

## 두 고체 입자들의 고체-액체 및 고체-기체-액체 유동층에서의 수력학적 특성

천병순 이용, 이동현\*  
 성균관대학교 화학공학과  
 (dhlee@skku.edu\*)

### Hydrodynamics Characteristics of Binary Solid in the Solid-Liquid and Solid-Gas-Liquid Fluidized Beds

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

#### Introduction

유동화에는 유입하는 유체의 종류에 따라서 기상 유동층, 액상 유동층, 서로 섞이지 않는 두 액상을 유입하는 액체-액체 유동층, 기체-고체-액체 삼상 유동층 등이 있으며, 일반적으로 많이 연구되어지고 산업적인 응용이 이루어지고 있는 삼상 유동층은 기체-액체-고체 삼상 유동층이다[1].

밀도와 입자크기가 다른 두 고체상 혼합물들을 고-액 유동층에서 유동화 시킬 때, 그 입자들은 분리되거나, 혼합되거나 또는 solid layer inversion 현상이 일어난다. 이 solid layer inversion 현상은 Moritomi et al.(1982)에 의하여 본격적으로 연구되기 시작하였으며, 다른 문헌들에도 보고되었다[3-4].

본 연구의 목적은 단일 고체상의 bulk density차이에 따른 inversion point를 예상하여, 밀도와 입자크기가 다른 두 고체혼합물들의 고체-액체 유동화에서 inversion point를 비교한다. 그리고 단일 고체상들이 기-액-고 유동화에서 각각의 holdup을 비교하고, 고체 혼합물들의 액체-고체 유동화와 기체-액체-고체 유동화에서의 층높이를 비교한다.

#### Theory

먼저 고체의 상 체류량은 다음 식에 의하여 층높이 측정을 통해서 계산 할 수 있다.

$$\varepsilon_s = \frac{M_s / \rho_s}{AH_B} \quad (1)$$

여기에서  $M_s$ 는 고체상의 질량,  $\rho_s$ 는 고체상의 진밀도,  $A$ 는 column의 단면적,  $H_B$ 는 고체층의 높이를 나타낸다.

고체-기체-액체 유동층 내의 정압력과 체류량의 관계는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$-\frac{\Delta P}{\Delta z} = (\varepsilon_l \rho_l + \varepsilon_s \rho_s + \varepsilon_g \rho_g)g \quad (2)$$

$$\varepsilon_l + \varepsilon_s + \varepsilon_g = 1.0 \quad (3)$$

$\varepsilon_l$ 는 액체의 상 체류량,  $\varepsilon_g$ 는 기체의 상 체류량,  $g$ 는 중력 가속도이다.

#### Experiment

Fig. 1은 본 실험 장치를 나타낸 것으로써, 실험 장치는 직경 0.21m 이고, 높이가 2.5m인 반원 모양의 아크릴 관으로 제작하였다. 실제 실험영역의 높이는 1.8m이다. 실험 장치의 liquid분산판은 3.0mm 지름의 35개의 고른 분산 구멍을 통하여 공급되어진다. 그리고 gas분산판은 1.0mm 지름의 33개의 고른 분산 구멍이 liquid분산판 위에 위치하고

있다. 실험에서 연속상인 액체는 water를 사용하였고, 기체는 air를 사용하였다. 분산상인 고체입자는 평균직경이 0.388mm, 밀도  $2.5g/cm^3$  인 glass beads와 직경 3.3mm, 밀도  $1.28g/cm^3$ 인 polymer beads를 사용하였다. 두 입자의 구형도는 모두 1.0이다.

Column의 옆면에는 유동층 내부에서의 압력 강하를 측정하기 위해서 압력 측정 탭을 설치하였다. 압력변환기(PX-771A)를 사용하여 voltage 신호를 A/D변환기를 거쳐 한 개의 압력점 당 10Hz의 주파수로 100초 동안 측정하여 컴퓨터를 사용하여 통계적으로 처리하였다.

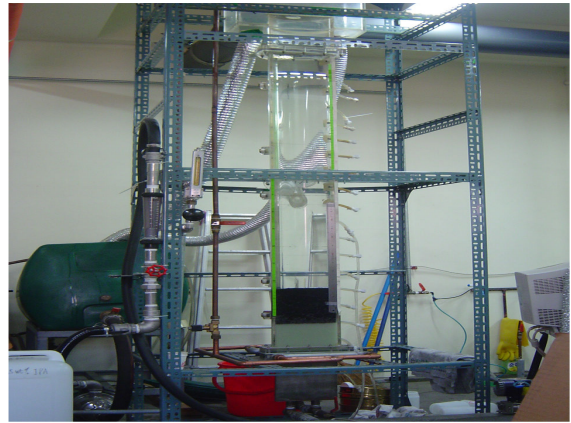


Fig. 1 실험 장치

**Results and discussion**

Fig. 2는 각 단일 고체상의 Liquid유속에 따른bulk density를 비교한 것이다. 고체-액체 유동층에서 solid layer inversion현상은 각 고체 단일상의 bulk density차이에 의해서 나타

