

제선 설비의 열공정 해석 모델링 접근 방법

양 원* · 류창국** · 최상민† · 최응수*** · 이덕원*** · 허완욱***

(2003년 11월 27일 접수, 2004년 5월 28일 심사완료)

Analysis of the Thermal Processes in the Iron-Making Facility - Modeling Approach

Won Yang, Changkook Ryu, Sangmin Choi, Eungsoo Choi, Deokwon Ri and Wanwook Huh

Key Words : Iron-Making Process (제선 공정), Iron Ore Sintering (철광석 소결), Modeling Approach (모델링 접근 방법)

Abstract

Thermo-fluid characteristics in coke oven, sintering machine and blast furnace in iron-making facility are key processes related to the quality and productivity of the pig iron. Solid material in the processes usually forms a bed in a gas flow. For simulation of the processes by mathematical model, the solid beds are idealized to be a continuum and a reacting solid flow in the gas flow. Governing equations in the form of partial differential equations for the solid material can be constructed based on this assumption. Iron ore sintering bed is simulated and limited amount of parametric study have been performed. The results have a good agreement with the experimental results or physical phenomena, which shows the validity and applicability of the model.

기호설명

- f_v : 체적률
- S : 생성항
- T : 온도 (K)
- t : 시간 (sec)
- v : 속도 (m/s)
- Γ : 일반적인 확산항 계수
- ρ : 밀도 (kg/m^3)
- ϕ : 스칼라량

1. 서 론

제선은 철광석에서 선철을 만들어 내는 공정

이다. 제선에 있어서 가장 핵심이 되는 공정은 크게 코크스 오븐(Coke oven), 소결 공정(Sintering process) 및 고로(Blast furnace) 에서의 공정을 들 수 있다. 최근 들어 코크스 공정과 소결 공정을 단순화하거나 없앤 새로운 공정들이 개발되거나 이미 가동이 되고 있지만, 여전히 위 세 공정은 제선 과정에서 가장 큰 비중을 차지하고 있다.

Fig. 1 에는 제선 공정의 개념도를 나타내었다. 소결 공정은 고로에서의 운전을 위한 전처리 공정이다. 주 연료로는 코크스 공정의 부산물인 분코크스를 사용하며, 이의 연소로 인해 철광석 입자들의 부분적인 용융이 생겨 서로 달라붙어 덩어리가 커지게 된다. 이를 통해 철광석은 고로의 운전애 요구되는 적절한 입도 및 물성치들을 가지게 된다. 소결광은 고로에 코크스 공정의 부산물이 되는 피코크스 및 석회석과 함께 장입되고, 고로 하부에서 1100℃ 가량의 뜨거운 공기 또는 산소 부화공기가 풍구로 유입되어 코크스를 연소시키고, 이로부터 발생하는 환원 가스(CO, H₂)에 의해 장입물이 가열, 환원 및 용해되어 선철과 슬래그가 출선구로 배출된다.

† 책임 저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : smchoi@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3030 FAX : (042)862-1284

* 한국과학기술원 기계기술연구소

** Dept. of Chemical engineering, Univ. of Sheffield, UK

*** POSCO 기술연구소 제선 연구 그룹

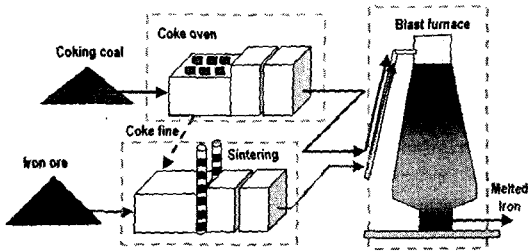


Fig. 1 Iron-making Process

이와 같이 제선 공정 내 각 단위 공정들 내부에서는 각각 다른 반응과 열전달 기작이 존재하지만, 고형 물질이 층을 이루어 존재하고 그 가운데 가스가 진행하면서 반응이 일어난다는 점에서는 공통적인 특징을 가지고 있다. 각 단위 공정에 해당되는 코크스 공정^(1,2) 소결 공정⁽³⁻⁶⁾ 및 고로⁽⁷⁾에 대한 수치적 모델링 및 해석에 대해서 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이러한 형태의 모델들은 각각 해당 시스템에만 적용이 가능하고 비슷한 형태의 다른 시스템에 적용하기가 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 기존의 시스템에 적용되어 왔던 모델을 개선하여 제선 공정에 적용이 가능하도록 하는 작업을 수행하였다. 제선 공정의 각각의 단위 공정을 정의하고, 이들의 해석에 있어 공통적으로 적용 가능한 접근 방법을 제시하였다. 모델링 및 계산의 적용 예로서 소결 공정을 선택하여 모사를 수행하고 계산 결과를 실험 결과와 비교하여 나타내었다.

