

가습 공기의 LNG 화염 Thermal NOx 저감의 수치 해석적 연구 Numerical Study on the Thermal NOx Reduction by Addition of Moisture in LNG Flame

신미수 · 박미선* · 장동순[†]
Mi-Soo Shin · Mi-sun Park* · Dong-soon Jang[†]

충남대학교 환경공학과 · *한국원자력연구원 원자력환경안전부
Department of Environmental Engineering, Chungnam National University
*Korea Atomic Energy Research Institute

(Received September 3, 2014; Revised December 8, 2014; Accepted December 26, 2014)

Abstract : A computer program is developed for the prediction of NO generation by the addition of water moisture and water electrolysis gas in LNG-fired turbulent reacting flow. This study is the first part to deal with the moisture effect on NO generation. In this study, parametric investigation has been made in order to see the reduction of thermal NO as a function of amount of moisture content in a LNG-fired flame together with the swirl and radiation effect. First of all, calculation results show that the flame separation together with the NO concentration separation are observed by the typical flow separation due to strong swirl flow. With a fixed amount of air, the increased amount of water moisture from 0 to 10% by 2% interval shows the decrease of NO concentration and flame temperature at exit are from 973°C and 139 ppm to 852°C and 71 ppm. The radiation effects on the generation on NO appears more dominant than swirl strength over the range employed in this study. However, for the strong swirl flow employed in this study, the flow separation cause the relatively high NO concentration observed near exit after peak concentration in the front side of the combustor.

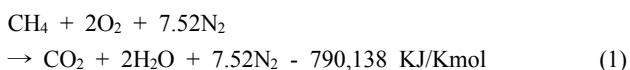
Key Words : NO Reduction, Moist Air, LNG Flame, Numerical Study, Swirl Strength

요약 : LNG 난류 화염에서 수증기나 물을 전기분해한 기체를 투입할 경우 발생하는 NO 생성을 예측하기 위하여 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 본 연구는 그 첫 번째로서 NO 생성에 대한 수증기 영향을 다룬 연구이다. 개발한 이 프로그램을 한국 에너지기술연구원에서 실험 연소로를 대상으로 적용하였다. 수증기 양에 따른 LNG 화염에서 NO 생성 효과를 검토하기 위하여 투입된 전체 공기량에 수분양을 0~10%까지 2% 간격으로 투입하였다. 계산 결과 강한 선회 유동의 결과로 나타나는 전형적인 유동분리에 따른 화염분리와 함께 NO 농도가 분리되는 양상이 나타났다. 수분양이 증가하면서 출구에서의 연소가스의 온도와 NO의 농도는 973°C에서 852°C로 NO의 농도는 139 ppm에서 71 ppm으로 일관성 있게 감소하였다. 그리고 연소로 복사 현상은 본 연구에서 고려한 영역에서 선회강도보다도 NO 생성에 큰 영향을 나타내었다. 그러나 본 연구에서 고려한 강한 선회 효과는 NO 농도가 연소로 전단에 이어 출구 근처에서 다시 높아지는 분리 현상을 나타내었다.

주제어 : NO 저감, 가습공기, LNG 화염, 수치해석, 선회강도

1. 서론

질소산화물(NOx)은 자체로 산성가스로서 문제일 뿐만 아니라 온난화지수가 높은 N₂O의 전구체 역할을 한다는 점에서 이에 대한 제어는 지속적인 관심사로 대두되고 있다. 본 논문의 주된 주제는 아래와 같은 주성분이 CH₄인 LNG 보일러에서 연소용 공기에 일정 비율로 수증기를 가습하여 NOx 저감을 시도하는 연구이다.



