

단순 연화층 모델을 적용한 석탄 성상별 Coke Oven 내의 가스압 특성

박주현* · 최상민**†

Simple Modeling of Plastic Layer in Coke Oven for Internal Gas Pressure

Juhyun Park, Sangmin Choi

ABSTRACT

A simplified model of plastic layer and internal gas pressure in a coke oven is presented. We calculate internal gas pressure using presented model. And results are compared with calculated results using experimental data. Results show the difference of internal gas pressure by coal composition. The model is used to show that the permeability at the resolidification end of the plastic layer is a key determinant of the magnitude of the internal gas pressure.

Key Words : Coke Oven(코크 오븐), Plastic laver(연화층), Modeling(모델링)

기 호 설 명

Alphabets

E : 활성화 에너지 (J/kmol)
Dp : 입자크기, m
M : 단위부피당 질량생성률, kg/m³s
p : 압력, N/m²
R : 기체상수
S : 소스항
t : 시간, s
u : 속도(m/s)

Greeks

ε : 기체상의 부피분율
 μ : 점성도
 ρ : 밀도, kg/m³

Subscripts

g : 가스상
ip : 내부기공
j : 가스상에서의 화학 성분
s : 고체상
s→g : 고체상에서 기체상

1. 서 론

* 한국과학기술원 기계공학과
† 연락처, 042)869-3030, smchoi@kaist.ac.kr
** 한국과학기술원 기계공학과

코크 오븐은 제선 공정에서 석탄을 건류하여 코크스를 생산하는 시설로, 코크 오븐은 Fig 1.과 같이 높이 8m, 길이 15m, 너비 0.45m의 긴 슬롯

형태(Slot-type)의 로가 일렬로 쭉 늘어선 형태 로 되어 있다.

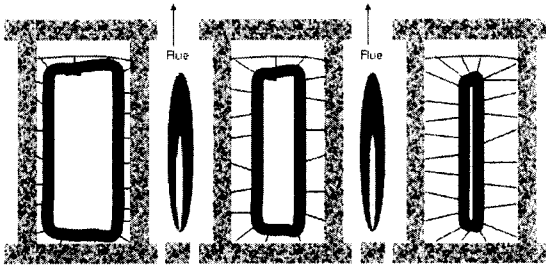


Fig. 1 Schematic diagram of Coke Oven

이러한 코크스 공정에 있어 생산자가 고려해야 할 것은 코크스의 품질, 생산성, 생산 단가, 그리고 팽창압 등이 있다. 이 중 팽창압은 건류 중 벽면에 나타나는 압력으로 이러한 압력이 지나치게 높아지면 벽면에 영구적인 손상을 주어 큰 경제적인 손실을 입히게 된다. 따라서 팽창압의 제어는 생산자로서 중요한 요소이며, 현재까지 팽창압에 관하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 하지만 팽창압의 발생 메커니즘의 복잡성으로 인하여 아직까지 구체적인 이론적 근거가 부족한 실정이다.

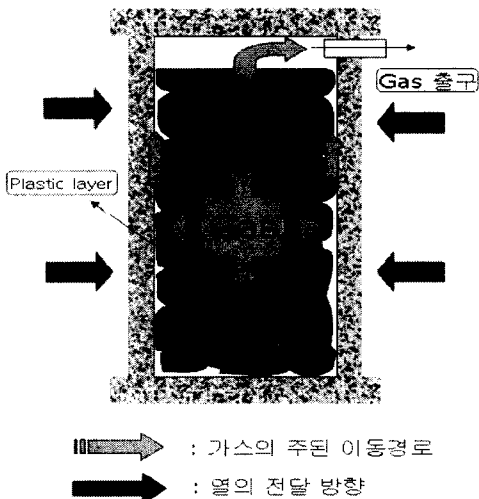


Fig. 2 Schematic diagram of coking pressure mechanism

Fig 2.는 팽창압의 발생을 개략적으로 나타낸 것이다. 석탄이 열을 받아 형성하는 연화층은 거의 액체와 가까운 상태로 가스의 유동에 매우 큰 저항을 나타낸다. 따라서 내부에서 발생한 가스의 배출을 막아 내부에서 가스압을 형성시키게 된다. 이러한 가스압은 Coke층을 통하여 전파되고 결국에는 벽면에 압력을 나타내게 된다.

