

불균일 입도를 가지는 기류식 고체

처리 시스템을 위한 해석모델

최동환* · 최상민*†

Analysis model for the pneumatic solid processing system in non-uniform particle size condition

Donghwan Choi*, Sangmin. Choi*†

ABSTRACT

In pneumatic reactor, hydrodynamic relation between gas and solid is important and particle size has a significant effect on this relation. In this reason, we analyzed drying and calcine process with a corrected model by considering the effect of the particle size distribution(PSD) with different seven particle groups by particle size.

Key Words : Pneumatic Reactor, Particle Size Distribution(PSD), Drying, Calcine.

광석으로부터 금속을 제련하는 과정에서 에너지 효율을 높이고 제련에 용이한 형태로 만들기 위해 건조(drying)나 소성(calcine)과 같은 광석의 예비처리(pre-treatment)가 필요하다.

이전 연구에서 에너지 효율이 높고 설치비용이 낮은 기류식 반응기(pneumatic reactor)를 채택한 광석 처리 시스템의 건조 및 소성반응에 대해 균일 입자 가정을 통한 분석을 진행하였다.[1]

기류식 반응기의 경우 입구에서 반응 목적물인 미분화 된 광석 입자와 승온을 위한 고온 연소 기체가 동일 방향으로 투입되어 동축류(Co-flow) 형태로 이동한다. 이때 기체-고체 간 유체역학적인 관계(hydro-dynamic relation)에 기반하여 상호작용이 발생하는데 입자크기는 이런 상호작용에 상당한 영향을 미치기 때문에 물질 및 에너지 전달현상을 지배하는 주요 인자임을 알 수 있다. 예를 들어 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 체적 당 표면적은 단순 기하 관계에 따라 입자 직경(d_p)에 반비례하며 입자의 자유종말속도(free fall velocity)로 가정 할 수 있는 상대속도(V_r)는 입자 직경의 제곱근에 비례함을 알 수 있다. 표면적의 변화는 건조나 열전달 같은 표면 현상(surface phenomena)에 직접 연관되고, 상대속도의 변화는 경험식 (1)과 (2)로 표현되는 열전달계수 및 물질전달계수에 직접적인 영향을

미친다. 이에 의해 각각 식 (3)과 (4)로 표현되는 열전달률 및 건조

$$h_{heat} = Nu \left(\frac{k_g}{d_p} \right) = 0.15 Re \left(\frac{k_g}{d_p} \right) = 0.15 \left(\frac{k_g}{d_p} \right) \left(\frac{d_p V_r}{\nu} \right) \quad (1)$$

$$h_{mass} = Sh \left(\frac{D_v}{d_p} \right) = 0.15 Re \left(\frac{D_v}{d_p} \right) = 0.15 \left(\frac{D_v}{d_p} \right) \left(\frac{d_p V_r}{\nu} \right) \quad (2)$$

$$Q_{trans} = h_{trans} A (T_g - T_s) \quad (3)$$

$$\dot{m}_p = M_{H_2O} h_m \pi d_p^2 \left(\frac{P_{vo}}{RT_{sur}} - \frac{P_{vg}}{RT_g} \right) \quad (4)$$

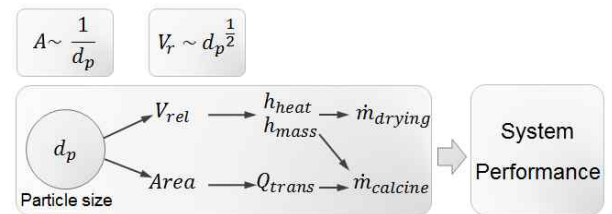


Fig. 1 Effect of PSD to the transfer phenomena

* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처자, smchoi@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3070 FAX : (042)-279-3199

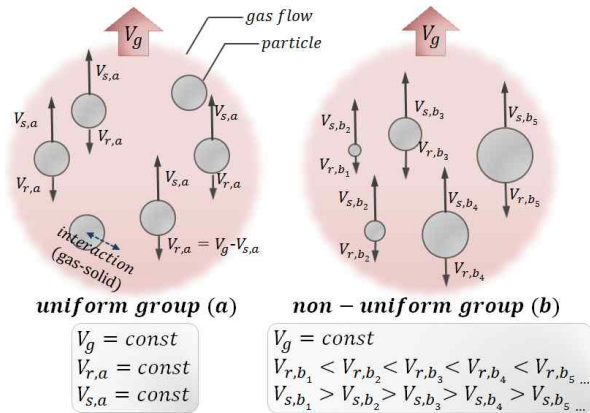


Fig. 2 Effect of PSD to the transfer phenomena
 울에도 영향을 미치며 변화된 온도에 의해 소성 반응을 까지 영향을 받는다. 게다가 입자 직경이 증가함에 따라 건조기의 성능을 떨어트리는 내부수분(internal water)량이 증가한다. 반응기 투입 전 직경 약 100 - 200 μm 입자로 분쇄되는 것이 이상적이나 1mm이상의 상당히 큰 입자 또한 일반적으로 무시하지 못할 정도로 존재한다.

