

〈論 文〉

확대유로내의 Bluff-Body 후류확산화염의 구조 및 특성(2)

최병륜* · 이중성**

(1994년 9월 19일 접수)

Structure and Characteristics of Diffusion Flame behind a Bluff-body in a Divergent Flow (II)

Byeong Ryun Choi and Joong Sung Lee

Key Words : Combustion(연소), Diffusion Flame(확산화염), Bluff-Body(비유선형 물체), Distributed Reaction Flame(분산반응화염), Divergent Flow(확대 흐름), Combustible Mixture(가연혼합기), Residence Time(체류시간), Probability Density Function(확률밀도함수)

Abstract

In order to elucidate the effects of positive pressure gradient on flame properties, structure and stabilization, an experimental study is made on turbulent diffusion flame stabilized by a circular cylinder in a divergent duct flow. A commercial grade gaseous propane is injected from two slits on the rod as fuel. In this paper, stabilization, characteristics and flame structure are examined by varying the divergent angle of duct. Temperature, ion current and schlieren photographs were measured. It is found that critical divergent angle is expected to be about 8~12 degree through blow-off velocity pattern to divergent angle and the positive pressure gradient influences the flame temperature, intensity of ion current and eddy structure behind the rod. With the increase of divergent angle, typical temperature of recirculation zone is low but intensity of ion current is high in shear layer behind rod. Energy distributions of fluctuating temperature and ion current signals turn up low frequency corresponding to large scale eddies but high frequency corresponding to small scale eddies as well as low with the increase of divergent angle. Therefore the flame structure becomes a typical distributed-reacting flame.

1. 서 론

효율적인 연소기를 설계하는 방법으로 연소기내로 유입되는 공기유로의 확대를 이용하여 공기속도를 가능한 낮추면, 혼합기의 체류시간(residence

time)이 길게 되어 연소효율을 높일 수 있다. 그런데 각종 연소기기의 연소에서 화염의 안정성은 중요한 요인이며, 특히 저질 연료가스를 효율적으로 연소시킬 때에는 직립물체 후류의 순환류를 이용하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이 경우 화염의 안정성을 지배하는 것은 환류영역과 순류영역과의 경계에 형성된 난류 전단층의 구조와 연소반응 관계이다. 즉, 전단층에서 발생하는渦(eddy)가

*정회원, 부산대학교 기계공학과 및 기계기술연구소

**정회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

환류영역과 순류영역 사이의 교환과정을 지배함과 동시에 화염의 안정성⁽¹⁾을 좌우한다고 생각된다. 그런데 Bovina와 Winterfeld^(2,3)는 재순환영역의 열과 물질이 전단층으로 전달되는데 있어서, 전달률의 지표가 되는 평균 체류시간은 흐름속도에 반비례한다고 하였고, 보염기 배후의 난류물질 교환 과정은 재순환영역의 기하학적 형상이나 이영역내의 가스입자의 체류시간에 의해서 결정된다고 밝혔다.

실용면에 있어서도 연소기의 고부하, 고성능을 지향하므로 연소실의 유로 형상변화에 수반되는 압력변화의 영향도 고려할 필요가 있다.

직립물체 배후에서 형성되는 고온의 재순환영역은 열원으로 작용해 화염을 안정화시키는데, 유로의 확대로 인하여 이 고온 재순환영역의 특성이 변하여 화염구조 및 안정성에 영향을 미친다.

이 확대유동장에 대해서 Ackeret와 Sprenger⁽⁴⁾ 등은 확대관내의 압력회복률은 입구의 난류경계층 두께에 의해 좌우되고, 그 최대회복률을 낼 수 있는 각도는 3°~8°라는 것을 실험적으로 밝혔다.

Lefebvre 등⁽⁵⁾은 많은 항공기 엔진에서 압축기 출구에서 나오는 연소용 공기속도를 낮추기 위해 사용되는 확대관은 스톨손실(stall loss)과 접촉저항손실(friction loss)의 상관관계에서 최적 확대각은 7°~12°사이라는 것을 밝혔다.

그 후 Kanemoto와 Toyokura⁽⁶⁾는 확대유동장내에 원주가 있을 때와 없을 때에 대해서 실험 및 이론적 해석을 통해 내부유동과 경계층의 특성을 연구했으며, 최근에는 Yamaguchi 등⁽⁷⁾이 비연소 확대유동장에서 원주후류 와(渦)구조의 거동에 관하여 실험을 했다. 그러나 이 확대각 변화에 의한 연소장을 취급한 연구는 Yamaguchi 등⁽⁸⁾의 슈리렌촬영에 의한 보염특성과 후류 와(渦)구조에 관한 연구가 있을 뿐이다.

따라서 본 연구에서는 연료의 분출을 동반하는 원주후류에 형성된 난류확산화염을 대상으로 확대각이 변하는 이차원 유로 내에서 그 확대각의 변화에 따른 보염한계, 슈리렌촬영, 온도 및 이온전류의 동시측정 신호들의 통제처리를 통하여 확대각에 의한 화염구조와 특성을 해명하고자 한다.

2. 실험장치의 방법

본 실험에 사용된 장치의 계통도는 Fig. 1에, 원

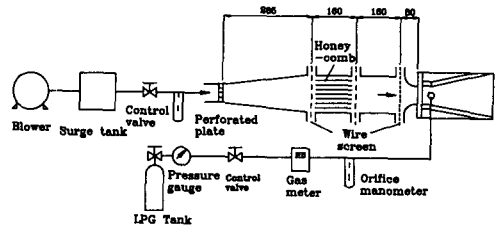


Fig. 1 Flow diagram of combustion system

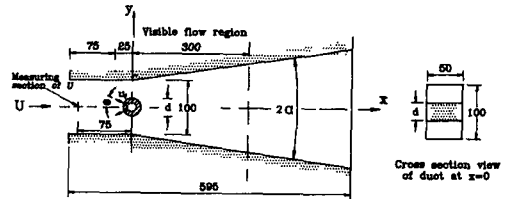


Fig. 2 A schematic diagram of measurement part of combustor

주보염기 설치위치, 좌표축 및 측정부 상세도는 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 송풍기로부터 공급된 공기는 확대부로 흐르면서 정류부에서 허니콤(honey-comb) 및 정류망(40 mesh)을 통해 정류된 후 축소비가 6이고, 단면적이 50×100 mm인 노즐을 통해서 측정부로 들어간다. 노즐부는 균일한 속도를 얻기 위해 Morel⁽⁹⁾의 제안에 따른 형상⁽¹⁰⁾을 채용하였다.

측정부의 입구 단면형상은 50×100 mm인 직사각형이고, 연소실은 원주보염기 설치 단면의 유로 높이 $H=100$ mm로 일정하게 유지시키면서, 확대각 2α 를 $-4^\circ \sim +20^\circ$ 범위내에서 설정 가능한 상하 제약 벽으로 되어 있고, 그것들을 평행하게 가우고 있는 좌우 두 개의 바이콜 유리(300 mm×100 mm×5 mm)로 가시화 창이 나있는 철판(두께 12 mm)으로 구성되어 있다. 그리고 원주형 보염기는 좌우 벽면에 뚫어진 구멍에 의해서 지지된다.

실험에 사용한 원주형 보염기로는 직경 $d=25$, 35 mm 및 45 mm의 세 종류의 원주직경을 사용해, 폐쇄비(blockage ratio) $BR(d/H)$ 을 0.25, 0.35, 0.45로 변화시켰다.

주류속도(U)는 확대 원점으로부터 상류 75 mm에서 피토크관을 이용하여 측정하였으며, 측정부 입구에서 열선풍속계로 측정한 흐름방향의 상대난류강도는 주류속도가 8.8 m/s일 때 약 5%이다.