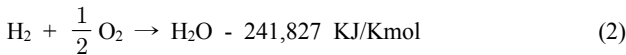
위와 같은 CH₄의 연소반응에 대하여 NOx 생성에 영향을 줄 수 있는 변수로는 첫 번째로 등가비를 조절함으로써 투입되는 공기의 양을 조절하여 그에 따른 산소의 양과 온도를 조절하여 NOx 생성에 영향을 주는 방법이고, 두 번째는

본 연구의 주제는 아래와 같이 수증기(H₂O)를 가습하여 화염 온도를 실질적으로 낮추는 방법이다. 이때 투입되는 수증기의 양은 투입되는 공기의 양을 고정시킨 상태에서 일정한 비율로 수증기의 양을 변화시킨다. 이 경우 연소공기에 수분이 첨가 되면 공기주입구의 운동량 증가로 인한 유동장의 변화도 가능하지만 기본적으로 연소공기의 비열과 열용량의 증가와 상변화 등에 의하여 최대 화염온도의 감소와 화염영역에서 온도 감소에 따른 NOx 발생량의 실질적인 감소가 예상된다.

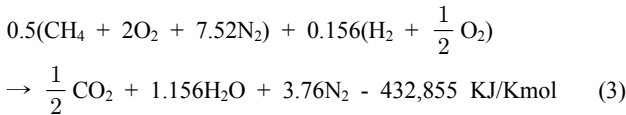
NOx 저감을 위한 다른 방법으로는 산화제에 포함된 질소 농도 감소에 의한 NOx 저감 방법이다. 즉 식 (1)에서 “oxygen-enhanced combustion” 방법에 의하여 산소농도를 증가시킬 경우 온도상승효과와 질소농도 감소라는 두 가지 상반된 작용이 나타난다. 이 경우 당량조건을 가진 단열화염에서 NO의 농도는 산소와 질소의 농도가 거의 50% 정도일 때 NO의 농도가 최대가 되는 것으로 연구결과가 제시되고 있다.¹⁾

[†] Corresponding author E-mail: p_dsjang@cnu.ac.kr Tel: 042-821-6677 Fax: 042-823-8362

또 다른 가능한 방법으로 이제까지 문헌에 보고되지 않은 방법으로서는 CH₄와 같은 화석 연료의 양을 일정한 양 감소시켜 투입한 후 화염의 온도가 동일한 온도가 되도록 물을 전기분해한 기체를 혼소하여 연소시키는 방법이다. 예를 들어 CH₄을 연소시키는 식 (1)에 의하면 이론공기 100%인 경우에 단위 생성물당 가열에 배당되는 발열량은 790,138 kJ/10.52 kmol이다. 그러므로 이때 생성가스의 단위몰당 발열량은 75,108 kJ/kmol이 된다. 반면, 물을 전기분해한 기체는 아래와 같은 식 (2)로 주어지는데 이 경우는 단위 생성물당 241,827 kJ의 발열량을 나타내게 된다.



식 (1)과 (2)를 비교하면 물을 전기분해한 기체의 경우 생성기체의 발열량은 CH₄에 비하여 241,827/75,108 = 3.22배가 된다. 즉 연소 생성물의 온도에 따른 비열의 차이를 고려하지 않을 때 물을 전기분해한 기체의 가열능력이 CH₄의 가열능력에 4.5배가 된다. 그러므로 식 (1)의 메탄을 사용한 경우 메탄의 양을 50% 정도 줄일 경우 물을 전기분해한 기체의 수소를 10% 정도 투입하면 같은 화염 온도를 얻을 수 있다는 결론에 도달한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.



즉 메탄의 감소한 양에 해당하는 만큼의 가열능력을 가진 물 전기분해가스로 대체한 후 감소한 질소 양만큼 NO_x 저감 효과를 기대할 수 있다는 점이고 이에 대한 연구가 진행 중이다. 만일 필요하다면 국부 고온을 막기 위해 공기의 N₂와 같은 inert 역할을 하는 수증기를 첨가하는 것이 NO_x 제

어의 방법 중 하나이다. 그러나 본 논문에서는 일차적으로 가습공기가 NO 생성에 미치는 효과를 검토하기 위해 LNG를 사용하는 보일러 내부의 난류 반응장의 열유동 해석을 통하여 발생하는 NO_x 농도를 정량적으로 산정하였다. 이를 위하여 한국에너지기술연구원의 실험용 연소로를 대상으로 자체 개발한 In house 코드를 활용하여 전산해석을 수행하였다. 연소로의 도식도 및 경계조건은 Fig. 1에 나타내었다.