본 연구는 이러한 팽창압 발생 메커니즘을 연화층의 단순 모델링으로 나타내고 이러한 특성에 석탄의 기초 분석 결과가 얼마만큼 영향을 주는 지 비교 분석하고자 한다.

2. 문제 접근 방법 및 모델링

2.1 문제 접근 방법

본 연구에서는 팽창압에 있어 석탄층이나 Coke층에서의 가스압은 연화층 내에서의 가스압에 비하여 매우 작은 영향을 나타낸다는 가정 하에 연화층 내의 가스압만을 고려하였다.

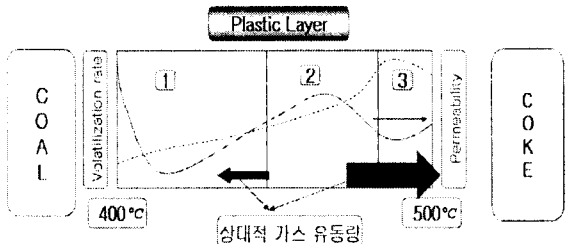


Fig. 3 Plastic layer

Fig 3.은 연화층 내에서의 현상을 나타낸 그림으로 연화층 내부를 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 우선 1번 구간은 가스의 유동이 가장 어려운 구간으로 석탄이 연화되고 융착되어 액체에 가까운 상태이다. 2번 구간은 고화되어 fissure가 생기고 가스 발생으로 인하여 Porosity가 증가하는 구간으로 연화층 내부에서 가스 유동이 가장 원활한 구간이다. 3번 구간은 가스의 발생량이 가장 큰 구간으로 이로 인하여 상대적으로 가스 유동이 어려운 구간이다. 이전의 연구 결과 연화층 내에서 발생한 가스의 90%정도가 3번 구간을 통하여 Coke층으로 빠져나가며 오직 10%정도만이 석탄층으로 빠져 나간다고 알려져 있다.^[7] 그리고 팽창압에 큰 영향을 미치는 구간은 3번 구간의 가스 유동도라 알려져 있다.^[6]

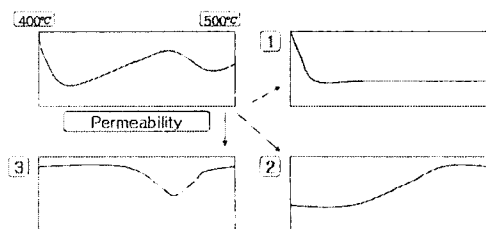


Fig. 4 Divided plastic zone

Plastic zone 내부를 한번에 모델링 하는 것은 쉽지 않다. 따라서 앞서 설명한 구간을 기준으로 나누어 각각 모델링 하고 결과를 중첩하여 계산하도록 한다. Fig 4.는 이를 나타낸 것으로 각 구간별 Permeability 값을 구하고 이를 중첩하여 가스압 계산에 적용하도록 한다.

가스압 모델을 위하여 1차원 50개의 Grid를 이용하고, 각 Grid는 3°C/min으로 가열된다고 가정한다.

2.2 연화층의 모델링

앞서 언급하였듯이 연화층 내부를 3구간으로 나누어 고려하고, 1번 구간의 경우 석탄이 연화되어 거의 액체에 가까운 상태로서 Permeability의 값이 가장 작은 구역이므로 참고문헌의 실험치를 이용하였다. 2번 구간의 경우 휘발분 발생으로 인한 Porosity의 증가와 내부 기공의 증가를 고려하였으며, 3번 구간의 경우 Permeability 값이 낮아지는 원인으로 휘발분 발생가스의 증가만을 고려할 것이다. 3번 구간은 발생 가스를 9가지($CH_4, C_2H_6, CO, CO_2, tar, H_2, H_2O, NH_3, H_2S$)로 나누어 고려한 Merrick의 모델을 이용하였다.

1번 구간

Table 1. Estimated permeability^[2]

Coal	Temp. range(°C)	Permeability (m ³ skg ⁻¹)
Coal A(HP)	440-460	1.25 X 10 ⁻¹¹
Coal B(MP)	420-440	6.125 X 10 ⁻¹²
Coal C(LP)	395-415	1.25 X 10 ⁻¹¹

실제 프로그램에 적용시 Permeability 값은 계단 함수 형식으로 적용된다.

