

## 점성슬러리 기포탑에서 작은 기포의 체류량 특성

진해룡 · 송양호 · 강 용<sup>†</sup> · 정 현\* · 이호태\*

충남대학교 화학공학과  
305-764 대전시 유성구 궁동 220  
\*한국에너지기술연구원  
305-343 대전시 유성구 장동 71-2  
(2010년 8월 3일 접수, 2010년 8월 31일 채택)

## Holdup Characteristics of Small Bubbles in a Viscous Slurry Bubble Column

Hae-Ryong Jin, Yang-Ho Song, Yong Kang<sup>†</sup>, Heon Jung\* and Ho-Tae Lee\*

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

\*Synfuel Research Group, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 3 August 2010; accepted 31 August 2010)

### 요 약

점성슬러리 기포탑에서 작은 기포의 체류량 특성에 대해 고찰하였다. 정압 강하방법(Static pressure drop method)에 의해 구한 기포탑 내부전체 기포체류량과 이중저항탐침법(dual resistivity probe method)에 의해 구한 큰 기포의 체류량으로부터 기포탑 내부에 체류하는 작은 기포의 체류량을 구할 수 있었다. 기체유속, 연속액상의 점도 그리고 슬러리 상중에 포함된 고체입자의 분율이 전체 기체체류량, 큰 기포의 체류량 그리고 작은 기포의 체류량에 미치는 영향을 검토하였다. 점성슬러리 기포탑에서 작은 기포의 체류량은 기체의 유속이 증가하면 증가하였으나 연속액상의 점도와 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율이 증가하면 감소하였다. 기포탑 내부에 체류하는 전체 기포 체류량 중 작은 기포 체류량의 분율은 기체유속이 증가하면 증가하였으나 연속액상의 점도와 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율이 증가하면 감소하였다. 기포탑 내부에 체류하는 작은 기포는 큰 기포의 상승속도에 영향을 미치지 못하였다.

**Abstract** – Holdup characteristics of small bubbles were investigated in a viscous slurry bubble column. The phase holdup of small bubbles was obtained from the knowledge of total bubble(gas) holdup and large bubble holdup, which were measured by mean of static pressure drop method and dual resistivity probe method, respectively. Effects of gas velocity, viscosity of continuous liquid phase and solid fraction in the slurry phase on the small bubble holdup as well as holdups of total bubble(gas) and large bubble in a viscous slurry bubble column. The small bubble holdup increased with increasing gas velocity but decreased with increasing liquid viscosity or solid fraction in the slurry phase. In addition the fraction of small bubble in the total bubble(gas) holdup increased with increasing gas velocity but decreased with increasing liquid viscosity or solid fraction in the slurry phase. It was revealed that the rising velocity of large bubble did not related to the holdup of small bubble in a viscous slurry bubble column.

Key words: Slurry Bubble Column, Small Bubble, Large Bubble, Viscous Medium, Phase Holdup

### 1. 서 론

촉매를 사용한 기체-기체 반응이나 기체-액체 반응, 또는 생성물이 액체상태인 기체-고체 반응이나 액체-고체 반응 등 다상(Multiphase)들 간의 접촉과 반응이 일어나는 다상흐름공정을 연속공정으로 운전하면서 다상들간의 접촉효율과 반응전환율을 극대화하고 생산효율(production efficiency)도 높일 수 있는 다상흐름공정에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다[1-7]. 이와같은 공정중 연속 액상에 분산상으로 기포의 흐름을 형성하는 기포탑 반응기나 공정에서는 불균

일계의 반응촉진을 위해 촉매를 사용하거나 특정 성분의 흡수나 흡착등을 위해 매체입자들을 사용하게 되는데, 이들 촉매입자나 매체입자들의 마모를 최대한 방지하고 그 활성을 극대화할 뿐만 아니라 반응물들과의 접촉효율을 크게 유지하기 위한 방안으로 많이 응용되고 있는 슬러리 기포탑에 대한 관심이 고조되고 있다[8-13].

