

## 로터리 킬른용 Low-NO<sub>x</sub> 다공노즐버너 개발을 위한 수치해석적 연구

안석기 · 김진호 · 황민영 · 김규보\* · 전충환<sup>†</sup>  
부산대학교 기계공학부, \*화력발전 에너지 분석기술센터

(2014년 6월 30일 접수, 2014년 12월 2일 수정, 2014년 12월 4일 채택)

### **Numerical Study to Develop Low-NO<sub>x</sub> Multi-nozzle Burner in Rotary Kiln**

Seok-Gi Ahn · Jin-ho Kim · Min-Young Hwang · Gyu-Bo Kim\* · Chung-Hwan Jeon<sup>†</sup>  
Department of Mechanical Engineering, Pusan National University,  
\*Pusan Clean Coal Center

(Received 30 June 2014, Revised 2 December 2014, Accepted 4 December 2014)

#### 요 약

공정효율 및 배기배출물 개선을 위해 로터리 킬른 버너 개발에 대한 연구는 지속적으로 이루어져 왔다. 본 연구에서는 COG(Coke Oven Gas)를 연료로 사용하는 철광석 소결용 로터리 킬른의 다공노즐버너 개발을 위해 일차공기 노즐 직경, 버너 당량비, 버너 중앙노즐과 주위노즐의 당량비 변화에 따른 화염 및 배기배출 특성에 대한 수치해석 연구를 수행하였다. 일차공기 노즐 직경이 증가함에 따라 각 동일 당량비에서 화염길이는 길어지고 NO<sub>x</sub> 배출도 증가하였으며, 버너 당량비가 증가함에 따라 화염길이와 NO<sub>x</sub> 배출이 증가하는 결과를 보였다. 버너 중앙노즐의 당량비 변화에 따라 NO<sub>x</sub> 배출에는 차이를 보였으며, 화염길이 및 킬른 내부 온도에는 큰 차이가 없었다. 본 연구를 통해 D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>가 1.33, 버너 당량비가 1.25이고 버너 중앙 노즐이 Rich인 조건이 킬른 내부 온도분포 및 NO<sub>x</sub> 배출량 기준을 만족하는 적절한 설계조건임을 제시하였다.

**주요어** : 로터리 킬른, 저 NO<sub>x</sub> 버너, 다공노즐버너, 질소산화물, 코크스로 가스, 전산해석

Abstract -Rotary kiln burner has been developed continuously to improve process efficiency and exhaust emission. In this study, the characteristics of the flame and exhaust emission were numerically analyzed according to the diameter of primary air nozzle, equivalent ratio of burner, and equivalent ratio at center and side nozzle for development of multi-nozzle burner in the COG(Coke Oven Gas) rotary kiln for sintering iron ore. The results indicated that the flame length and NO<sub>x</sub> emission increase, as the diameter of primary air nozzle and equivalent ratio of burner increase. And according to the change of equivalent ratio at the center and the side of the nozzle, the flame length and average temperature in the kiln show very little change but the NO<sub>x</sub> emission shows obvious difference. In conclusion, the best design conditions which have satisfying flame length, average temperature and NO<sub>x</sub> emission are as follows: D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub> is 1.33, equivalent ratio of burner is 1.25 and center nozzle conditions are Rich.

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Department of Mechanical Engineering, Pusan National  
University  
Tel : 051-510-3051 E-mail : chjeon@pusan.ac.kr

**Key words** : Rotary kiln, Low-NO<sub>x</sub> burner, Multi-nozzle burner, NO<sub>x</sub>, COG(Coke Oven Gas), Numerical simulation

1. 서 론

소결광(sintered ore) 제조를 위한 킬른(kiln)의 종류는 Shaft furnace system, Straight grate system, Grate-rotary kiln-cooler system이 있으며, 다른 킬른에 비해 균일한 열전달이 가능하고 고품질의 소결광을 얻을 수 있는 Grate-rotary kiln-cooler system이 많이 사용된다.[1] 철광석이 소결되는 로터리 킬른(rotary kiln)은 Fig.1 과 같이 Grate와 Cooler 사이에 위치해 있으며, 회전하는 원통형 반응기로서 수평면에 비해 약간 기울어진 형태로 설치된다. Grate에서 건조와 예열을 거친 철광석은 로터리 킬른의 회전방향을 따라 움직이면서 서서히 축방향으로 진행하게 되며, 화염의 열원으로부터 열에너지를 받아 소결과정을 거치게 된다.[2] 고품질의 소결광을 생산하기 위해서는 버너로부터 소결에 필요한 충분한 열에너지가 킬른 내부에 공급되고, 안정한 화염을 형성하는 것이 필수적이다. 로터리 킬른 내에서 화염과 베드 물질 사이의 열전달은 복사 열전달이 지배적이며, 대류 열전달은 고온의 연소 가스와 베드 물질이 직접적으로 접촉할 때 발생한다.[3] 따라서 일반적인 산업용 노에서는 예혼합화염 보다 복사 열전달을 높일 수 있는 확산화염을 많이 사용하며, 그 이유는 확산화염에서 발생하는 어느 정도의 Soot이 복사 열전달을 증가시키는 수단으로서 소결과정에 긍정적인 영향을 주기 때문이다.[4] 하지만, 공연비 조절을 통해 단열화염온도를 낮추어 Thermal NO<sub>x</sub> 생성을 줄일 수 있는 예혼합화염에 비해 이론당량비 상태에서 연료와 산화제가 반응하여 높은 단열화염온도를 갖는 확산화염은

Thermal NO<sub>x</sub> 생성 증가에 대한 부담을 가지게 된다. 이러한 질소산화물(NO<sub>x</sub>)은 스모그와 오존층 파괴의 원인이 되는 대표적인 대기오염 물질로써 국내 뿐 아니라 전 세계적으로 NO<sub>x</sub> 배출 규제를 제정하여 그 배출량을 제한하고 있으며, 국내의 경우 2015년부터 2007년 1월 31일 이전에 설치된 소결로는 200ppm(@15%O<sub>2</sub>), 2007년 2월 1일 이후에 설치된 소결로는 120ppm(@15%O<sub>2</sub>), 2015년 1월 1일 이후에 설치되는 소결로는 80ppm(@15%O<sub>2</sub>)으로 NO<sub>x</sub> 배출 규제를 강화할 계획이다.[5] 따라서 산업현장에서 NO<sub>x</sub> 배출 저감은 중요한 이슈이며, 이를 위한 다양한 NO<sub>x</sub> 저감 및 제거 기술들이 개발, 적용되고 있다.[6]

