

삼상유동층에서 동력학적 기체유출 측정방법에 의한 큰 기포와 작은 기포의 체류량 특성 해석

임현오* · 임대호** · 서명재** · 강 용***,† · 정 현*** · 이호태***

*충남대학교 녹색에너지 전문대학원
305-764 대전시 유성구 궁동 220
**충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
***한국에너지기술연구원
305-600 대전시 유성구 장동 100
(2011년 1월 18일 접수, 2011년 2월 8일 채택)

Analysis of Holdup Characteristics of Large and Small Bubbles in Three-Phase Fluidized Beds by using a Dynamic Gas Disengagement Method

Hyun oh Lim*, Dae Ho Lim**, Myung Jae Seo**, Yong Kang***,†, Heon Jung*** and Ho Tae Lee***

*Graduate School of Green Energy Technology, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

**Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

***Korea Institute of Energy Research, 100 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea

(Received 18 January 2011; accepted 8 February 2011)

요 약

내경이 0.105 m이고 높이가 2.5 m인 삼상(기체-액체-고체) 유동층에서 상대적으로 큰 기포와 작은 기포의 체류량 특성을 고찰하였다. 기체유속(0.01~0.07 m/s), 액체유속(0.01~0.07 m/s) 그리고 입자크기($0.5\sim3.0\times10^{-3}$ m)가 상대적으로 큰 기포와 작은 기포의 체류량에 미치는 영향을 검토하였다. 삼상 유동층에서 이들 두 종류 기포들의 체류량은 동력학적 기체 유출 방법(Dynamic gas disengagement method)에 의해 측정된 각각 기포들에 의한 압력강하 정보로부터 정압강하법(static pressure drop method)에 의해 산출되었다. 기체조절기에 의해 조절되는 건조되고 여과된 공기와 물 그리고 밀도가 $2,500\text{ kg/m}^3$ 인 유리구슬을 각각 기체, 액체 및 고체유동입자로 사용하였다. 삼상유동층에서 이들 두 종류의 기포, 즉 상대적으로 큰 기포와 작은 기포들은 유동층 탑에 유입되는 기체와 액체의 흐름을 정지시킨 후 경과시간에 따른 탑 내부의 압력강하를 측정함으로써 효과적으로 조사하고 분리할 수 있었다. 이들 두 종류의 기포들은 경과시간에 따라 증가하는 압력강하의 기울기가 서로 매우 다르게 나타났다. 실험결과 상대적으로 큰 기포들의 체류량은 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였으나 액체의 유속이 증가함에 따라서는 감소하였다. 그러나, 이들 큰 기포의 체류량은 유동입자의 크기가 변화함에 따라 국부적인 최소값을 나타내었다. 상대적으로 작은 기포들의 체류량은 기체유속 또는 고체입자의 크기가 증가함에 따라 증가하였으나 액체의 유속이 증가함에 따라서는 약간 감소하였다. 이들 두 종류 기포들의 체류량들은 각각 본 연구의 실험 범위 내에서 조작변수들의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

Abstract – Phase holdup characteristics of relatively large and small bubbles were investigated in a three-phase(gas-liquid-solid) fluidized bed of which diameter was 0.105 m(ID) and 2.5 m in height, respectively. Effects of gas(0.01~0.07 m/s) and liquid velocities(0.01~0.07 m/s) and particle size($0.5\sim3.0\times10^{-3}$ m) on the holdups of relatively large and small bubbles were determined. The holdups of two kinds of bubbles in three phase fluidized beds were estimated by means of static pressure drop method with the knowledge of pressure drops corresponding to each kind of bubble, respectively, which were obtained by dynamic gas disengagement method. Dried and filtered air which was regulated by gas regulator, tap water and glass bead of which density was 2500 kg/m^3 were served as a gas, a liquid and a fluidized solid phase, respectively. The two kinds of bubbles in three-phase fluidized beds, relatively large and small bubbles, were effectively detected and distinguished by measuring the pressure drop variation after stopping the gas and liquid

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

‡이 논문은 충남대학교 유승곤 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

flow into the column as a step function: The increase slope of pressure drop with a variation of elapsed time was quite different from each other. It was found that the holdup of relatively large bubbles increased with increasing gas velocity but decreased with liquid velocity. However, the holdup showed a local minimum with a variation of size of fluidized solid particles. The holdup of relatively small bubbles increased with an increase in the gas velocity or solid particle size, while it decreased slightly with an increase in the liquid velocity. The holdups of two kinds of bubbles were well correlated in terms of operating variables within this experimental conditions, respectively.

