

와류 발생기를 장착한 가스터빈 연소기에서 연료/공기 혼합 및 NOx 배출 특성에 관한 수치적 연구

김 구* · 이영덕** · 손채훈**

A Numerical Study on Mixing of Fuel/Air Mixture and NOx Emission in a Gas Turbine Burner with a Vortex Generator

Gu Kim, Young Duk Lee and Chae Hoon Sohn

ABSTRACT

가스터빈용 희박 예혼합 연소기 내부에 와류 발생기(vortex generator)를 장착하여 그에 따른 연료/공기 혼합 및 NOx 배출 특성 변화를 조사하였다. 이를 위해 수치해석적 방법을 채택하여 연소기내 유동특성, 연료/공기 혼합도, 배기가스(NOx), 화염형상을 분석하였다. 와류 발생기를 장착한 경우, 연소기 내부에서 와류 발생기에 의한 나사산 형상으로 인해 와류가 형성되며 이는 연소기 전면부까지 유지되었다. 또한 연소기 내부 면적 차로 인해 압력섭동이 발생하였다. 이와 더불어 연소기 전면부 기준 상류 지역의 연료와 공기의 혼합도가 증가됨으로서 연료 과농지역이 감소하게 되며 이로 인해 전반적인 NOx 발생량의 감소 효과를 볼 수 있었다. 화염 형상의 변화로부터 와류 발생기의 영향으로 선회수는 다소 감소할 것으로 예상되며, 이는 와류 발생기로 인한 유속의 반복적 증감에 의한 결과라고 판단된다.

Key Words : 예혼합 연소(Premixed combustion), 질소산화물 배출(NOx emission), 와류 발생기(Vortex generator)

기 호 설 명

A : Pre-exponential factor	ρ : 밀도
E_a : activation energy	τ : 응력 텐서
M : 수정된 비 혼합도	R : 라이너 직경
R_1 : 기체상수	X : 라이너 총길이
T : 온도	U : 축 방향 속도
f : 혼합 분율(mixture fraction)	W : 횡 방향 속도
f_1, f_2 : 보정계수	RR_1 : 첫 번째 단계 화학반응율
u_i : 속도	RR_2 : 두 번째 단계 화학반응율
g : 중력가속도	하첨자
δ_{ij} : 단위텐서	i : i 방향 단위벡터
μ : 점도	j : j 방향 단위벡터

1. 서론

연소기 개발 과정에서, 환경규제와 효율적인 에너지 이용을 위한 여러 대책이 강구되고 있다. 가스 터빈 연소기의 희박 예혼합 연소방식은 이에 부합

되는 대책중 하나이다[1]. 이를 구현하기 위한 희박 예혼합 연소기에는 선회기가 장착되어 안정적인 화염 형성을 용이하게 한다. 이로 인해 발생하는 희박 예혼합 화염은 낮은 화염 온도를 유지하기 때문에 그로 인해 NOx 등의 유해 배출물을 저감시킬 수 있는 효과를 볼 수 있다. 이러한 희박 예혼합 화염 형성과정을 살펴보면, 선회 효과를 받은 공기/연료 혼합물의 유동은 연소기 전면부에서의 면적증가로 vortex breakdown[2]을 보이고 재순환 영역을 형성한다. 재

* 세종대학교 기계공학과

** 한국기계연구원

† 연락저자, chsohn@sejong.ac.kr

순환 영역은 화염 기저부의 속도를 늦춰주고 화염부상을 막아 연료/공기의 체류시간 증대를 유도한다.

희박 예혼합 화염을 형성해주는 여러 형태의 연소기에 대한 분석과 성능개선을 위해 다양한 연구가 이루어지고 있다. Jang 등[3]은 축방향 선회기의 연료 분사 구조 형상을 변화시켜 NOx와 CO의 발생량을 감소시켰다. Terasaki 등[4]은 2단 vane 선회기와 중간부분(hub)의 직경을 변화시킨 선회기의 NOx와 CO 배출량을 측정하여 형상 변화에 따른 효과를 연구하였다.

