

이중원추형 모형연소기에서 압력과 공기비에 따른 NOx 배출특성

남동현* · 남현수* · 한동식* · 김규보** · 조승완* · 김한석*** · 전충환*,**†

* 부산대학교 기계공학부, ** 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터, *** 한국기계연구원

Effect of Pressure and Stoichiometric Air Ratio on NOx Emissions in Gas-Turbine Dump Combustor with Double Cone Burner

Dong Hyun Nam*, Hyun Su Nam*, Dong Sik Han*, Gyu Bo Kim**, Seungwan Cho*

Han Suk Kim*** and Chung Hwan Jeon**,**†

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

** Pusan Clean Coal Center(PC3), Pusan Nat'l Univ.

*** KIMM

(Received August 4, 2011 ; Revised December 3, 2011 ; Accepted December 3, 2011)

Key Words: Gas Turbine Combustor(가스터빈연소기), Double Cone Burner(이중 원추형 버너), Lean Premixed Combustion(희박 예혼합 연소), NOx Emission(NOx 배출), Stoichiometric Air Ratio(공기비), Elevated Pressure(가압)

초록: 본 연구에서는 이중원추형 버너가 장착된 고압연소기를 이용하여 입구공기온도, 공기비 그리고 연소실 압력조건에 따른 NOx 배출 특성을 실험적으로 조사하였다. 배기가스 온도와 NOx 배출량은 동일한 연소실 끝단지점에서 측정되었다. NOx 배출량은 공기비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 입구공기 온도와 연소실의 압력이 높아질수록 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 입구공기 온도의 증가는 희박 영역에서 가연한계를 증가시켜 높은 단열화염 온도를 가짐에도 불구하고 저감된 NOx 배출 수준을 얻을 수 있었다. 연소실 압력이 증가할수록 Thermal NOx의 영향을 받는 영역에서의 NOx 배출은 큰 폭의 상승을 보였으나, 공기비가 1.8이상인 영역에서는 적은 연료량으로 인하여 적은 상승폭을 나타내었다.

Abstract: This work presents an experimental investigation of NOx emissions according to inlet air temperature (550-660 K), stoichiometric air ratio (λ , 1.4-2.1), and elevated pressure (2-5 bar) in a High Press Combustor (HPC) equipped with a double cone burner, which was designed by Pusan Clean Coal Center (PC3). The exhaust-gas temperature and NOx emissions were measured at the end of the combustion chamber. The NOx emissions generally decreased as a function of increasing λ . On the other hand, NOx emissions were influenced by λ , inlet air temperature and pressure of the combustion chamber. In particular, when the inlet air temperature increased, the flammability limit was extended to leaner conditions. As a result, a higher adiabatic temperature and lower NOx emissions could be achieved under these operation conditions. The NOx emissions that were governed by thermal NOx were greatly increased under elevated pressures, and slightly increased at sufficiently low fuel concentrations ($\lambda > 1.8$).

1. 서론

공기를 산화제로 사용하는 대부분의 연소 시스템에서 필연적으로 발생하는 질소산화물은 오존층 파괴와 같은 환경문제에 직접적으로 관여함으로써 모든 연소 기술에서 질소산화물에 대한 저감이 주요 관심사가 되고 있다. 특히 기체연료를

사용하는 가스터빈을 이용한 발전 시스템은 일반적인 화력 발전에 비하여 공해 물질의 배출량의 지속적인 저감이 이루어지고 있으며 효율적인 면에서도 우수하다. 효율적인 질소산화물의 배출 저감을 위한 연구로 연소영역의 형상변화나 다단 연소와 같은 화염온도의 제어로 질소산화물을 저감시켰으며, 특히 희박 예혼합 연소(lean premixed combustion), 농후 급냉각 희박연소(rich quick quench lean burn combustion), 촉매연소(catalytic

