

정상상태 고로에 미치는 미분탄 투입의 영향

김정희 · 박판욱* · 정진경** · 허완욱** · 정용옥†

부경대학교 화학공학과

*부산대학교 화학공학과

**포항제철 기술연구소

(2001년 7월 2일 접수, 2001년 11월 28일 채택)

Effects of Pulverized Coal Injection on Blast Furnace at Steady State

Jung-Hee Kim, Pan-Wook Park*, Jin-Kyung Chung**, Wan-Wook Huh** and Yong-Ok Jeong†

Dept. of Chem. Eng., Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

*Dept. of Chem. Eng., Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Technical Research Laboratories, POSCO, Cheomnam 544-090, Korea

(Received 2 July 2001; accepted 28 November 2001)

요 약

미분탄 투입(pulverized coal injection; PCI)은 고로 내부의 분 축적을 가중시킨다. 특히 고로 하부에서 축적된 미연소 미분탄은 연소대 심도를 감소시키고 데드맨의 기체흐름을 저하시켜, 고로의 정상상태에 영향을 준다. 기체와 고체의 흐름 그리고 각 고체층에 상당하는 반응을 고려한 물질전달과 열전달로 모형화한 고로 내부 현상들은 유한요소법(Finite Element Method; FEM)을 사용하고, 철광석의 환원을 모형은 전진 차분법(Forward Euler Method)을 사용하여 수치해석하였다. 연소대의 심도 감소와 데드맨의 기체흐름저하는 모두 충전층 내의 압력강하를 증가시키고 고로 내부의 온도를 감소시킨다는 점에서는 비슷하였다. 그러나 데드맨의 기체 흐름 감소가 단지 고로 하부 온도만 감소시켰다. 이에 반해, 연소대의 심도 감소는 고로의 전체 평균온도를 저하시키고, 연소대 경계의 기체흐름을 증가시켜 노벽측 보쉬 부근의 고체온도를 상승시킨다. 따라서 철광석의 연화용착이 축 중심부에서 낮게 형성되고 노벽측에서는 높게 나타난다. 그 결과 연화용착대의 길이가 감소하여 기체흐름과 고로의 상태에 나쁜 영향을 미친다.

Abstract – A pulverized coal injection increases the accumulation of fines in a blast furnace. The accumulation of fines in the lower part of the blast furnace diminishes the size of the raceway depth and gas flow into the deadman and, as a result, affects the steady state condition of the blast furnace. The state of the blast furnace, which depends on the gas and solid flow, chemical reactions, mass transfer and heat transfer, is numerically analyzed using a FEM (finite element method). But the ore reduction index model, which estimates the chemical state of ore in blast furnace, is made using Forward Euler method. The decrease in both the size of the raceway depth and the gas flow into the deadman results in increasing pressure drop and lowering the average temperature in the blast furnace. However the reduction of gas flow into deadman affects in only the lower part of the furnace, but the diminution of the raceway depth decreases the average temperature in the entire furnace, even though the solids on the upper raceway become hotter due to increasing gas flux through the raceway. So, the melting position is lowered in axial direction at center of blast. As a result the length of the cohesive zone is shortened to give permeability resistance on the gas flow and to make the furnace operation unstable.

Key words: Pulverized Coal Injection, Blast Furnace, Numerical Analysis

1. 서 론

고로(blast furnace)는 Fig. 1과 같이, 기체성분은 하부 수십 개의 풍구를 통하여 투입되어 코크스 연소반응과 철광석 환원반응을 거쳐 상부로 배출되고, 고체 성분인 철광석과 코크스는 상부에서 번갈아 장입되어 반응 후 하부에서 용선과 슬래그로 배출되는, 일종의 연속적인 충전

층 향류 반응기이다.

고로 내부 상태는 기체의 상승속도, 고체의 하강속도, 기체에서 고체로의 열전달, 각상에서 노벽으로의 열전달, 그리고 고체층에 따른 산화 환원반응과 확산에 의한 열전달과 물질전달에 영향을 받을 뿐만 아니라 코크스와 철광석의 고로 내부 장입분포, 연화용착대(cohesive zone), 데드맨(deadman), 연소대(raceway) 등의 구조에도 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

연화용착대는 철광석으로부터 환원된 Fe와 FeO가 1,100 °C 부근에서

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jeongyo@pine.pknu.ac.kr

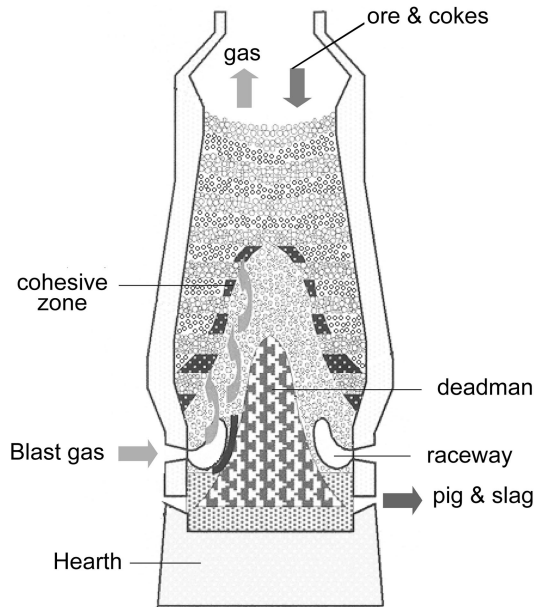


Fig. 1. Schematic diagram of a blast furnace.

용융초기 연화 융착되어 기체의 흐름을 막는 영역으로, 이 부근의 기체는 융착대 사이에 존재하는 코크스층을 통과하여 이동하게 된다. 그래서 연화융착대의 길이가 수직방향으로 길어질수록 기체의 흐름방향에 대한 코크스층의 수직단면이 커져서 고로 전체의 기체흐름이 원활해지고, 변형된 기체흐름은 온도분포에 영향을 주어서 고로의 성능을 호전시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 연화융착대의 형태는 고로의 상태를 결정짓는 주요인자가 된다. 연소대는 고로 하부의 풍구를 통해 고속 취입되는 가스의 운동에너지에 의해 생성되는 공동으로, 고온의 열원가스가 선화하면서 코크스를 연소시켜 철광석 반응에 필요한 환원가스와 열을 생성시켜 고로 전체에 공급하는 매우 중요한 곳이다. 데드맨은 고로 하부의 중심에서 물리적(화학적) 변화가 매우 느리게 일어나는 코크스더미로, 기체흐름을 변화시켜 연화융착대의 형성에 영향을 준다. 코크스와 철광석의 고로 내부 장입 분포는 연화융착대의 형성 뿐만 아니라 고로 상부의 온도, 반응성분의 조성에도 영향을 준다. 이처럼 고로 내부의 복잡한 구조들은 상호영향을 주는 것으로 알려져 있다.

이렇게 복잡한 고로 내부 현상을 이해하기 위하여 많은 검출단들이 개발되었으나 이것들로 얻어지는 자료의 한계로, 고로 내부 현상을 수학적 모델 수치적으로 근사하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 이러한 국내연구로는 윤 등[1]이 고로를 원통형으로 좌표 변환한 후 orthogonal collocation 방법으로 수치해석하였으며, 그 이후 이 등[2]은 기체온도와 조성, 고체온도, 압력분포와 철광석 환원반응을 표현하는 수식들을 정립하여 수치해석하였고, 복잡한 구조를 가진 고로를 해석하는데에는 유한요소법(finite element method; FEM)이 적합하다고 주장하였다. 국외의 연구로는 Yagi 등[3]이 유한요소법에 의해 고로의 가스흐름과 고체와 기체의 열전달을 2차원적으로 해석하였고, 최근 Takatani 등[4]은 blow-in/off 운전 에 따른 고로의 동적 거동들을 수치해석하였고, 고로 내 압력강하와 연료비 등을 최소화하고자 belly와 노저의 반경비에 따른 고로 형태에 대하여 연구하였다.

전세계적으로 코크스제조에 사용되는 가압결탄의 생산 감소와 가격인상으로 인하여, 고로 조업과정에서 고가 연료인 코크스의 사용량을 줄이고 저가 탄종으로 대체하는 노력으로 미분탄을 고로 하부에서 직접 취입하고 있다. 미분탄 취입(pulverized coal injection; PCI)은 용선의 생산원가를 절감할 수 있어서 그 양을 점차 증가시키고 있는 실정이다. 그러나, 미연소된 미분탄의 일부가 고로 내부에 축적하게 되고, 코크스의

체류시간이 길어짐에 따라 고로 내 코크스의 평균입경이 감소하게 된다. 특히, 고로 하부의 미연소 미분탄 축적은 코크스의 장입량과 그 입경 감소와 아울러 고로 하부의 통기성을 더욱 악화시키며, 연소대의 심도를 감소시켜 고로 조업에 악영향을 미치게 된다.

