

스윙 예혼합 버너의 유동 및 연소특성에 관한 수치적 연구

임준석* · 이종혁** · 백광민* · 조주형*** · 김한석*** · 손채훈**†

* 세종대학교 기계공학과, ** 경원 ENC, *** 한국기계연구원

Numerical Study on the Flow and Combustion Characteristics in Swirl-Premix Burners

Jun Seok Lim*, Jong Hyeok Lee**, Gwang Min Baek*, Ju Hyeong Cho***, Han Seok Kim*** and Chae Hoon Sohn**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sejong Univ.,

** Kyungwon ENC,

*** Korea Institute of Machinery & Materials

(Received June 22, 2011 ; Revised October 10, 2011 ; Accepted October 13, 2011)

Key Words: Large Eddy Simulation(대형 와 모사), Premixed Combustion(예혼합 연소), NOx(질소 산화물), Swirl-Premix Burner(스윙 예혼합 버너)

초록: EV double cone 버너를 장착한 스윙 예혼합 연소기를 대상으로 LES 수치기법을 적용하여 연소기 내의 유동 현상과 연료/공기 혼합, 화염 거동에 대해 조사하였고, 공연비와 압력 변화에 따른 NOx, CO 농도 변화를 예측하였다. 버너에서 발생한 강한 스윙로 인해 재순환 영역이 발생하였으며, 희박 예혼합 화염은 버너 출구부터 형성되어 0.2 m 이내에 존재하는 것으로 나타났다. 상압, 공연비 38.7인 해석 조건에서 NOx 발생량은 연소기 출구에서 0.59 ppm으로 예측되었고, CO는 화염면에서 다량 생성되나 출구로 갈수록 급격히 산화되어 출구에서 5.25 ppm으로 낮게 예측되었다. 또한, NOx 배출량은 공연비가 높아질수록, 압력이 감소할수록 줄어드는 것으로 나타났다. 설계 변경을 통해 다양한 연료 공급 형태에서의 NOx 배출 특성을 조사하였으며, 5 lance-hole 분사의 경우 가장 적은 NOx 배출 특성을 보였다.

Abstract: The flow field, fuel-air mixing, and behaviors of turbulent flames have been investigated using the large eddy simulation (LES) numerical technique in a premixed swirl combustor equipped with EV double cone burners. Recirculation zones are generated by the swirl burner, and lean premixed flames are formed within a distance of 0.2 m from the tip of the burner. NOx emission of 0.46 ppm is predicted at 1 atm and an air/fuel ratio of 38.7. However, most of the CO generated in a flame front continues to be oxidized as it moves toward the exit, and CO emission of 5.45 ppm is predicted at the exit. The NOx emission can be reduced by decreasing the pressure and air/fuel ratio. The characteristics of NOx emission have been investigated through RANS simulations for various fuel injection types, and it is found thereby that five-lance-hole injection produces the lowest NOx emission rate.

- 기호설명 -

A : 빈도 지수

a : 연료 반응 지수

b : 산화제 반응 지수

D_{SW} : 버너 출구 직경

E_a : 활성화 에너지

G_M : 각 운동량

G_t : 축방향 추력

g : 중력가속도

h : 엔탈피

$J_{i,i'}$: i 번째 화학종의 i' 방향으로의 확산질량 유속

k : 열전도도

M : 분자량

m_i : 질량 분율

n : 온도지수

p : 압력

\bar{R} : 기체 상수

† Corresponding Author, chsohn@sejong.ac.kr

S	: 생성 항
S_N	: 선회도
T	: 온도
t	: 시간
u_i	: 속도
Z	: 축방향 거리
δ_{ij}	: 단위텐서
μ	: 점도
ρ	: 밀도
τ	: 응력 텐서
$\dot{\omega}_i$: 반응률

하첨자

i	: i 방향 단위벡터
j	: j 방향 단위벡터

1. 서론

최근 환경 규제가 강화됨에 따라 가스터빈 및 버너 등 대부분의 실용 연소기에 희박 예혼합 연소 방식의 적용이 활발히 시도되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 일반적으로 희박 예혼합 화염은, 연료와 공기를 균질하게 예혼합시켜 국부적인 이론 당량비 근처 조건의 연소를 피함으로써 희박한 연료 조건에서 낮은 화염 온도를 나타내므로 thermal NOx 생성을 억제하는 장점을 가지고 있다. 그러나 예혼합 화염에서의 질소산화물 생성은 혼합기 조성 및 난류 강도에 의해 결정되는 난류 연소 속도에 의해 지배되기 때문에 확산 혼합과정에 의해 지배되는 비예혼합 화염과는 달리 연소실 내의 유동 변화에 매우 민감하게 응답한다. 그 결과 화염은 매우 불규칙한 거동을 보이며, 부적절한 운전으로 인하여 연소기 내부의 소음, 과도한 압력과 및 열전달을 발생시켜 성능 저하 및 연소기의 파손을 일으키는 연소 불안정성을 초래할 수 있다.