본 연구에서는 로터리 킬른에서 사용할 수 있는 다양한 연료 가운데 코크스로 가스(Coke Oven Gas, COG)를 로터리 킬른 버너의 연료로 고려하였다. 철강 생산 공정 가운데 코크스(coke) 제조 공정에서 발생하는 부생가스인 COG는 정제과정을 거쳐 제철소 하부 공정 등에 사용되어 제철 공정 전체 에너지 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. COG는 CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>와 같은 가연성 가스와 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>와 같은 불연성 가스로 구성되어 있으며, BFG(Blast Furnace Gas)와 같은 다른 부생가스보다 발열량이 높은 특징을 갖는다.[7] 하지만, COG는 연료 성분 가운데 3~6% 가량의 N<sub>2</sub> 성분을 포함하고 있기 때문에 연소과정에서 N<sub>2</sub> 함량이 낮은 가스연료에 비해 NO<sub>x</sub> 배출이 높은 특징을 보인다.[8]

로터리 킬른 버너는 원료를 소결하는데 있어서 연료 소비량, 킬른 운전의 안정성, 소결된 원료의 품질, 그리고 NO<sub>x</sub> 발생량 등에 직접적인 영향을 미치

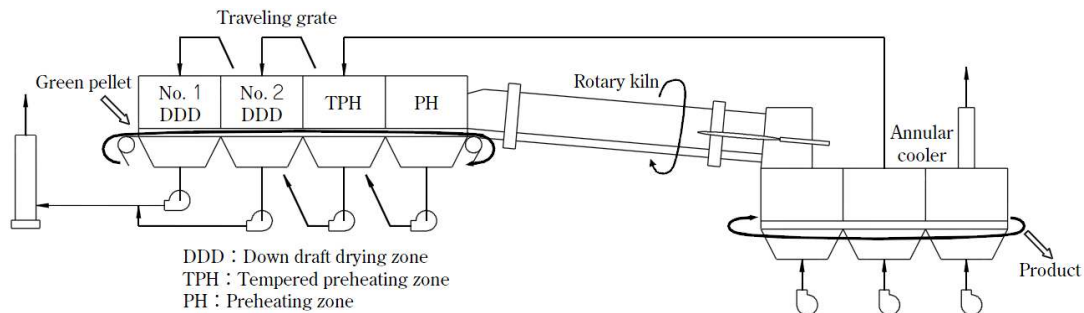


Fig. 1. Schematic diagram of a grate-kiln-cooler system[1]

기 때문에 지속적인 관심과 연구의 대상이 되어왔다. 새로운 형태의 버너와 기술이 개발됨에 따라 화염의 형태도 조금씩 변화되었으며, 화염의 형태에 따라 버너를 3개의 세대로 구분하였다. 1세대는 가늘고 긴 화염을 형성하는 단일채널버너(one-channel burner), 2세대는 강한 난류를 가진 짧고 발산하는 화염을 형성하는 다중채널버너(multichannel burner), 3세대는 약한 난류를 가진 비발산 화염을 형성하는 다중채널 버너로 발전되었다.[3]

본 연구에서는 다중채널버너에 비해 연료-공기 접촉 면적을 줄여 확산화염의 높은 단일화염온도 영역을 줄이고, 각 노즐의 연료 공기 유량 제어를 통해 화염중앙과 화염외부의 당량비(equivalent ratio)를 조절할 수 있는 다공노즐버너(multi-nozzle burner)를 개발하기 위해, 수치해석을 이용하여 일차공기 노즐 직경과 버너 당량비 변화에 따른 다공노즐버너의 연소 특성을 분석하였다. 이를 통해 양질의 소결광을 생산하고 80ppm(15%,O<sub>2</sub>)의 NO<sub>x</sub> 배출 기준을 만족하는 로터리 킬른용 Low-NO<sub>x</sub> 다공노즐버너의 최적 운전 조건을 평가하고자 한다.

## 2. 지배방정식 및 수치해석 조건

### 2-1. 수치해석 모델

로터리 킬른 버너의 연료-공기 유동은 난류유동으로 생각할 수 있으며, 연료-공기가 유입될 때 제트 형태로 유입되므로 연소는 확산적이다. 이러한 난류확산화염에서 연소속도는 화학반응 현상보다 유체역학적 현상에 의해 좌우된다고 가정할 수 있으며, 식(1)과 같이 정의되는 보존스칼라량인 혼합분율(mixture fraction,  $f$ )을 고려하여 연소(combustion)문제를 혼합(mixing)문제로 간단히 할 수 있다.

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (1)$$

난류 유동에서는 turbulent convection이 분자확산(molecular diffusion)보다 지배적이므로 화학종의 확산계수(diffusivity)는 동일하다고 가정할 수 있다. 따라서 화학종 보존 방정식은 식(2)와 같이 평균혼합분율(mean mixture fraction,  $\bar{f}$ )에 대한 Favre mean mixture fraction equation으로 표현되며, 혼합분율변

동(mixture fraction variance,  $\overline{f'^2}$ )에 대한 보존 방정식은 식(3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{f}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\bar{f}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\overline{f'^2}) \\ & = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} \end{aligned} \quad (3)$$

where,

$$\bar{f}' = f - \bar{f}, \quad \sigma_t = 0.85, \quad C_g = 2.86, \quad C_d = 2.0$$

열손실이 없는 단열계(adiabatic system)에서는 화염장내의 국부적인 상태량들이 오직 혼합분율에 의해서만 즉각적으로 결정된다. 하지만, 로터리 킬른과 같이 벽면과 베드입자를 통한 열손실이 고려되는 비단열계(non-adiabatic system)의 경우 국부적인 상태량은 혼합분율 뿐만 아니라 엔탈피에 의해 결정된다.[9] 엔탈피는 화학평형계산과 온도, 반응유동 내의 화학종에 영향을 미치며, 결론적으로 열손실에 의한 엔탈피 변화는 식(4)에서와 같이 혼합분율로부터 상태량을 계산할 때 반드시 고려해야 한다.

