

다공질 물질의 냉각현상 연구를 통한 코크스냉각공정의 모델링

김주한⁺, 이용주*, 김기석*

(Manuscript received: May, 9, 2012 / Revised: Aug, 6, 2012 / Accepted: Sep, 15, 2012)

Modeling for a Coke Dry Quenching Process Using a Theory of a Porous Material

Joohan Kim⁺, Yongju Lee*, Kiseok Kim*

Abstract

Numerical modeling for a coke dry quenching process was developed and evaluated. The cokes had similar characteristics to a porous material, therefore, its quenching analysis was simplified as a cooling process of porous blocks. A uniform inlet temperature and constant properties of materials in the oven were also assumed. With given operating conditions, temperature profiles in the cokes were calculated and compared to the actual values. The calculated temperature gradient was high at the upper part of the coke flow and the cooling rate decreased as cokes came down to the exit port. The exit port temperature of cokes was similar to the measured value, however, temperature-dependent material properties and operating conditions must be considered to predict the temperature precisely. The calculated results could be applied to design a coke oven to produce high quality cokes.

Key Words : Cokes(코크스), Dry quenching(건조 담금), Porous materials(다공질물질), Cooling(냉각)

1. 서론

제철공정에서 코크스는 제철 및 제선에 있어서 중요한 역할을 하고 있는 요소이다. 초기 공정에서는 석탄을 활용하였으나 이 경우 효율이 낮았으며 생산되는 철의 품질이 떨어짐에 따라 코크스가 개발되었다. 코크스란 점결탄의 고온건류에 의해서 생기는 다공질 고체연료를 일컫는다. 코크스는 일반적으로 회흑색을 띠며 금속성 광택을 지니고 일반적인 성분은 고정탄소이다. 코크스는 제선공정에서 제련하는 철의 환원제 역할, 내부물질의 용융을 위한 에너지원, 그리고 내부 유체의 원활한 유동제 등의 세 가지 역할을 하게 된다⁽¹⁾. 양질의 코크스를 생산하는 공정은 다음과 같다. 먼저 분쇄한 석탄을 코크스로 안에 장입하고 노벽에서

1,000°C 정도의 온도로 수십 분 가량 가열한 후, 노벽에서 가까운 부분으로부터 용해 및 분해하여 휘발분을 발생시킨다. 이후 용융상태에 있는 층을 24시간정도 건류한 후 온도가 더욱 상승하면 고화하여 코크스가 된다⁽¹⁾. 그 후 뜨겁게 달구어진 적열코크스를 질소가스에 의해 냉각시킨다. 이러한 냉각공정을 Coke Dry Quenching(CDQ) 공정이라 불리며⁽²⁾ Fig. 1에 코크스 냉각공정에 대한 개략도가 나타나 있다. 코크스의 냉각에서 냉각요소인 질소가스(N₂)는 코크스 사이를 통과하여 코크스를 냉각시키게 되며 이러한 물질은 다공질을 통한 에너지 전달로 해석되어질 수 있다. 여기서 다공질 물질이란 내부에 공극이 많은 물질, 즉 내부 공극 구조를 가진 고체를 말한다. 고체 입자의 배열이 조약돌을 쌓아놓은 듯한 층과 같이 규칙적이거나 또는

+ 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 (joohankim@seoultech.ac.kr)

