

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.5.060>

마이크로 가스터빈용 하이브리드/이중 선회제트 연소기 개발 (Part I: 형상 최적화를 위한 실험연구)

박태준^a · 황철홍^b · 이기만^{a,*}

Development of Hybrid/Dual Jet Combustor for a MGT (Part I: Experimental Study on Geometric Optimization)

Tae-Joon Park^a · Cheol-Hong Hwang^b · Kee-Man Lee^{a,*}^a*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University, Korea*^b*Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University, Korea***Corresponding author. E-mail: kmlee@scnu.ac.kr*

ABSTRACT

An optimum configuration of the hybrid/dual swirl jet combustor for a micro-gas turbine was investigated experimentally. Location of pilot nozzle, angle and direction of swirler vane were varied systematically as main parameters under the conditions of constant thermal load. The results showed that the variation in locations of inner fuel nozzle and pilot burner resulted in significant change in flame shape and swirl intensity due to the changes in recirculating flow pattern and minimum flow area near burner exit, in particular, with the significant reduction of CO emission near lean-flammability limit. In addition, it was observed that the co-swirl configuration produced less CO and NO_x emissions compared to the counter-swirl configuration.

초 록

마이크로 가스터빈용 하이브리드/이중 선회 제트 연소기의 형상 최적화에 대한 실험연구가 수행되었다. 고정된 열부하에서 pilot 버너의 위치 및 선회기 배인의 방향이 주요 변수로 검토되었다. 주요 결과로서, pilot 버너 및 연료 노즐의 위치변화는 버너 출구 근처의 최소 유동면적 및 재순환 유동패턴의 변화를 발생시키며, 이로 인하여 선회강도 및 화염형상이 큰 영향을 받게 된다. 선회기 배인 각도의 증가(30°에서 45°)는 희박가연한계 근처에서 CO 배출량을 크게 저감시킨다. 추가로 정방향 선회형상이 역방향 선회형상에 비해 보다 낮은 CO 및 NO_x 배출량을 갖게 됨을 확인하였다.

Key Words: Micro-gas Turbine(마이크로 가스터빈), Hybrid/Dual Swirl Jet Combustor(하이브리드 이중 선회제트 연소기), Lean-premixed Combustion(희박 예혼합연소)

여 마이크로 가스터빈(MGT)에는 예혼합 연소방식의 적용이 증가되고 있다. 특히 연료가 희박한 혼합기의 가연(flammability) 범위에서 화염온도의 감소로 Thermal NOx의 생성을 억제하여 낮은 NOx 배출지수를 얻고 있다[1]. 또한 연소기 입구에서 강한 선회유동에 의한 연료/공기의 혼합촉진과 더불어 높은 화염신장(flame stretch)을 통해 고온 영역의 체류시간을 감소시켜 보다 낮은 NOx 생성조건을 구현할 수 있다고 알려져 있다[2]. 그러나 난류 예혼합화염은 혼합기의 조성과 난류강도에 의해 결정되는 난류 연소속도에 의해 지배되기 때문에 희박 가연한계 근처에서 역화, 화염날림의 발생 그리고 연소실 내의 유동변화 및 음향 가진에 민감한 특성을 보인다. 그 결과 화염은 매우 불규칙한 거동을 보일 수 있으며, 부적절한 설계 및 운전으로 인하여 연소기 내부의 소음, 과도한 압력과 및 열전달을 발생시켜 성능저하 및 연소기의 파손을 일으키는 연소불안정성을 초래할 수 있다[3,4].

희박 예혼합화염에서 발생하는 연소불안정성은 크게 당량비 변동, 열발생을 변동, 압력 변동의 상호작용을 통한 feedback 현상에 의해 발생된다는 열음향 불안정성과 화염-와동 상호작용에 의한 유체역학적 불안정성으로 분류될 수 있다. 이러한 연소불안정성을 제어하는 방법으로 크게 추가 연료의 분사로 압력과 열발생율의 진동 위상차를 변화시키는 능동적 방법과 연소기의 형상 및 보조기구를 이용한 수동적 방법으로 구분된다^[4]. 수동적 방법으로 분류될 수 있는 추가적인 방법으로서, Ishizuka 등[5-6]은 긴 튜브 벽면의 접선방향으로 전개되는 tubular 예혼합화염을 통해 연소기 내부의 압력 및 열발생의 분포를 변화시킴으로써 연소불안정성을 감소시킬 수 있음을 보고하였다. 그러나 이 방법은 높은 부하량에서 연소기 내부의 낮은 체류시간으로 불완전 연소생성물이 다량 발생된다는 문제점을 갖고 있다.

희박 예혼합화염이 갖는 화염불안정 및 연소불안정성을 동시에 감소시키기 위한 다른 접근법으로는 예혼합/비예혼합 또는 예혼합/부분예혼합화염 모드를 동시에 생성시켜 비예혼합 (또

는 부분예혼합화염)과 예혼합화염의 상호작용으로 화염안정성을 크게 개선시키고, 연료 부하의 분할을 통해 예혼합화염의 부하 비중을 감소시킴으로써 연소불안정성을 부분적으로 저감시키는 방법이다. 이러한 하이브리드(hybrid) 개념의 연소방식을 통해 선행 연구자들은 NOx 및 CO의 발생이 크게 감소되며, 동시에 저열량의 연료까지 안정하게 연소시킬 수 있음을 확인한 바 있다[7-8].

