

# 축열식 저 NO<sub>x</sub> 연소기의 배가스 재순환이 연소특성에 미치는 영향

강민욱\* · 윤영빈\*\* · 동상근\*\*\*

## The effect of flue-gas recirculation on combustion characteristics of regenerative low NO<sub>x</sub> burner

Minwook Kang, Youngbin Yoon , Sangkeun Dong

### ABSTRACT

The conventional regenerative system has a high thermal efficiency as well as energy saving using the high preheated combustion air. in spite of these advantages, it can not avoid high nitric oxide emissions. Recently, flameless combustion has received much attention to solve these problems. In this research, numerical analysis is performed for flow-combustion phenomena in the self regenerative burner. In this analysis we used Fluent 6.0 code. the that is developed for commercial use, Methane gas is used as a fuel and two-step reaction model for methane and Zeldovich mechanism for NO generation are used. the velocity of the preheated combustion air is used as a parameter and we analyze the characteristics of flow-field, temperature distributions and NO emissions. Due to the increased recirculation rate, the maximum temperature of flame is significantly increased and NO<sub>x</sub> emissions is reduced

**Key Words** : Flameless Oxidation, Preheated combustion air, Flue gas recirculation, Regenerative low NO<sub>x</sub> burner, Fluent Code

### 1. 서 론

선진 공업국에서는 이미 오래 전부터 연소 배출가스에 대한 심각성을 인지하여 환경오염에 대한 배출 허용기준을 법제화하였으며, 또한 환경규제가 강화되어 가고 있는 실정이다.

이 같은 환경보존측면에서 그 규제가 강화되고

있는 공해물질 중 대표적인 것이 질소산화물이다.

대기중의 질소산화물은 광 화학적 스모그를 발생시키고 산성비의 원인을 제공하며, 성층권에서의 오존층을 파괴하여 지구온난화에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 하지만 국내 공업용 연소기에서 연소 시 배출되는 질소산화물량은 선진국 규제치 기준에서 보면 매우 위험한 수준이다. 이러한 환경규제를 만족시키면서 화염의 안정성 및 고효율 연소기를 개발하는 것은 용이하지 않다. 일반적으로, 예열된 공기를 이용함으로써 높은 에너지 효율을 얻을 수가 있지만<sup>[1][2]</sup> 높은 예열 공기는 화염의 최대온도를 높여 열적 NO<sub>x</sub> 생성

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

† 연락처자 , ybyoon@snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\*\* 한국에너지기술연구원

을 촉진시킨다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로, 주목을 받고있는 연소기술로는 무화염 산화반응( Flameless oxidation )이 있다.<sup>[3]</sup> 무화염 산화반응이란, 임의의 공간에서 연소속도의 개념을 적용하기 곤란한 연소반응이 진행됨을 의미하며 이러한 특성은 예열된 연소용 공기의 온도가 대부분의 가스연료의 자연착화온도인 500~600. C 이상을 초과하게 될 때, 보염기구 유무에 관계없이 착화가 일어나는 현상을 말한다.<sup>[3][4]</sup> 예열된 공기의 온도가 높을수록 연소는 지극히 낮은 산소농도에서도 가능하게 되어, 로내에 연료를 직접 분사하는 FDI( Fuel Direct Injection ) 연소방식<sup>[7-11]</sup>을 실현할 수 있게 되는 것이다. 이를 통해 기존의 예열된 공기를 이용함으로써 문제시 되어온 NOx 발생을 감소 시키고연소 안정성의 증대<sup>[3][4]</sup>로 인한 화박연소를 가능케 하며, 화염면내에 배가스를 침투시켜 NOx의 주 요인이 되는 산소의 농도를 낮출 수 있게 되었다. Michael Flamme<sup>[5]</sup>는 Conventional burner 와 새로운 기술의 flameless combustion & staged burner 의 NOx 방출량 실험을 통하여 FLOX 타입 버너에서 최소의 NOx가 방출됨을 보고하였다.

