저 NOx 희박연소기의 주연소영역에서의 연소특성 연구

임암호†·안국영*·김한석*·김용모**

The Combustion Characteristics at Primary Zone of Lean Premixed low NOx Combustor

A. H. Lim, K. Y. Ahn, H. S. Kim, Y. M. Kim

Key Words: Lean Premixed Prevaporized Combustion(희박 예혼합 예증발 연소), Reverse flow type(역류 통형방식), Semi-Empirical(Analytical) Correlations(준-실험 상관관계), Low NOx(저 NOx), Gas Turbine Combustor(가스터빈 연소기)

Abstract

The concept of lean-premixed combustion in gas turbine combustor operation has become a standard in recent years as an effective means to meet stringent enviromental standards on NOx emissions. The combustion characteristics of 75 kW class lean premixed combustor were investigated at the conditions of high temperature and ambient pressure. The exit temperature and emissions of CO and NOx were measured at the center of exit plane. The high temperature air of 550K~650K was supplied through air preheater. As expected, experimental results indicate that NOx emission was increased and CO emission was decreased by increasing inlet air temperature. But CO emission measured at the center of exit plane was increased because of the non-uniform radial direction profiles. The Semi-Empirical Correlation method was applied to obtain the design point emissions of NOx and CO. Also the flame temperature, CO and NOx emissions were measured along the centerline of liner at 650K inlet air temperature to determine the position of dilution holes.

1. 서 론

최근 심각한 사회적 문제가 되고 있는 공해문제의 해결을 위한 청정 동력원으로 가스터빈 엔진을 이용한 열병합(Cogeneration) 및 복합(Combined cycle)발전설비의 설치가 세계적으로 확대되어 가고 있는 실정이다. 가스터빈의 엔진 성능은 일반적으로 출력과 열효율로 표현되며, 열효율은 엔진의 에너지 소모량과 직결되므로 성능판단시 중요한 변수중의 하나이다. 일반적으로 열효율은 출력이 증가함에 따라 증가되며, 열효율을 높이기 위한 기술적인 노력이 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 이와 같은 노력은 압축비가 높은 압축기의 개발, 완전연소 연소기의 개발, 터빈 입구온도가 높은 터빈의 개발등으로 분류된다. 이중에서도 터빈 입구온도의 상승은 엔진성능을 향상시키는데 결정적인 역할을 하고 있다. 가스터빈 엔진의 성능은 온도와 압축비가 증가함에 따라 향상되므로, 잘 설계된 연소기는 압력손실이 적어야 하고, 완전연소가 되어야 하며, 연소기에 연료의 잔류물이 누적되어서는 안되며, 쉽게 점화되고, 안정된 연소를 유지해야 하며, 장시간 사용시 신뢰성이 저하되어서는 안된다.

† 한양대학교 대학원
E-mail : pass762000@hanmail.net
TEL : (017)478-5211 FAX : (042)868-7284
* 한국기계연구원
** 한양대학교 기계공학부

최근 환경문제가 심각하게 대두됨에 따라, 가스터빈 엔진의 배기가스 공해물질을 줄이기 위하여 다양한 저공해 연소기의 개발이 진행중이며, 그 방법으로는 연소영역의 화염온도 제어에 의한 배기가스의 감소(가변형상, 다단연소), 희박 예혼합 예증발 연소(Lean Premixed Prevaporized combustion), 농후 급냉각 희박연소(Rich Quick quench Lean burn combustion), 촉매연소(Catalytic combustion)와 같은 연구가 개발되고 있다.(1) (2)

본 연구에서는 저 NOx형 연소기 개발에 있어서 희박 예혼합 예증발 연소방법을 선정하여 연소기를 설계• 제작하였으며 입구공기온도에 따른 연소기의 성능실험을 수행하였다.