† Corresponding Author, chjeon@pusan.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

combustion) 등과 같은 연구가 진행되어 왔다.⁽¹⁾

일반적인 연소시스템에서의 NOx배출 특성을 알아보기 위하여 많은 선행 연구자들은 PSR (Perfectly Stirred Reactor) 등을 이용한 예혼합화염의 NOx 생성 기구에 관한 연구를 수행하였다. 특히 Lee 등⁽²⁾은 PSR등의 반응기 모델을 이용하여 희박예혼합 조건에서 당량비, 입구온도, 압력 등이 NOx 생성 매커니즘에 영향을 미친다는 것을 확인하였고, Hwang 등⁽³⁾은 예혼합화염을 대상으로한 premix code를 적용한 수치해석을 통하여 화염면 근처에서 열손실율의 변화와 체류시간이 NOx 배출특성에 중요한 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 특히 국내에서 Son 등⁽⁴⁾은 배기 이중 원추형 버너를 이용하여 공기의 혼합성의 향상에 따른 성능 평가를 배기가스 성분 분석 등으로 실시하였고, Lim 등⁽⁵⁾은 이중원추형 저 NOx 연소기로 실험을 수행하여 입구온도의 증가가 희박연소영역에서의 연소성과 NOx 배출특성에 중요한 영향을 미친다는 것을 나타내었다.

본 연구는 고압연소 시스템을 모형 가스터빈 연소기에 적용한 국내 최초의 연구로서 고온/고압 분위기에서의 연소 특성을 연구하기 위한 기초연구로서 수행하려 한다. 또한 본 연구에서는 연료-공기 혼합과 화염안정성을 강화시키는 이중 원추형 버너를 이용하고 가스터빈 연소기의 주요 운전 변수인 연소공기 온도, 공기비(Stoichiometric air ratio, λ), 그리고 압력의 변화가 NOx 배출특성에 미치는 영향을 실험적으로 확인하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 고압 연소 시스템

실험에 사용된 고압연소 시스템은 실제 가스터

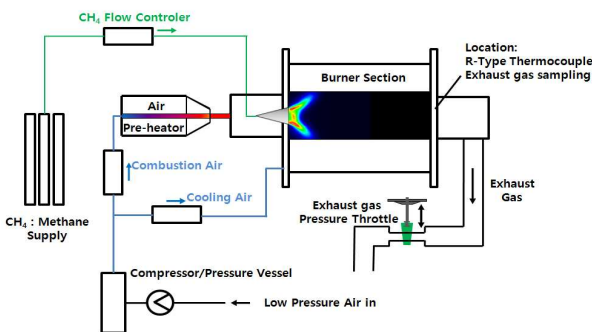


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus of high pressure combustion system

빈 연소조건(450K~900K)을 모사하기 위한 것으로 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터에서 국내 최초로 설계 제작한 시스템이며 Fig. 1에 고압 연소 시스템의 개략도를 나타내었다. 고압 연소 시스템은 연소용 공기공급장치, 연료공급장치, 연소기 및 배기가스 계측장치 등으로 구성되어 있다. 고압 연소 시스템의 연소실은 연소실험에 일반적으로 쓰이는 실린더형 연소실로서 Fig. 2에 개략도를 나타내었다. 연소실은 직경이 90mm, 길이가 270mm인 석영관으로 구성되어 있고, 내부 연소실을 구성하는 석영관 외벽으로는 냉각 공기를 흘려 대류 냉각시킬 수 있으며 외부 연소실 측면과 후면에 관측창(quartz)을 두어 광학적 접근이 용이하도록 하였다. 최대압력 13bar, 최대유량 240Nm³/h의 용량을 가지는 압축기를 통하여 750K까지 예열이 가능한 열교환기를 거쳐 형성된 고온, 고압의 연소용 공기가 연소기 입구로 공급되고, 연소기 배기부에 설치된 압력 조절밸브를 조절하여 연소실 내 압력을 형성할 수 있다.

