

# 희박연소를 이용한 가스터빈 연소기의 저 NOx 특성

손민규\* · 안국영\*\* · 김한석\*\* · 김용모\*\*\*

## The Low NOx Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor

M. G. Son, K. Y. Ahn, H. S. Kim and Y. M. Kim

**Key Words** : Combustor(연소기), Primary zone(주연소영역), Dilution zone(희석영역), Lean Premixed burn(희박예혼합연소), CO(일산화탄소), NOx(질소산화물), Flame temperature(화염온도)

### Abstract

The combustion characteristics have been investigated to develop the low NOx gas turbine combustor. The lean premixed combustion technology was applied to reduce the NOx emission. Also, the conventional combustor was designed and tested for the baseline of low NOx combustor performance. The test was conducted at the condition of high temperature and ambient pressure. The combustion air which has the temperature of 500K were supplied to the combustor through the air preheater. The temperature and emissions of NOx and CO were measured at the exit of combustor. The premixing chamber can be operated very lean condition of equivalence ratio around 0.35. The NOx was decreased with decreasing the equivalence ration. The CO was decreased with decreasing the equivalence ratio, but the CO was increased with decreasing the equivalence ratio below 0.45. But, at the very lean condition of equivalence ratio below 0.35 both NOx and CO were increased because of the flame unstability. The NOx was decreased slightly and CO was increased with increasing inlet air flowrate. This results can be used to determine the size of combustor. The low NOx combustor has lower values of NOx and CO compared with conventional one. Consequently the performance of combustor shows the possibility of the application to the gas turbine system.

### 1. 서 론

최근 환경 규제가 엄격하여짐에 따라 저배기 연소에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 가스

터빈의 경우에도 대부분의 연구가 NOx 저감기술에 초점이 맞추어지고 있다. 따라서, 새로운 개념의 연소기술이 등장하고 이를 응용한 다양한 저 NOx 연소기가 개발되어 실용화되어지고 있다.<sup>(1)-(4)</sup>

기존의 가스터빈 연소기는 연료가 연소용 공기와 주연소영역에서 혼합하여 이론 당량비보다 조금 낮은 당량비로 비예혼합화염을 형성하는 형식으로, 50ppm이하의 NOx배출량(15%O<sub>2</sub> 기준)을 얻

\* 한양대학교 대학원

\*\* 한국기계연구원

\*\*\* 한양대학교 기계공학부

기는 어렵다. 기존 연소기의 주연소영역에 물 또는 수증기를 분사하여 NOx를 저감시키기도 하나 이 경우에는 물속에 포함된 철분을 제거(demineralization)하여야 하므로 운용비용이 많이 들고 CO 및 소음이 증가하는 등의 결점이 있다. 현재 널리 사용되고 있는 저 NOx 연소기술로는 예혼합 희박연소(lean-premixed burning), 과농-희박 연소(rich-lean burn) 및 촉매연소(catalytic combustion) 등을 들 수 있으며, 예혼합 희박연소 방법은 초기에 연료와 공기를 미리 예혼합시키므로서 혼합특성을 향상시키는 동시에 연소용 공기를 가연한계에 가깝게 다량 공급하여 줌으로써(희박연소) 화염온도를 저하시켜 열적 NOx를 저감시킨다. 또 다른 접근방법으로는 주연소영역에서 연료과농상태로 연소를 시키므로 화염온도를 저하시키고 그 후류쪽에 갑작스럽게 공기를 다량으로 공급하여(quenching) 희박연소시키므로서 화염의 최고 온도영역을 피하여 NOx를 저감하는 과농-희박 연소 방법이 있다. 이 방법은 고온의 입구조건에서도 역화나 자연점화 등의 위험이 없고 운전성이 뛰어나며 액체연료가 질소를 함유하고 있을 경우에 적합하다는 등의 이점이 있으나, 공기냉각(quench)에 한계가 있어 국부적인 고온부위가 생겨 NOx가 발생할 가능성이 크고, CO 나 HC가 충분히 산화될 수 있도록 시간이 길어야 하는 등의 제한으로 말미암아 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 유망한 NOx 저감 방법중의 하나이나 실용화되지 못하고 있다. 최근에는 촉매를 사용하여 보다 낮은 온도영역에서 연소를 가능하게 하여 화염온도를 떨어뜨림으로써 NOx를 저감시키는 촉매연소 방법이 도입되어 일부 실용화되고 있다. 그러나, 촉매연소는 초기에 촉매층의 온도를 일정온도 이상으로 예열시켜야 하고 액체연료의 경우에는 미리 예혼합 증발시켜야 하며, 또한 내구성 등 해결하여야 할 문제점이 있는 것으로 알려지고 있다.