주소: 서울특별시 노원구 공릉동 17-2 다산관 335

* 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

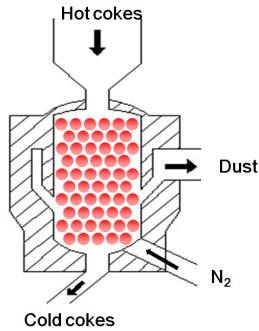


Fig. 1 Schematic of coke dry quenching system

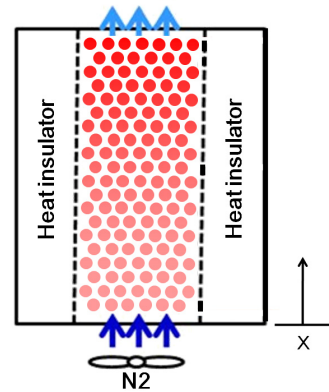


Fig. 2 Schematic of coke dry quenching process

스폰지와 같이 계 내부에 공극이 일정하게 인공적인 가공으로 얻어진 고체층을 공극이라 부르는데 이러한 공극을 통하여 고체층과 균질하며 효율적인 열전달이 가능하다. 이에 이러한 물질에 대한 적용 대상이 다양하게 제시되어왔고 이와 관련된 다수의 선행연구가 진행되었다⁽³⁻⁷⁾.

이는 다공질물질의 다수의 공극으로부터 면적의 증가를 얻을 수 있으며 이와 동시에 공극 사이의 유동저항의 증가에 의한 유속의 감소로 공극물질과 유체사이의 일정한 반응을 진행시킬 수 있는 장점을 갖는다. 또한 넓은 반응면적에서 오는 효율적인 에너지전달을 달성할 수 있는 장점이 있다⁽⁸⁾. 코크스 냉각에 있어 다양한 균질한 온도분포 또는 온도 강하률은 고품질의 코크스 생성에 중요한 부분이며 이를 위한 질소 냉각에 있어 코크스 냉각 시 온도분포의 균질성 또는 온도 강하률의 일정성 등은 중요한 요소이다. 만일 코크스의 온도가 냉각공정에서 어떻게 분포하는지 정량적으로 파악할 수 있다면 코크스의 품질을 상승시켜 고로내부의 안정적인 제선공정이 가능하게 할 것이고, 냉각공정 중 식지 않은 코크스의 수를 최소화함으로써 제조공정에 투입되는 원가와 시간을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 코크스 제조공정의 마지막 단계인 질소가스를 이용한 코크스 냉각 공정을 다공질 물질의 열전달과정으로 모델링하여 초기 코크스의 온도가 질소가스에 의해 최종적으로 어떻게 분포되는지 이론적 모델링을 수행하였으며 이에 대한 고찰을 수행하였다. 또한 예상된 모델링의 결과와 알려진 온도 분포와의 관계를 통해 본 공극모델의 유효성을 검증하였다.

2. 수치해석 모델링

2.1 코크스 냉각공정의 단순화

코크스 냉각공정에서 코크스 사이에는 공극이 다량 존재하므로 전체 계를 하나의 다공질 물질로 가정할 수 있다. 코크스 냉각 공정은 챔버의 윗부분에서 코크스가 투입되고 아랫쪽으로 이동하며 냉각된 코크스는 배출된다. 냉각시에는 질소가스

를 냉각유체로 사용한다. 이와 같은 공정에서 적열코크스의 투입과 냉각코크스의 배출이 일정한 플로우를 형성하기 때문에 일정한 코크스 투입속도와 냉각 질소 가스의 유입을 고려하면 본 공정은 Fig. 2와 같이 일정한 공극물질이 유체에 의해 연속적으로 냉각되는 공정으로 단순화할 수 있다. 이 경우 가장 윗면의 코크스는 신규투입되는 적열코크스이기 때문에 그 온도는 투입시의 일정한 온도로 가정할 수 있다.

또한 다공질 물질 속을 통과하는 유체는 코크스 고체표면에 일정한 경계면을 형성하게 되는데, 이 경우 유동과 열전달 해석을 위하여 지배방정식과 경계조건을 세워야 한다. 이와 같은 조건을 비교해 볼 때 본 연구에서는 다음과 같은 몇 가지의 가정을 도입할 수 있다.

- ① 적열코크스와 열교환된 질소가스가 지속적으로 냉각로 설비 내로 공급되고 배출되고 있으므로 이 공정을 하나의 정상상태(steady state)로 가정한다.
- ② 다공층을 이루는 고체와 유체의 열적 물성치는 일정하다.
- ③ 다공층은 균질이며 등방성이다.
- ④ 고체와 유체의 경계면에서의 점성효과와 확산효과는 무시한다.