이러한 배경 하에 본 연구에서는 높은 화염안정성과 저 NOx의 구현이 가능한 하이브리드/이중 선회제트 연소기를 고안하였다. 내부의 부분예혼합화염은 외부의 예혼합화염을 안정시키는 pilot 화염과 같은 역할을 수행하며, 동시에 연료 부하의 분배역할을 담당하게 된다. 연소기의 최적화를 위한 초기단계로서 본 연구에서는 연소기 내부의 pilot 버너 형상 및 위치변화에 따른 화염형상 및 배기성능을 통해 연소기 형상 최적화를 시도하였다. 또한 선회기 베인(vane)의 각도 및 선회방향의 변화가 화염안정성 및 배기성능에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험방법 및 조건

Fig. 1은 본 연구에서 고안된 하이브리드/이중 선회제트 연소기의 개략도 및 사진을 나타낸 것이다. 내부 pilot 버너에서 생성되는 선회화염은 직경 1 mm를 갖는 6개의 홀(hole)을 통해 분사되는 연료(CH₄)와 선회 공기류의 혼합정도에 따라 비예혼합화염에서 부분예혼합화염의 특성을 갖게 된다. Pilot 버너의 주요 기능인 화염안정성 및 배기성능을 확인하기 위하여, 외부관에 연료/공기 혼합기를 공급하지 않은 조건에서 선행 실험을 수행하였다. 주요 변수로 적용된 총괄당량비는 완전연소를 위한 연료/공기의 질량비에 대한 실제 공급된 연료/공기의 질량비로 정의되었다. 총괄당량비가 1.0에서 0.7로 감소됨에 따라 연료 분사 홀 근처에서 생성된 비예혼합화염은 노즐 출구에서의 안정된 부분예혼합화염으로 변화됨을 확인하였다. 또한 이때 CO 및 NOx가 점

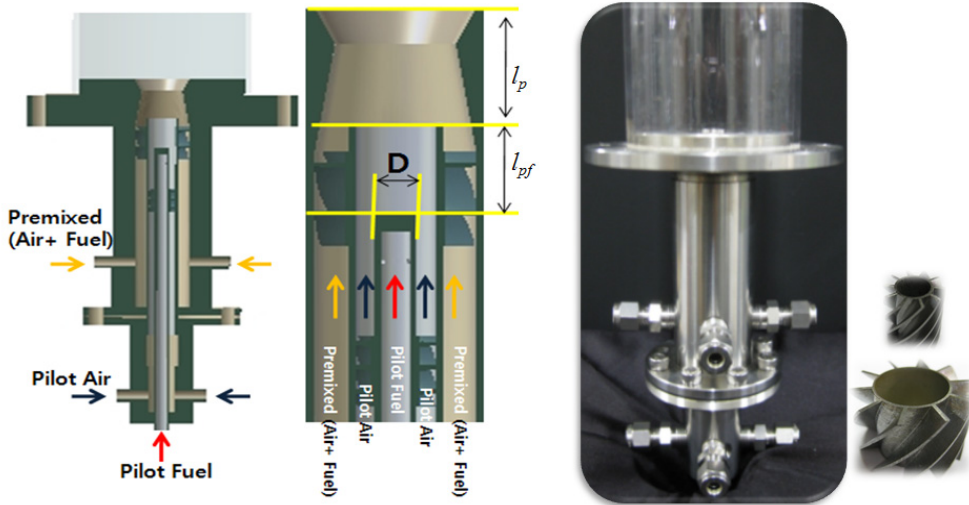


Fig. 1 Schematic and photographs of a hybrid/dual swirl jet combustor for the micro-gas turbine.

차적으로 감소되었으며, 결과적으로 pilot 버너의 최종 총괄당량비는 0.7로 고정하였다. 이중 선회연소기의 화염안정성 및 배기성능은 내부 및 외부 화염의 연료 부하에 대한 분배비에 의해 상당한 차이를 보일 수 있다. 본 연구에서는 선회 실험을 통해 내부 및 외부의 열부하가 3:7이 되도록 설정하였으며, 이에 대한 보다 구체적인 결과는 향후 보고될 예정이다. 적용된 연료/공기량으로서, pilot 버너에는 7.04×10^{-6} kg/s의 연료와 총괄당량비 0.7에 해당되는 공기가 공급되었다. 외부의 선회화염은 고정된 연료량 1.64×10^{-5} kg/s를 기준으로 당량비에 따른 공기량이 미리 혼합된 가스가 공급되었다.

연료 분사노즐 및 주위 선회 공기노즐로 구성된 pilot 버너의 위치 및 형상변화는 연소기 내부의 재순환 유동패턴, 화염형상, 연료/공기 혼합특성 및 외부 예혼합화염과의 상호작용을 통해 화염안정성 및 배기성능에 큰 영향을 줄 수 있는 가장 중요한 설계인자라 할 수 있다. 첫째, pilot 버너의 위치변화에 따른 연소특성을 체계적으로 검토하기 위하여 Fig. 1에서와 같이 버너 최종 출구와 pilot 버너의 선회공기 출구간의 축방향 위치 차이인 l_p 를 변화시켰다. 즉, pilot 버너의 연료 분사노즐의 외경(D)을 기준으로 l_p 는 3D(case 1), 1D(case 2), 0D(case 3)로 변화되었

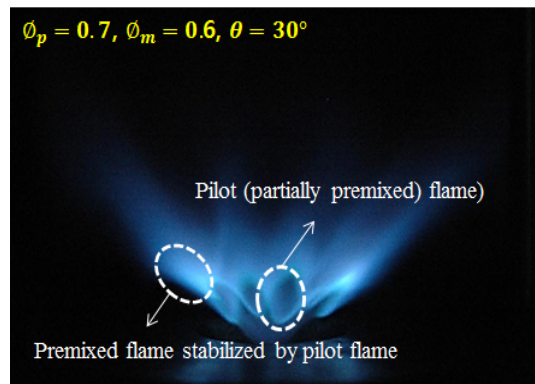


Fig. 2 Photograph of the typical flame shape inside the hybrid/dual swirl jet combustor.

