

제철 소결기 베드 내 연소 및 열전달 모델링

양원* · 류창국* · 최상민**

Modeling of Combustion and Heat Transfer in the Iron Ore Sintering Bed

Won Yang, Changkook Ryu and Sangmin Choi

ABSTRACT

Processes in an iron ore sintering bed can be characterized as a relatively uniform progress of fuel, cokes combustion and complicated physical change of solid particles. The sintering bed was modeled as an unsteady one-dimensional progress of the fuel layer, containing two phases: solid and gas. Coke 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. Numerical simulations of the condition in the iron ore sintering bed were performed for various parameters: moisture contents, cokes contents and air suction rates, along with the various particle diameters of the solid for sensitivity analysis. Calculation results showed that the influence of these parameters on the bed condition should be carefully evaluated, in order to achieve self-sustaining combustion without high temperature section. The model should be extended to consider the bed structural change and multiple solid phase, which could treat the inerts and fuel particles separately.

Key Words : Sintering bed, Modeling, Bed combustion

1. 서 론

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

Fig. 1에는 일반적으로 제철 공장에서 사용하는 철광석 소결 공정을 나타내고 있다. 베드의 80% 정도를 구성하는 철광석은 다양한 입자크기를 가지고 있고, 그 중 0.25mm 의 작은 입자가 25~40% 정도를 차지하고 있다. 이와 함께 15% 가량의 석회석이 포함되어 있고, 규소(silica) 및

무용 광물(gangue) 등의 물질이 미량 포함되어 있다. 열원으로는 코크스와 무연탄이 5% 정도 포함된다. 원료에 물을 첨가하고 혼합하면 큰 입자 표면의 요철에 미세한 입자가 달라붙게 되며 이를 압축하면 의사입자(pseudo-particle)가 형성된다. 이 과정을 통해 베드를 구성하는 입자의 크기 분포 범위가 좁아지게 된다. 코크스 입자 역시 일부는 의사입자에 포함되고 mm 단위의 입자들은 다른 입자들과 별도로 존재하게 된다. 이 입자들은 장입장치를 통해 순환식 화격자 위에 공급되어 일정한 높이의 층(bed)을 이루며, COG(Coke 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

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

† 연락 저자, 042-869-3030, smchoi@mail.kaist.ac.kr

기 호 설 명

A : area (m^2)
 C : molar concentration ($kmol/m^3$)
 D : gas diffusivity (m^2/s)
 dp : particle diameter (m)
 E : activation energy (J/kmol)
 F : mass of char/initial mass of char
 FFS : flame front speed (cm/sec)
 H : latent heat (kJ/kg)
 h : enthalpy (J/kg)
 h : convective heat transfer coefficient
 h : enthalpy/unit volume (J/m^3)
 I^+, I^- : radiation intensity upward or downward (W/m^2sr)
 k : thermal conductivity (W/m-K)
 k : rate coefficient (/s)
 k : mass transfer coefficient (m/s)
 \dot{M} : volumetric mass generation rate (kg/m^3s)
 m : mass fraction
 n : number density ($/m^3$)
 p : pressure (Pa)
 Q : heat (W)
 q : volumetric heat generation rate (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)
 y : coordinate along the height (m)

Greeks

ε : bed void fraction, internal pore
 ν : stoichiometric coefficient
 ρ : density (kg/m^3)
 τ : optical thickness
 κ : absorption coefficient

Subscripts

b : blackbody
 eff : effective
 g : gas
 i, j : index number of solid component and gas species
 ip : internal pore
 o : initial
 r : Arrhenius reaction rate
 s : solid, stoichiometric
 u : unreacted

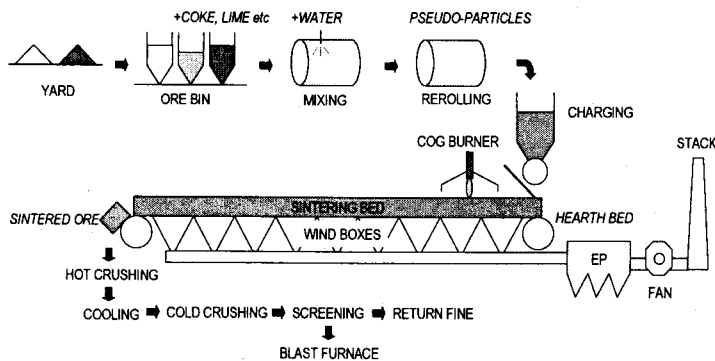


Fig. 1 Schematic of the sintering process in the steel industry

과정을 거쳐 5~75mm의 분포를 가진 입자가 고로로 투입되고 이보다 작은 입자는 소결 공정으로 재순환된다.