2. 저 NOx 연소기의 설계

연소기의 구조는 크게 케이스, 라이너 및 점화장치로 구성되어 있으나 전반적인 연소기의 설계에 있어서 연소기의 기본적인 크기를 결정하는 일이 중요하다. 따라서 연소기 설계는 일반적으로 공기역학적 관점에서 전압손실계수의 결정 및 화학반응적 관점에서의 연소효율 또는 배기가스의 특성 등으로부터 연소기의 단면적을 구한 후 연소기의 지름, 길이 등 주요크기를 결정하는 것으로부터 시작된다. 본 연구에서는 한국기계연구원에서 개발된 설계용 프로그램(KACOM)을 이용하여 설계된 20kW급 저 NOx형 연소기를 Scale - Up 한 연소기로써 설계에 관련한 구체적인 설계결과는 안 등의 결과를 참고하기 바란다.(6) (8) 또한 설계된 연소기의 설계사양은 Table. 1에서 보는 바와 같다. 연소기 입구압력은 389.088KPa로서 연소기 입구부터 출구까지 6%의 압력손실을 가지며 입구공기 온도는 802.66K으로서 높은 입구온도 조건을 가진다. 본 실험에서는 입구압력을 상압으로 하였으며, 입구온도는 열교환기의 성능으로 인하여 650K의 조건을 최고 입구온도로 설정하여 실험을 수행하였다. 설계점에서의 당량비는 0.108로서 920%의 과잉공기를 가지며, 연료는 경유(Light Oil)를 사용하였다.

Parameters	Unit	Value	Remarks
Inlet Pressure[P3]	KPa	389.088	Pressure Loss = 6%
Outlet Pressure[P4]	KPa	365.743	
Inlet Temperature[T3]	K	802.66	529.51℃
Outlet Temperature[T4]	K	1115	841.85℃
Fuel Mass Flowrate	kg/h	20.88	Light Oil
Lower Heating Value	MJ/kg	46.200	
Air Mass Flowrate	kg/h	2823.84	
Efficiency	%	99.5	
(A/F)st	-	14.6	
A/F	-	135.24	
Equivalence Ratio(∅)	-	0.108	

Table. 1 Design Point Specification

3. 실험장치 및 방법

3.1 연소기

본 연구에서 설계된 연소기는 희박 예혼합 예증발 연소기로서 Fig. 1에서 보는 바와 같이 라이너 지름은 134㎜, 길이는 304㎜의 크기를 갖는 역류통형 방식의 연소기로서 연소용 입구공기가 라이너 끝단에서 입구방향으로 유입되며, 예혼합실에서 연료와 혼합된다. 실험에 사용된 연료는 경유이며, 연료분사노즐은 압력식 노즐로서 분무각은 30°이다. 예혼합실은 원추형으로 연료노즐은 중앙에 위치하고 있으며, 연소용 공기는 원추형 벽면의 양쪽 슬롯으로 공급된다. 노즐로부터 분무된 연료는 접선방향으로 공급되는 연소용 공기와 혼합되어 강한 선회를 갖게 된다. 예혼합실 출구부는 라이너 입구에 연결되어 있으며, 이부분에서 강한 선회유동이 갑작스런 팽창에 의하여 vortex break down이 일어남과 동시에 예혼합실 출구부 바로 상단에 정체점이 생겨 보염기 역할을 하게 된다. 반면 이곳에서 폭발적인 분산 및 무화가 발생하여 노즐에서의 무화성능에 관계없이 양호한 화염을 얻을 수 있다는 보고가 있다.(5) 연소기의 점화는 예혼실 출구부 근방에 토치점화기를 설치하여 점화시키도록 하였다.