다. 둘째, pilot 버너의 형상변화에 따른 연소특성을 검토하기 위하여, 공기 선회노즐의 출구에서 내부 연료 분사노즐 끝단의 상대적 축방향 위치 차이인 l_{pf} 가 단계적으로 변화되었다. 총 5단계로 변화된 l_{pf} 는 -2D, -1D, 0D, 1D, 2D로 설정되었으며, pilot 버너의 위치변화를 나타내는 각 case의 -1~5까지 순차적으로 표기되었다.

선회각의 변화에 따른 연소특성을 검토하기 위하여 Fig. 1의 사진에서와 같이 선회기 베인의 각도가 각각 30° 와 45° 의 두 가지 형상이 고려되었다. 또한 내부 및 외부의 선회기의 방향을 변화시켜 정방향 선회(co-swirl)과 역방향 선회

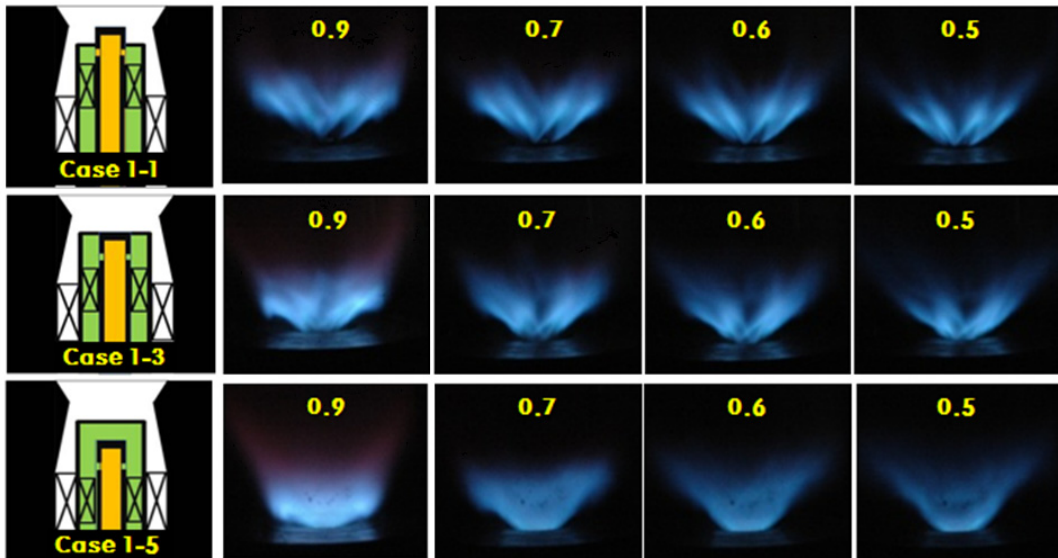


Fig. 3 Photographs of flame shape with the change in configuration of pilot burner under $\theta = 30^\circ$ and co-swirl conditions for the case 1 (equivalence ratios of external premixed nozzle were inserted in the photos).

(counter-swirl) 형상에 따른 배기특성이 검토되었다.

연료 및 공기 유량은 버블 유량계로 보정된 질량유량계(MFC)에 의해 제어되었다. 밀폐된 연소실 및 화염 가시화를 위하여 0.74 m 직경의 석영관이 설치되었다. CO 및 NOx의 농도는 다기능 가스분석기(MRU 5 analyzer)를 통해 측정되었으며, 측정 probe는 측방향 및 반경방향으로 농도변화가 발생되지 않은 충분한 하류에 설치되었다. 배기가스 측정은 동일 조건에 대하여 3회 측정되었으며 평균값을 제시하였다. 본 논문에서 언급된 CO 및 NOx의 농도는 건기준(dry-basis) O₂ 15%의 조건으로 환산한 값이며, NOx는 NO와 NO₂를 합한 값이다.

3. 결과 및 고찰

하이브리드/이중 선회제트 연소기의 화염형상을 검토하기 위하여 Fig. 2는 case 1-1의 조건에 대한 화염사진을 나타낸 것이다. 그림에 삽입된 ϕ_p 는 pilot 버너의 총괄당량비, ϕ_m 은 외부 메인

예혼합화염의 당량비, θ 는 선회기 베인의 각도를 의미한다. 이때 내부 및 외부의 선회방향은 같도록(정방향) 설정되었다. 위 사진에서 화염은 크게 내부와 외부의 이중 구조로 이루어졌음을 명확하게 확인할 수 있다. 내부 화염은 6개의 연료 홀과 주위의 공기 선회류에 의해 발생하는 부분 예혼합화염이며, 버너 출구 근처에서 안정화되어 있다. 외부 화염은 예혼합화염으로서 독립적으로 버너 출구에 안정화되지 못하고 내부의 부분에 혼합화염에 의해 안정화되어 있음을 볼 수 있다. 즉 내부의 부분예혼합화염은 70%의 열부하를 담당하는 외부의 예혼합화염의 안정화를 유지시키는 역할을 수행하고 있다. 또한 6개의 연료 홀의 존재로 인하여 원주방향으로 연료의 과농-희박 조건이 반복적으로 발생되고 있다. 위 결과를 통해 내부 pilot 버너의 연료/공기의 혼합도가 상당히 낮은 것으로 판단되며, 희박 가연한계 근처에서 높은 CO 배출량의 주요 원인이 될 수 있다. Pilot 버너의 위치 및 형상의 체계적인 변화를 통해 이러한 문제점은 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3은 l_p 가 3D로 고정된 case 1에 대하여