2. 수치 해석적 연구 방법

2차원 축대칭 원통연소로에서 연료와 공기에 대한 2차 편미분 기상 지배방정식 고려하였다. 그리고 난류에서의 특성 시간 및 크기로 나타나는 난류에 대해 $k-\epsilon$ 모델을, 난류반응 해석은 기본적으로 eddy breakup 모델을 기초로 하였다. 일반적인 지배방정식은 식 (4)와 같으며, 본 연구의 대상이 되는 2차원 축대칭 정상 상태하에서 식 (5)과 같이 나타내어진다. 이 때 종속변수 ϕ 는 단위질량당의 물리량을, S_ϕ 는 질량, 엔탈피, 운동량의 생성항을 나타낸다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (4)$$

unsteady convection diffusion source

위 식을 이산화시킨 방정식은 검사체적에 기초한 Patankar의 방법을 사용하여 TDMA로 해석하였으며 압력, 속도 연계는 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다.^{2,3)} 또한 난류 모델에서 쓰이는 일반적인 연소모델 중에서 eddy breakup model 모델을 사용하였다.⁴⁾ m_{NO} 와 m_{NH_3} 에 관한 지배방정식을 정의하기에 앞서 Thermal NO_x생성에 대한 모델링이 필요하다. NO는 온도의 함수로 아래 식 (5)과 같은 경험식처럼 생

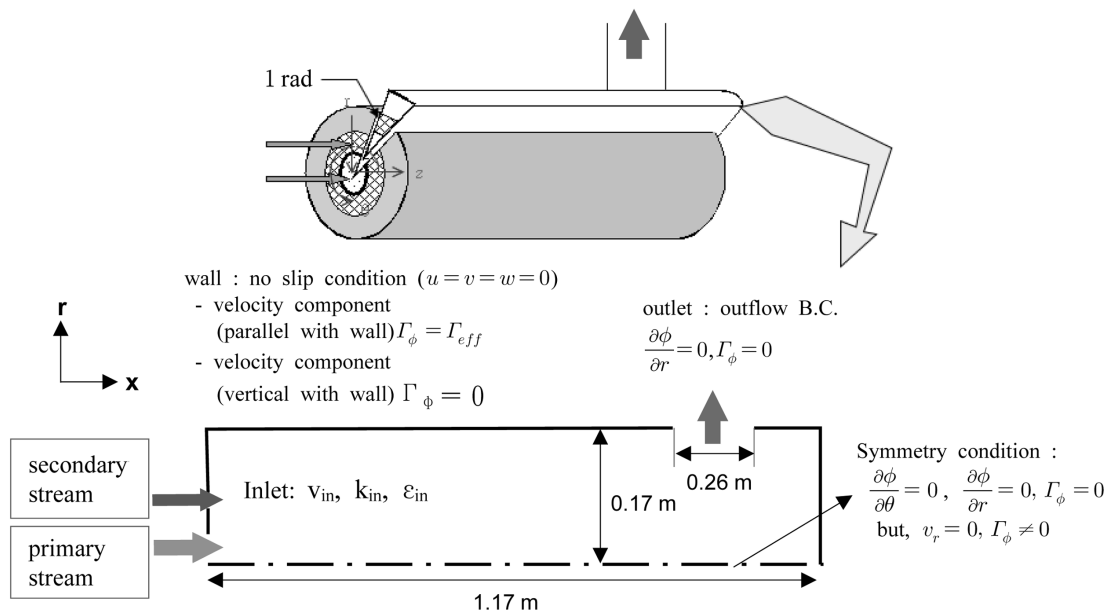


Fig. 1. Schematic diagram of LNG Combustor and boundary condition.