Fig. 2에는 소결기 베드 내의 현상을 개념적으로 나타내었다. 원료로부터 형성된 입자들이 별도의 장입장치에 의해 소결층에 공급된 후, 버너에 의해 상부 표면이 착화되면 서서히 코크스의

연소가 일어나며, 이로 인해 연소대 안의 상승된 온도 분위기에서 소결이 이루어진다. 연소대 아래쪽에서는 입자에 포함된 수분이 연소가스에 의해 증발된다. 그러나 연소가스가 더 아래로 진행하면서 이슬점 아래로 냉각되어 수분이 재응축되는 과정이 일어난다. 이러한 일련의 과정들이 약 100m 길이의 베드에서 30~60 분 동안 이동하면

서 느린 속도로 진행된다.

소결기 베드는 석탄 가스화기나 폐기물 소각로 내 연료층과 비교해 볼 때 비교적 연료 조성이 균일하고 층이 일정하게 이송되며 가스 유동장과의 상호작용이 거의 없다[1,2]. 따라서 기존의 고체 연료의 고정층 연소 모델링[3,4]을 이용한 접근이 비교적 수월한 편이며, 이에 따라 모델링을 통해 소결기 베드 내 상황과 배가스 조성을 예측하고자 하는 시도가 수행되어 왔다[1,2,5-11]. Muchi[5] 등과 Hosotani 등[6]은 소결기 베드 1차원 모델링을 코크스 연소를 중심으로 하여 수행하였고, Cumming[7] 등과 Patisson 등[8]은 용융 등에 의한 베드의 구조 변화를 shrinkage factor를 도입하여 함께 고려하였다. Nath[9] 등도 용융이 일어나는 영역을 함께 예측하는 작업을 수행하였으며, Ramos[10] 등은 이산요소법(discrete element method)을 사용하여 용융에 의한 베드 내 다공층 구조 변화를 수행하고 이를 베드 내 전체 상황 예측과 연계시켰다. 하지만, 이상의 연구들은 소결기 베드 내 현상에 있어서 가장 중요한 현상 중의 하나인 코크스 연소 및 연소 환경 변화, 열 및 물질 전달 환경의 변화 등에서 좀 더 세부적인 해석을 필요로 한다. 이와 함께 베드 내 다공층 구조의 변화에 대해서도 입자 크기 변화 및 내부 기공의 변화등이 인자 변화에 대한 계산 및 평가와 함께 세부적으로 진행되어야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 고체 연료의 고정층 연소 모델을 기초로 소결기 베드 내부의 연소 진행과정과 온도 분포 및 연소가스의 발생 특성을 해석할 수 있는 모델을 개발하였으며, 원료 조건 및 운전 조건 변화에 따른 해석을 수행하였다.

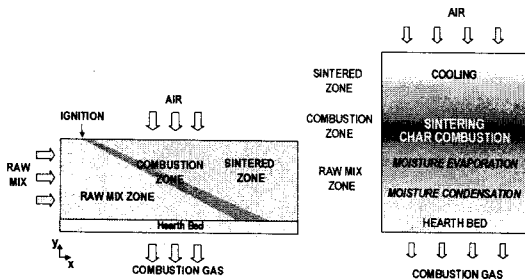


Fig. 2 Major phenomena in the sintering bed

2. 모델링

2.1 주요 가정

먼저 소결층 내의 고체 및 기체상(phase)을 공극률(porosity)에 의해 나누어지는 체적을 가지는 별도의 균일한 연속체(continuum)로 본다. 이로

부터 두 상에 대해 검사체적에 의한 지배방정식의 수립이 가능하다. 고체상 내 가연분인 코크스는 그 입자에 대한 별도 해석이 없이 하나의 연료입자 내 구성성분으로만 보았다.

소결기에서는 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, Fig. 3과 같이 하나의 연료 열이 시간에 따라 보이는 경계조건의 변화와 내부 연소의 해석으로 단순화된다.