3.2 실험장치

실험에 사용된 실험장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 연소용 공기공급장치, 연료공급장치, 연소기 및 배기가스 계측장치 등으로 구성되어 있다. 연소용 입구공기의 공급은 풍압 2000㎜Aq, 풍량 55Nm^3/min의 용량을 가지는 송풍기를 통하여 열교환기를 거쳐서 고온의 공기가 연소기 입구로 공급되며, 공기유량의 측정은 전자식 질량유량계를 사용하였다. 연소용 연료의 공급은 연료탱크와 연소기 사이에 위치한 펌프로써 공급되며, 공급유량의 측정은 Oval Flowmeter Type의 질량유량계를 사용하였다. 연소용 입구공기의 온도측정은 K-Type 열전대를 사용하였으며, 연소기 출구에서의 배기가스 온도측정은 R-Type 열전대

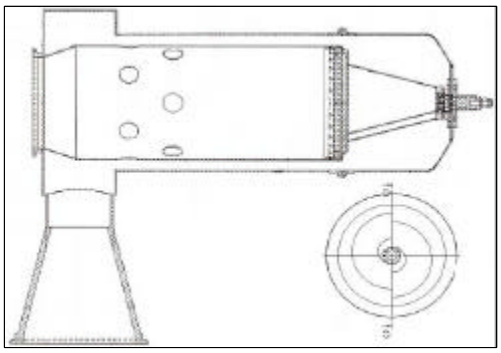


Fig. 1 75KW Class Lean Premixed Low NOx Combustor

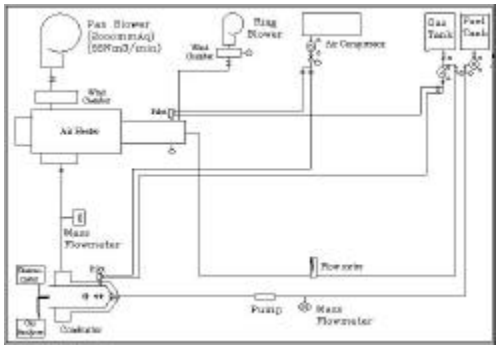


Fig. 2 Schematic Diagram of Experimenral Apparatus

를 사용하여 측정하였다. 각 열전대로부터 측정된 온도값에 대한 복사 열손실 및 전도에 의한 오차등은 보정하지 않았다. 연소기 출구에서의 배기가스는 별도로 제작한 수냉식 가스채취관을 이용하여 가스를 채취하였으며, 채취된 가스는 연속측정이 가능한 가스분석기(Green Line MK-2)를 사용하여 배기가스를 분석하였다.

3.3 실험 및 실험방법

본 연구에서는 예혼합 희박연소기의 배기가스 특성비교, 희박연소 한계 및 입구공기 온도에 따른 주연소 영역의 연소특성 등에 대한 실험을 수행하였다.

저 NOx 연소기의 연소특성을 알아보기 위하여 기존연소기(Convensional Combustor)와의 배기가스 농도에 대한 특성을 분석하였으며, 주연소 영역의 연소특성을 알아보기 위하여 희석공기공이 없는 라이너의 끝단에서 배기가스의 농도, 온도 및 화염형상을 측정함으로써 연소기의 연소특성 및 희박연소 한계를 분석하도록 하였으며, 실험하고자하는 연소용 공기의 입구온도는 550K, 600K, 650K로 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 또한 희석공기공의 적절한 위치 선정 및 주연소영역의 내부연소특성을 파악하기 위하여 입구공기온도가 650K일 경우, 라이너 길이방향으로의 각 지점별 배기가스 농도 및 온도를 측정하였다. 실험에서의 공기량은 입구온도에 의한 배기가스의 생성특성을 알아보고자 각 입구공기 온도별 동일당량비 내에서 동일한 속도를 가지도록 연소용 공기량을 유지시켰다. 따라서 실험은 연료량을 고정시킨 상태에서 입구공기 유량을 변화시켜 가면서 당량비를 조절하여 실험을 수행하였으며, 실험에 사용된 고온의 입구공기는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 열교환기를 거쳐서 연소기 입구에 공급되며, 실험시 압력은 상압조건에서 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 기존 연소기와 저 NOx연소기의 연소특성