2.2 지배방정식 및 해석

코크스 냉각공정을 다공질 물질의 열전달 현상으로 단순화하여 생각하면, 코크스는 여러 개의 층이 겹쳐져 있고, 그리고 그 층들이 단단히 결합되어 있다고 생각할 수 있다. 생각하고자 하는 모델은 Fig. 3 와 같이 아래에서는 냉각유체가 다공질 물질은 통과하여 냉각효과를 유도 해내고, 위쪽은 외기로 노출되어 대류로 열전달을 예상할 수 있다.

에너지의 전달과정을 1차원이라고 가정하면 고체 내부는 하부경계면에서 상부경계면 방향으로 균일한 수직 관통류가 흐르게 된다. 따라서 수직 관통류가 흐르는 다공질 물질에 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식을 적용이 해석에 필요하며 그 지배방정식은 다음과 같다⁽⁹⁾.

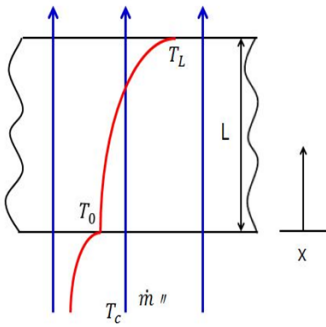


Fig. 3 Expected temperature distribution in the medium

1) 연속 방정식

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

2) 운동량 방정식

$$\frac{\rho_f}{\epsilon} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\epsilon^2} (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \rho_f g - \frac{\mu}{K} \vec{V} - \rho_f \frac{b}{K} |\vec{V}| \vec{V} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

3) 에너지 방정식

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f \vec{V} \cdot \nabla T = k_m \nabla^2 T \quad (3)$$

세부적인 다공질 물질의 냉각 해석을 위해 Fig 4와 같이 다공질 물질 안과 밖에 검사체적을 선정하였다. 검사체적 CV1은 열유속으로부터 대류항을 이용하여 냉각질소와 다공질 물질로

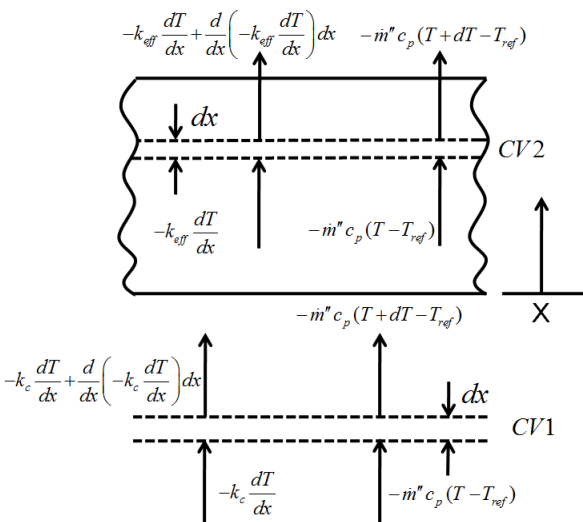


Fig. 4 Control Volume 1 and 2 for the modeling

가정된 코크스가 접촉할 때의 외부의 온도분포를 위한 검사체적이며, 검사체적 CV2는 코크스의 공극을 포함한 물질내의 에너지 전달에 대한 지배방정식을 적용하기 위한 검사체적이다.

