

스윙 예혼합 버너의 연소 특성 및 NO 배출에 관한 수치적 연구

백광민* · 조천현* · 조주형** · 김한석** · 손채훈**†

* 세종대학교 기계공학과, ** 한국기계연구원

Numerical Study of Combustion Characteristics and NO Emission in Swirl Premixed Burner

Gwang Min Baek*, Cheon Hyeon Cho*, Ju Hyeong Cho**, Han Seok Kim** and Chae Hoon Sohn**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sejong Univ.

** Korea Institute of Machinery & Materials

(Received March 25, 2013 ; Revised August 24, 2013 ; Accepted August 29, 2013)

Key Words: Gas Turbine(가스터빈), Premixed Combustion(예혼합 연소), NO_x Emission(질소산화물 배출), Swirl Premix Burner(스윙 예혼합 버너), Unmixedness(비혼합도)

초록: Double cone 버너를 장착한 가스터빈용 EV (Environmental Vortex)버너의 연소 특성과 NO 배출 특성을 수치적으로 조사하였다. NO 배출 저감을 위해 연료와 공기의 혼합 특성을 예측하였다. 혼합도와 NO 배출과의 상관관계를 예측하기 위해 메탄 1단계 화학반응식과 2단계 반응식에 적용하여 연소 해석을 수행하였다. 1단계 반응식을 적용한 결과, 혼합도가 저하된 모델에서 NO 배출량이 약 2% 증가하였으며, 혼합도가 향상된 모델의 경우 cone 상부에서 과도한 고온의 화염 영역이 형성되어 NO가 약 169%나 증가하였다. 2단계 반응식의 경우 첫 번째 모델에서 약 3% NO 배출량이 증가하였으며, 두 번째 모델에서 cone 내부의 고온 영역이 형성되지 않고 NO가 약 5% 감소하였다. 이 결과는, 혼합 특성이 저감된 모델에서 NO가 약 63% 증가하였고, 혼합 특성이 향상된 모델에서 NO가 약 11% 감소한 실험결과와 잘 부합하였다. 정량적인 오차가 있음에도, NO 배출의 정성적 경향성이 유사하므로 2단계 반응식을 적용한 수치해석을 통해 설계 변경 방안을 제시하는 것은 타당할 것으로 판단된다.

Abstract: The combustion characteristics of an EV (Environmental Vortex) burner (double-cone burner) adopted in a gas turbines are numerically investigated. The mixing of fuel and air is analyzed for reduction of NO emission. To predict the correlation between NO emission and fuel-air mixedness, 1-step and 2-step chemistry models are adopted. The results calculated by 1-step chemistry showed that NO emissions increased by 2% in the case of degraded mixedness and by 169% in the case of improved mixedness, where the temperature in the flame zone was overestimated upstream of the cone. However, the corresponding results calculated by 2-step chemistry showed that NO emission increased by 3% and decreased by 5%, where the flame zone was not formed inside the cone. The latter results agree well with the experimental ones indicating an increase of 63% and decrease of 11% in the respective cases. Despite quantitative errors, NO emissions can be predicted reasonably by the application of the 2-step chemistry model adopted here and design modification of burner for NO reduction can be proposed based on the numerical data.

- 기호설명 -

A : 빈도 지수

a : 연료 반응 지수

b : 산화제 반응 지수

D : 직경

E_a : 활성화 에너지

g : 중력가속도

h : 엔탈피

$J_{k,i}$: k 번째 화학종의 i 방향으로의 확산질량 유속

k : 열전도도

K : 반응 속도 상수

M : 분자량

m : 질량 분율

n : 온도지수

† Corresponding Author, chsohn@sejong.ac.kr

- p : 압력
- \bar{R} : 기체 상수
- S : 생성 항
- T : 온도
- t : 시간
- u_i : 속도
- W : 축 방향(Z 방향) 속도
- Z : 축 방향 거리
- δ_{ij} : 단위텐서
- μ : 점도
- ρ : 밀도
- τ : 응력 텐서
- $\dot{\omega}_k$: 반응률

하첨자

- f : 정반응
- i : i 방향 단위벡터
- j : j 방향 단위벡터
- k : k 번째 화학종
- r : 역반응

1. 서 론

천연가스는 점차 강화되는 환경 규제를 만족시킬 수 있는 고효율 에너지원의 하나로서 주목받고 있는 연료이다. 천연가스로 작동하는 실용 연소기는 배기가스 발생량이 적으며 출력당 가장 적은 이산화탄소를 배출한다. 그러나, 천연가스는 상대적으로 낮은 화염온도에도 불구하고 이론혼합비 근처에서는 높은 온도 영역이 형성됨으로 인해 다량의 질소 산화물 (NO_x)이 발생할 수 있으며, 이는 광화학 스모그, 산성비의 원인이 되는 것으로 알려져 있다.

