

탄재를 포함한 산화철 펠릿 소성 공정 수치 모델의 입자 반응 모델 적용

안형준* · 최상민**

A discussion on the application of particle reaction model for iron ore pellet induration process modeling

Hyungjun Ahn* and Sangmin Choi**

ABSTRACT

The application of particle reaction model in the packed bed process modeling is discussed for iron ore pellet induration process. Combustion of coke breeze in the pellet is estimated by using shrinking unreacted-core model and grain model in which the progress of chemical reaction is described in different concepts. Under the identical inlet gas and solid conditions, the calculation using shrinking core model showed deviated results in terms of temperature profile and conversion fraction, which may imply the significance of selecting proper particle reaction model in consideration of particle characteristics and process operation conditions.

Key Words : Packed bed modeling, Iron ore pellet induration proces, Particle reaction model, Shrinking core model, Grain model

고정층 베드는 다량의 고체 입자 처리를 위한 산업로로서 건조로, 소각로, 소결로, 샤프트로, 고로 등에 다양한 형태로 적용되고 있다. 이들 산업 공정과 관련하여 운전환경 및 대규모 공정 특성 상 수치 모델링을 통한 연구 방법이 주로 진행되고 있다. 대부분의 공정 모델의 경우 베드 구조의 단순화 및 이산화철을 포함한 수치적 기법에 따른 질량, 에너지, 화학종 보존 등 고려되는 지배방정식의 반복 계산을 통해 베드 온도 등 주요 공정 인자를 확인하게 된다. 베드 구조의 단순화 가정은 전체 입자층을 균일 물성치의 다공질 매체의 연속체로 가정함으로써, 적층된 모든 입자를 고려하는 복잡성을 피하고 주변 가스 조건과 고체층간 열 및 물질 전달 등 상호작용을 보다 단순하게 고려할 수 있게 한다.

대상 공정이 물리적, 화학적 입자 반응을 포함하는 경우 기본 지배방정식의 풀이 외에 입자 반응 모델이 추가되어야 한다. 입자 반응 모델과 관련하여 입자 크기, 입자 공극률, 조성, 입자의 구조, 즉 균일 성분의 단일 입자인지 미세 알갱이들의 괴성화를 통해 생성된 입자인지, 또한 대상 화학 반응의 특성, 입자 주변 분위기 가스의 온도, 조성, 유량 등 여러 인자들이 복합적으로

고려되어야 한다. 따라서 적절한 공정 모델링 결과를 위해서는 베드 내 입자의 반응 및 표현에 대한 이해 및 적절한 적용이 필수적이다. 일반적으로 입자 반응의 진행은 크게 보아 치밀한 입자 표면에서부터 반응 경계를 형성하며 내부로 진행되는 경우와 입자 전체 영역에 걸쳐 동시에 진행되는 두 가지 경우로 가정할 수 있다. 전자는 shrinking unreacted-core mode (SCM), 후자는 progressive conversion model (PCM)에 해당하며, SCM의 경우 석탄 등 고체 연료의 연소를 포함한 많은 고체 입자 반응에 대하여 유효하게 적용되고 있다.[1]

본 연구에서는 탄재를 포함한 산화철 펠릿 소성 공정 모델링에서 고체 연료의 연소 반응 모사를 위한 입자 반응 모델의 적용에 대한 고찰이 이루어졌다. 일반적인 산화철 펠릿은 미세 산화철 입자를 필요에 따라 코크스 등 탄재 및 석회질, 기타 물질 등과 함께 구형으로 괴성화하여 만들어지며, 대략 30% 수준의 공극률을 갖는 입자로 성형된다. Fig. 1에 개략적인 구조 및 펠릿 입자 특성을 요약하였다.

Fig. 1 Schematic diagram of conventional iron ore pellets.

펠릿 소성 공정에 대한 비정상 1차원 베드 모델을 바탕으로 Table 1과 같은 동일한 공급가스 조건에서 펠릿 내 코크스 입자의 연소 진행을 PCM에 해당하는 grain model 과 SCM 을 적용하여 살펴보았다. 위 모델들은 화학반응과 입자 표면 및 내부에서의 확산을 율속인자로 하고 있다는 점은 공통적이나, 구체적인 반응 진행 상황은 상이하게 묘사된다. 특히 미세 입자로 이루어진 다공질의 펠릿에서의 반응은 grain model에서 가정하는 것과 같이 조건에 따라 펠릿 내에서 좁은 반응 표면을 형성하는 대신 확산된 영역에서 동시에 반응이 진행될 수도 있다. 또한 펠릿 내에서 실제 반응은 각 미세 입자 표면에서 진행되므로 반응 가스의 펠릿 표면 및 펠릿 내부 기공 확산, 각 미세입자 내 확산의 영향이 복합적으로 고려될 필요가 있다.[3,4] 이와 같은 상황은 SCM 을 통한 펠릿 반응 진행에 대한 표현이 적절하지 못할 수 있음을 예상해볼 수 있게 한다.

