

마이크로 터빈 연소기 주연소영역의 저 NO_x 생성 특성

손민규* · 안국영** · 이현식*** · 윤정중***

The Low NO_x Characteristics of the Primary Zone in Micro Turbine Combustor

M. G. Son, K. Y. Ahn, H. S. Lee and J. J. Yoon

Key Words : Micro turbine(마이크로 터빈), Combustor(연소기), Primary zone(주연소영역), Dilution zone(희석영역), Lean Premixed burn(희박예혼합연소), CO(일산화탄소), NO_x(질소산화물), Flame temperature(화염온도)

Abstract

The low NO_x characteristics have been investigated to develop the combustor for micro turbine. The lean premixed combustion technology was applied to reduce the NO_x emission. The test was conducted at the condition of high temperature and ambient pressure. The combustion air which has the temperature of 450~650K were supplied to the combustor through the air preheater. The temperature and emissions of NO_x and CO were measured at the exit of combustor. The exit temperature and NO_x were increased and CO was decreased with increasing inlet air temperature. The premixing chamber can be operated very lean condition of equivalence ratio around 0.35. The NO_x was decreased with decreasing the equivalence ratio. The CO was decreased with decreasing the equivalence ratio, but the CO was increased with decreasing the equivalence ratio below 0.4. But, at the very lean condition of equivalence ratio below 0.35 both NO_x and CO were increased because of the flame instability. The NO_x was decreased and CO was increased with increasing inlet air flowrate. This results can be used to determine the size of combustor. Consequently the performance of combustor shows the possibility of the application to the gas turbine system.

1. 서 론

마이크로 터빈은 약 20~300kw의 전력을 생산할 수 있는 용량을 가진 것을 말하며, 현대 산업 사회의 고도화와 생활수준 향상에 따른 전력수요를 대체할 분산형 전원으로 개발이 활발히 진행

되고 있다. 마이크로 터빈의 경우에도 대부분의 연구가 환경규제에 따른 NO_x 저감기술에 초점이 맞추어지고 있다. 따라서, 새로운 개념의 연소기술이 등장하고 이를 응용한 다양한 저 NO_x 연소기가 개발되어 실용화되어지고 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾

기존의 가스터빈 연소기는 연료가 연소용 공기와 주연소영역에서 혼합되어 이론 당량비보다 조금 낮은 당량비로 비예혼합 화염을 형성하는 형식으로서, 50ppm 이하의 NO_x 배출량(15% O₂ 기준)을 얻기는 어렵다. 현재 널리 사용되고 있는 저

* 한양대학교 대학원
** 한국기계연구원
*** 한국터보기계(주)

NOx 연소기술은 예혼합 희박연소(lean-premied burning), 과농-희박 연소(rich-lean burn) 및 촉매연소(catalytic combustion) 등을 들 수 있으며, 예혼합 희박연소 방법은 초기에 연료와 공기를 예혼합시킴으로서 혼합특성을 향상시키는 동시에 연소용 공기를 가연한계에 가깝게 다량 공급하여 줌으로서(희박연소) 화염온도를 저하시켜 열적 NOx를 저감시킨다. 또 다른 접근방법으로는 주연소영역에서 연료과농상태로 연소를 시킴으로 화염온도를 저하시키고 그 후류쪽에 갑작스럽게 공기를 다량으로 공급하여(quenching) 희박연소화 되어 화염의 최고 온도영역을 피하여 NOx를 저감하는 과농-희박 연소 방법이 있다. 최근에는 촉매를 사용하여 보다 낮은 온도영역에서 연소를 가능하게 하여 화염온도를 떨어뜨림으로서 NOx를 저감시키는 촉매연소 방법이 도입되어 일부 실용화되고 있다.

