

배합탄을 사용하는 코크스로의 열전달 모델에 관한 연구

이해평 · 이성철 · 김기홍* · 이웅국*

한양대학교 공과대학 화학공학과, *포항산업과학연구원 에너지전환연구팀

A Study on Heat Transfer Model in a Coke Oven Using Blending Coals

Hae-Pyeong Lee, Sung-Chul Yi, Ki-Hong Kim* and Yong-Kuk Lee*

Department of Chemical Engineering, Hanyang University, *Energy Conversion Research Team, RIST

요 약

석탄을 건류하여 코크스를 제조 시, 사용되는 석탄의 특성에 따른 적정 노온 관리를 통해서 에너지 비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 코크스로의 수명을 연장시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 원료탄의 배합과 성상에 따른 코크스로 내의 열전달 및 온도 분포를 예측하기 위해서 Merrick의 모델을 배경으로 수학적 모델과 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 전산 모델을 광양 제철소의 코크스로에 적용하여 신뢰성을 확인함으로써 실제 공정의 조업 기준 설정과 기존 시설에 대한 개선 가능성을 판단할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract— Blending various coals during the coke making process affects the quality of coke as well as the total energy required for the process. The mathematical model based on Merrick's work developed to predict the effect of blending coals on coke making process. The Crank-Nicholson method was used to solve the model equation to predict temperature distributions, a coking time, and a total energy required during the process. The developed model successfully applied to KwangYang Steel Company's coke oven to validate the model performance. It is hoped that the model can serve as a guidelines on how to blend coals during the process.

1. 서 론

최근에 제철소의 고로가 대형화되면서 안정되고 우수한 품질의 코크스(coke)를 요구하게 되었고, 제철소 에너지 사용량의 17%를 차지하고 있는 코크스로(coke oven)에서의 건류 소비 열량을 판정할 수 있는 연소 관리의 필요성이 증대되고 있다. 적정 노온 관리를 통해서 에너지 비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 코크스로의 수명을 연장시키는데 직접적인 영향을 받기 때문이다.

코크스는 역청탄(bituminous coal)을 코크스로 내에서 습식 또는 예열의 공정 조건으로 분해·증류에 의하여 얻어지는 잔류물로서 생성되는 코크스의 질은 석탄(coal) 및 석탄 배합의 화학적·물리학적 성상, 탄화 반

응 전의 석탄의 전처리 과정, 탄화 반응 조건 등에 의하여 결정된다".

석탄을 건류하여 코크스를 제조함에 있어서 기존에 알려진 물성만으로는 석탄의 건류특성 및 건류후 코크스 품질 예측이 곤란하며, 사용되는 석탄의 특성별 공급 열량에 대한 정량적인 조절이 불가능하다.

이러한 문제점은 코크스 품질 변동을 분석함에 있어서 매우 어려운 요소로 작용하고 있고, 석탄의 특성에 따른 입열 방식이 정립되지 않아 건류 열량을 증가시키는 요인으로도 작용하고 있다. 따라서 석탄의 특성에 따라서 정량적인 열량 공급 방식을 수식적으로 정립함으로써 에너지를 절감시키는 연구가 필요하게 되었다.

석탄의 코크스화 성향에 대한 연구의 일환으로 암석

분류학과 석탄의 유동 물성을 이용하여 석탄의 혼합법 및 얻어진 코크스 질을 예측하는 방법이 Miyazu 등²⁾에 의하여 개발되었지만 코크스화 조건의 영향은 지금까지 보고된 바가 없다. 이 문제를 보완하기 위하여 Suginoe 등³⁾은 semi-coke의 장력 강도와 열응력을 이용하여 석탄의 암석 분류학에 의한 물성과 코크스화 조건에 관한 상관 관계를 얻어냈다.

석탄의 화학 반응 구조 및 물성치에 중점을 둔 수학적 모델에 관한 연구들은 탄화실의 구조에 따른 1차원적인 모델들⁴⁻⁶⁾이 주를 이루고 있으며, 그 중 대표적인 것이 영국 석탄 연구단체에서 개발한 Merrick⁹⁾의 모델, 한국 포항종합제철 연구소에서 개발한 이^{10,11)}의 모델 등이 있고, 미국 Republic Steel 회사의 도움으로 Purdue 대학의 Tang과 Leininger¹²⁾가 개발한 2차원적인 모델 및 Canada Algoma Steel 회사의 Osinski 등¹³⁻¹⁵⁾이 개발한 모델들이 있다.

코크스 생성시 코크스로 내에서 발생하는 석탄의 화학 반응 즉, 열분해 현상의 반응 구조 및 이로 인한 물리학적 물성치 변화를 포함하는 수학적 모델에 관한 연구는 Merrick¹⁶⁻²¹⁾에 의하여 정리가 잘 되어 있을 뿐만 아니라 휘발 물질의 생성 속도에 관한 여러 가지 수학적 모델이 개발되었으나 코크스로의 형태나 원료의 특성 및 현상의 해석에 대한 차이 등으로 약간씩 다르므로 실제 공정을 고려한 새로운 모델식의 개발이 이루어져야만 공정에 적용이 가능할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 실제 공정을 대상으로 단일 종류의 석탄뿐만 아니라 원료탄의 배합 및 성상에 따른 코크스로 내의 열적 거동 해석을 위해서 코크스로 내의 원료탄의 배합과 성상을 예측할 수 있는 속도론적 모델(kinetic model)의 개발과 코크스로 내의 열전달 및 온도 분포를 예측할 수 있는 모델을 개발함으로써 최적의 건류 소비 열량만을 공급하여 에너지 소비를 최소화시키는데 목적을 두었다.