$$\phi_i = \phi_i(f, H) \quad (4)$$

이러한 비단열계의 난류유동 내에서 온도, 밀도, 화학종 농도와 같은 스칼라량들에 대한 난류 변동의 영향을 고려하기 위해, 혼합분율과 엔탈피에 대한 Joint PDF(Probability Density Function) 접근법을 사용할 수 있으며, 식(5)의 평균엔탈피 수송방정식의 해와 식(6)과 같이 Joint PDF와 순간적인 상태량에 대한 적분을 통해 평균 상태량을 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{H}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\bar{H}) = \nabla \cdot \left( \frac{k_t}{c_p} \nabla \bar{H} \right) + S_h \quad (5)$$

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \phi_i(f, \bar{H}) p(f) df \quad (6)$$

PDF의 수학적 함수로는 식(2)와 식(3)에 의해 계산된 평균혼합분율( $\bar{f}$ )과 혼합분율변동( $\overline{f'^2}$ )의 함수인

식(7)의 베타함수 PDF를 사용하였다.

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}df} \quad (7)$$

where,

$$\alpha = \bar{f} \left[ \frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right], \beta = (1-\bar{f}) \left[ \frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right]$$

본 연구에서는 로터리 킬른에 대한 수치해석 연구를 위해 상용코드인 Fluent v.14를 사용하였으며, 비단 열계, 화학평형(chemical equilibrium) 가정과 PDF 접근법을 통해 확산화염에 대한 연소계산을 수행하였다. 난류모델은 표준 k-ε 모델을 적용하였으며, 복사에 의한 열전달은 P-1 모델을 적용하여 계산을 수행하였다.

연소 시스템에서 NO<sub>x</sub>가 생성되는 주요 과정으로 Thermal NO<sub>x</sub>, Prompt NO<sub>x</sub>, Fuel NO<sub>x</sub> 세 가지 경로가 있으며, 가스 연소 시스템에서는 Thermal NO<sub>x</sub>에 의한 NO<sub>x</sub> 생성이 지배적이다.[10] Thermal NO<sub>x</sub>는 공기 중의 질소분자가 1800K 이상의 고온의 연소영역에서 산소와 반응하여 급격히 생성되며 생성률이 온도에 매우 의존적이다. 본 연구에서는 로터리 킬른 내의 NO<sub>x</sub> 생성 정도를 예측하기 위해 Thermal NO<sub>x</sub> 모델을 사용하였으며, 연소 계산 후 NO<sub>x</sub> 모델을 후처리방식으로 계산하였다.

2-2. 수치해석 조건 및 모델링

철광석 소결공정에 필요한 에너지를 고려하여 공급되는 COG 유량은 고정하였으며, COG의 물성치는 Table 1과 같다. 다공노즐버너에는 버너 중앙에 1개의 연료분사노즐이 위치해 있고, 그 주위로 동일한 6개의 연료분사노즐이 둘러 있는 구조이며, 일차공기 노즐은 각 연료분사노즐의 중심원을 따라 연료분사노즐을 둘러싸고 있다. 버너 뒤쪽에서는 Cooler로부터 1000K으로 예열된 이차공기가 로터리 킬른 내로 유입되며, 고온의 이차공기는 화염의 형성 및 유지에 도움을 주고 연소열이 공기온도를 높이는데 소모되는 손실을 줄여주어 열효율을 높이게 된다. 이차공기는 이론공기량의 4.19배만큼 유입되며, 킬른 전체의 공기공급조건은 매우 희박한 상태이므로 버너에서 공급되는 일차공기량은 과잉으로 공급되지 않는다. 길이가 L m, 지름이 D m인 원통형의 로터리 킬른과 버

Table 1. COG properties[11]

Property	COG	
	Composition(%)	CH <sub>4</sub>
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.9
	N <sub>2</sub>	2.3
	O <sub>2</sub>	0.3
	H <sub>2</sub>	56.4
	CO	8.4
	CO <sub>2</sub>	3.1
LHV(kcal/Nm <sup>3</sup> /hr)	4389	
Adiabatic temperature(K)	2259	

Table 2. Calculation conditions

Item	Condition		
D <sub>2</sub> /D <sub>1</sub>	1.06, 1.13, 1.2, 1.26, 1.33		
Burner Equivalent ratio	1.25, 1.67, 2.5, 5		
Equivalent ratio at Nozzle	Rich	Normal	Lean
Center Nozzle	2.55	1.3	0.85
Side Nozzle	1.15	1.3	1.36

너 본체의 지름이 D<sub>0</sub> m인 버너를 3D 형상으로 형성하였으며, 격자는 육면체 격자로 180만개를 생성하였다. Fig.2는 로터리 킬른, 다공노즐버너의 형상 그리고 계산 격자를 나타내고 있다.

본 연구에서는 연료 노즐 직경, 연료 유량 및 이차 공기 유량은 고정하고, 다공노즐버너의 일차공기 노즐 직경(D<sub>1</sub>)과 버너 당량비, 버너 중앙노즐 당량비에 대한 영향을 확인하기 위해 다음의 (1), (2), (3)과 같은 3가지 조건을 따라 총 60가지 경우에 대한 수치해석을 수행하였으며, NO<sub>x</sub> 배출량, 화염길이, 킬른 단면평균온도에 대한 계산 결과를 비교하였다. 개발과정에 있으므로 스케일은 무차원화하여 표시하였으며, Table 2에 계산조건을 정리하여 나타내었다. (1) 철광석을 소결시키는데 필요한 COG 연료 노즐 직경(D<sub>1</sub>)은 고정하고 일차공기 노즐의 직경(D<sub>2</sub>)을 조절하여 D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>가 1.06, 1.13, 1.2, 1.26, 1.33 인 5가지 조건. (2) 버너 당량비가 1.25, 1.67, 2.5, 5 인 4가지 조건. (3) 버너 중앙노즐과 사이드노즐의 각 당량비가 2.55, 1.15로써 중앙노즐이 농후(fuel rich)인 경우(Rich), 각 노즐의 당량비가 1.3으로써 동일한 경우(Normal) 그리고 0.85, 1.36으로써 중앙노즐이 희박(fuel lean)인 경우(Lean)로 3가지 조건. 본 수치해석에서는 로터리 킬른의 회전과 철광석의 유입은 고려하지 않았다.

