

보염기에 의해 안정되는 난류확산화염의 연소특성에 관한 연구

안진근* 송규근**

(A Study on the Combustion Characteristics of Turbulent Diffusion Flame Stabilized by Bluff Body)

J.G.An* K.K.Song**

Key Words : Turbulence Generator, Flame Stability Limits, Average Values of Ion Current, Fluctuation Waves of Ion Current, Autocorrelation Factor, Spectrum Distribution of Fluctuating Ion Current, Probability Density Functions of Fluctuating Ion Current

ABSTRACT

The flame stabilization and the combustion characteristics of diffusion flame formed in the wake of a cylindrical bluff body with fuel injection are studied. With the turbulence generator, the flame stability limits and ion currents were measured and analyzed. The results from this experimental study are summarized as follows. 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. If the turbulence generator with strong turbulent component is installed, the turbulent time scale is increased with movement from main stream side to recirculation zone as well as the flame stability limits is deteriorated. Though the special dominant frequency is not appeared in the eddy which exists in flame, high frequency characteristics are appeared in uniform flow and turbulence generator G3, and low frequency characteristics are appeared in uniform flow, turbulence generator G3 and G1.

1. 서론

산업의 급속한 발전에 따라 세계적으로 에너지의 수요가 급증하고 있으며, 이로 인하여 자동차, 항공기, 보일러 등과 같은 열기관에 대하여 고부하 연소와 더불어 소형화, 경량화가 요구되고 있다.¹⁾ 고부하연소를 위해서는 연소속도를 증가시켜야 하기 때문에 강한 난류유동을 동반하는 고속유동장 내에서의 연소가 필수적이다.²⁾ 고속기류 중에 저항물체인 보염기를 설치하고, 이로부터 연료를 분출시켜 화염을 안정시키는 확산화염의 연소과정은 분출연료와 주류공기와의 혼합과정과 재순환영역의 상태에 따라 크게 지배되며, 연소특성을 결정하는 중요한 인자이다.^{3)~6)}

본 연구의 목적은 실제 항공기의 보조 연소장치에 응용되고 있는 보염기로부터 연료를 분출시켜 형성되는 확산화염의 연소특성을 규명하여 산업용

원동기, 제트기관 등의 실제 연소장치에서 본 연구 결과가 응용될 수 있도록 하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 목적을 달성하기 위해 연료 분출을 수반한 원통형 보염기를 모델로 선택하여 화염류에 있어서의 화염의 안정범위 및 이온전류의 특성을 측정하여 확산화염의 연소특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

본 연구에 사용된 실험장치는 연료공급계통, 공기공급계통, 정류실, 연소실 및 배기덕트 등으로 구성되어 있다. Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타낸다. 주류공기는 송풍기를 통해 유입되어 정체실, 수축부, 난류발생격자를 거쳐 연소실 내에서 주류 유동장을 형성한다. 사용된 연료는 시판용 LPG로서 보염기에 상하 대칭으로 제작된 슬릿(0.5×10mm)을 통해 주류공기를 향하여 분출되어 공기와 확산, 혼합된다. 연소실은 단면120×50mm, 길이1000mm이고, 화염의 직접관찰이 가능하도록 연소실의 양측에 석영유리를

* 정회원, 한국전력기술주식회사

** 정회원, 전북대학교 자동차신기술연구소

설치하였다. 또한 보염기는 직경 16mm, 길이 60mm 인 원통형 황동제로 가공되었으며, Fig. 2에 그의 개략도를 나타낸다.

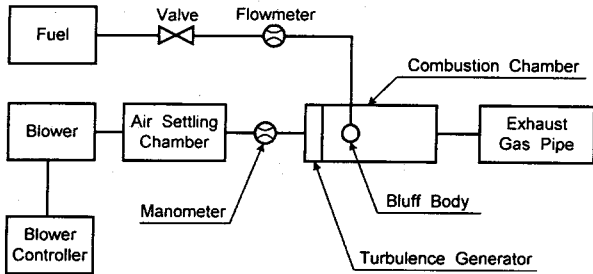


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

銅棒과 아크릴판으로 제작된 2종류의 난류발생격자를 보염기 상류에 각각 설치하였다.⁷⁾ Fig. 3에 난류발생격자와 보염기의 배열을 나타내며, Table 1에 발생격자의 제원을 나타낸다.

