

## 하이브리드/이중 선회제트 연소기에서 공기 예열온도에 의한 배출 특성 연구

최인찬\* · 조준익\* · 이기만\*\*†

### A study of Overall Combustion Characteristics according to the Air Preheated Temperature in a Hybrid/Dual Swirl Jet Combustor

Inchan Choi\*, Junik Jo\* · Keeman Lee\*\*†

#### ABSTRACT

The laboratory experiments have been conducted to investigate the effects of air preheated temperature on the emission characteristics by a model gas turbine burner with a hybrid/dual swirl jet flames configuration. The concentration of NO<sub>x</sub> and CO emissions, and flue gas temperature at combustor exit were measured with varying the equivalence ratio for different air preheated temperatures of 300, 400, 500K at atmospheric pressure. It was overall shown that the NO<sub>x</sub> and CO emissions, and flue gas temperature were decreased according to the decreasing of equivalence ratio due to the effects of lean premixed combustion regardless of the air preheated temperature. Experimental results of a lean premixed flames configuration indicated that the NO<sub>x</sub> emission was increased with higher inlet air temperature and air flow rate, which is attributed to the increasing of flue gas temperature and heat release related to the thermal NO<sub>x</sub> mechanism. But the CO emission was shown the opposite tendency, that is, the CO emission was decreased with increasing of inlet air temperature and flow rate.

**Key Words** : Hybrid/dual swirl jet burner, Lean premixed combustion, Low emission combustion, Inlet preheated air, Inlet air flow rate

가스터빈 연소기는 지상용 발전설비와 더불어 항공의 추진기관으로 널리 사용되고 있다. 또한 세계 각국의 배기가스 대한 규제의 추세에 맞추어 가스터빈용 연소기에도 저 NO<sub>x</sub> 연소에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다. 가스터빈 엔진은 운전특성상 터빈에 의해 유입공기가 다단 압축으로 인한 고온·고압의 상태가 되므로 고온의 연소 공기에 대한 연구는 필수적으로 인식되고 있다.

가스터빈용 연소기를 개발함에 있어 희박예혼합 연소방식은 낮은 화염온도로 NO<sub>x</sub> 배출지수를 크게 저감시킬 수 있는 장점을 갖고 있지만, 본질적으로 연소실 내의 유동변화와 음향 가진에 매우 민감한 단점을 갖고 있다. 이러한 문제점을 개선하고 동시에 희박 예혼합 연소의 배출성능을 유지하기 위하여, 본 연

구에서는 예혼합 화염과 부분예혼합화염이 동시에 존재하는 하이브리드(hybrid) 연소개념을 적용하였다<sup>(1)</sup>. 내부의 부분 예혼합화염은 외부의 예혼합화염의 안정성을 개선시키는 보염의 역할을 수행하며, 동시에 연료부하의 분배 역할을 담당한다. 또한 기존의 확산화염방식에서 화염 안정성과 저 NO<sub>x</sub> 배출을 위해 적용된 이중 선회연소기의 개념을 채택하였다<sup>(2)</sup>. 이를 통해 내부의 연료/공기 혼합축진과 내부 및 외부 선회유동간의 상호작용을 통해 희박가연한계를 확장시키고 저 NO<sub>x</sub> 발생이 가능한 희박 예혼합 연소기를 개발하고자 한다.

고온의 연소공기의 특징은 자발화 온도 이상의 산화제 공급에 의한 안정되고 소음이 적은 화염의 형성이 가능하고, 연소효율 증진에 따른 연료 소비를 절감 효과를 얻을 수 있으며, 연소실 전체로 반응영역을 확장시킴으로써, 균일한 온도분포로 열전달 효율을 향상시켜 연소실의 부피를 감소시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고효율 및 저 배기가스 가스터

\* 순천대학교 우주항공공학전공

\*\* 순천대학교 기계우주항공공학부

† 연락처, [kmlee@sunchon.ac.kr](mailto:kmlee@sunchon.ac.kr)

