

## 이차원모델에 의한 고로(高爐)내 정상상태 거동의 분석

이일옥·최태화·김홍식\*·이광순\*

산업과학기술연구소 제철연구부  
\*서강대학교 이공대학 화학공학과  
(1989년 11월 13일 접수, 1990년 2월 20일 채택)

## Analysis of Steady State Behavior of a Blast Furnace using a Two Dimensional Model

Il-Ok Lee, Tae-Wha Choi, Heung Shik Kim\* and Kwang Soon Lee\*

*Iron Making Research Lab., Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-330, Korea*

*\*Department of Chemical Engineering, Sogang University, C.P.O Box 1142, Seoul, Korea*

(Received 13 November 1989; accepted 20 February 1990)

### 요 약

고로내의 거동을 표현하는 모델식을 확립하여 이를 수치적으로 해석하고, 각 조업변수가 고로내부의 현상에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 고로내부에서의 기체 및 고체의 온도, 가스조성, 압력분포 및 철광석의 단계별 환원반응을 표현하는 수식을 정립하였으며 이들을 연립하여 해석하였다.

수치해석에는 계산시간의 단축을 위하여 윤 등[1]이 제시한 좌표변환방법을 도입하여 고로형상을 원통형으로 변환한 후, 반경방향에 대한 직교배열법(orthogonal collocation method)을 적용하였다. 또한 고로 상부에서의 온도분포 형상을 이해하기 위하여 1차원 모델을 수립하여 해석하고, 이것으로부터 상부에서의 초기조건을 설정하였다. 반경방향의 내부배열점의 수를 4, 5 및 6개를 취한 결과 모두 유사한 결과를 나타내었다.

포항제철의 조업자료를 바탕으로 해를 구한 결과, 실제 고로내부의 현상 및 다른 연구자들의 결과와 잘 부합하는 여러 해를 얻을 수 있었으며, 특히 기체와 고체의 유속비에 의해 온도분포가 민감한 영향을 받을 수 알 수 있었다.

**Abstract**—A mathematical model of the blast furnace was developed and the effects of operating variables on internal phenomena of the blast furnace were investigated through numerical computation. To achieve these objectives, equations which represent the distributions of gas and solid temperatures, gas compositions, pressure and stepwise reduction of iron ore were established and then solved simultaneously.

To reduce computation time, orthogonal collocation in radial direction was employed after transforming the blast furnace geometry into a cylinder using the technique proposed by Yun et al.[1]. Besides these, a potential instability problem of the model was analyzed using a simplified 1-dimensional model. With the aid of this model, initial values of gas and solid temperature at the stock line, which give a meaningful stable solution, could be determined. Collocations with four, five and six internal points were tried for comparison but the results were similar.

Simulation results based on the POSCO's operating data showed good agreement with the internal phenomena of real blast furnaces as well as with the results by other researchers. One of the important consequences through this work is that the temperature distributions are sensitively affected by a small change in the ratio of solid to gas flowrates.

## 1. 서 론

근래에 조업 중인 고로내부의 현상을 측정할 수 있는 검출단이 많이 개발되고 있으나 연화용착대, 온도 및 농도의 분포 등 고로내 여러 분포의 중요성이 강조됨에 따라 검출단으로부터 얻어지는 자료의 한계성을 보완하며, 고로내 현상을 보다 잘 해석하고, 나아가 고로를 온-라인 제어하기 위한 기초연구로서 수식모델개발과 전산기모사가 활발히 진행되고 있다. 고로내 현상의 수치해석을 위한 연구는 60년대의 1차원모델 및 간략화된 반응구조를 기초로 시작되었으나 최근에 이르러서는 반응식 및 전달현상에 대한 연구가 많은 진척을 보게 됨에 따라 2차원모델에 의한 상당히 엄밀한 해석이 행하여지고 있다. 이들 모델에 대한 기존의 해석 방법으로는 유한차분법(FDM) 및 유한요소법(FEM)이 사용되었으나, 프로그램량이 방대하고 많은 계산시간을 소요한다는 단점을 지니고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 1983년 윤 등[1]은 좌표변환 및 직교배열(orthogonal collocation)을 이용한 다항식근사에 의한 해석방법을 제시한 바 있다. 이 방법은 고로내 각 부분에서 미묘하게 나타나는 상분포 및 전달현상 등을 엄밀하게 고려해 줄 수 없다는 단점을 지니고 있으나, 계산시간의 단축, 표준화된 미분방정식 패키지의 활용 등 여러 계산상의 이점이 있으며 이에 따라 고로내 현상의 변화를 실시간대에서 예측하는데 활용할 수 있다는 가능성을 지닌 방법이라 할 수 있다. 본 연구는 고로내 온도 및 기체농도분포 등을 모사하기 위하여 철광석의 단계별 환원반응 및 각종 반응을 고려한 모델식을 수립하고, 윤 등[1]이 제시한 좌표변환 및 다항식 근사방법을 이용하여 고로내부의 현상을 2차원적으로 해석하고, 또한 전산기모사를 행하는데 따르는 수치해석상의 문제점을 분석하고자 하였다.

## 2. 고로내부의 현상 및 주요 반응

고로는 노상부에서 철광석( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ), 코우크스(C) 및 철광석의 용집을 낮추어 주기 위한 소량의 첨가물( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ) 등이 유입되며 하부로부터는 약  $1400^\circ\text{K}$  정도로 예열된 공기가 약간의 습분과 함께 유입된다. 이들은 서로 역류로 교차하며 노하부에서 공기 중의 산소와 코우크스간의 반응에 의하여 생성된 CO 가스와 철광석이 반응하여 적철광( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )→자철광( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )→비스타이트( $\text{Fe}_{0.95}\text{O}$ )→철(Fe)의 단계를 거쳐 환원된 후 용융되어 노하부로 방출된다. Fig. 1에

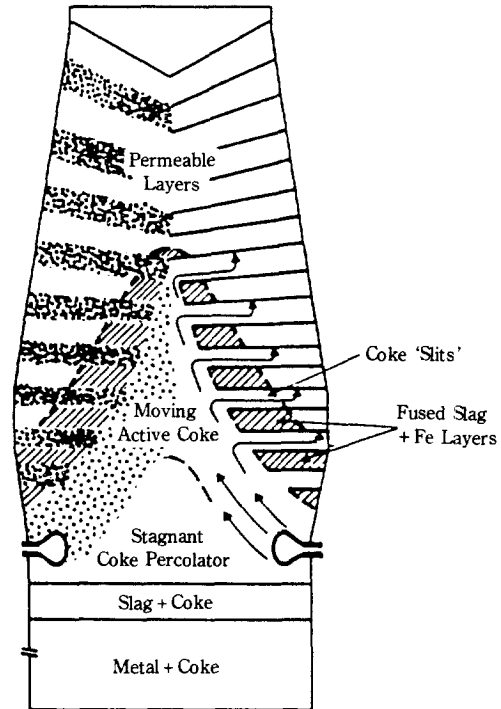


Fig. 1. Sketch of the internal structure of a large blast furnace[11].