내부 및 외부 선회기가 정방향, 배인 각도 30° 의 조건에서 pilot 버너의 형상변화(즉, 내부 연료 노즐의 위치변화)에 따른 화염사진을 나타낸 것이다. 총 연료량 및 내부 pilot 버너의 총괄당량비($\phi_p=0.7$)는 고정되었으며, 외부 예혼합화염의 당량비(ϕ_m)가 주요 변수로 사용되었다. 먼저 l_{pf} 가 $-2D$ 로서 연료 분사 노즐이 공기 선회노즐 출구보다 높은 위치에 존재하는 case 1-1의 조건을 살펴보면, Fig. 2에서 설명되었듯이 pilot 버너 내부의 연료/공기의 혼합도가 낮아 원주 방향의 과농-희박 부분 예혼합화염이 존재함을 확인할 수 있다. 당량비(ϕ_m)가 감소됨에 따라 화염의 길이 및 폭은 점차적으로 감소되는 경향을 보이고 있다. Case 1-3의 당량비 0.9의 화염형을 살펴보면, case 1-1과 비교할 때 pilot 화염에 의해 안정되는 외부의 예혼합화염이 버너 출구 윗부분에서 부착되어 안정화되었음을 볼 수 있다. 그러나 당량비가 희박가연한계 근처인 0.5로 감소함에 따라 pilot 화염에 의한 형상이 지배적으로 발생되며, 이는 외부 예혼합화염의 불안전연소로 인한 CO 발생량 증가를 유발시킬 것으로 판단된다. Case 1-5는 pilot 버너 출구를 기준으로 연료노즐이 $2D$ 만큼 상류에 위치하여 연료/공기의 혼합도가 가장 높은 조건에 해당된다. 그 결과 pilot 버너 출구의 높은 반응속도로 인하여 외부의 예혼합화염과의 상호작용이 촉진되어 최종 버너 출구 근처에서 두가지 화염이 결합되는 형상을 보이고 있다. Case 1-1 및 1-3의 조건과는 다르게 원주방향의 일정한 화염형을 보이고 있으며, V자형의 전형적인 선회화염을 보여주고 있다. 추가적으로 정량적인 연소소음이 측정되지 않았으나, 시간 및 공간에 대하여 균일한 당량비의 분포로 인하여 case 1-5의 조건에서 연소소음이 가장 낮음을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건에서 측정된 CO 및 NOx 배기 농도를 도시한 결과이다. 먼저 CO 형상 농도를 살펴보면, case 1의 모든 형상은 당량비 $0.7 < \phi_m < 1.0$ 의 조건에서 pilot 버너의 변화에 상관없이 5 ppm 이하의 낮은 농도를 보이고 있다. 그러나 당량비 0.6의 조건에서 case 1-1은

하여 약 40 ppm의 높은 CO를 배출하고 있다. 희박가연한계 근처인 당량비 0.5의 조건에서는 모든 형상에서 급격한 CO 증가가 발생되며, case 1-5의 경우 약 50 ppm으로 가장 낮은 CO 배출량을 보이고 있다. Fig. 4(b)의 NOx 농도를 살펴보면, CO의 경향과는 반대로 당량비 증가에 따라 NOx 발생량이 증가되고 있다. 특히 case 1-5의 조건은 $0.6 < \phi_m < 0.7$ 의 조건에서 가장 낮은 배출값을 갖지만, $\phi_m > 0.7$ 의 조건에서는 가장 높은 NOx 농도를 보이고 있다. 이는 pilot 버너의 연료/공기 혼합도가 가장 높고 외부 예혼합화염과의 상호작용(결합도)이 가장 우수하기 때문에 화염면 근처의 높은 온도로 인하여 발생된 결과라 판단된다. 일반적으로 가스터빈에서 희박예혼합연소가 당량비 0.6 ~ 0.7의 범위에서 운전됨을 고려할 때 case 1-5의 연소기의 형상이 배기성능 측면에서 가장 효과적임을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 l_p 가 $1D$ 로 고정된 case 2에 대하여 내부 및 외부 선회기가 정방향 및 배인 각도 30°

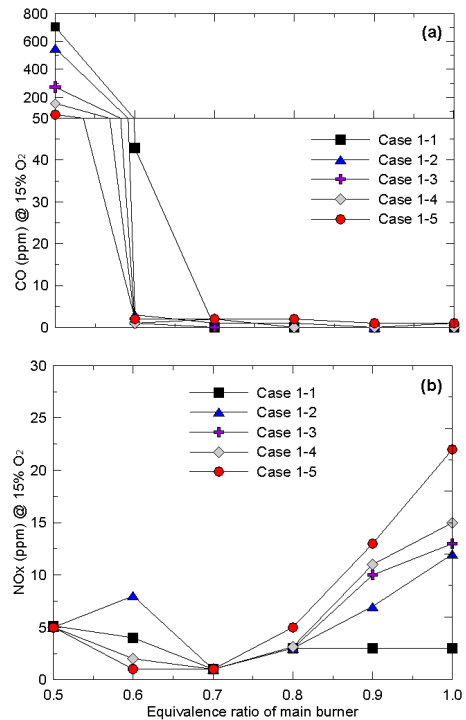


Fig. 4 Concentrations of (a) CO and (b) NOx as a function of equivalence ratio for the case.

