

# 제철 소결공정의 철광석-코크스 베드에서의 연소와 열전달 해석

양 원\* · 류창국\* · 최상민\*

## Prediction of Combustion and Heat Transfer in the Sintering Bed of Iron Ore

Won Yang, Changkook Ryu and Sangmin Choi

**Key Words:** sintering(소결), bed combustion(층 연소), modeling(모델링)

### Abstract

Sintering bed of iron ore in the steel making process is one of typical applications of solid fuel bed, which has relatively uniform progress of fuel and simple processes of combustion. The sintering bed was modelled as an unsteady one-dimensional progress of fuel layer containing the two phases of solid and gas. Cokes added to the raw mix of which the amount is about 3.5% of the total weight was assumed to form a single particle with other components. In the early prediction results presented in this paper, the flame propagation within the bed was not sustained after the top surface of the bed was ignited with hot gas. It suggests that the model should be extended to consider the multiple solid phase, which can treat the ore particles and the coke particles separately.

### 기호설명

A : area ( $m^2$ )

A : frequency function ( $s^{-1}$ , K/s)

C : molar concentration ( $kmol/m^3$ )

D : gas diffusivity ( $m^2/s$ )

d : diameter (m)

E : activation energy (J/kmol)

F : mass of char/initial mass of char

G : mass velocity ( $kg/m^2-s$ )

H : latent heat (kJ/kg)

h : enthalpy (J/kg)

h : convective heat transfer coefficient ( $W/m^2K$ )

h : thermal enthalpy per unit volume ( $J/m^3$ )

k : thermal conductivity (W/m-K)

k : rate coefficient (/s)

k : mass transfer coefficient (m/s)

M : mass per unit volume ( $kg/m^3$ )

m : mass fraction

n : number density ( $/m^3$ )

p : pressure (Pa)

\* 한국과학기술원 기계공학과

Q : heat (W)  
 q : heat per unit volume ( $W/m^3$ )  
 R : universal gas constant (kJ/kg-K)  
 T : temperature (K)  
 t : time (sec)  
 v : velocity (m/s)  
 W : molecular weight (kg/kmol)  
 W : mass per unit volume ( $kg/m^3$ )  
 y : axial distance (m)

### Greeks

ε : bed void fraction, internal pore  
 ν : stoichiometric coefficient  
 ρ : density ( $kg/m^3$ )

### Subscripts

eff : effective  
 g : gas  
 ip : internal pore  
 o : initial  
 p : particle  
 r : Arrhenius reaction rate  
 s : solid, stoichiometric  
 u : unreacted

소결(sintering)은 금속이나 세라믹 등의 분말을 가열했을 때 입자 표면이 용융되면서 입자간의 결합이 일어나 치밀화되는 과정이다. 제철공장에서는 이를 이용하여 수십 $\mu m$ ~수mm 이하의 크기를 가지는 분말 상태의 철광석(분광)을 고로에 필요한 5mm 이상의 소결광으로 만드는 철광석 소결공정을 사용하고 있다.

Figure 1에는 일반적으로 제철 공장에서 사용하는 철광석 소결 공정을 나타내고 있다. 베드 입자의 80% 정도를 구성하는 철광석은 다양한 입자크기를 가지고 있고, 그 중 0.25mm 의 작은 입자가 25~40% 정도를 차지하고 있다. 이외에도 다른 공정에서 회수된 표면 산화철(mill scale)과 석회석 등이 함유되어 있으며, 열원으로 코크스와 무연탄이 5% 정도 포함된다. 이 때 원료에 물을 첨가하고 혼합하면 큰 입자 표면의 요철에 미세한 입자가 달라붙게 되며 이를 압축하면 의사입자(pseudo-particle)을 형성한다. 따라서 초기 원료에 비해 베드를 구성하는 입자의 크기 분포 범위가 좁아지게 된다. 코크스 입자 역시 일부는 의사