따라서 화염과 유동의 상호 작용의 예측은 화염 안정화 및 연소실의 설계에 있어 매우 중요하다. 이와 관련된 선행연구로 손민규⁽⁴⁾는 기존의 선회연소기와 EV(En-Vironmetal) 버너를 이용한 연소 실험 결과를 서로 비교하여 EV 버너에서 NOx와 CO의 발생량이 저감하는 것을 확인하였고, 배기가스 성분과 연소기 출구 온도 및 화염 형상을 관찰하여 EV 버너의 연소특성과 희박연

소 한계 등을 분석하였다. Paschereit 등⁽⁵⁾은 EV 버너의 NOx 저감과 화염안정화를 위해 버너 내부로 분사되는 연료 유량을 조절해 NOx 배출량 또는 압력 섭동량을 20~30% 감소할 수 있음을 밝혔다. EV 버너는 희박예혼합 화염의 형성을 통해 공해 배출물을 적게 배출하도록 고안된 대표적인 가스터빈용 버너이다.

본 연구에서는 EV 버너로 발생하는 NOx를 저감시키기 위한 1단계 연구로서, LES(Large Eddy Simulation) 수치기법을 적용하여 EV 버너 내부의 평균 및 비정상 유동 현상, 난류화염 거동과 연소특성에 대해 조사하였다. 또한, 당량비 및 작동 압력에 따른 NOx 발생 특성을 예측하였고, NOx를 저감할 수 있는 방안을 모색하고자 버너의 연료 공급 패턴에 따른 NOx 발생 특성을 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 계산을 통하여 예측하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식과 화학종 방정식의 풀이를 통해 반응 유동장을 모사하였다.⁽⁶⁾ NOx 저감 방안을 모색하기 위한 계산과 과도상태 계산의 초기값으로 사용하기 위한 정상상태 계산에서는 난류 모델로 RANS $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였고, LES 모델의 아격자 모델(sub-grid scale model)로는 localized dynamic model을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \sum_i h_i J_i + \frac{\partial p}{\partial x_i} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + S_h$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_i) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(J_{i,i'}) + S_i \quad (4)$$

$$\rho = \frac{p}{RT \sum_i \frac{m_i}{M_i}} \quad (5)$$

여기에서 u_i 는 i 방향의 속도, ρ 는 유체의 밀도를 나타낸다.

예혼합 화염 해석을 위해 반응진행상수(reaction progress variable)를 정의하였으며 공간적인 혼합기의 불균일을 고려하기 위하여 혼합분율(mixture fraction)에 대한 방정식을 추가로 고려하였다. 화학 반응에 대한 난류 효과 모델로 2차원 PDF(Probability Density Function)를 이용하였으며, tri-delta 및 top-hat 형상의 PDF를 반응진행상수와 혼합분율에 대해 가정하여 각각의 분산(variance)에 대한 이송 방정식을 계산하였다.⁽⁷⁾

2.2 화학반응

LNG의 주성분인 CH_4 를 연료로 선택하였으며, 연료와 산화제의 연소 반응으로 1단계 화학반응(1-step global reaction)을 채택하였다. 이때 화학반응물은 아래의 식 (6)에 의해 계산된다. 반응에 따른 중간 생성물을 고려하기 위하여 H, O, OH, H_2 , CO에 대한 부분평형 가정을 동시에 고려하였고, 계산된 평형 값으로부터 CO의 농도를 계산하였다. 또한, 확장 Zeldovich mechanism를 고려한 thermal NOx와 Prompt NOx를 계산하였다.⁽⁸⁾

$$\dot{\omega}_i = A T^n \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) [A]^a [B]^b \quad (6)$$

A	n	E_a/R [K]	[A] [kmol/m ³]	[B] [kmol/m ³]	a, b
6.9E11	0	15,900	CH_4	O_2	1

2.3 버너 형상 및 해석조건

해석 대상인 EV 버너는 double cone 형태로 설계되어 있으며 좌우 slit을 통해 공기가 스웰을 형성하며 버너 내부로 유입된다. 버너의 좌우 slit 근처에 직경 1.5 mm의 홀이 32개씩 일렬로 배치되어 있으며, 이 홀을 통하여 연료가 공급되어 slit을 지나는 공기와 혼합되어 버너 내부로 유입된다. 버너가 장착된 연소기의 형상은 Fig. 1의 (a)와 같다. 전체 연소실 길이는 2.3 m이며 내부 직경은 0.34 m로 설계되었다. 예열되어 공급되는 공기는 75 mm 직경의 12개 홀을 가지는 격벽을 통과한 후 버너의 좌우측 slit을 통해서 균일하게 공급된다.

