

기체유동층에서 온도변화에 따른 축방향 고체체유량 분포

마상찬, 최정후, 선도원*, 손재익*
건국대학교 화학공학과
한국에너지기술연구소*

Effect of Temperature on the Axial Solid Holdup Profile in a Gas Fluidized Bed

Sang-Chan Ma, Jeong-Hoo Choi, Do-Won Shun*, Jae-Ek Son*
Department of Chemical Engineering, Kon-Kuk University, Seoul 133-701
Korea Institute of Energy Research, Taejeon 305-343*

서론

기포유동층 보다 더 큰 유속에서 조업되는 순환유동층은 비산된 미분 입자를 사이클론으로 포집하여 층내로 재순환하여 기체-고체간의 효과적인 접촉과 고체혼합효과를 높이는 유동층 기술의 한 분야이며, 순환유동층의 성공적인 조업과 설계를 위해서는 층내의 고체분포에 관한 이해가 필수적이다.

일반적으로 기체-고체 유동층에서 축방향 고체체유량(solid holdup) 분포의 정성적 형태는 고체밀도가 높이에 따라 감소하여 층하부에는 농후상(dense phase)이, 층상부에는 희박상(dilute phase)이 존재하는 전형적인 S자형 분포를 보이며, 유속이 증가하고 고체순환속도(G_s)가 감소함에 따라 고체체유량이 감소하는 것으로 보고되어왔으며[1], 유동층의 조업조건에 따라 농후상의 고체체유량이 다른 것으로 보고되어왔다(기포유동층 : 0.55~0.40; 난류유동층 : 0.40~0.22; 고속유동층 : 0.22~0.16)[2].

축방향 고체체유량 분포 변화량은 decay constant로 나타낼 수 있는데, 이는 유동층의 높이에 따른 단위길이당 고체체유량의 감소정도를 나타내는 것으로 일반적으로 decay constant가 크면 층표면에서부터 프리보드까지 축방향 고체체유량 분포가 급격히 감소하고, 작을 경우에는 그 감소정도가 완만한 것을 나타낸다. 그러므로 축방향 고체체유량 분포와 더불어 decay constant는 유동층에서 비산입자량의 제어와 유동층 설계에 있어 중요한 변수의 하나이다.

층내 고체체유량 분포에 영향을 미치는 인자로는 기본적으로 층압력, 층온도, 층직경, 층내 고체부하, 고체의 입도분포, 고체밀도, 기체밀도, 기체점도 등이 있으며, 축방향 고체체유량 분포에 대한 기존의 연구들은 주로 상온의 순환유동층에서 수행되어 보고되었으며, 실제로 공업적으로 이용되는 순환유동층의 조업조건에서 수행된 연구는 그다지 많지 않은 실정이다. 고온 순환유동층 조업에서는 축방향 고체체유량 분포에 영향을 미치는 여러 인자들 가운데 기체의 밀도와 점도가 변화하게 되는데, 기체의 밀도는 온도증가에 따라 감소하는 반면 기체의 점도는 증가하므로 이 두가지의 영향이 복합적으로 작용하여 순환유동층의 여러 가지 특성에 영향을 미치게 된다. 그러므로, 순환유동층의 올바른 조업과 설계를 위해서는 고온에서 축방향 고체체유량 분포에 대한 연구가 필수적이라 하겠다.

본 연구에서는 층온도(24~600°C)와 기체유속(0.5~2.0m/s)을 변화시키며 층온도와 유속변화에 따른 축방향 고체체유량 분포를 측정하였으며, 이를 바탕으로 decay constant에 미치는 유속과 온도의 영향을 종합적으로 검토 및 고찰하여 decay constant를 예측할 수 있는 상관식을 제시하는 데 활용하고자 하였다.

