

<논문>

고로내 열유동 현상의 수치해석 사례(I)

진홍종[†] (KAIST) · 최상민^{*}(KAIST)

Numerical simulation of thermo-fluid flow in the blast furnace

Hongjong Jin, Sangmin Choi

Key Words: Blast furnace(고로) Cohesive zone(연화용착대) Mathematical modeling(수학적모델링)
Gas flow(가스유동) Solid flow(고체유동)

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 on overall operating condition of blast furnace such as gas flow, temperature distribution and chemical reactions. 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 using the general purpose-simulation code. And Porous media is assumed for the gas flow and the potential flow for the solid flow. Velocity, pressure and temperature distribution for gas and solid are displayed as the simulation results. The cohesive zones are figured in 3 different operating conditions.

기호설명

ϵ : 공극률(m^3/m^3) ρ : 밀도(m^3/s)
 C_p : 비열(J/kgK) μ : 점도(Nm/s)
 ϕ : 형상계수 G : 질량유량

1. 서론

고로 공정(Blast furnace process)은 철광석을 환원시켜 철을 생산하는 공정으로써 제철 공정에서 가장 중요한 공정이라 할 수 있다. 고로는 향류식 반응기(Counter current moving bed reactor)로서 철광석(iron ore)은 고로에 피코크스 및 석회석과

함께 장입되고, 고로 하부에서 1100°C 가량의 뜨거운 공기 또는 산소 부화공기가 풍구로 유입되어 코크스를 연소시키고, 이로부터 발생하는 환원가스(CO, H₂)에 의해 장입물이 가열, 환원 및 용해되어 선철과 슬래그가 출선구를 통해 배출된다. 고로의 생산기술로는 조업 안정화, 생산성 증대, 연료비 절감, 설비의 대형화 형식으로 이뤄지는데 설비의 특성상 노내의 현상을 파악하기 위한 실측이 어려운 부분이 많이 있다.

고로 모델링 초기 단계에서 고로 전체에 대한 모델링을 수립하기에는 어려움이 많기 때문에 모델링을 단순화하기 위해서 부분적인 모델링을 수행하는 방법을 생각할 수 있다. 고체유동, 액체유동, 층상구조(Burden profile), deadman zone, 연화용착대, Raceway 등 여러 가지 부분적인 모델링이 있을 수 있다. 특히 Solid flow와 deadman zone에 대해서는 기존 모델링 결과를 이용하여 고로 내의 전체적인 가스 및 온도 분포 그리고 Coke와

[†] 한국과학기술원(KAIST)

E-mail : hero@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3070 FAX : (042)869-1284

^{*} 한국과학기술원(KAIST)

연화된 광석의 층상구조로 이뤄져 있는 연화 용착대의 형상을 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 2차원 모델링을 통하여 노내의 가스, 온도 분포를 예측하고 연화 용착대 형상에 대한 결과를 도출하여 기존의 모델링 결과와 실험 결과와 더불어서 비교 검증하고자 한다.

2. 해석 대상

고로의 실제 모습은 앞에 나와있는 Fig. 1처럼 복잡한 구조체이지만 적절한 가정을 통하여 Fig. 2와 같이 가스와 고체가 반대방향으로 흐르는 Counterflow 형태의 반응기와 유사한 단순화된 모형으로 계산 대상을 정하였다.

철광석과 코크스가 번갈아 가면서 이루는 층 구조를 고려하여 고로내부 구조를 아래 그림과 같은 형태로 생각할 수 있다. 각 층마다 두께는 다르고 물성치도 다르다. 크게 고로 상부, 연화 용착대, 데드맨 그리고 축대칭을 이루는 가운데 부분의 4영역으로 나뉘볼 수 있다. 고로 내에서 각 영역별로 porosity, 입경 그리고 형상계수의 물성치를 상수로 가정하여 각 영역별로 설정해 주었다.