슬러리 기포탑은 액상과 고체입자로 구성되는 연속상인 슬러리상에 기포가 분산상으로 존재하게 되는데 투입되는 기체에 의해 형성되는 기포는 무작위적으로 생성되고 기포탑 내부에서 서로 합체, 분쇄되는 흐름을 하므로 기포의 거동은 슬러리 기포탑 반응기나 공정의 특성을 결정하는데 매우 중요한 요소가 되고 있다. 슬러리 기포탑내부에 생성된 기포는 기포탑 내부에서 상승하면서 매우 복잡

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

한 거동을 하는데 비교적 쉽게 측정되는 큰 기포로 존재하기도 하지만 측정이 어려울 정도로 매우 작은 기포들로도 존재하게 된다. 이들 작은 기포들은 기포자체의 운동량이 매우 작기 때문에 큰 기포들처럼 개별적인 기포로써의 독립적인 거동을 하지 못하고 연속상인 슬러리상의 흐름과 같이 거동을 하게 된다. 따라서, 슬러리 기포탑 내부의 매우 작은 기포들이 연속상 내부에서 어떻게 분포하고 어떤 거동을 나타내며 그 체류량이 얼마나 되는지 하는 문제들은 연속상의 흐름특성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 슬러리 기포탑 내부에서 기체-액체간의 물질전달과 열전달 등에도 영향을 미칠 수 있는 요소가 된다. 그러나, 이에 대한 연구는 국내·외를 막론하고 매우 미흡한 실정이다[8,9].

따라서, 본 연구에서는 슬러리 기포탑에서 기포의 크기가 2 mm 미만인 작은 기포의 체류량 특성에 대해 고찰하였으며, 실험 변수인 기체의 유속, 연속액상의 점도 및 슬러리상을 형성하는 고체입자의 분율 등이 슬러리 기포탑 내부에서 작은 기포의 체류량에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 실험

본 연구의 실험에 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직경이 0.051 m이고 높이가 1.5 m인 스테인레스강으로 만들어진 슬러리 기포탑이었다. 연속액상으로는 CMC(Carboxy Methyl Cellulose)

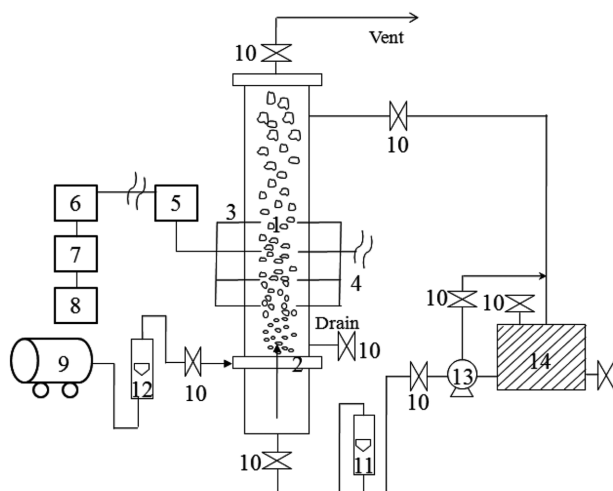


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- |                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| 1. Main column             | 8. Computer          |
| 2. Gas/liquid distributor  | 9. Compressor        |
| 3. Pressure probe          | 10. Valve            |
| 4. Resistivity probe       | 11. Liquid flowmeter |
| 5. Pressure sensor         | 12. Gas flowmeter    |
| 6. A/D converter           | 13. Liquid pump      |
| 7. Data acquisition system | 14. Liquid reservoir |

수용액을 사용하였으며, 슬러리상을 이루는 고체입자로는 크기가 40~70  $\mu\text{m}$ 이고 밀도가 2,500  $\text{kg/m}^3$ 인 유리입자를 사용하였다. 연속액상인 CMC 수용액의 점도는 Table 1에 나타난 물리적 특성에서 볼 수 있듯이 0.001~0.05  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 의 범위이었다. 슬러리 기포탑에 투입된 기체상은 여과된 압축공기를 사용하였으며 유속 범위는 0.04 ~ 0.12  $\text{m/s}$ 이었다.

