

〈論 文〉

# 同軸二重空氣噴流中的 亂流擴散火焰에 관한 實驗的 研究(Ⅱ)

趙庸大\*·崔炳翰\*\*

(1990년 6월 25일 접수)

## An Experimental Study on Turbulent Diffusion Flame in Double Coaxial Air Jets(Ⅱ)

Yong Dae Cho and Byeong Ryun Choi

**Key Words :** Double Coaxial Air Jets(동축이중 공기분류), Coherent Structure(코히런트 구조), Turbulent Shear Layer(난류 전단층), Entrainment(誘引), Fluctuating Temperature(맥동온도), PDF(확률밀도함수), Transition Region(전이영역)

### Abstract

Double coaxial air jets(annular and coaxial air jets) between which propane gas is fed was selected to study the structure of diffusion flames in turbulent shear flow. Schlieren and direct photographs are taken to visualize the flame structure. Mean and fluctuating temperatures and ion currents were measured to investigate the macroscopic and the instantaneous flame structure. The objective of this study is to understand the interaction between combustion and mixing process especially in the transition region of turbulent shear flow. The investigation reported in this paper focuses on the macroscopic and the instantaneous structures of three flames obtained.

The increased mixing effect resulting from increase of Reynolds number of central air jet makes the flame bluish and short. When the velocity of surrounding air stream is higher than that of central air jet, the instantaneous flame structure is composed of coherent structure. It is considered that the flame structure of transitional region of mixing layer depends on the structure of mixing layer of non-reacting conditions.

### 기 호 설 명

$d$  : 중심 공기류가 분출되는 원관의 내경  
 $D_i$  : 주위 공기류가 분출되는 환형 출구 단면의 내경  
 $f$  : Vortex passing frequency(Hz)  
 $R$  : 노즐 중심에서 반경방향좌표  
 $U$  : 축방향 유속  
 $U'$  : 축방향 유속의 RMS값

$U_c$  : 중심 공기류의 노즐 출구에서의 축방향 평균유속  
 $U_g$  : 연료의 노즐 출구에서의 축방향 평균유속  
 $U_s$  : 주위 공기류의 노즐 출구에서의 축방향 평균유속  
 $U_{min}$  : 단면 최저 축방향 유속  
 $U_{max}$  : 단면 최고 축방향 유속  
 $U_m$  :  $(U_c + U_s)/2$   
 $\Delta U$  :  $|U_c - U_s|$   
 $Z$  : 노즐 출구에서 유동방향 좌표  
 $\nu$  : Kinematic viscosity of air at 20°C

\*정회원, 부산대학교 대학원

\*\*정회원, 부산대학교 공과대학 기계공학과

1. 서 론

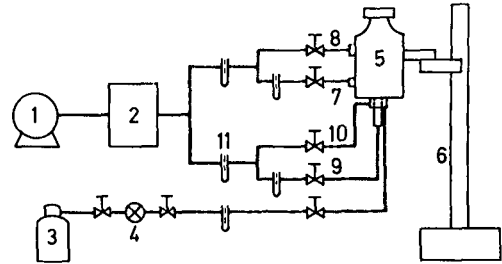
등온류의 난류전단층의 혼합구조에 대해서는 Winant와 Browand<sup>(1)</sup>, Brown과 Roshko<sup>(2)</sup>, Roshko<sup>(3)</sup>가 가시화에 의해 혼합층내에서 코히런트 구조(coherent structure)를 발표한 이후로 유체역학분야에서 이론적 및 실험적 연구가 계속되고 있으나 연소반응을 수반한 난류전단류에 대해서는 연소에 이르기까지의 열 및 물질의 수송과정과 난류구조와의 관련성 등의 상세한 조사연구는 미흡한 실정이다.

Koochesfahani 등<sup>(4)</sup>, Hasegawa와 Yamaguchi<sup>(5)</sup>는 2차원의 두 평행류의 전단층에서 두 물질의 혼합에 관해 연구한 결과 혼합층 內로의 誘引(entrainment)은 고속측 유체의 誘引이 저속측 유체의 誘引보다 크다고 보고한 바 있으며, 山口等<sup>(6,7)</sup>은 평면공기전단류중에 형성되는 난류확산화염을 대상으로 유동의 난류구조와 연소반응과의 상호작용에 관해 실험적으로 고찰하고 화염중에서의 코히런트구조를 정성적으로 모델화 하였다. 또한 Said M.A. Ibrahim 등<sup>(8)</sup>은 중심공기분류(concentric inner air jet)와 주위연료분류(annular fuel jet)가 대기중에 분출되어 형성된 확산화염의 화염구조 및 연료분류(fuel jet)와 공기분류(air jet)의 유동조건 변화가 화염길이에 미치는 영향을 조사하였다.

前報에서는 전형적인 연료제트형 난류확산화염에 비하여 연료와 산화제의 접촉면적을 증대시키고 또한 난류혼합속도를 증가시켜 연소효율을 높이기 위해서 동축의 2중공기분류의 전단층에 기체연료를 분출하여 형성된 화염에 대해 중심기류와 주위기류의 유동조건 변화에 따른 연료와 산화제의 혼합구조 및 거시적인 화염구조를 비교 고찰하였다. 本報에서는 선화가 없는 중심기류와 주위기류의 난류전단층에서 형성되는 난류확산화염의 천이영역(transition region)에 주목하여 전단층내의 혼합작용과 화염구조와의 상호작용을 규명하기 위해 거시적 및 순간적인 화염구조에 대해 실험적으로 조사 연구한 결과를 보고한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이고, Fig. 2는 연소기 출구의 상세도이다. 연료노즐



