

## 평면전단층의 난류예혼합 화염의 구조에 관한 실험적 연구

李在得\* · 崔炳輪\*\*

### A Study of Turbulent Premixed Flame Structure In a Plane Shear Layer

JAE-DEUK LEE, BYEONG-RYUN CHOI

**Key Word** ; Wrinkled Laminar flame(주름상층류화염), Distributed Reaction Zone(분산 반응영역), Flamelets(화염편), Burned Hot gas(고온의 연소가스, 기연가스), Unburned Mixture(미연혼합기), Coherent Eddy(대규모조직적 구조의 와(渦), Shear Layer(전단층), Turbulent Premixed Flame(난류 예혼합화염),

### Abstract

A turbulent premixed flames of shear layer formed between burned hot gas and unburned mixture were investigated by means of schlieren photograph with fluctuations of temperature and ion current. The combustion intensity between burned hot gas and shear layer was higher than the intensity between unburned mixture and shear layer. A wrinkled laminar flame and flamelet were appeared at downstream to exist and distributed reaction zone was at upstream as a result of analyzed probability density functions of temperature fluctuation. The initial combustion intensity of reaction zone of eddy between burned hot gas and shear layer was higher than that of final, flowing downstream, and vice versa between unburned mixture and shear layer.

### 초 록

본 연구에서는 고온의 연소가스류와 미연혼합기류 사이의 평면 전단층에 형성되는 난류예혼합화염의 구조를 조사하기 위해 슬리이렌

사진 촬영을 하고, 연소반응강도에 비례하여 나타나는 이온전류와 온도변동을 측정하였다. 이온전류값의 분포에 의해 고온의 연소가스와 전단층 사이의 반응강도가 미연혼합기와 전단층사이에서 보다 더 높게 나타났다. 맥동온도의 확률밀도함수(PDF)분포를 통해 주름상층

\*釜山大學校 大學院

\*\*正會員, 釜山大學校

류화염(wrinkled laminar flame)과 분산반응영역(distributed reaction zone)의 존재를 확인하였다. 또한 온도변동과 이온전류를 동시에 측정된 결과 고온의 연소가스와 전단층 사이에 있는 와의 반응면에서 일어나는 연소반응강도는 하류로 이동하면서 초기보다 후기에서 높게 나타나고, 미연 혼합기와 전단층 사이에서는 반대로 초기가 후기보다 더 높게 나타났다.

기호설명

- $I(\bar{I})$  : (시간평균)이온전류( $nA$ )
- $i'$  : 이온전류의  $rms$  값( $nA$ )
- $T(\bar{T})$  : (시간평균)온도(K)
- $t'$  : 온도의  $rms$  값(K)
- $U$  : 속도(m/s)
- $X$  : 유동방향좌표(mm)
- $Y$  : 유동의 직각방향좌표(mm)
- $\phi$  : 탕량비

하첨자

- b : 고온의 연소가스
- u : 미연 혼합기

1. 서 론

난류 예혼합 화염의 구조에 관해서는 1940년 G·Damköhler에 의해 주름상 층류화염(wrinkled laminar flame)이 제안되어<sup>1)</sup> 그 구조의 존재가 술리이렌 사진으로 확인되었으나<sup>2)</sup> 그 특성의 정량적 해명을 위한 연구가 행해지게 된 것은 최근의 일이다.<sup>3)~5)</sup> 그 후 Summerfield 등<sup>6)7)</sup>에 의해 분산반응영역(distributed reaction zone)모델이 제안되어 그 존재도 확인되었으나 그 정량적인 특성은 아직도 밝혀지지 않고 있다. 이들 2개의 구조는 난류상태에 따라 발생하지만 많은 실제 화염에서는 이 2개의 구조가 공존하고 있다고 생각된다.<sup>4)8)9)</sup>

본 연구에서는 고속의 고온연소가스류와 저속의 미연 혼합기류 사이의 전단층에 형성되는 난류 예혼합화염이 미시적으로 어떠한 구조를 갖는가를 밝힐 목적으로 술리이렌 사진 관찰에 의한 조사를 행하고 온도, 이온전류의 맥동량

을 측정하여 확률밀도분포를 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 연소기 구조는 Fig.1과 같다. 관측부는 폭 100 mm, 두께 30mm의 직사각형 단면의 유리이고 광학적 측정을 위해 바이코르(vycor)를 설치하였다. 관측부 하단

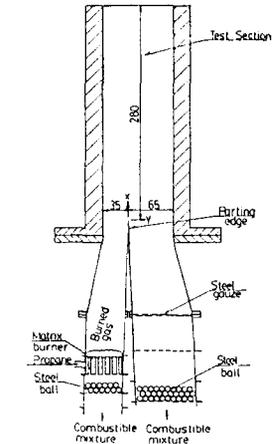


Fig.1 Combustion chamber.

