

시험용 연소로에서의 다단 저 NOx 버너의 실험 및 수치적 연구

최윤기[†] · 강경태* · 임기석** · 고동완** · 김용모***

(2004년 3월 26일 접수, 2004년 8월 25일 심사완료)

Experimental and Numerical Study of Low NOx Multi-Staged Burner in the Test Combustor

Yun-Ki Choi, Kyung-Tae Kang, Ki-Suk Lim, Dong-Wan Ko and Yong-Mo Kim

Key Words: Multi-Stage Burner(다단 버너), Low NOx Burner(저 NOx 버너), Turbulent Diffusion
Flame(난류 확산 화염)

Abstract

Development of the low NOx heating boiler was strongly asked due to severe air pollution and the large number of boilers in Korea. Compactness of the commercial boiler was also important because of low manufacturing cost and easy installation. In this study, newly developed compact low NOx burner, using turbulent gas diffusion combustion with multi-staged air supplies and multiple fuel nozzles, was investigated. Comparison study of the new burner was performed between experimental results and computational analysis. Commercial computational fluid dynamic(CFD) program named CFX-5.6 was used for numerical analysis of the low NOx burner inside the test combustor. Comparisons of experiment data and numerical result were performed under various equivalence ratio and fuel flow rate.

기호설명

- ρ : 밀도[kgf/m³]
- μ_{eff} : 효율 점성[kgf · s/m²]
- μ_T : 난류 점성[kgf · s/m²]
- B : 체적에 가하는 힘의 합[kgf]
- k : 운동에너지[m²/s²]
- ϵ : 소산율[m²/s³]
- S_X : X종이에 대한 생성율[kmol/kmol]
- E_a : 활성화에너지[J/kmol]
- W_{NO} : 질량 분율[kg/kg]
- ϕ : 당량비

1. 서론

산업이 급속히 성장함에 따라 에너지의 소비가 증가되어 각종 연소기기에 의한 대기 오염이 심각한 상태이다. 국제적으로도 각종 환경 규제 기준이 강화되고 있는 실정이다. 연소가스 중에는 유해물질인 미연탄화수소, 일산화탄소, SO_x, NO_x 등이 환경규제 대상이 되고 있다. 특히 고온의 산화 과정을 통해 생성되는 NO_x는 LA형 스모그 현상의 주범으로 호흡기 질환, 산성비를 통하여 인체와 환경에 폐해를 일으키는 주요 유해물질 중 하나이다.

최근 이러한 공해 문제 등을 해소하기 위하여 여러 분야에서 연구가 수행되어지고 있다. 우리나라의 경우 현재 가정용 및 산업용 보일러의 경우 NO_x의 규제치가 없으나 2005년을 기준으로 대기가스 배출 허용 규정치가 낮아짐으로서 NO_x

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : cyk7653@hanmail.net

TEL : (041)589-8338, FAX : (041)589-8330

* 회원, 한국생산기술연구원 마이크로 유체팀

** (주)부스타 연구개발팀

***회원, 한양대학교 기계공학과

뿐만 아니라 CO, SOx 등의 배출가스의 제어 기술이 필요하게 되어졌다. 이러한 제어기술 중 NOx의 경우는 NOx 생성 및 억제에 대한 많은 연구가 행하여지고 있다.

연소 방식에는 연료 및 공기를 분리해서 공급하는 확산화염, 연료에 소량의 공기를 혼합하여 공급하는 부분 예 혼합 화염, 이론 혼합비 근방의 연료-공기 혼합비를 만들어 공급하는 예 혼합 화염으로 대별 할 수 있다. 각 화염들은 안정성, NOx 및 Soot 등의 공해 발생 측면에서 서로 다른 특징을 가지고 있다. 근래에는 NOx 발생특성도 연소 방식의 결정에 매우 중요한 인자로 부각되고 있다.

NOx의 생성은 유동, 전열, 혼합 등의 물리적 현상과 반응 등의 화학적 현상에 민감하게 반응하기 때문에 본 연구에서는 역화의 위험성이 없고 안정 화염 범위가 넓은 확산화염을 선택하였다. 하지만 확산 화염의 경우 NOx 발생량이 많은 점을 고려하여 다단 연소를 채택하였다.