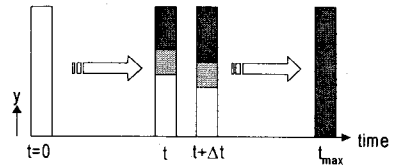


Fig. 3 Extension of 1-D unsteady model to the 2-D model

2.2 지배방정식

고체상 및 가스상의 지배방정식은 유체의 경우와 유사하며, 한 검사체적 내에서 두 상이 각각 차지하는 체적은 공극률을 통해 결정된다. 두 상간의 상호작용은 대류열전달과 연료 연소에 의한 가스의 발생과 발열을 통해 이루어지며 이 식들에서 생성항으로 반영되어 있다. 베드 내 입자에 의한 가스의 압력 강하는 그 변화가 상대적으로 크지 않으므로 이를 무시하였다. 이상의 가정들을 통하여 수립되는 지배방정식은 다음과 같다.

고체상(Solid phase)

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

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

Energy

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

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

가스상(Gas phase)

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

Energy

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

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

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

이 식들은 유한체적법을 이용해 풀이되었고, 이산화(discretization)는 고체상의 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 활(char) 성분으로 보았다. 따라서 수분의 증발과 응축, 활 반응을 고려해야 한다. 수분의 증발은 가열에 의한 증발과 확산에 의한 증발을 함께 고려하였으며, 활 반응은 O_2 외에도 CO_2 , H_2O 등의 다양한 가스들과 경쟁하며 일어나는 것으로 가정하였고, 반응 및 확산에 의해 지배되는 것으로 간주하였다. 이러한 반응들을 통하여 소모되거나 생성되는 물질들의 반응율을 구하는 식은 다음과 같다.

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

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

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.

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

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

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

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

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 내부 기공이 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.

고체상과 기체상 사이의 대류열전달은 packed bed에서 사용된 Wakao and Kagui[11]의 식을 사용하였다.

$$Nu = 2 + 1.1 Re^{0.6} Pr^{1/3} \quad (12)$$

층내 복사열전달은 입자의 크기와 다공도에 의해 흡수계수(absorption coefficient)가 결정된다고 보고, scattering 이 무시된 two-flux model을 적용하였다[4]. 즉,

$$-\frac{1}{2} \frac{dI^-}{d\tau} = I_b - I^-, \quad \frac{1}{2} \frac{dI^+}{d\tau} = I_b - I^+ \quad (13)$$

$$\kappa = -\frac{1}{d_p} \ln(\varepsilon) \quad (14)$$

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 계산 조건 및 해석방법

Fig. 4 에는 계산에 사용된 기준 운전조건을 나타내었다. 기준 조건은 실제 소결로에서 사용되고 있는 운전조건을 사용하였다. 입자 크기는 3mm 로 균일하게 가정했으며, 입자 내에 철광석과 코크스 및 기타 물질들이 균일하게 분포되어 있는 것으로 보았다. 소결이 일어나는 과정에서 입자들이 서로 결합하는 현상은 입자 크기나 0.4

Table 1 Simulation cases

Parameter	Reference	Variations
Moisture contents (wt %)	5.5 %	2~8 %
Coke contents (wt %)	3.5 %	2~7 %
Air velocity	0.23 m/s	0.1~0.7 m/s
Particle size	3 mm	1~5 mm

로 설정된 공극률 및 내부 기공률에 영향을 끼치지 않는 것으로 가정하였다. 실제 베드에서의 공기량은 전기 집진기 이후의 팬 압력으로 조절되는데, 베드에서 발생한 연소가스 유량으로부터 공기 유속을 역산하였다. 고온의 COG 가 베드에 영향을 끼치는 영역은 초기 4m(1.2분) 로 보았으며, 베드에서의 전체 체류시간은 약 33분이다.

Table 1 에는 해석 케이스들을 나타내었다. 변화 인자는 크게 원료의 성상과 운전조건 관련 인자로 나누어지며, 원료의 성상에서는 수분 함량과 코크스 함량을, 운전조건으로는 공기 흡입량을 바꾸어가며 해석을 수행하였다. 이와 함께, 입자 크기를 변화시키면서 민감도 해석을 수행하였다.