해석은 공연비(air/fuel ratio) 47.5와 38.7인 두

Table 1 Operating conditions of the test cases

	Air	Fuel	Air	Fuel	Air	Fuel
Mass flow [kg/s]	0.532	0.0112	0.501	0.0129	0.501	0.0129
Equivalence ratio	0.36		0.44		0.44	
A/F ratio	47.5		38.7		38.7	
Temperature [°C]	384	27	384	27	384	27
Pressure [atm]	1		1		12.4	

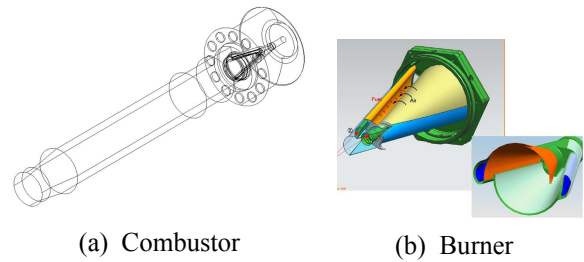


Fig. 1 3D geometries of a combustor and a burner

가지 경우에 대하여 수행하였고, 압력에 따른 NOx 배출량을 조사하기 위해 공연비 38.7인 작동 조건에 대하여 연소실 압력 1 atm, 12.4 atm의 경우를 LES로 해석하였다. 연료, 공기의 유량과 온도 및 압력에 대한 작동 및 경계 조건을 Table 1에 정리하였다. 연소실 벽면에서의 경계조건으로, 외부로의 열 손실을 고려하지 않은 단열조건을 가정하였다.

LES 계산은 RANS 계산 결과를 초기 조건으로 계산을 진행하더라도 과도 현상이 나타나기 시작하여 출구까지 유동이 한 번 빠져 나가기까지 상당한 계산 시간이 소요된다. 해석에 사용된 격자는 비정렬격자(unstructured grid)이며, 약 2,300,000개의 격자를 사용하였다. 격자 생성을 위하여 CFD-GEOM 프로그램⁽⁹⁾을 사용하였으며, 연소 해석을 위해 FVM(Finite Volume Method) 기반의 다중물리 현상 해석 프로그램인 CFD-ACE⁽¹⁰⁾를 solver로 사용하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 공연비 47.5의 LES 해석 결과 분석

1기압, 공연비 47.5 조건의 LES 결과로 버너와 연소기 내부의 유동 특성을 조사하였다.

