

〈기술논문〉

가스터빈 연소기내의 선회분무연소특성

홍정구* · 김혁주** · 이충원**

(1996년 3월 15일 접수)

The Characteristics of Swirl Spray Combustion in Gas Turbine Combustor

Jung-Goo Hong, Hyouck-Ju Kim and Choong-Won Lee

Key Words : Swirl Intensity(선회강도), Emission(배출), Flame Stability(화염 안정성), Recirculation(재순환), SMD(Sauter Mean Diameter 평균직경), Equivalence Ratio(당량비), Blow Off(소염), Atomization(미립화), Primary Zone(1차 연소영역)

Abstract

The present study conducted experimental study of spray combustion to investigate the effect of the inlet conditions of fuel and air on the flame structure, the flame stability and the characteristics of emission in the can-type model of a gas turbine combustor. In the experiment, the diameter of fuel droplet was measured using Malvern particle size analyser and temperatures in the combustion chamber were measured with R-type shielded thermocouple. In addition, flame structure was taken picture with camera and analysed. Gas analyser was also used to analyse the concentration of each components of exhausting gas. The experimental results showed that the flame condition was optimal with swirl number, 0.63 and equivalence ratio, 0.5 for controlling the flame stability, the combustion temperature and the NOx concentration. The present study concluded that both the flame structure and the emission formation were strongly affected by the swirl intensity, which selection was found as an important parameter for either stabilizing flame or lowering the quantity of NOx.

기 호 설 명

Q_a : 연소용 공기유량(kg/min)
 Q_f : 연료유량(kg/min)
 r : 반경방향 거리(mm)
 S : 선회강도
 T : 온도(°C)
 x : 축방향 거리(mm)
 τ_{av} : profile factor
 ϕ : 이론당량비

1. 서 론

가스터빈형 연소기내의 연소현상은 분무연소로, 연료의 미립화 및 주위 가스와의 혼합이라는 유체 역학적 현상, 유적의 가열, 증발과 같은 물리적 과정과 연료와 공기의 혼합에 뒤따른 착화 연소와 같은 화학반응 및 반응물질과 주위가스와의 열 및 물질의 교환 등의 과정으로 이루어지며, 이러한 물리적, 화학적 현상들이 동시에 혹은 순차적으로 진행되는 복잡한 연소형태를 보이고 있다. 이러한 이유로 가스터빈형 연소기의 구조나 작동조건, 성능,

*회원, 삼성항공(주)

**회원, 한국에너지기술연구소

***회원, 경북대학교 기계공학과

배기특성과의 관계에 대한 계통적인 연구가 드물고, 최적설계를 위한 자료 등이 아직까지는 충분하지 않기 때문에 이에 대한 연구가 현재까지 활발하게 진행되어 오고 있다.

분무연소의 기초와 관련된 연구로는 1973년 Chigier,^(1,2) 川口⁽³⁾의 순환류 중에 분사된 분무의 연소와, 유적의 거동을 포함한 연구가 있으며, Hacker,⁽⁴⁾ 川口^(5,6) 등은 화염의 안정성과 관련된 연구를 행하였다. 이와 같은 화염안정, 화염형상, 분무연소 등의 기초연구는 개별적으로 해석하는데 유효하지만 실용연소기내의 연소를 해명하기에는 충분하지 않기 때문에, 실용연소기의 구조를 어느 정도 단순화한 모형을 이용하여 연소기 내부의 가스조성, 온도측정을 한 연구⁽⁷⁾와, 연소기에 관점을 둔 江口,⁽⁸⁾ 新井,⁽⁹⁾ 永井⁽¹⁰⁾ 등의 연구가 있다. 또한, 1982년 Boysan⁽¹¹⁾은 가스터빈 연소실내에서의 분무연소의 모델을 제시하였고, Lee와 Oh⁽¹²⁾는 가스터빈 연소실내에서의 분무류의 거동과 혼합현상에 관해서 연구를 하였다.

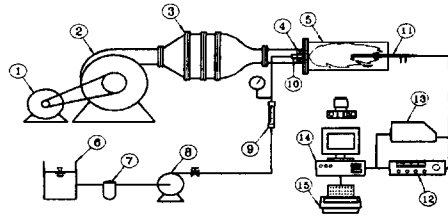
연소배출물에 관한 연구로는 1954년 Appleton⁽¹³⁾의 연료와 공기와의 혼합과 NOx 생성의 관계를 조사하였고, 1981년 Syred⁽¹⁴⁾는 NOx의 생성기구에 대한 연구를 행하였다. 가스터빈연소실내의 배출물들에 대하여 계측하고, 제 배출물을 감소시키기 위한 연구⁽¹⁵⁾ 등이 있으며, 당량비를 조절해서 배출 물을 줄이려는 의도로 행한 연구⁽¹⁶⁾ 등이 있다.