TEL : (061)750-3828 FAX : (061)-750-3820

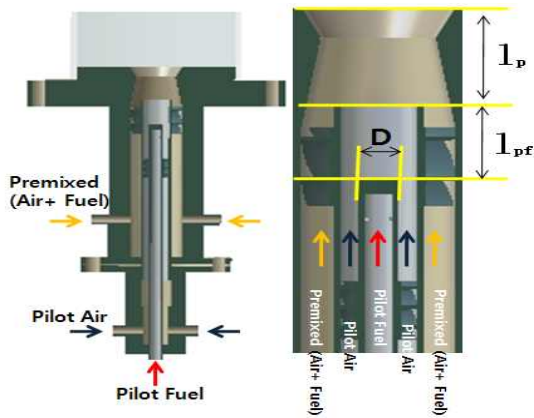


Fig. 1 Schematic of a hybrid/dual swirl jet combustor for a micro-gas turbine.

빈 연소기의 개발에 필요한 실험적인 연구를 진행하기 위하여 설계·제작한 연소기를 통해 당량비 변화에 따른 예열공기 온도가 화염의 형상 및 배기가스 배출성능에 미치는 특성을 파악하고자 한다.

본 실험에 사용된 마이크로 가스터빈용 연소기의 개략도와 연료 및 예열공기의 경로를 Fig.1에 표시하였다. 내부의 파일럿 화염은 6개의 연료 홀에서 분사되는 연료류(CH<sub>4</sub>)와 선회 공기류에 의한 부분 예혼합 화염의 특성을 갖게 되며, 외부의 메인 화염은 예혼합 화염의 특성을 갖는다. 파일럿 및 메인 버너에 각각의 선회기가 장착 되어 있으며, 이때 선회기의 각은 45°이다. 유입연소공기는 정격출력 8kW의 3상 예열장치를 사용하였고, ±5°C의 오차범위 내에서 K-type 열전대를 사용하여 유입되는 연소용 공기의 온도를 제어하였다.

또한 화염의 형상을 가시화하기 위하여 버너의 출구에 원통형 석영유리를 위치하였고, 석영 관 출구 부분의 중심부에서 연소 배기가

Table 1 Experimental conditions.(case. 1)

Burner	Equivalence ratio	Fuel ratio
Pilot Burner	0.7	0.3
Main Burner	0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0	0.7
Heat Power	3kW	
Air Temperature [K]	300, 400, 500, 600	

Table 2 Experimental conditions.(case. 2)

Air Temperature [K]	300, 400, 500
Fuel [l/min]	4 ~ 10
Air Flowrate [l/min]	63, 80, 100
Equi. ratio	0.45 ~ 0.95

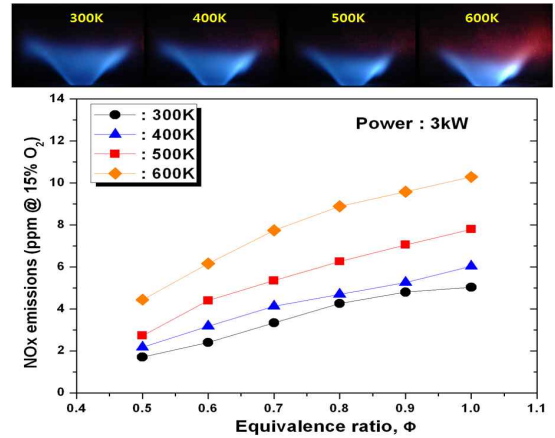


Fig. 2 Typical NOx emission as a function of  $\Phi$  for different air temperature at 3kW

스 분석기(Model: MGA5)를 설치하여 CO 및 NOx의 배출농도와 배기가스의 온도를 측정하였다. 파일럿 버너의 위치는 선 연구에서 최적의 연소 상태로 판단되는, 버너 출구와 연료노즐 상단의 축 방향 위치 차이( $l_p$ )가 일정 거리에 위치하도록 하였다. 또한 선행 연구를 통해 파일럿 버너의 공기관 끝과 연료노즐 상단의 축방향 위치차이( $l_{pf}$ )는 내부의 부분 예혼합화염과 외부 메인 버너인 예혼합화염의 상호작용으로 최적의 상태라 판단되는 지점에 위치시켰다.