## 1. 서론

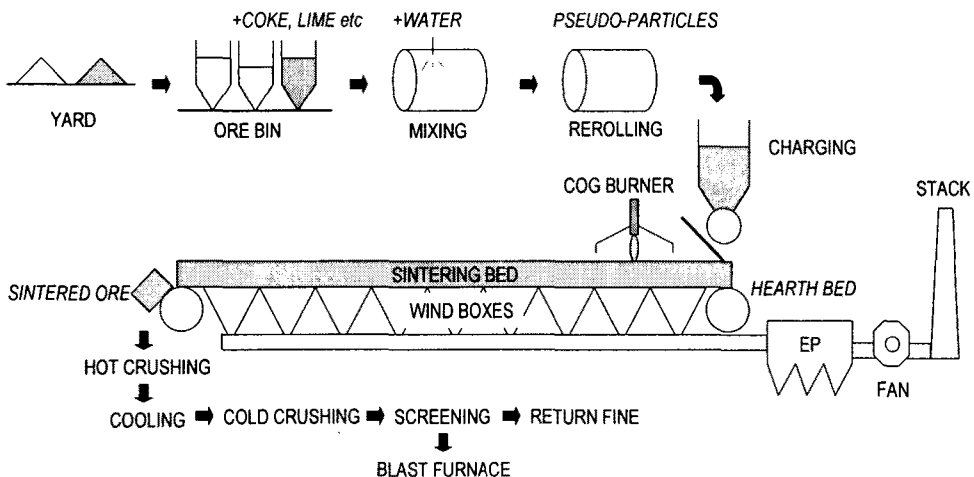


Figure 1. Schematic of sintering process in the steel industry

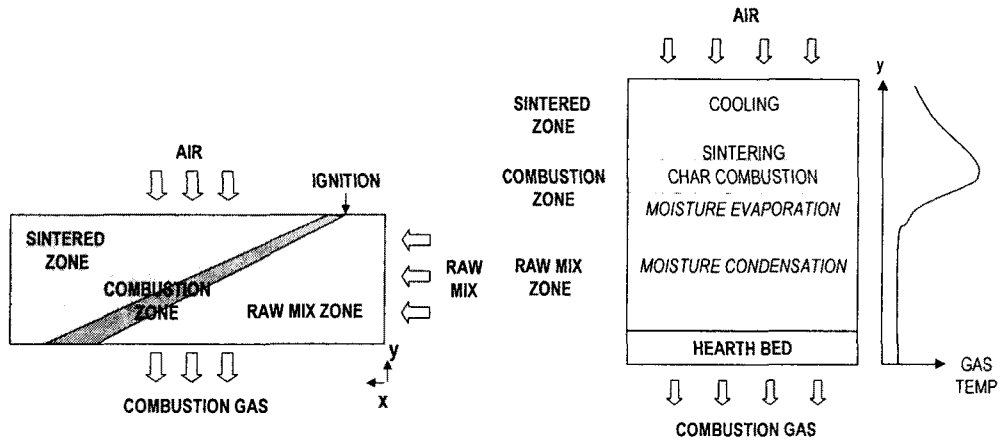


Figure 2. Major phenomena within the sintering bed

입자에 포함되고 mm 단위의 입자들은 다른 입자들과 별도로 존재하게 된다. 이 입자들은 장입장치를 통해 순환식 화격자 위에 공급되어 일정한 높이의 층 (bed)을 이루며, COG(Cokes Oven Gas)를 이용한 직화식 버너에 의해 표면이 착화된 후 입자에 포함된 코크스의 연소에 의해 소결이 이루어진다. 연소 공기는 팬에 의해 층 하단으로 연소가스가 흡입되는 방식으로 공급된다. 연소가스는 전기집진기에 의해 먼지가 제거된 뒤 굴뚝으로 배출된다. 이러한 과정을 거쳐 얻어진 소결광은 베드의 폭 방향으로 뭉쳐진 큰 덩어리를 이루며 파쇄 및 크기 선별 과정을 거쳐 5~75mm의 분포를 가진 입자가 고로로 투입되고 이보다 작은 입자는 소결 공정으로 재순환된다.

