

NO_x저감을 위한 연료희박 재연소 기법의 실험 및 수치적 연구

김학영** · 백승욱** · 손 희*** · 김세원****

Experimental and Numerical Investigation for NO_x Reduction with Fuel Lean Reburning System

Hak Young Kim, Seung Wook Baek Hee Son and Se Won Kim

ABSTRACT

Fuel lean reburning method is very attractive way in comparison with conventional reburning method for reducing NO_x. Meanwhile, the knowledge of the how flue gas re-circulated, temperature distribution and species concentration is crucial for the design and operation of an effective fuel lean reburning system. For this reason, numerical analysis of fuel lean reburning system is a very important and challenge task. In this work, the effect of fuel lean reburn system on NO_x reduction has been experimentally and numerically conducted. Experimental study has been conducted with a 15kW lab scale furnace. Liquefied Petroleum Gas is used as main fuel and reburn fuel. To carry out numerical study, the finite-volume based commercial computational fluid dynamics (CFD) code FLUENT6.3 was used to simulate the reacting flow in a given laboratory furnace. Steady state, three dimensional analysis performed for turbulent reactive flow and radiative heat transfer in the furnace.

Key Words : NO_x reduction, fuel lean reburning, computational fluid dynamics modeling, LPG flame

기 호 설 명

Alphabets

S : swirl number
 D_h : vane hub diameter
 D : nozzle diameter
 f_{re} : reburn fuel fraction
 x : the amount of reburn fuel
 F : the amount of total fuel
 P : pressure
 T : temperature
 Sh : source of energy term
 k : turbulent kinetic energy
 Pr : Prandtl number
 R : universal gas constant

Y : mass fraction

Greeks

θ : swirler van angle
 Φ : equivalence ratio
 ρ : Density
 ε : turbulent dissipation rate
 μ_t : turbulent viscosity
 k_t : turbulent conductivity

Superscript

P : product
 R : reactants

1. 서 론

화석 연료 사용 시 발생하는 배출 가스 특히, 질

소산화물(NO_x)은 지구 온난화나 산성비, 스모그 현상과 같이 우리의 삶에 심각한 환경오염을 초래하고 있다. 이러한 환경오염 물질 저감을 위하여 NO_x 저감 효율이 높은 재연소(Reburning) 기법을 기반으로 한 여러 가지 저공해 기술들이 개발되고 있다.

재연소 방법은 주연소 후류에 탄화수소 계열의 재연소 연료(reburn fuel)를 분사하여 연료 농후 영역인 재연소 영역(reburn zone)을 조성하여 NO_x가 질

* 한국과학기술원 기계항공 시스템 공학부

** 한국과학기술원 기계항공 시스템 공학부

*** (주) 한양 인더스트리

**** 한국생산기술연구원 생산시스템본부 산업설비팀

† 연락처, dions99@kaist.ac.kr

소 기체로 환원 되도록 유도 한다[1]. 본 논문에서 다루고 있는 연료희박 재연소(Fuel lean reburning) 방식은 적은 양의 재연소 연료를 사용하고(총 공급 열량의 5~15% 이내) 연소로 내 전체적인 연료희박 상태를 유지하여 추가적인 공기 공급 없이 미연탄화 수소나 CO의 발생을 억제할 수 있는 기술이다.

보일러의 후류 영역으로 고속의 재연소 연료를 분사하여 부분적 연료 농후 조건 지역을 생성하고 연료 농후 지역을 유도하여 생성된 탄화수소 연료와 NOx가 반응하여 HCN 혼합물이 생성되고 여러 화학 반응 단계를 거쳐 NOx를 N₂로 환원하게 된다 [2,3].

이러한 부분적 연료 농후 지역의 생성에도 불구하고 보일러 내부는 항상 전체적으로 연료 희박 상태가 유지되므로, 미연 탄화수소 및 일산화탄소의 완전 연소를 위하여 보일러 후단에서 공기를 추가로 도입하여 과연소 시킬 필요가 없다. 결국 NOx 저감 시스템을 더욱 단순화시키고 동시에, 기존 재연소 방법에서 총 연료의 20% 정도의 재연소 연료를 사용했던 것에 비해 10% 미만의 적은 양으로도 기존 재연소를 통한 NOx 저감 효율에 상응하는 높은 NOx 저감 효율을 기대할 수 있다.

