

## 보조연료의 공급이 확산화염의 보염특성에 미치는 영향

안진근\*, 송규근\*\*

### Stabilization Characteristics of Diffusion Flame with Auxiliary Fuel Supply through a Bluff Body

J. G. An\*, K. K. Song\*\*

Key Words : diffusion flame, main fuel injection angle, auxiliary fuel, flame stability limits, configuration of fuel, recirculation zone

#### ABSTRACT

The stabilization characteristics of diffusion flame formed behind a bluff body with fuel injection slits was experimentally investigated by varying main fuel injection angles and auxiliary fuel injection conditions. The flame stability limits, temperature and length of recirculation zone, direct and schlieren photographs of flames were measured in order to study the stabilization mechanism of the diffusion flame. The results of this investigation are as follows. The stability limits can be improved by the condition of the kind and quantity of the injected auxiliary fuel. The length and temperature decrease with injection of auxiliary fuel, and these phenomena are remarkable when LPG is injected into the recirculation zone. When the LPG is injected into the recirculation zone, flame remains sooty. Fluctuation of fuel and main stream is generated actively by air injection.

#### 1. 서론

에너지 수요의 증가와 환경오염의 깊은 인식 아래 자동차, 산업용 원동기, 제트기관 등에서 장치의 소형 경량화와 더불어 고출력 고부하 연소가 요구되고 있다. 고부하 연소를 위해서는 강한 난류강도를 가지는 고속 유동장에서의 연소가 필요하지만 연소실내의 일정 위치에서 화염을 안정화시키기가 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해서는 고속 유동장에 연소속도와 유동속도가 비슷한 고온영역을 만들어 주면 된다<sup>1)</sup>. 이러한 개념의 화염안정화 방법으로는 bluff body<sup>2)</sup>, recessed wall<sup>3)</sup>, 대향분류<sup>4)</sup>, 두꺼운 림을 갖는 동축분류<sup>5)</sup> 등이 있는데 이런 방법에 의한 화염의 안정화는 보염기 후류의 재순환영역이 중요한 역할을 한다<sup>5-8)</sup>. 고속기류 중에 설치

된 bluff body로부터 연료를 분출시켜 형성되는 화염을 안정화시키는 확산화염의 연소과정은 연료와 주류공기의 혼합과정에 의해 지배되며, 보염특성 및 화염의 구조를 결정하는 중요한 인자가 된다.

본 연구에서는 고속 유동장에 설치된 bluff body를 통해 연료를 분출시켜 형성된 확산화염에 대하여 연료의 분출각도, 재순환영역 내에 분사되는 보조연료의 양과 종류 등의 변화에 따른 화염 안정범위, 재순환영역의 길이 및 온도, 화염의 형상 등을 측정하여 보염특성을 밝히고자 한다.

#### 2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치는 주연료 및 보조연료 공급계통, 공기 공급계통<sup>9)</sup>, 정류실, 연소실, 보염기, 점화장치 및 배기관 등으로 구성된다. 송풍기를 통해 유입된 공기는 정류실, 수축부를 거치면서 유동장을 형성하며, 이 유동장 내에 설치된 원통형

