

## 이상 및 삼상유동층에서 두 고체입자의 혼합

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

### Mixing of Binary Solid in Two- and Three-Phase Fluidized Beds

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

#### 서론

삼상유동층은 연속상인 액상에 분산상으로 존재하는 상승 기포와 고체 입자들의 거동에 의해서 동특성이 결정되어진다[1]. 이런 삼상유동층은 반응기내의 와류 혼합에 의하여 우수한 접촉효과를 나타낼 수 있다. 또한 높은 유속에서도 압력강하가 심하지 않으며 온도 조절이 용이한 장점을 가지고 있어 상업적인 응용이 많이 이루어지고 있다.

촉매 공정에서의 촉매 입자 및 비촉매 반응에서의 고체 입자들은 종종 입자의 크기 분포가 나타난다. 또한 생물학적인 삼상 유동층의 운전 중에 고체 입자 표면에서 예기치 않은 bio-film이 자라기 때문에 고체 입자들의 크기 및 밀도 분포가 달라진다.

입자의 크기 및 밀도가 다른 입자가 포함되어 있는 삼상유동층에서의 연구는 제한적으로 실험되어 왔다. Evstropova et al.[2]는 삼상유동층에서 가볍거나 무거운 입자들의 운동에 대해서 실험을 하였다. Epstein et al.[3]은 액-액 및 액-고체 입자들이 기체입자들에 의해서 교반되어 질 때 초기의 성층과 고체 입자들의 섞임에 대해서 연구하였다. Fan et al.[4]는 10여 가지의 여러 입자들을 사용하여 수력학적 특성에 대하여 연구하였다. 또한 Fan et al.[5]는 입자의 밀도는 비슷하나 다른 입자크기를 가지는 두 고체 입자들을 사용하여 고체입자들의 축 방향 농도 분포 및 mixing coefficients에 대하여 실험하였다.

본 실험에서는 두 고체 입자들의 포함되어 있는 액-고 유동층에서 inversion point를 결정 한 후에 inversion point전 후의 액체 유속에서 이상 및 삼상 유동층의 고체입자들의 축 방향에 농도 분포 및 mixing index를 살펴보았다.

#### 실험

본 실험장치는 반원 모양의 아크릴 관으로 제작되었으며 직경은 0.21m이고, 높이는 2.5m이다. 실제 실험영역의 높이는 1.8m이며 그림 1은 본 실험에 사용된 장치 개략도를 나타내었다. 본 실험에서 연속상인 액체는 물을 사용하였으며, 분산상인 기체는 공기를 사용하였다. 또한 분산상인 두 고체 입자로 크고 가벼운 입자로는 직경 3.3mm, 밀도  $1280\text{kg/m}^3$ 인 polymer beads를 사용하였고, 작고 무거운 입자로는 평균직경이 0.388mm, 밀도  $2500\text{kg/m}^3$ 인 glass beads를 사용하였으며 두 고체 입자의 구형도는 모두 1이다. 기체와 액체의 분산판은 두 유체가 동시에 분산 될 수 있도록 만들어 졌으며 고른 분산 구멍을 통하여 일정한 유속으로 분산되도록 만들어 졌다. Column의 옆면에는 유동층 내부에서의 압력 강하를 측정하기 위해서 분배기 0.06m 위에서부터 시작하여 압력 측정 탭을 일정한 간격으로 설치하였다. 압력변환기(PX-771A)를 사용하여 voltage 신호를 A/D변환기를 거쳐 한 개의 압력점 당 10Hz의 주파수로 100초 동안 측정하여 컴퓨터를 사용하여 통계적으로 처리하였다. 측정된 압력을 이용하여 층 높이를 측정하여 다음 식에 의해서 고

체의 체류량을 측정 할 수 있다.

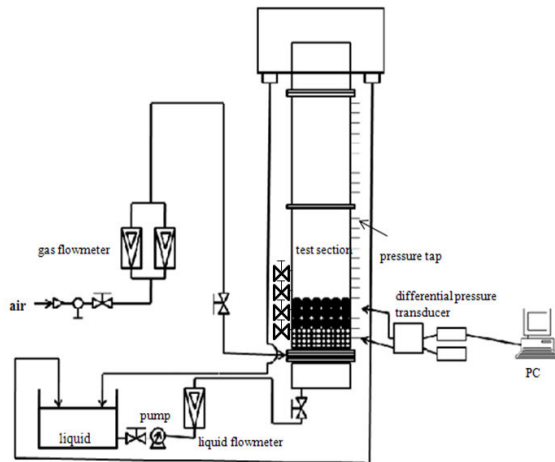


그림 1 장치 개략도

체류량,  $g$ 는 중력 가속도이다.

