

용착대 예측을 위한 고로공정 모델링

양광혁* · 최상민** · 정진경**

Blast Furnace Modeling for Predicting Cohesive Zone Shape

Yang Kwangheok*, Choi Sangmin** and Jung Jinkyung**

ABSTRACT

Analysis of the internal state of the blast furnace is needed to predict and control the operating condition. Especially, it is important to develop modeling of blast furnace for predicting cohesive zone because shape of cohesive zone influences overall operating condition of blast furnace such as gas flow, chemical reactions and temperature. because many previous blast furnace models assumed cohesive zone to be fixed, they can't evaluate change of cohesive zone shape by operation condition such as PCR, blast condition, and production rate. In this study, an axi-symmetric 2-dimensional steady state model is proposed to simulate blast furnace process. In this model, cohesive zone is changed by solid temperature range, FVM is used for numerical simulation. To find location of cohesive zone whole calculation procedure is iterated Until cohesive zone is converged. Through this approach, shape of cohesive zone, velocity, composition and temperature within the furnace are predicted by model.

Key Words : Blast furnace, Modeling, cohesive zone, 2D

기 호 설 명

P	Pressure (Pa)		
G	Mass flow rate (kg/m ² ·s)		
ϵ	Porosity	PCR	Pulverized coal rate
ϕ	Shape factor		
ψ	Solid velocity potential	하첨자	
h_{gs}	Heat transfer coefficient between gas and solid	g	gas phase
		s	solid phase
R	Reaction rate (kmol/m ³ ·s)		

1. 서론

고로공정은 철광석을 환원시켜 선철을 생산하는 공정으로써 제선공정의 핵심이라 할 수 있다. 고로는 항류식 반응기(Counter current reactor)로써 철광석은 고로에 피코크스 및 석회석과 함께 장입되고, 고로 하부에서 1100°C 가량의 뜨거운 공기 또는 산소 부화공기가 풍구로 유입되어 코크스를 연소시키고 이로부터 발생하는 환원가스

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

† 연락저자, smchoi@kaist.ac.kr

*** POSCO 기술연구소 제선연구그룹

(CO, H₂)에 의해 장입물이 가열, 환원 및 용해되어 선철과 슬래그가 출선구를 통해 배출된다. 고로내부는 일어나는 현상에 따라 피상대, 연화용착대, 데드맨, 연소대의 영역으로 나눌 수 있다. 고로의 생산기술로는 조업안정화, 생산성 증대, 연료비 절감, 설비의 대형화 형식으로 이뤄지는데 설비의 특성상 노내의 현상을 파악하기 위한 실측이 어려운 부분이 많이 있다. 실제 고로의 해체와 같은 작업은 경제적, 시간적인 면에서 효과적이지 못하기 때문에 노내 현상 이해에 대한 난점이 존재한다. 이러한 어려움을 해결하기 위해서 기본적인 노내의 현상예측, 공정 운전 조건의 실시간 예측 그리고 공정을 제어하기 위한 모델링이 많이 이뤄지고 있다. 실제 고로 모델링에 관한 많은 연구가 일본을 중심으로 진행되어 왔으며, 기술적으로 선도하는 위치에 있다. 특히 고로내 현상을 결정하는 데 있어서 고로 용착대의 형상은 중요한 역할을 하게 된다. 용착대에서는 철광석이 용융되어 환원되기 때문에 기체의 투과성이 크게 떨어지게 된다. 그러므로 용착대를 지나는 가스는 코크스 슬릿을 통하여 통과하게 되고 이러한 가스의 흐름이 원활하게 이루어져야 환원반응이 활발하게 일어나게 된다. 그러므로 노내 운전상황을 파악하기 위해서는 용착대에 대한 평가가 필수라 할 수 있다.

현재까지 진행된 고로 모델링을 살펴보면, Yagi 등은 고체, 기체, 액체, 입자의 4상을 고려하여 정상상태 2차원 모델을 수립하였다.[1,2,3], 또한 BRIGHT 모델에서는 장입분포 모델을 고려하여 장입물의 온도분포나 화학조성 만이 아니라 장입물의 분포를 예측하였다.[4] 또한 최근에는 2차원 모델 뿐만 아니라 3차원 정상상태 모델[5], 비정상상태[6] 모델 등이 개발되었다.

