

철광석 소결용 듀얼 버너의 노즐 간격과 각도가 화염 특성에 미치는 영향

이영준* · 황민영* · 김규보** · 송주현** · 장영준** · 전충환**[†]

*부산대학교 기계공학부 대학원, **부산대학교 기계공학부
(2010년 9월 1일 접수, 2010년 9월 20일 수정, 2010년 9월 20일 채택)

Effect of Nozzle Distance and Angle in the Iron-ore Sintering Dual Burner on Flame Characteristics

Young-jun Lee*, Min-Young Hwang*, Gyu-Bo Kim**,
Ju-hun Song**, Young-june Chang**, Chung-hwan Jeon**

*Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

**School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received 1 September 2010, Revised 20 September 2010, Accepted 20 September 2010)

요 약

소결버너를 이용한 표면점화는 제철공정에서 철광석의 소결을 위한 중요한 공정 중 하나이다. 본 연구에서는 듀얼 타입 소결 버너의 연소 특성을 분석하기 위하여 실험실적 규모의 실험과 전산 해석을 수행하였다. 라디칼 측정을 통해 연소특성을 파악하였으며, 열전대를 이용한 실험과 전산 해석 결과를 검증하였다. 검증된 전산 해석 모델을 바탕으로 싱글타입 소결 버너와 듀얼 타입 소결버너의 연소를 비교하였으며, 노즐 간격과 각도가 연소에 미치는 영향을 분석하기 위하여 3가지 노즐 간격 및 4개의 노즐 각도에 대한 전산해석을 수행하였다. 듀얼 타입이 싱글 타입 소결 버너보다 넓고 균일한 화염 폭을 형성함을 확인하였으며, 45도 비대칭 노즐 간격이 소결 베드 표면 점화를 위한 최적의 화염 폭을 형성함을 확인할 수 있었다.

주요어 : 소결 버너, COG, 노즐 간격, 노즐 각도, 자발광

Abstract— The objective of this study is to investigate the combustion characteristics of dual type of sintering burner as a function of design parameters using lab-scale sintering burner through experimental and numerical approaches. Combustion characteristics were evaluated by the radical method. The numerical model was verified as a temperature using R type of thermocouple at the bed surface. The effect of nozzle distance and angle were performed through the CFD analysis, and the comparison of burner types. As a results, dual type burner has more wider and uniform flame distribution than single type burner. Asymmetry and 45 degree angle condition have been suggested as an optimal condition for the ignition of the sintering bed surface.

Key words : Sintering burner, COG(Coke Oven Gas), Nozzle distance, Nozzle angle, Radical

[†]To whom corresponding should be addressed.
Energy Conversion System Lab. School of Mechanical Engineering, Pusan national University Gijeingwan 30 San Jangjeondong, Geumjeong-Ku, Busan, 607-735, Korea
Tel : 051-510-3051, E-mail : chjeon@pusan.ac.kr

1. 서 론

연소와 소결은 제철 소결기 베드 내에서 발생하는 중요한 물리적, 화학적인 현상이다. 소결은 금속이나 세라믹 등의 고상분말을 가열하였을 때, 입자가 서로 접한 면에서 결합되거나 일부가 고결하여 서로 연결되어 한 덩어리로 되는 과정이다. 좋은 철광석은 철분(Fe)이 풍부하고 유해성분인 황(S), 인(P), 동(Cu)의 함유량이 적으며 크기가 균일한 것으로 볼 수 있다. 그러나 철광석은 원산지에 따라 성분 함유와 형상이 각기 다르기 때문에 제철공장에서는 분말상태(수십 μm ~수 mm)의 철광석을 소결공정을 통해 품질을 고르게 하고 일정한 크기(5 mm)이상인 소결광으로 만들어 고로에 투입하고 있다.

철광석(80%), 석회석(15%), 코크스와 무연탄(5%)을 물을 첨가한 뒤 혼합하고 압축하면 큰 입자의 표면의 요철에 미세한 입자가 달라붙게 되어 의사입자(pseudo particle)를 형성하게 된다. 이 입자들은 100 m 이상의 순환식 베드에 공급되어 일정한 층을 이루고, COG(coke oven gas)를 이용한 직화식 소결버너를 이용하여 분철광석 입자들 사이에 혼합된 코크스의 연소에 의해 상층부터 하층으로 서서히 소결이 이루어진다. 이러한 과정으로 생성된 소결광은 5 mm 이상의 입자는 고로조업에 투입되며, 미반은 소결공정에 다시 재투입 된다.