3.1.1 유동 특성 분석

Figure 2의 (a)에 연소기 내부 유동을 나타냈고,

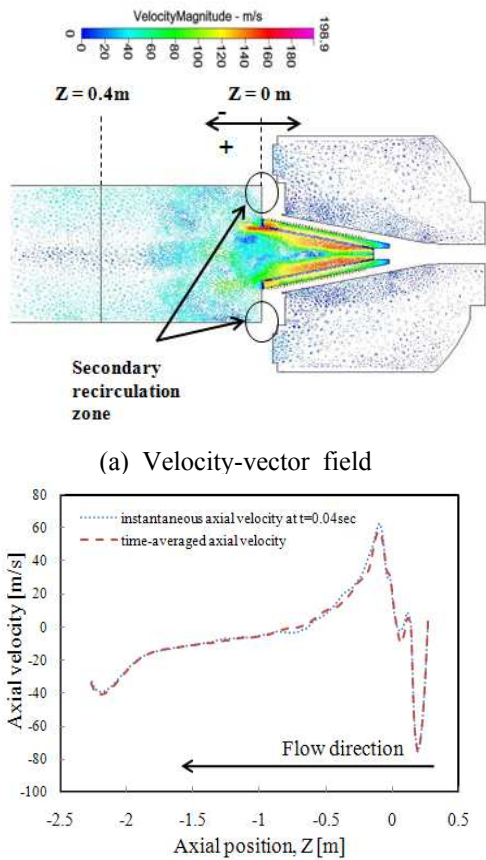


Fig. 2 Mean and instantaneous axial velocities in a burner

그때의 연소기 내부 중심을 따라 측정한 Z축 방향의 순간속도와 0.08 sec 동안 시간 평균한 속도를 (b)에 나타내었다. Double cone의 air slit로부터 유입된 공기로 인해 버너 내부에 강한 스월이 발생한 것을 알 수 있었고, 이로부터 버너 내부에서부터 출구 약 0.4 m까지 강한 재순환 영역이 나타났다. 재순환 영역에서는 축 방향이나 반경 방향으로 속도 변동이 심하게 나타났으며 재순환 영역의 평균 길이는 0.6 m 가량으로 확인되었다. 또한, 버너 출구 부분과 연소기의 내벽 사이 영역에서 2차 재순환 영역이 형성되는 것으로 나타났다. 선회도(swirl number)는 각운동량을 버너 출구의 직경과 축방향 추력으로 나눈 값으로 다음의 식과 같이 정의된다.⁽¹¹⁾

$$S_N = 2G_m / (D_{sw} G_t) \quad (7)$$

즉, 버너 출구 부분의 유동은 약 0.78 정도의

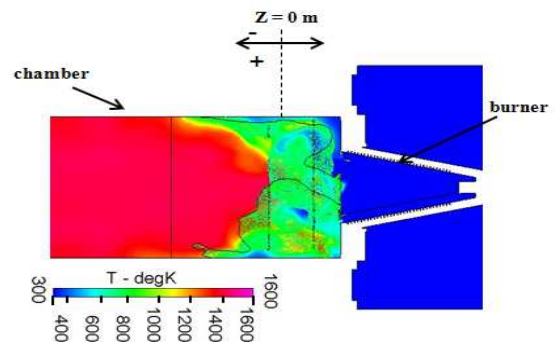


Fig. 3 Time-averaged temperature field in a combustor

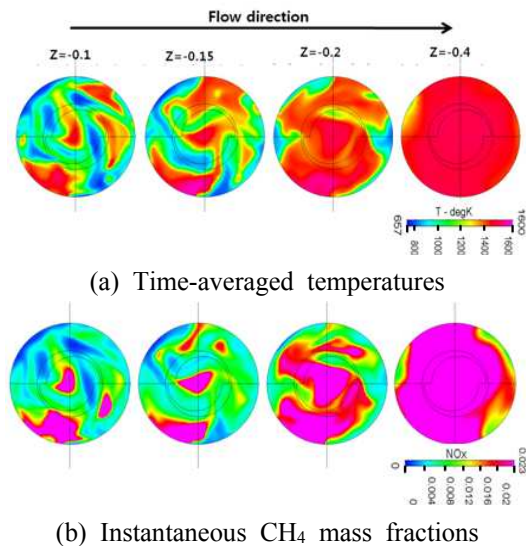


Fig. 4 Temperatures and CH₄ mass fractions at several cross-sections in a flow direction

선회도를 갖는 스월을 형성하여 일부는 연소실 내벽에 고속으로 충돌하는 경향을 보이며, 다른 일부는 나선형으로 회전하며 출구로 진행되는 양상을 보였다.

3.1.2 온도 분포 및 화염위치

Figure 3에 연소기 내부의 시간 평균 온도분포를 나타내었다. 이로부터 화염은 버너 출구부터 존재하며 버너 내부까지 전파하지 않는 것을 알 수 있다. 예혼합 화염에서 화염의 위치는 반응 진행 상수의 등위면(iso-surface)으로 표현한다. 본 연구에서는 반응 진행상수(progress variable) 값으로 0.5인 순간위치를 화염면으로 가정하였고, 개략적인 화염면의 거동을 확인한 결과, 화염면은 Z=0~0.2 m 구간에서 존재하는 것으로 판단된다.

