

철광석 펠릿 소성 공정 모형의 입자 반응 모델 적용에 관한 연구

안형준* · 최상민**

A Study on the Particle Reaction Models for Iron Ore Pellet Induration Process Modeling

Hyungjun Ahn*, Sangmin Choi**

ABSTRACT

Combustion of coke grains in a pellet used to be modeled using the shrinking core model in the previous indurator simulations. This leads to the discussions about its propriety due to the fundamental assumptions of the model inconsistent with the particle characteristics. The current study presents the grain model as an improvement, and the differently used reaction models are compared. In addition, the simulations assuming changed particle conditions are conducted to display the effects of using the grain model.

Key Words : Pellet indurator, Straight-grate, Grain model, Shrinking core model

펠레타이징(Pelletizing)은 선철 생산의 대부분을 차지하는 고로의 장입 원료의 전처리를 위한 공정이다. 현재 대부분의 원료는 소결 공정을 통해 처리되고 있다. 그러나 소결기에는 일정 크기 이상의 원료가 사용되며 미분의 입자는 적용이 제한된다. 이 경우 수십-수백 μm 크기의 미분 원료(Grain)를 약 9-16 mm 크기의 구형 펠릿(Pellet)으로 성형 후, 소성로에서 건조 및 가열을 통한 입자 강도 증가를 달성하는 펠레타이징을 통해 생산성을 높일 수 있다. 소성 공정은 온도 이력 조절을 통해 펠릿의 품질을 결정하는 중요한 단계이다. 소성기는 종류에 따라 straight-grate 방식 또는 grate-kiln 방식으로 분류된다. 여기에서는 전자에 대한 수치 모델링을 바탕으로 펠릿의 반응 모델 적용에 대하여 설명한다.

대부분의 이전 소성 공정 모델들의 입자 반응은 펠릿 크기 범위에서 유사하게 처리되었다. 예를 들어, 펠릿 내 코크스 미립의 연소는 shrinking core model을 이용하여 표현되는 것을 많은 경우 찾아볼 수 있다. 그러나 이러한 입자 반응 모델의 적용 조건이나 타당성 등에 대한 검토는 기존 소성 공정 모델 연구에서는 거의 포함되지 않고 있다.

이와 관련하여 기존 소성 모델링 연구들의 경

우 shrinking core model을 이용하여 코크스 연소를 표현함에 있어 몇 가지 토의가 이루어질 수 있다. 첫째, shrinking core model은 비 다공성 입자를 전제로 하는 반면 펠릿은 성분 입자들이 괴성화 된 다공성 입자로 고려된다. 다공성 입자의 반응 진행 과정은 확산 또는 화학 반응에 좌우되는지에 따라 다르게 나타난다. 따라서 Shrinking core model의 경우 펠릿 전체 영역에서 동일하게 진행되는 다공성 입자의 반응 양상을 표현하는데 제한이 될 수 있다. 둘째, 몇몇 이전 연구들은 입자 조건 등에 대한 구체적 정보가 고려되지 않는 경우가 있다. 코크스 연소의 경우 실제 연소 반응이 일어나는 곳은 펠릿 내 흩어져 있는 코크스 미분들이다. 그러나 shrinking core model을 적용함에 따라 이러한 미분들의 크기와 펠릿의 다공도 및 pore structure등 반응 진행과 연관된 고려사항들이 종종 생략되어 있다. 마지막으로, 같은 shrinking core model을 적용한다고 설명하는 기존 연구들마다 주요 인자, 즉 반응을 식에 적용되는 특성 입자 크기 및 확산 저항 등을 각각 다르게 적용하고 있다.[1-3]

물론, 일반적인 펠레타이징 및 소성 조건을 대상으로 각각 shrinking core model을 적용한 기존 연구들은 적절한 공정 모사 결과를 보이고 있는 것으로 보인다. 펠릿 내 코크스 함량은 1-2 wt.-% 정도이고 베드 외부에서 공급되는 고온 가스에 의한 열전달이 대부분이므로 코크스 연소 모델링의 영향은 상대적으로 적게 반영되는 것으로 생각해볼 수 있다. 이는 또한 모델링의 복잡

* 한국과학기술원 기계공학과

** 연락처, smchoi@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3030 FAX : (042)-350-3210

도와 효율성간의 trade-off로 이해할 수 있다. 그러나 이러한 입자 반응 표현이 공정 조건 변경 시에도 적절한 결과를 가져올 것인지는 알 수 없다. 또는 shrinking core model의 경우 반응 환경이 변하는 다공성 펠릿의 표현이 제한되므로 결과적으로 반응률이 과다 또는 과소 계산될 가능성도 있다.