고압 연소 시스템은 1850K의 최대 운용 가능 배기가스 온도 조건을 가지며 연소실을 제외한 나머지 부분에는 워터자켓을 설치하고 냉각수를 사용하여 장비를 보호하였다. 연소실에 공급되는 공기와 연료의 공급량은 압력조절기와 밸브를 조절하면서 질량유량계를 통해 제어하고, 버너에 각각 공급할 수 있다. 연소용 공기는 습도의 영향을 배제하기 위해 압축기 후단에 설치된 건조기를 통과시킨 후 열교환기에 공급하였으며, 공급되는 공기는 온도가 약 13~15℃일 경우 약 25~35%의 상대습도를 가지게 되어있다. 연소실 내 점화는 불꽃점화장치(spark ignition)를 이용하여 수행하였으며, 연소용 입구공기의 온도측정

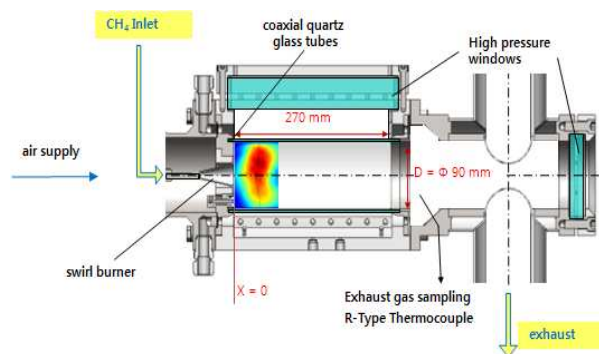


Fig. 2 Schematic of the high pressure combustion chamber

은 K-type의 열전대를 통해 측정된다. 연소실 내부의 연소가스 온도측정은 R-type 열전대를 사용하였고, 두께는 300um이며 세라믹제로 단열처리가 된 열전대를 사용하였다.

연소가스의 온도는 버너 출구로부터 300mm 떨어진 지점에서 측정하였으며 동일 위치에서 배출가스를 포집하여 측정하였다. 연소가스의 포집은 연소실(석영관)을 지난 직후이며, 수냉식 2중관과 칠러(chiller)를 통과시켜 충분히 냉각시킨 뒤 수분필터로 1차적으로 수분을 제거하고, 실리카겔과 거즈에 통과시킨 뒤 최종적으로 가스 분석기로 공급된다. 이때 연소실의 압력이 가변하기 때문에 샘플링 프로브(sampling probe)로 들어오는 배기가스의 유량을 일정하게 하기 위하여 압력조절기와 유량계를 조절하여 가스 분석기에 공급하였다. 배가스를 분석하기 위해 Eutoron사의 greenline MK2를 사용하였고 O₂, CO, CO₂, NO_x 등의 연소성 가스를 측정할 수 있다.

2.2 이중 원추형 버너

고압 연소 시스템에 장착된 이중 원추형 버너는 분당복합화력의 GT11N 기종의 EV버너를 모사한 것으로 기준부하에서의 작동조건은 12.5bar, 공기온도는 657K이며 Fig. 4에서 보는 바와 같이 직경 25mm, 12도의 각도를 가진 두 개의 원추형이 중심에서 편심되도록 하여 연료/공기가 잘 혼합될 수 있도록 제작되었다. 연료는 양쪽에 구성된 공기 유입 슬롯면의 24개의 홀(hole)에서 공급되어 공기와 혼합된다. 연소용 공기는 원추형 벽면에서 양쪽 슬롯 방향인 버너 내부로 공급되며 연료와 혼합되고 연소실로 유입되도록 되어 있다.