그러나 현재까지는 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 문제점 해결을 위한 연구개발이 지속적으로 수행되고 있다. 최근에는, 환경규제가 더욱 강화될 것에 대비하여 희박연소기술을 이용한 초 저 NOx연소기 개발이 활발히 이루어지고 있다.⁽⁵⁾

본 연구는 마이크로 터빈용 저 NOx 연소기 개발에 관한 연구로서, 예혼합 희박연소기의 주연소영역의 연소특성에 대한 연구결과를 소개하고자 한다.

2. 저 NOx 연소기 설계

저 NOx 연소기 설계는 공기역학적 관점에서의 전압손실계수 결정 및 화학반응 관점에서의 연소 효율 또는 배가스 특성 등으로부터 연소기의 지름, 길이 등 주요크기를 결정하는 것으로부터 시작되어야 하나, 저 NOx 연소기의 경우 기존에 개발된 연소기에 대한 데이터의 부족으로 기존의 방법들의 적용에는 어려움이 따른다. 따라서, 본

Table 1 Design point specification

P_3 [Pa]	473420	m_f [kg/h]	4.716
P_4 [Pa]	454483	m_a [kg/h]	618.084
T_3 [K]	730	$(A/F)_{st}$	14.6
T_4 [K]	1000	A/F	131.06
Fuel	diesel	Equivalence ratio (ϕ)	0.111

연구에서는 주연소영역에서 희박연소에 의하여 연소부하가 커질 것임을 감안하여 연소부하가 주연소영역에서 다소 적도록($275J/m^3/s/Pa$)하여 연소기의 단면적 등을 결정하였으며, 체류 시간 및 공기부하 등에 대하여도 개발이 용이한 범위에서 설계를 실시하였다. 연소기 설계는 사용목적 및 용도를 비롯하여 설계자의 경험과 의도 등 여러 변수에 의하여 설계되고 있으므로 같은 사양의 연소기라 할지라도 설계자에 따라 그 형상 및 크기는 크게 다르다. 연소기 설계사양은 Table 1 과 같으며 본 연구에서는 한국기계연구원에서 개발된 설계용 프로그램(KACOM)을 이용하여 연소기를 설계하였으며, 구체적인 설계결과는 안 등의 결과를 참고하기 바란다.⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 연소기

본 연구에서 사용한 연소기는 예혼합 희박연소를 이용한 저 NOx 연소기로서 연소기 성능평가를 위하여 설계·제작하였다. 실험에 사용한 연소기는 Fig.1에서 보는 바와 같이 라이너 내경 60mm,

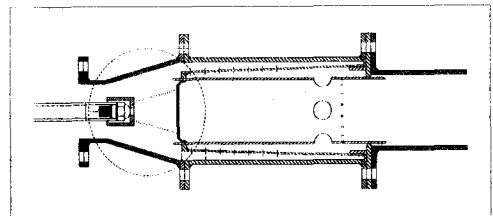


Fig.1 Lean Premixed Low NOx Combustor

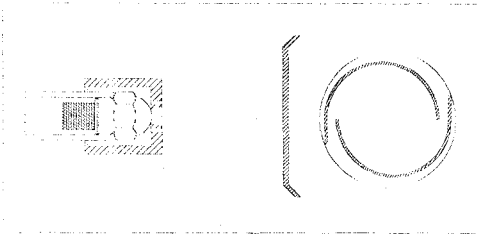


Fig. 2 Premixing Chamber

길이 350mm인 통형 연소기로서, 연소기 및 공기 유입부 모두 실제 엔진에서와 같은 크기 및 위치에 설치하였다. 사용된 연료는 경유이며, 노즐은 압력식 노즐로서 분무각은 30°이다. 저 NOx 연소기의 예혼합실은 Fig.2에서 보는 바와 같이 원추형으로 연료노즐은 중앙에 위치하고 있으며 연소용 공기는 원추형 벽면의 양쪽 스톱으로 공급된다. 노즐로부터 분무된 연료는 접선방향으로 공급되는 연소용공기와 혼합되어 강한 선회를 갖게된다. 예혼합실 출구부는 연소기 라이너에 연결되어 있으며, 이 출구부에서 강한 선회유동이 갑작스런 팽창에 의하여 vortex breakdown이 일어남과 동시에 예혼합실 출구부 바로 상단에 정체점이 생겨 보염기 역할을 수행하게 된다. 한편으로는 이 곳에서 폭발적인 분산 및 무화가 발생하여 노즐에서의 무화 성능에 관계없이 양호한 화염을 얻을 수 있다는 보고가 있다.⁽⁹⁾

