CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 13, No. 4, December 2007, pp. 300~307.

연료분출 조건에 따른 확산화염의 연소특성에 관한 연구

이성노, 안진근*

충남대학교 공과대학 기계공학부
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

(2007년 10월 25일 접수; 2007년 12월 7일 채택)

A Study on the Combustion Characteristics of Diffusion Flame with the Fuel Injection Condition

Sung No Lee* and Jin Geun An*

Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University
220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

(Received for review October 25, 2007; Revision accepted December 7, 2007)

요 약

본 연구에서는 연료분출각의 변화에 따라 보염기(cylindrical stabilizer) 후류에 형성되는 확산화염의 화염안정성, 재순환영역의 길이 및 온도, 보염기 후류의 난류강도 분포, 재순환영역의 연소가스 농도 등을 측정하고, 화염의 직접사진 및 슐리렌사진을 촬영하여 확산화염의 연소특성을 고찰하였다. 화염안정성은 연료분출각과 주류공기 유속의 영향을 받으며, 재순환영역의 길이와 온도는 연료분출각의 영향을 받았다. 재순환영역의 길이가 짧고 온도가 낮을수록 화염안정성이 양호하지만, 연료분출각의 변화에 따른 난류강도 분포에는 별로 차이가 없었다. 재순환영역 내 미연가스 농도가 높고 이산화탄소 농도가 낮은 경우, 화염안정성은 양호하지만 연소상태는 불량한 것으로 나타났다. 연소효율, 고부하 출력, 대기환경, 연료의 청정연소조건 등을 고려하여 적절한 연료분출각을 선정함으로써 양호한 연소조건을 유지할 수 있다.

주제어 : 확산화염, 화염안정성, 재순환영역의 길이/온도, 연소가스 농도, 화염의 형상, 연소특성

Abstract – The combustion characteristics of diffusion flame formed in the wake of a cylindrical stabilizer with varying fuel injection angle were studied. This study was performed by measuring the flame stability limits, lengths and temperatures of recirculation zones of flames, turbulence intensity in the wake of stabilizer, and concentration distribution of combustion gas, and by taking photographs of flames. The flame stability limits are dependent on fuel injection angle and main air velocity. The length and temperature of recirculation zone are dependent on fuel injection angle. As the length of the recirculation zone is decreased, the flame shows more stable behavior. The temperature of recirculation zone has a maximum value at the condition of theoretical mixture. The flame stability is enhanced when the temperature in the recirculation zone decreases. The turbulence intensity in the wake of stabilizer is independent of the fuel injection angle, but it is affected by stabilizer itself and main air flow condition. If the stabilization characteristics of flame is good, the concentration of C_3H_8 is high, but the concentration of CO_2 is low at the boundary of recirculation zone. The combustion characteristics of diffusion flame can be controlled by changing the fuel injection angles. The appropriate fuel injection angle should be selected to get high combustion efficiency, high load power, low environmental pollution, and clean combustion condition of fuel.

Key words : Diffusion flame, Flame stabilization, Length/temperature of recirculation zone, Concentration of combustion gas, Shape of flame, Combustion characteristics.

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail : jgan@kopec.co.kr

1. 서 론

연소현상은 일상생활에 없어서는 안 될 에너지변환 과정이다. 연료의 연소에 의해 전력을 발생시키고, 각종 자동차, 항공기, 선박 등의 교통기관을 움직이며, 또한 연소열을 이용하여 가열, 난방 등이 이루어진다. 이와 같이 연소는 우리 일상생활에 매우 중요하며, 인류의 문명이 발전함에 따라 연소공학의 역할이 더욱 중요시되고 있으나, 연소현상의 완전한 해명은 아직도 충분하지 못한 실정이다. 이는 연소현상이 짧은 시간에 열발생, 혼합, 화학반응, 열물질의 이동, 상변화 등과 같은 많은 현상이 동시에 일어나는 복잡한 현상이기 때문이다.

최근 에너지 소비의 급격한 증가와 국제정세의 복잡화에 따라 에너지의 불안정한 공급, 비용증가, 환경오염 문제 등 심각한 상황을 맞고 있다. 그 대책으로써 새로운 에너지원의 개발과 에너지 절약기술의 필요성이 강조되고 있으며, 핵융합기술 및 태양열에너지 이용기술 등이 크게 부상되고는 있으나, 앞으로 상당기간 동안은 에너지 공급의 상당 부분을 화석연료의 연소기술에 의존하지 않을 수 없다.

가솔린엔진과 같은 4행정 내연기관은 왕복운동을 회전운동으로 전환시켜 주기 때문에 속도에 한계가 있다. 그러나 고온, 고압가스에 의해 터빈을 직접 회전시켜 발생되는 동력을 이용하는 가스터빈이 음속돌파의 새로운 장을 열었다. 산업용 보일러, 제트기관 등에 대하여 대출력, 저공해성 연소기가 필요하며, 실제로 저공해 및 고부하 연소에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 이에 따라 대출력 보일러, 제트기관 등에 대한 연소기의 부하가 급속도로 향상되었으며, 장치의 소형화와 더불어 대출력을 위한 고부하 연속 연소에 대한 지속적인 기술향상이 요구된다.