따라서, 본 연구는 가스터빈형 연소기의 구조를

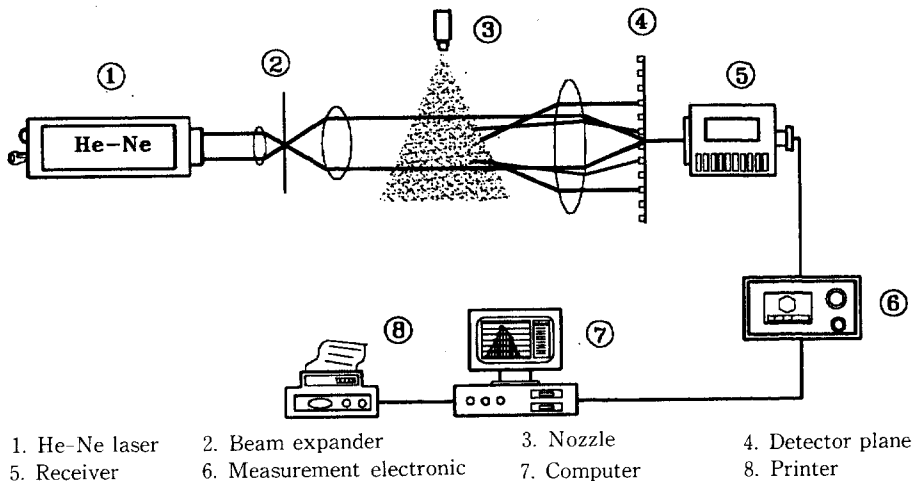
단순화한 can형 모형연소기를 사용하고, 연소용공기의 공기량, 연료량, 선회강도, 공연비 등의 변화에 따른 1차연소영역에 있어서의 화염구조, 화염형성기구, 화염안정성 및 연소배출물특성과의 관계를 상세히 규명하여, 고부하, 저NOx 연소기의 설계에 필요한 기초자료를 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에 사용한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 연소용 공기공급부(①, ②, ③), 연료공급부(⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩), 측정부(⑤)로 나누어지며, 실험에 사용된 연소기는 내경 100mm, 길이 200mm로 제작하였고, 재질은 측정항목에 따라 석영관, 강관을 사용하였다. 연료



1. Motor 2. Blower 3. Air rectifier
4. Swirler 5. Test section 6. Fuel reservoir
7. Filter 8. Fuel pump 9. Flowmeter
10. Nozzle 11. Sampling probe 12. A/D converter
13. Gas analyser 14. Computer 15. Printer
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus



1. He-Ne laser 2. Beam expander 3. Nozzle 4. Detector plane
5. Receiver 6. Measurement electronic 7. Computer 8. Printer
Fig. 2 Schematic diagram of Malvern particle size analyser

는 등유($C_{11.6}H_{23.2}$)를 사용하였고, 전자식 연료펌프 ⑧에 의해 가압된 후, 유량계 ⑨를 거쳐 분사노즐 ⑩을 통해 연소실내에 분사된다. 분사노즐은 압력 분무형 swirl 노즐이다. 연소용 공기의 공급은 원심송풍기 ②를 사용하였으며, 공기정류기를 거친 공기는 swirler를 통하여 연소실로 유입된다. 송풍기를 구동시키는 모터 ①의 출력은 5마력이며, 전원은 출력의 안정을 기하기 위하여 3상 220V를 사용하였으며, 공기량은 모터의 회전수를 가변시킴으로써 조절하였다. 연소시의 온도 측정에는 Pt/Pt-Rh13%의 수냉식 R-type 열전대를 사용하고, 출

력되는 기전력을 증폭기(TL-6200)와 A/D 변환기를 이용하여 온도로 환산하였으며, 이 경우 복사와 열전도에 의한 열손실은 고려하지 않았다. 연소가스 조성의 측정에 있어서 CO, HC 농도는 가스분석기(HORIBA, MEXA-554GE), NO 농도는 정전위전해법의 NO_x 분석기(CE22ASM-P)를 사용하여 측정하였으며, 연소가스 체취프로브는 관내에서 조성변화가 생기지 않도록하기 위하여 스테인리스 스틸을 사용하고 수냉시켰다.