소결광의 품질과 생산성은 온도와 체류시간, 입자 크기 및 수분함량, 베드의 균일도에 따라 많은 차이를 보이며, 특히 소결버너에 의해 베드 표면에 철광석과 함께 혼합된 코크스가 초기 점화를 충분히 이루어야 연소대가 하루로 끝까지 나타날 수 있다. 그러므로 소결버너의 성능과 운전조건이 소결에 큰 영향을 주게 된다. 소결버너의 연료로 사용되는 COG는 제선공정 중 코크스 공정에서 나오는 석탄가스를 재이용한 것으로, 최근 들어 CO₂저감에 대한 여러 정책과 에너지 효율 개선에 대한 요구에 따라 기존의 소결버너보다 COG사용량을 줄이면서 조업에는 영향을 미치지 않는 친환경 고효율 소결버너의 개발이 필요하게 되었다. 이에 따라 기존의 싱글타입 소결 버너에서 듀얼타입 소결 버너로 개선되었고, 최근 제철소에서는 듀얼 타입 소결버너로 교체하여 조업에 이용하고 있다. 여러 연구자들이 소결공정 중 철광석 베드에서 일어나는 코크스 연소의 교체-기체간의 반응과 열전달에 대한 수치적 모델링에 대한 연구를 진행

하였다 [1-4]. 그러나 개발된 듀얼타입 소결버너뿐 아니라 종전에 사용되던 싱글타입 소결버너의 연소특성에 대한 연구는 아직 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 실험실적 규모의 버너를 제작하여 듀얼타입 소결 버너의 연소특성을 분석하고 그에 대한 전산해석을 수행하여 그 결과를 검증하였으며, 전산해석을 통해 싱글타입 소결버너와 듀얼타입 소결버너의 연소특성을 비교하였다. 또한 실제로 제작이 힘든 노즐 간격과 각도변화에 따른 연소특성을 전산해석을 통해 비교함으로써 시간적 경제적 손실을 줄이며 노즐 간격과 각도가 화염분포에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험

2-1. 실험 구성

Fig. 1은 실험 장치의 개략도이다. 소결 버너의 특성을 분석하기 위하여 현장에서 조업 중인 듀얼 타입 소결버너 중 1개의 단위버너를 1/5 크기로 줄여서 제작하였으며 실험 장치는 크게 소결 버너 부, 라디칼 측정 시스템 부, 온도 측정 부, COG 및 Air 공급부로 구성된다. 먼저 소결 버너부에서는 COG 가스와 1차(primary), 2차(secondary) 공기가 분사되어 비 예 혼합 연소를 일으키게 된다. 연료 노즐은 지면 방향을 축으로 +45°, -45°의 각도로 설계되어 있다. COG 공급 부는 H₂, CH₄, CO 가스를 MFC를 이용하여 각 유량을 제어하게 되고 가스 mixing tank에서 3가지 가스가 혼합되어 소결버너에 공급하게 된다. 블로어

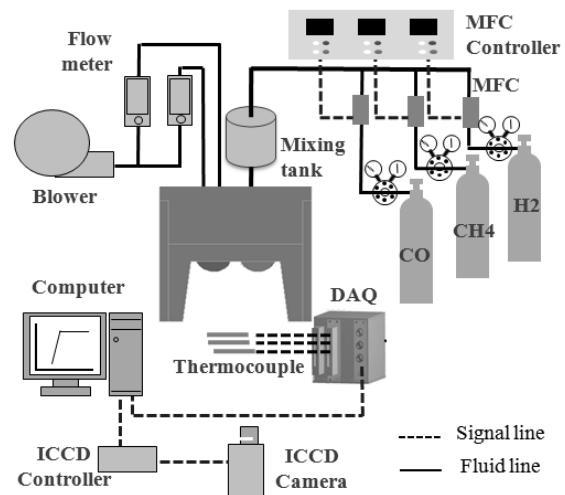


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

를 이용하여 연소 시 필요한 Air를 공급하며, 1차와 2차 공기에 필요한 양만큼 유량계를 이용하여 유량을 제어한다. 라디칼 측정을 위하여 ICCD 카메라를 버너의 정면 및 측면 그리고 하부에 설치하였으며 사용된 반사거울(Reflection mirror, TFAN-150C20-4)은 Pyrex에 Al 코팅을 한 것으로서 직경150 mm, 두께 20 mm, Flatness $\lambda/4$ 이며, 파장 200 ~ 1600(nm)에서 90% 이상의 투과율의 특성을 가진다. 그리고 OH*(0,0), CH*(0,0) 밴드의 자발광을 취득하기 위하여 각각 307.1 \pm 1.5nm, 430.7 \pm 2nm, 간섭필터(interference filter)를 사용하였다 [5-8]. 온도 측정을 위하여 실제 버너에서 소결 베드까지 거리인 400mm 지점에 R-type thermo couple을 을 설치하고 DAQ 장비를 이용하여 컴퓨터에 저장하게 된다.

