

기-액 유동층에서의 Bubble Drift Velocity 에 관한 연구

박성수, 강석민, 이동현*, 김상돈¹
 성균관대학교 화학공학과
¹한국과학기술원 생명화학공학과
 (dhlee@skku.edu*)

A Study of Bubble Drift Velocity in Gas-Liquid Fluidized Beds

SungSoo Park, SeokMin Kang, DongHyun Lee*, and Sang Dong Kim¹

Department of Chemical Engineering, SungKyunKwan University,

¹Department of Chemical Engineering and Energy & Environment Research Center, Korea
 Advanced Institute of Science and Technology,
 (dhlee@skku.edu*)

서론

유동화(fluidization)란 고체 입자층에 유체(기체 또는 액체)를 유입시켜 고체와 유체가 하나의 유체와 같은 행동을 하는 현상을 말한다. 이러한 삼상 유동층의 수력학적 특징으로써 상 체류량, 기포 특성, 혼합 특성에 대한 연구가 이루어져 왔다. 그러나 삼상 유동층 내부는 난류 흐름계이며 기포의 생성, 합체 및 분쇄가 일어나게 되어 그 내부의 유동 현상이 매우 복잡하다. 실제 반응기 성능을 예측하기 어렵기 때문에 공장 규모로 대형화하기 힘들다. 그러므로 삼상 유동층 반응기의 효율적인 응용을 위하여 수력학적 특성에 대한 연구의 필요성이 있다.

H-coal process와 같은 삼상 유동층은 고온, 고압 하에서 반응이 이루어지므로 기포의 크기가 작고 균일한 dispersed bubble flow 영역에서 운전되고 있다[Fan et al., 1986]. 이러한 고온, 고압하에서의 실험은 많은 비용이 소요되며, 그 거동을 쉽게 알기 어렵다. 따라서 이론적인 관점으로 볼 때, 상온, 상압하에서 이와 유사한 dispersed bubble flow 영역에서의 수력학적 특징을 분석하여 flow regime에 대한 특성을 살펴본다는 것은 중요하고 볼 수 있다. 여기서 층붕괴 기술(bed collapse technique)을 이용하여 이론적으로 해석하고 이상 유동층에 적용되는 drift flux model을 삼상 유동층에 적용하여 dispersed bubble flow 영역에 대한 해석은 큰 의미가 있다.

실험

본 실험에 앞서 bubble drift velocity에 대한 이론식은 dispersed bubble flow 영역에서 모델화 하였기 때문에 먼저 육안관찰을 통하여 액체, 기체의 유속에 따라 분산된 기포흐름(dispersed bubble flow), 분리된 기포흐름(discrete bubble flow), 합체된 기포흐름(coalesced bubble flow)로 흐름영역(flow regimes)을 나누어 table 1에 나타내었다[Zhang et al, 1997]. 또한 Chen and Fan [1990]이 기체와 액체의 흐름을 동시에 차단시킨 후 삼상유동층에서 발생하는 층붕괴 과정의 동적인 특성을 설명하였는데, 기체와 액체의 공급을 동시에 차단시킨 후의 액체-고체 영역에는 기포들이 존재하지 않는다는 가정하에서 모델화 하였다. 하지만 무거운 고체 입자들이 급격히 하강하기 때문에 많은 기포들이 액체-고체 층영역에 갇히게 된다. 따라서 이러한 단점을 보완하여 연속상인 액체를 최소 유동화 속도 이상

으로 유지시킨 상태에서 기체만을 차단시킴으로서 기존 모델을 보완하여 증봉괴되는 과정에서 상승하는 기포가 하강하는 고체층에 갖히는 현상을 방지할 수 있는 좀 더 개선된 실험하였다.

실험에 사용된 장치는 Fig. 1과 같이 직경 0.21m이고, 높이가 2.5m인 반원 모양의 아크릴관으로 제작되었다. 실험에는 고체입자로 직경 3.1mm이고, 밀도가 $2,475\text{kg/m}^3$ 이며, 구형도가 1.0 인 glass beads, 기체상은 air, 액체상으로 deionized water를 사용하였다. 또한 일정한 속도로 기체 흐름을 차단하기 위한 장치로 solenoid valve를 설치하였다. 실험유속의 범위는 흐름영역과 액상 최소유동화속도를 고려하여 기체유속이 0.0-41.5mm/s, 액체유속이 0.073-0.103m/s에서 변화시키면서 실험을 하였다. 유동층 내부에서의 측방향 압력강하(dynamic pressure fluctuations)를 측정하기 위하여 액체 분배기로부터 0.06m 위에서부터 시작하여 0.1m 높이 간격으로 압력측정 탭을 설치하였다. 여기에 압력변환기(PX-771A)를 사용하여 voltage 신호를 A/D 변환기를 거쳐 한 개의 압력점 당 10Hz로 60초의 자료를 컴퓨터로 입력받아 통계적 처리를 하였다.

