 = (2/3)\pi$, $\alpha/\beta = 4$ 인 경우의 형상을 NC밀링머신에서 가공하였으며, 스텝선단의 높이는 연소실 높이의 절반인 25mm이다.

변동온도는 소선경 25 μ m의 Pt/Pt-Rh13% 열전대를 같은 재질의 0.5mm 지주에 용접하여 사용하였고, 응답지연을 전기적회로에 의해 보상하여 측정하였다. 시정수 결정은 PDF법으로 하였으며, 미연혼합기측에서 연소가스측으로 probe를 이동하면서 최저 300K에서 최고 2000K이 나타나는 조건에서 측정하였다. 이온전류 측정에는 소선경이 0.1mm, 재질이 Pt-Rh13%, 돌출길이가 0.5mm인 정전탐침에 -18V를 가하여 양이온을 검출하였다.

유동장의 가시화에는 직경 300mm의 오목거울을 사용한 슐리엔(schlieren)법에 의하였다.

Fig. 2는 슐리엔 사진과 변동온도, 이온전류의 동시측정계를 나타낸 것이다. 순간 광원은

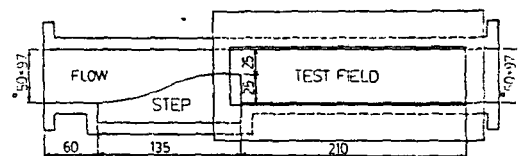


Fig. 1 Combustion chamber

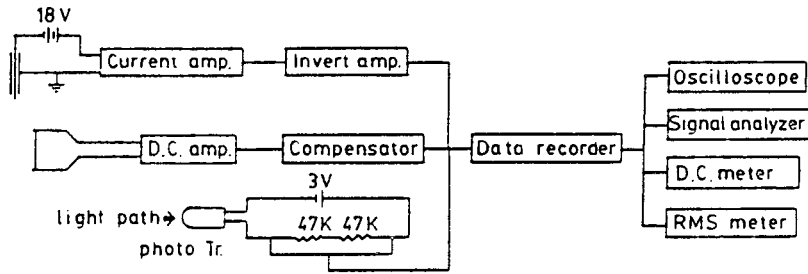


Fig. 2 Block diagram of simultaneous measurement of schlieren photograph, fluctuating temperature, and ion current.

stroboscope에 카메라를 동기시켜 발생하였고, 이때 광로(光路)에 Photo Tr.를 설치하여 나오는 신호를 온도-이온 신호와 함께 데이터 레코더에 수록한 후 각종 통계처리 및 분석을 수행하였다.

측정좌표는 스텝전단을 원점으로 상방향을 +Y, 下 방향을 -Y, 유동방향을 X축으로 설정하였다.



Fig. 3 Schlieren photograph at 5m/s, $\phi=1.0$, $p'=108\text{Pa}$.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염의 가시화 및 온도와 이온전류, 가스농도의 분포

Fig. 3은 순간 슬리이렌 사진으로서 코히런트 와(coherent eddy)가 혼합층 전반에 걸쳐서 나타나고 있다. 이 화염 조건의 $X=70\text{mm}$, $X=150\text{mm}$ 단

면에서 온도와 이온전류의 시간평균치와 rms치를 조사한 것이 Fig. 4(a), Fig. 5(a)이다. 유동장내에서의 온도는 현재 반응중인 가스와 상류로부터의 기연가스의 영향을 받고 있으므로 반드시 그 위치에서의 연소반응의 결과를 나타낸다고 볼 수 없다. 그러나 화염중에서의 양이온은 감쇠가 극히 빠르기

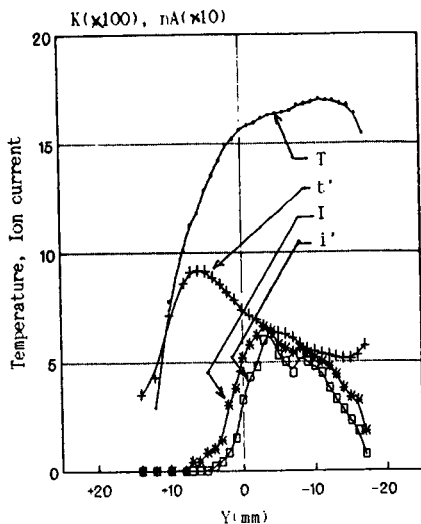


Fig. 4(a) Profiles of time mean temperature T , ion current i , and rms values (t' , i') at $X=70\text{mm}$.