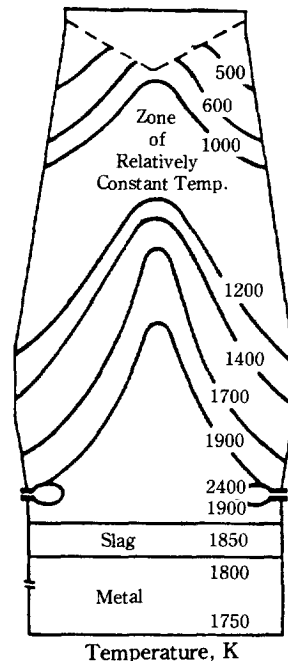


Fig. 2. Gas temperature in the blast furnace as interpreted from the quenched furnace data [11].

고로의 대체적인 모양과 내부구조를 보였다. 고로조업에서 특히 중요시하는 부분은 비스타이트가 철로 환원되면서 연화가 일어나는 연화용착대로 이것의 위치 및 분포형상이 고로조업 성능에 큰 영향을 주는 것으로 이해되고 있다. 연화용착대의 아래 쪽에는 도우크스가 산처럼 쌓여있는 데드맨(Deadman)이라는 부분이 형성되어 있으며 이 데드맨은 기체흐름의 분산에 많은 영향을 준다. 또한 이 데드맨은 고로마다 다른 모양으로 형성되며, 해체조사를 하기 전에는 어떤 모양을 취하고 있는지를 예측하는 방법은 거의 개발되어 있지 않다. Fig. 2에는 일반적인 고로의 중상부에서 나타나는 대체적인 온도분포를 보였다. 연화용착대 부근에서는 넓은 범위에 걸쳐 온도가 대단히 완만하게 상승되는 것으로 나타난다. 또한 고로외벽을 통해서는 연화의 고열에 의한 손실을 막기 위해 냉각수를 흘려주고 있으며, 이에 따라 고로내의 반경방향 온도분포는 그림과 같이 벽면에서의 온도가 중심부 보다 낮게 나타난다.

### 3. 모델식의 성격과 가정

전산기 모사를 위해 수립한 모델은 다음과 같은 가정과 성격하에서 수립하였다.

1. 고로내의 고체상(철광석, 코우크스, 염 등)은 균일하게 혼합되어 있다.
2. 반응은 고로내에서 중요하게 작용하는 대부분의 반응을 고려하였다.
3. 철광석의 환원반응은 고로내의 반응 중 가장 중요한 것으로 엄밀한 해석을 위해 기체상-고체상 이상간의 다계면 모델에 의한 단계별 환원반응식을 수립하여 이용하였다.
4. 모든 반응은 고체표면에서 일어나는 것으로 가정하여 반응에 의한 물질수지식은 고체흐름의 유선에 의해 결정되는 특성곡선을 따라 일차원모델로 취하였다.
5. 열수지식은 축방향의 확산효과를 무시하여 수립하였으며, 벽면에서의 열손실은 mixed-type 경계조건을 이용하였다.
6. 기체상 및 고체상의 흐름은 고로형상을 따르는 축방향으로의 포텐셜 흐름을 갖는다고 가정하였으며, 기체상의 압력분포는 충전탑에서의 Ergun 식으로 표현하여 해석하였다.

### 4. 반응모델의 구성

고로내에서 일어나는 여러 반응들 중에서  $H_2$  및  $CO$

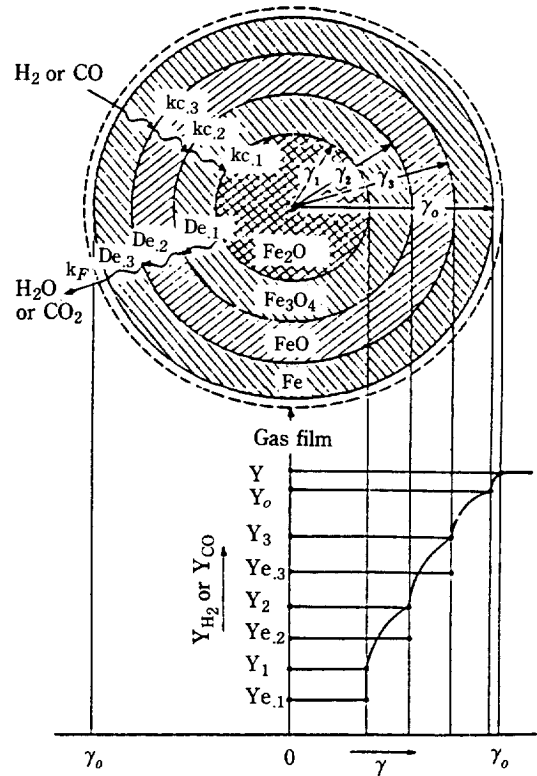


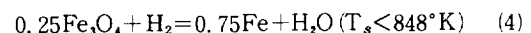
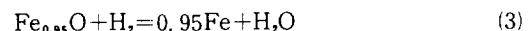
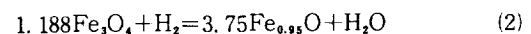
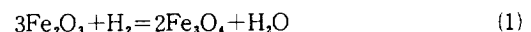
Fig. 3. Three-interface reaction model[4].

가스에 의한 철광석 환원반응, 코우크스 기체화반응(Boudouard), 코우크스-습분반응, 습분-가스 이동반응 및 석회석 분해반응 등을 고려하였다.

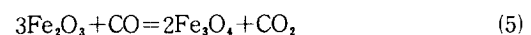
#### 4-1. 철광석의 환원반응

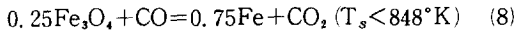
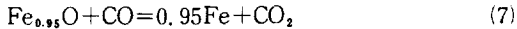
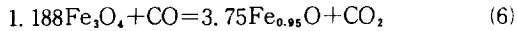
철광석 환원반응은 기체내의  $H_2$  및  $CO$  가스에 의해 일어나는데, Yagi[2]와 Lahiri[3] 등은 완전한 다계면 모델을 이용하지 않은 반응모델식을 수립했으나, 原 등[4]은 실제 반응이 Fig. 3과 같은 다계면 환원반응임을 입증하였다. 본 연구에서도 原 등[4]에 의해 제시된 다음과 같은 단계별 환원반응식을 도입하여 철광석의 환원을 해석하였다.