성된다고 가정하였다.⁵⁾

$$\frac{dNO}{dt} = \frac{1.8 \times 10^{21} \rho^{\frac{3}{2}} m_{N_2} m_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{T^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{69000}{T}\right)} \quad (5)$$

본 논문에서 사용한 종속변수 ϕ 와 그에 따른 확산항(Γ_ϕ)와 생성항(S_ϕ)을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1. Expression of Γ_ϕ and S_ϕ in 2-D cylindrical coordinate

	ϕ	Γ_ϕ	Source term (S_ϕ)
Axial momentum	u	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}$
Radial momentum	v	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2 \mu_{eff} \frac{v}{r^2} + \frac{\rho v^2}{r} - \frac{\partial p}{\partial r}$
Tangential momentum	w	μ_{eff}	$-\left(\frac{\mu_{eff}}{r^2} + \frac{\rho v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mu_{eff}}{\partial r} \right) w$
Kinetic energy	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_{k1} - \rho \epsilon$
Kinetic energy dissipation rate	ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_{k1} - C_2 \rho \epsilon)$
Specific enthalpy	h	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	$w_{fu} H_{fu} - L_{H_2O} w_{vol} - H_{rad}$
Fuel mass fraction	m_{fu}	Γ_{fu}	$-w_{fu}$
Oxygen mass fraction	m_{O_2}	Γ_{O_2}	$-\frac{w_{fu}}{M_{fu}} M_{O_2} n_{O_2}$
CO ₂ mass fraction	m_{CO_2}	Γ_{CO_2}	$\frac{w_{fu}}{M_{fu}} M_{CO_2} n_{CO_2}$
H ₂ O mass fraction	m_{H_2O}	Γ_{H_2O}	$\frac{w_{fu}}{M_{fu}} M_{H_2O} n_{H_2O} + w_{vol} \cdot (1 - x_{NH_3})$
N ₂ mass fraction	m_{N_2}	Γ_{N_2}	0
NO mass fraction	m_{NO}	Γ_{NO}	$-\frac{w_{NH_3}}{M_{NH_3}} M_{NO} n_{NO} + S_{NO}$
NH ₃ mass fraction	m_{NH_3}	Γ_{NH_3}	$-w_{NH_3} + w_{vol} \cdot x_{NH_3}$

\dot{w}_ϕ : ϕ volumetric generation rate M_ϕ : molecular weight
 x_{NH_3} : concentration of NH₃ w_{vol} : volatilization rate
 L_{H_2O} : heat of H₂O evaporation S_{NO} : volumetric NO generation rate
 H_{rad} : heat loss of radiation

$$G_k = 2\mu_t \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\bar{v}}{r} \right)^2 \right] + \mu_t \left[\left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\bar{w}}{r} \right) \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \right]$$

$C_1=1.44, C_2=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k, \sigma_h=0.9, \sigma_\epsilon=1.22$

3. 결과 및 고찰

본 연구는 전장 1.17 m, 직경 0.34 m의 소형 LNG 연소로에 공기와 함께 수분을 주입할 경우 주요변수 변화에 따른 계산결과 및 효과적인 NO저거를 위한 개념적인 설계를 제공코자 한다. 이 연구에서 고려한 표준조건을 살펴보면 연료는 LNG의 주성분인 CH₄가 140℃의 예열된 상태로 연료량과 주입구의 면적을 고려하여 4 m/s의 속도로 주입된다고 가정하였고, 공기는 15℃, 선회강도 0.667, 실험에서 측정된 출구 산소농도 4%에 기초하여 공기비는 1.23으로 산정하였다. 공기주입구의 면적을 고려하여 공기의 속도와 그에 따른 수분의 주입량을 결정하였다. 연료의 발열량은 메탄의 발열량인 4.9×10⁷ J/kg을 사용하였다. 위와 같은 조건 하에서 수치해석을 수행하였으며 일차적으로 수증기가 전혀 주입되지 않는 계산 조건을 표준조건으로 설정하였다. 표준조건에서의 열유동 해석에 따른 연소로 내부 유동, 온도, 연료 및 산화제분포, 수분농도 분포, NO 생성농도를 기준으로 하였다. 그리고 이에 기초하여 주입공기 중의 수분함량의 변화와 공기의 선회강도 그리고 복사모델 적용에 따른 온도 및 NO 생성농도 분포 변화를 살펴보고 비교하였다. 복사 모델의 경우는 연소로 전체에 걸쳐 일정한 비율로 열손실이 일어난다고 가정한 현열 손실 모델과 흡수계수와 복사계수에 의한 총 복사 flux를 구하고, 흡수계수는 수분과 CO₂에 의해 영향을 받는 Four flux 모델에 의해 계산을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 표준 조건 및 주요 변수들을 Table 2에 정리하였다.