재연소를 이용한 NOx 저감은 실험적인 방법뿐만 아니라 CFD 기법을 이용한 수치적 접근 방법도 많은 연구자들에 의해서 이루어지고 있다. Lei-Yong Jiang[4]은 Propane을 연료로 사용한 연소기에서 연소모델에 따른 NOx 생성을 모델링하였으며, Musfata Ilbas[5]는 수소와 탄화수소를 연료로 사용하는 연소기에서 복사모델에 따른 NOx 생성 특성을 고찰하였다. A.Frassoldati et. al[6]은 천연가스를 사용한 확산 화염에서 NOx 생성 특성이 초기 입력 속도 Profile과 경계조건, 수렴조건에 의해 달라짐을 수치 기법으로 계산하였다.

이러한 수치적 해석을 이용하여 연소로의 효율 증대를 기대할 수 있고 또한 환경오염 물질인 NOx 저감 및 연소로 내부의 유동을 예측 할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 연소로의 온도 분포 및 당량비에 따라 NOx의 발생 특성을 고찰하여 연료희박 재연소 기법을 적용한 연소 현상의 모델을 유도하였다. 이를 위하여 난류 효과를 고려한 유동장 및 복사 효과를 고려한 열전달 해석기법을 이용하였다. 또한 실험에 사용된 LPG의 산화 모델로 CO반응을 포함한 two-step반응 기구를 이용하였다.

2. 실험적 연구

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 실험 장치는 공기 및 연료공급 장치와 연소기, 연소로 등의 실험 장치들과 온

도 가스등의 측정 장치 등 크게 세 부분으로 나누어 생각 할 수 있다. 본 실험에서 사용된 연소기는 발열량 15 kW로 설계 하였다. 그 단면과 형태를 Fig. 1에서 개괄적으로 나타내고 있다. 연소기 중심의 직경 4 mm의 원형 파이프에서 연료인 LPG가 분사되고 동축 공기 공급관이 그 주위를 감싸도록 설계하였다. 또한 연소용 공기 공급을 원활하게 하고 연소 성능을 향상시키기 위하여 공기 공급 단의 선단에는 재순환 영역을 형성하도록 하였다. 재순환 영역 형성을 위하여 Radial flow vane swirler를 장착 하였는데 선회 수(S)와 선회 각(θ)는 각각 0.72와 45도로 설계하였다. 선회기의 선회 각과 선회수에 대한 계산은 다음 식 (2-1)을 이용하였다[7].

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (D_h / D)^3}{1 - (D_h / D)^2} \right] \tan \theta \quad (2-1)$$

본 실험에서 사용하는 연소로는 15 kW/m³ 이상의 열 부하를 견딜 수 있도록 설계 되었다. 재순환 영역을 고려하기 위해 연소로의 길이를 직경의 2배 이상이 되도록 직경 0.5 m 높이 1.2 m 실린더 형으로 제작하였다.

연소가스의 NOx, CO 성분과 O₂ 농도를 측정하기 위하여 가스 분석을 실시하였다. 가스 분석기는 Eutron 사의 Greenline MK2 제품을 사용하였다. 연소 가스에 포함된 공해 물질 CO, NO, NO₂와 SO₂ 등은 가스 분석기의 O₂ 농도를 기준으로 표시된다.

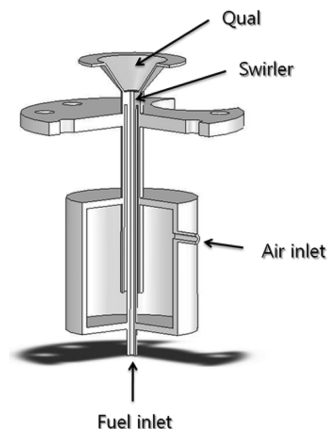


Fig. 1. Schematic of the combustion burner.

Table 1. Experimental conditions

Case	Primary fuel(kW)	Reburn fuel fraction	Reburn Zone location	initial O ₂ concentration(%)
1	15.0	0~0.15	0.5(m)	3.4
2	15.0	0.1	0.3~ 0.7 (m)	3.4

