

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2014.18.4.033>

이중선회 연소기에서 화염형상과 파일럿과 주 화염의 상호작용에 관한 연구

조준익^a · 박태준^b · 황철홍^c · 이기만^{b,*}

A Study on the Flame Shape and the Interaction between Pilot and Main Flames in a Dual Swirl Combustor

Jun-Ik Jo^a · Tae-Joon Park^b · Cheol-Hong Hwang^c · Kee-Man Lee^{b,*}

^aR&D Center, Ssangyong Motor Company, Korea

^bSchool of Aerospace Engineering, Suncheon National University, Korea

^cDepartment of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University, Korea

*Corresponding author. E-mail: knlee@scnu.ac.kr

ABSTRACT

Flame behaviors and interaction between pilot and main flames in a dual swirl combustor were investigated experimentally and numerically. Under the condition of fixed swirl angle of 45° for main flame, the swirl angle of pilot flame, total heat release rate and equivalence ratio of main flame were used as major parameters. As a result, detailed flame stability diagram of dual swirl combustor was identified in terms of 5 flame modes with the changes in total heat release rate and equivalence ratio of main flame. It was found that the swirl angle of pilot flame plays the most important role in the changes in flame location and overall flow structure inside the combustor, and thus leads to the significant change in the interaction between pilot and main flame.

초 록

이중선회 연소기에서 다양한 화염거동과 파일럿 화염과 주 화염의 상호작용에 관한 연구가 수행되었다. 주 선회각이 45°로 고정된 상태에서 파일럿 선회각도, 총 열 발생률 그리고 주 화염의 당량비가 주요 변수로 검토되었다. 주요한 결과로써, 이중선회 연소기의 상세한 화염안정화 영역이 총 발열량과 주 화염의 당량비 변화를 통해 발생하는 5가지 화염모드를 통해 확인되었다. 파일럿 화염의 선회각도는 파일럿 화염의 위치 및 연소기 전체의 유동구조에 가장 큰 영향을 미치게 되며, 그 결과 내부 및 외부 화염간의 상호작용의 큰 변화를 가져온다.

Key Words: Dual Swirl Burner(이중 선회버너), Flame Stability Diagram(화염 안정화영역), Flame-flame Interaction(화염간의 상호작용), Emission Performance(배기성능)

Received 10 December 2013 / Revised 1 July 2014 / Accepted 8 July 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2013년도 추계학술대회(2013. 12. 4-5, 경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

최근 가스터빈 기술에서 NO_x를 저감시키기

위하여 희박 예혼합 연소기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 기술의 개념은 희박연소를 통해 화염온도를 낮춤으로써, Thermal NOx의 생성을 억제하여 낮은 NOx 배출지수를 얻는 기술이다[1]. 또한 선회 유동장을 적용함으로써 연료와 공기의 혼합 촉진 그리고 화염 신장의 증가를 통해 고온 영역의 체류시간을 감소시킴으로서, 낮은 NOx 배출지수를 얻을 수 있다고 알려져 있다[2]. 그러나 희박 예혼합화염의 거동은 혼합기 조성과 난류강도에 의해 결정되는 난류 연소속도에 지배되기 때문에 역화나 가연한계 근처에서 연소조건의 작은 변화에도 화염특성이 큰 변화가 발생하는 연소불안정성이 발생될 수 있다.

이처럼 선회화염에서 주로 발생하는 연소불안정현상은 크게 당량비 변동, 압력 변동, 열 발생률 변동의 상호작용에 의해 발생하는 열-음향 불안정성과 화염과 와동에 의한 유체역학적 불안정성으로 분류될 수 있다. 이러한 연소불안정 현상을 제어하기 위한 방법으로는 추가적인 연료의 분사나 연료조성을 변화시켜 압력과 열 발생 주기의 위상을 변화시키는 능동적 방법과, 연소기 형상이나 연소실에 보조기구를 장착하는 수동적 방법으로 구분된다[3].

한편 희박예혼합화염이 갖는 화염불안정 및 연소불안정성을 동시에 감소시키기 위한 방법으로 부분예혼합화염과 예혼합화염의 상호작용을 통해 화염안정성을 개선시키고, 연료부하 비율에 따라 연소불안정성을 부분적으로 감소시키는 방법이 보고되었다[4,5]. 이러한 배경 하에 본 연구진은 하이브리드 이중선회 제트연소기에 대하여 노즐 형상 최적화에 관한 연구를 수행한 바 있다[6,7]. 이중선회 제트연소기는 크게 내부에는 부분예혼합화염의 형태를 갖는 파일럿(Pilot) 화염과 외부에는 예혼합화염 형태인 주(Main) 화염으로 구성되어 있다. 이때 내부의 부분예혼합화염은 외부의 예혼합화염을 안정시키는 파일럿 역할뿐만 아니라, 연료부하의 분배 역할도 담당하게 된다. 선행 연구에서는 파일럿 노즐 위치변화에 따른 화염형상과 배기특성을 파악하여 최적화된 노즐형상이 결정되었다. 또한 파일럿 노

즐의 위치변화는 전체적인 화염형태와 연소 배출성능에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다[6,7].

본 연구에서는 선행연구를 토대로 파일럿 화염의 선회각도가 이중선회 화염의 전체적인 화염거동에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 한다. 이를 위해 외부 주 화염의 선회각도를 고정시키고 내부 파일럿 화염의 선회각도를 변경하였다. 결과적으로 내부와 외부 선회화염에 대한 상호작용의 변화를 발생시켜, 다양한 형태의 화염모드를 통해 화염 안정화영역을 분류하였다. 또한 열 발생율과 당량비를 주요 변수로 NOx와 CO의 배기성능을 검토하였다. 추가적으로 제한된 실험결과 분석의 보완을 위하여, 3차원 수치 해석을 통한 평균적인 화염특성을 비교·검토하였다.