PCI에 대한 국내연구로는 정 등[5, 6]이 고로 내외부에서 채취한 분중 PCI에 따른 분의 양과 코크스에 의해 생긴 분의 양을 분리하여 정량화하였고, Oxy-coal 용 이중관 버너를 사용하여 미분탄의 연소성을 개선시키고자 하였다. 그러나 이러한 미분탄 축적이 고로 내부에 미치는 영향에 대한 수치적인 연구 활동은 아직 미미한 실정이다.

본 연구에서는 미분탄 취입으로 인한 연소대 심도 감소와 데드맨 기체 흐름 감소가 고로 내부의 정상상태 변화에 미치는 영향을 조사하였다. 기체 운동속도와 고체 운동속도는 각각 Ergun식으로부터 기체압력과 고체속도 포텐셜을 구하고 각 포텐셜의 구배를 취하여 계산하였고, 기체 온도, 고체온도와 각 기체성분의 농도는 코크스와 철광석 반응을 모두 고려한 에너지수지식과 물질수지식을 사용하여 수치해석하였다.

2. 수학적 모델

2-1. 계의 설정

고로의 경계는 Fig. 2와 같이, 상부는 고체층의 표면, 하부는 용선의 출선구 높이의 수평단면, 좌측은 축중심, 우측은 노벽과 연소대 경계로, 설정하였다. 계 내부에는 코크스와 철광석이 층층이 쌓여있고, 향류로 흐르는 고체와 기체간에는 화학반응과 열전달이 이루어지고, 노벽과 노저에서는 냉각과 용선유출에 의한 열전달이 일어난다.

2-2. 지배방정식

고로 내부의 현상은 기체와 고체의 흐름, 기체와 고체의 에너지수지, 기체성분의 물질수지 및 철광석의 환원율로 각기 나누어서 다음과 같이 모형화하였다.

2-2-1. 기체상의 흐름

이동상에서 기체의 운동속도는 고체에 비해서 매우 크므로 고체의 이동속도를 무시하여, 충전층에서 적용되는 Ergun식을 다차원으로 확장하여 사용하였다[3].

$$-\nabla P = (f_1 + f_2 |\vec{G}_g|) \vec{G}_g \quad (1)$$

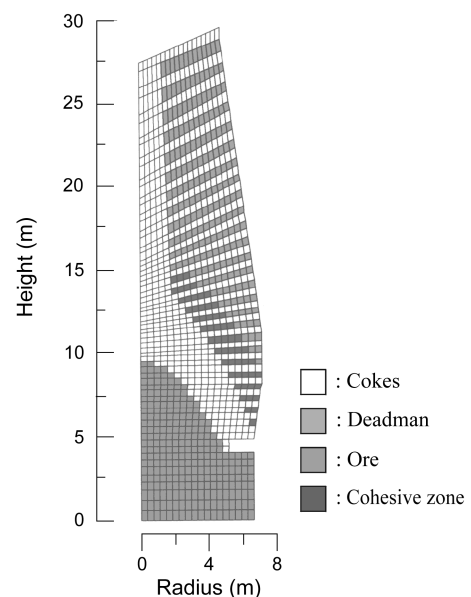


Fig. 2. An example of size and element mesh of a blast furnace.

여기서 $f_1=150\frac{(1-\epsilon_m)^2\mu_g}{(\phi_m dp_m)^2\epsilon_m^3\rho_g}$, $f_2=1.75\frac{(1-\epsilon_m)}{\phi_m dp_m\epsilon_m^3\rho_g}$ 이다. P 는 기체압력,

G_g 는 기체 질량 플럭스, ρ_g 는 기체 밀도이고, μ_g 는 기체 점도이다. dp_m , ϵ_m , ϕ_m 은 각각 물질번호가 m 인 고체 입자의 입경, 공극률과 형상계수이다. 식 (1)은 우변의 일부를 식 (2)와 같이 기체 흐름 저항(a_g)으로 정의하면 식 (3)이 된다.

$$a_g = \frac{1}{f_1 + f_2 |\vec{G}_g|} \quad (2)$$

$$-a_g \nabla P = \vec{G}_g \quad (3)$$

식 (3)에 미분(divergence)을 취한 식을 S_1 이라 둔다.

$$S_1 = \nabla \cdot (-a_g \nabla P) - \nabla \cdot \vec{G}_g = 0 \quad (4)$$

2-2-2. 고체상의 흐름

고체의 운동속도는 고체 속도 포텐셜의 구배에 비례하여 하강한다고 가정한다[7].

$$-a_s \nabla \psi = \vec{G}_s \quad (5)$$

$$S_2 = \nabla \cdot (-a_s \nabla \psi) - \nabla \cdot \vec{G}_s = 0 \quad (6)$$

여기서, ψ 는 고체 속도 포텐셜, a_s 는 고체 흐름 저항이고, \vec{G}_s 는 고체 질량 플럭스이다.

2-2-3. 에너지 수지와 물질수지

에너지 수지식은 기체상과 고체상으로 나누어 모형화하고, 고체상은 코크스와 철광석을 포함한다. 반응은 고체상에서만 일어난다고 가정하여 고체상의 에너지 수지식에 반응열을 포함시키고, 기체와 고체사이에는 상간 열전달을 고려한다.

$$S_3 = -D_g \left[\frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) \right] + Cp_g \left[G_{g,z} \frac{\partial T_g}{\partial z} + G_{g,r} \frac{\partial T_g}{\partial r} \right] - h_{gs} \frac{6(1-\epsilon_m)\phi_m}{dp_m} (T_g - T_s) = 0 \quad (7)$$

$$S_4 = -D_s \left[\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \right] + Cp_s \left[G_{s,z} \frac{\partial T_s}{\partial z} + G_{s,r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right] - h_{gs} \frac{6(1-\epsilon_m)\phi_m}{dp_m} (T_g - T_s) + \sum (-\Delta H_N) \mathfrak{R}_N = 0 \quad (8)$$

기체성분의 물질수지식은 화학반응에 의한 생성과 소멸을 고려한다.

$$S_i = -D_i \frac{P}{RT_g} \left[\frac{\partial^2 Y_i}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) \right] + \left[G_{g,z} \frac{\partial Y_i}{\partial z} + G_{g,r} \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right] + \sum \mathfrak{R}_N = 0, \quad i=5-9 \quad (9)$$

여기서, $Y_{i,i=5-9}=Y_{O_2}, Y_{CO}, Y_{CO_2}, Y_{H_2}, Y_{H_2O}$

여기서, T 는 온도, D 는 열전도도, D 는 기체 성분의 확산계수, h_{gs} 는 기체와 고체간의 열전달계수, Cp 는 열용량, ΔH 는 반응열, \mathfrak{R} 은 화학반응 속도를 의미하고, N 은 Table 1 중에서 해당하는 반응번호(reaction number)이다. 또한 Y 는 기체성분의 분율이며 R 은 기체상수이다.

2-2-4. 철광석 환원율

구형입자의 표면으로부터 중심으로 진행되는 철광석 환원반응은 Table 1과 같이 철광석 온도 848 K 이상에서 적철광(hematite; Fe_2O_3), 자철광(magnetite; Fe_3O_4), wustite(FeO) 그리고 철(Fe)순으로 단계별로 환원되어 들어가거나, 온도 848 K 이하에서 적철광, 자철광 그리고 철순으로 환원된다. 철광석 환원이 각 요소의 반응량에 의해 고로 상부에서 하부로 축 방향으로만 변화한다고 가정하면, Table 1의 $N=3/4, 5/6, 7/8$ 반응

Table 1. Chemical reaction and kinetics

Reaction number (N)	Reaction	Kinetics
1/2	$C(s) + CO_2(g) / H_2O(g) \rightarrow CO(g) + CO(g) / H_2(g)$	$\mathfrak{R}_N = \frac{146.3(1-\epsilon_m)k_N PY_i}{dp_m(T_g + T_s)}, i=7, 9[6]$
3/4	$3 Fe_2O_3(s) + CO(g) / H_2(g) \rightarrow 2 Fe_3O_4(s) + CO_2(g) / H_2O(g)$	$V_N = \pi dp_m^2 k_N \frac{P}{R_g T_g} \left(Y_i - \frac{Y_{i+1}}{K_N} \right)$
5/6	$1.188 Fe_3O_4(s) + CO(g) / H_2(g) \rightarrow 3.752 Fe_{0.95}O(s) + CO_2(g) / H_2O(g)$	$\mathfrak{R}_N = \frac{6(1-\epsilon_m)}{\pi dp_m^3} V_N, i=6, 8[2]$
7/8	$Fe_{0.95}O(s) + CO(g) / H_2(g) \rightarrow 0.95 Fe(s) + CO_2(g) / H_2O(g)$	
9/10	$0.25 Fe_3O_4(s) + CO(g) / H_2(g) \rightarrow 0.75 Fe(s) + CO_2(g) / H_2O(g)$	

의 각 철광석 환원율(F_H)은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다[2, 10].

$$S_H = \frac{dF_H}{dz} = \frac{6(1-\epsilon_m)}{\pi dp_m^3} \frac{\Sigma V_N}{G_o X_H}, \quad H=10-12 \quad (10)$$

여기서, $F_{H,H=10-12}=F_M, F_W, F_F$

여기서, V 는 철광석 1개당 환원 반응 속도, G_o 는 철광석 질량 플럭스이다. X_H 는 적철광 1 kg 환원시 각 H환원단계에서 떨어져 나간 산소의 kg-atom수이다. 그래서 Table 1의 $N=3/4$ 반응 단계에서 X_M 은 2.087×10^{-3} kg-atomO/kg $_{Fe_2O_3}$ 가 된다. 그리고, 철광석온도 848 K 이상에서 $N=5/6$ 단계의 X_W 는 $1.6835 \times X_M$ kg-atomO/kg $_{Fe_2O_3}$ 이며 $N=7/8$ 단계의 X_F 는 $6.3165 \times X_M$ kg-atomO/kg $_{Fe_2O_3}$ 가 되고, 철광석온도 848 K 이하에서 $N=9/10$ 단계의 X_F 는 $8.0 \times X_M$ kg-atomO/kg $_{Fe_2O_3}$ 가 된다.