이러한 질소 산화물 저감을 위하여 가스터빈 연소기와 같은 대부분의 실용 연소기에 희박 예혼합 연소방식의 적용이 활발히 적용되어왔다.^(1~3) 일반적으로 희박 예혼합 화염은 연료와 공기를 균일하게 예혼합하여 국부적인 연료 과농영역을 줄여 낮은 화염 온도로 thermal NO_x 생성을 억제하는 특징을 가지고 있다. 그러나 예혼합 화염은 혼합기 조성 및 난류 강도에 의해 결정되는 난류 연소 속도에 지배되기 때문에 연소실 내의 유동 변화에 매우 민감하게 반응한다. 화염과 유동의 상호 작용의 예측은 화염 안정화 및 연소실 설계

에 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 화염 안정성을 개선하기 위해 적용되는 선회유동은 화염기부에 재순환 영역을 형성하여 축 방향 유속을 낮추기 때문에 화염부상을 억제하며 재순환 영역의 고온 생성물이 미연 혼합기를 예열하여 화학 반응을 촉진시키는 특징을 가지고 있다. 본 연구의 대상인 EV(Environmental Vortex) 버너는 화염 안정성을 개선하기 위해 double cone 스윙 인젝터를 사용한다. Paschereit 등⁽⁴⁾은 EV 버너의 NO_x 저감과 화염안정화를 위해 버너 내부로 분사되는 연료 유량을 조절해 NO_x 배출량 또는 압력 섭동량을 20~30% 감소할 수 있음을 밝혔다. 또한 EV 버너 내부에 lance hole을 삽입하여 화염 형성 영역에 연료를 분사하여 화염을 안정화시킴으로써 연소 소음 및 NO_x 배출량을 감소시켰다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 EV 버너의 NO_x 저감을 위한 설계 변경안을 마련하기 위해 일차적인 방법으로 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 수치기법을 적용하였다. 화학반응 모델의 영향을 살펴보기 위해 두 가지 메탄 화학반응식을 적용하여 이에 따른 EV 버너 내부의 연료-공기 혼합 특성, 화염 형성, 연소특성 및 NO 배출 특성을 예측하고 설계변경 방안을 제안하였다.

2. 수치 해석 방법

2.1 지배 방정식

본 연구에서는 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식과 화학종 방정식, 상태방정식의 풀이를 통해 모형 연소기내 화학반응 유동장을 모사하였다.⁽⁶⁾

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_i h_i J_i + \frac{\partial p}{\partial x_i} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + S_h \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_k) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(J_{k,i}) + S_k \quad (4)$$

$$\rho = \frac{p}{RT \sum_k \frac{m_k}{M_k}} \quad (5)$$

여기에서 u_i 는 i 방향의 속도, S_k 는 화학 반응, 복사, 체적력 등에서 추가적으로 고려되는 소스 항을 나타낸다.

EV 버너의 경우 예혼합 화염의 형태를 보이나, 연료와 공기가 완전히 예혼합되지 않은 상태에서 개별적으로 분사된 후, 연료와 공기가 혼합되므로 공간적으로 불균일한 혼합도를 보이게 된다. 본 연구에서는 단순화된 난류 연소 모델로 유한화학 반응과 에디 소산 모델(eddy dissipation model)이 결합된 finite-rate/eddy-dissipation 모델을 사용하였다.^(6,7) 위 모델은 각각 Arrhenius 형태의 식과 난류에 의한 연료와 공기가 혼합되는 정도에 따라 결정되는 반응률 식이며, 둘 중에 느리게 일어나는 반응률 모델을 선택한다. 주로 finite-rate은 반응 초기에 선택되며, 반응이 안정화된 후에는 eddy-dissipation 모델이 선택된다. eddy dissipation model은 난류에 의한 연료와 공기 혼합 모델의 일종이다.

