한국에너지공학회지(2000), 제9권 제2호
Energy Engg J(2000), Vol. 9, No. 2, pp. 146~155

이온전류의 특성을 이용한 확산화염의 연소특성 고찰

안 진 근
한국전력기술주식회사

A Study on The Combustion Characteristics of Diffusion Flame by Analysis of Ion Currents Characteristics

J.G. An
Korea Power Engineering Company Inc.

요 약

연료분출을 수반하는 원통형 보염기 후류에 형성되는 확산화염에 대한 이온전류의 특성과 화염의 안정범위를 측정, 분석함으로써 연소특성을 고찰하였다. 난류강도가 큰 경우의 화염일수록 화염의 안정성은 악화되며, 화염대 중앙의 평균 이온전류 값이 가장 높은 값을 갖는 영역은 블로오프 직전상태에 비해서 안정시의 경우 더욱 하류측에 존재한다. 난류의 정도가 약한 화염의 경우 국소적으로 반응이 활발한 화염 덩어리가 빠른 속도로 이동하며, 난류의 정도가 강한 화염의 경우에는 반응이 완만한 화염 덩어리가 저속으로 이동한다. 재순환영역에서 주류유동 측으로 이동함에 따라 자기상관 계수의 저하가 빨라지고 난류 시간스케일이 작아지며, 보염기 직후에서 하류로 이동함에 따라 자기상관 계수의 저하가 늦어지고 난류 시간스케일이 커진다. 주류공기에 강한 난류를 가하지 않은 경우에는 큰 난류 시간스케일에 대응되는 저주파수 특성 외에도 작은 난류 시간스케일에 대응되는 고주파수 특성이 나타나며, 주류공기에 강한 난류를 가한 경우에는 큰 난류 시간스케일에 대응되는 저주파수 특성이 나타난다.

Abstract — The combustion characteristics of diffusion flame formed in the wake of a cylindrical bluff body with fuel injection are experimentally studied by analysis of measured ion currents characteristics and flame stability limits at each flame condition. Installing of turbulence generator with strong turbulent component, the flame stability limits are deteriorated. The region that has the highest average value of ion currents in the middle of flame zone is located on the down stream side at a stable condition compared with a near blow off condition. The flame mass with partially active reaction is moved fast for the flame with weak turbulent component, but the flame mass with relatively slow reaction is moved slowly for the flame with strong turbulent component. The autocorrelation factor of ion currents and turbulent time scale are affected by the horizontal and vertical distance from bluff body. Though the special dominant frequency is not appeared in the eddy which exists in flame, high frequency characteristics as well as low frequency characteristics are appeared in the cases that turbulence generator is not installed and turbulence generator with weak turbulent component is installed, and low frequency characteristics are appeared in the case that turbulence generator with strong turbulent component is installed.

1. 서 론

최근 경제, 산업의 눈부신 발전으로 인하여 에너지 소비량의 급진적인 증가와 환경오염에 대한 문제가 발생됨에 따라 자동차, 산업용 원동기, 항공용 제트기관 등에 열출력이 큰 고부하 연소기의 개발이 요구되고 있으며, 실제로 연소공학적인 입장에서 높은 연소효율, 저공해 연소 및 고부하 연소에 관한 관심이 높아지고 있다. 제트기관, 대출력 보일러 등의 출현으로 이들에 대한 연소기의 부하가 비약적으로 발전하였으며, 장치의 소형화와 더불어 대출력을 위한 고부하 연속연소가 요구되고 있다[1]. 고부하 연속연소의 경우에 열부하를 증가시키기

위해서는 고속 유동장 내의 연소가 필수적이지만, 고속 유동장 내에서는 화염을 안정시키기가 어렵기 때문에 화염의 안정성이 중요한 문제로 등장하게 되었으며, 화염의 안정화와 관련된 많은 연구가 수행되었다[1]-[11]. 일반적으로 고속 유동장 내에서 화염을 안정하게 유지시키는 방법의 기본개념은 연소실 내의 일정한 위치에 가연성 혼합기의 연소속도에 상응하는 저속, 고온영역을 형성시켜 그 영역이 연속연소에 필요한 열 및 활성화학종의 공급원 역할을 하도록 하는 것이다[1]. 이와 같은 개념을 이용하여 화염의 안정성 또는 화염의 여러 특성에 대한 많은 연구가 수행되었다[1]-[10][12]-[15]. 고속기류 중에 저항물체인 보염기를 설치하고, 이로부터 연료를 분출시켜 화염을 안정시키는 확산화염의 연소과정은 분출된 연료와 주류공기의 혼합과정 및 재순환영역의 상태에 따라 크게 지배되며, 연소특성을 결정하는 중요한 인자이다[1][6][7]. 한편, 층류연소에 관한 이론은 거의 체계화되었다고 볼 수 있으나, 실제 연소장치의 연소형태인 난류연소에 대해서는 매우 복잡한 화학반응과 유동으로 인하여 현상론적인 입장에서 명확한 연소모델이 제시되지 못하고 있다[6].

본 연구는 항공기의 보조 연소장치에 응용되고 있으며, 산업용 원동기, 제트기관 등의 실제 연소장치에 응용될 수 있는 보염기로부터 연료를 분출시켜 형성되는 확산화염의 연소특성을 규명하고자 수행되었다. 본 연구에서는 연료분출을 수반하는 원통형 보염기를 모델로 선택하여 고속 유동장 내의 화염에 대한 화염의 안정범위, 평균 이온전류, 이온전류 변동파형, 자기상관 계수, 주파수 특성 등을 측정, 분석하여 확산화염의 연소특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 측정장치

본 연구에 사용된 실험장치는 공기 및 연료 공급계통, 정류실, 난류발생격자, 연소실, 원통형 보염기, 점화장치, 배기덕트 등으로 구성되었으며, Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타낸다. 송풍기를 통해 유입된 공기는 정류실, 수축부를 거치면서 균일 유동장을 형성하고, 이 유동장 내

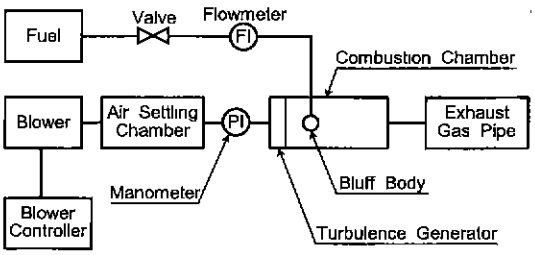


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

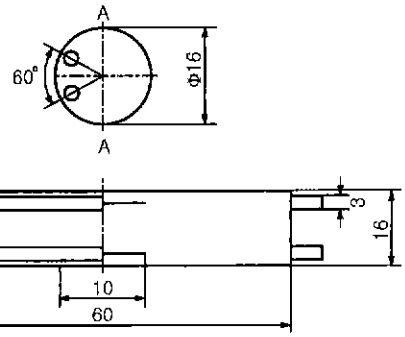


Fig. 2. Shape of bluff body.