Fig. 2는 노즐부터 분사된 액적의 평균입경을 측정하기 위한 측정장치의 개략도이다. He-Ne laser

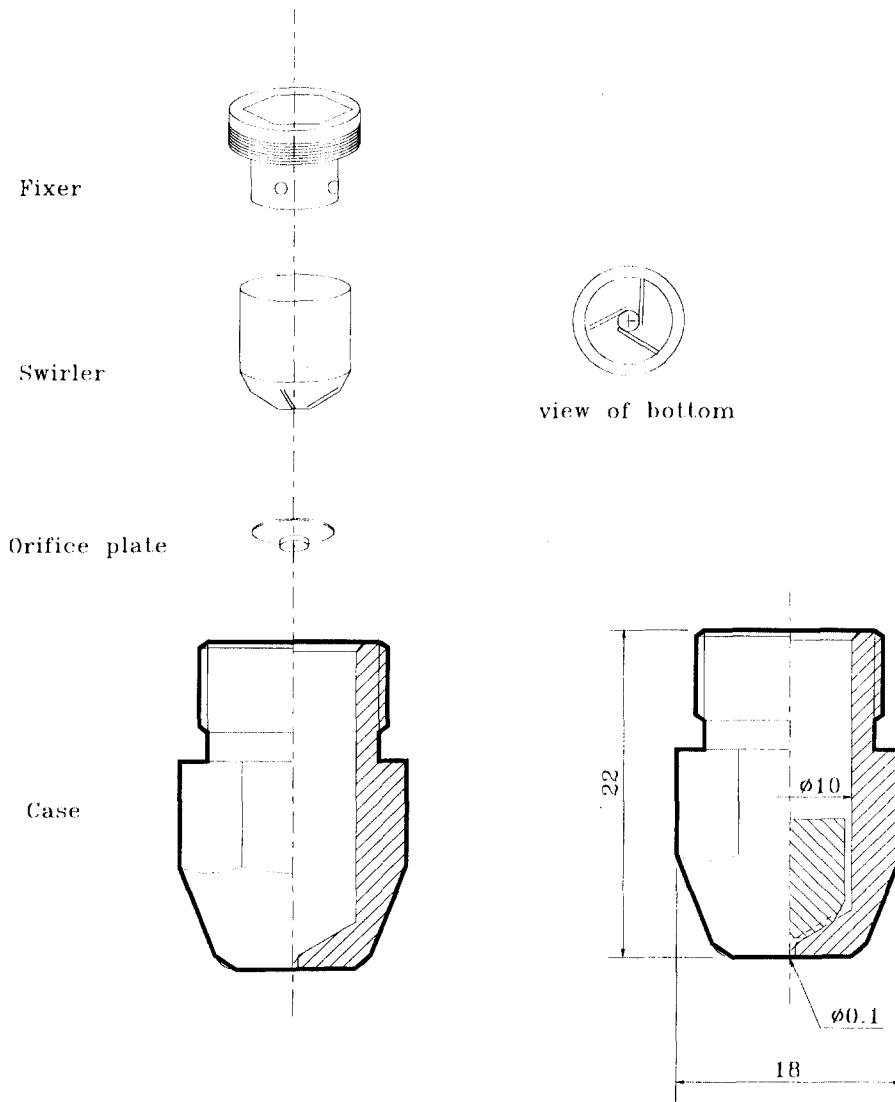


Fig. 3 Detail of nozzle

①에서 나온 광은 빔 확대기 (beam expander) ②를 통해 지름 9mm의 평행광으로 분무된 액적을 통과하게 된다. 이때 광은 산란되어 변이광 형태로 리시버 렌즈 (lens)를 지나 최종적으로 탐사면 (detector plane) ④를 거쳐 측정장치에 입력된다. 분무군과 리시버 렌즈 ⑤ 사이의 거리는 300mm이며, 이번 연구에 사용된 Malvern Particle Sizer의 입경 측정범위는 $2\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$ 이다.

또한, 대기의 영향과 주위 이물질의 혼입으로 인한 레이저광의 산란을 최대한 방지하기 위해 레이저 광 (laser beam) 으로부터 분무영역 앞까지와 분무영역이 끝나는 부분부터 리시버 렌즈 (Receiver lens)까지 지름 200mm의 파이프 주위를 차단시켰으며 측정부는 노즐 선단으로부터 수직하방 각각 80, 150mm이다.

Fig. 3은 본 실험에 사용된 연료분사노즐의 개략도를 나타내며, 노즐은 DANFOSS사의 단공스웰 노즐 (DANFOSS 80° H)을 사용하였고, 노즐로 유입된 연료는 세 개의 접선방향의 홈을 따라 스월 챔버 (Swirl chamber)로 유입되며 오리피스 (orifice)를 떠난 연료는 축방향과 접선방향의 속도성분을 가지게 되고, 분무군의 중심부에 액적 수밀도가 낮은 중공 (hollow cone)의 분무형태를 나타내며 분무각은 83° 이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 연료를 노즐로부터 수직하방으로 분사하였을 때, 분무군의 중심으로부터 반경방향 거리에 따른 SMD의 변화를 나타낸 그림이다. (a)는 노즐 선단으로부터 연직하방으로 80mm 떨어진 곳에서 연료를 0.026, 0.032, 0.038, 0.044, 0.050 kg/min로 점차적으로 증가시켜가며 측정한 평균입경을 나타낸 것으로, 반경방향으로 갈수록 평균입경이 증대됨을 알 수 있으며, 유량이 증가할수록 평균입경이 작아짐을 알 수 있다. 그림에서 연료유량이 증가함에 따라 평균입경이 작아지는 것은 분사압력의 증가로 노즐 출구 속도의 상대적 증가에 기인된다. (b)의 경우는 연료량이 0.050kg/min일 때, 노즐 선단으로부터 거리를 80, 150mm 지점에서 반경방향에 따른 SMD 분포를 나타낸 것으로 노즐선단으로부터 멀어질수록 분무중심축의 평균입경은 변하지 않으나 중심축에서 멀어질수록 평균입경이 증대됨을 알 수 있다. 이 경향은 hollow

