

연료분출을 수반하는 보염기 후류에 형성되는 확산화염의 보염특성

안 진 근

한국전력기술주식회사

Stabilization Characteristics of the Diffusion Flame Formed in the Wake of Bluff Body with Fuel Injection

J. G. An

Korea Power Engineering Company Inc.

요 약

보염기 후류에 형성되는 확산화염의 보염특성을 고찰하기 위하여 연료 분출각의 변화, 난류발생격자의 설치, 재순환영역 내에 보조 연료의 공급에 따른 화염의 안정범위, 재순환영역의 길이 및 온도, 재순환영역 주변의 난류강도 분포를 측정, 고찰하였다. 재순환영역의 길이는 주 연료 분출량의 변화에 따른 영향을 받지 않지만, 연료 분출각 및 주류유속의 변화, 보조 연료의 공급, 난류발생격자의 설치 등에 따라 영향을 받는다. 확산화염의 경우 일반적으로 재순환영역의 길이가 길수록 보염성이 불량하지만, 난류발생격자를 설치한 경우에는 재순환영역의 길이가 길수록 보염성이 양호하다. 재순환영역의 온도는 연료 분출각의 변화, 보조 연료의 공급, 난류발생격자의 설치 등에 따라 영향을 받으며, 이론 혼합기 상태에서 최고 값에 도달한다. 일반적으로 재순환영역의 온도가 낮을수록 보염성이 양호하지만, 난류발생격자를 설치한 경우에는 재순환영역의 온도가 낮을수록 보염성이 불량하다. 화염이 형성되는 보염기 후류 영역에 대한 난류강도는 격자의 직경이나 구속비가 큰 난류발생 격자를 설치한 경우에 크게 나타나며, 난류강도가 강할수록 보염성이 불량하다. 연료 분출각의 변화, 난류발생격자의 설치, 재순환영역 내에 보조 연료의 공급 등의 방법으로 확산화염의 보염특성을 제어할 수 있다.

Abstract — To study the stabilization characteristics of diffusion flame formed in the wake of a cylindrical bluff body with fuel injection, the flame stability limits, length and temperature of recirculation zone of flame, turbulence intensity distribution near the recirculation zone of flame were measured and analyzed. The length of recirculation zone is independent on main fuel injection quantity, but it is dependent on fuel injection angles, air stream velocity, and auxiliary fuel injection into recirculation zone. For diffusion flame, in general, the flame stabilization is deteriorated with increase of the length of recirculation zone, but if the turbulence generator is installed, the flame stabilization is improved with increase of the length of recirculation zone. The temperature of recirculation zone is dependent on fuel injection angles, auxiliary fuel injection into recirculation zone, turbulence generators, and it has a maximum value at the condition of each theoretical mixture. In general, the more temperature of recirculation zone is low, the more flame is stable. But when the turbulence generator is installed, the more temperature of recirculation zone is low, the more flame is unstable. The turbulence intensity in the wake of bluff body is increased with increase of diameter or blockage ratio of grid. The more turbulence intensity is increased by installation of turbulence generator, the more flame is unstable. Finally, It is clear that the stabilization characteristics of diffuser flame can be controlled by some parameters such as fuel injection angles, auxiliary fuel injection into recirculation zone, turbulence generators.

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 증가되었으며, 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^[2-4]. 일반적으로 고속 유동장 내에서 화염을 안정하게 유지하는 방법의 기본개념은 연소실 내의 일정한 위치에 가연성 혼합기의 연소속도에 상응하는 저속, 고온영역을 형성시켜 그 영역이 연속연소에 필요한 열 및 활성 화학종의 공급원 역할을 하도록 하는 것이다^[1]. 이와 같은 개념을 이용하여 화염의 안정성 또는 화염의 기타 여러 특성에 대한 많은 연구가 수행되었다^[5-15]. 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. 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 연구에서는 고속유동장 내에 설치된 보염기를 사용하여 연료 분출각의 변화, 난류발생격자의 설치 및 보조 연료의 공급 등의 변화에 따른 화염의 안정범위, 재순환영역의 길이 및 온도, 재순환영역 주변의 난류강도 분포 등을 측정하여 확산화염의 보염특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