고온에서 라이너 보호를 위한 냉각방법으로는 특별히 고안된 충돌냉각장치가 사용되었다. 연소기의 점화는 예혼합실 출구부 근방에서 토치점화기를 설치하여 점화시키도록 하였다.

3.2 실험장치

실험에 사용된 실험장치는 Fig.3에서 보는 바와 같이 연료 공급장치, 연소용 공기 공급장치, 연소기 및 계측장치 등으로 구성되어있다.

연료는 경유를 사용하였고 유량은 매스실린더를 이용하여 압력과 유량곡선을 구하여 사용하였다. 연소용 공기 공급은 풍압 2000mmAq, 풍량 55Nm³/min의 용량을 가지는 송풍기를 통하여 공급하였으며, 연소용 공기는 Fig.3에서 보는 바와 같이 예열기를 거쳐 필요한 온도까지 가열된다.

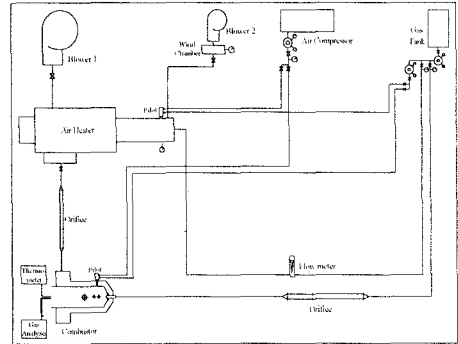


Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus

공기유량은 벤츄리 유량계를 이용하여 측정하였으며, 표준 유량계를 이용하여 보정하였다.

연소용 공기의 온도는 K-type 열전대를, 연소기 내부의 화염온도측정은 연소기 내부온도를 측정할 수 있도록 특별히 제작된 R-type 열전대를 사용하여 측정하였다. 열전대로부터 측정된 고온가스의 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 냉각을 할 수 있는 구조를 갖는 프로브를 별도로 제작하여 측정하였다.

3.3 실험 및 실험방법

본 연구에서는 예혼합 희박연소기의 희박연소 한계, 공기 온도별 연소특성 및 연소 부하 등에 대한 실험을 수행하였다.

실험에서는 주연소영역의 연소특성을 파악하기 위하여 희석공기공이 없는 경우에 대하여 출구부에서 배기가스 성분, 온도 및 화염 형상을 관찰함으로써 희박연소 한계 등을 평가하도록 하였다. 연소용 공기의 온도에 따른 연소특성을 파악하기 위하여 연소용 공기의 온도를 450K, 500K, 550K, 600K, 650K로 변화시켜 가면서 실험하였다. 각각의 온도에서의 공기량은 연소기내에서 동일한 속도를 가지도록 연소용 공기의 체적유량

이 같도록 하였으며(체류시간 동일) 연료량을 조절하여 당량비를 변화시키면서 실험하였다. 또한 예혼합실의 부하에 따른 배기특성을 알아보기 위하여 연소용 공기온도(600K) 및 공기량(105kg/h, 95kg/h, 80.35kg/h, 65kg/h)을 고정시키고 연료량을 조절하여 당량비를 변화시키며 실험을 수행하였다.