국내에서의 연구를 살펴보면 정등은 연소대의 심도, 분의 축적위치 변화에 대한 노내 운전상황의 변화를 모사하였다.[7] 하지만 용착대의 형상을 예측하지 않고 고정하였기 때문에 운전조건에 따른 용착대의 형상의 변화를 예측하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 고로를 정상상태 2차원 모델로 모사하고 용착대의 형상을 온도범위에 의해 예측할 수 있는 모델을 개발하고자 한다.

2. 고로 공정 예측 모델링

2.1 모델링 주요 내용

이 연구에서 고려하고 있는 정상상태 축대칭 2차원 모델이다. 실제 노내에서는 기체, 고체, 액체의 3상이 존재하게 되지만 모델에서는 고체, 기체의 2상만을 고려하며 각 상의 구성성분은 Table 1에 나타난 것과 같다.

Table 1 Species of gas and solid phase

Phase	Gas	Solid	
Species	CO	Ore	Fe ₂ O ₃
	CO ₂		Fe ₃ O ₄
	H ₂		Fe _w O
	H ₂ O		Fe
	N ₂		Coke

모델링을 위한 주요 가정은 다음과 같다.

- (1) 가스의 유동을 고려하기 위해 Ergun's equation을 적용하였다. 이 때 가스의 생성, 소멸되는 양은 노내로 들어오는 송풍량에 비해 작을 것이라 생각하여 무시하였다.
- (2) 고체의 속도는 포텐셜 흐름으로 가정한다.
- (3) 연소대에서의 현상은 이 모델에서 해석하지 않고 단일화염온도와 가스의 조성을 계산하여 경계조건으로 적용하였다.
- (4) 데드맨의 형상은 가정하여 계산을 수행하였다.
- (5) 광석층과 코크스층의 층상구조는 고정되어 있다고 생각한다.
- (6) 화학반응에 의해 광석과 코크스가 입경이 변하는 것을 고려하지 않고 입경을 위치에 따라 주어진 값으로 고정하여 계산하였다.
- (7) 용착대의 형상은 온도범위로서만 정의하여 온도에 따라 용착대의 형상이 바뀌는 것으로 생각하였다.

2.2 지배 방정식

각 상에 대해 질량, 운동량, 엔탈피, 화학조성에 대한 보존식이 계산되고, 2차원 정상상태 축대칭 모델을 생각하여 원통좌표계를 고려한다.

2.2.1 기체상과 고체상의 유동

기체 유동은 어건의 식(Ergun's equation)을 2차원으로 확장하여 강요하였다.

$$-\nabla P = (f_1 + f_2 \left| \frac{\mathbf{u}}{G_g} \right|) \frac{\mathbf{u}}{G_g}$$

여기서,

$$f_1 = 150 \frac{(1 - \epsilon_i)^2 \mu}{(\phi dp_i)^2 \epsilon_i^3 \rho_g}, \quad f_2 = 1.75 \frac{(1 - \epsilon_i)}{\phi dp_i \epsilon_i^3 \rho_g}$$

고체상의 속도도 속도 속도포텐셜의 구배에 비례하여 하강한다고 가정하였으므로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$-\nabla \psi = \mathbf{G}_s$$

$$\nabla \cdot (-\nabla \psi) = \nabla \cdot \mathbf{G}_s = 0$$

2.2.2 에너지 보존식

기체상에 대한 에너지 보존식은 다음과 같이 전도, 대류, 고체와의 상간 열전달을 고려하여 다음과 같이 고려하였다.

$$\nabla \cdot (\dot{C}_p C_p T_g - k_g \nabla T_g) = h_{gs} A_{gs} (T_s - T_g)$$

고체상의 에너지 수지식의 경우에는 확산, 대류 및 상간 열전달 외에도 반응열을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (\dot{C}_s C_s T_s - k_s \nabla T_s) = h_{gs} A_{gs} (T_g - T_s) - \sum (-\Delta H_j) R_j$$