\* 정회원, 한국원자력연구소

\*\* 정회원, 전북대학교 정밀기계공학과

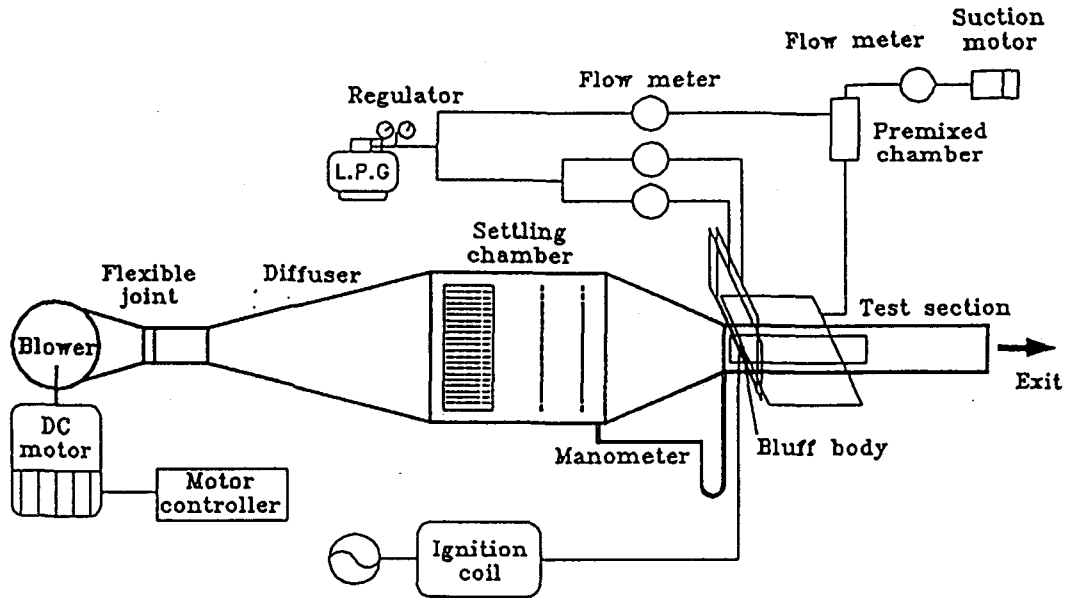


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

bluff body로 부터 연료를 분출시키면서 실험하였다. 본 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 연료는 시판용 LPG를 사용하였다. 주연료는 bluff body의 양단에 있는 내경이 3 mm인 연료관을 통과하여, 폭이 0.5 mm이고 길이가 10 mm인 2개의 주 slit으로부터 주류공기에 대하여 60°, 180°, 300° 등의 방향으로 분출된다. 보조연료로서 공기, 공기와 LPG의 혼합기, LPG 등을 사용하였으며, bluff body에 상하대칭으로 제작된 주 slit 사이에 있는 폭이 0.5 mm이고 길이가 4 mm인 1개의 보조 slit으로부터 재순환영역 내로 공급하였다. 공기와 LPG의 혼합은 체적비 1:1의 비율로 설정하였다. 예혼합실은 원통형 아크릴관으로 제작하여 원통주위로 LPG를 두갈래로 공급하고 상단의 밀폐판에서 공기를 공급하였으며, 하단의 밀폐판을 통해 bluff body의 보조 slit으로 공급되도록 하였다. 연소실은 단면 120×50 mm<sup>2</sup>, 길이 1000 mm이고, 화염의 직접관찰 및 사진촬영을 위해 양측 벽에 석영유리를 설치하였다. 보염기는 황동제로 직경이 16mm 이고 길이가 60 mm인 원통형 bluff body이다. 그의 구조를 Fig. 2에 나타낸다.

연소실 입구의 평균 주류유속은  $U(m/s)$ 으로 하였으며, 보염기에 의한 유로폭 감소를 고려한 보염기 축중심에서의 평균 주류유속은  $U_{act}(m/s)$ 으로

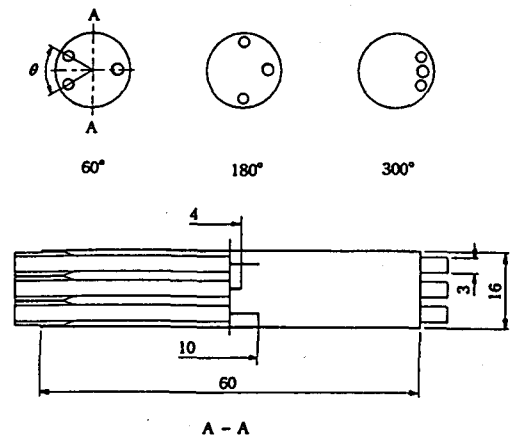


Fig. 2 Shape of bluff body

하였다. 재순환영역의 길이를 측정하기 위하여 보염기 후류에 식염수(NaCl)를 보염기의 축방향으로 주입하였다. 화염이 형성되는 측의 보염기 끝단부터 Na 반응에 의하여 발광이 프로브 선단에서 상류로 역류되기 시작하는 위치까지의 거리를 재순환영역의 길이로 정의하였다. 재순환영역 내의 온도 측정에는 소선의 지름이 0.1mm이고 Pt-Pt/Rh 10%인 S형 열전대를 사용하였으며, 측정된 아날로그 데이터의 디지털로의 전환에는 8 bit A/D convert를 사용하였다. 본 연구에서는 재순환영역 내에서 보염기의 축중심과 수평방향으로 이동하여, 재순환

영역 내의 길이를 3등분하여 3지점의 온도를 측정하고, 이 값들을 산술평균하여 재순환영역의 온도로 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 화염 안정범위

화염 안정범위는 주류유속( $U_{act}$ )을 일정하게 한 후 보조연료의 분출량( $Q_{af}$ )을 0.2~1.2(l/m)의 범위에서 0.2(l/m) 간격으로 변화시키고, 주연료의 분출량( $Q_f$ )을 서서히 감소시켜 화염이 blow off 될때의 주류유속( $U_{bo}$ )에 대하여 나타냈다. Blow off 곡선의 상측은 화염이 존재하지 않는 영역이고, 하측에 화염이 안정하게 존재한다. 즉 회박 연료한계 범위를 표시하고 있다.