2-2. 실험 방법

전산 해석을 위한 COG 혼합가스 및 1차, 2차 공기의 유량을 Table. 1에 나타내었다. 실제 조업에서 사용되고 있는 COG는 고로 공정에서 나온 가스를 재이용한 것으로, 조성은 Table. 2와 같이 혼합가스로 이루어져 있으며 단열화염 온도는 2259K이다. Scale down burner 실험에선 COG의 구성 중 가장 많은 비중을 차지하고 있는 H₂, CH₄, CO 3가지 가스를 선택하여 각각 60 L/min, 40 L/min, 12L/min으로 조성하여 노즐에서 분사되는 가스 유속 및 발열량을 실제 조업조건과 일치하게 하였다. 주변 분위기는 상온 대기압의 조건으로 Air의 총 유량은 633 L/min 이며 1차 측에서 443 L/min/min, 2차에서 190 L/min의 Air가 공급된다.

3. 전산해석 모델링 및 조건

3-1. 전산해석 모델

연소해석을 하기위하여 질량, 운동량, 화학종, 그리고 에너지 보존방정식이 적용되었고 비예혼합화염에 대한 해석을 수행하기 위하여 PDF(Probability Density Function) 연소모델을 적용하였다. 난류모델은 Standard k-ε 모델이 적용되었다. 또한 복사예 의한 열전달은 Radiation P-1 방법을 적용하여 계산을 수행하였다. 수치해석에 사용한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \tag{1}$$

Table 1. Composition and properties of gas for experimental.

Property	COG	
	Composition(%)	H ₂
CH ₄		35.7
CO		10.7
Primary air	443 L/min	
Secondary air	190 L/min	

Table 2. Composition and properties of COG [9].

Property	COG	
	Composition(%)	CH ₄
C ₂ H ₄		2.9
N ₂		2.3
O ₂		0.3
H ₂		56.4
CO		8.4
CO ₂		3.1
LHV(kcal/Nm ³ /hr)	4389	
Theoretical air/fuel ratio	4.476	
Laminar flame speed(m/s)	0.82	
Adiabatic temperature(K)	2259	

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{2}$$

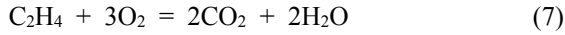
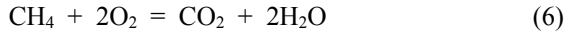
식 (1)은 질량 보존방정식으로 압축성 유체와 비압축성 유체에 모두 적용할 수 있으며 Sm은 증발과 같은 현상으로 일어나는 질량의 증가분을 나타낸다. 식 (2)는 모멘텀 보존 방정식으로 해석의 경계 안에서 모멘텀 보존식을 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot (\sum_j h_i J_i) + S_h \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{f}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{f}) = \nabla \cdot (\frac{\mu_i}{\sigma_t} \nabla \vec{f}) + S_m + S_{user} \tag{4}$$

식 (3)에서는 열적인 요소와 화학적인 요소의 합을 나타내는 열 유속, 온도 구배에 따른 전도, 화학종의 농도구배에 의한 엔탈피 확산을 포함하는 에너지 방정식을 나타내며, Source 항(Sh)은 화학반응에 의해 생기는 에너지를 나타내게 된다. 식 (4)에서는 각 화학종에 대한 질량 및 운동량은 보존이 되며, 각 화학종에 따른 확산 플럭스(Fi,j)가 고려되었다. 또한 Source 항(Si)은 반응에 의해서 생성되는 화학종을 고려하게 된다.

COG가 공기와 확산에 의해 혼합되어 일어나는 연소 반응식은 다음과 같다.



연소반응 식을 풀기 위해선 각각의 반응에 대한 반응 속도 인자를 구하여 적용시켜야 하므로, 실험에 의한 신뢰성 있는 값의 도출이 필요하다.

