

# 원통형 보염기 후류에 형성되는 확산화염의 연소특성에 관한 연구

안진근\* 임덕재\* 노태선\* 송규근\*\*

## (A Study on the Combustion Characteristics of Diffusion Flame Formed in the Wake of Cylindrical Bluff Body)

J.G.An\* D.J.Lim\* T.S.Ro.\* K.K.Song\*\*

Key Words : Fuel Injection Angle, Turbulence Generator, Auxiliary Fuel Injection, Turbulence Intensity, Concentration Distribution of Combustion Gas, Average Values of Ion Current, Fluctuation Waves of Ion Currents

### ABSTRACT

The stabilization characteristics of diffusion flame formed in the wake of a cylindrical flame holder were investigated. Distribution of turbulence intensity, concentration distribution of combustion gas, and ion currents were measured. The turbulence intensity in the wake of cylindrical flame holder is increased with increase of diameter or blockage ratio of grid. If the auxiliary fuel is injected into recirculation zone, the concentration of  $C_3H_8$  is high, but the concentration of  $CO_2$  is low at the boundary of recirculation zone. The region with highest average value of ion currents in the middle of flame is moved to the upstream side by the turbulent components of main stream. The flame mass with partially active reaction is moved fast for uniform flow and turbulence generator G3, but the flame mass with relatively slow reaction is moved slowly for turbulence generator G1.

### 1. 서론

경제, 산업의 성장에 따른 에너지 수요의 증가와 환경오염 문제의 대두로 보일러, 자동차, 항공기 등 열기관에 대하여 고효율화, 소형화, 경량화 및 저공해성화가 요구되고 있다. 고효율화를 실현하기 위해서는 고부하 연소가 이루어져야 하는데, 이를 위해서는 강한 난류를 동반하는 고속유동장 내의 연소가 필연적이지만, 난류의 증가 및 기류의 고속화에 따라 연소실 내의 일정한 위치에서 화염을 안정화시키기가 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해서는 고속유동장 내에 연소속도와 비슷한 저속, 고온영역을 만들어 그 영역이 연속연소에 필요한 열 및 활성화화학종의 공급원 역할을 하도록 하면 된다.<sup>1)~5)</sup> 보염기로부터 연료를 분출시켜 그 후류에 형성되는 화염은 본질적으로 확산화염이며, 확산화염의 연소과정은 연료와 연소용 공기의 혼합과정과 재순환영역의 상태에 따라 크게 지배되며, 연소특성을 결정하는 중요한 인자이다.<sup>3)~6)</sup>

본 연구에서는 연료분출을 수반한 원통형 보염기에 의해 안정되는 확산화염에 대하여 재순환영역 주변의 난류강도 분포, 연소가스의 농도분포 및 이온전류의 특성 등을 측정하여 확산화염의 연소특성을 고찰하였다.

### 2. 실험장치 및 측정방법

Fig.1에 본 연구에 사용한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 공기공급계통, 연료공급계통, 정류실, 난류발생격자, 연소실, 보염기, 배기덕트 및 점화장치 등으로 구성되었다.

본 실험을 위하여 소형 풍동을 제작하였으며, 주류공기는 유속 5~55 m/s의 범위에서 균일한 유동상태로 연소실에 유입된다.<sup>7)~8)</sup> 주연료로서 LPG를 사용하였으며, LPG 용기에서 나온 연료는 두 개의 유로를 통하여 각각 주연료와 보조연료로 공급된다. 주연료는 다시 두 개의 유로로 나뉘어 보염기의 상하에 가공된 두 개의 주연료 분출용 슬릿(0.5×10 mm<sup>2</sup>)을 통하여 대칭으로 분출된다. 보조연료로서

\* 정회원, 한국전력기술주식회사

\*\* 정회원, 전북대학교 정밀기계공학과

LPG를 사용하였으며, 이는 보염기의 뒷부분 즉, 주류공기가 유입되는 측과 반대측에 가공된 한 개의 보조연료 분출용 슬릿( $0.5 \times 10 \text{ mm}^2$ )을 통하여 분출된다. 보염기로부터 분출된 연료의 점화는 출력이 16,400 볼트인 고전압 점화코일의 불꽃방전으로 이루어졌다.