2. 시스템 정의

2.1 Coke oven

Fig. 2 에는 코크스 오븐의 구조 및 반응상황의 개념도를 나타내었다. 코크스 오븐은 원료로 coking coal 을 사용하며, 약 5m 높이의 오븐 내에 적치되고 오븐 바깥에 있는 버너를 통해 뜨거운 벽을 통하여 열이 공급된다. 0.45m 폭의 오븐과 약 0.3m 폭의 연소로는 약 100 여 개가 연속적으로 연결되어 있고, 깊이는 약 16m 정도이다. 오븐 내부에는 산화제의 공급이 없으며 이에 따라 원료의 온도 상승에 의한 원료탄(coking coal)의 열분해만 있게 되고 연소 등의 반응은 없다. Fig. 2 에 나타난 것처럼 오븐 바깥쪽에서부터 열이 전달되어 온도가 상승하면서 바깥쪽은 coke 가 생성되지만, 내부는 열분해가 끝나지 않은 영역으로 남게 된다. 가장 안쪽에는 원료탄이 건조되지 않은 상태에서 남아있게 된다.

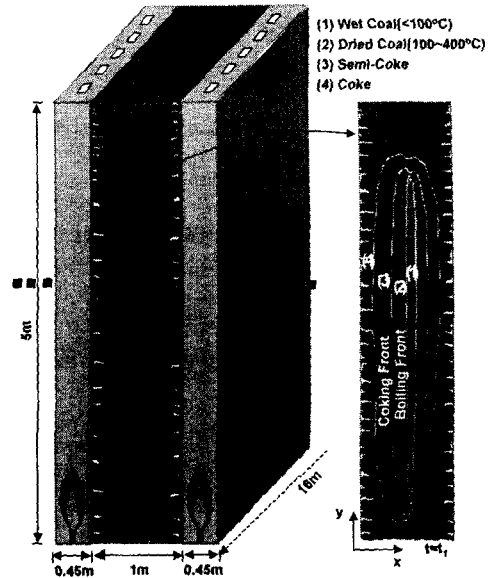


Fig. 2 Schematic diagram of a coke oven

코크스 오븐을 모델링할 때 고려되는 가장 중요한 현상은 벽으로부터 내부로 전달되는 열전달과 생성되는 건류 가스와 고체 입자 사이의 물질 전달이다. 이 두 현상은 각각이 수직 방향으로 진행하고 깊이가 약 16m로 매우 커 깊이 방향으로 일어나는 현상이 크게 중요하지 않기 때문에 시간에 따라 진행되는 과도 2차원 현상으로 고려될 수 있다. 이와 함께 원료탄의 열분해가 일어나면서 발생하는 고체 물성치의 변화가 중요하게 고려되어야 한다.

2.2 Iron ore sintering bed

Fig. 3 에는 소결층 내부에서 일어나는 현상을 정리하였다. 소결층을 이루는 주 원료인 철광석, 분코크스, 석회석은 믹서에서 혼합되어 의사 입자(pseudo particles)를 형성하게 된다. 이 원료가 장입되면 COG(Coke Oven Gas) 버너에 의해 약 90~120초 시간 범위 내에서 점화가 되며, 점화가 끝나면 코크스의 연소가 외부 열원 없이 층의 수직 방향으로 내려가면서 진행된다. 연소대에서는 소결이 이루어지고, 이 때 공기는 층의 상부에서 자연유입되며 연소가스는 흡입 팬을 통해 배출된다. 폭 5m, 깊이 0.7m 의 소결 베드는 이동식 화격자에 의해 이송되며, 총 길이는 약 100m 가량이 된다. 체류시간은 개략적으로 30분 정도이다. 소결층의 모델링에 있어서 가장 중요한 현상은 코크스의 연소 반응 및 철광석의 용융을 포함한 고체 원료의 물성치 변화로, 이는 수직 방향으로 이루어지는 열 및 물질 전달에 의해 가장 큰 영

향을 받는다.

소결층의 이러한 특성으로 인해 폭 방향 및 길이 방향으로의 전달 현상을 무시한다면, 1차원 비정상 모델링을 통하여 소결층의 모사가 가능하게 된다. 시간의 변화에 따라 진행되는 과정은 소결층이 일정한 이송속도로 움직이므로 2차원으로 확장이 가능하게 된다. Fig. 4 에는 이러한 과정을 도식적으로 나타내었다.