에는 분할엣지(parting edge)에 의해 35mm와 65mm유로로 나누어지고 좌측유로에서는 엣지 선단으로부터 약 200mm상류의 매트릭스 버너(matrix burner)에서 생성된 프로판-공기 연소가스가 연소실로 유입된다. 또한 65mm의 우측유로에서는 연소실 상류 약 4m 위치에서 프로판과 공기가 예혼합되어 연소실로 유입된다. 연소기 내의 측정좌표는 분할엣지 선단을 원점으로 하여 유동의 하류방향을 X축, 미연 혼합기측 수평방향을 Y축으로 설정하였다.

화염의 관찰은 유효직경 200mm인 2개의 오목거울을 이용한 술리이렌 법에 의하였고 평균 온도 측정은  $\phi 0.1mm$   $P_t/P_t-R_h13\%$  열전대를 사용하였다. 정전탐침에 의한 이온전류 측정에는  $\phi 0.1mm$   $P_t-R_h13\%$ 를 0.5mm 돌출시켜서 -18V를 가해 양이온을 검출하였다. 변동 온도 측정에는 선경  $25\mu m$   $P_t/P_t-R_h13\%$  열전대를 같은 재질의  $\phi 0.5mm$  지주에 용접하여 사용하였다. 열전대의 응답지연보상은 맥동 온도의 확률밀도분포로부터 시정수를 정하여

보상기에서 전기적으로 보상하였다.<sup>3)</sup>

실험조건은 고온의 연소가스의 연소실 유입 속도  $U_b=16\text{m/s}$ , 유입온도  $T_b=1100\text{K}$ 로 일정하게 한 후, 미연혼합기 유속  $U_u=4.5\text{m/s}$ 로 하여, 미연혼합기의 당량비( $\phi_u$ )를 각각 0, 0.5, 0.8로한 경우에 대해 실험하였다.  $U_b$  및  $U_u$ 는 연소실로 유입되는 체적유량을 유로 단면적으로 나눈 값이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 가시화 관찰

Fig. 2는 당량비 변화에 따른 전단층의 구조를 나타낸 슐리이렌 사진이다. 먼저 비연소시( $\phi_u=0$ )인 경우를 보면 거의 2차원적인 대규모 조직적 구조의 와(Coherent eddy)가 보인다.  $\phi_u=0.5$ 인 경우에는 화염의 전파성이 그

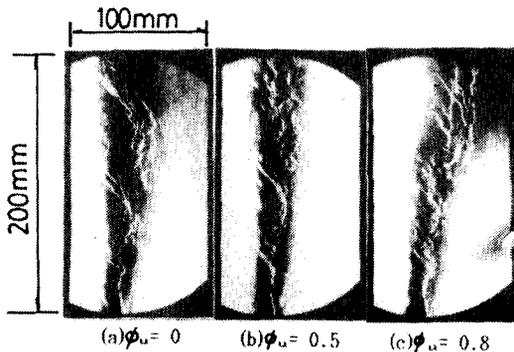


Fig.2 Schlieren photograph.

다지 강하지 않기 때문에 비연소시와 같은 전단층 영역을 나타내고 있으나 하류부근에서 불규칙한 3차원의 작은 와가 많이 나타나고 있다. 다음에  $\phi_u=0.8$ 인 화염전파성이 강한 조건에서는 분할엠티 가까운데에서 부터 대규모 조직적 구조의 와가 붕괴되면서 작은 와의 증가로 인해  $\phi_u=0.5$ 경우보다 전체적으로 와표면의 주름이 증가하고 하류에서는 작은 와의 크기가 커지고 있다. 또 이 하류에서는 연소열에 의한 열팽창 및 화염의 전파성으로 인해 전단층이 미연혼합기 측으로 확장되어 있다. 그러나 당량비가 증가한 경우에도 분할엠티 부근의 상류측에서 대규모 조직적 구조의 와가 확

실험 관찰되는 것으로 보아 이 대규모 조직적 구조의 발생 자체는 화염의 존재에 의해 영향을 받지 않고 단지 와의 발달과정에서 화염에 의해 교란을 받아 붕괴되는 것으로 생각된다.