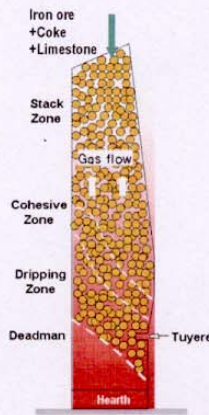


Fig. 1 Simplified geometry of blast furnace

2.1 초기 및 경계 조건

가스 유동은 풍구를 통해 4기압의 공기가 들어오고 노상부를 통해 2.5기압으로 빠져 나가는

초기조건을 설정해 주었고 고체 장입물은 위에서 2.675Kg/m²/sec의 질량유량으로 내려온다. 고체 장입물은 Fig. 3에서 보는 것처럼 코크스와 철광석 2가지로 이뤄지고 각층이 교대로 투입된다. 각 층에서의 물성치는 서로 다르게 상수값으로 주어지고 연화 용착대를 지나면서 철광석층은 사라지고 코크스 층만 남아있게 된다. 가운데 코크스로 차 있는 deadman 영역에서는 코크스의 물성치가 적용된다. 각 벽면에서는 impermeability에 의해 각 경계면에 수직인 방향으로의 압력 구배가 0이라는 경계조건을 사용하였다. 또한 중심에서도 대칭 조건에 의해 경계면에 수직인 방향으로의 압력 구배가 0이라는 경계조건을 사용한다. 또한 출구인 노정에서는 실제 조업조건에서 나온 값을 주었다.

고체 유동은 노정을 입구로 설정하여 장입되는 연료와 코크스의 양을 노정의 단면적으로 나누어서 질량유량 값으로 주게 된다. 또한 연소대를 출구로 설정하여 속도 포텐셜 값을 0으로 고정한다. 다른 벽면에 대해서는 기체유동과 마찬가지로 impermeability에 의해 각 경계면에 수직인 방향으로의 포텐셜 구배가 0이라는 경계조건을 사용하였다.

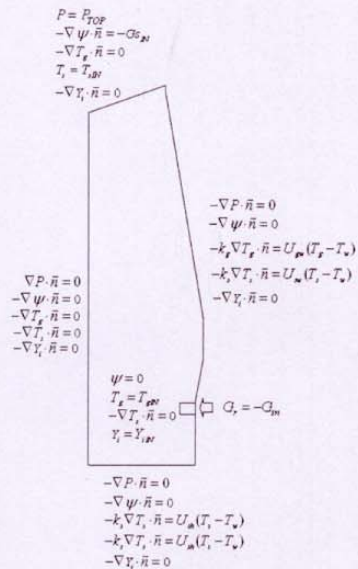


Fig. 2 Boundary and Initial condition
가스와 고체 유동 모두 2차원 축대칭 구조이

기 때문에 가운데 축대칭 부분에서는 대칭 조건을 사용하여 유동 및 열전달이 없는 상태로 간주하였다. 가스의 경우 풍구와 로의 위쪽 부분에는 압력과 온도 조건을 상수로 주었고 오른쪽과 아래 벽면에는 총괄 열전달 계수를 이용하여 열 손실을 고려해 주었다. 고체상의 경우는 로의 위쪽 부분에서 일정한 유량으로 장입되고 풍구를 통해 빠져 나가는 형태이고, 가스상의 경우와 마찬가지로 총괄 열전달 계수를 사용하여 오른쪽과 아래쪽 벽면에서 열전달을 고려해 주었다.

3. 해석 방법

고로 내부의 상황에 대한 현상을 규명하기 위해 온도나 가스 조성에 대한 실측이 어렵고 시간적, 경제적으로 효율적이지 못하기 때문에 단순화된 모델로부터 내부 현상을 규명하게 된다. 그러나 해석 대상을 단순화 할 지라도 고로내부에서는 기체-액체-고체의 3상의 반응들이 일어나며 상변화, 열전달 및 물질전달이 동시에 일어나고 그에 따라서는 미분탄의 입자상도 따로 고려해야 하기 때문에 코드 작성을 통한 접근은 시간적, 경제적으로 많은 어려움을 겪게 된다. 특히 고로와 같이 크기가 큰 구조체에 해석에는 천문학적인 시간이 들기 때문에 기존 모델 활용이 필요하다. 그리고 그리드 형성, 파라미터 변경, 후처리 과정 등의 작업도 기존에 범용으로 사용되는 코드에 비해 효과적이지 못하다.

반면 범용 코드를 사용하게 되면 여러가지 복합적인 물리현상에 대한 연계해석이 가능하고 결과해석을 위한 다양한 전, 후처리 기법을 효과적으로 적용할 수 있다. 검증된 물리현상에 대한 단위 모듈을 사용함으로써 계산시간을 단축하고 사용자에게 맞는 임의의 함수, 변수 그리고 물성치를 정의하여 자유롭게 사용하게 되고 고차원으로 확장이 용이하게 된다.