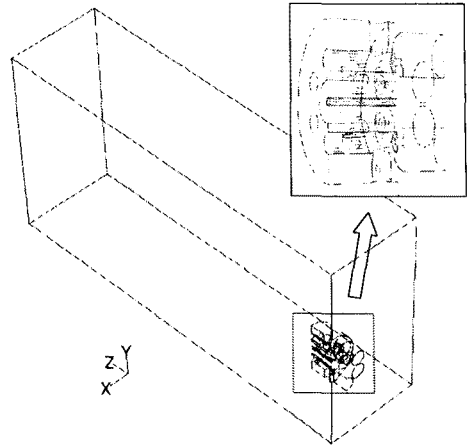
이전 김<sup>[12]</sup>등은 cold flow 실험에서, 버너 1대로 축열 연소가 가능한 자기 축열식 버너시스템( self-regenerative burner system)을 이용하여 자기 축열식 버너에서 NOx 저감을 효과적인 방법으로 알려진 로내 배기가스의 유동특성을 연소용 공기의 분사속도에 따라 알아보았다.

본 연구는 기존의 cold flow 실험<sup>[12]</sup>결과를 바탕으로 축열식 버너의 수치해석을 통하여 연소용 공기의 분사속도에 의한 연소유동장 및 NOx 생성에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

## 2. Self Regenerative Burner의 수치해석

본 연구에서는 정상상태, 3차원 유동장 수치해석을 위해 FLUENT 6.0 Code를 이용하였다. Fig. 1은 계산에 사용된 연소실과 연소기 헤드부분이며, 실제 실험에서 제작된 크기와 동일하게 모델링 하였다. 연소기 헤드 정면에 연료노즐과 동축공기 노즐, 그리고 6개의 연소용 공기 분출

노즐(배가스 흡입노즐)이 있다. 이 6개의 노즐중



200×400×800(mm)

**Fig 1 Configuration of the furnace and detail of burner head**

3개의 노즐에서 예열된 연소용 공기가 주입되며 나머지 3개의 노즐을 통해 배가스가 대기로 배출되게 된다. 실제 실험에서는 솔레노이드 밸브를 이용하여 절환을 시키지만, 연소과정은 이미 정상상태에 도달한 것으로 가정하였으며, 절환은 고려하지 않았다.

### 2.1. 지배방정식

지배방정식은 식(1)~(3)에 나타낸바와 같이 3차원 Navier-stokes 방정식을 사용하였고, 난류 모델로는 표준  $x-\epsilon$  모델을, 복사열전달은 P-1 radiation model을 이용하였다.

Continuity

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\bar{u}) = 0 \tag{1}$$

Momentum

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_e \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \left( \frac{2}{3} \mu_e \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \tag{2}$$

여기서  $\mu_e = \mu + \mu_t$ ,  $\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon}$ ,  $C_\mu = 0.09$

Energy

$$\frac{\partial \overline{\rho \bar{u}_i \bar{h}}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_h} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_i} \right) + \overline{S}_h, \sigma_h = 0.7 \quad (3)$$

Turbulent kinetic energy and its dissipation rates

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho \bar{u}_i \epsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{x} G_k - C_2 \overline{\rho} \frac{\epsilon^2}{x}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho \bar{u}_i x}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial x}{\partial x_i} \right) + G_k - \overline{\rho} \epsilon \quad (4)$$

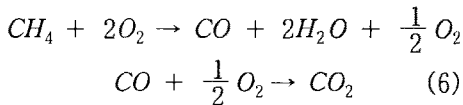
여기서  $G_x = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_x} \right)$ ,  $C_1 = 1.44$ ,  
 $C_2 = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_x = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$

P-1 radiation model

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_s u_{i,s} C_p T_s) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

## 2.2 화학반응모델

실제 반응시 연료는 LNG(Liquefied Natural Gas)를 사용하는데, LNG 구성성분의 약 90%가 CH<sub>4</sub>로 구성되어 있어, 수치해석시 연료로 CH<sub>4</sub>를 사용하였으며 2단계 비가역 반응 모델을 적용하였다.