#### 3-2. 온도와 이온전류의 분포

유동장 내에서의 온도는 현재 반응중인 가스 와 상류로 부터의 기연가스의 영향을 받고 있으므로 반드시 그 단면에서의 연소반응의 결과를 나타낸다고는 볼 수 없다. 그러나 양이온은 감쇄가 극히 빠르기 때문에 이온전류는 그 시점에서 반응의 존재를 나타낸다. 따라서 Fig. 3에서 평균이온전류  $\bar{I}$ 와 그 변동의  $rms$ 값  $i'$ 가 어느 정도의 크기를 나타내는 범위를 시간평균적인 반응이 활발한 영역이라고 보면  $X=120\text{mm}$ 단면에서는  $Y=-30\sim 10\text{mm}$ ,  $X=190\text{mm}$ 단면에서는  $Y=-10\sim 60\text{mm}$ 의 범위를 반응대 영역이라고 상정한다. 앞의 슐리이렌 사진에서 고찰한 바와 같이 전단층이 하류로 갈수록 폭이 넓어지면서 미연혼합기 측으로 기울어지기 때문에 시간평균적인 반응영역도 폭이 넓어지고 혼합기 측으로 기울어 진다. 한편 온도분포와 대비시켜보면 시간평균적으로 가장 반응이 활발한 지점이  $X=120\text{mm}$  단면의  $Y=0\text{mm}$  위치,  $X=190\text{mm}$  단면의  $Y=35\text{mm}$  위치에서 고온의 연소가스와 전단층이 접하는 영역임을 알 수 있는데 이곳은 변동온도의  $rms$  최대치 위치보다 연소가스측에 더 치우친 곳이다. 따라서 Fig. 4의 1 부근과 같이 고온의 연소가스와 전단층 사이의 미연혼합기가 휘말려 들어가는 곳에서 연소반응이 가장 활발히 일어나고 있음을 알 수 있다. 그리고 시간평균 이온전류치  $\bar{I}$ 와  $rms$ 값  $i'$ 는 어느 곳에서도 반응영역의 중앙부근에서 각각 최대치를 나타내나, 변동온도의  $rms$ 값  $t'$ 의 최대위치는 반응대 중앙보다 미연혼합기 측에 치우쳐 나타난다.  $t'$ 의 최대치가 나타나는 지점은 평균온도  $\bar{T}$ 의 분포에서 최대 구배 위치와 같다.