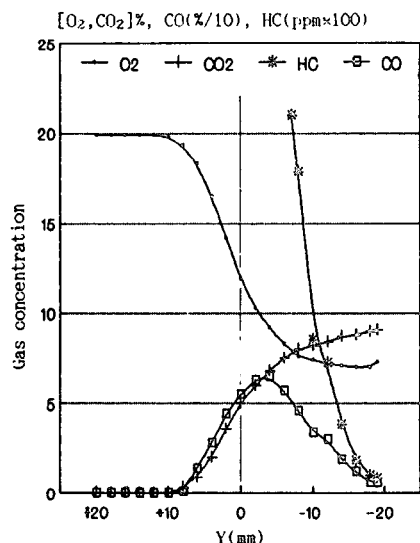


Fig. 4(b) Profiles of time mean gas concentration (O_2 , CO_2 , HC , CO) at $X=70\text{mm}$.

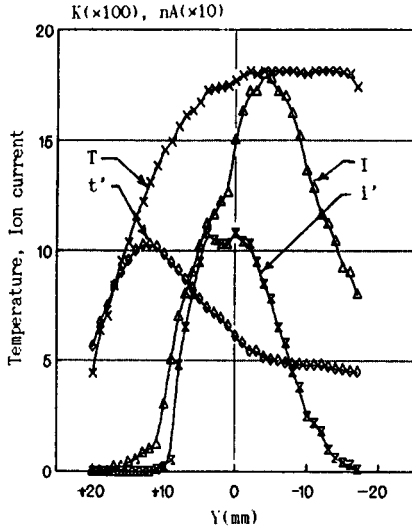


Fig. 5(a) Profiles of time mean temperature T , ion current i , and rms values (t' , i') at $X=150\text{mm}$.

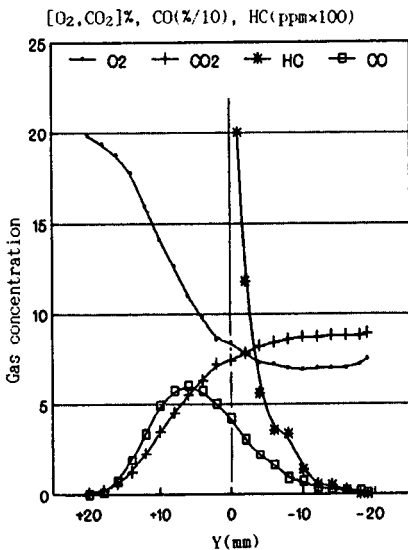


Fig. 5(b) Profiles of time mean gas concentration (O_2 , CO_2 , HC , CO) at $X=150\text{mm}$.

때문에 이온전류는 그 시점에서 반응강도를 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 이 그림에서 이온전류의 rms치 (i')가 최대값을 나타내는 위치를 반응영역의 중심이라고 보면, $X=70\text{mm}$ 단면에서는 $Y=-4\text{mm}$ 부근, $X=150\text{mm}$ 단면에서는 $Y=1\text{mm}$ 부근이 해당된다. 그런데 이들 위치는 온도분포로부터 추