주류유동 내에 난류발생에 따른 연소특성을 고찰하기 위해 연소실 입구에 난류발생격자를 설치하였다. 본 연구에서 사용된 난류발생격자의 제원을 Table 1에 나타낸다. 연소실은 단면  $120 \times 50 \text{ mm}^2$ , 길이 1000 mm이고, 화염을 육안으로 관찰할 수 있도록 양측 벽에 석영유리를 설치하였다. 직경이 16 mm이고, 길이가 60 mm인 황동제 원통형 bluff body를 보염기로 선택하였으며, Fig. 2에 그의 개략도를 나타낸다. 연료 분출각( $\theta$ )은 보염기 축을 원점으로 두 개의 주연료 분출용 슬릿이 주류공기에 대항하는 각도로 정의하였다. 연소실 입구에서의 평균 주류유속은  $U(\text{m/s})$ , 이 주류유속을 보정한 보염기 축중심에서의 평균 주류유속은 보염기에 의한 유로폭 감소를 고려하여  $U_{act}(\text{m/s})$ 로 하였다. Fig. 3에 난류발생격자와 보염기를 설치한 경우에 대한 연소실 내부의 배열을 나타낸다.

Table 1. Specification of turbulence generators

Grid No.	$B_r$	S (mm)	d (mm)	n
G1	33	30	10	4
G2	33	15	5	8
G3	33	7.5	2.6	15
G4	25	20	5	6
G5	30	10	5	12

$B_r$  : blockage ratio (%),  $B_r = (n \times d / H)$   
 $S$  : interval of grid (mm)  
 $d$  : diameter of grid (mm)  
 $n$  : number of grid (mm)  
 $H$  : width of combustion chamber (mm)

화염이 형성되는 보염기 후류에 대한 난류강도의 측정에는 정온형 열선풍속계를 사용하였으며, 열선은 직경이  $5 \mu\text{m}$ 인 I형을 사용하였다.<sup>9)</sup> 가스크로마토그래프를 이용하여 보염기 후류에 형성되는 화염의 연소가스 농도를 분석하였다.<sup>10)</sup> 이온전류의 변동을 측정하기 위해 사용된 정전탐침은 프로브의 소선 직경이 0.1 mm인 백금이고, 소선의 수감부는 1.5 mm이며, 수감부 외부를 석영관으로 피복하여 절연관에 넣어 사용하였다. Fig. 4에 정전탐침의 개략도 및 이온전류 검출회로를 나타낸다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 계순환영역 주변의 난류강도 분포

##### 3.1.1 난류발생격자에 의한 영향

주류유속이 10 m/s이고 주연료 분출량이 3.5 l/m인 안정상태의 조건에서 난류발생격자를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 대한 난류강도 분포를 Fig. 5에 나타낸다. 모두 연료 분출각이  $60^\circ$ 인 조건에서 측정한 결과이다. Fig. 5에서 가로축은 시간 평균속도로( $\bar{U}$ )로 무차원화한 난류강도 ( $RMS/\bar{U}$ )를 표시하며, 세로축은 보염기 축을 원점으로 주류유동에 대한 수직방향의 거리를 표시한다.

보염기 직후  $X=15 \text{ mm}$ 인 위치에서는 난류발생격자를 설치하지 않은 경우는 물론, 어느 격자를 설치한 경우에서도  $Y \geq 20 \text{ mm}$ 의 영역에서 난류강도는 평탄한 분포상태를 나타내고, 보염기에 의한 박리전단층 부근( $Y \approx 5 \sim 15 \text{ mm}$ )에서 난류강도는 급격하게 증가한다. 이 위치에서 각 격자에 따른 영향은 격자의 구속비가 같은 경우에는 격자의 직경이 클수록 난류강도가 크고, 격자의 직경이 같을 경우에는 격자의 구속비가 클수록 난류강도가 크게 나타났다. 또한 격자직경의 변화에 의한 난류강도 분포의 차이가 격자구속비의 변화에 의한 난류강도 분포의 차이보다 크게 나타났다. 난류발생격자를 설치한 경우 격자 G1, G5, G2, G4, G3의 순서로 난류강도가 큰 것으로 나타났다.

$X \geq 55 \text{ mm}$ 인 영역에서는 하류로 이동함에 따라 난류강도가 평탄한 상태로 수직방향으로 상승하는 Y의 위치가 주류유동축으로 이동하는 것을 보이고 있다. 이것은 하류로 이동함에 따라 전단층의 폭이 확대되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 격자를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우의 난류강도 분포의 차가 감소하고, 전단층 내의 난류강도 분포도 격자의 종류에 따라 큰 차이를 보이지 않으며, 거의 보염기의 존재에 의한 영향을 받는다.

##### 3.1.2 연료분출각과 보조연료의 공급에 의한 영향

주류유속이 30 m/s이고 주연료 분출량이 5 l

/m인 안정상태의 조건에서 연료 분출각 60°, 180° 340° 등에 대한 난류강도 분포를 Fig. 6에 나타내며, 주류유속과 주연료 분출량이 같은 조건에서 연료 분출량이 60°일 때 보조연료로서 LPG를 0.6 l/m 공급한 경우에 대한 난류강도 분포를 Fig. 7에 나타낸다.