에 설치된 보염기로부터 연료를 분출, 점화시키면서 실험을 수행하였다. 시판용 LPG(liquefied petroleum gas)를 연료로 사용하였으며, 이 연료는 보염기에 상하 대칭으로 60°의 각도를 유지하여 가공된 슬릿(0.5×10 mm²)을 통해 주류공기를 향하여 분출되어 공기와 확산, 혼합되도록 하였다. 연소실의 단면 및 길이는 각각 120×50 mm², 1000 mm이고, 화염의 육안관찰이 가능하도록 연소실의 양측에 석영유리를 설치하였다. 보염기는 직경 16 mm, 길이 60 mm인 원통형 황동으로 가공되었으며, Fig. 2에 그의 개략도를 나타낸다. 鋼棒과 아크릴 판으로 제작된 2종류의 난류발생격자를 보염기 상류에 각각 설치하였다. Fig. 3에 난류발생격자를 설치한 경우에 대한 난류발생격자와 보염기의 배열을 나타내며, Table 1에 본 연구에 사용된 난류발생격자의 제원을 나타낸다.

난류발생격자 직전 연소실 입구에서 공기의 평균 주

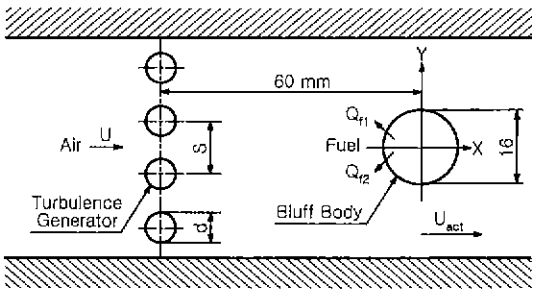


Fig. 3. Arrangement of turbulence generator and bluff body.

Table 1. Specification of turbulence generators.

Turbulence Generator	S (mm)	d (mm)	n
G1	30	10	4
G3	7.5	2.6	15

S: Interval of Grid, d: Diameter of Grid, n: Number of Grid

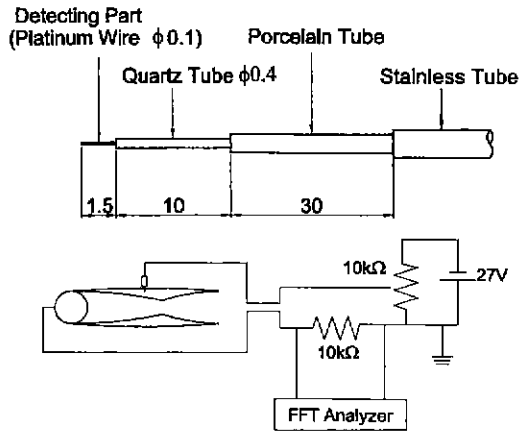


Fig. 4. Schematic diagram of electrostatic probe and ion currents measurement system.

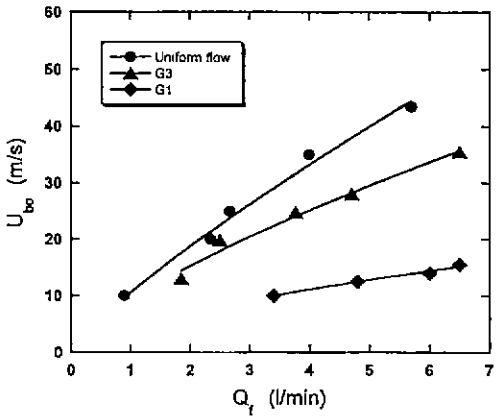


Fig. 5. Flame stability limits.

류속도는 U(m/s), 공기의 평균 주류속도를 보정한 보염기 축중심에서 공기의 평균 주류속도는 보염기에 의한 유로 폭 감소를 고려하여 U_{act}(m/s)로 정의하였다. 보염특성을 나타내는 화염의 안정범위는 공기의 주류속도 U_{act}(m/s)를 일정하게 하고, 연료 분출량(Q_f)을 서서히 감소시키면서 화염이 블로오프될 때까지 일정하게 유지한 공기의 주류유속을 해당 연료 분출량에 대한 블로오프 속도(U_{bo})로 정의하였다. 또한 보염기 축중심을 원점으로 하여 주류공기가 공급되는 방향인 수평방향을 X 방향, 이와 수직인 방향을 Y 방향으로 각각 설정하고, 보염기 후류측을 X 방향에 대한 정방향으로 정의하였다.

이온전류 변동을 측정하기 위해 실험에 사용한 정전탐침의 개략도와 이온전류 검출회로도를 Fig. 4에 나타낸다. 이온전류의 변동을 측정하기 위해 사용된 정전탐침(electrostatic probe)은 프로브의 소선 직경이 0.1 mm인 백금이고, 소선의 수감부는 1.5 mm이며, 수감부 외부를 석영관으로 피복하여 절연관에 넣어 사용하였다. 프로브를 고온의 화염 내에 투입하는 경우 석영의 절연성, 소선의 내열성 및 열전자 방출 등의 문제가 발생될 수 있지만, 본 실험에서 격자를 설치하지 않은 경우는 주류공기(U_{act}=30 m/s)에 의한 냉각작용이 있고, 또 격자를 설치한 경우의 화염은 전체적으로 온도가 낮기 때문에 가장 고온이 되는 재순환영역을 제외하면, 석영의 절연성과 내열전자 방출에 의한 영향은 중요한 문제가 되지 않는 것으로 생각된다. 이온전류의 검출은 보염기 본체를 보상전극으로 하고, 프로브에 −27 V를 가하여 프로브에서 얻어진 양이온은 검출회로의 저항(10 kΩ)에 의해 전압으로 변환된다. 전압으로 변환된 신호를 FFT Analyzer(AD 3525)에서 파형을 관찰하고 데이터를 저장시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 화염의 안정범위

Fig. 5에 난류발생격자를 설치하지 않은 경우(uniform flow)와 난류발생격자 G3 또는 G1을 설치한 경우에 대한 화염의 안정범위를 나타낸다.

