

## 삼상 유동층에서 층붕괴를 이용한 Bubble Drift Velocity

박성수, 강석민, 한귀영, 이동현\*, 김상돈<sup>1</sup>

성균관대학교 화학공학과

<sup>1</sup>한국과학기술원 생명화학공학과

(dhlee@skku.edu\*)

## Bubble drift velocity from the bed collapse technique in three-phase fluidized beds

SungSoo Park, SeokMin Kang, Gui Young Han, DongHyun Lee\*, and Sang Dong Kim<sup>1</sup>

Department of Chemical Engineering, SungKyunKwan University

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering and Energy & Environment Research Center, Korea

Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon

(dhlee@skku.edu\*)

## 서론

삼상유동층은 고체입자를 두 종류의 비혼합성 유체로 유동화시키는 공정을 의미한다. 삼상유동층에서 분배기는 연속상인 액체와 분산상인 기체를 동시에 분사시킴으로써 분산상인 고체와 기포의 균일한 유동흐름으로 유지시킬 수 있으며, 각 상들간의 접촉이 매우 효과적이고 유동층 내에서의 압력강화를 줄일 수 있고, 열 및 물질전달 효과가 우수하다는 장점을 갖고 있다 [Fan, 1989; Wright and Raper, 1996].

삼상유동층은 많은 상업적 공정에 적용되고 있는데, 직접 석탄 액화공정 [H-coal process; Li and Liu, 1981], 중질잔유류의 수소첨가 [H-oil process; Beaton et al., 1987] 과 생물학적 폐수처리 [Tang and Fan, 1987] 등이 대표적인 예이다. H-coal process와 같은 삼상유동층은 고온, 고압에서 반응이 수행되므로 기포의 크기가 작고 균일한 dispersed bubble flow regime에서 운전되고 있다 [Fan, 1989].

본 연구는 삼상유동층에서의 bubble drift velocity를 예측 할 수 있는 이론식을 제시하였으며, 이론식과 실험결과를 비교하기 위하여 bed collapse technique을 사용하였다. Chen 과 Fan [1990]이 시도한 gas-liquid를 동시에 shut down 시키는 bed collapse technique의 단점을 보완하여 연속상인 액상을 최소유동화 속도 이상으로 유지시킨 상태에서 분산상인 기상만을 차단함으로써 상승하는 기포가 하강하는 고체층에 갇히는 현상을 방지할 수 있도록 개선된 실험을 하였다.

## 실험

실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직경 0.21m이고, 높이가 2.5m인 반원 모양의 acryl column으로 제작(실험 영역의 높이는 1.8m)되었다. 이 실험장치의 분산판은 액체와 기체가 같은 면에서 동시에 분산될 수 있도록 만들어졌으며, 연속상인 액체는 deionized water, 분산상인 기체는 공기를 사용하고, 고체입자로는 직경이 3.0mm이고, 밀도가 2,475kg/m<sup>3</sup> 구형도가 1.0 인 유리구슬을 사용하였다. 액체와 기체상의 두 흐름이 같은 방향으로 유입시켰으며, 정지층의 높이(H<sub>Bo</sub>)는 H/D가 2 이상이 되도록 0.5m 보다 높도록 하였다. 실험유속의 범위는 기체유속이 0.0-63.9mm/s, 액체유속이 0.0-50.1mm/s에서 변화시키면서 실험을 하였다. 액체는 직경 16mm 유리 poll rings으로 채워진 chamber에서 유입

되어 직경 3.0mm의 35개의 고른 분산 구멍을 통해 유동층에 하부의 분산관에 고르게 공급되며, 기체는 직경 1.0mm 구멍 33개인 튜브를 통해 액상 분산관 위에서 공급된다. 유동층 내부에서의 축방향 압력강하(dynamic pressure fluctuations)를 측정하기 위하여 액체 분배기으로부터 0.05m 위에서부터 시작하여 0.1m 높이 간격으로 압력측정 탭을 설치하였다. 여기서 압력변환기(PX-771A)를 사용하여 voltage 신호를 A/D 변환기를 거쳐 한 개의 압력점 당 22Hz로 60초의 자료를 컴퓨터로 입력받아 통계적 처리를 하였다.

