

연속제강공정의 Simulation Model

이 문 일, 송 영근, 심 재 동
한국과학기술원 화학공정연구실

Simulation Model at continuous
Steel-making process

Moon, Il and Song, Hyung Keun and Shim, Jae Dong
Chemical Process Lab., KAIST

Abstract

The phenomenon of a continuous Steel-making process was studied with a set of collected equilibrium data for the steel-oxidation reactions. Mass and Heat balances were also established. Mass transfer constants which are physically unmeasurable but essential for the simulation study in the steel-making process were calculated from the experimental data using an optimization technique. Based on these data various operating conditions and process characteristics were examined.

1. 서 론

철강공장에서는 기술의 진보에 따라 연속화 공정이 많이 이루어지고 있으나 제강공정 만은 아직도 어려운 문제점이 많이 남아있다. 생산성이 높다는 이유로 외분식 LD 전로가 철강공정에서 매우 중요한 역할을 해왔으나, 한편으로는 다음과 같이 이유로 연속제강에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다.

- 1) 완전 자동화공정이 가능하여 인건비와 유지비를 감소시키고 생산성을 향상시킨다.
- 2) 품질 (Quality) 을 정확히 조절할 수 있다.
- 3) 전체적인 열효율이 좋아진다.
- 4) 공정의 단위를 줄임으로써 실제적인 반응시간을 늘린다. [1]

[2][3][4]

본 연구에서는 NRIM 의 simulation 을 검토하고 발전시켜 연속제강공정에서 변화하는 인자들을 예상하고, 모델을 변경하였을 때에도 사용될 수 있는 기본 Algorithm 을 얻고자 한다.

2. 공정의 개요 및 기초수식

(1) 모델링에 필요한 가정

연속제강공정의 수학적 모델은 MRIM 에서 1960년대 이후에 주로 연구되었다. 일반적으로 연속제강반응의 윗속단계는 화학 반응이 아니라 물질의 확산(diffusion) 단계로 알려져 있고 [5] MRIM 에서도 이러한 기초위에서 모델링을 하였다. 이러한 가정을 종합하면 다음과 같다.

- 1) 산소 랜스 1 개를 1 개의 완전혼합조로 본다.
- 2) 흡정된 산소의 일부는 FeO 로써 슬랙상에 함유 되고, 나머지는 용강중에 흡수하는 것으로 본다.
- 3) 반응 속도는 반응 성분의 용강 내부에서의 농도와 슬랙상 혹은 기상에 평형하는 농도와의 차에 비례하고 이동 저항에 반비례한다.
- 4) CO 가스 생성 반응에서는 이동 저항이 배출 가스 생성속도에 반비례하고, 용강과 슬랙사이의 반응에서는 이동저항이 배출 가스 생성속도와 송산속도의 합에 반비례 한다.
- 5) CO 생성 반응에 있어서 가스, 용강 계면의 탄소와 산소의 농도는 $P_{CO} = 1 \text{ atm}$ 과 평형을 유지하는 것으로 가정한다.
- 6) 용강, 슬랙 사이의 반응에서 FeO 의 환원은 FeO 에 평형하는 산소농도 O_{eq} 와 용강속의 산소농도 0 의 차에 따라 진행하고, Si, Mn, p 의 산화는 각 원소의 슬랙상에 평형하는 농도와의 차에 따라서 진행되는 것으로 하며, 이 경우 FeO 의 환원을 동반하는 것으로 한다. 농도차가 음수인 경우에는 상기의 역반응이 진행되는 것으로 한다.

(2) 계면반응에서 수식 유도

앞의 가정대로 1 개의 렌즈에서 일어나는 물질이동을 그림으로 표시하면 다음과 같다.