난류발생격자 직전 연소실 입구에서의 평균 주류속도는 U (m/s), 평균 주류속도를 보정한 보염기 축중심에서의 평균 주류속도는 보염기에 의한 유로폭 감소를 고려하여 U_{act} (m/s)로 정의하였다. 보염특성을 나타내는 화염의 안정범위는 주류속도 U_{act} (m/s)를 일정하게 하고 연료분출량(Q_f)을 서서히 감소시키는 과정에서 화염이 블로오프될 때까지 일정하게 유지한 주류속도를 해당 연료분출량에 대한 블로오프 속도(U_{bo})로 정의하였다. 또한 보염기 축중심을 원점으로 하여 주류공기가 공급되는 방향인 수평방향을 X방향, 이와 수직인 방향을 Y방향으로 각각 설정하고, 보염기 후류축을 X방향에 대한 정방향으로 정의하였다.

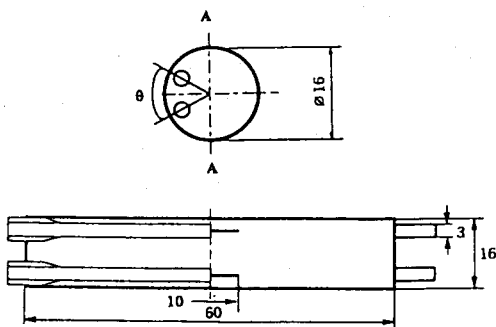


Fig. 2 Shape of bluff body

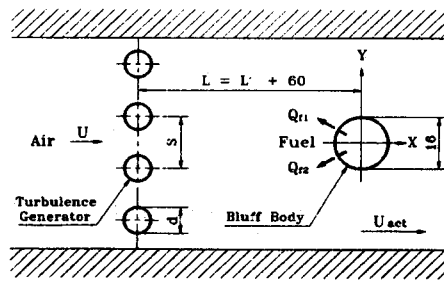


Fig.3 Arrangement of turbulence generator, and bluff body

Table 1. Specification of turbulence generators

Turbulence Generator No.	B_r	S (mm)	d (mm)	n
G1	33	30	10	4
G3	33	7.5	2.6	15

- B_r : blockage ratio (%)
- S : interval of grid (mm)
- d : diameter of grid (mm)
- n : number of grid (mm)

이온전류의 변동을 측정하기 위해 사용된 정전탐침(electrostatic probe)은 프로브의 소선 직경이 0.1mm인 백금이고, 소선의 수감부는 1.5mm이며, 수감부 외부를 석영관으로 피복하여 절연관에 넣어 사용하였다. Fig. 4에 정전탐침의 개략도 및 이온전류 검출회로를 나타낸다. 이온전류의 검출은 보염기 본체를 보상전극으로 하고, 프로브에 -27V를 가하여 프로브에서 얻어진 양이온은 검출회로의 저항(10k Ω)에 의해 전압으로 변환된다. 전압으로 변환된 신호를 FFT Analyzer(AD 3525)에서 파형을 관찰하고 데이터를 저장시켰다.

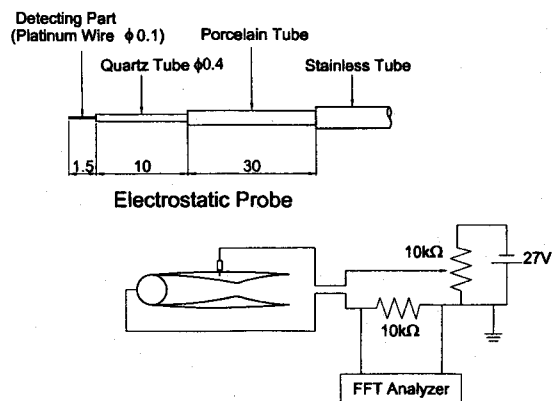


Fig.4 Schematic diagram of electrostatic probe and ion current measurement system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염의 안정범위

Fig. 5에 난류발생 격자를 설치하지 않은 경우 (uniform flow)와 설치한 경우에 대한 화염의 안정범위를 나타낸다.