정상상태의 삼상유동층에서의 각 상의 상체류량은 다음 세 개의 식으로부터 정지압력강하, 확장된 층 높이, 고체의 무게를 가지고 다음식을 통해 계산되어진다.

$$-\frac{\Delta P}{\Delta z} = (\epsilon_g \rho_g + \epsilon_l \rho_l + \epsilon_s \rho_s) g \quad (1)$$

$$\epsilon_g + \epsilon_l + \epsilon_s = 1.0 \quad (2)$$

$$\epsilon_s = \frac{M_p / \rho_s}{\frac{\pi}{4} D_t^2 \frac{1}{2} H_B} \quad (3)$$

기체와 액체의 상체류량은 관벽면에 부착된 압력 측정탭에 의해 측정된 압력강하로 계산할 수 있다. 또한 이렇게 얻어진 상체류량을 가지고 삼상유동층에서의 bubble drift velocity를 이론적으로 계산하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 regime 2는 기포가 없는 액체-고체 유동층이며, regime 3는 기체-액체-고체 삼상이 공존하는 영역이며, regime 4는 고체입자가 없는 기체-액체 system이다. Boundary 2에 대한 각 상의 물질수지식은 다음과 같다.

$$\text{Gas} : (V_{g3} - C_2) \epsilon_{g0} = 0 \quad (4)$$

$$\text{Liquid} : (V_B - C_2) \epsilon_0 = (V_L - C_2) \epsilon''_L \quad (5)$$

$$\text{Solid} : (V_{s3} - C_2)(1 - \epsilon_0 - \epsilon_{g0}) = (V_{s2} - C_2) \epsilon''_L \quad (6)$$

Dynamic bed 인 regime 3에서 기상과 고체상 사이의 상대속도 다음과 같다.

$$V_{s3} - V_{g3} = -\frac{U_0}{\epsilon_0} \quad (7)$$

액체-고체 유동지역에서 각 상의 upward velocity는 다음과 같다.

$$V_L = \frac{U_0}{\epsilon''_L} \quad (8)$$

$$V_{s2} = 0 \quad (9)$$

Dynamic system에 대한 식(4)에서 식(9)에서 미지수  $C_2$ ,  $V_L$ ,  $V_{s2}$ ,  $V_{g3}$ ,  $V_{s3}$ 이며, 각 식을 연립하여 풀면, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{g3} = C_2 = \frac{\frac{U_{g0}}{\epsilon_{g0}} (1 - \epsilon_0 - \epsilon_{g0})}{1 - \epsilon''_L} \quad (10)$$

기포상승속도,  $U_b$ 는 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$U_b = \frac{U_{g0}}{\epsilon_{g0}} = \frac{U_{g0} + U_0}{\epsilon_{g0} + \epsilon_0} + U_{bd} \quad (11)$$

여기서  $U_{bd}$ 는 삼상유동층에서 bubble drift velocity이며 다음과 같이 표현된다.

$$U_{bd} = \left( \frac{C_2 \epsilon''_L \epsilon_0}{\epsilon_{s0}} - U_0 \right) \frac{1}{1 - \epsilon_{s0}} \quad (12)$$

Bed collapse technique을 이용하여 삼상유동층의 drift flux model에 적용하여 bubble drift

velocity를 식(12)를 통해 계산할 수 있다.

또한 주어진 기체와 액체유속에서 정상상태를 유지 시킨 상태에서, 기체 공급라인의 볼 밸브를 빠르게 차단시키면, 확장된 층이 갑자기 붕괴가 일어난다. 층붕괴가 일어나기 전 삼상 유동층에서의 정상상태를  $t_0$ 로 두고 기체의 공급을 차단시킨 후의 층 붕괴에 순간적 변화를 초당 30프레임으로 동영상 촬영을 하였으며, 촬영된 동영상 분석을 통하여 층붕괴가 일어난 이후 기포가 빠져나간 층이 명확해 질 때의 층의 높이와 시간을 관찰하여,  $C_2$ 와 bubble drift velocity를 계산하였다. 이 실험결과를 각 상체류량의 결과를 이용하여 얻은 이론식과 비교하였다.