Key words: Large Bubble, Small Bubble, Three-Phase Fluidized Beds

1. 서 론

기체, 액체, 고체 등 다상들 간의 반응과 접촉효과가 매우 탁월할 뿐만 아니라, 이들 다상(multiphase)들간의 접촉과 반응이 연속조작 조건에서 일어날 수 있는 삼상유동층은, 다상들을 포함하면서도 공정 내부에서 열전달과 물질전달 효과가 매우 좋기 때문에 화학공정 뿐만 아니라 석유화학공정, 미생물공정, 폐수처리공정, 비료생산공정, 제약공정, 생물화학공정 등 다상들간의 반응과 접촉공정에서 많이 응용되어 왔다[1-4].

삼상 유동층공정은 연속상인 액체상에 기포와 유동 고체입자가 분산상(dispersed phase)을 형성하고 있으므로 이들 분산상 들의 거동이 삼상유동층 공정의 특성을 결정하는데 중요한 요인이 되고 있다 [5-8]. 분산상인 기포와 고체 유동입자의 복합적인 흐름과 유동거동은 동력학적 거동(dynamic behavior)이므로 매우 불규칙적이고 무작위적인 특성을 나타낸다. 따라서, Navier-Stokes 식 등 결정론적인 방법(deterministic method)에 의해 해석하는 데는 한계가 있으므로 이들 분산상들의 거동은 통계학적 방법을 응용하여 정량적으로 해석되기도 하였다[9-13].

삼상 유동층공정에서 기체 반응물이나 산소의 공급원인 공기는 기포로 존재하므로 기포의 수력학적 거동, 특히 체류량은 삼상 유동층공정의 수력학적 특성뿐만 아니라 열전달, 물질전달 및 반응특성 등 중요한 반응기의 성능과 특성의 결정에 중요한 요인이 되어왔다[14-16].

삼상 유동층공정에서 기포 체류량의 특성에 대한 연구들은 기포 체류량의 측정방법에 따라 약간의 차이는 있으나 일반적으로 공정의 운전조건이 기포 체류량에 미치는 영향으로 분석되어 왔다. 그러나, 삼상 유동층공정에 존재하는 기포들을 한 종류의 기포들로 보기에는 기포들의 크기에 너무 차이가 있으며 그 크기에 따라 기포들의 흐름 특성과 기능 그리고 역할의 측면에서 차이가 크므로 두 가지의 종류의 기포가 있음을 인식할 수 있다. 즉, 크기가 큰 기포와 작은 기포의 두 가지 종류의 기포들로 분리할 수 있다.

큰 기포는 운전조건 등 다른 요소들의 영향은 받지만 연속 액상의 흐름 속에서 독립적인 거동을 하는 반면, 작은 기포는 독립적인 거동을 하지 못하며 거의 연속 액상의 흐름에 따라 거동을 할 수 밖에 없게 된다. 따라서, 이 두 종류의 기포들은 삼상 유동층공정 내부에 존재하지만 흐름거동과 기능이 매우 다르므로 삼상 유동층의 수력학적 특성뿐만 아니라 열전달 및 물질전달 등에 미치는 영향도 매우 다를 것으로 여겨져서, 촉매를 사용한 기체-액체 반응들 불균일계 반응의 반응전환율 결정에도 매우 다르게 영향을 미칠 것으로 판단된다. 그러므로, 이들 두 종류의 기포들의 체류량 특성에 대한 정보는 삼상 유동층 반응기나 공정의 성능 결정에 중요한 요소가 될 수 있다. 그러나, 삼상 유동층공정에서 이들 두종류 기포들의 정보에 대한 연구는 국내·외를 막론하고 매우 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 삼상 유동층에서 두 가지 종류의 기포, 즉 큰 기포와 작은 기포의 체류량 특성에 대해 고찰하였다. 삼상 유동

층의 운전변수인 기체 및 액체의 유속 그리고 유동입자의 크기가 삼상 유동층 내부에 존재하는 큰 기포와 작은 기포의 체류량에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실 험

본 연구의 실험에 사용한 삼상 유동층은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 내경이 0.105 m이고 높이가 2.5 m인 아크릴관을 사용하였다[8,9]. 실험 변수로는 기체(0.01~0.07 m/s) 및 액체(0.01~0.07 m/s)의 유속 그리고 고체유동입자의 크기($0.5 \sim 3.0 \times 10^{-3}$ m) 등을 선택하였다. 기체로는 여과된 압축공기를 사용하였으며 연속상인 액상으로는 물을 그리고 고체 유동 입자로는 밀도가 $2,500 \text{ kg/m}^3$ 인 유리구슬을 사용하였다.