동일한 연료 분출량에 대해서 블로오프 속도가 가장 높은 값을 나타내는 것은 난류발생격자를 설치하지 않은 uniform flow의 경우이다. 다음으로 격자 직경이 작은 난류발생격자 G3를 설치한 경우이며, 블로오프 속도가 가장 낮은 값을 나타내는 것은 격자 직경이 큰 난류발생격자 G1을 설치한 경우이다. 즉, 난류강도가 강하다고 판단되는 격자[9]를 설치한 경우에 대하여 화염 안정범위가 더 좁아지는데, 이는 난류강도가 강해질수록 난류천이에 의하여 분출된 연료가 주류유동 측으로 활발하게 확산되기 때문인 것으로 판단된다[16]. Uniform flow의 경우에는 연료 분출량의 증가에 따라 블로오프 속도가 거의 직선적으로 증가한다. 그러나 난류발생격자를 설치한 경우에는 Q_f=3 l/min 이하의 영역에서는 연료 분출량의 증가에 따라서 블로오프 속도가 어느 정도 직선적으로 증가하지만, 연료 분출량이 많은 영역에서는 블로오프 속도의 증가율이 둔화되는 경향을 보인다. 특히 난류발생격자 G1을 설치한 경우에는 이러한 경향이 뚜렷하다. 이와 같은 현상은 난류발생격자 G1을 설치한 경우 주류유속을 소폭으로 증가시켜도 난류발생격자 G1에 의해 매우 강한 난류가 형성되기 때문에 난류발생격자를 설치하지 않은 경우나 난류발생격자 G3를 설치한 경우보다 연료 분출량의 증가에 따른 영향이 적고, 분출된 연료가 쉽게 확산되어 블로오프 조건에 빨리 도달하기 때문인 것으로 생각된다.

이상과 같이 난류발생격자를 이용하여 주류유동에 난류를 발생시킬 경우, 연료분출 확산화염의 보염성은 균

일유동의 경우에 비하여 악화되며. 이러한 현상은 난류발생격자의 직경이 클수록 더욱 뚜렷하다.

3-2. 평균 이온전류

Fig. 6은 안정상태일 때와 블로오프 직전상태일 때의 화염에 대하여 난류발생격자를 설치하지 않은 경우(uniform flow)와 난류발생격자 G3 또는 G1을 설치한 경우에 대한 각 화염대 중앙에 있어서 평균 이온전류 값의

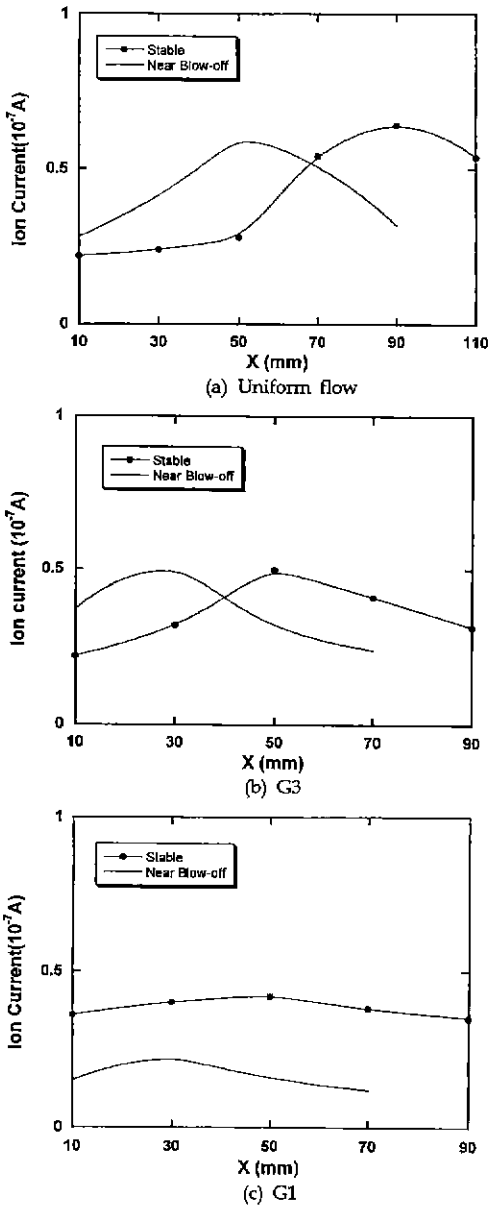


Fig. 6. Average values of ion currents.

X 방향에 대한 변화를 나타낸 것이다. 블로오프 직전상태(near blow-off)는 화염이 블로오프될 때의 연료 분출량을 10% 증가시켜 화염이 블로오프되지 않고 블로오프되기 직전의 상태로 유지되게 한 상태를 의미한다.

Uniform flow의 블로오프 직전상태의 경우에서 평균 이온전류 값은 보염기 직후에서 낮은 값을 나타내지만, X ≤50 mm의 범위에서는 하류로 갈수록 증가하고, X=50 mm에서 최대가 된 후 그 하류에서는 서서히 감소한다. 안정시에 있어서도 같은 경향을 나타내지만, 블로오프 직전에 비해 현저히 다른 점은 X=10~50 mm에 있어서 평균 이온전류 값의 증가비율이 매우 낮고, 또 최대 값에 도달하는 위치가 X=90 mm인 하류측으로 이동하는 것이다. Ahlheim과 Günther[7]에 의하면, 평균 이온전류 값은 반응밀도에 대응한다고 하였으며, 이것으로부터 uniform flow의 경우 안정시에는 보염기 후류의 일정한 위치(X=50 mm)까지 반응밀도가 낮은 화염이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 블로오프 직전상태인 경우의 X≤ 10 mm 및 안정시의 X≤50 mm의 영역에서는 난류성분이 거의 없는 평탄한 화염(난류로 천이하기 이전의 층류화염)이 형성될 것으로 판단되며, 이는 화염의 육안관찰로써도 확인할 수 있었다.

