

Finite Element Method에 의한 고로내 분거동 해석

정진경[†] · 김정희* · 정용옥* · 박판욱**

포스코기술연구소

*부경대학교 화학공학과

**부산대학교 화학공학과

(2000년 9월 27일 접수, 2000년 11월 27일 채택)

Fines Behavior Analysis in Blast Furnace with Finite Element Method

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

Technical Research Laboratories, POSCO, 699 Kumhodong, Kwangyang, Chonnam 544-090, Korea

*School of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

**Department of Chemical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received 27 September 2000; accepted 27 November 2000)

요 약

미분탄 취입량 증가와 함께 고로내에서 분의 거동은 조업상태를 결정하는 중요한 요소가 되었다. 유동 충전층의 일종인 고로내에서 분농도 분포를 추정하기 위해서 Ergun식을 활용하여 고로내 가스유속 및 압력분포를 FEM(Finite Element Method)에 의해서 2차원으로 해석하였다. 분의 거동 해석은 분과 충전입자간 충돌저항력과 중력에 의한 저항 등을 고려한 모멘텀 밸런스를 구현한 실험실적으로 구한 분속도 추정식과 결합하여 해석하였다. 해석 결과 충전층내에서 분의 축적량을 결정하는데 있어서 분입도, 분발생량 및 분 밀도 순으로 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 풍구를 통해 샘플링된 분의 농도는 수치해석에 의해서 구한 농도값과 비교한 결과 매우 잘 일치하였으며 분 농도가 10%가 되는 지점은 1.5-2 m정도가 되는 것으로 나타났다. 분의 농도가 높은 지역은 노심내로서 20-30%를 나타냈으며 연화용착대 부분과 연화용착대 직상의 벽부에서는 10-20%의 분 농도를 나타냈다.

Abstract – Fines behaviors are considered as main factors in determining the operation states of blast furnace with PCI(Pulverized Coal Injection). The gas velocity and pressure distribution in blast furnace was analyzed by Ergun equation with two dimensional FEM(Finite Element Method). The theoretical model to predict the pressure drop was used under assumption that the interaction force between gas and powder is main resistance factor in fines flow through packed bed. To estimate the powder hold-up, the model is combined with the experimental result on the fines velocity in gas stream. The size of fines is most important factor in determining the concentration of fine in blast furnace together with density and feeding rate. Both of the measured and calculated results show that 10% fines concentration is at 1.5-2 m distance from tuyere tip. The results of 2-D numerical analysis on the distribution of fines concentration in blast furnace shows 20-30% in deadman and 10-20% above the root of cohesive zone.

Key words: Blast Furnace, Pulverized Coal Injection, FEM, Fines Accumulation

1. 서 론

고로는 철을 생산해내는 충전층의 일종으로 연속식 항류 화학 반응기이다. 용광로의 다른 이름인 고로는 규모가 크고 높아서 붙여진 이름으로 대개 높이가 10-25 m이며 부대 설비를 포함한 총 높이는 대개 100 m 내외이다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 상부로는 원료인 철광석 등 철산화물과 연료로 사용되는 코크스가 연속적으로 장입되고 하부로는 고온의 공기인 열풍이 들어가서 연료인 코크스중 탄소를 연소시킨다. 연소

에 의해 발생한 열과 환원제인 CO가스는 고로 상부로 이동하면서 철산화물과 접촉하고 열과 산소를 서로 교환함으로써 하부에서는 고온의 용융철인 용선(pig iron)이, 상부에서는 고온의 가스가 발생하게 된다. 노내에서 코크스는 열공급 및 환원제인 CO가스의 공급원으로서 역할 외에도 강하하는 장입물의 기계적인 지지와 상승하는 가스가 통기성을 유지할 수 있는 통로를 만들어 주는 역할을 하는 노내에서 가장 중요한 물질이다[1].

미분탄의 미연소, 코크스 및 광석의 분화, 고온부에서 생성된 금속 및 금속산화물의 재응축 등 고로내 여러 과정에서 다양한 분이 발생하지만 이러한 분의 일부는 가스중으로 혼입되어 충전층내를 이동하거나 또

[†]E-mail: jkchung@posco.co.kr

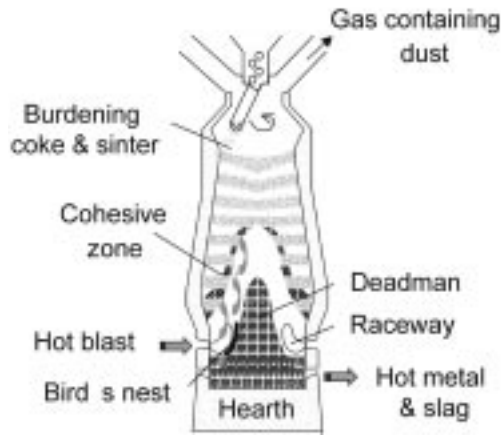


Fig. 1. Schematic diagram of a blast furnace.

는 국부적으로 축적하여 통기, 통액성에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 따라서 고로내의 가스흐름은 분을 함유한 고기 2상류이다. 분의 영향을 평가하여 조업에 반영시키기 위해서는 그 유동 특성을 명확하게 파악할 필요가 있다. 가스중에 분을 1개의 상으로 취급하여 gas와 분과의 상호작용력으로서 Ergun type[2]의 유체저항력과 분과 충전물간의 상호작용력으로서 양자간의 충돌에 기인하는 분의 운동량 변화를 나타내는 운동방정식을 사용하여 분의 유속과 충전층내에 체류하는 양을 계산하는 것이 가능하다. 또 압력손실에 미치는 분의 영향도 평가하는 것이 가능하다.

고로 하부에서 코크스 충전층을 용선, 용재가 낙하하고 하부로부터 고온의 가스가 상승한다. 코크스는 레이스웨이내에서 강력한 선회 운동을 받아 코크스는 부분 분화하여 코크스 미분으로 된다. 한편 풍구 직전으로부터 취입되어진 미분탄은 미연소 char를 생성하여 코크스 미분 및 환원가스와 함께 적하대로 이동하여 일부가 축적되는 것으로 생각된다. 미분의 이동과 축적은 고로내의 통기 통액성에 영향을 미친다. 충전층내를 상승하는 가스유속이 미분의 중단 속도보다도 충분히 크게 되면 고기 2상류로 취급한다. 또 층내 유속이 미분 중단속도 보다도 작으면 미분 축적이 있게 되며 2상류에서 유동층으로 이행한다.