2.2 화학반응

LNG가스의 주성분인 메탄(CH₄)을 연료로 가정하였으며, 메탄 1단계 총체 화학 반응을 식 (6)에 나타내었으며 화학 반응률은 식 (7)에 의해 계산된다.



$$w_k = AT^n \text{Exp}\left(-\frac{E_a}{RT}\right) [A]^a [B]^b \quad (7)$$

| A | n | E_a/R [K] | [A] | [B] | a | b |
|-----------------------|-----|-------------|-----------------|----------------|-----|-----|
| 1.86×10^{14} | 0 | 24154 | CH ₄ | O ₂ | 1 | 1 |

메탄 2단계 화학반응은 식 (8-9)에 나타내었으며, 화학 반응률은 식 (7)에 의해 계산된다.⁽⁸⁾



| A | n | E_a/R [K] | [A] | [B] | a | b |
|---------|-----|-------------|-----------------|----------------|-----|------|
| 4.56E11 | 0 | 20,087 | CH ₄ | O ₂ | 0.2 | 1.3 |
| 3.13E12 | 0 | 24,417 | CO | O ₂ | 1.5 | 0.25 |

Thermal NO는 공기 중의 질소 성분이 연소 중 산화하여 발생하는 것으로 다음과 같은 Zeldovich 메커니즘을 통하여 생성된다.⁽⁹⁾



NO의 생성량은 NO 발생으로 인한 열 발생을 무시 할 수 있고 유동 결과에 영향이 없다는 가정하에 ANSYS-Fluent⁽⁷⁾ code 내부 후처리를 통하여 계산하였다. NO의 발생은 위에서 말한바와 같이 유동과 온도에 영향을 미치지 않으므로 연소 해석 결과로부터 후처리 식을 통해 NO를 계산하여도 해석에 대한 정량적인 경향성과 실험과의 정성적인 경향성을 파악할 수 있다. 따라서 설계 변경에 대한 NO의 증감을 파악할 수 있으며 NO 저감을 위한 설계변경을 제안할 수 있다. thermal NO의 생성률은 식 (13)을 통해 계산하였으며, 식 내부의 [O] 화학종과 [OH] 화학종은 code 내부 후처리 식을 통해 계산된다.⁽⁷⁾

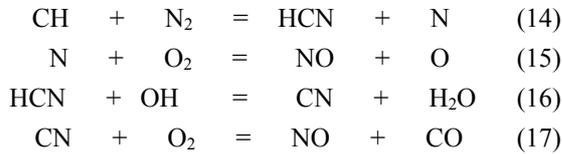
$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_{f,1}[\text{O}][\text{N}_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{r,1}k_{r,2}[\text{NO}]^2}{k_{f,1}[\text{N}_2]k_{f,2}[\text{O}_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{r,1}[\text{NO}]}{k_{f,2}[\text{O}_2] + k_{f,3}[\text{OH}]}\right)} \quad (13)$$

Prompt NO의 생성 메커니즘은 탄화수소 연료의 화학반응과 밀접하게 연결되어 있다. Prompt NO의 일반적인 메커니즘을 살펴보면, 탄화수소 활성기(CH)가 분자 상태의 질소(N₂)와 반응하여 아민(CN)이나 시안화수소(HCN)를 생성시키고, 시

Table 1 Thermal NO reaction rate constant

| Forward reaction [m ³ /mol-s] | | Backward reaction [m ³ /mol-s] | |
|---|-------------------------------------|--|---------------------------------------|
| $k_{f,1}$ | $1.8 \times 10^8 e^{(-38370 / T)}$ | $k_{r,1}$ | $3.8 \times 10^7 e^{(-425 / T)}$ |
| $k_{f,2}$ | $1.8 \times 10^4 T e^{(-4680 / T)}$ | $k_{r,2}$ | $3.81 \times 10^3 T e^{(-20820 / T)}$ |
| $k_{f,3}$ | $7.1 \times 10^7 e^{(-450 / T)}$ | $k_{r,3}$ | $1.7 \times 10^8 e^{(-24560 / T)}$ |

안화수소가 다른 화학종의 연쇄반응에 첨가되어 NO를 생성시킨다.



Thermal NO와 동일한 조건하에서 연소 해석 후, 그 결과로부터 prompt NO의 생성률을 다음의 식으로 계산하였다.

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = k_{pr} [\text{O}_2]^a [\text{N}_2] [\text{FUEL}] \text{Exp}^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (18)$$

$$\left(k_{pr} = 1.2 \times 10^7 \left(\frac{RT}{p} \right)^{a+1} \right)$$

여기서 E_a 는 251,151 J/mol이며 a 는 산소 반응 차수이다.

또한, 연료가 희박하고 ($\Phi < 0.8$)이며 저온인 조건에서 중요한 N_2O 중간 생성물 메커니즘을 고려하였다.⁽¹⁰⁾

2.3 버너 형상 및 기본/시험 모델

해석 대상인 EV 버너와 연소기의 형상과 3가지 해석 모델을 Figs. 1, 2에 각각 나타내었다. 연소기 전체 길이는 2.3 m이며 wind box 하부에 위치한 직경 75 mm의 12개 홀에서 공기가 공급되어 좌우 slot 통해 스윙을 형성하며 cone 내부로 유입된다. slot 후방에 연료가 공급되며 공기와 cone 내부에서 예혼합이 이루어진다.