난류발생격자 G3를 설치한 경우 평균 이온전류 값이 최대가 되는 위치는 uniform flow의 경우보다 상류측에 존재한다. 이것으로부터 uniform flow의 경우는 난류발생격자 G3를 설치한 경우보다 반응밀도가 높은 화염을 형성하기 위해서 상대적으로 긴 시간이 필요하고, 난류의 정도가 약하기 때문에 연료의 확산이 상대적으로 불량한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 난류발생격자 G3를 설치한 경우에는 공급된 연료와 공기가 균일하게 혼합되는 데 소요되는 시간이 짧고 난류발생격자에 의해 난류가 발생됨으로 인하여 상대적으로 반응속도가 빨라지기 때문에 최대 이온전류 값의 출현이 빨라지는 것으로 생각된다.

강한 난류를 발생시키는 난류발생격자 G1을 설치한 경우에는 X 위치에 대한 평균 이온전류 값의 변화비율이 작고 평탄한 분포상태를 보인다. 또 모든 X 위치에 있어서 블로오프 직전상태보다 안정시의 평균 이온전류 값이 높다. 이는 난류발생격자에서 발생된 매우 강한 난류성분에 의해 연료가 넓고 고르게 확산되어, 전체적으로 매우 희박한 상태로 되기 때문에 연료 분출량을 증가시킬수록 이론 혼합기에 가까운 상태로 되고, 화염대의 모든 영역을 통해 연료량의 증가에 의존하여 평균적으로 반응밀도가 높아지기 때문인 것으로 판단된다

3-3. 이온전류 변동파형

Fig. 7은 난류발생격자를 설치하지 않은 경우(uniform flow)에 대한 이온전류 변동파형을 나타낸 것이다. Fig.

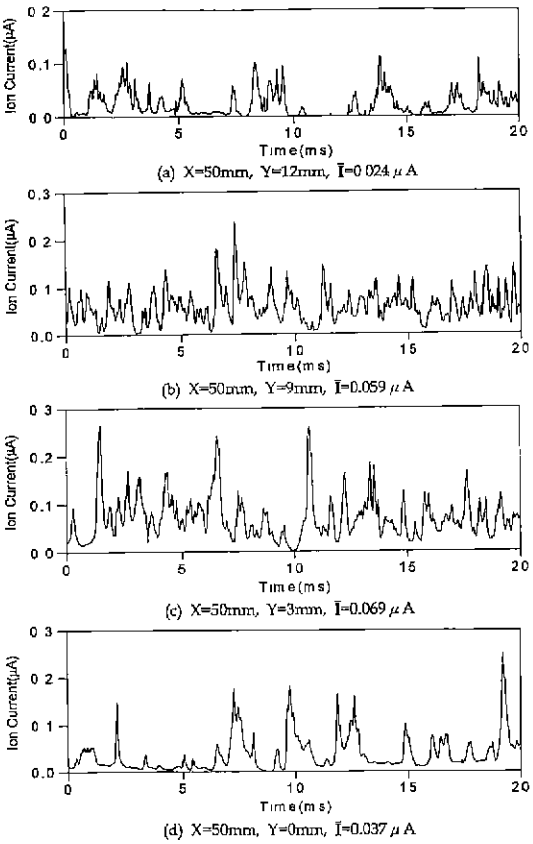


Fig. 7. Fluctuation waves of ion currents for uniform flow (U_{act}=30 m/s).

7(a)~(d)는 각각 블로오프 직전상태의 X=50 mm에 있어서 주류측 화염대, 화염대 중앙부, 외측 재순환영역, 내측 재순환영역에서의 이온전류 변동파형이다. 주류측 화염대는 화염대 중앙으로부터 재순환영역의 반대 방향인 화염대 외부에 가까운 화염대를 의미하며, 외측 재순환영역은 화염대 중앙부에 가까운 재순환영역을, 내측 재순환영역은 Y=0 mm인 위치의 재순환영역을 각각 의미한다

주류측 화염대와 내측 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 크고 화염면의 이동속도가 작기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 8~10은 난류발생격자를 설치하지 않은 경우(uniform flow)와 난류발생격자 G3 또는 G1을 설치한 경우에 대해서 화염대 중앙부에 있어서 블로오프 직전상태와 안정시의 이온전류 변동파형을 나타낸 것이다. Uniform

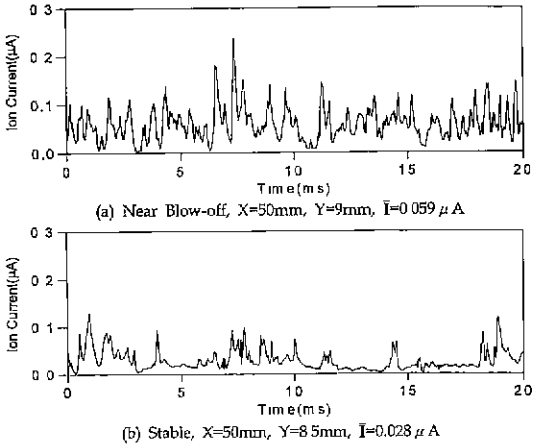


Fig. 8. Fluctuation waves of ion currents for uniform flow (U_{act}=30 m/s).

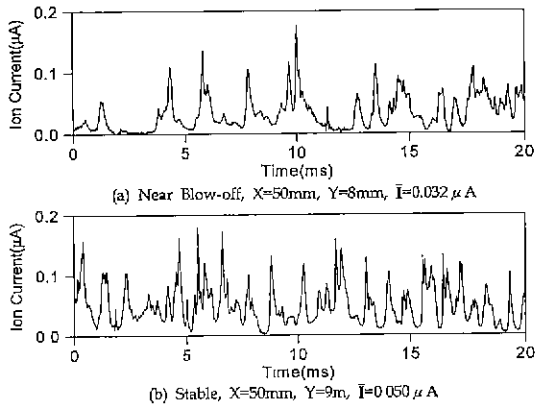


Fig. 9. Fluctuation waves of ion currents for turbulence generator G3 (U_{act}=20 m/s).