슬러리 기포탑 내부에 존재하는 기포의 체류량 측정을 위해 이중 전기 저항 탐침(dual electric resistivity probe)을 사용하였다. 이중 전기 저항 탐침은 탐침의 tip이 2 mm 간격이 되도록 제작되었으며, 기체 분산관으로부터 0.4 m의 높이에 설치하였다. 탐침에서 전기저항의 변화측정을 위해 탐침에 가해진 전압은 5.0 V이었다. 전기 저항 탐침으로부터 측정된 신호는 증폭기와 A/D 변환기를 거쳐 디지털 신호로 변환되어 자료수집장치(Data Acquisition System)에 의해 컴퓨터에 입력되었다. 전기 저항 탐침에 의한 자료의 수집은 300 Hz로 하였으며 자료의 크기는 각 실험조건에서 30,000개가 되도록 10초간 수집하였고, 이들 자료는 off-line process로 통계적으로 처리하여 해석하였다[14,15].

한편, 각 실험조건에서 기포탑 내부의 압력 강하를 측정하기 위해 압력탭을 설치하였는데, 기체 분산관으로부터 0.2 m의 위에서부터 0.2 m 간격으로 2개 설치하였다. 슬러리 기포탑에서 단위길이당 압력강하( $\Delta P/L$ )를 측정하여 식 (1)~(4)에 의해 기포탑 내부의 기체의 전체 체류량인 값을 구하였다.

$$\Delta P/L = (\epsilon_G \rho_G + \epsilon_L \rho_L + \epsilon_S \rho_S)g \quad (1)$$

$$\epsilon_G + \epsilon_L + \epsilon_S = 1.0 \quad (2)$$

$$\epsilon_S = C_S(1 - \epsilon_G) \quad (3)$$

$$\epsilon_L = (1 - C_S)(1 - \epsilon_G) \quad (4)$$

한편, 슬러리 기포탑에는 기포탑에 투입된 기체에 의해 형성되는 큰 기포도 있지만 매우 작은 기포들도 존재하게 되는데 전기 저항 탐침법에 의해 측정되는 기포는 탐침의 거리가 2 mm이므로 기포의 크기가 2 mm 이상인 것만 측정할 수 있다. 따라서 기포의 크기가 2 mm 미만인 기포의 체류량은 식 (5)와 같이 전체 기체체류량에서 기포의 크기가 2 mm 이상인 기포(큰 기포)의 체류량을 뺀 나머지의 기체체류량을 구하여 결정하였다.

$$\epsilon_G = \epsilon_{BL} + \epsilon_{BS} \quad (5)$$

본 실험에서 전기저항 탐침에 의해 측정된 기포의 전형적인 저항 변화는 Fig. 2에 나타내었으며 이들 아날로그 자료를 정량화(디지털화)하여 기포의 체류량을 구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구의 실험에서 측정된 기포탑 내부에 존재하는 큰 기포

Table 1. Physical and rheological properties of liquid phase

	Apparent Viscosity ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	Surface Tension ( $\text{mN/m}$ )	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	K ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ )	n	Diffusivity ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	Kinematic Viscosity ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
water	0.001	72.9	1000	0.001	1	$2.22 \times 10^{-5}$	$9.61 \times 10^{-7}$
CMC 0.1 wt%	0.011	73.2	1001	$21.69 \times 10^{-3}$	0.882	$0.48 \times 10^{-5}$	$1.10 \times 10^{-5}$
CMC 0.2 wt%	0.024	73.3	1002	$43.82 \times 10^{-3}$	0.847	$0.26 \times 10^{-5}$	$2.40 \times 10^{-5}$
CMC 0.3 wt%	0.038	73.6	1003	$71.69 \times 10^{-3}$	0.825	$0.19 \times 10^{-5}$	$3.79 \times 10^{-5}$
CMC 0.4 wt%	0.050	73.9	1004	$102 \times 10^{-3}$	0.802	$0.15 \times 10^{-5}$	$4.98 \times 10^{-5}$