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

본 실험을 위하여 이와 노^[16] 및 Mehta^[17]의 연구 결과를 참고로 소형 풍동을 제작하였으며, 주류공기는 유

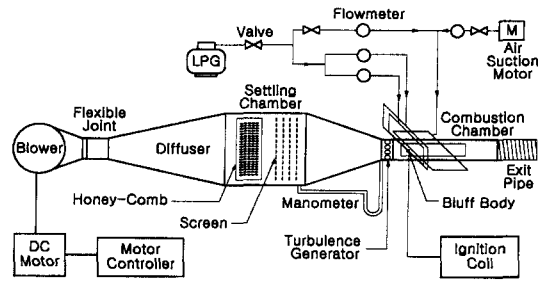


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

속 5~55 m/s의 범위에서 균일한 유동상태로 연소실에 유입된다. 주 연료로서 LPG(liquefied petroleum gas)를 사용하였으며, LPG 용기에서 나온 연료는 두 개의 유로를 통하여 각각 주 연료와 보조 연료로 공급된다. 주 연료는 다시 직경이 3 mm인 두 개의 연료공급 pipe로 나뉘어 보염기의 상하 측에 가공된 두 개의 주 연료 분출용 슬릿(0.5×10 mm²)을 통하여 대칭으로 분출된다. 보조 연료로서 공기, 공기와 LPG를 체적비 1 : 1의 비율로 혼합한 혼합기, LPG를 사용하였으며, 이는 보염기의 뒷부분 즉, 주류공기가 유입되는 측과 반대측에 가공된 한 개의 보조 연료 분출용 슬릿(0.5×4 mm²)을 통하여 분출된다. 보조 연료 공급시에도 주 연료 공급시와 동일한 직경의 보조 연료 공급 pipe를 통과한 보조 연료가 보조 연료 분출용 슬릿을 통하여 분출된다. 보염기로부터 분출된 연료의 점화는 출력력이 16,400 볼트인 고전압 점화코일의 불꽃방전으로 이루어졌다.

주류유동 내에 난류발생에 따른 보염성을 고찰하기 위해 연소실 입구에 난류발생격자를 설치하였다. 본 연구에서 사용된 난류발생격자의 제원을 Table 1에 나타낸다.

연소실의 단면적과 길이는 각각 120×50 mm², 1000 mm 이고, 화염을 육안으로 관찰할 수 있도록 양측 벽에 석영유리를 설치하였다. 직경이 16 mm이고 길이가 60 mm 인 황동제 원통형 bluff body를 보염기로 선택하였으며, Fig. 2에 그의 개략도를 나타낸다. 연료 분출각(θ)은 보염기 축을 원점으로 두 개의 주 연료 분출용 슬릿이 주류공기에 대항하는 각도로 정의하고, 60°, 180°, 340°를

Table 1. Specification of turbulence generators.

Turbulence generator	Br (%)	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	50	10	5	12

Br : Blockage ratio $\{(n \times d)/H\}$, S : Interval of grid, d : Diameter of grid, n : Number of grid.

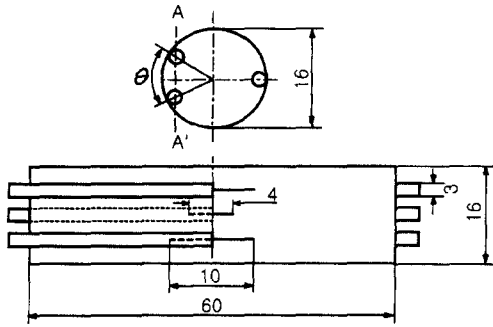


Fig. 2. Shape of bluff body.

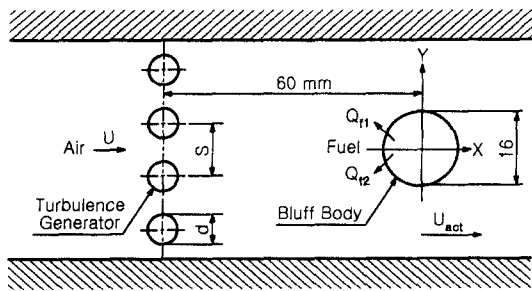


Fig. 3. Arrangement of turbulent generator and bluff body.

선택하였다. 연소실 입구에서의 평균 주류유속은 U (m/s)로 정의하였으며, 이 주류유속을 보정한 보염기 축중심에서의 평균 주류유속은 보염기에 의한 유로폭 감소를 고려하여 U_{act} (m/s)로 정의하였다. Fig. 3에 난류발생격자와 보염기를 설치한 경우의 연소실 내부 배열을 나타낸다.

화염의 안정범위는 주류유속(U_{act})을 일정하게 하고, 주 연료 분출량(Q_f)을 서서히 감소시켜 화염이 블로오프되게 하는 방법으로 측정하였으며, 화염이 블로오프될 때의 주류유속(U_{act})을 블로오프 속도(U_{bo})로 정의하였다. 화염이 블로오프될 때의 주 연료량보다 10% 더 많은 연료에 의해 화염이 블로오프되지 않고 유지되는 상태를 블로오프 직전상태로 정의하였다. 재순환영역의 길이(L_{rc}) 측정에는 외경이 1 mm인 스테인레스강으로 만든 프로브로부터 식염수(NaCl)를 보염기 후류에 분출시켜 나트륨 반응에 의한 발광을 이용하였다. 재순환영역의 길이는 보염기 후단부터 프로브 선단에서 분출된 식염수의 나트륨 반응에 의한 발광이 역류되기 시작하는 지점까지의 거리로 설정하였다. 재순환영역 내의 가스온도는 직경이 0.1 mm이고 재질이 Pt-Pt/Rh 10%인 S형 열전대를 사용하여 측정하였다. $y=0$ 인 위치에서 재순환영역의 길이를 3등분하여 각 지점의 온도를 측정하고, 이를 산술

평균 하여 그 값을 해당 조건의 재순환영역의 온도(T_{rc})로 선정하였다. 화염의 재순환영역 주변에 대한 난류강도의 측정에는 열선의 직경이 5 μ m이고 I형인 정온형 열선풍속계를 사용하였다^[8].

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 화염의 안정범위

3-1-1. 연료 분출각에 의한 영향

Fig. 4에 연료 분출각의 변화에 따른 화염의 안정범위를 나타낸다. 그림에서 가로축과 세로축은 각각 주 연료 분출량과 블로오프 속도를 나타낸다.

