

# 하이브리드/이중 선회제트 연소기에서 부분에혼합-예혼합 선회화염의 상호작용

조준익\* · 황철홍\*\* · 이기만\*\*\*†

## Interaction Between Partially Premixed and Premixed Swirl Flames in a Hybrid/Dual Swirl Jet Combustor

Joonik Jo\*, Cheol-Hong Hwang\*\*, Kee-Man Lee\*\*\*†

### ABSTRACT

The effects of interaction between partially premixed and premixed swirl flames on CO and NO<sub>x</sub> emissions were experimentally investigated using a hybrid/dual swirl jet combustor for a micro-gas turbine. Under the condition of constant angle (45°) for outer swirl vane, the angle and direction of inner swirl vane installed for a partially premixed flame were varied as main parameters with a constant fuel flow rate for each nozzle. It was found that for all conditions, CO and NO<sub>x</sub> emissions were measured below 4 ppm and 15 ppm at 15% O<sub>2</sub>, respectively, in a wide range of equivalence ratio (0.6~0.9). For co-swirl flows, CO emission increased dramatically as the angle of inner swirl vane increased from 15° to 45° near lean-flammability limit (i.e. equivalence ratio of 0.5). On the other hand, the case of swirl angle=45° provided the lowest NO<sub>x</sub> emission at higher equivalence ratios than 0.6. For counter-swirl flows, the case of swirl angle=45° extended the lean-flammability limit but higher NO<sub>x</sub> emissions were found compared to those of co-swirl flows. These results could be inferred by interaction between (inner) partially premixed and (outer) premixed swirl flames. However, these estimations were not clear yet because there was insufficient data on turbulent flow structure and fuel-air mixing in the present experimental approach.

**Key Words** : Hybrid/dual swirl jet combustor, Low-NO<sub>x</sub> combustor, Micro-gas turbine

선회유동을 이용한 희박예혼합연소는 저 NO<sub>x</sub>의 장점을 갖고 있지만, 선회 유동에 의해 야기되는 유동 불안정성과 열-음향 불안정성으로 연소기의 최적화된 형상 및 조건도출에 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 희박예혼합연소가 갖는 저 NO<sub>x</sub>의 장점을 유지하면서 화염 및 연소 불안정성을 부분적으로 개선시키기 위하여, 내부의 부분에혼합 선회화염과 외부의 예혼합 선회화염을 이용한 하이브리드(hybrid) 연소개념을 적용하였다[1]. 내부의 부분에혼합화염과 외부의 예혼합화염의 상호작용은 화염안정성뿐만 아니라 CO 및 NO<sub>x</sub>의 배출성능에 큰 영향을 미치게 된다[2]. 이에 본 연구에서는 외부 선회각이 고정된 조건에서 내부 선회각 및 선회방향을 변화시켜

연소기의 최적화를 위한 기초실험을 수행하였다.

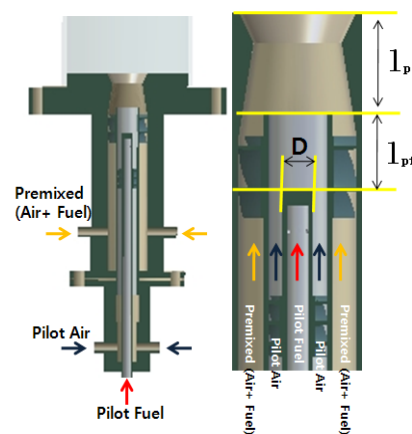


Fig. 1 Schematic of a hybrid/dual swirl jet combustor for a micro-gas turbine.

\* 순천대학교 우주항공공학과 대학원

\*\* 대전대학교 소방방재학과

\*\*\* 순천대학교 기계우주항공공학부

† 연락처자, [kmllee@sunchon.ac.kr](mailto:kmllee@sunchon.ac.kr)

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

Fig. 1은 하이브리드/이중 선회제트 연소기의 개략도를 도시한 것이다. 내부의 pilot 화염은 6개의 연료홀에서 분사되는 연료류( $\text{CH}_4$ )와 선회 공기류에 의한 부분예혼합화염의 특성을 갖는다. 이때 연료량은  $0.648\text{L}/\text{min}$ 이며 총괄 당량비는 0.7로 고정되었다. 외부관에는 당량비에 따른 연료/공기 혼합기가 공급되었으며, 연료량은  $1.512\text{L}/\text{min}$ 으로 고정되었다. 선행실험을 통해 연료노즐을 포함한 pilot 버너의 위치를 나타내는  $l_p$ 와  $l_{pf}$ 는 각각 3D와 2D로 고정되었다(이때 D는 연료노즐의 외경을 의미한다). 내부의 선회 부분예혼합화염과 외부의 선회 예혼합화염의 상호작용을 변화시키기 위하여, 외부의 선회각은  $45^\circ$ 로 고정된 조건에서 내부의 선회각 및 방향이 변화되었다. 정방향 및 역방향에 대하여 선회각은  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 로 총 6가지의 형상조건이 고려되었다. 외부의 선회 예혼합화염을 위한 당량비는 0.5~0.9의 범위가 고려되었다.