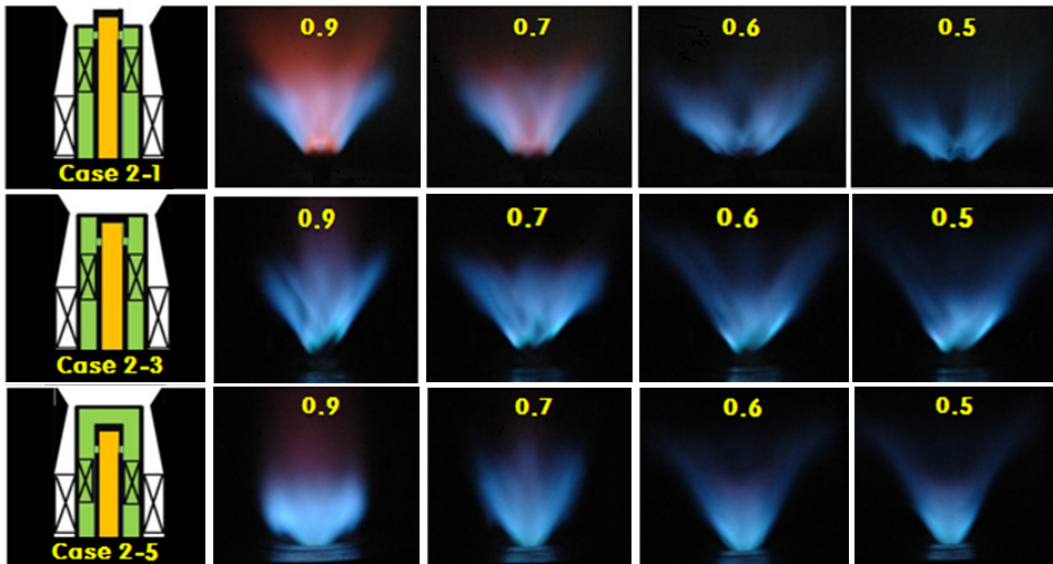


Fig. 5 Photographs of flame shape with the change in configuration of pilot burner under $\theta = 30^\circ$ and co-swirl conditions for the case 2.

의 조건에서 pilot 버너의 형상변화(즉, 내부 연료 노즐의 위치변화)에 따른 화염사진을 나타낸 것이다. Pilot 버너의 위치변화는 버너 출구 근처에서 외부 예혼합기의 최소 유동 단면적의 변화를 동반하게 된다. 즉, case 2의 조건($A = 100.5 \text{ mm}^2$)은 case 1(192.4 mm^2)에 비해 감소된 최소 유동면적을 갖게 됨을 Fig. 3의 왼쪽에 삽입된 연소기 개략도 비교를 통해 확인할 수 있다. 그 결과 동일한 배인 각도가 적용되더라도 버너 출구 근처에서 축방향 유속 증가로 화염면 근처의 선회강도 및 중앙재순환영역(center toroidal recirculation zone)이 크게 감소될 수 있음을 예측할 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 5의 화염사진을 통해 명확하게 확인할 수 있다. Case 2-1의 당량비 0.9 및 0.7에서 낮은 선회도로 선회화염의 발산각(V형상의 벌림 각)은 case 1-1의 동일 조건에 비해 크게 감소되었으며, 상대적으로 연료 분사노즐이 버너 출구에 근접함에 따라 충분한 연료/공기의 혼합이 이루어지지 않아 다량의 soot이 발생하는 비예혼합화염의 강한 특성을 보이고 있다. 또한 case 2-3의 경우 버너 출구에서 부분적인 화염 부상이 발생되며 비대칭 화염구조를 보이고 있다. Pilot 버너의 형상변화를 통해

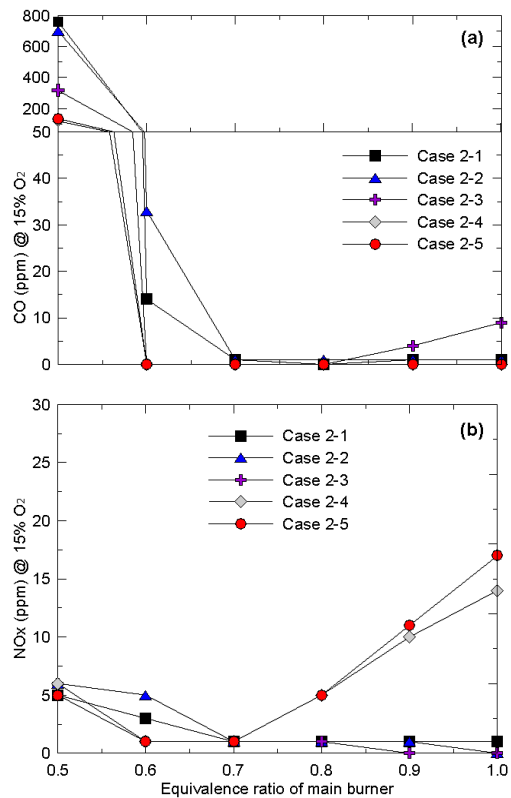


Fig. 6 Concentrations of (a) CO and (b) NOx as a function of equivalence ratio for the case 2.