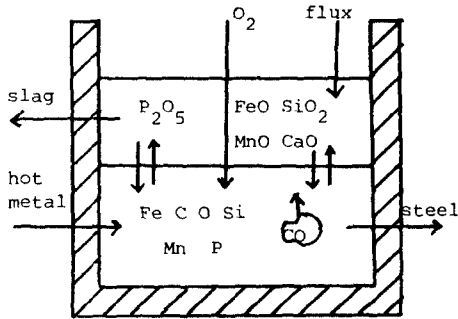


Fig.1 Material flow in the model

가정 (4) 에 따르면 탈탄반응은 waste (CO) gas 의 양에만 비례한다. 또한 이동 저항 상수 R 은 가스유량의 역에 비례한다고 하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

반응:

$$R_{CO} = \alpha_{CO} / V_{CO} \quad \text{----- (1)}$$

용강. 슬래크반응:

$$R_j = \alpha_j / (V_{CO} + V_{O2}) \quad \text{---- (2)}$$

여기서 α 는 각 원소 ($j = O, Mn$) 의 반응 비례 정수. C, O 와 CO bubble 간의 평형농도 C^*, O^* 는 아래의 (5) 식에서 얻어진다. 두 원소가 $C + O = CO$ 반응을 stoichiometrical 하게 만족한다고 가정하면 평형관계에서

$$K_{CO} = P_{CO} / (C^* \cdot O^*) \quad \text{--- (3)}$$

$$O - O^* = \frac{16}{12} (C - C^*) \quad \text{--- (4)}$$

(3) 과 (4) 에서 $P_{CO} = 1 \text{atm}$ 이라면

$$O^* = \left[O - \frac{4}{3} C + \sqrt{\left(O - \frac{4}{3} C\right)^2 + 16/3 K_{CO}} \right] / 2 \quad \text{.. (5)}$$

가정 (6) 에 따라 O, Si, Mn, p 의 평형농도는 다음의 수식에서 구한다.

$$\log K_O = \log \left[\frac{[\% O_{eq}]}{\gamma_{FeO} \cdot N_{FeO}} \right] = -6150/T + 2.604 \quad \text{..(6)}$$

$$\log K_{Si} = \log \left\{ \frac{[\% Si_{eq}][\% O_{eq}]^2}{\gamma_{SiO_2} \cdot N_{SiO_2}} \right\} = -30720/T + 11.76 \quad \text{..... (7)}$$

$$\log K_{Mn} = \log \left\{ \frac{\gamma_{MnO} \cdot Mn}{\gamma_{FeO} \cdot N_{FeO} [Mn_{eq}]} \right\} = 6440/T - 2.95 \quad \text{..... (8)}$$

$$\log K_P = \log \left\{ \frac{N_{PO_4}^{3-}}{[\% P_{eq}] (N_{Fe}^{2+})^{5/2} (N_O^{2-})^{1/2}} \right\} = 14660/T + 7 N_{Ca}^{2+} - 7.44 \quad \text{..... (9)}$$

여기서 $\gamma_{FeO} = 2.41$, $\gamma_{SiO_2} = 0.01$, $\gamma_{MnO} = 2.80$. [6]

N : 각 원소의 mole fraction.

3. 물질 및 열수지

(1) 물질 수지

1) 기오정리

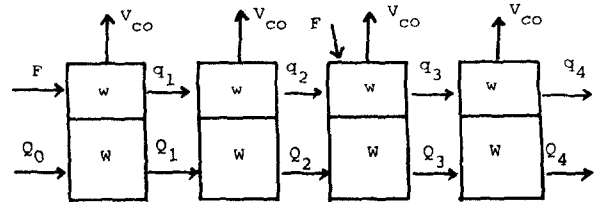


Fig.2 Nomenclature

Q_i : 용강상의 유량 (kg/min)

q_i : 슬래크상의 유량 (")

F_i : lime. Flcorepar-iron ore 의 유량 (")

C_{ij} : 용강상의 농도

i: i 번째 흐름 ($i = 0, \dots, 4$)

J: 조성 ($j = 1, \dots, 5$)

1=C, 2=O, 3=Si, 4=Mn, 5=P

CS_{ij} : 슬래크상의 농도

i : i 번째 흐름 ($i = 0, \dots, 4$)

J ; 조성 ($j = 1, \dots, 4$)

