

간섭침강분리의 모델링

김정윤 · 조희찬¹⁾

1. 서론

본 연구에서는 실험실 규모의 간섭침강분리장치를 기본으로 하여 간섭침강 분리 현상에 대한 기존의 수학적 이론을 정리하고 이를 이용하여 연속적인 간섭침강 분리의 모델을 개발하는 것이 목적이다. 이는 간섭침강분리 수행 시 분리에 여러 가지 운전조건들이 분리에 미치는 영향을 규명하고 가장 적절한 분리 조건을 찾아냄으로써 임의의 시료에 대해 원하는 산물을 얻어낼 수 있는 최적의 분리 장치를 설계하기 위함이다.

2. 간섭침강분리모델의 기본 개념

간섭침강모델에서 입자 농도에 영향을 미치는 현상은 크게 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫째는 입자 자체의 침강속도에 의한 이류 현상(advection)으로 각 입자의 침강속도 차이 및 입자 농도에 의해 일어난다. 둘째는 입자 농도에 의한 분산(diffusion)으로서 이는 침강분리장비 각 부분에서의 입자들의 농도 차이에 의해 일어난다. 이러한 간섭침강분리의 Batch 모델은 최근 Lee(1989)에 의해 수립되었으며 간섭침강속도 공식 또한 여러 연구자들에 의해 다양한 형태로 계산되었다(Concha and Almendra, 1979). 본 연구에서는 이러한 기존의 간섭침강분리 이론들을 정리하였으며 이를 통해 연속적인 간섭침강분리장치의 모델링 작업을 수행하였다.

연속적인 간섭침강분리 모델링에서 반응기 내에서의 전체적인 물질 흐름은 다음의 식과 같이 표현된다.

$$F + D = T + Q$$

where F = feed flow rate, D = teeter water flow rate,

T = tailing flow rate, Q = overflow product flow rate

또한 전체 물의 흐름과 고체입자의 흐름 각각에 대해서도 다음과 같이 물질수지식을 세울 수 있다.

$$\text{-Water balance : } F(1 - C_f) + D = T\theta + Q(1 - \phi_p)$$

$$\text{-Solid balance : } FC_f = T(1 - \theta) + Q\phi_p$$

where C_f = solid concentration of the feed flow

ϕ_p = solid concentration of the overflow product

θ = porosity of the thick bed

물의 질량수지 공식으로부터 반응기 내에서의 아래 방향으로의 물의 이동 속도(U_w)는 다음과 같은 형태로 계산된다.

주요어: 간섭침강분리, 모델링, Hindered-Settling, 간섭침강속도

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부(kooltz77@snu.ac.kr, hccho@plaza.snu.ac.kr)

$$U_w = \frac{(T\theta - D)}{A(1 - \phi)}$$

where A = cross-sectional area of the reactor

입의의 영역에서의 물질 농도의 변화는 Fig. 1과 같이 간섭침강분리장치를 n 개의 영역 (element)으로 분할하여 각 영역에서의 물질 변화량을 계산해서 구할 수 있다. 최하부의 영역을 1, 최상부의 영역을 n 영역이라고 하면 영역 k 에 대한 물질의 농도 변화는 이류와 분산의 영향을 고려하여 다음 식으로써 표현된다.

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial t} = D_C \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial z^2} - U_k \frac{\partial \phi_k}{\partial z}$$

where ϕ_k = solid concentration in k element

D_C = diffusion coefficient

U_k = settling velocity in k element

이때 시료 투입 영역에서는 이류 및 분산에 의한 물질 이동 외에도 직접적인 물질의 유입이 있으므로 다음과 같은 형태로서 식이 변형된다.

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial t} = D_C \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial z^2} - U_k \frac{\partial \phi_k}{\partial z} + \frac{FC_f}{V_k}$$

where V_k = volume of the element

따라서 우선 각 영역에서의 물의 이동속도와 간섭침강속도공식에 의해 구해진 각 입자종의 침강속도를 이용하여 각 입자종의 최종 침강속도를 계산하고 이를 이용하여 위 두 식을 수치해석적인 방법으로 풀게 되면 입의의 영역에서의 입의의 입자종에 대한 농도값을 계산할 수 있으며 입의의 영역에서 모든 종류의 시료에 대한 농도값을 합하면 입의의 시간에 그 영역에서의 새로운 물질농도가 계산된다. 다만 반응기의 상하 경계에서는 분산에 의한 물질의 이동은 일어날 수 없으므로 이류에 의한 물질의 변화만을 고려하여 top 영역과 bottom 영역에서의 물질 농도를 구하고 이를 이용하여 overflow 산물 및 underflow 산물의 양, 입도분포 등을 시간에 따라 계산할 수 있게 된다.

이러한 원리에 의해 본 연구에서는 입자의 간섭침강속도와 관련해서는 Concha and Almendra(1979)와 Lee(1989)의 이론을 적용해 보았으며 입의의 영역에서의 물질농도 공식은 Lee(1989)의 이론을 중심으로 적용하였다.