##### 1. $H_2$ 가스에 의한 단계별 환원반응식



##### 2. $CO$ 가스에 의한 단계별 환원반응식





위 환원반응식들에 의하면 고체온도와 기체내  $\text{H}_2$  및  $\text{CO}$  농도에 따라 1계면모델에서 최대 3계면모델까지 존재하게 되는데, 예를 들어 고체온도가  $848^\circ\text{K}$  보다 낮은 경우에 철광석의 환원반응은 철광석의 환원정도에 따라  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 의 반응에 의한 1계면모델 및  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\text{Fe}$ 의 반응에 의한 2계면모델이 가능해진다. 그리고 고체온도가  $848^\circ\text{K}$  보다 높은 경우 앞에서와 마찬가지로  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  농도 및 철광석의 환원정도에 따라 환원반응은  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 의 반응에 의한 1계면모델,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\text{Fe}_{0.95}\text{O}$ 의 반응에 의한 2계면모델,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\text{Fe}_{0.95}\text{O}$ ;  $\text{Fe}$ 의 반응에 의한 3계면모델이 가능해지며, 반응이 진행됨에 따라  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 모두  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 로 전환된 경우에는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\text{Fe}_{0.95}\text{O}$ 의 1계면모델 및  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\text{Fe}_{0.95}\text{O}$ ;  $\text{Fe}$ 의 2계면모델에 의해 해석되고, 이어서  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 가  $\text{Fe}_{0.95}\text{O}$ 로 모두 전환된 경우에는  $\text{Fe}_{0.95}$ ;  $\text{Fe}$ 의 1계면반응모델로 해석된다. 이와 같이 고체온도와 기체농도에 따라 적당한 계면모델을 찾는 흐름도는 杉山 등[5]이 제시한 바 있으며 본 연구에서는 이것을 미분방정식 패키지를 이용하는데 알맞도록 변형하여 활용하였다. 식 (1)에서 (8)의 각 단계의 반응식은 原 등[4]이 연구종합한 결과를 이용하였다.

#### 4-2. 철광석의 단계별 및 총괄환원율

철광석이 고로하부로 하강함에 따라 일어나는 환원의 정도를 구하는 것은 매우 중요한 일이며 이들 환원율은 단계별 및 총괄환원율로 나누어 표현할 수 있다. 먼저 단계별 환원율은 '해당성분으로 변환된 부피와 초기 적철광 부피의 비'로 정의된다. 예를 들어 3단계반응 중 식 (1) 또는 (5)는 적철광에서 자철광으로 전환되는 반응이며, 이 단계의 환원율  $R_w$ 은

$$R_w = (4\pi r_1^3/3 - 4\pi r_1^3/3) / (4\pi r_0^3/3) = 1 - (r_1/r_0)^3 \quad (9)$$

이 된다. Fig. 3의 상황에서는 자철광이  $r_1$ 과  $r_2$  사이에만 존재하나  $r_0$ 과  $r_1$  사이의 부분도 자철광이 이미 존재했던 곳이다. 이와 같은 방법에 의해 각 단계별 환원율은 아래와 같이 정의된다. 고체의 온도가  $848^\circ\text{K}$  보다 높은 경우의 3단계모델에서

$$R_w = 1 - (r_1/r_0)^3 \quad (10)$$

$$R_w = 1 - (r_2/r_0)^3 \quad (11)$$

$$R_F = 1 - (r_3/r_0)^3 \quad (12)$$

고체온도가  $848^\circ\text{K}$  보다 낮은 경우의 2단계모델에서

$$R_w = 1 - (r_1/r_0)^3 \quad (13)$$

$$R_F = 1 - (r_2/r_0)^3 \quad (14)$$

총괄환원율  $R_T$ 은 '초기 적철광 상태의 철광석과 결합되어 있던 산소 중 환원된 분율'로 정의된다. 만약 초기의 적철광이 식 (1)의 반응에 의해 모두 자철광으로 환원되고 식 (2), (3) 또는 (6), (7)의 반응이 전혀 진행되지 않았다면 9개의 산소원자 중 1개만이 환원된 것이므로  $R_T = 1/9$ 가 되며, 모두 비스타이트로 전환되었다면,  $R_T = (9 - 6.3158)/9$ 가 되고, 모두 철로 전환되었다면  $R_T = 1$ 이 된다. 이 총괄환원율과 앞에서 정의한 단계별 환원율 사이에는 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다. 고체온도가  $848^\circ\text{K}$  보다 높은 경우의 3단계모델에서

$$\begin{aligned} R_T &= R_w/9; \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ 과정에서 일어난 환원율} \\ &+ (8 - 6.3158)R_w/9; \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_{0.95}\text{O} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \\ &+ (6.3158 - 0)R_F/9; \text{Fe}_{0.95}\text{O} \rightarrow \text{Fe} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \\ &= 0.1111R_w + 0.1871R_w + 0.7071R_F \quad (15) \end{aligned}$$

마찬가지로 고체온도가  $848^\circ\text{K}$  보다 낮은 경우의 2단계모델에서 총괄환원율은 다음과 같다.

$$R_T = 0.1111R_w + 0.8889R_w \quad (16)$$

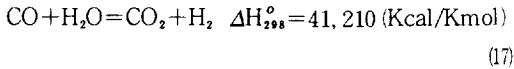
결국 이와 같은 방법에 의해 환원율을 정의함으로써 각 환원율들은 공히 고로의 축방향을 따라 0에서 1까지의 값을 갖게 된다.

#### 4-3. 코우크스의 반응

코우크스의 기체화 반응은 고로내 연화용착대에서 공기주입구 부근까지의 지역에서 산소와 코우크스 사이의 반응에 의해 생성된  $\text{CO}_2$  및 공기와 함께 주입된 습분에 의해 일어나는 것으로, 철광석의 환원에 필요한  $\text{H}_2$  및  $\text{CO}$  가스를 생성하는 중요한 반응이다. 이 반응들의 속도식은 宮坂 등[6]이  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{CO}$ - $\text{H}_2$ - $\text{N}_2$  계에서 산소 또는 수소가스가 탄소에 흡착되어 코우크스 가루가 기체화하는 반응기구로부터 실험적으로 도출하였고, 여기에 田口 등[7]은 코우크스 덩어리에 대한 실험을 행하여 세공으로의 확산에 의한 영향을 함께 조사하였으며 반응속도식이 코우크스 직경의 -0.52승에 비례한다는 것을 밝힌 바 있다. 본 연구에서는 田口 등[7]이 구한 반응속도식을 이용하여 코우크스의 기체화반응을 해석하였다.

4-3-1. 코우크스의  $\text{CO}_2$  가스에 의한 기체화반응 (Boudouard reaction)

반응식은

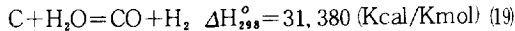


반응속도식은

$$V_{BR} = E_f \left( \frac{m_c N_c}{M_c} \right) \left\{ \frac{k_1 P_t Y_{\text{CO}_2}}{1 + P_t (k_2 Y_{\text{CO}_2} + k_3 Y_{\text{CO}} + k_5 Y_{\text{H}_2\text{O}})} \right\} \quad (18)$$

4-3-2. 코우크스의  $\text{H}_2\text{O}$  가스에 의한 기체화반응

반응식은



반응속도식은

$$V_{CH} = E_f \left( \frac{m_c N_c}{M_c} \right) \left\{ \frac{k_4 P_t Y_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + P_t (k_2 Y_{\text{CO}_2} + k_3 Y_{\text{CO}} + k_5 Y_{\text{H}_2\text{O}})} \right\} \quad (20)$$

여기서,

$$E_f = (D_p \times 10^3 / 7.5)^{-0.52}$$

$D_p$  : 코우크스의 직경 (m)

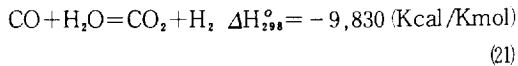
$M_c$  : 탄소의 분자량

$m_c$  : 코우크스 입자의 초기탄소량 (Kg/개)

$N_c$  : 코우크스 입자의 수 (개/m<sup>3</sup> bed)

