〈論 文〉

Bluff Body 후류에 형성되는 확산화염의 보염특성에 관한 연구

안진근* · 배윤영* · 송규근**

(1995년 2월 3일 접수)

A Study on the Stabilization Characteristics of the Diffusion Flame Formed Behind a Bluff Body

Jin-Geun An, Yoon-Yeong Bae and Kyu-Keun Song

Key Words : Diffusion Flame(확산화염), Fuel Injection Angle(연료 분출각), Fuel Injection Ratio(연료 분출비), Flame Stability Limits(화염 안정한계), Turbulence Generator(난류발생격자), Extension Duct(연장덕트), Recirculation Zone(재순환영역)

Abstract

The stability of diffusion flame formed behind a bluff body with fuel injection slits was experimentally investigated in various fuel injection angles, fuel injection ratios, grids and extension ducts. The flame stability limits, temperature distributions and length of recirculation zones, direct photographs of flames were measured in order to discuss the stabilization mechanism of the diffusion flame. The results from this study are as follows. The fuel injection angle is an important factor in determing the flame stability. Stability limits can be imporved by variety of the fuel injection ratio. When the grid and extension duct are set, stability characteristics are varied with the blockage ratios, grid intervals, and grid numbers. The recirculation zone not only serves as a steady ignition source of combustion stream but also governs the stabilization mechanism.

1. 서 론

최근 산업의 급속한 발전에 따라 세계적으로 에너지 수요의 증대와 환경오염의 깊은 인식 아래 자동차, 산업용 원동기, 항공용 제트기관 등에서 장치의 소형 경량화와 더불어 고출력 고부하 연소가 요구되고 있다. 고부하 연소를 위해서는 강한 난류, 고속 기류장에서의 연소가 필연적이나, 난류의 증가, 기류의 고속화 등에 따라 연소실내 일정 위치에서 화염을 정상화시키기가 어려워진다. 이 문제를 해결하기 위해 고속 유동장에서 연소속도와 비슷한 고온영역을 만들어 주면 된다.[1] 이러한 개념의 화염안정화 방법으로는 Bluff Body,[2] Recessed Wall,[3] 대향분류[4] 두꺼운 림을 갖는 동축분류[5] 등이 있는데 이런 방법에 의한 화염의 안정화는 보염기 후류의 재순환영역이 중요한 역할을 한다.[5~8]

고속기류 중에 설치된 보염기로부터 연료를 분출시켜 형성되는 화염을 안정화시키는 확산화염의 연소과정은 연료와 주류공기의 혼합과정에 의해 지배되며, 보염특성 및 화염의 구조를 결정하는 중요한 인자가 된다.

이에 본 연구에서는 고속기류 중에 설치된 보염기를 사용하여 연료 분출유량비, 연료 분출각, 난류발생격자 및 연장덕트 등의 변화에 따른 화염의 형상, 안정범위 등을 측정하여, 보염특성을 밝히고

*정회원, 한국원자력연구소
**정회원, 전북대학교 정밀기계공학과

자 한다.

2. 실험장치 및 측정방법

본 연구에 사용된 실험장치는 연료 공급계통, 공기 공급계통,[9,10] 정류실, 난류발생격자, 연장덕트, 연소실, 배기덕트 및 점화장치 등으로 구성된다. 송풍기를 통해 유입된 공기는 정체실, 수축부, 난류발생격자 및 연장덕트를 거치면서 유동장을 형성하며, 이 유동장내에 설치된 원통형 보염기로 부터 연료를 분출시키면서 실험을 수행하였다. 본 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다.

