

기체 고체 반응기 모형의 응용: 환원로 반응 모형 고찰

엄민제* · 최상민**

The Application of Gas-Solid Reactor Model: Consideration of Reduction reaction model

Minje Eum*, Sangmin Choi**

ABSTRACT

The gas-solid reactor, such as rotary kiln, sintering bed, incinerator and CFB boiler, is the one of most widely used industrial reactors for contacting gases and solids. the gas-solid reactor are mainly used for drying, calcining and reducing solid materials. In the gas-solid reactor, heat is supplied to the outside of the wall or inside of the reactor. The heat transfer in gas-solid reactor encompasses all the modes of transport mechanisms, that is, conduction, convection and radiation. The chemical reactions occurring in the bed are driven by energy supplied by the heat transfer. This paper deal with the effect of heat transfer and chemical reaction in the gas-solid reactor.

Key Words : Gas-Solid Reactor, Heat Transfer, Chemical Reaction

반응기는 종류와 목적에 맞게 많은 연구가 진행되었다. 종류는 크게 연속 흐름 반응기, 배치 반응기로 나눌 수 있으며, 목적과 용도에 따라 설계 방법과 운전 방법이 다르게 나타나고 있다. 기체 고체 연속 흐름 반응기는 베드층의 모양에 따라 고정층 베드(fixed bed), 이동식 베드(moving bed), 복잡한 움직임을 보이는 베드(complex bed motion)로 나눌 수 있다. 고체층에 주입 되는 가스는 병류형(co-current flow)과 향류식(countercurrent flow), 십자류(cross-current flow)가 있다. 반응기의 종류와 목적에 따라 고체층의 모양은 다르지만, 기체상과 고체상이 서로 열을 전달 하고, 화학 반응에 의해 물질을 전달을 하게 되는 기작은 매우 유사하다. 또한 기체-고체 반응기는 사용 목적과 용도에 따라 다른 형상과 운전 방법을 사용하고 있으나, 설계 및 해석 절차는 비슷하다. 우선적으로 주입 물질에 대한 분석을 실시 하게 되며, 반응기를 완전 혼합된 0차원 반응기로 가정하고 열 및 물질 정산을 수행한다. 열 및 물질 정산을 통해 반응기에 들어가고 나가는 물질과 에너지의 양 및 상태를 알 수 있다. 열 및 물질 정산의 결과를 토대로 반응기의 종류 및 크기를 결정할 수 있으며, 1차원 모델이나 3차원 전산 해석을 통해 비 정상상태에서의

운전 조건에서의 해석이 수행된다.[1-4].

기체 고체 반응기는 벽, 가스상, 고체상에서 서로 대류 및 복사 열전달이 일어나게 되고, 열전달 현상에 의해 베드에 전달된 열량은 입자는 승온 및 건조, 소성, 환원 반응을 일으키게 된다.



Fig. 1 0-Dimensional Steady Model

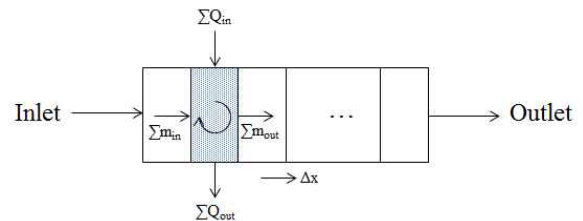


Fig. 2 0-Dimensional Steady Model

기체 고체 반응기에서의 화학 반응은 반응 속도 상수와 평형 상수에 의해 고려되며, 고체층에서 발생하거나, 열전달에 의해 고체상으로 전달된 열량은 손실된 열량을 제외하고 화학 반응과 고체 승온에 사용하게 된다.