Fig. 6에서 보염기 직후인 X=15 mm, Y=10 mm 부근에서 연료 분출각도에 따라 약간의 차이를 보이지만, 전반적으로 난류강도 분포상의 차이를 보이지 않고 단지 보염기에 의한 영향을 공통적으로 나타낼 뿐이다. 또한 보조연료를 공급한 경우와 이를 공급하지 않은 경우의 난류강도 분포는 거의 일치한다. 결국 난류강도 분포는 연료 분출각도나 보조연료의 공급에는 거의 영향을 받지 않으며, 보염기 상류측의 주류유동의 형성조건에 따라 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

## 3.2 연소가스의 농도분포

### 3.2.1 연료 분출각에 의한 영향

주류유속을 30 m/s로 설정하고 주연료를 7 l/m으로 공급한 안정상태의 화염에 대하여 연료 분출각에 따른 연소가스의 농도분포를 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타낸다. 가로축과 세로축은 각각 보염기 축을 중심으로 주류방향에 대한 거리와 주류에 수직인 방향에 대한 거리를 표시하며, 등고선으로 표시된 백분율은 각 가스성분의 농도를 표시한다.

재순환영역 부근의 산소 농도는 연료 분출각이 340°일 때 높은 것으로 나타났다. 이것은 주류유속을 30 m/s로 일정하게 설정했으므로 연료 분출각 60°일 때와 동일한 공기량이 공급되지만, 연료의 확산이 불량한 340°인 경우에는 연소반응이 활발하지 못하여 주류공기 중의 산소가 연료 분출각 60°인 경우에 비하여 연소반응시에 그다지 소비되지 않았기 때문에 산소 농도가 높게 나타났다.

재순환영역 부근의 이산화탄소 농도는 연료 분출각이 340°일 때 낮은 것으로 나타났다. 이것은 연료 분출각이 340°인 경우 연료의 확산상태가 불량하여 연소반응이 연료 분출각 60°인 경우에 비하여 활발하지 못하여 연소반응의 최종생성물인 이산화탄소의 생성량이 적기 때문으로 생각된다.

미연가스로 존재하게 되는 프로판 농도는 340°일 때 높게 나타났다. 이는 이미 언급한 바와 같이 연료의 확산이 불량한 경우일수록 연료로 분출된

프로판이 연소되지 못하고 미연상태로 존재하기 때문이다.

### 3.2.2 난류발생격자에 의한 영향

주류유속을 10 m/s로 설정하고 주연료를 3.5 l/m으로 공급한 안정상태의 화염에 대하여 난류발생격자를 설치하지 않은 경우와 난류발생격자 G2를 설치한 경우에 대한 연소가스의 농도분포를 Fig. 10 및 Fig. 11에 나타낸다. 모두 연료 분출각이 60°인 조건에서 실험한 결과이다.

재순환영역 부근의 산소와 이산화탄소의 농도는 난류발생격자를 설치한 경우가 높지만, 미연 프로판의 농도는 난류발생격자를 설치한 경우가 낮게 나타났다. 이것은 난류발생격자를 설치한 경우가 이를 설치하지 않은 경우보다 난류성분의 작용으로 인하여 재순환영역으로 산소 유입량이 증가되고 연료의 확산이 양호해져 연소반응이 활발히 일어나기 때문이라고 생각된다.

산소와 이산화탄소의 농도는 난류발생격자를 설치한 경우가 이를 설치하지 않은 경우에 비하여 매우 높은 것을 볼 때, 난류발생격자를 설치함으로써 연료의 확산을 향상시킬 수 있는 것으로 생각된다.

### 3.2.3 보조연료의 공급에 의한 영향

주류유속을 30 m/s로 설정하고 주연료를 7 l/m으로 공급한 안정상태의 화염에 대하여 보조연료로 LPG를 재순환영역 내에 0.6 l/m 공급한 경우 연소가스의 농도분포를 Fig. 12에 나타낸다. 연료 분출각이 60°인 조건에서 실험한 결과이다.

보조연료를 공급하지 않은 경우(Fig. 8)와 보조연료를 공급한 경우(Fig. 12)를 비교하면, 재순환영역 부근의 산소 농도는 보조연료를 공급하지 않은 경우가 높는데, 이는 보조연료로 재순환영역 내에 공급된 LPG로 인하여 이 영역 내에 존재해야 할 일부의 공기가 후류로 밀려나기 때문인 것으로 생각된다. 이산화탄소의 농도는 보조연료를 공급하지 않은 경우가 높고, 프로판 농도는 보조연료로 LPG를 공급한 경우가 높은 것으로 나타났는데, 이것은 보조연료를 공급하지 않은 경우가 보조연료로 LPG를 공급한 경우보다 연료의 확산이 양호하여 연소반응이 활발하게 일어나기 때문이다.