사용된 연료는 시판용 LPG로서 보염기에 상하 대칭으로 제작된 슬릿($0.5\times10\,mm^2$)으로 부터 주류에 향하여 연료 분출유량비(Q_{f1}/Q_{f2}) 1/0, 1/1, 1/2 및 1/5, 연료 분출각(θ) 60°, 120°, 180°, 240°, 300° 및 340° 등의 조건으로 분출된다. 보염기의 두 슬릿을 통하여 공급된 연료량(Q_f)중 상측의 슬릿을 통하여 분출되는 량을 Q_{f1}으로, 하측의 슬릿을 통하여 분출되는 량을 Q_{f2}로 각각 설정하였으며, $Q_f=Q_{f1}+Q_{f2}$의 관계가 성립한다. 여기서 연료 분출유량비(Q_{f1}/Q_{f2})는 상측 및 하측의 슬릿을 통하여 분출되는 각 연료유량의 상대적인 비율을 말한다. 연소실은 단면 $120\times50\,mm^2$, 길이 1000 mm이고, 화염의 직접관찰 및 사진촬영을 위해 양측 벽에 석영유리를 설치하였다. 또한 보염기는 황동제로 직경 16 mm, 길이 60 mm인 원통형 bluff body이며, 그 구조를 Fig. 2에 나타낸다.

주류공기의 난류유동이 화염의 보염특성에 미치는 영향을 검토하기 위해 Table 1에 나타낸 바와 같은 5종류의 난류발생격자($G1$, $G2$, $G3$, $G4$, $G5$)와 각각 길이(L')가 40, 60, 90, 140, 190 mm인 연장덕트를 사용하였으며, 연장덕트를 설치할 경우, 격자중심과 보염기 중심간의 거리(L)는 $L=L'+60$(mm)이다. 난류발생격자, 연장덕트 및 이들의 상호배열 등에 대한 개략도를 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타낸다. 난류발생격자는 간격 L을 거리로 두고, 보염기 상류에 설치하였다. 격자 직전 연소실 입구에서의 평균 주류속도는 U(m/s), 주류속도를 보정한 보염기 축중심에서의 평균 주류속도는 보염

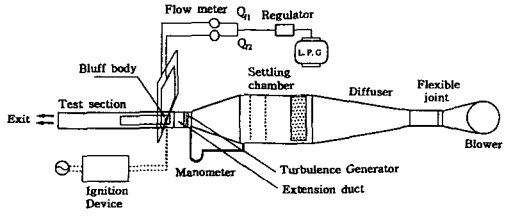


Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

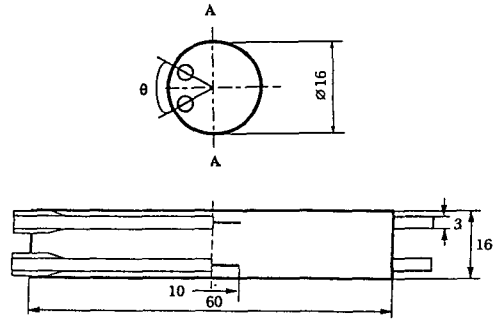


Fig. 2 Shape of bluff body

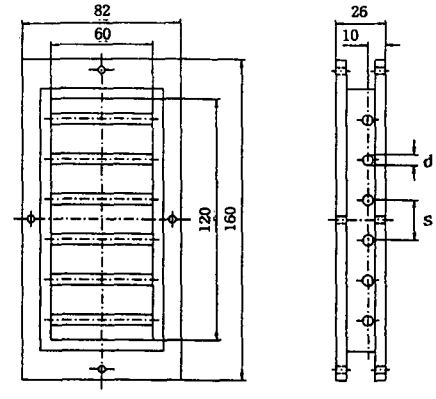


Fig. 3 Schematic diagram of turbulence generator (Grid)

Table 1 Turbulence generators

Turbulence generator No.	Blockage ratio (%)	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

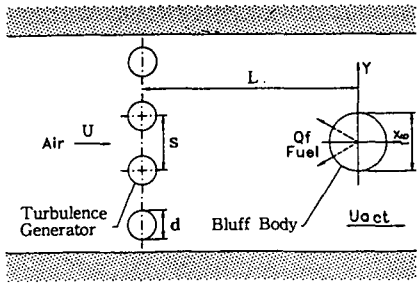


Fig. 4 Arrangement of turbulence generator and bluff body

기에 의한 유로폭 감소를 고려하여 U_{act}(m/s)로 하였다. 재순환영역의 길이를 측정하기 위하여 보염기 후류에 식염수(NaCl)를 보염기의 축방향으로 주입하였다. 이 때 식염수는 화염류 내에서 강한 나트륨 반응을 일으키며, 이 염화나트륨 tracer가 상하류 쌍방향으로 확산하기 시작하는 지점까지의 거리를 재순환영역의 길이로 정의하였다. 재순환영역의 온도측정은 소선의 지름이 0.1 mm인 Pt-Pt/Rh 10%의 S형 열전대를 사용하였다. 측정된 아날로그 데이타의 디지털로의 변환에는 8 Bit A/D 변환기를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염 안정범위