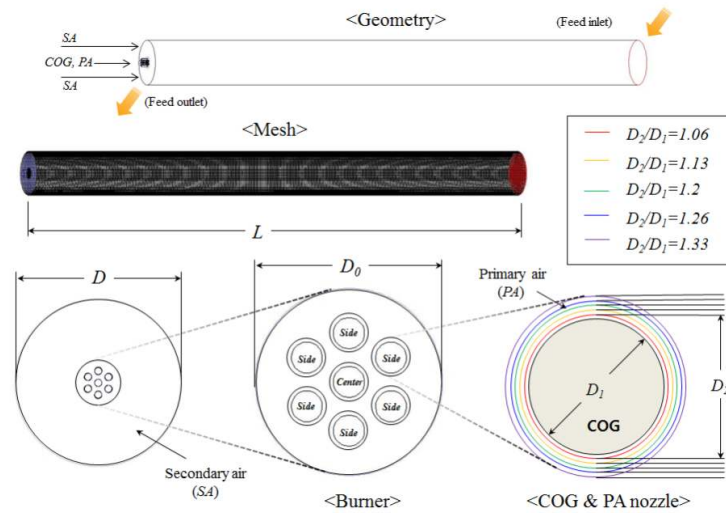


Fig. 2. Rotary kiln and burner modeling for numerical study

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 양질의 소결광을 생산하고 NO<sub>x</sub> 배출 기준을 만족하는 다공노즐버너의 최적 운전조건을 평가하고자 수치해석을 이용하여 일차공기 노즐 직경, 버너 당량비 그리고 버너 중앙노즐의 당량비 변화에 따라 다공노즐버너의 연소특성 결과를 고찰하였다. 킬른 공정의 효율과 NO<sub>x</sub> 배출 그리고 넓은 연소 범위를 확보하기 위한 기준으로 2000K 이상의 온도 영역을 화염길이 L<sub>F</sub>로 정의하여 노 전체 길이(L)에 대한 비(Normalized flame length, L<sub>F</sub>/L)로 화염길이를 나타내었다. 킬른 노 전체 길이에 대한 화염길이 비(L<sub>F</sub>/L)가 0.25 이상인 화염길이, 80ppm(@15%O<sub>2</sub>) 이하의 NO<sub>x</sub> 배출량 그리고 Feed outlet 에서부터 Feed inlet 까지 킬른 전체 길이를 1로 볼 때, 0.4에서 1까지 구간의 평균온도가 양질의 소결광 생산에 적절한 1373~1623K을 기준으로 각 조건별 수치해석 결과를 비교 평가하였다. 수치해석 결과, D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>가 1.13, 1.2, 1.26 조건에서 버너 당량비가 5인 경우, D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>가 1.33 조건에서 버너 당량비가 2.5, 5인 경우에는 화염이 위쪽 벽면과 버너 반대편의 킬른 끝단까지 발달하여 안정적인 화염을 형성하지 못하고 발산하여 수치해석 결과 및 고찰에서 제외하였다.

#### 3-1. 화염형상과 화염길이

Table 3은 D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>가 1.06 일 때 버너 당량비에 따

른 화염형상과 화염길이의 수치해석결과를 분석하여 예시로 나타내고 있으며, 각 계산 조건에 따른 화염길이 결과를 Fig. 3에 정리하여 나타내었다. 전반적으로 D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>의 각 조건에서 당량비가 증가할수록 화염의 길이가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 각각의 동일한 당량비 조건에서 D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>이 증가할수록 화염길이가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히 당량비의 증가에 따른 화염길이 증가는 버너 당량비 증가로 인해 연료가 산화제인 공기를 충분히 공급받지 못하고 주위공기의 확산에 의한 연소가 이루어짐에 따라 연료와 산화제간의 반응이 늦어진 결과로 사료되며, D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>의 증가에 따른 화염길이 증가는 노즐의 직경이 증가함에 따라 일차공기 속도가 감소하여 연료와 산화제간의 혼합이 잘 이루어지지 않아 상대적으로 화염길이가 길어진 것으로 판단된다. 이러한 결과는 D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>가 1.13~1.26인 경우에서 당량비가 5일 때, 그리고 D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>이 1.33이고 당량비가 2.5이상일 때 발산하여 화염이 형성되지 못하는 결과를 초래한 것으로 판단된다. 추가적으로 버너의 중앙노즐에 대한 당량비 변화(Rich, Normal, Lean)조건에 대해서는 화염길이의 변화가 작은 것을 확인할 수 있으나, 3-2절에서 다루게 될 화염의 온도특성에서는 초기 화염영역에서의 평균온도차를 발생시킴으로써 화염의 길이를 유지하면서 가스온도와 NO<sub>x</sub>를 제어하기에는 유용한 조건으로 사료된다.

Fig. 3-(f)는 0.25 이상의 화염길이를 만족하는 계

**Table 3.** Temperature distributions and normalized flame length for  $D_2/D_1=1.06$

1st air	Center nozzle	Temperature distributions [K]	Normalized flame length (LF/L)
$\Phi=1.25$	Rich		0.12
	Normal		0.12
	Lean		0.11
$\Phi=1.67$	Rich		0.16
	Normal		0.16
	Lean		0.16
$\Phi=2.5$	Rich		0.24
	Normal		0.24
	Lean		0.24
$\Phi=5$	Rich		0.47
	Normal		0.47
	Lean		0.46