2. 실험방법 및 조건

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 이중선회 연소기의 개략도 및 실험장치를 나타낸 그림이다. 내부 파일럿 화염 측의 연료(CH₄)는 직경 1 mm인 6개의 홀을 갖는 노즐에서 분사되며, 연소용 공기는 베인(Vane) 형상의 선회기를 지나면서 연료와의 혼합이 촉진된다. 그 결과 혼합정도에 따라 비예혼합화염에서 부분예혼합화염의 특성을 갖게 된다. 외부의 주 화염은 연료와 공기가 혼합기를 통하여 미리 예혼합된 후에 베인 형상의 선회기를 거쳐 연소실에 공급된다. 안정적인 화염생성을 위하여 주 연소를 담당하는 주 버너의 선회기의 각도는 Fig. 1에 표기된 바와 같이 45°로 고정하였으며, 주 화염과 파일럿 화염의 상호작용의 변화를 발생시키기 위하여 파일럿 버너의 선회각도는 15°, 30° 그리고 45°에 대하여 검토되었다.

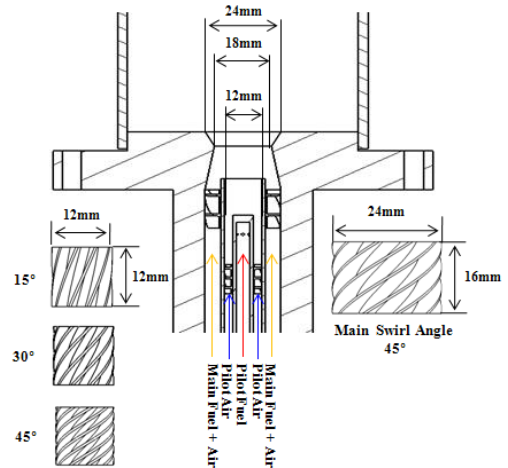
본 연구에 사용된 파일럿 화염과 주 화염의 실험조건은 Table 1에 제시되었다. 파일럿 화염의 총괄당량비를 결정하기 위한 선행실험을 통해, 총괄당량비 1.0에서 0.7로 감소됨에 따라 연료 분사 홀 근처에서 생성된 비예혼합화염은 점

Table 1. Experimental condition.

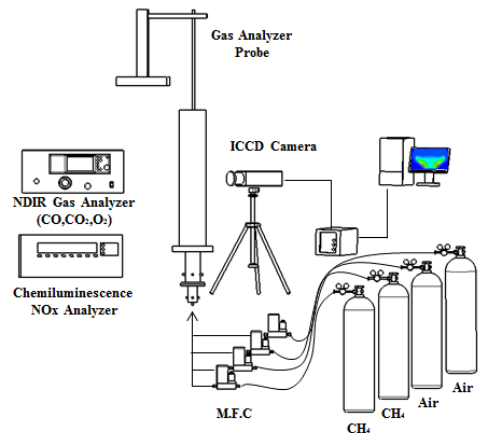
Parameters	Pilot Flame	Main Flame
Ratio of Heat Release	3	7
Equivalence Ratio (ϕ)	0.7	0.45 - 1.5
Heat Release Rate (kW)	0.5 - 1.2	1.0 - 2.8
Angle of Swirler ($^\circ$)	15, 30, 45	45

차적으로 부분예혼합화염으로 변화되었으며, 이때 CO 및 NOx가 점차적으로 감소됨을 확인하였다. 물론 총괄당량비 0.7 이하의 제한된 조건에서는 보다 우수한 배기성능을 확인하였으나, 화염안정성을 확보하기 위하여 적용된 파일럿 화염의 역할을 위하여 최종 총괄당량비는 0.7로 고정되었다. 파일럿과 주 화염에 대한 연료 분배를 역시 본 연소기의 중요한 운전조건으로서, 선행실험을 통해 파일럿 화염의 연료 공급비가 증가함에 따라 화염은 보다 안정되는 결과를 갖게 된다. 그러나 제한된 연료홀 및 파일럿 버너의 면적으로 인하여, 화염의 길이는 점차적으로 증가하게 된다. 이는 외부 주 화염과의 상호작용을 감소시킬 수 있으며, 최종 화염안정화 영역의 감소를 가져올 수 있다. 이러한 배경 하에, 배기성능과 화염안정성을 고려하여 최종 파일럿과 주 화염의 부하 분배 비율(즉, 연료 공급 유량 비율)은 3:7로 결정되었다. 요약하면, 파일럿 버너의 총괄당량비가 0.7로 고정된 조건에서 연료 부하 분배비 3:7의 조건에서 주 화염의 당량비는 본 연구의 주요 변수로 적용되었다. 공급된 총 연료유량과 메탄의 저위 발열량(50,016 kJ/kg)량을 통해 산정된 열 발생율은 1.5~4.0 kW의 범위를 갖게 된다.