### 3.3 이온전류

#### 3.3.1 평균 이온전류

Fig. 13은 안정상태일 때와 블로오프 직전상태일 때의 화염에 대하여 각각의 화염대 중앙에 있어서 평균 이온전류값의 X방향에 대한 변화를 나타낸 것이다. 여기서 블로오프 직전상태는 화염이 블로오프될 때의 연료 분출량을 10% 증가시켜 화염이 블로오프되지 않고 블로오프되기 직전의 상태로 유지되게 한 상태를 의미한다. Günther<sup>11)</sup>에 의하면, 평균 이온전류값은 반응밀도에 대응한다고 하였으며, 이것으로부터 uniform flow의 경우 안정시에는 보염기 후류의 상당한 위치( $X \approx 50$  mm)까지 반응밀도가 낮은 화염이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 블로오프 직전상태인 경우의  $X \leq 10$  mm 및 안정시의  $X \leq 50$  mm의 영역에는 난류성질이 거의 없는 평탄한 화염(난류로 천이하기 이전의 층류화염)이 형성될 것으로 판단되며, 이는 화염의 육안관찰로써도 확인할 수 있었다.

격자 G3를 설치한 경우 평균 이온전류값이 최대가 되는 위치는 uniform flow의 경우보다 상류측에 존재한다. 이것으로부터 uniform flow의 경우는 격자 G3를 설치한 경우보다 반응밀도가 높은 화염을 형성하기 위해서 상대적으로 긴 시간이 필요하고, 난류의 정도가 약하기 때문에 연료의 확산 또한 상대적으로 불량한 것으로 생각된다. 그러나 격자 G3를 설치한 경우에는 공급된 공기와 연료가 균일하게 혼합되는데 소요되는 시간의 단축 및 난류발생 등의 유동으로 인한 상대적으로 빠른 반응속도의 영향으로 이온전류의 최대 값의 출현이 빨라지는 것으로 생각된다.

난류강도가 큰 격자 G1의 경우는 격자에서 발생된 주류의 매우 강한 난류성분에 의해 연료가 넓고 고르게 확산되기 때문에 평균 이온전류값의 변화비율이 작고 평탄한 분포상태를 나타낸다고 생각된다.

#### 3.3.2 이온전류 변동파형

Fig. 14는 unifrom flow에 대한 이온전류 변동파형을 나타낸 것이다. Fig. 14(a)~(d)는 각각 블로오프 직전상태의  $X=50$  mm에 있어서 주류측 화염대, 화염대 중앙부, 외측 재순환영역, 내측 재순환영역에서의 파형이다. 여기서 주류측 화염대는 화염대

중앙으로부터 재순환영역의 반대방향인 화염대 외부에 가까운 화염대를 의미하며, 외측 재순환영역은 화염대 중앙부에 가까운 재순환영역을, 내측 재순환영역은  $Y=0$  mm인 위치의 재순환영역을 각각 의미한다.

주류측과 재순환영역에서는 화염대 중앙부에 비해 피크수가 적고, 화염면의 통과빈도가 낮은 것을 알 수 있다. 변동레벨은 내측 재순환영역을 제외하고, 화염대의 내측으로 갈수록 높아진다. 내측 재순환영역에서 변동레벨이 낮고, 피크의 형상이 다른 원인은 보염기에 의한 속도손실의 영향이 강하고 화염면의 이동속도가 작기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 15~17은 각각 uniform flow, G3, G1에 대해서 화염대 중앙부에 있어서 블로오프 직전상태와 안정시의 파형을 나타낸 것이다. Uniform flow의 경우, 블로오프 직전상태일 때가 안정시에 비해 피크수가 많고 변동레벨도 높으며, 평균이온전류치가 훨씬 높다. 이것은 블로오프 직전상태인 경우가 화염면의 통과빈도가 높고, 반응밀도가 높은 난류화염인 것에 반해, 안정시의 경우에는 이 X위치에서는 아직 완전한 난류상태로 천이되지 않은 화염인 것을 의미하는 것으로 생각된다. 난류강도가 작은 G3에서는 uniform flow와 유사하고, 피크수가 많으며, 피크는 날카로운 형상이다. Uniform flow 경우의 블로오프 직전상태와 격자 G3를 설치한 경우의 안정시의 파형이 서로 유사하고, uniform flow 경우의 안정시와 격자 G3를 설치한 경우의 블로오프 직전상태의 파형이 서로 유사함을 나타내고 있는데, 이는 Fig. 13의 결과와 잘 일치하고 있다. 또한 난류강도가 큰 격자 G1의 경우, 피크수가 적고, 파형은 둥근 모양을 나타낸다. 결국 G3의 경우 일부분에 강한 반응을 수반하는 화염덩어리가 빠른 속도로 이동하고 있는 것에 비해, G1의 경우는 비교적 반응이 완만한 화염덩어리가 저속으로 이동하고 있는 것이라고 생각된다.