보염특성을 나타내는 화염 안정범위는 주류유속(U_{act})을 일정하게 한 후 공급 연료량(Q_f)을 서서히 감소시켜 화염이 blow off 될때의 주류속도에 대하여 나타냈다. Blow off 곡선의 상측은 화염이 존재하지 않는 영역이고, 하측에 화염이 안정하게 존재한다. 즉, 희박한계 범위를 표시하고 있다.

3.1.1 연료 분출유량비에 의한 영향

Fig. 5는 연료 분출각(θ)이 60°일때, 연료 분출유량비(Q_{f1}/Q_{f2})를 1/0, 1/1, 1/2 및 1/5로 변화시킨 경우의 화염 안정범위를 나타낸다. Blow off 속도(U_{bo})는 분출 연료량의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있다. 연료 분출유량비가 1/0인 경우가 1/1의 경우보다 화염 안정범위는 Q_f가 증가함에 따라 약간씩 넓어지고 있으나, 1/0의 경우는 화염이 대칭성을 상실하여 진동염의 상태로 매우 불안정하게 유지되었다. 상하 대칭적으로 연료가 분출될수록 연료의 확산, 혼합이 쉽게 이루어져 blow off 조건에 먼저 도달하는 것으로 생각된다.

3.1.2 연료 분출각에 의한 영향

Fig. 6은 연료 분출유량비(Q_{f1}/Q_{f2})가 1/1인 경우, 연료 분출각이 blow off에 미치는 영향을 나타내고 있다. 일반적으로 화염 안정범위는 연료 분출각이 120°, 180°일때 가장 좁아지고 60°, 300°, 340°일때 크게 향상되고 있다. 연료 분출각이 60°, 300°, 340°의 경우보다 120°, 180°의 경우에 연료 분출속도의 Y방향 성분이 커짐에 따라 연료가 Y방향으로 강하게 관통하게된다. 따라서 연료와 공기의 혼합, 확산이 증가하므로 혼합영역이 넓어져 쉽게 희박 혼합기의 상태로 되기 때문에 보염성이 악화된다고 생각된다. 또 분출각이 340°인 경우에는 보염기 후류에 연료가 직접 주입됨으로서 다른 분출각의 경우에 비하여 반응대 내에 충분한 산소 공급이 이루어지지 못한다. 그러므로 보염기 후류

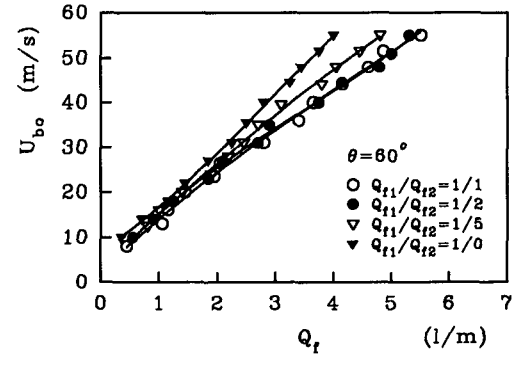


Fig. 5 Effect of fuel injection ratios for flame stability limits

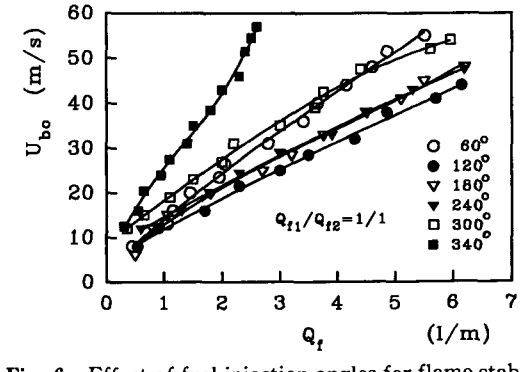


Fig. 6 Effect of fuel injection angles for flame stability limits

의 재순환영역 내의 반응이 서서히 이루어지고, 연료의 확산이 불량하여 주류속도가 증가할수록 화염 안정범위는 더욱 증대된다고 판단된다.