Figure 2에는 소결기 베드 내의 현상을 개념적으로 나타내었다. 원료로부터 형성된 입자들이 소결층에 공급된 후, 버너에 의해 상부 표면이 착화되면 서서히 코크스의 연소가 일어나며, 이로 인해 연소대 안의 상승된 온도 분위기에서 소결이 이루어지게 된다. 연소대 아래쪽은 입자에 포함된 수분이 연소가스에 의해 증발된다. 그러나 연소가스가 더 아래로

진행하면서 이슬점 아래로 냉각되어 수분이 재응축되는 과정이 일어난다.

소결광의 품질과 생산성은 온도와 체재 시간, 입자 크기 및 수분함량, 베드의 균일도 등에 따라 많은 차이를 나타내기 때문에 운전자의 입장에서인 이러한 인자들의 제어가 매우 중요하다.

연소의 관점에서 볼 때 소결기 베드는 고체연료층 연소의 예 중 하나로 볼 수 있다. 석탄 가스화기나 폐기물 소각로 내 연료층과 비교해 볼 때 비교적 연료 조성이 균일하고 층이 일정하게 이송되며 가스 유동장과의 상호작용이 거의 없다. 따라서 기존의 고체연료의 고정층 연소 모델링[1,2]을 이용해 접근할 수 있다. 이러한 접근 방식을 통한 소결 공정의 해석은 일본의 몇몇 제철회사에서 수행된 예[3-5]가 있다. 국내에서는 모델링 사례가 보고되지 않았지만 배가스 온도 분포 측정에 의한 소결광의 생산성 예측 [6], 무연탄이나 석회소성 슬러지 등 부원료에 따른 소결 특성[7,8] 등 기초적인 연구가 보고된 바 있다.

이 연구는 일반화된 고체 연료의 고정층 연소 모델을 기초로 소결기 베드 내부의 연소 진행과정과 온도 분포 및 연

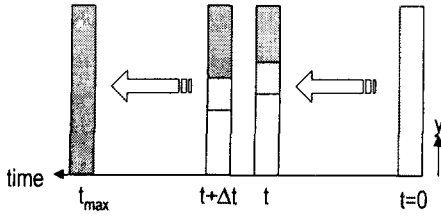


Figure 3. Extension of 1-D unsteady model to 2-D steady model

소가스의 발생 특성을 해석할 수 있는 모델을 개발하기 위한 것이다. 여기에서 제시된 결과는 초기 연구로서 소결 현상에 대한 직접적인 모델링이 없이 기존의 전형적인 고정층 연소에 대한 접근방식과 초기 해석 결과를 소개하고자 한다. 그리고 그 결과로부터 소결기 베드 해석을 위한 접근 방식을 검토하였다.

## 2. 모델링

### 2.1. 주요 가정

먼저 소결층 내의 고체 및 기체상(phase)을 공극률에 의해 나누어지는 체적을 가지는 별도의 균일한 연속체(continuum)로 본다. 이로부터 두 상에 대해 검사체적에 의한 지배방정식의 수립이 가능하다. 고체상 내 가연분인 코크스는 그 입자에 대한 별도 해석이 없이 하나의 연료입자 내 구성성분으로만 보았다.

소결기의 특성상 화격자 위에서 특별한 입자의 움직임이 없이 수십 분간 체재하므로 폭 방향 및 길이방향의 변화를 무시하고 높이 방향의 열 및 물질전달에 의해 층의 연소가 진행된다고 보았다. 따라서, Figure 3과 같이 하나의 연료 열이 시간에 따라 보이는 경계조건의 변화와 내부 연소의 해석으로 단순화된다.

### 2.2. 지배방정식

기체상 및 가스상의 지배방정식은 일반적인 유체의 경우와 유사하며, 한 검사체적 내에서 두 상이 각각 차지하는 체적은 공극률( $\varepsilon = V_{\text{gas}} / [V_{\text{gas}} + V_{\text{solid}}]$ )를 통해 결정된다. 여기에서 속도는 실제 속도가 아니라 면적에 의해 평균된 속도(Darcean velocity)이다. 두 상간의 상호작용은 대류열전달과 연료 연소에 의한 가스의 발생과 발열을 통해 이루어지며 이식들에서 생성항으로 반영되어 있다. 베드 내 입자에 의한 가스의 압력 강하  $\nabla p_{\text{bed}}$ 는 그 변화가 상대적으로 크지 않으므로 이를 무시하였다. 이로 인해 계산 과정이 단순해진다. 이러한 과정들을 식으로 나타내면 다음과 같다.