연료 및 공기의 유량은 버블 유량계를 통해 보정된 질량유량계(MFC)에 의해 제어되었다. 밀폐된 연소실 및 화염가시화를 위하여 0.74 m 직경의 석영관이 설치되었다. 정밀한 연소 배출성능을 분석하기 위하여 NOx는 화학발광방식(Chemi-luminescence)의 전용 분석기(Model: 200AH, Teledyne Inc.)로 측정되었으며, 일반 주요 화학종의 농도는 NDIR 방식의 배가스 분석기(Model : MGA5, MRU Inc.)로 분석되었다. 본



(a) Schematic of dual swirl combustor



(b) Experimental set-up

Fig. 1 Schematic of dual swirl burner and experimental set-up for model gas turbine combustor.

논문에 언급된 CO 및 NOx의 농도는 건기준(dry-basis) O2 15%의 조건으로 환산된 값이며, NOx는 NO와 NO2를 포함한 값이다.

복잡한 이중선회 화염간의 상호작용에 대한 이해를 위하여, 평균적 화염면의 위치는 간접적으로 예측할 수 있는 CH 라디칼의 분포가 측정하였다.

이때 CH* 자발광 이미지(425.5~442.5 nm)는 ICCD 카메라(PI-MAX Princeton Instrument)를 통해 얻어졌다.

Table 2. 3 step global reactions for CH₄ combustion.

Reaction	<i>A</i>	<i>E_a</i> (<i>J/kmol</i>)	<i>β</i>
2CH ₄ +3O ₂ →2CO+4H ₂ O	1.399E10	1.167E8	-0.062
2CO+O ₂ ↔2CO ₂	7.381E11	7.660E7	0.215

3. 계산방법 및 조건

이중선회 화염의 복잡한 화염거동 및 상호작용을 이해하기 위하여, 실험과 동일한 조건에 대하여 FLUENT Ver. 13.0[8]을 이용한 수치해석이 수행되었다. 3차원 정상상태 연속, 모멘텀, 화학종 및 에너지방정식은 QUICK 기법에 의해 차분되었으며, 압력-속도 교정은 SIMPLE 기법이 적용되었다. 난류 유동모델로는 표준 *k-ε*과 RNG *k-ε*에 비해 강한 역 압력구배, 박리 및 재순환 유동장에서 높은 예측정확도를 갖는 Realizable *k-ε*[9]이 사용되었다. 벽 근처 난류 모델링을 위하여 Enhanced wall treatment 모델[8]이 적용되었다. 화학반응 및 열 발생을 고려하기 위하여 3단계 총괄반응식이 적용된 EDC(Eddy Dissipation Concept) 모델이 사용되었다. 총괄 반응식과 관련된 반응속도 상수에 관한 정보는 Table 2에 제시되었다. 첫 번째 반응은 CH₄가 CO로 산화되는 비가역반응이며, 두 번째 반응은 CO가 CO₂로 산화되는 반응과 그 역반응으로 구성된 가역반응이다.

연소기의 복잡한 형상을 고려하기 위하여 Hybrid(hexahedral/prismatic/tetrahedral) 격자가 적용되었다. 격자 민간도 평가를 통해 최종 적용된 격자수는 약 200만개이다. 수치해의 수렴 평가를 위해 Residual 값은 에너지방정식에는 <10⁻⁸, 이외의 방정식에는 <10⁻⁵의 값이 적용되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 화염형상과 안정화선도

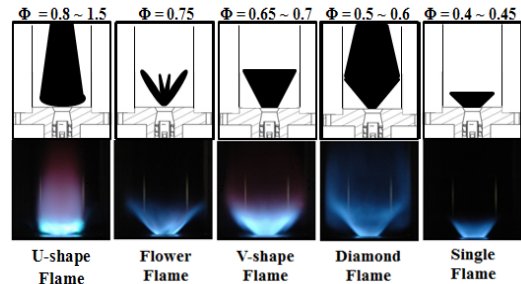


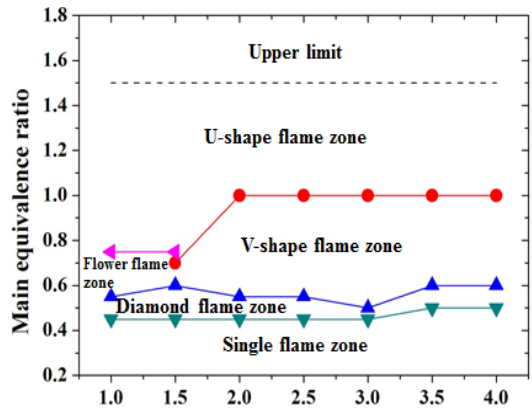
Fig. 2 Typical flame modes according to the main equivalence ratio for 1.5 kW.

본 연구에서 적용된 이중선회 연소기에서 열 발생률과 당량비에 따른 화염형상을 관찰한 결과, 파일릿과 주 화염의 상호작용에 따라 총 5가지의 화염형상이 확인되었다. Fig. 2는 5가지 화염형상이 모두 존재하는 대표적인 열 발생률 1.5 kW, 그리고 파일릿 선회각도 45°의 조건에서 주 화염의 당량비 변화에 따른 화염사진과 이해를 돕기 위한 각 조건의 화염형상을 도식화한 결과이다. 가시적으로 확인되는 화염영역은 검정색으로 표기되었다.