3.1.3 연료 분출량에 의한 영향

Fig. 7은 연료 분출량이 blow off에 미치는 영향을 나타낸다. 대체로 연료 분출각이 180°일때를 전후로 하여 blow off 속도(U_{bo})가 증가하고 있다. 즉, 화염 안정범위가 넓어지고 있으며, 이런 경향은 연료 분출량이 많아질수록 현저하다. 결국 연료 분출각이 180°인 경우는 다른 연료 분출각에 비하여 연료의 확산 증가 및 양호한 혼합으로 인한 반응대 내의 희박화에 의해 화염이 빨리 blow off 되는 것으로 판단된다. 전반적으로 연료 분출량이 증가할수록 화염 안정범위가 증가되는 경향을 보이고 있는데, 이는 연소될 연료량이 많을 수록 희박 혼합기 상태로 blow off 되기 위해서는 더 많은 공기량이 필요함에 따라 blow off 속도가 증가된다.

3.1.4 난류발생격자에 의한 영향

Fig. 8은 격자 G1에서 격자와 보염기 사이의 간격(L)을 변화시킨 경우의 화염 안정범위를 나타낸다. 연료 분출량이 증가함에 따라 blow off 속도(U_{bo})가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이 경향은 다른 격자를 설치한 경우에 있어서도 동일하다. 또한 보염기와 격자 사이의 간격이 증가함에 따라서 화염 안정범위가 확대되는데 이는 격자와 보염기 사이의 간격이 증가함에 따라 주류영역의 난류성분이 감소하기 때문이라고 생각된다. 주류에 난류성분이 강하게 작용된다고 생각되는 L=60 mm 경우, 보염성이 현저하게 저하되나, L이 증가할 경우에는 주류의 난류성분이 감소하여, 보염성이 향상되는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 L=60 mm로 고정하고 격자($G1$, $G2$, $G3$, $G4$, $G5$)를 변화시킨 경우의 화염 안정범위를 나타내고 있다. 격자직경과 구속비가 클수록 보염성이 악화되는 경향을 보인다. 또한, 동일조건, θ=60°, Q_{f1}/Q_{f2}=1/1, L=60 mm에서, 난류발생격자를 설치한 경우(Fig. 9)와 설치하지 않은 경우(Fig. 5)를 비교하면, 난류발생격자를 설치한 경우의 blow off 속도(U_{bo})가 현저히 감소되고 있다. 이와 같이 Table 1과 같은 난류발생격자를 이용하여 주류공기에 강한 난류를 가할 경우, 주류공기에 난류성분이 강화되어 불균일 유동을 형성함으로써 균일유동의 경우에 비하여 보염성이 악화되며, 이러한 현상은 난류발생격자의 격자직경이 클수록, 또, 구속비가 클수록 더욱 뚜렷하다.