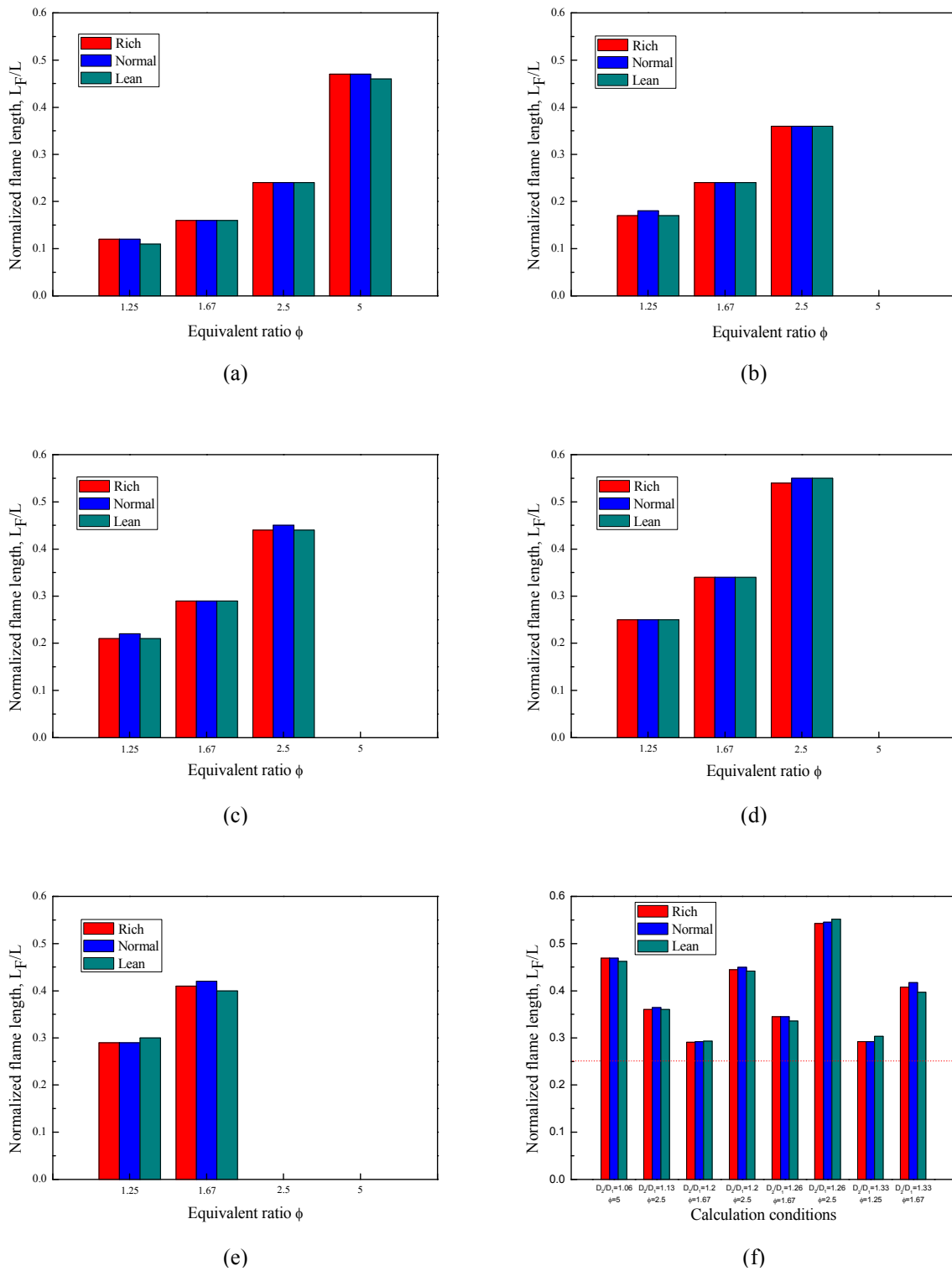
산 조건을 나타내고 있으며, 버너에서의 당량비( $\Phi$ )가 1.25 조건에서는  $D_2/D_1$ 이 1.33인 조건,  $\Phi=1.67$ 의 경우에는  $D_2/D_1$ 이 1.2, 1.26 및 1.33의 조건,  $\Phi=2.5$ 의 경우에는  $D_2/D_1$ 이 1.13, 1.2, 1.26의 조건 그리고  $\Phi=5$ 의 경우에는  $D_2/D_1$ 이 1.06의 조건이 화염길이를 만족하는 것을 확인할 수 있었으며, 킬른에 적용하게 될 다공노즐버너의 적절한 화염길이 형성과 NO<sub>x</sub> 저감을 동시에 만족하기 위해서는 낮은 당량비 조건에서 운전이 필수적이라고 할 수 있는데,  $D_2/D_1$ 이 커질 경우 낮은 당량비 조건에서도 적절한 화염길이를 형성함에 따라  $D_2/D_1$ 을 1.2 이상의 조건으로 설계하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