실 험

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치를 나타내고 있다. 유동층은 직경 0.1m, 총높이 2.1m의 스테레스관(SUS 316)으로 제작되었으며, 층가열장치로는 외부가열방식의 원통형 매물히터를 사용하였다. 유동화기체로는 공기가 사용되었으며, 수평관을 통하여 plenum으로 주입되어 유동층에 공급되도록 하였다. 분배기는 multi-tuyere 형으로 직경 20mm의 tuyere 4개에 각각 직경 3mm의 구멍 12개를 배치하였다.

유동층의 축방향 압력분포를 측정하기 위하여, 분산판으로부터 축방향으로 9개(-0.04, 0.02, 0.08, 0.18, 0.27, 0.57, 0.87, 1.29, 1.97m)의 압력점을 두고 마이크로 마노미터를 연결하여 각각의 압력점 사이의 차압(ΔP)을 측정하였으며, 축방향 온도분포는 분산판으로부터 축방향으로 설치된 7개의 K-형 열전대와 data logger(Molytek Model 2702)로 연속적으로 측정하였다.

기체출구는 분산판으로부터 1.93m 높이에 위치하며, 기체는 직렬로 연결된 1, 2차 사이클론과 백필터를 거쳐서 대기로 배출되도록 하였다.

고체순환속도는 1차 사이클론 하부에 연결된 diverter를 일정시간동안 젓혀서 포집된 고체의 무게를 측정하여 결정하였다. 1차 사이클론의 하부 배출관은 rotary valve를 거쳐서, 분산판으로부터 높이 0.42m에 설치된 재순환관을 통하여 유동층과 연결되었다.

층물질로는 평균입경 0.181mm를 갖는 모래를 사용하였으며, Table. 1은 층물질로 사용된 모래의 고체특성치를 나타낸다.

실험변수로는 총괄공압유속(0.5~2.0m/s), 유동층온도(24~600°C), 고정층높이(0.30m)가 고려되었으며, 특성값으로 축방향 압력분포 및 온도분포, 축방향 고체체유량 분포, decay constant 등이 측정되었다.

각 압력점 사이의 고체체유량은 다음의 식을 사용하여 압력분포로부터 계산되었으며 계산된 축방향 고체체유량 분포를 바탕으로 decay constant를 계산하였다.

$$\epsilon_s = \frac{g_c}{g} \left(\frac{\Delta P}{\Delta h} \right) \frac{1}{\rho_s}$$

Fig. 1. Experimental apparatus.

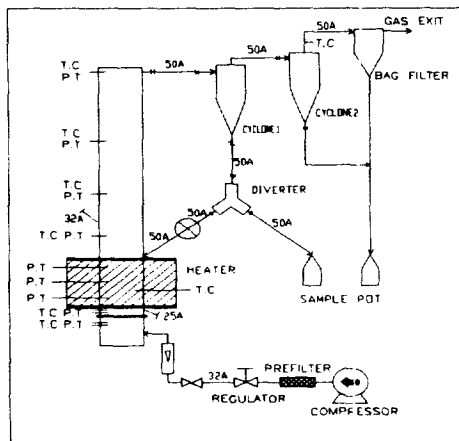


Table 1. Physical properties of solid.

Bed material	Sand
Properties	
Apparent density [kg/m ³]	2636
Bulk density [kg/m ³]	1377
Seive size [μm]	-212+150
Mean diameter [μm]	181
Terminal velocity [m/s]	1.42
Static bed height [m]	0.30

결과 및 토론

1. 축방향 고체체유량(ϵ_s) 분포

Fig. 2(a)는 일정온도(200°C)에서 유속변화에 따른 축방향 고체체유량 분포의 변화를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 유속범위(0.5~2.0m/s)에서 축방향 고체체유량 분포는 하부의 농후상 영역과 상부의 희박상 영역으로 뚜렷하게 구분되는 전형적인 S-자형 곡선을 보였다. 한편 본 실험의 온도범위에서 유속변화에 따른 축방향 고체체유량 분포의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않았는데, 이는 본 실험의 유속범위가 대부분 기포유동층 영역으로, 이 범위에서는 유속변화에 따른 고체체유량 분포의 변화가 작기 때문인 것으로 사료되었다.

