

고체 입자 베드 내 반응 환경 변화를 위한 모델링 접근 방법

안형준* · 최상민**

Modeling Approach of Solid Particle Bed for the Combustion Environment Control

Hyungjun Ahn*, Sangmin Choi**

ABSTRACT

Various solid particle materials are treated in the industrial processes including fixed-beds or moving grate beds, and modeling approaches have been widely applied to the processes to predict and evaluate their performance. For this study, the modeling approach was applied to iron ore sintering process with various improvement measures. Based on the previous modeling approach, the changes and effects of the improvement measures were discussed at the point of controlling the combustion environment in the bed.

Key Words : Solid bed modeling, Iron ore sintering process, Combustion control.

다양한 산업로에서 적용되고 있는 고체 베드 내에서는 탄재의 연소를 포함하여 고체-기체, 고체-고체 간 반응 및 원료 입자들의 물리, 화학적 변화가 동시에 진행된다. 많은 경우 고체 베드 공정들은 고온을 동반하는 대규모 공정으로 직접적인 설계, 운전, 성능 평가에 제약이 다르므로 복잡한 열 및 물질 전달 현상에 대해 모델링을 활용한 연구가 활발히 진행되어왔다. 덧붙여, 환경규제 및 공정 효율 개선 등의 필요성 증가에 따라 기존 공정을 바탕으로 다양한 개선안들이 제안 및 적용되고 있는 바, 투입원료, 운전조건 및 공정구성 등의 변화에 따른 영향을 살펴봄에 있어 모델링을 통한 접근 방법의 효용성이 더욱 높아질 수 있게 된다. 여기에서는 고정층 및 이동화격자 식 베드에 대한 주요 고려 사항을 바탕으로, 자연 상태의 산화철 입자로부터 용융 상태의 환원철을 생산하기 위한 제강공정 중 단위공정의 하나인 소결공정에 대한 베드 모델링을 살펴보았다. 기존 연구들에서 제시된 공정 개선안 관련 결과 등을 고체 원료 및 가스 조건 변화를 통한 베드 내 연소 환경 제어의 관점에서 살펴보고, 베드 연소 모델링의 적용 범위 확장 사례로써의 의의를 확인하고자 하였다.[1-3]

고정층 및 이동화격자 식 베드의 경우 다음과

같은 가정을 통하여 1차원 다공층 매질로 단순화할 수 있다. 베드 내 입자의 이동이 매우 느리므로 고체상은 연속체로 가정하며, 가스상 유동 방향 기준 반경방향 또는 폭 방향의 고체상 물성치 변화는 없는 것으로 가정한다. 따라서 고정층의 경우 축 방향으로의 변화만 고려하며, 이동화격자의 경우 이러한 1차원 비정상 모델을 길이방향 또는 시간 진행에 따라 나열하는 것으로 베드 높이 및 길이 방향으로의 2차원 정상상태를 표현할 수 있다(Fig. 1). 또한, 베드 내 입자는 균일 조성, 균일 분포하고 국부적으로 등온상태 조건을 이루는 것으로(또는 입자 내 물성치 구배 없음) 가정하며, 가스상은 이상기체로 고려한다.[4]

모델 상에서는 계산의 정확도를 위하여 전체 베드 영역을 적정 크기의 미소영역으로 나누어 고려한다. 각 단위영역마다 열 및 물질의 출입이 계산되며, 이러한 단위영역의 연속을 통하여 전체 베드에서의 물성치 변화를 확인하게 된다. 일반적으로 질량, 에너지, 화학종 보존식이 고려되며(Eq. 1) 필요에 따라 가스상의 운동량 보존식 또는 베드 내 압력강하 관계식이 추가된다(Eq. 2). 또한 탄재의 연소(Eq. 3 [4])와 같이 베드 내 물리적, 화학적 반응에 대한 관계식을 통해 반응에 의한 열 및 물질의 변화를 반영하게 된다. 고체 입자를 단일상이 아닌 복수의 상으로 고려하는 경우 식 1에서와 같이 각 고체상 별 체적분율(f_v)을 적용하여 개별적으로 고려할 수도 있다. Fig. 1에 베드 dimension의 단순화 및 단위영역 내 열 및 물질 전달에 대한 개략도를 나타내고 있다.