정되는 전단층에서 연소가스측 경계에 해당된다. 즉 고온의 연소가스와 전단층사이의 미연혼합기가 휘말려 들어가는 곳에서 연소반응이 가장 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상에 대해서는 고온의 연소가스와 미연혼합기와 평면전단층에 형성되는 화염의 경우에서 보고한 바 있다⁽¹⁵⁾. 한편 슬리이렌 사진에서 나타나는 코히런트 와(eddy)의 경계는 Weinberg⁽¹⁶⁾에 의하면 밀도의 1차도함수가 최대구배인 위치보다 낮은 최저온도의 1.5배인 위치라고 밝혔다. 즉, 본 연구에서 최저온도를 미연혼합기의 온도인 300K 로 보면 그 경계의 위치가 450K 정도로서 i' 의 최대치 보다 미연혼합기 쪽으로 많이 치우쳐진 곳임을 알 수 있다. 또한 미연혼합기 측에서 이온전류의 rms치가 거의 0에 가까운 위치를 보면 $X=70\text{mm}$ 단면에서 $Y=4\text{mm}$, $X=150\text{mm}$ 에서 $Y=11\text{mm}$ 이고 이 위치에서의 시간평균온도가 각각 1355K , 1384K 로 나타났다. 그런데 순수한 프로판의 자연발화온도가 약 777K ⁽¹⁷⁾인 점을 감안할때 이 위치에서 연소반응이 일어나지 않는 것은 화염의 신장, 혹은 기연가스의 확산에 의한 가연한계 이하 때문으로 생각된다. Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)에서 i' 의 최대치에서 이곳까지의 가스농도가 CO_2 와 CO 의 급격한 감소를 나타내고 있는 점으로 보아서 기연가스의 확산에 의한 가연한계 이하일 가능성이 높다. 한편 슬리이렌사진으로부터 구한 시간평균적인 와의 경계는 $X=70\text{mm}$ 단면에서 $Y=9\text{mm}$, $X=150\text{mm}$ 단면에서 $Y=18\text{mm}$ 로써 변동온도의 rms 최대치 (t')가 나타나는 위치 ($X=70\text{mm}$ 에서 $Y=6\text{mm}$, $X=150\text{mm}$ 에서 $Y=12\text{mm}$)보다도 미연혼합기 측으로 치우쳐 나타나고 주 반응대의 위치가 아님을 확실하다. 이 와의 경계로부터 이온전류의 rms치가 나타나기 시작하는 곳까지의 가스조성도 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)를 보면 연소가스가 존재하는 곳임을 알 수 있다. $X=70\text{mm}$ 단면에서 $Y=4\sim 9\text{mm}$ 사이, $X=150\text{mm}$ 단면에서 $Y=11\sim 18\text{mm}$ 사이가 이에 해당된다. 따라서 슬리이렌 사진에 나타나는 와의 윤곽은 주 반응대가 아닐 가능성이 높으며, 연소반응은 연소가스측에서 더 활발할 것으로 보인다. 그래서 슬리이렌사진과 온도 이온전류치의 신호를 동시측정하였다.

3.2 슬리이렌사진, 온도, 이온전류의 동시측정 기술한 바와 같이, 고온의 순환류와 혼합되면서

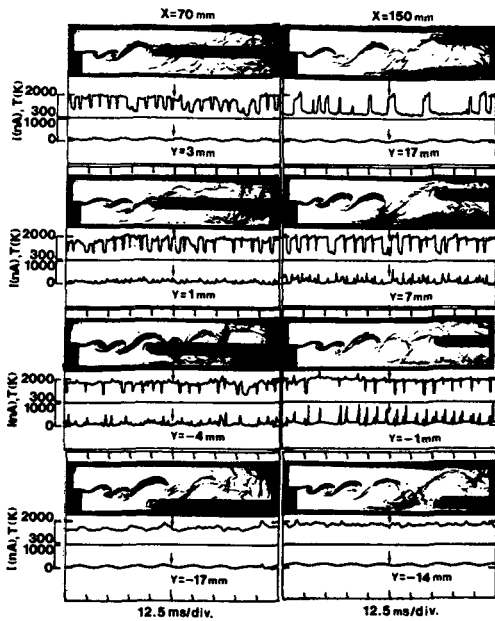


Fig. 6 Simultaneous signals of temperature, ion current and schlieren photograph at $X=70\text{mm}$, $X=150\text{mm}$.