NOx 저감 기술을 살펴보면 공연비, 체류시간, 연소온도 등 연소조건 조정과 재 연소, 다단계 연소 등 연소방법 및 버너 설계의 개선 등으로 나눌 수 있다. 본 연구에서 부분적으로 적용한 NOx저감 기술인 다단계 연소의 경우 Farmayan⁽¹⁾은 액체 연료를 사용해 공기의 단계적 공급에 의한 연소 방식을 적용하여 heterogenous 연소상태에서의 NOx 저감을 위한 다단 연소 효과를 제시하였으며, Javier⁽²⁾ 등은 연료의 단계적 공급에 의한 연소방식을 적용해 Semi-industrial scale의 연소기와 prototype 연소기의 연소 특성에 관한 비교 분석을 통해 NOx 배출량 감소를 위한 최적의 운전 조건을 제시하였다. 국내에서 단순한 형상의 산업용 보일러의 저 NOx 버너에 대한 전산해석 연구는 많았으나, 복잡한 형상의 연소기 전체를 해석하는 연구는 아직까지는 외국에서와는 다르게 활발하지 않은 실정이다. 일부의 연구에서 다차원 유동효과가 NOx 생성에 영향을 미침을 지적하면서 실질적인 연소장의 NOx 생성특성을 규명하기 위해서는 다차원 화염을 대상으로 한 연구의 필요성을 지적하기도 하였다.

본 연구에서 산업계와 공동 개발 중인 산업용 관류 보일러 연소기에 접목시킬 복잡한 형상의 버너를 대상으로 하여 수치해석과 실험을 수행하였다. 연구의 목적은 당량비 변화에 따른 연료

유량과 공기 유량 변화 시 생성되는 NOx 값과 온도장 등을 분석하고, 수치해석 값과 실험값의 비교를 통해 해석에 사용된 상용프로그램의 모델이 실험과 같은 경향의 결과를 나타내는가에 대해서 알고자 하였다. 수치 해석에는 ANSYS사에 의해서 개발된 상용 프로그램인 CFX-5.6를 사용하였다.

2. 수치해법

본 연구에서 사용된 저 NOx 버너의 유동장, 온도장 및 각 화학종의 발생량을 예측하기 위하여 기체상에서의 연속방정식, 운동량 방정식을 기초로 운동량의 전달과 물질 확산을 고려하였다. 본 연구에서 사용된 지배방정식, 난류 모델링은 앞서 발표한 연구⁽³⁾에서 사용한 k-ε 모델을 사용하였다.

2.1 지배방정식

2.1.1 화학적 반응 모델링

일반적으로 화학적 반응들은 초기 반응 Nc 구성 요소들을 포함한 K의 향으로 묘사할 수 있다.

$$I = A, B, C, \dots \quad \nu'_{kI} I \Leftrightarrow \quad I = A, B, C, \dots \quad \nu''_{kI} I \quad (1)$$

ν_{kI} 초기 반응 k에서 구성 요소 I에 대한 이론 반응 계수

생성율과 소모율인 S_I 는 구성요소 I에 대해 모든 기초 반응에 대한 진행율의 합으로 계산되며, 다음과 같이 표현된다.

$$S_I = W_I \sum_{k=1}^K (\nu''_{kI} - \nu'_{kI}) R_k \quad (2)$$

R_k = 반응 k에 대한 진행 초기 반응율

2.1.2 연소 모델링

연소 모델의 이동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho Y_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j Y_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \times \left(\Gamma_{I \omega} \frac{\partial Y_I}{\partial x_j} \right) + S_I \quad (3)$$

본 연구에는 난류연소모델로 Magnussen⁽⁴⁾이 제안한 eddy dissipation model을 사용하였다.

$$rate \propto \frac{\epsilon}{k} \quad (4)$$

Eddy Dissipation model에서 기초 반응 k의 진행의 값은 다음 두 개의 표현 중 가장 작은 값에 의해서 결정되어진다.

반응물 Limiter

$$R_k = A \frac{\epsilon}{k} \min \left(\frac{[I]}{\nu'_{kl}} \right) \quad (5)$$

[I]= I종의 몰 농도

생성물 Limiter

$$R_k = AB \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\sum_I [I] W_I}{\sum_P \nu'_{kl} W_I} \right) \quad (6)$$

p=기초 반응 k에서 전체 생성물의 구성 요소가 연결되어지는 값.

※ 다단일 경우: A=4.0, B=-1

2.2 NO model

많은 NO 저감 기술들의 기초가 되는 개념들은 다양한 질소 산화물들의 생성에 관한 반응 mechanism에 대한 이해로부터 비롯된다. NO는 Fuel NO, thermal NO, Prompt NO, NO Reburn의 4개 mechanism을 통해서 만들어졌다.⁽⁵⁾

2.2.1 Thermal NO mechanism

공기 중에 질소의 직접적인 산화에 의한 NOx 생성은 다음과 같은 기체 상 화학 반응 경로로 구성되어 진다.



식 (14), (15)에 다음 반응을 추가하면 확장 Zeldovich 반응 Mechanism이 된다.