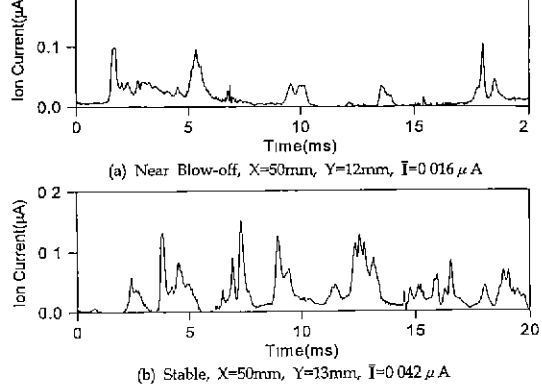


Fig.10 Fluctuation waves of ion currents for turbulence generator G1 (U_{act}=10 m/s).

flow의 경우, 블로오프 직전상태일 때가 안정시에 비해 피크수가 많고 변동레벨도 높으며, 평균 이온전류 값이 훨씬 높다. 이것은 블로오프 직전상태인 경우가 화염면의 통과빈도가 높고, 반응밀도가 높은 난류 화염인 것에 반해, 안정시의 경우 이 X 위치에서는 완전히 난류상태로 천이되지 않은 화염상태인 것으로 생각된다. 난류성분이 약한 난류발생격자 G3를 설치한 경우는 uniform flow의 경우와 유사하고 피크수가 많으며, 피크는 날카로운 형상을 나타낸다. Uniform flow 경우의 블로오프 직전상태와 난류발생격자 G3를 설치한 경우의 안정시의 파형이 서로 유사하고, uniform flow 경우의 안정시와 난류발생격자 G3를 설치한 경우의 블로오프 직전상태와 파형이 서로 유사함을 나타내고 있는데, 이는 3.2절에서 언급한 Fig. 6의 결과와 잘 일치하고 있다. 또한 강한 난류성분을 수반하는 난류발생격자 G1을 설치한 경우 피크수가 적고, 날카롭지 않은 무딘 파형을 나타낸다 결국 난류발생격자 G3를 설치한 경우 일부분에 강한 반응을 수반하는 화염덩어리가 빠른 속도로 이동하고 있는 것에 비해 난류발생격자 G1을 설치한 경우에는 비교적 반응이 완만한 화염덩어리가 저속으로 이동한다고 생각된다.

3-4. 자기상관 계수

일반적으로 불규칙한 해석에 대한 유용한 수단으로서 상관함수와 스펙트럼에 의한 통계처리가 있다 본 연구에서는 등온류의 이온전류 변동의 함수에 주목하여 난류현상을 해석하였다. 시간에 관한 불규칙 변동 x(t)가 주기성이 강한 경우, 주기의 정수배 시간 축을 겹치지 않도록 하면 원래의 파형과 상당히 유사하게 나타난다. 따라서 일정한 시간 τ 만큼 편차가 있는 파형이 원래의 파형과 유사한 정도를 조사하고, 파형중의 주기성분을 판별하는 것은 x(t)와 x(t+τ)의 상관을 구하면 된다. τ시간만큼 편차가 있는 두 변동량 x(t)와 x(t+τ)의 곱의 평균값으로 정의된 통계적 함수를 자기상관 함수라고 한다. 정상 확률과정에서는 자기상관 함수를 시간평균으로 변환할 수 있으며, 시간 t와 관계없는 지연시간 τ의 함수로 정규화 한 것이 자기상관 계수이다.

난류 스케일은 불규칙 변동의 자기상관 함수로부터 구한 난류의 특성시간(시간스케일) 혹은 특성시간에 대류속도를 곱한 공간 스케일로 표현할 수 있다. Taylor의 가설은 난류가 동질성이고 흐름이 일정한 평균속도(U_m)를 갖는 경우에 성립한다고 가정한 것이며, 일반적으로 $[(u')^2]^{0.5}/U_m \ll 1$과 같은 난류장에 있어서 난류스케일은 평균속도(U_m)와 특성시간(τ)의 곱으로 표현된다

난류발생격자를 설치하지 않은 경우(uniform flow) 블로오프 직전상태의 X=50 mm 위치에서 주류측 화염대, 화염대 중앙부 및 재순환영역의 이온전류 변동에 대한 자기상관 계수를 Fig 11에 나타낸다. 이들은 샘플링 간격 △τ를 10 μs로 설정하고 지연시간 0~2 ms까지의 범위에서 상관 계수가 급저하된 부분에 대한 결과이다. Uniform flow의 경우 자기상관에 주기성이 보이지 않고, 이온전류 변동은 탁월한 주파수 변동을 포함하지 않은 불규칙한 변동인 것을 알 수 있다. 자기상관 계수가 급저하된 부분에서 난류의 시간스케일을 파악할 수 있다 자기상관 계수의 급저하된 현상이 늦어지는 것은 하나의 와(渦)가 긴 시간에 걸쳐 이동하는 것을 나타내기 때문에 이러한 경우에는 난류의 시간스케일이 큰 것을 의미한다고 할 수 있다. 재순환영역에서 주류측으로 이동함에 따라서 자기상관 계수의 저하가 빨라지고 난류 시간스케일이 작아진다.

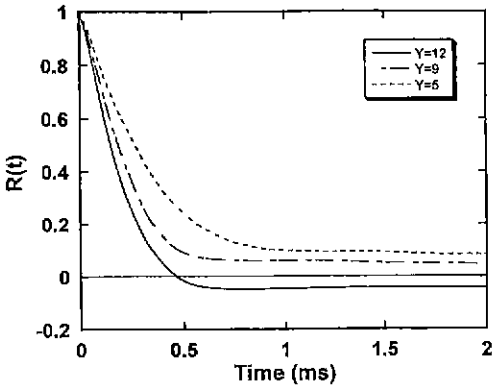


Fig. 11. Autocorrelation of ion currents for uniform-flow (near blow-off, X=50 mm).

Fig. 12는 자기상관 계수에 미치는 난류발생격자의 영향을 나타낸 것이다. 블로오프 직전상태의 X=50 mm에 있어서 화염대 중앙부에 대한 결과이다. 자기상관의 지

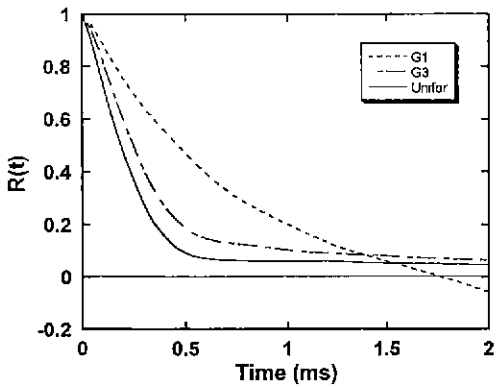


Fig. 12. Autocorrelation of ion currents for turbulence generators (near blow-off, X=50 mm, Y=middle of flame zone).