착화되는 기구를 갖는 예혼합화염에서는 주 반응대를 슬리렌사진의 윤곽에 의해 판단하여 화염구조를 조사하는데는 무리가 있다. 이것을 좀 더 자세히 조사하기 위해 Fig. 2의 측정계로써 슬리렌사진과 온도, 이온전류를 동시측정한 결과가 Fig. 6이다. 그림에서 온도 및 이온전류 파형(신호)상의 화살표는 슬리렌사진에서 검출되는 온도-이온 측정프로브와의 동기점이다. 그리고 이온전류의 신호 중에서 60Hz정도의 작은 파형은 잡음이다. 이 그림을 보면 순간 슬리렌사진에서 와(渦)의 경계로 보이는 $X=70\text{mm}$ 단면의 $Y=3\text{mm}$ 위치, $X=150\text{mm}$ 단면의 $Y=17\text{mm}$ 위치에서, 순간적인 최고온도는 2000K 정도 나타나지만 반응은 거의 일어나고 있지 않음을 알 수 있다. 그러나 연소가스측인 $X=70\text{mm}$ 단면의 $Y=1, -4\text{mm}$ 위치, $X=150\text{mm}$ 단면의 $Y=7, -1\text{mm}$ 위치에서는 모두 이온전류치의 예리한 피크가 많이 나타나고 있어서 반응이 활발한 곳으로 보인다. 한편 $X=70\text{mm}$ 단면에서 $Y=-17\text{mm}$ 위치의 재순환영역이나, $X=150\text{mm}$ 단면의 $Y=-12\text{mm}$ 위치에서는 고온의 연소가스만이 유동하고 있기 때문에 반응이 거의 일어나고 있지 않음을 알 수 있다.

3.3 온도와 이온전류의 확률밀도함수(PDF) 분포

주름상 층류화염(wrinkled laminar flame)과 분산 반응영역(distributed reaction zone)을 구분하는 방법의 하나로써, 온도변동의 확률밀도함수 분포에서 중간온도범위의 확률이 낮으면 주름상 층류화염, 중간온도의 확률이 높으면 분산반응 영역의 존재를 인정하는 것이다^(10,12,13). 그러나 이러한 연구들에서는 대부분의 화염안정화 기구가 파일럿 화염에 의한 것이고 이것이 미연혼합기로 전파하는 화염을 대상으로 하고 있어서, 본 실험장치와 같은 재순환영역의 연소가스와의 혼합과정에서 나타나는 코히런트 와에 지배되는 화염과는 다르다고 생각된다. 그래서 온도와 이온전류의 확률밀도함수 분포를 구해 본 것이 Fig. 7, Fig. 8이다. $X=70\text{mm}$ 와 $X=150\text{mm}$ 단면에서 미연혼합기측으로부터 고온가스측으로 갈수록 저온피크는 줄어들고 고온의 피크가 증가하고 있다. 그런데 $X=70\text{mm}$ 단면의 $Y=$

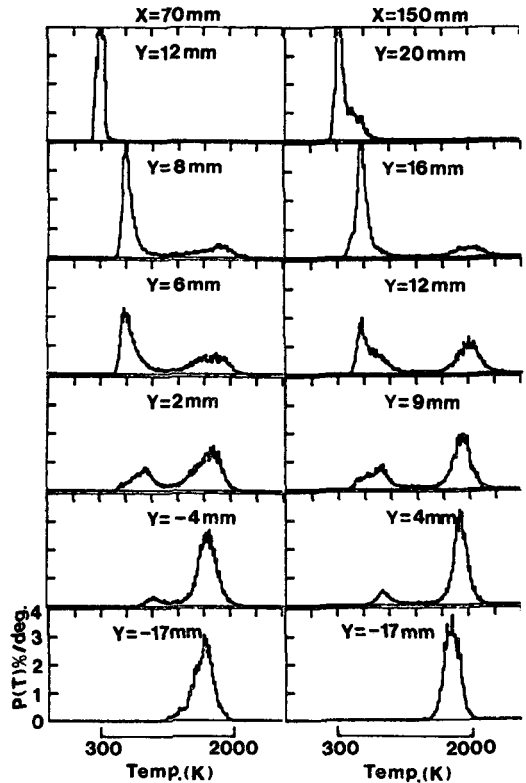


Fig. 7 PDF distributions of fluctuating temperature.