Fig. 2(b)는 일정유속(1.0m/s)에서 층온도의 변화에 따른 축방향 고체체유량 분포의 변화를 나타낸다. 모든 온도범위(24~600°C)에서 고체체유량은 Fig. 2(a)의 경우와 마찬가지로 하부의 농후상 영역에서 상부의 희박상 영역까지 높이에 따라 감소하는 일반적인 경향을 보였으며, 층온도에 따른 고체체유량 분포의 변화는 다소 복잡한 경향을 나타내었다.

또한, 모든 실험조건에서 층하부 농후상의 고체체유량은 0.35~0.44로 나타났으며, dense bed가 뚜렷하게 관찰되었다.

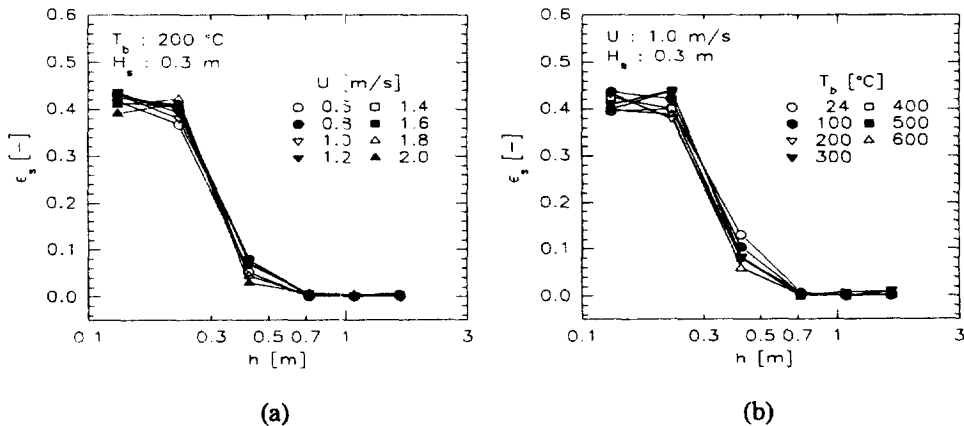


Fig. 2. Axial solid holdup profile: (a) at various gas velocities; (b) at various bed temperatures.

2. Decay constant(a)

2.1 유속의 영향

Fig. 3은 유속변화에 따른 decay constant의 변화를 나타낸다. 300°C를 제외한 모든 층온도 범위에서 Yang 등[3], Arena 등[4], Lu & Wang[5]의 결과와 마찬가지로 유속이 증가함에 따라 decay constant는 감소하는 경향을 보였다.

유속이 증가함에 따라 유동층의 축방향 고체체유량은 분산판으로부터의 높이에 따라 서로 다른 변화경향을 나타내게 된다. 층 하부의 농후상에서의 고체체유량은 유속이 점차 증가함에 따라 기포빈도와 기포크기가 증가하므로 유속증가에 따라 감소하는 반면, 희박상에서의 고체체유량은 유속증가에 따라 층표면에서 비산가능한 입자의 양이 많아지고 입자비산속도가 증가하여 유속증가에 따라 증가하게 된다. 그러므로 유속이 증가함에 따라 dense bed 영역에서의 고체체유량은 감소하고 프리보드에서는 증가하므로 decay constant가 감소하는 것으로 사료되었다.

한편 본 연구의 실험범위에서 측정된 decay constant는 $3.148 \sim 14.316 \text{m}^{-1}$ 의 범위로, 층직경과 입자밀도 및 평균입경 등의 실험조건이 유사한 Lu & Wang[5]과

Yang 등[3]의 결과($aU = 8s^{-1}$)를 기준으로 본 실험의 유속범위에서 계산된 decay constant($4 \sim 16m^{-1}$)와 유사한 결과를 나타내었다.