Fig. 4의 미소 검사체적 CV1에 대해 확산방정식과 에너지 방정식을 적용하여 관련된 식을 유추하면 아래의 식 (4) 또는 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$-k_c \frac{dT}{dx} - \left\{ -k_c \frac{dT}{dx} - \frac{d}{dx} \left(k_c \frac{dT}{dx} \right) dx \right\} = m'' h_{x+dx} - m'' h_x \quad (4)$$

또는,

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \gamma \frac{dT}{dx} = 0 \quad (5)$$

여기서 T 는 온도, k_c 는 유입되는 냉각가스(질소)의 열전달계수이고, m'' 은 질소가스의 질량유량, h 는 엔탈피, C_p 는 정압비열이다. 식 (5)는 아래와 같은 경계조건으로 특정화될 수 있다.

$$x \rightarrow -\infty, T \rightarrow T_c \quad (6)$$

$$x = 0, T \rightarrow T_0 \quad (7)$$

여기서 x 는 경계로부터 수직거리, T 는 온도, T_c 는 냉각질소의 온도, T_0 는 $x = 0$ 인 부분의 최종 냉각코크스의 온도이다. 같은 방법으로 Fig. 4의 코크스 내부 유동 및 에너지 전달과 관련된 CV2에 관련된 지배방정식을 유도하면 식 (8) 또는 (9)와 같다.

$$k_{eff} \frac{dT}{dx} - \left\{ -k_{eff} \frac{dT}{dx} - \frac{d}{dx} \left(k_{eff} \frac{dT}{dx} \right) dx \right\} - m'' h_{x+dx} + m'' h_x \quad (8)$$

또는,

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \lambda \frac{dT}{dx} = 0 \quad (9)$$

여기서 k_{eff} 는 다공질 물질, 즉 코크스 내부의 유효열전달계수, $\lambda = m'' C_p / k_{eff}$ 이다. 본 지배 방정식에 대한 경계조건은 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$x = 0, T = T_0 \quad (10)$$

$$x = L, T = T_L \quad (11)$$

여기서 T_L 은 $x = L$ 인 부분의 코크스온도를 정의하며 연속공정에서는 코크스의 일정한 투입초기온도로 정의할 수 있다. 식 (5)와 (9)의 2차 미분방정식의 해는 아래의 식 (12)와 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{T - T_h}{T_0 - T_h} = \exp(\gamma x) \quad (12)$$

$$\frac{T - T_0}{T_l - T_0} = \frac{e^{\lambda L} - 1}{e^{\lambda L} - 1} \quad (13)$$

코크스내의 온도 분포를 구하기 위해서는 먼저 코크스의 가장 밀부분의 온도(T_0)와 윗부분의 온도(T_L)가 정의되어야 하고 코크스의 최종 냉각 영역인 바닥면의 표면온도는 냉각유체와 코크스의 경계에서의 에너지평형을 이용하여 구할 수 있다.

코크스 바닥면의 온도 평형은 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$-k_h \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0^-} = -k_{eff} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0^+} \quad (14)$$

여기서 k_h 는 냉각유체인 질소가스의 열전달계수이다. 앞서 구해진 온도분포에 대한 해를 위의 식에 넣어 전개하면 코크스의 바닥경계면의 온도 (T_0)를 구할 수 있는 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$x = 0, (T_0 - T_h) = \frac{T_L - T_0}{e^{\lambda L} - 1} \quad (15)$$

식 (15)를 이용하면 온도경계가 주어진 본시스템에서 T_0 를 결정할 수 있다. 이러한 방식으로 양끝의 온도가 결정되어지면 앞선 식 (13)을 통해 코크스 내부의 온도를 분포를 결정할 수 있다.

3. 결과 및 토론

앞선 모델링을 통하여 코크스의 냉각과정에 있어서의 온도분포를 나타내는 식을 구할 수 있었다. 실제 모델링의 유효성을 검증하기 위해 코크스 냉각과정 계산을 위한 조건과 물성값을 아래의 표와 같이 정의하였다.