3가지 반응들의 값은 다음과 같이 표현된다.

$$k_1 = (1.8 \cdot 10^{11}) \exp \left(- \frac{38370}{T} \right) \quad (10)$$

$$k_2 = (6.4 \cdot 10^9) \exp \left(- \frac{3162}{T} \right) \quad (11)$$

$$k_3 = 3.0 \cdot 10^{13} \quad (12)$$

첫 번째 step은 한정적인 값을 가지는 경향을 가지며, NO와 N의 활성기 종들 모두가 생긴다. N 활성기는 반응 (15)의 Zeldovich mechanism⁽⁶⁾과

반응 (16) 확장된 Zeldovich mechanism에 의해서 산화되어지는 것으로 가정되었다.

다른 방법으로, 이 두 번째 산화 반응들은 만일 반응 (14)이 일어날 경우

$$S_{NO, thermal} = W_{NO} k_{thermal} [O][N_2] \quad (13)$$

$$k_{thermal} = 2k_1 \quad (14)$$

만일 O 활성기와 NO 활성기의 [O]와[N₂] 몰농도를 알면, Thermal NO mechanism은 계산할 수 있다.



$$[O] = 12567 [kmol^{1/2} m^{-3/2} K^{1/2}] \cdot T^{-1/2} \times \exp(-31096K/T) [O_2]^{1/2} \quad (16)$$

$$S_{NO, thermal, O_2} = W_{NO} k_{thermal} [O]^{1/2} [N_2] \quad (17)$$

$$k_{thermal, O_2} = 4.52414 \cdot 10^{15} [kmol^{-1/2} m^{3/2} K^{1/2} s^{-1}] \cdot T^{-1/2} \exp(69466K/T) \quad (18)$$

2.2.2 Prompt NO mechanism

평형 산소비를 이용하여 화염 영역에서 측정된 NO가 Zeldovich 반응 기구이다. 온도가 1800 K보다 낮을 때 나타나며, Thermal NO 생성률보다 훨씬 빠른 속도로 생성되기 때문에 prompt NO 라 정의하고 그 반응식은 다음과 같다.⁽⁷⁾



경험적으로 Prompt NO는 탄화 수소계 연료에서만 생성되고 온도, 연료의 종류, 당량비 등에 대한 의존성이 비교적 낮으나 연료가 풍부한 조건에서 발생하는 것으로 알려져 있다.

$$S_{NO, prompt} = W_{NO} k_{prompt} [O_2]^{1/2} [N_2] [Fuel] \left(\frac{W}{\rho} \right)^{3/2} \quad (21)$$

$$k_{prompt} = A_{prompt} \exp(-T_{A, prompt}/T) \quad (22)$$

$$A_{prompt} = 6.4 \cdot 10^6 [1/s], T_{A, prompt} = 36510 [K] \quad (23)$$

3. 대상 버너와 연소기

본 연구에서 실험 및 수치적 해석의 대상이 되는 버너의 형상은 실제 버너와 시험용 연소로의

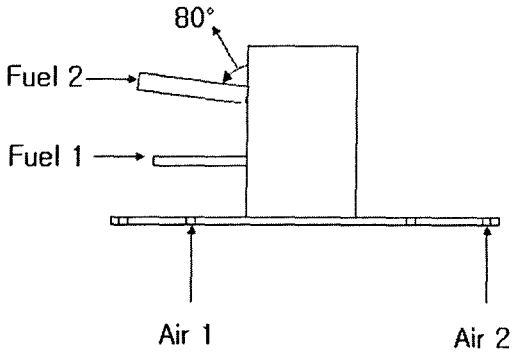


Fig. 1 Shape of burner

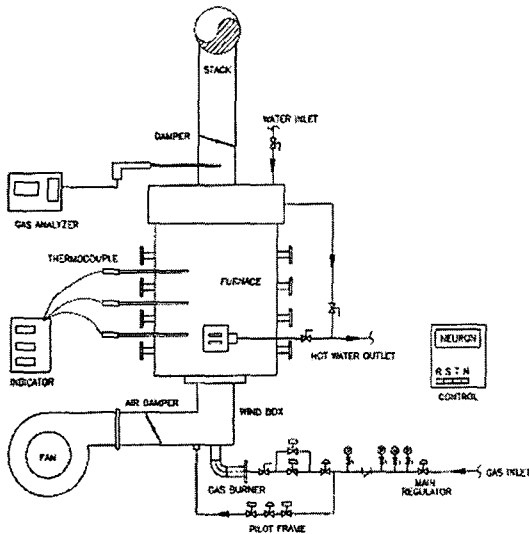


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

형상과 크기를 사용하였다. 실험 및 해석에 사용된 버너의 형상은 Fig. 1과 Table 1에 도시하였다.