본 연구에서 사용된 연소기는 저 NOx형 예혼합 예증발 희박연소기로서 저 NOx 연소기의 배기가스 특성을 참고하고자 기존 연소기와 저 NOx형 연소기의 배기가스 농도를 비교하였다. Fig. 3은 CO 및 NO의 배기가스를 비교한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 저 NOx형 연소기의 CO 및 NO의 배기가스 배출농도가 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 3를 보면 NO의 발생량은 당량비가 감소할수록 혼합특성의 향상과 희박연소에 의한 화염온도의 저하로 저 NOx 연소기의 경우 기존 연소기에 비하여 현저하게 낮은 값을 가지며, 최대 74%정도까지 감소함을 알 수 있다. 또한, CO의 발생량 역시 혼합특성 향상에 의하여 저 NOx 연

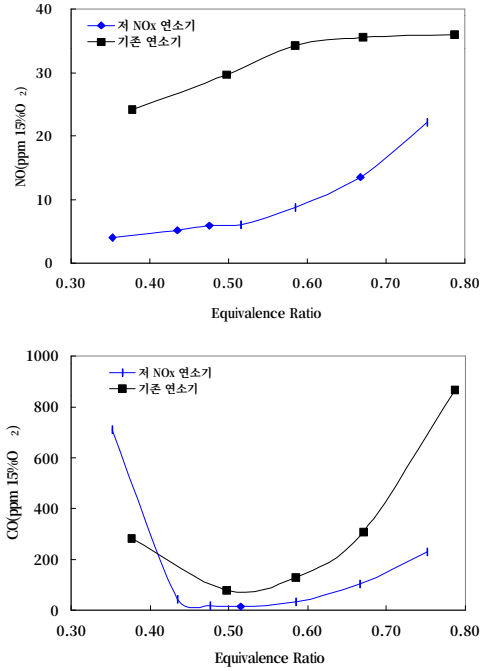


Fig. 3 NO & CO Emission of Convensional and Low-NOx Combustor

소기가 기존 연소기에 비하여 전체적인 당량비 영역에서 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편 ∅pz≦0.45일 경우에는 입구공기에 의한 유속의 증가로 인하여 혼합특성이 양호하지 못함으로써 화염이 불안정해지고, 급격한 냉각(Quenching)등의 영향으로 인하여 CO가 급격히 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

4.2 입구공기온도에 따른 주연소 영역의 연소특성

각 입구온도별 동일 당량비에 따른 연소공기의 체류시간을 일정하게 유지시킨 상태에서 당량비를 변화시키기 위하여 입구공기 유량을 조절하면서 실험을 수행하였으며, 연소기 출구부분에서 배기가스의 농도, 온도 및 화염형상을 측정하였다. 각 입구공기 온도는 550K, 600K, 650K이며, 이때의 연료량은 7.935kg/h, 7.274kg/h, 6.715kg/h를 각각 공급하였다. Fig. 4의 실험값에서 보는 바와 같이 NO는 입구공기 온도가 높아질수록 연소영역의 화염온도의 증가로 인하여 NO의 생성이 증가하고 있으며, 당량비가 감소할수록 연소가스의 체류시간이 짧아지고, 희박연소에 의한 화염온도의 저하로 NO 생성이 감소하는 결과를 볼 수 있다. 반면 CO의 경우는 일반적인 배기가스 생성과는 달리 입구온도가 높아질수록 CO의 생성이 증가하는 결과를 볼 수 있었다. 따라서 입구공기온도가 높을수록 CO의 배기가스 생성이 높게 나타나는 것을 알아보기 위하여 출구부분의 배기가스 측정을 라이너의 반경방향으로 측정해 보았다. 측정값은 Fig. 5과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 라이너 출구쪽에서의 반경방향 배기가스 분포를 보면 중심(Center)에서 2cm까지는 입구공기 온도가 낮을수록 CO의 농도가 낮고 벽면으로 갈수록 높게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 그 이유로는 각 입구온도별 당량비에 따른 체류시간을 일정하게 유지시킨 상태에서 낮은 입구온도에서는 압력식 노즐의 분무압력이 높기 때문에 연료의 분무속도가 커짐에 따라 입구공기와 예혼합된 혼합가스가 라이너 벽면에 부딪치면서 벽면에서의 냉각(Quenching)에 의한 영향으로 불안정 연소된 연소가스가 라이너 벽면을 따라 출구방향으로 배출되어 CO의 배기가스 분포가 중심보다는 라이너 벽면에서 높게 측정된 것으로 사료되며, 또한 입구온도에 따른 액체연료의 증발속도에 의한 영향으로 입구공기 온도가 높을수록 증발률이 증가하고 혼합률이 향상되어 혼합가스가 라이너 벽면에 의한 냉각 없이 주연소 영역안에서 완전연소가 일어나 라이너 벽면보다는 중심(Center)쪽에서 CO의 배출농도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 따라서 라이너 출구방향에서의 총체적인 면적비에 대한 배기가스의 배출농도는 입구공기온도가 550K일 경우 CO는 20ppm정도이며, NO는 6ppm으로 분석되었고, 입구공기 온도가 650K일 경우는 CO가 16ppm정도이며, NO는 11ppm으로 분석되었다.

