

삼상 유동층에서 층붕괴에 따른 동적 특성

박성수, 이동현*, 최원웅, 김상돈¹
 성균관대학교 화학공학과
 한국과학기술원 화학공학과¹
 (dhlee@skku.edu*)

Dynamic Characteristics of Bed Collapse in Three-Phase Fluidized Beds

Sungsoo Park, DongHyun Lee*, WonWoong Choi, SangDong Kim¹

Department of Chemical Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea

¹Department of Chemical Engineering and Energy & Environment Research Center, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-701, Korea
 (dhlee@skku.edu*)

서론

삼상유동층은 고체입자를 기체와 액체로 이루어진 비혼합성 유체로 유동화시키는 조작으로 이루어진다. 삼상유동층은 각 상들간의 접촉이 매우 효과적이고, 유동층내에서의 압력 강하를 줄일 수 있으며 열전달 및 물질전달 효과가 다른 공정에 비하여 매우 우수하다. 그러나 삼상유동층은 기-액-고상의 흐름계로 구성되어 있어 기포와 유동입자가 연속상인 액상에 각각 분산상으로 존재하므로 매우 복잡한 흐름형태를 나타낸다.

Jin and Zhang (1990)은 Bhatia and Epstein (1974)에 의해 일반화되어진 wake model에 의해서 k와 x값의 변수에 결정을 위한 층붕괴 실험을 하였다. Chen and Fan (1990)은 two-phase system에서의 drift flux model을 확장하였고, 기상과 액상을 동시에 멈춘 후 삼상유동층에서 발생하는 동적인 층붕괴 현상을 이론적으로 설명하였다. 그들이 제시한 이론과 실험결과는 잘 일치하지만, 무거운 고체 입자가 빠르게 아래로 이동하면서 많은 기포가 액-고 밀집층 영역에 갇혀 있게 된다.

따라서 본 연구의 목적은 기체-액체를 동시에 차단시키는 bed collapse technique의 단점을 보완하여 연속상인 액체가 연속적으로 흐르는 상태에서 분산상인 기체를 차단시킴으로써 층 붕괴되는 과정에서 bubble trap에 따른 영향을 효과적으로 제거할 수 있는 좀더 개선된 실험을 하고자 하였다. 또한 액-고 유동층 계에서의 최소유동화 속도 이상으로 일정하게 유지하면서 분산상인 기체의 공급을 갑자기 차단시킴으로써 발생하는 삼상 유동층에서의 층붕괴 과정의 동적 특성을 알아보고자 했다.

실험

본 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직경 210mm인 반원 모양의 높이가 2.5m인 아크릴관을 사용하였으며(실험 영역의 높이는 1.8m), 이 실험장치의 분산판은 액체와 기체가 같은 면에서 동시에 분산될 수 있도록 만들어졌으며, 연속상인 액체는 물을 분산상인 기체는 공기를 사용하고, 고체입자로는 직경이 3.2mm이고, 밀도가 1,280kg/m³ 구형도가 1.0인 폴리머입자를 사용하였다. 액체와 기체상의 두 흐름이 같은 방향으로 유입시켰으며, 정지층의 높이(H_{BO})는 입자의 밀도를 고려하여 항상 0.5m 보다 높도록 유지하였다. 실험범위는 기체유속이 0.0-28.9mm/s, 액체유속이 0.0-33.0mm/s에서 변화시키면서 실험

을 함으로서 연속상인 액상의 낮은 유속과 높은 유속에서의 층붕괴 특성을 비교하였다. 액체는 16mm 유리 raschig rings으로 채워진 chamber에서 유입되어 직경 3.0mm의 35개의 고른 분산 구멍을 통해 유동층에 하부의 분산판에 고르게 공급되며, 기체는 직경 1.0mm 구멍 33개인 튜브를 통해 액상 분산판 위에서 공급된다. 유동층 내부에서의 축방향 압력강하(dynamic pressure fluctuations)를 측정하기 위하여 액체 분배기로부터 0.05m 위에서부터 시작하여 0.1m 높이 간격으로 압력측정 탭을 설치하였다. 여기서 압력 변환기(GP:50)를 사용하여 voltage 신호를 A/D 변환기를 거쳐 한 개의 압력점 당 1Hz로 180초의 자료를 수집하여 컴퓨터에 입력시켰으며, 수집한 자료를 통계적 처리를 하였다.

처음에 주어진 기체와 액체유속에서 정상상태를 유지 시킨 후, 기체 공급라인의 볼 밸브를 빠르게 차단시키면, 확장된 층이 갑자기 붕괴된다. 층붕괴가 일어나기 전의 정상상태를 t_0 로 두고 기체의 공급을 차단시킨 후의 층 붕괴에 순간적 변화는 비디오 카메라를 이용하여 촬영하였으며, 이 동영상을 초당 30 프레임의 정지화상으로 분석을 실시하였다. 이와 같은 방법으로 촬영된 동영상 분석을 통하여 dense bed surface의 변화를 관찰하였다.