#### 연료상(Fuel phase)

$$\text{Mass} \quad \frac{\partial \rho_s (1-\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s}{\partial y} = \dot{M}_{s, \text{loss}} \quad (1)$$

$$\dot{M}_{s, \text{loss}} = (\dot{M}_{\text{drying}} + \dot{M}_{\text{pyrolysis}} + \dot{M}_{\text{char burnout}})_{\text{to gas}}$$

#### Energy

$$\frac{\partial (1-\varepsilon)h_s}{\partial t} + \frac{\partial v_s h_s}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( (1-\varepsilon)k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) + h_{\text{conv}} A_s (T_g - T_s) + q_{\text{rad}} + q_{\text{combustion}} + q_{s, \text{loss}} \quad (2)$$

$$\text{Component} \quad \frac{\partial \rho_s (1-\varepsilon) m_{s,i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s m_{s,i}}{\partial y} = \dot{M}_{\text{comb}, i} \quad (3)$$

#### 가스상

$$\text{Mass} \quad \frac{\partial \rho_g \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_g}{\partial y} = -\dot{M}_{s, \text{loss}} \quad (4)$$

#### Energy

$$\frac{\partial \varepsilon h_g}{\partial t} + \frac{\partial v_g h_g}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon k_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) + h_{\text{conv}, \text{po}} (T_s - T_g) + q_{\text{reaction}} - q_{s, \text{loss}} \quad (5)$$

$$\text{Species} \quad \frac{\partial \rho_g \varepsilon m_{g,j}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_g m_{g,j}}{\partial y} = \dot{M}_{\text{reaction}, j} - \dot{M}_{s, \text{loss}, j} \quad (6)$$

$$\text{Equation of state} \quad \rho_g = p / R \sum \frac{m_i}{W_i} T_g \quad (7)$$

위 식들은 유한체적법을 이용해 풀이하였고, 이산화(discretization)는 연료상의 경우 central differencing scheme을, 가스상은 upwind scheme을 적용하였다.

### 2.3. 연소 및 반응과 열전달

소결 원료에는 연료로서 무연탄이 일부 포함되기도 하지만 휘발분의 양이 매우 적으므로 가연분은 모두 최 성분으로 보았다. 따라서 수분의 증발과 응축, 최 반응을 고려해야 한다. 최 반응은 O<sub>2</sub> 외에도 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 등의 다양한 가스들과 경쟁하며 일어나는 것으로 가정하였다. 이러한 반응들을 통하여 소모되거나 생성되는 물질들의 반응율을 구하는 식은 다음과 같다.

Drying

$$\dot{M}_{moisture} = \begin{cases} -\min \left\{ \frac{\sum Q_{in}}{H_{fg}}, \frac{\rho_s (1-\varepsilon) m_{moisture}}{\Delta t} \right\} & \text{(by boiling)} \\ C_g M_v d_p n_p D_{wg} (X_{wp} - X_{wg}) & \text{(by diffusion)} \end{cases} \quad (8)$$

Char reaction

$$\dot{M}_{char} = A_s v_s W_{char} C_{g,i} d_p / \left( \frac{1}{k_r} + \frac{1}{k_m} + \frac{1}{k_{eff}} \right) \quad (9)$$

- $k_r$  : distributed Arrhenius rate constant
- $k_m$  : film mass transport constant
- $k_{eff}$  : effective internal mass transport coefficient for the particle

고체 연료의 연소과정에서 고려해야 할 중요한 사항은 입자의 연소에 따른 입자 크기 변화와 내부 기공의 형성이다. 연소에 의해 내부 기공이 형성되는 경우 입자의 밀도에 영향을 주게 되므로 밀도 계산에 앞서 이에 대한 고려가 필요하다. 내부 기공은 간단한 보존식을 통해 해석가능하다.