고부하 연속연소의 경우에 열 부하를 증가시키기 위해 고속 유동장 내 연소가 필요하지만, 고속 유동장 내에서는 화염을 유지하기가 어렵기 때문에 화염의 안정성이 중요하며, 화염의 안정화와 관련된 많은 연구가 수행되었다. 일반적으로 고속 유동장 내에서 화염을 안정하게 유지하는 방법의 기본개념은 연소실 내의 일정한 위치에 가연성 혼합기의 연소속도에 상당하는 저속, 고온영역을 형성시켜 그 영역이 연속연소에 필요한 열 및 활성 화학종의 공급원 역할을 하도록 하는 것이다. 이와 같은 개념을 이용하여 화염의 안정성을 포함한 화염의 여러 특성에 대한 많은 연구가 수행되었다[1~13].

고속기류 중에 보염기(cylindrical stabilizer)와 같은 저항물체를 설치하고, 이로부터 연료를 분출시켜 화염을 안정시키는 확산화염(diffusion flame)의 연소과정은 분출된 연료와 주류공기(主流空氣)의 혼합과정 및 재순환영역의 상태에 따라 크게 지배되며, 연소특성을 결정하는 중요한 인자이다. 실제 연소장치의 연소형태인 난류연소에 대해서는 매우 복잡한 화학반응과 유동으로 인하여 명확한 연소모델을 정립하기 위한 연구가 계속 요구되고 있다[6, 13].

본 연구는 실제 항공기의 연소장치 등에 응용되고 있는 보염기로부터 연료를 분출시켜 형성된 확산화염의 연소특성을 고찰함으로써 산업용 보일러, 원동기, 제트기관 등의 연소장치에서 본 연구 결과가 참고 또는 응용될 수 있도록 하고자 한다. 이에 본 연구에서는 연료분출을 동반하는 보염기를 모델로 선택하여 연료의 분출각도에 따른 화염의 안정범위, 재순환영역의 길이 및 온도, 난류강도 분포, 연소가스의 농도 등을 측정하고, 직접사진 및 슐리렌사진을 촬영하여, 보염기 후류에 형성되는 확산화염 관련 고 연소효율, 고 부하출력, 대기환경 감소 등을 만족할 것으로 기대되는 확산화염의 연소특성 및 청정연소조건에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 실험 및 측정 장치

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 Figure 1에 나타내었다. 실험장치는 공기공급계통, 연료공급계통, 정류실, 연소실, 보염기, 배기덕트 및 점화장치 등으로 구성하였다.

주류공기는 풍량 50 ㎥/min으로 변속 가능한 송풍기를 통하여 공급되며, 유동 단면의 전체 부위에서 유동의 균일성을 유지하기 위하여 벌집망과 4매의 철망을 설치하였다. 연소실의 수직단면은 120 ㎜ × 50 ㎜인 직사각형 모양이고 풍동 전체 길이는 4.5 m이다. 주류공기는 확산부, 정류실, 수축부를 통하여 유속 5 ~ 60 m/s의 범위 내에서 균일한 유동상태로 연소실에 유입되며, 연소실 입구에서의 주류공기의 유속을 주류유속[U(m/s)]으로 정의하였다.

연료로서 시판되는 가정용 액화 프로판 가스(liquefied petroleum gas)를 사용하였다. 가스용기에서 나온 연료는 두 개의 연료공급 튜브(tube)로 나뉘어, 보염기 축을 중심으로 보염기 내에 상하 대칭으로 가공된 2개의 직경 3 ㎜ 홀(hole)을 통하여 좌우 방향으로 동시 공급되며, 최종적으로 2개의 연료분출용 슬릿(0.5 ㎜ × 10 ㎜)을 통하여 대칭으로 연소실에 분출되도록 하였다. 고전압 점화코일의 불꽃방전을 이용하여 보염기로부터 분출된 연료를 점화시켰다.

연소실의 화염을 육안으로 관찰하고 사진 촬영이 가능하도록 하기 위하여 연소실 양측 벽에 크기 100 ㎜ × 250 ㎜, 두께 3 ㎜인 석영유리를 설치하였으며, 이 석영유리에 보염기를 설치 가능하도록 직경 15 ㎜인 구멍을 가공하였다. 연소실의 상측 중앙에는 측정용 프로브(probe)를 삽입할 수 있도록 폭 10 ㎜, 길이 200 ㎜인 슬릿을 가공하였으며, 실험 중에 이 슬릿에 의한 유동의 교란을 최소화하기 위하여 두께 6 ㎜인 유리판을 덮개로 사용하였다.

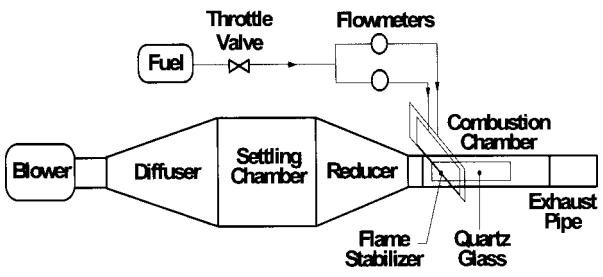


Figure 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

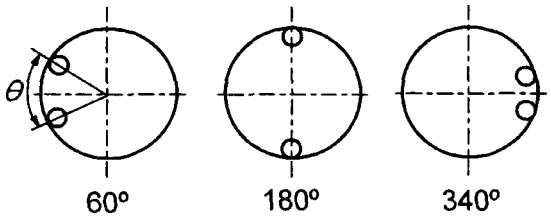


Figure 2. Schematic diagram of fuel injection angles.

