

두 고체 입자들의 이상 및 삼상 유동층에서 층 높이 변화

천병순 이 용, 이동현*
 성균관대학교 화학공학과
 (dhlee@skku.edu*)

Bed Height Change of Binary Solid in Two-phase and Three-phase Fluidized Beds

Byung Soon Chun, Yoong Lee, Dong Hyun Lee*
 Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University
 (dhlee@skku.edu*)

Introduction

액-고 유동층에서의 고체 입자들은 밀도분포와 입자크기 다양성이 나타난다. 촉매공정에서 촉매의 크기와 밀도는 항상 같지 않다. 이와 같이 밀도와 입자크기가 다른 두 고체상 혼합물들을 액-고 유동층에서 유동화 시킬 때, 그 입자들은 분리되거나, 혼합되거나 또는 층 전이 현상이 일어난다.

액-고 유동층에 기체를 주입하면 층이 팽창하거나 층이 수축되는 현상이 관찰된다. 삼상 유동층에서 기포의 거동에 따라서 기포 합체 영역, 기포 분쇄 영역, 슬러그 영역이 나타난다[2]. 이러한 흐름영역은 기체와 액체 유속, 고체입자의 밀도 및 크기에 따라 달라진다.

삼상유동층은 고체입자를 섞이지 않는 두 유체를 이용하여서 유동화시키는 조작으로 이루어진다[1]. 삼상유동층은 열전달 및 물질전달 효과가 다른 다상반응이나 접촉공정에 비하여 우수하며, 유동층 내의 압력 강하를 감소시킬 수 있다. 또한 각 상들간의 접촉이 효과적이며 높은 발열 반응에 적당하여 많은 상업적인 응용이 이루어지고 있다. 유분의 수소화 및 탈황공정인 H-oil공정, 석탄의 액화공정인 H-coal공정, 수소화 분해인 Hy-C공정 등에 쓰이며, 이 밖에도 생물학적인 산화반응 및 탈황공정에 응용되고 있다.

그러나 각 상들의 유동이 매우 복잡하기 때문에 여전히 잘 이해되어지지 않고 있다. 대부분의 삼상유동층이 단일 고체상을 이용하여 진행되어 왔다. 본 연구는 두 고체 혼합물들을 이용하여 삼상 유동층에서 기체와 액체 유속에 따른 층높이 변화를 살펴보았다.

Theory

Richardson과 Zaki [3]는 액-고 유동층에서 voidage를 다음의 식으로 예측하였다.

$$\frac{U}{U_t} = \varepsilon^n \quad (1)$$

여기에서 n 은 구형에서 종말속도에서의 Reynolds number, 솔리드 입자크기와 반응기의 크기비와 관련이 있다. Khan 과 Richardson [4]은 n 을 Archimedes number와 관련한 식을 제시하였다.

$$\frac{4.8-n}{n-2.4} = 0.043Ar^{0.57} \quad (2)$$

$\dot{n}(\varepsilon > \varepsilon_c)$ 은 Rapagná et al. [5]에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{n} = 6.4 - 0.6 \log Re_t \quad (3)$$

여기서 벽효과를 무시하면

$$\frac{U}{U_t} = \varepsilon^{\dot{n}} \quad (4)$$

이 되고, 식 (3) 과 식(4)를 결합하면

$$\varepsilon = \left(\frac{U}{U_t}\right)^{\frac{1}{6.4 - 0.61 \log Re_t}} \quad (5)$$

여기에서 U_t 는 종말 속도이다.

Asif[6]는 Westman[7]의 연구를 바탕으로 하여 액-고 유동층에서의 두 고체 혼합물들의 voidage를 예측 하였다.

$$\left(\frac{V - V_2 x_2}{V_1}\right)^2 + 2G \left(\frac{V - V_2 x_2}{V_1}\right) \left(\frac{V - x_2 - V_1(1 - x_2)}{V_2 - 1}\right) + \left(\frac{V - x_2 - V_1(1 - x_2)}{V_2 - 1}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

여기에서 V 는 비부피 $(1 - \varepsilon)^{-1}$, x 는 고체입자들의 초기 부피분율, G 는 혼합 수축 효과로 구형의 두 입자 지름의 비로 다음과 같이 나타낸다[8].

$$G = (1.355r^{1.566})^{-1} \quad r \leq 0.824, \quad G = 1 \quad r \geq 0.824 \quad (2)$$