고로를 대상으로 하는 충전층에 있어서 고, 기 2상류의 연구가 다수 보고되어 있다[3-11]. 충전층내에서 미립자가 상승운동하면서 배출되는 것을 동적 hold-up이라 하고 입자간 공극사이에서 축적되어져 연속적으로 배출되어지지 않는 분층 층내에서 체적 비율을 정적 hold-up이라고 한다. 분체의 속도에 대한 실험결과를 이용하여 FEM(Finite Element Method)에 의해 충전층내에서 분의 축적 거동모사에 대한 연구는 많지 않다.

본 연구에서는 실제 고로조업에서 샘플링된 결과와 분의 노내 축적 상태를 FEM에 의해 해석한 결과를 비교 분석함으로써 정확한 분해석 수식모델을 구현하고자 하였다.

2. 이 론

노내에서 분 축적량을 구하기 위해서는 노내 가스 및 압력 분포를 구하여 그에 따른 분의 거동을 살펴 보아야 한다. 또한 분의 축적은 노내 가스 및 압력분포에 영향을 미치므로 서로 상관관계에 있다고 볼 수 있다. 분의 속도는 여러 가지 이론적인 방법으로 구했으나 가장 정확한 방법은 실험적으로 직접 구하는 것이다. 따라서 이러한 가스속도 및 압력 분포 해와 분 속도에 관한 실험실적 결과를 결합하여 노내에서 분의 거동에 대해 해석할 수 있다.

2-1. 기체 및 고체흐름 해석

충전층내에서 가스의 운동속도를 해석하기 위해서 Ergun식을 다차원

으로 확장하여 사용하였다[12].

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

$$\text{여기서 } f_1 = 150 \left(\frac{1-\epsilon_g}{\phi_p d_p} \right) \frac{\mu_g}{\epsilon_g^3 \rho_g}, \quad f_2 = 1.75 \frac{1}{\epsilon_g} \left(\frac{1-\epsilon_g}{\epsilon_g^3 \phi_p d_p \rho_g} \right)$$

편의상 $a_0 = 1/(f_1 + f_2 |\vec{G}_g|)$ 라 정의하면 다음과 같은 식이 된다.

$$-\nabla P = \frac{1}{a_0} \vec{G}_g \quad (2)$$

윗식에 미분을 취하면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (-a_0 \nabla P) = \nabla \cdot \vec{G}_g = 0 \quad (3)$$

경계조건하에서 식 (3)을 풀어서 각 절점에서 압력을 구하고, 그 압력을 미분하여 요소내부의 적분점에서 기체유속을 구하였다. 이와 같이 식 (2), (3)을 반복해서 풀어서 기체유속이 수렴 ($|\vec{G}_{\text{new}} - \vec{G}_{\text{old}}| \leq \text{tolerance}$) 할 때까지 반복하였다.

고체속도도 속도 포텐셜의 구배에 비례하여 하강한다고 가정하였으므로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$-\nabla \psi = \vec{G}_s \quad (4)$$

윗식에 미분을 취하면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (-\nabla \psi) = \nabla \cdot \vec{G}_s = 0 \quad (5)$$

고체유속 또한 식 (5)를 풀어서 속도 포텐셜 ψ 를 구하고 이것을 미분하여 고체유속을 구하였다.

2-2. Ergun식의 유한 요소화

노내 가스류 흐름에 대한 속도 및 압력을 구하기 위해서 먼저 식 (3)과 (5)를 풀기 위하여 각 절점에서 초기 및 경계조건을 적용하고 각 식에 weighted residual을 적용하여 요소의 전영역을 적분하면 방정식의 weighted residual은 직교성이 되어야 한다. 이때 기체의 유속량 등은 압력으로 조절하였고, 고체의 유속은 노구부에서 실제 고체 장입속도로 설정하였다. 따라서 식 (3), (5)는 초기 및 경계조건 적용과 weighting factor(W)의 도입으로 weak form으로 변환하면 아래 식과 같이 구해진다.

$$\int W \cdot \text{ra}_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} d\Omega + \int W \cdot \text{a}_r \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) d\Omega = 0 \quad (\text{Weak form})$$

Weak foam으로 변환된 수식은 컴퓨터 프로그램화 하기 위해서 형상 함수(shape function) N_A, N_B 를 도입하여 $W = \sum_{A=1}^n C_A N_A$, $P = \sum_{B=1}^n N_B d_B$ 로 치환하면 아래식과 같이 Galerkin form으로 변환된다. 이를 다원 연립 방정식으로 정리하여 컴퓨터에 의해 해를 구하는 것이 가능하고, Newton method를 사용하여 요소내부의 각 적분점에서 수렴된 가스속도 포텐셜을 구할 수 있다[13].

$$\sum_{A=1}^n \left[\frac{\partial N_A}{\partial z} \cdot \text{a}_z \sum_{B=1}^n \frac{\partial N_B}{\partial z} d_B + \frac{\partial N_A}{\partial r} \cdot \text{a}_r \sum_{B=1}^n \frac{\partial N_B}{\partial r} d_B \right] = 0 \quad (\text{Galerkin form})$$

2-3. 분체흐름 수지 방정식

Yamaoka 등[4]은 고로내 가스흐름 연구에 분이 포함된 경우를 최초로 도입하였다. 분체가 기류에 의해서 수송되는 현상은 분체 수송기술과 관련하여 발전한 고, 기 2상류의 연구분야에서 취급되어지고 있지만 충전층중에서 분체 기류 수송에 관한 연구는 그리 많지 않았다. 분체의 거시적인 운동상태에 착안하여 상태 기술식을 다음과 같이 검토하였다.