연된 시간에 대해 급저하되는 부분은 난류성분이 가장 약한 uniform flow의 경우가 가장 빨리 나타나고, 다음은 난류발생격자 G3를 설치한 경우이며, 가장 강한 난류성분을 갖는 난류발생격자 G1을 설치한 경우가 가장 늦게 나타난다. 이것으로부터 격자에서 발생되는 난류성분이 상대적으로 강할수록 화염면의 난류 시간스케일은 큰 것으로 생각된다.

난류발생격자 G3 또는 G1을 설치한 경우 블로오프 직전상태의 자기상관 함수의 지연시간에 대한 변화를 Fig. 13 및 Fig. 14에 나타낸다. 난류발생격자 G3 또는 G1을 설치한 경우, 모두 화염대 중앙부에 대한 결과이다. 두 난류발생격자의 경우 모두 보염기 직후의 X=10 mm에 있어서 상관 계수의 급저하되는 부분이 빨리 나타나며, 이보다 하류 영역으로 이동할수록 상관 계수의 급저하되는 부분이 늦어진다. 결국 보염기 직후에서의 난류 시간스케일이 가장 작고, 이보다 하류로 이동할수록 점점 커지는 것을 알 수 있다.

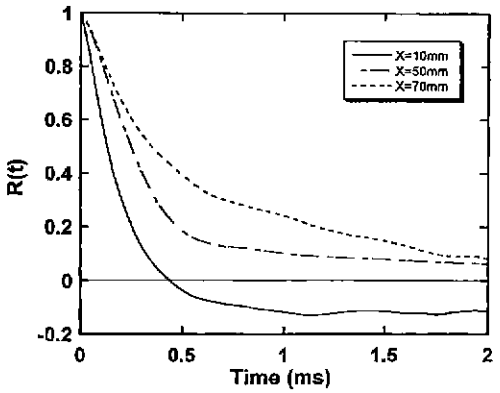


Fig. 13. Autocorrelation of ion currents for turbulence generator G3 (near blow-off, Y=middle of flame zone).

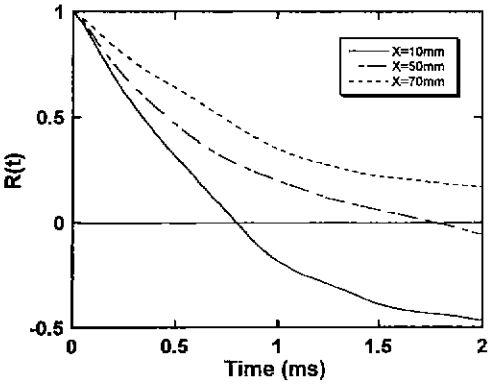
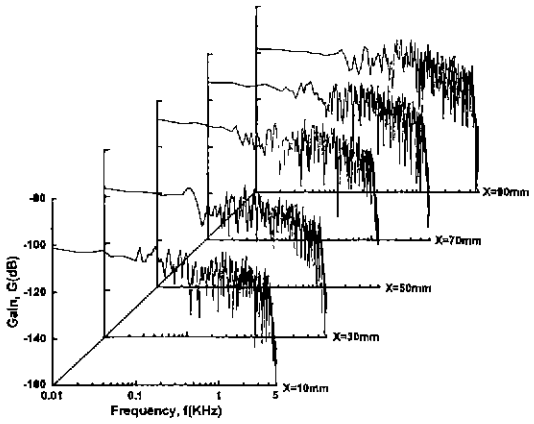


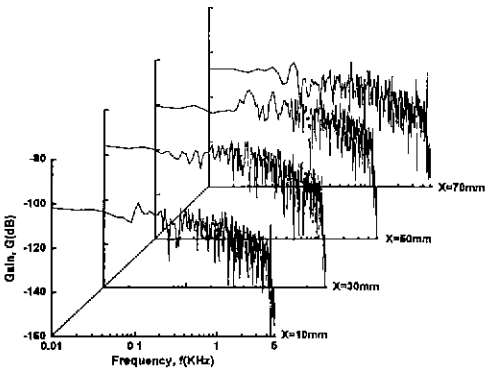
Fig. 14. Autocorrelation of ion currents for turbulence generator G1 (near blow-off, Y=middle of flame zone).

3-5. 주파수 특성

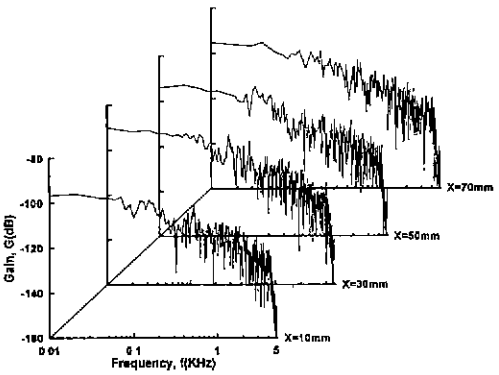
Fig. 15(a)~(c)에 난류발생격자를 설치하지 않은 경우



(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 currents (Y=middle of flame zone).

(uniform flow)와 난류발생격자 G3 또는 G1을 설치한 경우에 대한 이온전류 변동의 파워스펙트럼을 나타낸다. 이들은 블로오프 직전상태의 화염대 중앙부에 있어서 X 방향에 따른 변화를 나타낸 것이다. Uniform flow의 경우와 난류발생격자 G3를 설치한 경우, 시간스케일이 큰 와(渦)에 대응하는 저주파수 영역(500 Hz 이하)에서는 물론, 시간스케일이 작은 와에 대응하는 고주파수 영역(500 Hz 이상)에서도 비교적 높은 에너지가 나타난다. 그러나 난류발생격자 G1을 설치한 경우 시간스케일이 큰 와(渦)에 대응하는 저주파수 영역(500 Hz 이하)에서는 높은 에너지가 나타나지만, 시간스케일이 작은 와에 대응하는 고주파수 영역(500 Hz 이상)에서는 낮은 에너지가 나타난다.