3.2 재순환영역의 구조 및 특성

보염기 후류에 형성되는 재순환영역은 고온의 연

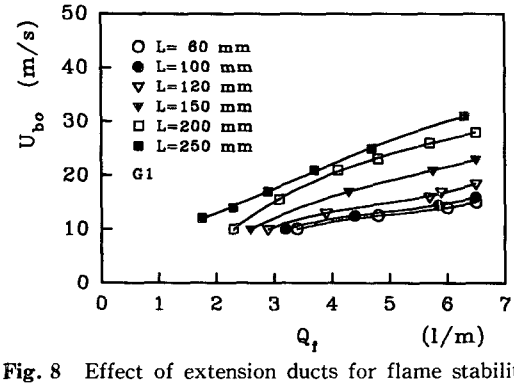


Fig. 8 Effect of extension ducts for flame stability limits at G1

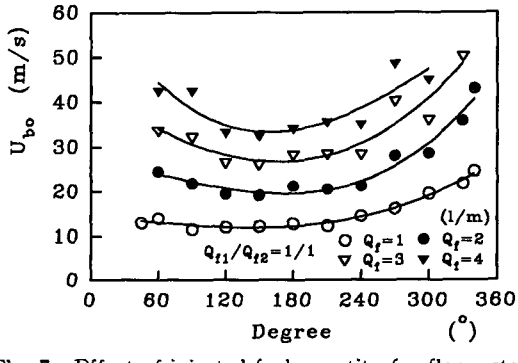


Fig. 7 Effect of injected fuel quantity for flame stability limits

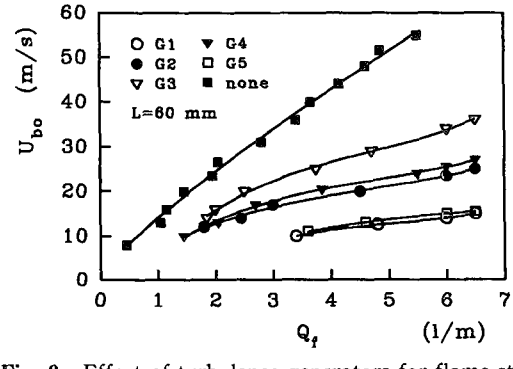


Fig. 9 Effect of turbulence generators for flame stability limits

소가스가 충만되어 열 및 활성 화학종의 공급원으로 작용하기 때문에 보염성능을 지배하는 중요한 인자라고 생각된다. 여기서는 재순환영역의 길이, 온도 등으로 부터 재순환영역의 구조와 특성을 검토하였다.

3.2.1 재순환영역의 길이

Fig. 10은 각 분출각이 60°, 180°, 340°이고, 연료 분출유량비가 1/1일때 blow off 근접시의 재순환영역의 길이(L_{rz})를 나타낸다. Blow off 근접시란 화염이 blow off 될때의 연료 분출량(Q_f)을 10% 증가시킨 blow off 직전의 상태이다. 분출각이 180°인 경우 L_{rz}가 가장 길고 340° 경우가 가장 짧다. 전술한 화염 안정범위 결과와 비교 검토해보면, 재순환영역의 길이가 증가함에 따라 보염성이 악화되고있다. 즉, 재순환영역의 길이의 증가는 보염성을 악화시키고 있다. 이러한 결과는 水谷의 결과와[11] 일치하나, 예혼합화염의 경우인 宋의 결과와는[4] 반대경향을 보인다.

난류발생격자를 설치한 경우에 대하여, blow off 근접시 주류속도에 대한 재순환영역의 길이의 변화를 Fig. 11에 나타낸다. 격자직경이 최소인 $G3$의 경우, 주류속도의 증가에 따라 L_{rz}은 약간 증가하고, U_{act}=25~35 m/s의 범위에서 거의 일정하게 된다. 격자 $G2$ 및 $G4$의 경우, 주류속도의 증가와 함께 L_{rz}은 직선적으로 약간 감소한다. 격자 $G1$ 및 $G5$의 경우에는, 주류속도의 차이에 대한 L_{rz}의 변화가 거의 없고 짧게 나타난다. 즉, 격자 후류영역에서는 주류 난류성분이 강하다고 생각되는 격자의 직경, 구속비 등이 큰 경우의 격자를 설치할때 재순환영역의 길이는 짧아 진다. Fig. 10과 Fig. 11에서 조건 θ=60°, Q_{f1}/Q_{f2}=1/1, L=60 mm에 대한 결과를 분석하면, 난류발생격자를 설치할 경우가 이를 설치하지 않을 경우보다 재순환영역의 길이가 짧아진다.

Fig. 12에 격자 $G1$을 설치했을 경우, 격자와 보염기 사이의 간격(L)의 변화에 따른 재순환영역의 길이를 나타낸다. 측정점은 blow off 근접시의 것이며, 전체적으로 L_{rz}는 각각의 L에서 연료 분출량에 의존하지 않고, 거의 일정한 값을 나타내고 있다.