먼저 분의 체류량을 “충전층 공극률 단위 체적당 존재하는 분의 양”

으로 정의하고, 충전층 공극기준의 분 체적 공극률을 ϵ_{kg} , 겉보기 밀도를 ρ_k 라하여 분체류량 H_k 를 표현하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_k = (1 - \epsilon_{kg}) \rho_k \quad (6)$$

한편 분은 중력 및 가스와의 상호작용력을 받아서 운동하고 운동에 대하여 운동 저항력이 작용하는 것으로 생각되어져서 정상상태에서 다음과 같은 식으로 힘의 균형관계를 나타낼 수 있다.

$$F_{k,g} - \frac{H_k g}{g_c} = R_k \quad (7)$$

여기서 $F_{k,g}$: 가스와 분의 상호작용력

$\frac{H_k g}{g_c}$: 분체류량에 상당하는 중력

R_k : 운동 저항력

분과 충전입자의 상호 작용력으로 충돌과 마찰이 있으나 상승운동의 주체의 분계에서는 마찰의 영향을 무시하고 충돌을 주요인으로 간주하였다. 2종류의 분체군의 충돌에 있어서 운동량 변화를 나타내는 R_k 는 운동 저항력으로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_k = \frac{1}{g_c} 3\beta \frac{1 + e_{k,p}(1 - \epsilon_g) \rho_p (1 - \epsilon_{kg}) \rho_k (d_p + d_k)^2}{1 - e_{k,p} \rho_p d_p^3 + \rho_k d_k^3} U_k^2 \quad (8)$$

여기서 β 는 반발보정계수로서 1/2이고 $e_{k,p}$ 는 반발계수로서 0.9정도이다. ρ_p , d_p 는 충전입자의 밀도 및 직경, ϵ_g 는 충전층 공극률, U_k 는 분 속도 따라서 반발력으로 인해서 분과 가스의 속도는 반드시 일치하지 않는다. 즉 가스에는 충전입자와 함께 분과의 상호작용력이 적용되는 것으로 생각되며 압력손실 $\Delta P/L$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\Delta P}{L} = F_{p,g} + F_{k,g} \quad (9)$$

여기서 $F_{p,g}$ 는 가스와 충전입자간의 상호 작용력으로 Ergun식을 적용하여 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \epsilon_{kg}) \rho_k \left(1 + \frac{1}{g_c} \frac{3(1 + e_{k,p})}{2(1 - e_{k,p}(1 + \rho_k d_k^3 / \rho_p d_p^3))} \frac{(1 + d_k/d_p)^2}{d_p} \frac{(1 - \epsilon_g)}{d_p} U_k^2 \right) + 150 \frac{\mu_g}{g_c} \left(\frac{1 - \epsilon_g}{\epsilon_g \phi_p d_p} \right)^2 \frac{1}{\rho_g} \left(\frac{\rho_g U_g}{\epsilon_g \epsilon_{kg}} \right) + 1.75 \frac{1}{g_c} \left(\frac{1 - \epsilon_g}{\epsilon_g \phi_p d_p} \right) \frac{1}{\rho_g} \left(\frac{\rho_g U_g}{\epsilon_g \epsilon_{kg}} \right)^2 \quad (10)$$

여기서 U_g 는 가스공급속도

그러나 실제 측정된 값과 계산된 값은 Allen역에서 상당한 차이를 보였으며 이는 분체의 속도를 구하는 과정에서 Ergun식으로부터 구한 것에 기인한 것으로 생각된다[4, 5]. Kusakabe 등[11]은 이러한 이론적인 한계를 극복하고 실험실적으로 가스와 분의 2상류 흐름시 지배방정식을 구하였다.

충전층에서 고기 2상류로 흐르는 경우는 미분의 공급유량 G_k , 미분의 상승속도 U_k 및 동적 hold-up인 H_d 간에는 다음과 같은 관계식으로 나타난다.

$$G_k = H_d \times U_k \quad (11)$$

충전층내에서 분의 축적형태는 정적 hold-up과 동적 hold-up의 두 가지로 나눌 수 있다. 분이 쌓여서 움직이지 않는 경우를 정적 hold-up이라 하며 실험실적으로 구한 코크스층내에서 정적 hold-up은 다음 식과 같다. 또한

$$H_s/\rho_k = 0.71(\text{ReFr}^2)^{-0.45} \quad (12)$$

동적 hold-up은 충전층내를 움직이는 분의 양에 의해 결정되는 것으로 실험실적으로 구한 충전층내에서 동적 hold-up은 다음 식과 같이 나

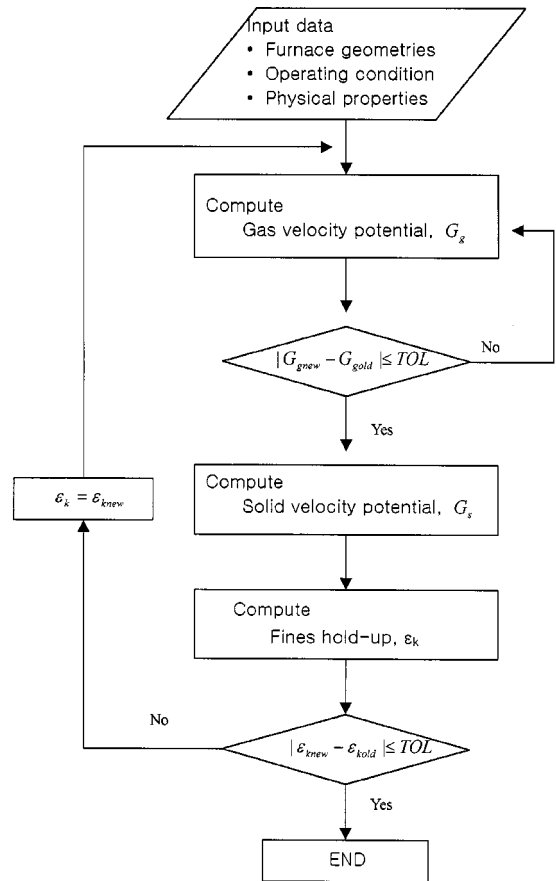


Fig. 2. Flow chart for the calculation of fines concentration in blast furnace.

타낸다.

$$H_d/\rho_k = 82(G_k/G_g)(d_k/d_p)^{0.3}(\text{ReFr}^2)^{-0.9} \quad (13)$$

그러므로 정적 hold-up과 동적 hold-up량을 합한 전체 hold-up량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{kg} = H/\rho_k = \{7.5 + 82(G_k/G_g)(d_k/d_p)^{0.3}\}(\text{ReFr}^2)^{-0.9} \quad (14)$$

여기서 Fr 는 Froude수를, Re 는 Reynolds수를 나타내며 각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{Fr} = (U_g/\epsilon_g)/(g d_p)^{0.5}, \quad \text{Re} = d U_g \rho_g / \epsilon_g \mu_g$$

여기서 G_k 는 미분의 질량유량 [$\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], G_g 는 기체의 질량유량 [$\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 분 분포를 구하기 위해서 Yamaoka의 총괄식 (10)과 Kusakabe의 실험식 (14)를 이용하여 가스, 분의 2 상류 흐름시 노내에서 가스류 및 분체흐름 해석을 FEM으로 실시하였다.