#### 4-4. 습분-가스 이동반응 (Water-gas shift reaction)

이 반응은 고로내 기체농도분포를 조절하는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있으며, 반응식은



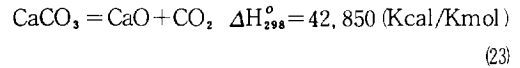
반응속도식은

$$V_{WG} = k_{c,ws} \left( \frac{P_t}{R_g T_g} \right)^2 \left( Y_{\text{H}_2\text{O}} Y_{\text{CO}} - \frac{Y_{\text{H}_2} Y_{\text{CO}_2}}{K_{e,ws}} \right) \quad (22)$$

原 등[4]은 이 반응을 1차가역반응으로 해석할 수 있음을 보였고, 이 습분-가스 이동반응은 철광석 입자의 촉매효과 등으로 인하여 반응속도가 무척 빠르기 때문에 고로내의 특정 온도조건에서는 쉽게 평형에 도달되는 것으로 알려져 있다. 杉山 등[5]은 고로의 수직 검출단을 이용하여 가스 농도조성을 분석한 결과 대략 950-1300°K의 온도범위에서 이 반응이 평형을 이룬다고 보고하였다. 본 연구에서는 이와 같은 효과를 고려하기 위하여 적당한 흐름도를 작성, 해석하였다.

#### 4-5. 석회석의 분해반응

석회석의 분해반응도 철광석의 환원반응과 마찬가지로 미반응핵모델을 이용하여 반응속도식을 수립하였으며, 화학반응상수, 평형상수 및 경막 물질이동계수 등의 자료는 Yagi 등[2]이 연구조사한 결과를 참고하였다. 반응식은



반응속도식은

$$V_{LS} = \frac{N_{LS} \pi d_{p,LS}^2}{R_g T_s W_{LS}} (P_{\text{CO}_2}^s - Y_{\text{CO}_2} P_t) \quad (24)$$

여기서,

$$W_{LS} = A_{LS} + B_{LS} + F_{LS}$$

$$A_{LS} = \frac{(1-R_s)^{-2/3}}{k_{c,LS} R_g T_s / K_{e,LS}}$$

$$B_{LS} = \frac{1 - (1-R_s)^{1/3}}{(1-R_s)^{1/3}} \cdot \frac{d_{p,LS}}{2D_{eS}}$$

$$F_{LS} = 1/k_{F,LS}$$

$R_s$  : 석회석의 분해율

입자내 확산계수 :

$$D_{eS} = D_{\text{CO}_2} \varepsilon_{v1}^{1.41}$$

기공률 :

$$\varepsilon_{v1} = 0.298 + 0.702 \delta_{LS}$$

경막 물질이동계수 :

$$k_{F,LS} = (D_{\text{CO}_2} / d_{p,LS}) \{ 2.0 + 0.55 (d_{p,LS} u_{\rho g} / \mu_g)^{1/2} (\mu_g / \rho_g D_{\text{CO}_2})^{1/3} \}$$

$\text{CO}_2$  가스의 확산계수 :

$$D_{\text{CO}_2} = 2.236 \times 10^{-6} T_s^{1.75} / P_t$$

## 5. 좌표변환 및 수지식의 구성

고로의 형상은 Fig. 4와 같이 절사된 원추형태를 갖는 세 부분으로 나누어 볼 수 있으며, 이와 같은 형상에는 직교배열법을 적용하는 것이 거의 불가능하다. 윤 등[1]은 여기에 다음과 같은 좌표변환을 도입하여 정규 원통형으로 그 형상을 바꿀 수 있음을 제시하였고, 본 연구에서도 이 좌표변환을 이용하여 모델식을 재정리하였다.

$$z = z^* / R_t$$

$$r = r^* / R_t (1 + az^*) \quad (25)$$

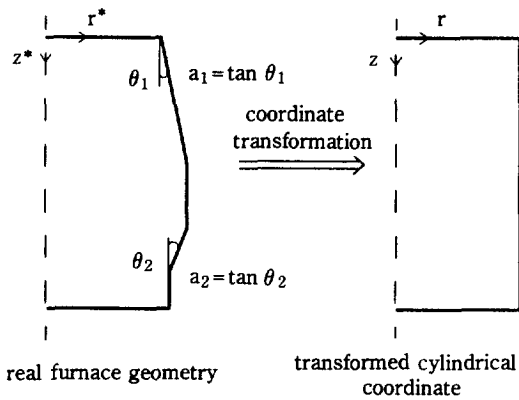


Fig. 4. Coordinate transformation.

여기서,

$R_1$ : 노경반경 (m)

### 5-1. 유동식의 구성

반응이 수반되지 않는 경우 고로내 유체의 유동은 실험적으로, 고로 형상을 따라 구성되는 유선을 흐르는 포텐셜흐름을 나타내는 것으로 보고되어 있다[5]. 실제로 반응에 의한 고체상의 체적손실(또는 증가)을 무시한 경우 유선은 기체, 고체상 모두  $dr^*/dz^* = ar^*/(1+az^*) = ar$ 의 관계를 만족한다.  $d/ds^*$ 를 사슬 법칙 및 신-구좌표계 사이의 관계에 의해 정리하여 식 (28)에 대입하면

$$G_{sz} = \{F_{ore}^o(1-R_M) + 2(R_M-R_W)/3 + 2R_F\} + F_{coke}^o / (\pi R_1^2) \quad (26)$$

여기서,

$F_{ore}^o, F_{coke}^o$ : 고로탑정에서 철광석 및 코우크스의 유입속도 (Kmol/hr)

기체상의 유동도 고체상과 마찬가지로 3장의 가정을 도입하였으며 이에 따라 반경방향의 흐름은 무시되고 축방향의 유속 만이 다음과 같이 표현된다.

$$G_{sz} = G_{N_2}^o \frac{P_t}{P_t - P_{co} - P_{co_2}} \quad (27)$$

여기서  $P_t$ 는 Ergun 식을 따르는 기체상의 총압력이다.

### 5-2. 물질수지식

고체상의 물질수지식은 3장의 가정에 의해 유선을 따르는 1차원모델로 표현하였다. 따라서, 철광석의 단위별 환원율은 다음과 같다.

$$\frac{dR_i}{ds^*} = R_1 \frac{6(1-\delta)}{\pi(2r_o)^2} \cdot \frac{V_i}{G_s^* d_{oi}}, \quad i=M, W, F \quad (28)$$

여기서,

$ds^*$ : 유선상의 미소거리

$V_i$ : 철광석의 환원반응속도 (Kmol/hr)

$G_s^*$ : 유선을 따르는 고체상의 mass flux (Kg/m<sup>2</sup> hr)

$d_{oi}$ : 철광석 중 피환원 산소농도 (Kmol/Kg)

문 등[1]에 의하면 반응에 의한 체적손실(또는 증가)을 무시한 경우 유선은 기체, 고체상 모두  $dr^*/dz^* = ar^*/(1+az^*) = ar$ 의 관계를 만족한다.  $d/ds^*$ 를 사슬 법칙 및 신-구좌표계 사이의 관계에 의해 정리하여 식 (28)에 대입하면

$$\frac{dR_i}{dz} = R_1 \frac{6(1-\delta)}{\pi(2r_o)^2} \cdot \frac{V_i}{G_s d_{oi}} \sqrt{1+(ar)^2}, \quad i=M, W, F \quad (29)$$