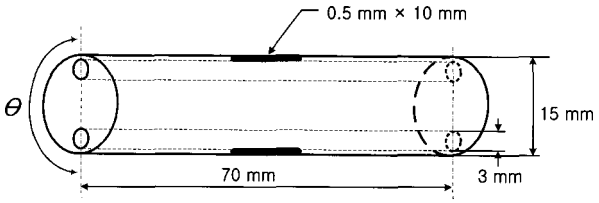


Figure 3. Schematic diagram of flame stabilizer.

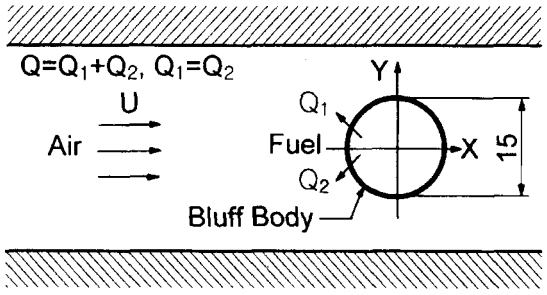


Figure 4. Arrangement of flame stabilizer in combustion chamber.

직경이 15 ㎜이고 길이가 70 ㎜인 황동제 원통형 보염기를 사용하였다. 보염기의 단면형상에 따라 보염성에 대한 차이가 발생되는데, 본 연구에서는 반원, 삼각형, 직사각형 등의 단면형상을 가지는 보염기보다 공기항력계수가 작은 단면이 원형인 보염기를 선택하였다. 연료분출각(Θ)은 보염기 축을 원점으로 상하 대칭으로 가공된 2개의 연료 분출용 슬릿이 주류공기에 대향하는 각도로 정의하고, 60°, 180°, 340°를 선택하였다. 보염기의 개략도와 연소실 내 보염기의 설치도를 Figure 2 ~ 4에 나타냈다.

화염의 안정범위는 공기의 주류유속을 일정하게 유지하고, 연료분출량(Q)을 서서히 감소시켜 화염이 블로우오프(blow off)되게 하는 방법으로 측정하였다. 일정한 공기의 주류유속 조건에서 연료 공급량을 서서히 감소시킴으로써 화염의 안정성이 극도로 불량하여 보염기 후류에 화염이 유지되지 못하고 소멸되는 상태를 화염의 블로우오프 조건으로 정의하였다. 따라서 각 공기의 주류유속에 대하여 화염의 블로우오프 조건에 해당하는 연료 분출량은 다르게 나타난다. 또한 화염의 블로우오프 직전상태는 화염의 안정범위 측정 시 화염이 블로우오프될 때의 연료 분출량보다 10% 많은 연료를 공급하여 화염이 블로우오프되지 않고 유지되는 상태로 정의하였다.

화염은 보염기 상의 박리점으로부터 하류에 형성되며 수평 및 수직방향의 평면상의 화염형상을 관찰할 수 있도록 보염기 축방향으로 사진을 촬영하였다. 화염의 직접사진은 표준렌즈를 사용하여 고감도 필름으로 촬영하였으며, 화염의 슐리렌사진은 Figure 5에 나타낸 바와 같은 슐리렌 촬영장치를 사용하여 촬영하였다. 슐리렌사진 촬영장치는 광원부, 두 개의 구면경, 수광부 등과 같이 크게 3부분으로 구별할 수 있다. 광원으로부터 나온 빛을 렌즈로 집광시키고, 직경이 약 1 ㎜인 핀홀(pin hole)을 통과시켜 점광상태로 만든다. 이 점광원이 첫 번째 구면경에서 평행광선으로 되어 연소실을 통과하여 두 번째 구면경에 도달하게 되고, 그의 초점위치에 슐리렌용 슬릿을 설치하였다. 이 슬릿을 통과한 빛이 슬릿 뒤에 있는 카메라에 영상을 맺히게 하여 촬영하였다. 광원으로서 스트로브스코프를 사용하였으며, 이를 수광부의 카메라와 동기시켰다.

외경이 1 ㎜인 스테인레스강으로 만든 프로브로부터 식염수(NaCl)를 보염기 후류에 분출시켜 나트륨 반응에 의한 발광현상을 이용하여 재순환영역의 길이(L_{rz})를 측정하였다. 식염수의 분출위치는 2차원 이송장치에 의해 수평 및 수직방향으로 이동이 가능하며, 식염수의 분출에 의한 영향을 최소화하기 위하여 보염기 축 방향으로 식염수를 분출시켰다. 재순환영역의 길이는 보염기 후단부터 프로브 선단에서 분출된 식염수의 나트륨 반응에 의한 발광이 역류되기 시작하는 지점까지의 거리로 설정하였다.

직경이 0.1 ㎜이고 재질이 Pt-Pt/Rh 10%인 S형 열전대를 사용하여 화염의 길이방향 중심축에서 재순환영역의 길이를 3등분한 각 지점의 온도를 측정하고, 이를 산술평균 하여 그 값을 해당 조건의 재순환영역의 온도(T_{rz})로 선정하였다.