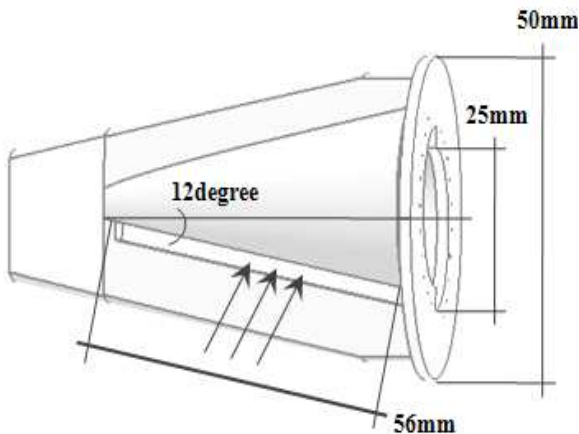


Fig. 3 The detailed view of the double cone burner

연료홀 노즐 출구부는 연소실 입구에 연결되어 있으며, 이 부분에서 발생된 선회유동이 갑작스런 팽창에 의하여 vortex breakdown이 일어남과 동시에 노즐 출구부 바로 상단에 정체점이 생기게 되어 보염기 역할을 하게 되어있다. 이는 화염역화를 방지하고 vortex breakdown으로 형성되는 후류의 재순환영역에서 화염의 안정성이 향상되는 등의 장점을 가지고 있다고 알려져 있다.⁽⁴⁾

2.3 실험방법

본 연구에서는 고압연소 시스템에서 회박영역에서 운전되는 가스터빈 연소기의 고온, 고압 조건에서 NOx 배출 특성을 살펴보기 위해 실험을 수행하였다. NOx 배출특성의 경우 연소공기온도, 연소실내 압력, 공기비에 따른 NOx 배출 영향을 살펴보았으며, 모형 가스터빈 연소기의 연소특성을 살펴보았다.

회박영역 내에서 고온, 고압연소 조건의 가연한계를 살펴보기 위해서 화염의 형상을 통해 불안정성이 발생하는 지점을 화염한계로 정의하였다. 실험에서는 연료량이 감소함에 따른 화염의 소멸현상을 확인할 수 있었고, 이러한 영역을 초과하는 지점에서는 소멸현상이 일어나게 되므로, 모든 실험은 이러한 화염한계 구간 내에서 수행되었으며 Fig. 4에 그 지점을 나타내었다. 전반적인 화염한계의 특성은 실험조건에서 입구공기 온도와 연소실의 압력이 증가 할수록 회박영역으로 화염한계의 범위가 넓어지는 것으로 나타났으며 이는 고온, 고압조건에서는 더 회박한 영역에서 화염의 유지가 가능했다는 것을 나타낸다.

Table 1 Experimental condition

Pressure(bar)	2	3	4	5
T _{air} .[K]	650	550 650 660	650	650
CH ₄ (SLPM)	25~46	43~70	58~94	72~117
AIR(SLPM)	580	870	1160	1450
U _{bulk} .[m/s]	10.13~10.46			
λ	1.4~2.1			

연소공기의 온도조건에 따른 NOx 배출특성을 살펴보기 위해 연소공기온도를 550K~660K에서 비교, 수행하였다. 또한 공기비와 압력에 따른 NOx 배출특성을 살펴보기 위해 공기비는 1.4~2.1까지 범위에서 수행하였으며, 압력의 영향을 살펴보기 위해 연소실내의 압력을 2~5bar 까지 1bar 간격으로 증가시키면서 NOx의 배출특성을 확인하였다. 압력과 공기비의 영향을 살펴보기 위해 연소공기는 650K으로 고정하여 수행하였다. 희석 공기(Dilution air)는 사용하지 않았으며 각 열전대로부터 측정된 온도 값에 대한 복사 열손실 및 전도에 의한 오차 등은 보정하지 않았다. 연소공기량을 고정하고 연료량을 증가하여 노즐 출구에서의 평균유속이 유사한 조건에서 수행하였으며 Table 1에 실험 조건을 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소공기 온도의 영향