실험에는 예열기를 통과하여 얻어진 고온의 공기를 사용하였으며, 압력은 상압 상태에서 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 연소기 입구온도에 따른 연소특성

연소기내에서 공기의 체류시간을 일정하게 유지하여 준 상태에서 연소기 입구 공기온도를 변화시켜 주었을 때, 연소기 출구의 온도 및 배가스를 측정하였다. 동일한 당량비와 체류시간을 유지하여 주기 위해서 연소기 입구 공기온도가 450K, 500K, 550K, 600K, 650K 일 때 연료량은 1.63kg/h, 1.47kg/h, 1.33kg/h, 1.22kg/h, 1.13kg/h를 각각 공급하였다. Fig.4는 연소기 출구온도를 나타낸 것으로 연소기 입구의 공기 온도가 증가할수록 연소기 출구 온도는 증가하고 있다. Fig.5는 연소기 출구에서의 CO 및 NO를 나타낸 것으로 연소기 입구 온도가 증가할수록 CO는 감소하고 NO는 증가하는 전형적인 배가스 특성을 보여주고 있다. CO는 입구공기온도가 증가함에 따라 감소하고 있는데 이것은 입구온도가 증가함에 따라 연소시의 화염온도도 증가하게 되어

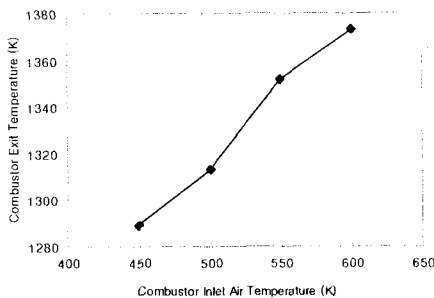


Fig.4 Combustor exit temperature for various inlet air temperature

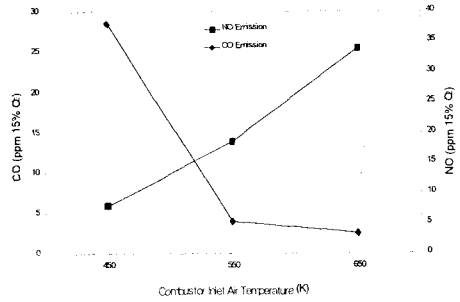


Fig.5 Emissions profile for various inlet air temperature

반응속도가 증가하기 때문이다. 연소기 출구에서의 NO는 입구공기온도가 증가함에 따라 증가하고 있는데 이것은 연소기 입구온도가 증가함에 따라 연소영역에서의 화염온도가 증가하기 때문이다.

예혼합실의 연소기 입구온도 및 당량비에 따른 연소특성을 알아보기 위하여 각각의 연소기 입구온도에 대한 설계점에서의 공기량을 공급하고 연료량을 조절하여 당량비를 변화시키면서 연소기 출구의 온도 및 배가스를 측정하였다. 공기량은 연소기 입구공기온도가 450K, 500K, 550K, 600K, 650K 일 때 각각 46.8kg/h, 42.12kg/h, 38.29kg/h, 35.1kg/h, 32.4kg/h를 각각 공급하였다. Fig 6과 Fig 7은 연소기 입구온도 및 당량비에 따른 NO 및 CO의 특성을 보여주고 있다. Fig 6에서 연소기 입구 공기 온도가 증가할수록 NO는 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 경우는 연소실내의 체