$$\frac{\partial(1-\varepsilon)\varepsilon_p}{\partial t} + \frac{\partial v_s \varepsilon_p}{\partial y} = -\sum_i f_{p,i} \frac{M_{comb,i}}{\rho_i} + \dot{\varepsilon}_{p,loss} \quad (10)$$

$$\rho_s = (1-\varepsilon_p)\rho_{true}$$

본 연구에서는 수분 증발은 내부 기공 형성에만 영향을 끼치고 최 연소는 입자의 크기 변화에만 영향을 끼치는 것으로 가정하였다. 최 연소 후 남은 재는 입자와 분리되지 않고 입자 바깥에 층을 이루는 것으로 가정하는 shell progressive model[1]을 채택하여 다음 식과 같이 유효입자크기를 계산하였다.

$$d_p = \left[ (1-m_{ash}^o) d_n^3 + m_{ash}^o d_o^3 \right]^{1/3} \quad (11)$$

또 하나 중요한 현상은 소결이다. 소결이 이루어지면 입자의 형태는 대략적으로 유지되더라도 입자 표면의 용융 및 입자간의 치밀화, 기공의 내부기공화 등이 일어난다. 여기에서는 초기 해석으로서 별도의 모델 없이 입자의 크기가 그대로 유지되고 코크스 연소는 의사입자 내에 내부기공이 형성되는 것으로 보았다. 실제의 경우 용융에 따른 흡열, 공극률의 변화, 입자간의 치밀화에 의한 베드 폭 방향 체적의 수축, 내부 기공화에 따른 가스의 채널링 등이 일어나는데 이는 향후 연구에서 소결 모델을 추가하여 해석하고자 한다.

대류열전달 및 물질전달은 다음의 식을 이용하였다.

층내 복사열전달은 입자의 크기와 다공도에 의해 흡수계수(absorption coeff.)이 결정된다고 보고 Two-Flux Model을 적용하였다. 즉,

$$\kappa = -\frac{1}{d_p} \ln(\varepsilon) \quad (12)$$

### 2.4. 운전 조건

Table 1에는 계산에 사용된 기본적인 운전조건을 나타내었다. 기준 조건은 실제

Fuel		
particle diameter	3mm	
feed rate	231.48kg/s	
fuel composition	moisture	0.055
	char	0.0355
	ash	0.895
Bed		
bed height	0.62m	
bed length	109m	
progress speed	3.3m/min	
Ignition (80 sec)		
COG combustion gas (%wt)	N <sub>2</sub>	64.7
	O <sub>2</sub>	4.
	CO <sub>2</sub>	4.1
	H <sub>2</sub> O	27.1
temperature	1130°C	
Combustion air		
inlet velocity	0.382m/s	

Table 1. Operating conditions

소결로에서 사용되고 있는 운전조건을 사용하였다. 입자 크기는 3mm로 균일하게 가정했으며, 소결이 일어나는 과정에서 입자들이 서로 결합하는 현상은 입자 크기나 공극률 및 내부 기공률에 영향을 끼치지 않는 것으로 보았다. 실제 베드에서의 공기량은 전기집진기 이후의 팬 압력으로 조절되는데, 베드에서 발생한 연소가스 유량으로부터 공기 유속을 역

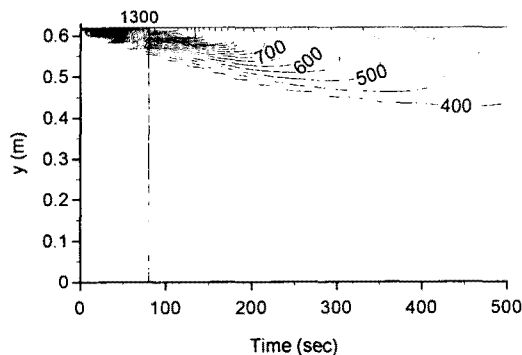


Figure 4. Temperature contour of solid phase for actual material composition(K)

산하였다. 고온의 COG 가 베드에 영향을 끼치는 영역은 초기 4m(1.2분)로 보았으며, 베드에서의 전체 체류시간은 약 33분이다.