따라서 코크스로의 연소 관리를 위해서 전열 기구(mechanism)를 파악하여 수식 모델을 도출해 냄으로써 실제적으로 건류중에 파악하기 힘든 고로 내부의 석탄 온도를 정확히 예측하는 동시에 건류 시간에 영향을 미치는 변수에 따른 적정 건류 시간(coking time)을 정량화 한 다음, 이것에 근거를 둔 코크스로의 해석 기법을 확립하며, 노온을 적정한 상태로 관리하여 에너지 소비량을 절감하고 코크스로의 조업 기준 설정과 연소 제어 모델의 매개변수(parameter) 계산을 위한 기초 자료로 활용할 수가 있다. 특히 장입되는 원료탄의 배합과 성상의 변화가 탄중 온도 분포에 미치는 효과를 예측할 수가 있으며, 각기 다른 코크스화(coking) 단계에서의 석탄의 성분은 석탄으로부터 방출되는 기체의 속도를 계

산함으로써 예측할 수 있으므로 새로운 노의 설계 시, 유력한 판단 기준 설정에도 기여할 수 있을 뿐만 아니라 코크스로 조업 기준 설정과 기존 시설에 대한 개선 가능성도 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 이 론

본 연구에서는 코크스로의 석탄 건류 과정에 있어서 전열에 기초를 둔 수식 모델을 개발하고자 영국 London 대학의 Merrick이 개발한 수학적 모델들¹⁶⁻²¹⁾을 배경으로 다음의 세 가지 부분을 고려하였다.

1) 석탄 건류 과정 중 고체 잔류분의 원소 함량의 변화 및 석탄의 열분해시 생성되는 물질의 양을 계산하는 열분해 부분

2) 고체 잔류분의 물리학적 물성치의 온도 및 원소 함량과의 관계 부분

3) 1)과 2)에서 얻어진 부분 모델을 사용한 코크스로 내의 2차원적인 온도 구배를 예측하는 열전달 모델

이 중에서 모델의 정확성을 좌우하는 중요한 요소들은 부분 1)과 2)이다. 석탄의 특성과 원소 함량의 함수 관계가 정립이 되면 탄화실의 운전 조건인 노벽의 온도를 사용하여 건류 시간, 코크스로의 장입량 및 에너지 소모량 등을 모델을 사용하여 예측한다. 또한 원료탄의 성상에 따른 코크스의 화학적·물리적 변화에 따른 관계를 정립하는데 중점을 두고, 코크스로 내의 위치에 따른 온도 변화를 고찰하였다.

2-1. 코크스로의 사양

코크스로의 구조는 크게 3개의 중심 부분인 탄화실(coke oven), 가열실(flue), 그리고 재생실(regenerator) 등으로 이루어져 있으며, 개략적인 모형을 Fig. 1에 나타내었다¹⁰⁾. 이 중에 본 연구에서는 탄화실 즉, 코크스로 내의 전열 기구의 파악에 요지를 둔다. 탄화실의 형상은 단면적의 변화가 있지만 일반적으로 길이는 10~16 m, 높이는 3~7 m 및 폭은 0.3~0.5 m 가량의 크기를 갖는다. 대체적으로 현재 사용되고 있는 코크스로의 용량은 30 ton 정도인데 이것은 부피 밀도로 800 Kg/m³에 해당된다. 석탄은 주로 상부의 4개의 열려진 통로를 통하여 중력 또는 공기 추진 방식에 의하여 장입되며, 생성된 코크스는 노에서부터 한쪽 끝으로 밀어져 나옴과 동시에 물로 급랭된다. 현재 가동되고 있는 코크스로 공장은 50~100개가 넘는 탄화실로 구성되어 있다. 각각의 탄화실은 가열실과 번갈아 구성되어 있기 때문에 1개의 가열실을 두고 각 면에 탄화실이 붙어 있는 형태이다¹²⁾. 본 연구의 대상인 광양 제철소에 설치된 코크스로의 사양을 Table 1에 제시했다.

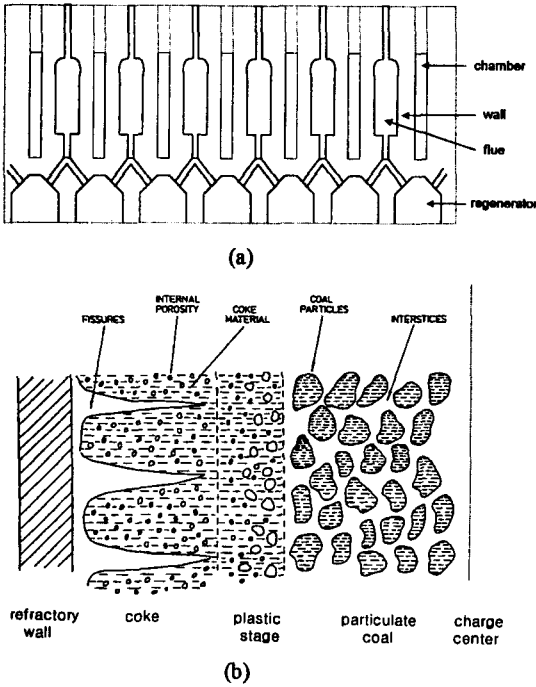


Fig. 1. Schematic diagram of coke oven and coking reactions in a coke oven charge.

2-2. 열분해 부분

석탄이 300~400°C로 가열되면 석탄은 소성 단계를 거쳐서 휘발성 물질들(volatile matters)을 방출한다. 온도가 더 상승되면 열분해시 팽창된 석탄은 열분해 종료와 함께 수축과 재고형(resolidification)을 하며 석탄 구조의 재중합화(repolymerization)가 나타난다. 휘발성 물질이 적은 양질의 석탄은 휘발 물질을 저질의 석탄보다

높은 온도에서 방출한다. 수학적 모델에서 흔히 고려의 대상이 되는 석탄의 휘발성 물질들은 tar, H₂O, C_nH_m (n≥2), CO₂, NH₃, H₂S, H₂, CH₄ 및 CO 등이며, H₂, CH₄, CO 기체는 2차 휘발성 물질들로서 각각 처리가 되고 전자의 물질들은 1차 휘발성 물질로서 하나의 형태로 취급된다^{1,11)}. Merrick⁹⁾의 실험 결과로부터 휘발성 물질의 최종적인 양과 석탄의 초기 성분과의 상관 관계식을 Table 2와 같이 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 Van Krevelen 등²⁹⁾이 제창한 코크스화 열분해 체계를 사용하였으며, 이 체계에서는 휘발성 물질들의 발화율(the rates of evolution)을 1차 반응으로 가정하였고 다음과 같다.