본 실험에서는 두 고체 혼합물의 부피비에 따른 기-액-고 유동층의 각 체류량은 위의 식들을 통하여 결정하였다. 또한 샘플링을 위해서 다른 측면에 볼밸브를 분산판 0.1m 위에서부터 시작하여서 일정 간격으로 설치하여 축 방향에 따른 고체 입자들의 농도 분포를 살펴 보았다.

### 결과 및 토의

그림 2는 액-고 유동층에서 액상의 유속에 따른 층 전이 현상을 나타내었다. 모든 유속은 두입자의 최소 유동화 속도 이상의 유속이다. Inversion point는 액상의 유속이 33.1mm/s 부근에서 나타났다. 그러나 삼상유동층에서는 기포의 혼합효과에 따라 층 전이 현상이 나타나지 않았다.

그림 3은 액-고 유동층에서 초기 부피비에 따른 두 고체 입자들의 축 방향 농도 분포를 나타내었다. 액상의 유속은 18.1mm/s이며, 그림 2(a)의 그림과 같은 상태이다. 부피비에 관련없이 층의 하단에서는 glass beads가 rich한 상태이고 층의 상단에서는 glass beads가 rich한 상태이다.

두 고체 입자들의 mixing index는 다음과 같이 정의 하였다.

$$M_I = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|x_i - \bar{x}|}{\bar{x}}}{n} \quad (4)$$

여기에서  $x_i$ 는 샘플링  $i$ 에서의 작은 입자의 부피비,  $\bar{x}$ 는 층 전체에서의 작은 입자들의 부피비를 나타낸다.  $M_I$ 의 값이 1에 근접할수록 혼합이 잘 된다는 것을, 0에 근접할수록 층 분리가 잘 된다는 것을 의미한다.

그림 4는 액-고 유동층에서 두 고체 입자들의 초기 투입비에 따른 mixing index를 액상의 유속에 따라 나타낸 그림이다. 초기에 액체의 유속이 증가하여 inversion point에서는 mixing index가 증가하였다. 이는 초기에는 두 고체 입자들이 분리되어 있기 때문에

$$\varepsilon_s = \frac{M_{s1}/\rho_{s1} + M_{s2}/\rho_{s2}}{AH_B} \quad (1)$$

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.

$$-\frac{\Delta P}{\Delta z} = (\varepsilon_l \rho_l + \varepsilon_g \rho_g + \frac{M_1 + M_2}{AH_B})g \quad (2)$$

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

$\varepsilon_l$ 는 액체의 상 체류량,  $\varepsilon_g$ 는 기체의 상

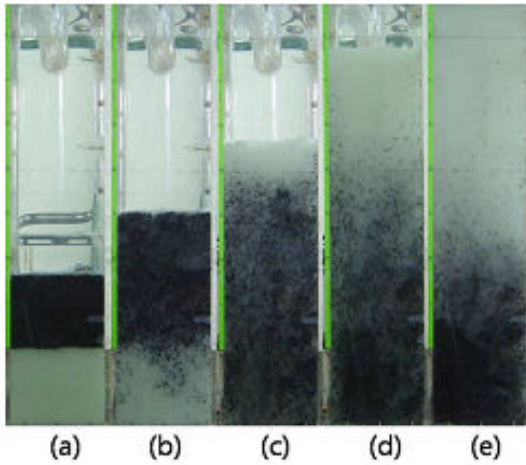


그림 2 액상의 유속에 따른 층 전이 현상 (부피비 1:1) (a) 18.2mm/s (b) 28.1mm/s (c) 33.1mm/s (d) 38.1mm/s (e) 43.1mm/s.

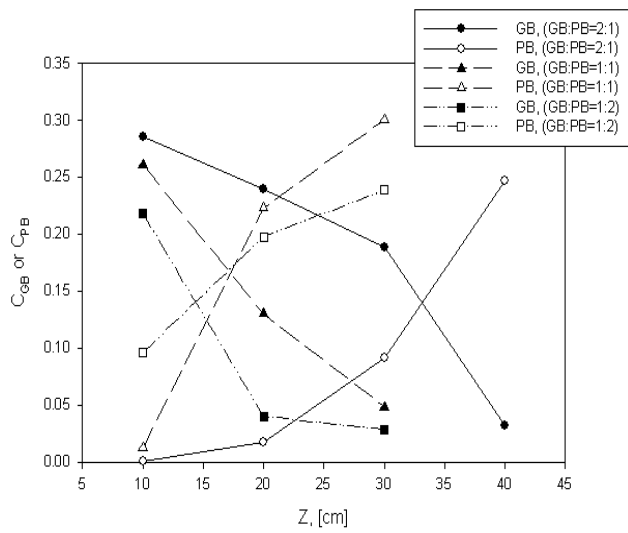


그림 3 액-고 유동층에서 초기 부피비에 따른 두 고체 입자들의 축 방향 농도 분포( $U_1=18.1\text{mm/s}$ ).

mixing index가 낮고 액상 유속이 증가함에 따라서 두 입자들이 섞이기 때문에 mixing index가 증가 하였다. Inversion point 이상의 액상 유속에서는 두 고체층이 섞여 있다가 층 전이 현상이 일어나서 다시 분리되었기 때문에 mixing index가 감소하였다.