## 4. 결론

고속유동장 내의 연료분출을 수반한 원통형 보염기 후류에 형성되는 확산화염을 대상으로 재순환영역 부근의 난류강도 분포, 연소가스의 농도분포 및 이온전류의 특성을 측정, 고찰하여 다음과 같이 확산화염의 연소특성에 대한 결론을 얻었다.

화염이 형성되는 보염기 후류영역에 대한 난류강도는 격자의 직경이나 구속비가 큰 난류발생격자를 설치한 경우에 크게 나타난다.

주연료를 재순환영역 부근에 근접하여 분출시키거나 재순환영역 내에 농도가 진한 보조연료를 공급한 경우 재순환영역 부근에서 미연 프로판의 농도가 높고, 이산화탄소의 농도는 낮다. 그러나 난류발생격자를 설치할 경우 재순환영역 부근에서 이산화탄소의 농도가 높고, 미연 프로판의 농도는 낮다.

화염대 중앙에 있어서의 평균 이온전류치가 가장 높은 값을 갖는 영역은 블로오프 직전상태에 비해서 안정시의 경우 더욱 하류측에 존재한다. 즉, 주류의 난류성분은 평균 이온전류치가 가장 높은 값을 갖는 영역을 상류측으로 이동시킨다.

난류강도가 작은 경우에는 국소적으로 강한 반응을 갖는 화염덩어리가 빠른 속도로 이동하지만, 난류강도가 큰 경우는 비교적 반응이 완만한 화염덩어리가 저속으로 이동한다.

이상과 같이 연료 분출각의 변화, 난류발생격자의 설치, 재순환영역 내에 보조연료의 공급 등의 방법으로써 확산화염의 연소특성을 제어할 수 있다는 사실을 확인하였다.

## 5.참고문헌

- 1) 辻廣, "高速氣流中における火炎安定化", 日本航空學會誌, 第10卷, 第99號, 1962, pp.122~133.
- 2) K. K. Song, J. G. An and Y. Y. Bae, "A Study on the Stabilization Characteristics of the Diffusion Flame Formed behind a Bluff Body", Proceedings of the Third Asian-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, 1995, pp.261~266.
- 3) O. Fujita, K. Ito and Y. Kuwahara, "Turbulent Structure and Flame Stability of a Diffusion Flame", Proceedings of the First KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 1995, pp.340~344.
- 4) 송규근, "동축분류 예혼합화염에 관한 연구 (I)", 韓國航空宇宙學會誌, 第10卷, 第3號, 1992, pp.107~115.
- 5) 안진근, 송규근, "연료분출을 수반하는 보염기에 의해 안정되는 확산화염의 보염특성", 韓國航空宇宙學會誌, 第25卷, 第2號, 1997, pp.73~80.
- 6) K. Ito, N. Matsumoto, M. Kaji and M. Koyama,

"Stabilization Mechanism of Turbulent Wake Flame behind Bluff Bodies with Fuel Injection", Bulletin of JSME, Vol.27, No.234, 1984, pp.2826~2832.

- 7) 이종순, 노병준, "다목적 아음속 풍동의 완전 국산화 연구", 과학기술처, R-81-2, 1981.
- 8) R. D. Mehta, "The Aerodynamic Design of Blower Tunnels with Wide Angle Diffuser", Pro. Aero. Sci. Vol. 18, 1977, pp.59~120.
- 9) 노병준, 김장권, "2차원 통계학적 난류특성치의 동시측정 및 연산방법", 大韓機械學會誌, 第29卷, 第5號, 1989, pp.507~519.
- 10) L. S. Ettre and A. Zlatkis, "The Practice of Gas Chromatograph", John Wiley & Sons, New York/London/Sydney, 1967, pp.1~49.
- 11) R. Günther, and M. Ahlheim, "Comb. and Flame", Vol. 36, 1979, pp.117.