연소반응을 동반하지 않은 등온류에 있어서 보염기 후류에 대한 난류강도를 측정하였다. 난류강도 측정에는 정온형 열선풍속계 시스템을 사용하였으며, 직경이 5 ㎛인 I형 열선을 이용하였다. 열선을 연소실 상부의 프로브 삽입용 슬릿을 통하여 삽입하고, 2차원 이송장치를 이용하여 X 및 Y 방향으로의 이동이 가능하도록 하였다. 난류강도 측정 시에는 프로브 선단의

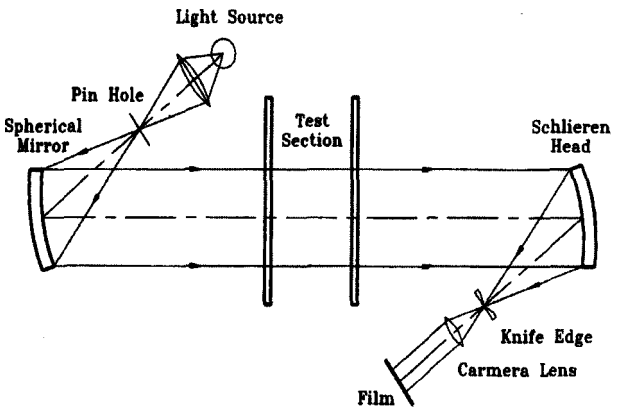


Figure 5. Schematic diagram of schlieren system.

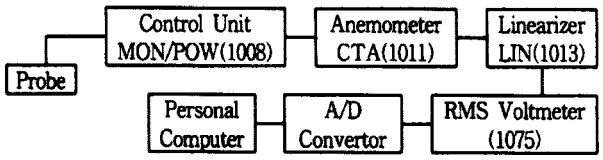


Figure 6. Schematic diagram of data acquisition system for turbulence intensity.

열선이 보염기와 평행하도록 설치하고 얻어진 신호는 선형기에 의해 유속-전압 사이의 선형화가 이루어지도록 하였다. 파동속도의 RMS 값은 RMS 전압계에 의해 측정되며, 측정된 데이터의 정확한 산술평균값을 얻기 위하여 변환기를 통해 온라인 연결된 컴퓨터로 수치처리하였다. 샘플링을 통하여 2.5초 동안 2,000개의 데이터를 획득하였다. Figure 6에 본 연구에서 수행한 난류강도 측정계통을 나타내었다.

가스크로마토그래프를 사용하여 보염기 후류에 형성되는 화염의 연소가스 농도를 측정, 분석하였다. 수평방향으로 20 ㎜, 수직방향으로 5 ㎜ 간격으로 측정점을 설정하였으며, 각 측정점에서 연소가스를 샘플링할 때 주변영역에 영향을 미치지 않도록 샘플링 량을 약 5 cc 정도로 제한하였다. 연소가스의 샘플링에는 내경이 0.2 ㎜이고 선단에서 10 ㎜ 정도의 위치에서 "ㄱ"형으로 굽힌 석영 가우스(Gauss)관을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 화염의 안정범위

Figure 7에 연료분출각의 변화에 따른 화염의 안정범위를 나타냈다. 보염기 후류의 재순환영역에 근접하여 연료를 분출시키는 경우 즉, 연료분출각이 340°일 때 화염안정범위가 가장 넓다. 주류유속이 작을 때(U<25 m/s)에는 연료분출각이 180°일 때가 60°일 때보다 화염안정범위가 넓지만, 주류유속이 클 때(U>25 m/s)는 상반되는 경향을 보이고 있다. 이것은 본 실험조건의 경우 주류유속 25 m/s를 경계로 하여 연료분출각 60°와 180°에 대한 연료의 확산특성이 변하기 때문이라고 생각된다. 연료분출각이 180°일 때는 화염안정범위가 좁아지는데, 이것은 연료분출속도의 수직방향 성분이 60°나 340°인 경우보다 커짐에 따라 분출된 연료의 수직방향의 운동량 증가로 인하여 연료와 공기의 혼합 및 확산이 활발해져 쉽게 희박혼합기 상태로 되기 때문이라고 생각된다. 그러나 연료분출각이 340°인 경우에는 재순환영역에 근접하여 연료가 주입되기 때문에 화염반응대 부근에 과농한 상태가 유지됨으로써 주류 공기유속이 고속으로 상승될 때까지 화염이 유지된다.

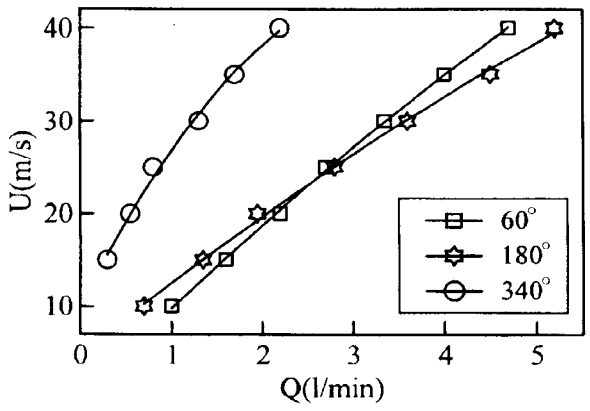


Figure 7. Flame stability limits according to the fuel injection angles.

연료분출각도의 변화에 따라 화염 안정범위에 차이가 없다고 주장하는 연구자도 있으나[5], 본 연구에서는 위에서 기술한 바와 같이 연료분출각도를 변화시킴에 따라서 화염 안정범위를 향상시킬 수 있다는 결과를 얻었다.

3.2. 화염의 형상

3.2.1. 화염의 일반 형상

일반적으로 원통형 보염기에 의해 형성되는 화염은 보염기 후류에서의 연료와 공기의 혼합, 확산에 의해 결정되며, 이와 같은 확산화염의 구조는 Figure 8에 나타냈다.

연료분출각의 변화에 따른 화염의 일반 형상을 Figure 9에 나타냈다. 이 사진들은 모두 주류유속이 20 m/s이고 연료 분출량이 3.0 *l*/min인 안정된 상태의 화염을 촬영한 것이다.