내부 pilot 화염의 독립적인 연소특성을 검토하기 위하여, 외부 노즐에 연료/공기 혼합기를 공급하지 않은 상태에서 실험을 수행하였다. 총괄 당량비 0.7의 조건에서 화염은 연료 분사홀 근처에서 확산화염이 생성되지 않고, 부분예혼합을 통해 버너 출구의 상류영역에서 생성되었다. 또한 CO 배출량은  $300\sim 400\text{ppm}$ 의 높은 값을 나타낸다. 수치해석을 통해 확인되었듯이 적용된 pilot 버너는 연료/공기의 혼합도가 매우 낮아서 최종 생성된 화염은 국부적으로 과농/희박 조건이 존재하는 부분예혼합화염의 특성을 갖는다.

Fig. 2는 외부 선회각이  $45^\circ$ 로 고정된 상태에서, 내부의 선회각 및 선회방향을 변화시켰을 때 당량비에 따른 CO 및 NOx 배출값을 도시한 결과이다. 먼저 CO의 결과를 살펴보면, 당량비 0.6

~0.9의 범위에서는 모든 조건에 대해  $4\text{ppm}$  이하로 낮은 배출값을 갖는다. 그러나 희박가연한 계 근처인 당량비 0.5의 조건에서 선회방향 및 선회각에 따라 매우 큰 차이를 보이게 된다. 즉, 정방향 선회류에서 선회각이  $15^\circ$ 에서  $45^\circ$ 로 증가함에 따라 CO는 약  $75\text{ppm}$ 에서  $200\text{ppm}$ 으로 급격하게 증가하게 된다. 외부 예혼합화염의 당량비가 매우 희박한 조건에서 높은 CO의 발생원인은 내부의 pilot 화염이 갖는 보염의 역할이 크게 감소되었음을 의미한다. 결과적으로 정방향 선회류에서 선회각의 증가는 내부 화염의 안정성을 오히려 감소시키는 것으로 해석될 수 있다. 역방향 선회류의 조건에서는 선회각  $15^\circ$ 와  $30^\circ$ 에서 화염은 blowout 되는 반면에,  $45^\circ$ 의 조건에서는 정방향 선회류의  $15^\circ$ 와 유사한 CO 배출값을 보이고 있다. 위 결과로부터 정방향 선회류에서 선회각 감소에 의한 CO 저감효과는 역방향 선회류에서는 반대로 작용되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2에서 NOx의 발생경향을 살펴보면, 모든 조건에서 최대  $15\text{ppm}$  이하로 발생되며, 정방향 선회류에서 선회각의 증가는 최저의 NOx(당량비 0.6~0.8에서 약  $1\text{ppm}$ )를 발생시킨다. 그러나 역방향 선회류에서는 선회각  $30^\circ$ 의 조건에서 가장 높은 NOx 배출값이 보이는 불연속 경향을 보이고 있다. 화염형상에서 확인되듯이, 역방향 선회류의 선회각  $30^\circ$ 의 조건에서는 내부 화염이 가장 밝게 존재하며, 이는 상대적으로 과농한 부분에 혼합화염에 의한 높은 화염온도로 NOx 발생량이 증가되었음을 짐작할 수 있다. 본 실험결과를 통해 내부 및 외부의 선회화염간의 상호작용이 화염안정성 및 배출성능에 미치는 영향을 상세히 규명하는 것은 많은 어려움이 있다. 향후 수치해석을 통해 보다 상세한 유동구조 및 혼합특성을 검토할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제입니다 (과제번호: 2011T100200099).

## 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] V.K. Akhmetov, V. Ya. Shkadov, "Interaction between a jet and an annular swirling stream", Fluid Dynamics, Vol. 30, No. 2, 1995, pp. 188-194.

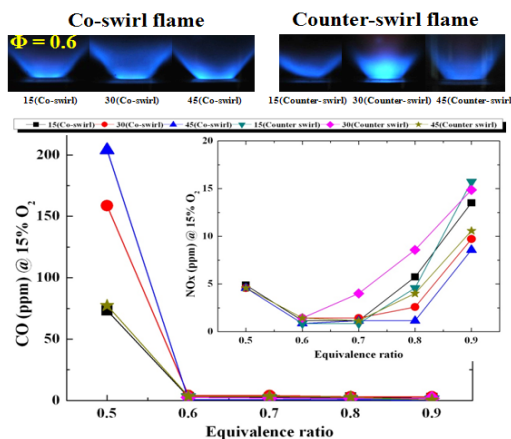


Fig. 2 CO and NOx emissions as a function of equivalence ratio for different angles and directions of swirl vane.