Fig. 3 ~ Fig. 5에 보조연료로서 공기를 사용한 경우의 연료 분출각에 대한 화염 안정범위를 나타낸다. 주연료 분출각이 60°와 180°일 때는 보조 공기량에 의한 영향이 거의 없으나, 300°인 경우에는 보조 공기량을 증가시킴에 따라 화염 안정범위가 증가된다. 이는 보조연료를 사용하지 않을 경우, 연료와 공기의 혼합이 비교적 양호하지 않은 상태에서, 재순환영역 내에 공급된 공기에 의하여 연소반응이 활발해짐을 나타낸다. 즉, 연료 분출각이 300°인 경우에는 연료분출의 특성상 재순환영역에 근접하여 분출된 주연료와 주류공기의 혼합이 불량한 상태이므로 재순환영역에 공기가 공급됨

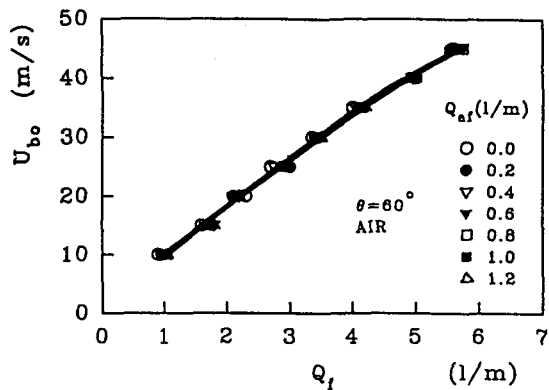


Fig. 3 Stability limits for air injection at  $\theta=60^\circ$

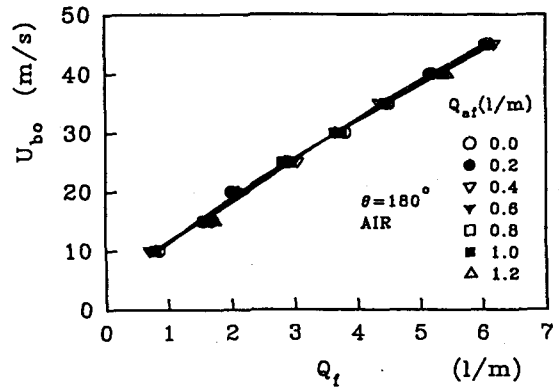


Fig. 4 Stability limits for air injection at  $\theta=180^\circ$

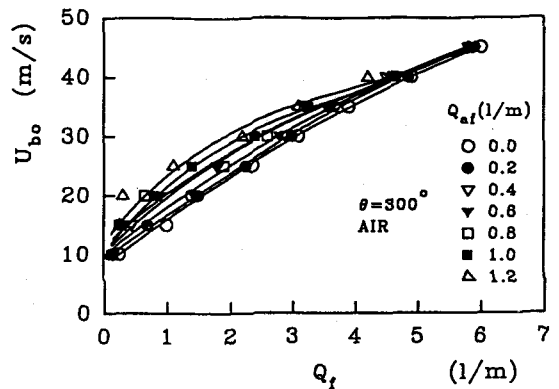


Fig. 5 Stability limits for air injection at  $\theta=300^\circ$

으로써 연소반응이 활발히 이루어진다고 생각된다.

Fig. 6 ~ Fig. 8은 보조연료로서 LPG를 사용한 경우의 연료 분출각에 대한 화염 안정범위를 나타낸다. 일반적으로 공기를 보조연료로 사용한 경우에 비하여 현저하게 화염 안정범위가 증가된다.