### 결과 및 고찰

동영상 분석을 통한 층 붕괴 과정은 Fig. 3에서 보는 바와 같다. (a)에서는 기체의 공급을 차단하기 전의 삼상에서의 정지화면이고, (b)는 기체의 공급이 차단된 이후 1.33초 이후 기포가 빠져나가고  $C_2$ 의 경계층이 명확하게 되었을 때의 정지화면이다. 이때의 높이는 60cm가 됨을 알 수 있다. 이와 같이 다른 유속에서도 동영상을 분석하였다. 기체의 공급이 차단된 이후에는 시간이 지남에 따라 층높이가 증가한다. 처음에는 매우 빠르게 기포가 빠져나가며 점차적으로 액-고 유동층으로 바뀐다. Fig. 4는 삼상유동층에서 액체의 유속에 따른 기상 체류량의 변화를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 액체의 유속이 증가함에 따라 기상 체류량이 감소함을 알 수 있다. 삼상유동층과 액-고 유동층에서의 상체류량의 측정값을 이용하여 식(10)과 식(12)로부터  $C_2$ 값과  $U_{bd}$ 의 이론값을 계산하였다. Fig. 5는 이론적으로 계산된  $C_2$ 값과  $U_{bd}$ 의 변화를 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 액상유속의 증가에 따라  $C_2$ 의 값과  $U_{bd}$ 는 증가하는 경향을 예측하였다.

### 참고문헌

1. Bhatia, J. K, and N, Epstein, "Three-Phase Fluidization; A General Wake Model," Proc. Int. Symp. on Fluidization and Its Application, Cepadues-Editions, Toulouse(1974).
2. Chen, Y. M. and L. S. Fan, "Drift Flux in Gas-Liquid-Solid Fluidized Systems from the Dynamics of Bed Collapse," *Chem. Eng. Sci.*, **45**, 935 (1990).
3. Epstein, N., "Three-Phase Fluidization; Some Knowledge Gaps," *Can. J. of Chem. Eng.*, **59**, 649 (1981).
4. Fan, L. S., "Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering," Butterworth, Stoneham, MA(1989).
5. Jin, Y. and J. Zhang, "Bed Collapse Technique for Estimating Parameters of Generalized Wake Model for a Three-Phase Fluidized Bed," Proc. 5<sup>th</sup> Chinese National Fluidization Conference, Beijing, 327(1990).
6. Kwauk, M., "Fluidization," Science Press(1992).
7. Lee, D. H., J. O. Kim and S. D. Kim, "Mass Transfer and Phase Hold-up Characteristics in Three-Phase Fluidized Beds," *Chem. Eng. Comm.*, **119**, 179(1993).

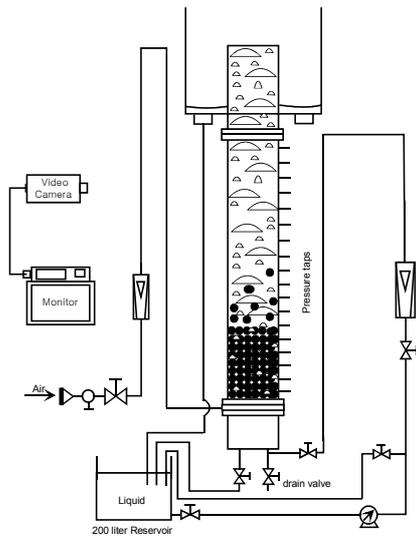


Fig. 1. 실험 장치도.