코크스 공정에서 유체의 유량 대비 냉각된 코크스의 배출온도에 대한 결과가 Fig. 5와 같이 계산되었다. 질소의 냉각유체의 유량이 11kg/s 으로부터 30kg/s로 증가할수록 실제 배출되는 코크스의 온도는 급속히 떨어지고 있음을 알 수 있다. 실제 코크스 냉각의 질소 유체 유량은 일반적으로 17kg/s에서 25kg/s의 값을 갖는다⁽¹¹⁾. 실제 공극을 통한 유동에서는 그 유

Table 1 Physical properties of cokes cooling process^(1,10)

Properties	Value
c_p	1.041(kJ/kg K)
k_{eff}	86.3(W/mK)
k_c	2.59(W/mK)
λ	13.55(1/m)
T_L	1,200(K)
T_∞	200(K)
L	4(m)
\dot{m}	11(kg/s)
porosity	0.4

동저항에 의해 냉각유체의 유입의 증가는 제한적이기 때문에 일정 유량 이상의 투입은 현실적으로 어려운 점이 있다. 코크스 내에 온도분포가 Fig. 6과 같이 계산되어졌다. 온도의 감소는 선형적이지 않고 이는 실제 공극을 통과하면서 에너지 전달이 더 효율적으로 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 수치들은 계산에 사용된 물성치들에 직접적인 관계가 있어 절대적인 수치와 직접 비교하기는 어렵다. 하지만 실제 온도 코크스의 배출온도의 측정을 통해 모델을 간접적으로 평가할 수는 있다. 실제 공정에서의 온도는 $T_0 = 523K$ 으로 측정되고 되었다⁽¹¹⁾. 따라서 두 결과를 상대오차분석을 통하여 계산해 보면, 계산된 결과는 다소의 오차를 보인다. 이는 고온의 코크스가 경계 또는 내부에서 정확히 어떠한 물성값을 갖는지는 실제 예측하거나 측정이 어려운 점에 기인한다. 현재의 모델링은 코크스 냉각공정에서의 복잡한 물성변화를 고려하지 않았기에 가스의 유동이나 내부 가스압력의 형성과 같은 다양한 운전상황에 대해서는 오차를 수반한 모델로 볼 수 있다. 본 모델은 간단한 유한체적법을 통해 그 결과를 비교해 볼 수 있는데 구형태로 단순화된 코크스의 냉각을 확인해 본 결과 초기 온도 상승률이 실제 제시된 모델보다 높게 나타났다(Fig. 7). 이는 본 공극의 비율이 본 모델의 온도분포에 민감하게 영향을 주는 것으로 판단된다. 또