보염기 후류의 재순환영역에 근접하여 연료를 분출시키는 경우 즉, 연료 분출각이 340°일 때 화염의 안정범위가 가장 넓다. 이는 재순환영역에 근접하여 연료가 주입되기 때문에 반응대 부근이 과농한 상태로 유지되어 주류공기 유속이 고속일 때까지 화염을 유지할 수 있어 블로오프 속도가 커지기 때문이다. 주류유속이 작을 때 ($U_{bo} < 25$ m/s)는 연료 분출각이 180°일 때가 60°일 때보다 화염의 안정범위가 넓지만, 주류유속이 비교적 클 때 ($U_{bo} > 25$ m/s)는 서로 상반되는 경향을 보이고 있다. 이것은 본 실험조건의 경우에 $U_{bo} = 25$ m/s를 전후로 하여 연료 분출각 60°와 180°에 대한 연료의 확산특성이 변하기 때문이라고 생각된다.

연료 분출각이 180°일 때는 다른 연료 분출각의 경우보다 화염의 안정범위가 좁은데, 이것은 연료 분출속도의 수직방향 성분이 60°나 340°인 경우보다 커짐에 따라 분출된 연료의 수직방향의 운동량 증가로 인하여 연료와 공기의 혼합 및 확산이 활발해져 쉽게 희박 혼합기 상태로 되기 때문인 것으로 사료된다.

Ito 등^[6]은 연료 분출각도의 변화에 따라 화염 안정범위에 차이가 없다고 발표했으나, 본 연구에서는 위에서 기술한 바와 같이 그들의 연구 결과와는 다르게 연료 분출각을 변화시키에 따라서 화염 안정범위를 향상시킬 수

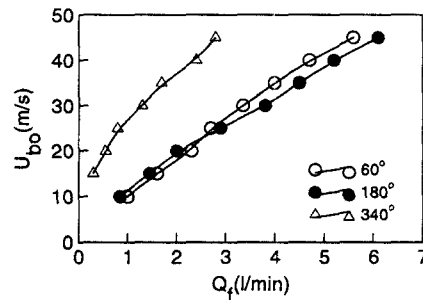


Fig. 4. Flame stability limits for fuel injection angles.

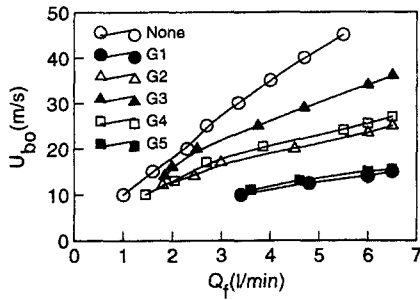


Fig. 5. Flame stability limits for turbulence generators.

있다는 결과를 얻었다.

3-1-2. 난류발생격자에 의한 영향

Fig. 5에 난류발생격자를 설치한 경우에 대한 화염의 안정범위를 나타낸다. 모두 연료 분출각이 60°인 조건에서 실험한 결과이다.

동일한 주 연료 분출량에 대해서 블로오프 속도가 가장 큰 것은 난류발생격자를 설치하지 않은 경우이다. 다음으로 격자의 직경이 최소인 G3, 격자의 구속비가 최소인 G4의 순이며, 블로오프 속도가 가장 작은 것은 격자의 직경이 최대인 G1의 경우이다. 결국, 난류강도가 강하다고 판단되는 난류발생격자 즉, 격자의 직경이나 구속비가 큰 난류발생격자일수록 화염의 안정범위가 더욱 좁아지는 데, 이는 난류강도가 강해질수록 난류천이에 의하여 분출된 연료가 주류유동 측으로 활발하게 확산되기 때문이다^[9].

난류발생격자를 이용하여 주류유동에 난류를 가할 경우 연료분출 확산화염의 보염성은 균일 유동의 경우에 비하여 난류발생격자의 직경 또는 구속비가 클수록 약화된다.

3-1-3. 보조 연료의 공급에 의한 영향

공기를 보조 연료 분출용 슬릿을 통하여 재순환영역 내에 공급한 경우 연료 분출각 60°에 대한 화염의 안정

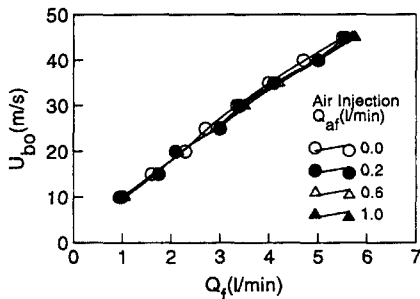


Fig. 6. Flame stability limits for air injection.

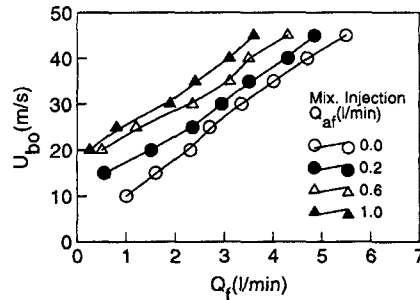


Fig. 7. Flame stability limits for mixture injection.