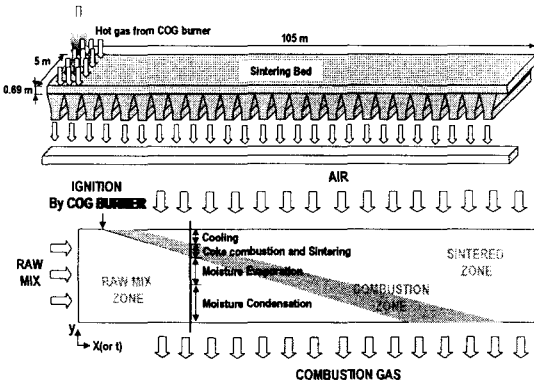


Fig. 3 Schematic diagram of an iron ore sintering bed

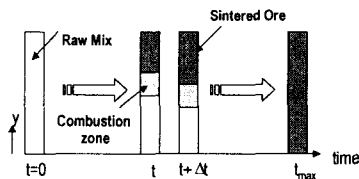


Fig. 4 Extension of 1-D unsteady model to the 2-D model

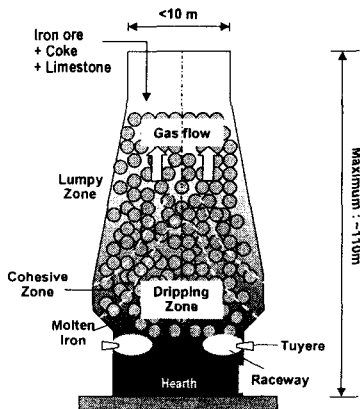


Fig. 5 Schematic diagram of a blast furnace

2.3 Blast Furnace

Fig. 5에는 고로 내부에서 일어나는 현상을 나타내었다. 약 100m 높이의 고로에서는 기체-액체-고체 3 상간의 반응이 일어나며, 상변화, 열전달 및 물질 전달이 동시에 일어나게 된다. 고로 위쪽에는 장입된 코크스와 소결광 등이 층을 이루고 있으며, 상승하는 반응 가스에 의해 철광석류가 일부 FeO 까지 환원되면서 응집 영역에 이른다. 이 영역에서는 FeO 가 환원되어 Fe 가 되고 온도가 상승하면서 고온에서 용융이 일어나게 된다. 고온의 송풍 가스는 원주상으로 놓여있는 풍구를 통해 유입되어 코크스를 연소시켜 환원 가스를 생성시킨다.

고로에는 제선 공정 중 모델을 수립하기에 가장 복잡한 현상들이 포함되어 있다. 원료 층 내에 액체상이 존재하기 때문에 해석이 쉽지 않으며 반경 방향으로의 통기도가 달라 가스 속도가 분포를 가지게 되므로 축 방향 뿐 아니라 반경 방향으로의 해석이 함께 수반되어야 한다.

2.4 각 단위 공정들의 비교

Table 1 에는 제선 공장 내 각 단위 공정의 차이점을 비교하여 나타내었다. 고로 내부는 코크스 오븐과 같이 고정층으로 볼 수 있지만 코크스 오븐은 원료 공급이 회분식(batch feed type)이고 고로는 연속식(continuous feed type)이라는 차이가 있다. 각각 다양한 물리적인 현상들을 포함하고 있으며, 점화 방식이나 산화제 공급 방식도 각각 다르다. 그러나 가스 흐름 내에 고체 층이 존재하여 반응/열전달이 일어나는 기본 기작은 모두 유사하다.

Table 1 Comparison of the 3 processes of iron-making

	Coke oven	Iron ore sintering bed	Blast furnace
Bed type	Fixed bed	Moving bed	Fixed bed
Dimension (Model)	2-D unsteady	1-D steady	2-D steady
Solid Material	Coking coal	Iron ore + Limestone + Coke fine	Iron ore + Coke(+coal) + Limestone
Supply of oxidizer	No	Suction	Hot blast
Ignition	-	Gas burner	Hot blast air
Heat source	Heating wall	Coke combustion	Coke and/or coal comb.
Physical change	Coking coal properties	Melting, sintering	Melting
Feeding	Batch	Continuous	Continuous
Chemical reaction	Pyrolysis	Coke combustion	Iron ore reduction