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

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

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

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

기체와 액체의 상체류량은 관 옆면에 부착된 압력 측정탭에 의해 측정된 압력강하로 계산 할 수 있다.

결과 및 고찰

동영상 분석을 통한 층 붕괴 과정은 Fig. 2에서 보는 바와 같다. Dense bed의 높이는 기포의 움직임에 의해 명확하지 않다. 기체의 공급을 차단하기 전에 끌려간 입자는 층 표면이 명확하지 않다. 액체는 일정유속($U=19.8\text{mm/s}$)으로 공급되고, 기체의 공급이 차단된 이후에는 시간이 지남에 따라 층높이가 증가한다. 처음에는 매우 빠르게 기포가 빠져나가며 점차적으로 액-고 유동층으로 바뀐다.

Fig. 3에서는 전형적인 dense bed의 높이를 결정하는 정지화면이다. Fig. 3(a)과 3(b)에서 볼 수 있듯이 dense bed의 높이는 기체 공급을 차단 시간후 2.47초 경과후 47.2 cm이고 20초 경과후 52.8 cm이었다. Fig. 3(a)에서 보면 기체 공급이 차단된 후 끌려 올라간 입자들이 중력에 의해 떨어짐으로 해서 dense bed surface의 구분이 힘들다. Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 20초 경과후의 dense bed surface는 기체공급을 차단하고 2.47초 지났을 때보다 보다 경계가 명확하다. 동영상 프레임 분석을 통해 보다 dense bed surface가 명확하지 않을 때는 각각의 정지 화상을 순차적으로 검토를 통해서 프레임들 중 비교적 명확하게 보이는 dense bed surface를 이용하여 dense bed 높이를 결정하였다.

Fig. 4에서는 기체공급을 차단시키기 전의 삼상유동층에 대한 전형적인 축방향의 압력강하 그림을 나타내었다. Fig. 4에서 두 개의 직선의 교차점으로써 층높이(H_B)를 구할 수 있고, 양의 기울기 부분은 층의 삼상영역의 압력 강하를 나타내고 기울기가 음인 부분은 고체가 없는, 즉 액체-기체 이상영역에서의 압력강하를 나타낸다. 양의 기울기 부분에서 직선과 기울기가 변하는 점에서 dense bed의 높이(H_{db})를 나타내었다.

Fig. 5에서는 기체의 공급을 차단시킨 이후의 시간의 경과에 따른 dense bed의 높이

변화를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 낮은 액체의 유속($U_1=19.8\text{mm/s}$)에서는 dense bed의 높이는 시간이 지남에 따라 점차 증가하여 액-고 유동층의 높이로 접근한다.

Jin and Zhang (1990)은 Bhatia and Epstein (1974)에 의해 일반화 되어진 wake model에 의하여 k 와 x 변수를 결정하기 위해서 층붕괴 실험을 했다. 그들의 실험에서 보면 삼상에서 액체-고체 유동화 영역에서의 고체 상체류량이 액체-고체 층에서의 고체 상체류량 보다 큰 값을 가지기 때문에 액체의 공급을 차단한 후의 dense bed의 높이는 시간이 지남에 따라서 높아지게 된다는 것을 보여준다. 하지만 본 실험의 결과를 그래프로 나타낸 Fig 5.을 보면 Jin and Zhang (1990)의 실험과 다른 점을 발견할 수가 있다. 액상의 유속이 낮은 $U_1=19.8\text{mm/s}$ 인 경우의 층붕괴 현상을 살펴보면 시간이 흐름에 따라서 dense bed 높이가 증가하여 액체-고체 이상유동층의 층높이에 도달하게 된다. 하지만 액상의 유속이 비교적 높은 $U_1=33.3\text{mm/s}$ 인 경우에서의 dense bed의 높이 변화를 살펴보면 기체의 공급을 중단한 후 대략 10초 이내의 시간 동안은 dense bed의 높이가 급격히 증가하여 기체-액체 유동층의 층높이 보다 더 높은 dense bed의 높이를 나타내었다가, 시간이 좀 더 흐르면서 dense bed의 높이가 점점 감소하여 같은 액체 유속에서 액체-고체 유동층의 층높이로 일정해짐을 알 수가 있다.