총괄 환원율(TF)은 848 K 이상에서 $TF=0.1111 F_M + 0.1871 F_W + 0.7018 F_F$ 이고, 848 K 이하에서 $TF=0.1111 F_M + 0.8889 F_F$ 이다. 따라서, 철광석 입자가 완전히 환원되면, 각 단계의 환원율이 모두 1이 되어, 결국 총괄 환원율은 1이 된다.

2-3. 유한요소법의 정식화

식 (4), (6)-(9)의 9개 미분방정식(\vec{S})에 가중함수(\vec{W} : weighting function)를 곱하여 계의 전구간(Ω)에 대하여 적분하면 Weak form인 식 (11)이 된다. 이때 가중함수는 함수값이 주어진 경계에서는 영(zero)이 되는 모든 함수군에 해당한다.

$$\int (\vec{W}_i \cdot \vec{S}_i) d\Omega = 0, \quad i=1-9 \quad (11)$$

예를 들어, 철광석요소에 해당하는 고체의 에너지수지식(S_4)에 대하여 구체적으로 나타내어 보자. Table 1의 $N=3-10$ 의 철광석 반응식은 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathfrak{R}_N = \frac{6(1-\epsilon_m)}{dp_m} \left(\frac{P}{RT_g} \right) k_{o,N} \exp \left(\frac{E_N}{RT_g} \right) \left(Y_i - \frac{Y_{i+1}}{K_{o,N} \exp(E'_N / RT_g)} \right), \quad i=6 \text{ if } N \text{ is odd} \\ i=8 \text{ if } N \text{ is even} \quad (12)$$

식 (11)의 2계 미분을 포함한 항에 divergence theorem($\int_{\Omega} \nabla f d\Omega = \int_{\Gamma} f \cdot n d\Gamma$)을 적용하면 식 (13)과 같다.

$$\int [W_4 \cdot S_4] d\Omega = \int \left[\frac{\partial W_4}{\partial z} \cdot D_s \frac{\partial T_s}{\partial z} + \frac{\partial W_4}{\partial z} \frac{1}{r} D_s \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \right] d\Omega - \int \left[W_4 \cdot D_s \frac{\partial T_s}{\partial z} + W_4 \cdot \frac{1}{r} D_s \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \right] d\Gamma$$

$$\begin{aligned}
& + \left[W_4 \cdot C_{p_s} G_{s,z} \frac{\partial T_s}{\partial z} + W_4 \cdot C_{p_s} D_{s,r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right] d\Omega \\
& + \left[W_4 \cdot h_{gs} \frac{6(1-\varepsilon_m)\phi_m}{dp_m} (T_g - T_s) \right] d\Omega \\
& + \left[W_4 \cdot \sum_N \left\{ (-\Delta H_N) \left(\frac{6(1-\varepsilon_m)}{dp_m} \frac{P}{RT_g} k_{o,N} \exp\left(\frac{E_N}{RT_g}\right) \right) \right\} \right] d\Omega = 0 \\
& \left(Y_i - \frac{Y_{i+1}}{K_{o,N} \exp(E_N'/RT_s)} \right) \Bigg] d\Omega = 0 \quad (13)
\end{aligned}$$

여기서, Γ 는 계의 경계를 의미한다.

계를 유한개의 절점으로 나누고, 각 적분점에서의 가중함수와 미지변수는 절점들 사이에서 구간 연속 함수인 보간함수를 내삽하여 사용한다. 보간함수로는 Lagrange 쌍1차 함수를 사용한다. 이때 가중함수와 미지변수를 동일한 보간함수로 사용하면 Galerkin법이 된다. 계의 전 절점을 η 라 하고 계의 경계에 위치한 절점들 중에서 i 식의 경계조건이 Dirichlet Condition($\Gamma_{g,i}$)인 절점을 $\eta_{g,i}$ 라 하면, 가중함수의 선택조건에 의하여 다음 조건 [$W_i^h = 0$ on $\eta_{g,i}$]이 성립된다. 따라서 구간 연속 가중함수(W^h)와 미지변수(u^h)는 다음과 같이 표시된다.

$$W_i^h = \sum_{A \in \eta - \eta_{g,i}} N_A C_{A,i} \quad (14)$$

$$u_i^h = \sum_{B \in \eta - \eta_{g,i}} N_B d_{B,i} + \sum_{B \in \eta_{g,i}} N_B g_{B,i} \quad (15)$$

여기서, $\vec{u} = \{u_i\} = \{P, \psi, T_g, T_s, Y_{O_2}, Y_{CO}, Y_{CO_2}, Y_{H_2}, Y_{H_2O}\}$ 여기서, N_A 와 $C_{A,i}$ 는 A절점에서의 보간함수와 상수이고, N_B, d_B 와 g_B 는 각각 B절점에서의 보간함수, 미지수들과 기지수들이다. 식 (13)에 식 (14)와 식 (15)를 대입하고 Fig. 3의 경계조건들을 적용하면 식 (16)-(18)과 같이 미지수의 항($K_{A,B}$)과 기지수의 항($F_{A,i}$)으로 표현할 수 있다[8].

$$\int [W_4 \cdot S_4] d\Omega = K_{A,B} + F_{A,i} = 0, \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
K_{A,B} = & \int \left(\frac{\partial N_A}{\partial z} \cdot D_s \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} \frac{\partial N_B}{\partial z} d_{B,4} \right) d\Omega \\
& + \int \left(\frac{\partial N_A}{\partial r} \cdot \frac{1}{r} D_s \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} r \frac{\partial N_B}{\partial r} d_{B,4} \right) d\Omega \\
& + \int \left(N_A \cdot C_{p_s} G_{s,z} \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} \frac{\partial N_B}{\partial z} d_{B,4} \right) d\Omega \\
& + \int \left(N_A \cdot C_{p_s} G_{s,r} \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} \frac{\partial N_B}{\partial r} d_{B,4} \right) d\Omega \\
& + \int \left(N_A \cdot h_{gs} \frac{6(1-\varepsilon_m)\phi_m}{dp_m} \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} N_B d_{B,3} \right) d\Omega \\
& - \int \left(N_A \cdot h_{gs} \frac{6(1-\varepsilon_m)\phi_m}{dp_m} \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} N_B d_{B,4} \right) d\Omega \\
& + \int \left[N_A \cdot \sum_N \left\{ (-\Delta H_N) \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} \left(\frac{6(1-\varepsilon_m)}{dp_m} \frac{P}{RN_B d_{B,3}} k_{o,N} \exp\left(\frac{E_N}{RN_B d_{B,4}}\right) \right) \right\} \right. \\
& \left. \left(N_B d_{B,i} - \frac{N_B d_{B,i+1}}{K_{o,N} \exp(E_N'/RT_s)} \right) \right] d\Omega' + L_{A,B} \text{ on } A \in \eta - \eta_{g,4} \quad (17)
\end{aligned}$$

여기서,

$$L_{A,B} = \int \left(N_A \cdot C_{p_s} G_s \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} N_B d_{B,4} \right) d\Gamma_{top}, \text{ on } A \in \Gamma_{top}$$

$$L_{A,B} = \int \left(N_A \cdot U_{sw} \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} N_B d_{B,4} \right) d\Gamma_{wall}, \text{ on } A \in \Gamma_{wall}$$

