

이중원추형 모형연소기에서 압력과 공기비에 따른

화염 구조 및 NO_x 배출특성

남현수* · 한동식* · 김규보** · 진충환***†

Effect of pressure and stoichiometric air ratio

on flame structure and NO_x emission

in gas turbine dump combustor with double cone burner

Hyun Su Nam*, Dong Sik Han*, Gyu Bo Kim**, and Chung-Hwan Jeon***†

ABSTRACT

This work presents an experimental investigation to study NO_x emissions under stoichiometric air ratio and elevated pressure (2~10bar) in a High Press Combustor(HPC) equipped with double cone burner which was designed by Pusan Clean Coal Center(PC3). Exhaust gas temperature and NO_x emissions were measured at the end of the combustion chamber. The OH* radical concentration and NO_x emission were decreased as a function of increasing λ generally. On the other hand, OH* radical concentration and NO_x emission increased with λ pressure of the combustion chamber. NO_x emissions which were governed by thermal NO_x, were highly increased under the elevated pressure, but slightly increased at sufficiently low fuel concentrations ($\lambda > 2.0$).

Key Words : stoichiometric air ratio, High pressure, OH* Radical, Thermal NO_x

실험에 사용된 고압연소 시스템은 실제 가스터빈 연소조건(450K~900K)을 모사하기 위한 것으로 부산대학교 화력발전 에너지 분석기술센터에서 국내 최초로 설계 제작한 시스템이며 고압 연소 시스템은 연소용 공기 공급 장치, 연료 공급 장치, 연소기 및 배기가스 계측장치 등으로 구성되어 있다. 고압 연소 시스템의 연소실은 연소실 형에 일반적으로 쓰이는 실린더형 연소실로서 Fig.1에 개략도를 나타내었다. 연소실은 직경이 90 mm, 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 12bar, 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. 연소실에 공급되는 공기와 연료의 공급량은 압력조절기와 밸브를 조절하면서 질량유량계를 통해 제어하고, 버너에 각각 공급할 수 있다. 연소실 내부의 연소가스 온도측정은 R-type 열전대를 사용하였고, 버너 출구로부터 300mm 떨어진 지점에서 측정하였으며 동일 위치에서 배출가스를 포집하여 측정하였다.

본 연구에서는 고압연소 시스템에서 희박영역에서 운전되는 가스터빈 연소기의 고온, 고압 조건에서 OH* 라디칼과 NO_x 배출 특성을 살펴보기

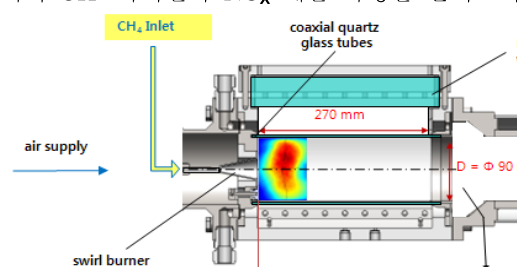


Fig. 1 Schematic of the high pressure combustion chamber.

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 화력 발전 에너지 분석 기술센터

*** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

† 연락처자, chjeon@pusan.ac.kr

TEL : (051) 510-3051, FAX : (051) 582-9818

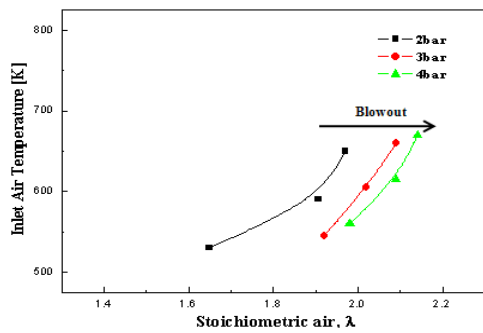


Fig. 2 Flammability limit as a function of λ for the inlet air temperature in elevated pressure and fuel-lean condition

살펴보기 위해 실험을 수행하였다.

OH* 라디칼 강도와 NO_x 배출특성의 경우 연소실내 압력, 공기비에 따른 NO_x 배출 영향을 살펴보았다.

희박영역 내에서 고온, 고압연소 조건의 가연한계를 살펴보기 위해서 화염의 형상을 통해 불안정성이 발생하는 지점을 화염한계로 정의하였다. 실험에서는 공기량 증가에 따른 화염의 소멸현상을 확인할 수 있었고, 이러한 영역을 초과하는 지점에서는 소멸현상이 일어나게 되므로, 모든 실험은 이러한 화염한계 구간 내에서 수행되었으며 Fig.2에 그 지점을 나타내었다. 전반적인 화염한계의 특성은 입구공기 온도와 연소실의 압력이 증가 할수록 희박영역으로 화염한계의 범위가 넓어지는 것으로 나타났다.

공기비와 압력에 따른 NO_x 배출특성을 살펴보기 위해 공기비는 1.4~2.1까지 범위에서 수행하였으며, 압력의 영향을 살펴보기 위해 연소실내의 압력을 2~10bar 까지 압력을 증가 시키면서 NO_x의 배출특성을 확인하였다. 압력과 공기비의 영향을 살펴보기 위해 연소공기는 650K으로 고정하여 수행하였다. Table 1에 실험 조건을 나타내었다.