계산 결과의 해석을 위해서 파악되어야 할 중요한 인자로는 베드 내부에서의 온도분포 및 성분별 질량 분포와 배출 가스의 성분별 농도 분포를 들 수 있다. 또한, 연소특성을 결정하는 정량적인 인자로 연소의 진행 속도를 나타내는 연소대 전파속도를 식 (15)와 같이 정의하였다[4].

$$FFS(\text{Flame Front Speed}) = \frac{\text{Distance between two points}}{\text{Time consumed for propagation}} \quad (15)$$

베드 내에서의 온도 분포 및 코크스 질량분포

를 확인함으로써 착화 후 코크스 연소열에 의하여 스스로 연소가 진행될 수 있는지의 여부와 국부적 고온 영역이 생기는지의 여부를 확인할 수 있다.

3.2 수분 함량 변화에 따른 해석 결과

Fig. 5에는 소결기 내에 장입되는 분광의 수분 함량을 변화시키면서 고체상 내 코크스 함량분포를 계산한 결과를 나타내었다. (a)와 같이 수분이 3% 로 기준조건보다 낮을 때는 증발 잠열에 의한 열손실이 줄어들면서 코크스 연소 완료에 걸리는 시간이 더 길어지고 있는 것을 볼 수 있다. 이를 통하여 고체상 내 수분의 함량이 연소 및 소결이 완료되는 시점에 많은 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. 수분 함량이 적을 때는 고체상 내 연소층이 두꺼워지고 있는 반면에 (b)와 같이 초기 수분 함량이 8% 로 기준 조건보다 더 높게 설정된 경우에는 증발 잠열 손실이 커져 연소층의 두께가 축소되고 있다.

Fig. 6에는 수분 농도의 변화에 따른 가스 조성 분포 변화를 나타내었다. 원료 내 수분의 함량이 증가하면서 초기에 CO가 많이 방출되고 있지만, 건조가 끝난 후에는 CO 의 연소가 더 활발하게 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 수분 농도가 높아지면서 산소 외에 steam 이 CO 의 연소에 참여하고 있음을 나타내는 결과이다[6].

3.3 코크스 성분 변화에 따른 해석 결과

코크스 성분은 소결기 내에서 소결에 필요한 열을 공급하는 연료이다. 소결기에 장입되기 전의 분광에 포함될 코크스 함량은 베드에서 반응이 일어나는 길이 조절의 측면 뿐만 아니라 온도 측면에서도 신중하게 결정되어야 한다.

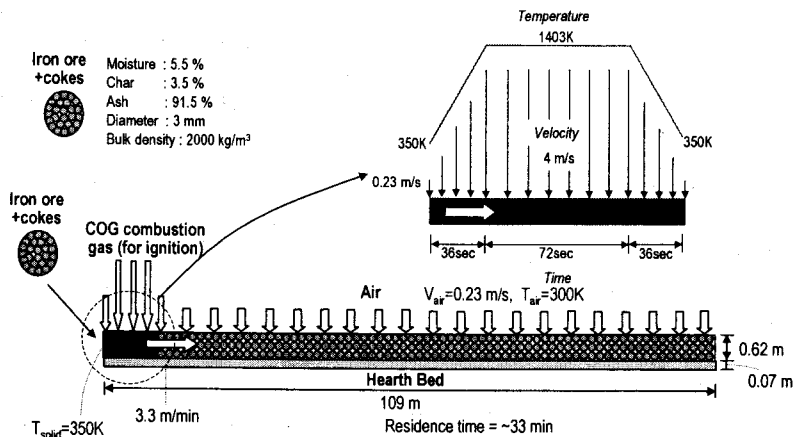
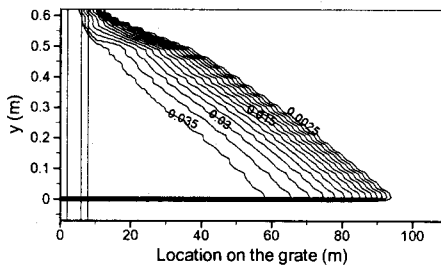
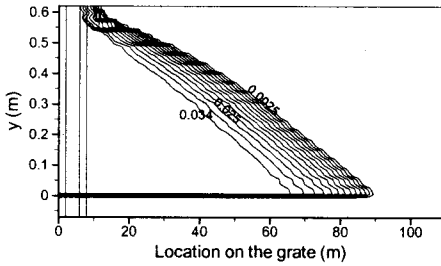


Fig. 4 Process of the sintering bed for the calculation (Reference case)