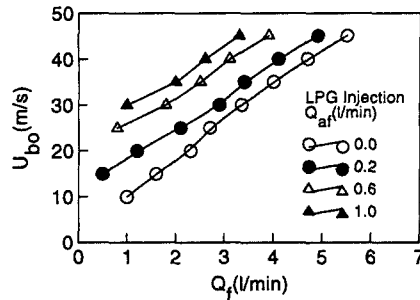


Fig. 8. Flame stability limits for LPG injection.

범위를 Fig. 6에 나타낸다. 재순환영역 내에 공기를 공급한 경우에는 화염의 안정범위에 거의 영향을 미치지 않는다. 이는 재순환영역 내에 공급된 공기가 연료를 확산시키려는 효과와 재순환영역 내의 순환류를 둔화시키려는 효과가 서로 비슷하게 작용하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 7 및 8에 보조 연료로 혼합기 및 LPG를 재순환영역 내에 공급한 경우 연료 분출각 60°에 대한 화염의 안정범위를 나타낸다. 공기를 공급한 경우에 비하여 현저하게 화염의 안정범위가 증가된다. 이는 비록 소량이지만 재순환영역 내에 공급된 혼합기 또는 LPG로 인하여 재순환영역 내의 순환류를 둔화시키는 물론 주 연료의 확산을 둔화시키기 때문인 것으로 생각된다. 결국 재순환영역 내에 공급된 혼합기 또는 LPG로 인하여 미연 가스의 발생을 가중시켜 블로오프 조건에 도달하기 위해서는 더욱 많은 공기량을 필요로 하기 때문에 블로오프 속도가 커지는 것으로 생각된다. Figs. 6~8에서 알 수 있는 바와 같이 이러한 현상은 농도가 진한 보조 연료를 공급할수록 현저하게 나타난다.

3-2. 재순환영역의 길이

3-2-1. 연료 분출각에 의한 영향

Fig. 9에 연료 분출각에 대한 블로오프 직전상태의 재순환영역의 길이를 나타낸다. Fig. 9에서 가로축과 세로

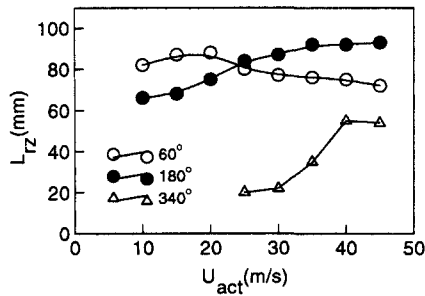


Fig. 9. Length of recirculation zones for fuel injection angles.

축은 각각 주류유속과 재순환영역의 길이를 표시한다.

$U_{act} < 25$ m/s인 영역에서는 연료 분출각이 60°일 때 재순환영역의 길이가 180°일 때보다 길고, $U_{act} > 25$ m/s인 영역에서는 연료 분출각이 180°일 때가 오히려 60°일 때보다 길게 나타났다. 이는 각각의 블로오프 조건을 고려할 때 $U_{act} < 25$ m/s인 영역에서는 연료 분출각이 60°인 경우가 180°인 경우보다 확산이 양호하여 먼저 블로오프 조건에 도달하지만, $U_{act} > 25$ m/s인 영역에서는 그 반대의 현상이 발생되기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 4와 Fig. 9에서 보는 바와 같이 $U_{act} < 25$ m/s인 영역에서는 연료 분출각이 180°일 때가 60°일 때보다 화염 안정 범위가 넓고 재순환영역의 길이는 짧다. 그러나 $U_{act} > 25$ m/s인 영역에서는 연료 분출각이 60°일 때가 180°일 때보다 화염 안정범위가 넓고 재순환영역의 길이는 짧다.

한편, 연료 분출각이 340°인 경우 재순환영역의 길이는 매우 짧는데, 이는 주 연료가 재순환영역 부근에 분출됨으로써 화염이 전체적으로 과농한 상태로 되어 화염 반응대가 확장되지 못하기 때문이라고 생각된다.

결국, 재순환영역의 길이가 길어짐에 따라 보염성이 악화됨을 알 수 있으며, 이 결과는 Ito 등¹⁶⁾의 연구결과와 일치한다.

연료 분출각이 180°와 340°일 때 주류유속이 증가함에 따라 재순환영역의 길이는 증가하다가 각각 어느 일정한 값에 도달하는 경향을 보이며, 연료 분출각이 60°일 때에는 주류유속이 증가함에 따라서 재순환영역의 길이는 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 결국, 재순환영역의 길이는 연소가스의 열팽창뿐만 아니라 공급되는 주류공기의 유속에 의해서도 영향을 받는 것으로 판단된다.

3-2-2. 난류발생격자에 의한 영향

재순환영역의 길이에 관한 본 실험에서 연소상태의 차이에 의한 재순환영역의 길이변화를 고찰하기 위하여 각 격자에 대해서 블로오프 직전 상태와 안정상태를 비교하였으나 그 차이는 거의 나타나지 않았다. 이 결과에 따라 본 연구의 경우 재순환영역의 길이는 주 연료 분

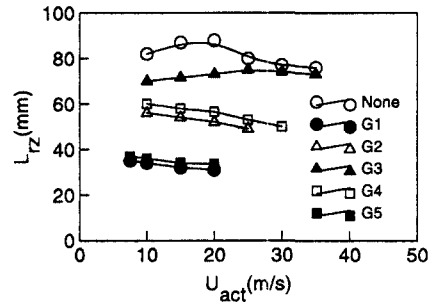


Fig. 10. Length of recirculation zones for turbulence generators.