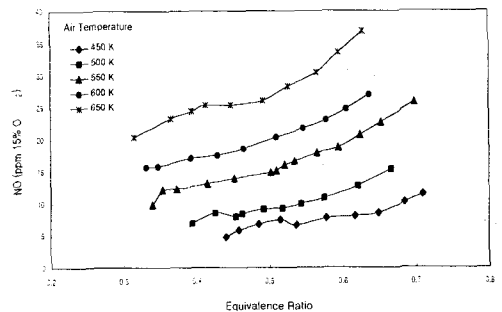


Fig.6 NO Emissions at combustor exit for inlet air temperatures

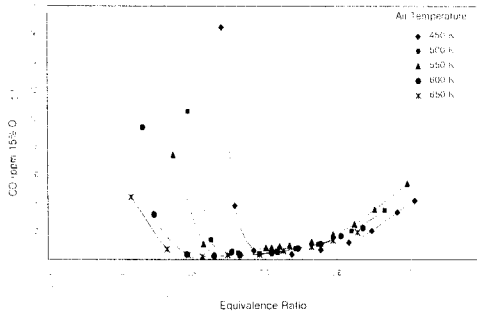


Fig.7 CO Emissions at combustor exit for inlet air temperatures

류시간을 일정하게 유지하며 공기량을 변화시켰기 때문에 연료와 공기의 혼합 특성 또는 체류시간보다는 주연소 영역의 온도 상승에 의하여 NO가 증가한 것으로 생각된다. 또한 당량비가 감소하여 희박 연소가 일어나면 화염 온도의 감소로 인하여 NO가 줄어든 것을 알 수 있다. Fig 7은 연소기 출구에서의 CO를 나타낸 것으로 연소기 입구 공기 온도가 증가할수록 CO값은 감소한다. 또한 당량비를 감소하면 초기에는 연료와 공기의 혼합상태가 양호하여 CO는 감소하다가 당량비가 더욱 감소하면 냉각 등에 의하여 연소가 불안정하여 CO가 현저히 증가한다. 이러한 CO의 증가가 발생하는 당량비는 연소기 입구 공기 온도가 증가할수록 점점 낮은값을 갖는다. 연소기 입구 공기온도가 450K일 때 당량비가 0.45이후 CO의 증가를 볼 수 있으나 연소기 입구 공기 온도가 650K 인 경우 당량비 0.3 이후에 CO의 증가를 볼 수 있다.

이와 같은 결과로부터 연소기 입구 공기 온도가 높고 당량비가 설계점 근방에서는 안정된 연소를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4.2 부하조건 변화에 따른 연소특성

부하에 따른 배기특성을 알아보기 위하여 연소용 공기온도(600K) 및 공기량(105kg/h, 95kg/h, 80.35kg/h, 65kg/h)을 고정시키고 연료량을 조절하여 당량비를 변화시켰다. Fig.8은 연소기 출구에서의 NO를 나타낸 것으로, 당량비가 감소할

수록 희박연소에 의하여 화염온도가 저하되어 NO가 감소함을 알 수 있다. 한편, 공기량이 증가할수록 NO는 감소하고 있는데, 이것은 공기량이 증가함에 따라 연료와 공기의 혼합이 양호하여저국부적인 고온부가 없고 한편으로는 공기량의 증가에 따라 주연소영역에서의 체류시간이 감소하여 NO가 감소한 것으로 생각된다. Fig.9은 연소기 출구에서의 CO를 나타낸 것으로, 당량비가 감소하면 초기에는 연료와 공기의 혼합상태가 양호하여저 CO는 감소하다가 당량비가 더욱 감소하면 냉각효과에 의하여 CO가 현저히 증가하고 있다. 이러한 현상은 NO의 경우에도 당량비가 어느 값 이하로 감소하면 화염의 안정성이 크게 떨어져 NO가 증가한다. 한편, 공기량이 증가할수록 CO는 NO와 반대로 증가하고 있는데, 이것으로 보아 연료와 공기의 혼합보다는 주연소영역에서의 체류시간에 의한 영향이 지배적인 것을 알 수 있다.