2번 구간

$$\varepsilon_{ip} = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{true}}$$

$$\frac{\partial(1-\varepsilon)\varepsilon_{ip}}{\partial t} = -\sum f_{ip} \frac{\dot{M}_s}{\rho} + (1-\varepsilon)\dot{\varepsilon}_{ip,loss}$$

3번 구간

$$\frac{d\delta}{dt} = [\kappa \exp(-E/R\bar{T})](1-\delta)$$

Activation Energy

$$F_j(E) = \exp(-((E - E_0)/\varepsilon)^\beta) \quad j = 1, \dots, 9$$

2.3 물성치 및 가스압 모델

True Density

$$1/\rho_{s,me} = \sum m_{s,i}/\rho_{s,i}$$

$$\rho_{fed} = \left(0.0053 \frac{C}{12} + 0.00577 \frac{H}{1} + 0.00346 \frac{O}{16} + 0.0669 \frac{N}{14} + 0.0384 \frac{S}{32} \right)^{-1}$$

$$\rho_{moisture} = 1000, \rho_{ash} = 3000$$

Gas Viscosity

$$\mu = \frac{\mu_0 \sqrt{T}}{1 + C/T}$$

위 식에서 μ_0, C 는 가스의 고유 상수로 Perry Handbook을 참조하였다.

Internal Gas Pressure

Continuity equation

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g u)}{\partial y} = \sum \dot{M}_{solid-gas}$$

Ergun equation

$$\nabla P = (F_v + F_i |G|) \vec{G}$$

$$\nabla P = \frac{\mu \varepsilon}{K} \vec{u} + \rho \frac{C_E \varepsilon^2}{K^{1/2}} |u| \vec{u}$$

$$\nabla P = \frac{150 \mu (1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon} \vec{u} + \frac{1.75 \rho (1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} |u| \vec{u}$$

Permeability(K)와 Ergun Coefficient(C_E)는 위의 식을 이용하여 구하였다.

$$K = \frac{D_p^2 \varepsilon^4}{150(1-\varepsilon)^2}, \quad C_E = \frac{1.75}{\sqrt{150} \varepsilon^3}$$

Equation of state

$$\rho = P / (R \sum \frac{m_j}{W_j} T)$$

위의 세식(Continuity eqn., Ergun eqn., Eqn. of state)을 이용하여 밀도(ρ), 압력(P), 속도(u)를 구하였다.

2.4 계산 방법

각각의 지배 방정식은 유한체적법을 이용하여 이산화하였다. 격자는 staggered grid를 사용하였고, SOR(Successive Over-Relaxation)을 사용하여 비정상 상태를 해석하였다.

Fig 5에 전체적인 계산과정을 나타내었다. 각 Time step마다 Iteration을 하여 수렴 조건을 만족시키면 다음 Time step으로 넘어가도록 하여 전체 계산을 수행하였다.

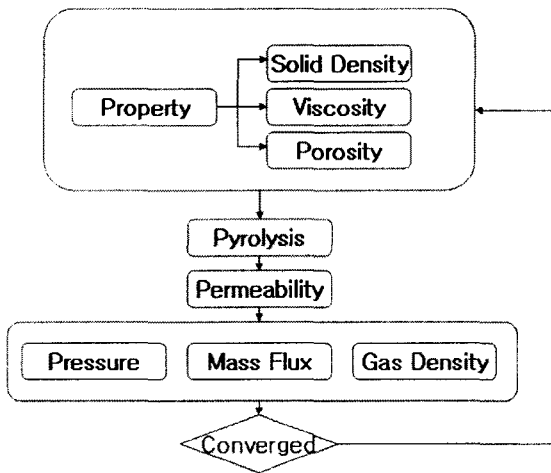


Fig. 5 Solving procedure

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 계산 조건

Table 2. composition of coking coal (%)

	SR(HP)	CM(MP)	MX(LP)
Moisture	12	6.1	9.2
Volatile Matter	15.66	25.29	31.81
Fixed Carbone	66.36	60.06	51.27
Ash	5.98	8.55	7.72
C	89.95	88.68	82.26
H	4.43	4.9	5.44
O	3.72	4.58	9.95
N	1.48	1.29	1.89
S	0.42	0.55	0.46

Table 2.에는 계산에 사용된 석탄의 종류를 기초분석 결과와 함께 나타내었다. 왼쪽부터 각각 HP, MP, LP에 대응된다.