1=SiO₂, 2.MnO, 3.P₂O₅, 4.FeO

2) 수식정리

가정 (1) 에 따라 용강상의 i 번째 완전혼합조에서 성분 k 에 대한 물질수지를 세우면

$$d(Wi \cdot C_{jout}) / dt = Q_{in} C_{jin} - Q_{out} C_{jout} - \Delta C_j / R_j = \dots \dots \dots (10)$$

여기서 용강. 슬랙 반응일때

$$\Delta C_j = C_{jout} - C_{jeq} \dots \dots \dots (11)$$

용강. 가스 반응일때

$$\Delta C_{j=c} = C - C^* \dots \dots \dots (12)$$

$$C^* = \frac{\frac{4}{3} C - O + (O - \frac{4}{3} C)^2 + 16/3Kco}{8/3} \dots \dots (13)$$

$$R_j = \alpha_j / (Vco + VO_2) \dots \dots \dots (14)$$

마찬가지로 슬랙상에서 k 성분에 대한 물질수지는

$$d(Wi \cdot C_{kout}) / dt = q_{in} C_{kin} - q_{out} \cdot \Delta C_{kout} + M_k \cdot \Delta C_j / (m_j \cdot R_i) \dots \dots \dots (15)$$

용강중 철의 물질수지를 세우면

$$d(Wi \cdot C_{Fe.out}) / dt = Q_{in} \cdot C_{Fein} - Q_{out} (Fe.out - O_2 \cdot in \cdot X \cdot M_{Fe} / m_o + \sum m_{Fe} \cdot \Delta C_j / (m_j R_i) - M_{Fe} (O_{out} - O_{eq}) / (m_o \cdot R_o) \dots (16)$$

여기서 X 는 Oxygen Delivery coefficient

$$X = \frac{\text{FeO 를 명성하는 사용된 산소의 양}}{\text{흡정 산소의 양}} \dots \dots (17)$$

용강중 산소의 물질수지는

$$d(Wi \cdot O_{out}) / dt = O_{2in} (1-X) + Q_{in} \cdot O_{2in} - Q_{out} \cdot O_{out} - (O_{out} - O^*) / R_{co} - (O_{out} - O_{eq}) / R_o \dots \dots \dots (18)$$

슬랙 중 FeO 의 물질수지는

$$d(Wi C_{FeO}) = q_{in} \cdot C_{FeO.in} - q_{out} \cdot C_{FeO.out} + O_2 \cdot in \cdot X \cdot m_{FeO} / m_o - \sum m_{FeO} \cdot \Delta C_j / (m_j \cdot R_j) + m_{FeO} (O_{out} - O_{eq}) / (m_o \cdot R_o) \dots \dots \dots (19)$$

(2) 열 수지

i 번째 반응조에서 들어가는 열을 Hin, 나가는 열을 Hout, 반응열을 Hr, 열손실을 Hl 이라고 하면 열수지는

$$dHi / dt = Hin - Hout + H4 - Hl \dots \dots \dots (20)$$

여기서

$$Hin = \sum C_{pn} \cdot \Delta T_n \cdot U_n \dots \dots (21)$$

$$Hout = \sum C_{p.p} \cdot \Delta T_p \cdot U_p \dots \dots (22)$$

$$Hr = \sum H_j (C_{jout} - C_{jeq}) / R_i + \Delta H_{co} (C_{out} - C^*) m_{co} / M_c R_{co} + \Delta H_{FeO} (O_{2in} \cdot X \cdot m_{FeO} / m_o - m_{FeO} (C_{jeq}) / m_j - R_j) \dots (23)$$

$$Hei = Hl \dots \dots (24)$$

(3) 전산 프로그램

NRIM 의 모사공장 자료를 이용하여 앞에서 유도한 용강상과 슬랙상에서 물질수지 및 열수식을 정상상태에서 Gauss Newton Method 로 각 원소의 농도온도, 반응 상수를 구하였다. MARQUARDT [7] 라는 이 방법은 최소자승법을 이용하여 목적함수를 최소화 시킨다.

(4) 계산 결과

1) 각 반응기에서 농도

각 반응기의 농도변화를 그림3에 나타내었다.