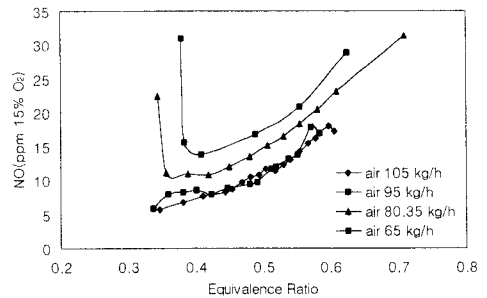


Fig.8 NO emissions at combustor exit

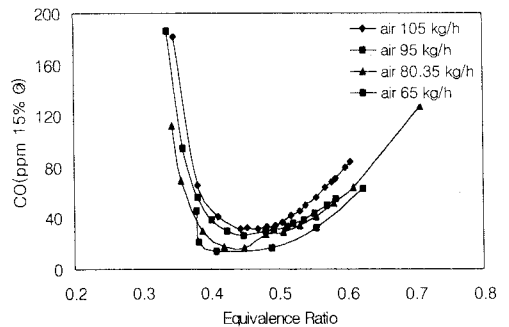


Fig.9 CO emissions at combustor exit

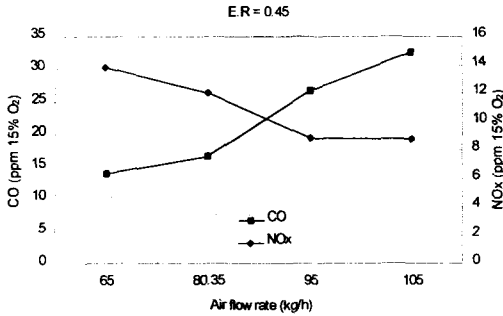


Fig.10 NO & CO emission for air flow rate

Fig.10은 NO 및 CO 등의 배기특성이 양호한 조건인 당량비가 0.45인 경우에 대하여 연소용 공기량에 대한 배기특성을 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 주어진 실험조건에서 NO는 8~14ppm 값을 가지며 CO는 연소용 공기량이 증가하면 15~33ppm 값을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 당량비가 0.45인 경우를 설계점에서의 운전 조건으로 선정하였으며, 이 결과를 연소기 크기 등을 결정하는데 고려하였다.

5. 결론

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 연소기 입구 공기의 온도를 증가시키면 연소기 출구 온도가 증가하며, CO는 감소하고 NO는 증가하는 전형적인 배가스 특성을 얻을 수 있었다.
- 2) 당량비가 감소할수록 즉, 희박연소가 일어날수록 화염의 온도가 감소하여 NO는 감소하였으며, CO는 초기에는 당량비가 감소할수록 연료와 연소용 공기의 혼합이 양호하여 감소하다 당량비가 더욱 감소되면 화염의 불안정성에 의하여 다시 증가함을 알 수 있었다.
- 3) 연소용 공기량이 증가하는 조건에서 NO는 감소하고 CO는 증가하였다. 이것은 체류시간에 의한 것으로 연소실 크기를 결정하는 데 유용한 정보를 제공한다.
- 4) 추후, 연소성능 개선을 위한 연구뿐만 아니라

연소기 출구의 출구온도분포 균일도(Pattern factor) 및 연료 스케줄에 따른 연소특성, 시동 특성 등 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) A. M. Mellor, 1976, "Gas Turbine Engine Pollution", Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 1, pp.111~133.
- (2) A. H. Lefebvre, 1983, Gas Turbine Combustion, McGraw-Hill
- (3) A. M. Mellor, 1990, Design of Modern Turbine Combustor, Academic Press.
- (4) "The Design and Development of Gas Turbine Combustors", Northern Research and Engineering Corporation, Woburn, Massachusetts, U.S.A.
- (5) K. Dobbeling 외, 1994, "Low NOx Premixed Combustion of MBTU Fuels using the ABB Double Cone Burner", ASME, 94-GT-394.
- (6) 오군섭, 안국영 외, 1997, "터보기계 설계기술 개발에 관한 연구", 한국기계연구원 연구보고서, UCN 304-521.M.
- (7) 오군섭, 안국영 외, 1997, "터보제너레이터 및 관련 유체계의 공력설계 및 해석기술 (I)", 한국기계연구원 연구보고서
- (8) 안국영, 김한석, 배진호, 조은성, 1998, "가스터빈 연소기 기본형상 결정을 위한 성능실험", 대한기계학회논문집 B권 제22권 제6호, pp.840~848.
- (9) Manfred Aigner 외, 1999, "Development of an Oil Injection System Optimised to the ABB Double Cone Burner", ASME.