본 연구에서는 대신 grain model을 적용하여 코크스 연소를 표현하는 소성 공정 모델을 구성하였다. Grain model은 하나의 다공성 펠릿을 성분 미립 입자들의 집합으로 보고 실제 화학 반응은 각 성분 입자들에서 진행되는 것으로 고려한다. 전체 반응은 화학반응, 펠릿 표면 확산, 펠릿 내 pore에서의 확산, 성분 미립 입자 표면 확산 등의 종합적인 영향으로 진행되는 것으로 고려한다.[4] 따라서 grain model을 적용하는 경우 다공성 또는 비 다공성 입자에 대하여 반응이 화학적으로 또는 확산에 의하여 좌우되는 환경 모두에 대한 표현이 가능하다. shrinking core model과 grain model의 반응률 식은 각각 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_c = \frac{\nu M_c A_p C_g}{\frac{r_o^2}{r_c^2 k_r} + \frac{1}{k_m} + \frac{r_o(r_o - r_c)}{D_{eff} r_c}} \quad (1)$$

$$R_c = \frac{\nu M_c k_{r,c} C_{O_2}^b (1 - \epsilon_b) (1 - \epsilon_p) / r_{g,0}}{\frac{1}{3(1-X)^{2/3}} + \left(\frac{k_{r,c} r_{g,0}}{6D_g} + \frac{r_{p,0}^2 (1 - \epsilon_p) k_{r,c}}{6D_{eff} r_{g,0}} \right) \left(\frac{2}{(1-X)^{1/3}} - 2 \right) + \frac{k_{r,c} r_{p,0}^2 (1 - \epsilon_p)}{3D_m r_{g,0} N_{sh}}} \quad (2)$$

Grain model을 적용한 소성 공정 모델링의 타당성 확인을 위하여 베드 온도 분포를 Fig. 1과 같이 기존 연구의 측정 및 계산 결과와 비교하였다.[5] 공정 모델을 바탕으로 본 연구에서의 grain model 과 이전 연구들을 참고한 3가지 다른 shrinking core model의 경우에 대한 적용 결과를 비교하였다. 또한 소성 공정 모델을 위한 grain model 활용의 유용성을 보이기 위하여 펠릿 및 미립 입자 등의 조건 변화에 대한 추가적인 계산이 이루어졌다.

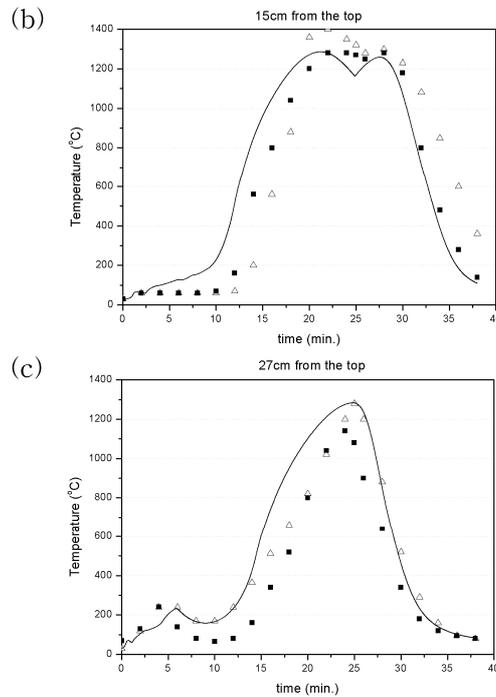
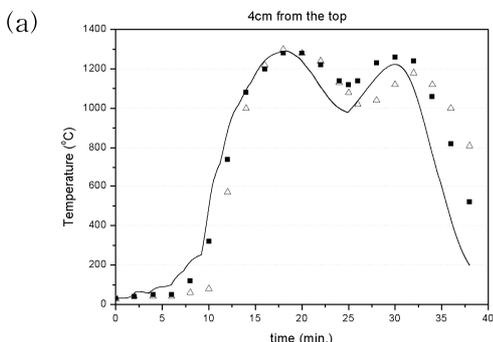


Fig. 1 Bed temperature profiles at different height of the bed. (a) 15 cm (b) 4cm (c) 27 cm from the bed top. (■)experimental, △simulation data from the reference, — the current simulation data)

참고 문헌

- [1] A.A. Hamidi, H. Payab, "Mathematical Model for Energy Saving in Induration of Iron Ore Pellets Containing Solid Fuel", IJE Trans., Vol. 16, 2003, pp. 265-278
- [2] S.K. Sadrnezhad, A. Ferdowsi, H. Payab, "Mathematical Model for a Straight Grate Iron Ore Pellet Induration Process of Industrial Scale", Comp. Mat. Sci., Vol. 44, 2008, pp. 296-302
- [3] S. Majumder, P.V. Natekar, V. Runkana, "Virtual Indurator: A Tool for Simulation of Induration of Wet Iron Ore Pellets on a Moving Grate", Comp. Chem. Eng., Vol. 33, 2009, pp. 1141-1152
- [4] J. Szekely, J.W. Evans, H.Y. Sohn, "Gas-Solid Reactions", Academic Press, 1976
- [5] K. Kucukada, J. Thibault, D. Hodouin, G. Paquet, S. Caron, "Modelling of a Pilot Scale Iron Ore Pellet Induration Furnace", Can. Metall. Quart., Vol. 33, 1994, pp. 1-12