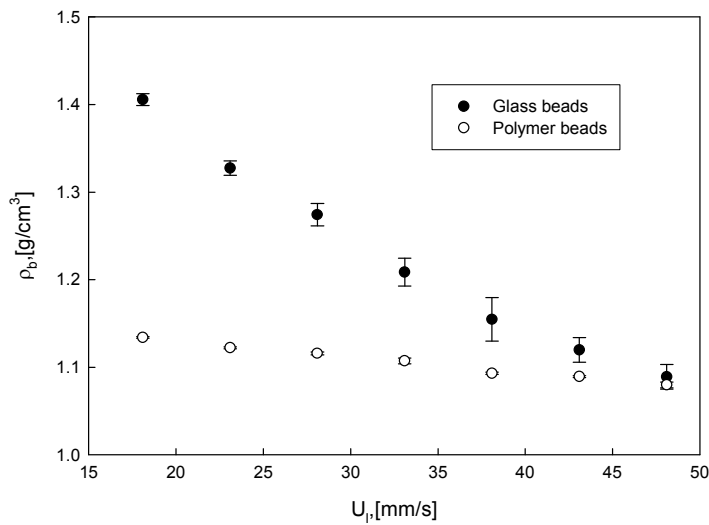


Fig. 2 Liquid유속에 따른 각 단일 고체상의 ρ<sub>b</sub> 비교

난다. Inversion point는 각 단일상의 bulk density가 같아지는 지점으로 고체 혼합상의 고체-액체 유동층에서 두 고체상이 전이되기 전 단계로써 서로 완벽하게 섞여있는 현상이다[3]. 이 그래프에서 각 상의 bulk density가 같아지는 점이 없기 때문에 고체 혼합상의 고체-액체 유동층에서 두 고체상이 전이되지 않을 것으로 예측되었다. 하지만 실험결과 Fig. 3과 같이 solid layer inversion현상이 일어났으며, inversion point도 liquid유속이 예측값보다 낮은 33.1mm/s에서 관찰 되었다.

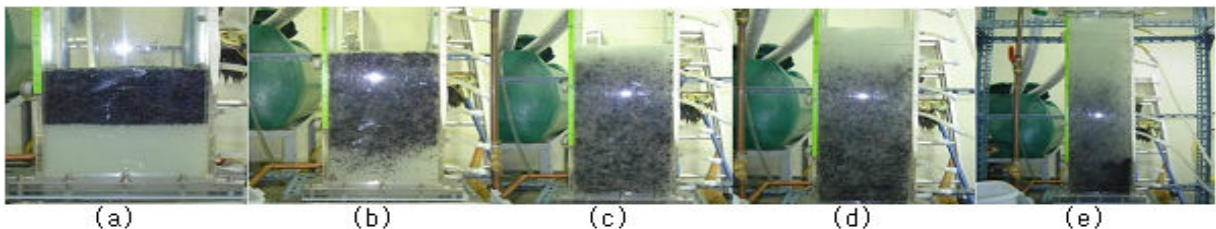


Fig. 3 Liquid유속에 따른 solid layer inversion현상. (a) 13.2mm/s (b) 28.1mm/s (c) 33.1mm/s (d) 38.1mm/s (e) 43.1mm/s

Fig. 4와 Fig. 5는 air 유속을 7.8mm/s로 고정시키고, liquid 유속을 변화시켜서 각 단 일고체상을 고체-기체-액체 유동화를 시켰을 경우 각 상들의 holdup을 나타낸 것이다. solid의 holdup은 liquid 유속이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었고, liquid의 holdup은 유속이 증가하기 때문에 증가하는 경향이 나타내었다. Gas의 holdup은 큰 차이를 나타내지 않았다.

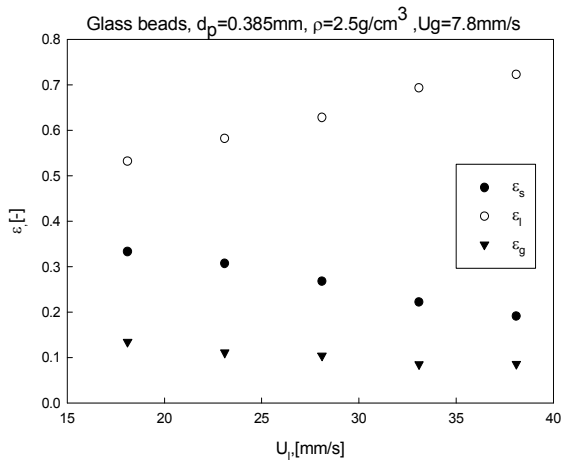


Fig. 4 Liquid 유속에 따른 phase holdup 비교 (Glass beads)