Fig. 5에서 동일한 주연료 분출량에 대해서 블로오프 속도가 가장 높은 값을 나타내는 것은 난류발생격자를 설치하지 않은 경우이다. 다음으로 격자직경이 작은 G3이며, 블로오프 속도가 가장 낮은 값을 나타내는 것은 격자직경이 큰 G1의 경우이다. 또한 난류강도가 강하다고 판단되는 격자, 즉 격자직경이 큰 격자에 대하여 화염 안정범위가 더 좁아지고 있는데, 이는 난류강도가 강해질수록 난류천이에 의하여 분출된 연료가 주류유동층으로 활발하게 확산되기 때문이다.⁸⁾

이상과 같이 난류발생격자를 이용하여 주류유동에 난류를 가할 경우, 연료분출 확산화염의 보염성은 균일유동의 경우에 비하여 악화되며, 이러한 현상은 난류발생격자의 직경이 클수록 더욱 뚜렷하다.

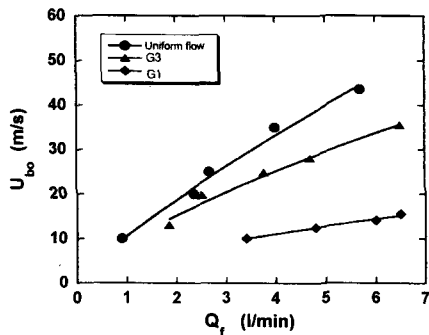


Fig. 5 Flame stability limits

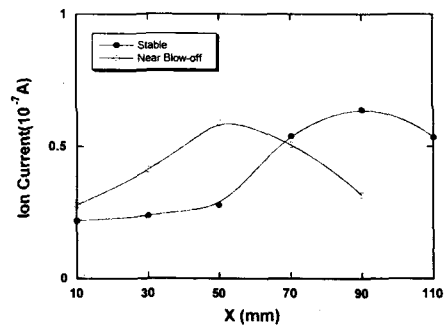
3.2 평균이온전류

Fig. 6은 안정상태일 때와 블로오프 직전상태일 때의 화염에 대하여 각각의 화염대 중앙에 있어서 평균이온전류값의 X방향에 대한 변화를 나타낸 것이다. 여기서 블로오프 직전상태는 화염이 블로오프될 때의 연료분출량을 10% 증가시켜 화염이 블로오프되지 않고 블로오프되기 직전의 상태로 유지되게 한 상태를 의미한다. Günther⁹⁾에 의하면, 평균 이온전류값은 반응밀도에 대응한다고 하였으며, 이것으로부터 uniform flow의 경우 안정시에는 보염기 후류의 상당한 위치(X≈50mm)까지 반응밀

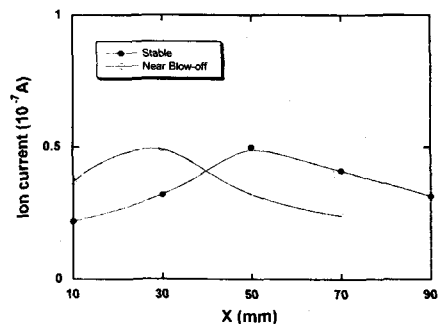
도가 낮은 화염이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 블로오프 직전상태인 경우의 X≤10mm 및 안정시의 X≤50mm의 영역에는 난류성질이 거의 없는 평탄한 화염(난류로 천이하기 이전의 층류화염)이 형성될 것으로 판단되며, 이는 화염의 육안관찰로써도 확인할 수 있었다.

격자 G3를 설치한 경우 평균이온전류값이 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 최대값의 출현이 빨라지는 것으로 생각된다.

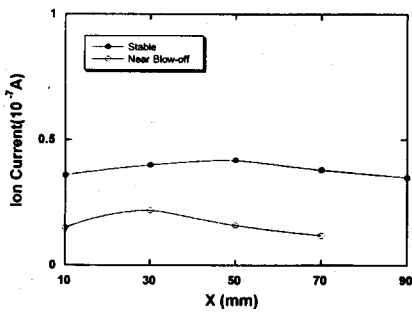
강한 난류성을 나타내는 격자 G1의 경우는 격자에서 발생된 주류의 매우 강한 난류성분에 의해 연료가 넓고 고르게 확산되기 때문에 평균이온전류값의 변화비율이 작고 평탄한 분포상태를 나타낸다고 생각된다.