본 연구에서는 동일한 목적으로 연소기내에 와류 발생기(vortex generator)를 장착시켰다. 와류 발생기는 유동 제어를 위해 다양한 분야에서 유용하게 쓰이고 있다[5]. Zhu 등[6]은 파이프 중심부의 와류 발생기로 온도분포와 vortex 형성으로 인한 혼합 증가 효과를 수치해석적으로 수행하였다. Saravaman 등[7]은 마이크로 스케일의 와류 발생기를 이용하여 초음속 공기유동 환경에서의 연료와 공기의 혼합 증가효과를 수치해석적으로 연구하였다. 또한, 초음속 공기유동에서 와류 발생기의 간섭이 발생한 후의 유동에 의한 와류 생성을 가시화한 Wang 등의 연구[5]를 찾아볼 수 있다. Henze 등[8]은 공기유동이 와류 발생기와 충돌 후 2차 와류(secondary vortex)를 형성한다고 보고하였다.

와류 발생기의 적용 가능성에도 불구하고, 그동안 연소기 내부에 와류 발생기를 적용하여 그 효과를 이용하고자 수행된 연구는 거의 진행된 바 없다. 본 연구에서는, 연료와 공기 혼합도 증가를 위해 radial type 선회기 중심부(hub)에 와류 발생기의 원리를 적용한 나사산 형상을 장착시켰다. 수치해석적 방법을 이용하여 난류유동 특성과 혼합도, 유해물질(NOx)의 분포를 조사하였다.

2. 연소기 형상

본 수치해석에 적용된 와류 발생기를 장착한 전체 연소기의 형상과 공기유입의 형태를 Fig. 1에 나타내었다. 횡 방향으로 유입되는 공기가 나사산 형상의 와류 발생기(VG)와 충돌하며 축 방향으로 흘러간다. 또한 연료는 축 방향으로 유입되며 스윙 효과를 얻은 공기와 함께 혼합되어 연소기 전면부에서 희박 예혼합 화염을 형성한다.

3. 수치해석 방법

3.1. 지배방정식

연소기내의 난류 유동 해석을 위해 필요한 지배방정식-질량보존 방정식과 운동량 방정식-을 식 (1), (2)에 나타내었다.

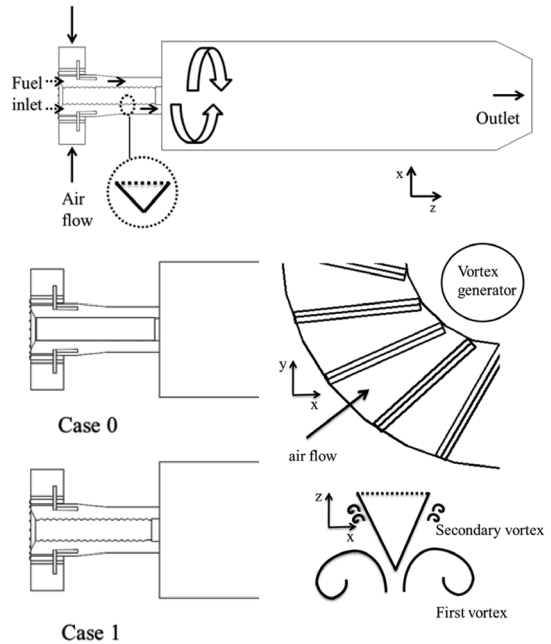


Fig. 1. Vortex generator (VG) in a swirler (case 0: without VG, case 1: with VG).

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

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

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

난류 모델로는 realizable *k-ε* model을 사용하였다. 이 모델은 standard *k-ε* model보다 넓은 유동범위에 대해 높은 정확도의 유동장 예측이 가능하다고 알려져 있다[9]. 이와 함께 에너지 방정식과 화학종 방정식 및 상태 방정식을 연립하여 풀게 된다. 여러 문헌에서 방정식 형태를 찾을 수 있으므로 여기서는 생략한다.

본 연구에서는 난류유동 정상상태 해석을 위해 압력 기반 모델(pressure-based model)을 채택하였으며, 초기압력은 대기압으로 설정해주었다. 또한 수치해석 방법으로 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 알고리즘[10]과 QUICK(The Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics) scheme[11]을 채택하였다. 난류 연소 모델로는 유한 화학 반응율/eddy 소산 모델을 선택하였으며, 범용 열유체 유동해석 코드인 Fluent를 solver로 사용하여 수치해석을 수행하였다[10].