2.2.3 화학종 보존식

반응성분들 (CO, CO₂, H₂, H₂O 및 N₂)의 물분을 보존식을 성분들간의 확산, 대류 및 화학반응에 의한 생성/소멸을 고려하였다.

$$\nabla^2 \left(D_i \frac{P}{RT} Y_i \right) + \nabla (G_i Y_i) = -\sum R_j$$

2.3 경계조건

Figure 1에 계산에 사용된 경계조건을 타나내었다. 기체 유동을 제외한 나머지 온도, 화학조성에 대해서는 연소대를 경계조건으로 설정한다. 연소대에서는 풍구로 들어온 모든 산소(수분 증산소 포함)는 C와 반응하여, CO와 H₂를 생성한다고 생각하고, 이때의 단일화염온도를 계산하여 연소대에서의 온도조건으로 설정하였다.[8] 기체 유동은 입구조건으로 풍구에서의 질량유량, 출구조건으로는 노정에서의 압력조건을 주게 된다. 고체와 기체의 온도는 각각 입구에서의 온도조건, 출구에서는 diffusion에 의한 heat flux가 0이라는 조건을 사용하게 되고, 벽면에서는 수관벽을 통해 냉각이 이루어지기 때문에 그에 의한 열손실을 고려하여야 한다. 벽면에서의 총괄 열전달 계수는 고체와 기체상에 대해 각각 0.05와 0.03 (kcal/m²·sec·K)으로 주어지게 되고 벽면의 온도는 300K로 주어지게 된다. 또한 노 중심에서는 축대칭 조건에 의해 모든 값의 구배가 0이 되게 된다.

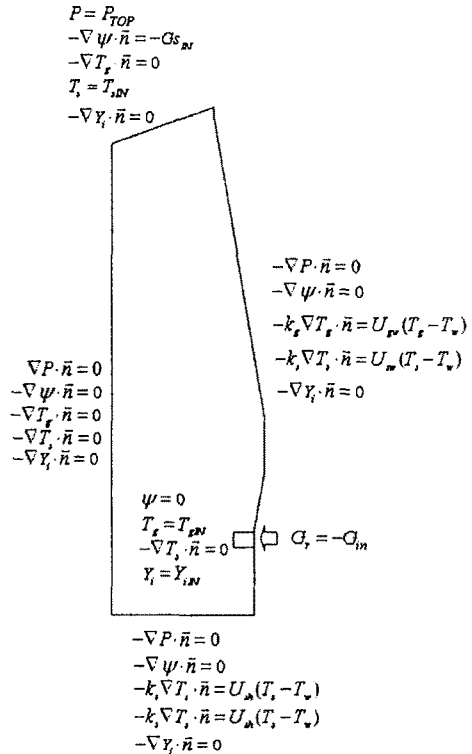


Figure 1. Boundary condition

2.4 열전달

고체상과 기체상 사이의 대류 열전달 계수는 Ranz-Marshall equation을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다. 여기에서 scaling factor γ (stack에서는 0.2, bosh에서는 0.02)는 Hatano에 의해 제안된 값을 사용한다.[9]

$$h_{gs} = \gamma \frac{k_g}{d_s} (2.0 + 0.6 Re_{gs}^{1/2} Pr_g^{1/3})$$

단위체적당 열전달량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

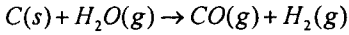
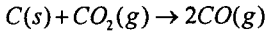
$$\dot{Q}_{gs}^v = h_{gs} \frac{6(1-\epsilon_i)}{dp, \phi} (T_g - T_s)$$

여기서 i 는 고체상의 층을 나타낸다.