베드층에 전달된 열량에서 반응에 소비 되는 열량과 고체상의 온도 상승에 소비되는 열량 분배는 반응 속도와 평형상수에 의해 결정된다. 검사

* 한국과학기술원 기계공학과
 † E-mail : smchoi@kaist.ac.kr
 Tel : (042)350-3070

체적에 일정한 열량이 공급되었을 때 반응의 크기가 클 경우 고체상의 승온에 소비되는 열량이 줄어들며, 반응의 크기가 작을 경우는 고체상의 승온에 소비되는 열량이 커지게 된다.

$$\frac{\partial(1-\epsilon)h_s}{\partial t} + \frac{\partial v_s h_s}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left((1-\epsilon)k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) + h_{conv} A_s (T_g - T_s) + q_{rad} + q_{combustion} + q_{reaction} + q_{loss} \quad (1)$$

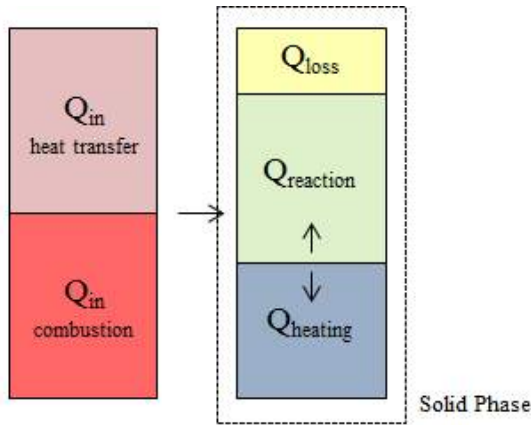


Fig. 3 Interrelation between Heat Transfer and Reaction

반응기를 길이 방향으로 n개의 셀(infinite small discrete element)로 나누고 각각의 셀은 균일한(homogeneous) 검사체적(control volume)으로 가정하며, 가스상과 고체상으로 나뉘 열물질 정산을 수행하게 된다. 고체상과 가스상은 화학 반응에 의해 물질을 교환하게 되며, 화학 반응은 평형상수와 반응 속도 상수로 고려할 수 있다.

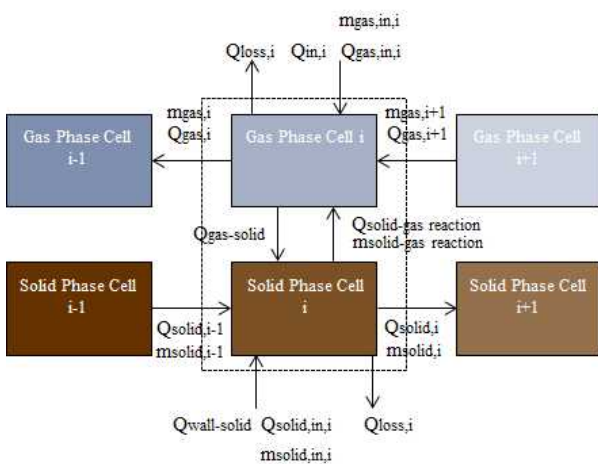


Fig. 4 1-Dimensional Cell Model

화학 반응에 의해 생성되거나 소비되는 열량을 두가지 모델을 이용해 모델링을 실시하였다.

열 분배 모델(HDM, Heat Distribution Model)은 화학 반응을 평형 상수에 의해 적용하였다. 고체상을 활성층(active layer)과 비활성층(stagnant layer) 두 개로 나뉘었으며, 활성층에서 화학 반응이 일어나는 모델이다. 활성층은 킬른 내벽을 따라 베드 상단으로 이동한 고체가 기울어진 베드 표면을 따라 내려오며, 기체 환원제와의 접촉에 의해 화학반응이 활발히 일어나는 층이다. 비활성층 베드 표면을 따라 내려온 고체가 킬른 내벽을 따라 다시 상승하는 부분이며, 킬른에 주입된 고체는 활성층과 비활성층을 순환하며 혼합이 이뤄진다.

열 분배 모델에서 기체-고체 반응기의 화학 반응을 평형 상수로 적용하기 위한 조건에는 매우 작은 입자의 크기와 매우 빠른 반응 속도가 있다. 활성층에서 고체상은 매우 작은 입자의 크기와 매우 빠른 반응 속도로 인해 평형 상태에 이르게 된다. 평형 상수는 각 셀에서의 환원제의 농도와 온도에 의해 반응 정도가 결정되며, 리프터(lifter)가 설치된 로터리 킬른의 경우 고체상의 표면과 기체상에서 반응이 일어나게 된다.