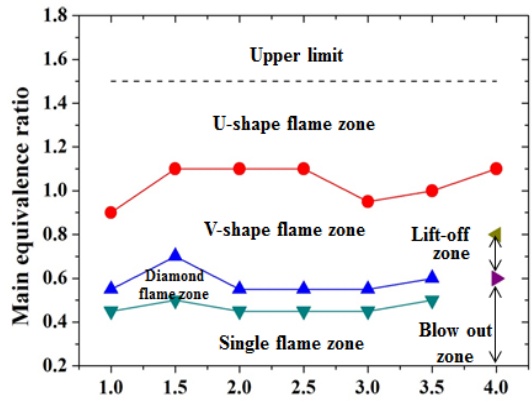
Fig. 2의 각 화염형상을 살펴보면, ‘U-shape flame’ 형상은 주 화염의 당량비 0.8~1.5에 조건에서 발생되며, 낮은 공기의 유량으로 인해 상대적으로 작은 선회강도로 마치 액체 연료의 풀(Pool) 화염과 같은 U자 모양의 화염이 존재하게 된다. ‘Flower flame’ 형상은 1.5 kW 이하의 낮은 열 발생률 조건에서만 발생되며, 주 화염의 당량비가 0.75일 때 존재한다. 구체적으로 노즐 출구에서 원주 방향으로 휘도의 불균일한 분포가 확인된다. 이는 본질적으로 연료-공기의 혼합도가 낮은 파일릿 부분예혼합화염이 외부의 주 화염과 낮은 상호작용으로 인하여 비교적 독립된 화염이 생성되기 때문이다. 주 화염의 공기량이 증가함에 따라 증가된 선회강도에 의해 화염이 짧아지게 되고 전형적으로 안정된 선회화염 형태인 역 삼각형의 V형상의 화염을 생성된다. 이 화염을 ‘V-shape flame’으로 정의하였다. 주 화염에 추가적으로 공기가 공급된 당량비 0.5~0.6 범위에서는 더욱 증가된 선회강도로 인하여 PVC(Precressing Vortex Core) 유동이 현저

해지면서 반경방향으로 화염영역이 확장된다. 그 결과 반응대는 제한된 직경을 갖는 석영관의 벽면에 충돌한 후에 보다 하류 영역에서 추가적 연소반응이 일어나게 된다. 이러한 화염을 'Diamond flame'이라 정의하였다. 마지막으로 메탄 연료의 가연한계 근처인 주 당량비 0.45~0.5 구간에서는 주 예혼합화염의 날림(Blow-out)이 발생되고, 오직 파일럿 화염만이 존재하는 'Single flame'이 발생된다. 이들 5가지 화염형태에서 가장 안정적인 선회화염 형태는 'V-shape flame'으로 희박 예혼합조건에서 가스 터빈 연소기가 정상상태로 운전될 때의 화염형상에 해당한다.

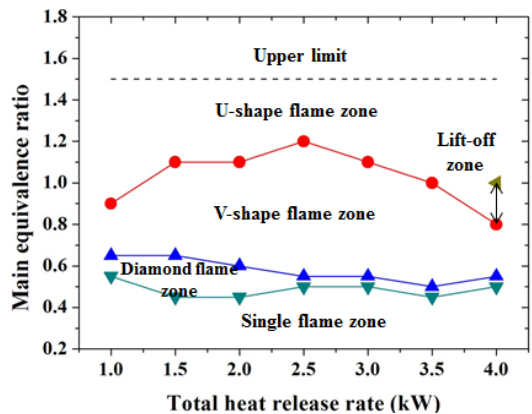
Fig. 3은 주 화염의 선회각도를 45°로 고정된 상태에서 파일럿 화염의 3가지 선회각도에 대한 열 발생률과 주 당량비 변화에 따른 화염안정화 영역을 도시한 것이다. 이때 화염안정화 영역은 Fig. 2에서 언급된 화염형상에 따라 분류되었다. 먼저 파일럿 화염의 선회각도가 45°인 경우, 열 발생률 1.5 kW이하에서는 꽃무늬 형태의 화염이 관찰되며, 열 발생률 2 kW이상부터 V자 화염형태가 존재하면서 안정적인 구간이 넓어지는 것을 알 수 있다. 30°인 경우에도 열 발생률이 2 kW이상부터 안정적인 구간이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 특히 열 발생률이 4 kW에서는 당량비가 0.6에서 0.8 구간에서 화염이 부상되고, 주 화염의 당량비가 0.6 이하로 낮아지면서 공기량이 더욱 증가하게 되면 화염날림 현상이 일어나는 것을 확인하였다. 그러나 15°인 경우의 동일한 조건에서 화염은 부상되지만, 주 화염의 당량비가 감소하면서 공기량이 증가하여도 앞서 30°인 경우처럼 화염날림 없이 다시 화염이 재 부착되는 것을 볼 수 있다. 이는 파일럿과 주 화염이 완전하게 하나의 화염으로 결합되면서 일어나는 과도기적인 현상으로 사료된다. 또한 선회각도 차이로 인해 30°는 15°보다 당량비가 희박한 조건인 주 당량비 0.6에서 부상이 일어나게 된다. 그리하여 파일럿 선회각도 30°는 당량비가 0.6보다 더욱 희박해지면 화염날림 현상이 발생하지만, 15°는 화염이 부상된 이후에 당량비가 희박해지더라도 화염날림 없이 V형 화염으로 재



(a) Swirl angle of pilot flame = 45°



(b) Swirl angle of pilot flame = 30°



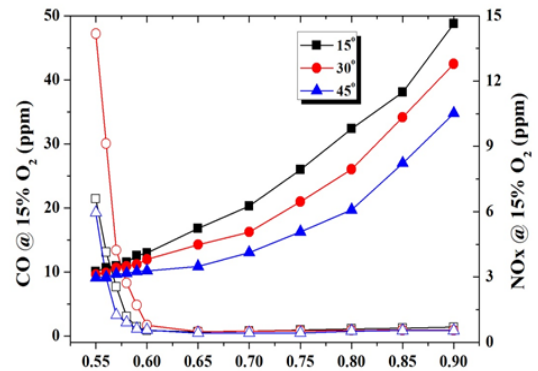
(c) Swirl angle of pilot flame = 15°

Fig. 3 Stability diagrams of various flame modes expressed by main equivalence ratio and total input heating value for 3 swirl angles of pilot burner.