- 1. Blower
- 2. Surge tank
- 3. LPG tank
- 4. Regulator
- 5. Burner
- 6. Traversing equipment
- 7. Axial air control valve of surrounding air
- 8. Tangential air control valve of surrounding air
- 9. Axial air control valve of central air
- 10. Tangential air control valve of central air
- 11. Manometer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

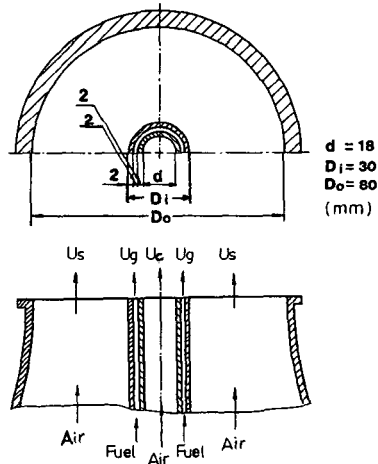


Fig. 2 Schematic of burner head

은 내경 18mm, 두께 2mm의 圓管과 내경 26mm, 두께 2mm의 圓管이 동심으로 설치되어 두개의 동심원관 사이(간격 2mm)에서 연료가 공급되는 구조이고, 이 연료노즐은 출구직경(D<sub>o</sub>) 80mm의 공기노즐에 동심으로 설치되었다. 연료노즐의 중심측 공기류를 중심기류, 연료노즐 주위의 공기류를 주위기류라 정하고, 각각의 출구평균유속을 U<sub>c</sub>, U<sub>s</sub>로 표시하였다. 출구공기의 평균유속은 노즐끝단에서 1mm 떨어진 높이에서 연료노즐 중심으로부터 반경방향으로 1mm의 간격으로 각 점에서 管軸방향의 시간평균유속을 정온형 열선유속계에 의해 측정된 뒤 측정단면에 대해 적분하여 구한 유량을 출구단면적으로 나눈값과 총류공기유량계(SOK-

Table 1 Initial conditions at nozzle exit

	B1	B2	B3
$U_0$ (m/s)	3.8	1.5	1.5
$U_g$ (m/s)	0.37	0.37	0.37
$U_c$ (m/s)	1.3	3.0	6.0
$\Delta U$ (m/s)	2.5	1.5	4.5
$Re(d \cdot U_c/\nu)$	1470	3390	6780

KEN, LEF-50)로 측정된 체적유량을 출구단면적으로 나누값을 비교할 때 그 차이가 실험범위 내에서 5%이내 이었으며, 이렇게 구한 두 값의 평균값으로써  $U_c$  및  $U_g$ 를 정하였다. 측정좌표는 노즐선단에서 유동의 하류방향을 Z축, 노즐중심에서 반경방향을 R축으로 설정하였다. 실험에 사용된 연료는 상용프로판가스(LPG)이고 연료량은 프로판가스용 적산유량계로써 측정하였다.

본 실험에서는 프로판가스의 유속을 0.37m/s ( $Q_g=0.4\text{kg/h}$ )로 일정하게 유지하면서 선회를 부여하지 않은 중심기류와 주위기류의 속도를 변화시켰을 때 형성되는 화염을 3종으로 분류하고 그 조건을 Table 1에 나타내었다. B1화염에서는  $U_c < U_g$ 이고, B2, B3화염에서는  $U_c > U_g$ 이며, B3화염은 B2화염보다 중심기류의 레이놀즈수가 더 큰 경우이다.

화염의 안정을 위하여 연료노즐 림(rim)의 두께를 크게 할 필요가 있으나 유동장에 미치는 림의 영향을 최소화 하기 위해서는 두께를 가능한 작게 해야 한다. 水谷等<sup>(9)</sup>의 화염안정조건에 대한 연구 결과에서 프로판-공기화산화염의 경우 림두께가 대략 1mm 이하일 때 화염안정이 극히 악화되므로 림의 두께를 2mm로 하였다. 非燃燒時 全流動場에 대한 평균유속 및 유속변동의 RMS값의 측정에는 정온형 열선유속계를, 화염대의 평균온도측정에는 직경 0.3mm의 Pt-Pt/Rh13% 수냉식열전대를, 맥동온도측정에는 직경 25 $\mu\text{m}$ 의 Pt-Pt/Rh13% 열전대를 사용했으며 열전대의 열관성에 의한 응답 지연은 전기적 보상법에 의해 보상하였다<sup>(10)</sup>. 정전탐침에 의한 이온전류측정에는 직경0.1mm의 Pt/Ph13% 세선(fine wire)을 프로브 선단에서 0.5mm 돌출시키고, -18volt를 가해서 화염대의 양이온을 검출하였다. 화염구조의 가시화를 위한 광학적 관찰에는 순간슬리이펜사진법 및 줌 렌즈를 부착한 직접사진법(ASA 400, 노출 1ms)을 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 비연소시 유동장의 시간평균특성

Fig. 3은 3종의 실험조건중 대표적으로 B1조건( $U_c < U_g$ )과 B2조건( $U_c > U_g$ )의 비연소시 유동장의 시간평균 특성을 나타낸 것이다. 평균유속은  $U/U_0$ 로, 유속변동의 RMS값을  $U'/\Delta U$ 로 무차원화 하였다.  $Z=20\text{mm}$  단면에서는 B1, B2 모두  $R=9\sim 12\text{mm}$ 에서 노즐림에 의한 영향인 것으로 생각되는 속도결손이 보이지만  $Z \geq 50\text{mm}$ 의 단면에서는 단순전단류에서 볼 수 있는 것과 같은 매끄러운 분포를 나타낸다. 난류강도는 B1, B2 모두에 대해 속도구배가 최고인 위치의 부근에서 최대가 되는 경향이며 노즐에서 가까운  $Z=20\text{mm}$  단면에서는 고속류측의 속도구배 최고위치 부근(B1조건에서는 주위기류측, B2조건에서는 중심기류측)의 난류강도가 저속류측 보다 더 크다.