여기서 r 은 두 고체 입자들의 지름의 비이다. Escudié et al. [9]은 G 를 두 입자의 지름의 비와 각 입자의 Archimedes number를 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$G = (5.31r^{-1.303} (Ar_2/Ar_1)^{-0.766})^{-1} \quad (3)$$

Epstein et al. [10]은 serial model이라 불리는 다음과 같은 식으로 voidage를 예측하였다.

$$1 - \varepsilon = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{x_i}{1 - \varepsilon_i}} \quad (4)$$

Experimental

그림 1은 본 연구에 사용된 장치의 개략도를 나타내었다. 본 실험장치는 직경이 0.21m이고, 높이가 2.5m인 반원 모양의 아크릴 관으로 제작되었으며 실제 실험영역의 높이는 1.8m이다. 이 실험장치의 분산판은 액체와 기체가 같은 면에서 동시에 분산될 수 있도록 만들어 졌다. 기체는 지름 1.0mm, 구멍 33개인 튜브 10개로 구성된 기체 분산판을 통하여 일정한 유속으로 분배되며, 액체는 3.0mm 지름의 35개의 고른 분산 구멍을 통해서 공급된다. 연속상인 액체는 물을 사용하였고, 분산상인 기체는 공기를 사용하였다. 또한 분산상인 고체 입자는 평균직경이 0.388mm, 밀도 2500 kg/m^3 인 glass beads와 직경 3.3mm, 밀도 1280 kg/m^3 인 polymer beads를 사용하였다. 두 입자의 구형도는 모두 1.0이다. Column의 옆면에는 유동층 내부에서의 압력 강하를 측정하기 위해서 분배기 0.06m 위에서부터 시작하여 압력 측정 탭을 일정한 간격으로 설치하였다.

본 실험에서는 두 고체 혼합물의 부피비에 따른 고-액 유동층의 voidage를 측정하였으며, 두 고체 혼합물의 부피비에 따른 고-기-액 유동층의 액체와 기체 유속에 따라 층높이를 측정하였다.

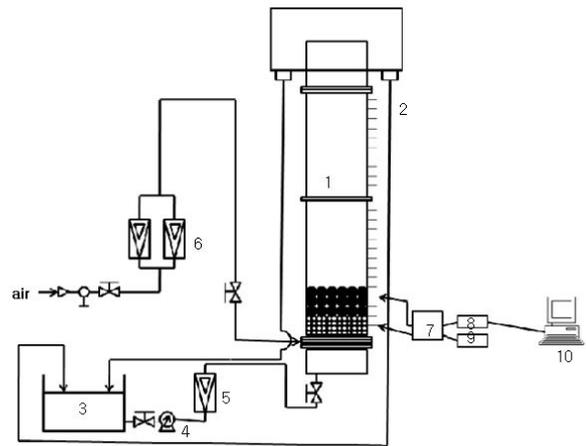


그림 1 장치 개략도. 1. 실험영역, 2. 압력 탭, 3. 물탱크, 4. 펌프, 5. 액체유량계, 6. 기체유량계, 7. 압력변환기, 8. data acquisition, 9. power supply, 10. PC.

Result and discussion

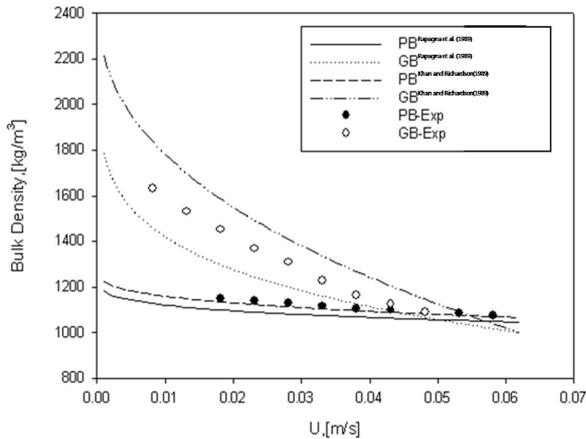


그림 2 액체 유속에 따른 고체입자들의 bulk density

그림 2는 액-고 유동층에서 액체 유속에 따른 bulk density의 예측값과 실험값을 비교하였다. 전체적인 그래프 경향은 polymer beads의 경우에는 Khan 과 Richardson [4]의 식을 이용한 값이 비슷한 값을 나타내었으며 glass beads의 경우에는 두 식들의 중간값들을 나타내었으며 두 값이 같아지는 경우는 액체의 유속이 48mm/s인 경우이다.