연소 가스가 가스 분석기 내로 들어오면 diffusion membrane을 통하여 수소 이온이 제거 되고 전기 화학적 산화 과정을 통해 각 공해 가스의 농도에 비례하는 전압을 생성하게 된다. 이러한 전압이 각각의 sensor를 통하여 연소 가스의 농도를 검출하게 된다. 가스 분석기는 O₂, CO, NO, NO₂, SO₂ 가스에 대한 5가지 센서를 통해 농도 측정을 하고 수분을 제거하기 위한 water trap으로 구성되어 있다. 본 연구에서 측정된 NO_x는 NO와 NO₂의 합으로 고려하였다. 또한, 연소장내의 온도 분포를 측정하기 위하여 고온(~1600℃)에서 안정적인 측정이 가능한 R-type (Platinum 19% rhodium(+) versus platinum(-))을 사용하였다. 열전대의 보정을 위하여 여러 가지 bead size를 이용하여 각 bead 직경 별로 같은 조건의 온도를 측정 한 후 bead 직경이 zero일 때의 값으로 보정하는 방법을 선택 하였다.

2.2 실험 조건

재연소 시스템의 효율에 영향을 미치는 여러 요소 중에서 본 실험에서는 Case 1에서 당량비(ϕ)를 고정 시킨 상태에서 재연소 연료량의 변화에 따른 NO_x 저감 및 CO 발생에 미치는 영향을 살펴보았다. 그리고 Case 2에서는 재연소 연료를 고정시킨 상태에서 재연소 연료 분사 위치에 따른 NO_x 발생 및 저감 특성에 관한 고찰을 하였다.

실험은 주 연소 영역에서 발열량을 15 kW로 일정하게 유지시킨 상태에서 전체적인 연료 희박 조건을 유지하기 위하여 재연소 연료량에 따라 당량비를 조절하였으며 배출 가스의 O₂ 농도를 기준으로 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 연료 조성 및 주 연소 영역에서의 조건은 Table 1과 같다. 또한 재연소 연료의 양은 다음과 같은 수식 (2-2)에 의하여 정의 되었다.

$$f_{re} = \frac{x}{F} \quad (2-2)$$

f_{re} = reburn fuel fraction

x = the amount of reburn fuel

F = the amount of total fuel (reburn+primary)

3. 해석

본 연구에서는 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하여 유동장 해석을 하였다. 실제 연소기내의 연소 현상을 모사하기 위하여 3차원 격자를 생성하였다. 연소로 내부의 벽면 온도를 측정하여 모델링의 경계조건으로 사용 하였다. 또한 압력과 속도

계산을 위하여 SIMPLE algorithm 을 사용하였고 복사 효과를 고려하기 위하여 DOM(Discrete Ordinate Method)을 사용하였다. 유동장의 난류 효과를 모사하기 위하여 $k-\varepsilon$ model을 이용하였다. LPG 연소 모델은 CO가 포함된 two-step 모델을 사용하였으며 화학 반응의 난류 효과를 고려하기 위하여 eddy-dissipation 모델을 고려하였다.

3.1.1 지배 방정식

유동장은 운동량 방정식, 난류 방정식, 에너지 방정식 그리고 화학 방정식을 연계하여 해석 하였으며 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 기반으로 한 정상상태의 지배 방정식은 다음과 같다[8].

$$\begin{aligned} \text{연속방정식} & \quad (3-1) \\ \nabla \cdot \rho \mathbf{v} & = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{운동량 방정식} & \quad (3-2) \\ \nabla \cdot \rho \mathbf{v} \mathbf{v} & = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v} - \rho \overline{\mathbf{v}' \mathbf{v}'}) + \rho \mathbf{g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{에너지 방정식} & \quad (3-3) \\ \nabla \cdot (\rho \mathbf{c}_p T) & = \nabla \cdot (k \nabla T - \sum_j h_j J_j - \rho \mathbf{c}_p \overline{\mathbf{v}' T'}) + S_h \end{aligned}$$

지배 방정식 (3-2)과 (3-3)에 나타난 Reynolds stress 항과 turbulent heat flux 항은 Boussinesq 가설을 이용하여 다음과 같이 치환하여 해석 하였다.

$$\rho \overline{\mathbf{v}' \mathbf{v}'} = -\mu_t \nabla \mathbf{v} \quad (3-4)$$

$$\rho \mathbf{c}_p \overline{\mathbf{v}' T'} = -k_t \nabla T \quad (3-5)$$

난류 영향을 고려하기 위하여 다음과 같은 standard $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였다.

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} k = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + S_k \quad (3-6)$$

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} \varepsilon = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + S_\varepsilon \quad (3-7)$$

또한 난류 점도(μ_t)와 난류 전도도(k_t)는 다음과 같이 정의 하였다.