버너의 출구로부터 0.4 m 떨어진 위치까지는 기연 gas와 미연 gas의 불균일한 분포로 인해

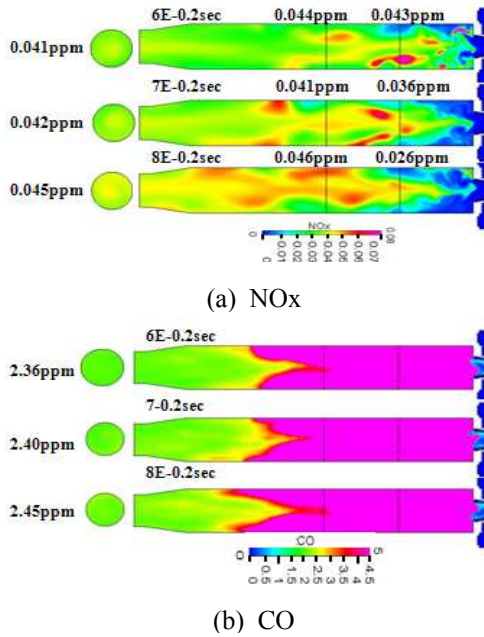


Fig. 5 Instantaneous fields of NOx and CO emissions at several times

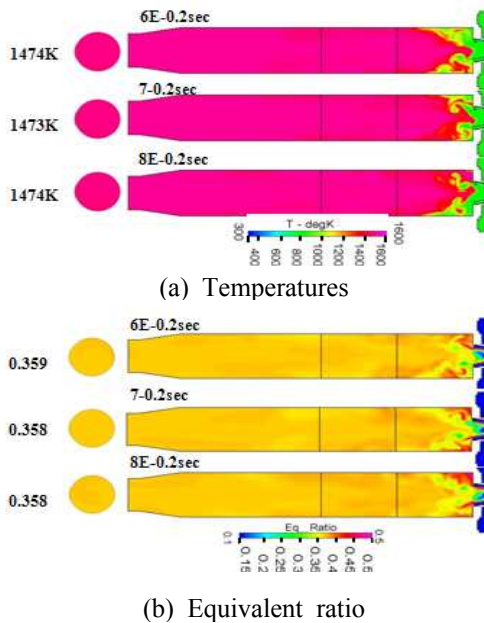


Fig. 6 Instantaneous fields of Temperature and Equivalent ratio at several times

온도분포 또한 불균일하게 나타난 것으로 판단된다. 이는 Fig. 4에 나타낸, 유동 진행방향에 따른 시간 평균 온도와 혼합분율 분포를 통해서 확인할 수 있다.

3.1.3 배기가스 배출 특성

LES 계산에서 NOx와 CO의 평균 발생량을 예

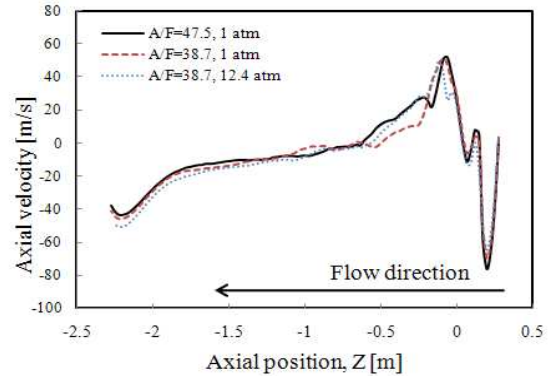


Fig. 7 Axial velocities in a burner for several operating conditions

측하기 위해서는 유동이 2~3회 연소기 출구를 빠져나가는 충분히 긴 시간동안 배기가스 발생량을 평균해야 한다. 하지만 이러한 평균을 계산하기 위해서는 상당히 많은 시간이 소요되므로, 이를 대신하여 본 연구에서는 연소기 내부 유동 진행 방향으로 3개의 위치를 선정하여 해당 위치에서의 배기가스 농도를 계산하였다. 버너 출구로부터 0.5, 1 m 및 연소기 출구에서 NOx와 CO의 농도, 평균 온도 및 평균 당량비를 계산한 결과를 Figs. 5, 6에 나타냈다.

계산 초기에는 화염부에서 생성된 NOx가 출구까지 도달하지 않아 출구에서 NOx 농도가 매우 낮았으며 약 0.08 sec 경과 후 0.045 ppm 정도에 달하였다. 이 시점에, NOx량은 연소기 출구로 진행되는 동안 농도 변화가 거의 없었다. NOx와 달리 CO는 화염면 근처에서 다량 발생하나 출구로 진행되는 동안 대부분 산화되어 농도가 급격히 낮아지는 특성을 보였으며, 출구에서 약 2.45 ppm 정도로 나타났다.

3.2 공연비와 압력의 효과 분석

공연비 효과를 분석하기 위해 1기압에서 두 가지 공연비 38.7과 47.5 조건에 대해 계산을 수행하였다. 또한, 압력효과를 보기 위해서 공연비 38.7에 대해 두 가지 압력, 1기압과 12.4기압 조건에 대한 계산을 수행하였다.