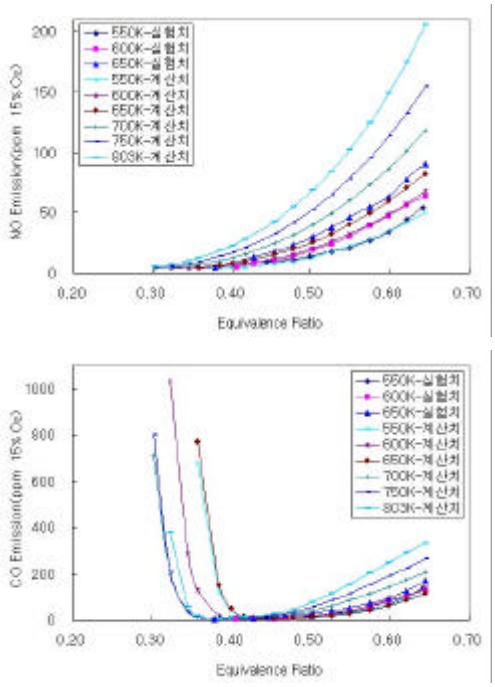


Fig. 4 NO & CO Emission for Semi-Empirical Correlation at Primary Zone

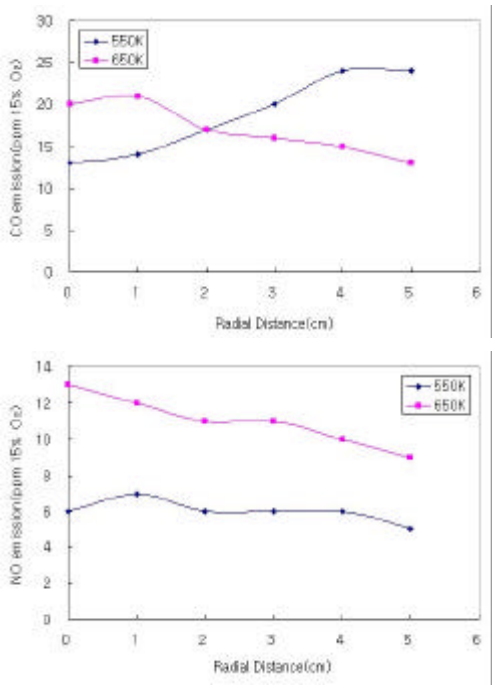


Fig. 5 Characteristic of CO & NO Emission for radial direction at liner exit

따라서 이를 고려하면 입구공기 온도가 높을수록 CO는 감소하고 NO는 증가하는 전형적인 배기가스의 생성특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한 당량비가 감소함에 따라 연료와 공기의 혼합특성이 향상되어 CO의 생성이 감소하는 결과를 나타낸다.