Table 1. Inlet conditions adopted for numerical analyses

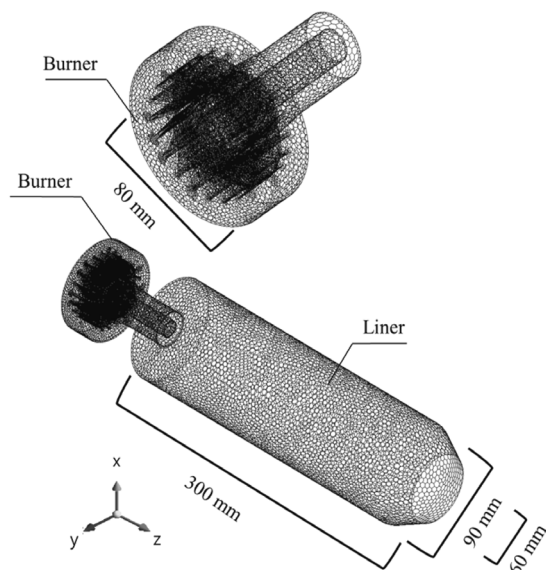
Parameter	Unit	Value	Remark
Air mass flow rate	kg/s	0.01106	Inlet temperature 650 K
Fuel mass flow rate	kg/s	0.000488	Inlet temperature 300 K
Equivalence ratio		0.750	

3.2. 경계조건

본 연구에 적용된 공기, 연료 유량 경계조건을 Table 1에 요약하였다. 공기는 air(79% N₂, 21% O₂), 연료는 CH₄이며, 라이너 출구에는 대기압, 라이너 벽에는 단열 경계조건을 부여하였다.

3.3. 격자 의존성

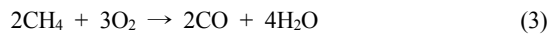
본 수치해석에 사용된 격자계를 Fig. 2에 나타내었다. 격자계는 liner와 burner의 두 부분으로 구성되며 모두 다면체(polyhedral) 격자계를 사용하였다. 이것의 격자 의존성을 검토하기 위해 총 세 가지(격자 1: 362619개의 cell, 격자 2: 413563개의 cell, 격자 3: 472358개의 cell)의 격자를 비교해 보았다. 연소기 출구에서 라이너 배출구 까지 균일한 간격으로 NO_x 계산 값을 추출하여 격자 의존성을 검토하였다. 격자 3과 격자 1간의 오차는 9%, 격자 2와의 오차는 4.5% 이하임을 확인하였다. 이에 본 수치해석에서는 격자 3(약 47만개)을 사용하였다.

**Fig. 2.** Geometry and unstructured grids of burner and liner.**Table 2.** Activation energy, pre-exponential factor, and temperature index for each reaction step

Reaction step	A	E _a [J/kmol]	β	f
1	1.40e10	1.167e8	-0.062	1
2	7.39e11	7.660e7	0.215	1

3.4. 화학반응

LNG가스의 주성분인 메탄(CH₄)을 연료로 가정하였기 때문에 연소반응은 공기-메탄 혼합기의 2단계 반응(2-step global reaction)을 채택하였다. 이는 대기압 조건에서, 당량비 0.5-1.6, 공기유입 온도 295 K-650 K 범위에 대한 연소 해석을 위해 채택할 수 있다고 알려져 있으며, 해당 반응 메커니즘을 다음 식에 나타내었다[12].



화학 반응률(RR)은 식 (5), (6)에 의해 계산하였다. 첫 번째 반응은 메탄의 산화반응이고 두 번째 반응은 CO의 산화반응이다. 두 번째 반응은 정반응과 역반응을 포함하고 역반응율은 평형을 가정하여 구하였다.

$$RR_1 = f_1(\phi) T^{\beta_1} A_1 e^{\frac{-E_{a_1}}{RT}} [\text{CH}_4]^{0.5} [\text{O}_2]^{1.066} \quad (5)$$

$$RR_2 = f_2(\phi) T^{\beta_2} A_2 e^{\frac{-E_{a_2}}{RT}} [\text{CO}_2]^2 [\text{O}_2]^1 \quad (6)$$

반응율 식에 사용된 활성화 에너지, E_a, 빈도계수, A, 온도지수, β를 Table 2에 나타내었다. 식 (5), (6)에서 f₁, f₂는 첫 번째, 두 번째 반응의 당량비 별 보정계수이며, 본 계산에서 채택한 당량비 조건인 0.75에서는 1.0을 사용하였다[12].