본 연구에서는 이미 검증된 PDF(Probability Density Function) 연소 모델 [10]을 이용하여 소결 버너 연소 시스템 해석을 하였다. 대부분 난류확산화염에서 화학 반응율은 혼합을 보다 훨씬 커서 반응물질이 혼합되는 순간 반응이 완료된다고 가정할 수 있다. 즉, 반응시간이 혼합시간에 비해 무시할 정도로 작으므로 난류화학염에 무한반응속도(infinitely fast chemistry)라고 가정할 수 있다. 이러한 가정으로 인해 순간 화학종의 농도와 온도가 그 순간의 보존스칼라의 함수로서 주어지며 혼합 분율의 전달방적식의 해를 구하는 혼합분율/확률밀도함수 모델을 이용할 수 있는데 혼합 분율은 식 (9)와 같이 정의된다.

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,Or}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,Or}} \quad (9)$$

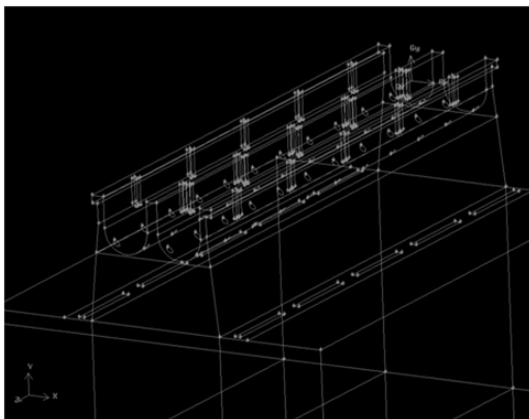
$$p(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \sum_i T_i \quad (10)$$

식 (10)은 화학반응에 미치는 난류변동의 영향을 고려하기 위해 보존스칼라에 대한 확률밀도함수(Probability Density Function)를 도입함으로써 이러한 난류변동과 화학반응과의 상관관계를 해결하였다 [11].

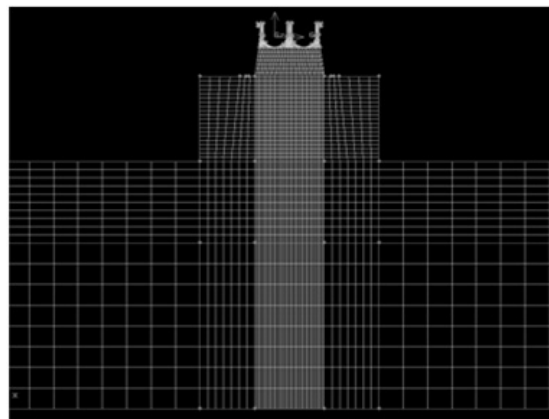
3-2. 해석조건 및 계산격자

경제적, 시간적인 이유로 실제 제작을 통한 실험으로 얻기 힘든 Dual type 소결 버너의 노즐 각도 및 간격이 연소에 미치는 영향을 보기 위해 전산해석 전처리 프로그램을 통해 3가지의 간격 형태와 4가지의 노즐각도를 변경한 총 12가지 경우의 모델링을 하였다. Case 1의 경우는 기존 Single 버너 2개를 붙인 것으로 안쪽과 바깥쪽의 연료 분배 홀이 대칭으로 뚫려 있으며 각 홀의 크기는 10 mm로 총 40개의 분배 홀에서 COG가 분배되도록 설계하였다. Case 2 경우 안쪽과 바깥쪽 분배 홀이 비대칭 적이며 바깥쪽의 경우 7.5mm 직경 홀이 24개, 안쪽의 경우 7 mm 직경 홀이 20개로 총 44개의 홀이 배치되도록 구성하였다. Case 3은 Case 2와 같이 안쪽과 바깥쪽 홀이 비대칭이며 바깥쪽은 7.5mm 직경의 홀이 12개, 안쪽은 7 mm 직경의 홀을 11개로 디자인 하여 총 46개의 홀을 배치함으로써 Case 2 보다 간격을 더욱 좁게 하여 모델링 하였다. 또한 Single type 소결버너에서 Dual type 소결버너로 전환되며 개선된 점을 파악하기 위해 과거에 사용했던 Single type 소결버너에 대한 모델링도 수행하였다.

Fig. 2는 전산해석을 위한 3D modeling 및 계산 격자를 형성한 것을 나타내었다. 연료가 공급되어 공기가 혼합되는 부분과 연소가 일어나는 부분은 조밀



(a) 3D modeling



(b) Mesh structure

Fig. 2. Sintering burner modeling and mesh structure for numerical analysis.