Fig. 2는 식 (3), (10), (14)를 기초로 가스류 및 분체흐름 해석을 위한 컴퓨터 프로그램의 순서도를 나타냈다.

3. 실험

3-1. 노내 분 샘플링

미분탄 취입 조건에 따라서 유한 요소법을 활용하여 고로내 분농도 분포를 모사한 결과와 동일조건에서 측정된 실 고로내 분 농도 상태와 비교하기 위해서 노내 분을 채취하였다. 정기수리를 위하여 휴지하는 고로에서 열풍이 들어가는 입구인 풍구를 통해서 길이 3.5 m, 직경

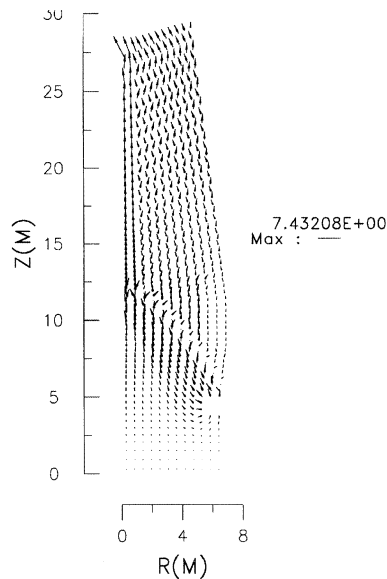


Fig. 3. Calculated gas velocity distribution in furnace by 2D FEM.

0.15 m의 파이프를 삽입하여 노내 충전물을 샘플링한다. 시료채취는 송풍온도가 1,200 °C, 용선온도는 1,515 °C, 장입코크스의 평균 입경은 50 mm인 때를 기준으로 실시하였다.

풍구에서 구성물 채취후 란스를 절개하여 길이별로 구성물을 구분하고 그 구성물의 물성을 분석하여 고로 반경방향의 코크스층의 특성을 조사하였다. 란스내 구성물을 20 cm간격으로 구분한후 채질하여 입도별로 무게를 측정하여 전체 무게 대비 중량분율로 나타냈다.

이렇게 샘플링된 란스내 코크스 상태를 살펴보면 풍구 앞쪽에는 연소대의 공간으로서 성긴 코크스층이 존재하고 그 이후 노심방향으로 치밀한 조직의 버드네스트 및 소립상태의 코크스로 이루어진 노심으로 구성되어 있다. 연소대를 이루는 코크스는 장입코크스에 비해서 입도가 반 정도에 지나지 않으며 표면 상태는 매우 거칠다. 버드네스트는 노심이 시작되는 부분으로 코크스 입도는 크나 코크스 사이에 분이 많이 쌓여 있는 것이 특징이다. 고로 반경방향의 코크스입도를 조사하여 3 mm 이하분이 10%가 되는 지점의 거리를 풍구로부터 측정하여 이를 연소대 심도라고 정의하였다.

3-2. 유한요소망 및 경계조건

고로 내부 상태를 모사하기 위해서 고로 전체를 839개의 절점과 759개의 요소로 분할하였고, 경계 조건으로는 풍구쪽에 압력과 노정쪽에서 압력을 경계조건으로 하고 여기에 실고로에서 평균 값을 적용하였다.

Fig. 3은 이와 같은 조건에서 Ergun식에 의한 노내 각 적분점에서 속도분포 계산예를 나타내고 있다. 통기성이 좋은 노중심에서는 가스흐름이 매우 빠르고, 노심과 연소대 직상부의 벽측에서 가장 가스흐름이 낮은 것을 알 수 있다. 또한 연화 용착대 근처에서 가스 속도가 감소하는 구역이 발생하고 있으며 이렇게 가스 속도가 낮은 곳에 분이 축적된다는 것을 쉽게 예상할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 미분탄 취입량에 따른 연소대 주위 분농도 측정

Fig. 4는 미분탄 취입량 86 및 144 kg/t-p에서 노내 충전물의 입도별 누적 무게분율 분포를 나타내고 있다. 미분탄 취입량이 86 kg/t-p일 때 버드네스트부분에서 입도가 25 mm이하인 코크스는 전체중에서 50%를 차지하고 있으며 미분탄 취입량이 144 kg/t-p일 때는 25 mm 이하 코크스가

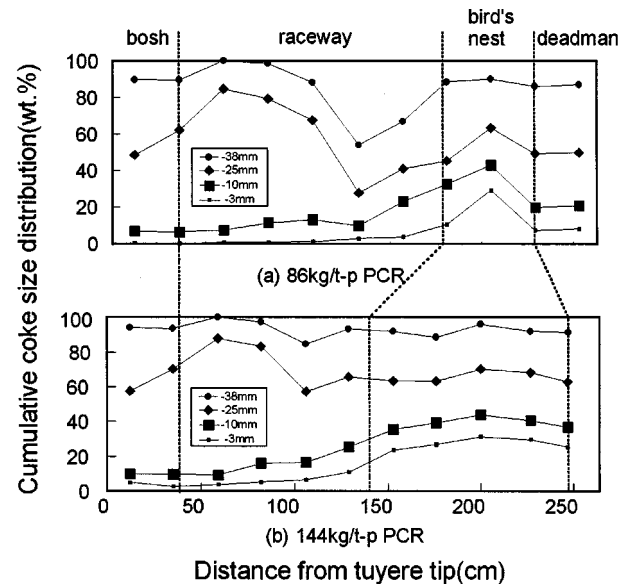


Fig. 4. Cumulative coke size distribution at tuyere level.

(a) PCR: 86 kg/t-p and (b) PCR: 144 kg/t-p in blast furnace.

Table 1. Operating conditions and raceway depth changes

PCR (kg/t-p)	Tf (°C)	Burning ratio (-)	Fines generation rate (kg/m ² s)	Measured raceway depth(m)
86	2234	0.83	0.4	1.9
97	2165	0.8	0.48	1.6
130	2200	0.81	0.62	1.2
124	2307	0.86	0.51	1.5
144	2510	0.93	0.46	1.7
86	2231	0.83	0.4	1.8

70%로 86 kg/t-p일 때보다 많다. 이에 대한 원인으로서는 144 kg/t-p일 때는 장입 코크스 입경이 51.3 mm로 86 kg/t-p일 때인 48.9 mm보다 오히려 큼에도 불구하고 미분탄 취입량이 144 kg/t-p일 때 풍구상에서 25 mm 이하의 코크스가 많은 것은 미분탄 취입량에 따라서 노내 코크스의 체류시간이 코크스 분화에 영향을 주어서 풍구상에서 코크스 입도가 적게 된다고 보고한 바가 있다[1]. 이렇게 분화된 코크스는 미연소 미분탄과 함께 풍구에서 1.5-2 m 지점에 형성되는 버드네스트에 쌓이게 되고 이는 통기·통액성을 방해하여 용선의 생산감소를 가져온다.