Fig. 2는 표준조건에 대한 계산 결과를 나타낸 것이다. 표준 조건은 공기 중 수분의 함량은 없고 공기를 주입하는 vane angle은 45° (swirl = 0.667)를 가정한 조건이다. 우선 Fig. 2(a)의 유선도 분포를 살펴보면 강한 선회의 경우 코너 재순환이 비교적 약해진 전형적인 강 선회 유동 특성이 나타나고 있음을 보여준다. Fig. 2(b)는 온도분포로서 선회에 의해서 고온화염 영역이 버너 부근으로 앞당겨져 분포한 결과를 나타내고 있다. 일반적으로 선회가 존재할 경우 축방향의 속도는 감소한다. 그리고 강한 선회유동일 경우 직경 방향 흐름에 의하여 중심부에 재순환 영역이 형성된다. 강한 연

Table 2. The numerical calculation condition of this study

Primary stream (Fuel)	Species	LNG (CH ₄ 100%)
	Temperature	140℃
Velocity (m/s)	4	
Calculation condition	Species	Air, Air+H ₂ O
	Temperature	15℃
	Air/H ₂ O (%)	100/0, 98/2, 96/4, 94/6, 92/8, 90/10
	Swirl No./vane angle	0/0°, 0.38/30°, 0.667/45°, 1.15/60°
Radiation model		(sensible heat loss model, four-flux model)

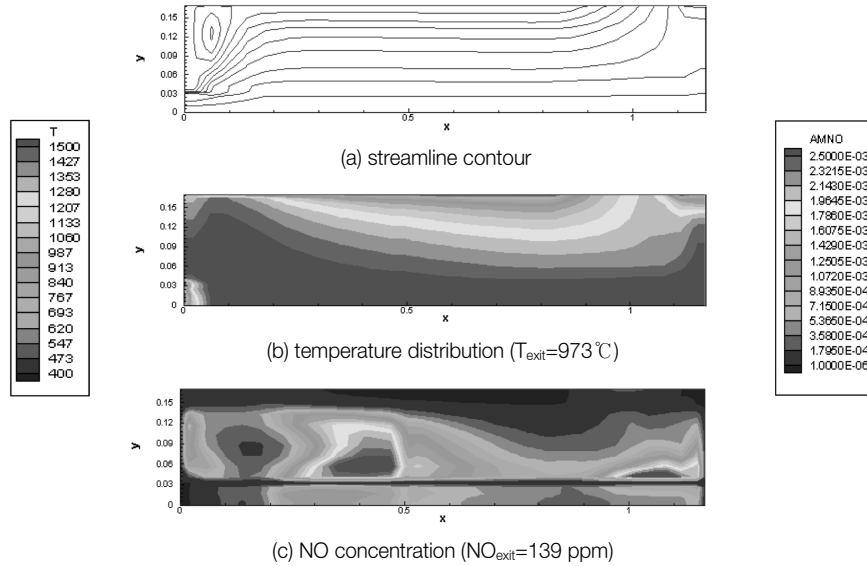


Fig. 2. Streamline, temperature and NO distribution for a CH₄-air flame without moisture.