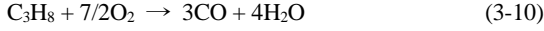
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-8)$$

$$k_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (3-9)$$

본 연구에서는 $C_u=0.0845$ $Pr_t=0.85$ 로 가정 하였다.

3.1.2 연소 반응 모델

실험에서 사용된 LPG의 경우 95%가 프로판(C_3H_8), 5% 정도가 메탄(CH_4)로 구성되어 있으므로 연소계산은 프로판에 대해서만 고려하였다. 프로판에 대한 산화반응모델은 CO 반응을 포함한 two-step 반응기 구조 다음과 같이 가정하였다.



Eddy-dissipation의 반응율은 large turbulence time scale(k/ϵ)에 의해 결정 된다. 생성율과 반응율은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{\nu'_{R,r} M_{w,R}}\right) \quad (3-12)$$

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N \nu'_{j,r} M_{w,j}} \quad (3-13)$$

Y_P 는 생성되는 화학종의 질량 분율을 나타내고 Y_R 는 각각 반응물의 질량 분율을 나타낸다. 또한 A, B는 경험적 상수로 본 연구에서는 4.0과 0.5로 사용하였다.

3.1.3 복사 열전달

본 연구에서는 확산연소의 모델링에 가장 널리 사용되고 있는 DOM(Discrete Ordinate Method)을 사용하였다. 복사 강도를 구하기 위해서는 복사 전달 방정식을 적당한 수치적 방법으로 모사하여야 하며 연소로 인하여 발생하는 기체의 흡수 및 방사를 고려한 복사 전달 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -kI(\vec{r}, \vec{s}) + kI_b \quad (3-14)$$

또한 연소 환경에서 여러 화학종의 열 흡수율을 고려하기 위하여 회체가산 가중합산 모델(WSGGM)을 적용하였다.

3.1.4 NOx 생성 모델링

본 연구에서는 연료에 NOx 성분이 거의 없는 LPG(Liquefied Petroleum Gas)를 사용하였으므로 fuel NOx의 생성은 없다고 가정하고 thermal NOx와 prompt NOx의 생성만을 고려하였다.

1) Thermal NOx formation

Thermal NOx의 생성은 유동장 내의 온도조건에 큰 영향을 받는 Zeldovich mechanism에 의해 결정 된다.



위의 반응 식 (a), (b)를 살펴보면 반응식 (a)에서 매우 강한 결합인 N_2 결합(dissociation energy of 941 kJ/gmol)이 끊어져야 하는 것을 알 수 있다. 그렇지만 N_2 의 산화반응인 반응식 (b)는 상대적으로 적은 에너지가 필요하게 된다. 그러므로 연료가 매우 농후한 조건을 제외한 대부분의 연소 환경에서 N 원자의 생성과 N의 산화 반응은 준 평형 상태를 이룬다고 가정할 수 있다. 그러므로 thermal NOx 생성율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{f,1}[O][N_2] \frac{(1 - \frac{k_{f,1}k_{f,2}[NO]^2}{k_{f,1}[N_2]k_{f,2}[O_2]})}{(1 + \frac{k_{f,1}[NO]}{k_{f,2}[O_2] + k_{f,3}[OH]})}$$

2) Prompt NOx Mechanism

화염 면 근처에서 공기 중에 N 성분과 CHi radical의 반응으로 NO를 생성하게 된다. 반응에 참여하는 주 hydrocarbon radical 은 CH_2 와 CH 로 알려져 있다.



위의 화학 반응식은 대표적인 Prompt NOx의 화학반응을 통한 생성 경로를 나타낸다.

초기 화염영역에서는 높은 온도와 연료 농후 조건에 의하여 N radical은 대부분 N_2 로 생성 되는 대신 prompt NOx로 변환 된다고 가정할 수 있다. prompt NOx 생성율은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{pr}[O_2]^a [N_2][FUEL]e^{-Ea/RT}$$

a는 주어진 oxygen reaction order를 R는 universal gas constant를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

4.1 해석 결과 검증

FLUENT6.3 Code를 이용한 수치해석을 검증하기 위하여 실험결과 값과 비교 검증을 하였다. 실험 조건 case1의 조건에서 재연소 연료를 분사하지 않는 환경에서 연소로 중앙지점의 축방향의 온도 분포와 CO 및 NO농도를 이용하여 해석 코드를 비교 검증하였다. Fig. 2는 연소로 중앙 지점에서 축방향 온도 분포의 실험값과 해석 값의 비교를 나타낸다.