버너의 용량은 300,000 kcal/hr~650,000 kcal/hr급이었고, 연소로는 화염 형상과 화염온도 및 배기가스 성분의 측정이 용이하도록 설계하되, 출구의 출구 화염 온도를 낮추며 보일러의 연소실과 동일한 구조로 보일러의 적용할 수 있는 형태로 만들었다. Fig. 2와 3에 나타난 연소로는 연소실, 버너, 공기 공급 장치, 수냉용 급수 장치, 연소이행 컨트롤러, 배기가스(Stack), 연소 가스 분석기 등으로 구성하였다. 또한 오랫동안 실험을 할 경우 배기가스의 온도 상승으로 인한 연소실의 과열로 인해 시험이 불가능 할 것으로 판단, 연소실 밖으로 수냉 공간을 만들었다.

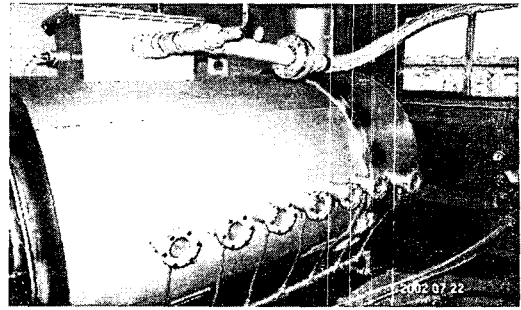


Fig. 3 Combustor

Table 1 Experiment & analysis condition

Contents	Length (mm)	Diameter (mm)	Area(m ²)
Burner	85	60	-
1st fuel nozzle	44	6	2.82E ⁻⁵
2nd fuel nozzle	55	9	6.36E ⁻⁵
Combustor	1650	900	-
1st air stage	-	-	0.000653m ²
2nd air stage	-	-	0.004102m ²

Table 2 Analysis of burner

Total fuel flow rate(m ³ /hr)	1st fuel nozzle (m/s)	2nd fuel nozzle (m/s)
12	6.48	4.57
15	7.94	5.68
18	9.43	6.51
21	10.9	7.90
24	12.3	9.00

4. 실험 방법 및 수치적 방법

당량비에 따른 연료 유량과 공기 유량의 변화 시키면서 출구 NO와 출구 CO, 출구 온도를 알아 보기 위해 오리피스와 인버터를 이용하여 공기를 제어하였고, 연료 유량의 제어는 연료 소비량을 측정하기 위한 가스미터기, 2차 정압기, 1·2차 가스량 조절 밸브, 오리피스 등을 이용해 제어하였다. 출구에서 배출 가스를 측정하기 위한 가스 분석기는 Testo - 350M/XL을 이용하였다.

실험에 사용한 연료는 상용 LPG를 사용했으며, 연료와 공기 모두 2단으로 투입하였다. 버너의 연료 노즐 1, 2단은 각각 8개의 노즐로 구성되어 있다.

수치적 설계는 원통형 연소기를 지면에 대해 수직인 형상 모델을 3차원으로 해석하였고, 화염은 C₃H₈-공기 난류 확산 화염을 계산 대상으로

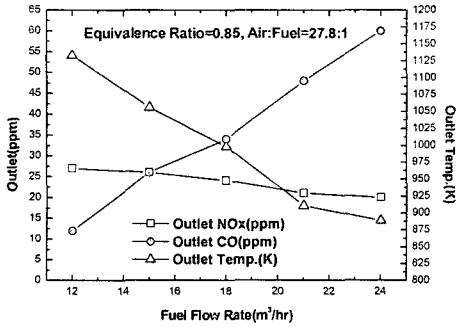


Fig. 4 Outlet data of experiment for change of fuel flow rate at equivalence ratio=0.85

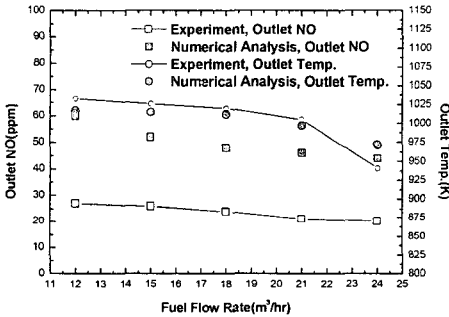
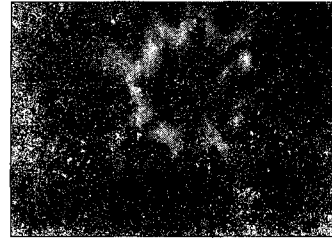


Fig. 5 Outlet NO of experiment and numerical analysis for change of fuel flow rate at equivalence ratio=0.85

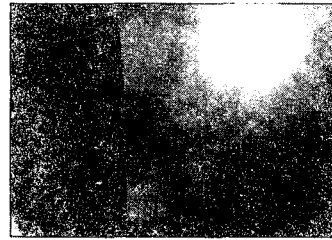
하였다. 본 연구에서 복사 모델은 P1 모델로서 특정조건에서는 NO 예측치를 합리적으로 예측이 가능하나 본 실험 및 수치적 해석이 되는 당량비와 연료 유량 변화에 경우에는 실험상의 경향을 잘 예측하지 못하고 복사를 고려하지 않는 경우보다 실험값과 먼 경향을 나타나는 것을 확인하고 복사 효과를 고려하지 않았다.