출량의 차이에 따라 거의 영향을 받지 않는다고 생각되며, 이 결과는 辻廣¹²⁾의 연구 결과와 일치한다.

연료 분출각이 60°인 경우 블로오프 직전상태의 주류유속에 대한 재순환영역의 길이의 변화를 Fig. 10에 나타낸다.

난류발생격자를 설치한 경우에는 격자의 직경이나 구속비가 큰 경우일수록 재순환영역의 길이는 짧게 나타난다. 그리고 주류공기에 난류성분을 가한 경우의 재순환영역의 길이는 균일유동인 경우에 대한 재순환영역의 길이에 비하여 짧다. 이 현상은 격자의 직경이나 구속비가 큰 난류발생격자를 설치함에 따라 주류공기의 난류강도가 강해져 경계층의 난류천이에 의한 박리점의 후퇴와 전단층의 난류천이에 의한 주류유동 축으로의 저저한 이동이 발생되기 때문이라고 생각된다¹⁶⁾.

결국, 격자직경이나 구속비가 큰 난류발생격자를 설치할수록 주류의 난류강도가 강해져 연료가 주류 측으로 활발하게 확산되어 화염이 수평방향으로 신장되지 못하므로 재순환영역의 길이가 짧아진다고 생각된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 난류발생격자를 설치한 경우에는 재순환영역의 길이가 짧을수록 보염성이 불량하고, 재순환영역의 길이가 길수록 보염성이 양호한 것으로 나타나 재순환영역의 길이가 증가함에 따라 보염성이 악화된다는 일반적인 확산화염의 특성을 따르지 않고, 이와 반대의 특성을 나타낸다. 이것은 난류발생격자에 의해 주류유동 내에 형성된 강한 난류성분으로 인하여 균일 유동장 내의 화염 안정화의 경우와는 본질적으로 다른 화염의 블로오프 기구에 지배되기 때문이라고 생각된다.

3-2-3. 보조 연료의 공급에 의한 영향

Fig. 11에 연료 분출각 60°에 대하여 보조 연료의 공급에 따른 재순환영역의 길이변화를 나타내고 있다. 보조 연료의 공급량을 0.6 l/min으로 일정하게 하고 블로오프 직전상태에서 측정된 결과이다. Fig. 11에서 가로

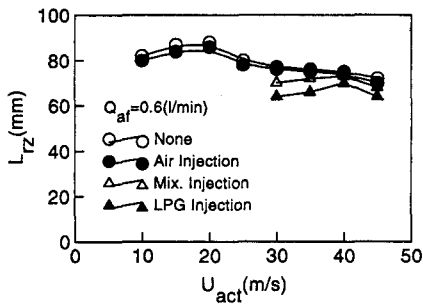


Fig. 11. Length of recirculation zones for auxiliary fuel injection.

측은 주류유속을, 세로측은 재순환영역의 길이를 각각 표시한다.

일반적으로 보조 연료를 공급한 경우가 이를 공급하지 않은 경우에 비해 재순환영역의 길이가 감소하고 있는 것을 볼 수 있으며, LPG, 혼합기, 공기의 순서로 감소하는 정도가 크다. 이는 연료분출 확산화염의 경우에 있어서 재순환영역의 길이의 감소는 보염성의 향상을 의미하는 것과 잘 일치한다. 각 보조 연료를 공급한 경우에 대하여 재순환영역의 길이의 최고점이 나타나며, 이 지점은 연소반응의 최적 상태인 이론 혼합기 상태인 점으로 생각된다.

재순환영역 내에 혼합기, LPG 등을 보조 연료로 공급함에 따라 재순환영역 내의 연료농도가 높아지고 재순환영역 내의 순환류가 둔화되는 것으로 생각된다. 따라서 연료의 확산 및 혼합이 불량하게 되어 화염이 신장되지 못하고 짧아져 재순환영역의 길이가 감소되는 것으로 판단된다. 결국, 보조 연료를 공급한 경우에도 재순환영역의 길이는 공기역학적 특성에 따른 영향을 받는 것으로 생각된다.

3-3. 재순환영역의 온도

3-3-1. 연료 분출각에 의한 영향

주류유속을 30 m/s로 고정하고 주 연료 분출량을 서서히 증가시킨 경우 연료 분출각 60°, 180° 및 340°에 대한 재순환영역 내의 온도변화를 Fig. 12에 나타낸다. Fig. 12에서 가로축과 세로축은 각각 주 연료 분출량과 재순환영역의 온도를 나타낸다.

전반적으로 60°와 180°의 경우가 340°의 경우보다 약 200°C 정도 높은 것을 볼 수 있다. 이는 340°의 경우에는 연료분출이 거의 재순환영역 부근으로 이루어지기 때문에 다른 각도에 비하여 연료의 확산상태가 불량함으로써 불완전 연소상태로 유지되기 때문인 것으로 생각된다.