버드네스트부분에서 전체 코크스 무게에 대한 3 mm 이하 분량의 비는 취입되는 미분탄의 연소성 지표로 사용되기도 하며 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 분량 10%를 기준으로 버드네스트의 시작점을 구분한다. 단일관 형태의 미분탄 취입 란스를 사용하는 경우 3 mm이하분은 미분탄 취입량 증가에 따라서 증가하는 반면 이중관 란스를 사용하여 중심에 미분탄 외부에 산소부화를 하는 oxy-coal 란스의 경우 동일 미분탄량 취입시 3 mm이하 분량이 적게 나타났으며 144 kg/t-p에서 이중관 란스를 사용하여 미분탄을 취입하는 경우 3 mm 이하 분량은 단일관 미분탄 취입란스를 사용하여 미분탄을 86 kg/t-p 취입하는 경우의 수준과 비슷하였다.

미분탄 취입량 및 조업조건에 따른 연소대 주위 충전층에서 분의 농도는 코크스 샘플링을 통하여 확인 할 수 있다. 샘플링된 분은 dynamic hold-up과 static hold-up의 양을 합친 total hold-up량이라고 볼 수 있다. Fig. 4에는 샘플링 시료의 각 구간별 wt%를 나타내고 있다. 10 mm이하의 시료중 대부분이 3 mm이하라는 것을 알 수 있다.

충전층의 주요 입자인 코크스는 10 mm이상으로 10 mm이상의 시료

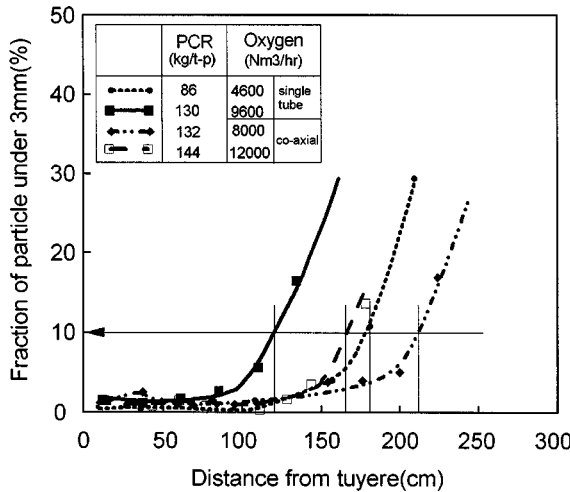


Fig. 5. Difference in -3 mm size fraction with various PCR, lance configuration and oxygen enrichment at tuyere level.

를 다시 입도별로 분리하여 나타내어 보면 강력한 송풍에너지에 의해서 코크스 선화가 일어나는 구역인 50-80 cm 구역은 25 mm 이하의 코크스가 많은 것을 볼 수 있는 반면 코크스 충전층의 시작점으로 추정되는 80-100 cm 이후 분의 hold-up 시작점인 3 mm 이하 크기의 코크스 분율이 10%인 지점까지는 입도가 큰 25 mm 이상의 코크스가 많은 것을 알 수 있다.

Table 1은 여러번에 걸쳐서 얻어진 코크스 샘플링 결과로부터 얻어진 미분탄 취입량별 연소대 온도와 연소율 그리고 연소대 심도를 나타내고 있다. 연소대 온도의 경우 oxy-coal조업을 하지 않는 경우 조업지수 중 5일간 평균 연소대 온도로 나타냈다. Oxy-coal조업을 하는 경우는 oxy-coal량 1,000 Nm³/hr당 60 °C의 온도 상승이 있다는 연구결과[14]를 이용하여 연소대 온도를 추정하였다. 연소대 온도로부터 미분탄 연소율 추정은 다음식과 같이 쓸 수 있다[15].

$$\text{미분탄 연소율} = \text{연소대온도} \times 0.03801 - 2.08 \quad (16)$$

이 식은 실험으로부터 측정된 연소대 온도와 버드네스트에 쌓인 분량과의 관계로부터 구해졌다. 이와 함께 한 개 풍구당 연소대에서 코크스 미분탄의 분발생량은 다음과 같은 추정식으로 구하였다. 여기서 연료비 기준을 500 kg/t-p로 설정하였다.

$$\begin{aligned} \text{분발생량(kg/m}^2\text{/s)} = & \left\{ (500 - c_{\text{gas}}) \times \frac{c_{\text{gas}}}{500} \times \frac{1}{3} + \frac{2}{30} \times c_{\text{gas}} + \text{PCR} \times (1 - \eta) \right\} \\ & \times \{ 8500/86400/34/0.3925 \} \quad (17) \end{aligned}$$

여기서 PCR: 미분탄 취입량(kg/t-p)

η : 연소율(-)

$c_{\text{gas}}(\text{PCR} \times \eta)$: 미분탄중 가스화량(kg/t-p)

첫번째 항의 경우 미분탄 취입량에 따라서 코크스의 분발생량이 증가하게 되므로 연료비를 기준으로 미분탄 취입량에 따라서 코크스분이 계산되도록 하였다. 이렇게 발생된 분은 전체중 1/3정도가 연소대로 유입되어 버드네스트에 쌓이는 것으로 가정하였다. 두번째 항은 미분탄중 수소에 의해서 노내 solution loss반응 감소에 해당하는 분발생량을 나타냈다[16]. 세번째항은 미분탄의 연소율에 따른 미분탄 자체에서 발생되는 분량을 나타내고 있다. 이러한 값에 출선량, 시간 및 풍구갯수를 고려하므로써 분발생 유속을 구할 수 있으며 이를 Table 1에 나타냈다.