본 연구에서 유입되는 연소용 공기의 온도 변화에 따른 연소 배출물 성능과 화염의 거시적인 특성은 Table 1, 2에 나타난 바와 같이 두 가지의 방법으로 당량비를 조절하는 방법으로 연구를 진행하였다.

먼저 연료 발열량 기준으로 3kW에 해당되는 연료량을 고정시킨 후 연소용 공기량을 변화시켜 운전 당량비를 조절하였으며, 이 경우 유입 공기 온도 변화에 따른 NOx의 배출값과 단열화되는 화염의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 측정 결과는 예열온도에 따른 전형적인 희박 예혼합 연소기의 NOx의 배출 형태를 보여주고 있는데, 전체적으로 당량비가 감소함에 따라 희박 예혼합 효과에 의한 화염장의 온도 저하로 인해 NOx 배출 값이 선형적으로 감소하고 있으며, 연소용 공기온도가 증가에 따라서는 반응대의 온도 상승으로 NOx 배출 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 각 당량비와 공기 온도에 따른 화염의 형상은 공기의 온도가 증가함에 따라 화염의 길이는 짧아지고, 그 강도는 점점 강해지는 것으로 나타났다. 이는 연소 공기의 온도가 증가함에 따라 연소 반응장이 활성화 되어 그 결과로 연소속도 증가로 인한 화염의 체적 감소로 판단이 된다.

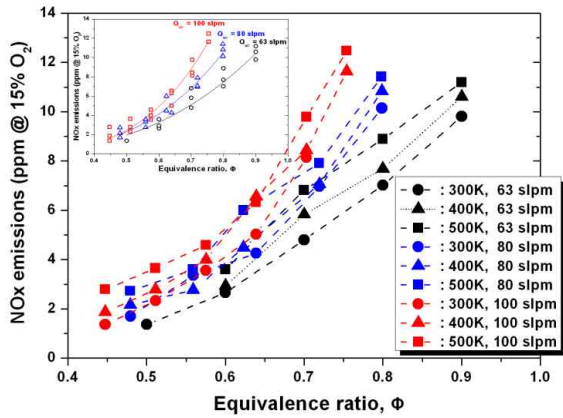


Fig. 3 NOx emission as a function of  $\Phi$  for different air preheating temperature

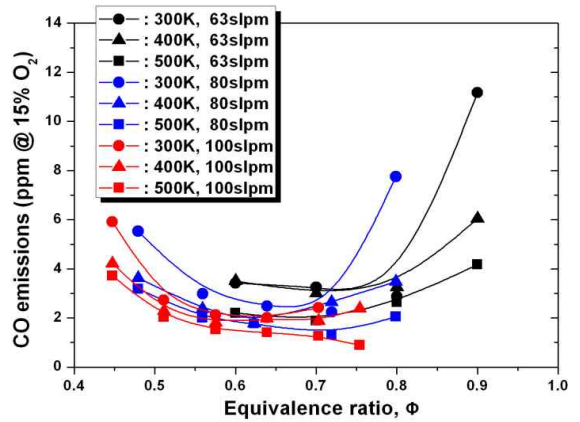


Fig. 5 CO emission as a function of  $\Phi$  for different air preheating temperature.

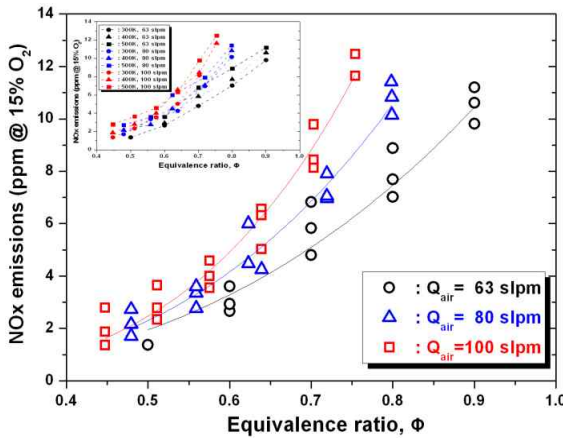


Fig. 4 Curve fitting of NOx emission as a function of  $\Phi$  for different air flow rates.