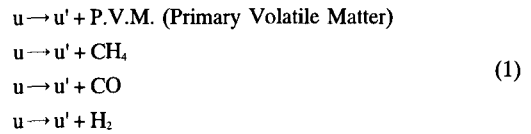


Table 2. Final yields of volatile matter species (dry, ash free, initial coal basis).

CO	0.35X
H ₂ O	0.71X
CO ₂	0.08X
CH ₄	0.06
C _n H _m (n≥2)	0.012
H ₂	0.034-0.3H
N _{vol}	N-0.01
S _{vol}	S-0.006
tar	16.3H-X-0.663
total yield	16H-0.14X+N+S-0.573

where X, H, N, S are percents by weight of oxygen, hydrogen, nitrogen and sulfur respectively; N_{vol} and S_{vol} are the final yields of volatile nitrogen and sulfur.

Table 1. Input data to the computer program for the thermal model.

coal elemental composition (% DAFB)					
	C	H	O	N	S
15% volatile matter	91.80	4.30	2.30	1.00	0.60
25% volatile matter	89.40	4.90	3.70	1.20	0.80
35% volatile matter	84.70	5.30	7.80	1.30	0.90
charge parameters					
moisture	ash		bulk density	initial temperature	
0~10%	5.0% D-B		750 kg/m ³ D-B	20°C	
oven specification					
oven width	oven height	wall thickness	wall conductivity	wall specific heat	wall density
0.45 m	6.7 m	0.10 m	2.3 J/m · K · s	1200 J/Kg · K	2800 Kg/m ³

where DAFB=dry, ash-free basis
D-B=dry basis

여기서, u 는 반응 전의 석탄의 고체 상태, u' 는 반응 후 semi-coke의 고체 상태이며, P.V.M.은 $\text{tar} + \text{H}_2\text{O} + \text{CnHm} + \text{CO}_2 + \text{Nvol} + \text{Svol}$ 이다. 전체 방출되는 양 m_e 는 Arrhenius 식에 의하여 얻어질 수 있다.

$$\frac{dm_e}{dt} = \sum_{i=1}^4 (A_i) \left(e^{-\frac{E_i}{RT}} \right) (M_i - m_i) \quad (2)$$

여기서, m_i 는 식 (1)의 물질(species) i 의 유출 질량이고 A_i , M_i , E_i 는 각각 물질 i 의 빈도 인자, 최종 수율 및 활성화 에너지이다. 빈도 인자는 단일 입자 반응으로 간주하여 전이 변화 상태 이론에 의하여 Merrick⁹⁾에 의하여 얻어졌으며, 본 연구에서는 그의 평균값인 $1.3 \times 10^{13} \text{ sec}^{-1}$ 을 사용하였다. 1차 휘발성 물질의 활성화 에너지는 온도의 함수로써 5개의 각기 다른 상수도 역시 Merrick⁹⁾의 실험에서 얻어졌다. 각각 3개의 2차 휘발성 물질에 대해서는 석탄으로부터 방출되는 기체가 넓은 온도에 걸쳐서 화학 반응이 일어나므로 온도에 종속된 분포 함수를 사용하였다.

2-3. 물리학적 물성치

Merrick이 개발한 수학적 모델¹⁶⁻²¹⁾ 중 물리학적 물성치는 열분해 모델에 의하여 계산된 석탄의 기본 원소의 함량 변화에 기초를 둔다. 이것은 석탄의 물리학적 특성은 석탄의 유기학적 구조와는 독립적이라는 가정 하에 모델을 개발하였다. 본 연구에서 코크스로 내의 온도를 계산하기 위하여 사용된 물리학적 물성치의 서술은 다음과 같다.

1) 석탄의 부피 밀도(bulk density)는 단위 코크스로 체적당 차지하고 있는 충전물의 무게이다. 코크스화 공정 중 충전물의 수직 수축률은 원래 체적의 5% 내외로 대단히 작은 편이다. 전체의 수축률 및 수축이 생기는 비는 탄화 반응(carbonization)이 진행되는 동안 일정하다고 가정한다. 그러므로 부피 밀도는 다음의 식에서 계산될 수 있다.

$$\rho = \rho_0 \frac{Y}{1 + \delta v} \quad (3)$$

여기서, ρ_0 는 충전물의 초기 부피 밀도를 나타내며 단위는 (Kg/cm^3) , Y 는 코크스의 초기 충전량의 단위 질량당 생성물(yield of coke) 및 v 는 회귀 곡선(regression curves)으로부터 얻어진 충전물의 분할 체적(fractional volume)의 변화를 나타낸다.

2) 석탄의 실제 밀도(true density)는 다음과 같은 식으로부터 얻어질 수 있다.

$$\frac{1}{d} = \frac{w_{daf}}{d_0} + \frac{w_a}{d_a} + w_m \quad (4)$$

여기서, d 는 충전 물질의 실제 밀도이며, d_0 는 석탄 또는 코크스의 재(ash)가 없는 건조 상태의 밀도, d_a 는 재의 밀도이고 w_{daf} , w_a , w_m 은 각각 습도와 재가 없는 석탄 또는 코크스, 재 및 습도의 충전 질량 당의 분별 질량(fractional mass)이다. 코크스화 공정에서는 가벼운 물질들의 분해와 함께 석탄으로부터 증발되므로써 코크스의 실제 밀도는 처음 석탄의 실제 밀도보다 높다.