NO는 속도장, 체류시간, O₂의 농도, 화염의 온도와 밀접한 관계를 가진다. 본 연구에서는 당량비 변화에 따른 stack에서의 온도, 출구 NO양의 변화를 실험값과 수치 해석값을 통해 비교하였다.

출구 부분의 NO의 양을 비교하기 위해 실험과 수치해석 모두 출구 부분의 O₂의 배출농도는 3%로 고정시켰다. 수치 해석에서 필요한 버너부의 연료 투입 속도와 공기 투입부에서의 공기 유속



(a) Front



(b) Side

Fig. 6 Flame ($\Phi=0.85$, fuel flow rate = 18 m³/hr)

은 버너 공급부와 공기 공급부(wind box)를 각각 모델링하여 계산하였다.

5. 실험 및 수치해석 결과 비교

Fig. 4와 Fig. 5는 본 연구에 사용한 수치 계산 결과의 타당성을 검토하기 위해 당량비를 0.85로 고정한 후 연료 유량 변화에 대한 실험값과 수치해석값을 비교한 그래프이다. 연료 유량을 12 m³/hr~24m³/hr까지 3m³/hr 씩 증가시키면서 실험을 하였다. 실험의 조건에 의해서 연료 유량이 증가함에 따른 당량비에 의해 산소의 양이 증가하였다. 산소량의 증가와 연소실내의 체류시간의 감소로 인해 연료 유량이 증가 시 배기가스 출구부에서의 NO값이 감소하였다. 또한 보일러에 적용시키기 위한 출구 온도를 낮춤으로써 NO값이 작게 산출되는 것을 볼 수 있었다. 하지만, 출구 부분의 CO의 경우 NO와의 반비례적으로 연료 유량이 증가함으로써 증가하는 것을 볼 수 있었다. 수치 해석적으로 접근해 본 결과 버너 형상의 효과로 인해 연소기 내에서 유동의 재순환 영역이 생성되었으며, 그로 인해 연소실내에서

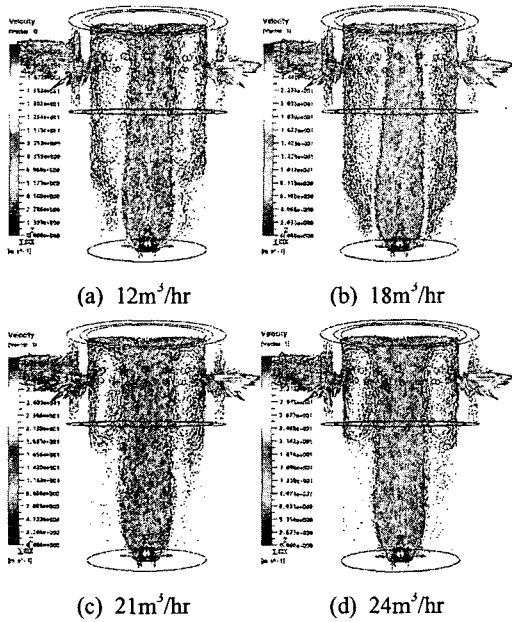


Fig. 7 Vectorline for change of fuel flow rate ($\Phi=0.85$)

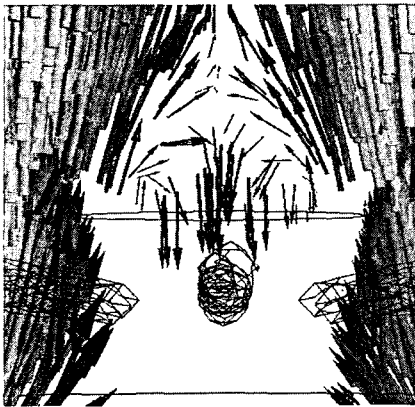
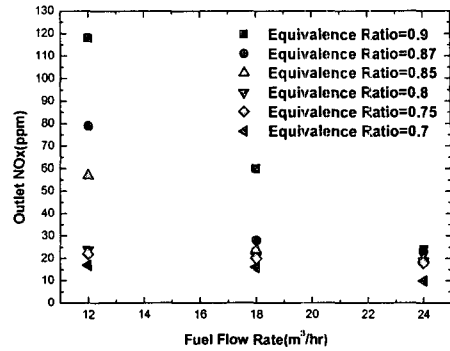
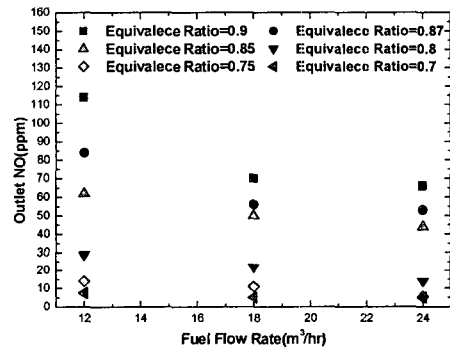


