

## 두 고체 입자들의 액체-고체 및 기체-액체-고체 유동층에서의 고체입자들의 축방향 농도

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

### Axial Solid Concentration of Binary Solid in the Liquid-Solid and Gas-Liquid-Solid Fluidized Beds

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

#### 서론

유동화 (fluidization)는 기체, 액체 또는 기체와 액체가 동시에 접촉하여 고체입자들을 유체와 같이 유동성을 갖도록 조작하는 공정을 말한다. 액-고 유동층은 crystal growth, 침출 및 세척, 흡착, ion exchange, granular filters의 backwashing, bioreactor 등에 응용 된다[1]. 기-액-고 유동층은 헵탄의 수소 첨가 반응, Fischer-Tropsch 반응, 중질유나 synthetic crude의 hydrotreating과 conversion, 석탄 액화, 생물학적인 산화반응 및 탈황공정에 응용된다[2].

일반적인 고체상 체류량은 압력강하를 측정하여 층 높이를 이용하여 측정되어진다. 그 밖에도 여러 종류의 프로브들을 통해서 로컬 체류량을 측정할 수 있다. 감마선 스캐닝을 이용해서 CT촬영으로 고체상 체류량을 측정하기도 한다[3]. Shutter plates를 이용하여 시료를 직접 샘플링을 하거나 샘플러를 테스트섹션 상단에서 직접 투입하여 체류량을 측정하는 방법도 있다 [4,5].

이상 및 삼상 유동층에서의 고체입자들의 움직임들은 cinematography, radio pill, optical fiber probes, radioactive particle, CARPT(Computer Automated Radioactive particle Tracking)등에 의해서 측정되어진다.

두 고체 입자들이 포함된 이상 및 삼상 유동층에서 각 상들의 운동이 매우 복잡하기 때문에 여전히 잘 이해되어지지 않고 있다.

본 연구는 두 고체 혼합물들을 이용하여 이상 및 삼상 유동층에서의 기체 및 액체 유속에 따른 축방향 고체농도 프로파일을 측정하고 이를 비교하였다.

#### 실험

그림 1은 본 실험에 사용된 장치개략도를 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  $2500\text{kg}/\text{m}^3$  인 glass beads와 직경 3.3mm, 밀도  $1280\text{kg}/\text{m}^3$ 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. 압력변환기(PX-771A)를 사용하여 voltage 신호를 A/D변환기를 거쳐 한 개의 압력점 당 10Hz의 주파수로 100초 동안 측정하여 컴퓨터를 사용하여 통계적으로 처리하였다. 샘플링을 위해서 다른 측면에

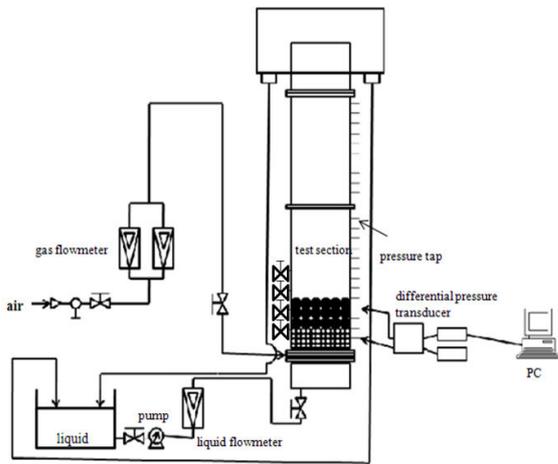


그림 1 장치 계략도

볼밸브를 분산판 0.1m 위에서부터 시작하여서 일정 간격으로 설치하였다.

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

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

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.

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

$$\epsilon_l + \epsilon_s + \epsilon_g = 1.0 \quad (3)$$

$\epsilon_l$ 는 액체의 상 체류량,  $\epsilon_g$ 는 기체의 상 체류량,  $g$ 는 중력 가속도이다.

결과 및 토의

그림 2는 액체의 유속에 따른 고체층의 전이현상을 나타낸 것이다. 액체의 유속이 증가함에 따라서 밀도가 크고 입자의 크기가 작은 glass beads의 층이 전이되는 현상이 나타났다.