EV 버너의 기본 설계 모델인 case 0의 경우 slot 후방에 직경 1.5 mm인 32개 홀이 등간격으로 배치되어 있다. 이와 다른 시험 모델인 case 1의 경우 연료 홀의 개수를 42개로 변경하고 연료 홀 직경은 1.3 mm로 축소하여 연료의 균일성 증가시킨 설계 변경 모델이며 화염 안정화를 위한 설계 변경 모델인 case 2에서는 기준이 되는 EV 버너 상부에 연료를 분사 할 수 있는 lance injection hole을 3개 추가하였다. 해석에 사용된 격자는 다면체 격자(polyhedral grid)이며 연소 해석을 위해 ANSYS-Fluent⁽⁷⁾를 solver로 사용하였다. 정상 상태 해석을 수행하였으며, realizable $k - \epsilon$ 난류 모델을 사용하였고, 공기의 공급 온도는 647K, 연료의 공급 온도는 300K이며 공기와 연

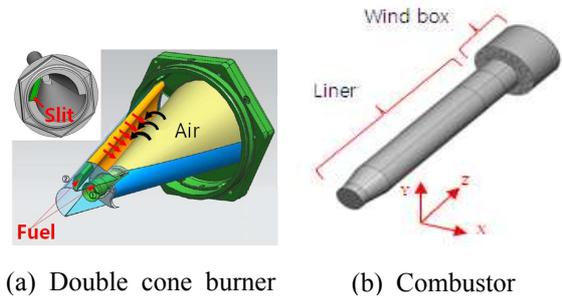


Fig. 1 Three dimensional geometries of double cone burner and a combustor

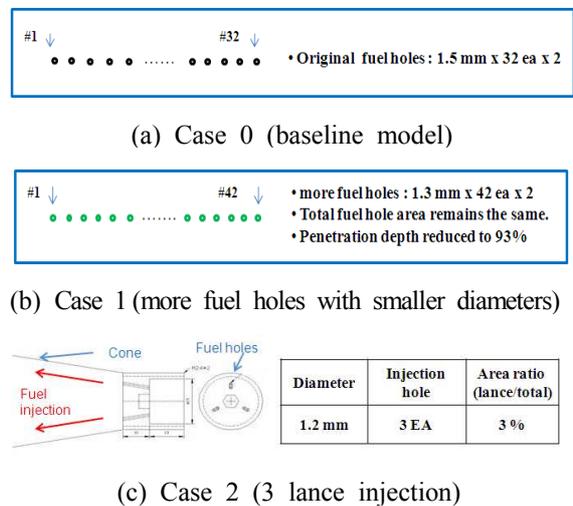


Fig. 2 A baseline and test model cases of the burner for simulation

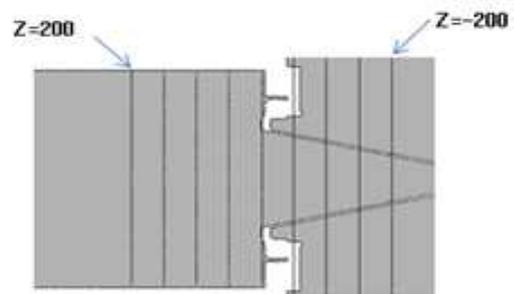


Fig. 3 Monitoring planes for fuel and air mixing

료의 유량은 각각 0.5kg/s, 0.014kg/s로서 공기 연료비(A/F ratio)는 35.7(당량비 0.48에 해당)로 설정하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 혼합 특성 분석

연료와 공기가 부분적으로 예혼합될 경우 국부

적으로 더 농후한 영역과 희박한 영역이 형성된다. 연료 과농 영역의 형성은 고온의 연소 영역의 증가로 thermal NO_x의 증가를 초래한다. Cold flow(비반응 유동) 계산을 통해 기본 모델과 다른 2가지 시험 모델에 대한 NO_x 배출 경향성을 예측하였다. Figure 3에 나타낸 것과 같이 cone 상류 Z=-200 mm 위치부터 liner 내부 Z=200 mm 영역에 대하여 50 mm 간격으로 혼합 특성을 조사하며, 혼합 특성 향상의 정도를 판정하기 위해 ‘수정된 비혼합도(modified unmixedness)’를 도입하고자한다. 기존의 연구에서는 비혼합도(unmixedness) 계산시에 혼합 분율의 섭동값을 변수로 사용하였다.⁽¹¹⁾ 그러나, 본 연구에서처럼 정상 상태(steady state) 유동장 결과로부터 혼합특성을 파악하기 위해서는 혼합도를 이용할 수 없으며(섭동값을 평가할 수 없으므로) 이에 따라 아래의 비혼합도식을 제안하였다.