3) 기공율(porosity) e 는 충전물의 실제 밀도와 부피 밀도간의 상대적인 차이이다.

$$e = 1 - \frac{\rho}{d} \quad (5)$$

코크스화 과정 중 소성 단계 전에는 기공율은 석탄 입자들 사이의 간극에서 주로 발생한다. 소성 단계에서는 석탄 입자들의 병합이 일어나며, 휘발성 물질이 방출됨에 따라 팽윤이 되면서 용융된다. 그러므로, 코크스화 후의 기공율은 기체가 증발된 후의 입자들 내의 공극(void)으로 간주되어진다. 이 공극들은 탄화 반응의 마지막 단계에서는 변화가 거의 일어나지 않는다. 석탄의 재고형화가 일어난 이후에 전체 공극률은 입자내의 기공 및 semi-coke의 수축률에 의하여 발생한 분극(fissure)으로 이루어진다. 코크스의 기공 구조 및 기공의 가열 공정 중의 변화에 관한 연구는 Tang과 Leininger¹²⁾에 의하여 행해졌다.

4) 석탄 또는 코크스의 비열(specific heat)은 다음의 식에 의하여 얻어질 수 있다.

$$C = \sum_{i=1}^3 w_i c_i \quad (6)$$

여기서 c_1 , c_2 , c_3 는 각각 재가 없는 석탄, 재 및 습도의 비열이고 w_1 , w_2 , w_3 는 각각의 질량당의 분별 질량이다. c_1 , c_2 및 c_3 의 식 및 값들은 Merrick⁹⁾ 및 Einstein의 모델²⁰⁾로부터 얻어질 수 있다.

5) 탄화 반응 중 반응열은 비열 자체 만으로부터 얻어진 필요 열량과 특정한 온도까지의 탄화 반응에 필요한 전체의 열량의 차이로써 얻어진다. 이 차이는 탄화 반응 중의 여러 가지의 화학 반응 중 방출되고 흡수되는 열로써 나타내어질 수 있다.

6) 코크스로 충전물의 열전도도(conductivity)는 다음과 같이 정의될 수 있다.

(1) 고체상의 열전도도-상대적인 평균 분자량(relative mean atomic weight) 및 온도의 함수

(2) 기체상의 열전도도-온도가 700 K보다 낮을 때에는 공기의 열전도도가 지배적이고 온도가 1100 K보다 클 때에는 수소의 열전도도가 지배적이다. 700 K와 1100 K 사이에서는 기체의 열전도도를 선형 보간법

(linear interpolation)에 의하여 계산하였다.

(3) 기공, 간극 및 열극 사이에서의 복사(radiation)에 의한 열전달은 고온에서도 큰 영향을 미치지 않는다. 복사 열속(radiation heat flux)의 지배적인 변수는 복사가 일어나는 경로의 길이이다. 경로의 길이의 범위는 0.003~0.03 m이며, 본 연구에서는 평균값으로 0.01 m를 사용하여 코크스로 내의 온도 분포를 계산하는데 이용하였다. 재고형화가 일어나기 전까지는 석탄 및 기체에 대하여 직렬 전도 법칙(serial conduction law)을 사용하였고 코크스 생성 중에서는 병렬 전도 법칙(parallel conduction law)을 적용하였다. 열전도도의 습도에 의한 영향도 고려하였다.

위의 일련의 현상들은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$k = (1-e)k^0 + ek_1 + e_m k_{2a} + e_{ext} k_{2b} \quad (7)$$

여기서 e는 코크스로 내의 전체 기공율이고 e_m 및 e_{ext} 는 내부 기공 및 분극(fissure)에 의한 기공율이다. k_0 , k_1 , k_{2a} 및 k_{2b} 는 위의 나열한 현상들의 열전도 계수로서 Merrick⁹⁾에 잘 나타나 있다.

2-4. 열전달 모델

코크스로 내의 충전물은 초기에는 균일하다고 가정한다. 분리(segregation) 및 체류량(hold-ups)에 의한 열극 현상 및 부피 밀도의 비균일성은 무시한다. 코크스로의 끝에서 일어나는 주변 효과(edge effect) 또한 무시한다.

1차원적인 열전도식은 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\rho}{\rho x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + r_{gas} C_{gas} \frac{\partial T}{\partial x} + Q \quad (8)$$

여기에서 ρ 는 충전물의 부피 밀도이고, C는 비열, k는 열전도도, r_{gas} 는 충전물의 기체 흐름으로 인한 대류 열전달, C_{gas} 는 기체의 비열 및 Q는 탄화 반응에 의한 열발생률(the rate of heat released)이다.

코크스로 벽면에서의 열전달은 가열실쪽 벽면으로부터 연소 기체의 발생열에 의하여 행하여진다. 코크스로 벽면에서의 열전도식은 다음과 같다.

$$\rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = k_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \quad (9)$$

여기에서 ρ_w , C_w , k_w 는 각각 노벽의 밀도, 비열 및 열전도도이다.

[경계 조건 및 초기 조건]

본 연구에서 개발한 모델에서 사용된 경계 조건과 초기 조건들은 다음과 같다.

1) 연소실 벽 - 연소실 벽면의 온도는 코크스화 공정 상 측정이 가능하며, 복사 효과를 고려하여 다음과 같이

나타낼 수 있다.

$$-k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} = \epsilon_g \sigma (T_g^4 - T_w^4) \quad (10)$$

여기에서 T_g 는 유입되는 기체의 온도, ϵ_g 는 기체의 복사능(0.59) 그리고 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수($5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)이다.

2) 코크스로 쪽 벽면 - 열선속(heat flux) 및 온도가 연속이라고 가정한다.

$$-k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} = -k_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \quad (11)$$

3) 코크스로의 중심 - 열선속 즉, 온도 구배가 0이라고 가정한다(대칭조건).

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{w=0} = 0 \quad (12)$$

여기에서 w는 코크스로의 폭을 나타낸다.

4) 초기 조건 - 초기 조건으로는 벽면은 노벽의 초기 온도를 가정하고 코크스로 내의 초기 조건은 석탄이 장입된 초기 온도를 사용한다.

$$T(x,0) = T_w \text{ (벽면)} \quad (13)$$

$$T(x,0) = T_i \text{ (코크스로 내)} \quad (14)$$

여기에서 T_i 는 상온이다.