Fig. 4는 전단영역의 중심위치<sup>(11)</sup>(radial position at which the velocity is equal to  $0.5(U_{max} + U_{min})$ )의 분포를 나타낸 것으로서  $Z \geq 50\text{mm}$ 에서 모두 직선적으로 분류가 확대됨을 알 수 있고  $U_c > U_g$ 인 B2조건이  $U_c < U_g$ 인 B1조건보다 분류의 확대율<sup>(11)</sup>(rate of spread of jet)이 더 크게 나타났다.

#### 3.2 거시적 화염구조

Fig. 5는 B1, B2, B3 화염의 평균온도분포를 등온선으로 나타낸 것이고, Fig. 6은 이들 화염에 대한 화염의 직접사진(A)과 화염의 순간슬리이펜사진(B) 및 비연소시의 슬리이펜사진(C)이다.

Fig. 5의 등온선도 및 Fig. 6-A의 화염의관사진에서 보면 화염基部の 층류화산화염은 B1, B2, B3 화염 모두에 대해 각각 저속류측의 노즐림(nozzle rim)선단에(B1 화염에서는  $R=9\sim 11\text{mm}$ 에, B2 및 B3 화염에서는  $R=13\sim 15\text{mm}$ 에) 부착하여 있으며, Fig. 3의 난류강도분포에서 보면 노즐에서 가까운  $Z=20\text{mm}$  단면에서 B1, B2 조건 모두에 대해 저속류측의 속도구배 최고위치 부근(B1 화염에서는  $R=8\text{mm}$ , B2 화염에서는  $R=13\text{mm}$ )의 난류강도가 고속류측보다 작은 점을 미루어 보아 난류강도가 상대적으로 작은쪽에서 화염안정을 위한 층류화염대가 형성됨을 알 수 있다.

또한 Fig. 5 및 Fig. 6-A에서 B1 화염은 B2와 B3화염에 비해 화염의 길이가 짧고  $Z=30\text{mm}$  단

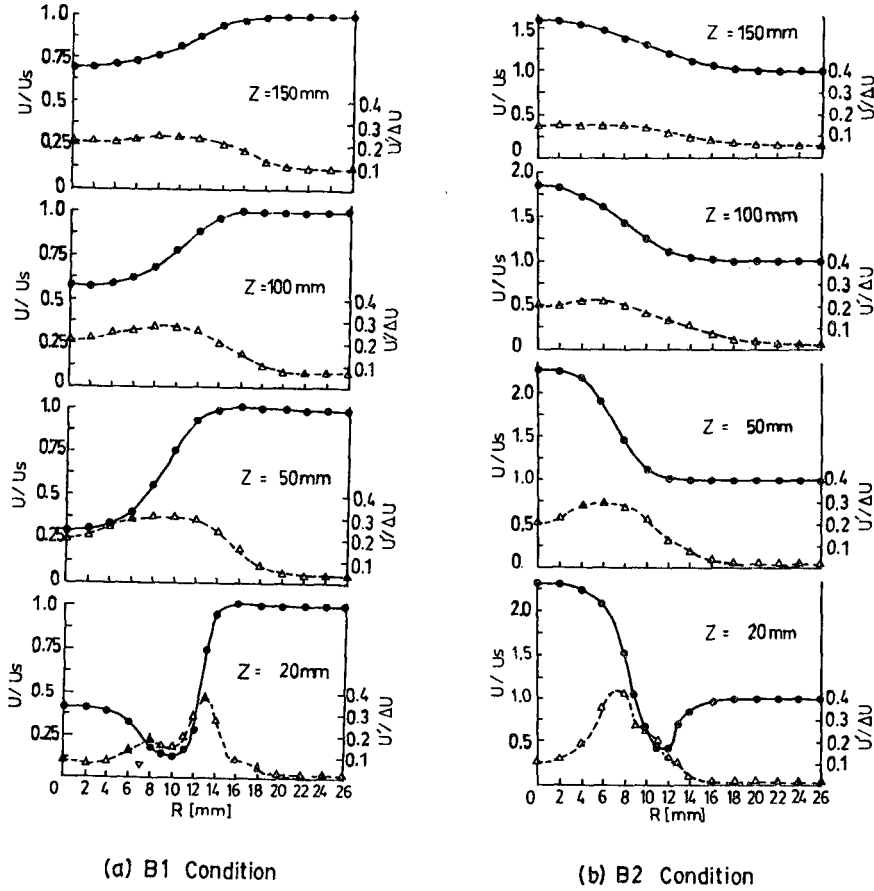


Fig. 3 Distributions of mean velocity and RMS value for non-reaction conditions(● :  $U/U_s$ , Δ :  $U'/\Delta U$ )

면에서부터 화염의 반경방향 폭이 급격히 확대되며 하류로 감에따라 1500K 이상의 고온영역이 반경방향으로 이동하는 반면에, B2와 B3 화염은 중심축 쪽으로 이동한다. 그러나 이러한 고온영역은 모두 중심축에서 반경방향으로 이동한 영역에서 형성되므로 중심기류와 주위기류의 난류혼합층에서 고온영역이 형성됨을 알 수 있다. 화염외관 사진에서 B1화염은  $U_c < U_s$ 인 조건으로서 전체적으로 청염이며 하류영역에 약간의 휘염이 있고, B2 화염과 B3 화염은 모두  $U_c > U_s$ 인 조건으로서 B2 화염은 림(rim) 근처를 제외하고는 전체적으로 휘염이며, B3 화염은 전체적으로 청염이다. 또 B3 화염은 B2 화염보다 화염길이가 더 짧고 최고온도가 100K이상 더 높다. 이것은 B3 화염이 B2 화염보다 중심기류의 레이놀즈數가 두배로 증가했으며, Fig. 6-B에서渦의 크기를 비교해 볼 때 B3 화염

의渦가 B2 화염의渦보다 작음을 알 수 있으므로 난류강도의 증가로 인해 연료와 공기의 혼합작용이 강해져서 연소반응이 빨리 종료된 결과라고 생각한다.

