

코크스로에서의 열유동 특성에 관한 수치적 연구

양광혁* · 양원* · 류창국** · 최상민†

Mathematical Approach of Thermo-fluid Characteristics in a Coke Oven

Kwangheok Yang*, Won Yang*, Changkook Ryu**, Sangmin Choi†

ABSTRACT

Coke oven is used in an iron-making process for producing coke through devolatilization of the coking coal. An unsteady 2-dimensional model of solid bed is proposed to simulate a coke oven. The model contains governing equations with partial differential equation forms for the solid phase and the gas phase. Drying and devolatilization of coking coal, heat transfer, and generation of internal pores in the coking coal are also reflected to the source terms. Simulation results show a reasonable trend compared with the physical data.

Key Words : Coke oven, Devolatilization, Solid bed, Modeling

1. 서론

코크스 공정에서는 제선 공정에 필요한 주 연료인 피코크스를 생산한다. 코크스는 고로에서 연료 및 환원제로 사용되며 고로(용광로, blast furnace) 내 철광석-코크스 층에서 통기를 위한 공간을 확보하는 역할도 함께 하므로, 코크스 공정에서의 양질의 코크스를 생산해내기 위해서는 코크스로 내의 현상을 정확하게 파악하고 수학적 모델링을 통해 다양한 운전 조건에 따른 오븐 내의 열유동 특성의 변화를 파악하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 1 에는 일반적으로 사용되는 코크스 공정을 위한 설비의 구조를 나타내었다. 코크스 공정을 위한 설비는 연소실과 오븐으로 구성되어 있다. 연소실에서는 고로가스(BFG)와 코크오븐가스(COG)의 혼합가스를 연소시켜 석탄의 건류에 필요한 열량을 제공한다. 코크스 공장에 있는 오븐은 일반적으로 폭 0.45m, 높이 6.70m, 길이 18.0m의 규모를 가진다. 에너지와 공간의 절약을 위해 수습에서 100개 이상의 코크오븐들이 하나의 코크스 공정 설비를 구성하게 된다.

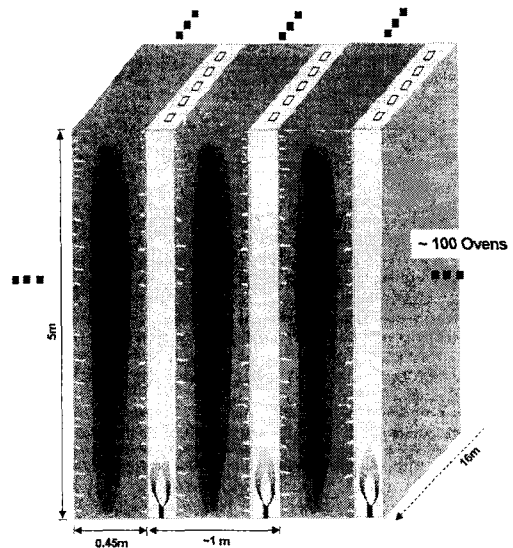


Fig. 1 Coke batteries in an iron-making process

Fig. 2 에는 코크스 오븐 내에서 일어나는 주요 현상을 나타내었다. 일단 벽면에서 전달되는 열량에 의해 석탄의 온도가 올라가게 되고 100℃에 이르르게 되면 온도는 그대로 유지된 채 수분증발이 일어나게 된다. 수분증발이 모두 끝나면 다시

* 한국과학기술원 기계공학과

** University of Sheffield, UK

† 연락 저자, 042-869 3030, smchoi@mail.kaist.ac.kr

석탄의 온도가 상승하고 350°C가 되면 열분해가 일어나기 시작하고 연화가 시작된다. 400°C부터는 본격적으로 가스, 타르등으로 열분해가 일어나고 plastic stage가 된다. 500°C에서 가스의 방출이 최대로 일어나고 또한 swelling이 일어나게 된다. 온도가 더 올라가서 550°C정도가 되면 고화가 일어나고 다공성의 semi-coke를 형성하게 되고 700°C에서는 많은 양의 수소가 방출된다. 가열이 계속되면 수축이 일어나고 기공과 균열이 자라고 최종 생성물인 코크스가 형성되게 된다. 코크스 공정은 일반적으로 900°C이상에서 30분이 지나면 완료된 것으로 가정한다.