따라서, 현재까지 예혼합 희박연소기술이 저 NOx 기술로서 가스터빈 연소기에 가장 적합한 기술로 평가되고 있으며, 이 분야의 선진기술을 보유하고 있는 미국 및 유럽 등에서는 연소기에 적용하여 실용화한 실적이 있으나 희박연소에 따른 화염의 안정화, 부하에 따른 제어 등 아직 문제

점 해결을 위한 연구개발이 지속적으로 수행되고 있다. 최근에는, 환경규제가 더욱 강화될 것에 대비하여 희박연소기술을 이용한 초 저 NOx연소기 개발이 활발히 이루어지고 있다.<sup>(5)</sup>

본 연구는 가스터빈용 저 NOx 연소기 개발에 관한 연구로서, 예혼합 희박연소기의 설계 및 상세설계를 위한 초기 연구결과를 소개하고자 한다. 또한, 예혼합 희박연소기의 성능 평가 기준을 위하여 별도로 기존 연소기를 설계·제작하여 성능실험을 통하여 배기가스 성분 등을 측정하여 성능을 비교할 수 있도록 하였다.

## 2. 저 NOx 연소기 설계

저 NOx 연소기 설계도 기존의 연소기 설계와 마찬가지로 공기역학적 관점에서의 전압손실계수의 결정 및 화학반응적 관점에서의 연소효율 또는 배기가스 특성 등으로부터 연소기의 지름, 길이 등 주요요기를 결정하는 것으로부터 시작되어야 하나, 저 NOx 연소기의 경우 기존에 개발된 연소기에 대한 데이터의 부족으로 기존의 방법들의 적용에는 어려움이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 주연소영역에서 희박연소에 의하여 연소부하가 커질 것임을 감안하여 연소부하가 주연소영역에서 다소 적도록( $275\text{J}/\text{m}^3/\text{s}/\text{Pa}$ )하여 연소기의 단면적 등을 결정하였으며, 체류시간 및 공기부하 등에 대하여도 개발이 용이한 범위에서 설계를 실시하였다. 연소기 설계는 사용목적 및 용도를 비롯하여 설계자의 경험과 의도 등 여러변수에 의하여 설계되고 있으므로, 같은 사양의 연소기라 할지라도 설계자에 따라 그 형상 및 크기는 크게 다르다. 본 연구에서는 한국기계연구원 에서 개발된 설계용 프로그램(KACOM)을 이용하여 연소기를 설계하였으며, 구체적인 설계결과는 안 등의 결과를 참고하기 바란다.<sup>(6)-(8)</sup>

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 연소기

본 연구에서 사용한 연소기는 기존 연소기 및 예혼합 희박연소를 이용한 저 NOx 연소기로서,

기존 연소기는 저 NOx 연소기의 성능평가를 위하여 설계·제작하였다. 실험에 사용한 연소기는 Fig.1 및 Fig.2에서 보는 바와 같이 라이너 내경 60mm, 길이 350mm인 통형 연소기로서, 연소기 및 공기유입부 모두 실제 엔진에서와 같은 크기 및 위치에 설치하였다. 사용된 연료는 경유이며, 노즐은 압력식 노즐로서 분무각은 기존 연소기는 80°, 저 NOx 연소기는 30°이다. 저 NOx 연소기의 예혼합실은 Fig.3에서 보는 바와 같이 원추형으로 연료노즐은 중앙에 위치하고 있으며 연소용 공기는 원추형 벽면의 양쪽스롯으로부터 공급된다. 노즐로부터 분무된 연료는 접선방향으로 공급되는 연소용공기와 혼합되며 강한 선회를 갖게된다. 예혼합실 출구부는 연소기 라이너에 연결