(a) Uniform flow



(b) G3



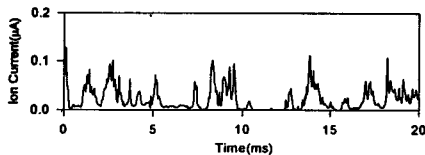
(c) G1

Fig. 6 Average values of ion current

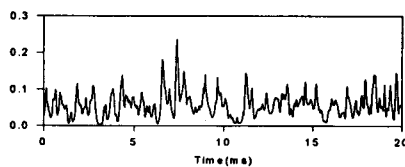
3.3 이온전류변동파형

Fig. 7은 unifrom flow에 대한 이온전류 변동파형을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)~(d)는 각각 블로오프 직전상태의 X=50mm에 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=0mm인 위치의 재순환영역을 각각 의미한다.

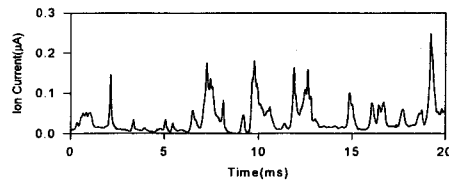
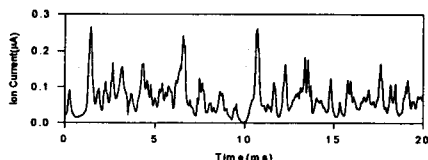
주류측과 재순환영역에서는 화염대 중앙부에 비해 피크(peak)수가 적고, 화염면의 통과빈도가 낮은 것을 알 수 있다. 변동레벨(level)은 내측 재순환영역을 제외하고, 화염대의 내측으로 갈수록 높아진다. 내측 재순환영역에서 변동레벨이 낮고, 피크의 형상이 다른 원인은 보염기에 의한 속도손실의 영향이 강하고 화염면의 이동속도가 작기 때문인 것으로 생각된다.



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



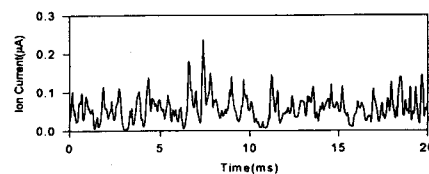
(b) X=50mm, Y=9mm, $\bar{I}=0.059 \mu A$



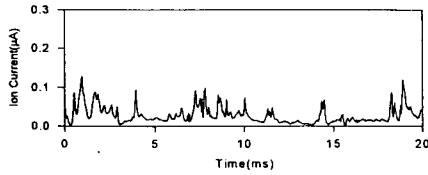
(d) X=50mm, Y=0mm, $\bar{I}=0.037 \mu A$

Fig. 7 Fluctuation waves of ion current for uniform flow($U_{act}=30m/s$)

Fig. 8~10은 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. 난류성이 약한 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. 6의 결과와 잘 일치하고 있다. 또한 강한 난류성을 수반하는 G1의 경우, 피크수가 적고, 파형은 등근모양을 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.

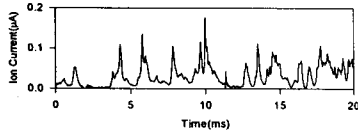


(a) Near Blow-off, X=50mm, Y=9mm, $\bar{I}=0.059 \mu A$

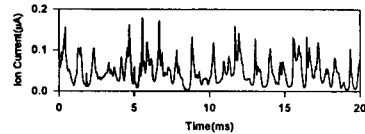


(b) Stable, $X=50\text{mm}$, $Y=8.5\text{mm}$, $\bar{I}=0.028\ \mu\text{A}$

Fig. 8 Fluctuation waves of ion current for uniform flow ($U_{\text{act}}=30\text{m/s}$)