2-5. 습도 및 증기의 영향

습도 및 증기의 영향은 Fig. 2에서 볼 수 있다. 건류 초기에 노벽에 가까운 부분의 장입탄의 수분은 100°C에서 증발되어(Fig. 2a) 100°C에 도달하지 않은 부분에서 응축되다가(Fig. 2b) 탄화실 중심부가 100°C에 도달하게 되면 증발되고, 증기가 노벽 쪽으로 흐르는(Fig. 2c) 증발(boiling), 응축(condensation) 및 대류(convection)의 기구로 가정하였다.

2-5-1. 증발

탄화실 내에서 100°C에 도달한 부분의 수분 증발 속도는 전달되는 열량에 비례하여 수분을 모두 증발시킬 때까지 온도는 100°C로 일정하다. 즉,

$$T = 100$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x_0}^+ = 0 \quad (15)$$

$$(w)_{x_0}^+ = 0$$

여기에서 x_0 는 벽면으로부터의 증발면까지의 거리이고 w는 습윤 함유량을 나타내며, +, -는 저온 및 고온 쪽에서의 접근을 의미한다. 증발에 관한 열 및 물질전달식은

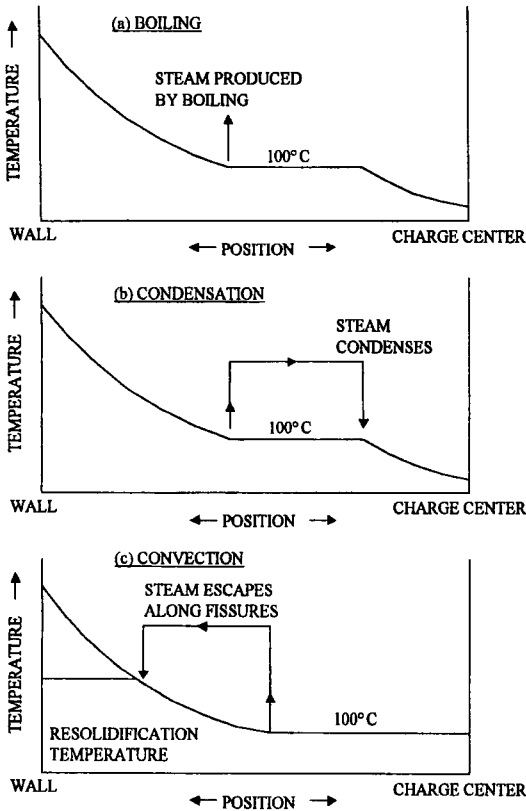


Fig. 2. Boiling, condensation and convection of the moisture.

다음과 같다.

$$r = (\rho w)_{x_b}^+ \frac{dx_b}{dt} \quad (16)$$

그리고,

$$2.257(10^6)r = - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x_c}^-$$

여기에서 r 은 증발 속도이고 $\frac{dx_b}{dt}$ 는 증발면의 코크스로 중심으로의 이동 속도이다.

2-5-2. 응축

수증기의 응축 속도가 상당히 빠르다고 가정하면 100°C에 도달하지 못한 지점의 열 전달은 인접한 지점과의 열전달과 수분의 응축 잠열에 의해서 일어난다. 즉, 응축면의 위치는 다음의 식에 의하여 결정될 수 있다.

$$T = 100^\circ\text{C}$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x_c}^- = 0 \quad (17)$$

$$(w)_{x_c}^- = w_0$$

여기서 x_c 는 노벽면으로부터의 응축면까지의 거리이고, w_0 는 코크스로 내의 초기 습윤 함유량이다. 응축에 관한 열 및 물질전달식은 다음과 같다.

$$(\rho w)_{x_c}^+ - (\rho_0 w_0) \frac{dx_c}{dt} = r$$

$$- \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x_c}^+ = 2.257(10^6)r \quad (18)$$

2-5-3. 대류

탄화실의 중심이 100°C에 도달하게 되면 수증기의 응축은 더이상 일어나지 않고 증발되는 수증기는 노벽 쪽으로 코크스 층 사이를 흐르며 남아 있는 수분이 모두 증발될 때까지 대류에 의한 열전달을 일으키게 된다. 그러므로 식 (6)으로부터

$$r_{\text{gas}} = r$$

$$C_{\text{gas}} = 1810 + 0.66T \quad (19)$$

로 정의되어진다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 계산 방법

열전달 모델과 열분해 반응을 고려할 경우, 코크스로 및 노벽을 탄화실의 폭방향으로 28등분(코크스로 20개, 벽면 8개)하고 노드(node)로써 대표되는 미소 부피에 대하여 에너지 수지식과 물질 수지식을 세워 거리에 대한 차분화를 행하였고, 시간에 대해서는 유한 차분법을 적용하여 Crank Nicholson법²⁹⁾에 의하여 함축적으로 시간에 대한 적분을 행한다.

따라서 본 연구에서는 코크스로 내에서 시간의 증분에 따른 각 위치별 온도의 변화와 화학 반응 및 열분해 반응이 일어난 결과값들을 고찰하였다.

코크스로 내의 습도 함량이 반응에 미치는 영향을 고려하였으며, 휘발성 물질이 방출되기 시작하는 300~400°C의 소성 단계가 끝난 온도에서는 물에 의한 영향이 적을 것으로 판단되지만 본 연구에서는 습도의 함량을 10%까지 변화시키면서 습도의 함량에 따른 영향을 실제적으로 고찰해 보았다.

휘발성 물질의 함량에 따른 영향을 고찰하고자 본 연구에서 사용된 입력 데이터들은 Table 1에 제시하였다. 본 연구에서는 상온에서 시작해서 코크스로의 중심 온도가 950°C에 도달할 때까지 프로그램을 실행시켜 결과값들을 얻어냈다.

또한 본 연구 결과를 실제 공정에 적용하기 위해서 개인용 컴퓨터(personal computer)상에서 수행되는 프로그램을 개발하였다.

