

수학 모델에 의한 소결층의 온도분포 해석

최용수, 이덕원
포항제철 기술연구소 선강연구팀

Investigation of temperature distribution in sinter bed by mathematical model

Eungsoo Choi, Deokwon Ri
Ironmaking and Steelmaking Research Team
POSCO Technical Research Lab.

1. 서론

소결과정은 분철광석을 괴상화하여 고로용 원료에 적합하도록 가공하는 공정으로서, 공업적으로 소결광은 연속식 소결기에 의해 대규모로 만들어진다. 소결광 제조시 주요원료는 분철광석, 코크스, 석회석 그리고 수분으로 구성되어 있다. 소결기에 장입된 소결원료는 충전층의 상부에서 점화되어 상부로부터 하부로 서서히 연소가 진행된다. 이 때 철광석과 석회석이 반응하여 저융점의 용액이 생성되고 이러한 용액이 분철광석을 서로 결합시키는 역할을 한다. 소결과정 중 소결층은 Figure 1에 나타낸 바와 같이 그 특성상 4부분으로 구별되는데 소결층의 상부는 연소가 완료된 소결광층으로 큰 Block을 이루고 있으며 새로이 흡입되는 공기를 통해 냉각된다. 소결반응이 일어나는 연소층은 연소배기가스에 의해 연소열을 하부층으로 전달하며 연소층 하부의 건조층에서는 장입원료중의 수분이 급격히 증발하여 연소배기가스의 현열은 대부분 이곳에서 손실된다. 한편 증발된 수분은 하부의 습윤층에서 냉각, 응축된다. 이 과정에서 흡입 공기는 소결원료의 연소에 필요한 산소를 공급해줄 뿐 아니라 연소열의 하부층으로의 열전달 매개체로서 이용된다. 따라서 연소층의 이동속도는 소결층을 통과하는 흡입공기의 양에 비례하게 된다.

소결층내 온도분포는 소결생산성 및 소결광조직에 직접적인 영향을 미칠뿐 아니라 소결층내 온도분포에 관한 정보는 소결조업의 최적화에 필수적이다. 따라서 소결과정 중 소결층내 온도분포해석은 매우 중요하다. 소결층의 온도분포를 해석하기 위해서는 소결층에 대한 유체 및 열수지식 그리고 물질수지식에 의해 얻어진 편미분 방정식을 풀어야 한다. 본 연구에서는 Young(1977)의 기본 물질수지식에 기초하여 수치해석 모사를 통해 소결과정 중 소결층의 온도분포를 해석하였으며 얻어진 결과는 소결 Pot 실험에 의해 검증되었다. 또한 점화온도, 연료양 그리고 소결층을 통과하는 공기의 속도에 따른 소결층내 온도분포 변화가 조사되었다.

2. 수학 모델

소결기에 장입된 소결원료는 분철광석 및 부원료들이 조립에 의한 물리적 결합으로 이루어진 다공성 구조로 되어있다. 소결층은 일정한 크기의 구형 입자들로 이루어진 균일한 다공성 매개체로 소결층내에서 복사 및 확산에 의한 전열효과는 무시하고 열전달은 오직 소결층내를 통과하는 가스에 의한 강제대류에 의해 서만 일어난다고 가정하면 Figure 1에 나타난 소결층내의 소결현상은 다음과 같은 1차원 비정상상태 모델로서 해석될 수 있다.

2.1 모멘텀, 에너지, 물질 수지식

$$-\frac{dp}{dx} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3 d_p^2} \mu v + 1.75 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3 d_p} \rho_g v^2$$

$$v \rho_g C_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial x} + \epsilon \rho_g C_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial t} = ah(T_s - T_g)$$

$$\rho_s (C_{ps} - C_{pm}) \frac{\partial T_s}{\partial t} = ah(T_g - T_s) + R_c (-\Delta H_c)$$

$$v \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x} + \epsilon \frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} = -r_{O_2}$$

$$v \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x} + \epsilon \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = r_{O_2}$$

$$v \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial x} + \epsilon \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial t} = r_{H_2O}$$