Fig. 8 Recirculation in burner tip

배출된 배기가스의 연소실 벽 주변과 버너 팁 부분에서 다시 재 연소되는 것을 볼 수 있었다. 각 연료유량에 대한 vectorline은 Fig. 7과 8에 도시하였다. NO의 분포는 최대 화염온도에서 최대 NO가 발생하였고, 각 연료 유량에 대한 최대 NO는 381 ppm~280 ppm이었고, 그에 따른 최대 NO에 대한 화염 온도는 2268 K~2210 K로 측정되었다. 실험값과 수치해석과의 출구 NO값과 온도 값을 비교해 본 결과 출구 NO의 경우 수치값



(a) Experiment

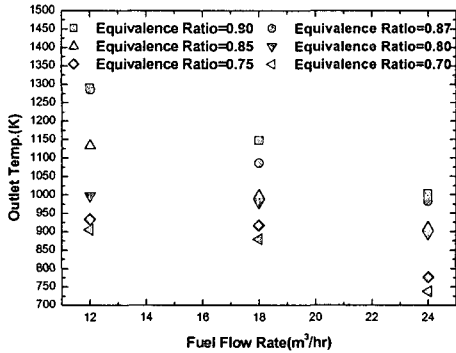


(b) Numerical Analysis

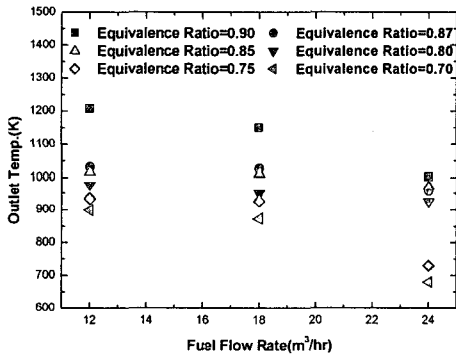
Fig. 9 Outlet NO of experiment and numerical analysis for change of fuel flow rate

이 실험값 보다 약간 큰 것을 볼 수 있는데, 실험의 경우 수치와 같은 이상적인 조건에서의 결과가 아니라, 실험 시 수반되어지는 열 손실 등으로 인한 외적인 반응들이 NO값의 감소가 수치적 계산일 때 보다 더 작용하여졌다고 본다. 그러나, 대체로 연료 유량이 증가함으로써 출구부분의 NO와 온도가 실험값과 수치값 모두 낮아지는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 9는 당량비와 연료 유량 변화에 따른 출구 NO와 온도에 대해서 실험값과 수치값을 비교하였다. 당량비는 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.87, 0.9로 고정하고 그에 대한 연료 유량 12, 18, 24m³/hr



(a) Experiment



(b) Numerical Analysis

Fig. 10 Outlet temp. of experiment and analysis for change of fuel flow rate

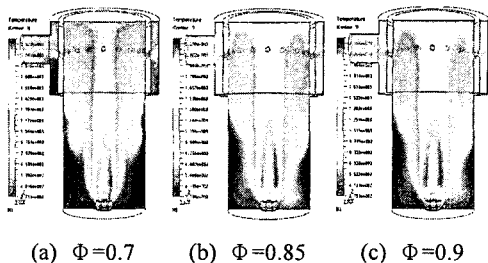


Fig. 11 Contour of temp. for change equivalence ratio at fuel flow rate = 24m³/hr