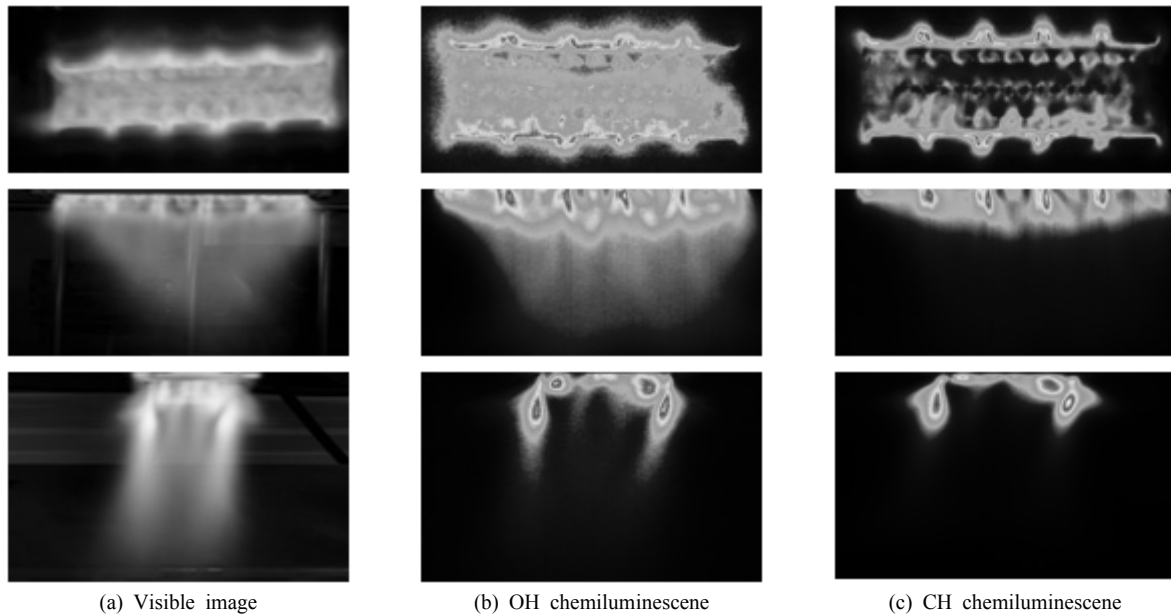


Fig. 3. Typical implementation for sintering burner radical analysis.

하게 형성하였으며, 베드에 도달한 화염이 퍼져나가는 부분은 크게 형성함으로써 계산 시간을 줄였다. 각 모델 당 격자의 수는 약 100만개로 구성하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 화염특성

Fig. 3은 실험실적 규모의 버너에서 연소가 일어날 때 정면 및 측면, 그리고 버너 하부에서 촬영한 화염 실사 및 OH, CH 라디칼 사진이다. 라디칼은 연소 반응 중 발생하는 혼합가스의 중간 생성물로서 라디칼 발광 강도를 측정하여 반응 영역을 표시 할 수 있는 지표로 사용되고 있다. 화염 사진을 보면 노즐 부근으로 고른 화염 분포를 보이고 있지만 라디칼 사진을 보면 중앙의 발광 강도는 낮은 편이며 2차 공기 공급부 부근에서 높은 강도 값이 나타남을 알 수 있다. 이것은 라디칼의 특성상 과잉 공기비가 1이 되는 지점에서 가장 높은 강도 값이 나타나는데 COG와 1차 공기가 혼합되는 부분에서는 과잉 공기비가 0.95정도 이므로 2차 공기와 혼합되어 과잉공기비가 1이 되는 지점에서 가장 높은 강도 값을 나타남을 알 수 있다. 1차 공기 유입부의 유량을 늘려 COG와 1차 공기의 과잉 공기비가 1이 되도록 한다면 보다 고른 화염 분포를 가질 것으로 사료된다.

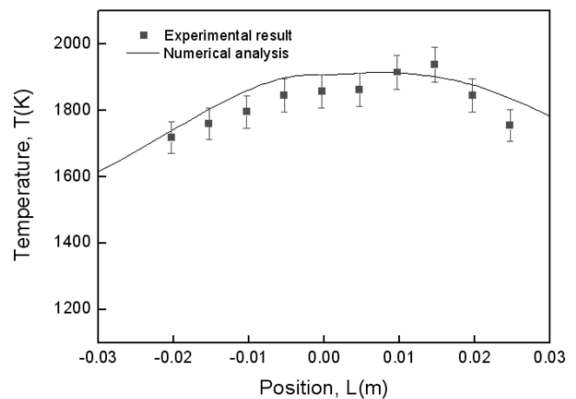


Fig. 4. Temperature comparison between experimental result and numerical analysis.