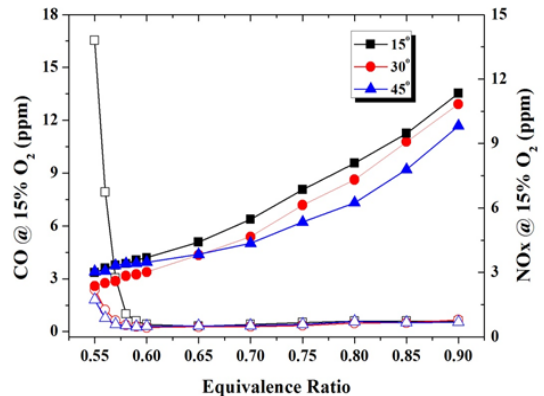
부착이 일어나는 것으로 판단된다.

4.2 CO 및 NO_x 배출성능

이중선회 연소기에서 내부 및 외부 화염의 상호작용에 따른 CO 및 NO_x 배출성능을 검토하기 위하여, 1.5 그리고 2.5 kW 열 발생율의 조건에서, 파일럿 화염의 선회각도에 따른 CO 및 NO_x 배기농도가 비교되었다. 먼저 총 발생열량이 1.5 kW의 조건을 살펴보면, 주 화염의 당량비가 0.9에서 0.6까지 감소되는 범위에서는 CO의 발생량은 거의 0에 가깝다. 그러나 당량비가 0.6에서 0.55로 감소되는 구간에서는 3가지 파일럿 선회각도 조건 모두 급격한 CO 증가를 가져온다. 특히 파일럿 선회각도 30°의 조건은 다른 조건에 비하여 더욱 급격한 CO를 발생시키고 있다. 이러한 현상은 Fig. 2의 화염모드에 의해 분류된 화염안정화 선도를 통해 설명될 수 있다. Fig. 2의 3가지 파일럿 선회각도의 결과에서 공통적인 1.5 kW의 결과를 비교해보자. 파일럿 선회각도 45°와 15°에서 'Diamond flame'이 발생되는 주 화염의 당량비는 약 0.5~0.6의 범위를 갖는 반면에, 선회각도 30°의 조건은 당량비 0.6~0.7의 보다 넓은 'Diamond flame' 발생 영역을 보여주고 있다. 'Diamond flame'은 'V-shape flame'의 조건에서 보다 증가된 공기유량(즉, 감소된 주 화염의 당량비)에서 발생되며, 이로 인한 선회도의 증가로 화염은 석영관의 벽면에 충돌한 후에 하류 방향으로 진행하게 된다. 즉, 화염 내부에서 충분한 연소가 이루어지지 않기 때문에 'Diamond flame'이 발생되는 영역에서는 상당한 양의 CO가 발생될 수 있음을 충분히 예측할 수 있다. 그 결과 보다 넓은 당량비 영역에서 'Diamond flame'이 발생되고 있는 선회각도 30°의 조건에서 보다 급격한 CO 발생이 이루어짐을 예측할 수 있다. NO_x의 결과를 살펴보면, 모든 선회각도에 대하여 주 화염의 당량비 증가에 따라 NO_x의 발생량이 증가됨을 볼 수 있다. 가장 높은 선회도를 갖는 45°는 다른 선회각도 조건들에 비하여 가장 낮은 NO_x 배출량을 보여주고 있으며, 15°에서 가장 많은 NO_x가 배출되고 있다. 구체적으로 선회각도 변화에 따라 최대



(a) Total heat release rate of 1.5 kW



(b) Total heat release rate of 2.5 kW

Fig. 4 CO and NO_x concentrations with equivalence ratio of main flame for 1.5 and 2.5 kW.

3 ppm의 정량적 차이가 발생됨을 알 수 있다. 대부분의 당량비 조건에서 CO 발생량이 무시될 정도로 작음을 고려할 때, 화염대 근처에서 연료-공기의 혼합은 모든 선회각도에서 양호하게 이루어짐을 예측할 수 있다. 그러나 선회각도의 증가로 인한 증가된 화염신장(이로 인한 화염온도의 감소) 그리고 감소된 화염길이(즉, 고온 영역의 감소)로 인하여 파일럿 선회각도 45°의 조건에서 가장 낮은 NO_x가 발생됨을 예측할 수 있다.

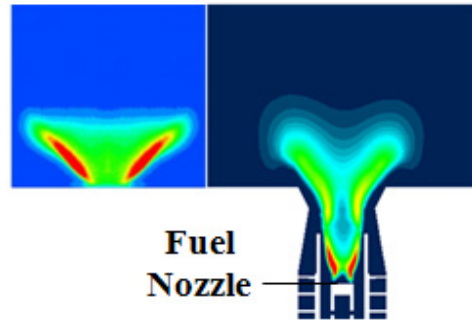
Fig. 4(b)는 총 열 발생율 2.5 kW의 조건에서의 결과이다. 전반적인 결과는 1.5 kW에서와 유사하지만, 희박 가연한계 근처에서 파일럿 선회각도 15°의 조건에서 CO가 가장 많이 발생됨을

볼 수 있다. Fig. 4(a)에서와 동일한 분석방법으로 Fig. 3의 2.5 kW의 화염모드를 살펴보면, 'Diamond flame'이 발생하는 당량비는 거의 유사하다. 그러나 선회각도 15°의 경우에 'Diamond flame'과 'Single flame'의 경계가 매우 좁아, 당량비의 미세한 변화에도 화염은 'Diamond flame'에서 'Single flame'으로 변화되는 과도기에 존재한다.