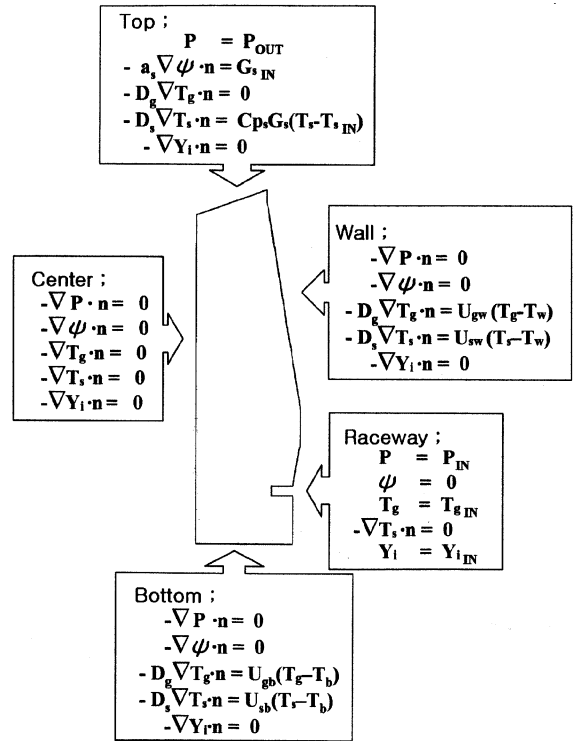


Fig. 3. Boundary condition of a blast furnace.

$$L_{A,B} = \int \left(N_A \cdot U_{sb} \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} N_B d_{B,4} \right) d\Gamma_{bottom}, \text{ on } A \in \Gamma_{bottom}$$

$$L_{A,B} = 0, \text{ on } A \in \Gamma_{center} \text{ and inside nodes}$$

$$F_{A,i} = - \int \left(N_A \cdot C_{p_s} G_s \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} N_B T_{s,IN} \right) d\Gamma_{top}, \text{ on } A \in \Gamma_{top}$$

$$F_{A,i} = - \int \left(N_A \cdot U_{sw} \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} N_B T_w \right) d\Gamma_{wall}, \text{ on } A \in \Gamma_{wall}$$

$$F_{A,i} = - \int \left(N_A \cdot U_{sb} \sum_{B \in \eta - \eta_{g,4}} N_B T_b \right) d\Gamma_{bottom}, \text{ on } A \in \Gamma_{bottom}$$

$$F_{A,i} = 0, \text{ on } A \in \Gamma_{center} \text{ and inside nodes} \quad (18)$$

여기서, U 는 총괄 열전달 계수이며 T_w 와 T_b 는 각각 노벽과 노저용선의 온도이다.

2.4. Newton-Raphson Method

식 (16)을 선형화하여 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{A,B}(\vec{d}_o) + \left[\frac{\partial K_{A,B}}{\partial \vec{d}} \right]_{\vec{d}_o} \Delta \vec{d} + F_{A,i} = 0 \quad (19)$$

초기에 해를 가정하여 \vec{d}_o 로 놓고, 식 (19)를 변형하면 다음과 같다.

$$\left[\frac{\partial K_{A,B}}{\partial \vec{d}} \right]_{\vec{d}_o} \Delta \vec{d} = -K_{A,B}(\vec{d}_o) - F_{A,i} \quad (20)$$

식 (20)을 풀어서 $\Delta \vec{d}$ 를 구한 다음, $\vec{d}_o = \vec{d}_o + \Delta \vec{d}$ 로 수정하고, 식 (20)의 우변이 허용오차범위 이내가 될 때까지 반복 계산한다.

2.5. 환원율 계산

식 (10)은 전진 차분법(Forward Euler Method)으로 탑 상부에서 장입되는 철광석의 환원율을 초기조건으로 하고, 철광석 요소에서 생성된 CO_2 와 H_2O 의 몰수로부터 얻어진 환원된 산소의 kg-atom수를 해당요소

상부 절점의 환원율에 누적하여 하부 절점의 환원율값을 계산하였다.

3. 연구 방법

3-1. 유한요소망

유한요소망은 Fig. 2와 같이 고로를 실제크기로, 높이는 노지의 출선구 레벨로부터 고체 장입물의 최상단인 29.5 m로, 내부반경은 노지에서 6.7 m, belly에서 7.2 m, 상부에서 4.8 m로, 설정하여 연소대의 크기에 따라 1,231-1,233의 격자점과 1,144-1,148개의 요소로 구성하였다.

3-2. 요소내부의 물질종류와 물리적 성질

각 요소의 고체종류, 고체입자크기와 기체저항에 따른 파라메타들은 다음과 같이 설정하였다. 먼저 내부요소를 크게 코크스층과 철광석층으로 나누었다. 코크스층의 입경은 실제 고로 내부와 유사하게 설정하여 고로 상부에서 연화용착대 윗층까지는 50 mm로 동일하게 하였고 연화용착대 아래에서 풍구높이까지는 50-20 mm로 등 간격으로 점차 감소시켰으며 그 아래는 20 mm로 일정하게 두었고, 코크스층 중 데드맨영역은 코크스의 입경과 병행하여 통기성을 달리 정의하였다[9]. 철광석층의 입경은 모두 19.1 mm로 일정하게 두었고, 그 중 연화용착대 영역의 통기성을 달리 정의하였다. 각 요소에 정의된 파라메타들은 기체 흐름, 화학반응 및 상간 열전달 등의 계산시에 용이하게 사용할 수 있도록 Table 2와 같이 각 요소에 물질번호(material number; m)들을 부여하였다.

3-3. 화학반응과 주요성분

코크스와 미분탄은 CO_2 와 H_2O 뿐만 아니라 O_2 와도 반응한다. 그러나 풍구에서 취입된 O_2 는 연소대 내부에서 모두 CO 로 반응한 것으로 가정하여, 코크스 연소반응은 Table 1의 반응 N=1/2만을 고려하였다. 그리고, 철광석 반응은 고체온도와 철광석 환원율들에 따라 Table 1의 N=3-10 반응들 중에서 선택하여 일어나도록 계산하였다[10]. 그래서 본 연구에서 고려한 기체 성분들과 고체 성분들은 Table 3과 같고, 이 중 질소성분의 분율은 계산된 다른 기체 성분 분율의 합으로부터 계산하였다.

3-4. 경계조건

고로의 경계조건은 Fig. 3에 나타내었고, 경계조건에 필요한 값들은 용선(pig) 생산량 8,800 ton/day를 기준으로 한 실제 조업조건인 Table 4로부터 계산하여 Table 5에 수록하였다.

기체는 공기 5,947 Nm^3/min , 산소 17,000 Nm^3/hr 와 약간의 수분이 도

Table 2. Computational particle parameter of element

Bed	Material number	Position	Diameter (mm)	Void fraction	Shape factor
Cokes	1	Central column	50	0.45	0.90
	2	Top-cohesive zone	50	0.43	0.90
	3-6	Cohesive zone-tyere level	20-43	0.43	0.90
	7-9	Deadman	20-35	0.10-0.25	0.90
Ore	10	Cohesive zone	19.1	0.10	0.84
	11-12	Ore bed	19.1	0.20-0.36	0.84

Table 3. Species of gas and solid

Phase	Gas	Ore	Cokes
Species	CO	Fe_2O_3	C
	CO_2	Fe_3O_3	
	H_2	FeO	
	H_2O	Fe	
	N_2		

Table 4. Actual operating condition

Operating condition	Value operated
Blast volume rate	5,947 Nm^3/min
Ore	144,388 ton/day
Cokes ratio	325.5 kg/ton-pig
Pulverized coal ratio	182.7 kg/ton-pig
O_2	17,000 Nm^3/hr
Pressure at bosh	3.50×10^5 Pa
Pressure at top	2.61×10^5 Pa

Table 5. Calculating data used

Boundary value	Value used
G_{sIN}	3.017 $\text{kg/m}^2\text{sec}$
P_{IN}	3.50×10^5 Pa
P_{OUT}	$2.6-2.8 \times 10^5$ Pa
T_{gIN}	2,300 K
Y_{COIN}	0.396
Y_{CO2IN}	0.000
Y_{H2IN}	0.047
Y_{H2OIN}	0.000

입되고 이 중 산소와 수분이 연소대 내부에서 모두 반응한다고 가정하였다. 그래서 연소대 경계에서 기체의 총 도입속도는 177.418 kg/sec 가 된다. 고로 내부를 통과하는 기체량이 동일하도록 연소대 경계에서 압력은 실측값인 3.50×10^5 Pa를 사용하고, 고로 상부의 압력은 조절하였다.

철광석은 초속 166.53 kg/sec 로 공급되며, 코크스와 미분탄을 합한 연료공급량은 초속 51.78 kg/sec 로 이는 용선 1 ton당 연료 508.2 kg의 공급을 의미한다. 그래서 고체의 총 장입속도는 218.31 kg/sec 가 되어서 고로 상부에서 고체 장입 플럭스는 3.017 $\text{kg/m}^2\text{sec}$ 가 되고, 연소대 경계에서는 고체속도 포텐셜을 영으로 두었다.