주류공기가 보염기의 위치를 통과할 때의 평균유속 U^* 를 다음과 같이하여

$$U^* = \frac{H}{H-d} U \quad (1)$$

주류속도를 수정했다. 여기서, H 는 연소실 유로 높이, d 는 실린더직경 그리고 U 는 보염기 중심으로부터 상류 75 mm에서 측정된 주류속도이다.

보염기의 구조와 치수는, 공급 연료유량(Q_f)을 일정하게 유지시키고 슬릿 폭을 변화시켜 분출연료가 갖는 운동량이 최대 세 배 정도 달라도, 이 슬릿 폭의 변화가 보염특성⁽¹¹⁾에 거의 영향을 미치지 않기 때문에, 본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 슬릿 길이를 15 mm, 폭을 0.8 mm로 일정하게 하였다. 원주의 길이는 벽면에 지지되는 코어부분을 제외하고 모두 유로 폭과 똑같은 50 mm이다. 연료는 주류에 대해서 $\theta = \pm 30^\circ$ 로 두 개의 슬릿을 통하여 분출시켰으며, 상용프로판가스(C_3H_8)를 사용하였다.

연료분출각도의 변화가 블로오프(blow-off) 속도⁽¹⁰⁾에 미치는 영향은 그 분출각이 흐름 방향에 대해 $20^\circ \sim 135^\circ$ 사이에서는 블로오프속도에 거의 영향을 미치지 않고, 105° 이상이 되면 보염기 축방향의 반응면의 폭은 하류로 갈수록 좁게 되어 이차원성을 잃게 되므로 이와 같은 각도로 연료를 분출시켰다.

화염의 블로오프(blow-off)속도는 연료의 분출속도를 일정하게 한 후 공기의 유속을 증가시키면서 실험을 하였다. 화염이 완전히 없어졌을 때를 블로오프로 하였으며 화염이 블로오프될 때의 속도를 U_{BO} 로 표시하여 화염안정범위를 측정하였다.

압력구배에 의한 난류전단층에서의 난류모양과

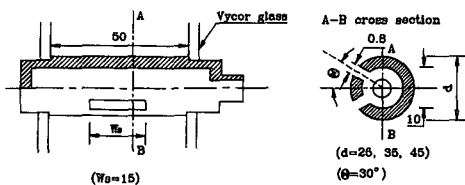


Fig. 3 The shape of flame holder

Table 1 Experimental condition

Flame No.#	1	2	3	4	5	6
U^* (m/s)	11.7		15.2			
u_t/U^*	0.23					
2α ($^\circ$)	0	8	16	0	8	16
Re ($\times 10^4$)	1.8		2.4			

거시적 화염구조는 슈리렌법에 의해 관찰하였다.

화염특성을 밝히기 위해 온도 및 이온전류의 시간 평균분포와 이것들의 변동을 검출하여 각각의 변동파형의 특징 및 관계를 조사하고, 맥동파형과 대비시켜 검토하였다.

Table 1은 실험조건을 표시한다. 실험조건은 공기속도를 11.7 m/s, 공기속도에 대한 연료분출속도의 비(u_t/U^*)를 0.23으로 일정하게 유지시키고, 확대각 $2\alpha=0^\circ$ 를 기준화염(flame No. 1)으로 하고, 그 외의 화염은 각각 유속과 확대각을 변화시킨 것으로 하였다.

원주중심을 원점으로 하고 주류방향을 x 축, 수직방향을 y 축으로 잡았다.

슈리렌사진 촬영⁽⁸⁾에는 두 개의 오목거울($\phi 300$)로 형성되는 Z-형 광학계를 이용했으며, 통상의 나이프에지 혹은 미세한 밀도변화를 관찰할 수 있는 원형의 나이프에지를 이용하였다.

본 연구에서 맥동량의 측정은 맥동온도 및 이온전류를 중심으로 하였다. 화염의 이온전류 측정은 직경 0.1 mm Pt-Rh 13%의 합금선으로 만든 이온프로브를 사용하였다.

온도측정으로, 평균온도는 직경 0.1 mm의 Pt/Pt-Rh 13%, 변동온도는 직경 25 μ m의 Pt/Pt-Rh 13% 열전대를 사용하여 측정하였다.

Fig. 4는 슈리렌사진, 온도 및 이온전류의 동시 측정계를 나타낸 것이다. 변동온도 측정용의 열전대 접점과 정전탐침과의 거리는 1 mm로 하였다. 슈리렌사진과 온도, 이온전류의 동기는 광원인 스트로보스코프의 광로(光路)에 포토 트랜지스터(photo transistor)를 설치하여 발생하는 전기적인 신호를 이용하였다.

신호는 온도와 이온전류의 파형과 함께 데이터레코더에 수록한 후 분석하였다. 맥동온도 신호는 보상기를 지나, 2 kHz 저역(low-pass)필터를 거쳐

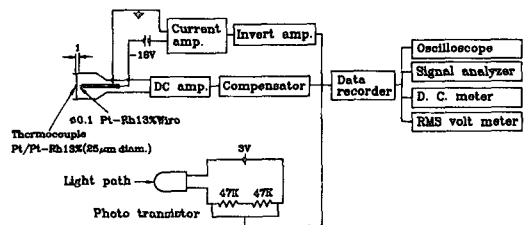


Fig. 4 Block diagram of simultaneous measurement of schlieren photograph, fluctuating temperature and ion current signal

테이타레코더(TEAC 사의 model XR-5000)나, A/D 변환기를 통해 컴퓨터 하드디스크에 기록된다. 측정된 신호에 대해서는 신호분석기(Iwatsu 사의 model SM-2100B)나 오프라인 프로그램을 통하여 분석을 수행하였다. A/D 변환기에서 자료의 추출 간격은 500 μ s이고, 2048개씩의 자료를 취하였다. 단 화염의 복사에 의한 영향은 보정하지 않았다.

변동온도 측정용 세선(細線) 열전대의 응답지연을 전기적으로 보상하는 방법은 1952년의 Shepard & Warshawsky⁽¹²⁾의 논문에 기초를 두고 있다. 세선내의 열전달과 복사를 무시하면, 가스온도 T_g 는

$$T_g = T_i + \tau \frac{dT_i}{dt}$$

여기서, $\tau = \frac{\rho c V}{\mu s}$ (2)

이다. 여기서, T_i 는 열전대의 온접점(溫接點) 온도, μ 는 열전달률, ρ , c , s , V 는 각각 소선(素線)의 밀도, 비열, 접점의 표면적, 접점체적이며, τ 는 시정수이다.

식 (2)를 Laplace변환을 하여 전달함수 $G(s)$ 를 구하면

$$G(s) = L[T]/L[T_g] = 1/(1 + \tau s)$$
 (3)

가 된다. 따라서 열전대의 응답특성은 복사손실과 전도손실이 무시되는 경우 시정수 τ 를 가지는 1차 지연을 의미한다.

이 지연보상 열전대를 사용하는 연구⁽¹³⁾는 많은데, 본 연구에서는 화염구조를 특징적으로 나타내는 변동온도의 확률밀도 분포형에 주목하여 실험적으로 시정수 τ 를 다음과 같은 방법으로 구하였다.

열전대를 화염대의 이온이 검출되지 않는 곳과 저온 공기류층 및 화염대의 가스류 중에 위치시키고 보상기의 보상량을 바꾸어 가면서 각 측정점에서 맥동온도를 측정하여 이 맥동온도의 확률밀도분포가 합당한 분포형이 되도록 τ 를 정하는 방법⁽¹⁴⁻¹⁶⁾이다.

이 방법은 열전대의 열관성에 의한 응답지연을 1차 지연이라고 가정한다는 점에서 문제가 있으나 현상과의 대응에 용이하고, 맥동파형에 주목할 때에는 이치에 맞는 시정수의 설정이 가능하다는 점에서 우수하다고 생각된다.

따라서 어느 단면의 변동온도를 측정할 때는, 반응대의 중앙부근 위치에서 적당한 시정수를 그때마다 확률밀도분포 형상으로부터 결정해 그 단면

전체에 대해 시정수를 일정하게 하여 변동온도를 측정하였다.