연소공기 온도에 따른 NOx 배출특성을 살펴보기 위해 각 연소공기의 온도는 550K, 660K이고 공기비 조건은 연소공기 온도의 영향만 살펴보기 위해 1.4~2.1까지 조건으로 수행하였으며 연소실의 압력은 3bar로 동일하게 유지하였다. 연료유량을 조절하면서 실험을 수행하였으며 연소실 끝단에서 배기가스의 농도를 측정하였다. 연소공기온도가 550K에서 660K으로 증가할 때 공기비의 변화에 따른 NOx의 배출특성을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에 나타난 기본적인 NOx의 배출 특성은, 공기비가 감소함에 따라 지수적인 증가를 보인다. 이는 연료량 증가에 기인한 결과로,⁽⁶⁾ 투입되는 연료량을 늘리게 되면 연료분출 속도가 증가되어 연소반응영역을 증가시키게 되는데, 이 때 Thermal NOx 생성에 영향을 주는 고온영역에서의 체류시간이 증가하여 전체 NOx 발생량이 증가하는 것으로 사료된다.⁽⁷⁾ 또한 화염면의 증가에 따른 prompt NOx의 기여도가 분명히 있을 것으로 사료되지만, 화염온도와 thermal NO 발생과의 관계에서 온도의 증가에 따른 NO 발생 증가 기울기가 선형증가가 아닌 지수 함수적 증가 경향을 고려하면 화염 내부에 존재하는 고온영역의 존재가 NOx 발생에 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.^(8,9,13) 단열화염온도가 약 1800K 이

상인 구간에서, 연소공기 온도에 따른 NOx 발생량의 차이가 증가하는 경향을 보이며, 이는 공기비가 감소하는 효과와 마찬가지로 입구공기의 온도 상승에 따른 상대적인 단열화염온도 상승에 의한 효과로 판단된다.

공기비가 1.8이상인 구간에서 입구공기 온도에 따라 희박연소 구간에서 화염온도의 저하와 함께 소멸되는 구간이 다르게 나타났고 입구온도가 660K일 경우에 높은 입구공기 온도로 인하여 희박연소구간이 확장되는 것을 확인할 수 있다. 또한 안정된 연소성이 유지되는 희박 연소구간에서 더 낮은 수준의 NOx 배출량을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있는데, 상온의 연소용 공기를 이용하는 것보다 고온의 연소용 공기를 이용하면 가연한계가 더 희박한 영역까지 확대될 수 있고 이는 상대적으로 낮은 단열화염온도로 NOx의

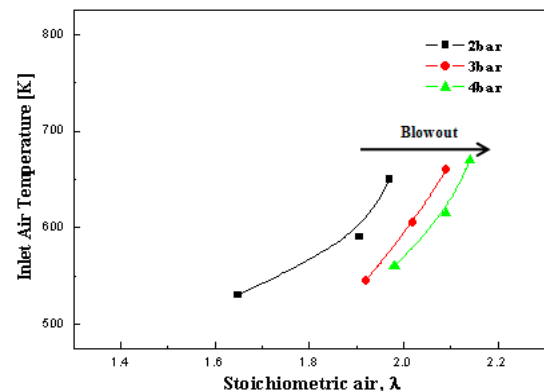


Fig. 4 Flammability limit as a function of λ for the inlet air temperature in elevated pressure and fuel-lean condition

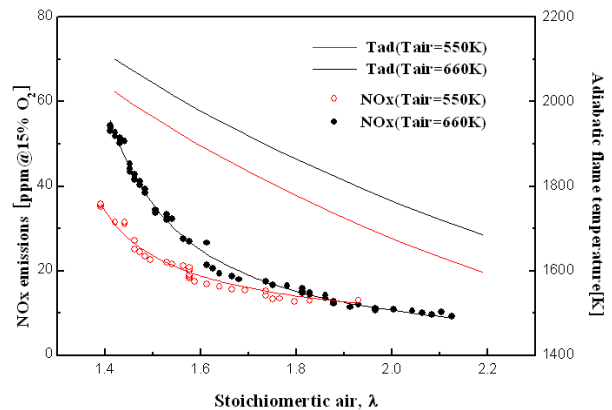


Fig. 5 NOx concentration and adiabatic flame temperature as a function of λ for different inlet air temperature at 3bar