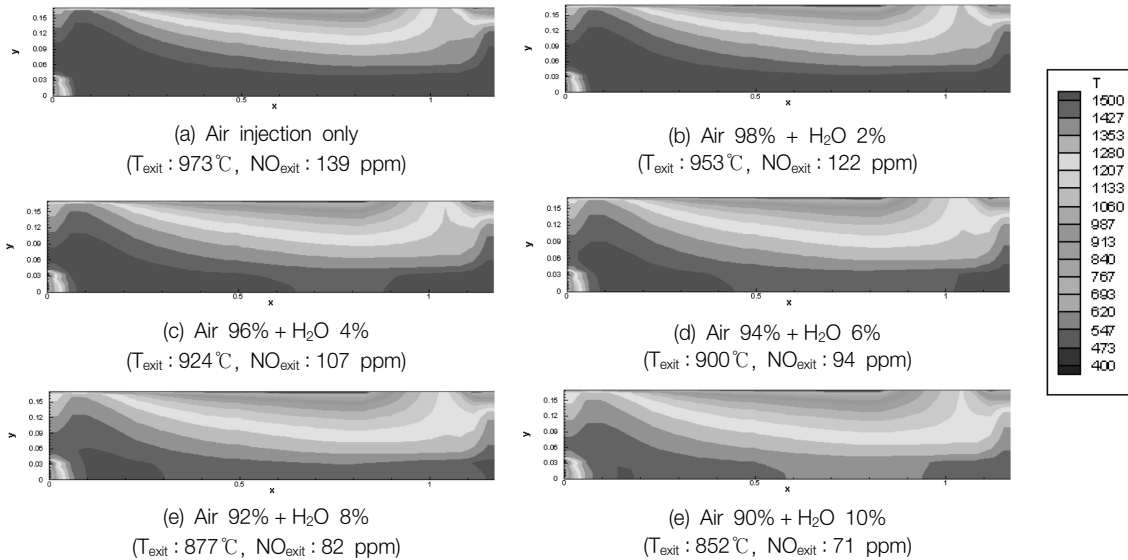


Fig. 3. Temperature distribution for a CH₄-air flame with moisture contents

소에 의하여 고온팽창현상이 나타나는 경우 이렇게 축방향 속도의 감소현상은 하류영역으로 가면서 팽창 확대되는 양상을 나타낸다. 이러한 특징이 나타나는 임계선회속도는 0.6 정도로 알려지고 있으며 본 수치해석의 결과 이러한 유동 특성이 부분적으로 나타나 높은 온도를 가진 영역의 일부가 후류영역에 잔존하는 양상이 나타나고 있다.⁶⁻⁸⁾ 이러한 유동 특성은 NO의 분포에서도 강한 선회의 경우 고농도의 NO가 연소로 전단과 후단에 분리되어 나타나는 양상을 보여준다. 연소로 출구의 평균온도가 약 973 °C 정도로 나타났으며, Fig. 2(c)의 NO 생성농도 분포는 주로 버너부근 고온영역대가 NO 생성에 유리하여 고농도로 나타났으며 연소로 후단으로 갈수록 농도가 감소하여 위쪽 출구에서의 평균 NO 농도는 139 ppm 정도로 계산되었다.

Fig. 3은 연소용 공기의 수분 함량 변화에 따른 온도분포

와 출구에서의 평균온도와 평균 NO의 농도를 나타낸 것이다. 공기만 주입한 경우를 기준으로 하여 비교차원에서 변수연구로 주입 공기에 수분함량을 각각 2, 4, 6, 8, 10%로 변화시켜가면서 조직적인 변수연구를 시도하였다. 수분함량이 증가할수록 수분에 의한 열량 손실로 인하여 연소로 내부의 온도가 가시적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 구체적인 예로 출구의 평균 온도를 살펴보면 공기만 주입한 표준상태의 경우 출구의 평균 온도가 973 °C인데 비하여 수분함량을 2, 4, 6, 8, 10%로 증가시킨 경우 각각 953 °C, 924 °C, 900 °C, 877 °C, 852 °C로 일관성 있게 감소하는 것으로 나타났다. 현 단계에서는 수분함량에 따른 현열 변화가 주는 영향만을 단독적으로 고려하기 위하여 복사모델은 고려하지 않았으나 복사 모델의 영향을 고려할 경우 복사 열손실이 증대하므로 이러한 온도 감소현상이 보다 증대할 것으로