8,6mm 위치에서 1500K이상의 확률이 나타나지만, Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)에 의하면 연소반응은 일어나지 않는 곳이다. 이것은 앞에서 고찰한 바와 같이 화염의 신장, 연소가스의 확산에 의한 가연한계 이하, 또한 시정수(14ms)일정으로 인한 온도의 과보상등 복합적인 요인 때문이 아닌가 생각된다. 역시 $X=150\text{mm}$ 단면의 $Y=16,12\text{mm}$ 위치도 마찬가지로 결과를 보여준다. 이 그림에 의하면 $X=70\text{mm}$ 단면의 $Y=-4\text{mm}$, $X=150\text{mm}$ 단면의 $Y=4\text{mm}$ 위치와 같이 고온의 피크확률이 저온의 피크확률보다 약 6배 정도 더 크게 나타나는 곳이 Fig. 4(a), 5(a)에서 이온전류의 rms치가 최대인 점으로 보아 이 위치가 주 반응영역으로 생각된다. 이들 위치에서 중간온도의 크기는 거의 비슷하다. 일반적으로 온도변동의 rms치가 가장 크게 나타나는 곳에서 확률밀도함수의 분포가 거의 대칭적인 쌍봉성을 나타내게 되고, 이 부근을 주 반응영역으로 고려하게 되는데, 본 연구에 의하면 이러한 PDF형상만을 가지고 반응대를 가정하고 화염구조를 고

찰하는 데는 무리가 있음을 알 수 있다. 따라서 온도변동의 PDF분포를 가지고 주 반응대를 가정하고 화염구조를 유추할 때에는 이온전류등과 같은 연소반응에 민감하게 반응하는 다른 정보와 함께 고찰함이 필요하다.

한편 이온전류의 PDF분포를 나타낸 Fig. 8을 Fig. 7과 대비시켜 보면, 모두 주 반응대의 영역이 앞에서 고찰한 바와 같이 와 중심부근에 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실들로 부터 본 연구 범위에서와 같은 코히런트 와에 지배되는 화염의 미세구조는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 미연혼합기 연소실로 유입(流入)되는 초기단계에서는 유동속도 차이로 인해 나타나는 전단력에 의해 초기 와가 형성되고, 이로 인해 미연혼합기와 재순환영역내의 고온연소가스가 나선형을 이루면서 미세스케일(fine scale)로써 혼합된다. 이 때 고온연소 가스로부터 저온의 미연혼합기로 열전달이 이루어짐에 따라 와 내부의 미연혼합기는 온도가 증가하면서 착화하여 화염이 성장하고 발열반응으로 인해 연소반응은 더욱 활발하게 된다. 동시에 와 내부에서는 연소반응에 의해 온도가 증가함에 따라 체적팽창하면서 와의 성장이 촉진된다. 그러나 와 중심에서 미연혼합기측으로 갈수록 연소반응강도가 감소하는데, 이는 화염신장 또는 연소가스의 확산에 의한 가연한계 이하 때문이 아닌가 생각된다. 그리고 하류방향으로 유동함에 따라 코히런트 구조의 와가 붕괴되기 시작하면서 작은 스케일의 불규칙한 3차원 와에 지배되는 화염편(flamelets)의 구조를 갖는 것으로 생각된다. 또한 하류단면으로 갈수록 난류에너지의 소산과 점성증가, 벽면의 영향 때문에 유인(entainment)은 감소하게 되고, 재순환영역 이후에서는 상류에서 유인된 미연혼합기에 의해 연소반응이 주로 와 내부에서 일어나게 된다. 이러한

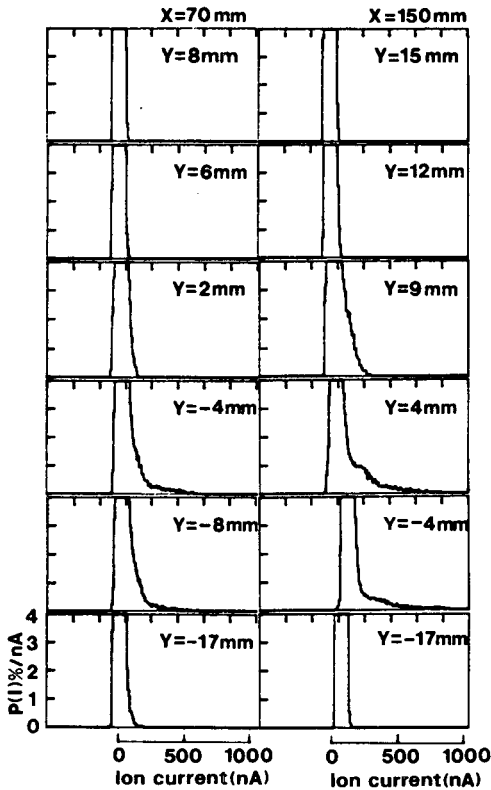


Fig. 8 PDF distributions of ion current.