#### 3-3. 맥동온도의 확률밀도함수분포

응답지연 보상회로를 사용하여 열전대로 온도를 측정할 경우 비드(bead)보다도 큰 와에

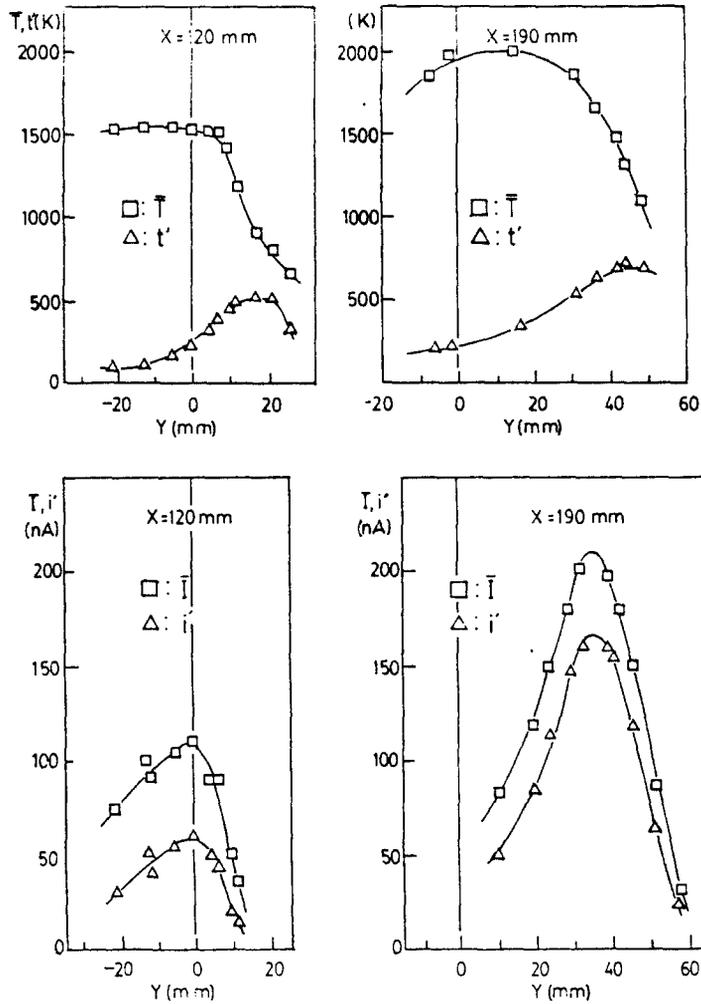


Fig.3 Profiles of time-mean temperature  $\bar{T}$ , ion current  $\bar{I}$ , and rms values( $t'$ ,  $i'$ ),  $\phi_0=0.8$ .

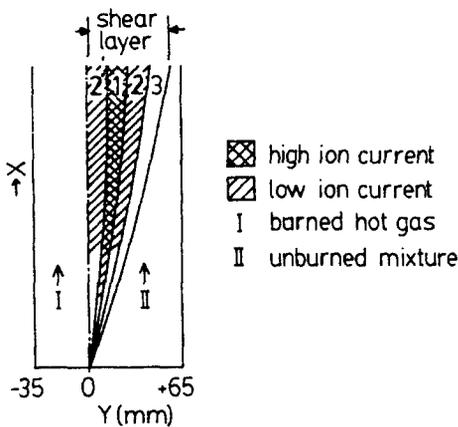


Fig.4 Distribution of ion current at shear layer.

대한 연소가스나 미연혼합기 또는 반응중의 가스가 지나가면 각각의 가스피의 온도에 대응한 변동온도파형이 얻어지게 된다. 따라서 역으로 변동온도파형을 주의깊게 해석하면 가스피의 상태, 즉 와에 대한 화염구조를 알 수 있다. 그래서 맥동온도파형의 확률밀도함수 분포를 구한 것이 Fig.5이다. 먼저  $X=190\text{mm}$  단면을 보면 반응대의 미연혼합기 측에서는 저온의 피크(peak)가, 연소가스 측에서는 고온의 피크가 나타나며  $Y=50\sim 35\text{mm}$  위치에서는 쌍봉형(bimodal)분포를 보이고 있다. 그리고 중간온도의 확률은  $X=120\text{mm}$  단면에 비해 아주

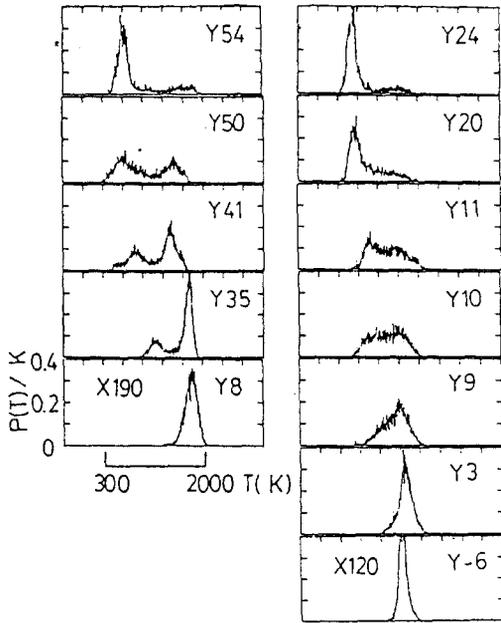


Fig.5 PDFs of fluctuating temperature at X=190mm 120mm.