연료분출각이 60°인 경우, 화염의 선단에서 중앙으로 갈수록 전체적으로 수직방향의 폭이 증가되는데 이는 연료의 확산이 화염의 중앙부에서 활발히 진행되어 결국 반응대가 확장되기 때문이라고 생각된다. 화염은 옅은 청색을 나타내어 양호한 연소상태임을 보여주고 있다. 연료분출각이 180°인 경우, 전반적인 경향은 60°인 경우와 유사하지만, 화염이 수직방향으로 더욱 확장되고 있는데, 이는 연료의 분출이 주류에 수직으로 이루어짐으로써 연료가 수직방향으로 더욱 활발히 확산되기 때문인 것으로 생각된다.

연료분출각이 340°인 경우, 재순환영역 부근으로 연료가 분출되기 때문에 주류유동 방향으로 연료를 분출하는 효과로 인해 연료의 확산이 불량하여 화염이 크게 신장되지 못하므로, 전체 화염의 길이가 비교적 짧다. 전반적으로 화염은 휘염(輝

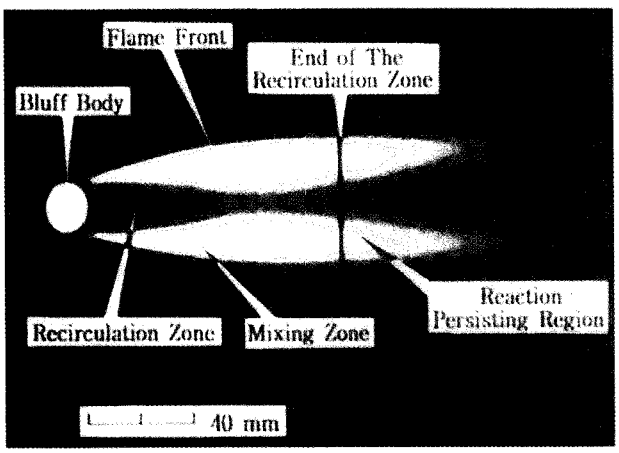
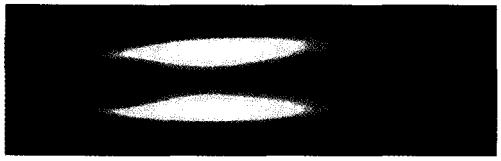
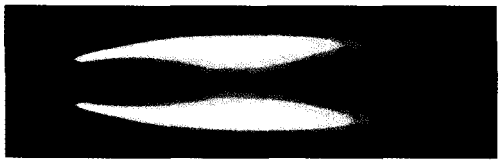


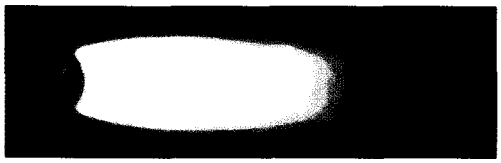
Figure 8. Side view of a stabilized flame.



(a) θ=60°



(b) θ=180°



(c) θ=340°

Figure 9. Photographs of flames with different angles of fuel injection.

(a) Θ=60°

(b) Θ=180°

(c) Θ=340°

Figure 10. Schlieren photographs of flames with different angles of fuel injection.

焰)상태를 유지하는 불량한 연소상태이며, 연료의 일부가 미연(未燃)의 상태로 배출된다.

비교적 작은 20 m/s의 주류유속에서 연료분출각이 60°인 경우 연료가 주류유동 방향과 거의 반대방향으로 분출됨으로써 연료와 공기가 예혼합(豫混合)되어 연소실에 공급되는 효과가 있으므로 예혼합화염의 성격을 갖는 것으로 판단된다. 그러나 연료분출각 340°인 경우에는 연료와 공기가 확연히 서로 별도로 공급되므로 확산화염의 성격을 갖는다.

3.2.2. 슐리렌(Schlieren) 사진에 의한 화염의 형상

연료분출각의 변화에 따른 화염의 슐리렌사진을 Figure 10에 나타냈다. 주류유속 및 연료 분출량은 직접사진을 촬영한 조건과 동일하게 유지하였다. 화염의 직접사진과는 다르게 슐리렌사진으로는 화염대와 비화염대의 구별이 쉽지 않음을 알 수 있다. 또한 모든 연료분출각에 대한 와류(渦流)의 크기에 별로 차이가 없음을 보여주고 있다.

보염기 직후의 화염 상단부에서 와류의 형성은 연료분출각이 60°일 때가 오히려 180°일 때보다 뚜렷하며, 340°일 때에 가장 희미한 것으로 나타났다. 이것은 주류유속의 조건 20 m/s에서는 연료분출각이 60°일 때가 180°일 때 보다 연료와 공기의 확산 및 혼합이 양호하기 때문인 것으로 생각된다.

3.3. 재순환영역의 길이

연료분출각의 변화에 따른 화염의 블로우오프 직전상태의 재순환영역의 길이를 Figure 11에 나타냈다. 재순환영역의 길이는 주류유속이 작은 영역에서는 연료분출각이 60°일 때가 180°일 때보다 길고, 주류유속이 큰 영역에서는 연료분출각이 180°일 때가 60°일 때보다 길게 나타났다. 이는 주류유속이 작은 영역에서는 연료분출각이 60°인 경우가 180°인 경우보다 연료와 공기가 쉽게 혼합됨으로써 먼저 화염의 블로우오프 조건에 도달하지만, 주류유속이 큰 영역에서는 그 반대의 현상이 발생되기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 본 논문의 3.2.2절에 기술한 바와 같이 주류유속이 20 m/s인 경우, 연료분출각이 60°일 때의 와류가 180°일 때의 와류보다도 발달되어 60°일 때의 확산상태가 더욱 양호함을 나타낸다.