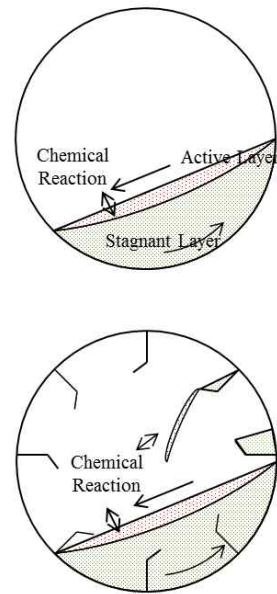


Fig. 5 Concept of Heat Distribution Model

반응 속도 상수 모델(RRM, Reaction Rate Model)은 화학 반응을 반응 속도 상수를 고려해 적용하였으며, 반응 속도 상수 모델에 적용한 대표 온도는 고체상의 평균 온도로, 본 연구에서 고려한 모델에서 고체상은 충분한 혼합에 의해 각 셀에서의 온도가 일정하다. 고체상에서 반응에 의해 발생한 기체는 기체상으로 전달된다. 각 셀의 온도에 의해 결정된 반응 속도와 각 셀에서의 체류시간에 의해 반응의 정도가 결정된다.

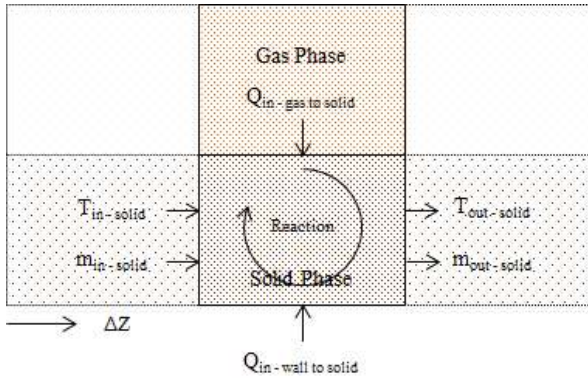


Fig. 6 Concept of Heat Distribution Model

두 개의 모델에 대한 결과를 비교하기 위해 운전 조건을 다음과 같이 설정하였으며, 화학 반응으로는 철산화물과 수소의 반응을 고려하였다. 결과로는 고체상과 기체상의 온도, 환원정도를 살펴보았다[5].

Table 1 Operating Condition

외부 가열 온도	650~900℃
회전 속도	1rpm
고체 성분	Fe ₂ O ₃ +SiO ₂
고체 충전률	10%
환원제	H ₂
기체 주입량	580Nm ³ /hr-Ton
킬른 내부 형상	Lifter 설치

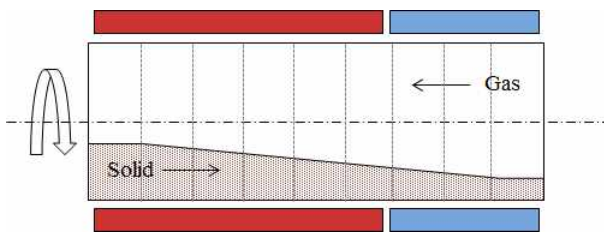


Fig. 7 Concept of indirect heated rotary kiln

고체상의 온도 분포를 살펴보면 고체상의 가열 구간에서는 온도 분포 차이가 작지만, 반응이 활발히 일어나는 구간에서 두 모델의 온도 분포가 차이난다. 평형상수를 고려한 모델에서는 각 셀에서 평형 조건에 의해 고체상의 성상이 결정되어 초기에 빠른 반응을 보였지만, 반응 속도 상수 모델에서는 고온으로 갈수록 반응 속도가 빨라져 킬른 후반에서 빠른 반응이 일어나게 되어 온도 분포의 차이를 보였다. 기체상의 온도 분포를 살펴보면 고체상의 온도 분포에 비해 큰 차이는 나타나지 않고 비슷한 경향을 보였다.