4. 해석결과 및 토론

4.1. 유동 해석 결과

Case 0(VG 미 장착)와 case 1(VG 장착)에 대해 계산된 와류 유동장을 Fig. 3에 나타내었다. 와류 생성 모사를 위해 스윙 강도(swirling strength)를 부여하였으며 이는 속도 성분 텐서의 eigenvalue 값의 허수부에 해당한다[10]. 또한 강도 수준(level)으로 일반화되어 표기되므로 각 case에서 동일한 수준에 대해 상대비교 하였다. Fig. 3을 보면 case 1(VG 장착)에서 나선상 모양으로 와류가 발달됨을 볼 수 있다. 또한

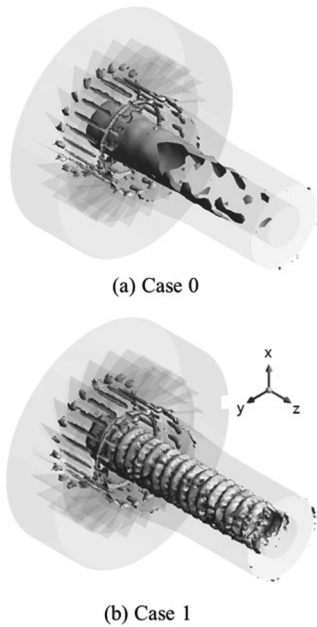


Fig. 3. vortex core regions calculated in case 0(upper plot) and case 1(lower plot).

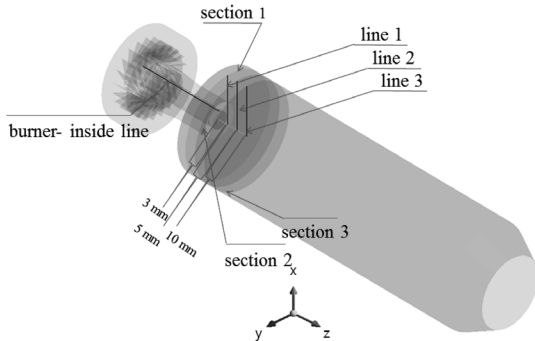


Fig. 4. Cross-sectional view of burner and liner including burner-inside line.

와류 발달이 case 0(VG 미 장착)에서보다 연소기 출구에 도달할 때까지 계속 유지됨을 확인할 수 있다. 즉 case 1(VG 장착)의 경우 와류생성에 더욱 유리함을 알 수 있다.

연소기 내부 VG 장착에 의한 압력 변화를 파악하기 위해 Fig. 4에 표기된 burner-inside line(VG에 가까운 연소기 내부 직선으로서 버너 중심으로부터 8 mm 떨어진 곳에 위치하며 길이는 81 mm 임)에서의 정압력 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 편의상, 기준압력을 0 Pa로 설정하여 표시하였다. 먼저, case 1(VG 장착)의 경우, 정압력의 섭동을 관찰할 수 있다. 이는 연소기 내부의 나사산 형상(VG 장착으로 기인함)으로 인한 유동 단면적의 증가와 감소가 반복적으로 발생하기 때문으로 판단된다.

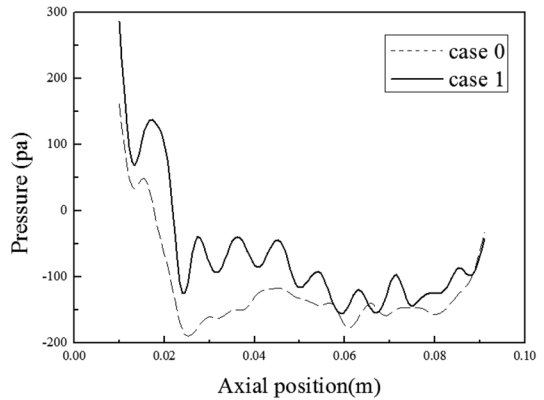


Fig. 5. Static-pressure profiles along the burner-inside line in case 0 and case 1 (pressure value is expressed in gauge pressure).