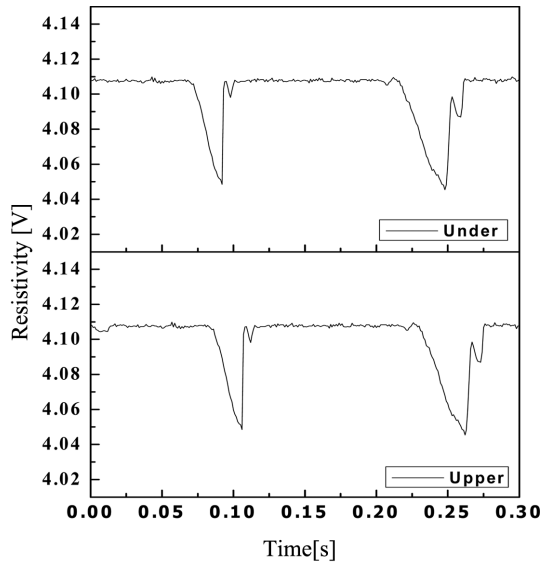


Fig. 2. Typical example of resistivity signals in a viscous slurry bubble column( $U_G = 0.12$  m/s,  $\mu_L = 0.001$  Pa·s,  $C_S = 0$ ).

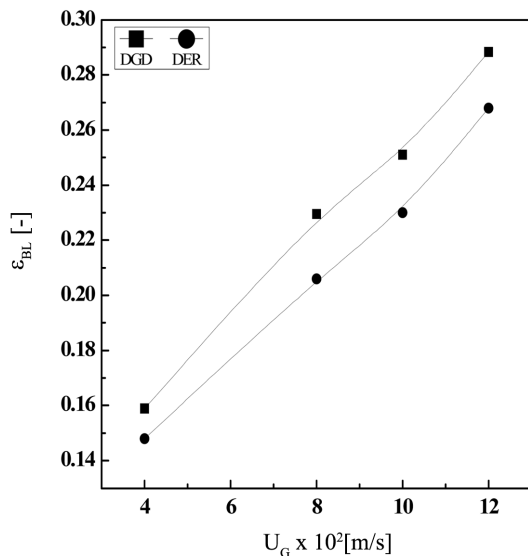


Fig. 3. Typical comparison of large bubble holdups measured by dynamic gas disengagement(DGD) method and dual electrical resistivity(DER) method( $\mu_L = 0.001$  Pa·s,  $C_S = 0$ ).

(Large Bubble)의 체류량을 다른 방법으로 구한 큰 기포의 체류량과 Fig. 3에 비교하여 나타내었다. 즉, Fig. 3에는 저항탐침의 거리가 2 mm인 경우에 측정한 큰 기포의 체류량과 동력학적 기체 방출(Dynamic Gas Disengagement, DGD) 방법[2,9]에 의해 측정한 큰 기포의 체류량을 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 두 방법으로 측정된 큰 기포의 체류량은 3~7% 범위 내에서 잘 맞는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 기포탑 내부에 존재하는 비교적 크기가 큰 기포와 크기가 작은 기포의 경계를 2 mm로 하였다. 즉, 전기저항 탐침에 의해 측정된 기포는 큰 기포(Large bubble)라 하였고 전기저항 탐침에 의해 측정되지 않는 기포를 작은 기포(Small bubble)라 하여, 큰 기포의 체류량을 실험적 측정에 의해 구하였다.