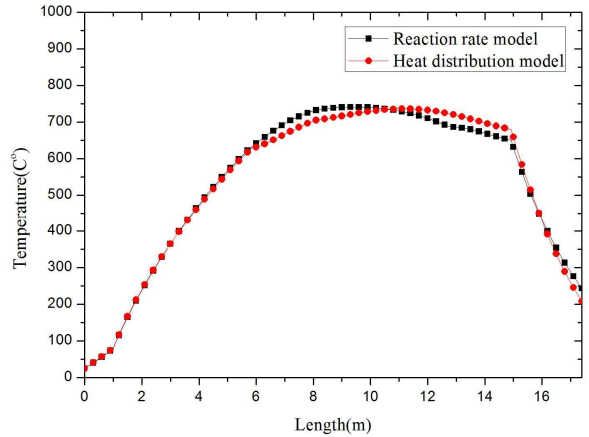


Fig. 8 Solid Phase Temperature Distribution(HDM, RRM)

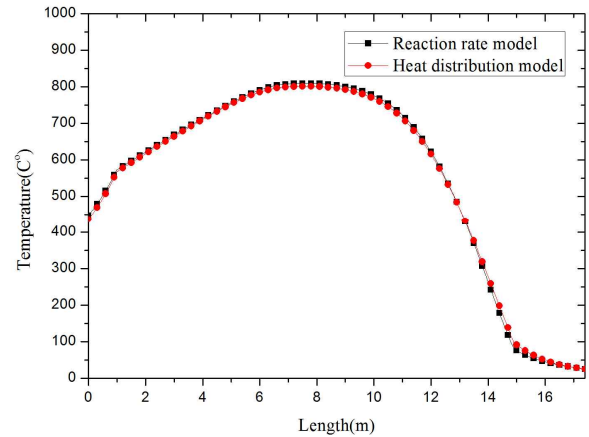


Fig. 9 Gas Phase Temperature Distribution(HDM, RRM)

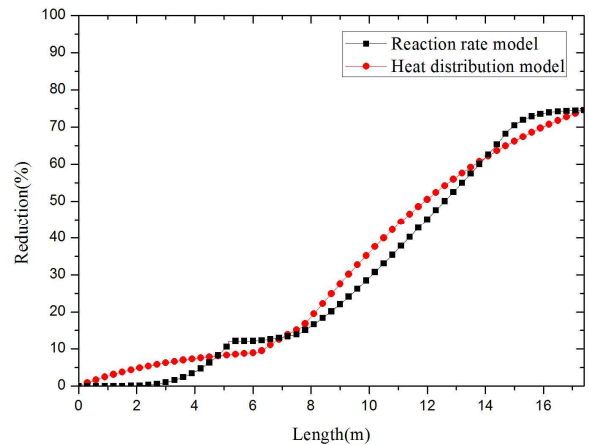


Fig. 10 Reduction Rate(HDM, RRM)

실제 운전은 최적화된 조건에서 운전 되지만, 생산량의 변화, 공급되는 원료의 성분비 변화 등의 원인으로 운전 성능의 차이를 가져오는 경우가 있어, 여러 운전 조건에 따른 해석이 필요하다

다. 또한 실제 플랜트에서의 실험 결과와 해석 결과와의 비교를 통해 모델의 타당성을 확보할 수 있다.

반응기 설계 및 해석을 위해 물리적, 화학적 현상을 포함하는 반응기의 수학적 모델을 정립하였으며, 반응기 모델 개발을 통해 열전달 현상 및 화학 반응의 영향을 확인해 보았다. 이를 통해 로터리 킬른에서 열전달 현상과 화학 반응의 영향을 이해할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국 과학 기술원 가치제조 기계사업단(BK 21)의 지원을 받았습니다.

참고 문헌

- [1] A.A. Boateng, "Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes", Elsevier Inc, 2008.
- [2] S.H. Tscheng, A.P. Watkinson, "Convection Heat Transfer in a Rotary Kiln", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 57, 1979, pp. 433-443.
- [3] K.S. Mujudar, V.V. Ranade, "Simulation of Rotary Cement Kilns using a One Dimensional Model", Chemical Engineering Research and Design, Vol. 84(A3), 2006, pp.165-177
- [4] E. Donskoi, D.L.S. McElwain "Estimation and Modeling of Parameters for Direct Reduction in Iron Ore/Coal Composites: Part. Physical Parameters", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 34B, 2003, pp.93-102
- [5] W.K. Jozwiak, E. Kaczmarek, T.P. Maniecki, W. Ignaczak, W. Maniukiewicz, "Reduction Behavior of Iron Oxides in Hydrogen and Carbon Monoxide Atmospheres" Applied Catalysis A, Vol 326, 2007, pp17-27