$$M = \frac{(f - f_{aver})^2}{f_{aver}(1 - f_{aver})} \quad (19)$$

여기서 f 는 연료의 혼합 분율(mixture fraction)이며, f_{aver} 은 혼합 분율의 각 조사평면에서의 면적 평균값이다. 비혼합도 값이 작을수록 연료와 공기의 혼합 특성이 향상된 것, 즉 더 균일하게 혼합됨을 의미한다. 먼저, 비반응 유동 해석을 수행하여, 기본 및 두가지 시험 모델에 대한 수정된 비혼합도 값을 축방향 위치에 따라 구하여 Fig. 4에 나타내었다. Lance injection을 적용한 시험 모델인 case 2의 경우, cone 중앙에 연료를 분사하여 버너 내부의 혼합 특성이 향상된 것으로 판단

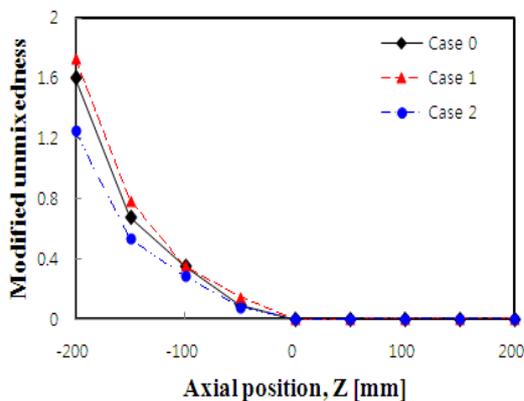


Fig. 4 Area-averaged values of modified unmixedness on each monitoring plane as a function of axial position

된다. 그러나, 연료를 균일성 향상을 위해 시도된 case 1의 경우, 연료 홀의 증가로 벽면에서의 연료 분포가 증가하고 공기의 swirl에 의한 연료의 cone 내부 혼합이 저하되어 혼합도가 저감된 것으로 판단된다.

3.2 유동 및 연소 특성 분석

다음으로 시험 모델에 대한 연소 해석을 수행하였다. 연소실 벽면 경계 조건을 외부로의 열손실을 고려하지 않은 단열 조건으로 가정할 경우 연소실 내부 온도가 과도하게 증가하여 NO 발생량 예측에 큰 오차가 포함될 것으로 판단되어 복사 열전달과 외부로의 열 손실을 고려하여 연소 해석을 수행했다. 복사모델로는 구분종좌법(discrete ordinate method)을 사용하였으며, 연소 배기가스는 비회색체 매질로 가정하였다. 배기가스의 방사율과 흡수율은 각각 0.85, 0.2로 설정하였고 입구와 출구부분의 경계 조건은 흑체(black body)로 가정하였다. 외부로의 열 손실은 복사 열손실과 대류 열손실을 고려하였으며, 이때 방사율은 표면 온도와 거칠기를 고려하여 결정하였다. 대류 열전달 계수는 $h=40\text{W/K}\cdot\text{m}^2$ 로 가정하였다.^(12,13)

3.2.1 연소 특성: 메탄 1단계 반응식 적용

1단계 화학 반응식을 적용한 수치해석 결과로부터 축 방향 속도, 연소실내 온도 분포를 구하여 Figs. 5~6에 나타내었다. 기존 EV 버너와 설계 변경 모델 모두 liner 내부 Z=500mm까지 강한 내부 재순환 영역을 형성하였다.

Case 0와 case 1의 경우 cone 내부에서부터 재순환 영역이 형성되며 재순환 영역 전면에 화염

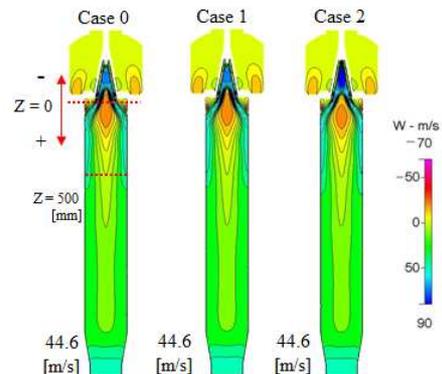


Fig. 5 Mean axial-velocity fields in a combustor (with 1-step global reaction for CH₄)