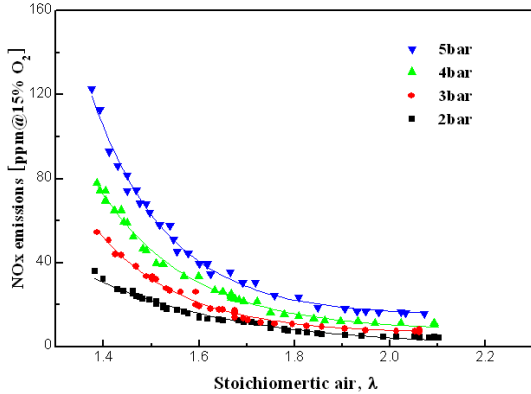


Fig. 6 NOx concentration as a function of elevated pressure at 650K

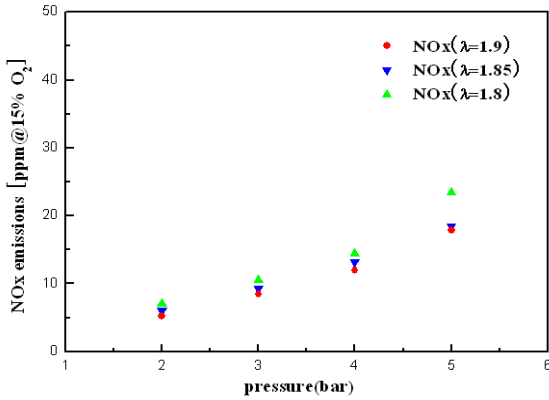


Fig. 7 NOx concentration as a function of p for λ=1.9, 1.85 and 1.8 at 650K

배출량이 더 저감되는 구간을 확보할 수 있는 것을 의미한다.

3.2 압력의 영향

본 실험에서는 배기단에서 압력조절밸브를 이용하여 연소실 내부의 압력을 실험조건에 맞게 형성시켰으며, 압력에 따른 공기유량을 고정시킨 후, 연료유량을 조절하여 공기비를 변화시키고 NOx 배출 농도를 측정하였다. 체류시간의 영향을 배제하기 위하여 각 공기비별 버너 출구에서 동일한 혼합기 평균유속을 유지하였으며, 연소실 내부 압력이 증가할 경우, 질량유량과 열부하는 압력에 따라 선형적으로 증가하게 된다. 연소공기 온도는 650K로 동일하게 하였다. 공기비와 압력에 따른 NOx 배출특성을 Fig. 6에 1.4~2.1까지의 공기비 범위에서 나타내었다. Fig. 6에 나타난 전체적인 NOx 배출 특성은 공기비 감소에 따라 지수적으로 증가하고 압력 증가에 따라 증가폭이

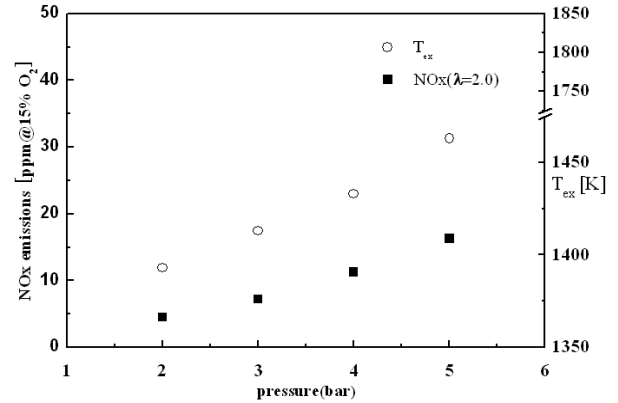


Fig. 8 NOx concentration and exhaust gas temperature as a function of pressure at 650K, λ=2.0