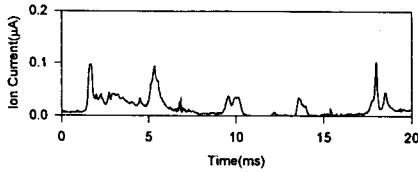


(a) Near Blow-off, $X=50\text{mm}$, $Y=8\text{mm}$, $\bar{I}=0.032\ \mu\text{A}$

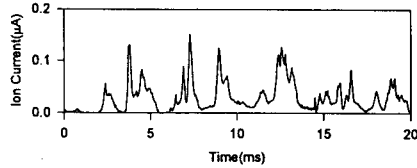


(b) Stable, $X=50\text{mm}$, $Y=9\text{mm}$, $\bar{I}=0.050\ \mu\text{A}$

Fig. 9 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. 10 Fluctuation waves of ion current for G1 ($U_{\text{act}}=10\text{m/s}$)

3.4 자기상관계수

Uniform flow의 경우의 블로오프 직전상태에 있어서 주류측 화염대, 화염대 중앙부 및 재순환영역의 이온전류변동에 대한 자기상관계수를 Fig. 11에 나타낸다. 이들은 샘플링 간격 $\Delta\tau$ 를 $10\ \mu\text{s}$ 로 설정하고, 지연시간이 0~2ms까지의 범위에서 상관계수의 급저하된 부분에 주목한 결과이다. Uniform flow에서는 자기상관에 주기성이 보이지 않고, 이온전류변동은 탁월한 주파수성분을 포함하지 않은 불규칙한 변동인 것을 알 수 있다. 자기상관계수의

급저하된 부분이 늦어지는 것은 하나의 와(渦)의 영향이 긴 시간에 걸쳐 이동하는 것에 대응하기 때문에 난류의 스케일이 큰 것을 의미한다. 재순환 영역에서 주류측으로 감에 따라서 상관계수의 급저하됨이 빨라지고, 주류측의 난류의 시간스케일이 작게 된다.

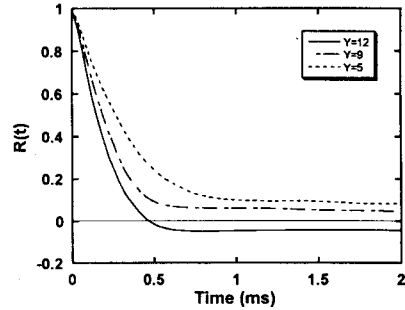


Fig. 11 Autocorrelation of ion currents (Uniform flow, Near Blow-off, $X=50\text{mm}$)

Fig. 12는 자기상관계수에 미치는 격자의 영향을 나타낸 것이다. 블로오프 직전상태의 $X=50\text{mm}$ 에 있어서 화염대 중앙부에 대한 결과이다. 자기상관의 지연된 시간에 대해 급저하되는 부분은 난류성이 가장 약한 uniform flow의 경우가 가장 빨리 나타나고, 이어서 G3, 가장 강한 난류성을 갖는 G1의 경우가 가장 늦다. 이것으로부터 격자에서 생성되는 난류성이 상대적으로 강할수록 화염면의 난류의 시간스케일을 클 것으로 생각된다.

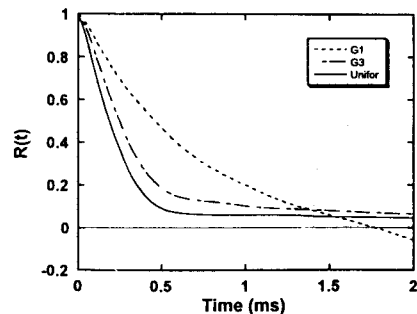


Fig. 12 Autocorrelation for turbulence generators

(Near Blow-off, $X=50\text{mm}$, $Y=$ 화염대중앙부)

블로오프 직전상태의 G3 및 G1에 관한 자기상관함수의 지연시간에 대한 변화를 Fig. 13 및 Fig. 14에 나타낸다. G3, G1 모두 화염대 중앙에서의 결과이다. 두 격자의 경우 모두 보염기 직후의 $X=10\text{mm}$ 에 있어서 상관계수의 급저하되는 부분이 빨리 나타나며, 이보다 하류의 영역으로 갈수록 상관계수의 급저하되는 부분이 늦어진다. 결국, 보염

기 직후에서의 난류의 시간스케일이 가장 작고, 이보다 하류로 갈수록 점점 커지는 것을 알 수 있다.