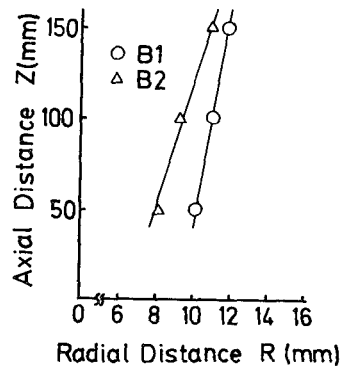


Fig. 4 Centerlines of shear layer

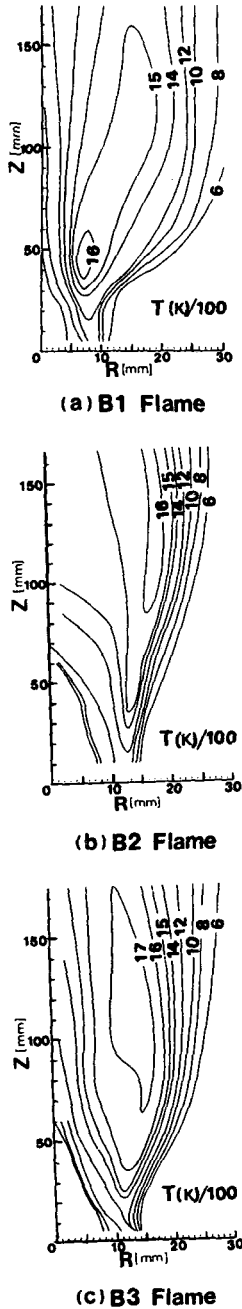


Fig. 5 Temperature distributions

3.3 순간적 화염구조

Fig. 6-B의 3종의 화염에 대한 순간슐리엔사진에서 최초의 와의 생성위치는 Fig. 5 및 Fig. 6-A에서 관찰한 화염기부의 층류화산화염의 부착위치와는 달리 B1, B2, B3 화염이 다 같이 고속류측

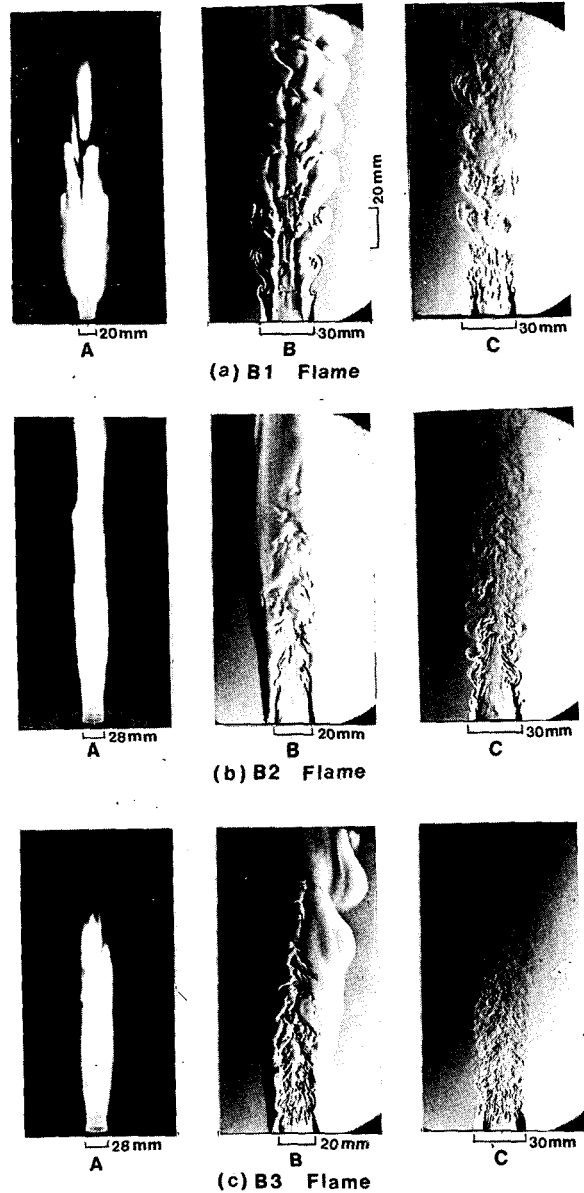


Fig. 6 Direct photographs and schlieren photographs (A) Direct photographs of flame(1/4 sec), (B) Instantaneous schlieren photographs of flame, (C) Instantaneous schlieren photographs of non-reacting conditions

의 림(rim)선단에서 (B1화염은  $R=13\sim 15\text{mm}$ 에서, B2 및 B3 화염은  $R=9\sim 11\text{mm}$ 에서) 각각 최초의 와가 형성되기 시작하며, Fig. 3의 난류강도 분포에서 보면 B1, B2 조건 모두에 대해 고속류측의 속도구배 최고위치부근(B1 화염에서는  $R=13$