실험측정에서 당량비가 더욱 감소하여 입구공기에 의한 냉각 및 연소공기의 속도의 증가로 인하여 화염이 불안정해 지면서 단시간 안에 화염이 소멸되는 현상이 일어나지만 그에 따른 배기가스 측정은 이루어지지 못했다. 따라서 NO 및 CO의 생성에 대한 이론 및 실험결과를 근거로 한 기연구자들의 상관관계식을 참고하여[2] [4] Fig. 6과 같은 상관관계식을 얻을수가 있었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 기연구자들이 제시한 것과는 다소 다르지만 본 연구에서 입구공기온도별 CO 및 NO 배기가스 생성에 영향을 미치는 연소기 입구압력, 공기유량, 출구온도 및 압력손실등의 주요변수(Key-Parameters)를 X-축으로 하였으며, 그에 따른 배기가스 농도를 Y-축에 나타내었다.

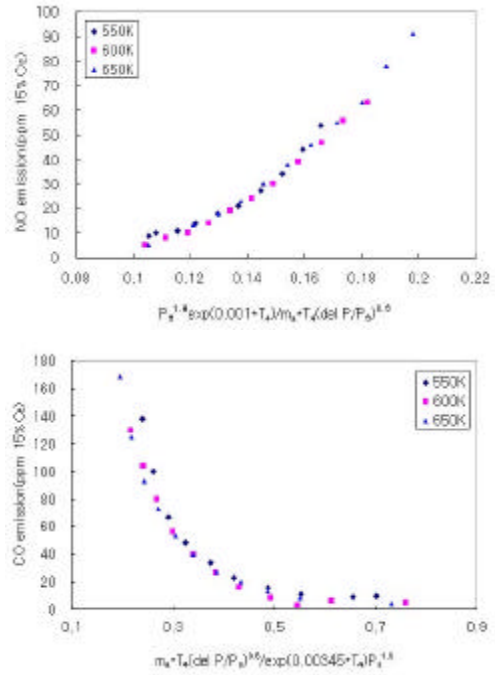
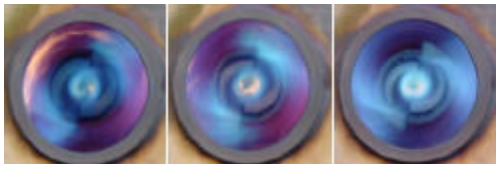


Fig. 6 NO and CO Emission for key parameters



550K 600K 650K

Fig. 7 Photographs of flams for inlet temperature(∅pz = 0.45)

Fig. 4에서 보는 바와 같이 분석된 관계식은 매우 만족스러웠으며, 그 결과 실험에서 측정하지 못한 저· 희박연소구간에 대한 배기가스 농도와 고온의 입구공기 온도에 대한 설계점 온도(803K)에서의 CO 및 NO 배기가스 농도에 대해서도 예측할 수 있었다. Fig. 7은 ∅pz=0.45일때의 각 입구온도별 화염형상을 나타낸 것으로 온도가 높을수록 연소기내의 반응속도가 빠른 결과로, 입구공기의 강한 선회력으로 인하여 혼합특성이 향상되고 연료의 예증발로 인한 연소특성이 향상되어 전체적인 화염의 색깔이 적염에서 청염으로 바뀌어지는 것을 확인 할 수가 있었다.

4.3 주연소 영역의 내부연소 특성

저 NOx 연소기의 설계에 있어서 희석영역의 위치 선정 및 연소특성을 관찰하기 위하여 주연소 영역에서의 입구공기 온도가 650K일때 내부연소 특성을 알아보았다. 실험은 주연소 영역의 당량비를 0.48로 고정시킨 상태에서 라이너 출구부분에서 입구방향으로 2㎝씩 이동하면서 화염의 온도 및 배기가스 분포에 대하여 측정하였다. 측정된 배기가스의 결과는 Fig. 8과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 NO는 라이너 입구부에서 출구방향으로 갈수록 약간의 감소추세를 보이고 있으며, CO는 라이너 입구부에서 4㎝까지는 증가하다가 4 18㎝까지는 급격히 감소하며, 이후로는 완만한 감소추세를 보이고 있다. 따라서 Fig. 8로부터 주연소 영역에서의 연소과정이 거의 끝나는 거리에 희석공기공을 위치시킬 수 있는 정보를 얻을 수 있었다.