3. 모델링

3.1 기본 개념

각 공정의 해석을 위해서 층 내 고형 물질을 균일한 연속체로 가정하였다. 또한 기존의 단일 고체상 모델 대신에 여러 종류의 고체 원료 각각에 대해 상(phase)을 부여하는 다중 고체상 모델을 사용하여 모델의 개선을 도모하였다. 고체 층은 고체상들이 f_v 만큼의 체적을 차지하고 있는 다공성 매질(porous media)로 가정되었으며, 이에 의해 기체 흐름의 해석에 사용되는 편미분 방정식 형태의 지배방정식이 고체상에도 동일하게 적용가능하게 된다. 이러한 지배방정식은 해당 고체상의 부피분율 (volume fraction) f_v 에 대하여 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있으며, 이러한 가정에 의한 해석 방법에 의해서 소각로 폐기물 층 및 석탄 가스화기 등에 대한 연구가 수행되어 왔다.^(8,9)

$$\frac{\partial(\rho f_v \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \phi \vec{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_{eff} \nabla \phi) + S_{\phi}$$

Fig. 6 에는 실제 해석에 있어서 위의 연속체 가정에 의해 이산화가 이루어지는 과정을 나타내었다. 실제 원료층은 내부에서 일어나는 현상에 따라 1 차원, 2 차원, 3 차원 등으로 보고 지배방정식을 수립할 수 있으며, 이산화 과정을 통해 가스 흐름과 마찬가지로 격자를 나눌 수 있다. 이러한 방법은 이동층(moving bed) 형태 및 고정층(fixed bed) 형태에 모두 적용이 가능하다.

Fig. 7 에는 이산화 과정 중 생성되는 한 셀 내에서 일어나는 주요 현상들을 나타내었다. 가스 흐름이 고체 원료 층 내부에서 이루어지면서 수분 증발/응축, 열분해, 촉 연소, 철광석의 환원 과 같은 다양한 형태의 고체-기체 반응이 이루어지게 된다. 각각은 고체 원료 고유의 물성치 및 반응의 환경에 따라 영향을 받게 된다. 고체상과 기체상 사이에서는 열 및 물질 전달이 있게 된다. 고체상 내부에서는 전도 및 복사가 중요한 열전달 모드가 된다. 이러한 일련의 과정들은 입자 크기의 변화, 내부 기공의 형성과 같은 고체 물성치의 변화를 야기한다. 이는 또한 층 높이의 변화로 이어지게 되며, 이 모든 현상들이 서로 연계되어 층 내에서 일어나게 된다. 이러한 모든 과정들은 위 지배방정식에서 경계 조건, 초기 조건 및 생성항으로 반영될 수 있으며, 비정상 항과 대류(convection) 항, 그리고 확산(diffusion) 항은 동일한 조건으로 기술될 수 있다. 이러한 사실을 이용

하여 고체 원료층을 포함한 반응기에 대하여 통합적인 모델을 수립할 수 있다. 생성항과 경계조건은 사용자가 실제 입력 파일에서 지정하여 입력할 수 있도록 하였다.

Table 2 에는 각 단위 공정에 대하여 모델에 반영되는 주요 현상과 경계조건 및 초기 조건에 대하여 나타내었다. 원료층 내에서의 물리화학적 현상은 크게 반응, 열전달, 원료 입자 성장 및 층 구조의 변화로 나눌 수 있다. 각각에 대하여 시스템의 종류에 따라 중요한 현상들을 고려하게 된다. 이들을 계산하는 모델은 생성항에 반영되어 계산이 이루어진다. 본 연구에서 계산 결과를 나타낸 소결 공정의 경우, 각각의 모델은 기존에 이루어진 연구⁽¹⁰⁾에서 사용된 것을 그대로 사용하였다. 2장에서 기술한 각 단위 공정의 차이들은 모델에 초기 조건 또는 경계 조건의 형태로 반영된다.

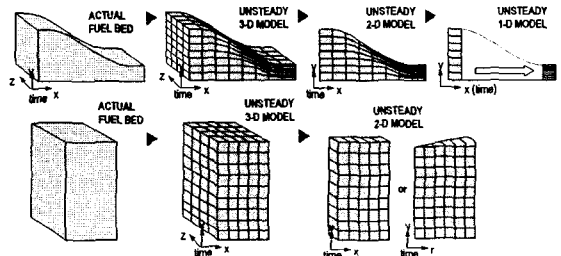


Fig. 6 A simplified approach of various solid bed reactors

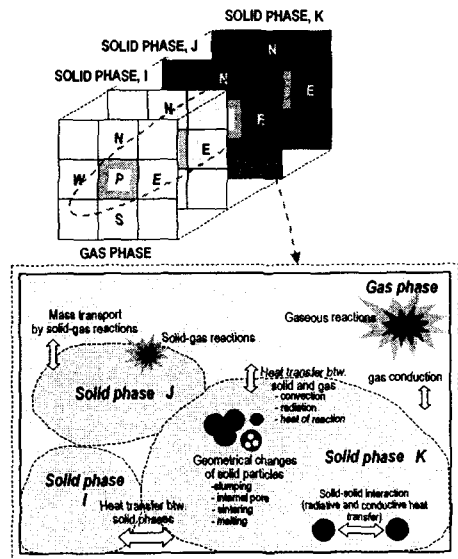


Fig. 7 Discretization process of the solid bed and phenomena in one cell

Table 2 Major phenomena, initial conditions and boundary conditions for each process