삼상 유동층에서 각상의 체류량은 각상이 차지하고 있는 체적분율로써 정상상태의 삼상유동층에서 각 상의 상체류량은 다음 세 개의 식으로부터 정지압력강하, 확장된 층 높이(H_B), 고체의 무게(M_s)를 가지고 계산되어진다.

$$\epsilon_s = \frac{M_s}{\rho_s A H_B} \quad (1)$$

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

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

또한 이렇게 얻어진 상체류량을 가지고 삼상유동층에서의 bubble drift velocity를 이론적으로 계산하였다. 먼저 식(4), (5), (6)에서 기-액-고 유동층인 regime 2에서의 상체류량은 초기 정상상태의 기체-액체-고체 유동층상태에서의 상체류량과 같다고 가정하였으며, regime 1에서 각 상체류량은 액체-고체 유동층에서의 상체류량과 같다고 가정하였다. Boundary 1에 대한 각 상의 물질수지식은 다음과 같다.

$$\text{Gas : } (V_{g2} - C_1)\epsilon_{g0} = 0 \quad (4)$$

$$\text{Liquid : } (V_{l2} - C_1)\epsilon_{l0} = (V_{l1} - C_1)\epsilon''_{l1} \quad (5)$$

$$\text{Solid : } (V_{s2} - C_1)(1 - \epsilon_{l0} - \epsilon_{g0}) = (V_{s1} - C_1)\epsilon''_{s1} \quad (6)$$

Dynamic bed 인 regime 2에서 기상과 고체상 사이의 상대속도 다음과 같다.

$$V_{s2} - V_{g2} = -\frac{U_D}{\epsilon_{l0}} \quad (7)$$

액체-고체 유동지역에서 각 상의 upward velocity는 다음과 같다.

$$V_{l1} = \frac{U_D}{\epsilon''_{l1}} \quad (8)$$

$$V_{s1} = 0 \quad (9)$$

Dynamic system에 대한 식(4)에서 식(9)에서 미지수 C_1 , V_{l1} , V_{s1} , V_{g2} , V_{l2} , V_{s2} 이며, 각 식을 연립하여 풀면, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{g2} = C_1 = \frac{U_{g0} (1 - \epsilon_{l0} - \epsilon_{g0})}{\epsilon_{g0} (1 - \epsilon''_{l1})} \quad (10)$$

기포상승속도, U_b 는 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$U_b = \frac{U_{g0}}{\epsilon_{g0}} = \frac{U_{g0} + U_D}{\epsilon_{g0} + \epsilon_{l0}} + U_{bd} \quad (11)$$

여기서 U_{bd} 는 삼상유동층에서 bubble drift velocity이며 식(11)을 식(10)과 연립하여 U_{bd} 에 대한 식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$U_{bd} = \left(\frac{C_1 \epsilon'_{s0} \epsilon_D}{\epsilon_{s0}} - U_{g0} \right) \frac{1}{1 - \epsilon_{s0}} \quad (12)$$

즉, bubble drift velocity는 액-고 유동층과 기-액-고 유동층에서의 각 상체류량을 알면 식(12)를 통하여 계산할 수 있다.

이를 검증하기 위한 방법으로 일정한 기체와 액체유속 정상상태에서의 축방향 압력강하 측정을 끝낸 후, 기체 공급라인의 solenoid valve를 이용하여 기체의 흐름을 차단시킴으로써 층붕괴 현상을 관찰하였다. 기체의 흐름이 차단되면 확장된 층이 갑자기 붕괴가 일어난다. 기체의 흐름을 차단시켜 층붕괴가 일어나기 시작한 시간을 t_0 라고 하고, 기체의 공급을 차단시킨 후의 층붕괴에 순간적 변화를 초당 30프레임으로 동영상 촬영을 하였다. 이렇게 촬영된 동영상 분석을 통하여 층붕괴가 일어난 이후 기포가 빠져나간 층의 높이와 시간을 관찰하여, 이론적인 C_1 을 얻어 bubble drift velocity을 실험적으로 계산하였다. 이 실험결과를 상체류량을 통해 얻은 bubble drift velocity 값과 비교하였다.

결과 및 고찰

액체 유속이 102.9 mm/s 일때, 동영상 분석을 통해 얻은 시간에 따른 boundary 2의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 기체의 유속 12.8 mm/s에서는 흐름영역이 dispersed bubble flow으로써 기포의 크기가 작고 균일하기 때문에 그 감소가 완만하며, 41.5 mm/s에서는 coalesced bubble flow 영역으로 기포의 크기가 상대적으로 크기 때문에 기체의 흐름을 차단한 이후 빠르게 층높이가 하강함을 알 수 있으며, 유속 22.3mm/s에서는 두 흐름의 중간부분에 해당됨을 알 수 있다. 또한 기체-액체-고체 유동층과 액-고 유동층에서의 상체류량의 측정값을 식(11)에 대입하여 얻은 C_1 과 동영상 분석을 통해 얻은 C_1 을 식(12)에 대입하여 bubble drift velocity를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 기체의 유속 12.8 mm/s 이하 dispersed bubble flow 영역에서는 U_{bd} 값이 유사함을 알 수 있었다. 기체의 유속이 증가함에 따라 흐름영역이 바뀌면 이론적으로 값과 동영상 분석결과는 차이가 생기며, 이는 기포의 크기가 heterogeneous 하기 때문에 생기는 오차라고 생각된다. 차후 본 실험은 6.0 mm, 밀도 2,422 kg/m³의 glass beads를 사용하여 입자의 크기에 따른 영향을 살펴볼 계획이다.