Uniform flow의 경우, 와(渦)가 주기성을 갖지 않고, 작고 많은 와(渦)들로 이루어져 있기 때문에 이온전류 변동에 탁월 주파수가 나타나지 않는다고 생각된다. 한편 Equchi[12]는 보염기에 의해 안정되는 예혼합화염의 유속변동에 대한 파워스펙트럼에 있어서 탁월 주파수가 나타나지 않는다고 하였다. 비교적 약한 난류를 발생시키는 난류발생격자 G3를 설치한 경우에도 uniform flow의 경우와 같이 이온전류 변동에 탁월한 주파수를 나타내지 않는다. 그러나, 강한 난류를 발생시키는 난류발생격자 G1을 설치한 경우에는 이온전류 변동은 비교적 저주파의 탁월한 성분을 포함하고 있는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 난류발생격자 G1을 설치한 경우에는 난류발생격자에서 방출된 와(渦)가 화염대 전 영역을 통해 대규모의 반응 와(渦)를 지배하며, 이온전류 변동특성은 본질적으로 난류발생격자의 특성에 의존한다고 판단된다.

또한 난류발생격자를 설치하지 않은 경우(uniform flow)와 난류발생격자 G3 또는 G1을 설치한 경우에 대하여 Y 방향에 따른 파워스펙트럼 분포도 고찰하였는 바, 모든 경우의 화염에 대하여 외측 화염대에서 내측 화염대로 갈수록 저주파 영역의 에너지가 높아지는 것을 알 수 있었으며, 이는 3.4절에서 언급한 바와 같이 내측 화염대로 갈수록 시간스케일이 커지는 경향과 일치한다. Uniform flow의 경우와 난류발생격자 G3를 설치한 경우에는 탁월 주파수가 나타나지 않았으나, 난류발생격자 G1을 설치한 경우에는 저주파수 영역에서 탁월 주파수를 볼 수 있었다. 결국 난류발생격자 G1을 설치한 경우의 화염은 저주파의 주기적 와류의 경향이 강하고, uniform flow의 경우와 난류발생격자 G3를 설치한 경우의 화염은 저주파 성분을 포함하지 않은 충분히 발달된 난류상태인 것으로 생각된다.

3-6. 확률밀도 함수

본 연구에서는 변동량의 통계처리법으로서 가장 일반적인 방법중의 하나인 확률밀도 함수(probability density function)를 통하여 확산화염의 연소특성을 고찰하였다.

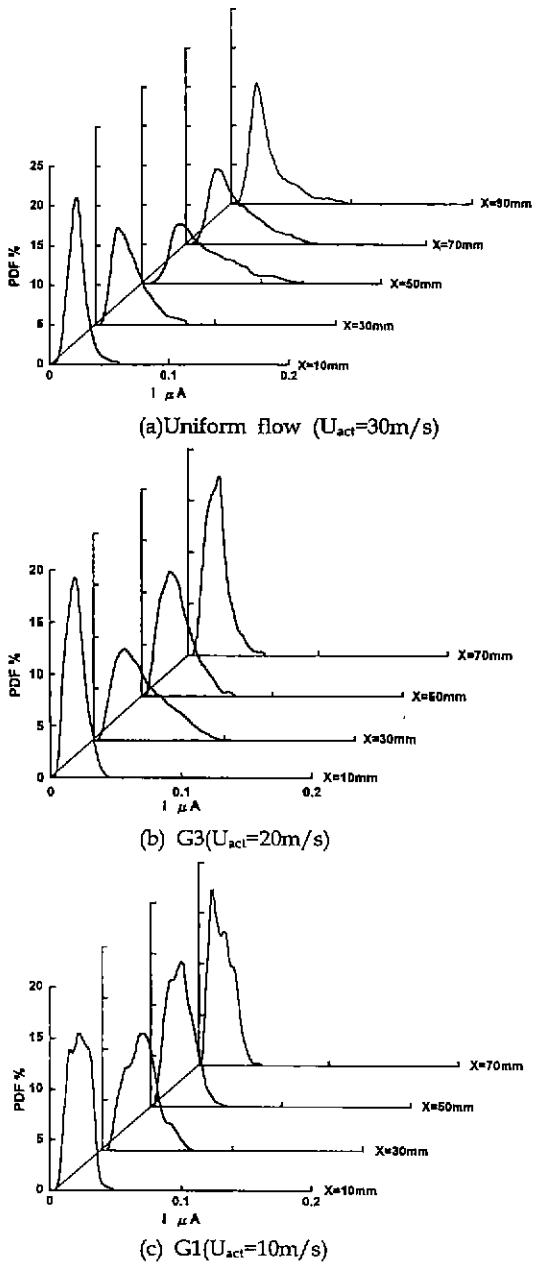


Fig. 16. Probability density functions of fluctuating ion currents (Y=middle of flame zone).

Fig. 16에 난류발생격자를 설치하지 않은 경우(uniform flow)와 난류발생격자 G3 또는 G1을 설치한 경우에 대하여 각 조건에 따른 이온전류 변동의 확률밀도 함수를

나타낸다. 이들은 블로오프 직전상태의 화염대 중앙부에 있어서 X 방향에 따른 변화를 나타낸 것이다. Uniform flow의 경우와 난류발생격자 G3를 설치한 경우, 상류로부터 하류에 이르기까지 피크가 위치하는 이온전류 값이 거의 일정한 것을 알 수 있으며, 반응밀도가 큰 위치에서 높은 이온전류 값까지 확률밀도 분포가 비교적 넓게 나타나고 있다. 그러나 난류발생격자 G1을 설치한 경우, 비교적 반응밀도가 높은 X=30 mm의 영역에서 확률밀도 분포가 넓게 나타나기는 하지만, 전체적으로 X 방향에 따른 확률밀도는 비슷한 분포를 나타낸다. 이는 3.2절에 언급된 바와 같이 난류발생격자 G1을 설치한 경우 X 위치에 대한 평균 이온전류 값의 변화율이 작고 평탄한 분포를 나타내는 것과 일치한다.