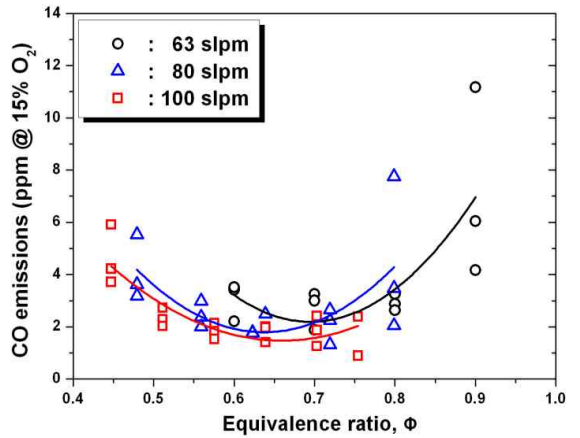


Fig. 6 Curve fitting of CO emission as a function of  $\Phi$  for different air flow rates.

두 번째 방법의 당량비 조절인 Case 2에서의 NOx 특성을 Fig. 3, 4에 나타내었다. 그림에서도 알 수 있듯이 당량비 감소에 따라 NOx의 발생량이 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이러한 경향은 온도에 지배적인 NOx 배출 특성으로 화염의 온도 저하로 인해 감소하는 것으로 판단된다. 아울러 연소용 공기의 온도가 증가함에 따라 Thermal NOx 생성에 영향을 주어 NOx의 발생량이 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 연소용 공기의 각 유량별로 발생 특성을 살펴보면, 동일한 당량비에서 공기 유량의 증가함에 따라 NOx의 발생량이 증가함을 알 수 있다. 이는 공기의 유량이 증가함에 따라 고온 영역에서 체류시간이 증가하게 되고 이로 인한 Thermal NOx의 증가로 인해 전체적으로 배출되는 NOx 지수가 증가하게 된 것으로 사료된다.

Fig. 5, 6은 당량비 변화와 예열 공기 온도에 따른 CO의 배출 특성을 보여주고 있다. 이

경우도 전체적으로 당량비가 저하됨에 따라 희박 예혼합연소 효과로 인해 CO의 배출도 감소하는 것을 볼 수 있는데, 당량비가 상대적으로 희박한 일정 당량비 이하에서는 낮은 화염의 온도와 화염 불안정으로 인해 다량의 CO가 발생하는 것으로 나타났다. 과농한 영역에서는 선회화염의 연료 과잉으로 역시 다량의 CO가 배출되고 있음을 볼 수 있어 당량비 0.6 ~ 0.8의 적정한 구간에서는 매우 양호한 배출 성능을 보이고 있어 저공해 가스터빈 연소기에 적합하도록 설계된 희박 예혼합 연소기의 적정한 운전 조건이 있음을 확인하였다.

또한 연소 공기의 온도가 상승함에 따라 CO의 발생량이 감소함을 알 수 있는데, 이는 희박 연소구간에서도 고온의 연소공기로 인해 상대적으로 높은 화염의 온도로 인한 CO의 발생량이 감소한 것으로 사료된다. 이 경우에서도 동일한 당량비 일 때 공기유량이 증가함에 따라 CO의 발생량이 감소하는 경향을 보이고

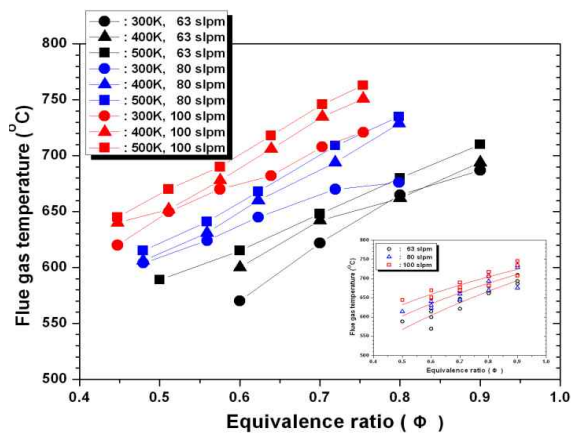


Fig. 7 Flue gas temperature as a function of  $\Phi$  for different air preheating temperature.