3-2. 단일 석탄을 사용한 경우

본 연구에서 개발한 수학적 모델을 이용하여 단일 종류의 석탄을 사용할 경우, 코크스로 내에서 위치에 따른 온도의 변화, 습도의 함량에 따른 건류 시간, 장입된 석탄의 부피 밀도가 건류 시간에 미치는 영향 그리고 코크스화에 요구되는 열량 등을 살펴보았으며, 이 결과값들을 Fig. 3-6에 나타냈다.

본 연구에서는 가열실의 벽면을 경계 조건으로 하여 코크스로 벽과 내부를 전산 영역으로 설정하였으며, 코크스로 내에 장입된 석탄의 초기 온도는 상온으로 일정하고 코크스로 벽의 온도는 정상 상태에 도달한 온도를 초기 조건으로 사용했다. 또한 코크스로 중심에서의 열선속은 대칭 조건에 의하여 0이라고 가정했다.

Fig. 3은 가열실 벽면의 온도를 1050°C로 가열했을 경우의 시간에 따른 코크스로 내 각 위치에서의 온도를 나타내고 있다. 위치 0은 코크스로의 벽면과 코크스로 내부의 경계면을 나타내고 있다. 코크스로 중심의 온도가 950°C까지 도달하는데 걸리는 건류 시간이 21시간 정도인 것으로 보아 실제 공정을 적절하게 반영한 결과인 것으로 생각된다.

Fig. 4는 석탄의 부피 밀도를 750 Kg/m³으로 유지하고 습도의 함량을 0~10%까지 변화시키면서 가열실 벽면의 온도에 따른 건류 시간의 변화를 살펴 본 것이다. 같은 가열실 벽면의 온도에 대하여 습도의 함량이 증가하면 건류 시간이 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 1050°C의 벽면 온도를 유지하고 습도의 함량을 변화시키면서 석탄의 부피 밀도에 따른 건류 시간을 나타낸 그림이다. 부피 밀도의 증가에 따라 더 오랜 건

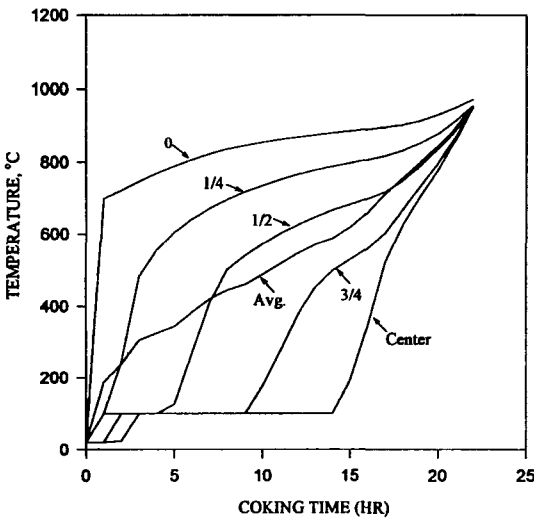


Fig. 3. Coke temperature history with flue wall temperature 1050°C.

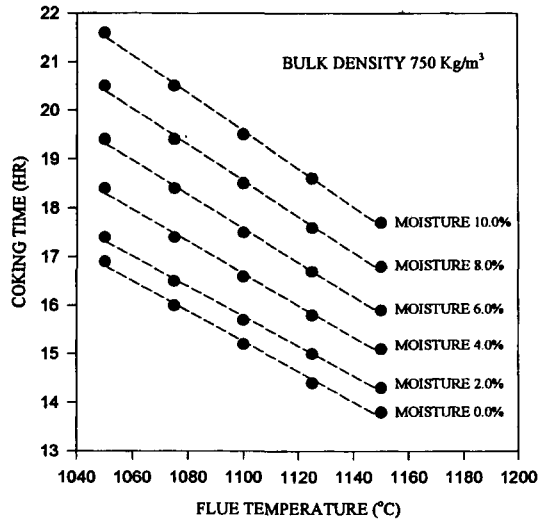


Fig. 4. Prediction of coking times as functions of flue wall temperature and moisture content with specific bulk density.

류 시간을 요구한다.

Fig. 6은 석탄의 부피 밀도를 750 Kg/m³으로 유지하고 습도의 함량을 변화시키면서 가열실의 벽면 온도에 따른 요구 열량을 나타내고 있다. 습도의 함량이 증가할수록 그리고 온도가 높을수록 더욱 많은 열량을 요구하게 된다. Fig. 4~6으로부터 코크스로 작동시 필요한 조업 변수들의 변화를 대략적으로 예측할 수 있다.

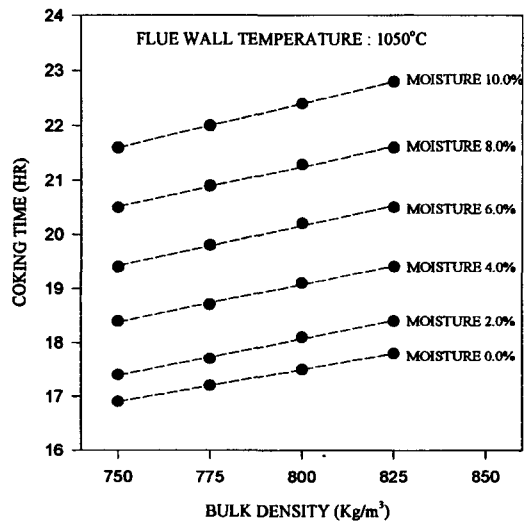


Fig. 5. Prediction of coking times as functions of bulk density and moisture content with specific flue wall temperature 1050°C.

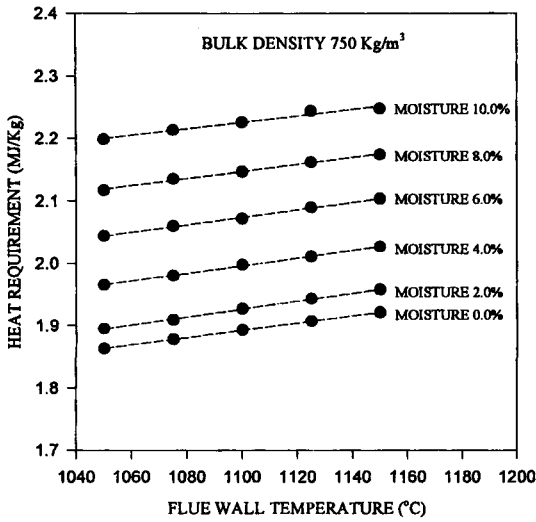


Fig. 6. Heat inputs to the charge as functions of flue wall temperature and moisture content with specific bulk density.