기체온도는 연소대 경계에서는 추정된 약 2,300 K를 사용하였고, 고로 상부 경계 이상에서는 반응에 의한 생성 또는 소멸되는 열이 없고 임의로 제거되는 열량이 없다고 가정하여 기체열속이 영(Zero)인 노이만 경계조건을 사용하였다. 고체온도는 고로 상부에서는 상온인 고체 장입속도에 의한 열전달이 일어나고 연소대 경계에서는 온도 구배가 영인 Dankwert's condition을 적용하였다. 그리고, 노벽은 냉각수로 매시간당 일정한 열량이 제거되고, 고로 하부에서는 용선유출에 의한 열전달이 일어나므로, 기체와 고체 모두 총괄 열전달 계수를 사용하여 계 외부로 열전달이 이루어지도록 설정하였다. 기체 성분은 앞서 설명한 바와 같이 연소대 내부로 도입된 산소와 수분이 모두 반응한 것으로 가정하여 연소대 경계에서의 값을 계산하였고, 고로 상부에서는 농도 구배가 영(Zero)인 노이만 경계조건을 적용하였다.

장입되는 철광석은 58.6%의 Fe_2O_3 와 25.3%의 Fe_3O_4 를 함유하고 있으며, 나머지는 모두 불순물로 가정하여 고로 상부에서의 철광석의 초기 환원율을 설정하였다.

3-5. 계산과정

전 계산과정을 Fig. 4에 나타내었다. 우선 초기의 기체속도($\vec{G}_{g,old}$) 값을 임의로 결정하고, 식 (2)에 의해서 a_g 를 구한 다음, 식 (4)을 풀어서 각 절점에서의 압력을 구하였다. 이 압력값의 각 방향에 대한 미분값을 취하여 다시 식 (3)에 의해 요소내부의 적분점에서의 새로운 기체속도($\vec{G}_{g,new}$)를 계산하였다. 이렇게 계산된 기체유속은 수렴조건($\sum_{i=1}^{element} |\vec{G}_{g,new} - \vec{G}_{g,old}|$)이 허용오차 범위 이내가 될 때까지 $\vec{G}_{g,new}$ 값을 $\vec{G}_{g,old}$ 값으로 사용하여 반복 계산하였다. 고체속도도 식 (6)을 풀어서 고체속도 포텐셜을 구하고 이것을 미분하여 식 (5)에 의해 요소내부 적분점에

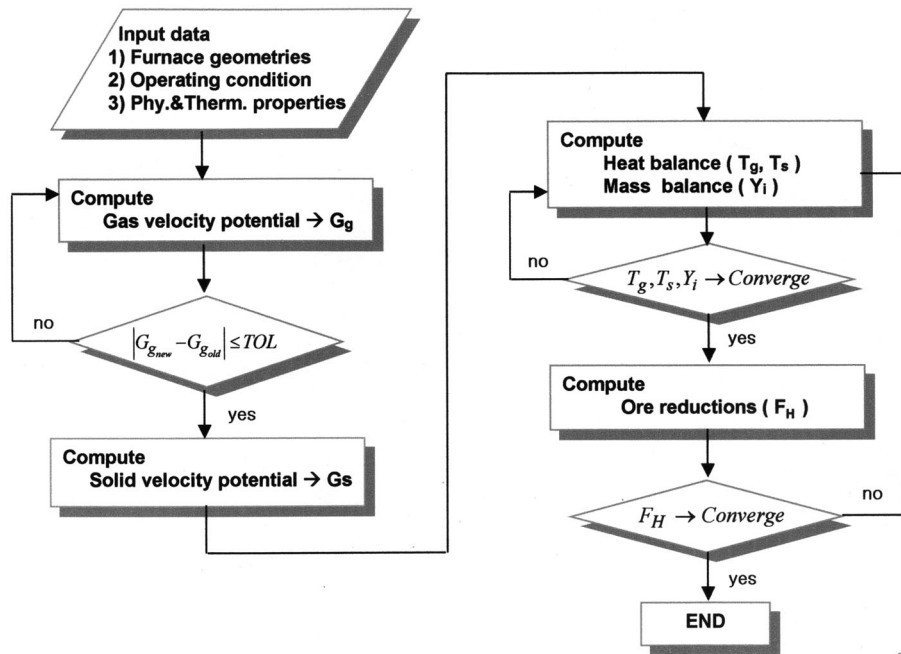


Fig. 4. Program procedure diagram.

서의 고체속도를 구하였다.

열수지식과 물질수지식은 동시 계산하였다. 기체 속도값과 고체 속도 값은 이미 구해진 각 적분점의 값을 사용하였고 철광석 환원율은 임의로 가정하여 계산을 시작하였다. 코크스층 반응은 Table 1 중의 N=1/2 반응을 모두 선택하였고 철광석층 반응은 각 요소마다 고체온도 848 K 이상에서 N=3-8 반응 중에서, 848 K 이하에서 Table 1의 N=3/4, 9/10 반응 중에서 철광석 환원율에 따라 선택하였고, 반응속도는 요소마다 정의된 물질번호에 해당하는 입자의 파라메타들을 선택된 화학반응식에 적용하여 계산하였다. 기체온도와 농도, 그리고 고체온도는 허용오차범위 이내로 수렴할 때까지 반복 계산하였다. 철광석의 환원율은 이미 물질수지식에서 계산된 철광석층에서 환원된 산소의 kg-atom수의 합을 식 (10)에 대입하여 계산하였다.

계산된 환원율을 사용하여 고체온도, 기체온도, 기체성분농도를 계산하고, 다시 철광석 환원율을 반복 계산하여, 온도, 농도, 환원율의 모든 변수값을 허용오차 범위 내로 수렴시켰다.

계산을 위하여 FORTRAN언어를 사용하였으며, 기체속도식, 고체속도식, 열수지식과 물질수지식은 Newton's method로 반복 계산하였고, 철광석 환원율은 전진 차분법으로 계산하였다. 모든 수렴척도는 10^{-10} 이하로 하였으며, 계산시간은 Kayak XA series 0503에서 20분 정도 소요되었다.

4. 결과 및 고찰

고로하부에서 미분탄 취입으로 인해 고체 장입물 두께, 송풍 조절, 연소대 심도크기, 테드맨 공극률 등 여러 가지 요인들이 변화하게 된다. 그 중 큰 영향을 미치는 것은 연소대 심도크기와 테드맨 공극률 변화이다.

4-1. 연소대 심도 변화에 따른 고로 내부 상태분석

연소대 심도크기 변화에 따른 고로 내부 상태변화를 고찰하기 위하여, 연소대의 크기를 축 방향의 크기는 0.8 m로 일정하게 하고 반경방향으로만 1.49 m, 1.12 m, 0.75 m로 각기 설정하여, 고로 하부 요소를 Fig. 5와 같이 구성하였다.

Fig. 6은 기체도입속도를 177.418 kg/sec로 동일하게 유지하였을 때,

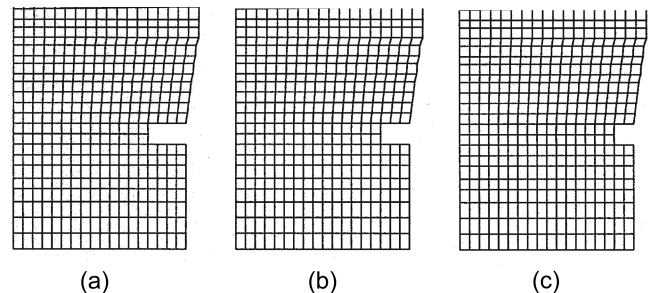


Fig. 5. Element mesh around raceway of a blast furnace for varying size of raceway depth in radius direction.

[size of raceway depth; (a) 1.49 m, (b) 1.12 m, (c) 0.75 m]

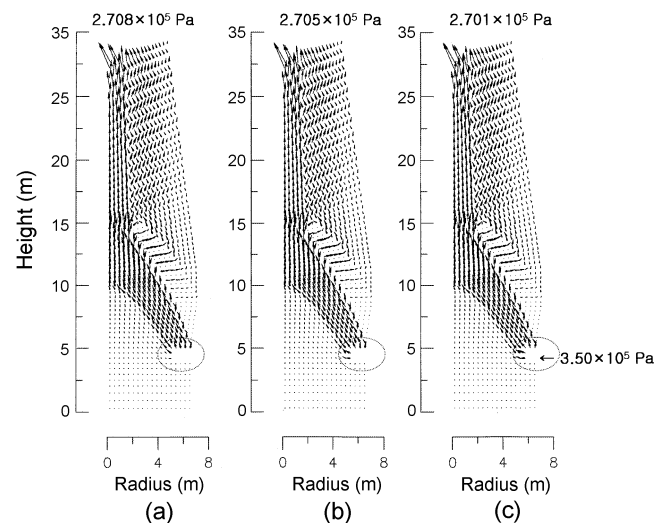


Fig. 6. Gas velocity distribution for varying size of raceway depth.