연료분출각이 340°인 경우에는 재순환영역의 길이는 매우 짧게 나타났는데, 이는 연료가 재순환영역 부근에 분출됨으로써 화염이 전체적으로 과농한 상태로 되어 반응대가 확장되지 못하기 때문이다.

결국 보염성과 관련하여 고찰하면, Figure 7 및 11에서 알 수 있는 바와 같이 모든 연료분출각에 대하여 주류유속에 관계없이 재순환영역의 길이와 화염 안정범위가 서로 반비례함을 나타냄으로써 본 연구 결과는 재순환영역의 길이가 짧을수록 보염성이 양호하다는 확산화염의 일반특성과 잘 일치하고 있다.

연료분출각이 180°와 340°일 때에는 주류유속이 증가함에 따라 재순환영역의 길이는 증가하다가 각각 어느 일정한 값에 도달하는 경향을 보였다. 이것은 어느 정도의 주류유속까지는 유속이 증가함에 따라 주류유속에 의해 물리적으로 화염이 신장되지만, 그 이후로는 화염의 블로우오프 조건에 해당되는 연료 분출량이 증가되어도 이에 상당하는 주류유속이 매우 커지게 되어 주류유속 증가에 의한 영향이 한계에 도달함은 물론, 화염이 형성되지 못함으로써 이미 측정 가능한 재순환영역을 벗어났기 때문으로 생각된다.

연료분출각이 60°일 때에는 주류유속이 증가함에 따라서 재순환영역의 길이는 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 연료분출각이 60°인 경우, 연료분출각의 특성상 보염기의 상류로 연료가 분출됨으로 인하여 주류유속이 증가함에 따라 화염이 블로우오프되는 조건에 해당하는 연료량은 180°의 경우와 마찬

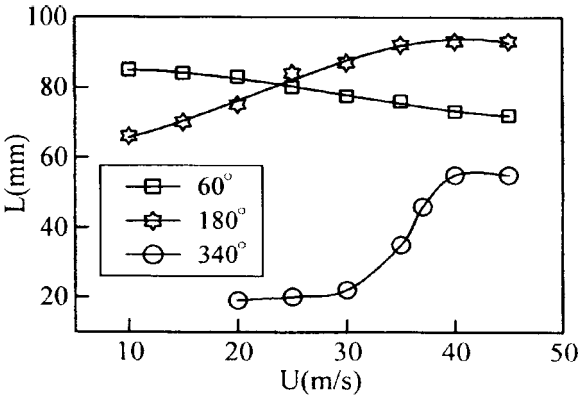


Figure 11. Lengths of the recirculation zones.

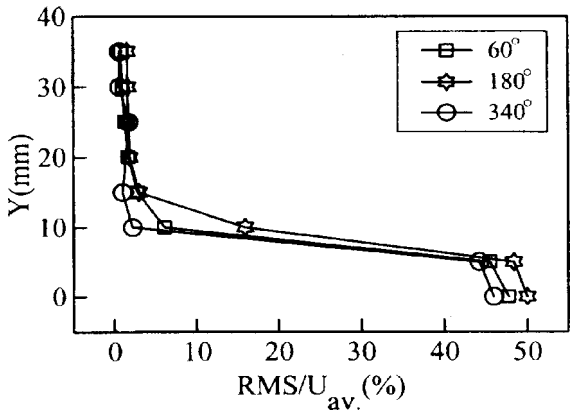


Figure 13. Distribution of turbulence intensity for different fuel injection angles.

가지로 증가된다. 그러나 분출되는 연료속도의 수평방향 성분이 주류유속과 서로 상쇄반응을 일으켜 분출 연료속도의 증가에 따라 연료와 주류공기의 속도성분이 보염기에 대해 영향을 주는 항력계수가 조금씩 감소되기 때문에 상기와 같은 경향을 나타내는 것으로 생각된다. 결국, 재순환영역의 길이는 연소가스의 열팽창뿐만 아니라 공급되는 주류공기의 유속에 의해서도 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.4. 재순환영역의 온도

주류유속을 30 m/s로 일정하게 유지하고, 연료 분출량을 서서히 증가시켜가면서 얻은 연료분출각의 변화에 따른 재순환영역 내의 온도변화를 Figure 12에 나타냈다. 연료분출각 60°와 180°의 경우가 연료분출각 340°의 경우보다 약 200 °C 정도 높게 나타났다. 이는 연료를 60° 혹은 180°로 분출하는 경우에는 기연(旣燃) 가스가 재순환영역으로 들어오기 때문에 재순환영역의 온도가 높고, 340°로 분출하는 경우에는 연료가 재순환영역으로 직접 분출되고 화염이 외부에 존재하기 때문에, 재순환영역은 반응이 잘 일어나지 않는 부분에 해당하므로 측정한 온도가 전체의 평균온도를 낮춘 것으로 판단된다.