3-2. 온도분포 특성

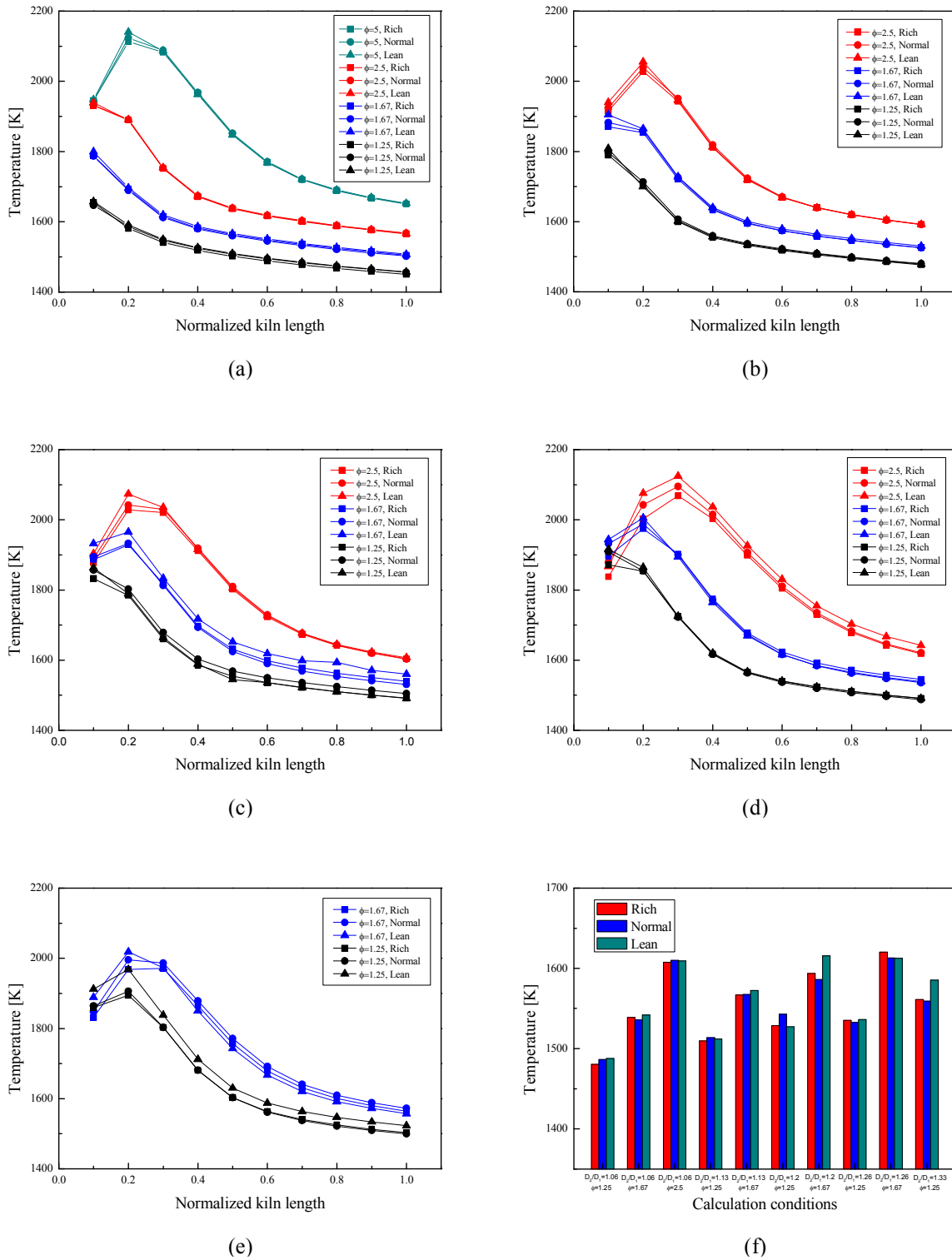
Fig. 4는 각 계산 조건에 따라 킬른 내부 단면 평균온도 분포 결과를 나타내고 있다. 전반적으로  $D_2/D_1$ 가 동일할 때 버너 당량비가 증가할수록 킬른 내부 온도는 증가하는 결과를 보이고 있으며, 이러한 결과는 화염의 길이가 길어질 뿐만 아니라, 전술한 바와 같이 확산화염의 특성을 가짐에 따른 결과로 사

료된다. 또한, 동일한 버너 당량비 조건에서  $D_2/D_1$ 가 증가함에 따라 단면 평균온도 분포는 높아지는 결과를 보이고 있다. 그 이유는 일차공기 노즐 직경이 증가함에 따라 길어진 화염으로 인해 킬른 내부 온도 분포가 증가하기 때문으로 사료된다. 버너 중앙노즐의 당량비 변화에 대한 온도분포 변화는  $D_2/D_1$ 이 1.06과 1.13의 조건에서는 거의 변화가 없는 것을 확인할 수 있으나, 그 외 조건에서는 전반적으로 초기 화염이 형성된 지점에서 비교적 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있으며, 화염발달 이후 가스온도의 평균분포에서도 대부분 평균온도의 차이를 발생시키고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는  $D_2/D_1$ 의 값이 1.2이상으로 증가할 경우, 버너의 중앙노즐과 주위노즐간의 상호작용에 의한 버너 중앙노즐의 당량비 변화에 따른 영향이 커진다는 것을 의미하며, 다공노즐 버너의 설계 시 적용효과를 얻기 위해서는  $D_2/D_1$ 이 1.2이상의 값을 가져야 한다는 것을 의미한다.

Fig. 4-(f)는 킬른의 0.4에서 1 사이 위치의 평균온도가 1373~1623K 범위를 만족하는 계산 조건을 나타내고 있으며,  $\Phi=1.25$ 에서는  $D_2/D_1$ 이 1.06, 1.13, 1.2, 1.26, 1.33인 조건,  $\Phi=1.67$ 의 경우에는  $D_2/D_1$