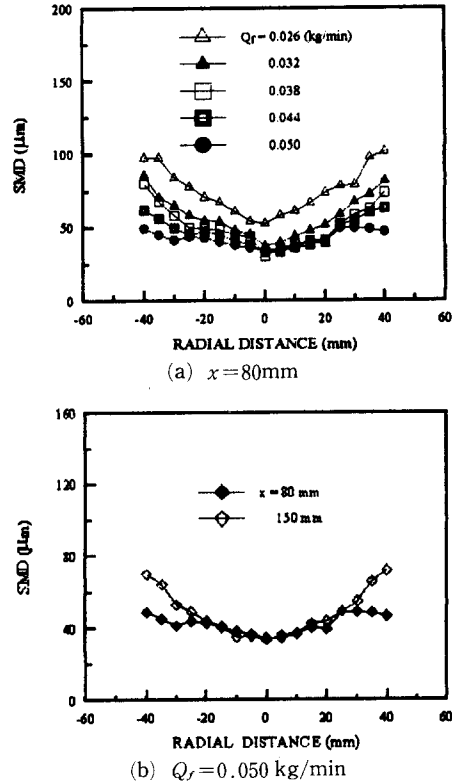


Fig. 4 SMD distribution

cone type 노즐의 분무특성상 중심에는 액적수밀도가 낮고, 중심축에서 멀어진 곳에서의 액적수밀도가 크기 때문에 액적들이 서로 합체되어 평균입경이 증대된 것으로 생각된다.

Fig. 5(a)는 연료량이 0.050kg/min일 때 연소용 공기량과 선회수의 변화에 대한 화염색을 영역으로 나타낸 그림이다. 연소용 공기량이 작은 영역에서는 모든 선회수에 대하여 빨간화염과 노란화염, 연소용 공기량이 많은 영역에서는 선회수가 0.6을 중심으로 푸른화염, 그 외의 영역에서는 노란색으로 나눌 수 있었다. 선회수가 0.6일 때 연료와 연소용 공기의 적절한 혼합으로 푸른화염이 넓게 분포함을 볼 수 있다. (b)는 선회수 0.63일 때 연료량과 연소용 공기량의 변화에 대한 화염 상태를 영역으로 나타낸 그림이다. 모든 연료량에 대하여 크게 연소영역과 소염영역으로 나눌 수 있고, 연소영역은 연소용 공기량이 0.8kg/min 이하의 초기영역, 0.8 kg/min~1.5kg/min의 천이영역, 1.5kg/min~3.4 kg/min의 안정영역으로 구분할 수 있고, 소염영역에서는 연소용 공기량이 3.4kg/min 이상에서

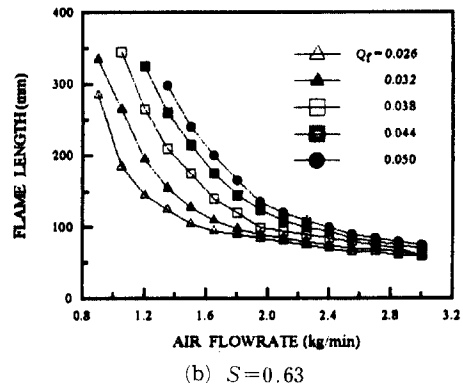
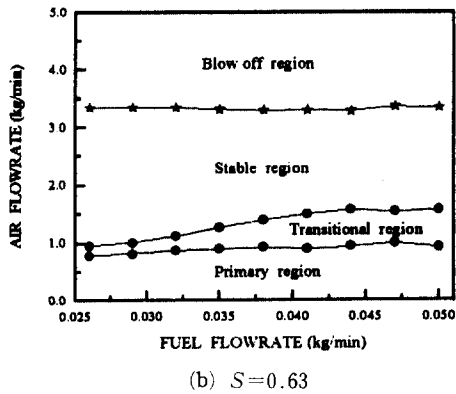
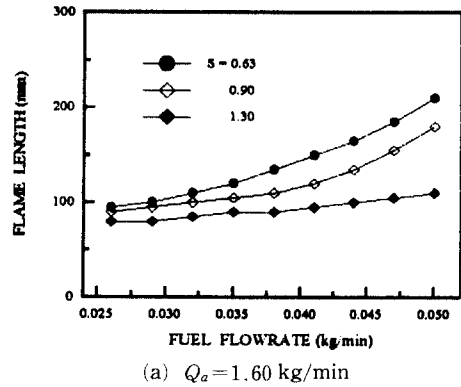
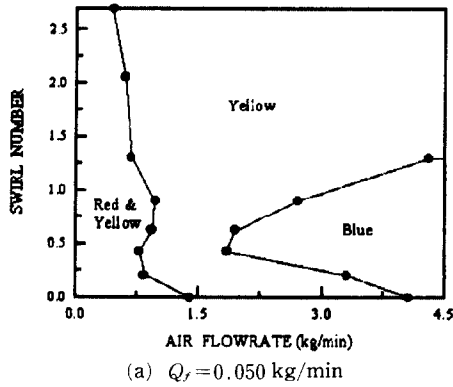


Fig. 5 Color plot & stability plot

Fig. 6 Flame length

blow off 현상을 볼 수 있다. 이것은 연료액적과 연소용 공기의 혼합의 정도에 따른 변화로 판단되며, 특히 blow off의 현상은 연소용 공기량이 과다하여 냉각되었기 때문이라고 생각된다.