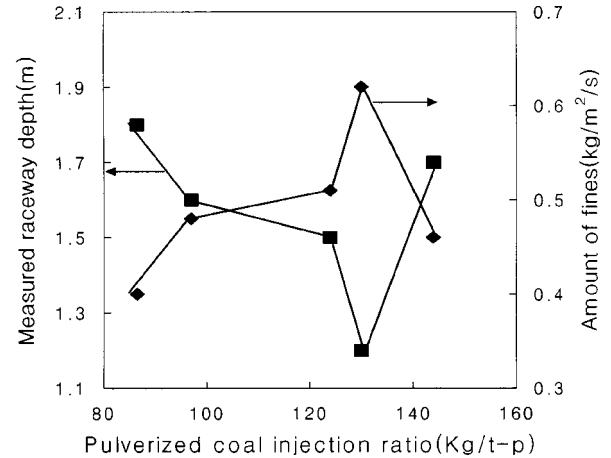


Fig. 6. The change of raceway depth and amount of fines generated with PCR.

이와 같이 연소대에서 분 발생량은 미분탄의 연소율에 따라서 미분탄 자체 뿐만 아니라 코크스의 분화에 따른 분 발생도 고려할 필요가 있음을 알 수 있다. 이러한 미분탄 연소율 및 코크스 분발생량에 따른 노내에 분의 hold-up은 연소대 주위의 코크스 충전층에 슬래그 및 메탈 체류시간을 길게 하므로 통기성에 영향을 미치는 것으로 보인다.

4-2. 조업조건별 FEM에 의한 고로내 분농도 추정

Fig. 6은 Table 1에 나타난 미분탄 취입 조건별로 측정된 분 축적이 시작되는 위치, 즉 연소대 심도와 분발생량의 관계를 나타낸 것으로 분발생량의 증가에 따라서 연소대 심도가 저하는 경향이 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7은 미분탄 200 kg/t-p 취입시 연소율 60, 80, 90%일 때 노내에서 분축적상황을 나타낸 것이다. 계산전제 조건으로는 미분탄의 입도가 75 μm , 밀도가 1,000 kg/t-p인 것으로 하였다. 연소율 증가에 따라서 풍구직상의 벽측에서 약 5%정도의 분축적량 감소가 있었으며 노심측에서도 1 m정도의 분축적 높이의 감소가 있었다. 노저 전영역에서 분의 농도가 최고값을 나타내는 것은 용융물에 의한 분제거 효과를 고려하지 못한 것에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 8은 분의 밀도 변화에 따른 노내 분 축적 상황을 나타낸 것이다. 계산전제 조건으로는 분 입도가 0.5 mm, 분의 발생량이 0.88 kg/m²/s경우에 대해서 계산하였다. 분의 밀도가 변하는 경우는 미분탄 대신 분광석이나 flux류를 취입할 때이다. 분의 밀도증가에 따라서 노내에서 분 축적 농도가 크게 증가하지는 않으나 풍구 직상부와 노심에서 분축적 구역의 크기가 약간 넓어지는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9는 미분탄 150 kg/t-p 취입시 연소율 60% 조건에서 미분탄 입도별 분 축적 상태를 나타내고 있다. 현재 평균 입도인 75 μm 에서 0.5 mm로 입도가 커지는 경우 벽측에서 농도가 10%이상 증가하는 것을 알 수 있다. 노심에서의 분 축적 높이도 1 m이상 증가하는 것으로 나타났다. 특히 연화용착대를 따라서 직상부 부분에 분이 쌓이기 시작하는 것을 알 수 있다. 입도가 1 mm인 미분탄이 취입될 경우 풍구직상부에 분농도가 25% 이상인 통기불량 구역이 생성되어 벽측에서 가스류 흐름을 방해할 것으로 생각된다. 따라서 미분탄 입도 관리의 고로조업에서 가장 중요하게 관리해야 할 인자인 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 연소율 60%, 입도 75 μm 의 미분탄을 취입비 150 kg/t-p에서 300 kg/t-p로 증가시키는 경우 노내에서 분의 농도 분포를 조사하였다. 미분탄 취입량 증가에 따라서 노벽측에서 약 3%의 농도가 증가하였으나 노심 상태 변화에 비하여 그리 크지 않았다. 노심 경우 분의

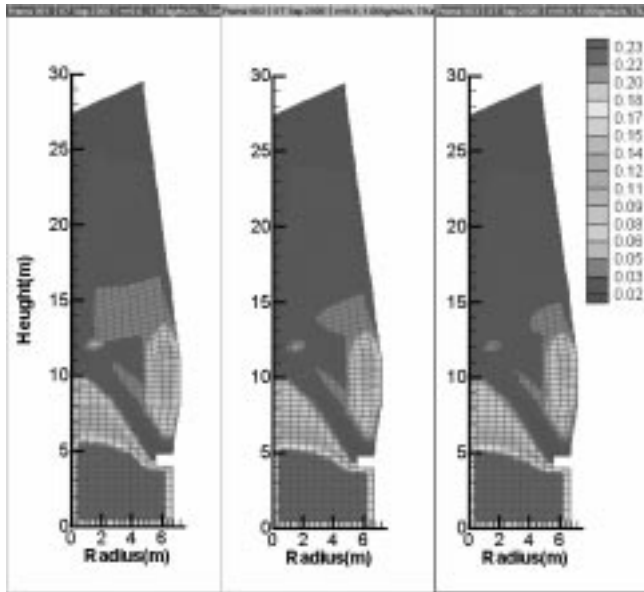


Fig. 7. Calculated 2-D fines accumulation diagram in BF.

(a): at $\eta=60\%$, $75\ \mu\text{m}$ size, PCR $200\ \text{kg/t-p}$, $\rho=1,000\ \text{kg/m}^3$, (b): at $\eta=80\%$, and (c): at $\eta=90\%$ (PCR: coal injection ratio, η : PC combustion efficiency, ρ : fine density).

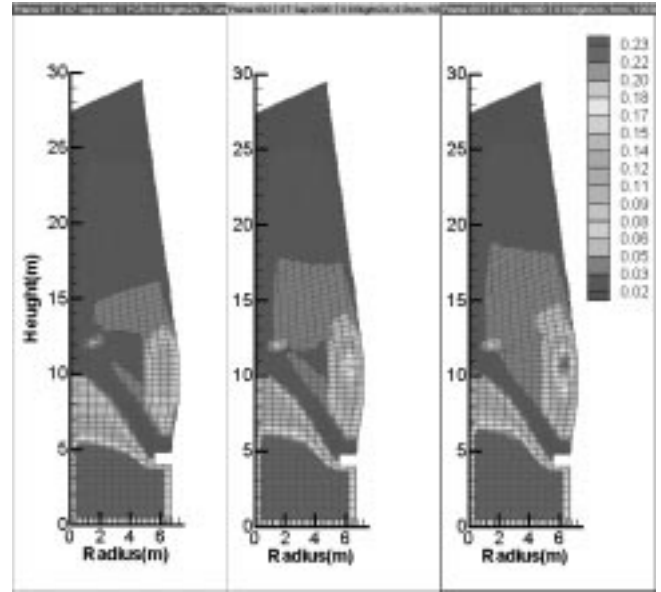


Fig. 9. Calculated 2-D fines accumulation diagram in BF.