Table 3. Modified unmixedness

Modified unmixedness	case 0 (without VG)	case 1 (with VG)
section 1	4.07E-5	3.86E-5
section 2	1.36E-5	1.31E-5
section 3	2.7E-6	3.6E-6

연료와 공기의 혼합도에 미치는 VG의 효과를 파악하기 위해 비 혼합도(unmixedness)의 값을 계산하여 Table 3에 정리하였다. 이는 총 3개의 단면(Fig. 4에 표시한 sections 1~3)에서 관찰하였다. 비 혼합도는 혼합 특성 향상을 판정하기 위한 식으로서, 혼합 분율, f 의 섭동 값이 독립변수로 사용된다[13]. 그러나, 본 연구에서는 혼합특성 계산시 정상 상태(steady state) 해석을 수행하였기 때문에 다음의 식 (7)로 정의된, 수정된 비 혼합도(M) 식을 사용하였다[14]. 이러한 정의에 따르면, 비 혼합도 값이 작을수록 연료와 공기가 균질하게 혼합된 것을 의미한다.

$$M = \frac{(f - f_{aver})^2}{f_{aver}(1 - f_{aver})} \quad (7)$$

여기서, f 는 연료의 국부적인 혼합 분율이며, f_{aver} 는 혼합 분율의 면적 평균값이다. Table 3에서 볼 수 있듯이, 단면 1과 2에서는 와류 발생기를 장착한 case 1에서의 비 혼합도 값이 case 0(VG 미 장착)의 비 혼합도보다 낮은 값을 보인다. 즉 상류에서는 VG 장착에 따라의 혼합도가 향상됨을 알 수 있다. 반면 가장 하류인 단면 3에서는 오히려 VG 미장착의 경우에서 비 혼합도 값이 더 작게 나타났다. 하류 영역에서는 전반적인 혼합이 이미 완료됨에 따라 비 혼합도 값 자체가 매우 작으며 두 경우에서의 비 혼합도 차

이도 매우 작다. 따라서, 단면 3에서의 결과는 혼합도 경향 파악과는 관련이 없다고 판단된다. 종합적으로 와류 발생기의 장착은 혼합도 향상에 기여한다고 판단할 수 있다.

4.2. 연소 해석

연소해석 결과로 얻은 NOx 발생량을 분석하였다. 각 단면별 라이너 중심으로부터 라이너 벽면까지 총 세 개의 반경방향 선(Fig. 4에 표기한 line 1~3을 의미함)을 따라 NOx 발생량을 추출하였다. 그리고, line 1에서의 NOx 배출량의 임의의 값 (0.0282 ppm)을 NOx 배출의 기준값(NOx_{reference})으로 정하였다. 이를 기준으로 NOx 발생량을 무차원화하여 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 NOx 생성량은 주 연소 영역에서의 국부적인 고온부(국부적으로 당량비 1 근처인 영역)에 의한 thermal NOx 배출이 NOx 발생량의 대부분을 차지한다. 이를 바탕으로 Fig. 6의 결과를 살펴보면, case 1의 경우(VG 장착한 경우) 전 단면에 걸쳐 상대적으로 case 0의 경우보다 NOx 발생량이 낮게 예측됨을 알 수 있다. 이는 Table 3에 나타난 비혼합도 결과에서 보는 바와 같이 VG 장착에 의해 혼합도가 향상되어 NOx 발생량의 감소가 야기된 것으로 판단된다.

화염 형상 예측을 위해 연소기 내부 온도분포를 Fig. 7에 나타내었다. 주 유동영역과 주변 유동영역의 속도 차로 발생된 전단층이 재순환영역을 생성하며 이로 인해 V자형태의 화염이 형성됨을 볼 수 있다. 기울어진 화염의 형상을 따라 연장한 선이 라이너 벽면과 만날 때, 그 높이를 각각 L1과 L2로 표시하였다. Case 1의 경우 L2가 case 0의 L1보다 약간 길게 계산되었으며, 이로부터 화염 각도(θ_2)가 상대적으로 더 크게, 즉 더 적게 퍼지는 형상의 화염이 형성됨을 알 수 있다. 선회수가 클수록 원심력으로 인

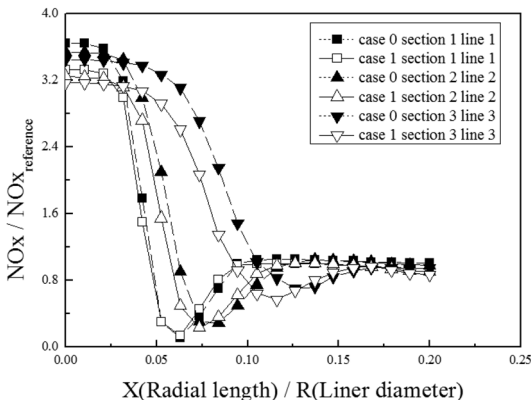


Fig. 6. Radial profiles of NOx concentration at 3 different sections in cases 0 and 1.