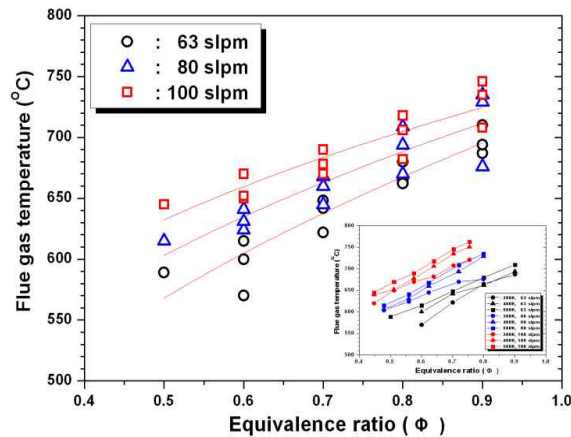


Fig. 8 Flue gas temperature as a function of  $\Phi$  for different air flow rates.

있는데, 이는 발열량 증가로 고온영역에서의 체류시간의 증가되어 CO 발생량이 감소하는 것으로 판단된다.

한편, 연소용 공기의 온도 증가에 따른 배기가스 배출온도 특성을 Fig. 7과 8에 나타내었는데, 그림에서 확인할 수 있듯이 배기가스 온도는 연소용 공기 온도가 상승함에 따라 비례적으로 증가하고 있음을 확인하였다. 여기서도 공기 유량 증가에 따른 배기가스의 온도 상승을 확인할 수 있는데, 이는 동일한 당량비의 기준에서 볼 때, 공기 유량이 적을 때에 비해 상대적으로 유량이 증가하게 되면 발열량의 증가를 야기하여 배기가스의 온도가 증가하게 되는 것으로 판단이 된다.

본 연구를 통하여 연소용 공기의 예열온도와 공기 유량의 증가로 인해 그 정도가 감소하는 경향을 나타냄을 확인하였으며, 저 공해 가스터빈 연소기의 배출 성능에 주요 기준이 되는 NO<sub>x</sub>와 CO의 배기 특성을 감안할 때 희박 예혼합 연소기로 설계된 가스터빈 엔진의

버너는 당량비 0.6 ~ 0.8의 운전범위가 최적인 조건이라 판단이 된다.

### 후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제입니다. (과제번호: 2011-2010-1000-10)

### 참고 문헌

- [1] C.H. Hwang, S. Lee, J.H. Kim, C.E. Lee, "An experimental study on flame stability and pollutant emission in a cyclone jet hybrid combustor", Applied Energy, Vol. 86, 2009, pp. 1154-1161.
- [2] T. Terashki, S. Hayashi, "The effects of fuel-air mixing on NO<sub>x</sub> formation in non-premixed swirl burners", Proc. Combust. Inst. Vol. 26, 1996, pp. 2733-2739.
- [3] Lim, A.H., Ahn, K.Y., Kim, H.S. and Kim, Y.m., "The Combustion Characteristics at Primary Zone of Lean Premixed low NO<sub>x</sub> Combustor," Conference of KSME, 2003, pp. 314-319.
- [4] M.R. Johnson, D. Littlejohn, W.A. Nazeer, K.O. Smith and R.K. Cheng, "A comparison of the flowfields and emissions of high-swirl injectors and low-swirl injectors for lean premixed gas turbines", Proc. Combust. Inst. Vol. 30, 2005, pp. 2867-2874.