유동층의 축방향 압력강하를 측정하기 위하여 유동층의 액체-기체 분산관으로부터 20 cm 떨어진 위치에서 20 cm 간격으로 8개의 압력 탭을 설치하여 유동층의 축방향 압력변화를 측정하였다. 삼상 유동층의 축 방향 각 위치에서 압력변동 신호는 주어진 실험조건에서 압력센서(Sensys)로 측정하였으며 이 신호는 압력 변환기에 의해 볼트-시간의 신호로 바뀌어 증폭기와 필터 그리고 A/D 변환기를 거

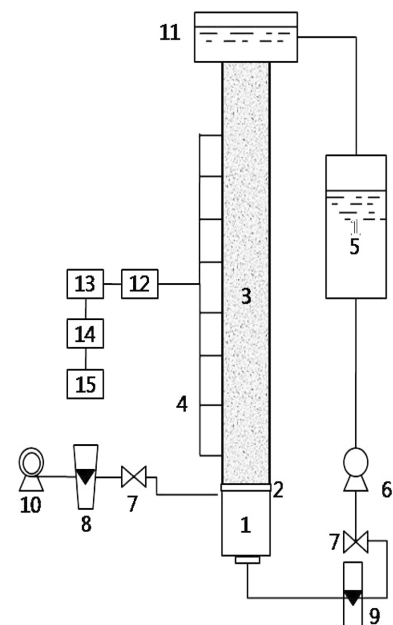


Fig. 1. Experimental apparatus.

- | | |
|---------------------|-----------------------------|
| 1. Calming section | 9. Liquid flowmeter |
| 2. Gas distributor | 10. Air compressor |
| 3. Main column | 11. Weir |
| 4. Pressure tap | 12. Pressure sensor |
| 5. Liquid reservoir | 13. Data Acquisition system |
| 6. Pump | 14. A/D converter |
| 7. Valve | 15. Computer |
| 8. Gas flowmeter | |

쳐 디지털 신호로 변환시켜 데이터획득장치(data acquisition system, DT-2805 Lab Card, DT-VEE software)를 사용하여 PC에 입력시켜 저장한 후 Off-line Process로 통계적 처리를 하였다. 압력신호의 Sample 측정은 500 Hz로 하였으며 시료의 길이는 10,000 이상으로 하여 각 실험조건에서 충분히 압력요동의 특성을 분석할 수 있도록 하였다[11,12].

삼상 유동층에서 큰 기포와 작은 기포의 체류량 결정은 동력학적 기체 유출 측정방법(Dynamic gas disengagement)을 사용하였다 [17,18]. 즉, 삼상 유동층이 일정한 기체와 액체의 유속조건에서 정상상태로 운전될때, 기체와 액체의 유속을 동시에 Step 함수로 0으로 하여 삼상 유동층 내부에 기체와 액체의 유입을 막으면 유동층 내부에 존재하던 기포들은 부력에 의해 유동층을 빠져나가게 된다. 이때, 삼상 유동층 내부에 존재하던 크기가 큰 기포들은 부력을 크게 받으므로 유동층을 빨리 그리고 쉽게 빠져나가지만, 크기가 작은 기포들은 큰 부력을 받지 못하므로 서서히 유동층 내부를 빠져나가게 된다.

이와 같은 현상을 정량적으로 측정하기 위하여 삼상 유동층 내부에서 일어나는 압력 강하의 변화를 기체와 액체의 유입을 차단한 후 경과시간에 따라 측정하였다. 한편, 각 운전조건에서 삼상 유동층 내부의 기체와 액체 그리고 고체 유동입자의 체류량은 정압강하법(static pressure drop method)[1-7]에 의해 식 (1)-(3)을 이용하여 결정하였다.

$$\varepsilon_B + \varepsilon_L + \varepsilon_S = 1.0 \quad (1)$$

$$\Delta P/\Delta L = (\rho_B \varepsilon_B + \rho_L \varepsilon_L + \rho_S \varepsilon_S)g \quad (2)$$

$$\varepsilon_S = W/AL\rho_S \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

삼상 유동층이 일정한 기체와 액체의 유속조건에서 정상상태로 운전되고 있을 때 기체와 액체의 유입을 step 함수로 차단한 후 삼상 유동층 내부에서 일어나는 압력강하 변화의 전형적인 예를 Fig. 2에 나타내었다. 즉, Fig. 2에서 보는바와 같이 삼상유동층 내부의 압력