3.2.1 유동 특성 분석

모든 계산 결과에서 버너 중심에 강한 재순환 영역이 발생한 것으로 나타났으며, 그 길이는 버너 출구로부터 0.5 m 내외이나, Fig. 7에서 보듯 조건에 따라 다소 차이가 있다. 버너 이후의 연

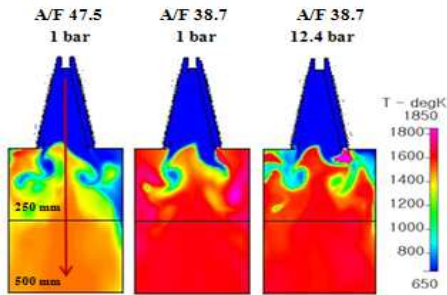


Fig. 8 Temperature fields for several operating conditions

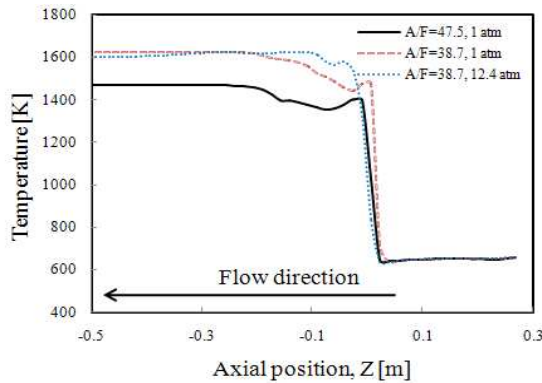


Fig. 9 Time-averaged temperature along the centerline of a combustor for several operating conditions

소실 내부 유동은 화염 위치 및 열 방출률(heat release rate)의 영향으로 조건에 따라 다른 특성을 보이나, 버너 내부의 특성은 조건에 따라 크게 달라지지 않았다. 이와 같은 결과로 미루어 버너 내부는 외부 화염의 영향을 크게 받지 않는 것으로 보인다. 따라서 화염이 버너 내부에 존재하지 않을 경우 혼합 특성 예측 시 화학반응을 고려하지 않더라도 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

3.2.2 온도 분포

각 해석 조건에 따른 온도장과 순간 화염 위치를 Fig. 8에 나타냈으며, 연소기 내부 중심을 따라 측정된 온도분포를 Fig. 9에 나타내었다. 공연비 47.5인 경우 화염온도는 1450 K, 공연비 38.7인 경우는 1600 K으로 계산되었다. 순간 화염 위치는 반응진행상수 0.5인 위치로 가정하였으며, 세 경우 모두 버너의 바깥쪽에 화염이 형성되었다. Fig. 8에 나타낸 순간 화염의 형상으로부터 공연비 47.5에서의 화염의 두께가 가장 두꺼움을

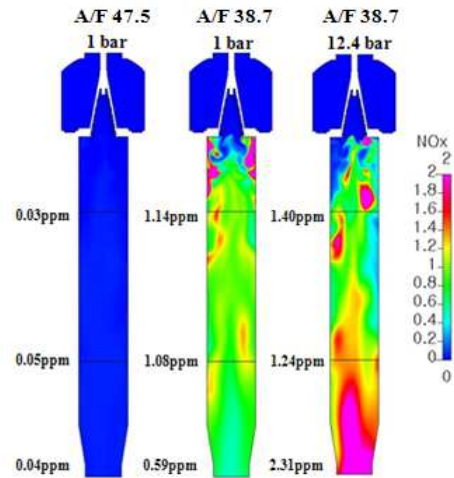


Fig. 10 Instantaneous fields of NOx emission for several operating conditions

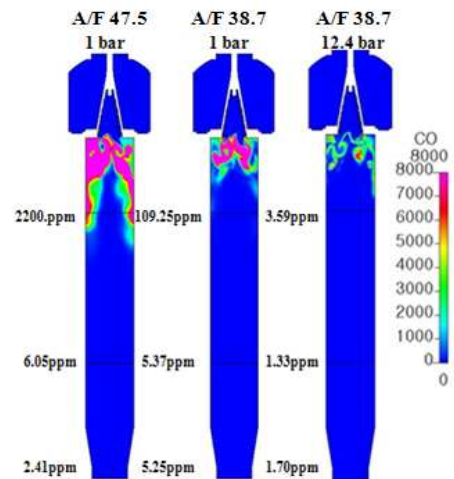


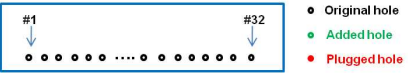



Fig. 11 Instantaneous fields of CO emission for several operating conditions

알 수 있다. 공연비가 높을수록 당량비가 낮아지므로 화염이 두꺼워지는 것으로 판단된다. 동일한 공연비 38.7에 대해 압력 조건을 달리하여 계산한 결과, 압력의 변화는 화염 온도에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