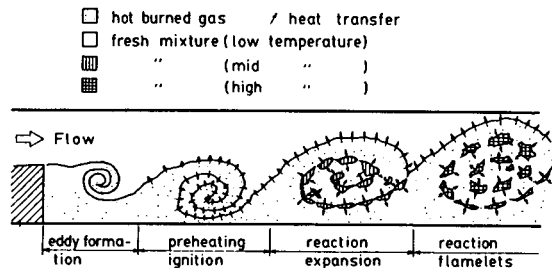
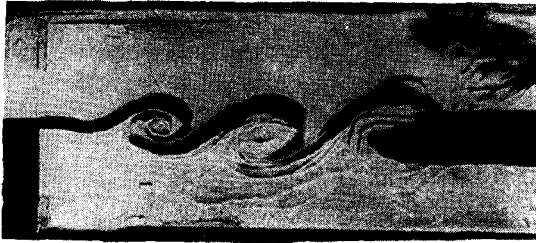


Fig. 9 Schematic diagram of enlargement of eddy during combustion.



(a)



(b)

Fig. 10 Schlieren photographs

구조를 알아보기 위해 슬리이렌 사진을 이용하여 초기와(initial eddy) 부근과 하류단면의 와(渦)를 자세히 조사해 본 것이 Fig. 10이다. Fig. 10(a)에는 초기와(渦)의 형성과 나선형 혼합을 나타내고, Fig. 10(b)는 하류단면에서의 와내부의 3차원적인 화염편과 상류로부터 와(渦)의 합체에 의한 경계 등으로 인해 많은 윤곽들이 나타나고 있다. 그러나 이 윤곽들이 화염면(flame front)인지는 분명치 않다. 한편, Fig. 9와 같은 화염구조에서는 와 내부에서 연소반응하고 있는 화염편이 주위의 연소반응이 없는 연소가스에 둘러싸여 있고 미연혼합기로 전파성을 갖지 못하기 때문에, 역화(flash back)가 일어나기 어렵다. 그러나 만일 접근류(approaching flow)에 강한 난류가 주어지거나 스템의 유선형 면위의 경계층을 교란시키게 되면⁽¹⁸⁾, Fig. 11과 같이 초기 와가 형성될 때 부터 난류혼합이 이루어지게 된다. 따라서 와내부의 미연혼합기나 화염편이 주위의 연소가스를 횡단하여 상부의 미연혼합기로 돌출하게 되면, 미연혼합기로 전파하는 주름상층류화염이 나타나서, 역화가 일어날 가능성이 매우 높아지게 된다. 또한 Fig. 9와 같이 초기와(渦)의 형성이 층류일지라도 복사나 전도 등에 의해 미연혼합기의 온도가 높아지거나 당량비 증가로 인해, 와내부에서 화염편의 연소속도가 커지게 되면

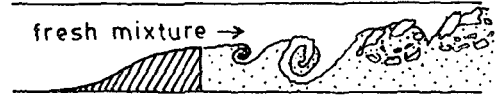


Fig. 11 Schematic diagram of flame development within initial eddy for turbulent mixing

Fig.11과 같이 하류단면에서 화염이 미연혼합기층으로 전파되어 역화의 가능성이 있게 된다. 그러나 본 연구에서는 전보⁽¹⁹⁾에서 보고한 바와 같이 당량비의 증가(속도 3.7m/s에서 $\phi=1.9$)에도 불구하고 역화는 일어나지 않았다. 이것은 본 실험장치에서는 Fig. 9와 같은 화염구조에 지배되기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

유선형 스템에 의해 안정화되고, 코히런트 와(coherent eddy)에 지배되는 난류예혼합화염의 미세구조를 밝히기 위해 슬리이렌 법에 의한 가시화, 온도, 이온전류등을 동시측정 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 슬리이렌 사진에서 나타나는 코히런트 와의 거시적인 윤곽은 화염면(flame front)이 아니고 미연혼합기와 연소가스의 혼합영역, 또는 연소가스영역이다.
- (2) 이 때 연소반응은 주로 큰 스케일의 와 내부에서 일어나고 미세 스케일의 화염편(flamelets) 구조를 갖는다.
- (3) 재순환영역에 의해 안정화되고 코히런트 와에 지배되는 예혼합화염의 주 반응영역은 온도변동의 rms피크치 위치보다 더 고온측인 연소가스층에서 나타났다. 이 주 반응영역에서의 온도 변동의 PDF분포 형상은 고온의 피크확률이 저온의 피크확률보다 약 6배 더 높다. 따라서 대칭적인 쌍봉성형상의 PDF분포가 나타나는 위치를 주 반응대로 가정하고 화염구조를 고찰하는 데는 문제가 있다.