결론

삼상유동층에서 분산상인 기체의 공급을 중단한 후, 층붕괴의 현상을 살펴보았다. 삼상 유동층에서 기체 공급의 차단후 순간적 층붕괴 현상은 낮은 액체의 유속에서는 dense bed surface의 높이는 시간의 경과함에 따라 증가하여 액-고 유동층 상태의 층높이와 같이 변화했다. 그러나 높은 액체 유속에서는 층높이가 빠르게 증가했다가 액-고 유동층 상태의 층높이로 감소하였다. 기체의 공급을 중단한 후 시간이 경과하면 dense bed의 높이는 액체-고체 유동층에서의 높이와 같이 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

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. 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).

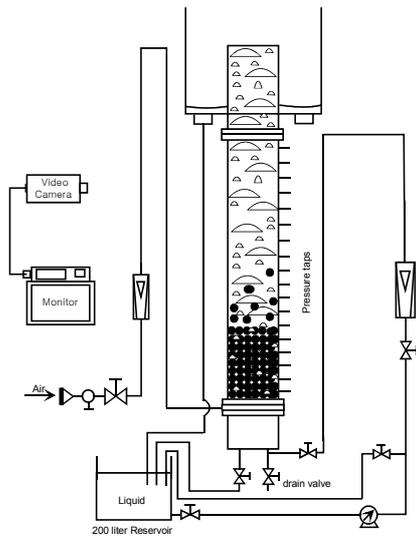


Fig. 1. Schematic diagram of experimental equipment.

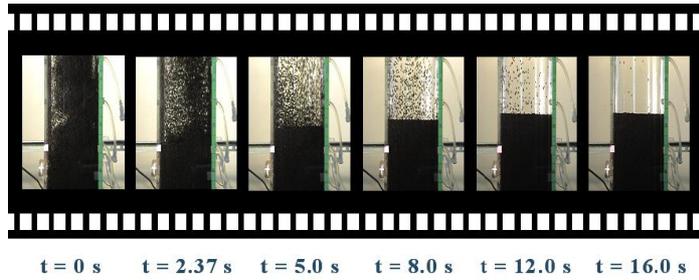
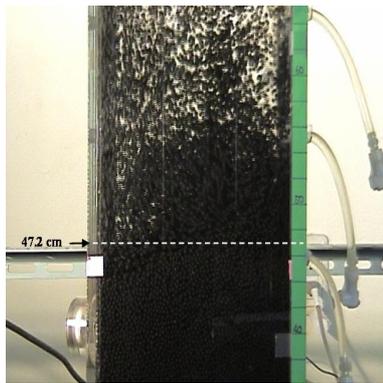
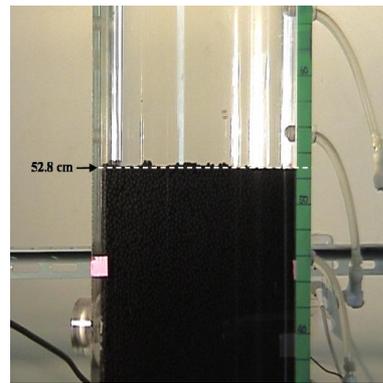


Fig. 2. Series of snapshot on H_{db} after shutting of the gas supply at $U_1=19.8$ and $U_g=19.4$ mm/s



(a)



(b)

Fig. 3. Typical snapshots for determining the dense bed height after shutting-off the gas supply:

- (a) snapshot at $t=2.47$ s after shutting-off the gas supply,
- (b) snapshot at $t=20$ s after shutting-off the gas supply.

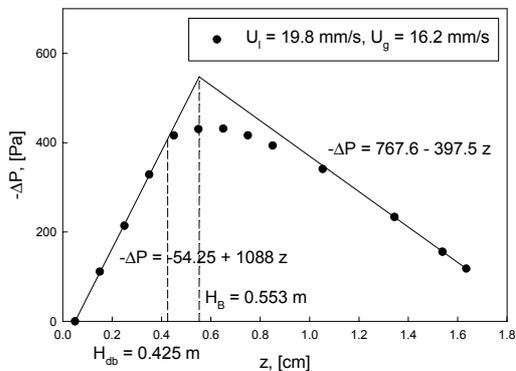


Fig. 4. Typical axial pressure drop profile before shutting-off the gas supply ($t \leq 0$ s).

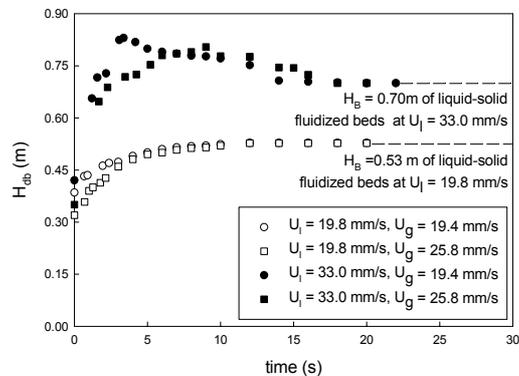


Fig. 5. Variation of H_{db} with the elapsed time.