[size of raceway depth; (a) 1.49 m, (b) 1.12 m, (c) 0.75 m]

연소대 심도크기 변화에 따른 기체속도분포 결과들이다. 그림중 화살표가 속도크기를 나타내며, 점선으로 표시한 부분중 빈 셀 부분이 연소대

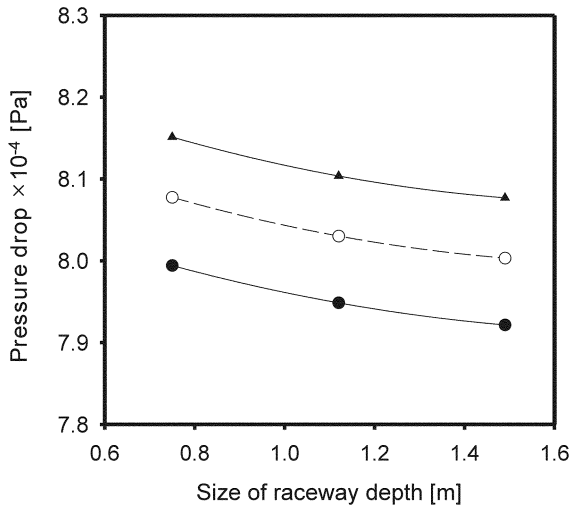


Fig. 7. Pressure drop for varying size of raceway depth and void fraction of deadman.

[void fraction of deadman; ●: 0.25, ○: 0.20, ▲: 0.15]

부분으로 연소대 경계에서의 기체속도는 연소대 심도크기가 감소함에 따라 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 연소대 심도크기 감소로 인한 연소대 표면적 감소에 기인한 것이다.

Fig. 7은 연소대 경계의 압력과 고로 상부의 압력차($\Delta P = P_{IN} - P_{OUT}$)를 연소대 심도크기 변화에 따라 표현한 그림으로, 연소대의 심도크기와 데드맨의 기공률이 감소할수록 압력강하가 증가되는 결과를 보여준다. 이는 일반적으로 풍구에서 기체압력을 $4 \times 10^5 \text{ Pa}$ 로 일정하게 하는 고로 조업시 미분탄의 취입을 증가시키에 따라 고로 상부의 압력을 감소시켜야 동량의 기체의 흐름량을 유지할 수 있다는 것을 보여준다.

Fig. 8은 고로 내의 기체 온도 분포를 연소대 심도 크기 변화에 따라 나타낸 그림으로, (a)에서는 연소대 심도 크기가 1.49 m일 때 1,800-2,000 K 구역이 노중심(반경 0 m)에서 높이 방향으로 7 m 지점까지인 반면, 연소대 심도 크기가 1.12 m인 (b)에서는 1,800-2,000 K 구역이 노중심(반경 0 m)에서 높이 방향으로 6.3 m 지점까지, 연소대 심도 크기가 0.75 m인 (c)에서는 1,800-2,000 K 구역이 노중심(반경 0 m)에서 높

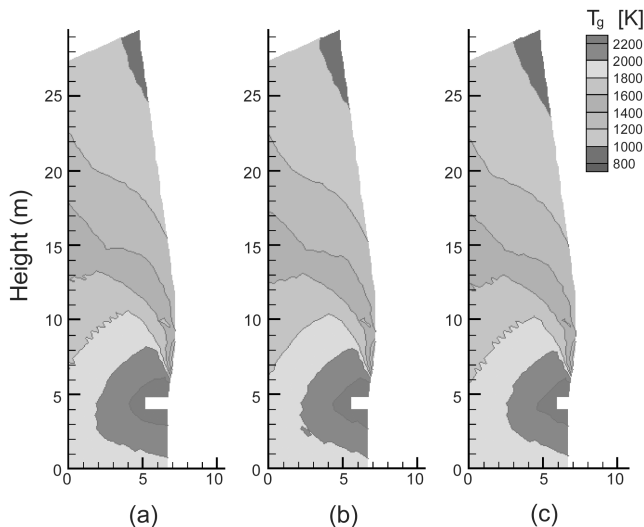


Fig. 8. Gas temperature for varying size of raceway depth.

[size of raceway depth; (a) 1.49 m, (b) 1.12 m, (c) 0.75 m]

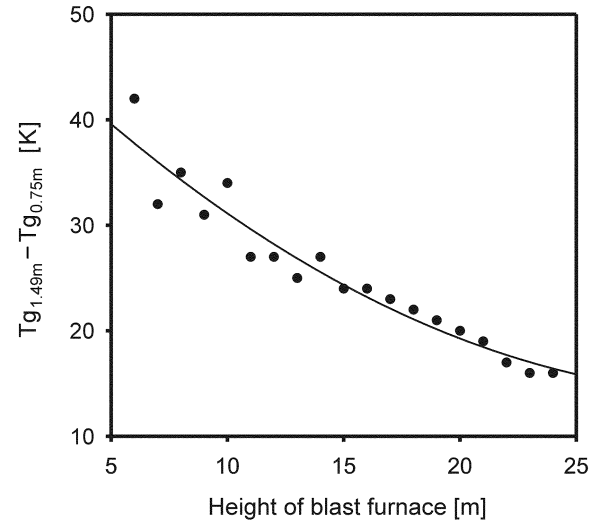


Fig. 9. Difference of gas temperature at z-axis with 1.49 raceway depth from that with 0.75 m.

이 방향으로 5.8 m 지점까지였다. 즉, 연소대 심도 크기가 감소함에 따라 고로 하부 중심으로의 열전달이 현저히 감소하였고, 고로 전체의 기체온도가 낮아지는 것을 알 수 있었다.

이러한 경향을 좀더 정확하게 파악하기 위해서 연소대의 심도 크기가 1.49 m와 0.75 m일 때 Fig. 8의 노중심(반경 0 m)에서 높이방향으로 기체 온도차($\Delta T = T_{1.49m} - T_{0.75m}$)를 고로 축 높이에 따라 Fig. 9에 나타내었다. 연소대 심도 크기는 고로의 상부보다 하부에 크게 영향을 주는 것을 알 수 있었으며 이는 연소대 심도가 짧아지면서 연소대에서 발생한 고온의 가스가 고로내를 통과하기 위해서 저항을 크게 받게 되는데 그 이유가 있는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 연소대 경계에서 고로 중심방향의 고체온도를 확인하여 연소대의 심도 크기에 대하여 나타낸 그림이다. 본 수치해석시 연소대 경계에서 동량의 기체가 같은 온도 2,300 K로 도입되었음에도 불구하고, 연소대 경계에 위치한 고체온도는 저하되는 것으로 나타났다. 이는 미분탄 취입률이 증가함에 따라 연소대 내부에서 측정된 코크스의 온도가 감소하였다는 문헌[6]의 내용과 일치하였다.

Fig. 11은 연화 용착이 시작되는 철광석온도 1,100 °C 부근을 확인하

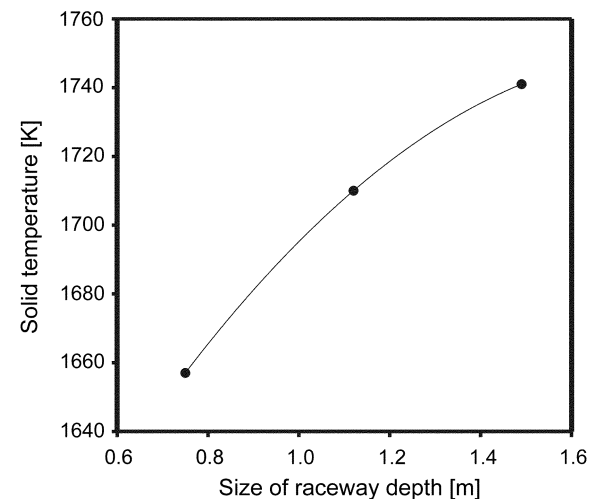


Fig. 10. Solid temperature on raceway verge for varying size of raceway depth.

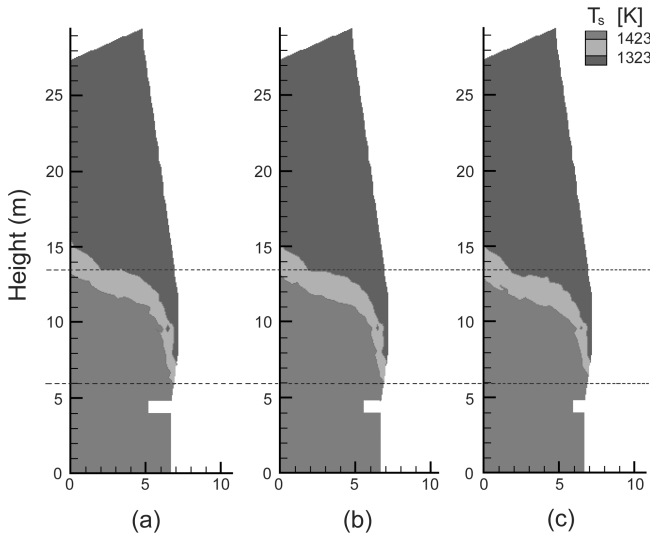


Fig. 11. Solid temperature between 1,323-1,423 K for varying size of raceway depth.