이는 재순환영역의 길이는 공기 역학적 특성에 의해서만 결정되고, 화학적 특성에는 의존하지 않는다는 연구 결과와 잘 대응한다.[12]

3.2.2 재순환영역의 온도

공기유속을 각각 20, 30 m/s로 한 상태에서 연료량을 증가시켰을 경우, 연료 분출각 60°에 대한 재순환역 내의 온도(T_{rz})를 Fig. 13에 나타낸다.

재순환영역의 온도는 Y=0이고, 각 재순환영역

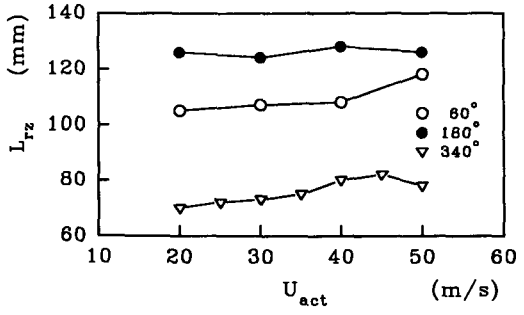


Fig. 10 Length of recirculation zones according to injection angles

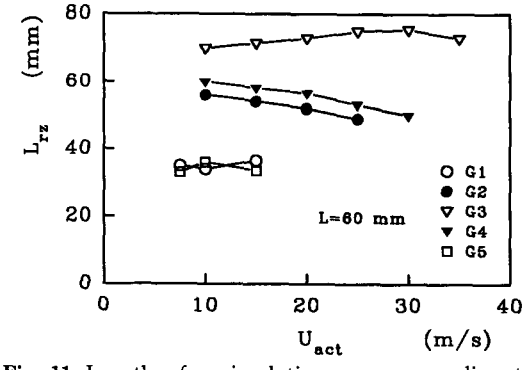


Fig. 11 Length of recirculation zones according to turbulence generators

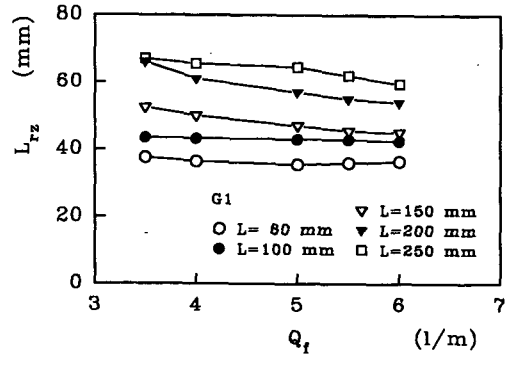


Fig. 12 Length of recirculation zones according to extension ducts

의 길이의 세등분 지점에서 국소온도를 측정하여 평균한 값으로 하였다. 대체로 연료유량이 증가함에 따라 온도가 1600 ℃ 까지 증가하다가 서서히 감소됨을 알 수 있다. 이는 연료 분출량의 증가에 따라 재순환영역 내부가 양론 혼합기 상태가 될 때 비로소 최고 온도까지 증가하다가 과농상태가 되어 감에 따라 산소 부족에 의해 반응이 서서히 둔화되어 저하됨을 알 수 있고, 최고 온도를 보이는 지점을 당량비가 1.0인 양론 혼합기의 상태라고 예측할 수 있다.

Fig. 14는 난류발생격자 $G1$을 설치했을 경우, 주류유속을 각 L에 대해 Q_f=3.5 l/m에 대한 blow off 근접유속으로 통일하고, 분출 연료량을 blow off 근접상태에서 안정상태까지 변화시켰을때의 재순환영역 내의 온도변화를 나타낸다.

전체적으로, Q_f가 증가함에 따라 T_{rz}는 증가했다가 감소하는 경향을 보이고 있다. Q_f가 감소함에 따라, 즉 blow off 상태에 접근함에 따라서 T_{rz}가 저하하고 있으며, 이것은 재순환영역 내의 온도 저하에 의해 열에너지가 연속적으로 화염에 공급되지 못해 blow off된다고 판단된다.