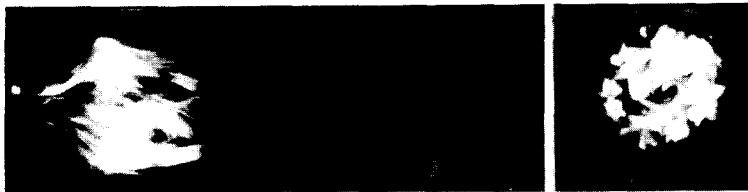
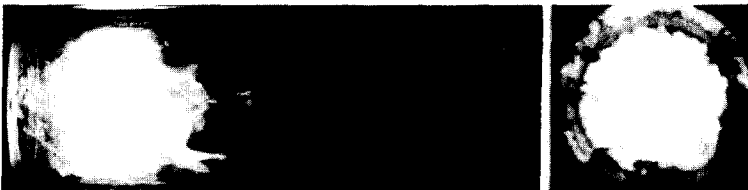
Fig. 6은 노즐 선단에서부터 화염이 잘록하게 잘리는 부분까지를 화염길이라고 정하고 연료 및 공기 유량, Swirl수의 변화에 따른 화염길이를 나타낸 그림이다. (a)는 연소용 공기량이 1.60kg/min이고, 선회수를 0.63, 0.90, 1.30으로 증가시켰을 때, 연료량에 따른 화염길이를 나타낸 것으로 연료량이 증가함에 따라 화염길이는 전체적으로 증가하며, 선회수가 1.30일 때는 연료량의 변화에 대한 화염길이 변화는 작은 것으로 나타난다. (b)의 경우는 선회수를 0.63으로 고정하고, 연료량을 점차적으로 증가시켜가며 측정한 화염길이를 나타낸다. 연소용 공기량이 증가함에 따라 70mm정도의 임계값을 가지며 감소하고, 연료량이 증가함에 따라 화염길이는 긴 것으로 나타난다.

Fig. 7은 연료량이 0.050kg/min, 연소용 공기량

이 1.60kg/min일 때 선회수를 0, 0.20, 0.43, 0.63, 0.90, 1.30으로 증가시켜가며 촬영한 사진이다. 좌측사진은 연소기 측면에서, 우측사진은 연소기 출구를 쪽에서 촬영한 사진으로, 선회수 0.20이하에서는 선회강도가 미약하여 재순환영역이 거의 존재하지 않기 때문에 연소실 중심부에서는 연소가 거의 이루어지지 않고, 화염이 떠 있는 부상염을 볼 수 있다. 선회수가 0.43 이상에서는 충분한 선회강도로 인하여 화염길이가 짧아지고, 연소실 중심부에서 활발한 연소가 진행됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 연료량을 0.050kg/min, 연소용 공기량을 1.60kg/min으로 하였을 때 선회수의 변화에 따른 연소실내의 등온 분포를 나타낸 그림이다. 선회수가 증가함에 따라 주연소영역이 연소실 입구쪽으로 옮겨가는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 9는 선회수가 0.63, 연소용 공기량이 1.60 kg/min일때 연료량의 변화에 따라 연소실내의 등온 분포를 나타낸 그림이다. 연료량이 증가함에 따라, 주연소영역은 길고, 넓게 분포하며, 평균온도

(a) $S=0.00$ (b) $S=0.20$ (c) $S=0.43$ (d) $S=0.63$ (e) $S=0.90$ (f) $S=1.30$ $(\psi=0.5)$ **Fig. 7** Photographs of flame

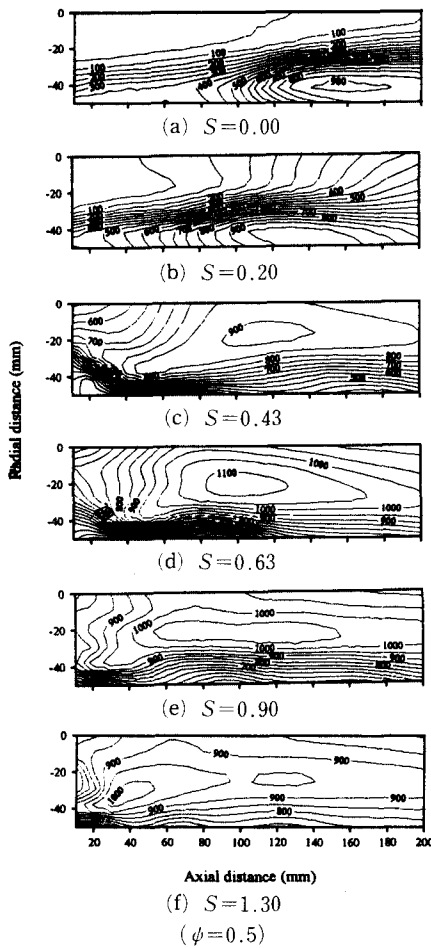


Fig. 8 Equivalent temperature lines of flame

분포도 높아짐을 알 수 있다. (a), (b)의 경우는 소염되기 직전인 회박가연한계에 가까운 상태의 혼합비이므로 연소상태는 매우 취약하였다. 따라서, 뒤에 소개할 배출가스 농도 실험에서는 연료량을 0.050kg/min으로 고정하였다.