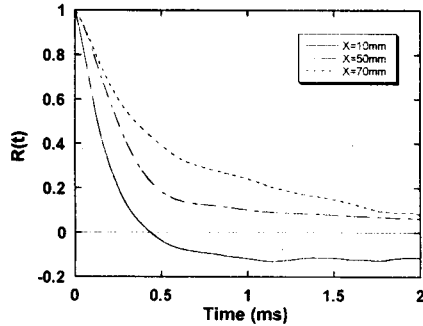


Fig. 13 Autocorrelation for G3 (Near Blow-off, Y=화염대중앙부)

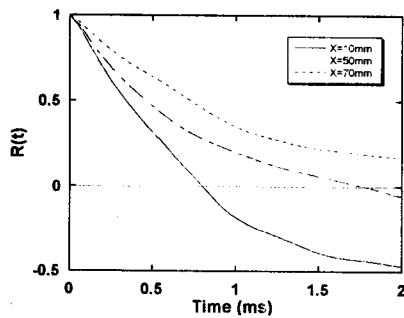


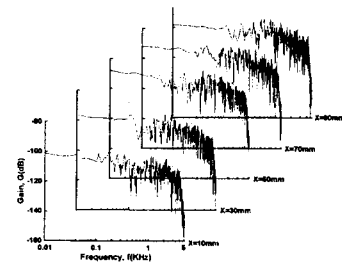
Fig. 14 Autocorrelation for G1 (Near Blow-off, Y=화염대중앙부)

3.5 주파수특성

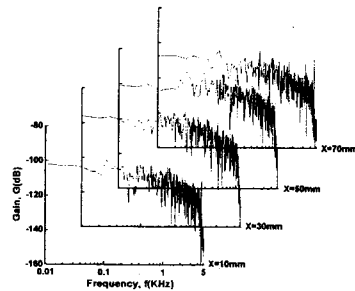
Fig. 15(a)~(c)에 각각 Uniform flow, G3, G1에 대한 이온전류변동의 파워스펙트럼을 나타낸다. 이들은 블로오프 직전상태의 화염대 중앙에 있어서 X방향에 따른 변화를 나타낸 것이다. 전체적인 경향으로는 uniform flow와 G3의 경우 시간스케일이 작은 와(渦)에 대응하는 고주파수영역(500Hz 이상)에 높은 에너지를, G1의 경우는 시간스케일이 큰 와에 대응하는 저주파수영역(500Hz 이하)에 높은 에너지를 갖고 있는 것을 알 수 있다.

Uniform flow의 경우, 와가 주기성을 갖지 않고, 작고 많은 와들로 이루어져 있기 때문에 이온전류변동에 탁월주파수가 보이지 않는다. Equchi¹⁰⁾는 보염기에 의해 안정되는 예혼합화염의 유속변동에 대한 파워스펙트럼에 탁월주파수가 나타나지 않는다고 하였고, 또한 宮内¹¹⁾는 예혼합화염의 난류천이에 관한 연구에서, 보염기에 의해 안정되는 예혼합화염에 대한 온도변동의 주파수분석을 수행한 결과, 레이놀드수가 높은 경우에는 탁월주파수가 존재하지 않는다고 하였다. 본 연구의 uniform flow의 경우에도 주류속도가 30m/s인 비교적 고속

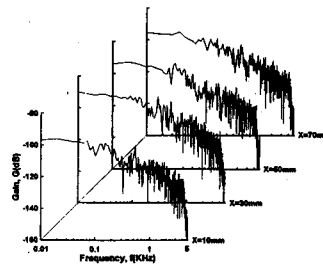
이고, 등온류에 대한 레이놀드수가 10⁴인 것으로부터 블로오프 직전상태에 있어서 uniform flow중에 안정되는 화염은 충분히 발달한 난류상태에 있다고 고려된다. 비교적 작은 난류를 갖는 G3의 경우도 uniform flow와 같이 이온전류변동에 탁월주파수를 갖지 않는다. 그러나, 강한 난류를 갖는 G1의 경우의 이온전류변동은 비교적 저주파의 탁월한 성분을 포함하고 있다는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 G1의 경우에는 격자에서 방출된 와가 화염대 전 영역을 통해 대규모의 반응와를 지배하고, 이온전류 변동특성은 본질적으로 격자의 특성에 의존한다고 판단된다.