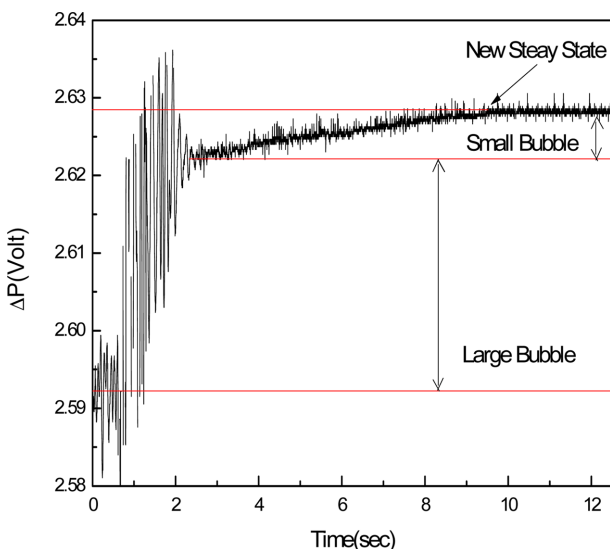


Fig. 2. Pressure drop variation in the three-phase fluidized bed during the elapsed time after closing the inputs of gas and liquid flow into the three-phase fluidized bed ($U_G=0.03$ m/s, $U_L=0.03$ m/s).

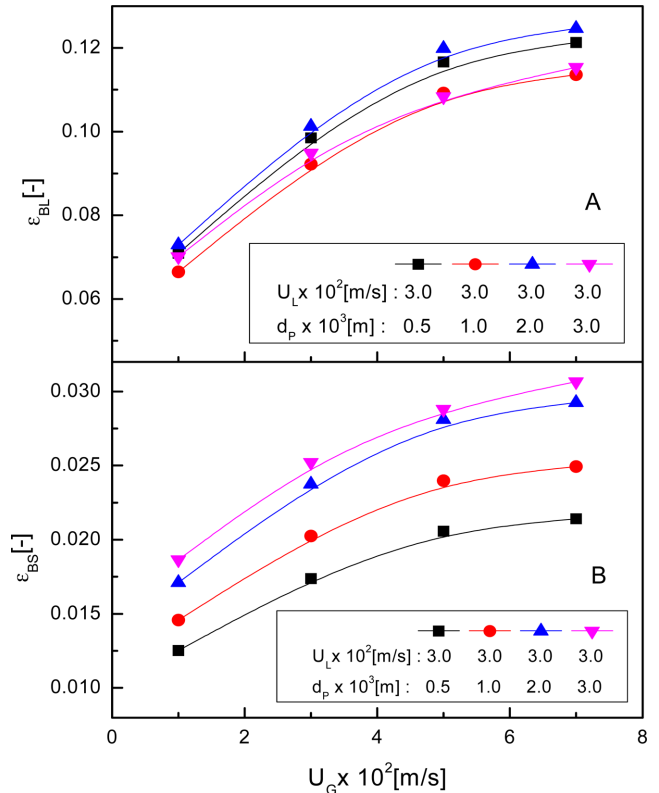


Fig. 3. Effects of gas velocity on the holdups of large and small bubbles in three-phase fluidized beds.

강하는 경과시간의 흐름에 따라 거의 선형적으로 증가하였는데 이들 압력강하의 증가 양상은 두 가지의 형태로 나타났다. 이와 같은 두 가지 형태의 압력강하 변화 양상으로부터 삼상 유동층 내부에 두 가지 종류의 기포들이 존재하고 있음을 알 수 있다. 삼상 유동층에 유입되는 기체나 액체의 유입을 차단한 후의 초기에는 유동층 내부에서 존재하던 상대적으로 크기가 큰 기포들이 빠져나가므로 시간의 흐름에 따른 압력강하 증가 직선의 기울기가 크지만, 큰 기포가 다 빠져나간 후의 작은 기포의 이탈에 의한 압력강하 직선의 기울기는 상대적으로 감소하게 되기 때문이다. 이와 같은 두 가지의 압력강하 변화양상으로부터 삼상 유동층이 정상상태로 운전시에 유동층 내부에 존재하는 상대적으로 크기가 큰 기포와 작은 기포의 체류량을 구할 수 있었다.

삼상 유동층에서 기체의 유속이 기포의 크기가 상대적으로 큰 기포와 작은 기포의 체류량에 미치는 영향을 각각 Fig. 3A와 B에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 삼상 유동층에 유입되는 기체의 유속이 증가함에 따라 삼상 유동층에 유입되는 기체의 양이 증가하기 때문에 유동층 내부에서 크기가 큰 기포와 작은 기포 모두의 체류량이 증가한다고 해석할 수 있다[1-4].