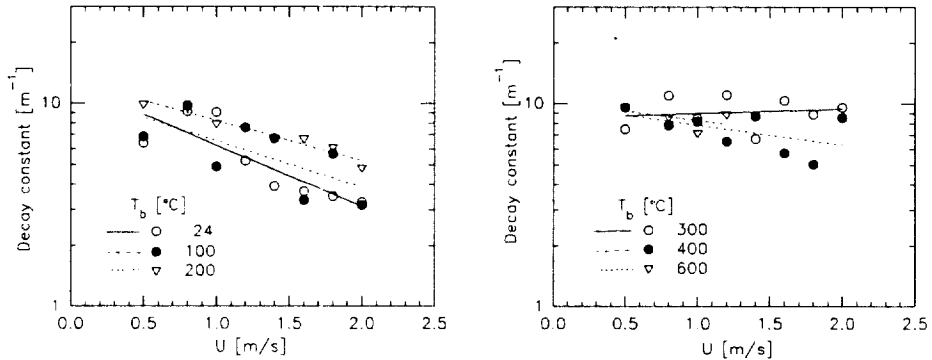


Fig. 3. Effect of gas velocity on decay constant.

2.2 층온도의 영향

Fig. 4는 decay constant에 미치는 층온도의 영향을 나타낸다. 모든 유속범위에서 층온도가 증가함에 따라 decay constant는 증가하는 경향을 나타내었으며, 이와 같은 경향은 층온도 증가에 따라 회박상의 고체체유량이 감소하였기 때문인 것으로 사료되었다. 또한, 온도범위의 차이는 있으나 낮은 유속($0.5 \sim 1.2m/s$)보다 높은 유속($1.4 \sim 2.0m/s$)에서 온도증가에 따른 decay constant의 증가경향이 더 큰 것으로 나타났다.

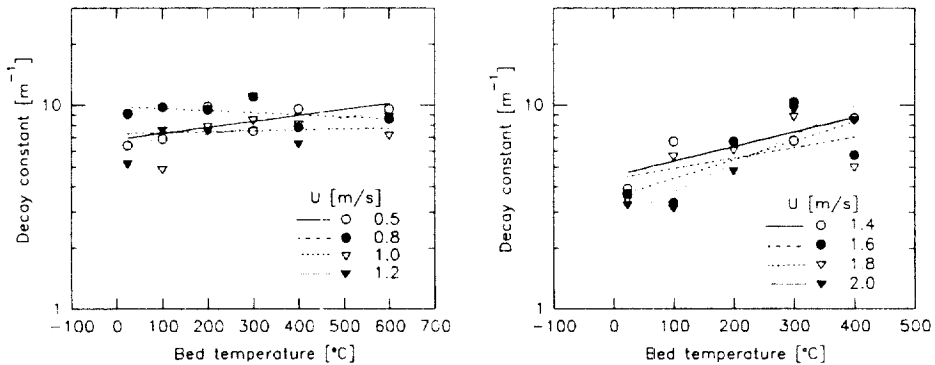


Fig. 4. Effect of bed temperature on decay constant.

참고문헌

1. Adanez, J., Gayan, P., Garcia-Labiano, F. and de Diego, L.F., "Axial voidage profiles in fast fluidized beds," *Powder Technology*, 81, 259-268(1994).
2. Kunii, D. and Levenspiel, O., *Fluidization engineering*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 197-201(1991).
3. Yang, G., Huang, Z. and Zhao, L., in "Fluidization, IV," edited by Kunii, D. and Toei, R., Engineering Foundation, 145(1983).
4. Arena, U., Cammarota, A. and Pistone, L., in "Circulating Fluidized Bed Technology," edited by Basu, P., Pergamon, 119(1986).
5. Lu, Q. and Wang, Y., private communication, 1985.