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. 5th Chinese National Fluidization Conference, Beijing, 327(1990).
6. 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).
7. Zhang, J.P., Grace, J. R. and Epstein, N. : *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 3979(1997)

Table 1. 유속에 따른 흐름 영역

U_g [mm/s] \ U_l [mm/s]	6.4	8.0	9.6	11.2	12.8	14.4	16.0	17.6	19.1	20.7	22.3	23.9	25.5	27.1	28.7	30.3	31.9	33.5	35.1	36.7	38.3	39.9	41.5	
73.0	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
83.0	P	P	P	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C
92.9	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C
102.9	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C
112.9	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C

(P: dispersed bubble flow, D : discrete bubble flow, C : coalesced bubble flow)

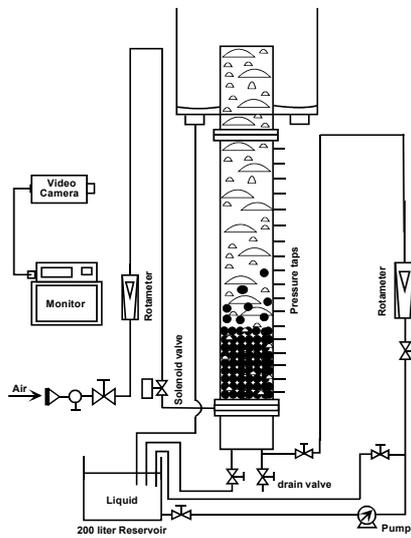


Fig. 1. 실험 장치도.

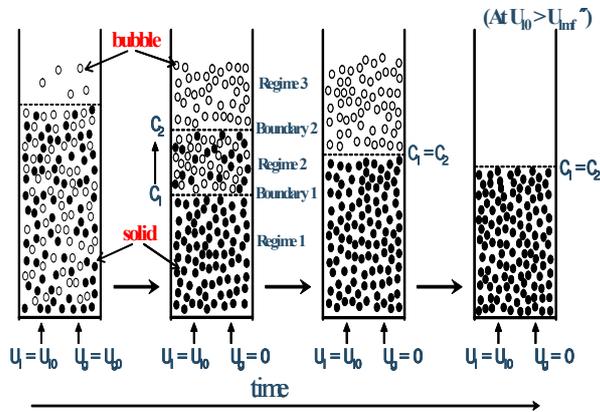


Fig. 2. 삼상유동층에서 시간에 따른 층의 변화.

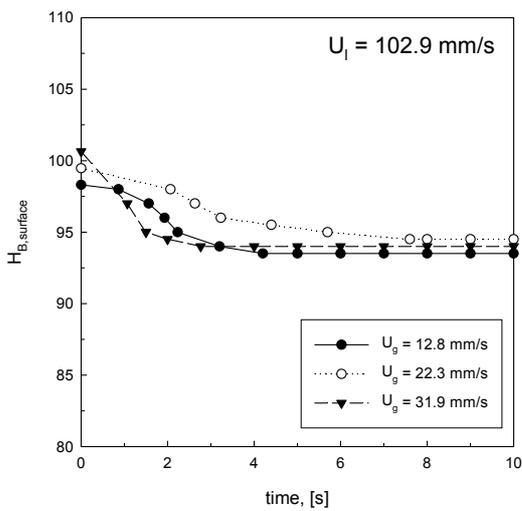


Fig. 3. $U_l = 102.9$ mm/s 에서의 시간에 따른 boundary 2의 변화

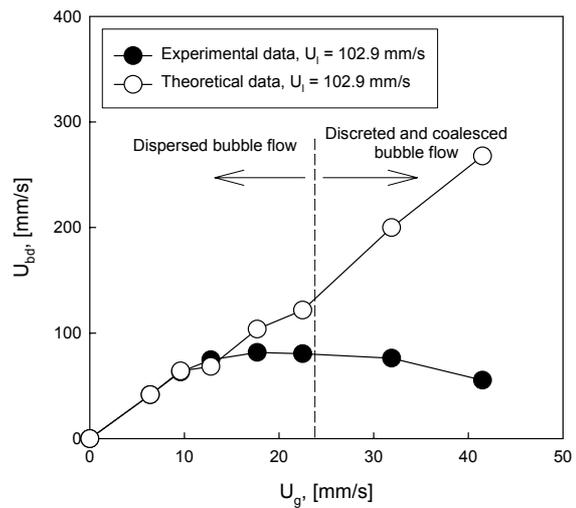


Fig. 4. U_{bd} 이론값과 실험값 비교