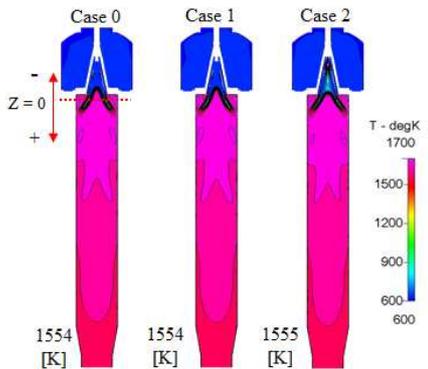


Fig. 6 Mean Temperature fields in a combustor(with 1-step global reaction for CH₄)

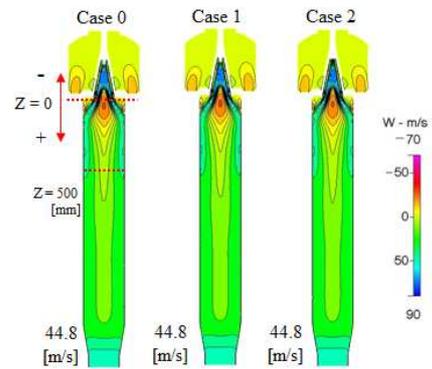


Fig. 8 Mean axial-velocity fields in a combustor(with 2-step global reaction for CH₄)

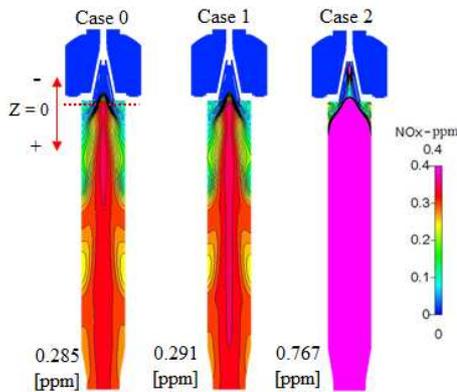


Fig. 7 Mean NO fields in a combustor(with 1-step global reaction for CH₄)

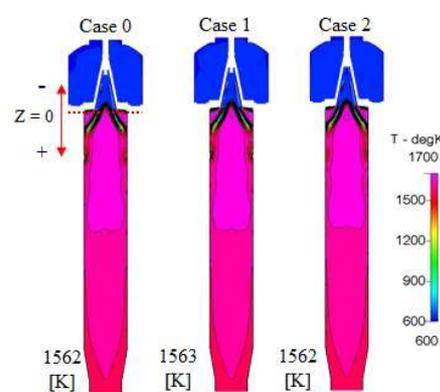


Fig. 9 Mean Temperature fields in a combustor(with 2-step global reaction for CH₄)

이 형성되지만, 세 개의 lance hole을 적용한 case 2의 경우 버너 출구 (Z=0)에서부터 재순환 영역이 형성되기 시작하였다. 또한, cone 내부에서 1차 화염이 형성되며 주 화염은 내부 재순환 영역 전면에서 형성되었다. 연소 해석 결과로부터 기본/시험 모델에 대한 NO 발생 예측 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 혼합 특성이 저감된 case 1의 경우 버너 출구에서 NO 배출량이 약 2% 증가하였다. 혼합 특성이 향상되어 NO가 저감될 것으로 예측된 case 2의 경우 오히려 버너 출구에서 NO 배출량이 162%나 증가하여 세 가지 모델 중 가장 많은 NO 배출 특성을 보였다.

3.2.2 연소 특성: 메탄 2단계 반응식 적용

동일한 조건하에서 메탄 2단계 반응식에 대한 수치해석을 수행하였으며 축 방향 속도, 연소실 내 온도 및 NO 분포를 Figs. 8~10에 나타내었다. Case 0와 case 1의 경우 1단계 반응식과 유사한 축 방향 유동 특성을 나타내었으며 case 2의

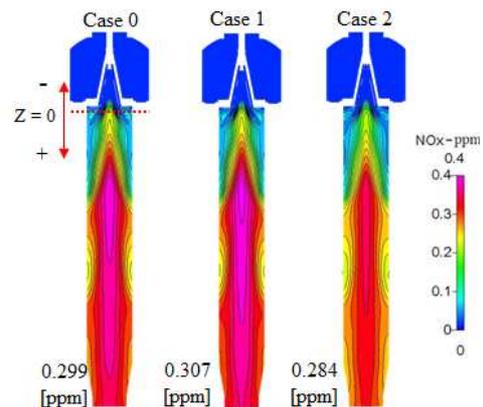


Fig. 10 Mean NO fields in a combustor(with 2-step global reaction for CH₄)

경우 1단계 반응식을 적용한 결과와는 달리 case 0와 1m/s의 작은 오차 범위 내에서 매우 유사한 유동 특성을 나타내었다. 온도 분포의 경우 case 0과 1에서는 1단계 반응식과 유사한 특성을 보여주었다. 그러나, case 2의 경우 cone 내부에서 1차 화염

이 발생하지 않았으며 case 0와 유사한 특성을 나타내었다. NO 농도의 경우 혼합 특성이 향상된 case 2에서 case 0에 비해 버너 출구에서 5.2% 감소한 NO 배출 특성을 나타냈으며, case 1의 경우 2.5% 증가한 NO 배출 결과를 보였다.