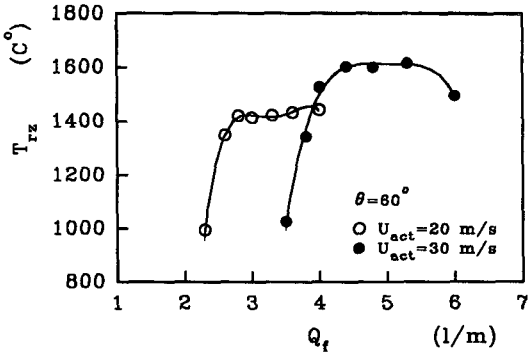


Fig. 13 Temperatures of recirculation zones at θ=60°

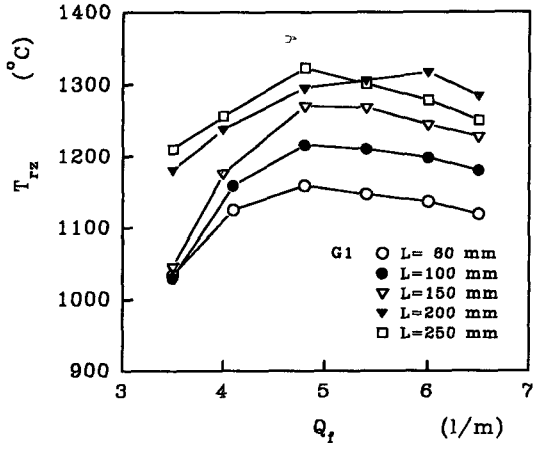


Fig. 14 Temperatures of recirculation zones according to extension ducts

3.3 화염의 형상

3.3.1 연료 분출조건에 의한 영향

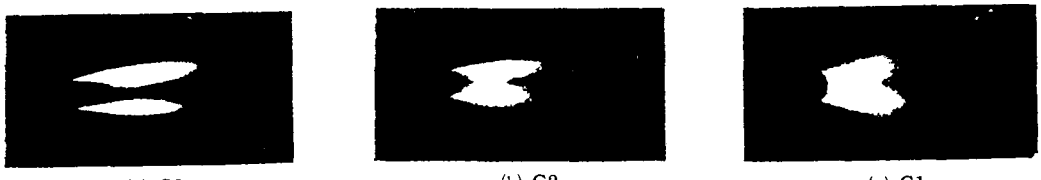
Fig. 15는 각각 분출각 60°, 180°, 340°에 대하여, 유속 20 m/s, 유량 2.6 l/m, 연료 분출유량비 1/1인 경우, 화염의 직접사진을 나타낸다. 화염은 보염기의 박리점으로부터 하류로 향해 형성된다. 보염기 후류의 재순환영역과 주유동의 경계면 부근에서 주유동에 직각으로 연료가 분출된 경우, 즉, 분출각이 180°인 경우는 연료가 크게 확산됨으로써 혼합영역 이 넓어지고, 주류방향으로 연료를 분출하는 340°의 경우는 재순환영역 내로 연료를 분출시키기 때문에 경계면 밖으로 연료확산이 적어 화염이 크게 성장하지 못하는 것으로 생각된다. 결국 연료 분출각이 180°의 경우는 재순환영역의 희박화에 의해 보염성이 감소하고, 연료 분출각이 340°의 경우는 재순환영역 밖의로의 연료 확산량이 적어 재순환영역 내가 진한 혼합기의 상태에 있으므로 보염성이 양호함을 알 수 있다. 연료의 확산 및 혼합이 양호한 연료분출각 60° 및 180°인 경우는 화염이 청염의 상태를 보인다. 그러나 연료분출각 340°인 경우는 짙은 적염의 상태로 유지되는데 이는 연료의 일부가 미연의 상태로 배출되기 때문이라고 생각된다.

3.3.2 난류발생격자에 의한 영향

격자와 보염기 사이의 간격을 60 mm로 하고 난류발생격자($G1$, $G2$, $G3$)를 변화시킬 경우, blow off 근접시에서 촬영한 화염의 직접사진을 Fig. 16에 나타낸다. 여기서는, 측정조건을 통일하여, blow off 근접시의 주류유속을 U_{act}=10 m/s로 고정했다. 격자를 설치한 경우에는 난류성분이 높아짐에 따라, 즉 그림 중 (a)에서 (c)로 감에 따라서 반응면은 Y축 방향으로 점차 확대되는 반면, X축 방향으로는 축소되는데, 이는 주류의 난류성분이 증가함으로 인하여 보염기의 Y축 방향으로 연료가 확산되어 보염기의 상류측에 집중하여 반응이 이루어지기 때문이다. 각 격자들에 대한 화염 안정범위