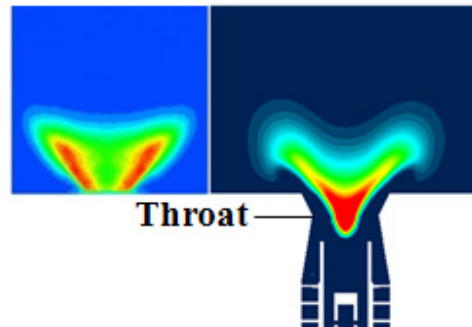
그 결과 30°의 경우는 주 연료의 연소가 거의 이루어지지 않는 'Single flame'으로 비교적 쉽게 변환될 수 있으며, 이로 인하여 화염은 희박한 계 근처에서 다른 선회각도에 비해 높은 CO를 발생시키게 된다. NOx의 발생을 살펴보면, 선회각도가 NOx에 미치는 상대적인 영향은 1.5 kW에서와 동일함을 알 수 있다. 다만, 1.5 kW에 비해 2.5 kW의 조건에서는 약 3 ppm 정도의 NOx 배출량 감소를 확인할 수 있다. 그 결과 본 연소기의 최적 조건은 최소 1.5 kW 보다 큰 발생열량 조건에서 존재함을 짐작할 수 있다. 실용적 관점에서 본 연구에서 적용된 이중선회 연소기는 희박 가연한계를 제외하고 적용된 모든 주 화염의 당량비 조건에서 충분히 높은 성능의 CO 및 NOx 배출성능을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

4.3 선회화염간의 상호작용 분석

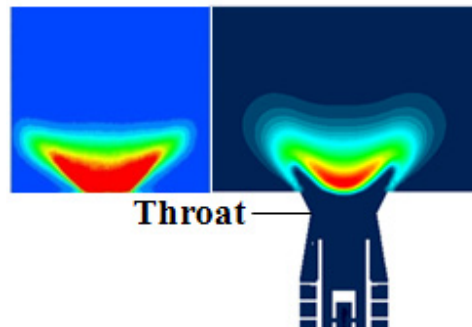
Fig. 5는 총 발열량 2.5 kW와 주 화염의 당량비 0.7의 조건에서 파일럿 선회각도에 따른 CH 라디칼의 자발광 이미지(왼쪽)와 수치계산을 통한 연료의 산화 반응속도(Reaction rate, 오른쪽)를 동일 Scale을 통해 비교·도시한 결과이다. 본 수치계산에서는 3단계 총괄반응식이 고려되었기 때문에, 실험과 동일한 CH 라디칼의 분포가 예측되지 않는다. 따라서 연료의 초기 반응에 해당되는 Table 2의 CH₄→CO로 변환되는 반응의 반응속도를 대안으로 비교하였다. CH 라디칼의 자발광과 연료의 초기 산화반응속도는 다른 물리량으로써, 단지 화염대의 위치를 비교하기 위한 정성적인 접근이기 때문에, 그림에서 각 정량적 값들(범례)은 생략되었다. 먼저 파일럿 선회각도가 45°인 결과를 살펴보면, 파일럿 버너에서 공



(a) Swirl angle of pilot flame = 45°



(b) Swirl angle of pilot flame = 30°



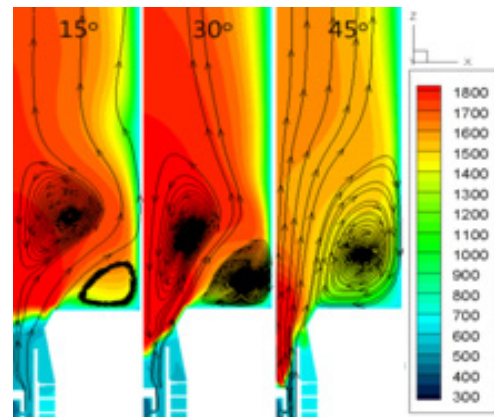
(c) Swirl angle of pilot flame = 15°

Fig. 5 Comparison of CH radical (experimental data) and reaction rate of first reaction in Table 2 (numerical data) with swirl angle of pilot flame for 2.5 kW and main equivalence ratio 0.7.

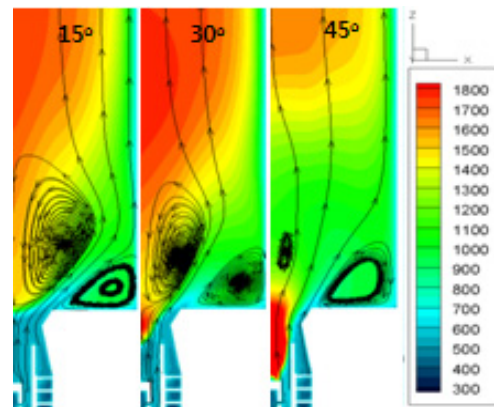
급되는 연료와 공기의 혼합도가 다른 선회각도에 비해 높을 것으로 판단된다. 또한 큰 선회각도와 연료 분사노즐 상단에 Bluff-body의 효과를 통해 화염이 버너 내부에서 반응이 개시되었음을 확인할 수 있다. 안정된 파일럿 화염은 외부