초기 화염의 생성부분인 0~0.3 m 지역까지는 해석 값이 실험치보다 높게 나타나는 경향이 있는데 이는 실험의 측정 오차와 LPG의 연소반응을 간단한 two-step 모델을 사용함으로써 생길 수 있는 해석상의 오차라고 판단된다.

하지만 연소로 후단 부근에서는 실험 측정치의 오차 범위 내에 해석 값이 나타나므로 비교적 정확한 실험 결과를 예측하고 있다. 또한 Fig. 3, 4는 축방향의 CO 및 NOx 농도를 실험값과 해석 값의 비교를 보여준다. 그래프에서 볼 수 있듯이 초기 화염 생성구간(0~0.3 m) 지점에서는 실험값과 해석 값의

차이가 나타나지만 연소로 후단으로 진행할수록 10% 이내의 오차로 실험치와 유사한 경향을 보여 주고 있다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 화염 생성구간(0~0.3 m) 근방에서 CO 발생이 급격히 증가하는 이유는 주연소 영역에서 산화제 공급시 선회기에 의하여 공기의 흐름이 반경 방향으로 향하기 때문에 외부로부터의 공기 공급이 부족하여 연료가 완전 연소를 이루기 못하기 때문이다.

하지만 연소로 후단으로 갈수록 연소용 공기의 공급으로 연소가 활발히 이루어져 CO농도는 감소되는 것으로 판단된다. Fig. 4의 NOx 발생 분포를 살펴보면 주 연소 영역에서 적은 값을 나타내고 후류로 갈수록 증가하여 화염영역의 끝단에 해당하는 0.3~0.4 m 지점부터 일정해 지는 것을 볼 수 있는데 주연소 영역에서 발생한 NOx가 후류로 갈수록 축적되기 때문이다.

또한 화염대 영역은 버너 끝단에서 0.3~0.4 m 지점에서 관찰 된다. 이는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 C₃H₈의 mole fraction 이 0.4 m 근방에서 0으로 수렴하는 것을 볼 수 있는데 이는 화염면의 끝단에서 C₃H₈이 모두 연소된 상태를 나타낸다.

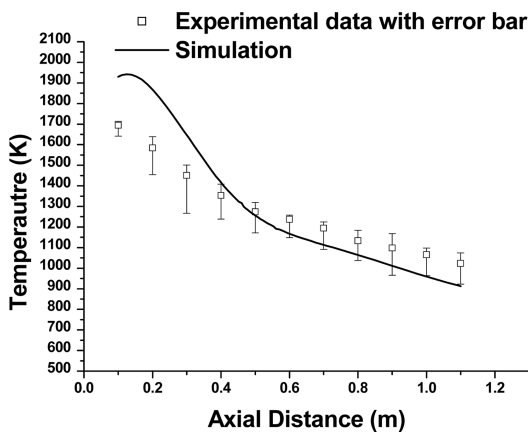


Fig. 2. Axial temperature distribution at the centerline.

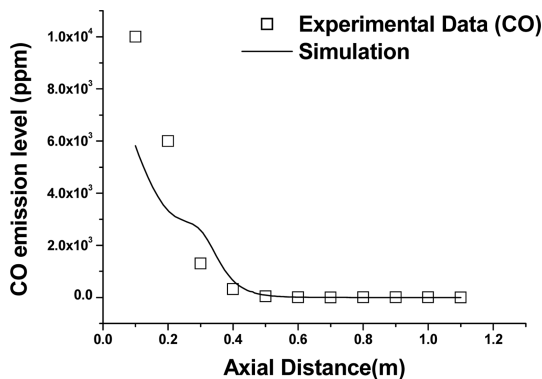


Fig. 3. CO emission level along the axial direction.

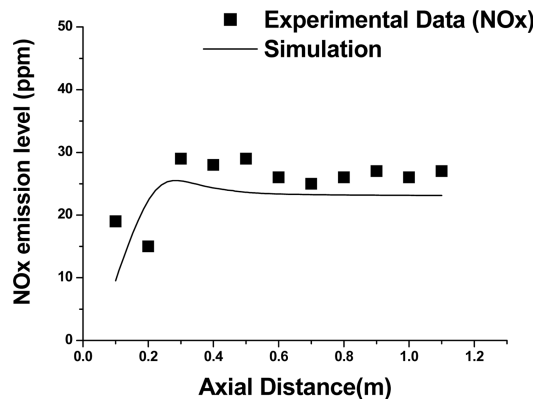


Fig. 4. NO emission level along the axial direction.