(a): at $\eta=60\%$, $75\ \mu\text{m}$ size, PCR= $150\ \text{kg/t-p}$, $\rho=1,000\ \text{kg/m}^3$, (b): at $0.5\ \text{mm}$ size, and (c): at $1\ \text{mm}$ size (PCR: coal injection ratio, η : PC combustion efficiency, ρ : fine density).

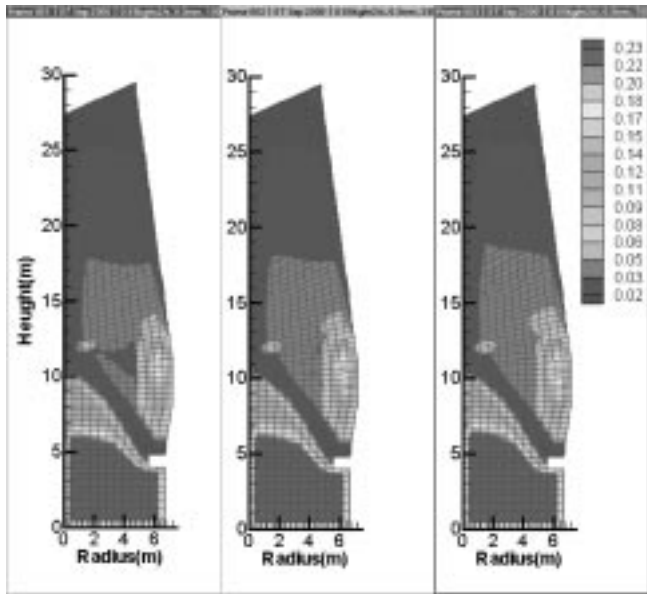


Fig. 8. Calculated 2-D fines accumulation diagram in BF.

(a): at $\rho=1,000\ \text{kg/m}^3$, $0.5\ \text{mm}$ size, FIR $0.88\ \text{kg/m}^2/\text{s}$, $\eta=60\%$, (b): at $\rho=3,500\ \text{kg/m}^3$, and (c): at $\rho=7,000\ \text{kg/m}^3$ (FIR: fine injection rate, η : PC combustion efficiency, ρ : fine density).

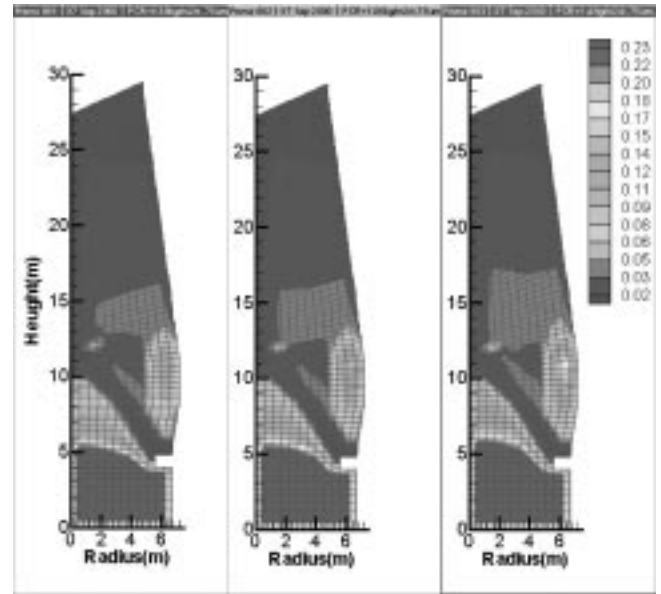


Fig. 10. Calculated 2-D fines accumulation diagram in BF.

(a): at PCR= $150\ \text{kg/t-p}$, $75\ \mu\text{m}$ size, $\eta=60\%$, $\rho=1,000\ \text{kg/m}^3$, (b): at PCR= $200\ \text{kg/t-p}$, and (c): at PCR= $300\ \text{kg/t-p}$ (PCR: coal injection ratio, η : PC combustion efficiency, ρ : fine density).

쌓이는 위치가 크게 변화했으며 분 축적 시작점의 위치도 풍구 쪽으로 가까워졌음을 알 수 있다.

Fig. 11은 밀도, 입도, 분 취입량의 영향을 각각 비교한 것으로서 입도 $75\ \mu\text{m}$, 분 공급량 $0.66\ \text{kg/m}^2/\text{s}$ (미분탄 $150\ \text{kg/t-p}$ 를 기준으로 연소율 80% 시 분발생량에 해당), 밀도 $1,000\ \text{kg/m}^3$ 를 기준으로 비교 검토하였다. 밀도가 $7,000\ \text{kg/m}^3$ 로 변환 경우 노벽부에서는 거의 변화가 없으나 노심에서 분 축적 구역의 크기가 증가되는 것을 알 수 있다. 입도를 $1\ \text{mm}$ 로 증대시키는 경우 노벽측에서 분농도 변화와 함께 노심에서 분 축적 위치의 상승이 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다. 분발생량의

증가도 입도증가에 따른 분 축적량의 변화 정도에는 미치지 못하나 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 측정된 연소대 심도와 2차원 FEM으로 계산된 연소대 심도와와의 관계를 나타낸 것으로 그 경향은 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있으나 절대값에서 상당한 차이를 나타내고 있다. 즉 평균 $1.6\ \text{m}$ 근처에서 연소대 심도 추정은 비교적 정확하나 심도가 매우 얇거나 긴 경우에는 상당한 차이를 보이고 있다. 이것은 수치해석을 위한 메쉬를 나눈 간격이 약 $50\ \text{cm}$ 로서 연소대 주위를 정확히 묘사하는 데에는 약간 큰 것으로 생각된다. 또한 액체흐름의 영향을 고려하지 못하여 노심상태가

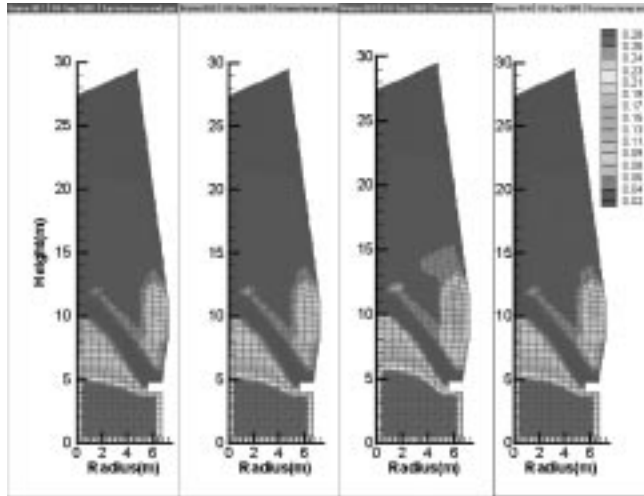


Fig. 11. Calculated 2-D fines accumulation diagram in BF.