3-3. 광양 제철소의 전형적인 배합탄의 적용 사례

실제 공정에서는 단일 석탄을 사용하는 경우보다 몇 가지 석탄들을 배합해서 사용하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서 개발한 모델을 광양 제철소에서 실제 사용하는 배합탄에 적용함으로써 결과에 대한 신뢰도 및 타당성을 고찰해 보고자 한다. 광양 제철소에서는 최소 6개부터 최대 12개까지의 석탄을 배합하여 사용하고 있으며, Table 3은 가장 전형적인 배합탄에 대한 데이터들

이다. 배합된 석탄의 조성 및 습도 함량, 부피 밀도들은 장입되는 각각의 석탄의 질량에 대한 비중치(weight factor)를 적용하여 계산한 값들이다.

이 석탄들을 배합해서 사용했을 경우의 결과를 Fig. 7~9에 나타냈다. Fig. 7은 가열실의 온도를 1050°C로 가열하고, 기체의 온도를 1100°C로 취했을 때, 시간에 따른 코크스로 내에서 각 위치별 온도 변화를 나타내고 있다. 전류의 완료 시기는 탄화실의 중심 온도, 기체 발생 속도 및 발생 기체의 조성에 의해 결정하였다. 그림

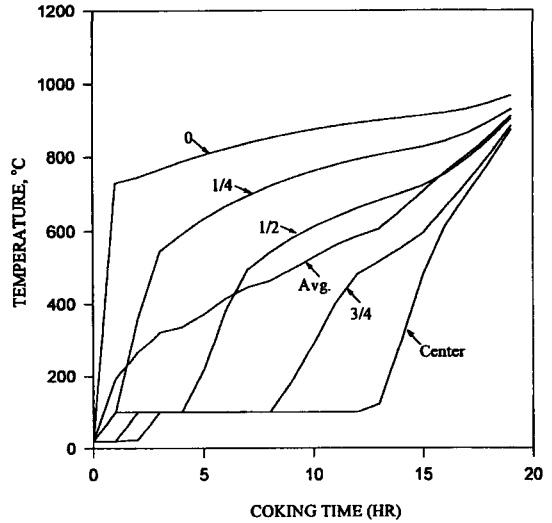


Fig. 7. Coke temperature history of blending coal with flue wall temperature 1050°C.

Table 3. Blending coal analysis data from Kwangyang Steel Company.

		coal elemental composition					total moisture (%)	ash content (%)	blending ratio (%)
coal name		C	H	O	N	S			
1	CW	89.70	5.08	1.57	2.81	0.84	7.23	7.29	17
2	PD	92.01	4.47	1.88	1.05	0.59	9.20	9.65	18
3	FR	86.67	5.12	4.70	3.05	0.46	7.00	8.64	10
4	SR	92.38	4.39	1.39	1.42	0.42	7.34	6.91	8
5	YK	93.93	4.22	1.19	0.46	0.20	7.80	9.16	5
6	GP	89.39	4.73	1.54	3.74	0.60	8.71	7.89	15
7	OC	89.83	5.15	2.06	2.29	0.67	9.21	9.12	9
8	GT	86.69	5.05	2.10	5.54	0.62	7.20	6.83	4
9	MW	84.67	5.25	1.73	7.90	0.45	8.04	9.78	11
10	PC	89.53	4.05	2.22	2.20	2.00	9.00	0.27	3

배합탄의 총 장입량	: 33ton (wet basis)	oven의 폭	: 0.45 m
oven의 초기 온도	: 20°C	oven의 높이	: 6.7 m
flue의 온도	: 1050~1300°C	gas의 온도	: 1100~1305°C
벽의 열전도도	: 2.3 J/m · K · s	벽의 비열	: 1200 J/Kg · K
벽의 밀도	: 2800 Kg/m³	벽의 두께	: 0.10 m

(※ bulk density는 750.0 Kg/m³로 모두 고정값을 사용함)

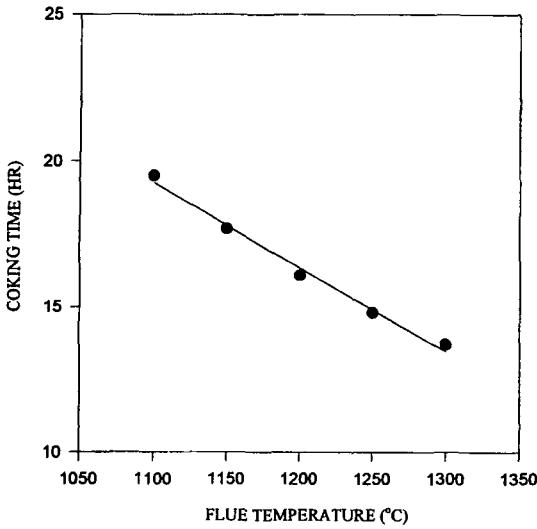


Fig. 8. Prediction of coking times as functions of flue wall temperature and moisture content for blending coal.

에서 알 수 있듯이 20시간 정도의 건류 시간을 나타내고 있다.