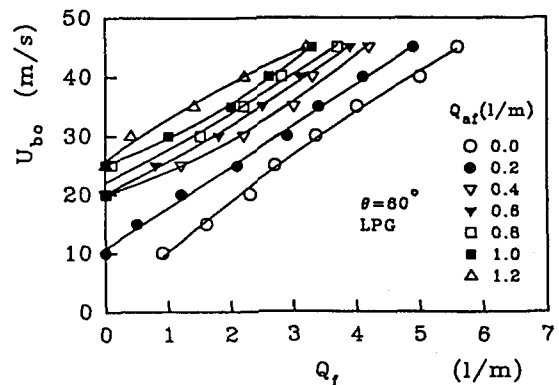


Fig. 6 Stability limits for LPG injection at  $\theta=60^\circ$

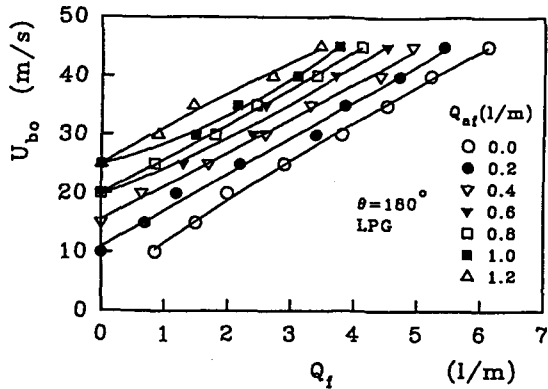


Fig. 7 Stability limits for LPG injection at  $\theta=180^\circ$

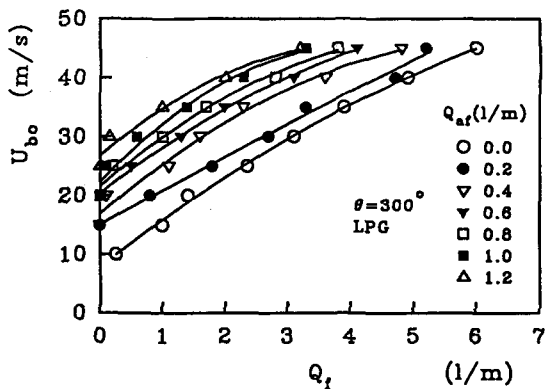


Fig. 8 Stability limits for LPG injection at  $\theta=300^\circ$

주연료 분출각이 60°와 180°인 경우에는 300°인 경우에 비하여 연료의 확산 및 혼합상태가 양호하여 쉽게 blow off 상태에 도달한다. 주연료 분출각이 300°인 경우에는 180°의 경우에 비하여 연료와 주류공기의 혼합이 양호하지 못할뿐만 아니라, 보조연료로서 주입된 LPG로 인하여 더욱 과농한 상태로 되어 blow off 조건에 도달할 때까지 더많은 공기를 필요로하기 때문에 blow off 속도가 증가되는 것으로 생각된다.

보조연료 분출량 및 주연료 분출각이 동일한 조건에서 보조연료로서 공기와 LPG의 혼합기를 사용할때의 화염 안정범위는 보조연료로서 공기를 사용할때 보다는 넓고, LPG를 사용할때 보다는 좁은 결과를 얻었다. 또한 보조연료량 및 보조연료의 종류가 동일한 조건에서 주연료 분출각이 60°인 경우의 화염 안정범위는 일반적으로 180°일 때보다는 넓고 300°일때보다는 좁은 결과를 얻었다. 이는 주

연료 분출각도의 특성상, 연료의 확산상태가 180°일 때 보다는 불량하고 300°일 때 보다는 양호하기 때문인 것으로 생각된다.

### 3-2. 재순환영역의 길이

보염기 후류에 형성되는 재순환영역은 고온의 연소가스가 충전되어 열 및 활성 화학종의 공급원으로 작용하기 때문에 보염성능을 지배하는 중요한 인자이다. 본 연구에서는 재순환영역의 길이와 온도를 측정하여 재순환영역의 특성을 검토하였다.

Fig. 9 ~ Fig. 11은 연료 분출각 60°, 180° 및 300°의 경우에 대하여 사용된 보조연료에 따른 재순환영역의 길이( $L_{rz}$ ) 변화를 나타낸다. 보조연료의 공급량( $Q_{af}$ )을 0.6(l/m)으로 일정하게 하고 blow off 근접시에서 Na의 반응에 의해 측정된 결과이다. 일반적으로 보조연료를 사용한 경우가 보조연료를 사용하지 않은 경우에 비해  $L_{rz}$ 가 감소하고 있는 것을 볼 수 있으며, LPG, 혼합기, 공기의 순으로  $L_{rz}$ 가 감소하고 있다. 이는 연료 분출 확산 화염의 경우에 있어서  $L_{rz}$ 의 감소가 보염성의 향상을 의미하는 것과 잘 일치한다. 연료 분출각이 60°인 경우에는  $L_{rz}$ 의 최대점이 존재하며, 이 점이 우측으로 전위하고 있다. 이 점은 연소반응의 최적상태인 이론 혼합기 상태인 곳으로 생각되며, 혼합기를 사용한 경우가 LPG를 사용한 경우보다 먼저 최대점에 도달한다. 동일한 종류의 보조연료를 주입할 경우에 대하여 주연료 분출각이 300°일 때