(a) mass fraction of moisture = 3%



(b) mass fraction of moisture = 8%

Fig. 5 Mass fraction distribution of char for various initial moisture contents

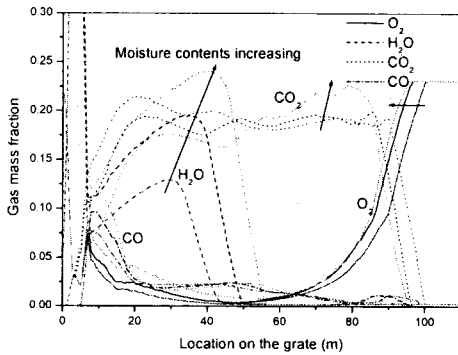


Fig. 6 Distribution of gas mass fractions for various initial moisture contents

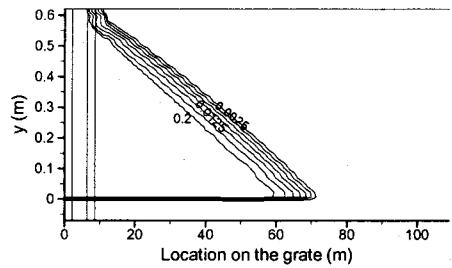
Fig. 7에는 분광 내 코크스 함량을 바꾸어가면서 좌의 질량 분포 계산을 수행한 결과를 나타내었다. 기준량(3.5%)보다 적은 양의 코크스를 주입한 Fig. 7(a)의 경우에는 끝까지 연소가 이루어질 수 있을 정도의 연소열은 유지되고 있지만, 연소열이 적어 연소층이 얇게 나타나는 결과를 보여주고 있다. 반면에 기준량보다 많은 양의 코크스를 주입한 Fig. 7(b)의 경우에는 좌 연소 영역이 더욱 두껍게 형성되고 있으며, 연소가 베드 끝에 이를 때까지 종료되지 못하고 있다. 코크스 함량이 적을수록 연소가 일어나는 범위는 점점 좁아지게 되며, 어느 시점에 이르렀을 때에는 화염이 소멸된다.

원료의 성상에 따른 연소 상황의 변화를 살펴본 결과, 내부 연소열에 의해 스스로 연소가 진행되는 self-sustaining 연소 상황을 이끌어 내는 운전 영역의 예측이 계산을 통하여 가능함을 알 수 있다. 원료 내의 수분 또는 코크스의 함량에 따라 민감하게 베드 내 상황이 변화하므로, 원료 성상의 변경이 있을 때의 운전 조건이 신중하게 결정되어야 함을 확인할 수 있다. 이러한 경우 철광석의 물리적 거동의 변화도 함께 확인하는 작업이 필요하다.

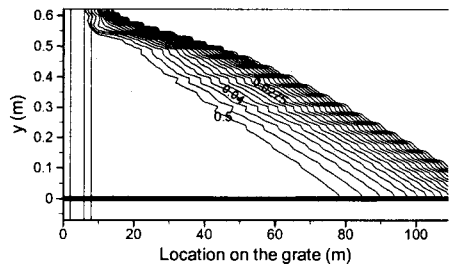
3.4 공기 흡입량 변화에 따른 해석 결과

연소기의 대표적인 운전 조건인 공기 흡입량은 연소 속도에 영향을 끼치게 되며, 이 값은 모델에서는 공기 주입 속도로 결정된다.

Fig. 8(a)에는 기준 속도(0.23 m/s) 보다 적게 공기가 주입되는 경우(0.10 m/s) 고체상 내 온도 분포를 나타내었다. 이를 통해 연소가 끝까지 같



(a) initial coke mass fraction = 2%



(b) initial coke mass fraction = 5%

Fig. 7 Coke mass fraction distributions for initial contents of coke

은 속도로 진행되고 있으며, self-sustaining 연소 조건임을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 산소의 부족으로 인해 연소 속도가 느리게 진행되어 고체상 내 온도가 낮고, 좌 연소도 다 종료되지 못하는 현상이 나타나고 있다. 이를 통하여 소결기 베드의 연소 속도가 산소량에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8(c)에는 기준 케이스(Fig. 8(b))보다 공기