Fig. 10은 선회수를 0.63, 연료량을 0.050kg/min으로 하였을 때, 연소용 공기량의 변화에 따라 화염의 등온 분포를 나타낸 그림이다. 선회수가 증가함에 따라 주연소영역이 연소실 입구쪽으로 옮겨가는 것을 알 수 있다. 비록 동일한 선회수이지만, 연소용 공기량이 증가할수록 난류정도가 심화되어, x가 40~120mm에서 재순환영역이 뚜렷이 형성되며, 화염이 짧고, 안정되는 경향은 재순환영역이 보임 역할을 하기 때문이라고 생각된다. 한편, 본 연구의 실험범위에서 연소용 공기량 1.90kg/min

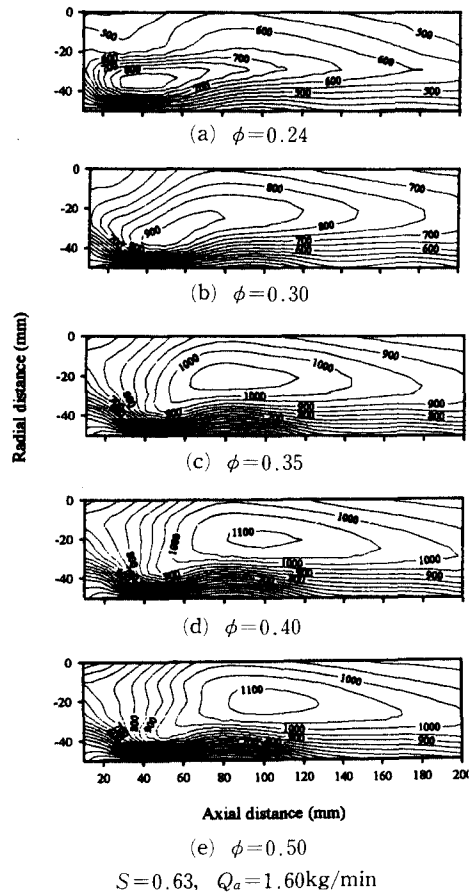


Fig. 9 Equivalent temperature lines of flame

이상에서는 과잉 공기로 인한 냉각효과로 연소실내의 전체 온도분포는 낮게 나타난다.

연소실 출구의 가스 온도는 터빈에 직접 영향을 미치는 인자로서, 반경방향에 대한 온도 불균일은 국소적인 hot spot이나 열응력을 야기시켜 터빈의 수명에 큰영향을 미친다. 이런 관점에서 Fig. 11은 축거리 180mm지점의 반경방향에 따른 연소기 출구의 온도 분포를 나타낸 그림으로, (a)는 선회수가 0.63, 연료량이 0.050kg/min일 때 연소용 공기량의 변화에 따라 출구 온도 분포를 나타낸 그림이다. 출구 온도 분포는 연소실 내부에서는 고온이고, 벽면부에서는 저온인 대칭 분포를 나타내고 있다. 이는 충분한 선회강도를 가지므로 중심부의 온도가 높게 나타나며, 화염과 연소기 벽면 사이의 열손실 때문에 벽면부에서의 온도는 낮게 나타난다고 생각된다. 연소용 공기량이 클수록 출구온도가

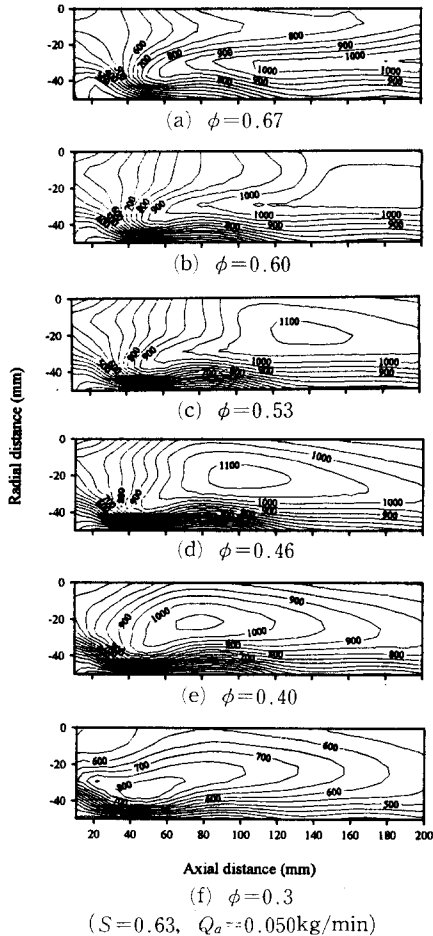


Fig. 10 Equivalent temperature lines of flame

낮게 분포하는데, 그 이유는 과잉 공기로 인한 냉각효과 때문이라고 생각된다. (b)는 선회수가 0.63, 연소용 공기량이 1.60kg/min일 때 연료량의 변화에 따라 출구의 온도분포를 나타낸 그림으로, (a)와 비슷한 형태를 보이며, 연료량이 증가할수록 출구온도는 높게 분포한다. 본 실험에서 연소기 출구의 반경방향 온도 불균일 정도를 나타낸 profile factor는 모두 10% 이내의 값을 보이고 있다.