또한 난류발생격자를 설치하지 않은 경우(uniform flow)와 난류발생격자 G3 또는 G1을 설치한 경우에 대하여 블로오프 직전상태의 화염에 있어서 이온전류 변동의 Y 방향에 따른 변화도 고찰하였는 바, uniform flow의 경우 내측 재순환영역을 제외하고 주류측 화염대에서 내측 화염대로 갈수록 이온전류 값이 높은 값에서 높은 확률을 나타냈으며, 외측 재순환영역에서는 피크를 볼 수 없는 확률밀도 분포를 보였다. 이는 3.3절에서 언급한 바와 같이 보염기에 의한 속도손실과 화염면의 이동속도가 작기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 난류발생격자 G3를 설치한 경우와 G1을 설치한 경우에도 나타났다. 난류발생격자 G3를 설치한 경우, 전체적으로 uniform flow의 경우와 비슷한 경향을 보였으며, 모든 화염대에 있어서 피크가 위치하는 이온전류 값이 거의 일정한 것을 알 수 있었다. 난류발생격자 G1을 설치한 경우에도 비슷한 경향을 나타냈으며, 주류측 화염대와 화염대 중앙부에서 두 개의 피크를 갖는 분포를 나타냈다

4. 결 론

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

화염대 중앙부의 평균 이온전류 값이 가장 높은 값을 갖는 영역은 블로오프 직선상태에 비해서 안정시의 경우 더욱 하류측에 존재한다. 즉, 주류의 난류성분으로 인하여 화염의 상류측에서 평균 이온전류 값이 가장 높게 나타나며, 연료의 확산을 촉진시켜 화염의 반응밀도를 높인다.

난류발생격자를 설치하지 않은 경우와 난류성분이 비교적 약한 난류를 발생시키는 난류발생격자를 설치한 경우 국소적으로 강한 반응을 수반하는 화염 덩어리가 빠른 속도로 이동하지만, 난류성분이 강한 난류를 발생시키는 난류발생격자를 설치한 경우는 비교적 반응이 완만한 화염 덩어리가 저속으로 이동한다.

재순환영역에서 주류측으로 이동함에 따라 자기상관계수의 저하가 빨라지고, 주류측의 난류 시간스케일이 작아진다. 또한 난류강도가 클수록 화염면의 난류 시간스케일은 커지며, 화염의 안정성은 악화된다. 보염기 직후에서 난류 시간스케일이 작고 이보다 하류로 이동함에 따라 난류 시간스케일이 커진다.

화염내에 존재하는 와(渦)에 대해서 특정 탁월 주파수는 나타나지 않지만, 주류유속이 고속인 난류발생격자를 설치하지 않은 경우와 약한 난류를 발생시키는 난류발생격자를 설치한 경우에는 큰 난류 시간스케일에 대응되는 저주파수 특성 외에도 작은 스케일에 대응되는 고주파수 특성이 나타난다. 주류유속이 저속인 강한 난류를 발생시키는 난류발생격자를 설치한 경우에는 큰 난류 시간스케일에 대응되는 저주파수 특성이 나타난다.

참고문헌

1. Song, K.K., An, J.G. and Bae, Y.Y.: "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, I, 261 (1995)
2. Gross, R.M., Baer, A.D. and Ryan, N.W.: "Flame Stabilization on Fuel-Wetted Cylinders", Combustion and Flames, 25, 121 (1975).
3. Kundu, K.M., Banerjee, D. and Bhaduri, D.: "Theoretical Analysis on Flame Stabilization by a Bluff Body", Combustion Science and Technology, 17, 153 (1977).
4. Rao, K.V.L. and Lefebvre, A.H.: "Flame Blowoff Studies Using Large-Scale Flame Holders", Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, 104, 853 (1982).
5. Mizutani, Y., Kasashi, M. and Ueda, M.: "Mechanism of Flame Stabilization for Gas Burners of Radial Injection Type with a Bluff Body", Transactions of The JSME (Series B), 49(439), 724 (1983).
6. Ito, K., Matsumoto, N., Kaji, M. and Koyama, M.: "Stabilization on Mechanism of Turbulent Wake Flame behind Bluff Bodies with Fuel Injection", Bulletin of JSME, 27(234), 2826 (1984).
7. Fujita, O., Ito, K. and Kuwahara, Y.: "Turbulent Structure and Flame Stability of a Diffusion Flame", Proceedings of the First KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 1, 340 (1988)

8. Ishino, Y., Yamaguchi, S. and Ohiwa, N.: "Flame Structure and Stabilization in a Divergent Flow (Relationship between Flame Stability and Eddy Structure behind a Circular Cylinder)", Transactions of the JSME (Series B), 56(528), 2469 (1990).
9. Li, J. and Zhao, H.F.: "A Study of Premixed Flame Stabilization by Using Opposed Jet", Proceedings of the Third Asian-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, I, 290 (1995).
10. An, J.G. and Song, K.K : "Stabilization Characteristics of the Diffusion Flame Stabilized by the Flame Holder with Fuel Injection", The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 25(2), 73 (1997).
11. Schefer, R.W. and Goix, P.J.: "Mechanism of Flame Stabilization in Turburlent, Lift-Jet Flames", Combustion and Flame, 112, 559 (1998).
12. Fuji, S. and Eguchi, K.: "A Comparison of Cold and Reacting Flows Around a Bluff Body Flame Stabilizer", Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, 103, 328 (1981).
13. Yamaguchi, S., Ohiwa, N., Hasegawa, T. and Wada, S.: "Structure and Blow-off Mechanism of Rod-Stabilized Premixed Flame", Combustion and Flame, 62, 31 (1985).
14. Lee, C.E. and Onuma, Y.: "Experimental Study of Turbulent Diffusion Flames Stabilized on a Bluff Body (1st Report, Flame Structure)", Transactions of the JSME (Series B), 57(544), 4266 (1991).
15. Lee, C.E., Yang, O.Y. and Onuma, Y.. "Modelling of Turbulent Diffusion Flames Stabilized on a Bluff Body", Transactions of The JSME (Series B), 58(552), 2577 (1992).
16. Suzuki, Y. and Kiya, M.: "Effects of Free- Stream Turbulence on Separated-Reattaching Flows for Different Angles of Separation", Transactions of The JSME (Series B), 51(461), 317 (1985).
17. Ahlheim, M. and Günther, R.: "Ionization Measurements in Free-Jet Diffusion Flames", Combustion and Flame, 36, 117 (1979).