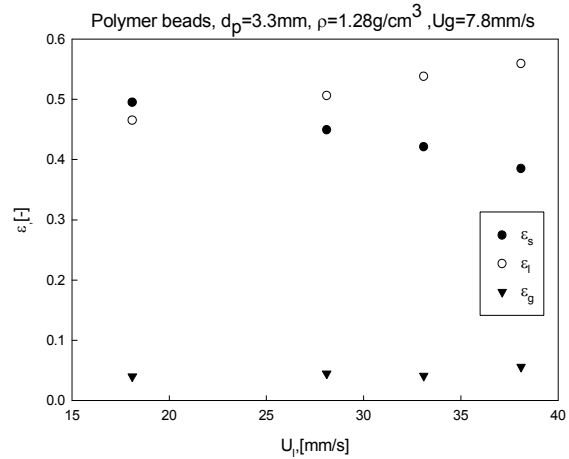


Fig. 5 Liquid 유속에 따른 phase holdup 비교 (Polymer beads)

Fig. 6은 gas 유속을 7.8mm/s로 고정시키고, liquid 유속을 변화함에 따른 고체 혼합물들의 고체-기체-액체 유동화를 나타낸 것이다. 위의 Fig. 3과 비교를 해 보았을 때, gas의 영향으로 두 고체입자들이 더 잘 섞이는 현상이 나타났다. 이는 gas의 유입으로 bulk density가 달라져서 solid layer inversion이 일어나지 않게 된 것이다.

Fig. 7은 고체-액체 유동층에 gas를 주입한 경우와 주입하지 않았을 경우의 층높이 변화를 비교한 것이다. Inversion point 이상에서 gas를 주입하였을 경우 층높이가 낮아지는 경향을 나타내었다. 밀도는 같고, 입자 크기가 다른 두 개의 고체입자를 혼합한 고체-기

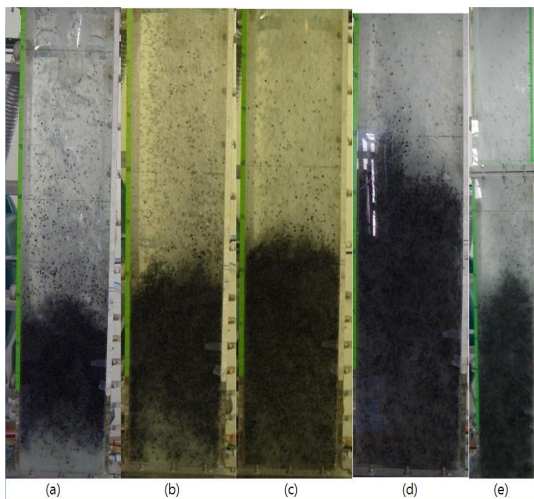


Fig. 6 유속에 따른 기-액-고 삼상에서의 solid layer (a) 18.1mm/s (b) 23.1mm/s (c) 28.1mm/s (d) 33.1mm/s (e) 38.1mm/s

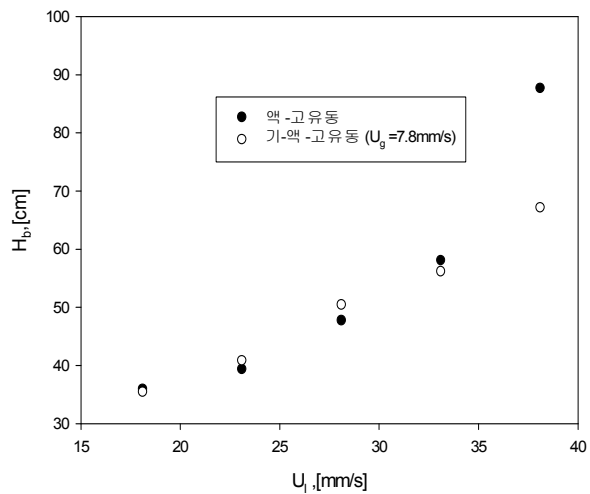


Fig. 7 기체 주입의 유무에 따른 고체층의 높이 비교

체-액체 유동층에서 작은 균일입자를 액체로 유동화 시킨 후, 기체를 주입하였을 때 층높이 감소 현상은 나타나지 않았다[5]. 그러므로 위 실험결과는 두 고체상의 밀도차이가 원인이라고 할 수 있을 것이다.

### **Conclusion**

고체혼합물의 액체-고체 유동층에서 inversion point는 예측 값보다 더 낮은 유량 범위를 나타내었으며 solid layer inversion이 나타났다. 단일 고체상들이 기-액-고 유동화에서 각각의 holdup은 liquid유속의 증가함에 따라 solid의 holdup은 감소하고, liquid의 holdup은 증가하였다. 고체 혼합물들의 액체-고체 유동화와 기체-액체-고체 유동화에서의 층높이를 비교하면 inversion point 이상에서 기체-액체-고체 유동화에서의 층높이가 낮아졌다.

### **References**

- [1] D. H. Lee, J. O. Kim and S. D. Kim, *Chem. Eng. Comm.*, 119, 179-196 (1993).
- [2] H. Moritomi, T. Iwase and T. Chiba, *Chem. Eng.* 37, 1751-1757 (1982).
- [3] N. Epstein and B. P. LeClair, *Chem. Eng.* 40, 1517-1526 (1985).
- [4] R. Jean and L. S. Fan, *Chem. Eng. Process.* 41, 2811-2821 (1986).
- [5] J. S. Oh and S. D. Kim, *KICHE*, 18, 5, 375-384 (1980).