Categories		Coke oven	Sintering bed	Blast furnace
Reactions	Solid-gas reactions	devolatilization	Char reactions Limestone decomposition	Char reactions Limestone decomposition Iron ore reduction
	Gaseous reactions	-	CO oxidation	CO, H ₂ oxidation Water-gas shift reaction
Heat transfer		Conduction / Convection Radiation	Conduction/Convection/Radiation Heat exchange among solid phases	Conduction/Convection/Radiation Heat exchange among solid phases Heat transfer between liquid -gas-solid
Geometrical changes		Generation of the internal pores Bed structural changes	Particle diameters Generation of the internal pores Bed structural changes	Particle diameters Generation of the internal pores Bed structural changes Melting of iron ore
Initial conditions		T _{bed} = ~ 300K Solid composition, internal pores	T _{bed} = ~ 300K Solid composition, internal pores, diameters	Steady state
Boundary conditions		T _{wall} = 1400~1500K No gas inlet	T _{gas.in} = ~1400K (ignition) T _{gas.in} = 300K (after ignition) v _{gas.in} : dependent on the pressure drop	Solid composition, internal pores, diameters Conditions of blast air

4. 해석 결과 - 소결 공정의 예

4.1 해석 조건

Fig. 8에는 소결 공정의 계산이 이루어진 소결층의 사양을 나타내었다. 높이는 60cm 이며, 온도 측정이 높이별로 세 지점에서 이루어진다. 고정층 형태의 소결층은 시간에 따라 계산이 수행되므로 실제 소결 공정에서의 이송속도를 사용하여 길이 방향으로의 변환이 가능해진다. 실제 소결층은 길이 약 100m 에 폭 약 5m 의 큰 설비이지만, 이를 축소하여 Fig. 9 와 같은 실험실 규모의 장치인 소결 포트(sintering pot) 로 만들어 온도, 배가스 성분 및 유량의 측정이 이루어질 수 있게 하였다. Fig. 4 에 나타난 것처럼 시간에 따른 온도 및 가스 조성 변화를 측정하면 시간축을 실제 공정에서의 층 이송속도를 사용하여 진행 방향의 위치로 변환할 수 있다. 소결층 부분은 직경 205 mm, 높이 600 mm 이며, 바닥부분에는 통기가 원활하게 되도록 직경 10mm 이상의 소결광을 설치하였다. 온도는 세 지점에서 R type 열전대를 이용하여 측정하였으며, 배가스 중 O₂, CO₂ 및 CO 의 측정이 이루어졌다.

Table 3 에는 실험에서 사용된 기준 조건에 해당하는 주요 조건을 나타내었다. 원료는 80% 이상이 철광석이며, 여기에는 철광석 외에도 실제 소결 공정에서 생성된 반광(return fine) 과 같은 원료들도 포함되어 있다. 원료로 사용되는 분코크스는 3.8% 를 차지하도록 설정하였다. 이와 함께 원료

입자의 평균 크기도 운전 조건에 있어 중요한 인자로, 철광석의 경우에는 3.0~3.2mm, 코크스와 석회석의 경우에는 1.6mm 였다. 90 초 동안 프로판 가스 버너를 사용하여 소결층 상부에 90 초 동안 열을 가하는 방식으로 점화가 이루어졌으며, 점화 후에는 흡입 팬 초기 압력을 1500 mmAq 로 설정하여 공기 공급이 이루어지게 하였다. 공기 공급량은 측정값과 배가스 유량값을 함께 비교하여 확인하였으며, 평균값은 0.45 m/s 이다.

Table 4 에는 기준 조건에 해당되는 계산 조건을 나타내었다. 계산 조건의 대부분은 실험 조건의 값을 사용하였으며, 한 셀의 크기는 10mm, 시간 간격은 1 초로 설정하여 약 25 분 동안 계산을 수행하였다. 기준 조건 외에도, 소결 공정에 있어 중요한 인자인 공기 흡입량과 점화 시간에 대하여 계산을 수행하였다.