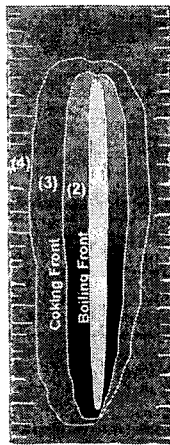


Fig. 2 Major phenomena in a coke oven

1000°C 이상의 온도에서의 장시간 노출은 기공을 없애 코크스의 반응성을 감소시킬 가능성이 있기 때문에 피하는 것이 좋다. [2]

앞에서 설명했듯이 실제의 코크스 공정은 매우 복잡한 현상이며 이러한 현상들을 자세하게 모델링 하는 것은 매우 어렵기 때문에 코크오븐에 대한 수치적 연구는 매우 단순화된 모델의 형태로 수행되었다. 기존의 코크 오븐에 대한 많은 연구들은 벽면에 수직한 방향의 열전달이 지배적이라고 생각한 1차원 전열모델을 사용하였다. 하지만 이러한 모델에서는 코크스 공정에서 발생한 수증기나 가스의 유동을 고려할 수 없게 된다. 일반적으로 코크스 공정에 사용되는 석탄은 많은 양의 수분(~8%)과 휘발분(~30%)을 포함하고 있기 때문에 이러한 생성물들의 유동에 의해 열전달이 영향을 받게 된다. 그러므로 이러한 가스의 유동을 고려하기 위해서는 2차원 해석이 필요하게 된다.

본 연구에서는 석탄의 건류 과정을 2차원 모델로 수치적으로 해석하여 실제 코크오븐에서 일어나는 현상을 모사하고자 한다.

2. 모델링

2.1 문제 정의

Fig. 3 에는 코크스 오븐 내 열유동 현상을 모델링하기 위해 문제를 정의하였다. 오븐의 폭은 0.45 m 이며, 깊이 방향은 고려하지 않은 2차원 형태로 단순화하였다. 일단 오븐내의 장입탄의 층을 균일한 다공층(porous media)로 가정한다. 고체상의 층의 높이, 형상, 상 등은 변하지 않는다고 가정하였고, 건류과정에서 빠져나간 질량은 모두 내부기공의 형성으로 반영하였다. 또한 수분 증발, 탈휘발 과정을 고려하였다. 좌우 대칭 형태이기 때문에 실제 계산은 오븐의 반에 대해서만 이루어졌다. 모든 면은 단열 조건으로 가정하였으며, 벽면 부분의 온도값을 경계조건으로 주게 된다. 상(phase)은 고체상과 기체상으로 나누어 각각에 대해 지배방정식을 세우게 된다.

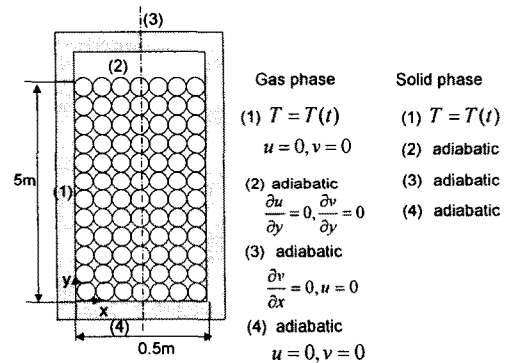


Fig. 3 Problem definition

2.2 지배방정식

지배방정식은 기체상과 고체상에 대하여 2차원 형태의 편미분 방정식 형태를 사용하였다. 속도는 면적 평균속도 (Darcean or superficial velocity)를 사용하였으며, 기체상이 차지하는 부피 분율, 즉 void fraction을 ϵ 라 하면 고체상과 기체상에서 스칼라량 ϕ 에 대해 각각 다음과 같은 형태의 일반화된 방정식을 사용할 수 있다.