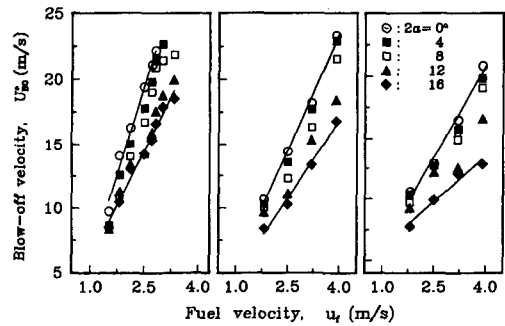
본 연구에서 재순환영역의 길이의 측정에는 식염수 증기(NaCl mist)를 이용하였다.

유동에 교란을 주지 않기 위해 식염수를 내경이 0.5 mm인 스테인레스 관을 통하여 유동에 직각방향으로 화염내에 주입하였다. 이 때 화염내에서의 식염수의 Na^+ 이온에 의한 황색반응을 이용해 염화나트륨에 의한 황색 트레이서가 주입부 상·하류 양방향으로 확산하기 시작하는 지점까지의 거리를 재순환영역의 길이(l_{RZ})로 결정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염안정범위

Fig. 5(a), (b) 및 (c)는 각각 $d=25$ mm($BR=$



(a) $BR=0.25$ (b) $BR=0.35$ (c) $BR=0.45$

Fig. 5 Stability limits for fuel mean velocity and blockage ratio

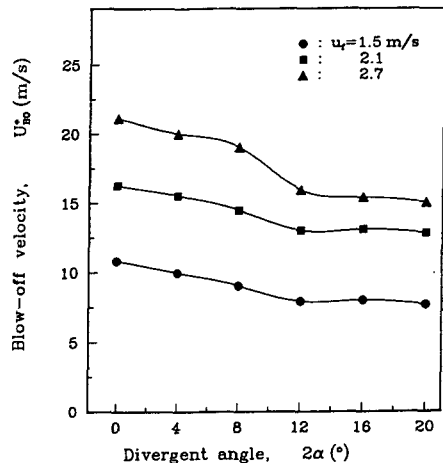


Fig. 6 Effect of divergent angle on stability limits ($BR=0.25$)

0.25), 35 mm(0.35) 및 45 mm(0.45) 원주를 사용한 경우의 블로오프(blow-off)속도 U_{bo} 의 변화를 확대각 2α 를 변수로 해서 나타내었다. 횡축은 연료의 분출속도(u_f)를 나타낸다.

Fig. 5에 의하면, 어느 원주에 대해서도 연료속도의 증가에 따라 블로오프속도는 증가한다.

다음으로, 연료유량을 일정하게 유지시키고 확대각 2α 를 변화시켰을 때의 U_{bo} 변화의 한 예로, $d = 25 \text{ mm}(BR=0.25)$ 의 경우를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 연료속도를 일정하게 유지한 조건에서의 블로오프속도는 확대각 증대에 따라서 감소하고, 그 감소 비율은 확대각 $2\alpha=10^\circ$ 전후에서 불연속적으로 변하고 있다. 이는 확대각이 약 10° 이후에서는 확대유로내 흐름의 박리(separation)에 의해 공기흐름의 유효 단면적 변화가 거의 없기 때문에 블로오프속도 변화가 없다. 따라서 이 불연속대의 중심이 되는 확대각을 임계확대각⁽⁹⁾이라고 부르고, $2\alpha_{cr}$ 로 표시해 변화의 형태를 분류하면, $2\alpha < 2\alpha_{cr}$ 의 범위에서는 2α 의 증대에 따라 U_{bo} 는 선형적으로 감소하지만, $2\alpha > 2\alpha_{cr}$ 영역에서는 2α 의 값에 무관하게 거의 변화가 없다.

본 논문에서는 기술하지 않았지만 $BR=0.35$ 및 0.45 의 경우, 즉 폐쇄비의 증가에 따라 임계확대각이 증가하는 경향을 나타냈었다. 그러나 어느 쪽의 경우에도 블로오프속도 U_{bo} 는 각각 $2\alpha_{cr}$ 를 경계로 해서 Fig. 6과 같은 경향을 나타내었다.

3.2 화염의 관찰

Table 1의 각 조건에 관한 화염의 순간 슈리렌 사진을 Fig. 7에 나타내었다. 원주의 배후에는 고

온 연소가스의 순환류가 형성되고 이 순환류와 원주에서 박리된 미연혼합기와와 사이에 생기는 전단층에서는 불규칙한 3차원 와(渦)가 지배적이다. 이와(渦)는 x 축에 대해 좌우에 나타나고, 와(渦)의 유인(entrainment)작용에 의해서 미연혼합기와 고온 가스괴(塊)의 혼합이 이루어져 전단층내에 화염이 형성된다. 최초 와(渦)는 유인에 의해서 차츰 성장하지만 환류영역보다 하류측에서 차츰 와(渦)가 붕괴되고 불규칙한 3차원 와(渦)에 지배되는 화염으로 변화한다. 또 상부의 와(渦)는 화염 No. 1에 보여지는 바와 같이, 수 개의 와(渦)가 하나의 집단(group)을 형성하는 것 같이 불규칙한 형상으로 화염이 확산하든지 줄어들든지 하는 거동을 나타낸다.

화염의 블로오프에 있어서 와(渦)의 거동이 중요한 역할⁽¹⁴⁾을 한다고 지적되고 있다. 본 실험의 슈리렌촬영의 결과에서도 집단을 이룬 와의 불규칙한 거동과 와 스케일(scale)이 함께 화염의 블로오프에 대해 중요한 요인이 된다고 생각된다. 다음으로 실험조건에 따른 화염의 변화를 보면, 임계 확대각 전후에서 전단층내의 화염구조가 변하고 있다. $2\alpha < 2\alpha_{cr}$ 의 범위에서는 수개의 작은 와(渦)가 하나의 집단(group)을 형성하지만, $2\alpha > 2\alpha_{cr}$ 에서는 작은 스케일 와(small scale eddy)로 형성되어 있다. 즉 유로의 확대각이 증가하면 압력구배의 증대로 큰 스케일 와(large scale eddy) 에너지의 급격한 전달로 인하여 전단층에서 전체적으로 작은 스케일 와가 나타나는 것으로 생각된다.

주류속도가 빨라지면 화염 폭은 좁아지고 와의 붕괴가 더욱 빠르게 진행되는 것이 관찰되지만, 앞서 서술한 그 외의 경향과는 변화가 없다.

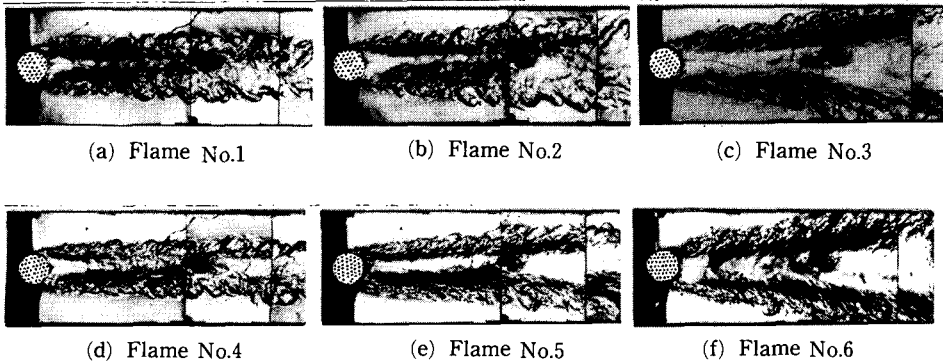


Fig. 7 Schlieren photographs for velocity vs. different divergent angles

3.3 온도 및 이온전류

3.3.1 온도 및 이온전류 분포

유로의 확대에 의한 화염특성의 변화를 조사하기 위해 온도 및 이온전류의 평균 및 그 변동량을 조사하였다. 또 나트륨이온의 황색반응을 이용한 재순환영역의 길이를 측정된 결과에서 재순환영역 길이는 보염기 중심으로부터 약 120 mm 전후의 범위에 있었다.