화학반응에서 난류의 영향을 고려하여 eddy-dissipation model을 이용하여 반응율을 계산하였다.

$$\begin{aligned} R'_{i,k} &= \nu'_{i,k} M'_i A \rho \frac{\epsilon}{x} \frac{m_R}{\nu'_{R,K} M'_R} \\ R'_{i,k} &= \nu'_{i,k} M'_i A B \rho \frac{\epsilon}{x} \frac{\sum_j p m_p}{\sum_j \nu'_{j,i} M'_j} \end{aligned} \quad (7)$$

## 2.3 격자계 및 작동조건

계산에 사용된 격자는 187,746개의 셀을 이용하였으며, 연소실 헤드부위의 복잡한 형상으로

인해 이 부분은 비정렬 격자계를 이용하였다. 실험조건과 동일한 연료유량과 동축 공기 유량을 사용하였으며, 연료 대 공기 유량비는 1 : 11, 동축 공기량 대 연소용 공기량은 3 : 7로 하였다. 연료와 동축 공기의 초기온도는 298K로 하였다. Table 1에 작동조건을 나타내었다. 온도에 따른 변화를 살펴보기 위해 13mm노즐에서 각각 300K, 650K, 1000K의 연소용 공기를 이용하여 계산을 수행하였다. 또한 속도 변화에 따른 연소 특성을 살펴보기 위해 예열된 공기의 온도는 1000K로 사용하였고, 일정한 유량 하에서 분사되는 연소용 공기의 속도를 변화시키기 위해 분사용 노즐의 크기를 각각 13mm, 6.5mm, 5mm인 경우로 모델링 하였다.

Table 1 Operating conditions

Fuel Inlet Velocity	60 m/s
Coaxial air Inlet Velocity	10 m/s
Combustion air Inlet Velocity	3 m/s
Velocity of combustion air	Variable
Combustion air Inlet Temp.	Variable
Exhaust Fan	23000pa

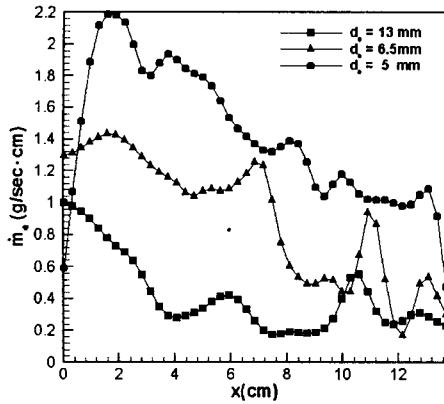
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 기존의 실험결과 및 예측

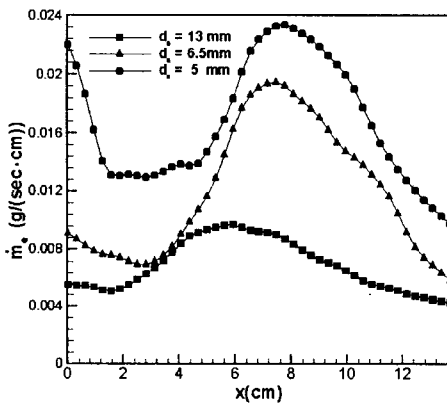
기존의 비화학 반응 실험(PIV, 아세톤 PLIF)을 통하여 분사용 노즐의 직경(13mm, 6.5mm, 5mm)에 따른 축열식 버너의 내부 재순환 유동 특성을 살펴보았다. 아세톤 PLIF 기법을 이용하여 연료의 분무특성을 파악하여, stoichiometric line을 구하였으며, Two Color PIV 기법을 이용하여 각각의 경우에 대해 유동장 분석을 하였다. Fig. 2는 실험결과로 얻은 stoichiometric line을 직선상으로 통과하는 유동 중에서 수직방향 성분만을 고려하여 단위길이 당 유입되는 유량을 나타내었다. 축 방향을 따라서 유입되는 유량을 보