석회석의 분해율은

$$\frac{dR_s}{dz} = R_1 \frac{A_z V_{ls}}{w_s c_{is}^o} \sqrt{1+(ar)^2} \quad (30)$$

여기서,

$A_z$ : 고로의 단면적 (m<sup>2</sup>)

$w_s$ : 고체입자의 질량속도 (Kg/hr)

$c_{is}^o$ : 장입물 단위 질량당 석회석의 농도 (Kmol/Kg)

기체상에 대하여도 위와 같은 방법으로 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

CO 성분에 대하여:

$$G_{N_2}^o \left( \frac{1}{P_{N_2}} + \frac{P_{co}}{P_{N_2}^2} \right) \frac{dP_{co}}{dz} - \frac{G_{N_2}^o}{P_{N_2}^2} P_{co} \frac{dP_t}{dz} + \frac{G_{N_2}^o}{P_{N_2}^2} P_{co} \frac{dP_{co_2}}{dz} + R_1 \sqrt{1+(ar)^2} r_{co} = 0 \quad (31)$$

CO<sub>2</sub>성분에 대하여:

$$G_{N_2}^o \left( \frac{1}{P_{N_2}} + \frac{P_{co}}{P_{N_2}^2} \right) \frac{dP_{co_2}}{dz} - \frac{G_{N_2}^o}{P_{N_2}^2} P_{co_2} \frac{dP_t}{dz} + \frac{G_{N_2}^o}{P_{N_2}^2} P_{co_2} \frac{dP_{co_2}}{dz} + R_1 \sqrt{1+(ar)^2} r_{co_2} = 0 \quad (32)$$

H<sub>2</sub>성분에 대하여:

$$\frac{dP_{H_2}}{dz} = \frac{R_1 P_{N_2}}{G_{N_2}^o} \{ B_s V_{os} (V_{H_1} + V_{H_2} + V_{H_3}) - V_{BD} - V_{os} V_{wg} \} \quad (33)$$

여기서,

$r_{co}$ : 단위 충부피당 CO 가스 생성속도 (Kmol/m<sup>3</sup>)

hr)

 $\dot{r}_{CO_2}$ : 단위 총부피당  $CO_2$ 가스 생성속도(Kmol/m<sup>3</sup>

hr)

 $V_{os}$ : 단위 총부피당 철광석의 체적비 $V_{hi}$ :  $H_2$ 가스에 의한 철광석의 단계별 환원속도 (Kmol/개 hr)

$$B_r = 6(1-\delta)/(2r_o)^3$$

기타  $H_2O$  및  $N_2$ 의 물분율은 수소수지식 및 전체 농도 수지식으로부터 구하였고, 기체상의 전압분포는 Ergun 식으로부터 다음과 같이 표현된다[8].

$$-\frac{dP_t}{dz} = R_1 f_2 G_{sz}^2 \sqrt{1+(ar)^2}$$

$$f_2 = 1.75(1-\delta)/g_c \rho_g (2r_o)^3 \delta^3 \quad (34)$$

기체상 및 고체상의 온도분포식은 축방향의 확산효과를 무시하였고, 고로내의 온도가 대단히 넓은 영역의 값을 가지므로 열용량 및 열전도도는 모두 온도의 함수 단위로 고려하였다. 물질수지식과 마찬가지로 에너지수지식에 대해서도 좌표변환을 취하면 다음과 같은 온도 분포식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dT_s}{dz} = R_1 \left\{ \frac{K_{gr}^e}{R_1} \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) - \beta_s G_{sz} T_s / R_1 \right. \\ \left. + \frac{(1+az)^2}{1000} \Sigma \dot{r}_i (-\Delta H_i) + 3(1+az)^2(1-\delta)h \right. \\ \left. (T_g - T_s) / (r_o \phi) \right\} / (c_s G_{sz} + \alpha_s c_s T_s) \quad (35)$$

$$\frac{dT_g}{dz} = R_1 \left\{ \frac{K_{gr}^e}{R_1} \left( \frac{\partial^2 T_g}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) - \beta_g G_{sz} T_g / R_1 \right. \\ \left. - 3(1+az)^2(1-\delta)h (T_g - T_s) / (r_o \phi) \right\} \\ / (c_g G_{sz} + \alpha_g c_g T_g) \quad (36)$$

여기서,

$$\alpha_s = \partial c_s / \partial T_s, \quad \alpha_g = \partial c_g / \partial T_g$$

$$\beta_s = \Sigma \frac{\partial c_s}{\partial G_i} \cdot \frac{\partial G_i}{\partial z}, \quad \beta_g = \Sigma \frac{\partial c_g}{\partial P_i} \cdot \frac{\partial P_i}{\partial z}$$

$c_s, c_g$ : 고체상 및 기체상의 평균 열용량(Kcal/Kmol $\cdot$ K)

온도분포식의 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T_s}{\partial r} = \frac{\partial T_g}{\partial r} = 0, \text{ at } r=0, 0 \leq z \leq L/R_1$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial r} = -B_{i,s} (T_s - T_a) \text{ at } r=1, 0 \leq z \leq L/R_1$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial r} = -B_{i,g} (T_g - T_a) \text{ at } r=1, 0 \leq z \leq L/R_1 \quad (37)$$

$$B_{i,s} = R_1 \frac{k_w}{d_w(z) K_{gr}^e}$$

$$B_{i,g} = R_1 \frac{k_w}{d_w(z) K_{gr}^e}$$

 $k_w$ : 노벽의 열전도도(Kcal/m $\cdot$ hr $\cdot$ K) $d_w$ : 노벽의 두께(m)

## 6. 직교배열법을 이용한 다항식근사의 적용 및 수치해석방법

직교배열법은 정규좌표계에서 편미분으로 나타나는 식을 상미분으로 간략하게 근사할 수 있는 표준화된 방법[9, 10]이다. 위의 수지식들 중 온도분포식만이 편미분식으로 나타나며, 이 식에 반경방향으로 직교배열법에 의한 근사를 적용하여 상미분식으로 변환하면 아래와 같다.

$$\frac{dT_s^R}{dz} = R_1 \left\{ \frac{K_{gr}^e}{R_1} B^R T_s^R - \beta_s G_{sz} T_s^R / R_1 + \frac{(1+az)^2}{1000} \right. \\ \left. \Sigma \dot{r}_i (-\Delta H_i) + 3(1+az)^2(1-\delta)h (T_g^R - T_s^R) \right. \\ \left. / (r_o \phi) \right\} / (c_s G_{sz} + \alpha_s c_s T_s^R) \quad (38)$$

$$\frac{dT_g^R}{dz} = R_1 \left\{ \frac{K_{gr}^e}{R_1} B^R T_g^R - \beta_g G_{sz} T_g^R / R_1 \right. \\ \left. - 3(1+az)^2(1-\delta)h (T_g^R - T_s^R) / (r_o \phi) \right\} \\ / (c_g G_{sz} + \alpha_g c_g T_g^R) \quad (39)$$

내부배열점의 수를 N 개로 취할 경우, 풀어야 할 전체 방정식의 개수는 전압분포식, 고체상 및 기체상의 온도 분포식에서 각 N 개씩, 고체상의 물질수지식에서  $4 \times N$  개, 기체상의 물질수지식에서  $3 \times N$  개로 총  $10 \times N$  개가 된다. 이 방정식들을 동시에 해석하기 위하여 상미분방정식의 해를 구하기 위한 적분방법으로 Hamming's Predictor-Corrector Gill 방법을 이용하였고, 수치해석상의 오차를 줄이기 위하여 double precision을 취하였다.