특히, 60°나 180°인 경우는 각각 온도의 최고치가 존재하며, 그 값을 정점으로 감소하는 경향을 보이고 있

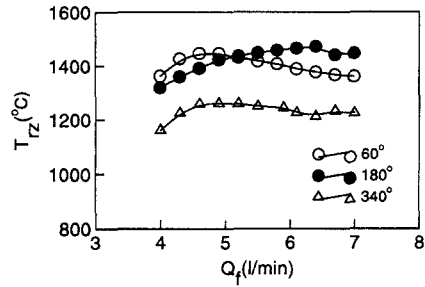


Fig. 12. Temperatures of recirculation zones for fuel injection angles.

다. 이 정점들이 각각의 이론 혼합기 상태로 추측되며, 이 점은 60°인 경우가 180°인 경우보다 먼저 나타난다. 이는 상대적으로 연료의 확산이 불량한 60°인 경우에는 적은 연료량으로써 이론 혼합기 상태에 먼저 도달하고, 그 이상의 연료가 공급됨에 따라 과잉 공급되는 연료 측으로의 열 손실에 의해서 재순환영역의 온도가 서서히 낮아지기 때문이다. 그러나 연료의 확산이 보다 양호한 180°인 경우에는 이론 혼합기 상태에 도달하기 위해서는 보다 많은 연료가 필요하기 때문에 이와 같은 현상을 보이고 있다. 340°인 경우는 약 1250°C로 재순환영역의 온도가 상승된 후 거의 일정하게 그 온도로 유지되는데, 이는 주 연료 분출량이 약 4.5 l/min 이상이 되면 연료의 확산이 개선되지 못하고 화염의 불완전 연소상태가 지속되기 때문이다.

3-3-2. 난류발생격자에 의한 영향

난류강도가 가장 큰 난류발생격자 G1을 설치한 경우와 난류발생격자를 설치하지 않은 경우에 대하여 주 연료 분출량을 블로오프 직전상태(Q=3.5 l/min)에서 안정상태(Q=6.5 l/min)까지 변화시키면서 측정된 재순환영역의 온도변화를 Fig. 13에 나타낸다. 모두 연료 분출각이 60°인 경우이다.

어느 경우에 있어서도 재순환영역 온도의 최대 값이

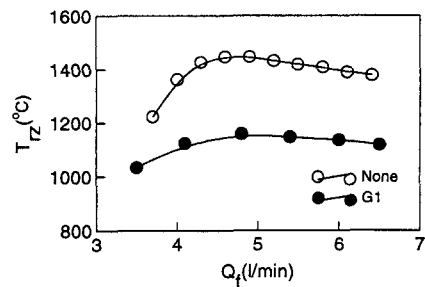


Fig. 13. Temperatures of recirculation zones for turbulence generator.

나타나며, 그 값은 $Q_f=4.5\sim 5$ l/min 범위에 존재한다. 또 안정상태에서 블로오프 상태에 접근함에 따라 재순환영역의 온도가 낮아진다. 이것은 재순환영역 내의 온도가 낮아짐으로써 반응대에 연속적인 착화에너지를 공급하지 못하여 블로오프된다는 기존의 연구결과와 일치한다^[21]. 한편, 난류발생격자를 설치한 경우의 재순환영역의 온도는 이들을 설치하지 않은 경우에 비하여 낮게 나타났는데, 이는 주류에 난류가 형성됨으로써 동일 주 연료량에 대하여 쉽게 희박한 상태로 되기 때문에 난류를 가하지 않은 경우에 비하여 재순환영역의 온도가 낮은 것으로 생각된다.

3.3-3. 보조 연료의 공급에 의한 영향

주류유속을 30 m/s로 설정하고 각각의 보조 연료에 대한 재순환영역의 온도를 측정하였다. Figs. 14-16은 연료 분출각이 60°인 경우 보조 연료로서 각각 공기, 혼합기, LPG 등을 재순환영역 내에 공급한 경우의 재순환영역의 온도변화를 나타낸다.

전체적으로 공기를 공급한 경우에는 공급된 공기량에 따른 온도변화가 거의 없으나, LPG나 혼합기를 공급한 경우에는 공급된 LPG나 혼합기량에 따른 온도변화가 두드러지게 나타난다. LPG와 혼합기를 공급한 두 경우를

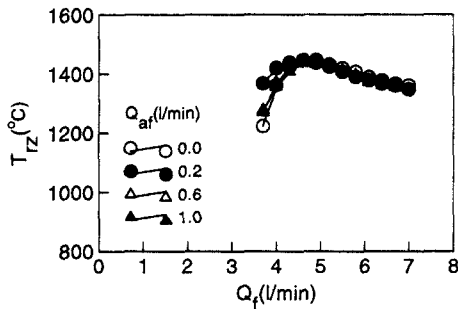


Fig. 14. Temperatures of recirculation zones for air injection.

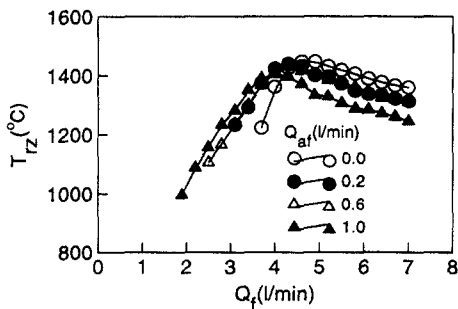


Fig. 15. Temperatures of recirculation zones for mixture injection.