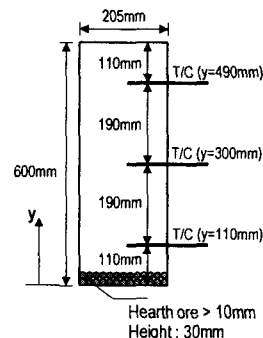


Fig. 8 The sintering bed simulated in this study

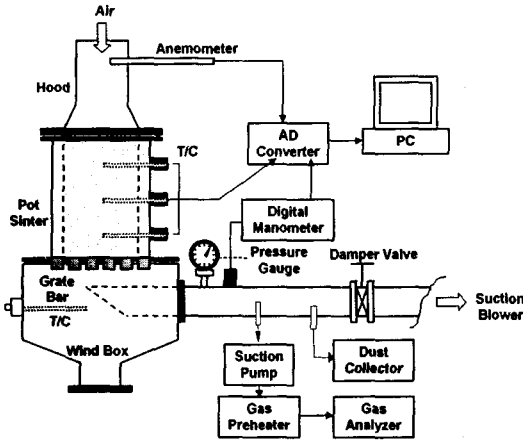


Fig. 9 Schematic diagram of the sintering pot

Table 3 Experimental conditions of sintering pot

Parameters	Value	Parameters	Value		
Mass fraction (%)	Iron ore	83.2	Water contents (%)	7.0	
	Coke	3.8	Porosity of the bed	0.4	
	Limestone	13.0	Ignition time (sec)	90	
Particle diameter (mm)	Iron ore	3.2	ΔP	Ign.	1000
	Coke	1.6	(mmAq)	After -ign.	1500
	Limestone	1.6	Air velocity (avg. m/s)		0.45

Table 4 Computational conditions

Parameters	Value	Parameters	Value	
Δy (cm)	1	Initial internal porosity	Iron ore	0.025
Time step (sec)	1		Coke	0.025
			Limestone	0.025
Gaseous reaction	$CO+0.5O_2 \rightarrow CO_2$	Solid-gas reactions	Drying / Condensation	
	$H_2+0.5O_2 \rightarrow CO_2$		Char combustion	
			$CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$	

4.2 결과 및 고찰

Fig. 10 에는 위 기준 경우에 대한 소결층 내 온도 분포를 등온선 형태로 나타내었다. 90 초 동안 점화가 진행되면 이후에는 외부 열원 없이 연소대가 생성이 되고, 이는 아래쪽으로 진행되면서 점점 두꺼워지게 된다. 이는 공기 유입량이 많아지고, 뜨거운 고체 원료층 부분을 공기가 지나가면서 연소에 사용되는 공기의 온도가 상승하여 코크스의 반응률이 높아졌기 때문이다. 이러한 계산 결과는 실제 소결 공정에서 나타나는 물리적인 현상을 잘 묘사하고 있다. Fig. 11 에는 계산 결과와 실험 결과를 비교하여 나타내었으며, 고체상의 온도 및 배가스의 조성 계산 결과가 모델이 실험 결과를 잘 예측하고 있음을 보여준다.

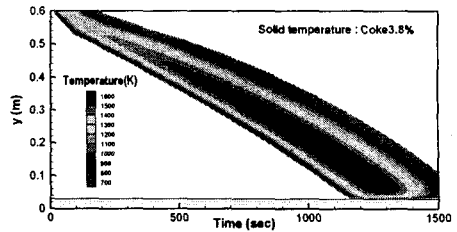
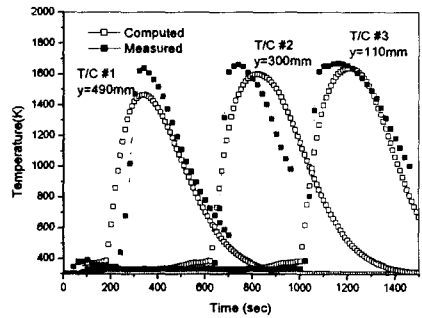
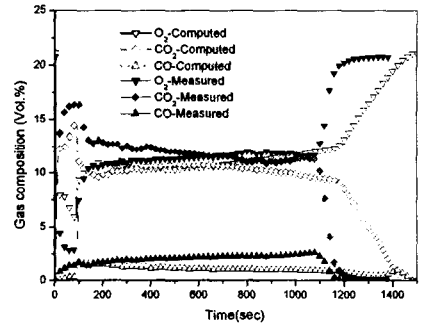


Fig. 10 Temperature distribution (unit : K)