mm, B2 화염에서는  $R=8\text{mm}$ 의 난류강도가 저속류측보다 큰 값을 가지므로 와가 존재하는 위치에서 난류강도가 상대적으로 높은 값이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6-B의 B1화염은 주위기류측 림선단에서 명확히 코히런트渦(coherent eddy)가 발생하여 하류로 감에 따라 성장하고 있으며 이것은 Brown과 Roshko<sup>(2)</sup>가 非反應의 두 평행류 사이의 혼합층에서 관찰한 코히런트구조와 본질적으로 동일한 것으로 본다. 따라서 전단류중에 연료가 유입되어 연소반응이 일어나도 코히런트구조가 존재함을 알 수 있다. 또 Fig. 7은 코히런트渦(coherent eddy)의 성장을 조사하기 위하여 다수의 순간슬라이덴사진에서 각각 인접한 두개의 와의 간격  $L$ 의 변화를 나타낸 것이다. 그림중의 실선은 등온전단류에 대해 Roshko<sup>(3)</sup>가 구한 경험식  $L=0.31 \times Z$ 를 나타낸 것이다. 그림에서 보면  $30\text{mm} \leq Z \leq 80\text{mm}$ 에서 와가 급격히 성장한다. 와의 성장에 관해서는 고속슬라이덴촬영을 행하지 않고는 단정할 수 없지만 다수의 순간슬라이덴사진에서 合體(pairing)를 나타내는 특징적인 거동은 관찰되지 않았으며, Fig. 5(a)의 B1 화염의 등온선도에서 볼때 고온영역의 팽창이 현저한  $30\text{mm} \leq Z \leq 80\text{mm}$ 에서 와의 성장이 현저하다는 점으로 보아 팽열에 의한 열팽창이 지배적이라고 생각된다. 또한 Fig. 7에서 중심기류와 주위기류의 속도차( $\Delta U$ )의 크기가 코히런트 와의

크기에 미치는 영향을 알아보기 위해 와의 크기를 노즐출구에서부터渦 중심까지의 거리로 무차원한 값( $L/Z$ )으로 나타내면 속도차가  $\Delta U=2.5, 4.5, 6, 0, 8.0\text{m/s}$ 로 점차 커질수록  $Z \geq 40\text{mm}$ 에서  $L/Z$ 가 전반적으로 작아지는 경향이 있다. 즉 속도차가 클수록 와의 크기는 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6-B의 B2와 B3 화염에서는 중심기류측 림선단에서 와가 발생하지만 코히런트구조가 명확히 관찰되지는 않는다. 그리고 레이놀즈數가 더 높은 B3 화염은 B2 화염보다 더 작은 스케일의 불규칙한 3차원의 와로 이루어져 있다. 그러므로 B2와 B3화염에서는 속도차에 의해 생긴 코히런트渦 이외에 중심기류의 레이놀즈數의 증가에 따른 난류강도의 증가로 인해 코히런트구조가 붕괴되는 것으로 생각된다.

Fig. 6-C는 비연소시의 순간슬라이덴사진으로서 프로판가스와 공기 사이의 밀도구배에 의해 생긴像이므로 하류로 갈수록 공기와 와의 난류혼합에 의해 밀도가 균질해져서 슬라이덴像이 점점 흐려진다. 그러나 상류의 천이영역에 주목하여 3조건을 비교

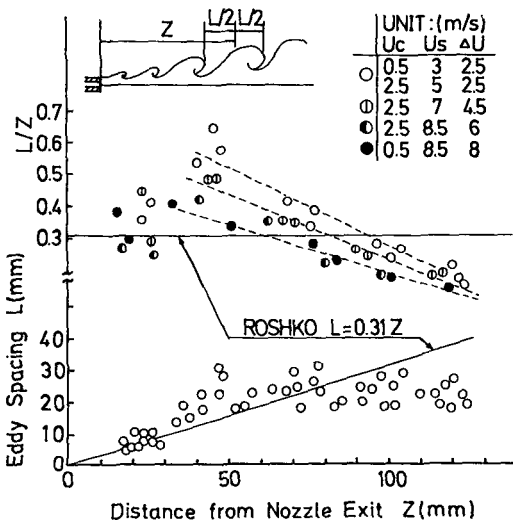


Fig. 7 Growth of coherent structure eddies

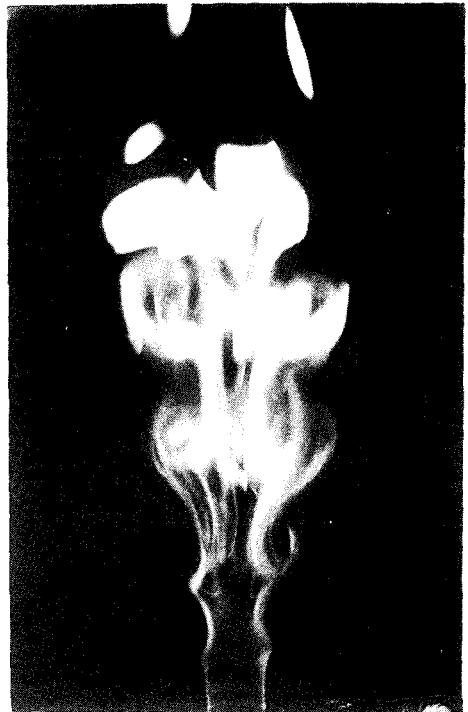


Fig. 8 Instantaneous direct photograph of the flame. ( $U_c=1\text{m/s}$ ,  $U_s=2\text{m/s}$ ,  $1/1000\text{sec}$ )

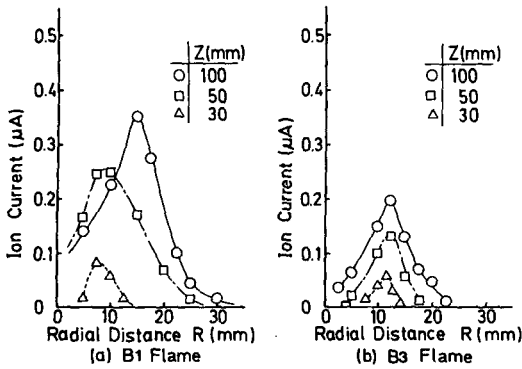
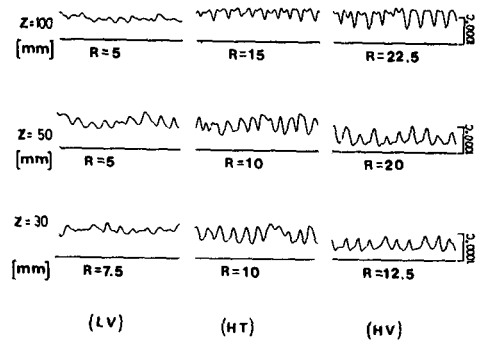