이러한 이유로 신뢰성 높은 분석 결과를 도출하기 위해서는 불균일 입도분포(PSD)에 따른 분석이 중요하다고 할 수 있다. 개별 입도분포를 고려한다면 Fig.2에서 확인할 수 있듯이 입도에 따라 상대속도가 변하며 표면적도 입도에 종속된다. 그러므로 본 연구에서는 PSD에 따른 영향을 고려하기 위해 입도에 따라 입자 표면을 총 일곱 구간으로 나누어 각각에 대한 분석을 진행함으로써 불균일 입도조건에 따른 영향을 분석하고자 하였다.

Fig. 2를 통해 반응기 내 물질 흐름을 볼 수 있다. 왼쪽 그림과 같은 기류식 반응기의 경우 고온기체와, 광석 입자들이 유입되어 반응기 내부에서 건조 혹은 소성과정을 통한 물질전달 및 열전달을 거친 뒤 오른쪽 그림과 같은 사이클론 집진기로 투입된다. 사이클론 집진기의 주목적은 기체로부터 고체 입자의 분리이며 건조 이후 소성기 투입 전 고체입자의 승온(Heat-up) 및 일부 소성과정 또한 담당한다.[1]

모델링을 위한 각 반응기 별 현상과 그에 따른 관련식 및 참고문헌을 Table 1에 나타내었다. 건조의 경우 초기에는 입자 표면과 내부 기체 간 수증기압 차이로 인한 표면 수분 증발(surface evaporation)이 발생한다. 이후 입자 표면으로부터 수분 증발로 인한 건조층(crust layer)이 생성되기

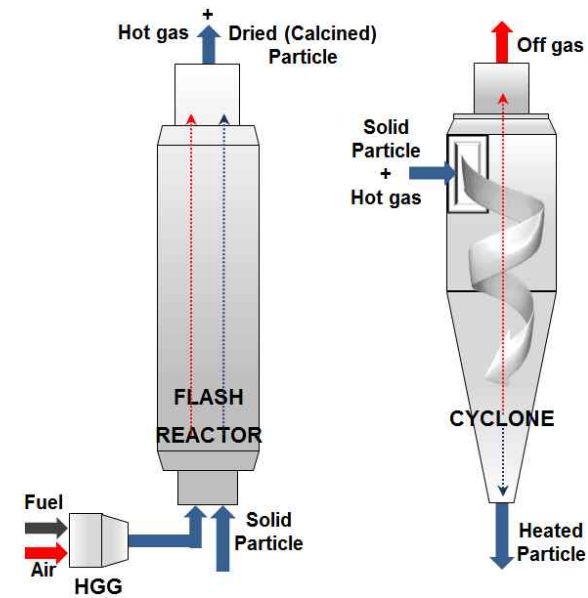


Fig. 2 Schematic and flow chart of each reactor
Table 1 Analysis phenomena & Equation in each reactor

Reactor	Phenomena	Author	Ref
Dryer	Surface evaporation	-	-
	Internal evaporation	Abuaf	[4]
	Boiling	Yang	[9]
	Heat & Mass transfer	Baeyens	[3]
Cyclone	Heat & Mass transfer	Raju	[5]
	Inner velocity	Cooper	[8]
Calciner	Calcine	-	-
	Heat & Mass transfer	Baeyens	[3]
Common	Radiation heat transfer	Hottel	[7]