4-2. 화염 온도 분포

Fig. 4는 scale down burner에서 열전대를 통해 얻은 화염의 온도와 전산 해석을 통하여 나타난 온도를 동일한 위치에서 비교한 그래프이다. 노즐로부터 400 mm 떨어진 위치에서 노즐 사이를 기준으로 하여 좌우로 5 mm 씩 이동하면서 온도 측정을 반복적으로 수행하였다. 1400 K 이상의 좌우 위치간의 편차가 비교적 크지 않은 고른 온도분포를 볼 수 있으며, 소결 베드의 점화를 위해서 1400 K 정도가 필요한 것으로 알려져 있기 때문에 듀얼 타입 소결버너는 조업에 표면 점화온도 측면에서 큰 문제를 일으키지 않을 것으로 사료된다. 연소가스의 50% 정도가 수소로 구성이

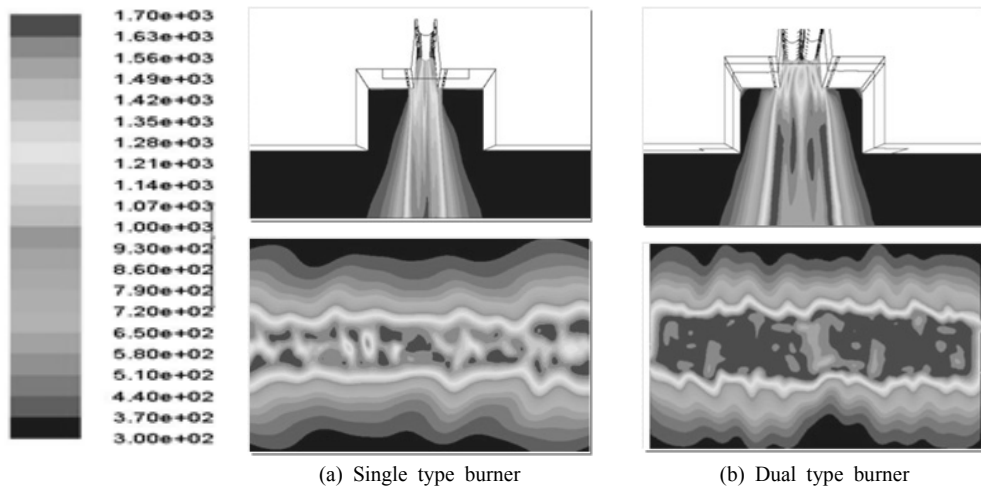


Fig. 5. Flame Comparison between single and dual type burner.

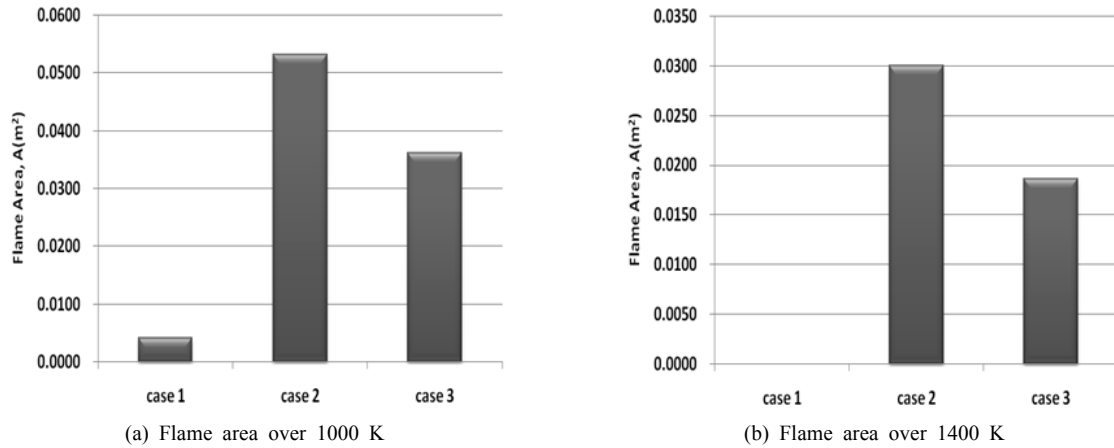


Fig. 6. Flame distribution as function of nozzle distance.