고체상 :

$$\frac{\partial(\rho(1-\epsilon)\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\bar{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_{eff}\nabla\phi) + S_\phi$$

기체상 :

$$\frac{\partial(\rho\epsilon\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\bar{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_{eff}\nabla\phi) + S_\phi$$

각각의 생성항을 포함하여 자세히 기술하면 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

고체상 (Solid phase)

Energy :

$$\frac{\partial((1-\varepsilon)h_s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left((1-\varepsilon)k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((1-\varepsilon)k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) + q_{radi} \\ + h_{comb} A_s (T_g - T_s) - \left(\sum_r \dot{M}_{s,r} \right) C_p T_s$$

Component :

$$\frac{\partial(\rho_s(1-\varepsilon)m_{s,k})}{\partial t} = \sum_r \dot{M}_{s,k,r}$$

기체상 (Gas phase)

Mass :

$$\frac{\partial \rho_g \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u_g}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g v_g}{\partial y} = - \sum_r \dot{M}_{s,r}$$

x-momentum :

$$\frac{\partial \rho_g \varepsilon u_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u_g u_g}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g v_g u_g}{\partial y} = \\ - \varepsilon \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon \mu_g \frac{\partial u_g}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon \mu_g \frac{\partial u_g}{\partial y}) + S_x$$

y-momentum :

$$\frac{\partial \rho_g \varepsilon v_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u_g v_g}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g v_g v_g}{\partial y} = \\ - \varepsilon \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon \mu_g \frac{\partial v_g}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon \mu_g \frac{\partial v_g}{\partial y}) + S_y$$

$$\text{where, } S_x = \frac{\mu}{\alpha} v_x + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_x$$

$$\alpha = \frac{D_p^2}{100} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}, \quad C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3}$$

Energy :

$$\frac{\partial \varepsilon h_g}{\partial t} + \frac{\partial u_g h_g}{\partial x} + \frac{\partial v_g h_g}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon k_g \frac{\partial T_g}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon k_g \frac{\partial T_g}{\partial y}) \\ + h_{comb} (T_s - T_g) + \left(\sum_r \dot{M}_{s,r} \right) C_p T_s$$

Chemical species :

$$\frac{\partial \rho_g \varepsilon m_{g,i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u_g m_{g,i}}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g v_g m_{g,i}}{\partial y} = M_{s \rightarrow g,i}$$

Equation of state :

$$\rho_g = p / R \sum \frac{m_i T_g}{W_i}$$

1차원 모델에서는 가스 속도를 운동량 보존식이 아닌 질량 보존식에서 구하게 된다.

2.3 Sub-models

2.2 절에서 기술한 대로 각 보존식들의 생성항에는 반응, 열전달, 입자의 크기 변화 및 내부 기공 생성 등에 대한 모델들이 반영된다.

반응은 앞에서 기술한대로 크게 heterogeneous reaction 인 고체-기체 반응과 homogeneous reaction 인 기체-기체 반응으로 나눌 수 있지만, 실제 오븐 내에서 가장 중요한 반응은 건조와 탈휘발로 볼 수 있다. 각각의 반응 및 열전달은 기존의 모델에서 채택한 것과 일치하며[1], 물질 전달에 의한 효과를 고려한 다음과 같은 탈휘발 모델이 추가된다.

$$k_{desulf}^{eff} = \left(\frac{1}{k_{Arr}} + \frac{1}{k_m} \right)^{-1}, \text{ where } k_{Arr} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

고체 연료층에서 일어나는 geometrical change 는 입자 내부 기공의 변화만을 고려했으며, 고체 입자 크기의 변화는 없는 것으로 가정하였다. 내부 기공 발생은 기존의 연구에서 계산한대로 다음과 같은 지배방정식의 형태로 나타내었다.

$$\frac{\partial f_{c,s,i} \varepsilon_{ip,i}}{\partial t} + \frac{\partial v_s \varepsilon_{ip,i}}{\partial y} = - \sum_i f_{ip,i} \frac{\dot{M}_{comb,i}}{\rho_i} + \dot{\varepsilon}_{p,loss,i}$$

2.4 계산 과정

지배방정식들은 유한체적법을 이용해 풀이되었고, 이산화(discretization)는 고체상의 경우 central differencing scheme을, 가스상은 upwind scheme을 적용하였다.