면 분사 노즐 직경이 작을수록, 즉 분사속도가 클수록 유입되는 유량도 많아진다. 최대속도일 때

를 각각 나타내었다. 실제 실험결과에서 13mm 노즐의 속도는 대략 15m/s, 5mm인 경우는



(a) suction region



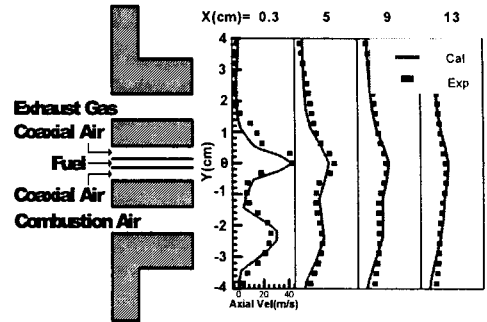
(b) injection region

Fig. 2 Entrained mass flow rate along the stoichiometric line

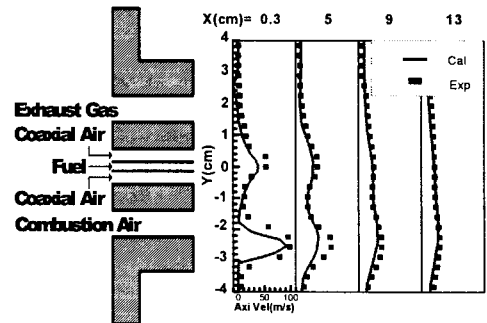
와 최저속도일 때의 유량차이는 평균 4배의 차이가 있었다. 배기가스 내부 재순환으로 인해 화염면으로의 배기가스 유입을 유도해 화염면의 높은 온도를 낮추어서, 열적 NOx의 저감을 예상하였다.

### 3.2. 속도분포 비교

연소반응에 앞서 기존의 two color PIV 실험에서 얻은 속도 성분을 먼저 비교해 보았다. 연료 분사 대신에 공기를 넣고 실험조건과 동일한 조건 하에서 계산을 수행하였다. Fig. 3은 축 방향을 따라 반경방향 속도성분을 비교한 그림이다.(a)는 연소용 공기의 최소속도에 해당하는 13mm, (b)는 최대속도에 해당하는 5mm 인 경우



(a) 13mm nozzle



(b) 5mm nozzle

Fig. 3 Comparison of the radial velocity distribution

100m/s로 측정되었다. 수치해석 결과, 실제실험에서 보인 속도성분과 전반적으로 일치함을 볼 수 있었고, 내부유동장 형성도 유사하리라 예측된다.

Fig. 4는 노즐의 직경에 따라 후방 부에서의 속도벡터와 유선을 도시한 것이다. 노즐의 직경이 클 때 재순환 영역이 후방근처에서 생성되며 노즐의 직경이 작아질수록 중심으로의 유동의 모멘텀이 강해져 상류 쪽으로 재순환 영역이 확장됨을 확인할 수 있다. 이렇게 상류로 재순환 유동이 이동하면 고온의 배기가스가 화염면으로 침투하는 양이 증가할 것을 예측할 수 있으며, 이는 기존의 cold flow 실험<sup>[12]</sup>에서도 확인되었다.

### 3.3. 예열된 공기의 연소특성

Fig. 5는 13mm nozzle를 장착한 로에서 연소용공기의 온도를 각각 300K, 650K, 1000K로 두고 각각 계산을 수행하여, 분사부분과 흡입부분