3. 간섭침강분리 모델링의 예시

Fig. 2는 간섭침강분리의 모델링에 의한 결과와 실제 실험 자료를 비교 도시한 그래프이다. 실험 자료는 Set point 25, 하부주입수량 5.7L/min, 상부주입수량 1.9 L/min, 시료 투입량 2kg/min의 상태에서 수행된 결과이다. 시료는 +20, 20x40, 40x70, -70 US mesh의 네 입도의 시료를 이용하였다. 실험결과 +20mesh, 20x40mesh 시료는 비중 1.8 이하에서만 각각 약 65%, 100% 회수되었으며 나머지 비중에서는 거의 회수되지 않았고 -70mesh 시료는 모든 비중에서 거의 전량 회수되었다. 따라서 모델링값과의 비교는 중간 입도인 40x70mesh 시료에 대해서만 도시하였다. 모델링에서는 +40mesh의 굵은 입자는 거의 회수되지 않았으며 40x70mesh 시료에서만 일정한 분포를 보이며 회수되었고 -70mesh 시료는 역시 전량 회수되었다. 그래프를 보면 비중에 따라 회수되는 양의 경향성이 실험자료와 어느 정도 일치함을 알 수 있다. 모델링에서 +40mesh 시료 중 가벼운 입자들, 특히 비중 1.8 이하 입자들

의 회수율이 작게 나온 것은 입도의 영향 때문으로 분석된다. 우선은 실험에 사용된 시료는 연속적인 입도분포를 가지고 있으나 모델링에서는 넓은 범위의 입도를 하나의 평균 입도로 나타내고 있다. 특히 큰 입도에서는 그 입도간격이 훨씬 크기 때문에 침강속도를 구할 때 입도에 의한 영향을 정확히 반영하였다고 보기 힘들다. 또한 간섭침강속도를 구하는 과정에서 입도의 영향이 실제보다 더 크게 적용되었을 가능성도 있는 것으로 보인다.

4. 결론

간섭침강분리의 모델링을 위하여 입자의 간섭침강속도 및 각 영역에서의 농도변화에 관한 모델을 설정하였다. 이를 이용하여 간섭침강분리의 모델링 작업을 수행하였으며 그 결과 실험 결과와 유사한 경향성이 나타남을 확인하고 모델의 적용성을 검증하였다. 그러나 운전 조건의 변화에 따라 현재의 모델이 실제 자료와 잘 일치하지 않은 경우도 상당수 발생하여 현재까지는 시료의 입도 및 비중에 따른 간섭침강 기작이 정확히 묘사되지 않았음을 알 수 있었다. 특히 입도의 영향에 관한 연구가 많이 이루어져야 할 것이다. 앞으로 더 많은 작업을 통해서 더욱 양호한 결과를 보여줄 수 있는 모델이 제작될 수 있을 것이며 이를 통해 간섭침강분리 공정의 과학적인 설계가 가능할 것으로 예측된다.

5. 참고문헌

1. Concha, F. and Almendra, E.R., "Settling Velocity of Particulate Systems, 2. Settling Velocity of Suspension of Spherical Particles," Int. J. Mineral Process, no.6, pp.31-41, 1979b
2. Lee, C., "Modeling of Batch Hindered Settling," A Thesis in Mineral Processing, The Penn. State Univ., 1989

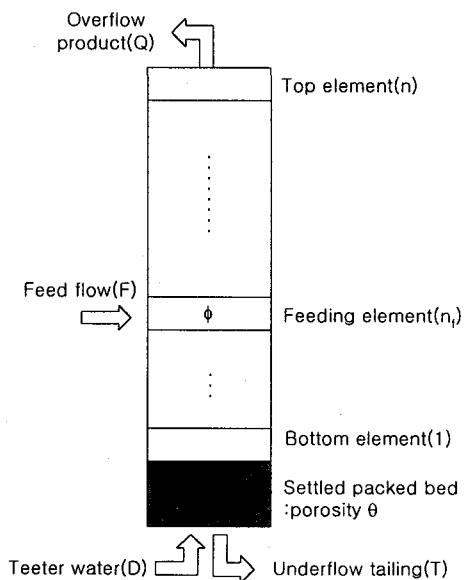


Fig. 1. Partitioning of the Hindered-Settling column

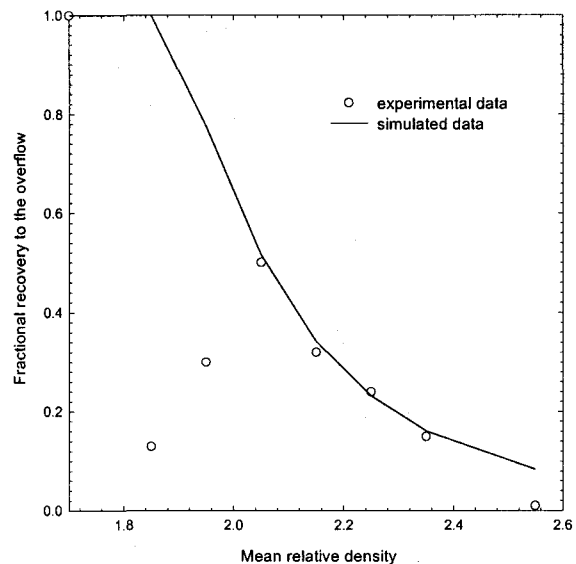


Fig. 2. Fractional recovery curve; set point 25, teeterwater flow rate 5.7L/min, size 40x70 mesh