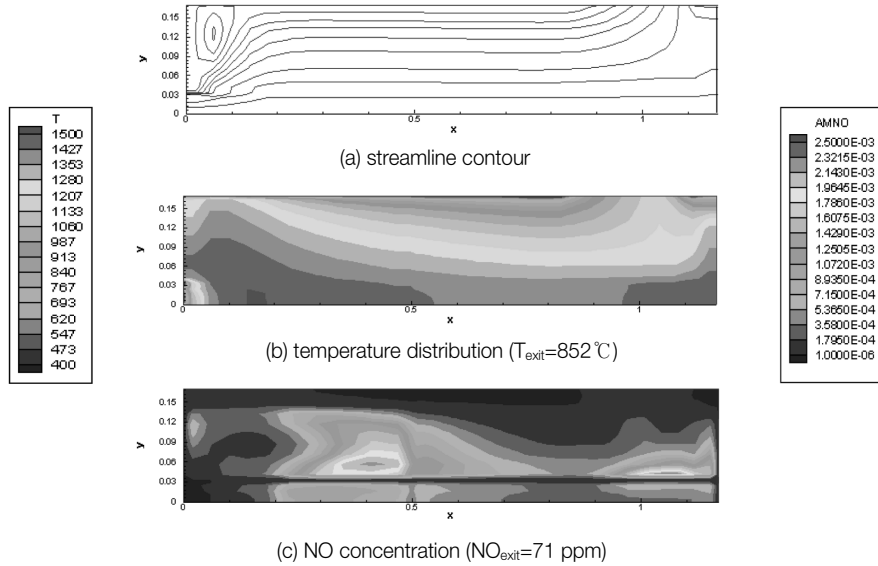


Fig. 4. Streamline, temperature and NO distribution for a CH₄-air flame with 10% moisture.

예상된다. 연소로 내부의 NO 생성농도 분포는 지면상 구체적으로 제시하지 않았으나 Thermal NO의 경우 매우 큰 활성화 에너지에 의하여 NO 발생은 고온에서 온도 분포에 민감하므로 당연히 상대적으로 최대 화염온도가 높고 화염길이 긴 표준조건인 경우가 NO 농도가 가장 높게 나타났다. 구체적으로 연소로의 출구에서 출구면적으로 비중을 두어 계산한 NO평균 출구농도를 살펴보면 공기만 주입한 경우 139 ppm으로 나타났으며 수분 주입량을 각각 2, 4, 6, 8, 10%로 증가시킨 경우 출구농도 역시 122, 108, 94, 82, 71 ppm으로 출구온도 감소에 따라 일관성 있게 현저히 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 위의 조건 중 실험을 수행한 공기 중 수분의 함량은 10%, 공기와 수분을 주입하는 vane angle은 45° (swirl = 0.667)를 가정한 조건에 대한 수치해석 결과를 세부적으로 나타낸 것이다. 유선도는 강선회 조건이 동일하므로 Fig. 2와 유사한 분포를 나타내고 있다. 수치해석 계산 결과 연소로 출구의 평균온도가 852°C로 나타났는데 이는 실험에서 연소로 출구온도 830°C~870°C 범위와 비교적 잘 일치하는 것으로 개발한 프로그램의 성능의 검증 결과를 보여주고 있다. Fig. 4(c)는 NO 생성농도 분포를 나타낸다. 예상한 바와 같이 주로 버너부근 고온 영역대가 NO 생성에 유리하여 고농도로 나타났으며 연소로 후단으로 갈수록 농도가 감소하여 위쪽 출구에서의 평균 NO 농도는 약 71 ppm 정도로 계산되었다. 그러나 부분적으로는 후류 영역으로 가면서 NO 농도가 부분적으로 증가하여 분리되는 양상을 나타내고 있다. 그리고 본 논문에서는 제시하지 않았지만 격렬한 난류 혼합에 의한 빠른 반응은 버너 부근에서만 주로 연료와 산화제가 분포된 것을 볼 수 있다. 한편 수분의 질량 비율은 주입되는 양과 연소생성물로 나타나는 양이 더하여져 연소로 후단으로 갈수록 농도가 높아지고 있다.