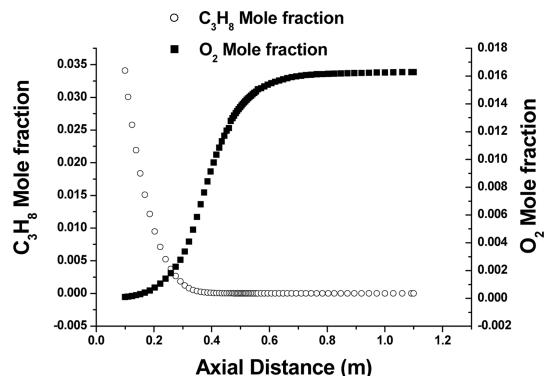


Fig. 5. C₃H₈ and O₂ mole fraction along the axial direction (simulation result).

4.2 실험 및 해석 결과

case 1의 실험시 재연소 연료 비율이 0.13에 이를 때 최대 45%의 NOx 저감을 이룰 수 있다.

주 연소 영역의 연소 가스와 재연소 연료의 탄화수소기와 반응하여 반응식 (1)~(5)와 같은 화학 반응식이 진행 된다. 재연소 연료의 분사에 따라 생성된 탄화수소기 CHi radical은 NO와 반응하여 HCN radical을 생성하게 되고 아래의 화학 반응 단계를 거쳐 결국 NO를 N2로 환원하게 된다. 이러한 반응이 원활히 이루어지기 위해서는 탄화수소 계열 연료인 CHi와 NO와의 적절한 혼합이 필수적인 요소이다.

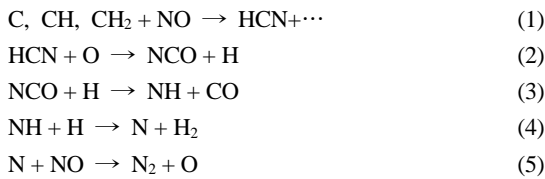


Fig. 6에서 볼 수 있듯이 재연소 연료량이 증가하

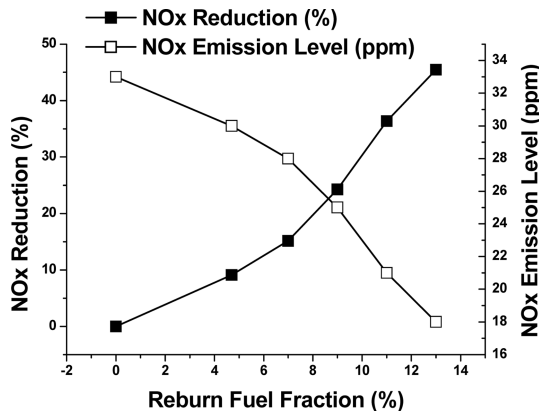


Fig. 6. Effect of reburn fuel fraction on NOx reduction.

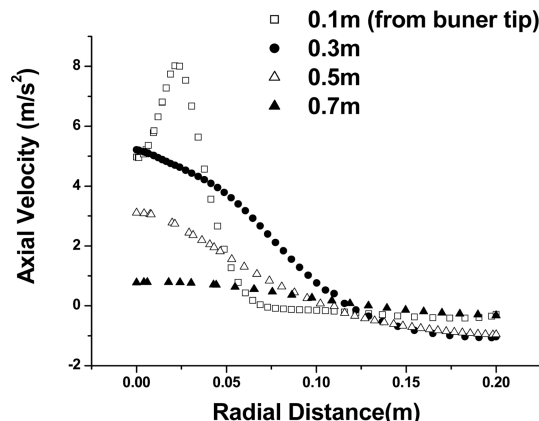


Fig. 7. Axial velocities profile for different distance from the burner tip (simulation result).

면서 NOx 저감량은 재연소 연료 13%를 사용하였을 때 최대 45%에 이르는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 7에서는 재연소 연료를 분사하지 않는 조건에서 버너 끝단에서 0.1~0.7 m 떨어진 지점에서의 반경 방향으로의 속도 분포를 나타낸다. 이를 통하여 연소로 내부의 재순환 유동이 어느 지점에서 활발한지 파악 할 수 있다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 0.7 m 지점에서부터 반경방향으로 속도분포가 거의 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러므로 다른 지점과 비교하여 재순환 유동에 의한 영향이 거의 없다고 할 수 있다.