## 7. 수치해석상의 문제점 분석

고로는 기체상과 고체상이 서로 반대방향으로 흐르며 반응, 열 및 물질전달이 일어나는 계이므로 수치해석상에 문제점이 발생할 수 있다. 즉, 기체상의 경우는 탑저에서 유입이 되므로 탑정의 초기조건으로부터 축방향을 따라 온도분포 등을 구하기 위해서는 흐름의 방향과 반대로 거슬러 올라가면서 해석해야 한다. 만일 기체상

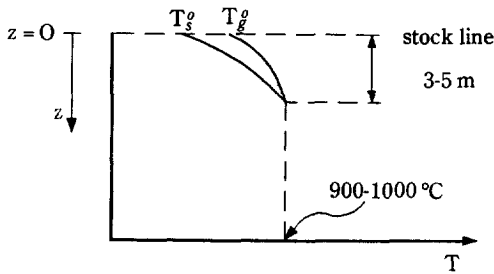


Fig. 5. Solid and gas temperature profiles near the stock line.

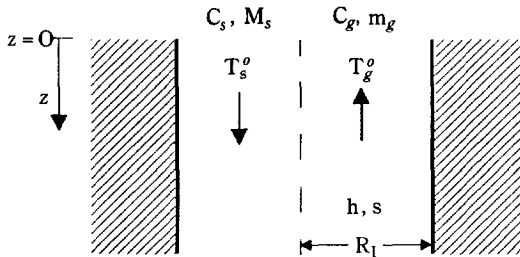


Fig. 6. A simplified 1-dimensional model of the blast furnace.

$h$ : heat transfer coefficient b.t.n. solid and gas ( $\text{Kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{K}$ ).

$s$ : heat transfer area b.t.n. solid and gas ( $\text{m}^2/\text{m}^3$  bed).

과 고체상 간의 열교환이 없다면, 이 문제는 근본적으로 불안정한 해를 주는 것이며 탐정에서 내려오면서 온도분포는 지수적으로 증가하는 형태를 나타낼 것이다. 실제 고로내의 온도분포는 기체상과 고체상이 열교환을 이루며 축방향을 따라 Fig. 5와 같은 모양을 갖는다고 알려져 있다. 그림에서 보듯이 기체상 및 고체상의 온도가 서로 만나는 지점은 stock line에서 가까운 곳이며, 실제 이 지점에 이르기까지는 온도가 낮아 반응량이 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 이 부근에서의 온도분포는 주로 기체상과 고체상의 열교환에 의해서만 형성된다고 볼 수 있으며, 이 분포는 기체상 및 고체상의 탐정에서의 초기온도 및 분포와 유속에 의하여 크게 지배를 받는다. 실제 모사를 하는 과정에서 이 초기값들이 적절하게 주어지지 않은 경우 수렴해를 구할 수 없었다. 이와 같은 문제점을 분석하고 타당한 온도분포를 얻기 위하여 Fig. 6과 같은 1차원모델을 이용한 간단한 해석을 통해 초기온도 및 유속비를 결정하였다. Stock line 부근에서 실제 고로의 조업자료 및 전달계수값을 이용하여 계산한 결과 기체상과 고체상 간의 열교환량이 외벽으로의 손실 및 반응열 보다 훨씬 큰 값

으로 나타나며, 이 경우의 온도분포식은 아래와 같이 근사된다.

$$\frac{dT_s}{dz} = -\alpha_1 (T_s - T_g) \quad (40)$$

$$\frac{dT_g}{dz} = -\alpha_2 (T_s - T_g) \quad (41)$$

여기서,

$$\alpha_1 = \frac{\pi R_1 h s}{m_s c_s}$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi R_1 h s}{m_g c_g}$$

초기조건은

$$T_s(0) = T_s^o, T_g(0) = T_g^o \quad (42)$$

식 (40), (41)을 식 (42)와 함께 풀면, 해는  $\alpha_2 - \alpha_1 < 0$  인 경우 안정해지며

$$T_s(\infty) = T_g(\infty) = \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_1 T_g^o - \alpha_2 T_s^o) \quad (43)$$

이 성립되어  $z$ 가  $\infty$ 일 때  $T_s$ 와  $T_g$ 가 만나지만, 실제로는  $T_s$ 가 상승하면 적철광에서 자철광으로 변환되는 반응이 일어나게 되어 고체상의 온도와 기체상의 온도가 stock line 이하의 짧은 거리에서 만나게 된다. 식 (43)의  $T(\infty)$ 를 실제 고로내의 두 상이 만나는 온도  $T^*$ 로 대치하면, 식 (44)와 같이  $T^*$ 를 예측할 수 있다.

$$T^* = \frac{1}{1 - (\alpha_2/\alpha_1)} (T_g^o - T_s^o) \quad (44)$$

식 (43)과 (44)를 살펴보면 두 상의 온도가 만나는 지점과 그 때의 온도  $T^*$ 는 초기온도  $T_g^o$ ,  $T_s^o$ 와  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ 에 지배되므로 합리적인 고로상부의 온도분포를 얻기 위해서는 적당한  $T_g^o$ ,  $T_s^o$  및  $m_g$ ,  $m_s$ 를 결정해야 한다.

## 8. 전산기 모사 및 결과

앞 절에서 보인 바와 같이 stock line 이하의 짧은 거리에서 기체상과 고체상의 온도가 타당한 분포를 가지며 만나도록 상부조건을 결정해준다면, 그 이후는 반응 등의 현상에 의해 온도분포가 형성될 것이므로 1차원모델에서 구한 자료를 토대로 설정한 고로상부의 기준조건들은 다음과 같다. 먼저 기준조업조건은 POSCO의 조업자료와 고로 전체의 탄소 및 산소수지식으로부터 구하여 Table 1에 나타내었다. 고체상 및



Table 1. Standard simulation conditions

Input flowrate	(Kmol/hr)
Magnetite	$2.578 \times 10^3$
Cokes	$1.221 \times 10^3$
Lime stone	20.8
Blast	$1.151 \times 10^3$
Initial conditions	
Mole fraction of CO	0.25
Mole fraction of CO <sub>2</sub>	0.22
Mole fraction of H <sub>2</sub> O	0.0287
Mole fraction of H <sub>2</sub>	0.0287
Solid temperature $T_s^i$	460 °K
Gas temperature $T_g^i$	350 °K