(a) Temperature profiles

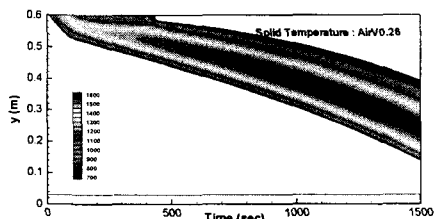


(b) Flue gas composition

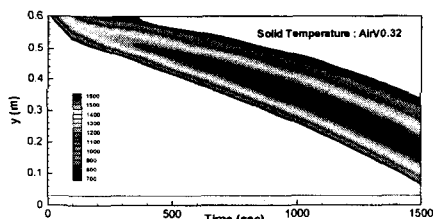
Fig. 11 Typical example of the simulation results: (a) Temperature distribution (b) Flue gas composition

Fig. 12 에는 공기 흡입량을 변화시켜가면서 계산을 수행한 결과를 나타내었다. 공기 흡입량은 실제 계산에서는 공기 속도로 경계조건에 반영되며, 전체 공정 동안의 속도 평균치를 변화시켜가면서 온도 분포 변화를 계산하였다. 공기 흡입량이 커지면서 연소 속도가 점점 빨라지고 연소 종료 시점도 점점 빨라지고 있는 것을 관찰할 수 있다. 또한 연소 속도가 0.26 m/s 에서 0.32 m/s 로 증가할 때는 고온부의 두께도 두꺼워지는 현상을 볼 수 있다. 이는 공기 공급량이 많아지면서 코크스의 연소가 더욱 활발하게 일어나 생기는 현상이다. 그러나 공기 공급량이 0.45 m/s 에서 0.52 m/s

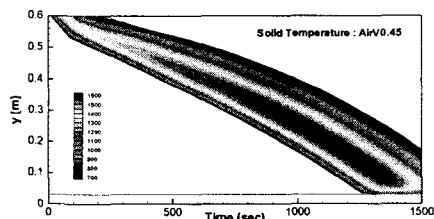
로 더 늘어나게 되면, 대류 냉각 효과로 인해 연소대의 두께가 얇아지고 고온부의 온도가 내려가는 것을 관찰할 수 있다. 공기 공급량을 더욱 늘려서 계산을 수행하면 코크스의 연소에 의해 발생하는 열량이 대류로 인한 열손실을 따라가지 못해서 연소가 중간에서 종료된다. 이러한 연소 속도 변화와 연소대의 두께 변화는 소결광의 생산성과 품질에 직접적으로 영향을 끼치게 되며, 배가스 처리 장치의 수명에도 영향을 미치므로 공기 공급량은 운전시에 주의깊게 설정되어야 할 인자 중 하나이다.



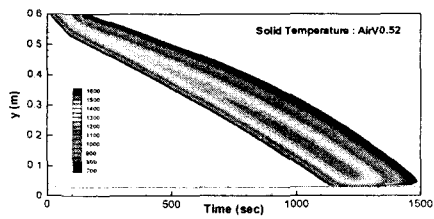
(a) Averaged air velocity = 0.26 m/s



(b) Averaged air velocity = 0.32 m/s



(c) Averaged air velocity = 0.45 m/s

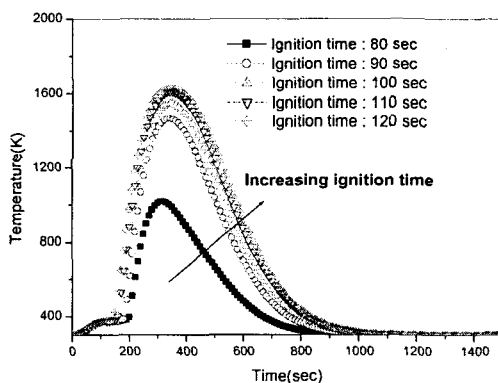


(d) Averaged air velocity = 0.52 m/s

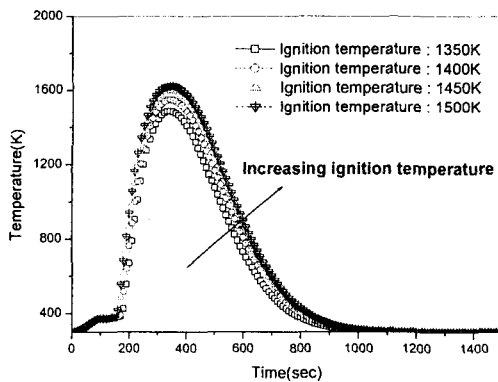
Fig. 12 Temperature distributions (unit : K) for various air velocities