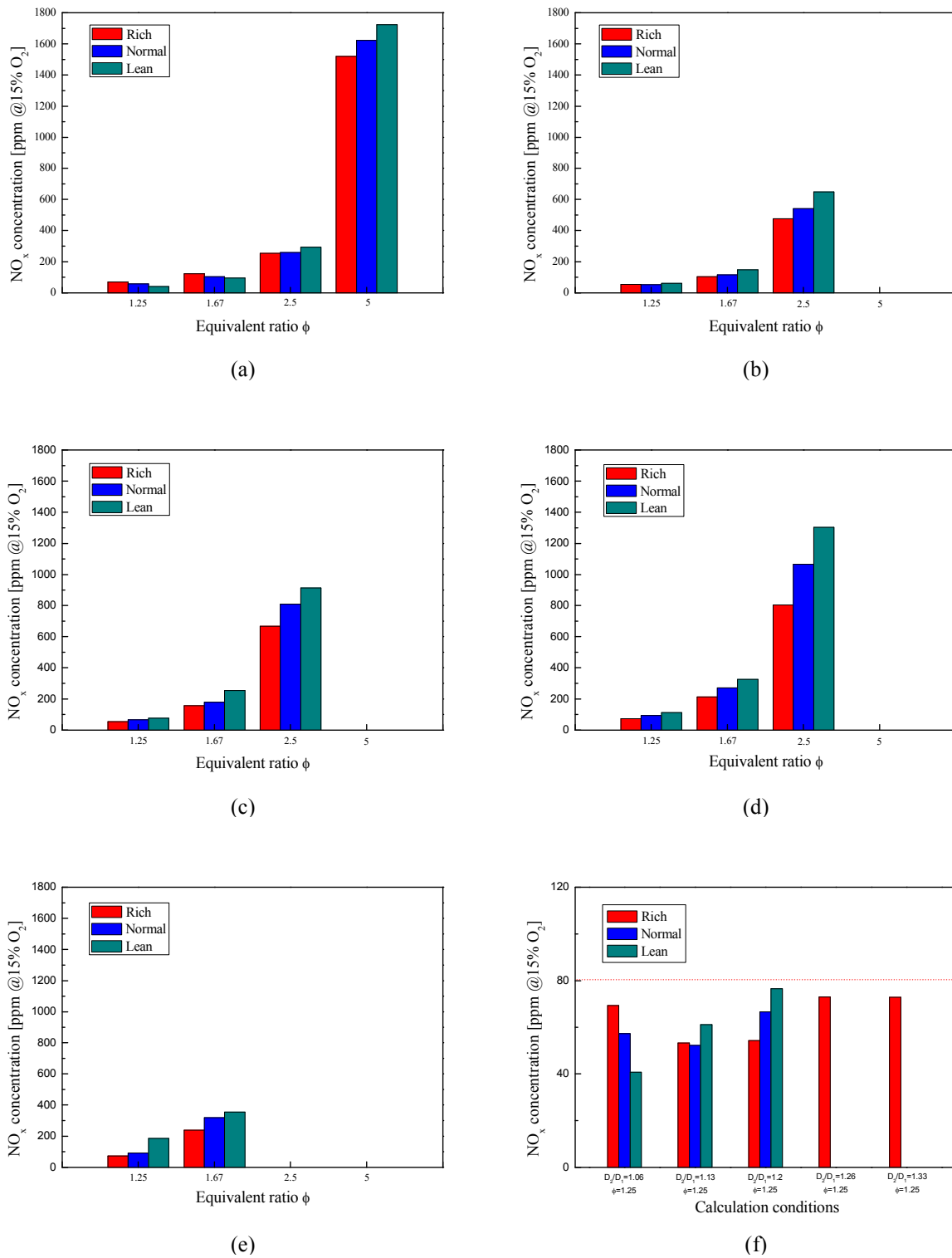


**Fig. 3.** Normalized flame length as function of burner equivalent ratio; (a)  $D_2/D_1=1.06$ , (b)  $D_2/D_1=1.13$ , (c)  $D_2/D_1=1.2$ , (d)  $D_2/D_1=1.26$ , (e)  $D_2/D_1=1.33$ , (f) Satisfying flame length calculation



**Fig. 4.** Temperature distribution as function of normalized distance from feed outlet; (a)  $D_2/D_1=1.06$ , (b)  $D_2/D_1=1.13$ , (c)  $D_2/D_1=1.2$ , (d)  $D_2/D_1=1.26$ , (e)  $D_2/D_1=1.33$ , (f) Satisfying average temperatures calculation conditions, normalized kiln length range from 0.4 to 1.0.





**Fig. 5.** NO<sub>x</sub> concentration as function of burner equivalent ratio; (a)  $D_2/D_1=1.06$ , (b)  $D_2/D_1=1.13$ , (c)  $D_2/D_1=1.2$ , (d)  $D_2/D_1=1.26$ , (e)  $D_2/D_1=1.33$ , (f) Satisfying NO<sub>x</sub> concentration calculation conditions.

이 1.06, 1.13, 1.2, 1.26인 조건 그리고  $\Phi=2.5$ 의 경우에서는  $D_2/D_1$ 이 1.06의 조건이 양질의 소결광 생산에 필요한 온도분포 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

3-3. NO<sub>x</sub> 배출 특성

Fig. 5는 각 계산 조건에 따른 NO<sub>x</sub> 배출 결과를 보여주고 있다. 동일한 당량비 조건에서  $D_2/D_1$ 가 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 배출량 역시 증가하는 결과를 보이고 있다. 확산화염 내에서 발생하는 Thermal NO<sub>x</sub>는 연료와 산화제의 급격한 반응이 발생하는 고온부에서 형성되기 때문에 화염이 길어질수록 고온부도 넓어져 NO<sub>x</sub> 배출량이 증가한 것으로 사료된다.  $D_2/D_1$ 가 동일할 때 버너 당량비가 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 배출량도 증가하는 경향을 보인다. 전술한 바와 같이 버너 중앙노즐의 당량비 변화에 따라 NO<sub>x</sub> 배출량은 큰 차이를 보이고 있으며, 화염길이가 0.175 이상의 긴 화염을 형성하는 경우, 버너 중앙노즐의 공기유량이 적은 농후 조건일수록 NO<sub>x</sub> 발생은 감소하는 경향을 보였다. 하지만  $D_2/D_1$ 가 1.06이고 버너 당량비가 1.25, 1.67인 조건과 같이 화염길이가 0.175 이하의 짧은 화염을 형성하는 경우에는 버너 중앙노즐의 공기유량이 적을수록 NO<sub>x</sub> 배출은 증가하는 경향을 보였고, 화염길이가 대략 0.175인  $D_2/D_1$ 가 1.13이고 버너 당량비가 1.25인 조건의 경우 버너 중앙노즐의 당량비 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 발생 결과는 특별한 경향 없이 비슷한 결과를 보였다. 상대적으로 공기노즐의 면적이 넓어지거나 공기유량이 작아지면 버너에서 분사되는 일차공기 속도는 느려지고 이로 인해 연료와 산화제

간의 혼합속도도 감소하여 긴 화염을 형성한다. 이때, 다공노즐버너의 형상적 특성상 버너 중앙노즐의 당량비가 커지게 되면 확산화염 내부에 농후한 영역이 형성되어 화염 내 국부적인 온도가 낮아짐에 따라 NO<sub>x</sub> 발생이 감소하게 되는 것으로 판단된다. 하지만 노즐 면적( $D_2/D_1$ )이 좁아지고 공기유량이 많아지면 버너에서 분사되는 공기 속도는 빨라지고 이로 인해 연료와 산화제간의 혼합속도가 증가하여 화염길이는 짧아지게 된다. 이러한 경우, 이미 연료와 산화제간의 혼합이 매우 원활히 이루어지고 있기 때문에 버너 중앙노즐의 당량비가 높아지면, 오히려 화염 내부의 국부적인 온도를 상승시켜 NO<sub>x</sub> 발생을 증가시키게 되는 것으로 사료된다.