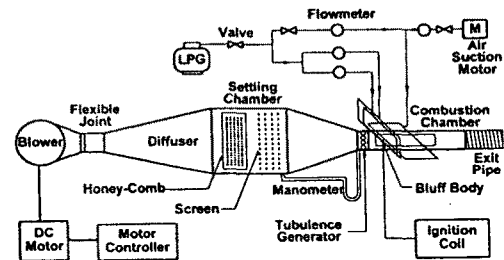


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

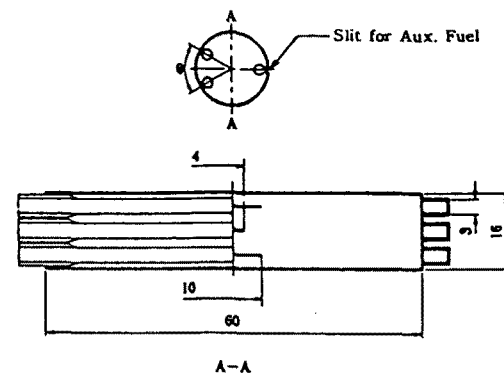


Fig. 2 Shape of bluff body

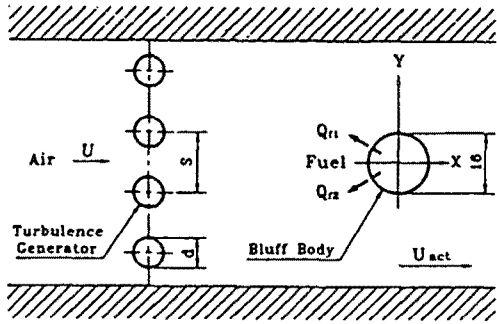


Fig. 3 Arrangement of grid and bluff body

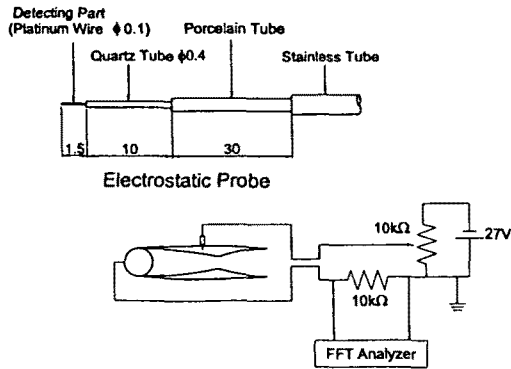


Fig. 4 Schematic diagram of electrostatic probe and ion current measurement system