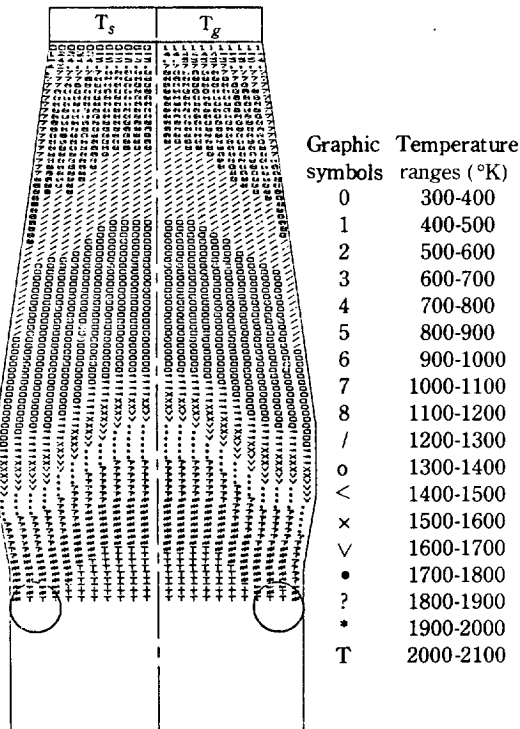


Fig. 7. Simulated temperature profiles using the standard simulation conditions.

기체상의 초기온도분포는 고로내의 온도분포가 convex 형으로 형성되는 것을 정상적인 상황으로 간주하여 수차의 반복시도에 의하여 다음과 같이 정하였다.

$$\begin{aligned} T_g^0(r_j, z) &= T_g^i - 13.0 \times r_j \\ T_s^0(r_j, z) &= T_s^i - 10.0 \times r_j \end{aligned} \quad (45)$$

여기서,

$r_j$ : 반경방향의 배열점

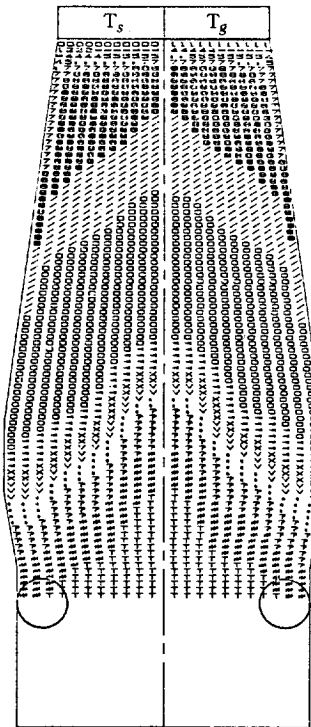


Fig. 8. Simulated temperature profiles using 5 internal collocation points.

The graphic symbols and temperature ranges are the same as Fig. 7.

Table 2. Computing times

No. of collocation points	4	5	6
time (min)	41	55	73

machine: IBM-PC/XT-4.77 MHz

Fig. 7은 Table 1의 기준조건과 식 (45)의 초기온도분포를 이용하고 내부배열점의 수를 4개로 취하여 모사한 결과로 참고문헌[11]에 소개되어 있는 고로를 냉각동결한 후 해체조사한 결과 및 杉山 喬 등의 연구 결과[5]와도 잘 일치함을 보인다.

Fig. 8과 9는 내부배열점의 수를 증가시키며 모사한 결과로, 그 수가 증가하여도 분포는 크게 달라지지 않으나, Table 2에서 보듯이 계산시간은 엄청난 차이를 보인다. 따라서 4개의 배열점으로 충분히 해석이 가능하므로 이후의 비교를 위한 모사는 모두 4개를 취하였다.

Fig. 10은 초기온도분포를 평평하게 준 경우의 모사 결과로 역 W형의 온도분포를 보인다. 기체상의 유속

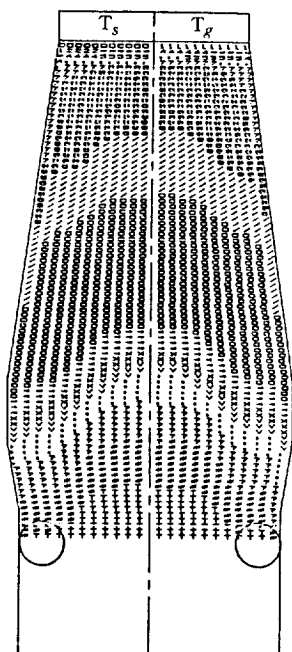


Fig. 9. Simulated temperature profiles using 6 internal collocation points.

The graphic symbols and temperature ranges are the same as Fig. 7.

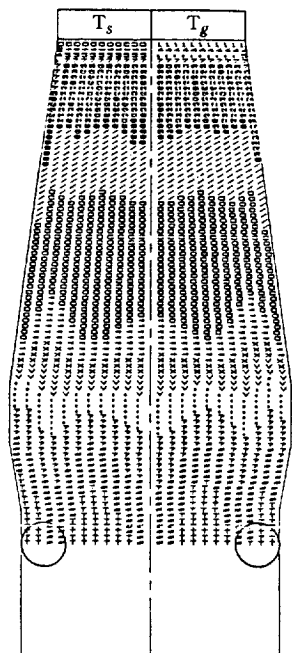


Fig. 10. Simulated temperature profiles using flat initial temperature distributions.

The graphic symbols and temperature ranges are the same as Fig. 7.

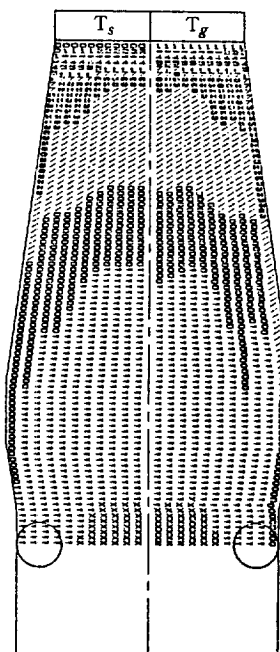


Fig. 11. Simulated temperature profiles for the case of increasing the initial gas flow-rate.

The graphic symbols and temperature ranges are the same as Fig. 7.

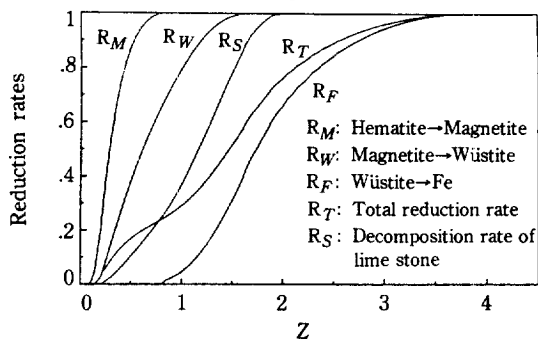


Fig. 12. Simulated profiles of reduction rates of iron ore and lime stone.

변화에 의한 영향을 살펴보기 위하여 유속을 10% 증가하여 모사한 결과를 Fig. 11에 보였다. 예상되는 바와 같이 기체상 및 고체상의 온도가 현저하게 낮아짐을 볼 수 있다.