4. 모델링

4.1 지배 방정식

각 상에 대해 질량, 운동량, 엔탈피, 화학조성에 대한 보존식이 계산되고, 2차원 정상상태이고 축

대칭이라 생각하여 시스템을 고려한다.

기체 유동은 Ergun's equation을 2차원으로 확장하여 사용하였다.

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

식(1)에서 볼 수 있듯이 기체 유동에 대한 식은 압력차와 기체의 유속에 대한 상관식으로 나타낼 수 있다. 식 (2)에 나타나 있듯이 상수항은 점도, 공극률, 입경 그리고 밀도와 같은 물성치의 함수로 나타낼 수 있다.

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

고체 속도도 속도 포텐셜의 구배에 비례하여 하강한다고 가정하였으므로 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (-\nabla \psi) = \nabla \cdot \overline{G}_s = 0 \quad (3)$$

기체상과 고체상에 대한 에너지 수지식은 일반적으로 나타내어지는 식(4)와 같이 전도, 대류, 상간 열전달을 고려하는 식을 사용하였다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T + \rho C_p T u) = Q \quad (4)$$

기체상에 대한 에너지 수지식은 식 (5)와 같이 전도, 대류, 고체와의 상간 열전달을 고려하였다.

$$\nabla \cdot (\overline{G}_g C_p T_g - k_g \nabla T_g) = h_{gs} A_{gs} (T_s - T_g) \quad (5)$$

고체상의 에너지 수지식의 경우에는 확산, 대류, 및 상간 열전달 외에도 반응열을 고려하여 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (\overline{G}_s C_p T_s - k_s \nabla T_s) = h_{gs} A_{gs} (T_g - T_s) - \sum (-\Delta H_j) R_j \quad (6)$$

4.3 격자 구성

Fig. 3에서 보는 것처럼 철광석과 코크스 층으로 구분되어 있고 고로의 중심쪽에는 공극률을 크게하여 가스 유동을 원활히 하기 위하여 코크스로만 구성하였다. 아래쪽에는 deadman을 임의로 지정하여 주었고 풍구 위 부분에는 연화 용착대 영역을 구성하여 그에 맞는 물성치를 지정해 주었다.

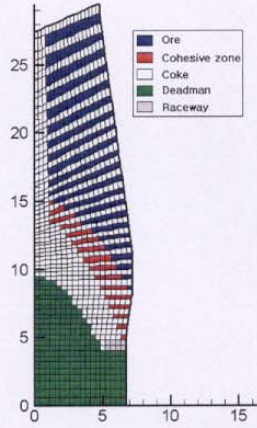


Fig. 3 Grid generation

5. 계산결과

Fig. 4에서 보는 것처럼 코크스로 차있는 고로의 중앙 부분과 코크스 층에서 공극률이 크게 나타나기 때문에 가스 유동은 공극률이 큰 영역을 따라 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

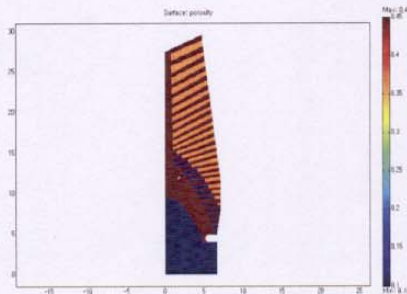


Fig. 4 Porosity distribution

그래서 Re수 분포를 보면 풍구를 시작점으로 하여 연화 용착대 왼쪽의 중앙 부분을 통과하여 노상으로 빠져 나가는 것을 볼 수 있고 연화 용착대에서는 철광석 층으로는 유동이 거의 없고 코크스 층으로 유동이 흐르는 것을 확인 할 수 있다.

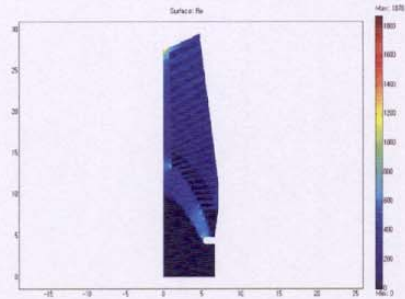


Fig. 5 Re number

가스 속도 분포도 Re수와 마찬가지로 분포를 보이고 있는 것을 확인 할 수 있다. 데드맨에서는 공극률이 작기 때문에 유동이 거의 없고 풍구 앞에서 유속이 급속하게 빨라지는 것을 볼 수 있다.