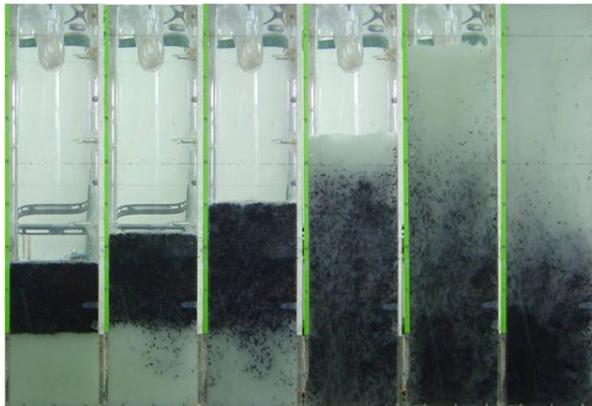


그림 2 Liquid유속에 따른 solid layer inversion현상. (a) 18.2mm/s (b) 23.1mm/s (c) 28.1mm/s (d) 33.1mm/s (e) 38.1mm/s (f) 43.1mm/s

같은 액체의 유속 범위에서 기체의 유속을 7.8mm/s로 고정시켜서 단일 고체입자가 포함된 유동층에서 각 상의 체류량을 비교한 것이 그림 3이다. 액체의 유속이 증가함에 따라서 층높이가 팽창하기 때문에 체류량은 액체 유속이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었고, 액체의 체류량은 유속이 증가하기 때문에 증가하는 경향이 나타내었다. 기체의 체류량은 액체의 유속에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다. 삼상 유동층에서 Kato et al.[6]은 dense한 영역에서 고체의 체류량을 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$\epsilon_s = \epsilon_s^* [1 - 1.09(1 + 0.00124Re_t^{0.8})(U_l/U_t)^{0.85}] \quad (4)$$

구형입자에서  $\epsilon_s^*$ 는 위식에서 0.63이다.

본 실험의 고체 체류량은 Kato et al.[6]의 실험식과 비슷한 경향을 나타내었다.

그림 4는 액-고 유동층에서 두 고체입자들의 축방향 고체농도를 액체의 유속에 따라 나타낸 그림이다. 액체 유속이 18.1mm/s일 때, 두 고체 입자들이 separation되었으며 고체층의 하단부에는 glass beads, 상단부에는 polymer beads가 rich한 상태로 나타났다. 액체의 유속이 33.1mm/s의 경우에는 두 고체입자들이 섞여 있었으며 그 경우 전체적으로 두 고

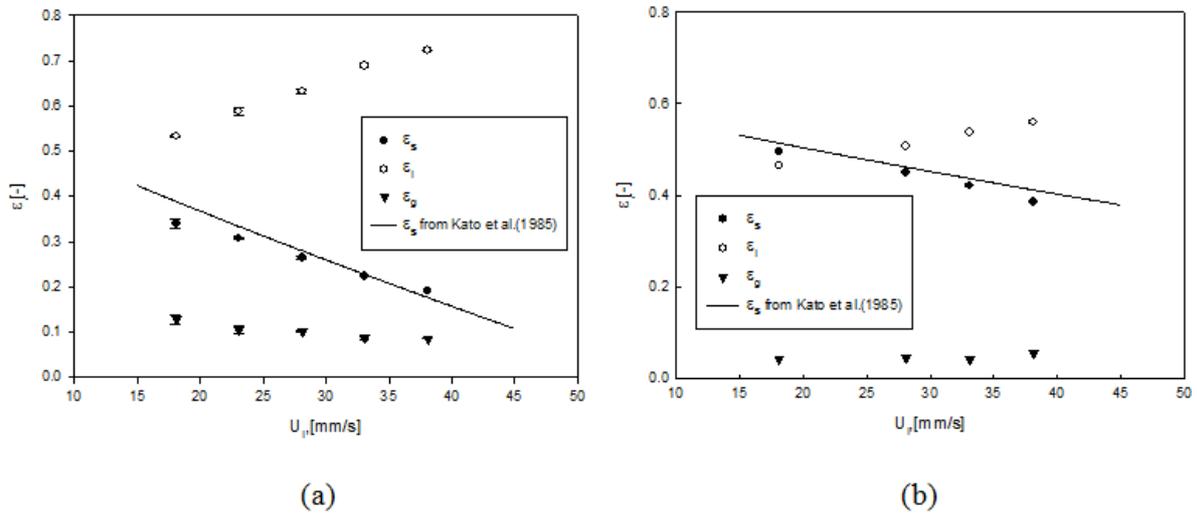


그림 3 액체유속에 따른 각 상의 체류량( $U_g=7.8\text{mm/s}$ ). (a) Glass beads (b) Polymer beads