Fig. 12는 철광석의 단계별 환원율, 총환원율 및 석회석의 분해율을 모사한 결과를 보인 것이다. 그림을 보면 철광석의 환원단계는 적철광에서 자철광으로의 발열반응이 가장 먼저 일어나서 앞 질에서 언급한 바와 같이 두 상의 온도가 일치하고, 자철광으로의 환원이

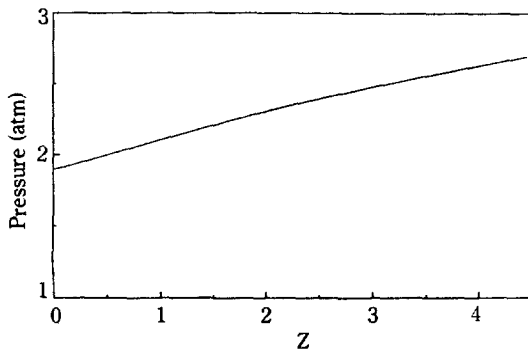


Fig. 13. Simulated total pressure distribution.

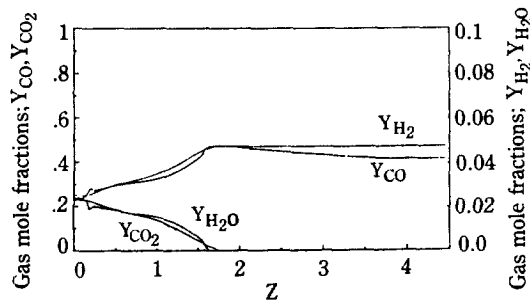


Fig. 14. Simulation result of gas mole fractions.

반 정도 진행되었을 때 자철광에서 비스타이트로의 흡열반응이 일어나기 시작하여, 두 반응이 경쟁을 하여 온도가 일정해지는 thermal reserve zone 이 형성된다.

이 지역은 자철광에서 비스타이트로의 반응이 끝난 뒤에도 잠시 유지가 되는데 이것은 비스타이트에서 철로의 환원발열반응과 이 온도범위에서 서서히 코우크스의 기체화 흡열반응이 일어나 서로 경쟁하기 때문이다. 비스타이트가 모두 철로 환원되고 나면 코우크스의 기체화반응 만이 일어나서 온도는 다시 상승한다. 위 과정에 의한 온도분포의 해석은 Fig. 7과도 잘 일치하며, 이 온도분포 그림과 비교해 보면, 적철광에서 자철광으로의 환원반응은 대략 600-900°K, 자철광에서 비스타이트로의 환원은 900-1200°K, 비스타이트에서 철로의 환원은 1100-1400°K 의 온도범위에서 각각 일어남을 알 수 있다.

고로내의 압력분포는 앞 절에서 보인 바와 같이 충전탑에서의 Ergun 식으로 구하였다. Fig. 13에 기본조건 조건 하에서의 기체상의 압력분포를 반경방향으로 평균값을 구하여 나타내었다. 이 결과는 Kuwabara 등 [12]과 Lahiri 등[3]의 연구결과와 같이 선형의 분포를 보이며, 실제 POSCO 고로 하부에서의 압력측정치보

다는 약 0.5 기압 정도 높게 나타났다. Fig. 14에는 기체상의 각 성분의 물분율의 모사결과를 반경방향에 대하여는 평균값을 구한 후 축방향의 변화로 나타내었다.

고체상의 유동은 유량함수를 정의하여 successive overrelaxation 방법으로 해석하였고, 그 결과는 앞 절에서 가정한 바와 같이 고로형상을 따르는 거의 직선에 가까운 형태를 보였다.

## 9. 결 론

고로내의 물질수지 및 온도분포를 파라볼릭형의 편미분방정식으로 모델화하였다. 이 편미분방정식을 해석하기 위하여 반경방향으로 직교배열에 의한 다항식 근사를 행하여 연립방정식으로 변환하였고, 이것을 적분패키지를 이용하여 해석하였다. 내부배열점의 수를 4, 5 및 6개로 변화시키며 계산을 행한 결과, 4개로도 내부현상을 잘 표현할 수 있었다.

철광석의 환원을 3계면반응모델을 도입하여 엄밀하게 해석하였으며, 계산된 각 단계별 환원을 및 총괄환원을 이 실제 고로내의 현상 및 다른 연구결과와도 잘 일치하였다. 또한 고로상부에서 기체상 및 고체상의 초기온도분포가 고로내의 온도분포를 형성하는데 큰 영향을 미치는 것을 단순화한 1차원모델에 의해 해석하였으며, 이 모델을 이용하여 적당한 초기조건을 설정할 수 있었다.

## 감 사

본 연구를 위하여 연구비를 지원해준 산업기술연구소에 감사를 드립니다.

## NOMENCLATURE

- B : collocation matrix
- c : heat capacity [Kcal/Kmol°K]
- d : particle diameter [m]
- G : molar flowrate [Kmol/hr]
- H : heat of reaction [Kcal/Kmol]
- K<sup>e</sup> : effective thermal conductivity [Kcal/m·hr·°K]
- K<sub>e</sub> : equilibrium constant
- k : reaction rate constant [m/hr]
- L : furnace length [m]
- N : number of particles [개/m<sup>3</sup> bed]
- P : pressure [atm]
- R : reduction ratio
- R<sub>1</sub> : furnace radius at top [m]

$R_g$  : gas constant [J/mol·°K]  
 $\dot{r}$  : reaction rate [Kmol/m<sup>3</sup>hr]  
 $s$  : surface area [m<sup>2</sup>]  
 $T$  : temperature [°K]  
 $Y$  : gas mole fraction  
 $z$  : normalized spacial variable

### Greek Letters

$\delta$  : void fraction  
 $\varepsilon$  : porosity  
 $\rho$  : density [Kg/m<sup>3</sup>]  
 $\phi$  : spherisity

### Superscripts

$o$  : initial condition  
 $R$  : reduced by boundary conditions  
 $s$  : saturated condition  
 $*$  : old coordinate

### Subscripts

$c$  : coke  
 $j$  : collocation point  
 $F$  : iron  
 $ls$  : lime stone

$M$  : magnetite  
 $W$  : Wüstite

### REFERENCES

1. 윤창구 외 : “고로내 유동과 온도분포의 수식화 연구 (II)”, 한국과학재단 연구보고서 (1985).
2. Yagi, J. and Muchi, I.: *Transactions ISIJ*, 392 (1970).
3. Lahiri, A.K. and Seshadri, V.: *JISI*, 293 (1969).
4. 原 行明 외 : 鐵と鋼, 3 (1976).
5. 杉山 喬 외 : 第 95 回 西山 紀念講座, 150 (1983).
6. 宮坂尚親 : 鐵と鋼, 14 (1968).
7. 田口整司 외 : 川崎製鐵技報, 10 (1970).
8. Ergun, S.: *Chem. Eng. Progr.*, **48**, 89 (1952).
9. Finlayson, B.A.: “The Method of Weighted Residuals and Variational Principles”, Academic Press, 1972.
10. Villadsen, J. and Michelsen, M.L.: “Solution of Differential Equation Models by Polynomial Approximation”, Prentice-Hall, 1978.
11. Peacey, J.G. and Davenport, W.G.: “The Iron Blast Furnace; Theory and Practice”, Pergamon, Oxford, 1979.
12. Kuwabara, M. and Muchi, I.: *Transactions ISIJ*, **17**, 331 (1977).