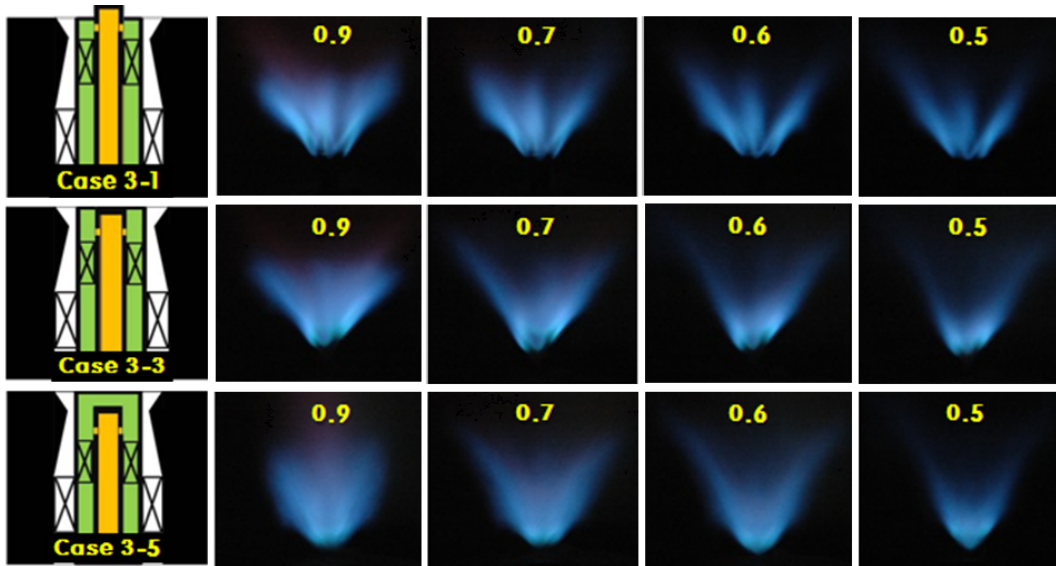


Fig. 7 Photographs of flame shape with the change in configuration of pilot burner under $\theta = 30^\circ$ and co-swirl conditions for the case 3.

연료 분사노즐의 위치가 상류로 이동함에 따라 (case 2-1 \rightarrow case 2-5) 화염면은 원주방향으로 보다 균일한 분포를 갖게 됨을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5과 동일한 조건에서 측정된 CO 및 NO_x 배기 농도를 도시한 결과이다. Case 1의 결과와 비교할 때 화염형상의 뚜렷한 변화에 비해 배기성능에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 case 2-1과 case 2-2는 당량비 0.6의 조건에서 급격한 CO 증가 경향을 보이고 있다. 이는 위에서 언급되었듯이 버너 출구 예혼합화염의 유효 유동면적의 감소로 인한 선회도 및 재순환 유동구조의 변화로 인하여 case 1에 비해 전반적으로 낮은 연료/공기 혼합이 발생되기 때문으로 사료된다. Fig. 6(b)의 NO_x 결과를 살펴보면, case 1의 결과와 큰 차이를 보이지 않지만, CO와는 반대로 정량적으로 낮은 수치의 NO_x가 발생되었음을 볼 수 있다. 특히 case 2-5의 경우 $\phi = 1.0$ 의 조건에서 최대 20 ppm의 낮은 수치를 보이고 있으며, 연료/공기 혼합도가 크게 감소되는 case 2-1 ~ case 2-3은 높은 당량비의 조건에서도 낮은 수치의 NO_x 값을 제공하고 있다.

Fig. 7은 l_p 가 0D로 고정된 case 3에 대하여

정방향 선회 및 배인 각도 30°의 조건에서 pilot 버너의 형상변화에 따른 화염사진을 나타낸 것이다. Case 3의 최소 유동면적은 case 2와 동일하지만, 버너 출구의 발산 기울기를 갖는 형상을 통해 실제 보다 큰 선회효과가 적용될 수 있다. 그 결과 전반적인 화염형상은 case 1과 case 2의 중간단계의 화염폭 및 비대칭 구조를 보이고 있다. Case 3-1에서 case 3-5로 변화되는 Pilot 버너의 형상변화가 화염형상에 미치는 영향은 다른 case에서와 정성적으로 동일한 경향을 보이고 있다. 그러나 pilot 버너 내부의 연료 분사노즐이 가장 하류에 위치한 조건으로 분류될 수 있으며, 이는 CO의 발생량에 큰 영향을 미칠 것으로 예측된다.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 조건에서 측정된 CO 및 NO_x 배기 농도를 도시한 결과이다. 위에서 언급된 바와 같이 case 3는 다른 pilot 버너의 위치조건에 비해 많은 양의 CO가 발생되고 있으며, 낮은 연료/공기의 혼합으로 인하여 당량비 0.7에서 급격한 증가경향을 보이고 있다. Fig. 8(b)의 NO_x는 CO와는 반대로 모든 형상 및 당량비에 대하여 5 ppm 근처의 낮은 농도가 발생됨을 확인할 수 있다.

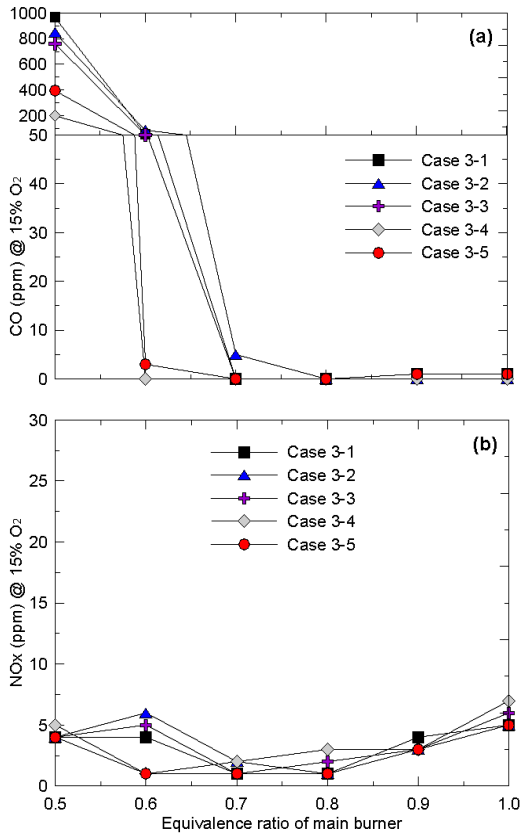


Fig. 8 Concentrations of (a) CO and (b) NOx as a function of equivalence ratio for the case 3.