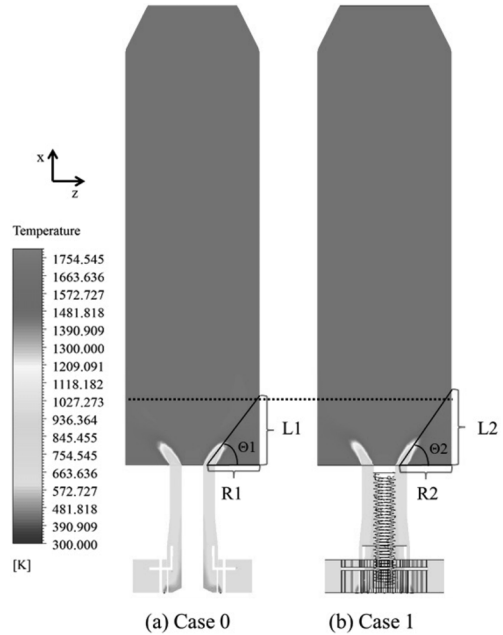


Fig. 7. Temperature fields on xz plane in the liner.

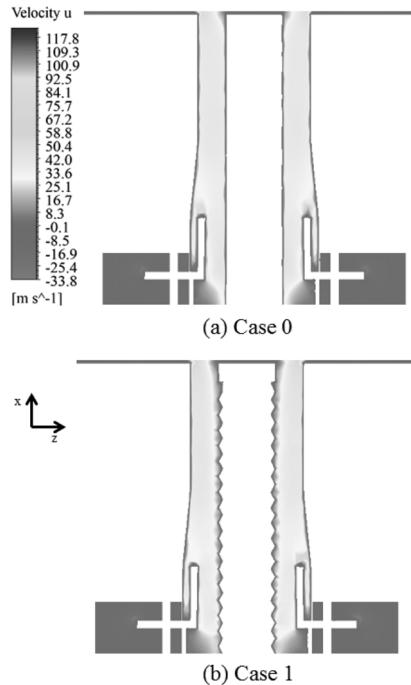


Fig. 8. Axial velocity fields on xz plane in a burner.

한 재순환 유동의 강도가 증대된다. 따라서, 연소기 전면부에서 화염 폭이 증가하고 화염길이가 감소한다[15]. 두 경우(즉, case 0와 case 1)의 설계 선회수가 같음을 감안하면 case 1의 경우에 와류 발생기로 인하여 화염 형성 지역에서 다소 선회 수가 감소하

였고, 이로 인해 L2가 L1보다 더 길게 나타난 것으로 판단된다.

이를 좀더 명확히 파악하기 위해 연소기 내부 와류발생기 단면(xz 단면)에서의 축방향 속도 크기를 Fig. 8에 나타내었다. Case 0의 경우, 연소기 중심부 벽면과 가까운 지역에서 속도 감소구간이 균일하게 발생하였으나, Case 1의 경우 와류발생기에 의해 면적 감소 구역이 반복적 형성된다. 이러한 벽면 마찰로 인해 속도 감소 폭이 더 크게 나타나며 결과적으로 선회수가 감소하게 된다. 따라서, 와류 발생기는 유동에 섭동을 주어 혼합효과를 증진시키는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 버너 중심부에 와류 발생기를 장착한 가스터빈 연소기의 유동 및 연소 특성을 조사하였다. 수치해석 결과를 통해 파악한 와류 발생기의 효과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 와류 발생기의 장착에 의해 연소기 내부유동에서 와류의 발달이 연소기 전면부까지 유지되는 것을 알 수 있었다. 또한 버너 내부의 반복적인 면적변화로 인한 압력섭동이 관찰되었다.
- 2) 와류 발생기를 장착한 연소기 전면부에 근접한 상류 영역에서 연료와 공기의 혼합도가 향상되었다.
- 3) 연소 해석 결과, 와류 발생기의 장착에 의한 혼합도 향상이 전반적인 유해물질(NOx) 발생량의 감소를 야기하는 것으로 판단된다. 이 때 화염각도는 다소 크게 형성되었다. 이로부터 와류 발생기의 장착에 의해 선회 강도가 다소 약해질 것으로 예상된다. 그 원인을 연소기 내부 유동장을 통하여 파악하였다. 결국, 선회 강도 약화는 와류 발생기에 의한 유속의 반복적 증감에 의한 결과로 판단된다. 반면 비 반응 유동장 계산에서 예측된 결과(Fig. 3)와 상반되며, 향후 좀 더 엄밀한 분석이 수행될 예정이다.