삼상 유동층에서 연속상인 액체의 유속이 유동층 내 큰 기포와 작은 기포의 체류량에 미치는 영향을 각각 Fig. 4A와 4B에 나타내었다. Fig. 4A에서 볼 수 있듯이 기포의 크기가 상대적으로 큰 기포의 체류량은 액체의 유속이 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 나타내었다. Fig. 4B에서 볼 수 있듯이 기포의 크기가 상대적으로 작은 기포의 체류량은 액체의 유속이 증가함에 따라 크게 변화하지 않았으나 약간 감소하는 경향을 나타낼 수 있다. 삼상 유동층에서 액체의 유속이 증가하면 연속 액상에 분산상으로 존재하는 크기가 큰

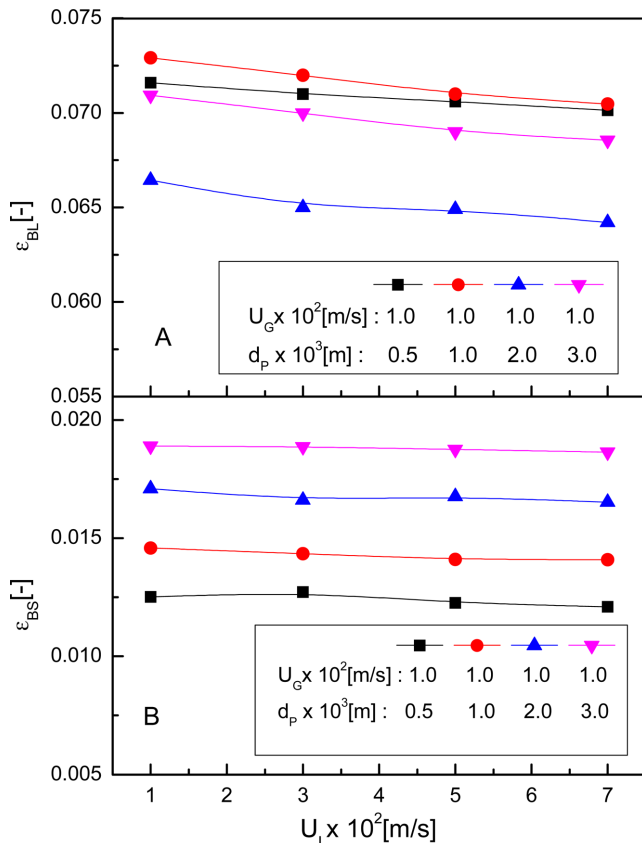


Fig. 4. Effects of liquid velocity on the holdups of large and small bubbles in three-phase fluidized beds.

기포에 작용하는 액체 흐름에 의한 Drag 힘이 증가하기 때문에 큰 기포가 유동층 내부에 머무르는 시간이 감소하게 된다. 그러나, 삼상 유동층에서 연속액상의 유속이 증가하면 유동층 내부의 불균일계 흐름에서 난류 현상이 증가하게 되며 분산상인 기포의 크기가 작아지게 된다[1-5]. 전자는 삼상 유동층에서 상대적으로 큰 기포의 체류량을 감소시키는 영향을 미치나, 후자는 기포의 체류량을 증가시키는 영향을 미치게 되어서 이들 두 요소의 영향으로 삼상 유동층에서 기포의 체류량은 액체유속의 증가에 따라 변화하지 않거나, 약간 증가 또는 약간 감소하기도 하는 것으로 보고되고 있다[1-7]. 이와 같은 결과는 각 연구의 수행에서 삼상 유동층의 장치적 특성이나 운전조건의 변화에 기인하는 것으로 보고되고 있다[1-4]. 본 연구에서는 상기 두 가지의 요인의 영향중 전자의 영향이 약간 크게 나타나 상대적으로 큰 기포의 체류량(ϵ_{BL})이 액체의 유속이 증가함에 따라 약간 감소하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 액체유속의 범위가 상대적으로 낮으며 유동입자의 크기가 상대적으로 작기 때문으로 해석할 수 있다. 상대적으로 크기가 작은 기포들은 연속 액상에 분산되어 분포되어 있으며, 독립적인 운동이나 거동을 할 수 있는 충분한 관성력을 가지고 있지 못하기 때문에 연속 액상의 흐름과 함께 유동층으로부터 유출될 수 밖에 없다. 따라서, 작은 기포의 체류량은 본 연구의 실험범위에서는 액체의 유속이 증가함에 따라 약간 감소하는 것으로 나타났다.