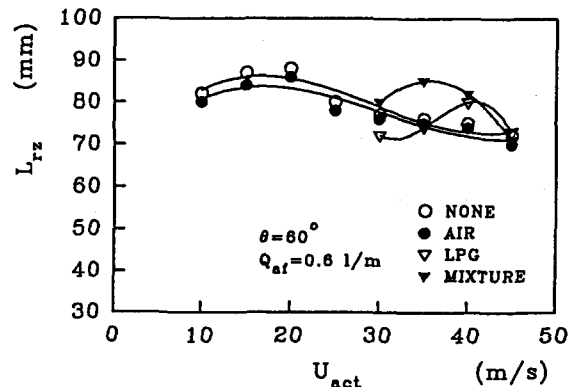


Fig. 9 Length of recirculation zone for auxiliary fuel injection at  $\theta=60^\circ$

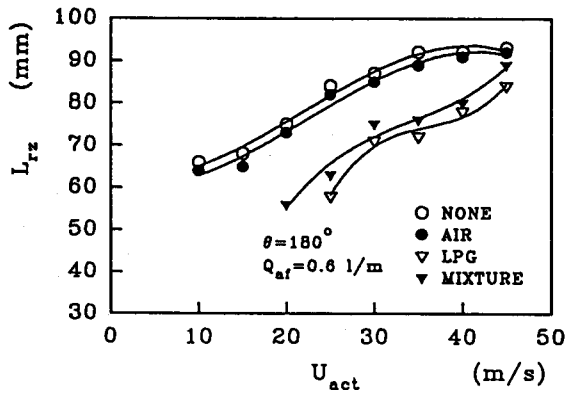


Fig. 10 Length of recirculation zone for auxiliary fuel injection at  $\theta=180^\circ$

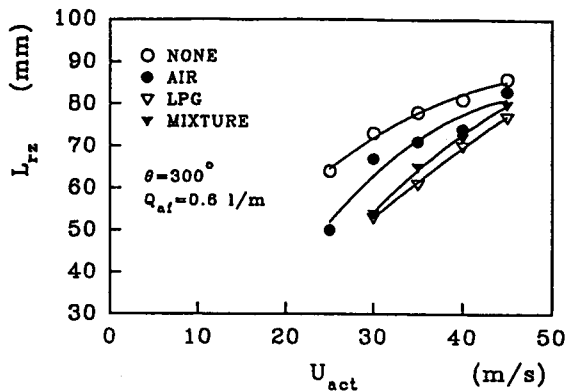


Fig. 11 Length of recirculation zone for auxiliary fuel injection at  $\theta=300^\circ$

의 재순환영역의 길이가  $180^\circ$ 일 때보다 짧는데 이는 화염 안정범위와는 반대의 현상을 보인다. 즉, 화염 안정범위가 증가할수록 재순환영역의 길이는 감소하고 있다. 이러한 결과는 확산화염의 결과인 水谷<sup>10)</sup>의 결과와 일치하지만, 예혼합화염의 경우인 宋<sup>4)</sup>의 결과와는 반대의 경향을 보이고 있다. 즉, 확산화염의 경우에는 화염의 보염성과 재순환영역의 길이는 서로 반비례함을 알 수 있다.

### 3-3. 재순환영역의 온도

주류공기의 유속( $U_{act}$ )을 30 m/s로 일정하게 하고 주연료 분출각이  $60^\circ$ 일 때 보조연료로서 공기, LPG 등을 분출할 경우의 재순환영역의 온도( $T_{rz}$ )를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타낸다.

일반적으로 공기를 공급한 경우에는 온도변화가

거의 없으나, LPG를 공급한 경우에는 온도변화가 뚜렷하다. 보조연료로서 공기를 사용한 경우에는  $T_{rz}$ 의 변화가 거의 없는 것으로 나타났는데, 이는 Fig. 9 ~ Fig. 11에 보인 것처럼 재순환영역 내에 공기를 공급하여도 연료 분출각의 특성상 보염성의 변화에 거의 영향을 미치지 못하고,  $T_{rz}$ 의 변화 또한 거의 없는 것으로 생각된다. 주연료량이 4.5 l/m일 때  $1430^\circ\text{C}$  정도의 최대값을 보이는데, 이 지점이 이상적인 연소조건인 이론 혼합기상태라고 생각된다. 보조연료로서 LPG를 공급하는 경우에는 대체적으로 보조연료의 공급량이 증가함에 따라

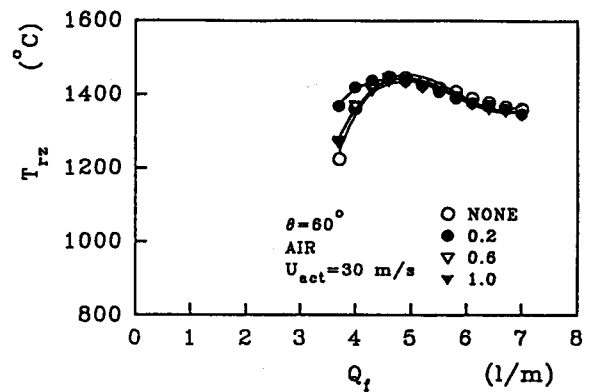


Fig. 12 Temperature of recirculation zone for air injection at  $\theta=60^\circ$