위 결과로부터 pilot 버너의 위치변화는 외부 선회 예혼합기의 최소 유동면적의 변화를 초래하며, 감소된 단면적으로 인한 축방향 유속의 증가는 선회강도 및 중앙 재순환유동구조의 변화를 초래하게 된다. 그 결과 화염의 폭이 감소되며 부분적으로 비대칭적인 화염구조를 보이게 된다. Pilot 버너 형상변화를 의미하는 연료 분사 노즐의 위치변화는 연료/공기의 혼합에 큰 영향을 미치게 되며, 결과적으로 외부 예혼합화염과의 상호작용에 큰 변화를 동반하게 된다. 이는 CO의 배출량에 직접적인 원인을 제공하게 된다. 추가적으로 pilot 버너의 형상변화는 위치변화로 인한 영향과 결합되어 최종 CO 및 NOx의 생성 특성에 영향을 미치게 되며, 본 연구에서는 희박 예혼합연소를 적용한 가스터빈의 실제 운전조건에 해당되는 당량비 0.6~0.7의 범위에서 안정된

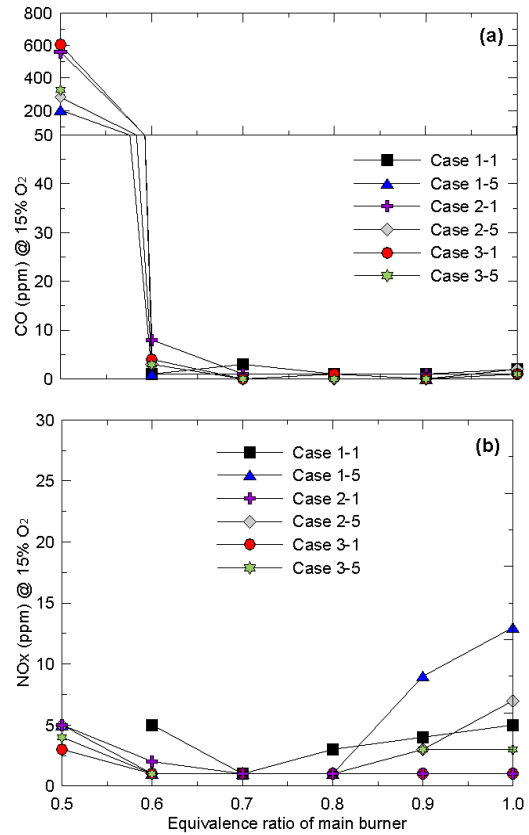


Fig. 9 Emissions of (a) CO and (b) NOx as a function of equivalence ratio for co-swirl and vane angle=45°.

화염형상, CO 및 NOx 배출량을 고려하여 case 1-5의 조건이 본 개발연소기의 최적형상이라는 결론을 도출하였다.

Fig. 9는 정방향 선회조건에서 선회기 베인 각도가 45°로 변경되었을 때 pilot 버너의 위치 및 형상변화에 따른 CO 및 NOx 배출량을 도시한 결과이다. 선회기 베인 각도가 30°인 Figs. 4, 6, 8의 결과와 비교할 때, CO의 배출량은 $0.6 < \phi_m < 1.0$ 의 넓은 범위에서 5 ppm 이하의 매우 낮은 값을 보이고 있다. 이러한 결과는 선회강도 증가에 따른 pilot 버너 내부의 연료/공기 혼합도 증가 및 중앙 재순환영역의 증가로 인한 화염안정화 개선이 가장 큰 원인으로 작용되었음을 예측할 수 있다. NOx의 배출량 역시 증가된 선회강도로 인한 화염신장율의 증가 (고온 영역의 체류

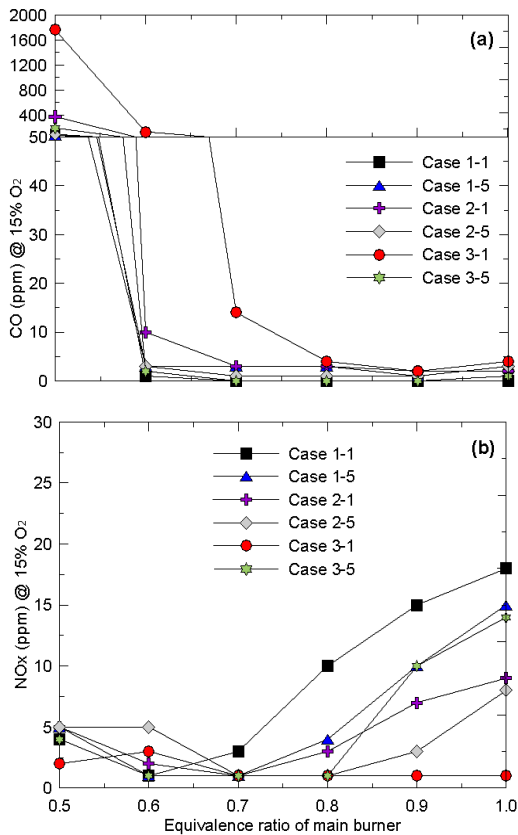


Fig. 10 Emissions of (a) CO and (b) NOx as a function of equivalence ratio of main burner for counter-swirl and vane angle=45°.

시간의 감소)로 인하여 당량비 0.6~0.7의 범위에서 5 ppm 이하의 매우 우수한 배기성능을 제공하고 있다.

Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 선회기 배인 각도의 조건에서 내부 및 외부의 선회방향을 반대로 설정한 역방향 선회에 대한 CO 및 NOx 배출량을 도시한 것이다. 일반적으로 역방향 선회의 적용은 난류운동에너지의 증가로 연료/공기의 혼합을 촉진시키며 보다 축소된 중앙 재순환영역을 생성, 화염길이의 감소 및 고온 영역의 체류시간 감소로 NOx 저감에 효과적이라 보고되고 있다 [9-11]. 그러나 이러한 결과는 대부분 비예혼합화염의 이중 선회연소기에서 제시된 것이며, 연료/공기의 혼합 유무, 선회류의 형상 및 위치에 따라 선회방향이 화염안정성 및 배기성능에 미치

는 영향을 큰 차이를 보일 수 있다. 정방향(Fig. 9) 및 역방향 선회(Fig. 10)의 결과를 비교할 때, CO 발생량은 case 2-1 및 case 3-1의 경우 역방향의 조건에서 보다 많은 양의 CO가 발생되고 있다. NOx의 경우 역시 전반적으로 역방향의 조건이 정방향에 비해 높은 값을 갖는다. 위 결과로부터 본 연구에서 개발되는 하이브리드/이중 선회 제트 연소기의 경우, 역방향 선회보다는 정방향 선회가 화염안정성 및 배기성능에 보다 우수함을 확인할 수 있다. 이에 대한보다 명확한 원인분석을 위해서는 선회 연소장의 속도 및 온도 측정 그리고 수치해석을 통한 상세한 분석이 동반되어야 하며, 이에 대한 결과는 향후 논문을 통해 보고될 예정이다.

4. 결 론

마이크로 가스터빈용 하이브리드/이중 선회제트 연소기를 고안하였으며, CO 및 NOx 저감을 위한 연소기 형상 최적화에 관한 기초 실험연구를 수행하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

내부의 부분예혼합화염이 적용된 pilot 버너의 위치변화는 외부 예혼합기의 최소 유동면적의 변화를 초래하여, 버너 출구 근처의 유속분포와 재순환유동구조에 큰 영향을 미치게 된다. 그 결과 화염면의 형상, CO 및 NOx의 생성특성의 변화를 초래한다. Pilot 버너의 형상, 즉 내부 연료 분사노즐의 위치 변화는 부분예혼합화염의 연료/공기 혼합에 직접적인 영향을 주며, 외부 예혼합화염과의 상호작용에 큰 변화를 동반한다. 화염의 형상, 상대적 연소소음, CO 및 NOx의 배출량을 통해 최적 연소기 형상조건(case 1-5)을 도출하였다. 또한 선회기 배인 각도의 증가는 화염안정화 및 CO의 저감에 큰 효과를 주며, 이중 선회가 적용된 본 연소기의 운전조건에서 역방향 선회에 비해 정방향 선회가 보다 우수한 배기성능을 갖게 된다. 본 연소기의 최대 부하량 및 소음한계를 포함한 상세한 재순환 유동 및 화염구조, CO 및 NOx 생성특성은 향후 추가적인 실험 및 수치해석을 통해 분석될 예정이다.

후 기

이 논문은 2012년도 순천대학교 공과대학학술재단 연구비와 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(과제번호: 2011-2010-1000-10)을 받아 수행된 연구입니다.

References

1. Bahr, D., "Aircraft Turbine Engine NO_x Emissions Abatement," In Culick, F., Heitor, M.V., Whitelaw, J.H. (Eds.), *Unsteady Combustion*, Kluwer Academic, pp. 234-264, 1995.
2. Hwang, C.H. and Lee, C.E., "Large Eddy Simulation of Swirling Premixed Flames in a Model Gas Turbine Combustor," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Science*, Vol. 34, No. 7, pp. 79-88, 2006.
3. Poinso, T.J., Bourienne, F., Candel, S., Esposito, E. and Lang, W., "Suppression of Combustion Instabilities by Active Control," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 5, pp. 14-20, 1989.
4. Hwang, C.H., Lee, C.E. and Kim, S.W., "LES Studies on Flow Structure and Flame Characteristics with Equivalence Ratio in a Swirling Premixed Combustor," *Journal of The Korean Society of Combustion*, Vol. 11, No. 4, pp. 27-35, 2006.
5. Ishizuka, S., "On the Behavior of Premixed Flames in a Rotating Flow Field: Establishment of Tubular Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 20, pp. 287-294, 1985.
6. Ishizuka, S., "An Experimental Study on Extinction and Stability of Tubular Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 75, pp. 367-379, 1989.
7. Onuma, Y., Yamauchi, T., Mawatari, M., Morikawa, M., Noda, S., "Low NO_x Combustion by a Cyclone-Jet Combustor," *JSME Int. J., Ser., B*, Vol. 44, No. 2, pp. 299-304, 2001.
8. Hwang, C.H., Lee, S.R., Kim, J.H. and Lee, C.E., "An Experimental Study on Flame Stability and Pollutant Emission in a Cyclone Jet Hybrid Combustor," *Applied Energy*, Vol. 86, No. 8, pp. 1154-1161, 2009.
9. Takashi, T. and Shingeru, S., "The Effect of Fuel-Air Mixing on NO_x Formation in Non-Premixed Swirl Burners," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 26, pp. 2733-2739, 1996.
10. Hadeif, R. and Lenze, B. "Effects of Co- and Counter-Swirl on the Droplet Characteristics in a Spray Flame," *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 47, pp. 2209-2217, 2008.
11. Eldrainy, Y.A., Saqr, K.M., Aly, H.S., Lazim, T.M., Jaafar, M.N.M., "Large Eddy Simulation and Preliminary Modeling of the Flow Downstream a Variable Geometry Swirler for Gas Turbine Combustor," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1104-1109, 2011.