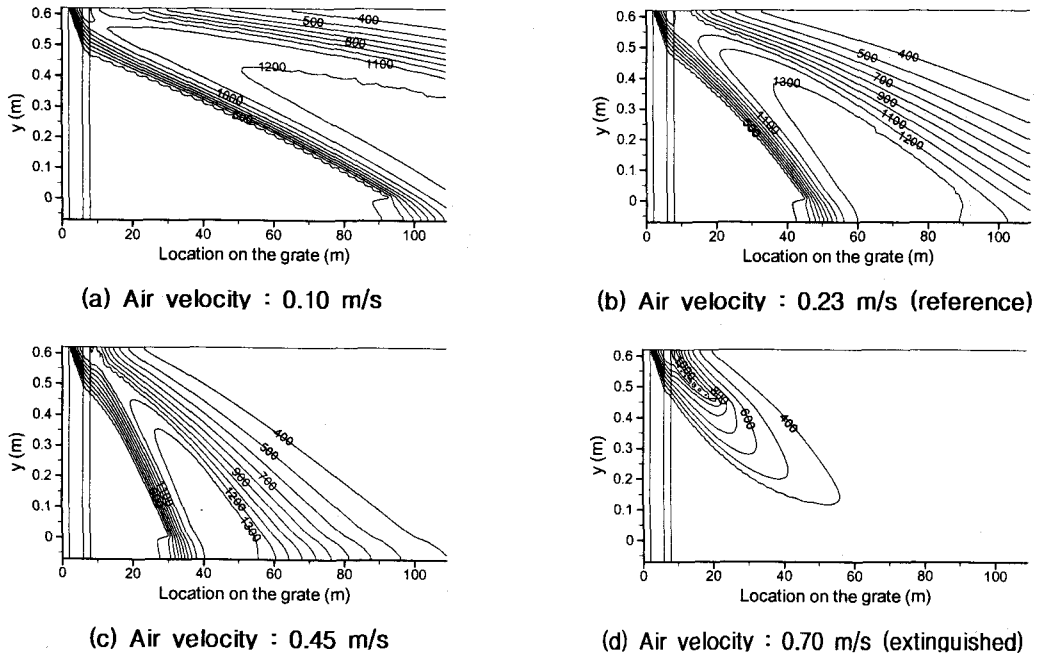


Fig. 8 Solid temperature distributions for various air velocities (K)

흡입량이 많은 경우에 베드의 온도 분포를 계산한 결과를 나타내었다. 기준치보다 공기 흡입량이 많으면 연소의 종료는 기준 공기 속도에 비해 훨씬 빨리 일어나게 되며, FFS 값도 훨씬 커지게 된다(FFS = 6.98 cm/min, 0.45 m/s). 하지만, 공기 흡입량을 더 늘리면, 대류 열손실에 의해 고온 영역의 크기가 작아지게 되며, FFS 값이 작아지게 된다(FFS = 5.54 cm/min, 0.65 m/s). Fig. 8(d)와 같이 공기 흡입량이 어느 한계를 넘어가는 경우(0.7 m/s)에는 많은 공기량으로 인한 대류 열손실에 의해 좌 연소 진행이 이루어지지 못하고 화염이 소멸된다. 이러한 결과를 Fig. 9에 정량화하여 나타내었다. 산소에 의해 연소 반응이 진행되는 초기에는 공기 흡입량에 비례하여 연소진행속도가 증가하게 된다(oxygen limited). 그러나 어느 영역을 지나게 되면, 연소 진행 속도가 반응 및 산소확산에 의해 제한되고 잉여 산소가 생기게 된다(reaction limited). reaction limited 영역에서는 잉여공기가 베드를 냉각시키게 되어 고온 영역의 크기가 작아지고, 좌 연소 영역은 얇아지지만 연소대 진행 속도는 변화가 없다. 공기 흡입량이 더 증가하면 대류 열손실에 의해 연소 진행이 중단된다. 기준 계산 케이스는 oxygen limited 영역에 해당되며, 이는 소결기의 운전이 연료 과잉 상태에서 일어나고 있음을 의미한다. 각 영역의 길이는 입자 크기에 따라 달

라지게 되며, 특히 reaction limited 영역의 길이는 입자 크기가 클수록 더욱 길어지게 된다[4].

3.5 입자 크기에 의한 변화

실제 장입되는 원료들의 입경이 균일하지 않기 때문에, 입자들의 크기 분포에 대한 영향을 해석하여 실제 계산에 반영하는 일은 매우 중요하다. 이에 따라, 소결기에 장입되는 입자들의 평균 직경을 바꾸어가면서 입자 크기의 영향을 살펴보았다.