실험 조건 case 2에서는 재연소 연료의 비율을 총 연료의 10%로 일정하게 유지시킨 상태에서 재연소 연료 분사위치를 변경하며 실험을 하였다. 재연소 연료 분사 후에도 연소로 내부는 연료 희박 조건을 유지 하도록 당량비 $\phi=0.86$ 로 유지 하였다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 일정한 재연소 연료를 분사 하더라도 분사 지점이 0.3~0.5 m 지점에서는 3 ppm 미만의 CO가 발생 하는 것을 볼 수 있다.

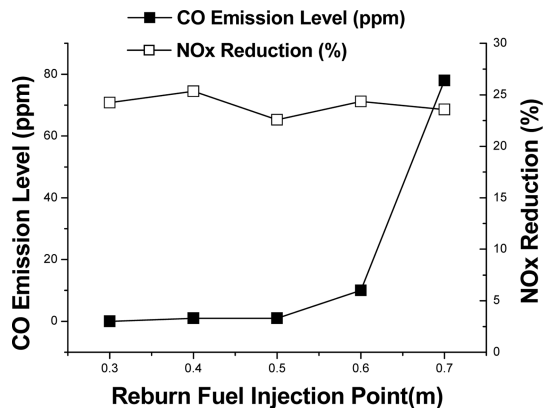


Fig. 8. Effect of reburn fuel injection point on NOx reduction and CO emission.

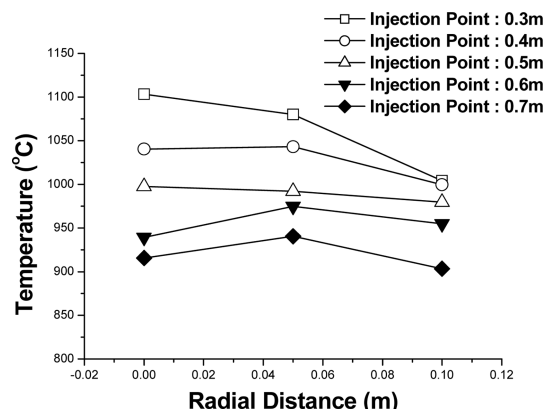


Fig. 9. Radial temperature distributions at the various reburn fuel injection point.

하지만 분사 지점이 연소로 후류로 갈수록 CO의 급격한 발생을 확인 할 수 있다.

Hayhurst, A.N. and Parmar[9]는 주연소 과정에서 CO와 CO₂를 주된 생성 혼합물로 생각하고 다음과 같은 화학반응식에 의하여 CO가 CO₂로 환원 된다고 하였다.



이러한 결과는 CO의 산화 반응인 (6)식은 본 실험에서는 약 950℃ 이상에서 활발히 반응하고 그 이하의 온도 범위에서는 산화 반응이 활발히 일어나지 않는다고 생각할 수 있다. Fig. 9는 분사 지점에서의 반경 방향으로의 온도 분포를 나타낸다. 재연소 연료 분사 지점이 버너 끝단으로부터 0.6 m 떨어진 지점부터는 반경방향의 온도 분포가 950℃ 이하에서 유지되는 것을 볼 수 있다.

또한 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 분사 지점이 0.5 m 이하 지점에서는 재연소 연료가 분사 되는 연소로 벽면 근처에서 재순환 유동이 활발한 것을 볼 수 있다.

즉, 재연소 연료가 분사 되더라도 일정 부분은 재순환 유동에 의하여 연소로 상류로 흘러 들어간다고 생각 할 수 있다. 하지만, 0.7 m 이상의 재연소 연료 분사 지점에서는 축 방향으로의 속도 분포 및 온도 분포도 거의 일정하므로 유동이 안정화 되었다고 생각할 수 있다. 즉, 상류 지점과 비교하여 연소로 상류로 향하는 재순환 유동을 무시할 수 있다. 그러므로 CO의 산화 환원 반응의 원인으로 높은 온도장 및 재순환 유동으로 인한 재연소 연료의 연소로 상류로의 유입을 고려 할 수 있다.

Fig. 10은 실험 조건 case 1에 대한 해석 결과를 나타낸다.