Table 1 Experimental condition

Pressure(bar)	1	2	3	5	7	10
T _{air} [K]	650					
CH ₄ (SLPM)	16	32	48	80	112	160
AIR(SLPM)	273	548	832	1371	1919	2742
	~	~	~	~	~	~
λ	335	670	1005	1676	2346	3351
λ	1.8~2.2					

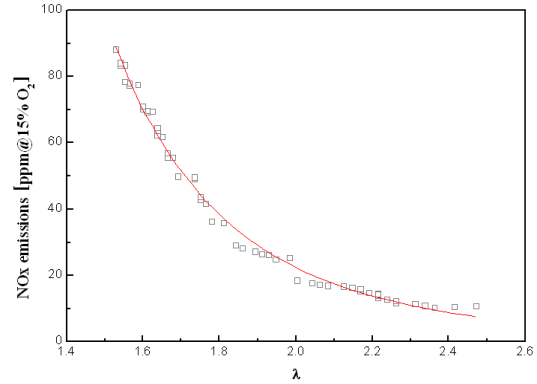


Fig. 3 NO_x concentration as a function of λ (P=2bar, T_{air}=650K)

Fig.3에 나타난 기본적인 NO_x의 배출 특성은, 공기비가 증가함에 따라 지수적인 감소를 보인다. 이는 공기량 증가에 기인한 결과로,^[1] 투입되는 공기량을 늘리게 되면 연료와의 혼합도가 증가하여 연소반응영역을 감소시키게 되는데, 이 때 Thermal NO_x 생성에 영향을 주는 고온영역에서의 체류시간이 감소하여 전체 NO_x 발생량이 감소하는 것으로 사료된다.^[2] 또한 화염면의 증가에 따른 prompt NO_x의 기여도가 분명히 있을 것으로 사료되지만, 화염온도와 thermal NO 발생과의 관계에서 온도의 증가에 따른 NO 발생 증가기울기가 선형증가가 아닌 지수 함수적 증가 경향을 고려하면 화염 내부에 존재하는 고온영역의 존재가 NO_x 발생에 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.^{[3],[4],[5]}

본 실험에서는 배기단에서 압력조절밸브를 이용하여 연소실 내부의 압력을 실험조건에 맞게 형성시켰으며, 압력에 따른 연료유량을 고정시킨 후, 공기유량을 조절하여 공기비를 변화시키고 NO_x 배출 농도를 측정하였다. 연소공기 온도는 650K로 동일하게 하였다.

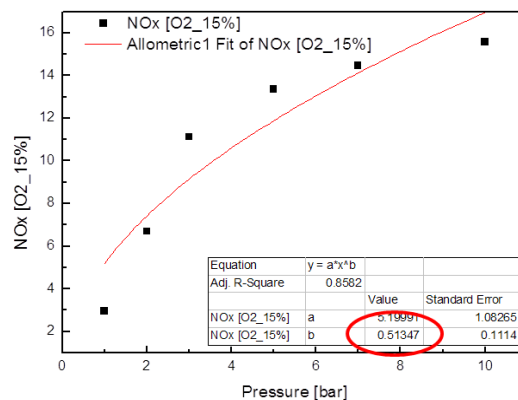


Fig. 4 NO_x concentration as a function of elevated pressure at T_{air} : 650K, λ : 2.1

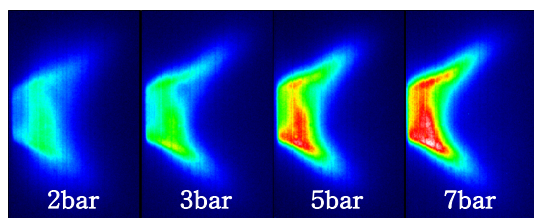


Fig. 5 OH* radical intensity image of elevated pressure at $T_{air} : 650K, \lambda : 2.0$

압력에 따른 NO_x 배출특성을 Fig.4에 2~10bar 범위에서 나타내었다. Fig.4에 나타난 전체적인 NO_x 배출 특성은 압력의 증가에 따라 지수적으로 증가하고 압력 증가에 따라 증가폭이 감소하는 경향을 나타내고 있으며 기존 연구에서 확인된 $NO_x \propto P^n$ 에 따르는 0.5~0.8 사이의 n의 값과 비슷한 0.51의 값이 도출되는 것을 확인 할 수 있다.^[6] 낮은 공기비에서 두드러지게 나타나는 압력증가에 따른 NO_x 발생량의 증가는 공기비 감소로 증가한 화염온도에 의해 증가된 NO_x 배출 수준과 압력에 제공근으로 의존하는 Thermal NO_x 메커니즘에 기인한 것으로 판단되며, 공기비가 증가할수록 압력과 NO_x 배출량의 관계가 점차 독립적으로 형성 되는 것을 확인 할 수 있다.^[7]

Fig.5에서는 압력의 증가에 따른 OH* 라디칼 사진을 나타내었다. 압력이 증가 할수록 OH* 라디칼 강도는 강해지는 것을 볼 수 있으며 이를 통해 단일 화염온도가 압력의 증가로 인해 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 압력이 증가할수록 연료와 공기의 혼합도가 증가하여 반응이 더 활발하게 일어나는 것으로 사료되며, 화염의 길이가 점점 짧아지는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

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

참고 문헌

- [1] 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
- [2] 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

[3] 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 KSME(B), Vol. 27, pp.215~226

[4] Lefebvre, A. H., 1983, Gas Turbine Combustion, McGraw-Hill, pp. 360~417

[5] Piotr Siewert., 2006, "Flame Front Characteristics of Turbulent Lean Premixed Methane / Air Flames at High-pressure," Ph.D Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich

[6] Sanjay M. Correa, "A Review of NO_x Formation Under Gas-Turbine Combustion Conditions", Combustion Science and Technology, Vol. 87, 1993, pp. 329 - 362

[7] Ayman, B., Ahmed, A., Ala'a H. A., Ahmad A. and D. Trimis., 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. 589~96