### 3. 초기 계산 결과

#### 3.1. 실제 원료 조건

실제 소결기 베드의 원료 조성은 철광석 및 부원료 91.5%에 수분 5%, 최 3.5% 내외이다. Figure 4는 이 조성에 대하여 해석한 고체상의 온도 분포이다. 80초까지 진행된 착화 이후 층 표면에서 연소의 전파가 초기에 진행되다가 온도 상승이 낮아 연소가 종료된 결과를 보인다. 이는 실제의 현상과 큰 차이가 있는 것이다.

#### 3.2. 가연성분을 높인 해석 결과

Figure 5는 수분이 없고 최만 5%가 존재한다고 할 때 같은 운전조건에서 해석한 결과이다. 최의 양이 연소의 유지에 충분하기 때문에 화염의 전파가 5.5 cm/min 정도로 빠르게 진행되고 있다. 그러나 실제 소결기 베드에서의 화염 전파 속도는 2cm/min이하로서 이 결과에 비해 상당히 느리다. 이 결과에서 나타났듯이

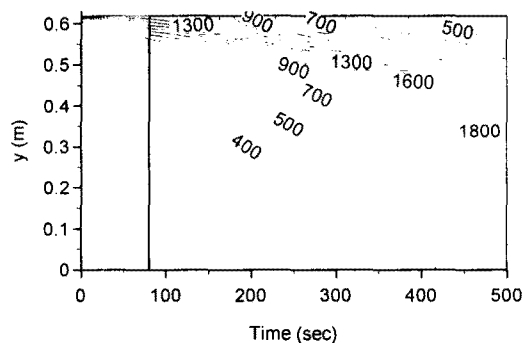


Figure 5. Temperature contour of solid phase for high cokes content

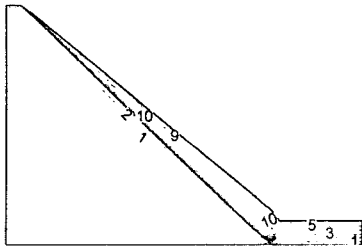


Figure 6. Typical simulation results for packed bed of wood particles  
(Gas temperature $\times 100^\circ\text{C}$ )

소결기 베드의 특징 중 하나는 연소가스가 아래로 향하기 때문에 최 연소에서 발생한 고온의 가스가 아래쪽으로 진행하면서 곧바로 냉각된다. 따라서, 코크스가 아닌 휘발분이 포함된 연료인 경우 미연분의 발생 가능성이 높다. 또한 연소공기가 연소대를 지나기 전에 이미 온도가 상승된 고체 상과의 대류열전달을 통해 온도가 올라가기 때문에 시간이 지날수록 베드 아래쪽 방향으로 열이 집중되는 현상이 나타난다.

Figure 5와 6에 비교된 바와 같이 현재의 모델은 연소가 유지되면서 느린 속도로 진행되는 전파과정을 모사하는데에 한계가 있다. 그 원인과 앞으로의 개발 방향에 대해 고찰에서 서술하였다.

#### 4. 고찰

소결 공정의 운전성능과 생산성은 베드 내 온도분포 및 소결 온도이상에서의 체재시간에 의해 일반화된 고체 연료 연소 모델링을 통해 소결로 내의 온도 분포와 연료 조성 및 가스 조성 분포를 개략적으로 얻을 수 있다. 이와 같은 접근방식을 통해 기존의 나무 입자로 구성

된 고정층에 대한 해석에서는 Figure 6과 같은 결과를 통해 다양한 인자의 영향을 평가한 바 있다[2].

그러나 현재까지의 얻은 결과에서는 착화후에 화염이 유지되지 않고 소멸되는 결과를 얻었다. 이는 기존 방식의 해석시에 코크스 입자의 가열 과정이 입자 평균적인 증발, 가열과정에 지배되기 때문이다. 실제 코크스의 비율이 4%이하로 낮아서 착화를 통해 형성된 화염면 아래에 위치한 코크스 입자에서 발열에 충분한 온도로의 상승 및 최 연소에 의한 추가적인 온도 상승이 일어나지 못한다. 실제의 경우, 별도로 존재하는 코크스 입자는 1mm내외로 크기가 작아 가열과정이 빠르고 최 연소가 개시되면 베드 평균 온도에 비해 매우 높은 온도를 가지게 되며, 이로 인한 발열이 주변 입자를 가열시키게 된다. 따라서, 기본적인 접근 방식에 있어서 고체 상을 구성하는 원료들의 성분과 물리적 특성을 별도로 해석하는 다상 모델의 개발이 필요하다.