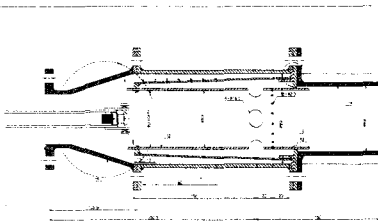


Fig.1 Conventional Combustor

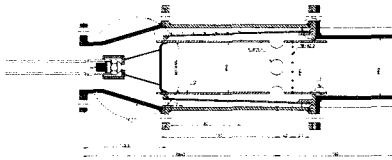


Fig.2 Lean Premixed Low NOx Combustor

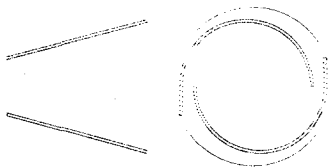


Fig.3 Premixing Chamber

되어 있으며, 이 출구부에서 강한 선회유동이 갑작스런 팽창에 의하여 vortex breakdown이 일어남과 동시에 예혼합실 출구부 바로 상단에 정체점이 생겨 보염기 역할을 수행하게 되어 된다. 한편으로는 이 곳에서 폭발적인 분산 및 무화가 일어나 노즐에서의 무화성능에 관계없이 양호한 화염을 얻을 수 있다는 보고가 있다.<sup>(9)</sup>

기존 연소기의 경우에는 이전의 연구<sup>(6)-(8)</sup>에서와 같은 방법으로 연소기를 설계하였다. 선회기는 내경 22mm, 외경 28mm의 원통형 실린더내부에 연료공급관을 중심으로 같은 축에 위치하고 있으며 선회각은 45°, 날개수는 10개이다. 선회기와 라이너 사이의 틈의 경사각은 120°로 하였다.

고온에서 라이너 보호를 위한 냉각방법으로는 특별히 고안된 충돌냉각장치가 사용되었다. 연소기의 점화는 기존 연소기의 경우에는 재순환영역 출구 근방에, 저 NOx 연소기의 경우에는 예혼합실 출구부 근방에 토치점화기를 설치하여 점화시키도록 하였다.

### 3.2 실험장치

실험에 사용된 실험장치는 Fig.4에서 보는 바와 같이 연료 공급장치, 연소용 공기 공급장치, 연소기 및 계측장치 등으로 구성되어있다.

연료는 경유로 유량은 매스실린더를 이용하여 압력과 유량곡선을 구하여 사용하였다. 연소용 공기 공급은 풍압 2000mmAq, 풍량 55Nm<sup>3</sup>/min의 용량을 가지는 송풍기를 통하여 공급하였으며, 연소용 공기는 Fig.4에서 보는 바와 같이 예열기

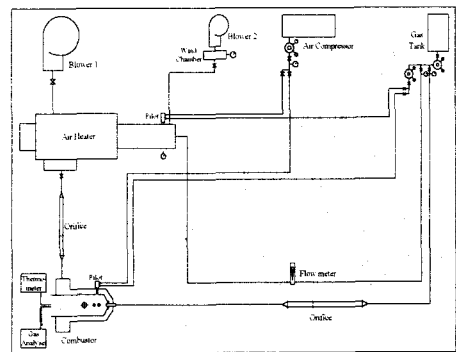


Fig.4 Schematic diagram of experimental apparatus

를 거쳐 필요한 온도까지 가열된다. 공기유량은 벤츄리 유량계를 이용하여 측정하였으며, 표준 유량계를 이용하여 보정하였다.

연소용 공기의 온도는 T-type 열전대를, 연소가 내부의 화염온도측정은 연소기 내부온도를 측정할 수 있도록 특별히 제작된 R-type 열전대를 사용하여 측정하였다. 열전대로부터 측정된 고온 가스의 온도값에 대한 복사 열손실 및 전도에 의한 오차 등은 보정하지 않았다.