Fig. 10에는 입자 크기가 기준치(3mm)보다 작

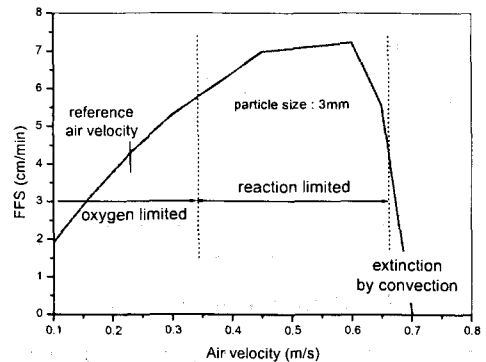


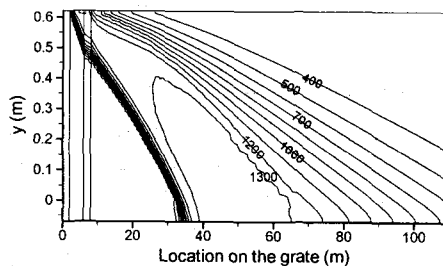
Fig. 9 Flame front speeds for various air velocities

은 경우와 큰 경우에 대하여 고체상의 온도 분포 변화를 나타내었다. 입자 크기가 작은 경우(1 mm)에는 고온 영역의 크기가 커지고, FFS 값이 크게 증가하게 된다(FFS = 6.35 cm/min). 반면에, 입자 크기가 늘어나면서 이러한 현상이 줄어들고, 입자 크기가 5mm 가 될 때는 화염대가 소멸하는 현상을 보이게 된다. 이러한 결과가 나오는 것은, 다공층 내에서의 복사 열전달 침투 변화에 의한 것으로, 입자의 크기가 커지게 되면 복사열의 침투가 더 잘 일어나기 때문에 다공층 내의 radiant conductivity 가 증가하게 되지만, 입자가 작아지면 반대의 현상이 일어나기 때문에 열집중이 발생하게 되는 것이다. 따라서 계산을 수행할 때 입자 크기에 대한 정확한 정보를 가지고 있어야 함을 알 수 있다.

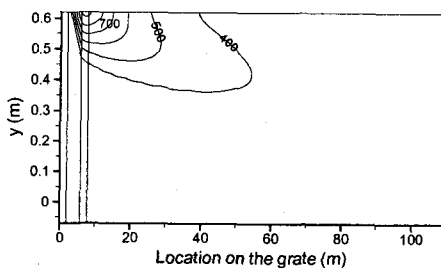
이러한 결과들을 통하여 소결을 포함한 불연물들의 물리적 성상의 변화에 따른 다공층에서의 유효 열전도도 변화를 정확하게 파악해야 함을 알 수 있었다. 이를 위해서는 입자 크기 변화 및 결합에 의한 void fraction 의 변화를 고려해야 할 것으로 생각된다.

3.6 모델의 한계 및 개선 방향

고체 연료층 연소 모델링을 통하여 물리적으로 어느 정도 타당한 결과를 얻을 수 있음을 인자



(a) Particle diameter : 1mm



(b) Particle diameter : 5mm

Fig. 10 Solid temperature distribution for particle diameters (K)

변화를 통한 계산을 통해 확인할 수 있었다. 반면에 계산의 한계점 및 개선해야 할 사항들도 나타나고 있었다. 우선 계산 중에 국부적인 고온 영역이 발생하는 문제에 있어서 현재 사용한 모델을 통한 정량적인 운전 조건의 수립에 한계가 있음을 볼 수 있었다. 모델에서는 고체상을 단일상(single phase)으로 간주하여, 연료와 불연물이 한 입자를 이루고 있다고 가정하였다. 그러나 실제의 경우, 별도로 존재하는 코크스 입자는 가열 과정이 빠르고 연소시에는 베드 평균 온도에 비해 매우 높은 온도를 가지게 되며, 이로 인한 발열이 주변 입자를 가열시키게 된다. 실제 계산을 통하여 얻은 온도분포는 이를 평균한 값이므로 철광석 또는 소결광의 용융을 야기할 수 있는 국부적인 고온 영역의 온도 예측에 있어 한계를 드러내고 있다. 따라서, 고체상을 구성하는 원료들의 성분과 물리적 특성을 별도로 해석하는 다중 고체상 모델의 개발이 필요하다.