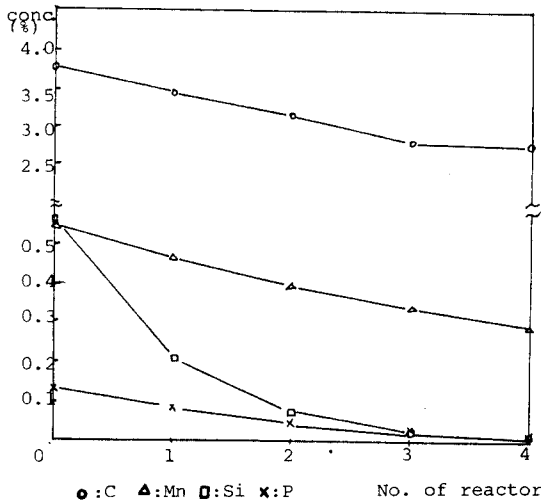


Fig3. Conc. variation at each reactor(exp 58-1)

2) 반응 상수

반응 상수의 계산 결과와 문헌치를 비교하면 다음과 같다.

실험번호	58 - 1		59		60	
	계산치	문헌치	계산치	문헌치	계산치	계산치
co	0.00050	0.00019	0.00013	0.0002	0.00014	0.00014
i	0.0065	0.0071	0.0076	0.0063	0.0069	0.0069
Mn	0.0640	0.0240	0.0439	0.0218	0.0548	0.0548
p	0.0240	0.0116	0.0188	0.0080	0.0292	0.0292

Table1. computed reaction constant.

4. 모델의 응용

(1) 랜스 수의 변화에 따른 농도 예측

앞에서 계산한 변수 (반응상수, 유량, 온도) 를 이용하여 랜스 수의 변화에 따른 반응조의 농도를 예측하였다. NRIM 실험 58-1 의 초기 선철 농도를 input data 로 하여, 랜스의 수에 따른 Si, Mn, p 의 농도 변화를 그림 4 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 랜스의 수가 늘어나면 각 원소가 산화하여 농도는 떨어지나 감소율은 증가하지 않는다. 따라서 실제 공장을 세울때는 원하는 제품의 농도, 가격, 장치비 등을 고려하여 최적의 랜스 수를 결정하여야 한다.

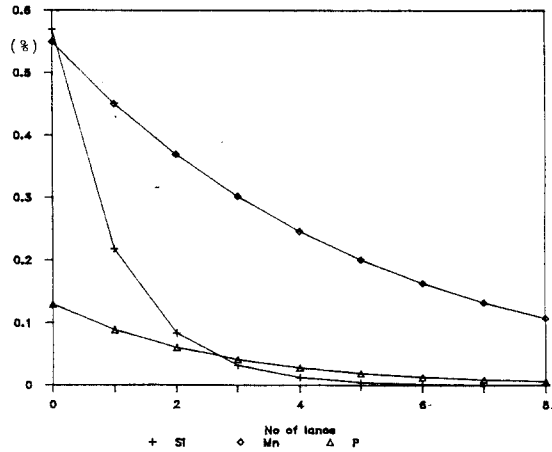
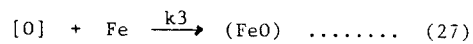
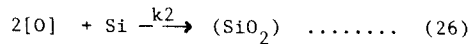
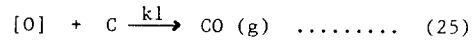


Fig.4 Conc. variation at each reactor

(2) 완전혼합 반응기와 관 흐름 반응기의 비교

철, 탄소, 규소의 농도 변화를 고려하여 보자. 이들의 산소와 반응식은



여기서

$$K_1 = 100kg(Fe)/kg.mol(O).sec$$

$$k_2/k_1 = 20kg mol (c)/kg.mol (Si)$$

$$k_3Co/k_1 = 10^{-4}kg mol (c)/kg(Fe)$$

각 조성의 반응율을 다음과 같이 정의하자. [8]