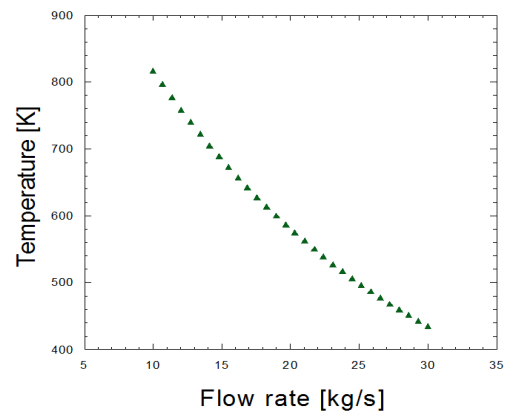


Fig. 5 N₂ Cooling gas Flow rate vs. coke temperature

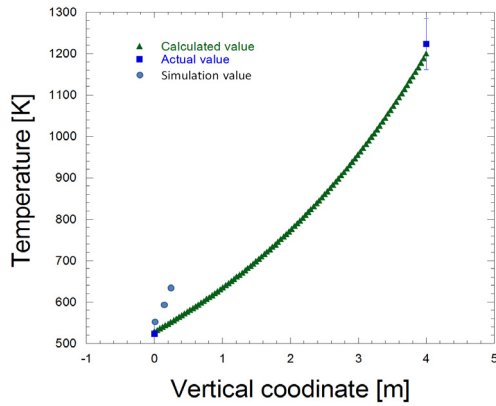


Fig. 6 Temperature profiles in the coke

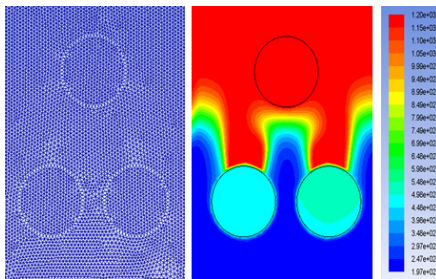


Fig. 7 Numerical simulation result

한, 내부온도 분포에서 확인될 수 있는 사항은 공극효과에 의해 온도 상승률이 상층으로 갈수록 높게 형성된다는 것이다. 이것은 일정한 온도 상승률에서 오는 균질한 냉각이 바람직한 형태라고 볼 때 실제 냉각공정의 설계에 있어 상대적으로 많은 양의 코크스가 초기 냉각공정을 거칠 수 있도록 한다면 실제 균질한 냉각효과를 얻을 수 있을 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 코크스 냉각공정을 모사할 수 있는 모델을 제시하였고 이를 통한 코크스의 온도분포에 대한 계산된 결과를 도출하였다. 또한 실제 코크스 공장에서 측정된 실험값과 비교하여 모델에 대한 검증은 하였다. 본 모델을 통해 공극물질인 코크스내부의 온도분포와 변화를 확인할 수 있었고 코크스의 냉각유체의 유량에 따른 배출온도도 확인할 수 있었다. 실제 공극의 효과에 의해 코크스의 냉각속도는 상층부에서 더 크게 계산되었으며 이는 균질한 냉각공정을 위해 코크스 냉각공정 설계에 있어 반영될 수 있다. 코크스의 냉각의 정확한 온도분포 예측을 위해서는 다양한 조건에서의 코크스의 물성치와 공극의 세분화된 모델 및 이에 대한 유동 형태가 적용된 모델링이 필요하며 이를 통해 더욱 개선된 결과를 도출할 수 있으리라 사료된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Yang, K. H., Yang, W., and Choi, S. M., 2004, "Modeling of Coking Process in a Coke Oven," 2004 *Spring Conference Proceedings of KSME*, pp. 1184~1189.
- (2) Errera, M. R., and Milanez, L. F., 2000, "Thermodynamic Analysis of a Coke Dry Quenching Unit," *Energy Conversion & Management*, Vol. 41, No. 2, pp. 109~127.
- (3) Kim, Y., Lee, Y., and Jeong, J., 2007, "A study on Quasi-static Compression of Foam-filled Circular Tubes," *Spring Conference Proceedings of KSME*, pp. 213~219.
- (4) Figini-Albisetti, A., Velasco, L. F., Parra, J. B., and Ania, C. O., 2010, "Effect of Outgassing Temperature on the Performance of Porous Materials," *Applied Surface Science*, Vol. 256, No. 17, pp. 5182~5186.
- (5) Amahmid, A., Hasnaoui M., Mamou, M., and Vasseur, P., 1999, "Double-diffusive Parallel Flow Induced in a Horizontal Brinkman Porous Layer Subjected to Constant Heat and Mass Fluxes: Analytical and Numerical Studies," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 5, pp. 409~421.
- (6) Nakayama, A., Koyama, H., and Kuwahara, F., 1988, "An Analysis on Forced Convection in a Channel Filled with a Brinkman-Darcy Porous Medium: Exact and Approximate solutions," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 23, No. 5, pp. 291~295.
- (7) Nield, D. A., 1991, "The Limitations of the Brinkman-forchheimer Equation in Modeling Flow in a Saturated Porous Medium and at an Interface," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 12, No. 3, pp. 269~272.
- (8) Chung, M., 1995, "A Study on Heat and Mass Transfer in Porous Media," *Solar Energy*, Vol. 15, No. 1, pp. 39~51.
- (9) Seo, S. J. and Park, C. K., 1998, "The Natural Convection in Horizontal Porous Layer with Vertical or Horizontal Throughflow," *Journal of Korean Computational Fluid Dynamics*, Vol. 3, No. 1, pp. 73~81.
- (10) Incropera, F. D., and DeWitt, D. P., 2002, *Introductions of Heat and Mass Transfer, 5th ed.*, p. 401.
- (11) POSCO Engineering & Construction, 2011, *Operation Manual*, POSCO Inc.