

## 삼상유동층에서 유동입자의 자유흐름속도 및 분산

고명한, 김기인, 강 용, 김상돈\*

충남대학교 화학공학과  
\* 한국과학기술원 화학공학과

### Dispersion and Free Flowing Velocity of Fluidized Particles in Three-Phase Fluidized Beds

M.H.Ko, K.I.Kim, Y.Kang and S.D.Kim\*

Department of Chemical Engineering,  
Chungnam National University, Taejon 305-764  
\* Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejon

#### 서론

삼상유동층의 동특성은 연속상인 액상에 분산상으로 존재하는 상승기포와 고체 유동입자들의 거동에 의해 결정된다. 따라서 삼상유동층의 해석이나 공업적 응용을 위해서는 기포와 유동입자의 거동특성에 대한 연구는 필수적이라 할 수 있다. 삼상유동층에서 분산상인 기포의 크기 및 분포, 상승속도, 흐름영역 그리고 합체와 분쇄 등의 특성들에 대한 연구와 기포거동의 모델링 등에 대한 연구는 상당히 진행되어져 왔으나, 고체 유동입자의 거동에 대한 연구는 상대적으로 어렵기 때문에 매우 미흡한 실정이다.

기체-액체-고체가 존재하는 삼상계에서 매우 미세한 고체입자들이 슬러리 상태로 존재하는 계에서의 고체입자의 분포나 축방향 분산 그리고 상대속도 등에 대한 연구들은 진행되었으나, 이들 계에서는 슬러리상을 이루는 고체입자들이 연속상인 액체와 함께 연속적으로 계에 유입, 유출되므로 고체 유동입자가 유동층 내부에서 batch 상태로 존재하는 삼상유동층과는 그 거동특성이 다르다 하겠다.

지금까지 삼상유동층에서 유동입자의 혼합이나 축방향 분산에 대한 연구는 두 가지 종류의 혼합입자계에서 축방향 분산모델을 사용하여 입자의 혼합과 흐름영역의 관계를 규명하고자 한 연구에 불과하며, 삼상유동층에서 층팽창 이완방법에 의해 통계학적으로 유동입자의 축방향 분산계수를 구하고자한 연구에서, 기체의 유속이 커짐에 따라 압력요동이 심하여져서 유동입자의 거동을 해석하기가 매우 어려워져 낮은 유속범위에서 유동입자의 축방향 분산계수를 제한적으로 구한 정도였다. 그러나, 삼상유동층에서 유동입자의 거동이나 흐름형태는 유동층내에서의 연속액상의 혼합 뿐만 아니라 열전달 및 물질전달에도 큰 영향을 미치므로 [1,2], 이에 대한 연구는 매우 필요하다 하겠다. 따라서, 본 연구에서는 삼상유동층에서 상대적으로 소홀히 다루어졌던 고체 유동입자의 거동해석이나, 이들 거동이 삼상유동층의 특성에 미치는 영향을 규명하는 등에 필수적인 정보를 제공할 것으로 사료된다.

#### 해석

삼상유동층에서 크기가 다른 두 종류의 입자가 유동화할 경우 유동입자들은 유체흐름에 의해 유동화 되면서 혼합이 일어난다. 이와 같은 유동입자의 축방향 분산거동을 해석하기 위해서는 유동입자의 분포가 반경방향으로는 균일하며, 축방향의 분산계수는 일정한 값을 나타낸다는 가정을 도입할 수 있다. 고체 유동입

자의 축방향 흐름은 유체들의 흐름에 의한 분산과 유동입자 자체의 공간 흐름 (bulk flow or convective flow)으로 식 (1) 과 같이 구별할 수 있는데, 전자는 입자의 혼합을 유발하나 후자의 입자들의 분리현상으로 나타낼 수 있다.

$$N_z = -D_p \frac{dC_i}{dZ} + \overline{U}_p C_i \quad (1)$$

정상상태로 운전되는 삼상유동층에서 유동층 벽면에 대한 유동입자의 flux는 없으므로 식 (1)에서  $N_z=0$  가 된다. 식 (1)에서  $D_p$  와  $\overline{U}_p$  는 각각  $i$  성분 유동입자의 축방향 분산계수와 유동입자 자체의 평균공간 흐름속도(bulk or convective flow)를, 그리고  $C_i$  는  $i$  성분입자의 농도를 나타낸다.