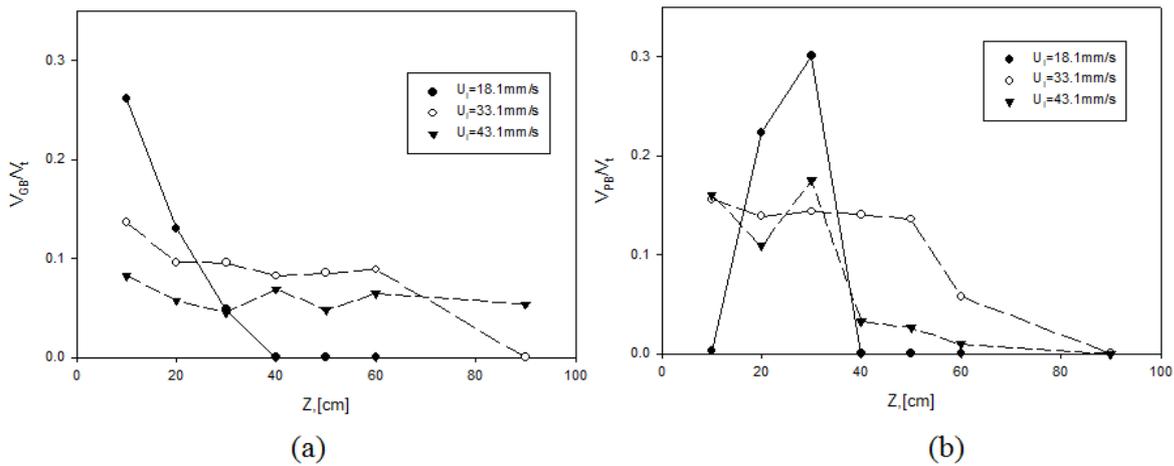


그림 4 액-고 유동층에서 고체입자들의 축방향 분포. (a) Glass beads (b) Polymer beads

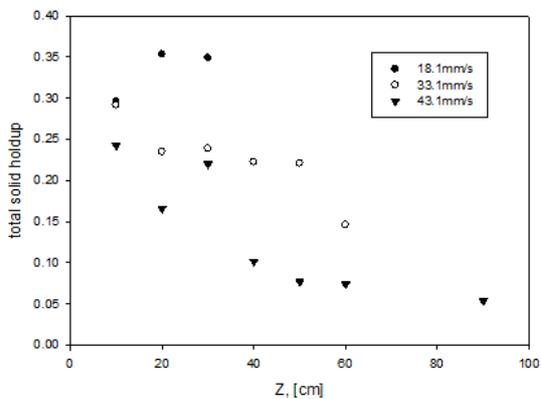


그림 5 축방향에 따른 총 고체 체류량

체입자들이 축방향으로 고루 분포되어 있었다. 액체 유속이 43.1mm/s의 경우에는 glass beads 층이 전이된 상태이며 고체층의 하단에는 polymer beads와 glass beads가 섞여 있었으며, 그 경우에 polymer beads가 층 하단부에 많은 상태로 분포되어 있었다.

그림 5는 축방향에 따른 총 고체 체류량을 나타내었다. 유속이 18.1mm/s의 경우에 압력 측정에 의한 총 고체 체류량은 0.393, 층 높이에 의해서는 0.382가 나왔으며 샘플링에 의한 방법이 약 10%의 오차가 있었다. 유속이 33.1mm/s의 경우에는 압력측정에 의한 총 고

체 체류량은 0.217, 높이 측정에 의해선 0.22였다. 유속이 43.1mm/s의 경우에 총 고체 체류량은 측방향으로 40cm 이상에서 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 glass beads는 층 전체에 고루 분포되어 있으나 polymer beads는 층 아래에만 분포되어 있기 때문이다.

### 결론

유동층에서 두 고체층의 전이 현상을 확인하였다. 단일 고체입자가 포함된 삼상 유동층에서 고체의 체류량은 Kato et al.[6]의 식과 유사한 값을 나타내었다. 고체입자들의 측방향 분포는 그림2와 비슷하게 액체의 유속에 따라 다른 값들을 나타내었으며 총 고체체류량은 유속이 43.1mm/s에서 측방향에 따라서 명확히 다른 값들을 나타내었다. 삼상유동층에서의 고체입자들의 측방향 분포에 대해서 측정을 하고 비교할 예정이다.

### 참고 문헌

- [1] N. Epstein. *Int. J. Che. Rea. Eng.*, **1**, (2003).
- [2] L. S. Fan. *Pow. Tech.*, **88**, 245-253(1996).
- [3] S. Limtrakul, J. Chen, P. A. Ramachandran, M. P Duduković, *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 1889-1900(2000).
- [4] L. S. Fan, T. Yamashita, R. H. Jean, *Chem. Eng. Sci.*, **42**, 17-25(1987).
- [5] N. Epstein, B. B. Pruden, *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 401-415(1999).
- [6] Y. Kato, S. Morooka, T. Kago, T. Saruwatari, S. Z. Yang, *J. Chem. Eng. Japan.*, **18**, 308-313(1985).