2.2 코크스 연소반응 모델



위 반응식에 대한 속도상수 및 총괄반응식은

$$k_c = 3.92 \times 10^9 \sqrt{T_s} \exp(-44000/RT_s)$$

$$R_c = 4\pi r_c^2 k' C_{O_2}$$

여기서 k' 는 총괄속도상수로서

$$k' = \left(\frac{d_p}{Sh D_{O_2}} + \frac{1}{k_c} \right)^{-1}$$

$$Sh = 2 + 0.7 Re^{0.5} Sc^{0.333}$$

$$Re = \rho_g d_p v / \mu \epsilon, \quad Sc = \mu / \rho_g D_{O_2}$$

3. 실험장치 및 실험방법

소결 Pot 시험 설비는 원료의 축분을 위한 축분기, 원료의 혼합을 위한 Drum Mixer 그리고 상부내경 300mm, 하부내경 260mm, 높이 500mm의 원통형 Pot로 구성되어 있다. 본 실험에 사용된 시험설비를 Figure 2에 나타내었다. 균일하게 축분된 원료를 소결시 통기도 향상을 목적으로 Drum Mixer에 장입하여 혼합, 수분을 첨가하여 조립을 실시하였으며 이 때 수분량은 7.0%로 일정히 유지되었다. 조립된 배합원료는 상부광 위로부터 Pot 상부까지 장입되었다. 장입이 완료된 원료는 1100°C로 예열된 점화로에 의해 2분간 점화되어 소결이 시작되며 배

합원료에 섞여진 코크스의 연소에 필요한 공기는 Pot 하부에 설치된 Blower에 의해 Pot 상부로 부터 소결층내로 공급된다. 소결층내의 통기도 및 온도변화는 Pot 상부에 설치된 풍속계(Anemometer)와 소결층에 직접 연결된 Thermocouple에 의해 측정되었으며 소결상황은 소결이 종료될 때까지 Microprocessor에 의해 연속적으로 기록되었다.

4. 결과 및 고찰

소결 Pot 실험을 통해 측정된 소결층내 온도와 수확모델의 수치모사로부터 얻어진 소결층내 온도분포를 Figure 3에 나타내었다. Pot 실험시 Thermocouple의 위치는 Pot 상부(Pot 상단 끝으로부터 12.5cm 아래에 위치)와 하부(Pot 상단 끝으로부터 37.5cm 아래에 위치), 2곳에 고정시켰다. 점화개시후 약 5분 후에 Pot 상부의 온도가 상승하기 시작, 극대점에 도달한 후 하강하였다. Pot 하부의 온도곡선은 Pot 상부와 유사한 경향을 보이니 연소배기가스를 통해 소결층 상부와 중간 부분부터 전달된 열의 축적효과로 인해 냉각속도가 느리고 고온유지 시간이 긴 것으로 나타났다. 수치모사 결과는 Pot 상부에 대해서는 Pot 실험결과와 잘 들어맞는 것으로 나타났으나 Pot 하부에서는 비교적 큰 오차를 보였다. 이는 소결반응시에 소결층 내부구조가 변화하지만 본 연구에 사용된 수확모델에서는 이를 고려하지 못하기 때문인 것으로 생각된다. Figure 4 - Figure 6에 Pot 상부 끝에서 5cm 아래에 위치한 지점에서의 수치모사를 결과를 나타내었다. Figure 4 에서 점화온도가 낮아짐에 따라 온도곡선의 극대점은 낮아졌으며 소결 시간은 지연되었다. 점화온도 800°C 에서는 코크스의 연소가 일어나지 않아 소결이 진행되지 못하였다. Figure 5 는 소결층내를 통과하는 공기의 양이 소결층의 온도에 미치는 영향을 보여준다. 공기의 양이 증가함에 따라 소결시간은 단축되었으며 코크스 연소속도가 빨라져 온도상승곡선이 급해지는 것을 볼 수있다. Figure 6은 소결원료 중의 코크스 양의 영향을 나타낸 것으로 코크스 양이 증가함에 따라 온도곡선의 극대점이 높아지며 고온에서의 온도곡선 폭이 넓어져 소결광의 강도가 향상되는 것으로 생각된다.