노즐이 위치한 부분에서 화염 중심 축을 따라가며 온도분포를 나타내어 보았다. 연소용 공기가

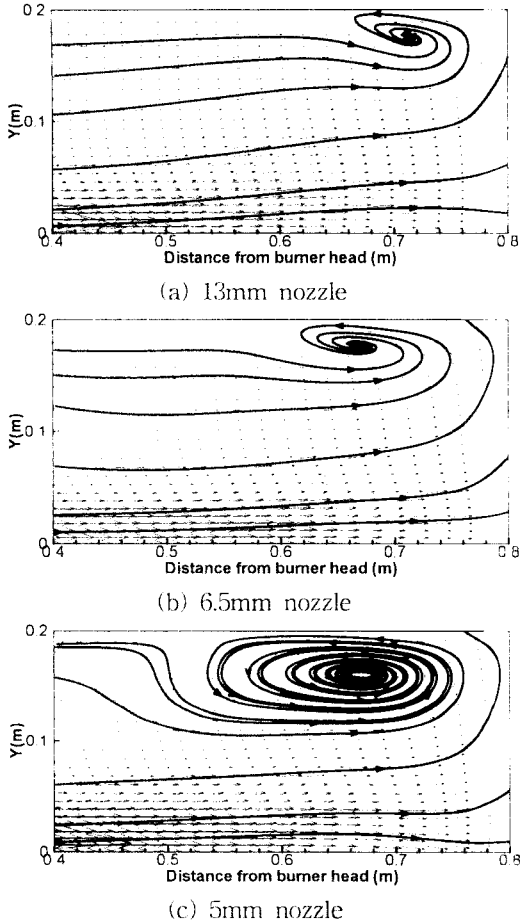


Fig.4 Stream line and velocity vector for each nozzle at symmetry plane

예열되지 않았을 때, 화염의 상류지역은 아직 연료 분사노즐에서 분사된 연료가 아직 혼합되지 않아, 불안정한 연소가 이루어지는 반면, 온도가 증가할수록 안정된 연소가 일어나는 최대화염 온도부위가 분사 및 흡입부분 모두 버너헤드 부분에서 생성되며, 활발한 연소작용으로 인해 보다 안정된 연소가 이루어짐을 예측할 수 있다. 본 버너는 로내 온도에 의해 착화하는 방식이기 때문에, 일반 천연가스(메탄 주성분) 또는 도시 가스(프로판 주성분)의 최적혼합비 착화온도가 850K 이상임을 고려해 보면 Fig. 6에서 보듯이, 로내 평균온도가 대략 1300K 이상이 되고, 예열된 공기의 온도가 1000K 이상 일 때, 안정된 무화염 연소(Flameless Combustion)가 이루어 질 수 있음을 예측할 수 있다. 그러나, 예열된 연소용 공기의 온도증가에 의한 Thermal NO의 증가로 인하여 전체적인 NOx량은 증가하였음을 알 수

있다. 이는 예열된 연소용 공기를 이용할 때 나타나는 일반적인 현상이다.

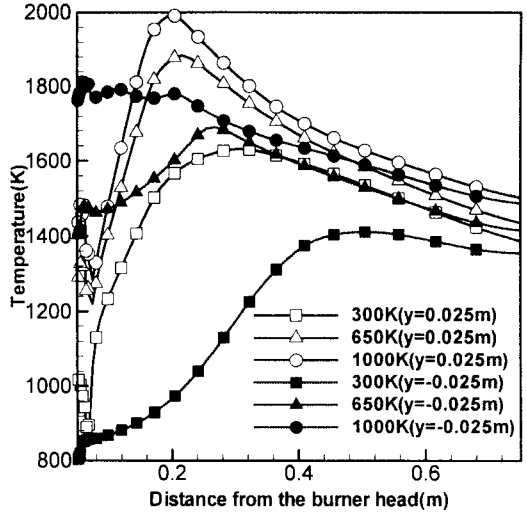


Fig.5 Temperature distributions for preheated combustion air temperature along axial distance

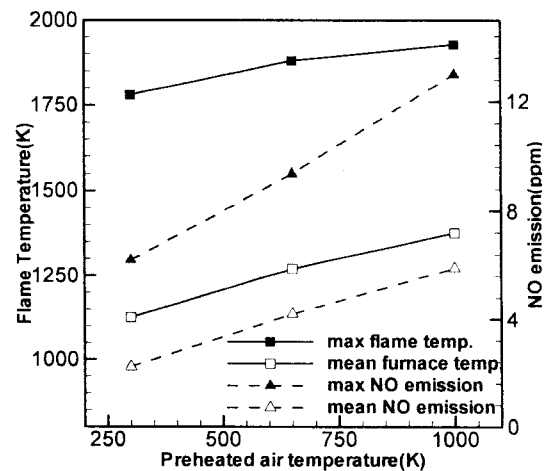
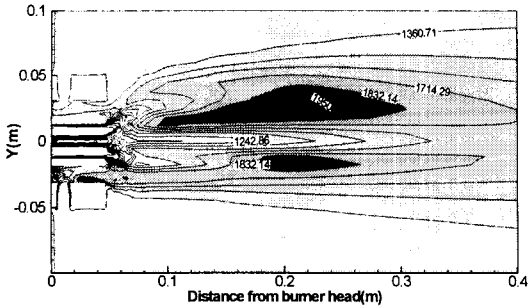