작게 나타난다. 즉 고온측의 피크는 완전히 연소된 가스의 통과 확률을 나타내고, 저온측 피크는 미연혼합기의 통과 확률에 대응한다고 생각된다. 연소 반응중인, 즉 온도가 충분히 상승하지 않은 상태의 가스괴는 X=120mm 단면 보다 적게 존재함을 보여 주고 있다. 또한 연소가스 측으로 갈수록 저온측 피크 확률이 저하함과 동시에 저온의 피크 위치도 조금씩 고온측으로 이동하고 있다. 그러나 미연혼합기 측으로 갈수록 연소가스에 대응하는 고온의 피크 확률은 점차 저하하지만 피크 위치는 거의 변하지 않는다. 시간평균반응영역에서 연소가스류 측으로 접근할수록 저온측 피크 온도가 점차 상승하는 원인은 주위 연소가스에 의한 예열, 열전대의 시정수 보상부족, 촉매작용에 의한 발열 때문으로 보인다. 따라서 X=190mm 단면의 맥동온도 확률밀도함수 분포로부터 화염구조는 얇은 반응면의 양측에 연소가스괴와 미연혼합기가 접하고 있는, 소위 주름상층류화염 또는 층류 화염편(flamelets)이 지배적인 구조라고 할 수 있다. 한편 X=120mm 단면에서는 X=190mm 단면과 유사한 모양을

나타내지만 Y=11~9mm 사이에서 중간온도의 분포확률이 더 크게 나타나고 있는 점과, X=190mm 단면에서와 같은 쌍봉형 분포가 보이지 않는다. 이것은 X=120mm 단면이 대규모 조직적 구조의 와에 지배되면서 반응이 일어나기 시작하는 영역이기 때문에 반응강도가 다른 여러가지 작은 와의 불완전 혼합에 의해 이러한 분포를 나타낸다고 보여진다. 따라서 X=120mm 단면의 화염구조는 주름상층류 화염에 분산반응영역이 공존하는 구조라 생각된다.

3-4. 이온전류맥동의 확률밀도함수분포

Fig. 6에서 X=190mm 단면을 보면 Y=54mm 위치의 미연혼합기 측에서 연소가스 측으로 갈수록 반응강도가 높은 이온전류의 확률이 증대되고 있다. 이것을 맥동온도확률밀도분포(Fig. 5)와 비교하여 보면 Y=54mm 위치는 변동온도파형에서 2000K의 고온이 존재하지만 이온전류는 최대 100nA로서 600nA 이상 나타나는 Y=35mm 위치에 비해 1/6정도의 극히 미미한 반응강도이다. 그러나 두위치 모두 2000K의 고온의 확률이 존재한다. 따라서 변동온도파형과 반응강도의 관계는 위치에 따라 현저히 다를 수 있다. 위와 같이 고온의 연소가스와 전단층 사이의 미연혼합기괴의 연소반응강도는 높고(Fig. 4의 1영역) 미연혼합기 측으로 갈수록 연소반응강도는 저하한다. (Fig. 4의 2영역) 이것은 Y=35mm 위치에서는 고온에 둘러싸인 미연혼합기괴가 연소하는 화염을 의미하고 Y=54mm 위치에서는 작은 크기의 연소가스괴가 미연혼합기에 둘러싸여 연소하는 화염편(flamelets), 혹은 연소가스괴가 미연혼합기 측으로 돌출되어 있는 형상인 화염 구조를 의미한다고 볼 수 있다. 한편 X=120mm 단면에서도 이온전류의 확률밀도는 X=190mm 단면에서와 거의 같은 분포를 보이고 있으나 반응강도가 약하기 때문에 이온전류치가 낮다는 것과 특히 Y=9mm 위치에서는 반응강도가 다양하게 분포되어 있어서 피크치로부터 완만하게 하향곡선을 나타내는 것이 다른 점이다.