Fig. 5-(f)는 80ppm(@15%O<sub>2</sub>) 이하의 NO<sub>x</sub> 배출 기준을 만족하는 계산 조건을 보여주고 있으며,  $\Phi=1.25$ 에서  $D_2/D_1$ 이 1.06, 1.13, 1.2이고 중앙노즐의 당량비가 Rich, Normal, Lean인 조건, 그리고  $D_2/D_1$ 이 1.26, 1.33이고 중앙노즐의 당량비가 Rich인 조건이 NO<sub>x</sub> 배출 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

3-4. 전체 결과 비교 평가

Fig. 6에는 각 계산 조건에 대한 NO<sub>x</sub> 배출량, 화염길이 그리고 킬른의 0.4에서 1까지 구간의 평균온도 결과를 나타내었다. 양질의 소결광을 생산하고 NO<sub>x</sub> 배출 기준을 만족하기 위해서는 NO<sub>x</sub> 배출량, 화염길이, 킬른 내 평균온도에 대한 기준을 모두 만족해야 하며, 각 기준의 범위를 파란색, 녹색, 붉은색 화살표로 Fig. 6에 나타내었다. 세 가지 계산조건에 따른 결과를 종합적으로 비교한 결과,  $D_2/D_1$ 가 1.33이고 버너 당량비가 1.25, 버너 중앙노즐이 Rich인 조건이 NO<sub>x</sub> 배출량 72.81ppm(@15%O<sub>2</sub>), 화염길이 0.292, 킬른 내 평균온도 1561K으로 세 가지 기준을 모두 만족하는 계산조건임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 이용하여 COG를 연료로 사용하는 다공노즐버너의 일차공기 노즐 직경, 버너 당량비, 버너 중앙노즐의 당량비 변화에 따른 화염특성 및 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 비교 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다공노즐버너의 일차공기노즐 직경이 증가함

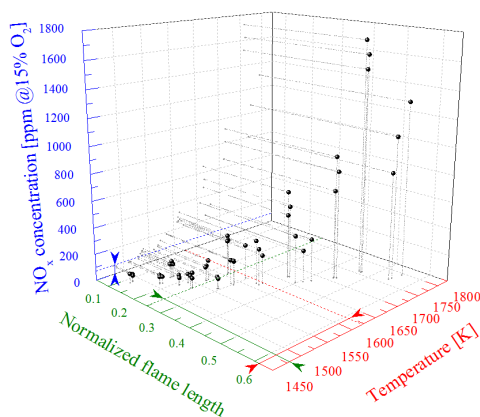


Fig. 6. Calculation results of NO<sub>x</sub> emission, normalized flame length and average temperature.

에 따라 동일한 당량비에서 화염길이는 길어지고 NO<sub>x</sub> 배출 역시 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

- 2) 동일한 일차공기노즐 직경에서 버너 당량비가 증가함에 따라 화염길이는 길어졌으며, 화염이 길어짐에 따라 화염 내 고온부가 증가하여 NO<sub>x</sub> 배출량도 증가하는 결과를 확인할 수 있었다.
- 3) 버너 중앙노즐의 당량비가 변하는 경우, 전체 계산조건에 있어서 화염길이와 킬른 내부 온도분포에는 큰 영향을 미치지 않았다. 하지만 NO<sub>x</sub> 배출의 경우, 화염길이가 0.175 보다 긴 경우에는 버너 중앙노즐의 당량비가 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 배출은 감소하였고, 화염길이가 0.175 보다 짧은 경우에는 버너 중앙노즐의 당량비가 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 배출이 증가하였다.
- 4) 본 수치해석 연구를 통해 D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>가 1.33, 버너 당량비가 1.25이고 버너 중앙 노즐이 Rich조건이 킬른 내부 온도분포 및 NO<sub>x</sub> 배출량 기준을 만족하는 적절한 설계조건임을 제안하였다.

## 후 기

본 연구는 2014년도 (주)포스코건설의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

## References

1. S. Yamaguchi, T. Fujii, N. Yamamoto, T. Nomura: "KOBELCO Pelletizing Process", KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW, No.29, pp.61-64, (2010)
2. Minjae Eom, Taekjin Hahn, Hookyung Lee, Sangmin Choi: "Performance Analysis Modeling for Design of Rotary Kiln Reactors", J. Korean Soc. Combust., Vol.18, No.3, pp.9-23, (2013)
3. Rainer H. Nobis: "Latest Rotary Kiln Burner Technology: Possibilities and Experiences", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol.27, No.5, pp.798-806, (1991)
4. Gary L. Borman, Kenneth W. Ragland: "Combustion Engineering", Mc Graw Hill Education, pp.135-137, (1998)
5. 환경부: "대기오염물질의 배출허용기준", pp.20-23, (2014)
6. Enviromental Protection Agency: "Nitrogen oxides(NOx), why and how they are controlled", pp.12-31, (1999)
7. Rauf Razzaq, Chungshan Li, Suojiang Zhang: "Coke ove gas: Availability, properties, purification, and utilization in China", Fuel, Vol.113, pp.287-299, (2013)
8. Sangmin Lee, Wonseok Choi, Kookyoung Ahn: "Experimental Study on the Combustion Characteristics of Syngas-Oxyfuel Diffusion Flames", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol.21, No.6, pp.553-560, (2010)
9. Gunhong Kim, Yongmo Kim, Kookyoung Ahn: "Non-Adiabatic Presumed PDF Modeling for Combustion Processes of Turbulent Oxy-CH<sub>4</sub> Flame", 30th KOSCO SYMPOSIUM, pp.67-72, (2005)
10. S.C. Hill, L. Douglas Smoot: "Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems", Progress in Energy and Combustion Science, Vol.26, pp.417-458, (2000)
11. Youngjun Lee, Minyoung Hwang, Gyubo Kim, Juhun Song, Youngjune Chang, Chunghwan Jeon: "Effect of Nozzle Distance and Angle in the Iron-ore Sintering Dual Burner on Flame Characteristics", Journal of Energy Engineering, Vol.19, No.3, pp.163-170, (2010)