본 연구의 주 관심인 확대유동장에 의한 화염특성 변화에서는, 재순환영역의 경계면 부근에 형성된 전단층내에서 화염특성 및 구조를 조사하는 대표단면으로 $x=50\text{mm}$, 재순환영역보다 하류측의 화염의 대표단면으로 $x=150\text{mm}$ 그리고 그 중간영역의 대표단면으로 $x=100\text{mm}$ 를 취했다.

Fig. 8은 Table 1의 실험조건에서 공기와 연료속도비를 일정하게 하고 확대각 변화에 따른 화염 No. 1, No. 2 및 No. 3의 각각의 단면에 대한 평균온도 및 그 변동의 RMS 값을 나타낸 것이다. 이들 화염에서 $x=50, 150\text{mm}$ 단면에서의 평균온도는 중심축에서 낮은 분포형상을 나타내지만, $x=100\text{mm}$ 단면에서는 $2\alpha=16^\circ$ 를 제외하고 중간이 높은 분포를 나타내었다. 변동온도는 세 단면에서 모두 평균온도 분포의 구배가 가장 큰 위치에서 최대치를 나타내었다.

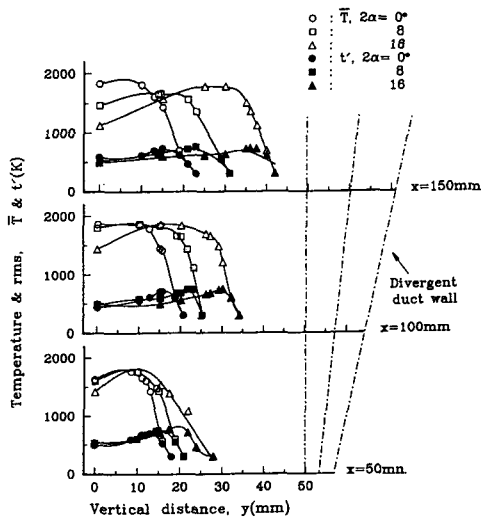


Fig. 8 Profiles of mean and fluctuating temperature for different divergent angles (flame No. 1~3)

유속이 높은 화염 No. 4, No. 5 및 No. 6에 대한 평균온도 및 변동온도 분포를 나타낸 Fig. 9는 전체적으로 고온과 저온분포의 폭은 좁으나, 평균온도와 RMS치의 분포의 경향은 전술한 화염 No. 1~3의 경우와 유사하다.

유동장내의 어떤 위치에서의 온도는 현재 반응중인 가스와 상류로부터의 기연가스의 영향을 받고 있으므로 반드시 그 위치에서의 연소반응의 결과⁽¹⁾

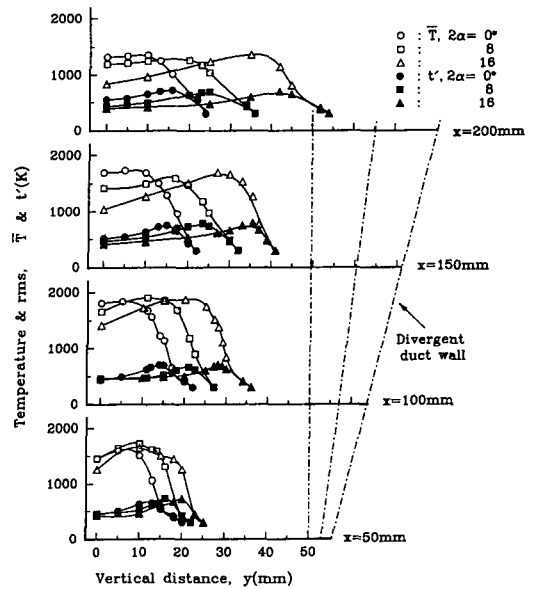


Fig. 9 Profiles of mean and fluctuating temperature for different divergent angles (flame No. 4~6)

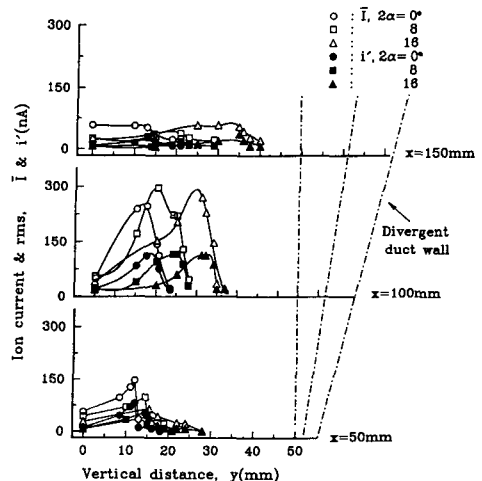


Fig. 10 Profiles of mean and fluctuating ion currents for different divergent angles (flame No. 1~3)

를 나타낸다고 볼 수 없다. 그러나 화염 중에서의 양이온은 감쇄가 극히 빠르기 때문에 이온전류치는 그 시점에서 반응강도⁽¹²⁾를 나타낸다.

이온전류의 rms치가 최대값을 나타내는 위치를 반응영역의 중심이라고 보면, Fig. 10에서 $2\alpha=8^\circ$ 일 때 $x=50\text{ mm}$ 단면에서는 $y=14\text{ mm}$, $x=100\text{ mm}$ 단면에서는 $y=15\text{ mm}$ 그리고 $x=150\text{ mm}$ 단면에서는 $y=23\text{ mm}$ 부근이 이에 해당된다.

하류 $x=150\text{ mm}$ 단면 이상에서는 반응영역의 시간평균온도가 1000 K 이상으로 나타났다. 그런데 순수한 프로판(propane)의 자발화 온도가 약 777 K ⁽¹⁷⁾인 점을 감안할 때, 이 위치에서 연소반응이 활발하지 않은 것으로 보아 화염의 신장 혹은 기연가스의 확산에 의한 가연 한계 이하이기 때문으로 생각된다.

유속을 증가(Fig. 11) 시키면 환류영역에서 다소 반응이 증가되고, 그 후류에서는 반응이 다소 감소하며 주반응영역에서는 이온전류치 즉 반응강도는 확대각에 비례한다. 이는 유속 증대에 따라 강한 전단력에 의해 반응표면적이 증대되기 때문이며, 앞서 서술한 경향과 차이가 없다.

이상으로부터 어느 조건에 대해서도 주반응은 $x=100\text{ mm}$ 단면 전후에서 일어나고 있음을 알 수 있으며, 주반응영역과 그 이전 영역 $x=50\text{ mm}$

에서는 화염 No. 2와 No. 5($2\alpha=8^\circ$)에서 반응이 가장 활발하게 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 유로의 확대에 의한 혼합기의 체류시간과 밀접한 관계가 있다.

그러나 임계확대각 이상에서는 혼합기의 체류시간이 더 길어져 와(渦) 스케일의 감소 즉 요소 표면적의 증대에 따라 반응은 활발하나, 큰 에너지를 가지고 있는 스케일이 큰 와가 없어 중심부로 혼합기를 유인시키지 못하기 때문에 거의 기연가스로 구성되어 있다.

중심부에서는 반응이 거의 없고 기연가스로 인한 열 손실의 증가를 초래해 중심부의 온도가 낮다. 따라서 재순환영역이 충분한 활성화확종의 공급원 역할을 못하게 되어 화염이 불안정하고 블로오프되기 쉬우며, 지나친 유로의 확대는 오히려 화염의 안정성을 저해한다.