(a) 60° (b) 180° (c) 340°

Fig. 15 Direct photographs of flame according to fuel injection angles(60°, 180°, 340°)



(a) G3 (b) G2 (c) G1

Fig. 16 Direct photographs of flame according to turbulence generators(G3, G2, G1)

를 나타낸 Fig. 9에서도 알 수 있는 바와 같이 난류성분이 작을수록, 즉 $G3>G2>G1$의 순으로 보염성이 양호함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 수행한 보염기 후류에 형성되는 확산화염의 보염특성에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 보염기 후류의 재순환영역 부근에 집중적으로 연료가 분출되도록 연료 분출각을 설정하고, 상하의 슬릿을 통하여 비대칭적으로 연료를 분출시킬수록 화염 안정성을 향상시킬 수 있다.

(2) 난류발생격자를 설치할 경우에는 이를 설치하지 않을 경우보다 보염성이 저하되며, 격자의 직경, 구속비 등이 작고 격자와 보염기 사이의 간격이 증가함에 따라 보염성이 증대된다.

(3) 재순환영역의 길이의 증가는 보염성을 저하시키며, 연료 분출량에는 거의 무관하고 연료 분출각에 따라 영향을 받는다.

(4) 일반적으로 화염은 청염의 상태이나, 재순환영역 부근에 연료를 분출시킬때는 미연가스의 성분으로 인하여 적염의 상태를 보인다. 또한 주유동에 직각으로 연료를 분출시킬 경우, 화염의 형상이 전반적으로 커지며, 격자의 직경을 증가시킬수록 화염의 상하 폭은 커지지만, 길이는 짧아진다.

참고문헌

(1) Tsuji, H. 1962, "高速氣流中における火炎安定化," 日本航空學會志, Vol. 10, No. 99, pp. 122~133.

(2) Tsuji, H. and Okano, T., 1962, "Flame Stabilization by Bluffbody Flame Holder with Gas In-Jection," Uni Tokyo Report, pp. 369~375.

(3) Zukoski, E. E. and Marble, F. E., 1975, "Experiments Concerning the Mechanism of Flame Blow-off from Bluffbodies," *Comb. Res. and Rew. AGARD*, pp. 167~176.

(4) 송규근, 안진근, 1993, "동축분류 예혼합 화염에 관한 연구(Ⅱ)," 한국항공우주학회지, 제21권, 제6호, pp. 86~94.

(5) Kundu, K. M., Bannerjee O. and Bhacluri D. 1977, "Theoretical Analysis on Flame Stabilization by a Bluffbody," *Comb. Sci and Tech.*, Vol 17, pp. 153~162.

(6) Zukoski, E. E. and Marble, F. E., 1956, "Experiments Concerning the Mechanism of Flame Blow-off from Bluffbodies," *Proc. Gas Dynam-ic. Symp. on Aerothermochemistry*, pp. 205~210

(7) Cheng S. I. and Kovitz, A. A. 1959, "Theory o Flame Stabilization by a Bluff-Body," *Procee*

ding, 7th Sympo. on Com., pp. 681~691.

(8) Winterfield, G. 1965, "On Processes of Turbulent Exchange Behind Flame Holders," *Proceeding, 10th Sym. (Intern.) on Comb.*, pp. 1265~1275.

(9) 조옥찬, 유상신, 이동호, 1988, "교육실험용 소형 풍동제작," 한국항공우주학회지, 제16권, 제2호, pp. 59~67.

(10) 이종순, 노병준, 1981, "다목적 아음속 풍동의 완전 국산화 연구," 과학기술처, R-81-2.

(11) 水谷幸大, 香月正司, 上田正則, 1983, "放射噴流 擴散火炎バ-ナの火炎安定機構" 日本機械學會論文集(B編), 49卷 439號, pp. 724~728.

(12) 述廣, 1977, "燃燒現象論(1)," 機械の研究, 28卷 第5號, pp. 85~88.