연소기 출구에서의 배기가스는 연속 측정이 가능한 가스분석기(Greenline MK2)를 이용하여 측정하였으며, 배기가스의 포집은 고온 및 배기가스의 연소 등을 고려하여 물로 냉각할 수 있는 구조를 갖는 프로브를 별도로 제작하여 측정하였다.

### 3.3 실험 및 실험방법

본 연구에서는 예혼합 희박연소기의 예혼합실의 상세설계를 위하여, 예혼합실의 희박연소한계 및 화염 안정성 등에 대한 실험을 수행하였다. 실험에서는 주연소영역의 연소특성을 파악하기 위하여 희석공기공이 없는 경우에 대하여 출구부에서의 배기가스 성분과 화염 형상을 관찰하므로서 희박연소 한계 등을 평가하도록 하였다. 한편, 성능평가 기준으로는 별도로 설계·제작된 기존 연소기에 대하여 저 NOx 연소기와 같은 실험조건에서 측정된 배기가스 분석값 등을 이용하였다. 초기에는 예혼합실의 형상에 따른 화염형상 등을 관찰하여 예혼합실의 형상을 결정하였으며, 결정된 형상에 대한 성능실험을 통하여 예혼합실의 수정 및 희석공기공의 크기 등을 결정하게 된다.

실험에는 공기 예열기를 통과하여 얻어진 고온의 공기를 사용하였으며, 압력은 상압상태에서 실험하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

주연소영역에서의 연소특성을 알아보기 위하여 희석공기공을 설치하지 않은 상태에서 화염형상 및 연소기 출구에서의 배기가스 및 온도 등을 측

정하였다. 실험은 예혼합실의 부하에 따른 배기 특성을 알아 보기 위하여 연소용 공기온도(500K) 및 공기량(105kg/h, 95kg/h, 80.35kg/h, 65kg/h)을 고정시키고 연료량을 조절하여 당량비를 변화시켰다. Fig.5는 설계점에서의 연소용 공기량인 80.35kg/h에 대한 출구온도를 나타낸 것으로 당량비가 감소할수록 출구온도는 감소하고 있다.

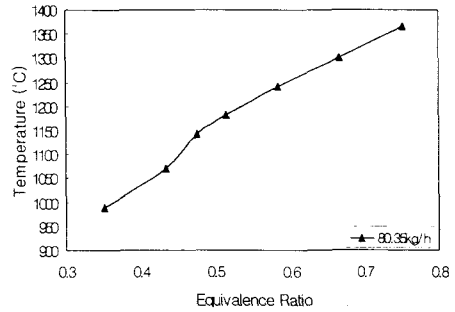


Fig.5 Exit Temperature of Combustor

Fig.6은 연소기 출구에서의 NO를 나타낸 것으로, 당량비가 감소할수록 희박연소에 의하여 화염온도가 저하되어 NO가 감소함을 알 수 있다. 한편, 공기량이 증가할수록 NO는 감소하고 있는데, 이것은 공기량이 증가함에 따라 연료와 공기의 혼합이 양호하여저 국부적인 고온부가 없고 한편으로는 공기량의 증가에 따라 주연소영역에서의 체류시간이 감소하여 NO가 감소한 것으로 생각된다. Fig.7은 연소기 출구에서의 CO를 나타낸 것으로, 당량비가 감소하면 초기에는 연료와 공기의 혼합상태가 양호하여저 CO는 감소하다가