Fig. 12는 당량비에 따른 CO농도 변화를 나타낸 그림이다. 당량비가 0.9이하에서 CO농도는 낮고, 0.9 이상의 농후한 영역에서 CO가 급격히 증가하는 형태를 나타내고 있다. 이는 CO₂로 반응해야 할 O₂농도가 희박함으로 CO농도가 높은 것으로 생각된다. 선회수를 0.43, 0.63, 0.90, 1.30으로 증가

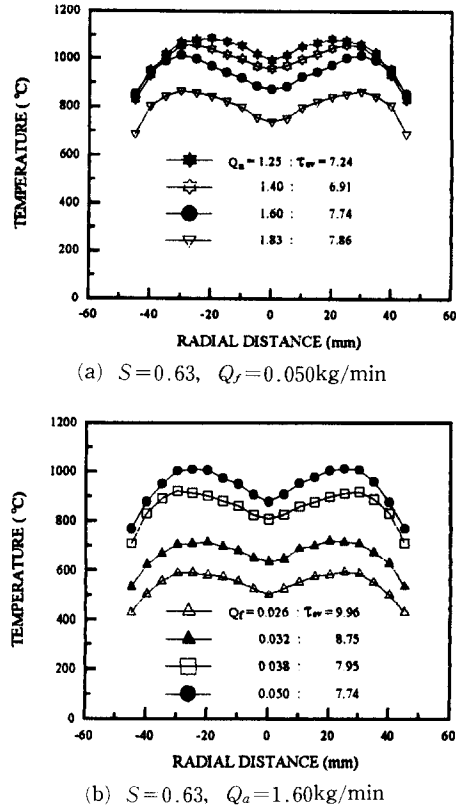


Fig. 11 Temperature distribution at exit

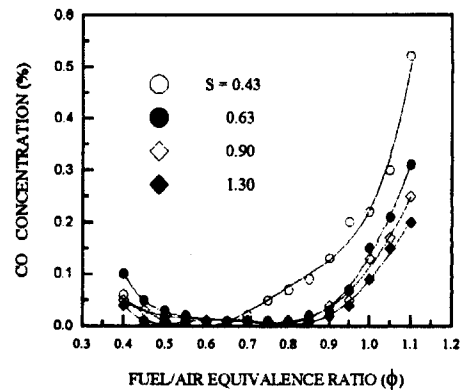


Fig. 12 CO concentration distribution

시켰을 때, CO농도가 낮은 이유는 연료와 연소용 공기간의 혼합이 양호함으로 완전 연소에 가까운 연소가 이루어지기 때문이라고 생각된다.

Fig. 13은 당량비에 따른 HC농도 변화를 측정할 결과로서, 당량비가 0.6 이상에서 HC농도는 낮고, 0.6 이하의 희박한 영역에서 HC가 급격히 증

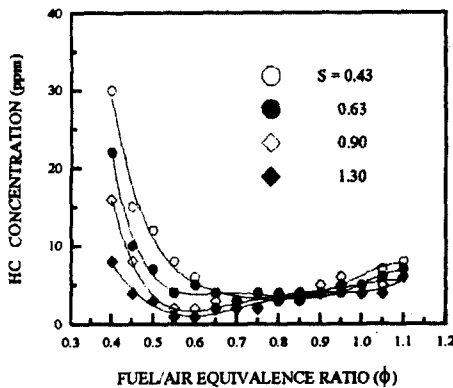


Fig. 13 HC concentration distribution

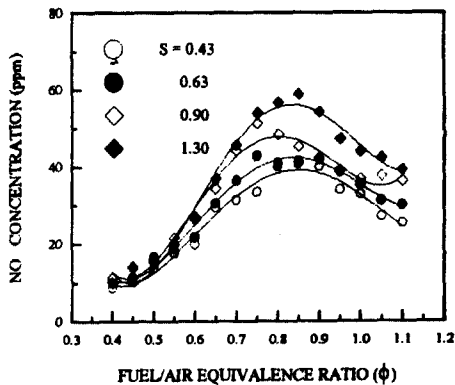


Fig. 14 NO concentration distribution

가하는 형태를 나타내고 있다. 이는 화염대 근방에서 열분해되어 분자량이 작은 여러 탄화수소를 생성하여 HC농도가 높게 나타난다고 생각된다. 선회수의 증가에 따른 HC농도가 낮은 이유는 연료와 연소용 공기가 양호한 혼합상태로 됨에 따른 것이라고 생각된다.

Fig. 14는 당량비에 따른 NO농도 변화를 측정된 그림으로, 당량비가 0.85에서 높은 농도를 보이고 있다. 이는 연소 온도의 증가에 따른 thermal NO의 생성으로 NO농도가 증가한다고 생각된다. 선회수의 증가에 따른 NO농도가 높은 이유는 연료와 연소용 공기의 혼합 상태가 잘 이루어져 연소실 온도가 높게 되므로, 낮은 선회수에 비하여 NO농도가 높게 나타난다고 생각된다.

4. 결 론

가스터빈형 연소기의 구조를 단순화한 can형 모

형연소기를 사용하고, 연소용공기의 공기량, 선회강도, 공연비 등을 변화시키면서, 화염구조, 화염안정성 및 연소배출물특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 화염영역은 연소용 공기량에 따라 크게 연소영역과 소염영역으로 나눌 수 있다. 선회수가 0.63일 때 연소영역은 연소용 공기량이 0.8kg/min 이하의 초기영역, 0.8kg/min~1.5kg/min의 천이영역, 1.5kg/min~3.4kg/min의 안정영역으로 구분할 수 있고, 소염영역에서는 연소용 공기량이 3.4kg/min 이상에서 Blow off 현상을 볼 수 있었다.