Fig. 12는 이온전류분포와 온도분포의 관계를 나타낸 것으로, 이온전류치의 최대치를 나타내는 위치는 전단층에서 연소가스측에 해당된다. 즉 고온의 연소가스와 전단층 사이의 미연혼합기가 휘말려 들어가는 곳에서 연소반응이 가장 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 즉, 평균온도분포와 비교해 보면 온도구배가 생기기 직전의 고온영역에 위치해 있다.

시간 평균적으로 이온전류치가 높게 나타나는 영역은 시간 평균적으로 반응이 활발한 영역이며 이 영역은 고온영역과 일치하고 있음을 알 수 있다. 이런 현상에 대해서는 고온의 연소가스와 미연혼합기가 평면전단층에서 형성되는 화염⁽¹⁸⁾의 경우에서도 설명되고 있다.

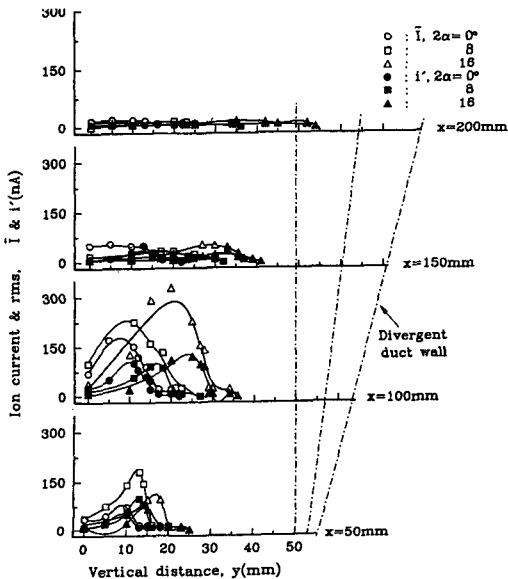


Fig. 11 Profiles of mean and fluctuating ion currents for different divergent angles(flame No. 4~6)

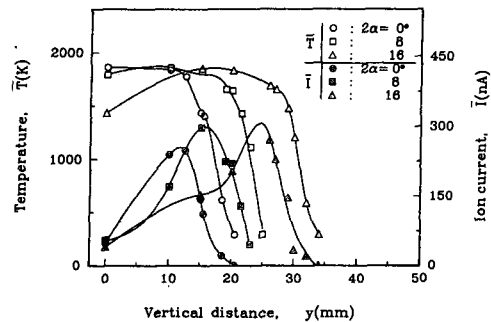


Fig. 12 Distributions of mean temperature and ion current with different divergent angles(flame No. 1~3)

3.3.2 확률밀도분포

Fig. 13과 Fig. 14는 직경이 25 mm인 보염기를 사용한 경우로 화염 No. 1 및 No. 2에 대한 $x=50$ 과 150 mm 단면에서의 맥동온도의 확률밀도분포(PDF)를 나타낸 것이다.

$x=50$ mm 단면에서의 반응영역부근에서는 중간온도의 확률이 제일 높은 형태로 고온가스와 저온주위 기류의 혼합시에 생기는 가우스(gauss)분포⁽¹⁶⁾를 나타내었다. 그리고 $x=150$ mm 단면에서는 중간 온도부분의 확률이 다소 높게 나타났고, 반응영역부근에서 거의 사다리꼴형의 분포를 갖고 있다. 이것은 화염의 신장(stretch)으로 고온의 연소가스 꺾(塊)과 저온의 미연혼합기체가 섞여 있는 "분산반응화염(distributed reaction flame)"이나, Yoshida⁽¹⁶⁾가 층류 화염에서 관찰한 것과 비슷한 PDF 모양을 나타내었다. 이는 유로의 확대로 인

해 보염기 후류에서 주류의 운동량과 배압의 상반되는 힘에 의해 전단층에서 강한 신장을 받기 때문으로 생각된다.

분산반응화염에서 나타나는 사다리꼴형 분포는 $2\alpha=0^\circ$, $y=23$ mm에서 PDF가 저온, 중간온도 및 고온분포가 가장 비슷하게 나타났다.

Fig. 15의 $x=100$ mm 단면에서도 $x=150$ mm 단면과 유사한 형태이다. $2\alpha=0^\circ$ 일 때 $y=15$ mm 그리고 $2\alpha=8^\circ$ 일 때 $y=21.5$ mm의 위치에서의 맥동온도의 확률밀도분포를 보면, 이는 시간 평균적으로 화염의 맥동 범위에서 마치 연료와 산소가 공존하고 있는 것 같이 보인다. 즉, 고온의 기연가스와 저온의 미연혼합기체에 반응도가 다른 여러 가지의 와가 존재하는 부분이 있다고 생각된다.

확대각이 증대되어도 PDF 분포과정은 비슷한 형태를 갖고 있으나, 확대각이 8° 일 때가 0° 일 때

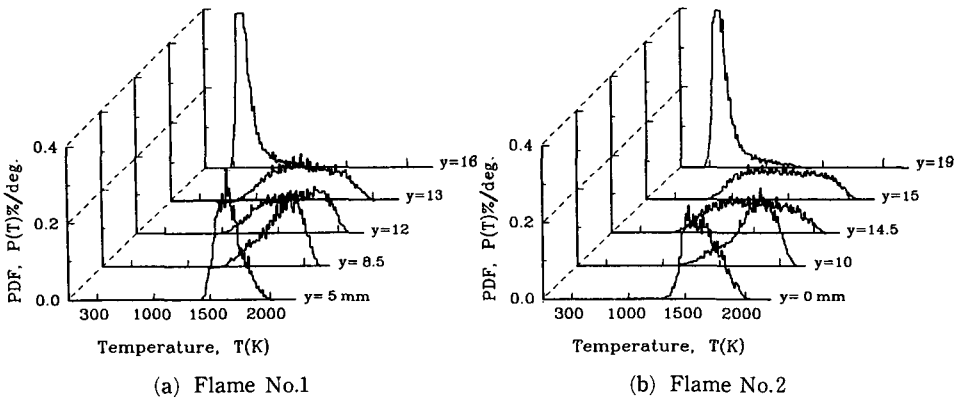


Fig. 13 PDFs of fluctuating temperature at 50 mm for different divergent angles and vertical distance

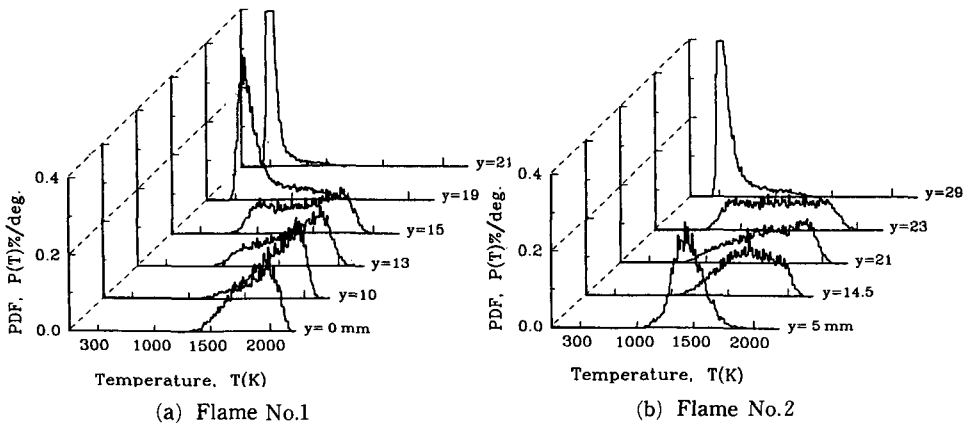


Fig. 14 PDFs of fluctuating temperature at 150 mm for different divergent angles and vertical distance