Table 3. calculation parameter

bed half width (m)	0.225
bed heght (m)	6
t _{max} (sec)	72000
time step (sec)	10
Initial Bulk Density (kg/m ³)	750

Table 3.에서는 주요 계산 인자들을 나타내었다.

3.2 계산 결과

3.2.1 기본 물성치 계산 결과

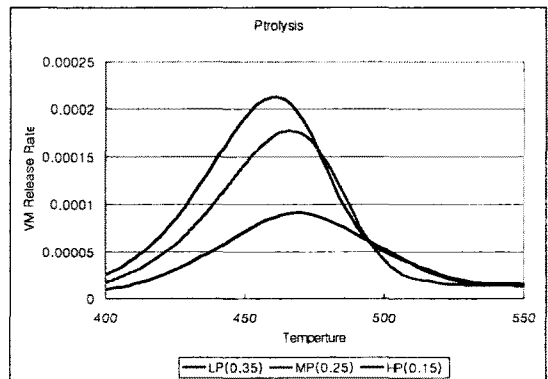


Fig. 6 Volatile matter release rate (mass fraction of coal)

Fig 6.은 휘발분 발생률을 온도에 따라 나타낸 그래프이다. 쉽게 알 수 있듯이 휘발분 성분이 많은 석탄일수록 휘발분 발생률이 더 높은 것을 볼 수 있고, 이 결과는 앞서 언급한 3번 구간에서 사용될 데이터이다.

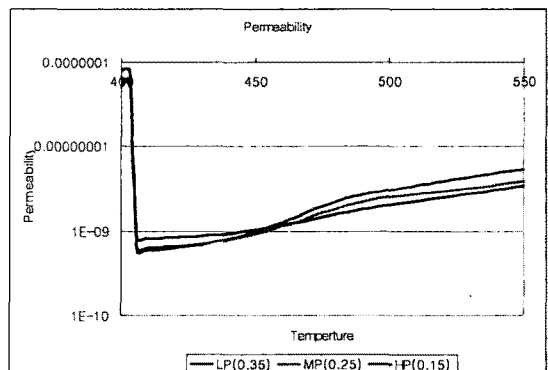


Fig. 7 Permeability

Fig 7.은 Permeability값을 나타낸 그래프로 휘발분 성분이 많은 석탄의 경우 Permeability값이 더 높아지는 것을 알 수 있다. 이 결과는 2번 구간에서 사용될 데이터가 된다.

3.2.2 실험치 대입 결과와 비교

Table 4. Permeabilities for the plastic layers of HP, MP and LP coals^[2]

Coal	Temp. range (°C)	Permeability (m ³ skg ⁻¹)
Coal A(HP)	440-460	1.25 × 10 ⁻¹¹
	460-480	5 × 10 ⁻¹⁰
	480-505	2.5 × 10 ⁻¹¹
Coal B(MP)	420-440	6.125 × 10 ⁻¹²
	440-485	7.5 × 10 ⁻¹⁰
	485-495	2.5 × 10 ⁻¹⁰
Coal C(LP)	395-415	1.25 × 10 ⁻¹¹
	415-440	6.25 × 10 ⁻⁹
	440-480	2.5 × 10 ⁻⁹

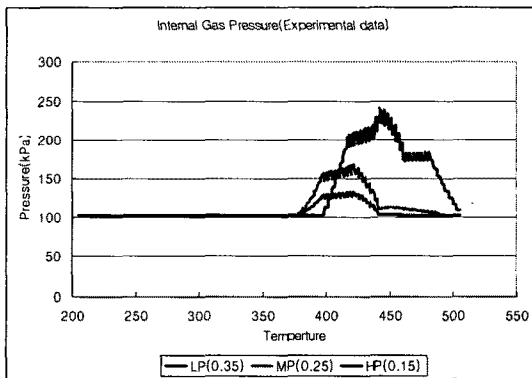


Fig. 8 Internal gas pressure (Experimental data : 100mm from wall)