Fig. 9 Distributions of time mean ion current

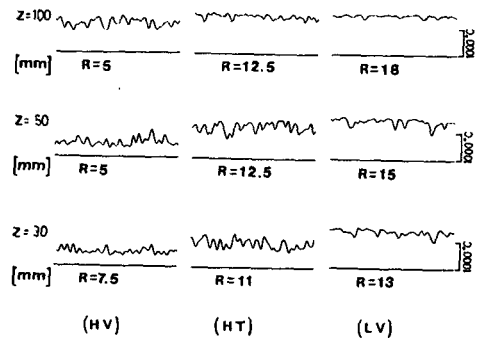
하여 보면 각 조건에 대해 Fig. 6-B의 순간적인 화염구조와 매우 유사하다. 그러므로 동축이중공기류 중의 확산화염에서도 순간적인 화염구조는 비연소시의 혼합층의 혼합구조에 크게 영향을 받음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 유동조건이  $U_c=1\text{m/s}$ ,  $U_s=2\text{m/s}$ 인 화염에 대한 순간직접사진(노출 1msec, ASA 400)이다. B1 화염( $U_c=1.3\text{m/s}$ ,  $U_s=3.8\text{m/s}$ )에 대한 사진은 노출시간(1 msec)에 비해 와의 평균대류속도( $U_m$ )가 비교적 높아서 사진에 나타난 와의 윤곽이 흐렸기 때문에 와의 평균대류속도가 낮은 조건인  $U_c=1\text{m/s}$ ,  $U_s=2\text{m/s}$ 를 택하였다. 사진에서 화염발광면이 B1 화염의 순간슬리이렌 사진과 비교해 볼때 코히런트구조에 잘 대응하여 형성되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 9~Fig. 12는 3종의 화염중에서 대표적으로 유동조건이  $U_c < U_s$ 인 B1 화염과  $U_c > U_s$ 인 B3 화염에 대한 시간평균 이온전류치의 분포, 맥동온도의 파형, 맥동온도의 확률밀도함수 및 온도변동의 주파수분석결과를 나타낸 것이다. Fig. 9는 B1 화염 및 B3 화염에 대해  $Z=30\text{mm}$ ,  $50\text{mm}$ ,  $100\text{mm}$



(a) B1 Flame



(b) B3 Flame

Fig. 10 Signals of fluctuating temperature

단면에서의 이온전류실효치의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 10은 각 단면에서 화염의 시간평균적인 저속측영역(LV), 고온영역(HT), 고속측영역(HV)의 3곳에서 측정된 맥동온도파형을 대표적으로 나타낸 것이고 측정점의 위치는 Table 2에 나타내었다. Fig. 11은 Fig. 10의 각 측정점 중에서 대표적으로 고속측영역(HV)에서의 맥동온도에 대한 PDF를 나타낸 것이다.

Fig. 9에서 보면 B1 화염은  $Z=30\text{mm}$ ,  $50\text{mm}$ ,

Table 2 Points of measurement of fluctuating temperature

Z (mm) R (mm)	B1 Flame			B3 Flame		
	LV	HT	HV	HV	HT	LV
Z=100	R=5	R=15	R=22.5	R=5	R=12.5	R=18
Z= 50	R=5	R=10	R=20	R=5	R=12.5	R=15
Z= 30	R=7.5	R=10	R=12.5	R=7.5	R=11	R=13