3.3 메탄 화학 반응식 검증: 실험결과와 비교

기본 EV 버너 및 시험 모델에 대한 메탄 1단계 반응식과 2단계 반응식을 적용한 NO 배출계산 결과를 가용한 실험 결과⁽¹⁴⁾와 비교하였다. 정량적인 배출량 비교보다 case 변경에 따른 배출량 증감의 상대적 경향을 정량적으로 파악하는데 초점을 두었다.

1단계 반응식의 경우 혼합 특성이 향상되었던 case 2에서 NO가 증가 하였다. 이는 cone 내부에서 고온의 영역을 형성하여 다량의 thermal NO가 생성되었기 때문이라고 판단된다. 그리고, 전체 연료의 3%만을 분사는 lance injection hole 직후의 매우 희박한 조건에서 화염이 형성된 것은 1단계 반응식의

적용으로 cone 상부의 좁은 영역에서 화학반응이 과대 측정되었기 때문인 것으로 판단된다.

2단계 반응식을 적용한 결과, case 0와 case 1의 경우 1단계 반응식을 적용한 경우와 유사한 유동 및 연소 특성을 나타내었다. case 2의 경우 cone 내부에서 고온 영역이 형성되지 않았으며 case 0에 비해 혼합 특성이 향상되어 NO가 감소한 것으로 판단된다.

1단계 반응의 경우 CO에 대한 반응식이 없기 때문에 CO와 NO 화학종 간의 상관관계를 볼 수 없으나 2단계 반응의 경우 CO와 NO 사이의 trade-of 관계를 확인할 수 있다. 2step을 적용한 모든 설계변경 안에서 NO와 CO는 동일한 특성을 보이고 Fig. 11에 대표적으로 Case0에 대한 NO와 CO의 그림을 나타내었다.

동일한 세 가지 모델에 대해 1단계 반응식, 2단계 반응식을 적용하여 구한, 연소기 출구에서의 NO 배출량과 실험 결과를 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. Case 0에서의 실험값과 1단계 반응식의 수치해석 결과로 실험 값과 계산 값을 무차원화하여 나타내었다. 실험 결과로부터 혼합 특성이 향상되었던 case 2의 경우 NO가 저감되었으며 혼합 특성이 저감되었던 case 1의 경우 NO 배출량이 증가하였다. 이는 2단계 반응식을 사용한 해석결과와 유사한 경향을 보이는 결과이다.

4. 결 론

EV double cone 버너의 설계 변경 모델에 대한 비반응 유동 해석을 통하여 혼합 특성을 분석하였다. 기본 모델 대비 설계 변경된 두 가지 시험 모델에서의 혼합 특성 향상과 NO 배출 특성을 예측하였다. 이를 위해 메탄 1단계 반응식과 2단계 반응식을 적용하여 NO 발생량을 예측하고 가용한 실험 결과와 비교하였다.

1단계 반응식을 적용한 경우 혼합 특성이 저감된 case 1에서 case 0보다 많은 NO가 발생되었다. 하지만 혼합 특성이 향상되어 NO_x가 저감될 것으로 예상된 case 2에서 오히려 가장 많은 NO가 예측되었다. 이는 1단계 반응식을 적용한 해석의 경우, lance hole을 통해 분사된 공기와 연료가 cone 상부에서 과다하게 화학반응을 일으키는 것으로 평가되어 화염이 형성되고, 고온영역이 생기기 때문이다. 이러한 과대평가에 의해 다

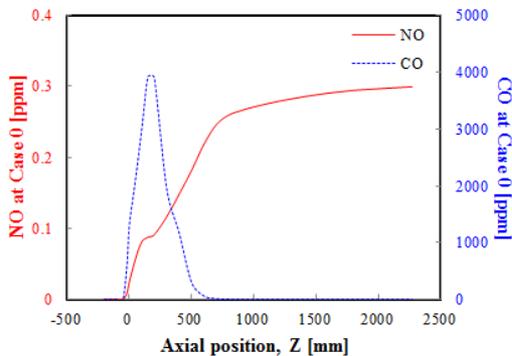


Fig. 11 Correlation of NO and CO(at 2-step Case 0)