선회강도와 복사모델 적용 유무에 대한 수치해석도 수행

Table 3. Exit average temperature and NO concentration with moisture amount, swirl intensity and radiation model

Calculation parameters		Avg. temperature at exit (°C)	Avg. NO concentration at exit (ppm)
Standard condition	moisture 10%	852	71
	swirl intensity 0.385 without radiation model		
Moisture amount	0%	973	139
	2%	953	122
	4%	924	107
	6%	900	94
	8%	877	82
Swirl intensity	10%	852	71
	0 (0°)	788	63
	0.385 (30°)	831	64
	0.667 (45°)	852	71
Radiation model	1.155 (30°)	860	71
	without radiation model	852	71
	sensible heat loss model	835	56
	Four Flux model	806	41

하였는데 계산결과는 Table 3에 정리하여 나타내었다. 선회 강도가 어느 정도 증가할수록 연소로 내 혼합의 증가로 화염이 보일러 버너 쪽으로 앞당겨지며 고온영역이 형성되는 것을 확인할 수 있었으며 출구의 NO 평균농도는 오히려 선회가 없는 경우 초반의 혼합효과가 현저히 감소하여 연소효율을 저감시켜 전반적으로 고온의 영역이 감소되어 낮게 나타났다. 복사모델 적용 결과 출구의 평균 온도는 약 50°C 감소하였으며 NO 농도 분포 역시 전반적으로 낮게 분포하였다.⁹⁾ 특히 복사 열손실에 의해 연소로의 출구 쪽의 온도 감소에 따라 복사모델을 적용하지 않은 경우에 비해서 NOx의 출구농도가 약 40% 정도 낮아진 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서 가습공기가 NO 생성에 미치는 효과를 검토하기 위해 LNG를 사용하는 연소로 내부의 난류 반응장의 열유동 해석을 통하여 발생하는 NOx 농도를 정량적으로 산정하여 의미있는 결과를 도출하였다. 연소로는 한국에너지기술연구원의 실험용 연소로를 대상으로 전산 해석을 수행하였다.

연구 결과를 살펴보면 10%의 가습공기 주입시 온도 계산 결과는 약 852℃로 나타났으며 이는 연소로 실험에서 출구 온도 측정결과인 830℃~870℃ 범위와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 연소 공기 중 수분함량이 증가함에 따라 수분의 증발잠열 손실에 따라 연소로 내부의 온도 감소하였고 그에 따라 thermal NOx 생성이 연소공기만 주입했을 때에 비해서 수분함량이 10%인 경우 약 50% 감소하는 것으로 나타났다. 강한 선회 유동 특성에 의한 유동 분리 현상에 의하여 고온의 영역과 이에 따른 NO 농도의 분리 현상이 가시적으로 관찰되었다. 복사모델 적용 결과 출구의 평균 온도가 감소하였으며 NO 농도 분포 역시 전반적으로 낮게 분포한 것으로 나타나 정확한 복사모델을 적용이 중요함을 시사하고 있다. 본 논문에서는 습공기의 영향을 제시하였으며 추후 연구는 물 분해 가스의 적용에 따른 NO 발생 영향에 대한 연구 결과를 제시하고자 한다.

Acknowledgement

본 연구는 대전 녹색 환경지원센터에서 시행한 환경기술 연구개발 사업(2014)의 연구비 지원과 환경부의 폐기물에너지화·자원화 전문인력양성사업의 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

KSEE

References

1. Charles, E. and Baukal, Jr, Oxygen-enhanced combustion, Chapter 2 pollutant emission, CRC Press(1998).
2. Patankar, S. V., Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill Company(1980).
3. Hinze, J. O., Turbulence, McGraw-Hill Company(1956).
4. Magnussen, B. F. and Hjertager, B. H., "On mathematical modeling of turbulence combustion with special emphasis on soot formation and combustion," Sixteenth Symposium on Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 719~729(1977).
5. Niessen, W. R., "Combustion and incineration processes: Application in Environmental Engineering, 3rd edition," CRC Press(2002).
6. Mathur, M. L. and Maccallum, N. R. L., "Swirling air tests issuing from vane swirlers," *J. Inst. Fuel*, **41**, 238~240(1976).
7. Shin, M. S., Kim, H. S. and Jang, D. S., "Numerical study on the SNCR application of space-limited industrial boiler," *Appl. Thermal Eng.*, **27**(17), 2850~2857(2007).
8. Chaturvedi, M. C., "Flow characteristics of axi-symmetric expansion," *Proc. J. Hydraulics Division, ASCE*, **89**(3), 61~92(1963).
9. Lockwood, F. C. and Shah, N. G., "A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures," *Proc. Combust. Inst.*, **18**(1), 1405~1414(1981).