삼상 유동층에서 유동입자의 크기가 큰 기포와 작은 기포의 체류량에 미치는 영향을 각각 Fig. 5A와 5B에 나타내었다. Fig. 5A에서 볼 수 있듯이 유동입자의 크기가 변화함에 따라 상대적으로 크기가

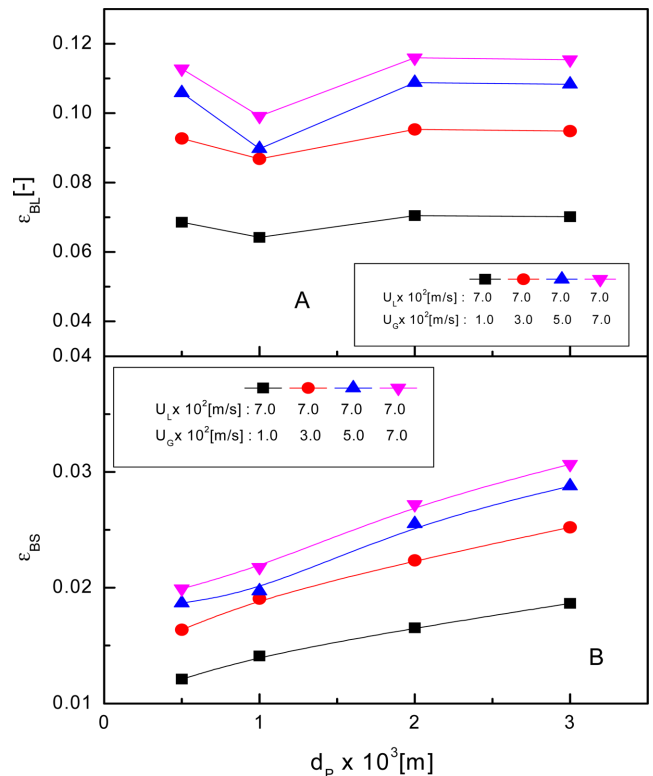


Fig. 5. Effects of particle size on the holdups of large and small bubbles in three-phase fluidized beds.

큰 기포의 삼상 유동층 내부에서의 체류량은 국부적인 최소값을 나타내었다. 즉, 유동입자의 크기가 0.5 mm인 경우보다 1.0 mm인 경우가 삼상유동층 내부에 큰 기포의 체류량은 작은 값을 나타내었으며 유동입자의 크기가 2.0 mm와 3.0 mm가 되면 큰 기포의 체류량은 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 현상은 삼상 유동층에서 유동입자의 크기가 작은 경우에 유동입자들이 기포들의 합체 현상을 증진시키기 때문으로 해석할 수 있다. 그러나, 유동입자의 크기가 어느정도 이상 커지게 되면 유동입자들은 크기가 큰 기포들을 분쇄하는 역할을 하게 되어 기포의 크기가 작아진다고 보고되고 있다[1-6]. Fig. 5A의 결과에서, 본 연구의 실험조건에서는 유동입자의 크기가 1.0 mm인 경우가 0.5 mm인 경우보다 삼상유동층 내부에서 기포들의 합체에 좀 더 많이 일어나는 여건이 된다고 할 수 있다. 한편, Fig. 5B에서 볼 수 있듯이, 삼상 유동층 내부에 존재하는 상대적으로 크기가 작은 기포의 체류량은 유동입자의 크기가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 유동입자의 크기가 증가함에 따라 유동입자들은 유동층 내부에서 상대적으로 크기가 작은 기포들을 합체하는 효과보다는 기포들을 분산시키거나 기포를 분쇄하는 효과가 더 크게 나타남을 의미한다고 할 수 있다. 삼상 유동층에서 크기가 상대적으로 큰 기포와 작은 기포를 분리 측정하여 보고한 문헌은 현재까지 찾아보기 어려우므로 삼상 유동층에 체류하는 모든 기포를 포함하는 총 기포의 체류량을 측정한 기존의 연구결과에 의하면 기포의 총 체류량은 유동입자의 크기가 작을 때 국부적인 최소값을 나타내고 있다[1-5]. 이와 같은 현상은 유동입자의 크기가 작을 때 기포의 합체현상이 매우 활발하게 일어나 기포의 크기가 커지게 되므로 기포의 상승속도가 증가하여 이들 기포들이 빠른 속도로 유동층을 빠져나가기 때문에 유동층이 수축하게

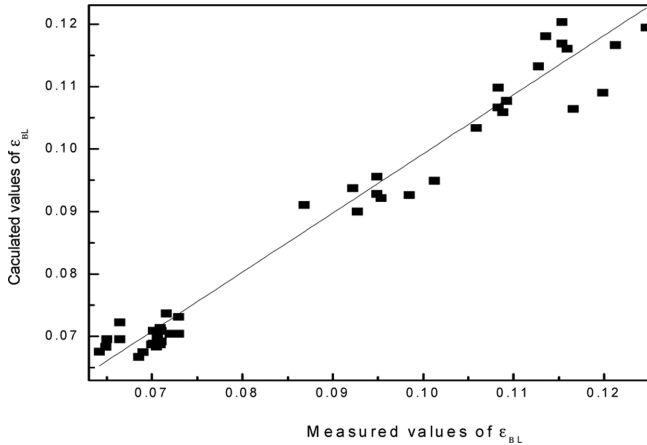


Fig. 6. Comparison of large bubble holdup between the calculated and the measured values.