모든 연료분출각에 대하여 각각 온도의 최고치가 존재하며, 그 값을 정점으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 정점들이

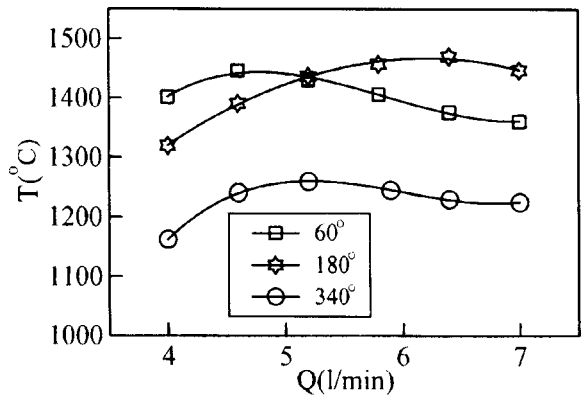


Figure 12. Temperatures in the recirculation zones.

각각의 양론혼합기 상태로 추정되며, 이 점은 60°인 경우가 180°인 경우보다 적은 유량에서 나타났다. 이는 60°인 경우에 적은 연료량으로써 양론혼합기 상태에 먼저 도달하나, 그 이상의 연료가 공급되면 과잉 공급되는 연료로의 열손실에 의해서 재순환영역의 온도가 서서히 낮아지기 때문으로 판단된다. 그러나 180°인 경우에는 양론혼합기 상태에 도달하기 위해 보다 많은 연료가 필요하기 때문에 더 큰 유량에서 최고치가 존재하게 된다. 연료분출각이 340°인 경우, 연료분출각 60° 및 180°인 경우보다 낮은 1250 °C 부근에서 양론혼합기 상태에 도달한 후, 과잉 공급되는 연료로의 열손실에 의해서 재순환영역의 온도가 비교적 완만하게 낮아지고 있다. 이는 연료 분출량이 약 5 l/min 이상이 되면 화염의 불완전 연소상태가 지속되기 때문인 것으로 판단된다.

3.5. 난류강도 분포

주류유속이 30 m/s이고 연료 분출량이 5 l/min인 안정상태로 유지한 조건에서 연료분출각의 변화에 따른 난류강도 분포를 Figure 13에 나타냈다. 보염기 직후 영역 (X=15 mm, Y=10 mm)에서 연료분출각도에 따라 약간의 차이를 보이지만, 전반적으로 난류강도 분포상의 차이를 보이지 않고 단지 보염기에 의한 영향을 공통적으로 나타낼 뿐이다. 난류강도 분포는 연료분출각도에는 거의 영향을 받지 않으며, 보염기 상류 측의 주류유동의 형성 조건에 따라 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

난류강도 분포상에 거의 차이가 없음에도 불구하고 본 논문의 3.1절에 기술한 바와 같이 연료분출각에 따라 보염성이 다른데, 이는 난류성분에 따른 차이는 거의 없지만 각각의 연료분출각도 특성에 따라서 화염이 반응대 내의 연료 또는 반응생성물의 농도가 각 조건에 따라 서로 다르기 때문인 것으로 생각된다.

3.6. 연소가스 농도분포

주류유속이 30 m/s이고 연료 분출량이 7 l/min인 안정상태의 화염에 대하여 연료분출각의 변화에 따른 재순환영역의 평균 연소가스 농도분포를 Figure 14에 나타냈다.

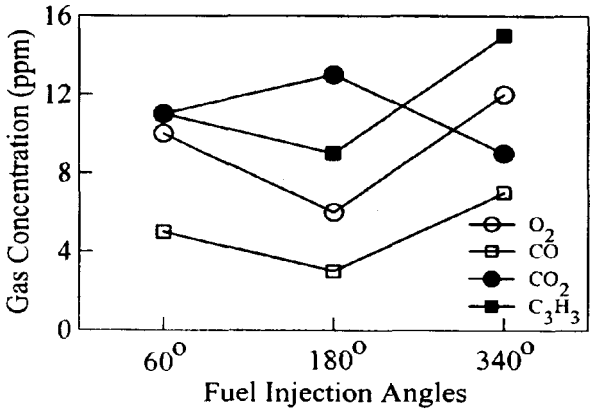


Figure 14. Concentrations of combustion gases versus the fuel injection angle.

산소(O_2) 농도는 연료분출각이 340°일 때 가장 높고 180°일 때 가장 낮은 것으로 나타났다. 이것은 주류유속을 일정하게 설정했으므로 모든 연료분출각에 대하여 공급되는 공기량은 동일하지만, 연료의 확산이 양호한 180°인 경우에는 주류공기 중의 산소가 다른 연료분출각에 비하여 연소반응시에 많이 소비되었기 때문에 산소 농도가 낮게 나타난 것이다. 연료분출각이 60°일 때 재순환영역 부근의 산소 농도는 180°와 340°의 중간 정도의 농도를 나타내고 있다.

일산화탄소(CO) 농도는 340°일 때 가장 높고, 180°일 때 가장 낮은 것으로 나타났다. 연소반응의 특성상 일산화탄소는 불완전 연소반응이 일어날 때 생성되는 중간 생성물이다. 연료분출각이 340°일 때 일산화탄소 농도가 가장 높은 것은 이 경우에 가장 연소상태가 불량함을 보여주고 있는 것이라고 할 수 있다.

이산화탄소(CO_2) 농도는 연료분출각이 180°일 때 가장 높고, 340°일 때 가장 낮은 것으로 나타났다. 이것은 연료분출각이 180°인 경우 연료의 확산상태가 양호하여 연소반응의 최종 생성물인 이산화탄소의 생성량이 많아졌기 때문으로 생각된다.