2.4 화학반응

이 모델에서 고려하는 반응은 철광석과 환원가스에 의한 간접환원반응, 코크스와 가스상 사이의 반응이 고려되고 각 반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

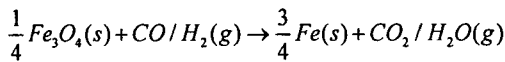
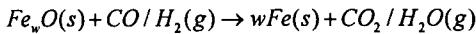
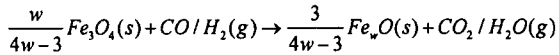
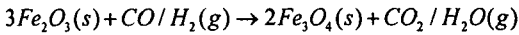
2.4.1 코크스 반응



코크스 반응의 반응속도는 다음의 식[10]을 사용하여 구한다. 여기서 k 는 rate constant를 나타낸다.

$$R_i = \frac{146.3(1 - \varepsilon_c)k_i Y_i}{d_p(T_g + T_s)}$$

2.4.2 철광석 환원 반응



반응속도는 다음의 식을 사용하여 구하고 k 는 반응상수, K 는 평형상수를 나타낸다.

$$V_i = 4\pi r_0^2 k_i \frac{P}{R_g T_g} \left(Y_i - \frac{Y_j}{K_i} \right)$$

여기서 i 는 CO 또는 H_2 , j 는 CO_2 나 H_2O 를 나타낸다. 이것을 단위 체적당 반응속도 ($kmol/m^3 \cdot s$)로 변환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i = \frac{6(1 - \varepsilon_c)}{\pi d_p^3} V_i$$

반응속도는 각 지점에서의 환원율과 화학조성을 고려하고 각 반응이 일어나는지를 확인한 다음 계산하도록 하여야 한다.

3. 수치해석 방법

3.1 격자구성

격자 구성을 Figure 2 와 같이 1235개의 절점 (node)과 1152개의 요소로 분할하였다. Stack zone에서의 격자의 모양은 층의 구조에 의해 결정되었다.

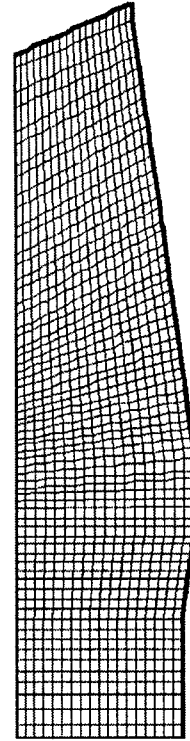


Figure 2. Grid structure

3.2 해석방법

지배 방정식의 이산화를 위해 고체와 가스의 두 상에 대해 유한체적해석(Finite volume method)를 적용하였다. 미분항은 upwind scheme[11]을 사용하여 처리하였다. Figure 3은 수치해석의 흐름도를 나타내고 있다. 온도조건에 의해 유착대의 형상이 변화하고 유착대의 형상은 가스의 유동을 변화시켜 온도, 화학반응에 영향을 미치기 때문에 유착대의 형상이 수렴할 때까지 모든 계산을 반복하여 풀어주게 된다.

철광석과의 환원반응에 의해 입경이 25mm로 줄어들게 된다. 또한 데드맨은 기체가 거의 통과하지 못하는 부분이므로 공극률을 0.20으로 설정하였다. 철광석은 용착대에서의 낮은 투과성을 반영하기 위해 공극률을 0.10으로 설정하였다. 그리고 벽쪽의 철광석은 10mm의 입경을 가진다.

Table 3 Layer Properties

Layer		$d_p(m)$	ϵ	ϕ
Coke	Central column	0.050	0.45	0.90
	Top~cohesive	0.050	0.43	0.90
	Cohesive~tuyere	0.025	0.43	0.90
	Deadman	0.025	0.20	0.90
Ore	Cohesive	0.0191	0.10	0.84
	Top~cohesive	0.0191	0.36	0.84
	Near-wall	0.0100	0.36	0.84

4.1.3 계산결과

Figure 4, 5 에 위의 모델을 사용하여 계산된 결과를 나타내고 있다. 현재는 가스와 고체상의 상간 열전달만이 고려되고 있으며, 다음단계로써 화학반응을 추가하여 계산을 수행하고자 한다. Figure 4는 가스유동을 Figure 5는 가스와 고체상의 온도를 나타내었다.

현재의 계산결과는 고체의 온도가 전체적으로 낮고, 노 중심에서의 온도가 낮게 나오는 등의 개선점을 보이고 있다. 하지만 온도범위에 의한 용착대 예측이 이루어지고 있으며 용착대의 형상에 의해 가스유동, 온도분포 등이 물리적으로 타당한 결과를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다.