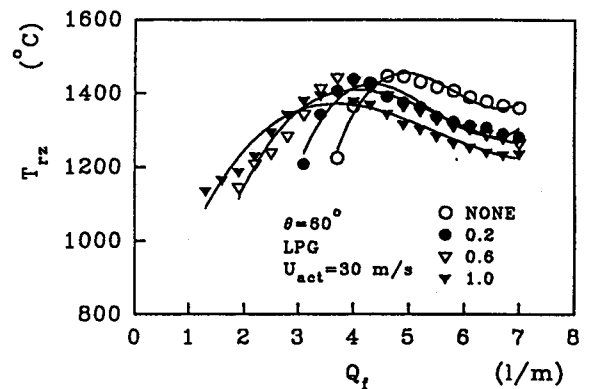


Fig. 13 Temperature of recirculation zone for LPG injection at  $\theta=60^\circ$

$T_{rz}$ 가 감소하고  $T_{rz}$ 의 최대치가 좌하향하는 경향을 보이고 있다. 이는 보조연료를 사용하지 않은 경우에 대해 이론 혼합기의 연소조건이  $Q_{af}$ 가 증가함에 따라 적은 주연료량( $Q_f$ )에서 이루어지고 보염성

의 향상에도 기여하는 것으로 보여진다.

$U_{act}=30$  m/s로 일정하게 하고, 주연료 분출각을  $300^\circ$ 로 했을 때 공기, LPG 등을 보조연료로서 분출할 경우에 대한 재순환영역의 온도( $T_{rz}$ )를 Fig. 14와 Fig. 15에 나타낸다. 각 보조연료에 대하여 보조연료량( $Q_{af}$ )이 증가함에 따라 온도분포가 보조연료를 공급하지 않은 경우에 비하여 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 공기가 소량으로 공급되는 경우에는 연소반응의 촉진으로 인하여  $T_{rz}$ 가 상승한다. 그러나 과잉 공급되는 경우는 연료의 확산이 활발해져 화염체적이 증가되고 이에 따라 열손실량이 증가되어  $T_{rz}$ 가 감소하게 된다. 보조연료로서 LPG를 사용한 경우에는 공기를 공급한 경우보다  $T_{rz}$ 가 감소하는 경향을 보이고있다. 재순환영역 내에 LPG나 혼합기를 보조연료로 공급함에 따라 재순환영역에서 반응대로의 열손실이 커짐

으로써 공기의 경우보다  $T_{rz}$ 가 더욱 감소한다고 생각된다. 결과적으로 주연료 분출각도에 관계없이 LPG를 공급하는 경우가 공기를 공급하는 경우에 비해 혼합영역 내의 온도저하로 인한 열손실이 증가되어 재순환영역 내의 온도가 감소되는 것으로 생각된다. 또한 보조연료로서 혼합기를 사용한 경우에는 LPG와 공기를 사용한 경우의 중간적인 특성을 보이며, 주연료를 주연료 분출각  $180^\circ$ 로 분출하고, 각 보조연료를 재순환영역 내에 분출할 경우, 온도의 특성은 주연료 분출각  $60^\circ$  및  $300^\circ$ 로 분출할 경우보다 변화가 작은 것으로 나타났다.

### 3-4. 화염의 형상

화염의 직접사진 및 솔리렌사진은  $U_{act}=30$  m/s로 일정하게 하고  $Q_{af}=0.6$  l/m으로 고정시킨 경우 blow off 근접시의 화염에 대하여 연료 분출각 별로 촬영하였다.

Fig. 16은 주연료 분출각이  $180^\circ$ 인 경우, 각 보조연료 공급시 화염의 직접사진을 나타낸다. 공기를 공급한 경우에는 보조연료를 공급하지 않은 (a)의 경우와 유사한 형상의 화염을 보이지만, LPG와 혼합기를 공급한 경우에는 재순환영역 내에 강한 휘염이 형성되고, 연료 분출각의 특성에 기인한 혼합영역의 확대에 인하여 휘염의 길이는 별다른 차이가 없는 것으로 생각된다. 또한 주연료 분출각이  $60^\circ$ 인 경우에도  $180^\circ$ 인 경우와 유사한 경향을 볼 수 있었다.