수치보다는 약간 낮게 산출되었으나, 연료유량 변화에 따른 각 당량비에 대한 유형은 실험값과 수치값 모두 연료 유량을 기준으로 연료 유량이 증가할 때 NO값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한 당량비 변화에 대해서는 당량비가 작아질수록 NO값이 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9의 (a)와 (b)는 각 당량비에 대한 연료 유량 증가 시 실험값 NO와 수치값 NO를 비교하였다. 실험의 경우 연료 유량이 증가할수록 NO값은 감소하였고, 당량비가 커질수록 NO값이 증가하였다. 각 당량비에 대해 연료 유량이 24 m³/hr 일 때 가장 낮은 NO값을 가졌다. 연료 유량을 증가시킴으로 인해 그에 따른 당량비에 의해 공기량이 증가되어 투입되었고, 증가된 공기의 투입의 영향으로 인해 산소의 양에 증가하였으며, 이는 연소실 내에서의 배출되는 연소가스의 연소실내의 체류 시간을 감소시켰으며, 또한 산소 양의 증가가 연소 온도를 증가시키는 것 보다 N₂ 농도를 줄어드는 쪽이 더 커서 NO 배출 수준을 저감시키었다. 수치해석의 경우 당량비가 0.85와 0.9일 때는 NO값이 높은 값에서 형성되었으나 당량비가 작아질수록 실험값과 같은 비슷한 값을 나타내었다. 해석의 경우도 실험의 경우같이 각 당량비에서 연료 유량이 증가할 때 NO값이 작아지는 것을 알 수 있었다. 각 당량비와 연료 유량에 대한 NO값의 크기는 실험값과 수치 해석값에서의 차이는 있으나 당량비가 증가하면서 NO 값이 증가하는 것과 연료 유량이 증가할 때 NO값이 감소하는 것은 실험값과 수치해석값 모두 같은 유형을 나타내었다. 아직까지 NO 반응 기구에 대한 모델링이 완전하지 않는 점을 미루어 봤을 때 실험값을 정확히 예측하는 것은 어렵다. 이러한 점을 고려하여 보았을 때 본 수치적 계산 결과는 실험값을 합리적으로 예측하고 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 배출 부분 온도를 통한 실험값과 수치해석값을 비교한 그래프이다. 연료 유량과 당량비 변화를 통한 결과를 비교하였는데, NO 결과값과 마찬가지로 실험값과 수치해석값의 약간의 차이는 있었다. 하지만, 당량비와 연료 유량 변화에 따른 온도의 변화 추이는 실험값과 수치해석값 모두 같은 유형을 나타내었다. 실험값의 출구 온도의 분포를 보면 700 K~1300 K 사이를 유지하고 있으며, 수치해석값의 경우 680 K~1250

에 대하여 배출가스를 측정하였다. NO의 경우 그래프에서 보듯이 수치 해석적 값이 실험값의

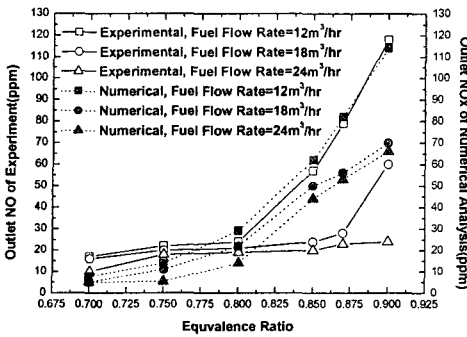


Fig. 12 Outlet NO of experiment and analysis for change of equivalence ratio

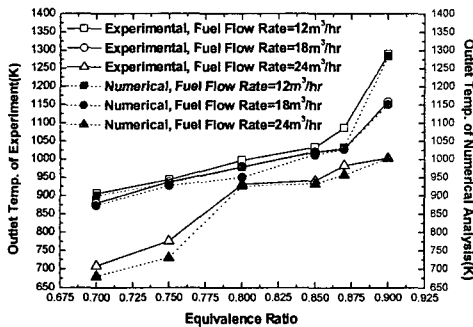


Fig. 13 Outlet temp. of experiment and analysis for change of equivalence ratio

K의 온도를 유지하였다. 출구 온도의 경우 NO와 마찬가지로 당량비가 작고 연료 유량이 증가함에 따라 낮았다. 온도 또한 출구 NO와 마찬가지로 배출부의 NO가 가장 낮은 연료 유량 24m³/hr 일 때 가장 낮은 온도를 형성하였다. 결론적으로 당량비의 경우 당량비가 증가할수록 온도와 NO의 값 또한 증가하는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 11은 연료 유량 24m³/hr 일 때 당량비 변화에 따른 온도장을 나타낸 것이다. 당량비가 클수록 최대 화염대가 연료 노즐을 축으로 길게 뻗어 있으며, 온도가 높은 온도장이 당량비가 클수록 연소기 끝 부분에 넓게 형성되었고, 배출구에서는 연소기 하단부에서 형성된 온도장이 배출구에서 측정된 온도에 영향을 미쳤다. 당량비가 낮아짐으로써 온도장의 불 나타났으며, 공기가 투

입되는 공기 투입부 부분의 연소실 하단부에서는 당량비의 감소에 따라 낮은 온도장을 나타내었고, 온도장이 불균일하였다. 다른 연료 유량의 경우에도 각 당량비에 Fig. 11과 같은 경향을 나타내었다.