상승하는 경향을 나타내고 있다. 낮은 공기비에서 두드러지게 나타나는 압력증가에 따른 NOx 발생량의 증가는 공기비 감소로 증가한 화염온도에 의해 증가된 NOx 배출 수준과 압력에 제공근으로 의존하는 Thermal NOx 메커니즘에 기인한 것으로 판단되며, 공기비가 낮을수록 압력에 의한 NOx 배출량 증가에 영향이 큰 것으로 나타났다.⁽¹⁰⁾

압력이 증가할 때 Thermal NOx 메커니즘의 영향을 크게 받기 시작하는 영역을 살펴보기 위하여 연소실의 압력에 따른 NOx 배출량을 Fig. 7에 나타내었다. NOx 배출량은 압력이 증가하고 공기비가 1.9에서 1.8까지의 감소함에 따라 일정한상승폭을 가지며 증가하는 특성을 보이고 있으며, 특히 압력이 5bar에서 공기비가 1.8로 감소하였을 때 상승폭이 큰 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 앞에서 언급한 바와 같이 압력증가에 따른 단열화염온도의 상승의 영향으로 Thermal NOx의 영향이 NOx 배출을 지배하기 시작하는 것으로 사료된다.

Thermal NOx의 영향을 상대적으로 덜 받는 조건에서 압력에 관한 영향을 살펴보기 위하여 공기비가 2.0일 때 압력증가에 따른 NOx 배출특성을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 나타난 NOx 배출특성은 압력이 상승함에 따라 연소가스 출구온도의 상승과 함께 1.5의 지수값에 비례하여 증가하는 것으로 나타났고, 실제의 작동조건인 12.5bar에서 운전되었을 경우의 NOx 배출수준은 공기비가 2.0인 조건에서 약 40ppm으로 유추될 수 있다. 이는 기존 연구에서 달성한 결과보다 상당히 높은 수준인 것으로 판단되지만, 배출규정치인 70ppm 범위 내에는 속하는 것으로 나타났다. 이러한 NOx 배출특성

은 실험용으로 제작된 이중 원추형 버너가 최적화 되지 못한 연료 홀의 크기와 개수로 인한 연료/공기의 혼합기의 높은 비혼합 특성을 발생시키는 것에 대한 결과에 기인한 것으로, 기존 연구에서 확인된 $NO_x \propto P^n$ 에 따르는 0.5~0.8 사이의 n의 값과는 다르게, 본 실험에서는 높은 연료/공기의 비혼합도로 인하여 발생하는 화염의 열점(hot spot)에서 생성된 Thermal NO_x가 압력이 증가함에 따라 매우 크게 증가된 현상으로 사료되며,⁽¹¹⁻¹³⁾ 본 연구를 통하여 저 NO_x 버너 설계시에 충분한 혼합이 이루어질 수 있는 설계가 필요하다는 것을 확인할 수 있었다. 추후에는 예혼합기를 투입할 수 있는 연소시스템의 구조변경을 통하여, 저감된 NO_x 배출물의 압력에 관한 의존성에 대한 연구가 진행될 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 대기압 이상의 압력을 유지할 수 있는 연소기를 구성하고, 이중 원추형 버너를 이용해 메탄-공기 연소에서의 NO_x 배출에 관한 영향을 실험적으로 조사하였다. 연소실 내부의 공기비, 입구공기 온도, 압력에 따른 배기 배출 특성을 살펴보았으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 공기비에 의한 NO_x의 배출에 관한 영향에서 공기비가 감소할수록 NO_x 배출이 지수적으로 증가하였다.