Table 1은 고체 혼합물들의 액-고 유동층에서의 층 voidage를 예측한 값들과 실험값을 비교한 것이다. 여기에서 두 고체 혼합물의 초기 부피비는 PB:GB=1.22:1이다. Serial model을 이용한 voidage 예측값이 다른 식들을 이용하여 예측한 값들 보다 좀 더 가까운 값을 나타내었고 특히 유속이 33.1mm/s이상에서 serial model로 예측한 값이 좀더 정확했다. Table 2는 두 고체 혼합물의 초기 부피비가 PB:GB=3.51:1인 경우

우의 액-고 유동층에서의 층 voidage를 예측한 값들과 실험값을 비교한 것이다. 전체적으로 serial model이 다른 식들을 이용한 예측한 값들 보다 좀 더 가까운 값을 나타내었다.

Table 1 고체혼합물들의 액-고 유동층에서의 voidage(PB:GB=1.22:1)

Table 2 고체혼합물들의 액-고 유동층에서의 voidage(PB:GB=3.51:1)

U _i (mm/s)	$\epsilon_{pred.}^{Epstein et al. (1982)}$	$\epsilon_{pred.}^{Asif (2001)}$	$\epsilon_{pred.}^{Escudie et al. (2001)}$	ϵ_{exp}
13.1	0.5655	0.4001	0.4695	0.582
18.1	0.5983	0.4384	0.5068	0.618
23.1	0.6626	0.5276	0.5845	0.693
28.1	0.6871	0.5627	0.6139	0.729
33.1	0.7679	0.6889	0.7187	0.783
38.1	0.8203	0.5614	0.6338	0.829

U _i (mm/s)	$\epsilon_{pred.}^{Epstein et al. (1982)}$	$\epsilon_{pred.}^{Asif (2001)}$	$\epsilon_{pred.}^{Escudie et al. (2001)}$	ϵ_{exp}
18.1	0.547	0.442	0.476	0.492
23.1	0.596	0.475	0.521	0.557
28.1	0.622	0.502	0.549	0.59
33.1	0.698	0.578	0.633	0.643
38.1	0.749	0.639	0.693	0.697
43.1	0.767	0.664	0.715	0.748

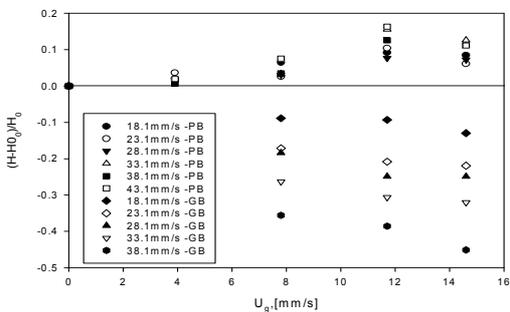


그림 3 Polymer beads와 Glass beads의 삼상에서의 층 팽창 또는 층 수축

그림 3는 삼상유동층에서 Polymer beads와 Glass beads의 층 팽창 또는 층 수축을 나타내었다. Polymer beads의 경우에는 기체와 액체의 유속이 증가함에 따라서 층이 팽창하는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 기체의 유속이 증가함에 따라서 층이 기포 분쇄 영역을 나타내었다. Glass beads의 경우에는 기체와 액체의 유속이 증가함에 따라서 층이 감소 하는 현상을 나타내었다. 이 경우에는 Gass beads의 평균입자 크기가 0.385mm로 작기 때문에 이 경우에는 기체의 거동이 기포합체영역을 나타내었으며 층이 감소 하는 현상이 나타났다.

그림 4는 고체 혼합물들의 초기부피비가 PB:GB=1.22:1인 경우에 삼상에서의 층 팽창 또는 층 수축을 나타내었다. 액체의 유속이

33.1mm/s를 넘어선 경우에는 층 높이가 gas의 유속이 증가함에 따라서 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 고체 혼합물들의 초기 부피비가 PB:GB=3.51:1인 경우에 삼상에서의 층 팽창 또는 층 수축을 나타내었다. PB의 부피가 상대적으로 많기 때문에 전체적으로 층이 팽창 하는 것을 알 수 있지만 여기에서는 액체의 유속이 43.1mm/s를 넘어선 경우에는 층이 감소하는 것을 알 수 있다.