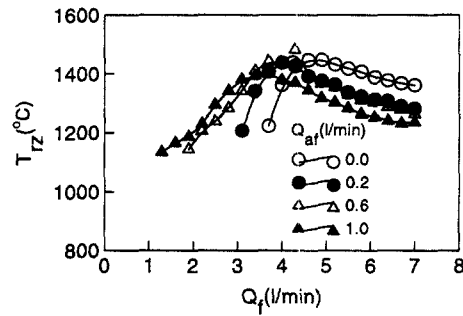


Fig. 16. Temperatures of recirculation zones for LPG injection.

비교할 때 혼합기를 공급한 경우가 공급된 보조 연료량에 따른 온도변화가 작고 동일한 보조 연료량에 대해서 높은 온도분포를 나타내고 있는데, 이것은 혼합기를 공급한 경우가 LPG를 공급한 경우보다는 연소반응이 양호하기 때문이라고 생각된다.

보조 연료로 공기를 공급한 경우에는 공기 공급량에 따른 재순환영역의 온도변화가 거의 없는 것으로 나타났는데, 이는 재순환영역 내에 공급된 공기가 연료의 확산에 기여하지 못함으로써 연소상태가 거의 개선되지 않기 때문이다. 보조 연료로 LPG를 공급하는 경우에는 대체적으로 연료의 공급량이 증가함에 따라 재순환영역의 온도가 감소하고, 재순환영역의 온도의 최고 값이 최적으로 하향하는 경향을 보이고 있다. 이는 보조 연료를 사용하지 않은 경우에 비해 이론 혼합기의 연소조건이 보조 연료량이 증가함에 따라 적은 주 연료량에서 이루어지고 보염성의 향상에도 도움을 주는 것으로 보여진다. 보조 연료로 혼합기를 공급한 경우에는 LPG를 공급한 경우와 유사하지만, 온도분포가 LPG를 공급한 경우보다 높다는 것과 재순환영역 온도의 최고 값에 대한 분포가 넓지 않다는 차이점이 있다. 결국, 재순환영역 내에 농도가 진한 보조 연료를 공급할 수록 재순환영역의 온도가 낮아진다.

3.4. 재순환영역 주변의 난류강도 분포

3.4-1. 연료 분출각과 보조 연료의 공급에 의한 영향
 주류유속이 30 m/s이고 주 연료 분출량이 5 l/min인 안정상태의 조건에서 연료 분출각 60°, 180°, 340°에 대한 재순환영역 주변의 난류강도 분포를 Fig. 17에 나타내며, 주류유속과 주 연료 분출량이 같은 조건에서 연료 분출각이 60°일 때 보조 연료로서 LPG를 0.6 l/min 공급한 경우에 대한 재순환영역 주변의 난류강도 분포를 Fig. 18에 나타낸다.

Fig. 18에서 보염기 직후인 X=15 mm, Y=10 mm 부

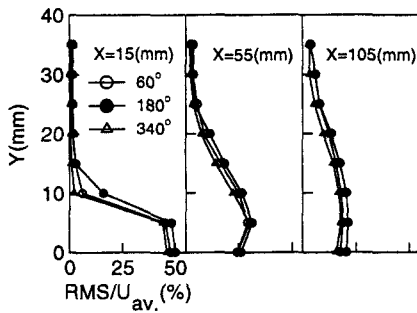


Fig. 17. Distribution of turbulence intensity for fuel injection angles.

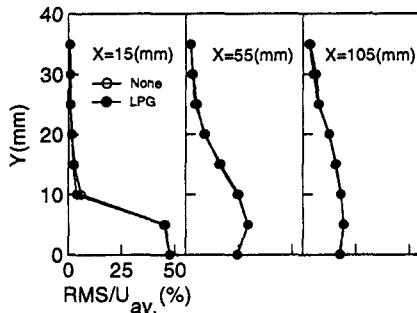


Fig. 18. Distribution of turbulence intensity for auxiliary fuel injection.

근에서 연료 분출각에 따라 약간의 차이를 보이지만, 전반적으로 난류강도 분포상의 차이를 보이지 않고 단지 보염기에 의한 영향을 공통적으로 나타낼 뿐이다. 또한 보조 연료를 공급한 경우와 이를 공급하지 않은 경우의 난류강도 분포는 거의 일치한다. 결국, 난류강도 분포는 연료 분출각이나 보조 연료의 공급에는 거의 영향을 받지 않으며, 보염기 상류 측의 주류유동의 형성조건에 따라 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

그러나 난류강도 분포상에 거의 차이가 없음에도 불구하고 본 논문의 3-1-1절 및 3-1-3절에서 논의된 바와 같이 연료 분출각 및 보조 연료의 공급에 따라 보염성에 차이가 발생되는데, 이는 난류강도상의 차이는 거의 없지만 각각의 연료 분출각도에 따른 특성 또는 재순환 영역 내에 보조 연료가 공급된 상태에 따라서 화염이 반응대 내의 연료 또는 반응 생성물의 농도가 각 조건에 따라 서로 다르기 때문인 것으로 생각된다.

3-4-2. 난류발생격자에 의한 영향

주류유속이 10 m/s이고 주 연료 분출량이 3.5 l/min인 안정상태의 조건에서 난류발생격자를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 대한 난류강도 분포를 Fig. 19에 나타낸다. 연료 분출각이 60°인 조건에서 측정된 결과이다.