Fig. 8은 배합탄에 대한 가열실 벽면의 온도를 1100~1300°C까지 변화시키면서 온도에 따른 건류 시간의 변화를 살펴 본 것이다. 배합탄의 조성을 조절함으로써 변화되는 건류 시간을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 9는 배합탄에 대한 가열실 벽면의 온도를 1100~1300°C까지 변화시키면서 온도에 따른 열선속의 요구

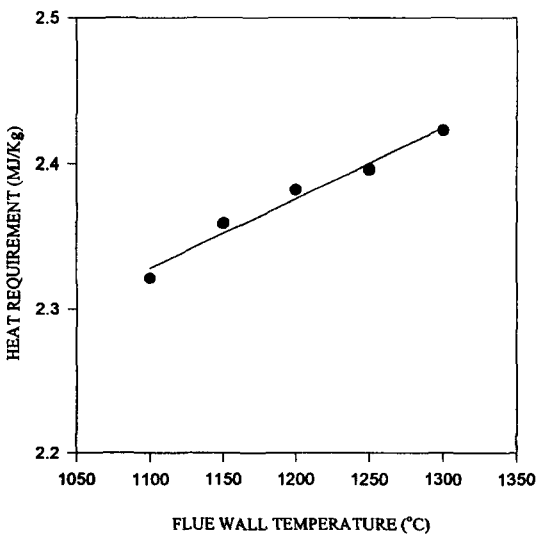


Fig. 9. Heat inputs to the charge as functions of flue wall temperature and moisture content for blending coal.

량을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 배합탄의 경우, 배합된 조성에 따라 코크스화에서 필요로 하는 열선속을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 석탄의 원소 함량을 나타내는 제한된 정보와 석탄의 장입 변수들과 코크스로의 가열 조건들을 입력데이터로 사용하여 코크스로 내에서 온도의 증가에 따른 석탄의 조성 변화를 예측할 수 있는 전산 모델을 개발하였다. 이 전산 모델로부터 석탄의 물리적 특성을 알 수 있을 뿐만 아니라 사용된 석탄들의 배합 성상에 따른 열적 거동을 예측할 수 있으므로 코크스를 만드는 공정에 대한 체계적인 정보를 얻을 수 있다.

본 연구에서 개발한 전산 모델은 단일 종류의 석탄뿐만 아니라 여러 종류의 석탄들을 배합하여 사용할 경우에 대해서 코크스로 내의 시간에 따른 조성 변화 및 위치에 따른 온도 변화를 예측할 수 있으며, 전형적인 배합탄을 사용하는 광양 제철소에 적용해 본 결과, 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 포항산업과학연구원의 연구비 지원과 한양대학교 신소재 공정원(GSAMP)의 장학금 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

사용기호

- A_i : Frequency factor of species i
- C : Specific heat
- C_{gas} : Specific heat of gas
- C_w : Specific heat of wall
- c_i : Specific heat of ash free coal, ash and moisture ($i=1, 2, 3$)
- d : True density of the charged material
- d_a : Density of ash
- d_o : Density of dry, ash free coal or coke
- e : Porosity
- k : Thermal conductivity
- k_w : Thermal conductivity of wall
- M_i : Final yield of volatile matter i
- m_c : Total mass yield of the volatile matter from coal
- m_i : Cumulative mass of volatile matter i released in the carbonization
- N_{vol} : Nitrogen yield that evolved from coal

- Q : Heat rate
- S_{vol} : Sulphur yield that evolved from coal
- T : Temperature
- T_w : Wall temperature
- t : Time
- u : Solid phase of coal before reaction occurs
- u' : Solid phase of semi-coke after reaction occurs
- w_a : Fractional mass of ash per mass of charge
- w_{daf} : Fractional mass of dry, ash free coal per mass of charge
- w_i : Fractional mass of ash free coal, ash and moisture (i=1, 2, 3)
- w_m : Fractional mass of moisture per mass of charge

Greek Letter

- ϵ : Emissivity of gas
- ρ : Charge bulk density
- ρ_w : Density of wall
- σ : Stefan-Boltzmann constant

참고문헌

1. Tang, D.L.: Ph. D. Thesis, Purdue Univ. (1984).
2. Myazu, T., *et al.*: Nippon Kokan Tech. Report-Overseas, 1 (1975).
3. Suginohe, M., *et al.*: Proc. AIME, **42**, 243 (1983).
4. Tashiro, K., *et al.*: Fuji Seitetsu Technical Report, **17**, 353 (1968).
5. Bogenschneider, B. and Simonis, W.: Gluckauf-Forschungshefte, **33**, 198 (1972).
6. Butorin, V.I. and Matveeva, G.N.: Coke and Chemistry U.S.S.R., **10**, 19 (1975).
7. Yamada, T., Ohki, *et al.*: J. Fuel Soc. Japan, **56**, 36 (1977).
8. Kim, C.S. and Aukrust, E.: Ironmaking and Steelmaking, **6**, 49 (1979).
9. Merrick, D.: Ph. D. Thesis, Univ. of London (1977).
10. 이근성: 화학공업과 기술, **3**(4), 417 (1985).
11. 이근성: 연구기보, **8**(1), 147 (1986).
12. Tang, D.L. and Leininger, G.G.: Report No. 133, Purdue Laboratory for Applied Industrial Control, Purdue Univ., West Lafayette, IN (1982).
13. Osinski, E.J., *et al.*: Ironmaking and Steelmaking, **20**(5), 350 (1993).
14. Osinski, E.J., *et al.*: Ironmaking and Steelmaking, **20**(6), 453 (1993).
15. Osinski, E.J., *et al.*: Ironmaking and Steelmaking, **21**(1), 44 (1994).
16. Merrick, D.: FUEL, **62**(May), 534 (1983).
17. Merrick, D.: FUEL, **62**(May), 540 (1983).
18. Merrick, D.: FUEL, **62**(May), 547 (1983).
19. Atkinson, B. and Merrick, D.: FUEL, **62**(May), 553 (1983).
20. Merrick, D., *et al.*: FUEL, **62**(May), 562 (1983).
21. Merrick, D.: FUEL, **62**(May), 567 (1983).
22. Peters, W.A., *et al.*: Final Tech. Progress Rep., Bethlehem Steel Co., U.S.A. (1985).
23. Van Krevelen, D.W., *et al.*: Fuel, **35**, 462 (1956).
24. Frost, A.A. and Pearson, R.G.: "Kinetics and Mechanism", 77, John Wiley and Sons, Inc., London, England (1961).
25. Myers, G.E.: "Analytical Methods in Conduction Heat Transfer", McGraw-Hill (1971).