주 예혼합기의 연소를 개시 및 보염효과를 갖으며, 최종 버너 출구에서 'V-shape flame'을 형성하게 된다. 결과적으로 실험에서 측정된 CH 라디칼의 분포는 대부분 주 예혼합화염에 의해 생성된 것으로 판단되며, 파일럿 선회각도가 45°인 조건은 파일럿 버너에 의한 보염효과를 통해 상당히 안정된 화염을 기대할 수 있다. 두 번째로 파일럿 선회각도가 30°인 결과를 살펴보면, 파일럿 버너 내부에서 부분예혼합화염은 안정되지 못하고, 주 예혼합기와 만나는 부분에서 화염이 안정됨을 계산결과를 통해 볼 수 있다. 그 결과 45°의 조건과는 다르게 파일럿과 주 화염이 결합된 하나의 화염이 생성되었음을 알 수 있다. 마지막으로 파일럿 선회각도가 15°로 감소되면, 연료-공기의 혼합 및 난류강도의 감소로 인하여 파일럿 화염의 본질적인 역할인 보염의 기능이 크게 감소될 수 있음을 결과를 통해 예측할 수 있다. 파일럿과 주 화염이 결합된 화염은 버너 출구 근처에서 안정된 화염을 생성시킨다. 이러한 화염은 결과적으로 파일럿과 주 버너에서 공급되는 반응물의 유동 및 당량비 변화에 상대적으로 더욱 민감해질 수 있다. 본 연구에서는 직접적인 검토가 이루어지지 않았으나, 가연한계 근처에서 발생하는 급격한 압력파와 소음을 유발하는 연소불안정성에 상당한 문제점을 노출할 것으로 판단된다. 위 그림으로부터 파일럿 화염의 선회각도의 변화로 인하여 화염면의 위치 및 본질적인 보염의 역할이 크게 변화되며, 외부의 주 화염의 안정된 연소에 큰 영향을 미치는 것으로 결론지을 수 있다.

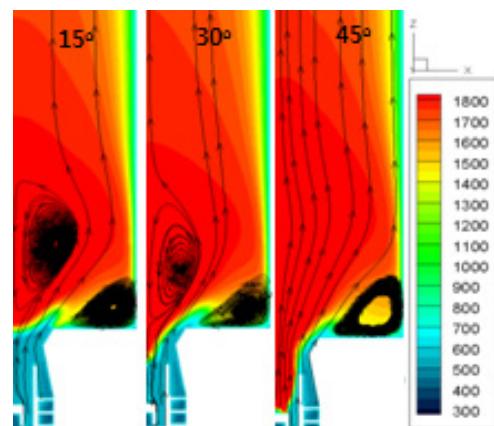
Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 총 발열량과 주 화염의 당량의 조건에 대하여, 온도 및 유선분포를 나타낸 것이다. 파일럿과 주 화염이 연소기 내부의 유동구조에 미치는 개별 및 통합적 기여도를 확인하기 위하여, 수치해석을 통해 다음 3가지 조건이 고려되었다: (a) 파일럿 연료-공기만이 공급된 경우(이 경우에 주 버너에는 예혼합기가 공급되지 않음), (b) 파일럿 연료-공기가 공급되고 동시에 주 버너에는 실제 조건과 동일한 유속의 공기만 공급된 경우 그리고 (c) 파일럿과 주가 동시에 연소되는 경우. 그림에 삽입된 각도는 파



(a) Pilot flame only



(b) Pilot flame with swirling air of main burner



(c) Pilot and main flame

Fig. 6 Temperature distributions of (a) case 1 (only pilot flame), (b) case 2 (air swirl pilot flame), (c) case 3 (premixed swirl flame).

일럿 화염의 선회각도를 의미한다. 먼저 Fig. 6(a)의 파일럿 연료-공기만이 공급된 경우를 통해 파일럿 선회도에 의한 반응장의 온도 및 속도분포를 독립적으로 확인할 수 있다. 선회각도가 15°인 경우에, 중앙 내부재순환영역(Center Toroidal Recirculation Zone: CTRZ)과 코너 재순환영역(Corner Recirculation Zone: CRZ)이 확인된다. 이러한 현상인 일반적인 선회 연소장의 유동구조로 설명되며, 비록 선회각도가 15°로 매우 작더라도 버너 출구에서 생성된 화염이(Fig. 5(a) 참조) 충분한 선회유동에 의해 생성되었음을 짐작할 수 있다. 안정된 화염 기부가 보다 상류로 이동하게 되는 선회각도 30°의 경우에는 CTRZ의 크기가 감소되며, CRZ의 크기는 증가된다. 마지막으로 선회각도가 45°로 가장 큰 선회강도가 적용된 경우에, CTRZ가 생성되지 않으며, 크게 증가된 CRZ를 통해 마치 후향계단유동(Backward-facing step flow)와 유사한 유동구조를 갖게 된다. 파일럿 버너의 연료 분사 노즐 윗단에서 생성된 화염은 좁은 유로를 통과하면서 화염의 선회강도가 크게 감소되었음을 짐작할 수 있다. 이러한 결과는 일반적인 선회연소기에서와 반대되는 경향을 갖는다. 즉, 일반적으로는 선회도(또는 선회강도)가 증가함에 따라 CTRZ는 증가하고 CRZ는 감소하게 된다. 그러나 본 연구에서 적용된 이중선회 연소기는 내부 파일럿 화염의 생성위치에 따라 내부 유동구조가 크게 변화될 수 있음을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 조건에 주 버너에 실제 조건과 동일한 공기를 공급하여, 주 화염에 의한 열발생 효과를 무시한 조건에 해당된다. 기존 파일럿 화염에 의해 생성된 유동구조는 외부 주 선회 공기유동에 의해 고온 영역은 모든 선회각도에 대하여 공통적으로 하류방향으로 이동하게 된다. 선회각도 15°의 경우에는 추가된 주 선회유동에 의해 CTRZ가 반경방향으로 조금 증가되어, 연소기 내부의 전반적인 선회유동이 강화되었음을 알 수 있다. 이러한 경향은 선회각도 30°에서도 확인되며, 최종 45°의 경우에는 Fig. 6(a)에서는 관찰되지 않았던 작은 크기의 CTRZ가 생성되었음을 알 수 있다. 결과적으로 주 선회유동은 파