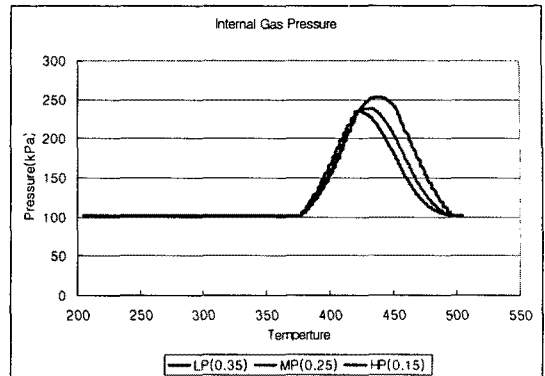


Fig. 9 Internal gas pressure (100mm from wall)

Fig 8.은 Permeability 값을 실험을 통하여 얻어진 데이터를 이용하여 내부 가스압을 계산한 결과이며, Fig 9.는 탈휘발로 인한 Porosity증가를 계산하여 얻은 값을 바탕으로 내부 가스압을 계산한 결과이다. Fig 9.의 경우 전체적인 경향은 Volatile Matter(VM)이 증가할수록 가스압이 감소한다는 경향은 Fig 8.과 같다고 할 수 있으나 계산 값의 크기에서는 차이를 나타낸다고 할 수 있다. 가스압에 영향을 미치는 인자는 매우 많고 또한 매우 복잡하다. 따라서 단순화하기 위하여 Porosity만을 고려하여 해석한 결과는 많은 문제점이 있다. 이는 향후 연구 진행에 있어 부피의 변화로 인한 영향과 fissure의 영향에 대한 연구의 필요성이 강조된다고 할 수 있겠다.

석탄의 성상에 있어서 Volatile Matter(VM)이 증가할 경우 팽창압이 낮아지는 경향이 있다. 팽창압의 원인이 가스압이므로 VM이 증가한다면 가스압 역시도 감소하는 경향이 있다고 할 수 있다. 위의 결과는 그러한 경향을 잘 나타내 준다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 코크 오븐 내에서의 발생하는 가스압에 관한 모델링과 계산 결과를 나타내었다. 이를 바탕으로 몇가지 물성치에 대한 계산 결과를 얻었고, 제시한 모델의 결과와 실험 결과치를 이용한 계산 결과를 비교하였다. 계산 결과 물리적인 현상은 파악할 수 있었으나 정확성에는 문제가 있었다. 이는 여러 가지 원인의 가스압을 가장 단순한 모델로 묘사하였기 때문이며 또한 석탄의 물성 변화를 거의 고려하지 않았기 때문이다. 이는 향후 연구에서 보완 되어야 할 사항

이며 특히 연화층 내부의 모델링의 보강이 우선 되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 연소기술 연구센터(CERC)와 Brain Korea21의 지원으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D.Merrick, "Mathematical models of the thermal decomposition of coal" Fuel, Vol. 62, 1983, pp.534-539
- [2] D.R.Jenkins, "Plastic layer permeability estimation using a model of gas pressure a coke oven" Fuel. Vol. 80, 2001, pp.2057-2065
- [3] D.R.Jenkins, "Effect of coke shrinkage and plastic layer deformation on gas pressure in a coke oven", Fuel, Vol.81, 2002, pp.461-465
- [4] E.J.Osinski, "Mathematical model for tall coke oven battery, part 2 Calculation of gas flow and related phenomena for oven charge" Ironmaking and Steelmaking, Vol. 20, 1993, pp. 453-467
- [5] S.Nomura, "The effect of swelling pressure during coal carbonization on coke porosity", Fuel, Vol.75, 1996, pp.187-194
- [6] S.Nomura, "Some aspects of the generation of coking pressure during coal carbonization", Fuel, Vol. 75, 1996, pp.801-808
- [7] R.Loison, "Coke : quality and production", London:Butterworths, 1989, pp.353-416
- [8] 양원, "Combustion modeling of the solid fuel bed and its application", KAIST 박사학위 논문, 2004
- [9] 양광혁, "고체층 열유동 공정 해석 - 코크오븐에의 적용", KAIST 석사학위논문, 2004