Fig.6 NO emissions and maximum flame temperature for preheated combustion air temperature

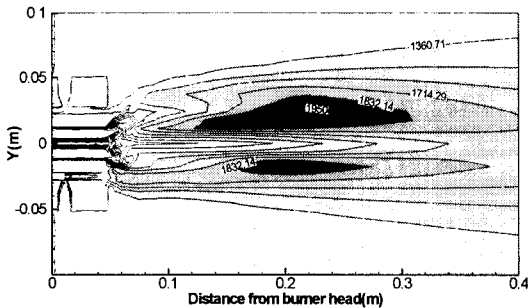
3.4. 속도변화에 따른 연소특성

Fig. 7에서는 대칭면에서의 세 가지 노즐의 온도장을 통해 최대 화염면의 분포특성을 살펴보았다. 기존의 버너에서 예열된 공기를 이용함으로써 버너헤드 부분에서 최고 온도부위가 생성되는

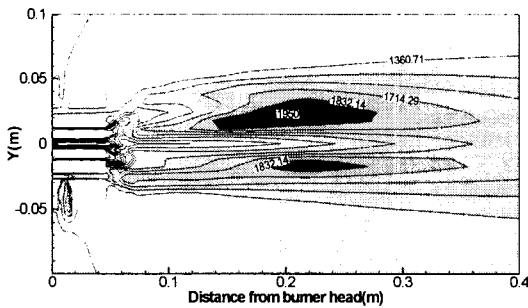
것을 피할 수 없었다. 그러나, 연료와 공기를 각 각 따로 분리하여 예열된 연소용 공기를 로내에



(a) 13mm nozzle



(b) 6.5mm nozzle



(c) 5mm nozzle

Fig.7 Temperature fields for each nozzle diameter at symmetry plane

직접 고속 분사함으로써 화염의 중심부로의 강한 모멘텀이 작용하게 되고, 연료와 연소용 공기사이의 강한 전단작용(shear motion)으로 인하여 주화염(base flame)의 소멸 현상을 일으키게 된다. 연료 분사부분에서 화염의 온도를 보면 버너헤드에서 약간 떨어진 하류지역 약 0.2m 부근에서 최고 온도값이 생김을 볼 수 있다. 이 버너의 특징 중 하나인 무화염 연소가 이루어짐을 알 수 있다. 또한 노즐의 직경이 작아질수록 화염면의 최대 값이 떨어지고 있으며 버너헤드에서 조금 떨어진 위치에서 최대 값이 생성됨을 확인할 수 있다. 전체적으로 화염의 폭과 온도가 떨어지며,