또한 연구에 사용된 모델에서는 철광석 성분이 단일 입자 안에 가연분과 함께 결합된 회분으로 간주되는데, 소결기에 장입되는 원료에서는 이러한 불연 물질이 원료의 대부분을 차지하게 된다. 그러므로, 이러한 물질들의 거동 변화에 의한 void fraction 의 변화 및 부피의 변화가 연소 상황에 많은 영향을 끼치게 된다. 따라서 소결에 의한 입자의 용융과 치밀화 및 이에 따른 특성 변화를 해석하는 특수한 모델의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

4. 결론

소결광의 품질과 생산성은 소결기 베드 내 상황에 많은 영향을 받게 된다. 고체 연료 연소 모델링을 통해 소결기 내의 온도 분포와 연료 조성 분포를 얻을 수 있었다. 모델에 대하여 원료 조건과 운전 조건을 바꾸어 가면서 계산을 수행하였으며, 이를 통해 국부적으로 고온 현상이 발생하는 것을 방지하면서 자체 연소열에 의해 연소가 끝까지 진행되도록 하는 조건을 찾기 위한 접근 방법을 제시할 수 있었다. 또한 원료의 성상이나 운전조건에 따라 베드 내 상황의 변화가 심하기 때문에 조건 변화시에 이러한 부분을 고려해야 한다는 것을 알 수 있었다. 이와 함께 좀더 정확한 베드 내 상황 예측을 위해서 입자 크기 및 소결 현상에 의한 원료층 내 다공층 특성 변화 등에 대한 정확한 정보가 필요함을 확인할 수 있었다. 또한 고체상을 구성하는 원료들의 성분과 물리적 특성을 별도로 해석하여 국부적인 온도 예측을 좀더 정확하게 할 수 있는 다상 모델의 개발이 필요함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 양원, 류창국, 최상민, "제철 소결공정의 철광석-코크스 베드에서의 연소와 열전달 해석," 제 23회 KOSCO Symposium 논문집, 2001, pp. 161-168.
- [2] 양원, 류창국, 최상민, "제철 소결기 베드 내 연소 및 열전달 모델링 - 인자 변화에 의한 계산결과 평가," 제 24회 KOSCO Symposium 논문집, 2002, pp. 171-178.
- [3] Hobbs, M. L., Radulovic, P. T. and Smoot, L. D., "Combustion and Gasification of Coals in Fixed Beds," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 19, 1993, pp. 505-586.
- [4] Shin, D. H. and Choi, S., "The Combustion of Simulated Waste Particles in a Fixed Bed," *Combust. and Flame*, Vol. 121, 2000, pp. 167-180.
- [5] Muchi, I. and Higuchi, J., "Theoretical Analysis on the Operation of Sintering," *鐵と鋼*, Vol. 56, 1970, pp. 371-381.
- [6] Hosotani, Y., Fujimoto, M., Konno, N., Okada, T. and Shibata, J., "Influence of Oxygen and Humidity of Inlet Gas on the Sintering Reaction," *鐵と鋼*, Vol. 83, 1997, pp. 7-12.
- [7] Cumming, M. J. and Thurlby, J. A. "Developments in Modelling and Simulation of Iron Ore Sintering," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 17, 1990, pp. 245-254.
- [8] Patisson, F., Bellot, J. P., Ablitzer, D., Marlière, E., Dulcy, C. and Steiler, J. M., "Mathematical Modelling of Iron Ore Sintering Process," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 18, 1991, pp. 89-95.
- [9] Nath, N. K., Da Silva, A. J. and Chakraborti, N., "Dynamic Process Modelling of Iron Ore Sintering," *Steel Research*, Vol. 68, 1997, pp. 285-292.
- [10] Ramos, M. V., Kasai, E., Kano, J. and Nakamura, T., "Numerical Simulation Model of the Iron Ore Sintering Process Directly Describing the Agglomeration Phenomenon of Granules in the Packed Bed," *ISIJ Int.* Vol. 40, 2000, pp. 448-454.
- [11] Wakao, N. and Kaguei, S., "Heat and Mass Transfer in Packed Beds," *Gordon and Breach Science Publishers*, 1982.