$$Z_1 = k_1 C_e / (k_1 C_c + k_2 C_{si} + k_3 C_{Fe}) \dots (28)$$

$$Z_2 = k_2 C_{si} / (k_1 C_c + k_2 C_{si} + k_3 C_{Fe}) \dots (29)$$

$$Z_1 + Z_2 + Z_3 = 1 \dots\dots\dots (30)$$

여기서 C_c, C_{si}, C_{Fe} 는 탄소, 규소, 철의 농도. 농도의 시간에 따른 변화율은 산소량과 반응물의 곱에 비례한다

$$\frac{dC_c}{dt} = -Z_1 O_2 \dots\dots\dots (31)$$

$$\frac{dC_{Si}}{dt} = -Z_2 O_2 \dots\dots\dots (32)$$

전체 반응기중 관흐름의 비율을 P 라 하고, 반응기의 체류 시간을 I 라하면 체류시간 함수 E(t) 는 아래와 같다.

$$E(t) = \frac{1}{1-P} \exp\left(-\frac{t/I - P}{1-P}\right) \dots\dots (33)$$

i 조성의 평균 농도는

$$[C_i] = \frac{E(t) \cdot C_B(t) dt}{E(t) dt} \dots\dots (34)$$

산소유량은 2.2 Nm³/min, 탄소, 규소의 초기농도를 각각 3.85%, 0.61%로 대입하여 P와 C_i의 관계를 계산하여 그림5에 나타내었다. (34) 식을 적분할때 time 을 등 간격으로 하면 지수함수 때문에 오차가 크므로 time 을 지수함수의 간격으로 나누어 적분하였다.

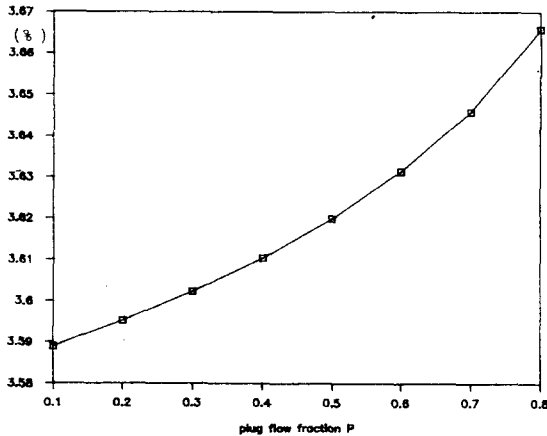


Fig.5 Conc. variation with P

5. 결 론

본 연구 내용을 정리하면 아래와 같다.

- 1) 연속제강공정에서 일어나는 반응을 요약하고 모델을 세움.
- 2) 물성 및 반응자료를 요약.
- 3) 물질 및 열수지 식을 계산함.
- 4) 고유의 상수를 계산하여 반응기의 상태를 예측함.

5) 반응기의 혼합특성을 규명함.

새로운 연속제강 반응기를 설계하고 운전할때, 본 연구 결과를 토대로 혼합특성, 반응기 내의 상태 (농도, 온도, 유량) 등을 예측할 수 있다.

6. 참 고 문 헌

- 1) 양운영, "제철제강공학", 문운당, 1980
- 2) Howard K. Worner. et al "WORCRA steelmaking" J. of metals. June. 1969
- 3) Ryuichi Nakagawa, et al. "Studies of NRiM Cont. St. Process ", Transactions ISIJ. vol 13, 1973
- 4) Akira Fukujawa. et al. "On a reaction model of the oxygen Steelmaking Process" Transactions ISIJ. vol 19. 1979
- 5) I. S. Darken, "Basic Open Hearth Steelmaking "AIME 1951. (592)
- 6) Akira Fukuzawa, Ryuichi Nakagawa, Shiro Yoshimatsu and Takyya Ueda, "Simulation of the NRiM Continuous Steelmaking Process". Transactions ISIJ. vol 18. 1978
- 7) James L. Kuester, Joe H. Mize, "Optimization Techniques" McGRAWHILL, 1973.
- 8) 上田卓弥, '金材技研式連続製鋼装置의 反応工学的 考察' 일본광업회지/89, 1025