한편, 식 (1)에서 유동입자의 평균공간 흐름속도,  $\overline{U}_p$  는 액체-고체 유동층에서와 같이 기체-액체 혼합 유체의 단위 면적당 유효부피 흐름속도(effective volumetric flux)인  $U_0$  와 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다[3].

$$\overline{U}_p = \frac{U_0 - U_f}{\varepsilon_g + \varepsilon_l} \quad (2)$$

여기서,  $U_0 = f_g U_g + f_l U_l$  (3)

$$f_g = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_g + \varepsilon_l}, \quad f_l = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_g + \varepsilon_l} \quad (4)$$

이며,  $U_f$  는 유동입자들이 정상상태로 유동할 수 있게 하는 유동층 내부에서의 유체의 유효 흐름속도를 나타낸다.

따라서, 식 (1) 과 (2)로 부터

$$D_p \frac{dC_i}{dZ} = \left( \frac{U_0 - U_f}{\varepsilon_g + \varepsilon_l} \right) C_i \quad (5)$$

가 되며, 이를 풀면 식 (6)을 얻을 수 있으므로 실험적으로 측정된 유동층 높이에 따른 상체류량과 유동입자의 농도들로부터 유동입자의 축방향 분산계수  $D_p$  를 얻을 수 있다.

$$\int_{L_1}^{L_2} \left( \frac{U_0 - U_f}{\varepsilon_g + \varepsilon_l} \right) dZ = D_p \ln \left[ \frac{C_i(L_2)}{C_i(L_1)} \right] \quad (6)$$

한편, 유동입자의 평균공간 흐름속도  $\overline{U}_p$  가 다음과 같이 축방향 높이의 함수로 나타낼 수 있다면[4]

$$\overline{U}_p = a + bZ \quad (7)$$

이 식을 식 (6)에 대입하면 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\int_{L_1}^{L_2} (a + bZ) dZ = D_p \ln \frac{C_i(L_2)}{C_i(L_1)} \quad (8)$$

### 실험

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 직경 0.152 m, 높이 2.5 m 인 아크릴 관을 사용하였다. 실험장치는 분산판 박스와 유동층 그리고 weir 의 세부분으로 이루어져 있으며, 분산판은 스텐레스로 만들어졌는데 기체와 액체가 동시에 같은 면에서 주입되도록 제작되었다. 각 실험조건에서 유동층 내부에서의 축방향 압력강하 측정을 위해서 분산판으로부터 0.15 m 간격으로 압력 측정 tap 을 11 개 설치하였으며 이들을 액체 마노미터에 연결하였다. 액상으로

는 물을, 기상으로는 압축공기를 그리고 유동입자로는 밀도가  $2500 \text{ kg/cm}^3$  인 유리구슬을 사용하였는데, 크기는 1.0, 3.0, 6.0 mm 의 세 종류를 선택하였다. 각 조건에서의 상 체류량은 정압강하법[10, 20]에 의해 결정하였다. 유동입자의 축방향 농도를 측정하기 위하여, 유동층이 주어진 조건에서 정상상태에 도달된 후 유동층의 유동입자 혼합영역 벽면에 부착된 단절판을 유동층에 순간적으로 삽입하여 유동입자가 유동하고 있는 위치에서 채취되도록 하였다. 단절판은 5개로 이들의 위치는 유동입자들의 혼합영역에 위치하도록 액체-기체 분산판으로부터 0.15, 0.225, 0.30, 0.45, 0.60 m 높이에 설치하였다. 단절판 밑면은 유체는 통과하고 고체 유동입자들은 통과하지 못하도록 400 mesh 스텐레스 강으로 되어 있으며, 단절판과 유동층 벽면은 유체의 누출을 막기위하여 실리콘으로 sealing 되어 있다. 실험은 부피비로 같은 양의 두 종류 유동입자를 유동층에 투입한 후 일정 수준으로 기체와 액체의 유속을 조절하여 정상상태에 도달된 후 유동입자의 혼합영역에서 유동입자를 동시에 채취하여 그 분율로 농도를 결정하였다.