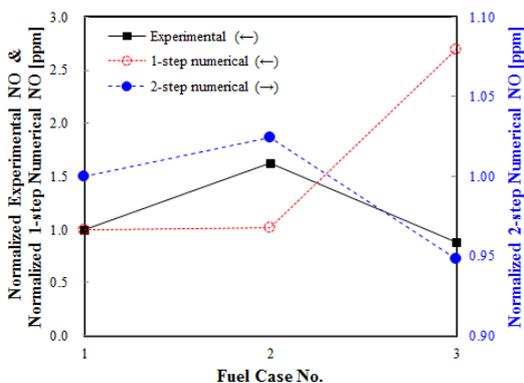


Fig. 12 Results of Normalized experimental NO_x and Normalized numerical NO for 1step and 2step

량의 thermal NO가 생성되는 것으로 판단된다.

2단계 반응식의 경우 혼합 특성이 저감된 case 1에서 NO 배출량이 증가하였다. 혼합특성이 향상된 case 2의 경우 출구에서의 NO 배출량이 저감되었다. 2단계 반응식을 적용한 경우와 실험 결과는 서로 유사한 경향성을 보여 주었다. 이로 부터 2단계 반응식을 적용하여 연료/공기 혼합 및 연소 특성을 타당하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 향후, 수치해석적 접근을 통해 혼합도가 향상되고 NO 배출량을 저감할 수 있는 다양한 설계 변경 시험 모델을 도출하여 제안하고자 한다. 이는 후속 연구에서 다루어질 예정이다.

후 기

본 연구는 부분적으로 2013년도 지식경제부와 한국에너지기술평가원의 지원(과제명: 100 MW 급 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., Christian, M., 2007, "Development and Design of Alstom's Staged Fuel Gas Injection EV Burner for NO_x Reduction," *ASME Turbo Expo*, GT2007-27730.
- (2) Yu, J. H., Kim, B. G., Chang, Y. J., 2008, "LES Modeling Study on the Characteristics of NO_x Emissions in a Lean Premixed Combustor Implementing LES Model," *KSME Spring conference*, pp. 381~386.
- (3) Capehart, S. A., John, C. Y., "Effect of Fuel Combustion on NO_x Formation in Lean Premixed Prevaporized Combustion" *ASME*, 97-GT-336, 1997.
- (4) Paschereit, C. O., Schuermans, B., Buche, D., 2003, "Combustion Process Optimization Using Evolutionary Algorithm," *ASME Turbo Expo*, GT-38393.
- (5) Paschereit, C. O., Flohr, F., Knopfel, H., Geng, W., Steinbach, C., Stuber, P., Bengtsson, K., Gutmark, E., 2002, "Combustion Control by Extended EV Burner Fuel Lance," *ASME Turbo Expo*, GT-30462.
- (6) Linán, A., Williams, F. A., 1993, "Fundamental Aspects of Combustion," Oxford University Press, pp. 9~13.
- (7) ANSYS FLUENT Theory Guide V13.0, 2010, ANSYS Inc.
- (8) Polike, W., Dobbeling, W., Sattelmayer, T., Nicol, D. G., 1996, "A NO_x Prediction Scheme for Lean-Premixed Gas Turbine Based on Detailed Chemical Kinetics," *ASME*, Vol. 118, pp. 775~776.
- (9) Turns, S. R., 2000, "An Introduction to Combustion," Mc-Graw Hill, pp. 472~507.
- (10) Melte, P. C., Pratt, D. T., 1975 "Measurement of Atomic Oxygen and Nitrogen Oxides In Jet Stirred Combustion," *Symposium on Combustion*, Vol. 15, pp. 1061~1070.
- (11) Fernando, B., Felic, G., 2007, "Effect of Pressure and Fuel-Air Unmixedness on NO_x Emissions from Industrial Gas Turbine Burners," *Combustion and Flame*, Vol. 151, pp. 274~288.
- (12) Yu, M. J., 1999, "Investigation of Combustion and Nox Emission Characteristics for Pulverized Coal with Radiation Effects," PhD Dissertation, KAIST, pp. 63~65.
- (13) Lim, I. G., Chung, S. H., 1995, "Numerical Study of Interacting Premixed Flames Including Gas Phase Radiation." *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 19, pp 858~867.
- (14) Cho, J. H., Kim, H. S., 2012, Development of Technologies for Analysis of Thermo-fluid/Combustion and Operations of Combustion System with Applications to a 100 MW-class Gas Turbine, Korea Institute of Machinery and Materials, Annual Report, Vol 3.