일럿 선회각도에 따라 이미 형성된 유동장의 선회강도를 약간 증가시키는 효과를 제공하는 것으로 판단된다. 그러나 그 기여도는 그리 크지 않다. 실제 연소조건과 동일하게 파일럿과 주 화염이 동시에 존재하는 Fig. 6(c)를 살펴보면, CTRZ와 CRZ의 분포를 통해 전체적인 선회 유동구조는 Fig. 6(b)와 매우 유사함을 볼 수 있다. 다만, 주 선회유동에 열발생 효과가 추가됨에 따라 열팽창효과와 점성계수의 증가로 인하여, Fig. 6(b)의 선회각도 45°에서 확인되었던 작은 크기의 CTRZ는 존재하지 않게 된다.

결론적으로 주 화염의 선회각도가 동일한 조건에서 파일럿 화염의 선회각도의 변화는 보염 역할을 담당하는 파일럿 화염의 위치를 크게 변화시키며, 이로 인하여 연소장의 유동구조의 큰 변화를 초래하게 된다. Figs. 2와 3에서 확인되었던 다양한 형태의 화염모드 역시 파일럿 화염과 내부 화염의 강도뿐만 아니라 결합유무 및 위치 배열 등에 의해 발생되었음을 예측할 수 있다. 그러나 보다 상세한 분석을 위해서는 본 연구에서 고려된 3단계 총괄반응식을 이용한 수치계산에서는 상당한 한계가 있다. 향후 상세화학반응 효과를 고려할 수 있는 보다 정교한 난류 연소 모델을 적용한 수치해석을 통해 화염 거동을 분석할 수 있는 상세 라디칼의 분포와 유동과의 상호작용에 관한 해석이 진행될 예정이다.

5. 결 론

모델 가스터빈 이중선회 연소기에서 파일럿과 주 화염의 상호작용을 살펴보기 위해 주요 변수들에 의한 실험과 수치해석을 수행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 총 발열량(총연료량), 파일럿 버너의 선회각도 그리고 주 화염의 당량비에 따라 5가지 화염형상이 확인되었으며, 이를 바탕으로 이중선회 연소기의 상세한 화염 안정화선도를 제시하였다.
- (2) 주 화염의 선회각도가 45°로 고정된 조건 하에서 파일럿 버너의 선회각도의 변화는 내부

파일럿 버너의 연료-공기 혼합도 및 선회각도를 크게 변화시키며, 결과적으로 부분예혼합화염의 생성위치의 변화에 매우 큰 영향을 미친다.

- (3) 파일럿 버너의 선회각도 변화로 인한 내부와 외부 화염의 상호작용으로 인하여 화염의 형상에는 상당한 변화가 발생되지만, 파일럿 화염의 보염으로 인하여 화염안정화영역에는 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 희박 가연한계의 근처에서 CO의 생성에 상당한 영향을 주고 있음을 확인하였다.
- (4) 결론적으로 본 연구에서 검토된 이중선회 연소기는 부하량 변동에 따라 화염 안정화영역의 큰 변동없이 넓은 가연범위를 갖으며, 주예혼합화염의 당량비 $\phi \geq 0.6$ 의 조건에서 0에 근접한 CO의 배출과 최대 15 ppm 이하의 NOx 배출능력이 확인되었다.

후 기

본 연구는 2014년도 미래창조과학부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제입니다. (과제번호 : 2014-2010-102780)

References

1. Bahr, D., "Aircraft turbine engine NOx emissions abatement," In F. Culick, M.V. Heitor, J.H. Whitelaw (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. McManus, K.R., Poinso, T. and Candel, S.M., "A Review of Active Control of Combustion Instabilities," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 19, pp. 1-29, 1993.
4. Onuma, Y., Yamauchi, T., Mawatari, M., Morikawa, M. and Noda, S., "Low NOx Combustion by a Cyclone-Jet Combustor," *JSME Int.*, Vol. 44, No. 2, pp. 299-304, 2001.
5. 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.
6. Park, T.J., Hwang, C.H. and Lee, K.M., "Development of Hybrid/Dual Jet Combustor for a MGT - Part I : Experimental Study on Geometric Optimization," *Journal of The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 5, pp. 60-69, 2013.
7. Mun, S.Y., Hwang, C.H. and Lee, K.M., "Development of Hybrid/Dual Swirl Jet Combustor for a MGT - Part II: Numerical Study on Isothermal Flow," *Journal of The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 5, pp. 70-79, 2013.
8. ANSYS Fluent User's Guide (Release 13.0): ANSYS Inc., Canonsburg, PA, U.S.A., 2010.
9. Shah, N.G., "A New Method of Computation of Radiation Heat Transfer in Combustion Chambers," Ph.D. Thesis; Imperial College, University of London: England, 1979.