참 고 문 헌

- (1) Ganji, A.R. and Sawyer, R.F., 1980, Experimental Study of the Flow Field of a Two Dimensional Premixed Turbulent Flame, AIAA, 79-0017 R, pp. 817~824.

- (2) Pitz, R.W. and Daily, J.W., 1983, Combustion in a Turbulent Mixing Layer Formed at a Rearward-Facing Step, AIAA, 21-11, pp. 1565~1570.
- (3) Ballal, D.R. and Lefebvre, A.H., 1975, The Structure and Propagation of Turbulent Flames, Proc. R.Soc.London, A344, pp. 217~234.
- (4) Ballal, D.R., 1979, The Influence of Laminar Burning Velocity on the Structure and Propagation of Turbulent Flames, Proc.R.soc.London, A367. pp. 485~502.
- (5) Ballal, D.R., 1979, Further Development of the Three-Region Model of a Premixed Turbulent Flame, Proc.R.Soc.London, A368, pp. 267~293.
- (6) Damköhler, G., 1936, Einflüsse der Strömung, Diffusion und Des Wärmetüberganges auf Die Leistung von Reaktionsöfen, Z.Elektrochem., 42-12. pp. 846~862.
- (7) Summerfield, M., et.al., 1954, The Physical Structure of Turbulent Flames, Jet Propulsion, 24, pp. 254~255.
- (8) Summerfield, M., et.al., 1955, The Structure and Propagation Mechanism of Turbulent Flames in High Speed Flow, Jet Propulsion, 25, pp. 377~384.
- (9) Yoshida, A., 1981, An Experimental Study of Winkled Laminar Flame, 18th Symp.(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 931~939.
- (10) Yoshida, A., Tsuji, H., 1982, Characteristic Scale of Wrinkles in Turbulent Premixed Flames, 19th Symp.(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 403~411.
- (11) Namazian, M., et.al., 1982, Two-Point Rayleigh Scattering Measurements In a V-shaped Turbulent Flame, 19th Symp.(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 487~493.
- (12) 香月正司 外5, 1989, 亂流豫混合火炎における亂れと混合(第2報), 日本機械學會論文集(B), 第55券, 第514號, pp. 1729~1736.
- (13) 高橋丈雄, 香月正司, 水谷幸夫, 1989, 亂流豫混合火炎の分散反應領域の觀察, 日本機械學會論文集(B), 第55券, 第511號, pp. 859~864.
- (14) Libby, P.A. and Keiss, H.R., 1951, The Design of Two Dimensional Contraction Scetion, Quarterly of Applied Mathematics, 10, pp. 95~98.
- (15) 이재득, 최병륜, 1989, 평면전단층의 난류에 혼합화염의 구조에 관한 실험적 연구, 한국박용기 관학회지 제13권, 제4호, pp. 33~39.
- (16) Weinberg, F.W., 1956, The Shadowgraph of a Flat Flame, Proc.Roy.Soc.A235, pp. 510.
- (17) Kanury, A.M., 1975, Introduction to Combustion Phenomena, Combustion Science and Technology Vol.2, Gordon and Breach, New York, pp. 131.
- (18) Ganji, A.R., 1979, Combustion and Stability Characteristics of a Prdmixed Vortex Dominated Two Dimensional Flow, Ph.D.Thesis, University of California, Berkeley
- (19) 이재득, 최병륜, 1990, 유선형 스텝에 의해 안정화된 예혼합화염의 구조와 연소특성에 관한 연구(1)—점근류의 압력맥동의 영향에 대하여—, 자동차공학회지, 제12권, 제3호, pp. 63~70.