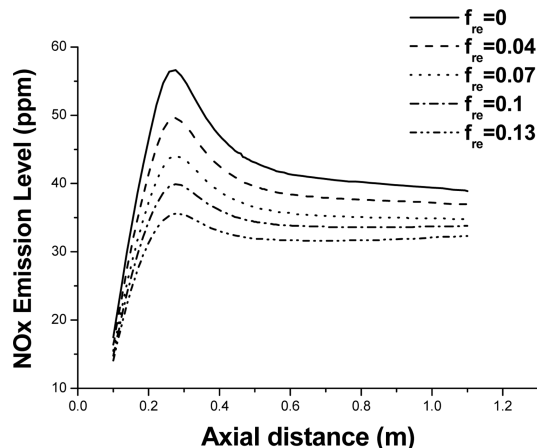


Fig. 10. NOx emission level for different reburn fuel fraction (simulation result).

재연소 연료의 양이 증가함에 따라 NOx 저감율이 선형 적으로 증가하여 최대 30%의 NOx 저감을 달성하였다. 재연소 연료가 분사되는 지점은 축방향으로 0.5 m 지점 이지만 NOx가 저감이 이루어지는 부분은 0.3 m 지점으로 생각할 수 있다. 이것은 재순환 유동에 의해 벽면에서 분사된 재연소 연료가 연소로 상류로 유입되어 분사지점보다 0.2 m 낮은 곳에서 NOx 저감 반응이 이루어 졌다고 사료된다.

5. 결론

연료희박 재연소의 연소 특성을 규명하기 위하여 LPG 연료 연소에 관한 실험 및 수치적 연구를 진행하였다. 이를 통하여, 연료희박 연소의 NOx 저감 및 CO 발생 특성과 국부적 유동 특성을 관찰 하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) Propane-air 2step model 및 복사 열전달 모델을 사용하여 15 kW LPG 가스버너가 장착된 연소로를 해석 하여 실제 실험 결과와 비교 검증하였다.
- 2) 연료희박 재연소 기법은 재연소 연료량이 총 공급 열량의 13%에 이를 때 추가 적인 공기공급 없이 약 45%의 NOx 저감과 CO의 zero emission을 달성하였다.
- 3) CO의 산화 환원 반응의 원인으로 분사 위치의 950℃ 이상의 온도 분포와 연소로 내부의 재순환 유동으로 인한 재연소 연료 일정 부분이 연소로 상류로의 유입을 고려할 수 있다.
- 4) 재순환 유동이 활발한 지역에서는 재연소 연료의 연소로 상류로 유입으로 인하여 NOx 저감 반응은 분사 지점 보다 낮은 곳에서 이루어진다.

후기

이 연구는 “지식 경제부 에너지 자원기술 개발 사업”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] Zeldovich, Y. B., “The oxidation of nitrogen in combustion and explosions,” *Acta Physicochim. URSS*, Vol. 21, No. 4, 1946, pp. 577-628.
- [2] Folsom, B. A., Sommer, T. M., and Royne, R., “Demonstration of combined NOx and SO₂ emission control technologies involving gas reburning,” International Conference on Environmental Control of Combustion Process. Honolulu, October 7-10, 1991.

- [3] Frederiksen, R., "Fuel Lean Gas Reburn (FLGRTM) Technology for Achieving NOx Emissions Compliance: Application to a Tangentially-Fired Boiler," 1998 Joint-American/Japanese Flame Research Committee International Symposium, 1998.
- [4] Lei-Yong Jiang, "A critical evaluation of NOx modeling in a model combustor," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2005, Vol. 127, pp. 483-491.
- [5] Mustafa Ilbas, "The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen-hydrocarbon combustion modeling," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, Vol. 30, pp. 1113-1126.
- [6] Fassoldati, A.a, Frigerio, S.a, Colombo, E.b, Inzoli, F.b, Faravelli, T.a., "Determination of NOx emission from strong swirling confined flames with an integration CFD-based procedure," *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 11, 2005, pp. 2851-2869.
- [7] Gupta, A. K., Lilley, D. G., and Syred. N., "Swirl Flows," Abacus, Inc, 1984.
- [8] Fluent manual 6.3
- [9] Hayhurst, A. N. and Parmar, M. S., "Does solid carbon burn in oxygen to give the gaseous intermediate CO or produce CO₂ directly? Some experiments in a hot bed of sand fluidized by air," *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, No. 3, 1998, pp. 427-438.

접수일 : 2009. 05. 19
심사완료일 : 2009. 06. 10