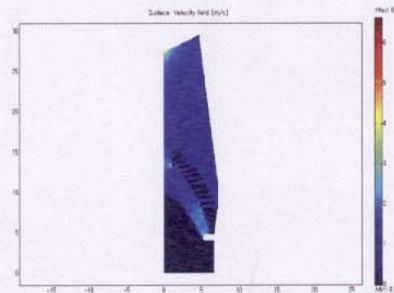


Fig. 6 Gas velocity distribution

고체 유동의 경우 노상에서 일정 유량이 반경 방향으로 변화없이 공급 되고 포텐셜 유동이라 가정하였기 때문에 전체적으로 균일한 유동을 보이고 풍구를 출구 조건으로 설정하였기 때문에 풍구를 빠져 나가는 형태의 속도 분포를 보이고 있다. 아랫쪽에서는 벽면으로 막혀 있기 때문에 속도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

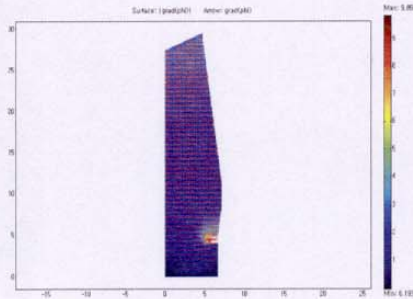


Fig. 7 Solid velocity distribution

고체 장입물은 300K로 장입되고 아래 벽면 조건이 1800K로 설정되었기 때문에 노상에서부터 풍구까지 전체적으로 균일한 온도 분포를 보이고 아래쪽 벽면에서 온도가 올라가고 유동 형태를 따라 온도 분포가 달라지는 것을 볼 수 있다.

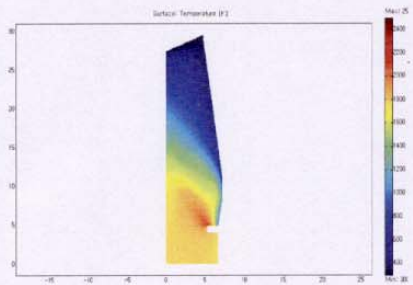


Fig. 8 Solid temperature distribution

위 그림에서 처럼 가스 유동 분포에 따라 가스 온도 분포가 형성되는 것을 볼 수 있듯이 대류 효과에 의해 온도 분포가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 고로의 중앙을 통해 가스 유동이 흐르기 때문에 고온 영역이 형성되고 오른쪽 벽면에서는 열손실이 있기 때문에 비교적 저온 영역이 나타난다. 연화 용착대에서도 가스 흐름이 있는 코크스 층에서는 고온영역이 나타나고 철광석 층에서는 상대적으로 온도가 낮은 것을 볼 수 있다.

고체 온도도 가스 온도 분포와 비슷한 형상을 띄고 있는데 아래쪽으로 갈 수록 온도가 높아진다. 특히 풍구에서 뜨거운 가스의 흐름이 있기 때문에 가스와의 상간 열전달 효과로 인하여 풍구 주위에 고온 영역이 형성되는 것을 확인할 수 있다.

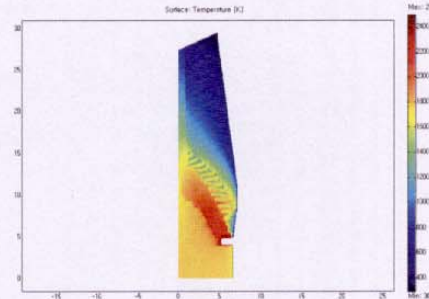


Fig. 9 Gas temperature distribution

계산 결과를 검증하기 위하여 기본 운전조건과 2가지의 다른 운전 조건에 대하여 결과를 비교하였다.