와류 발생기는 질소산화물 저감에 효과적이며, 최적화 연구 진행을 통해 본 연구 결과가 와류 발생기를 장착한 버너 설계에 활용될 수 있을 것이다. 향후 본 수치해석 결과의 검증을 위해 실험 결과와의 비교가 필요하며, 그 과정에서 단열 벽면 조건이 아닌 벽면 열손실을 고려한 연구가 수행될 예정이다.

후 기

본 연구에서 손채훈은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 부분적으로 받아 본 연구를 수행하였음(No. 2013-023030).

참고문헌

- [1] F. Peter, Z. Martin, L. Rudolf, B. Stefano, and M. Christian, "Development and Design of Alstom's Staged Fuel Gas Injection EV Burner for NOx Reduction", ASME Turbo Expo, 2007, GT2007-27730.
- [2] O. Lucca-Negro, T. O. Doherty, "Vortex breakdown: a review", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 27, 2001, pp. 431-481.
- [3] J.H. Jang, J.H. Cho, H.S. Kim, S.M. Lee, M.K. Kim, K.Y. Ahn, "Study on Lean-Premixed Combustion Characteristics of Dual-Stage Burner", Transactions of KSME(B), Vol. 37, NO.1, 2013, pp. 51-57.
- [4] T. Terasaki, S. Hayashi, "The Effects of Fuel-Air Mixing On NOx Formation In Non-Premixed Swirl Burners", Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1996, pp.2733-2739.
- [5] W. Dengpan, X. Zhixun, Z. Yuxin, W. Bo, Z. Yanhui, "Imaging of the Space-time Structure of a Vortex Generator in Supersonic Flow", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 25, 2012, 57-63.
- [6] J.X. Zhu, M. Fiebig, N.K. Mitra, "Numerical Investigation Of Turbulent Flows And Heat Transfer In a Rib-roughened Channel With Longitudinal Vortex Generatorst", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 3, 1995, pp. 495-501.
- [7] G. Saravanan, C. Suresh, "Numerical Simulation Of Mixing Enhancement In Scramjet Using Micro Vortex Generator", Procedia Engineering, Vol. 38, 2012, pp. 3969-3976.
- [8] M. Henze, J. Wolfersdorf, B. Weigand, C.F. Dietz, S.O. Neumann, "Flow and Heat Transfer Characteristics Behind Vortex Generators A Benchmark Dataset", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 32, 2011, pp. 318-328.
- [9] R. Rihani, O. Guerri, J. Legrand, "Three dimensional CFD simulations of gas-liquid flow in millitorus reactor without agitation", Chemical Engineering and Processing, Vol. 50, 2011, pp. 369-376.
- [10] ANSYS FLUENT Theory Guide V13.0, 2010, ANSYS Inc.
- [11] Y.A. Eldrainy, K.M. Saqr, H.S. Aly, M. N.M. Jaafar, "CFD Insight of The Flow Dynamics in a Novel Swirler for Gas Turbine Combustors," International Communications in Heat and Mass Trans-

- fer, Vol. 36, 2009, pp. 936-941.
- [12] A. AbouTaouk, L. Eriksson, "Optimized Global Mechanisms For CFD Analysis of Swirl-Stabilized Syngas Burner For GAS Turbines", Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, GT2011-45853.
- [13] B. Fernando, G. Felic, "Effect of Pressure and Fuel-Air Unmixedness on NOx Emissions from Industrial Gas Turbine Burners," Combustion and Flame, Vol. 151, 2007, pp. 274-288.
- [14] C.H. Cho, G.M. Baek, C.H. Sohn, J.H. Cho, H.S. Kim, "Effect of Pressure and Fuel-Air Unmixedness on NOx Emissions from Industrial Gas Turbine Burners," Applied Thermal Engineering, Vol. 59, 2013, pp. 454-463.
- [15] H.S. Kim, W.S. Choi, J.H. Cho and K.Y. Ahn, "Combustion Characteristics of Methane/Oxygen in Pre-Mixed Swirl Flame", Transactions of KS-ME(b), Vol. 33, 2009, pp 343-348.

논문접수일 : 2013. 07. 20

심사완료일 : 2013. 09. 10