최대화염온도의 위치는 재순환 가스의 유입에 의한 화염온도의 냉각을 의미하는 것으로 볼 수

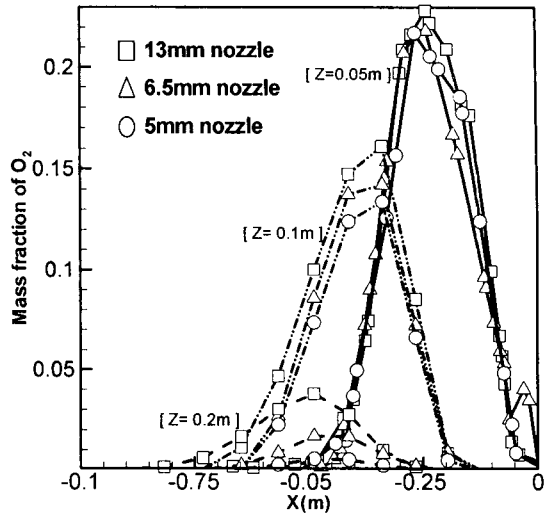


Fig.8 Mass fraction of O<sub>2</sub> distributions along radial distance

있다. 기존의 아세톤 PLIF 실험결과에서 노즐의 직경이 작아질수록 제트상단 부분에서 더 많은 연료의 분포를 예측했었다. 수치해석 결과에서도 배기가스가 흡입되는 부분에서 약간 위쪽으로 치우친 비대칭적인 화염의 구조를 볼 수가 있으며, 이는 실험결과에서 예측한 부분과 잘 일치하였다. 흡입과 연소용공기의 분사에 따른 인한 모멘텀에 의한 효과로 인해 유동이 위로 치우쳐 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

Fig. 8은 산소의 반경방향 질량 분율을 축 방향을 따라 구해보았다. 버너헤드 부근에서는 연소용 공기의 모멘텀에 의해 큰 차이를 보이지 않고 있으나 하류 쪽으로 내려갈수록 5mm 노즐의 질량 분율이 급격히 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 실험에서 예측한대로, 버너헤드 부근에서 화염 면으로의 침투하는 배가스의 양이 노즐의 직경이 줄어들수록 늘어나며, 이로 인해 산소의 농도를 급격히 떨어뜨리기 때문이다.

다음의 식<sup>[3]</sup>을 이용하여 세 가지 노즐의 연소 유동장에 대해서 재순환율을 구해 보았다.

$$K_V = \frac{M_E}{M_F + M_A} \quad (8)$$

$M_E$  : Mass flow rate of Recirculated exhausted gas

$M_F$  : Mass flow rate of fuel

$M_A$  : Mass flow rate of air

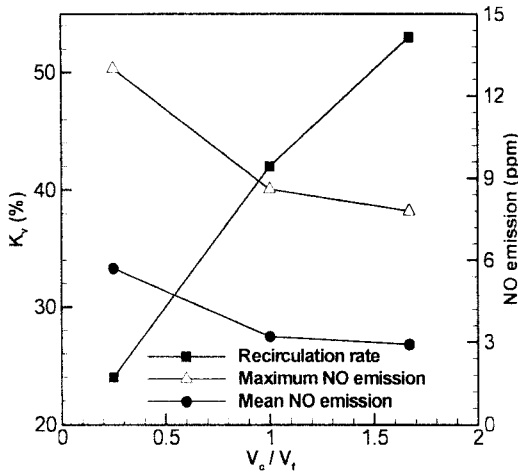


Fig.9 Recirculation rate and NOx emissions for Velocity ratio

여기서 재순환 되는 배가스는 연료와 공기가 반응이 일어나기 전까지를 의미한다. Fig. 9에서 노즐의 직경이 줄어들수록, 예열된 연소용공기와 연료의 속도 비 증가로 인하여 재순환율이 증가되었음을 볼 수 있다. 배가스가 가지는 열을 이용하여 부화염 연소가 가능한 환경을 조성해 줌으로써 희박한 공기에서도 연소가 가능하게 되어 화염의 안정성을 더욱더 높여 줄 수 있게 된다. 이러한 희박연소로 인하여 연소시 최대 화염면의 분포 및 온도가 앞의 결과와 마찬가지로 감소하였음을 알 수 있으며, 최대온도의 감소는 로내 평균온도의 감소로 이어져, 전반적인 NOx의 생성량이 줄어들음을 예측할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 자기 축열식 버너에서 cold flow 실험을 통하여 얻은 유동해석 결과와 이를 모사한 수치해석 결과를 비교하였으며, 예열된 연소용공기의 온도와 속도변화가 연소특성에 미치는 영향에 대하여 알아보고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 기존의 cold flow 실험과 수치해석상의 속도 분포와의 비교를 통하여 전반적으로 유사한 속도분포가 형성됨을 확인할 수 있다. 또한 노즐의 직경이 줄어들수록, 재순환 영역이 강하게 생성되며 배가스의 순환도 증가할 것으로 예측되었는데 이는 실제 cold flow

실험 결과에서도 확인 할 수 있었다.