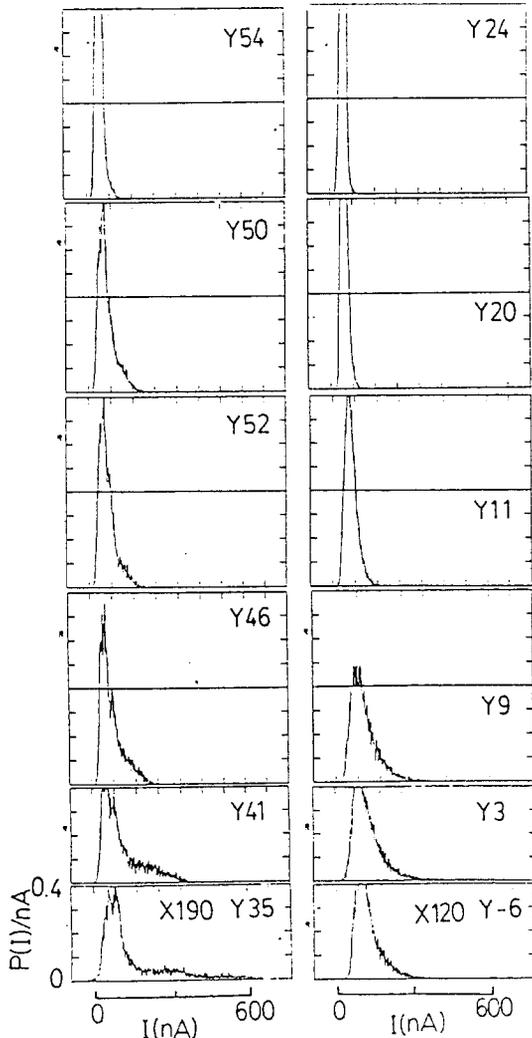


Fig.6 PDFs of ion current at X=190mm, 120mm. ( $\phi_u=0.8$ ).

3-5. 온도와 이온전류의 동시측정

난류전단층의 화염대 내에서 온도와 이온전류 변동량의 상호관계를 알기위해 동시 측정된 것이 Fig. 7이다. 이 파형을 주의깊게 보면, X=190mm 단면에서 미연혼합기 측인 Y=50mm 위치에서는 고온연소가스피가 지나갈때 이온전류치도 상승하고 있으나 연소가스 측인 Y=35mm 위치에서는 저온가스피가 지나갈때 이온전류값이 높게 나타나고 있다. 그러나 전단층의 중간부근이라 생각되는 Y=41mm에서는 양자가 복합된 복잡한 파형을 나타낸다.

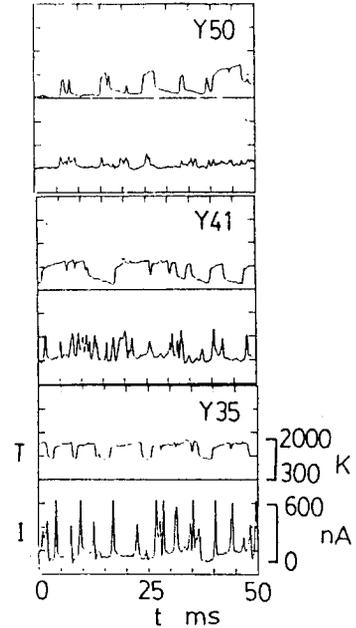


Fig.7 Simultaneous signal of T(K), I(nA), ( $\phi_u=0.8$  X=190mm).

그러나 이러한 것은 거시적 현상이고 자세히 보면 변동온도파형에서 큰 시간 스케일(time scale)을 갖는 와에 대해서는 와의 경계부근(온도의 상승, 하강시)에서 이온전류치가 높게 나타나는 것으로 보아서 이를 분석하면 와의 크기와 연소반응 형태를 알 수 있을 것으로 보인다. 특히 연소가스 측인 Y=35mm 위치를 보면 큰 와가 하류로 가면서 초기경계부분(온도하강위치)에서보다 후기경계부분(온도상승위치)에서 높은 이온전류치가 검출되고 있는 것은 이 와가 하류로 이동하면서 반응강도가 증가하기 때문일 것이다. 그러나 미연혼합기 측인 Y=50mm 위치에서는 미약하지만 초기반응강도가 더 높다. 이것은 고온가스피가 저온의 미연혼합기에 둘러싸여 있기 때문에 열손실로 인해 화염이 성장하지 못하기 때문으로 보인다. 이상을 종합하여 화염구조를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 8이다. 이 그림은 Fig. 4의 1영역에서 반응이 활발한 가스피가 미연혼합기 측(Fig. 4의 2,3영역)으로 전파해 나가면서 하류로 유동하는 화염구조이다.