* 한국과학기술원 기계공학과

** 연락처, smchoi@kaist.ac.kr

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

모델링의 직접적인 결과 항목은 고체 및 기체상의 온도, 조성, 유량, 열량, 진행 시간 등이 될 수 있다. 그러나 많은 경우 공정의 성능 평가를 위한 정보로서는 제한적이므로 기본 변수들을 바탕으로 정량화인자를 정의하여 성능 변화를 살펴보는 것이 필요하게 된다.

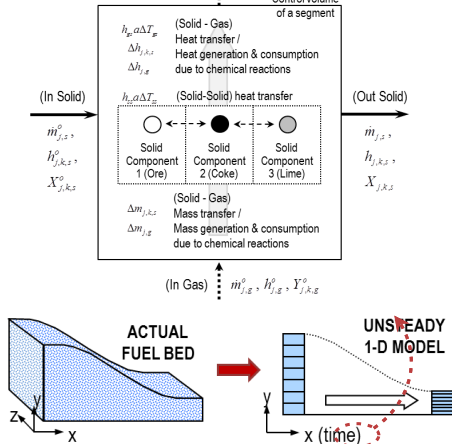


Fig. 1 Schematic diagram of bed simplification with heat and mass transfer in a unit cell.

$$\frac{\partial(\rho f_v \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \phi \vec{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_{eff} \nabla \phi) + S_\phi \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2 V}{d_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho_g(1-\varepsilon)V^2}{d_p \varepsilon^3} \quad (2)$$

$$R_{c,i} = \frac{A_p v_s W_{char} C_{g,i}}{1/(k_r \zeta) + 1/k_m + 1/k_{eff}} \quad (3)$$

여기에서 다루고 있는 산화철 소결공정은 길이 100m 이상, 폭 4m, 높이 0.5~0.8m 크기의 이동화격자 식으로 2차원 정상상태 또는 1차원 비정상 모델로 단순화할 수 있다. 고체원료로 산화철, 코크스, 석회석 및 수분을 포함, 의사입자(pseudo-particle)을 형성하여 공급하고 베드 상부로부터 하부로 가스가 통과한다. 공급된 원료입자는 약 2m/min의 속도로 약 1시간 정도의 운전시간에 걸쳐 베드 상에서 이송된다. 이때 내부에서 코크스의 연소가 이루어지며, 발생하는 고온에 의한 부분 용융을 통해 입자강도를 증가시킨다.

소결베드는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 구조상 베드 상, 하부 및 원료 투입, 배출구 방향의 연소 진행 차이에 따른 열량 분포 불균형이 존재한다. 따라서 코크스의 충분한 연소 환경을 확보하여 베드 내 각 위치가 적절한 온도 이력을 거치도록 함과 동시에 베드 내 반응 과정의 지연을 최소화하여 단위 시간당 생산량이 유지 또는 향상되는 것을 적절한 공정 구성 및 운전 조건으로 하며,

그 결과 단위 생산량 당 가능한 많은 산화철 입자가 고로에서 요구되는 크기 및 강도를 갖도록 하는 것을 생산 품질로써 관리한다.

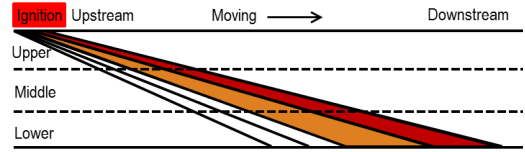


Fig. 3 Progress of combustion in the sinter bed.

기본 소결공정의 품질 및 생산성 개선 또는 배출 가스 저감 등의 목적으로 여러 공정 개선 방안들이 제시되고 있다. 이러한 공정 수정안들은 베드 내 연소 환경의 제어 및 이에 대한 모델링의 관점에서 살펴볼 때 크게 고체 원료 특성 변화 또는 공급 가스 조건 변화에 의한 베드 내 반응 조절로 생각할 수 있다. 고체 원료 자체의 특성을 변화하는 것으로 Fig. 4(a)와 같이 베드 내 탄재를 코크스 대신 보다 저렴한 무연탄 등으로 교체하거나 의사입자 형성 시 탄재를 입자 표면에 집중시키는 방법 등이 검토될 수 있다[3]. 공급 가스의 조건의 경우, 배출 가스량 감소를 위해 일부 배가스를 재순환하여 다시 공급하거나, 베드 일부 구간의 연소 촉진을 위한 산소 혼합 공급[2], 베드 상, 하부간 열분포 개선을 위한 연료 가스 혼합 공급 등이 있다(Fig. 4(b)).