그림 5는 기-액-고 유동층에서 두 고체 입자들의 초기 투입비에 따른 mixing index를 기상의 유속에 따라 나타낸 그림이다. 액-고 유동층에 기체를 투입하면 mixing index가 액-고 유동층의 inversion point와 관계없이 증가하는 현상을 나타내었다. 그리고 이 유속에서 기체의 flow regime은 기포분쇄영역이 나타났다. 기체가 투입함에 따라서 두 고체의 혼합정도가 좋아졌다.

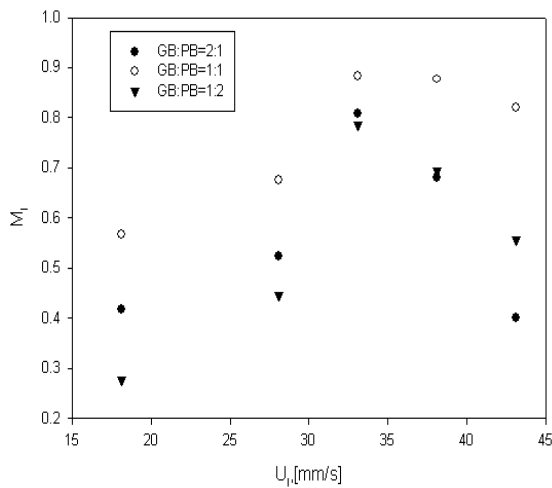


그림 5 액-고 유동층에서 액상의 유속에 따른 mixing index비교

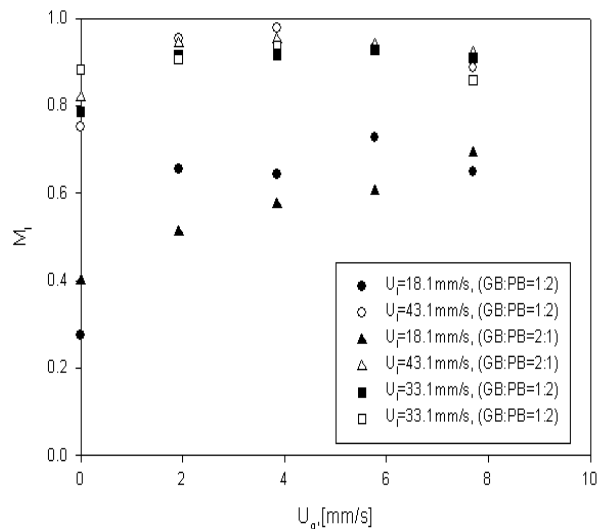


그림 4 삼상유동층에서 mixing index비교

**결론**

두 고체 입자들이 포함된 액-고 유동층에서 두 고체 입자들의 전이 현상은 액상의 유속이 33.1mm/s 이상에서 나타났다. 액-고 유동층에서 액체의 유속이 증가할수록 mixing index가 증가하였다가 inversion point 이상의 유속에서는 층 전이 현상이 일어났기 때문에 mixing index가 감소하였으나 기-액-고 유동층에서는 기체를 투입함에 따라 액-고 유동층의 inversion point 유속에 관계없이 mixing index가 증가하는 경향을 나타내었다.

### 참고문헌

- [1] Y. Kang, M. H. Ko, K. I. Kim, S. D. Kim, *Hwahak Konghak* **34**, 58-63(1996).
- [2] I. P. Evstropeva, I. N. Jaganov, P. G. Romankov, *Theor. Found. Chem. Eng.*, **6**, 545-549(1972).
- [3] M. Epstein, D. J. Petrie, J. H. Lineham, G. A. Lambert, D. H. Cho, *Chem. Eng. Sci.*, **36**, 784-787(1981).
- [4] L. S. Fan, A. Matsuura, S. H. Chern, *A. I. Ch. E. J.* 31 1801-1810(1985).
- [5] L. S. Fan, T. Yamashita, R. H. Jean, *Chem. Eng. Sci.*, **42**, 17-25(1987).