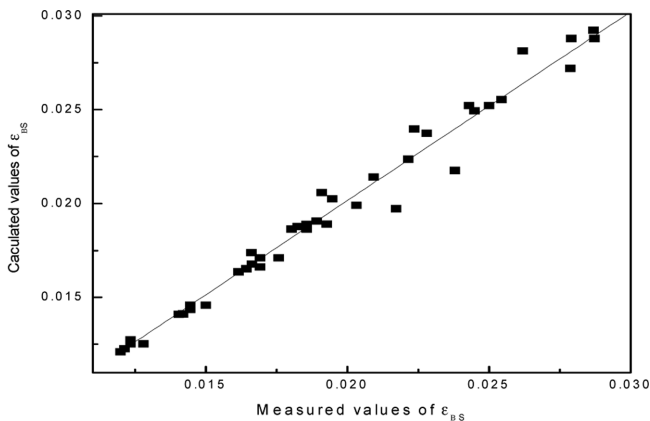


Fig. 7. Comparison of small bubble holdup between the calculated and the measured values.

되는 원인이 되기도 한다고 알려져 있다. 본 연구의 결과도 Figs. 5A와 5B에서 크기가 큰 기포와 작은 기포의 체류량을 합친 총 기포의 체류량이 유동입자의 크기가 작을 때 국부적인 최소값을 나타내어 기존에 발표된 연구들의 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서, 삼상 유동층에서 유동입자의 크기가 작은 경우, 유동층의 수축현상은 작은 유동입자의 작용으로 촉진된 기포들의 빈번한 합체 현상에 의해 생성된 상대적으로 크기가 큰 기포의 빠른 상승 때문에 큰 기포의 체류량이 감소하게 되어 일어 난다고 할 수 있다.

본 연구의 실험범위에서 삼상 유동층에 체류하는 크기가 큰 기포의 체류량은 식 (4)와 같이 실험변수의 상관식으로 나타낼 수 있었으며, 작은 기포의 체류량을 식 (5)와 같이 나타낼 수 있었다.

$$\varepsilon_{BL} = 0.0722U_G^{0.27}U_L^{-0.034}d_p^{0.17} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{BS} = 0.0151U_G^{0.27}U_L^{-0.033}d_p^{0.23} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)는 각각 Figs. 6과 7에서 볼 수 있듯이 상관계수 0.93와 0.91으로 실험적으로 측정된 값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

삼상 유동층에서 동력학적 기체 유출 측정방법에 의해 유동층 내부에 존재하는 상대적으로 크기가 큰 기포와 작은 기포를 분리하여 그 체류량들을 측정할 수 있었다. 상대적으로 크기가 큰 기포들의 체

류량은 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였으나 액체의 유속이 증가함에 따라서는 약간 감소하였다. 그러나, 고체유동입자의 크기가 증가함에 따라서는 큰 기포의 체류량은 국부적인 최소값을 나타내었다. 삼상 유동층에서 상대적으로 크기가 작은 기포들의 체류량은 기체의 유속과 고체 유동입자의 크기가 증가함에 따라서는 점점 증가 하였으나 연속 액상의 유속이 증가함에 따라서는 약간 감소하는 경향을 나타내었다.

삼상 유동층에서 상대적으로 크기가 큰 기포와 작은 기포의 체류량은 본 연구의 범위에서 다음과 같은 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$\varepsilon_{BL} = 0.0722U_G^{0.27}U_L^{-0.034}d_p^{0.17}$$

$$\varepsilon_{BS} = 0.0151U_G^{0.27}U_L^{-0.033}d_p^{0.23}$$

감 사

본 연구는 한국에너지기술연구원의 연구비지원(A7-2802)으로 수행되었으며 귀 연구원에 감사드립니다.