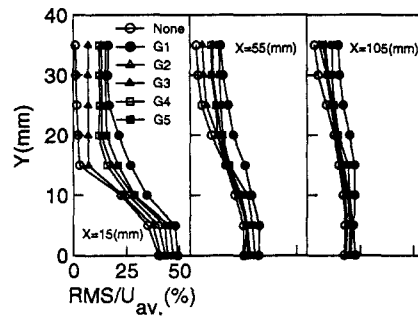


Fig. 19. Distribution of turbulence intensity for turbulence generators.

Fig. 19에서 가로축은 시간 평균속도(U_{av})로 무차원화한 난류강도(RMS/U_{av})를 표시하며, 세로축은 보염기 축을 원점으로 주류유동에 대한 수직방향의 거리를 표시한다.

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

$X \geq 55$ mm인 영역에서는 하류로 이동함에 따라 난류강도가 평탄한 상태로 수직방향으로 상승하는 위치가 주류유동 측으로 이동하는 것을 보이고 있다. 이것은 하류로 이동함에 따라 전단층의 폭이 확대되기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 각 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.

4. 결 론

고속유동장 내에 설치된 보염기 후류에 형성되는 확산화염의 보염특성을 고찰하기 위하여 연료 분출각의 변화, 난류발생격자의 설치, 재순환영역 내에 보조 연료의 공급에 따른 화염의 안정범위, 재순환영역의 길이 및 온도, 재순환영역 주변의 난류강도 분포 등을 측정, 고찰

하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

주류유속이 작을 때는 주 연료가 주류유동에 수직 방향으로 분출되는 경우에 보염성이 양호하지만, 주류유속이 증가함에 따라 주 연료가 주류유동에 대향으로 분출되는 경우에 보염성이 양호하다. 그러나 주 연료가 재순환영역 내에 근접하여 주류유동 방향으로 분출되는 경우에는 주류유속에 관계없이 다른 연료 분출각의 경우보다 보염성이 양호하다.

연료 분출각과 주류유속에 관계없이 재순환영역의 길이가 길어짐에 따라 보염성이 악화되며, 연료가 주류유동 방향으로 분출되는 경우에는 다른 연료 분출각의 경우보다 재순환영역의 길이가 짧아지고 보염성이 양호해진다. 난류발생격자를 설치하여 주류의 난류강도가 강해질수록 재순환영역의 길이가 짧아지고 보염성이 악화된다. 보조 연료가 공급되지 않은 경우 재순환영역의 길이와 보염성은 주 연료 분출량과는 거의 무관하고, 연료 분출각, 주류유속, 주류유동의 난류강도 등에 따라 영향을 받는다. 그러나 재순환영역 내에 농도가 진한 보조연료가 공급됨에 따라 재순환영역의 길이가 현저히 짧아지고 보염성이 크게 향상된다.

주 연료의 분출량이 증가됨에 따라 연료 분출각에 관계없이 재순환영역의 온도는 이론 혼합기 상태에서 최고 값에 도달한 후 서서히 감소한다. 또한 주 연료가 주류유동 방향으로 분출되거나 농도가 진한 보조 연료가 재순환영역 내에 공급되는 경우에는 재순환영역의 온도가 낮아지며, 보염성이 향상된다. 주류유동에 난류성분이 가해지는 경우에는 일반적으로 재순환영역의 온도가 낮아진다. 주류에 난류성분이 가해지지 않는 경우에는 재순환영역의 온도가 낮을수록 보염성이 양호하지만, 주류에 난류성분이 가해지는 경우에는 재순환영역의 온도가 낮을수록 보염성이 악화된다.

난류발생 격자를 설치한 경우 난류발생 격자의 직경이나 구속비가 클수록 난류강도가 강해져 보염성이 악화되며, 연료 분출각의 변화 및 보조연료의 공급에 따라 보염성이 크게 변하지만, 이들에 의한 난류강도의 차이는 거의 없다.

결국, 확산화염의 보염성은 연료 분출각을 변화시키거나 농도가 진한 보조 연료를 재순환영역 내에 공급함으로써 향상될 수 있지만, 난류발생격자를 설치함에 따라 악화된다. 즉, 연료 분출각의 변화, 재순환영역 내에 보조 연료의 공급, 난류발생격자의 설치 등의 방법으로써 확산화염의 보염특성을 제어할 수 있다.

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 Lefévre, 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 Turbulent, 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. 이종순, 노병준: "다목적 아음속 풍동의 완전 국산화 연구", 과학기술처, R-81-2 (1981).
 17. Mehta, R.D.: "The Aerodynamic Design of Blower Tunnels with wide Angle Diffuser", Prog. Aero. Sci., 18, 59 (1977).
 18. 노병준, 김장권: "2차원 통계학적 난류특성치의 동시측정 및 연산방법", 大韓機械學會誌, 29(5), 507 (1989).
 19. 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).
 20. 辻廣: "燃燒現象論", 機械の研究, 28(5), 669 (1976).
 21. Longwell, J.P., Frost, E.E. and Weiss, M.A.: "Flame Stability in Bluff Body Recirculation Zones", Industry Engineering Chemistry, 45(8), 1629 (1953).