(2) 연소용 공기량과 연료량이 일정할 때, 선회강도가 증가하면, 연료와 공기의 혼합이 촉진되어 화염은 길이가 짧아지며 안정하게 된다.

(3) 연소 배출물은 연료 분무군과 연소용 공기의 혼합상태와 연소실내의 온도분포에 영향을 받는다.

(4) 화염안정성, 연소실의 온도분포, NO_x 농도 등을 제어하는 측면에서, 본 실험에서는 선회수 0.63, 당량비 0.5일 때 가장 양호하였다.

참고문헌

- (1) McCreath, C. G. and Chigier, N. A., 1973, "Liquid-spray Burning in the Wake of a Stabilizer Dis-k.," *14th Symp. Int. on Comb.*, pp. 1355~1363.
- (2) Styles, A. C. and Chigier, N. A., 1977, "Combustion of Air Blast Atomized Spray Flames." *16th Symp. Int. on Comb.*, pp. 619~630.
- (3) 川口修, 佐藤豪, 山田敏彦, 江波戸智, "循環氣流中に噴射された噴霧の燃焼の研究." *機論B編*, 48-248, pp. 792~801, (昭和 57-3). 川口修, 佐藤豪, 大越敏行, "循環氣流中に噴射された噴霧の燃焼の研究(第2報) 噴霧火炎の構造," *機論B編*, 48~428, pp. 1378~1384(昭和57-7). 川口修, 佐藤豪, 大越敏行, 石川雅夫, "循環氣流中に噴射された噴霧の燃焼の研究 (第3報) 火炎内における液滴の舉動," *機論 B編*, 48-428, pp. 1385~1391. (昭和57-7).
- (4) Hacker, D. S., 1974, "A Simplified Mixing Length Model of Flame Stability in Swirling Combustion-," *AIAA Journal*, Vol. 12-1.
- (5) 川口修, "豫混合旋回火焰に關する研究", 昭和

- 46年度慶 義塾大學學位論文.
- (6) 川口修, 大川政喜, 桑原茂, 佐藤豪, “豫混合旋回火焰に関する研究(火焰基部近傍の構造について)”, 機講論, 740-16, (昭和49), 183~186.
- (7) Sawyer, R. F., 1972, “Experimental Studies of Chemical Processes in a Model Gas Turbine Combustor,” Emissions from Continuous Combustion Systems, 243-254, Edited by Cornelius, W. and Agnew, W. G., Plenum Press.
- (8) 江口邦久, “スワラ-の性能向上に関する研究(第3報) 保炎特性について”機講論, 730-17,(昭和48), 113-116. 江口邦久, “スワラ-の性能向上に関する研究(第4報) 流れ模様について”機講論, 740-16, (昭和49), 215-218. 江口邦久, “スワラ-の性能向上に関する研究(第5報) 噴射弁の位置について”機講論, 750-15, (昭和50), 157~160.
- (9) 新井雅彦, 永井伸樹, “旋回流燃焼器内の流動と燃焼に関する研究”, 機論B編, 46-403, (昭和55), 520~530.
- (10) 永井伸樹, 平井哲郎, 加藤恵二, 高堂純治, “旋回流燃焼器の噴霧燃焼特性に関する研究(第1報)”, 第19回燃焼シンポジウム前刷集, (昭和56), 302-304. 永井伸樹, 平井哲郎, 高堂純治, “旋回流燃焼器の噴霧燃焼特性に関する研究(第2報)”, 第20回燃焼シンポジウム前刷集, (昭和57), 341~343.
- (11) Boysan, F., Ayers, W. H., Swithenbank, J. and Pan, J., (1982) “Three-dimensional Model of Spray Combustion in Gas Turbine Combustors.,” *J. Energy*, 6, pp. 368-375.
- (12) Lee, C. W. and Oh, Y. S., (1992) “Behaviors of Sprays and Mixing Phenomena in Gas Turbine Combustor.,” *ILASS-KOREA 1992 Symposium*, pp. 38~46.
- (13) Appleton, J. P. and Heywood, J. B., (1954) “The Effects of Imperfect Fuel-air Mixing in a Burner on NOx Formation from Nitrogen in the Air and the Fuel.,” *14th Symp. (Intern.) on Comb.*, 777~786.
- (14) Claypole, T. C. and Syred, N., (1981) “The Effect of Swirl Burner Aero Dynamics on NOx Formation.” *18th (Intern.) on Comb.*, 81~89.
- (15) Mizutani, Y., Katsuky, M. and Shibuya, K., (1976) “Emissions from Gas Turbine Combustors.,” *Bull. JSME*, 19, pp. 1353~1359.
- (16) Noyce, J. R. and Sheppard, C. G. W., (1982) “The Influence of Equivalent Ratio Variation on Pollutant Formation in a Gas-turbine Type Combustor.,” *Comb. Sci. and Tech.*, 29, pp. 37~52.