[size of raceway depth; (a) 1.49 m, (b) 1.12 m, (c) 0.75 m]

고자, 고체온도 1,323-1,423 K 구간을 나타낸 그림이다. 기억자 모양의 좁은 영역인 이 구간의 형성위치는 연소대 심도가 감소함에 따라 축 중심부는 보다 하부에서 형성되고 노벽측은 보다 상부에 위치하는 것으로 나타나, 그 영역의 길이가 짧아지는 것으로 나타났다. 따라서 연화용 착대는 철광석의 고체온도에 따라 형성되므로 그 길이는 짧아질 것으로 생각되어진다. 그 원인으로는 Fig. 6에서 연소대 심도가 감소함에 따라 연소대 경계를 통과하는 기체속도가 커져 연소대 상부에 위치한 고체로의 열전달을 증가시킨 것으로 보인다. 미분탄 취입 증가시 미분탄 연소율 85% 이하에서는 미연소 분이 고로 중심부에 쌓여서 실제 용선과 용융 슬래그가 노벽쪽으로 흐르게 되어 노벽의 온도를 상승시켜 고로의 수명을 단축시킨다는 문헌[5]의 결과와 더불어 실제 고로에서는 노벽측의 온도가 훨씬 증가할 것으로 생각되어진다.

4.2. 데드맨 기체흐름저항 변화에 따른 고로 내부 상태분석

미분탄 취입에 의해 일부 미연소 미분탄이 고로 하부의 데드맨 영역

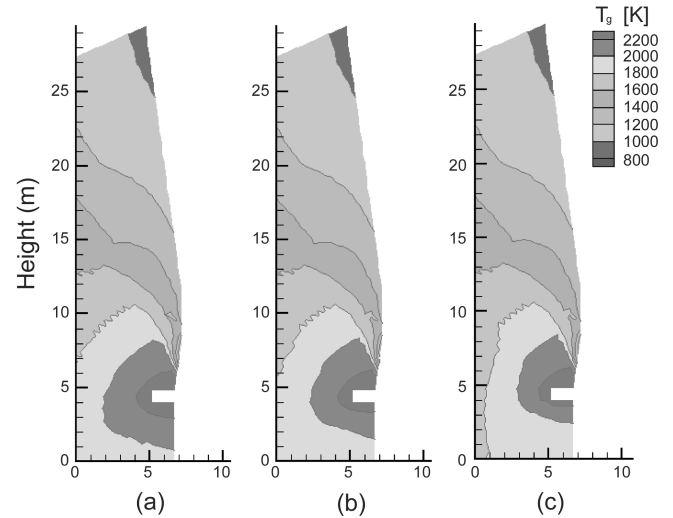


Fig. 12. Gas temperature for variety of deadman's air permeability. [void fraction of deadman; (a) 0.25, (b) 0.20, (c) 0.15]

에 축적됨에 따라 데드맨의 기체흐름 저항이 증가하게 된다. 따라서 데드맨의 기체흐름 저항에 따른 고로 내부의 변화를 살펴보기 위하여 데드맨 영역의 공극률을 0.10-0.25로 변화시켜 모사하였다. 모든 조건에서 기체와 고체는 동일한 양을 도입하였다.

Fig. 7에서 데드맨의 코크스 공극률을 0.25, 0.20, 0.15로 감소시킬 때 각각 고로 내부의 압력강하는 연소대 심도크기가 1.49 m로 일정할 때 각각 7.924×10^4 Pa, 8.003×10^4 Pa, 8.077×10^4 Pa로 증가하여 0.153×10^4 Pa 정도의 통기저항이 발생함을 알 수 있었다. 이것은 미분탄 취입량을 200 kg/ton-pig로 증가시킨 경우, 연소율은 20% 감소하고 그에 따라서 공극률이 감소하여 통기성 저항이 증가한다는 결과[11]와 비슷한 경향을 보여주고 있다. 따라서 본 연구결과는 미분탄 취입량 증대시 통기성 저항 발생원인을 정량화하고 대책을 마련하는데 유용하리라 생각되어진다. 또한, Table 2의 조건에서 계산된 고로 상부에서의 압력은 2.684×10^5 Pa- 2.708×10^5 Pa로 나타났다. 이것은 고로 상부에서 실측한 압력인 2.614×10^5 Pa와 거의 비슷하게 나타났으며, 이것으로부터 Fig. 7에 나타난 공극률 변화에 따른 압력 손실량의 계산 결과가 신뢰할 수 있는 것

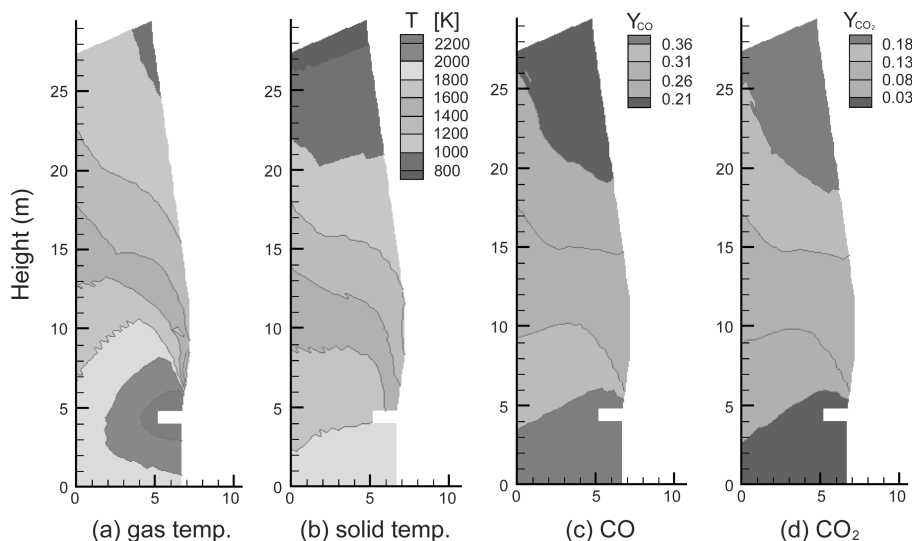


Fig. 13. Typical computational results of a blast furnace.

[size of raceway depth; 1.49 m, void fraction of deadman; 0.25]

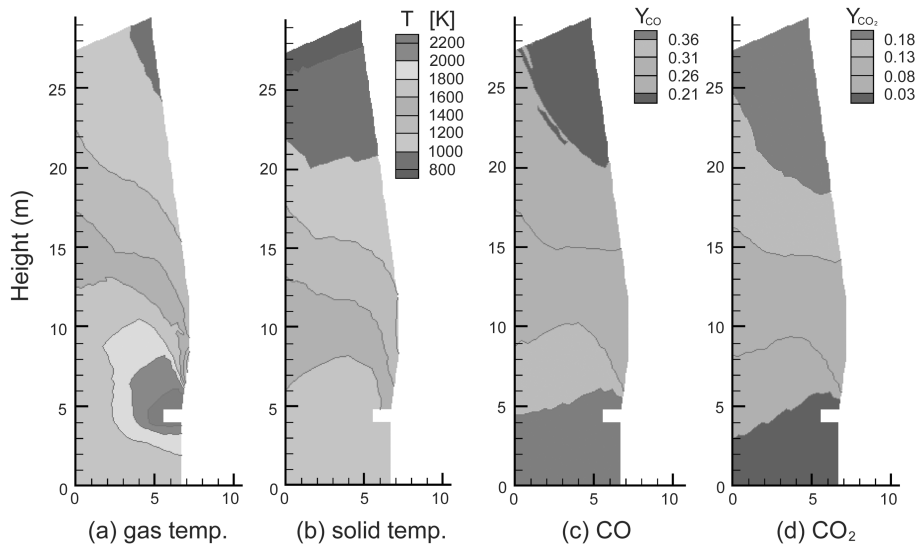


Fig. 14. Typical computational results of a blast furnace.

[size of raceway depth; 1.12 m, void fraction of deadman; 0.10]

임을 보여주고 있다.