	Usual	High PCR	High production
Topgaspressure (MPa)	0.277	0.265	0.277
Blast volume (Nm ³ /min)	6315	6166	6312
Blastpressure (MPa)	0.4192	0.4187	0.4206
Blasttemperature(°C)	1191	1174	1201
Productionrate of pig iron(t/d)	9284	9218	10129
PCR(kg/t)	147.6	226.3	159.9
O ₂ rate (Nm ³ /hr)	20000	21213	26551
Blastmoisture (g/Nm ³)	22.3	19.2	8.4
R.R(kg/t)	489.2	485.2	487.4
Operatio(-)	1.683	1.64	1.588

Table 1 Operation conditions for evaluation

Table 1에서 볼수 있는 것처럼 운전 조건 비교를 위해 여러가지 항목이 나열되어 있지만 일차적인 결과를 도출하기 위하여 노정에서의 압력, 풍구에서 들어오는 가스의 압력과 온도만을 고려하여 결과를 비교하여 보았다. 고체 온도 분포를 보면 전체적으로 풍구에서부터 노정까지 온도가 감소하는 비슷한 형태를 띄고 있음을 볼 수 있고

특히, 기본 운전조건 일때 보다 High Production 조건일 경우 보다 높은 온도 영역이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 연화 용착대의 변화를 비교하기 위하여 1323~1623K 범위에 있는 영역을 표시하여 연화 용착대를 나타내었다. 아래 그림에서 보면 기본 조건 보다 High PCR, High Production일 경우 조금씩 위로 올라가는 것을 볼 수 있다.

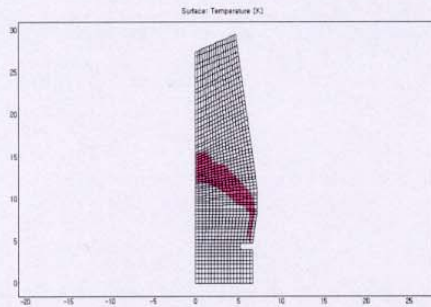


Fig. 10 Cohesive zone in usual condition

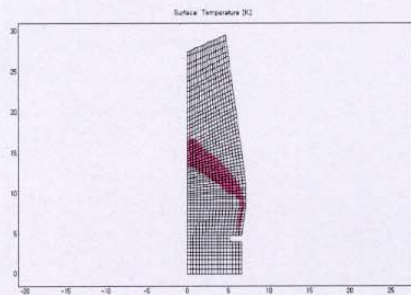


Fig. 11 Cohesive zone in High PCR condition

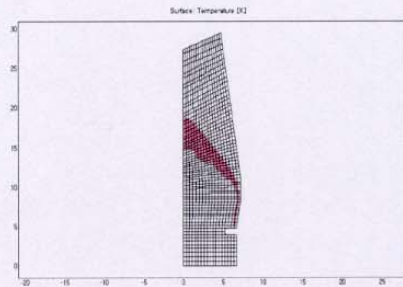


Fig. 12 Cohesive zone in High production condition

가스 유동은 중앙 부분을 중심으로 흐르는데 연화 용착대 형상은 중앙 부분에 오히려 유동이 막혀 있는 형상을 나타내는데 앞으로 수정 보완해야 할 부분이다. 또한 운전 조건에 따른 용착대 위치 변화도 High Production일 경우 기본 운전 조건보다 낮은곳에 위치해 있어야 하는데 위로 치우친 것은 표에 나와있는 운전 조건을 모두 고려 하지 않았기 때문일 것으로 예측되고 다음 연구에 이어서 살펴봐야 할 부분이다.

후 기

본 연구는 포스코(POSCO) 기술연구소와 연소 기술연구센터(CERC)의 도움으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Won Y, 2003, "Combustion Modeling of the Solid Fuel Bed and Its Application", Ph. D thesis
- (2) P.R. Austin et al., 1997, "A mathematical model of four phase motion and heat transfer in the blast furnace", ISIJ international, Vol. 37, No. 5, pp.458-467
- (3) P.R. Austin et al., 1997, "Analysis of Actual Blast furnace Operations and evaluation of static liquid holdup effects by the four fluid model", ISIJ international, Vol. 38, No. 3, pp.246-255
- (4) S. J. Zhang et al., 1998, "Modeling of the solids flow in a blast furnace", ISIJ international, Vol. 38, No. 12, pp.1311-1319
- (5) S. J. Zhang et al., 2002, "Numerical simulation of solids flow in a blast furnace", Applied Mathematical Modelling, Vol. 26, pp.141-154
- (6) "Transport phenomena for enhancement of process technology in lower part of blast furnace", Research committee on enhanced processing technology in lower part of blast furnace, 日本製鋼協會, 2000