유동입자들의 혼합영역에서의 체류량들과, 기체 및 액체의 체류량은 다음 식들에 의해 결정하였다.

$$\epsilon_{Gi} + \epsilon_{Li} + \epsilon_{SLi} + \epsilon_{SSi} = 1.0 \quad (9)$$

$$\frac{\Delta P}{L_i} = (\epsilon_G \rho_G + \epsilon_L \rho_L + \epsilon_{SL} \rho_{SL} + \epsilon_{SS} \rho_{SS})_i g \quad (10)$$

$$\epsilon_{SLi} = \frac{W_{SLi}}{A L_i \rho_{SL}} \quad (11)$$

$$\epsilon_{SSi} = \frac{W_{SSi}}{A L_i \rho_{SS}} \quad (12)$$

### 결과 및 고찰

삼상유동층에서 유동입자의 축방향 분산계수  $D_p$ 는 Fig. 2에서 보는바와 같이 기체유속  $U_G$ 의 증가에 따라 증가하였다. 이는 기체유속의 증가에 따라 유동입자에 작용하는 유체의 Drift flux가 증가할 뿐만 아니라 유동층 내부에 존재하는 분산상인 기포의 흐름이 많아지므로 연속상인 액상과의 흐름속도 차이에 의한 유동층 내부에서의 난류현상이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 더욱이, 기체유속의 증가에 따라 기포의 영역이 증가하여 유동층 내부의 총공극률을 증가시켜 주기 때문에 고체 유동입자들의 흐름거동이 활발하여지는데도 그 원인을 찾아 볼 수 있다. 삼상유동층에서 액체의 유속  $U_L$ 이 유동입자의 축방향 분산계수에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 이들 그림에서 볼 수 있듯이 유동입자의 축방향 분산계수는 액체유속이 증가함에 따라 증가하였다가 최대값을 보인 다음 다시 감소하였다. 삼상유동층에서 유동입자의 크기가 입자의 축방향 분산계수에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었는데, 유동입자의 축방향 분산계수는 유동입자의 크기가 증가함에 따라 일반적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

### 참고문헌

1. Kang, Y., Suh, I.S. and Kim, S.D.: *Chem. Eng. Commun.*, **34**, 1(1985).
2. Kang, Y. and Kim, S.D.: *I & EC Process Des. Dev.*, **25**, 717(1986).
3. Kang, Y. and Kim, S.D.: *Particulate Sci. Technol.*, **6**, 133(1988).
4. Fan, L.S., Yamashita, T. and Jean, R.H.: *Chem. Eng. Sci.*, **42**, 17(1987).

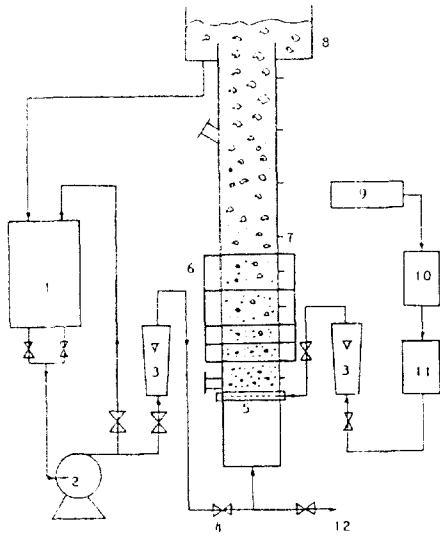


Fig. 1. Experimental apparatus :  
 1. tank 5. distributor 9. compressor  
 2. pump 6. damper 10. filter  
 3. rotometer 7. pressure taps 11. regulator  
 4. valve 8. weir 12. drain