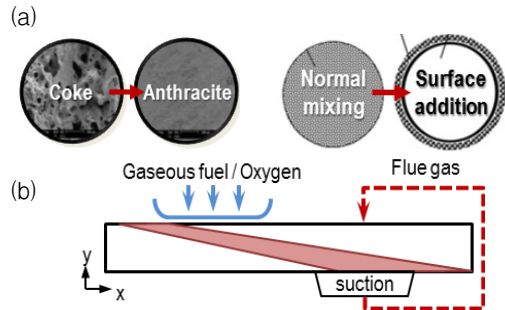


Fig. 4 Concepts of measures to control combustion in environment in the bed. (a) fuel substitution and coke surface addition (solid conditions), (b) FGR and additional gas injection (gas conditions)

탄재 연소 반응 관계식(Eq. 3)과 연관하여 살펴보면 고체 연료에 대한 방안들은 탄종 변화에 따른 kinetic parameter의 변화(k_r), 입자형성 방법에 따른 입자 표면 및 내부로의 산화제 가스 확산률(k_m , k_{eff})과 반응표면적(A_p) 등의 변화를 통해 모델링 상 반응 진행에 반영되며, 가스 조건 변화의 경우 공급가스의 온도, 유량, 조성 등의 변화에 따라 산화제의 농도(C_g) 및 고체, 기체상

의 반응온도 변화 등으로 반영된다. 실제 공정 적용 형태 상 여러 변화 방안들의 상이점이 있으나, 적절한 가점과 단순화를 바탕으로 온도, 조성 등 모델링 변수 및 추가적인 정량화인자들을 통하여 각각의 조건 변화에 따른 베드 내 영향을 서로 유사한 관점에서 살펴볼 수 있다.

탄재를 코크스에서 무연탄으로 교체하는 경우 낮은 발열량으로 베드 내 온도 및 반응진행의 저하를 확인할 수 있으며, 소결입자 표면에 탄재를 집중하는 경우 증가하는 반응률에 따른 공정 소요시간 단축 및 생산성 증가를 예상할 수 있다.

가스 조건 변화의 경우를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)의 배가스 재순환의 경우 재순환에 따른 공급가스 내 산소함량 감소에 의한 탄재 연소의 지연이 예상되므로 배가스 순환 위치 선정 시에 대한 고려가 필요함을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)는 베드 생산성 개선과 관련하여 부분적인 산소 추가주입의 경우에 해당하며, 산소 주입위치에서 탄재 연소율 증가에 따른 베드 내 연소 촉진 효과를 확인할 수 있다. Fig. 5(c)는 부분적인 추가 가스연료 주입의 경우로, 베드 상, 하부간 불균일한 열분포 개선을 목적으로 전체적인 탄재 함량 감소와 동시에 탄재 연소의 촉진이 필요한 베드 초기 구간에 LNG를 주입하는 상황을 나타내고 있다. 기본 케이스에 비하여 전체적인 고온 영역의 두께는 감소하면서 가스 주입 위치에서는 상대적으로 연소반응이 촉진되는 효과를 확인할 수 있다.

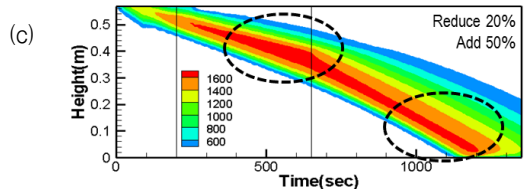


Fig. 5 Effects of gas conditions on the bed performance. (a) flue gas recirculation (presented with reference case), (b) oxygen enrichment, (c) gaseous fuel injection (LNG)

후 기

본 연구는 한국과학기술원 가치제조 기계사업단 (BK21)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] W. Yang, C. Ryu, S. Choi, E. Choi, D. Lee, W. Huh, "Modeling of combustion and heat transfer in an iron ore sintering bed with considerations of multiple solid phases", ISIJ Int., Vol. 44, 2004, pp. 492-499
- [2] H. Kang, S. Choi, W. Yang, B. Cho, "Influence of oxygen supply in an iron ore sintering process", ISIJ Int., Vol. 51, 2011, pp.1065-1071
- [3] P. Hou, S. Choi, E. Choi, H. Kang, "Improved Distribution of Fuel Particles in Iron Ore Sintering Process", Ironmaking and Steelmaking, Vol. 38, 2011, pp.379-385
- [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