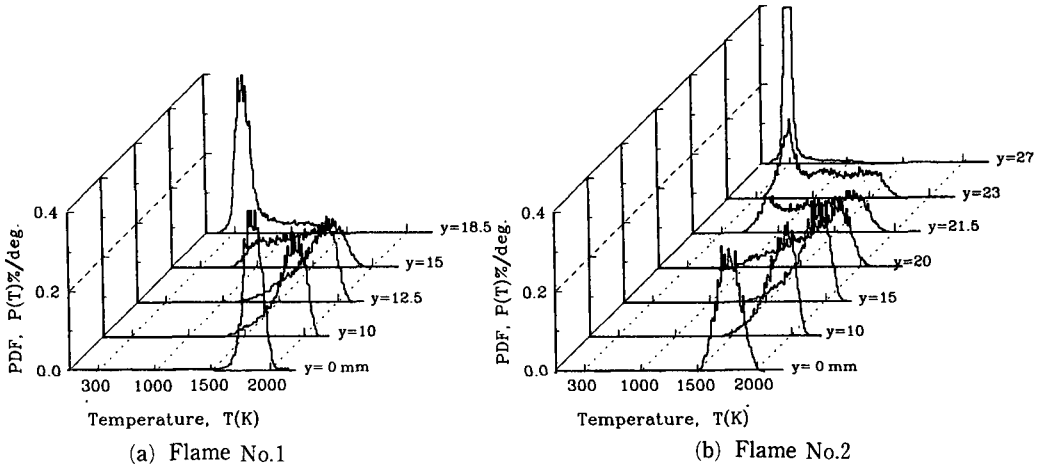


Fig. 15 PDFs of fluctuating temperature at 100 mm for different divergent angles and vertical distance

보다 반응영역부근에서 고온과 저온확률이 넓게 분포하고 있다. 이는 유로의 확대에 의한 혼합기의 체류시간이 길어져 재순환영역의 열과 활성화확률들이 전단층으로 빠르게 전달⁽¹⁹⁾되기 때문이다.

3.3.3 온도 및 이온전류의 파워스펙트럼

Fig. 16은 변동온도, Fig. 17, Fig. 18과 Fig. 19는 이온전류 변동의 파워스펙트럼(power spectrum)이다.

유로의 확대에 관계없이 $x=50\text{ mm}$ 단면에서는 변동온도의 스펙트럼은 전체적으로 감소하나, 이온

전류 변동의 스펙트럼은 176 Hz 부근($2\alpha=8^\circ$, $y=10\text{ mm}$)에서 블로트(blot)한 피크치가 나타났다. 이것은 전단층에서 비교적 큰 와(渦)의 주기 현상, 즉 큰 와의 운동에 대응하는 것으로 생각된다. 그러나 그 피크가 현저하지 않은 것으로 보아 와의 출현 주기가 불규칙성을 갖고 있다고 생각된다. 더욱이 고주파수에 대응하는 작은 와에는 탁월 주파수가 보이지 않고 거의 일정하게 감소하고 있다.

화염중의 환류영역($x=50\text{ mm}$)과 주반응영역인($x=100\text{ mm}$)에서 500 Hz 이하의 저주파수영역에서 에너지가 크고, 1 kHz 이상의 고주파수영역에

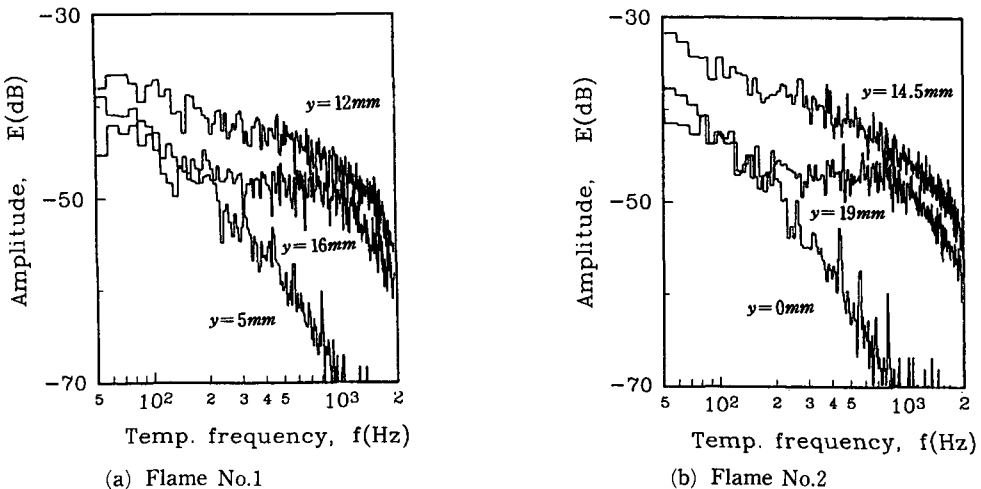


Fig. 16 Power spectrum of fluctuating temperature at 50 mm for different divergent angles and vertical distance

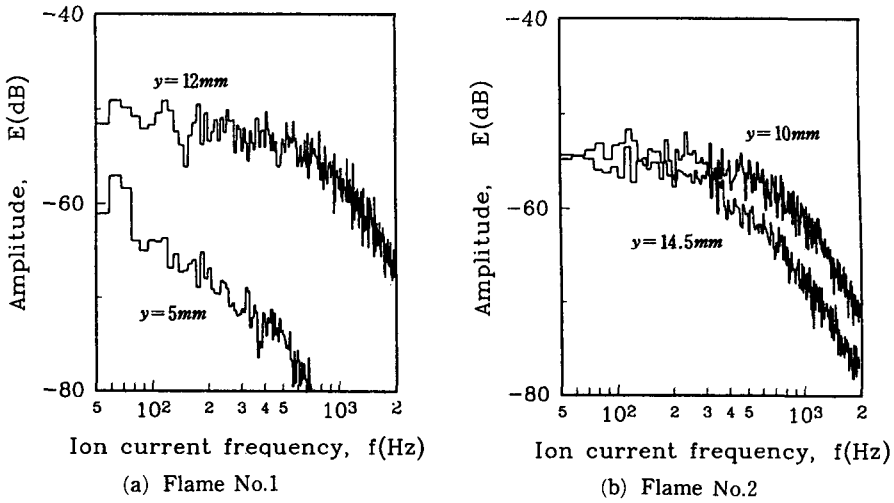


Fig. 17 Power spectrum of ion current signal at 50 mm for different divergent angles and vertical distance

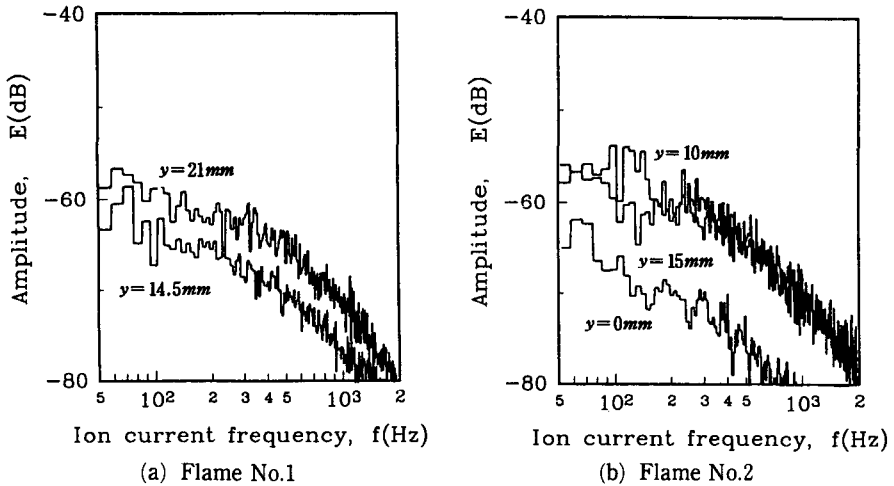


Fig. 18 Power spectrum of ion current signal at 150 mm for different divergent angles and vertical distance

서는 감쇄가 현저하다. 확대각이 증대될수록 에너지분포는 보염기 직후에서 높게 나타난 것으로 보아 유로의 확대에 의하여 와의 성장과 발달이 확대가 없을 때보다도 빠르다는 것을 알 수 있다. 그리고 하류 $x=150\text{ mm}$ 단면에서는 변동온도와 이온전류의 스펙트럼분포에서 확대각이 8° 일 때가 0° 일 때 보다 감쇄율이 낮는데, 이는 유로의 확대에 의하여 보염기 직후에서 후류 와(渦)가 성장하고, 충분히 발달하기 때문이다. 그리고 이 영역에서는 주로 기연가스가 분포되어 있어 연소반응이 활발하지 않고 와의 성장이 거의 완료된 상태로 난류에너지

전달에 의한 와의 스케일이 현저히 감쇄하기 때문으로 생각된다. 전체적으로 탁월 주파수는 보이지 않으며 에너지는 고주파수 쪽으로 감에 따라 감쇄하고 있다.