3.2.3 NOx 및 CO 발생

각 해석 조건에 따른 NOx 방출량에 대한 결과로 동일한 시간(0.08 sec)에서의 순간 NOx 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 기준보다 높은 공연비인 47.5의 경우 NOx 농도가 0.03~0.04 ppm으로 매우 낮게 나타났으며, 동일한 압력조건에서 공연비 38.7인 경우 0.59~1.14 ppm 정도의 NOx 발생량을

Table 2 Test cases with design modifications of the burner

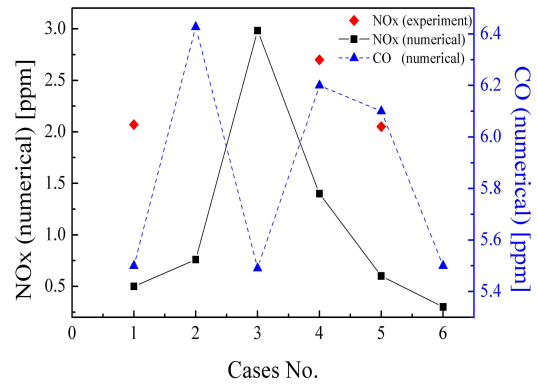
case 1	 <p>● Original hole ● Added hole ● Plugged hole</p> <p>baseline design</p>
case 2	 <p>8 holes added between the 16th and the 24th hole</p>
case 3	 <p>8 holes closed from the 1st to the 8th hole</p>
case 4	 <p>4 holes closed from the 1st to the 4th hole + the 23rd and the 24th hole closed</p>
case 5	3 holes added for lance injection (3 % of fuel amount)
case 6	5 holes added for lance injection (5 % of fuel amount)

보였다. 높은 공연비로 인하여 NO_x 농도가 매우 낮게 나타난 결과는 이론적으로 타당하다. 공연비 38.7의 고압 조건의 경우는 1.40~2.31 ppm 정도의 NO_x 발생량을 보였다. 즉, 일정한 공연비에서, 고압일 때 상압에 비하여 NO_x 발생량이 증가하였다. 일반적으로 일정한 당량비에서, 압력이 증가할수록 NO_x 발생이 증가하는 것으로 알려져 있으며, 이는 화염 온도가 높은 경우에 적용된다.⁽⁸⁾

CO의 분포를 Fig. 11에 나타내었다. 초기 화염면에서 2000 ppm 이상의 CO가 발생하나 연소기 내 체류 시간동안 대부분 산화되어 연소기 출구에서 세 가지 해석조건 모두 6 ppm 이하의 낮은 CO 농도가 예측되었다. 동일 압력에서 공연비가 높을수록 CO 발생이 낮게 예측되었으며, 압력이 높을 경우 CO량이 감소하였다. 이는 기존에 알려진 이론적 사실과 잘 부합한다.

3.3 RANS 해석을 통한 NO_x 저감 방안 검토

NO_x의 저감을 위해서는, 국부적으로 당량비가 높은 영역에서 연소가 발생하여 화염온도가 높아지는 열점(hot spot)을 줄여야 하기 때문에, 연료

**Fig. 12** NO_x and CO emissions in several cases

와 공기의 혼합 성능을 높여야 한다. 이를 위하여 기존의 연료 공급 홀(64개)을 국부적으로 개폐하는 설계 변경을 통하여 연료의 혼합 특성 및 NO_x 발생 특성을 조사하였다. 또한 버너의 중심부에서 일부의 연료를 분사(lance injection)시킨 경우에 대하여 혼합 특성 및 NO_x 발생 특성을 P 살펴보았다. 각 설계 변경의 경우를 Table 2에 나타내었다. 설계 변경의 방향성을 찾기 위해서는 상대적으로 적은 계산 시간이 소요되는 RANS를 수행하였고, 계산 결과를 가용한 실험 결과와 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 수치 해석과 실험 결과사이의 NO_x 발생량은 약 4배 정도 차이를 보이지만 정성적인 경향성은 유사하게 나타났다. 따라서, 의도했던 대로 수치해석을 통해 설계 변경의 방향성을 잡을 수 있다고 판단된다.

전체 연료 홀에서 동일한 연료량이 공급되는 경우(case 1)에 비교적 낮은 NO_x 발생 특성을 보였다. Case 2의 경우, NO_x의 농도가 증가하였다. 이는 연료와 공기의 혼합특성이 좋지 못해 국부적으로 높은 화염 온도를 야기하는 혼합기가 연소되고 있음을 나타낸다. Case 3 또한 균일하게 분사된 경우에 비하여 5배 이상의 NO_x가 발생하였다. 1~8번 홀을 막으면 나머지 홀에서 약 20% 정도의 연료 분사량이 증가하여 상대적으로 중심부와 버너의 벽면부의 연료 농도 차가 심해지고, 특히 버너의 벽면부에서 연료 농도가 높아지는 현상을 보여 전체적으로 연료 공기간의 혼합도를 떨어뜨리는 것으로 판단된다. Case 4의 경우, 8개의 홀을 막은 경우보다 NO_x 발생특성이 크게 달라짐을 알 수 있다. 버너 중심부의 연료 농도를

감소시키기 위해 1~4번 홀을 막았으나 동시에 23, 24번 홀을 막아 버너의 벽면에서 연료 농도를 약간 저감시키는 효과가 있는 것으로 판단된다.