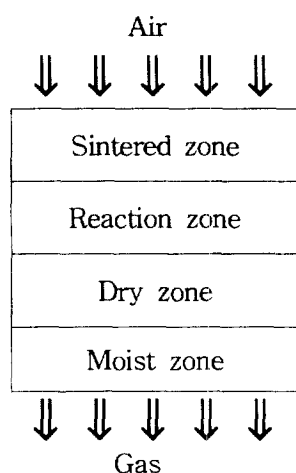


Figure 1 Sinter bed

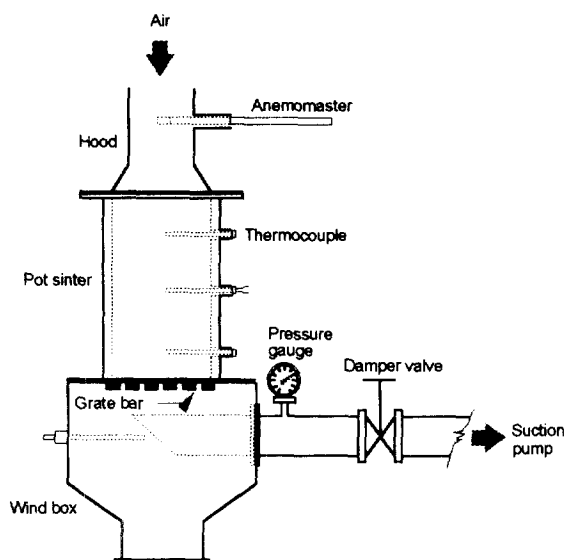


Figure 2 Schematic view of sintering pot

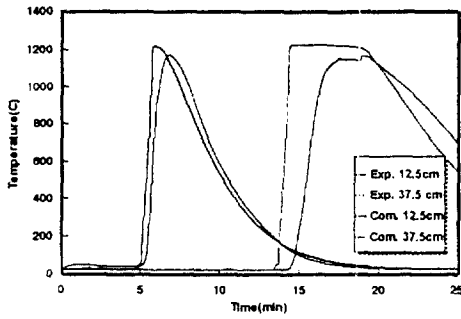


Figure 3 Temperature distribution in sinter bed

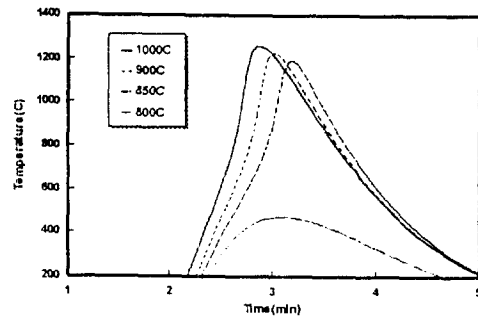


Figure 4 Effect of ignition temperature

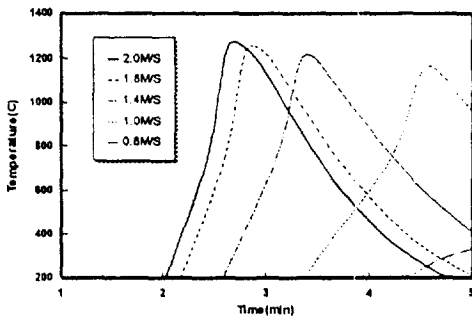


Figure 5 Effect of wind velocity

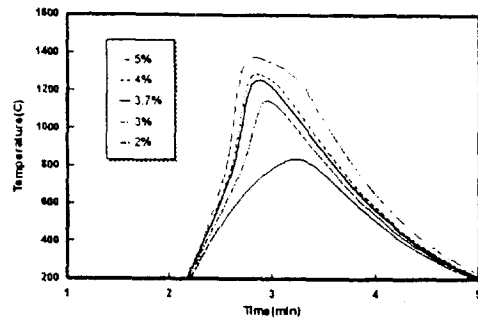


Figure 6 Effect of coke amount in sinter mix

5. 참고문헌

1. Young, R.W., Ironmaking and Steelmaking, 1977, 4, 321
2. Michi, I. and Higuchi, J., Tetsu-to-Hagane, 1970, 56, 371
3. Patisson, F. et al, Ironmaking and Steelmaking, 1991, 18, 89
4. Ergun, S. Chem. Eng. Prog., 1952, 48, 87
5. Bird, B. et al, Transport Phenomena, John Wiley & Sons