3.4 슈리렌사진, 온도 및 이온전류의 동시관찰
전단층에 존재하는 와(渦)에 대하여 변동량의 파워스펙트럼(power spectrum), 自己相關(autocorrelation) 등을 조사하여도 통상의 난류중의 그것들과 비교해서 대개 큰 차이가 없다는 보고⁽¹⁴⁾도 있다. 그것은 와(渦)의 거동이 주기적이지 않고 그

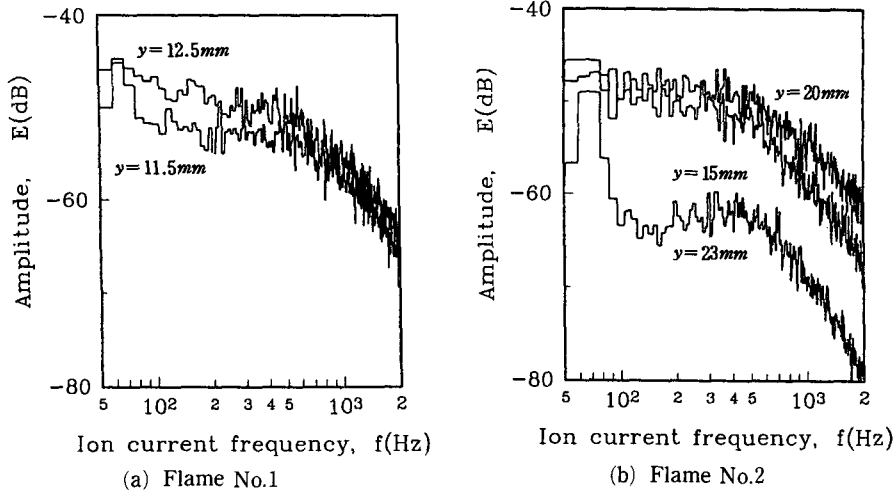


Fig. 19 Power spectrum of ion current signal at 100 mm for different divergent angles and vertical distance

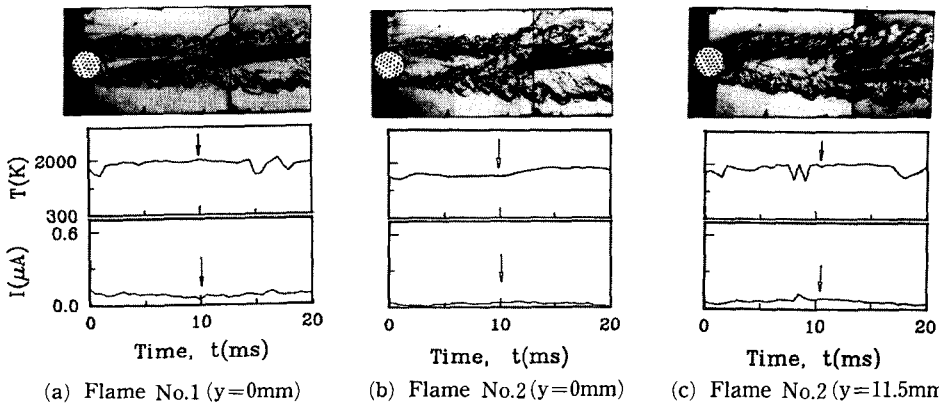


Fig. 20 Simultaneous signals of fluctuating temperature, ion current and schlieren photograph for different divergent angles($x=100$ mm)

자신의 불규칙한 특성 외에도, 크기나 주기가 다른 수많은 와로 이루어져 있기 때문이다. 따라서 복잡하지만 와의 운곽과 대응되는 조건에서의 측정이 유효한 수단⁽¹⁴⁾이다.

화염중의 이온전류치는 연소 반응강도에 비례한다. 슈리렌사진과 정전탐침에 의한 이온전류 및 열전대에 대한 변동온도를 동기시킨 측정조건에서 3종의 동시측정을 하였다.

Fig. 20, Fig. 21 및 Fig. 22은 화염 No. 1, No. 2에 대한 이온전류와 변동온도 파형을 슈리렌사진 촬영과 동기시켜 측정할 것으로, 파형중에 화살표로 나타낸 순간은 순간 슈리렌촬영의 동기점이다.

하류측(右方)에 이온전류 및 온도프로부의 선단

부분이 슈리렌사진에서 검게 나타나 있다. 슈리렌 사진과 이온전류 및 온도 파형을 통해 이온전류와 온도의 이력(履歷)을 살펴보면, 와의 경계면에서는 이온전류 및 온도는 단순피크가 출현한다. 와(渦) 내부의 기연(既燃)가스 영역에서는 이온전류의 레벨(level)이 낮고 온도변동 폭도 작다. 외부의 미연(未燃)영역에서 이온전류는 영(零)이고 거의 미연가스가 통과하나, 때때로 화염의 통과에 대응되어 변동온도 피크치가 나타났다. 또 상류에서 합체가 일어난 와의 잔해에 상당하는 주름부근에서는 복합피크가 나타났고, 와의 유인 작용으로 유입되는 혼합기의 연소에 대응하는 복합 파형으로 나타났다.

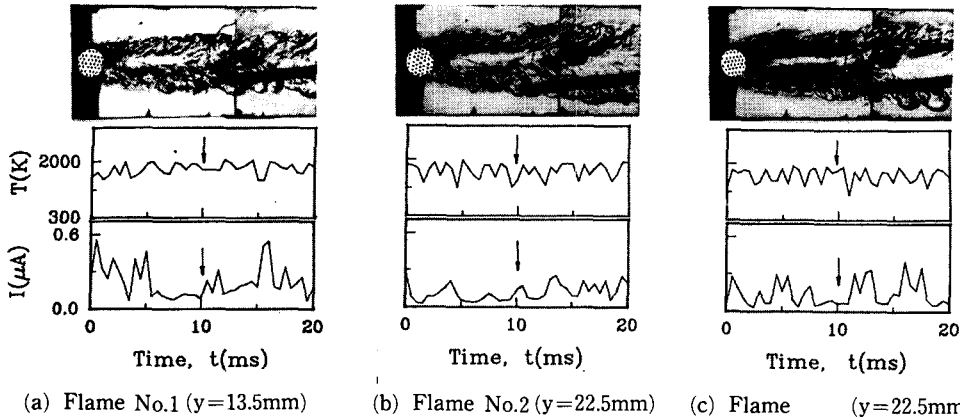


Fig. 21 Simultaneous signals of fluctuating temperature, ion current and schlieren photograph for different divergent angles($x=100$ mm)

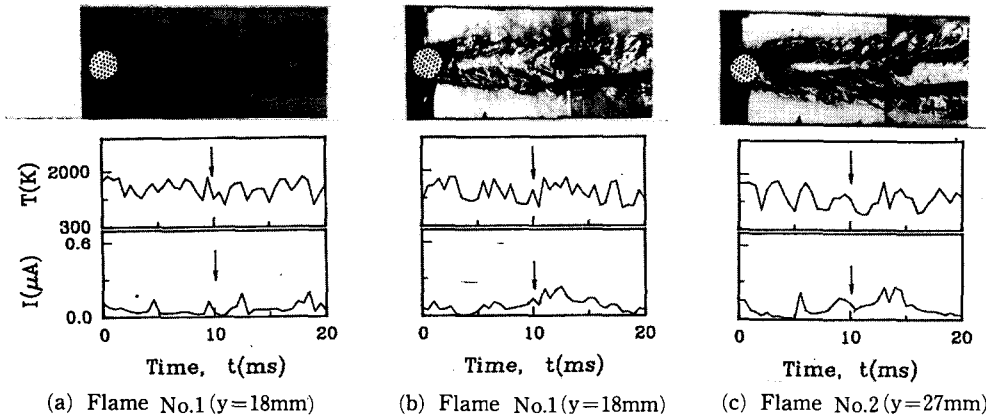


Fig. 22 Simultaneous signals of fluctuating temperature, ion current and schlieren photograph for different divergent angles($x=100$ mm)

Fig. 21의 $y=0$ mm 및 중심근방의 위치에서는 대부분이 기연가스이고 미연혼합기가 거의 없지만, 유인에 의한 혼합기의 연소에 대응하는 피크가 간혹 나타나고 있다.