Fig. 4 에는 모델의 전체적인 계산 과정을 나타내었다. 초기화 후에는 고체상과 기체상을 수렴할 때까지 번갈아가면서 풀게 되며, 기체상의 momentum 보존식을 풀기 위해 SIMPLE 알고리즘을 이용하였다. [6]

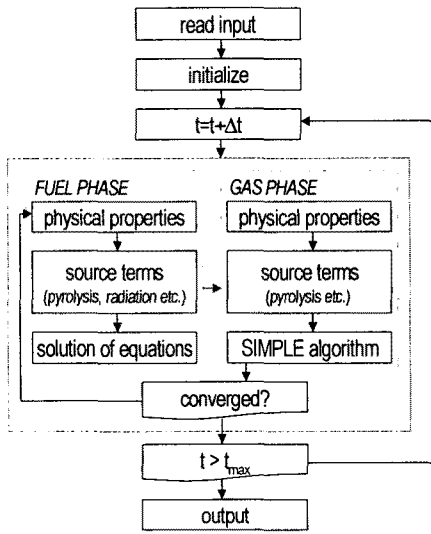


Fig. 4 Solving procedure

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 계산 조건

Table 1 에는 주요한 계산 조건 및 coking coal의 성상을 나타내었다. 실제 코크스 공정에서는 일반적으로 여러 종류의 원료탄을 배합하여 사용하지만 계산에서는 아래와 같이 혼합된 재료의 성상을 가진 균일한 하나의 고체상으로 생각한다.

Table 1. Major calculation parameters

| | | |
|-----------------|------------------|-------|
| bed width (m) | | 0.225 |
| t_{max} (sec) | | 54000 |
| time step (sec) | | 10 |
| Solid Material | Size(m) | 0.003 |
| | Moisture (%) | 7.0 |
| | Volatile (%) | 30.4 |
| | Char (%) | 56.6 |
| | Ash (%) | 5.2 |
| | Initial porosity | 0.4 |

3.2 실험 결과

Fig. 5는 실제 코크스 공장의 코크 오븐에서 베드의 중앙 부분에서 thermocouple과 probe를 이용하여 온도와 내부 가스 압력을 측정된 결과이다. 약 100°C에서 수분증발이 일어나면서 온도가 일정하게 유지되고 8시간 정도가 지나면서 수분증발이 끝나고 그 이후에는 계속 온도가 상승한다. 내부 압력은 약 500°C에서 최대가 되는 것을 관

찰할 수 있다. 코크스 공정에서 오븐벽에 평행한 두개의 연화층(plastic layer)가 형성되어 있고, 이 연화층은 투과성이 상당히 낮아서 가스의 방출을 방해하게 된다. 그러므로 내부의 가스 압력은 이 연화층에 크게 영향을 받는다. 이 두개의 연화층은 탄화 과정이 진행됨에 따라 오븐의 중앙으로 이동하게 되고 이 두 연화층이 오븐의 중앙에서 만나는 시점에 내부가스압력이 최대가 된다.[5]

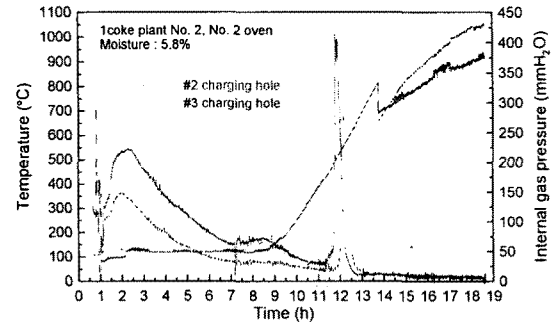


Figure. 5 Temperature and Internal gas profile with time within Coke oven

3.2 초기 계산 결과 - 1차원 모델

Fig. 6 에는 베드 내의 1차원 온도 분포 계산 결과를 나타내었다. 뜨거운 벽에서부터 열전달이 진행되어서 초기에는 벽면 부분의 온도가 높게 나타나다가, 시간이 지나면서 내부의 온도도 함께 올라가고 있는 현상을 보여주고 있다. 1차원 계산 결과는 계산 조건의 입력시에 임의성이 많이 반영됨을 고려했을 때, 1차원 모델의 계산 결과는 그 자체의 의미보다는 2차원 모델의 계산 결과의 타당성 확인에 있어서 기초 자료를 제공할 수 있다는 점에서 의미를 찾을 수 있다.