미연가스로 존재하게 되는 프로판(C_3H_8) 농도는 340°, 60°, 180°의 순서로 높게 나타났다. 이는 이미 언급한 바와 같이 연료의 확산이 불량한 경우일수록 연료로서 분출된 프로판이 완전히 연소되지 못하고 미연상태로 존재하기 때문이다.

결국 연료분출각 60° 및 180°의 경우 재순환영역에는 이미 화염을 통과한 기연가스가 많이 있기 때문에 완전 연소생성물이 많고, 연료분출각 340°의 경우 재순환영역에서의 화학종이 확산화염을 지나서 배출되기 때문에 미연 혹은 불완전 연소생성물이 재순환영역에 많은 것으로 판단된다.

4. 결 론

고속유동장 내의 보염기 후류에 형성되는 확산화염을 대상으로 연료분출각의 변화에 따른 화염의 안정범위, 화염의 형상, 재순환영역의 길이 및 온도, 난류강도 분포, 연소가스의 농도 분포를 측정, 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 주류유속이 작을 때에는 연료가 주류유동에 수직방향으로 분출되면 보염성이 양호하지만, 주류유속이 증가함에 따라 연료가 주류유동에 대향으로 분출되면 보염성이 양호하다. 그러나 연료가 주류유동 방향으로 분출되는 경우에는 주류유속에 관계없이 다른 연료분출각의 경우보다 보염성이 양호하다.
2) 연료가 주류유동에 대향이나 수직방향으로 분출되는 경우에는 청염상태를 유지하지만, 연료가 주류유동방향으로 분출되는 경우에는 휘염상태를 유지한다.
3) 연료분출각과 주류유속에 관계없이 재순환영역의 길이가 길어짐에 따라 보염성이 악화되며, 연료가 주류유동 방향으로 분출되는 경우에는 다른 연료분출각의 경우보다 재순환영역의 길이가 짧아지고 보염성이 향상된다.
4) 연료의 분출량이 증가됨에 따라 재순환영역의 온도는 양론혼합기 상태에서 최고 값에 도달한 후 서서히 감소한다. 또한 주류유동 방향으로 연료가 분출되는 경우 재순환영역의 온도가 낮아지나 보염성은 향상된다.
5) 난류강도 분포는 연료분출각도에는 거의 영향을 받지 않으며, 보염기 및 보염기 상류 측의 주류유동의 형성 조건에 따라 영향을 받는다.
6) 연료를 재순환영역에 근접하여 분출시키는 경우 미연 프로판 농도가 높고, 이산화탄소 농도가 낮음으로써 불량한 연소상태가 된다.
7) 연소효율, 고부하 출력, 대기환경 등을 고려할 때 연료를 주류유동에 수직방향으로 분출, 연소시키는 것이 바람직하다. 연료를 주류유동에 대향하여 분출시키는 경우에는 주류유동이 매우 작아지면 화염이 역류하여 폭발 가능성이 있으므로 적합하지 않다. 또한 주류유동 방향으로 연료를 분출시킬 경우 연소상태가 매우 불량하므로 연소조건으로 선택하기에 부적합하다.

감 사

이 논문은 2006년도 충남대학교 학술연구비의 지원 하에 연구되었으며, 이에 연구를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Gross, R. M., Baer, A. D., and Ryan, N. W., "Flame Stabilization on Fuel-Wetted Cylinders", *Combust. Flame*, **25**, 121-128 (1975).
2. Kundu, K. M., Banerjee, D., and Bhaduri, D., "Theoretical Analysis on Flame Stabilization by a Bluff Body", *Combust. Sci. Technol.*, **17**, 153-162 (1977).
3. Rao, K. V. L., and Lefébvre, A. H., "Flame Blowoff Studies Using Large-Scale Flame Holders", *Trans. ASME, J. Eng. Power*, **104**, 853-857 (1982).
4. Mizutani, Y., Kasashi, M., and Ueda, M., "Mechanism of Flame Stabilization for Gas Burners of Radial Injection Type

with a Bluff Body", *Trans. JSME (Series B)*, **49**(439), 724-728 (1983).

5. Ito, K., Matsumoto, N., Kaji, M., and Koyama, M., "Stabilization on Mechanism of Turbulent Wake Flame behind Bluff Bodies with Fuel Injection", *Bull. JSME*, **27**(234), 2826-2832 (1984).
6. 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**, 340-344 (1995).
7. 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)", *Trans. JSME (Series B)*, **56**(528), 2469-2475 (1990).
8. 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 , 290-293 (1995).
9. Kyu-Keun Song and Jin-Geun An, "A Study on the Premixed Double Concentric Jet Flame", *J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **21**(6), 86-94 (1993).
10. Schefer, R. W., and Goix, P. J., "Mechanism of Flame Stabilization in Turbulent, Lift-Jet Flames", *Combust. Flame*, **112**, 559-574 (1998).
11. Fuji, S., and Eguchi, K., "A Comparison of Cold and Reacting Flows Around a Bluff Body Flame Stabilizer", *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **103**, 328-334 (1981).
12. Yamaguchi, S., Ohiwa, N., Hasegawa, T., and Wada, S., "Structure and Blow-off Mechanism of Rod-Stabilized Premixed Flame", *Combust. Flame*, **62**, 31-41 (1985).
13. Lee, C., and Kim, Y.-C., "Experimental Study on the Flame Stability and the NOx Emission Characteristics of Low-BTU Coal Gas Fuel", *J. Korean Soc. Energy Eng.*, **9**(2), 109-116 (2000).