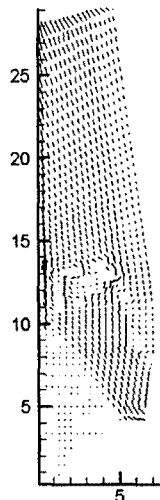


Figure 4 simulation result - gas flow

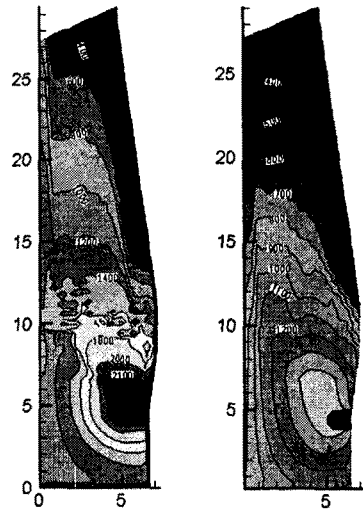


Figure 5 simulation result - gas and solid temperature (K)

4. 결론

FVM을 이용하여 고로내 용착대의 형상을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 용착대의 형상은 온도범위로부터 정의되며 반복계산을 통해 용착대의 형상을 도출할 수 있었다. 향후 연구에서는 화학반응을 모델에 추가하여 화학반응에 의한 용착대 형상의 변화, 그리고 여러 가지 운전조건에 따른 용착대 형상변화 등을 살펴보고 실제 측정결과와 비교하고자 한다.

그리고 현재는 장입물의 층상구조를 고정된 상태로 계산을 수행하고 있기 때문에 장입방법에 따라 층상구조가 변화하는 경우에 대한 영향을 살펴볼 수가 없다는 한계를 가지고 있다. 그러므로 이 모델을 층상구조 예측 모델과 연계하여 여러 가지 층상구조를 반영할 수 있게 확장하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 POSCO 기술연구소와 연소기술연구센터(CERC)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고문헌

[1] P. R. Austin, H. Nogami and J. Yagi, "A Mathematical Model of Four Phase Motion and Heat Transfer in the Blast Furnace", *ISIJ*

- International* 37, 1997, pp. 458-467.
- [2] P. R. Austin, H. Nogami and J. Yagi, "A Mathematical Model for Blast Furnace Reaction Analysis Based on the Four Fluid Model", *ISIJ International* 37, 1997, pp. 748-755.
- [3] P. R. Austin, H. Nogami and J. Yagi, "Analysis of Actual Blast Furnace Operations and Evaluation of Static Liquid Holdup Effects by the Four Fluid Model", *ISIJ International* 38, 1998, pp. 246-255.
- [4] Takashi Sugiyama and Masayasu Sugata, "Development of Two-Dimensional Mathematical Model for the Blast Furnace "BRIGHT"", *Nippon Steel Technical Report* 35, 1987, pp. 32-42.
- [5] J. A. Castro, H. Nogami and J. Yagi, "Three-dimensional Multiphase Mathematical Modeling of the Blast Furnace Based in the Multifluid Model", *ISIJ International* 39, 1999, pp. 15-22.
- [6] K. Takatani, T. Inada and Y. Ujisawa, "Three-dimensional Dynamic Simulator for Blast Furnace", *ISIJ International* 39, 1999, pp. 15-22.
- [7] 김정희, 박판옥, 정용옥, 정진경, 허완옥, "정상상태 고로에 미치는 미분탄 취입의 영향", *화학공학* 40, 2002, pp. 169-178.
- [8] J. G. Peacy and W. G. Davenport, "The Iron Blast Furnace Theory and Practice", Pergamon Press, pp. 205-208.
- [9] M. Hatano and K. Kurita, *Tetsu-to-Hagane* 66, 1980, pp. 1898.
- [10] 정진경, 박판옥, "Oxy-coal 버너 사용이 연소대 온도에 미치는 영향", *화학공학* 36, 1998, pp. 743-750.
- [11] Suhas V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", *Taylor & Francis*, pp. 83-85.