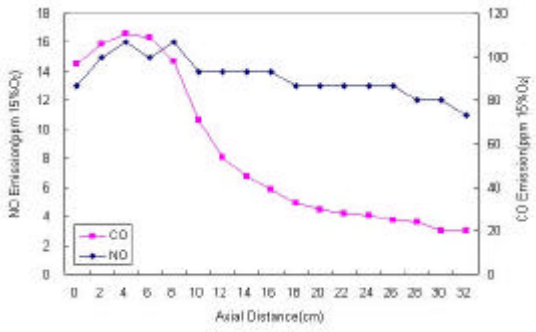


Fig. 8 Characteristic of CO & NO Emission for inner combustion at Primary zone

5. 결 론

본 연구에서 얻은 75kW급 저 NOx 연소기의 연소특성은 다음과 같다.

① 입구공기 온도가 증가할수록 NO는 증가하고, CO는 감소하는 배기가스 특성을 관찰할 수 있었

으며, 입구온도가 증가하면 할수록 희박연소 영역에서의 연소가 가능하다는 결과를 알 수 있었다.(550K : ∅pz=0.44 , 600K : ∅pz=0.43 , 650K : ∅pz=0.38)

② NO 배기가스의 경우 당량비가 감소함에 따라서 화염온도가 감소하고 연소공기의 체류시간이 짧아짐으로써 NO의 생성이 감소함을 관찰 할 수 있었으며, CO의 경우 당량비가 감소함에 따라서 연료와 공기의 혼합특성이 양호하여 배기가스의 생성이 감소하다가 더욱 감소하면 입구공기에 의한 유속의 증가로 인하여 화염이 불안정해지고, 급격한 냉각(Quenching)에 의한 영향으로 CO가 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다.

③ 기연구자들의 Semi-Empirical Correlations을 참고하여 실험에 준하는 결과값을 비교· 분석한 결과 연소기 설계점에서의 CO, NO에 대한 배기가스 농도에 대하여 예측할 수 있었다. 준-실험 상관관계(Semi-Empirical Correlations) 사용시 본 실험과는 무관한 주요변수(Key-Parameters)는 고려하지 않았다.

④ 축방향에 대한 분석결과 희석공기공의 적절한 위치 및 크기를 결정할 수 있는 정보를 얻을 수 있었다.

⑤ 차후 실험은, 연소성능 개선을 위하여 노즐의 종류(크기)에 따른 분무특성 및 연소부화 실험과 희석영역의 연소특성, 출구온도 분포도(Pattern Factor), 연료스케즐에 따른 화염안정성 등의 실험이 지속적으로 연구되어야 하며, 또한 연소기의 운전중 소음 및 내구성에 대한 연구도 필요하다.

참고문헌

(1) 윤천석, 김수용, 전승배, 천세창, 조병도, 박상선, 2002, “2002 신기술동향조사 보고서 – 가스터빈엔진,” 특허청 기계/금속분야 제4권, pp15-17, pp24-25, pp93-141

(2) Lefebvre, A. H., 1983, Gas Turbine Combustion, McGraw-Hill

(3) Rizk, N. K., 1993, "Semianalytical Correlatios for NOx, CO, and UHC Emissions," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 115, pp. 612-619

(4) Lefebvre, A. H., 1984, "Fuel Effects on Gas Turbine Combustion-Liner Temperature, Pattern Factor and Pollutant Emissions," AIAA -84-1491

(5) Manfred Aigner 외, 1999, “Development of an Oil Injection System Optimised to the ABB Double Cone Burner", ASME.

(6) 오군섭, 안국영 외, 1997, “터보기계 설계기술 개발에 관한 연구”,한국기계연구원 연구보고서, UCN 304-521.M.

(7) 오군섭, 안국영 외, 1997, “ 터보제너레이터 및 관련 유체기계의 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.