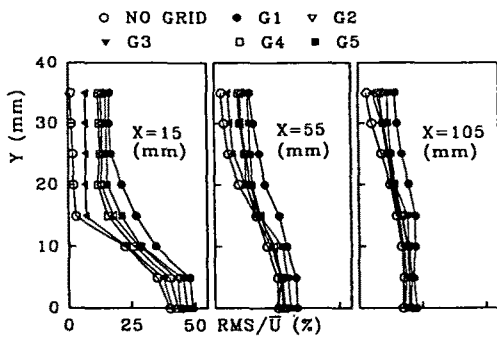


Fig. 5 Distribution of turbulence intensity for turbulence generators

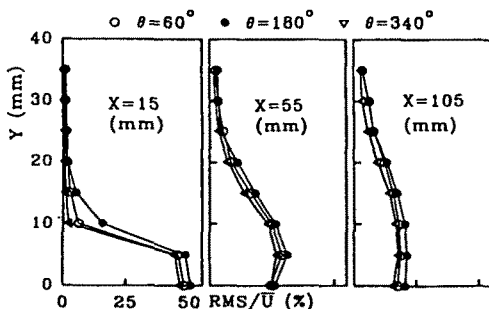


Fig. 6 Distribution of turbulence intensity for fuel injection angles

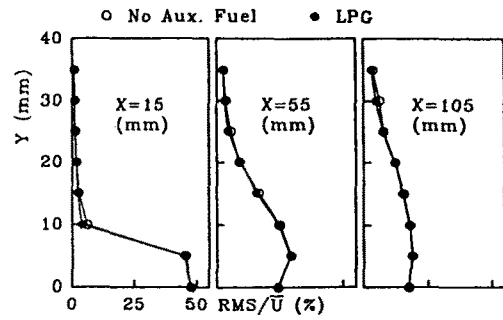


Fig. 7 Distribution of turbulence intensity for LPG injection

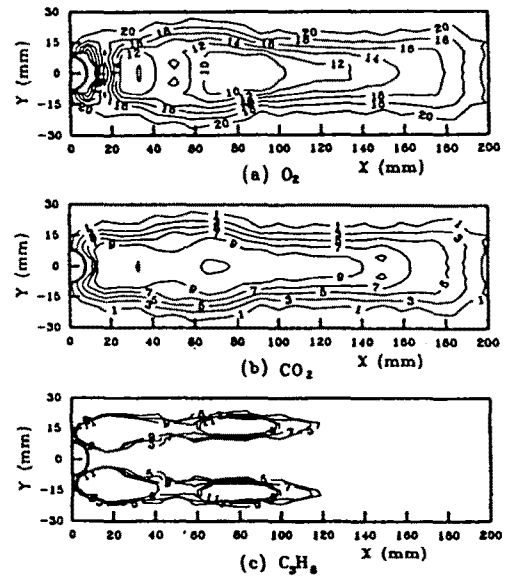


Fig. 8 Concentration distribution of combustion gas at  $\theta = 60^\circ$

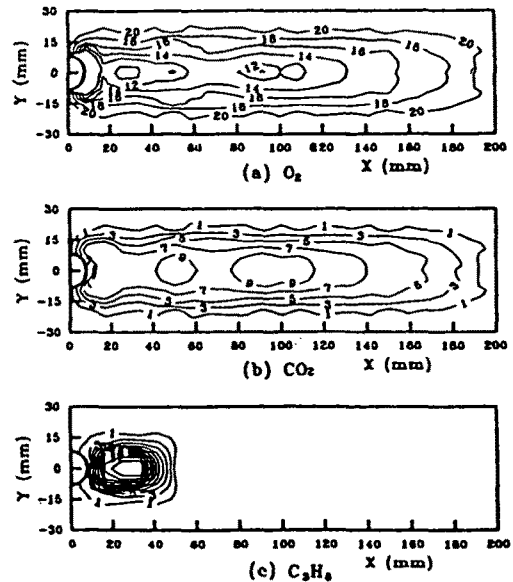


Fig. 9 Concentration distribution of combustion gas at  $\theta = 340^\circ$

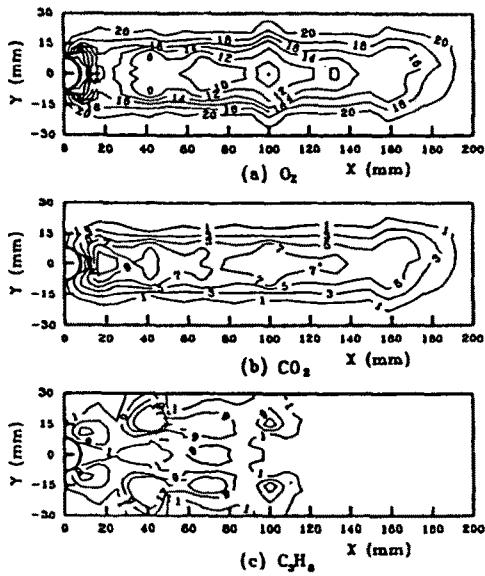


Fig. 10 Concentration distribution of combustion gas without grid

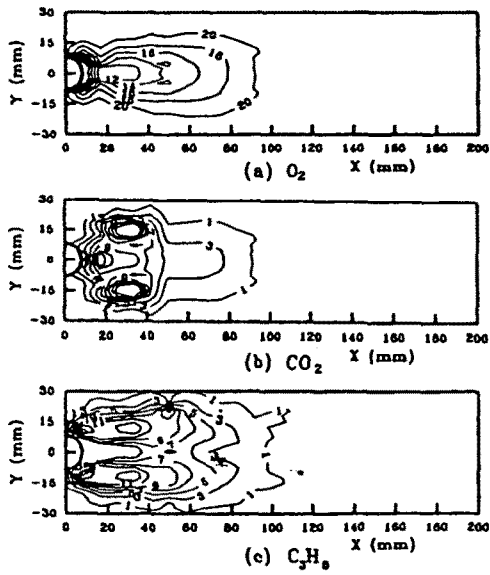


Fig. 11 Concentration distribution of combustion gas with grid

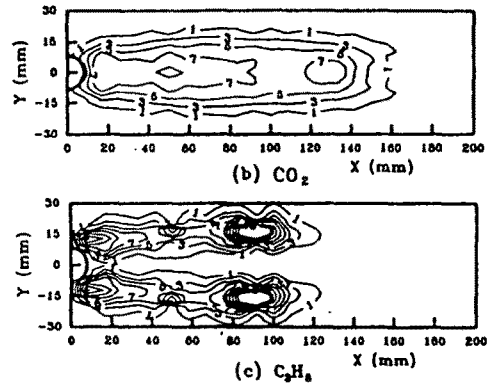
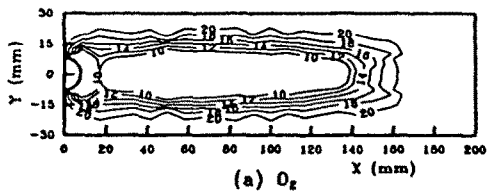


Fig. 12 Concentration distribution of combustion gas with auxiliary fuel injection