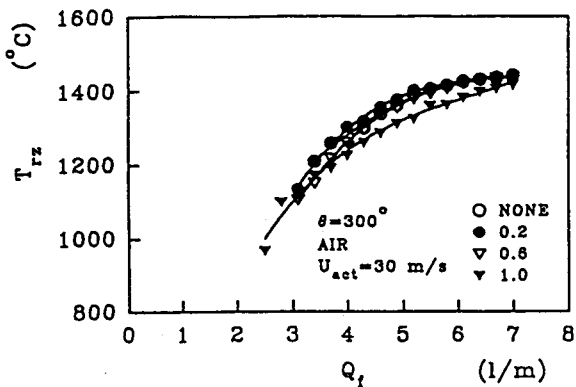


Fig. 14 Temperature of recirculation zone for air injection at  $\theta=300^\circ$

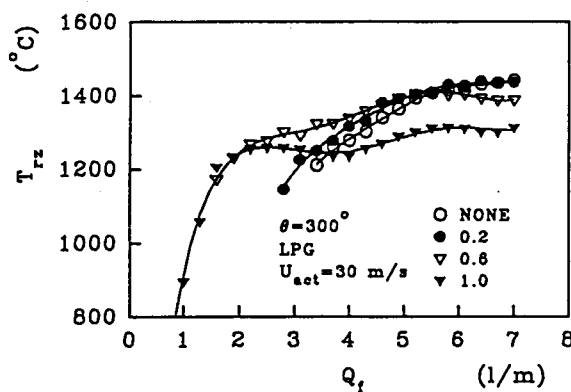


Fig. 15 Temperature of recirculation zone for LPG injection at  $\theta=300^\circ$

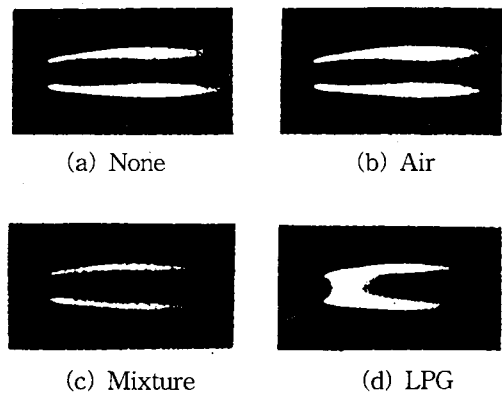


Fig. 16 Direct photographs for auxiliary fuel injection at  $\theta=180^\circ$

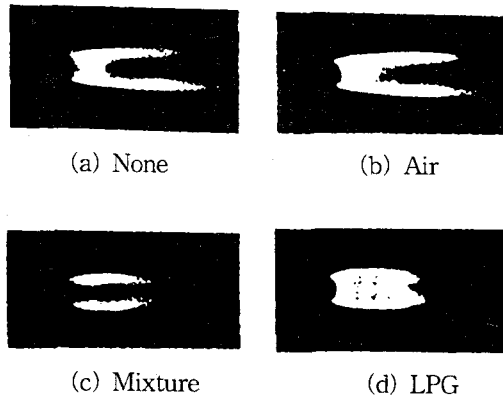


Fig. 17 Direct photographs for auxiliary fuel injection at  $\theta=300^\circ$

Fig. 17은 주연료 분출각이  $300^\circ$ 인 경우에 대하여 각 보조연료 공급시 화염의 직접사진을 나타낸다. 혼합불량으로 인한 미연탄소의 연소반응에 의하여 전반적으로 휘염상태를 보인다. 보조연료로 공기를 공급한 경우에는 보조연료를 공급하지 않은 (a)와 유사한 화염의 형태를 보이며 주연료에 의한 화염은 연한 청색을 띤다. 또한 Fig. 3 ~ Fig. 6 및 Fig. 14 ~ Fig. 15에 보인 것처럼 연소반응의 촉진으로 인한 재순환영역의 온도상승과 함께 보염성이 다소 향상된다. 보조연료로서 LPG와 혼합기를 공급한 (c), (d)의 경우에는 전체적으로 화염의 길이가 감소한다.