Fig. 12와 13은 각 연료 유량에 대한 당량비 변화시 출구 NO와 출구온도를 실험값과 수치 해석값으로 비교한 것이다. 앞에서 언급했던 것과 같이 당량비의 변화 시에 연료 유량이 증가함으로써 출구 NO와 온도가 모두 감소하였다. 출구 NO와 출구 온도가 감소한 이유로는 연소기 형상으로 인하여 연소기 내에서의 배출되는 연소가스의 재순환 영역 생성되어 연소가스가 재 연소되기 때문이다.

6. 결론

3차원 난류 다단 확산화염을 적용한 저 NO_x 버너에 대한 실험과 수치적으로 당량비, 연료 유량을 변화시키면서 NO, 배출온도, 실험으로 출구 CO를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) NO와 출구 온도의 경우 실험값과 수치 해석값 모두 연료 유량이 증가하고 당량비가 작을수록 NO값은 작아졌고 출구온도의 경우 낮아진다. 수치적으로 접근한 결과 버너의 용량의 비례 NO가 적게 산출되는 것이 연소기 내에서의 배기가스의 재순환과 다단의 효과, 당량비에 인한 O₂로 인해 NO가 적게 산출되는 것을 볼 수 있었다. 출구온도는 실험값의 경우 700K~1300K, 수치 해석값으로는 680K~1250K사이를 유지하였다. 또한 출구 NO의 경우 15ppm~55ppm, 실험값은 출구 CO의 경우 12ppm~60ppm을 나타내었으며, 현재 적용되는 규정치 보다 낮은 결과값을 보였다.

(2) 실험의 출구 CO의 경우 연료 유량 증가에 대하여는 NO값과는 반대로 CO값이 증가하는 것을 보였다.

실험과 수치해석을 통하여 NO의 경우 실험값과 해석값이 정확히 같은 값을 가지지는 않았으나 매우 유사한 경향을 나타내고 근접한 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 수치값이 실험값에 비해 약간 높은 NO값을 가지고 있는데, 이는 완벽한 조건에서의 수치적 조건과는 달리 실험 시 발생하는 열 손실이나 실험 외적인 조건에 의해서

실험값이 수치 결과 값보다 낮은 값을 가지게 되었다. 또한 아직까지 NO 반응기구에 대한 모델링이 완전하지 않는 점을 고려해 보았을 때 본 계산 결과는 실험값을 합리적으로 예측하는 것을 알 수 있었고, 수치 해석 결과를 이용하여 실험에서 자세히 분석할 수 없었던 NO에 대한 생성 특성 및 연소기 형상 변화, 조건 변화에 대한 NO의 변화에 대해 해석을 면밀히 해보는 것이 충분히 의미가 있다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 청정에너지 개발 사업지원 하에 "1ton/hr 규모 저 NOx 가스연소 소형 관류보일러 개발사업"의 일환으로 이루어졌으며, 에너지 관리공단, 산업자원부 관계자 분들에게 깊은 감사의 말을 올립니다.

참고문헌

- (1) Walter, F. Farmayan, 1980, "The Control of Nitrogen Oxides Emission by Staged Combustion," M. S. Thesis, *Department of mechanical engineering The Massachusetts Institute of Technology.*
- (2) Javier, M. Ballester, Cesar Dopazo, Norberto Fueyo, Manuel Hernandez and pedro J. Vidal, 1997, "Investigation of Low NOx Strategies for Natural Gas Combustion," *Fuel*, Vol. 76, No. 5, pp. 435~446.
- (3) Choi Yun-Ki and Kang Kyun-Tae, 2002, "Numerical and Experimental Study For Burner of Low NOx Formation of Multi-Stage In a Combustor," *Presented at the 27th KOSCO symposium*, pp. 65~74.
- (4) Magnussen, B. F., 1989, "The Eddy Dissipation Concept for Turbulent Combustion Modeling. Its Physical and Practical Implications," *Presented at the First Topic Oriented Technical Meeting, International Flame Research Foundation, The Netherlands.*
- (5) De Soete, G.G., 1990, "Fundamental Chemistry of NOx and N₂O Formation and Destruction," *3rd flame research course on fuel utilisation and environment*, Int Flame Research Foundation.
- (6) Polifke, W., Dovveling, K. and Sattelmayer, T., 1995, "A NOx Prediction Scheme for Lean-Premixed Gas Turbine Combustion Based on Detailed Chemical Kinetics," *In international Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Houston TX.*
- (7) De soedte, G. G., 1990, "Fundamental Chemistry of NOx and N₂O Formation and Destruction," *3rd flame research course on fuel utilisation and environment*, Int Flame Research Foundation.
- (8) OH, C. H. and LEE, C. E., 1998, "Numerical Analysis of NOx Formation Characteristics in CH₄-Air Jet Diffusion Flame," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 22, No. 2, pp. 193~204.