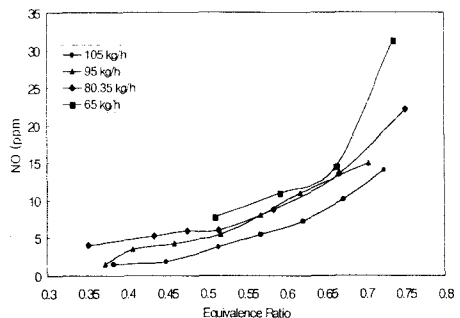


Fig.6 NO Emissions at Combustor Exit

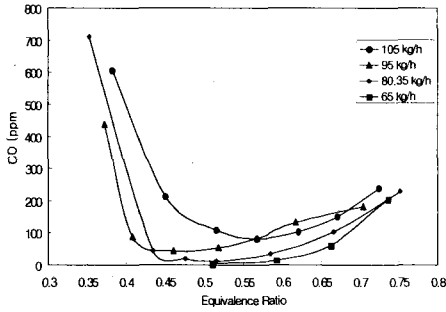


Fig.7 CO Emissions at Combustor Exit

당량비가 더욱 더 감소하면 냉각효과에 의하여 CO가 현저히 증가하고 있다. 이러한 현상은 Fig.6에는 나타내지 않았지만 NO의 경우에도 당량비가 어느 값 이하로 감소하면 화염의 안정성이 크게 떨어져 NO가 증가한다.

한편, 공기량이 증가할수록 CO는 NO와는 반대로 증가하고 있는데, 이것으로 보아 연료와 공기의 혼합보다는 주연소영역에서의 체류시간에 의한 영향이 지배적인 것을 알 수 있다. Fig.8은 NO 및 CO 등의 배기특성이 양호한 조건인 당량비가 0.52인 경우에 대하여 연소용 공기량에 대한 배기특성을 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 주어진 실험조건에서 NO는 매우 적은 값을 가지나 CO의 경우에는 연소용 공기량이 증가하면 즉, 부하가 증가하면 현저히 증가하고 있으므로 설계시 이를 고려하여 연소기 크기를 결정하여야 한다.

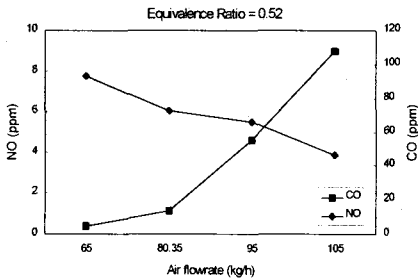


Fig.8 NO & CO Emission for Air Flowrate

Fig.9 및 Fig.10은 기존 연소기와 저 NOx 연소기의 NO 및 CO를 비교한 것으로, 그림에서 보

는 바와 같이 저 NOx 연소기의 경우가 NO뿐만 아니라 CO도 적게 발생함을 알 수 있다. NO 및 CO 값은 모두 15% O<sub>2</sub>조건으로 환산한 값이다.

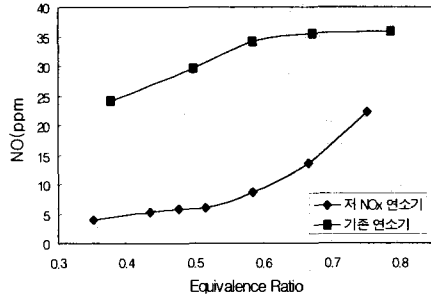


Fig.9 NO Emissions for the primary zone equivalence ratio

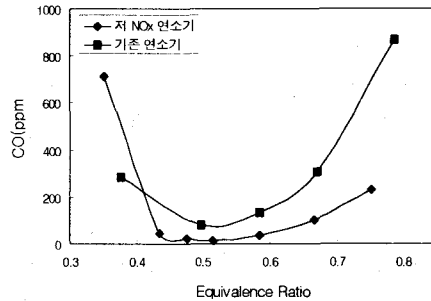
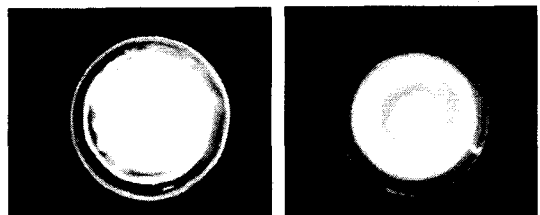


Fig.10 CO Emissions for the primary zone equivalence ratio

Fig.11는 기존연소기와 저 NOx 연소기의 화염 사진으로, 저 NOx 연소기의 경우 내부에서 연료가 연소용 공기가 강한 선회력으로 혼합되고 있음을 볼 수 있다.



(a)Conventional (b)Lean Premixed  
Fig.11 Flame shape of Conventional and Low NOx Combustor