이온전류치가 반응강도에 비례하므로 미연혼합기의 유인이 일어나는 하상부(下上部)에서 반응이 가장 활발히 이루어지고 있으며, 확대각이 8° 일 때가 0° 일 때보다 이러한 영역이 더 넓게 나타났다. 이들 위치는 슈리렌사진과 변동온도 관제를 통해서 보면, 온도분포로부터 추정되는 전단층에서 연소가스층의 경계에 해당된다. 즉 고온의 연소가스와 전단층 사이의 미연혼합기가 휘말려 들어가는 곳에서 연소반응이 가장 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 와(渦)의 중심 부근에서는 하상부(下上部)보다는 반응이 활발하지 않지만, 온도 변동 폭이 큰

것으로 보아 고온영역과 저온영역 중앙부근으로 고온가스 피(塊)와 저온의 미연가스피가 혼재하면서 통과하는 것으로 추정된다. 와의 하부계면 부근에서는 미연혼합기의 큰 유인이 거의 없기 때문에 반응영역의 폭도 좁으며 반응도 활발하지 않다. 또 중심부의 고온 기연가스층에서는 잔존 이온이 존재하는 정도로서 반응이 활발하지 않다.

4. 결 론

확대각을 가변할 수 있는 2차원 풍동을 사용하여, 흐름 방향에 $\theta = \pm 30^\circ$ 방향으로 연료분출을 동반하는 보염기 후류 난류 확산화염을 대상으로, 화염의 구조 및 특성에 미치는 유로의 확대각의 영향을 실험적으로 조사하여 얻어진 결과를 요약하면

다음과 같다.

(1) 확대각의 증대에 따라 임계확대각($2\alpha_{cr}=10^\circ$ 전후) 이하에서의 블로오프속도는 거의 선형적으로 감소한다. 그러나 임계확대각 이상에서의 블로오프속도는 확대유로내의 흐름의 박리에 의해 공기흐름의 유효단면적 변화가 거의 없기 때문에 블로오프속도 변화가 거의 없다.

(2) 임계확대각 이상 ($2\alpha_{cr}\leq 2\alpha$)에서의 화염구조는 화염의 전단층에서 주로 스케일이 작은 와 (small scale eddy)로 구성되어 거동하나, 임계확대각 이하($2\alpha_{cr}\geq 2\alpha$)에서는 스케일이 큰 와 (large scale eddy)속에 스케일이 작은 와 (small scale eddy)가 포함되어 함께 거동한다.

(3) 확대유동장내 전단층에서의 화염구조는 반응면을 사이에 둔 고온연소가스피와 미연혼합기피외에 반응도가 서로 다른 가스 스케일이 혼재하는 분산반응화염에 가까운 구조이며, 유속의 증가나 확대각이 증대되면 분산반응영역의 부분이 증대한다.

(4) 확대유동장내 화염의 온도 및 이온전류의 에너지는 비교적 큰 와(渦)의 운동에 대응되는 저주파특성을 가지고 있으며, 확대각의 증대에 따라 에너지는 큰 스케일에 대응되는 저주파특성 외에도 작은 스케일에 대응되는 고주파 쪽에서도 높게 나타났다.

후 기

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해서 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 崔炳輪, 李中成, 1993, "압력구배가 있는 유동장에서 Bluff-Body 후류확산화염의 화염특성 (I)," 대한기계학회 '93년도 추계학술대회논문집 (II), pp. 408~412.
- (2) Bovina, T. A., 1959, "Studies of Exchange between Re-circulation Zone Behind the Flameholder and Outer Flow," *Seventh Symposium (International) on Combustion*, pp. 692~696.
- (3) Winterfeld, G., 1965, "On the Processes of Turbulent Exchange Behind the Flameholder," *Tenth Symposium (International) on Combustion*, pp. 1265~1275.
- (4) Ackeret and Sprenger, 1967, "Experimentally Determined Optimum Geometries for Rectilinear Diffusers with Rectangular, Conical or Annular Cross-section," in Sorvan, G., (ed.) *Fluid Mechanics of Internal Flow*, pp. 270~319.
- (5) Lefebvre, A. W., 1983, *Gas Turbine Combustion*, McGraw-hill, New York, pp. 77~88.
- (6) Kanemoto, T. and Toyokura, T., 1982, "圓柱後流を有する廣がり流路内の流れ," *JSME (B)*, Vol. 48, No. 425, pp. 18~24.
- (7) Yamaguchi, S., 1990, "Cold Flame Structure and Stabilization in a Divergent Flow," *JSME (B)*, Vol. 56~523, pp. 803~808.
- (8) Ishino, Y. and Yamaguchi, S., 1990, "Flame Structure and Stabilization in a Divergent Flow," *JSME (B)*, Vol. 56, No. 528, pp. 2469~2475.
- (9) Morel, T., 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions," *Journal of Fluid Engineering*, pp. 225~233.
- (10) Tulapurkara, E. G. and Bhalla, V. V. K., 1988, "Experimental Investigation of Morel's Method for Wind Tunnel Contractions," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 110, pp. 45~47.
- (11) Ito, K., 1977, "Stabilization Mechanism of Turbulent Diffusion Wake Flame Behind Bluff Bodies with Fuel Injection," *JSME (B)*, Vol. 83, No. 0123, pp. 1144~1151.
- (12) Shepard, C. E. and Warshawsky I., 1953, "Electrical Techniques for Compensation of Thermal Time Lag of Thermocouples and Resistance Thermometer Elements," *NACA TN-2703*, pp. 1~85.
- (13) Yoshida, A. and Tsuji, H., 1978, "Measurements of Fluctuations of Temperature and Velocity in a Turbulent Premixed Flame," *17th. Symp. (International) on Combustion*, Williams & Wilkins, pp. 945~956.
- (14) 崔炳輪, 1983, "亂流豫混合火焰の構造に関する研究," 博士學位論文, 大阪大學.
- (15) 香月正司, 1985, "亂流火炎の計測と燃焼診斷技術," 日本機械學會學術雜誌(展望講演), pp. 77~83.

- (16) Yoshida and Günther, 1980, "Experimental Investigation of Thermal Structure of Turbulent Premixed Flames." *Combustion and Flame*, Vol. 28, pp. 249~258.
- (17) 香月正司. 外 5, 1988, "亂流豫混合火炎における亂れと混合(第1報, 亂流特性と火炎の擴がり)," 日機論B, 54-500, pp. 993~998.
- (18) 山口, 外 3, 1989, "平面せん斷流中の亂流擴散火炎," 日機論B, 55~551, pp. 859~864.
- (19) Zukoski E. E. and Marble F. E., 1956, "Experiments Concerning the Mechanism of Flame Blow-off from Bluff Bodies," *Gas Dynamics Symposium on Aerothermochemistry*, pp. 205~210.