주연료 분출각이  $180^\circ$ 인 보염기를 설치하고, 보조연료로 LPG를 각각  $0.2 \text{ l/m}$ ,  $1.0 \text{ l/m}$ , 공급한 경우와 이를 공급하지 않은 경우에 대한 blow off 근접시의 슬리렌사진을 Fig. 18에 나타낸다. 보조연료로 LPG를  $1.0 \text{ l/m}$  공급한 경우가  $0.2 \text{ l/m}$  공급한 경우와 이를 공급하지 않은 경우에 비하여, 유동상의 와(eddy)가 작게 나타나고 있다. 즉, 재순환영역 내에 농도가 높은 보조연료를 다량으로 공급할수록 연료와 공기의 확산이 불량하다는 것을 나타낸다. 결국 재순환영역 내에 보조연료를 공급함에 따라 연료의 확산이 불량해져 보염성이 향상됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

Bluff body로부터 연료를 분출시켜 그 후류에 형성

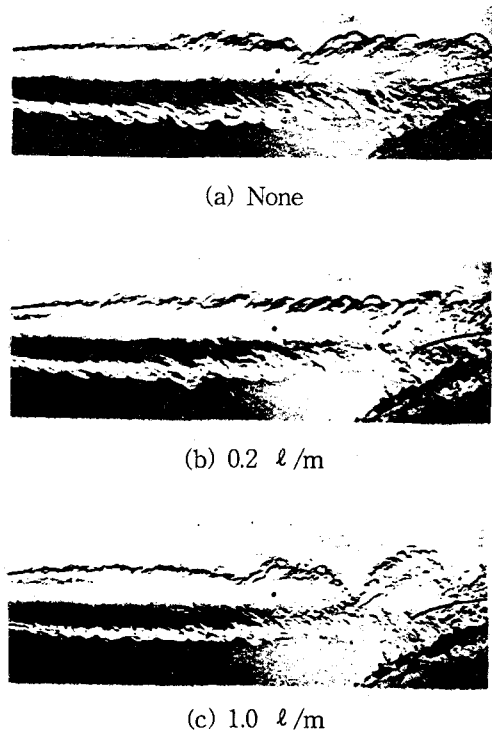


Fig. 18 Schlieren photographs for LPG injection at  $\theta=180^\circ$

되는 확산화염에 대하여 주연료 분출각도와 재순환영역 내에 분사되는 보조연료의 양과 종류를 변화시킨 경우, 화염의 보염특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 보조연료의 종류와 양을 변화시키에 따라 보염성을 향상시킬 수 있다.
2. 주연료 분출각이 주류유동 방향인 경우, 재순환영역 내에 보조연료로서 공기를 공급하면, 미연가스량을 줄일 수 있을 뿐만아니라 화염 안정범위를 증가시킬 수 있다.
3. 보조연료를 공급하는 경우에는 이를 공급하지 않는 경우보다 재순환영역의 길이가 감소하며, 이런 경향은 농도가 진한 보조연료를 공급할 수록 더욱 뚜렷하다.
4. 보조연료로서 LPG를 공급한 경우가 공기를 공급하는 경우에 비하여, 혼합영역 내의 열손실이 증가되어 재순환영역 내의 온도가 낮아진다.
5. 보조연료로서 공기를 공급한 경우에 화염의 형상은 보조연료를 공급하지 않은 경우와 유사하다. 그러나 LPG를 공급한 경우에는 미연가스의 발생으로 인하여 휘염상태를 보이는데 이런 현상은

주류공기 방향으로 주연료를 분출할 경우에 더욱 뚜렷하다.

## 5. 참고 문헌

- (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, 99, pp.122~133.
- (2) Ito K., Matsumoto N., Mitsuo K., and Masami K., 1984, "Stabilization Mechanism of Turbulent Wake Flame Behind Bluff Bodies with Fuel Injection", Bulletin of JSME, Vol. 27, No. 234, pp.2826~2832.
- (3) Zukoski E. E. and Marble F. E., 1975, "Experiments Concerning the Mechanism of Flame Blow-off from Bluffbodies", Comb. Res. and Rev. AGARD, pp.167~176.
- (4) 송규근, 안진근, 1993, "동축분류 예혼합 화염에 관한 연구(II)", 한국항공우주학회지, 21권, 6호, pp.86~94.
- (5) Kundu K. M., Bannerjee O. and Bhacluri D., 1977, "Theoretical Analysis on Flame Stabilization by a Bluff Body", 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", Proceeding of the Gas Dynamics Symposium on Aerothermochemistry, pp.205~210
- (7) Cheng S. I., and Kovitz A. A., "Theory of Flame Stabilization by a Bluff-Body", 1959, Proceeding of the Seventh Symposium (International) on Combustion, pp.681~691.
- (8) Winterfield G., "On Processes of Turbulent Exchange Behind Flame Holders", 1965, Proceeding of the Tenth Symposium (International) on Combustion, pp.1265~1275.
- (9) 조옥찬, 유상신, 이동호, "교육실험용 소형풍동 제작", 1988, 한국항공우주학회지, 제16권, 제2호, pp.59~67.
- (10) 水谷幸夫, 香月正司, 上田正則, 1983, "放射噴流擴散火炎バーナの火炎安定機構", 日本機械學會論文集(B編), 第49卷, 第439號, pp.724~728.