Fig. 13 에는 소결 공정에서 중요한 인자 중의 하나인 점화 시간 및 점화 온도에 대한 계산 결과를 나타내었다. 점화가 끝난 후에는 공기 유입에 의해 소결층의 꼭대기 부분이 급격히 냉각되며, 조금 더 내려가면 여기서 열을 얻은 공기로서 코크스의 연소가 진행된다. 그러므로 점화 시간 및 점화 온도는 소결층 위 부분의 온도분포에 많은 영향을 미치게 되며, $y = 490 \text{ mm}$ 에서의 온도분포는 이러한 결과를 잘 보여주고 있다. Fig. 13 (a) 에서는 점화시간이 80 초일 때 온도가 급격하게 떨어지고 있는데, 이는 공기 주입으로 인한 대류 열손실량이 연소로 인해 발생하는 열보다 많아 연소가 끝까지 진행되지 않음을 보여주는 것이다.

이상의 결과들을 살펴볼 때 전체적으로 인자 변화에 대한 계산 결과를 모델이 잘 예측하고 있으며, 효과적인 운전을 위한 기초적인 자료를 제공하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Ignition time (ignition temperature=1400K)



(b) Ignition temperature (ignition time=90sec)

Fig. 13 Temperature profile at $y = 490\text{mm}$ for various ignition conditions (Averaged velocity=0.32m/s) (a) Ignition time, (b) Ignition temperature

5. 결 론

제선 공장에서 사용되는 주요 열공정, 즉 코크스 공정, 소결 공정 및 고로 공정에 대한 모델링을 수행하였다. 각 공정은 일어나는 반응의 종류, 열전달 방향, 가스 흐름 등의 특성이 각각 다르게 나타나고 있지만, 고체 입자가 다공층을 이루고 그 가운데를 가스 흐름이 통과한다는 점에서 공통적인 지배방정식의 형태를 가지게 된다. 이에 근거하여 공통적인 지배방정식의 형태를 제시하고 그 중 소결 공정에 대한 계산 결과를 제시하였다. 계산 결과는 실험 결과 및 물리적인 현상에 비추어 타당하게 나타났으며, 이를 통해 다른 단위 공정에의 적용을 위한 기초를 확립할 수 있다.

후 기

본 연구는 (주) 포스코 기술연구소 및 과학기술부 과학기술 국제화 사업 중 국제공동연구 사업의 재정 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Osinski, E. J., Barr, P. V. and Brimacombe, J. K., 1993, "Mathematical Model for Tall Coke Oven Battery - Part 1 : Development of the Thermal Model for Heat Transfer within Oven Charge," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 20, No. 5, pp. 350~361.
- (2) Osinski, E. J., Barr, P. V. and Brimacombe, J. K., 1993, "Mathematical Model for Tall Coke Oven Battery - Part 2 : Calculation of Gas Flow and Related Phenomena for Oven Charge," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 20, No. 6, pp. 453~467.
- (3) Young, R. W., 1977, "Dynamic Mathematical Model of Sintering Process," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 7, No. 6, pp. 321~328.
- (4) Cumming, M. J. and Thurlby, J. A., 1990, "Developments in Modelling and Simulation of Iron Ore Sintering," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 17, pp. 245~254.
- (5) Nath, N. K., Silva, A. J. and Chakraborti, N., 1997, "Dynamic Process Modeling of Iron Ore Sintering," *Steel Research*, Vol. 68, pp. 285~292.
- (6) Ramos, M. V., Kasai, E., Kano, J. and Nakamura, T., 2000, "Numerical Simulation Model of the Iron Ore Sintering Process Directly Describing the Agglomeration Phenomenon of Granules in the Packed Bed," *ISIJ International*, Vol. 40, pp. 448~454.
- (7) Austin, P. R., Nogami, H. and Yagi, J., 1997, "A Mathematical Model of Four Phase Motion and Heat Transfer in the Blast Furnace," *ISIJ International*, Vol. 37, pp. 458~467.
- (8) Min, J., Shin, D. and Choi, S., 1999, "An Experimental Study on the Bed Combustion Phenomena in MSW (Municipal Solid Waste) Incinerator," *Trans. KSME B*, Vol. 23, No. 2, pp. 159~165.
- (9) Ryu, C., Shin, D. and Choi, S., 2002, "Combined Bed Combustion and Gas Flow Simulation for a Grate Type Incinerator," *J. of Air and Waste Management Association*, Vol. 52, No. 2, pp. 189~197.
- (10) Yang, W., Ryu, C. and Choi, S., 2002, "Modeling of Combustion and Heat Transfer in the Iron Ore Sintering Bed," *J. of the Korean Society of Combustion*, Vol. 7, No. 3, pp. 23~31.