(a) Uniform flow(U_{act}=30m/s)



(b) G3(U_{act}=20m/s)



(c) G1(U_{act}=10m/s)

Fig. 15 Spectrum distribution of fluctuating ion current (Y=화염대중앙부)

3.6 확률밀도함수

본 연구에서는 변동량의 통계처리법으로서 가장 일반적인 것 중 하나인 확률밀도함수(probability

density function)를 통해 보염기 후류 확산화염의 구조를 고찰하였다.

Fig. 16(a)~(c)에 uniform flow, 난류발생격자 G3, G1에 대하여 각 조건에 따른 이온전류변동의 확률밀도함수를 나타낸다. 이들은 블로오프 직전상태의 화염대 중앙에 있어서 X방향에 따른 변화를 나타낸 것이다.

Uniform flow와 G3의 경우, 상류로부터 하류에 이르기까지 피크가 위치하는 이온전류치가 거의 일정한 것을 알 수 있으며, 반응밀도가 큰 위치에서 높은 이온전류치까지 PDF분포가 넓게 나타나고 있다. 그러나 G1의 경우, 비교적 반응밀도가 높은 X=30mm영역에서 PDF분포가 넓게 나타나기는 하지만, 전체적으로 비슷한 분포를 갖고 있다. 이는 격자 G1에서 X위치에 대한 평균이온전류값의 변화비율이 작고 평탄한 분포를 갖는 것과 일치한다.

<Fig. 16>

4. 결론

고속유동장 내의 보염기 후류에 형성되는 난류 확산화염을 대상으로 화염의 안정범위 및 이온전류의 변동특성을 측정, 고찰하여 다음과 같이 확산화염의 연소특성에 대한 결론을 얻었다.

1. 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.
2. Uniform flow와 격자 G3의 경우는 국소적으로 강한 반응을 갖는 화염덩어리가 빠른 속도로 이동하지만, G1의 경우는 비교적 반응이 완만한 화염덩어리가 저속으로 이동한다.
3. 난류의 성분이 강한 격자를 설치함에 따라 화염의 주류 유동측에서 재순환영역으로 갈수록 화염의 안정성이 악화되며, 난류의 시간스케일이 커진다.
4. 화염내에 존재하는 와에 대해서 특정 탁월주파수는 나타나지 않지만, 고속인 uniform flow 및 G3의 경우는 큰 스케일에 대응되는 저주파특성 외에도 작은 스케일에 대응되는 고주파특성이 높게 나타났으며, 저속인 G1의 경우는 큰 스케일에 대응되는 저주파특성이 특히 높게 나타났다.

5.참고문헌

1. 辻廣, "燃焼現象論(1)", 機械の研究, 第28卷, 第5號, 1976, pp.669~672.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 안진근, 송규근, "보조연료의 공급이 확산화염의 보염특성에 미치는 영향", 韓國燃焼學會誌, 第1卷, 第1號, 1996, pp.11~18.
 6. 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.
 7. 안진근, 송규근, "연료분출을 수반하는 보염기에 의해 안정되는 확산화염의 보염특성", 韓國航空宇宙學會誌, 第25卷, 第2號, 1977, pp.73~80.
 8. 鈴木擁宏, 木谷勝, "にく離・再付着流れに對する主流亂れの影響", 日本機械學會論文集(B篇), 第51卷, 第461號, 1985, pp.317~324.
 9. R. Günther, and M. Ahlheim, "Comb. and Flame", Vol. 36, 1979, pp.117.
 10. S. Fujii and K. Eguchi, "A Compatision of Cold and Reacting Flows Around a Bluff Flame Stabilizer", Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol.103, 1981, pp.328~334.
 11. 宮内, "燃焼 シンボ", 第22號, 1984, pp.260.