되어있고, 각 노즐에서 나온 연료의 연소로 인한 화염간의 간섭이 크기 때문에 특정 지점에서의 온도는 작게는 50 K 크게는 100 K의 변화량이 나타났다. 그러나 전체적으로 전산해석 결과와 유사한 온도분포와 경향을 보이므로 전산해석에 대한 신뢰성을 확보할 수 있다.

4-3. Single vs Dual 소결 버너

Fig. 5는 이전에 사용되던 single type 소결버너와 최근에 개발되어 조업에 사용되고 있는 dual type 소결버너에 대한 온도 분포를 측면에서 비교한 그래프이다. Single type 소결버너의 경우 Dual type 소결버너보다 화염 폭이 좁게 나타나며 온도 분포가 고르지 못하고 주위보다 온도가 낮은 부분이 여러 군데서 발생된 것을 알 수 있다. 이것은 연료 공급부가 1개로

이루어져 있기 때문에 좌우로 위치한 노즐에서만 연료가 분사되므로 노즐과 노즐사이인 중앙에서 산소가 부족해지는 현상에 기인한 것이다. Dual type 소결버너의 경우 연료 공급부가 2개로 구성되어 있고 공급부 사이에서 1차공기가 내려오므로 중앙에 산소를 공급하여 훨씬 균일하고 넓은 화염두께를 형성하게 된다.

4-4. 노즐 간격에 따른 화염 분포

Fig. 6은 전산해석을 통하여 얻어진 노즐 간격에 따른 화염의 면적을 나타낸 그래프이다. 소결 베드위치에서 온도가 1000 K 이상이 되는 면적과 1400 K 이상이 되는 화염 면적을 나타낸 그래프이다. 분철광석의 소결현상을 위해 혼합되는 코크스의 점화온도를 위해서 1400 K이상의 온도는 필수적이다. case 1의 경우는 1000 K 이상 되는 부분의 면적이 나머지에 비

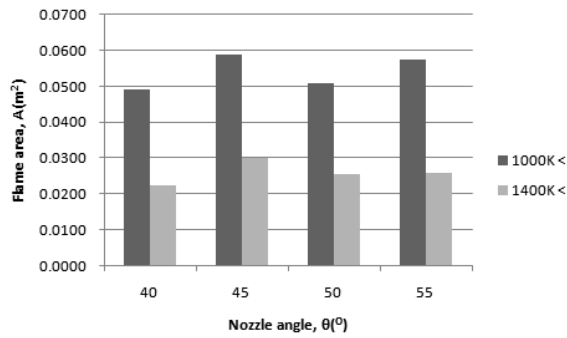


Fig. 7. Flame distribution as function of nozzle angle.

하여 현저하게 작고 1400 K 이상이 되는 부분은 없는 것으로 나타났다. case 3의 경우도 1000 K, 1400 K 이상 되는 부분 면적 모두 case 2보다 좁게 나타났다. 이것으로 소결버너의 노즐 간격에 따라 넓고 고른 화염을 가지는 노즐의 간격이 있음을 알 수 있고 case 2의 경우가 가장 좋은 성능을 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

4-5. 노즐 각도에 따른 화염 분포

Fig. 7는 40, 45, 50, 55도로 노즐 각도가 변함에 따라 나타나는 1000 K, 1400 K 이상 되는 부분의 화염 면적을 나타낸 그래프이다. 노즐 간격은 앞 절에서 화염면적이 가장 넓게 나왔던 Case 2의 조건을 사용하였다. 라디칼 결과에서 보았듯, 화염면적과 온도는 각 노즐에서 접선방향으로 분사된 연료와 상부에서 내려오는 공기와의 혼합위치에 크게 좌우된다. 그러므로 공기와 연료의 유속에 따라 혼합위치가 이동하게 되며, 이는 곧 하부의 화염분포 변화를 가져오게 된다. 각도에 대한 화염 면적을 분석해 보았을 때, 각도의 넓어짐이 화염면적에 비례하는 것은 아니며, 공급되는 공기와 연료의 유속, 노즐 간격에 따른 최적의 노즐 각도가 있음을 알 수 있다. 현재 조업에 이용되는 유속과 비대칭 노즐 간격 조건에서, 노즐 각도가 45도 일 때 가장 넓은 화염 면적을 가진다.