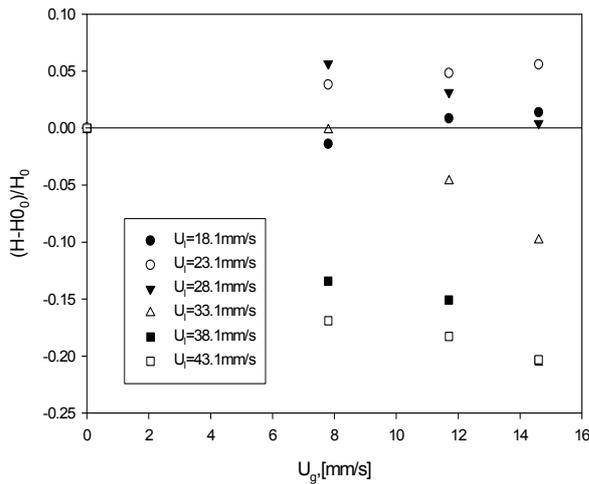


그림 4 고체 혼합물들의 삼상에서의 층 팽창 또는 층 수축(PB:GB=1.22:1)

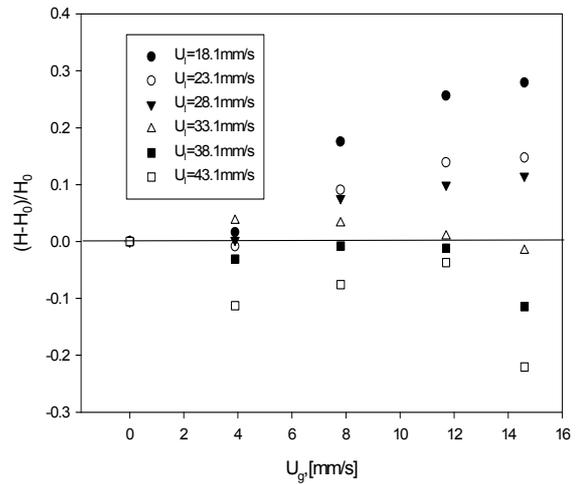


그림 5 고체 혼합물들의 삼상에서의 층 팽창 또는 층 수축(PB:GP=3.51:1)

Conclusion

고-액 유동층에서 유속에 따른 bulk density를 비교하였으며, 고체 혼합물들의 고-액 유동층에서의 층 voidage예측은 serial model이 다른 식들보다 예측값이 초기 두 혼합물들의 부피비가 다르더라도 좀 더 정확한 값을 나타내었다. 기-액-고 유동층에서는 polymer beads는 기체, 액체 유속이 증가함에 따라 층이 팽창하고, glass beads는 기체, 액체 유속이 증가함에 따라 층이 감소했다. 고체혼합물들의 삼상에서의 층 높이가 감소는 polymer beads의 부피비에 영향을 받았다.

Reference

- [1] D. H. Lee, J. O. Kim and S. D. Kim, *Chem. Eng. Comm.*, **119**, 179-196 (1993).
- [2] S. D. Kim, C. G. J. Baker, M. A. Bergougnou, *Can. J. Chem. Eng.*, **50**, 695-701 (1972).
- [3] J. F. Richardson, W. N. Zaki, *Trans. Instn. Chem. Eng.*, **32**, 35-53(1954).
- [4] A. R. Khan and J. F. Richardson, *Chem. Eng. Comm.*, **78**, 111-130 (1989).
- [5] S. Rapagnà, R. Di Felice, L. G. Gibilaro and P. U. Foscolo, *Chem. Eng. Comm.*, **79**, 131-140 (1989)
- [6] M. Asif, *Chem. Eng. Tech.*, **24**, 1019-1024(2001).
- [7] A. F. R. Westman, *J. Am. Ceram. Soc.*, **19**, 127-129 (1936).
- [8] A. B. Yu, N. Standish, A. McLean, *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**, 2813-2816(1993).
- [9] Escudié R., Epstein N., Grace J. R., and Bi H. T., *Fluidization XII New Horizons in fluidization engineering, Engineering Conferences International*, (2007).
- [10] Epstein N., Le Clair B. P., Pruden B. B., *Chem. Eng. Sci.*, **36**, 1803-1809(1981).