(2) 입구공기온도에 따른 NO_x 배출의 특성에서는 입구공기온도가 높을수록 NO_x 배출이 증가하였으며, 가연한계가 넓어졌다. 또한 가연한계의 증가에 따른 희박연소조건($\lambda=1.9$)을 통해 더 높은 단열화염을 가짐에도 불구하고 희박영역에서의 화염의 안정성 증가로 더 낮은 NO_x 배출수준을 얻을 수 있었다.

(3) 연소실 내 압력이 증가함에 따라 전체적으로 NO_x 배출이 증가하였으며 그 증가의 폭이 압력이 증가할수록 지수적으로 증가하였다.

후 기

본 논문은 3단계 BK21 사업과 지식경제부의 지원으로 수행한 전력산업원천기술개발사업의 지원으로 연구를 수행하였으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, B.S., Kim, H.S. and Cho, J.H., 2010, "Large Gas Turbine Combustor Development," *Korean Fluid Machinery Association*, Vol. 13, No. 4, pp. 63~69.
- (2) Lee, B.R., Park, J.K., Lee, D.Y., Lee, M.C. and Park, W.S., 2010, "A Chemical Reactor Modeling for Prediction of NO Formation of Methane-Air Lean Premixed Combustion in Jet Stirred Reactor," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 34, No. 4, pp. 365~373.
- (3) Hwang, C.H., Hyun, S.H., Tak, Y.J. and Lee, C.E., 2007, "The Effect of Residence Time and Heat Loss On NO_x Formation Characteristics in the Downstream Region of CH₄/Air Premixed Flame," *Transactions of KSME(B)*, Vol. 31, No. 1, pp. 99~108.
- (4) Son, M.G., Ahn, K.Y., Kim, H.S. and Kim, Y.M., 2001, "The Low NO_x Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Transactions of the KSME*, Vol. 4, pp. 66~70.
- (5) Lim, A.H., Ahn, K.Y., Kim, H.S. and Kim, Y.M., 2003, "The Combustion Characteristics at Primary Zone of Lean Premixed low NO_x Combustor," *Conference of KSME*, pp. 314~319.
- (6) Heo, P.W., Oh, J.S., and Yoon, Y.B., 2009, "NO_x Reduction by Acoustic Excitation on Coaxial Air Stream in Lifted Turbulent Hydrogen Non-Premixed Flame," *Journal of KOSCO*, Vol. 14, pp. 31~38.
- (7) Jo, E.S. and Jeong, S.H., 2004, "A Numerical Analysis of the NO Emission Characteristics in CH₄/Air Counterflow Premix Flame," *Journal of KOSCO*, Vol. 9, pp. 22~27.
- (8) Kim, H.S., Ahn, K.Y., Kim, H.K., Yu, M.J. and Baek, S.W., 2003, "Characteristics of NO_x Formation in a Coaxial Multi-Air Staged LPG Flame," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 27, pp. 215~226.
- (9) Lefebvre, A. H., 1983, *Gas Turbine Combustion*, McGraw-Hill, pp. 360~417.
- (10) Ayman, B., Ahmed, A., Ala'a H.A., Ahmad, A. and Trimis, D., 2010, "CO and NO_x Emissions in Porous Inert Media (PIM) Burner System Operated under Elevated Pressure and Inlet Temperature using a new Flame Stabilization Technique," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 165, pp. 589~596.

- (11) Rajiv, K.M., Eiji, T., Frank, K.H., Lawrence, T and Robert, W. D., 1996, "Use of an Optical Probe for Time-resolved in SITU Measurement of Local Air-to-fuel Ratio and Extent of Fuel Mixing with Applications to Low NOx Emissions in Premixed Gas Turbines," *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 26, pp. 2749~2755.
- (12) Lepnard, G. and Stegmaier, J., 1994 "Development of an Aero-derivative Gas Turbine Dry Low Emissions Combustion System," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 116, pp. 542~546.
- (13) Siewert, P., 2006, "Flame Front Characteristics of Turbulent Lean Premixed Methane / Air Flames at High-pressure," Ph.D Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.