- 2) 연소용 공기의 예열된 온도가 증가할수록 최고온도부위가 로내 하류 쪽에서부터 버너 헤드 앞 부근으로 생성됨을 확인할 수 있었다. 로의 상류 부근에서는 연료 노즐에서 분사된 연료가 원활히 혼합되지 않아, 불안정한 연소가 일어나며, 또한 버너헤드 앞에서의 안정된 무화염 연소를 위해서는 메탄가스의 자연착화온도(850K) 이상의 고온의 예열된 공기가 필요함을 알 수 있었다. 이때 활발한 연소작용이 일어남을 예측할 수 있었으나 예열된 고온 공기는 Thermal NO의 생성을 증가시켰다.
- 3) 동일한 조건의 고온으로 예열된 공기(1000K)에서 연소용 공기의 속도 증가는 최고 화염 온도 및 로내 평균온도를 감소시켰다. 이는 속도증가로 인하여 화염 중심 축 방향으로 연료의 모멘텀을 증가시켜 로내 배가스를 화염속에 침투시켜 산소의 농도를 낮추어주었기 때문이며, 또한 분출된 gas와 연료가 혼합되기 전에 미리 예열되어 가스의 일부가 열분해 되고, 그 후 산소농도가 저하된 공기와 혼합되어 화염 주위로의 복사 열 전달을 증가시켜 화염의 온도를 저하 시켰기 때문이라 생각된다. 이러한 효과로 인하여 고온의 예열된 공기를 이용함으로써 높아진 로내 온도에서 생성되는 NOx에 대한 저감이 이루어 질 것을 예측할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 에너지 · 자원기술 개발 위탁사업과제(과제명: 공업로용 고효율 저 NOx 연소기 연소특성 연구, 과제번호: 2000-E-FM01-P-27)에 의해 수행된 것이며 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- [1]Choi,G.-M.and Katsuki, M., "Advanced Low NOx Combustion Using Highly Preheated Air," Energy Convers. Mgmt Vol.42, pp.639-652,2001
- [2]Nishimura,M.,Suzuki,T.,Nakanishi,R.,and Kitamura,H., "Low-NOx Combustion Under Preheated air Temperature Condition in an Industrial Furnace," Energy Convers. Mgmt Vol.38. No. 10-13, pp.1061-1071,1997
- [3]Wünning,J,A and Wünning,J.G., "Flameless Oxidation To Reduce Thermal NO-Formation," Prog.Energy Combust. Sci.Vol.23, pp.81-94,1997
- [4]Katsuki,M., and Hasegawa,T., "The Science

and Technology of Combustion in Highly Preheated Air,"proc . comb. Inst. , Vol .27 ,pp . 3135-3146,1998

[5]Flamme,M., " Low NOx Combustion Technologies for High Temperature Applications",Energy Convers. Mgmt Vol.42,pp. 1919-1935,2001

[6]Tomecz. J., Goral, J., Gradon, B., " The GAFT Burner for Reducing NOx in Gas-fired High-Temperature Industrial Furnace", Journal of the Institute of Energy, Vol. 68, No.477,pp.178-183,1995

[7]仲町 一郎,"最近の低NOx燃焼技術の動向", 工業加熱 Vol. 36, No. 1, pp. 21-29, 1999.

[8]栗原孝好, 仲町一郎, 安岡 省,小泉健司, "FDI リジェネレイティブバーナの開發", 工業加熱 Vol. 33, No. 5, pp. 39-47, 1996.

[9]"わが國の工業爐におけるリジェネレイティブシステムの實踐的活用法",日本バーナ研究會報 NO. 73, 1993.

[10]藤崎 亘, 橋本建信, 中村恒明,"FDI 天然ガス酸素バーナの開發" 工業加熱 Vol. 37, No. 6, pp. 13-21, 2000.

[11] 谷川正,"高性能工業爐開發プロジェクトの変遷と高温空氣燃焼技術の展望", 工業加熱 Vol. 37, No. 5, pp. 13-22, 2000.

[12] 김중규, " 축열식 저 NOx 연소기의 유동특성에 관한 연구", 서울대학교 대학원 석사논문, 2002