사용기호

- A : Surface area of the column[m²]
- dp : particle size[m]
- g : Gravitational acceleration[m/s²]
- L : Bed height[m]
- ΔL : Length of test section[m]
- ΔP : Pressure drop in the test section[Pa.s.]
- T : Elapsed time[S]
- u : Velocity[m/s]
- W : Weight of solid particles[kg]

이래첨자

- B : Bubble phase
- BL : Large bubble phase
- BS : Small bubble phase
- G : Gas phase
- L : Liquid phase
- S : Solid phase

그리스 문자

- ε : phase holdup
- ρ_S : density of solid particle

참고문헌

1. Fan, L. S., Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering, Butterworths, Stonehair, Ma.(1989).
2. Kim, S. D. and Kang, Y., "Heat and Mass Transfer in Three-phase Fluidized Beds; An Overview," *Chem. Eng. Sci.*, **52**(21-22), 3639-3660(1997).
3. Kim, S. D. and Kang, Y., "Hydrodynamic, Heat and Mass Transfer in Inverse and Circulating Three-phase Fluidized-bed Reactors for Waste Water Treatment," *Stud. Surf. Sci. Catal.*, **159**, 103-

- 108(2006).
4. Kang, Y., Lee, K. I., Shin, I. S., Son, S. M., Kim, S. D. and Jung, H., "Characteristics of Hydrodynamics, Heat and Mass Transfer in Three-phase Inverse Fluidized Beds," *Korea Chem. Eng. Res. (HWAHHAK KONGHAK)*, **45**, 451(2008).
 5. Lefebvre, S., Guy, C. and Chaouki, J., "Solid Phase Hydrodynamics of Three-phase Fluidized Beds-a Convective/dispersive Mixing Model," *Chem. Eng. J.*, **133**(1-3), 85-95(2007).
 6. Kim, S. D. and Kang, Y., "Dispersion Phase Characteristics in Three-phase Fluidized Beds," *Mixed Flow Hydrodynamics*, Advanced Eng. Fluid Mechanics Series, Gulf Pub. Co. New York(1996).
 7. Wild, G., Saberian, M., Schwarty, J. and Charpentier, J. E., "Gas-liquid-solid Fluidized-bed Reactors: State of Art and Industrial Possibilities," *Int'l Chem. Eng.*, **24**, 639(1984).
 8. Lee, K. I., Son, S. M., Kim, U. Y., Kang, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Particle Dispersion in Viscous Three-phase Inverse Fluidized Beds," *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 7060(2007).
 9. Shin, K. S., Song, P. S., Lee, C. G., Kang, S. H., Kang, Y., Kim, S. D. and Kim, S. J., "Heat Transfer Coefficient in Viscous Liquid-solid Circulation Fluidized Beds," *AIChE J.*, **51**(2), 671-677 (2005).
 10. Lin, T. J. and Chiu, H. T., "Effects of Macroscopic Hydrodynamics on Heat Transfer in a Three-phase Fluidized Bed," *Catal. Today*, **79-80**, 159-167(2003).
 11. Cho, Y. J., Song, P. S., Kim, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Stochastic Analysis of Gas-liquid-solid Flow in Three-phase Circulating Fluidized Beds," *J. Chem. Eng. Japan.*, **34**(2), 254-261(2001).
 12. Son, S. M., Kang, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Characteristics of Particle Flow and Heat Transfer in Liquid-particle Swirling Fluidized Beds," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHHAK KONGHAK)*, **44**(5), 505-512(2006).
 13. Son, S. M., Shin, H. J., Kang, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Characteristic of Phase Holdups and Pressure Fluctuations in a Three-phase Swirling Fluidized Bed," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **15**(6), 652-658(2004).
 14. Wan, L., Alvareguencia, M., Upreti, S. R. and Lohi, A., "Development of a Three-phase Fluidized Bed Reactor with Enhanced Oxygen Transfer," *Chem. Eng. Processing : Process Intensification*, Doi: 10. 1016/J. Cep. 2009. 10. 012(2009).
 15. Ramesh, K. V., Raju, G. M. J., Sarma, G. V. S. and Sarma, C. B., "Effect of Internal on Phase Holdups of a Three-phase Fluidized Bed," *Chem. Eng. J.*, **145**, 393(2009).
 16. Jena, H. M., Roy, G. K. and Meikap, B. C., "Prediction of Gas Holdup in a Three-phase Fluidized Bed from Bed Pressure Drop Measurement," *Chem. Eng. Res. Des.*, **86**, 1301(2008).
 17. Deckwer, W. D., *Bubble Column Reactors*, John Wiley And Sons. Ny(1992).
 18. Krichna, R. and Sie, S. T., "Design and Scale-up of the Fischer-tropsch Bubble Column Slurry Reactor," *Fuel Processing Technol.*, **64**, 73(200).