(a): at 75 μm size, FIR 0.66 $\text{kg/m}^2\text{s}(\eta; 80\%)$, $\rho=1,000 \text{ kg/m}^3$, (b): at $\rho=7,000 \text{ kg/m}^3$, (c): at 1 mm size, and (d): at FIR 0.88 $\text{kg/m}^2\text{s}(\eta; 60\%)$ (FIR: fine injection rate, η : PC combustion efficiency, ρ : fine density).

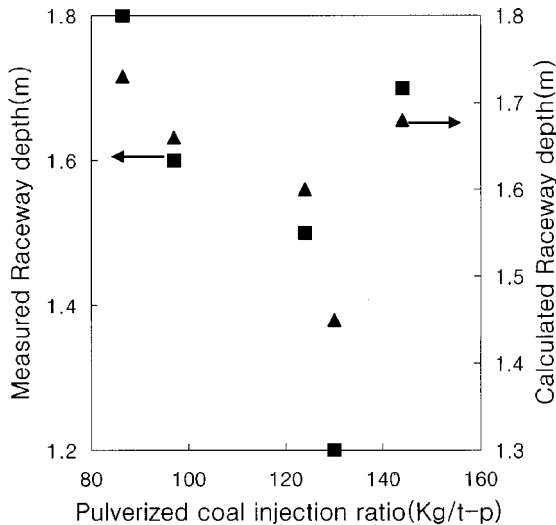


Fig. 12. The measured and calculated raceway depth with PCR.

악화되거나 개선되는 경우 용융물의 흐름과 분 퇴적량간의 상호작용을 고려하지 못하여 그에 따른 분 축적량의 상승작용 효과를 제대로 반영하지 못한 것에 기인한다고 생각된다.

5. 결 론

(1) 충전층에서 FEM에 의해 가스 및 압력분포 모사와 분의 속도에 관한 실험식을 결합시켜서 고로내 분의 거동을 잘 모사할 수 있었다.

(2) 미분탄 다량 투입시 연소율이 20% 감소하는 것보다 입도가 1 mm로 증가하는 것에 의해 분 축적 위치 및 농도에 크게 영향을 미치게 된다.

(3) 분발생량에 따른 연소대 심도 변화 실측값과 수치모사에 의한 예측값은 연소대 심도가 매우 크거나 작은 경우를 제외하고는 잘 일치하였다.

(4) 분농도가 높은 지역은 풍구직전과 노심내로서 20-30%를 나타냈으며 연화음작대와 연화음작대 직상 벽부에서는 10-20%의 분 농도를 나타냈다.

사용기호

d_i	: diameter of i [m]
$e_{k,p}$: repulsion factor [-]
Fr	: Froude number $[(U_g/e_g)/(gd_p)^{0.5}]$
$F_{i,j}$: interacted force between i and j [$\text{Kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$]
G_i	: mass velocity of phase i [$\text{Kg}/(\text{m}^2\text{s})$]
g_c	: gravimetric conversion factor [$1\text{N}/\text{Kg}_f$]
g	: gravimetric force [m/s^2]
H_t	: total hold-up of powder [Kg/m^3]
H_d	: dynamic hold-up of powder [Kg/m^3]
H_s	: static hold-up of powder [Kg/m^3]
P	: pressure [Pa]
R_k	: momentum through collision of powder [Kg/m^3]
Re	: Reynolds number $[d_p U_g \rho_g / \epsilon_g \mu_g]$
U_i	: velocity of i [m/s]

그리스 문자

β	: correction factor of repulsion angle
ϵ_{kg}	: voidage of powder
ϵ_g	: voidage of packed bed
ϵ_k	: volume fraction of powder in packed bed
Φ_I	: shape factor of powder
μ_i	: viscosity of i [$\text{Kg}/(\text{ms})$]
ρ_i	: density of i [Kg/m^3]

하첨자

p	: coke in blast furnace
g	: gas
k	: powder

참고문헌

1. Chung, J. K. and Hur, N. S.: *ISIJ int.*, **37**(2), 119(1997).
2. Ergun S.: *Chem. Eng. Prog.*, **48**, 89(1952).
3. Fan L. S., Toda, M. and Satija, S.: *Powder Technology*, **36**, 107(1982).
4. Yamaoka, H.: *Tetsu-to-Hagane*, **72**, 403(1986).
5. Yamaoka, H.: *Tetsu-to-Hagane*, **72**, 2194(1986).
6. Kusakabe, K., Yamaki, T., Morooka, S. and Matsuyama, H.: *Tetsu-to-Hagane*, **77**, 1407(1991).
7. Kusakabe, K., Yamaki, T. and Morooka, S.: *Tetsu-to-Hagane*, **77**, 1413(1991).
8. Shibata, K., Shimizu, M., Inaba, S., Takahashi, R. and Yagi, J.: *Tetsu-to-Hagane*, **77**, 236(1991).
9. Shibata, K., Shimizu, M., Inaba, S., Takahashi, R. and Yagi, J.: *Tetsu-to-Hagane*, **77**, 1267(1991).
10. Ariyama, T. and Asakawa, Y.: *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **22**, 171(1996).
11. Kusakabe, K.: Report of Research Committee on Transport Phenomena of Four Fluids, 61(1996).
12. Yagi, J., Takeda, K. and Omori, Y.: *Tetsu-to-Hagane*, **66**, 108(1980).
13. Jeong Park, Y. O.: Ph. D. Dissertation, University of Houston, USA(1989).
14. Chung, J. K. and Park, P. W.: *HWAHAK KONGHAK*, **36**, 743(1998).
15. Patent of KOREA, Patent No. 1997-25769.
16. Matsui, Y.: *CAMP-ISIJ*, **12**, 632(1999).