또한 소결에 의한 입자의 용융과 치밀화 및 이에 따른 특성 변화를 해석하는 특수한 모델의 개발이 요구된다. 연구에 사용된 모델에서는 철광석 성분이 단일 입자 안에 가연분과 함께 결합된 회분으로 간주된다. 이와 소결로에 사용되는 주 연료인 코크스 대신에 무연탄과 같은 연료를 사용함에 따라 발생하는 물리화학적 현상에 대한 고려도 함께 모델링에 반영되어야 할 것이다.

이밖에도 베드 높이에 따른 입자 분포 변화나 불균일한 입자 분포로 인한 채널링(channeling), 베드 하부의 국부적인 가열로 인한 용융, 적철광에 비해 질이 떨어지는 갈철광을 사용했을 때의 효과 등과 같이 모델에서 고려되지 않은 현상들에 대한 고려도 함께 수행되어야 할 것

으로 보인다. 또한 실제 운전과정에서 발생하는 중요한 문제점 중 하나인 폭방향 수축에 의한 누풍효과를 고려할 때 2차원 모델로의 확장을 위한 검토가 필요하다.

이러한 접근방식은 소결의 다음 공정으로서 유사한 베드 성분과 물리적인 현상이 존재하는 고로(blast furnace)에 대해서도 적용할 수 있을 것이다.

## 5 결론

일반화된 1차원 비정상 고체 연료층 연소모델을 체철 소결로내 철광석-코크스 베드에 적용하기 위한 초기 해석을 수행하였다. 기존의 고정층 연소에 사용된 접근 방식은 코크스 조성이 4% 이하이고 수분이 포함된 소결기 베드의 연소 전파를 해석하지 못하였다. 따라서 철광성과 코크스 입자를 구분하여 해석하는 다상모델을 통해 접근해야 한다. 이와 함께 소결 과정의 특성에 맞는 응용 및 치밀화에 대한 공정 모델의 개발이 필요하다.

## 참고문헌

- [1] M.L. Hobbs, P.T. Radulovic and L.D. Smoot, "Combustion and Gasification of Coals in Fixed Beds", Prog. Energy Combust. Sci., Vol.19, pp.505-586 (1993)
- [2] D.H. Shin and S. Choi., "The Combustion of Simulated Waste Particles in a Fixed Bed", Combustion and Flame, Vol.121, pp.167-180 (2000)
- [3] I. Muchi and J. Higuchi, "Theoretical Analysis on the Operation of Sintering", 鐵と鋼, Vol. 56, No.3, pp.371-381 (1970)
- [4] Y. Hosotani, M. Fujimoto, N. Konno, T. Okada and J. Shibata, "Influence of Oxygen and Humidity of Inlet Gas on the Sintering Reaction", 鐵と鋼, Vol. 83, No.5, pp.7-12 (1997)
- [5] M.V. Ramos, E. Kasai, J. Kano and T. Nakamura, "Numerical Simulation Model of the Iron Ore Sintering Process Directly Describing the Agglomeration Phenomenon of Granules in the Packed Bed", ISIJ Int. Vol. 40, No.5, pp.448-454 (2000)
- [6] 이시형, 이만승, 박봉수, "DL식 소결기에서 배가스 온도분포를 이용한 소결광의 품질 예측", 대한금속학회지, Vol. 36, No.3, pp.439-447 (1998)
- [7] 윤석상, 강기홍, "국산 무연탄을 연료로 한 소결광 제조에 관한 연구", 대한금속학회지, Vol. 18, No.2, pp.159-169 (1980)
- [8] 김성황, 김태동, 김종연, 김종래, "철광석의 소결성에 미치는 석회소성 슬러지 첨가의 영향", 대한금속학회지, Vol. 36, No.10, pp.1648-1654 (1998)