Fig. 12는 연소대 심도 크기가 1.49 m일 때 테드맨 영역의 공극률을 변화시켜 계산한 기체온도 분포이다. 테드맨의 기체유속 감소는 주로 고로 하부의 기체온도를 급격하게 저하하였으나 상부의 온도에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 보인다. 그러나 고체온도는 기체온도와 다른 경향을 보였다. 고로 높이방향 15 m 위치에서 확인한 결과 공극률 감소에 따라 고체온도는 고로 중심측은 약간 저하하고 노벽측의 온도는 소폭 상승하는 것을 확인하였다. 이것은 테드맨 영역의 기체흐름 저항이 증가함에 따라 노벽으로 발달된 기체가 고체로의 열전달을 증가시킨 것으로 생각되어진다. 이것 또한 연소대 만큼 크지는 않지만 고체온도의 기울기를 감소시켜 용착대의 길이에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

Fig. 13은 연소대 심도 크기 1.49 m와 테드맨의 공극률 0.25로 설정한 계산결과를 나타내었다. Fig. 13의 (a)에서 기체 온도는 고온인 기체속도가 큰 축 중심부는 높고, 냉각이 일어나는 노벽측은 상당히 낮아지는데 반하여, (b)의 고체온도경사는 기체온도경사만큼 크지 않았고, 고체온도는 상부에서 하부로 진행할수록 높아졌다. 풍구에서 고로 반경방향으로 1.5 m에 위치한 연소대 경계에서 고체온도는 1,745 K이고 기체온도는 2,299 K이었다. 이 계산된 고체온도는 문헌[6]에서 보고한 같은 위치에서 코크스의 실측온도 1,600-1,800 K의 범위내의 값이다. 또한 계산된 고체온도는 기체온도의 75.9%이고, 이것은 일반적으로 알려진 연소대 내부의 코크스 온도가 기체온도의 약 75%라는 수치에 근접한 값이다[5]. Fig. 13의 (c)와 (d)는 각각 CO와 CO₂의 농도 분포이고, 고로 상부에서 계산된 각 농도는 약 0.20와 0.19로서 고로 조업시 고로 상부에서 배출되는 실측값인 23%와 22%와 비슷한 경향을 보인다.

Fig. 14는 연소대 심도크기 1.12 m와 테드맨의 공극률 0.10로 설정한 결과이다. Fig. 14의 고로 내의 온도는 Fig. 13보다 감소하였고, 특히 고로 하부에서의 온도가 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다. 고체온도 약 1,400 K의 등온선에서 고로 중심쪽의 온도경사가 감소하는 것으로부터 연소대 심도와 테드맨 공극률 감소가 용착대 길이 감소에 영향을 미칠 것으로 생각되어진다. 또 CO 농도분포는 고로 상부의 농도가 Fig. 13보다 조금 증가하는 것으로 나타났고 이는 고체온도 감소에 따라 상부에서 CO가스에 의한 철광석 환원량이 적어진 것에 기인한 것으로 생각되어진다.

Fig. 15는 연소대심도 1.12 m와 테드맨 공극률이 0.15일 때의 풍구로부터 반경방향의 온도를 확인한 결과와 그 위치에서의 실제 측정치의

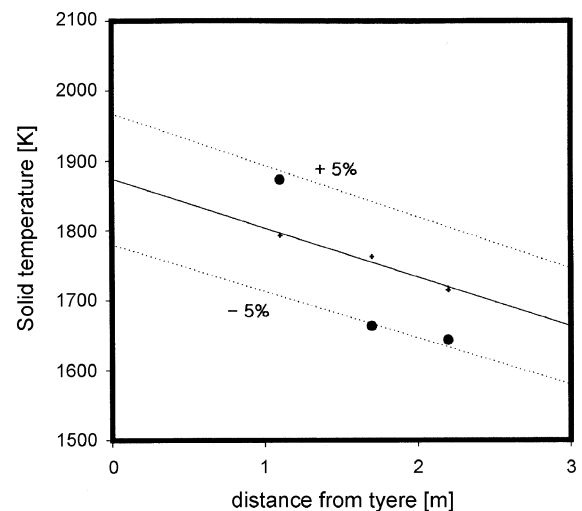


Fig. 15. Comparison with the calculated and measured solid temperature.

[size of raceway depth; 1.12 m, void fraction of deadman; 0.15; +; calculated, ●; measured, —; regression of calculated solid temp.]

값들을 비교한 그림으로 이 조건에서는 측정치는 계산치의 약 5% 내외의 오차를 가지는 것으로 나타났다. 이런 차이를 보이는 것은 실제 고로에서 공극률이 정확히 평가되지 못한 것에 기인한 것으로 생각된다.

5. 결 론

고로 하부의 미연소 미분탄 축적으로 인한 연소대의 심도 크기 감소와 테드맨의 기체흐름 감소가 고로의 정상상태에 미치는 영향을 고찰하였다.

고로 내부 현상들은 기체와 고체의 흐름 그리고 각 고체층에 상당하는 반응을 고려한 열전달과 물질전달로 모형화하여 FEM으로 discretize 하고 Newton's method로 반복 계산하였고, 철광석 환원율모형은 전진차분법을 사용하여 수치해를 얻었다. 계산 결과들은 실제 조업 측정치와 유사하였다.

분 축적에 의한 연소대 심도 크기 감소와 테드맨 통기성 저하는 모두

충진층 내의 압력강하를 증가시켰으며, 고로 내부의 온도를 감소시켰다. 그러나 데드맨 통기성 저하는 단지 고로 하부에만 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하지만 연소대 심도 크기 감소는 고로 전체 온도를 강하시킬 뿐만 아니라, 연소대 경계에서 증가된 기체 속도는 노벽 bosh위치의 고체 온도를 상승시켰다. 그 결과 연화용착대의 길이를 감소시켜 고로의 조업에 좋지 못한 영향을 줄 것으로 나타났다.

감 사

본 연구는 포항제철 기술연구소의 연구비지원으로 수행되었다.

사용기호

C_p	: heat capacity [kcal/kg K]
d	: constant unknown
d_p	: mean diameter of solid [m]
D	: thermal conductivity [kcal/m sec K]
D	: diffusivity [m^2/sec]
E	: activation energy [kcal/kmol]
E'	: activation energy at equilibrium [kcal/kmol]
F	: reduction index of ore [-]
g	: constant known
G	: mass flux [$kg/m^2 sec$]
h_{gs}	: heat transfer coefficient between gas and solid [kcal/kgmol K]
$-\Delta H$: heat of reaction [kcal/kgmol]
k_o	: Arrhenius pre-exponential factor [various]
K_o	: equilibrium pre-exponential constant [-]
n	: outward unit normal vector to the boundary
P	: pressure [Pa]
r	: radius coordinate [m]
R	: gas constant
\mathfrak{R}	: reaction rate [$kmol/m^3 sec$]
S	: equation
T	: temperature [K]
TF	: total reduction index of ore [-]
u	: variable
U	: overall heat transfer coefficient [$kcal/m^2 sec K$]
V	: reaction rate of ore for each [$kmol/sec EA$]
W	: weighting function
X_H	: kg-atom of oxygen removed from unit kg of hematite to H state
Y	: mol fraction of gas [-]
z	: axial coordinate [m]
μ	: viscosity [$kg/m sec$]
η	: node

ϵ	: void fraction [-]
ϕ	: shape factor [-]
Ψ	: solid velocity potential [$kg/m sec$]
Ω	: domain
Γ	: boundary

하첨자

b	: bottom
c	: cokes
g	: gas
i	: equation number
IN	: input
m	: material number
N	: reaction number
o	: ore
OUT	: output
r	: radial direction
s	: solid
w	: wall
z	: axial direction

참고문헌

1. Yun, C. K., Shim, J. D., Cho, Y. S., Kang, I. S. and Shim, Y. T.: "Mathematical Modeling of Fluid Flow and Temperature Profile in a Blast Furnace," KAIST(1983).
2. Lee, K. S. and Kim, H. S.: "Analysis of Steady State Behavior of a Blast Furnace using a Two Dimensional Model," Sogang Univ(1986).
3. Yagi, J., Takeda, K. and Omori, Y.: *Tetsu-to-Hagane*, **66**, 1888(1980).
4. Takatani, K., Inada, T. and Ujisawa, Y.: *ISIJ International*, **39**, 15(1999).
5. Chung, J. K., Huh, W. W. and Park, P. W.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 767(1999).
6. Chung, J. K. and Park, P. W.: *HWAHAK KONGHAK*, **36**, 743(1998).
7. Chen, J., Akiyama, T., Nogami, H., Yagi, J. and Takahashi, H.: *ISIJ International*, **33**, 664(1993).
8. Jeong, Y. O.: Ph.D. Dissertation, Houston Univ., Houston, U.S.A. (1989).
9. Austin, P. R., Nogami, H. and Yagi, J.: *ISIJ International*, **38**, 246(1998).
10. Hara, Y., Sakawa, M. and Kondo, S.: *Tetsu-to-Hagane*, **62**, 315(1976).
11. Sato, M., Murai, R., Ariyama, T., Maki, A., Shimomura, M. and Mori, K.: *Tetsu-to-Hagane*, **85**, 717(1999).
12. Austin, P. R., Nogami, H. and Yagi, J.: *ISIJ International*, **37**, 748(1997).
13. Miyasaka, N. and Kondo, S.: *Tetsu-to-Hagane*, **54**, 1427(1968).
14. Wang, G. X., Chew, S. J., Yu, A. B. and Zulli, P.: *ISIJ International*, **37**, 573(1997).