Lance injection을 사용한 경우 버너 출구에서 NOx 발생량이 저감되었다. 이는 버너의 중심에서 상대적으로 당량비가 낮아 혼합도가 악화되는 단점을 중앙에서 연료를 분사하여 보완하였기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

EV double cone 버너에 대한 LES 연소 해석을 수행하여 유동 특성, 온도분포, NOx 및 CO 배출량 특성에 대해 분석하였고, 당량비와 압력 변화의 효과를 비교 분석하였다. 또한 화염 형상의 시간에 따른 변화를 예측하였으며, 평균 화염이 존재하는 위치를 예측하였다. 버너의 설계 변경을 통하여 연료 공급 패턴에 따른 NOx 발생 특성을 RANS 연소 해석을 통해 예측하였다.

공연비 47.5인 경우 0.04 ppm 이하의 NOx 발생 농도를 보였으며, 공연비 38.7인 경우에도 0.59 ppm 이하의 낮은 NOx 농도를 보였다. 고압의 경우 상압에 비해 NOx 발생이 증가하는 특성을 보였으며, 이에 대한 실험적 검증이 추가적으로 필요하다.

다양한 연료 공급 형태에서 NOx 배출 특성을 조사하였다. 64개(양쪽에 32개씩)의 연료 홀에서 균일하게 연료를 공급하고 5 lance-hole 분사의 경우 가장 작은 NOx 배출 특성을 보였으며, 1~8번 홀을 막은 경우 가장 많은 NOx 발생 특성을 보였다. Lance-hole 분사를 이용할 경우 NOx 배출량이 저감된 점은 주목할 만하다. 본 결과를 바탕으로 향후에는 NOx를 저감할 수 있는 상세한 설계 변경안을 도출하여 수치해석 및 실험을 통해 검증하고자 한다. 또한, 검증된 설계안을 실제 산업 현장에 적용하고자 한다.

후 기

본 연구는 부분적으로 2011년도 지식경제부와 한국에너지기술평가원의 지원(과제명: 100 MW급 가스터빈 upgrade 적용 열유동/연소 해석 및 연소

시스템 운영 기술 개발)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Peter, F., Martin, Z., Rudolf L., Stefano, B. and Christian, M., 2007, "Development and Design of Alstom's Staged Fuel Gas Injection EV Burner for NOx Reduction," *ASME Turbo Expo*, GT2007-27730.
- (2) Fernando, B. and Felic, G., 2007, "Effect of Pressure and Fuel-Air Unmixedness on NOx Emissions from Industrial Gas Turbine Burners," *Combustion and Flame*, Vol. 151, pp. 274~288.
- (3) Yu, J. H., Kim, B. G. and Chang, Y. J., 2008, "LES Modeling Study on the Characteristics of NOx Emissions in a Lean Premixed Combustor implementing LES Model," *KSME spring conference*, pp. 381~386
- (4) Son, M. G., 2001, "The Low NOx characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *KSME spring conference*, pp. 66~70.
- (5) Paschereit, C. O., Schuermans, B. and Buche, D., 2003, "Combustion Process Optimization Using Evolutionary Algorithm," *ASME Turbo Expo*, GT-38393
- (6) Linán, A. and Williams, F. A., 1993, "Fundamental Aspects of Combustion," Oxford University Press, pp. 9~13.
- (7) Bengtsson, K. U. M., Benz, P., Schären, R. and Frouzakis, C. E., 1998, "NyOx formation in lean premixed combustion of methane in a high-pressure jet-stirred reactor," *Symposium (International) on Combustion*, Volume 27, pp 133~139.
- (8) Turns, S. R., 2000, "An Introduction to Combustion," Mc-Graw Hill, pp. 472~507.
- (9) CFD-GEOM User's manual V2009, 2009, ESI Group.
- (10) CFD-ACE User's manual V2009, 2009, ESI Group.
- (11) Lefebvre, A. H., 1999, *Gas Turbine Combustion*, Taylor & Francis, pp 127~128.