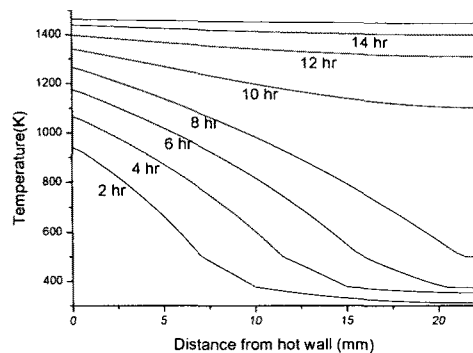


Fig. 6. Temperature profile within the coke oven (1-D model)

3.3 초기 계산 결과 - 2차원 모델

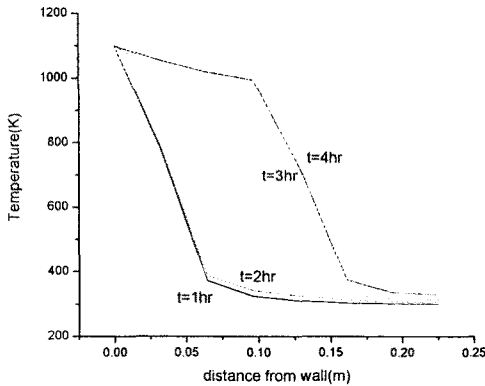


Fig. 7. Temperature profile within the coke oven (2-D model)

Fig. 7은 2차원 온도분포 계산 결과를 나타낸 것이다. 일단 초기결과로써 기체상의 유동을 고려하지 않고, 고체상의 전도 열전달만을 고려하여 나타낸 결과이다. 1차원 결과와 비슷한 양상을 보이고 있다. 다만 실제 결과[7]보다 온도상승이 빠르게 일어나는 것을 볼 수 있는데 이것은 기체상과의 대류열전달을 고려하지 않았기 때문에 나타나는 결과이다.

4. 결론

코크스로 내 열유동 현상을 해석하기 위해 수학적 모델을 수립하였다. 내부의 현상을 2차원으로 단순화하였으며, 열분해, 열전달, 내부 기공 생성 등의 현상이 포함되었지만 coking coal의 swelling이나 베드의 높이 변화, 연화, 고화 과정 등과 같은 복잡한 현상들은 고려하지 않았다. 1차원 및 2차원 계산의 초기 결과를 도출했으며, 계산 결과는 대체로 물리적인 현상을 잘 예측하고 있다.

참고문헌

[1] 양원, 류장국, 최상민, "다중 고체상을 고려한 고체 연료층 연소 모델링", 제 26회 KOSCO Symposium 논문집, 2003, pp.119-127.

[2] E.J. Osinski, P.V. Barr, and J.K. Brimacombe, "Mathematical model for tall coke oven battery Part 1", Ironmaking and Steelmaking, Vol. 20, 1993, pp. 350-359.

[3] P.V. Barr, E.J. Osinski, J.K. Brimacombe, and M.A. Khan "Mathematical model for tall coke oven battery Part 3", Ironmaking and Steelmaking, Vol. 21, 1994, pp. 44-55.

[4] D.Merrick "Mathematical models of the thermal decomposition of coal." Fuel, Vol. 62, 1983, pp.534-539.

[5] Woon-Jae Lee and Yong-kuk Lee, "International Gas Pressure Characteristics Generated during Coal Carbonization in a Coke Oven", Energy & Fuel, Vol. 15, 2001, pp.618-623

[6] Suhas V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow"

[7] Roger Loison, Pierre Foch, Andre Boyer, "COKE Quality and Production"