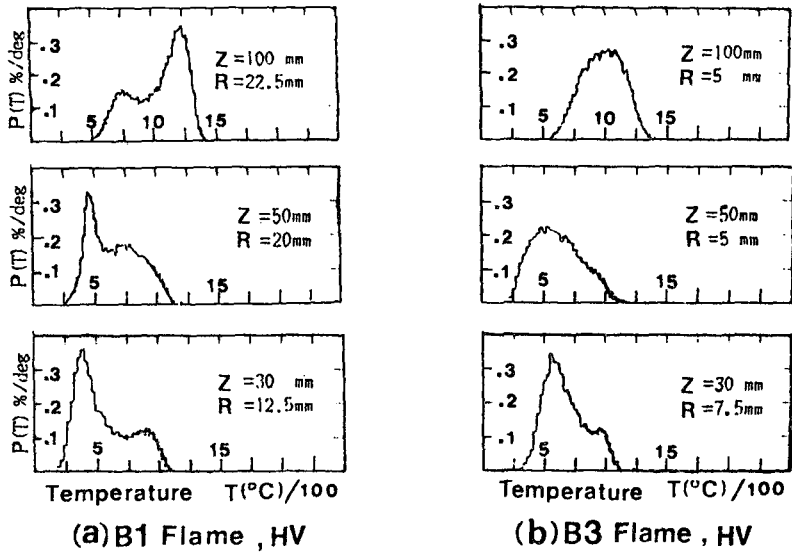


Fig. 11 PDF of fluctuating temperature

100mm 단면에서 이온전류치의 최대값이 각각  $R=7.5\text{mm}$ ,  $10\text{mm}$ ,  $15\text{mm}$  위치에서 나타나고, B3 화염은  $Z=30\text{mm}$ ,  $50\text{mm}$ ,  $100\text{mm}$  단면에서 이온전류치의 최대값이 각각  $R=11\text{mm}$ ,  $12.5\text{mm}$ ,  $12.5\text{mm}$ 의 위치에서 나타나며, 이 위치들은 Fig. 5의 (a) B1 화염 및 (c) B3 화염에서 보면 모두 각 단면에서 고온영역이다. 즉 시간평균적으로 이온전류치가 높게 나타나는 영역은 시간평균적으로 반응이 활발한 영역이며 이 영역은 고온영역과 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10(a) 및 Fig. 11(a)의 B1 화염에 대해서 고찰하면  $Z=30\text{mm}$  단면의 고속추영역(HV)인  $R=12.5\text{mm}$ 에서는 맥동온도파형이 약  $300^\circ\text{C}$ 의 낮은 온도에서 상향인 고온으로의 스파이크(spike)가 규칙적으로 튀는 상향스파이크형인 반면에  $Z=100\text{mm}$  단면의 고속추영역(HV)인  $R=22.5\text{mm}$ 에서는 약  $1200^\circ\text{C}$ 의 높은 온도에서 하향인 저온으로의 스파이크가 규칙적으로 튀는 하향스파이크형임을 알 수 있다. 그리고 Fig. 12는 B1 화염 및 B3 화염의 고속추영역(HV)에서의 온도변동에 대한 주파수분석 결과로서 Fig. 12(a)의 B1 화염에 대해  $Z=30, 50, 100\text{mm}$  단면에서 모두 탁월주파수가 약  $190\text{Hz}$ 이므로 Fig. 10(a)에서 맥동온도의 스파이크의 평균적인 주기가 약  $5.3\text{msec}$ 임을 알 수 있다. B1 화염의 경우에 평균적인渦의 크기(eddy scale)를

스파이크의 주기와 주위기류의 유속( $U_s=3.8\text{m/sec}$ )의 곱으로 보면, 평균적인 와의 크기는 약  $20\text{mm}$ 이며, 이것은 Fig. 6-B의 B1 화염에 대한 슬리이렌사진에서의 와의 크기와 비교할때 비슷한 크기이다. 그러므로 규칙적인 스파이크는 코히런트구조에서의 유인(entrainment)에 의해 나타난 결과라고 생각되며  $St_{NO} (=f \cdot D_i / U_s)$ 는 평균적으로 1.5이다. 즉  $Z=30\text{mm}$  단면에서는渦의 사이에 연료가 밀려 들어가서 연료와 산화제가 분자확산에 의해 가연범위내에 속하는 영역에서 반응이 일어나며 이것이 맥동온도파형에서 상향으로 튀는 상향스파이크로 나타난 것으로 볼 수 있고,  $Z=100\text{mm}$  단면에서는 주위류의 찬 공기가 와의 사이에 밀려 들어가므로 맥동온도파형에서 하향으로 튀는 하향스파이크로 나타난 것으로 볼 수 있다. 또한 이 현상은 Fig. 10(a)에서 볼때 중심추방향으로 갈수록 불분명해지며, 이것은 큰 스케일의 와에 밀려들어가서 세분화 되어진 연료의 화학반응에 기인한다고 생각되며 山口<sup>(7)</sup>의 2차원 평면전단류중의 코히런트구조화염에 대한 연구에서 밝혀진 바와 유사한 현상이다.

Fig. 10(b) 및 Fig. 11(b)의 B3 화염에 대해서 고찰해 보면 고속추영역(HV) 및 고온영역(HT)에서의 맥동온도파형이 B1 화염에서와 같이  $Z=30\text{mm}$  단면의 상향스파이크형에서  $Z=100\text{mm}$  단면의