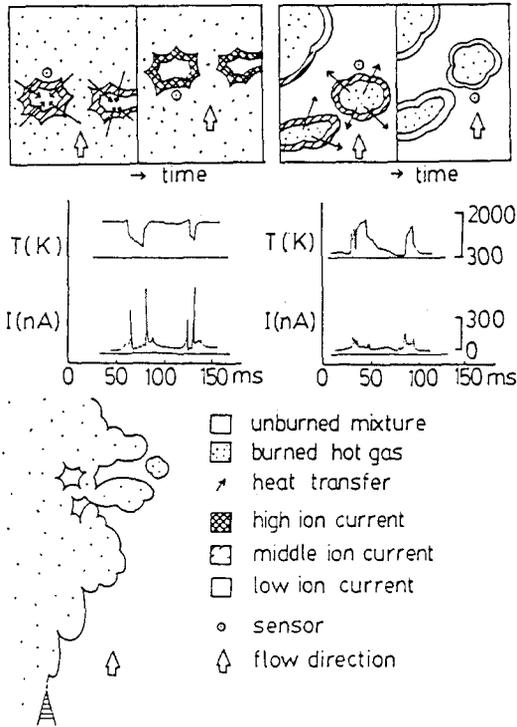


Fig.8 Schematic diagram of flame structure of burned hot gas and unburned mixture.

4. 결 론

고온, 고속의 연소가스류와 상온, 저속의 미연혼합기류 사이의 전단층에 형성되는 화염을 대상으로 현상론적 입장에서 조사한 결과 본 연구 범위내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 난류전단층에 형성되는 화염구조는 상류에서는 대규모 조직적 구조의 와(coherent eddy)에 지배되는 화염이 나타나고 하류부에서는 불규칙한 3차원 와에 지배되는 전파화염이 형성된다. 이러한 하류부의 전파화염에서는 주름상 층류화염(wrinkled laminar flame) 또는 화염편(flamelets)구조를 갖고 상류부에서는 분산반응영역(distributed reaction zone)이 공존하는 구조이다.

(2) 하류부근의 고온가스와 미연혼합기의 전단층내에서 연소반응이 가장 활발한 곳은 고온의 연소가스와 전단층사이의 미연혼합기가 휘말려 들어가는 곳이다. 이곳에서 큰 와의 연소반응은 하류로 이동하면서 반응강도가 커진다.

(3) 미연혼합기 측에서의 연소는 순간적인 높은 온도에도 불구하고 고온의 연소가스측에 비해 반응강도가 낮게 나타나는데 이는 저온의 미연혼합기에 의한 연소가스의 열손실때문으로 보인다. 따라서 변동온도파형과 반응강도의 관계가 위치에 따라 현저한 차이를 나타낸다.

참고문헌

- 1) Gerhard Damköhler, "The effect of turbulence on the flame velocity in gas mixtures", NACA, TM NO. 1122, pp. 1~51, 1947.
- 2) K.Yamazaki and H.Tsuji, "An experimental investigation on the stability of turbulent burner flames", 8th symp.(Int.)on combustion pp. 543~553, 1962.
- 3) A.Yoshida and R.Günther, "Experimental investigation of turbulent premixed flames", combustion and flame, 38-3, pp. 249~257, 1980.
- 4) A.Yoshida, "An experimental study of wrinkled laminar flame", 18th symp.(Int.) on combustion, pp. 931~939, 1981.
- 5) 香月正司, 水谷幸夫, 崔炳輪, 柴田悅雄, 秋友克文, "亂流子混合火炎の構造(第1報, コヒーレントウズに支配される火炎", 日本機械學會論文集(B), 50-452, pp. 1077~1087, 1984.
- 6) M.Summerfield, S.H.Reiter, V.Kebely, and R.W.Mascolo, "The physical structure of turbulent flames", Jet propulsion, 24, pp. 256~255, 1954.
- 7) M.Summerfield, S.H.Reiter, V.Kebely, and R.W.Mascolo, "The structure and propagation mechanism of turbulent flames in high speed flow", Jet propulsion, 25-8, pp. 377~384, 1955.
- 8) A.Yoshida and H.Tsuji, "Measurements of fluctuating temperature and velocity in a turbulent premixed flame), 17th symp.(Int.) on combustion, pp. 945~955, 1979.
- 9) 崔炳輪, 香月正司, 水谷幸夫, "Structure of premixed turbulent flames stabilized by a cylindrical flame holder", 大韓機械學會論文集, 9-4. pp. 497~508, 1985.