5. 결 론

본 연구는 듀얼타입 소결 버너에 대해 실험실적 규모의 버너를 이용한 화염 특성 분석 및 전산 해석을 통하여 현재 조업에서 이루어지는 공기와 연료 공급비에서 위치에 따른 온도 분포를 확인하고 노즐 간격과 각도에 따른 연소 특성을 분석 하였다.

- (1) OH 및 CH 라디칼을 측정된 결과 COG와 공기의 과잉공기비가 1이 되는 2차 공기 공급부 부근에서 가장 강한 발광 강도를 확인하였다.
- (2) 동일 조건으로 전산해석을 모델링한 결과, 실험값과 유사한 경향을 가짐을 확인하였다.
- (3) 전산해석을 통해 최근에 개발된 dual 타입버너가 single 타입버너에 비해 동일한 유량조건 시 화염 폭 및 연소측면에서 우수함을 확인 하였고, 이는 산소 결핍영역에 1차 공기를 공급하므로 더 원활한 연소가 일어나도록 하는데 기인한 것이다.
- (4) 노즐 간격과 각도를 다르게 하였을 때의 온도 분포 면적을 확인한 결과 가장 넓은 면적을 가지는 간격과 각도가 있음을 알 수 있었고, 비대칭 간격인 바깥쪽의 24개 노즐과 안쪽의 20개 노즐 조건과 45도 노즐 각도에서 가장 넓은 면적을 가짐을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 지원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

참고문헌

1. Yang, W., Ryu, C. K. and Choi, S. M., 2003, "Modeling of Coke Combustion and heat Transfer in an Ore Sintering Bed with Considerations of Multiple Solid Phases," Proceeding. of the KSME, pp. 79-84
2. Yang, K. H., Yang, W. and Choi, S. M., 2004, "Modeling of Coking Process in a Coke Oven," Trans. of the KSME, 5, pp. 1184-1189.
3. Yang, W., Yang, K. H., Choi, S. M., Choi, E. S., Li, D. W. and Kim, S. M., 2004, "A Study on the Combustion Characteristics of Coke and Anthracite in an Iron Ore Sintering Bed," Trans. of the KOSCO, Vol. 23, No. 5, pp. 30-37.
4. Yang, K. H., Yang, W., Ryu, C. K. and Choi, S. M., 2003, "Mathematical Approach of Thermo-fluid Characteristics in a Coke Oven," KOSCO symposium, pp. 43-47.
5. Kim, Y. S., Cho, S. W., Kim, G. B., Chang, Y. J. and Jeon, C. H., 2007, "A Study of Characteristics of Combustion Radical and Exhausted Emission in a Radiant Burner With Porous Ceramic Mat," KSME, Vol. 31, No. 6, pp. 539-546.

6. Ahn, K. M., Jeong, Y. K, Chang., Y. J., and Jeon, C. H., 2005, "An Experimental Investigation of The Characteristics of Radical and Pollutant Emission in Partially Premixed Swirling Methane-air Flame," KOSCO symposium, pp. 320-327.
7. Jeong, Y. K., Oh, J S, Jeon, C. H., and Chang, Y. J., 2005, "Detailed Local Chemiluminescence Measurement and Nitrogen Oxides Emission in Laminar Partually Premixed CH₄/Air Flames" KSME, Vol. 29, No. 2, pp. 263-270.
8. Ahn, K. M., Jeong, Y. K, Chang., Y. J., and Jeon, C. H., 2005, "An Experimental Investigation of Temperature and Flame Structure Related to Chemiluminescence in Partially Premixed laminar Methane-Air Flames," KOSCO symposium, pp. 178-185.
9. Choi, W. S., Lee, S. M, Kim., H. S., Cho, J. H., Ahn, K. Y. and Kim, Y. M., 2009, "Experimental study on the Combustion Characteristics of Syngas-Oxifuel Diffusion Flame," KOSCO symposium, pp. 111-117.
10. Kim, H. J., Choi, W Y, Bae, S. H., Hong, J. G., and Shin, H. D., 2008, "A Study on Oxy-Fuel Combustion System with Multi-Jet Burner Numerical Simulation with PDF Combustion Model" KSME, Vol. 32, No. 7, pp. 504-512.
11. Kim, J. K., Kim, S H, Lee, Y. S. and Huh, K. Y., 1997, "Numerical Analysis of s swirl burner by FLUENT," Proceeding. of the KSCFE, pp. 85-93.