때문에 증발 후반부에는 내부 수분핵(water core)으로부터 표면까지 수분의 확산이 진행된 후 표면에서 증발하는 내부 수분 증발(internal evaporation)이 발생한다.[2] 대용량 기류식 반응기에 대해 Baeyens 등이 실험을 통해 제시한 유동 특성 및 입자 조건에 따른 Nu수 경험식을 사용하였으며[3] Abuaf 등이 제시한 내부 수분핵 크기의 변화가 고려된 내부 수분 증발 모델을 사용하였다.[4] 소성과정은 아레니우스식 기반의 화학반응식을 통한 소성 반응을 통한 내부 결정수 제거를 고려하였다. 사이클론의 경우 일반적으로 복잡한 형상 및 나선 유동을 가지나 기하학적 관계에 근거하여 단순화 할 수 있다. 이를 통해 사이클론의 내부속도에 대해서는 Cooper등이 제시한 경험식을[8], Nu수에 대해서는 Raju등이 제시한 경험식을 사용하여 분석을 진행하였다.[5]

해석 대상은 수분 함량이 높고 내부 결정수

또한 많은 광석으로 선정하였으며 Table 2를 통해 운전 조건 및 광석의 물성치를 확인할 수 있다.

에너지 정산을 기반으로 반응기 별 길이방향 1차원 해석을 진행하였다. 유동에 의한 대류항이 전도에 의한 확산항보다 매우 큰 유동이기 때문에 하류의 상류에 대한 영향을 무시한 일방향 계산(one-way calculation)을 진행하였으며 고체입자의 경우 유동화가 가장 잘되는 Geldart 도표 A 그룹에 속하며 투입속도가 충분히 빠르기 때문에 유동화(fluidization)가정을 사용하였다. 또한 기체 체적 대비 고체 입자의 체적 비가 크지 않

Table 2 Operating conditions & Properties

Operating conditions	
Processing Capacity	40 t/h
HGG Gas Temperature	1200 °C
Solid particle properties	
Moisture	35 %
Density	3000 kg/m ³
Average diameter	370 μm

기 때문에 입자 간 상호작용은 무시하였다.

그 결과 동일 입도 가정을 사용한 기존 결과와 비교하여 상당히 수정된 결과를 얻을 수 있었다. 예상보다 직경이 큰 입자들이 많았기 때문에 열전달이 느렸으며 내부수분량 또한 많았다. 따라서 건조 및 소성반응이 느려짐을 확인할 수 있었다. 또한 입도 별 건조 및 소성 양상을 확인할 수 있었다. 그러므로 기류식 반응기 성능 평가에 있어 입도 분포가 많은 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었으며, 수정된 모델을 통해 이에 대한 영향을 반영할 수 있을 것으로 기대한다.

하지만 유동장에 따른 분석을 진행하지 않았고 소성반응 관련 계수들의 불확실성, 반응기 통로에서의 열 손실 및 압력손실 등이 고려되지 않았다. 또한 일반적인 기류식 반응기보다 내부온도가 높은 바, 사용한 경험식에 대한 검토가 필요하다. 그러므로 이러한 요차요인에 대한 분명한 인식이 필요하며 추가적인 해석모델의 검토 및 개선이 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 BK21 플러스의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] T. G. Eom, "Thermal Design and Performance of Pyro-processing Ores", School of Mechanical and Aerospace Engineering,

Department of Mechanical Engineering, 2015, pp. 67.

[2] M. Mezhericher, A. Levy, I. Borde, "Theoretical Models of Single Droplet Drying Kinetics: A Review", *Drying Technology.*, 28, 2010, pp. 278-293.

[3] J. Baeyens, D. V. Gauwbergen, I. Vinckier, "Pneumatic drying: the use of large-scale experimental data in a design procedure", *Powder Technology.*, Vol. 83. 1995, pp. 139-148.

[4] N. Abuaf, F. W. Staub, "Drying of liquid-solid slurry droplets", *Drying '86*, in A. S. Mujumdar (ed.), Hemisphere Publishing Corporation, London.

[5] A. V. Raju., S. R. Subrahmanyam, J. P., Rao, T. R., and Pitchumani, B., "Gas-Solid Heat Transfer in Cyclone Heat Exchanger," *Indian Chemical Engineering.*, Sect. A, 361 - 2, 1994, pp.58 - 62.

[6] A. Jain, B. Mohanty, B. Pitchumani, K.S. Rajan, "Studies on Gas-Solid Heat Transfer in Cyclone Heat Exchanger", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, 2006, pp. 761 - 768.

[7] H. C. Hottel, "Radiation from carbon dioxide, water vapor and soot, American Flame Committee, MIT, 1985.

[8] C. D. Cooper, F. C. Aelly, "Air Pollution control", 1986, Springer.

[9] W, Yang, "Combustion Modeling of the Solid Fuel Bed and Its Application", Department of Mechanical Engineering, Division of Mechanical Engineering, 2004, pp. 96.