Table 1 Inlet gas conditions [2]

stage	temp. (°C)	time (min.)	dP (mbar)
1	288	5.9	45.0
2	265	3.3	40.0
3	746	2.0	50.0
4	1050	2.0	50.0
5	1175	1.3	50.0
6	1280	3.9	50.0
7	1200	1.3	50.0
8	1000	2.6	50.0
9	950	2.6	50.0
10	60	13.1	65.0

Fig. 2는 전체 베드 높이 40cm 중 베드 표면 아래 15cm (pt#2) 와 27cm (pt#3) 지점에서의 온도 분포이다. 점으로 표시된 기존 연구 자료에서의 결과 및 실선의 grain model 결과 (model 1) 와 비교해볼 때 SCM (model 2) 의 경우 공정 초반 비정상적인 급격한 베드 온도 상승을 보인다. 이는 SCM 적용에 있어 펠릿 전체가 아닌 미분 크기의 개별 탄재 입자 조건에 대하여 계산이 이루어지므로 과도한 탄재 연소율이 계산되는 것으로 생각할 수 있다. Fig. 3은 고체 반응물의 변환률로 탄재 연소 반응의 경우 탄재 소모율로 고려할 수 있으며, 그림에서 볼 수 있듯이 SCM의 경우 베드 높이 별 각 지점에서 반응 시작 후 매우 짧은 시간에 전체 반응물의 반응이 완료되는 결과를 가져오는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 다공성 펠릿 입자에 대한 반응 모델을 탄재 연소 반응을 대상으로 살펴보았으나 carbon solution loss, 수성가스 반응 등 탄재 관련 반응 외에 금속산화물의 산화-환원 공정 등에 대하여도 위와 같은 고려사항을 통한 적절한 입자 반응 모델의 적용이 이루어져야 한다.

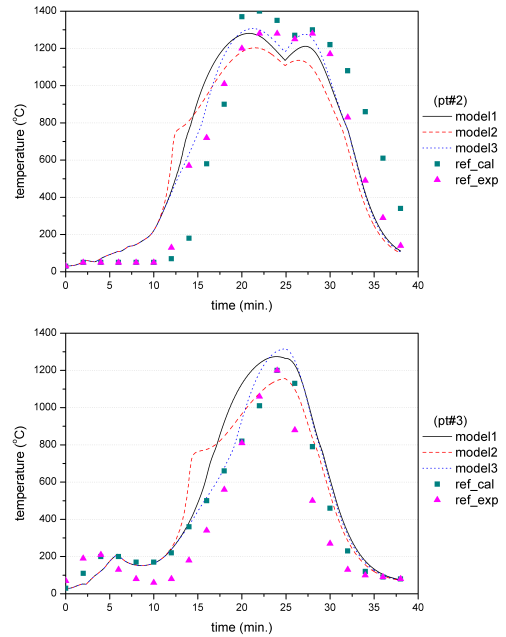


Fig. 2 Bed temperature profile at different levels.

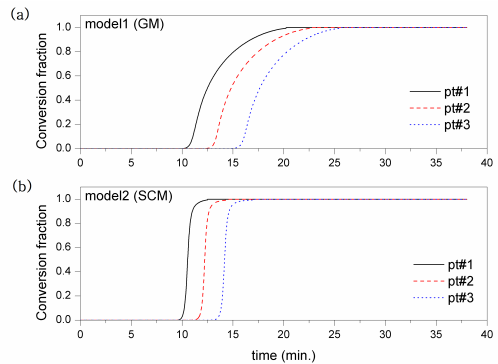


Fig. 3 Conversion fraction of coke for (a) grain model and (b) shrinking core model.

참고 문헌

[1] O. Levenspiel, "Chemical Reaction Engineering, 3rd edition", John Wiley & Sons, 1999.
 [2] K. Kucukada, J. Thibault, D. Hodouin, G. Paquet, S. Caron, "Modeling of a Pilot Scale Iron Ore Pellet Induration Furnace", Can. Metall. Quart., Vol. 33, 1994, pp. 1-12.
 [3] J. Szekely, J.W. Evans, H.Y. Sohn, "Gas-Solid Reactions", Academic Press, 1976.
 [4] M.L. Hobbs, P.T. Radulovic, L.D. Smoot, "Combustion and Gasification of Coals in Fixed-Beds", Prog. Energy Combust. Sci, Vol. 19, 1993, pp. 505-586.