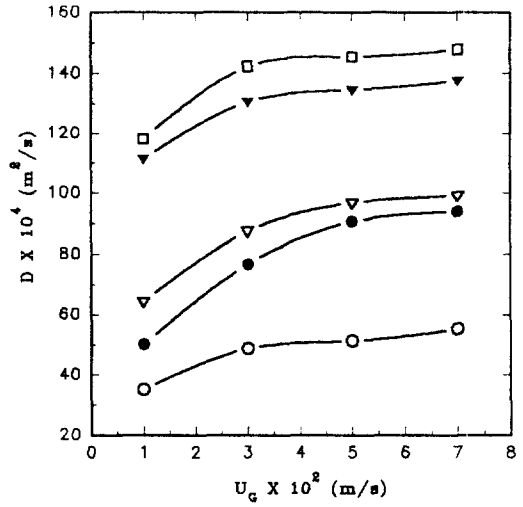


Fig. 2. Effects of  $U_g$  on  $D_p$  in three-phase fluidized beds :  
 ○ ● ▽ ▼ □  
 $d_p$ (mm) : 1 3 3 6 6  
 $U_L$ (m/s) : 0.10 0.08 0.10 0.12 0.14

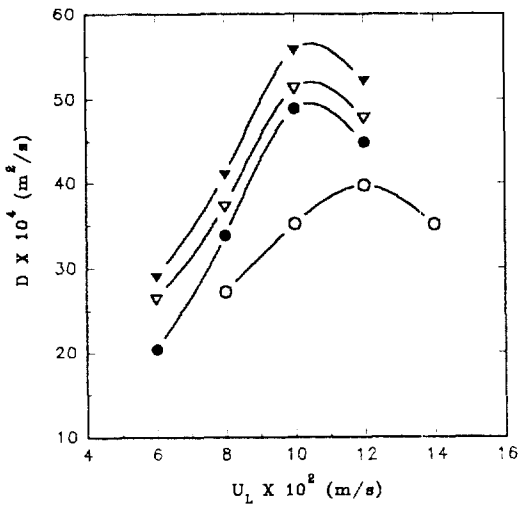


Fig. 3. Effects of  $U_L$  on  $D_p$  in three-phase fluidized beds  
 $(d_p = 0.001 \text{ m})$  :  
 ○ ● ▽ ▼  
 $U_g$ (m/s) : 0.01 0.03 0.05 0.07

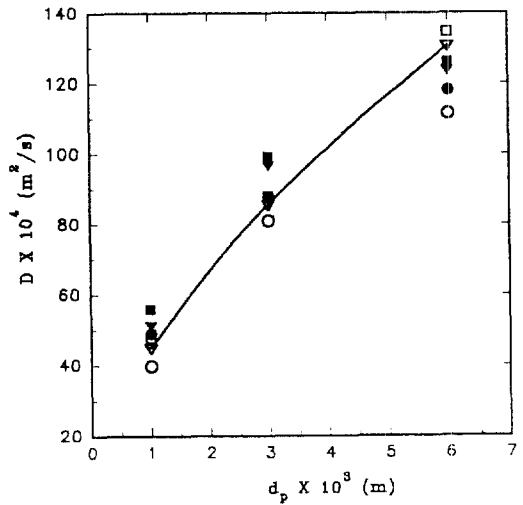


Fig. 4. Effects of  $d_p$  on  $D_p$  in three-phase fluidized beds  
 ○ ● ▽ ▼ □ ■  
 $U_g$ (m/s) : 0.01 0.03 0.03 0.05 0.05 0.07  
 $U_L$ (m/s) : 0.12 0.10 0.12 0.10 0.12 0.10