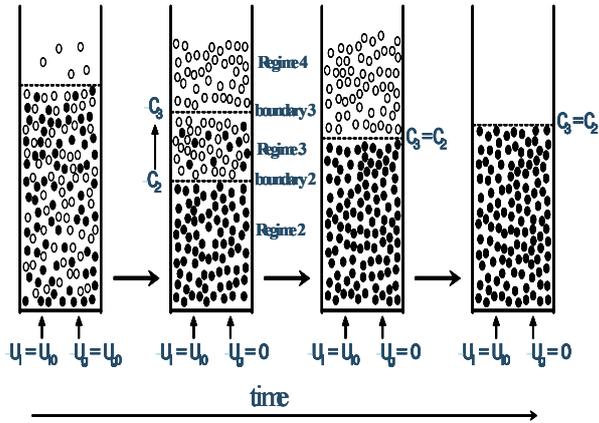
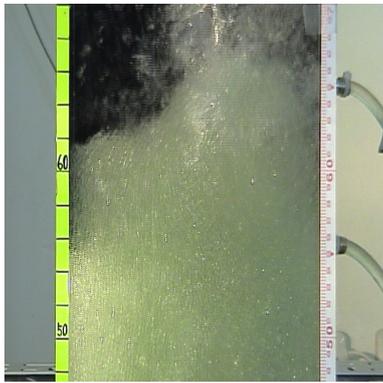
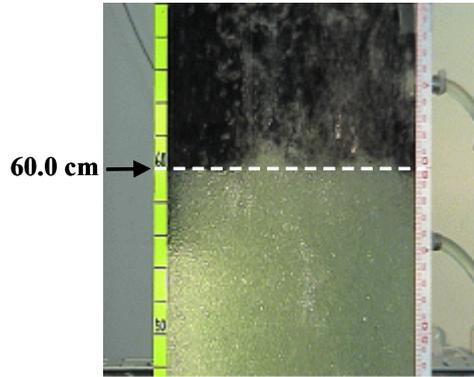


Fig. 2. 삼상유동층에서 시간에 따른 층의 변화.



(a)



(b)

Fig. 3. 삼상유동층에서 동영상 분석 자료 ( $U_l=45.2\text{mm/s}$ ,  $U_g=48.0\text{mm/s}$ ).

(a)  $t=0\text{s}$  에서의 정지화면, (b)  $t=1.33\text{s}$  에서의 정지화면

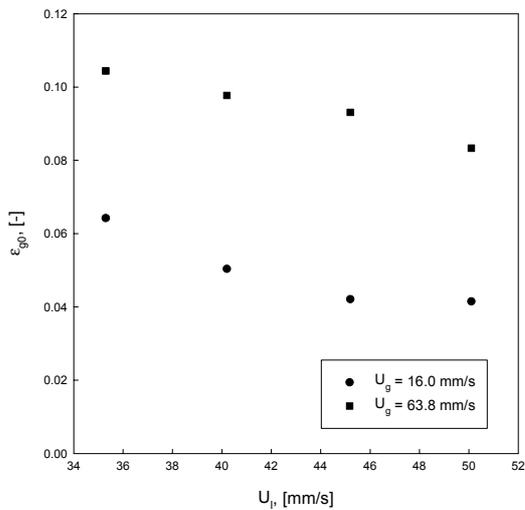


Fig. 4.  $U_l$ 에 따른 기체의 상체류량.

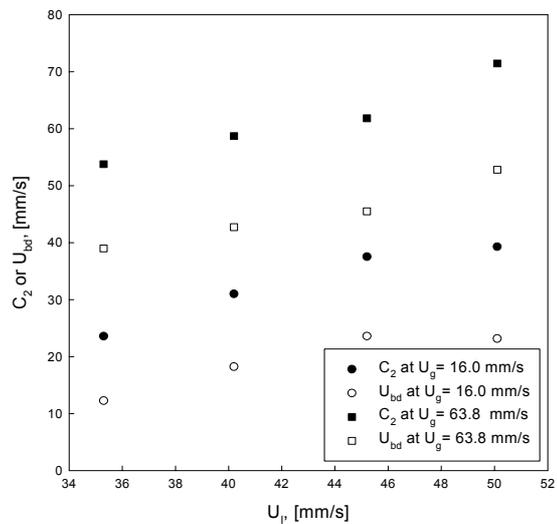


Fig. 5. 이론식에 의한  $C_2$ ,  $U_{bd}$  계산.