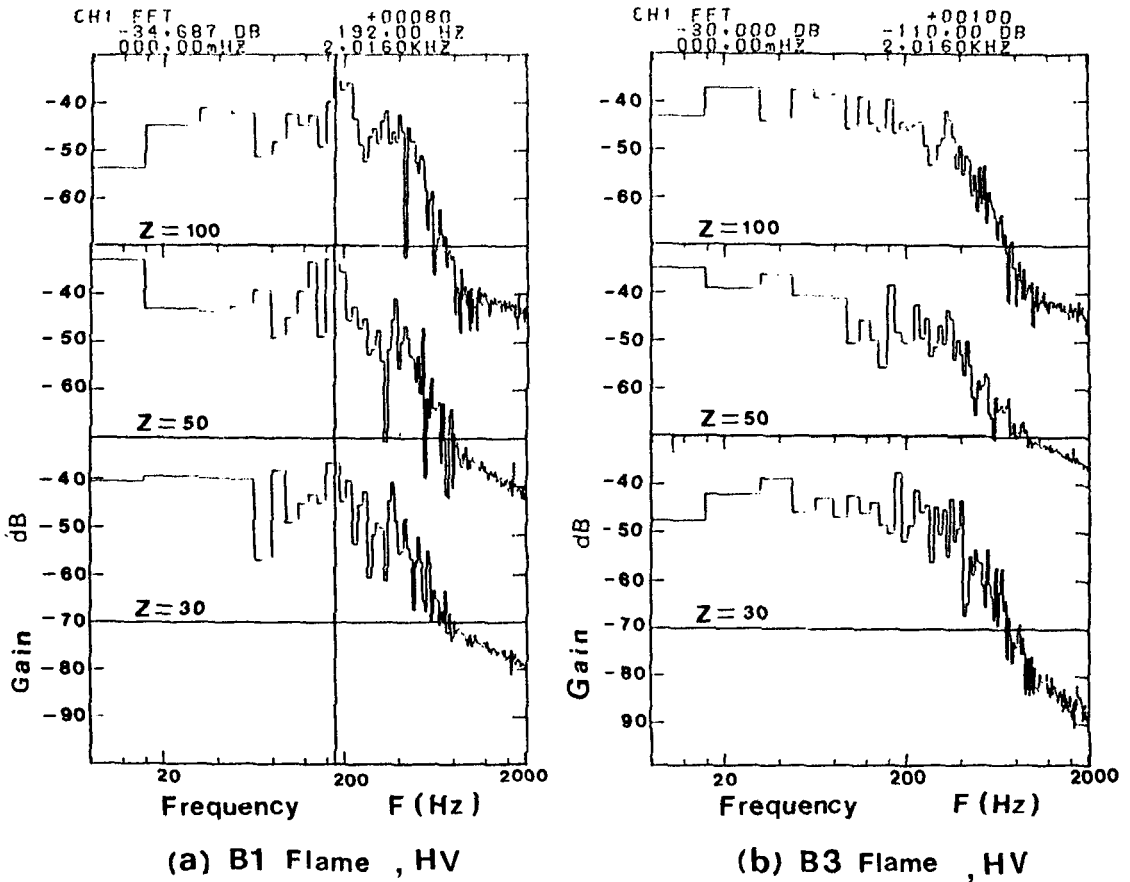


Fig. 12 Frequency spectra of fluctuating temperature

하향스파이크형으로 변화하는 양상은 같으나 주기성이 약간 불분명하며 Fig. 12 (b)의 B3 화염에 대한 주파수 분석 결과에서도 탁월주파수가 분명하지 않다.

따라서 주위기류의 유속( $U_s$ )이 중심기류의 유속( $U_c$ )보다 큰 조건인 B1 화염은 주기성이 분명한 코히런트구조에 지배되는 화염이며, 중심기류의 유속( $U_c$ )이 주위기류의 유속( $U_s$ )보다 큰 조건인 B3 화염은 중심기류의 레이놀즈수가 6780이므로 중심기류의 난류혼합작용에 의한 불규칙한 와에 지배되는 화염구조를 가진다.

#### 4. 결 론

선화가 없는 동축이중공기분류의 전단층에 프로판가스를 분출시켜서 형성된 난류확산화염에 대해

전단층내의 혼합작용과 거시적 및 순간적인 화염구조에 대해서 실험적으로 연구한 결과 본 연구의 범위내에서 다음의 결론을 얻었다.

(1) 화염기부의 층류확산화염은 난류강도가 상대적으로 작은 저속류층의 노즐림에 부착하여 화염을 안정시키며, 전단층의 최초의渦는 고속류층의 노즐림에서 생성된다.

(2) 시간평균적으로 연소반응이 활발한 고온영역은 중심층에서 반경방향으로 이동한 영역에서 형성되며, 유동조건이  $U_c > U_s$ 인 화염에서는 중심기류의 레이놀즈수가 증가하면 속도차의 증가 및 난류확산효과의 증가로 인해 혼합작용이 강해져서 화염의 길이가 짧아지고 최고온도가 높아진다.

(3) 유동조건이  $U_c < U_s$ 인 화염의 순간적인 화염구조는 코히런트구조이며 화염발광면은 코히런트渦의 경계에 잘 대응하여 형성되어 있다. 그리고

코히런트渦의 급격한 성장은 발열에 의한 팽창이 지배적이라고 생각되며 속도차가 클수록渦의 크기는 상대적으로 작아진다.

(4) 코히런트구조 화염의 고속층영역(HV)에서의 맥동온도파형은 화염상류역의 상향스파이크형에서 화염하류역의 하향스파이크형으로 변하는 특징을 가지고 있으며  $U_c=1.3\text{m/s}$ ,  $U_s=3.8\text{m/s}$ 인 조건에서 St NO는 1.5이다.

### 후 기

본 연구는 1990년도 한국과학재단의 일반기초연구비(과제번호 901-0903-015-2)의 지원에 의해 수행중인 연구에 대한 일부의 결과이며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Winant, C.D., and Browand, F.K., 1974, "Vortex Pairing: The Mechanism of Turbulent Mixing Layer Growth at Moderate Reynolds Number", J. Fluid Mech., Vol. 63, part 2, pp. 237~255.
- (2) Brown, G.L. and Roshko, A., 1974, "On Density Effects and Large Structure in Turbulent Mixing Layers", J. Fluid Mech., Vol. 64, part 4, pp. 775~816.
- (3) Roshko, A., 1976, "Structure of Turbulent Shear Flows: A New Look", AIAA J., Vol. 14, No. 10.
- (4) Koochesfahani, M.M., Dimotakis, P.E. and Broadwell, J.E., 1985, "A 'Flip' Experiment in a Chemically Reacting Turbulent Mixing Layer", AIAA J., Vol. 23, No. 8.
- (5) Hasegawa, T., Yamaguchi, S. and Ohiwa, N., 1987, "A Numerical Analysis of Mass Transfer in a Plane Shear Layer", JSME International Journal, Vol. 30, No. 263.
- (6) 山口響起 ら, 1980, "平面せん断流中の亂流擴散火焰", 日本機械學會論文集(B), 第46卷, 第405號, pp. 981~990.
- (7) 山口響起 ら, 1983, "平面せん断流中の亂流擴散火焰(コヒーレント構造火焰の舉動と燃燒モデル)", 日本機械學會論文集(B), 第49卷, 第440號, pp. 893~900.
- (8) Ibrahim, Said M.A. and El-Mahallawy, F.M., 1985, "The Structure of Turbulent Free Diffusion Flames", Combustion and Flame, Vol. 60, pp. 141~155.
- (9) 水谷幸夫, 矢野和明, 1978, "同軸流擴散火焰の安定條件と付着機構", 日本機械學會論文集, (第2部), 第44卷, 第379號, pp. 1036~1052.
- (10) Yoshida, A. and Tsuji, H., 1979, "Measurements of Fluctuating Temperature and Velocity in a Turbulent Premixed Flame", 17th Symposium (International) on Combustion, pp. 945~956.
- (11) Beer, J.M. and Chigier, N.A., 1972, "Combustion Aerodynamics", Halsted-Wiley, pp. 19~20.