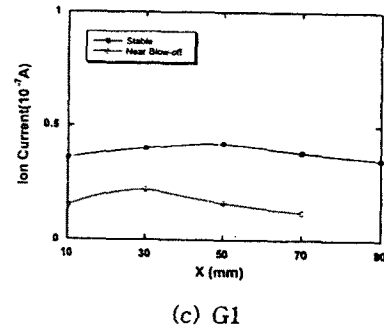
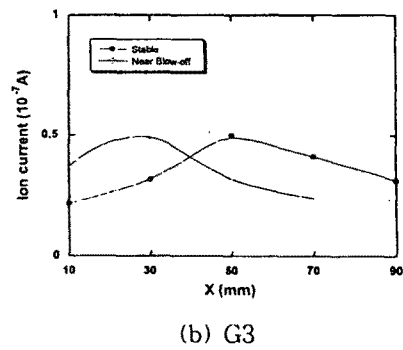
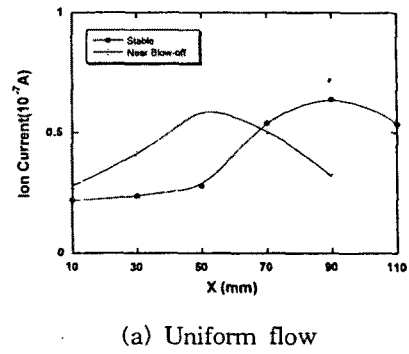
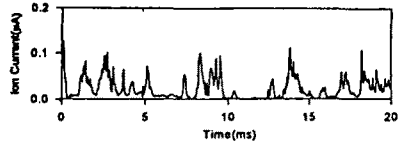
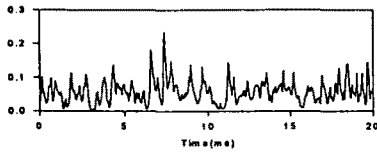


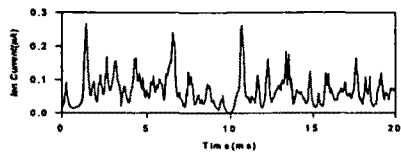
Fig. 13 Average values of ion current



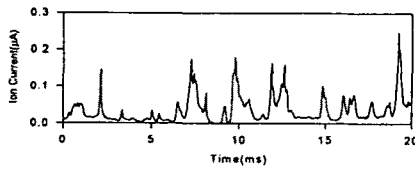
(a)  $X=50\text{mm}$ ,  $Y=12\text{mm}$ ,  $\bar{I}=0.024\ \mu\text{A}$



(b)  $X=50\text{mm}$ ,  $Y=9\text{mm}$ ,  $\bar{I}=0.059\ \mu\text{A}$

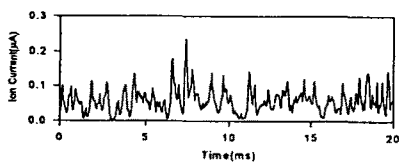


(c)  $X=50\text{mm}$ ,  $Y=3\text{mm}$ ,  $\bar{I}=0.069\ \mu\text{A}$

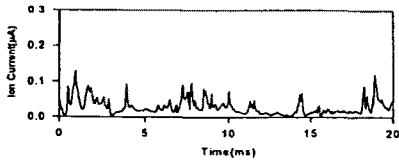


(d)  $X=50\text{mm}$ ,  $Y=0\text{mm}$ ,  $\bar{I}=0.037\ \mu\text{A}$

Fig. 14 Fluctuation waves of ion current for uniform flow ( $U_{\text{act}}=30\ \text{m/s}$ )

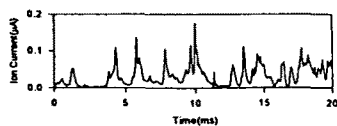


(a) Near Blow-off,  $X=50\text{mm}$ ,  $Y=9\text{mm}$ ,  $\bar{I}=0.059\ \mu\text{A}$

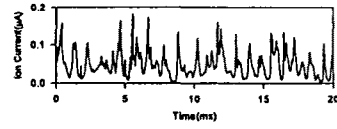


(b) Stable,  $X=50\text{mm}$ ,  $Y=8.5\text{mm}$ ,  $\bar{I}=0.028\ \mu\text{A}$

Fig. 15 Fluctuation waves of ion current for uniform flow ( $U_{\text{act}}=30\ \text{m/s}$ )

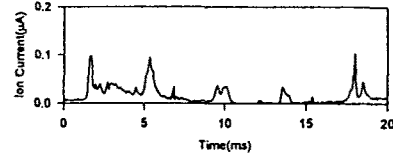


(a) Near Blow-off,  $X=50\text{mm}$ ,  $Y=8\text{mm}$ ,  $\bar{I}=0.032\ \mu\text{A}$

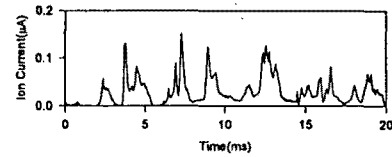


(b) Stable,  $X=50\text{mm}$ ,  $Y=9\text{mm}$ ,  $\bar{I}=0.050\ \mu\text{A}$

Fig. 16 Fluctuation waves of ion current for  $G3(U_{\text{act}}=20\ \text{m/s})$



(a) Near Blow-off,  $X=50\text{mm}$ ,  $Y=12\text{mm}$ ,  $\bar{I}=0.016\ \mu\text{A}$



(b) Stable,  $X=50\text{mm}$ ,  $Y=13\text{mm}$ ,  $\bar{I}=0.042\ \mu\text{A}$

Fig. 17 Fluctuation waves of ion current for  $G1(U_{\text{act}}=10\ \text{m/s})$