실험부분에서도 언급하였듯이 기포탑 내부의 일정 영역에서 단위길이당 압력강하( $\Delta P/L$ )를 측정하여 식 (1)~(4)에 의해 구한 전체

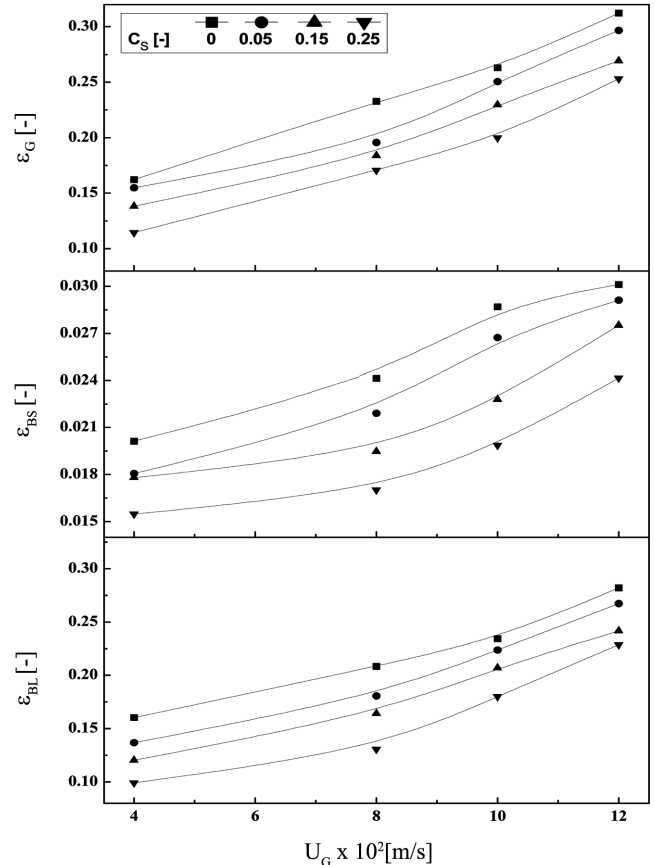


Fig. 4. Effects of gas velocity on the holdups of total gas, large bubble and small bubble in a viscous slurry bubble column( $\mu_L = 0.038$  Pa·s).

기체의 체류량인  $\epsilon_G$ 는 전기저항 탐침에 의해 측정된 큰 기포의 체류량과 전기저항 탐침에 의해 측정되지 않은 작은 기포의 체류량으로 구성되어 있으므로 식 (5)에 의해 슬러리 기포탑 내부에 존재하는 작은 기포의 체류량( $\epsilon_{BS}$ )을 구하였다.

슬러리 기포탑의 일정한 운전조건에서 기포탑 내부에 존재하는 전체 기체 체류량( $\epsilon_G$ ), 큰 기포의 체류량( $\epsilon_{BL}$ )과 작은 기포의 체류량( $\epsilon_{BS}$ )을 기체유속의 변화에 따라 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 기체의 유속이 증가함에 따라 전체기체의 체류량, 큰 기포의 체류량 및 작은 기포의 체류량 모두가 증가하였다. 이는 기체의 유속이 증가함에 따라 슬러리 기포탑 내부에 유입되는 기체의 양이 증가하기 때문에 기체의 체류량이 증가하게 되는데, 이들 기체는 큰 기포뿐만 아니라 작은 기포들로도 존재하여 슬러리상에 분산되는 것을 알 수 있다. 슬러리 기포탑에서 연속액상의 점도가 큰 기포와 작은 기포의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 연속액상의 점도가 0.001에서 0.05 Pa·s로 증가함에 따라 큰 기포와 작은 기포의 기포탑 내부에서의 체류량은 모두 감소하는 것을 알 수 있다. 슬러리 기포탑에서 큰 기포의 체류량은 연속 액상의 점도가 증가하면 감소하는 것으로 보고되고 있는데[8,9,15] 작은 기포의 경우 연속액상의 점도가 증가하면 작은 기포들간의 접촉과 합체에 의해 기포의 크기가 증가하게 되며 점점 크기가 커짐에 따라 개별 기포에 작용하는 부력이 증가하여 기포들이 개별적인 거동을 하는 큰 기포가 되기 때문에 작은 기포의 체류량은 감소하는 것으로 사료된다. 슬러리 기포탑 내부에서 개별 거

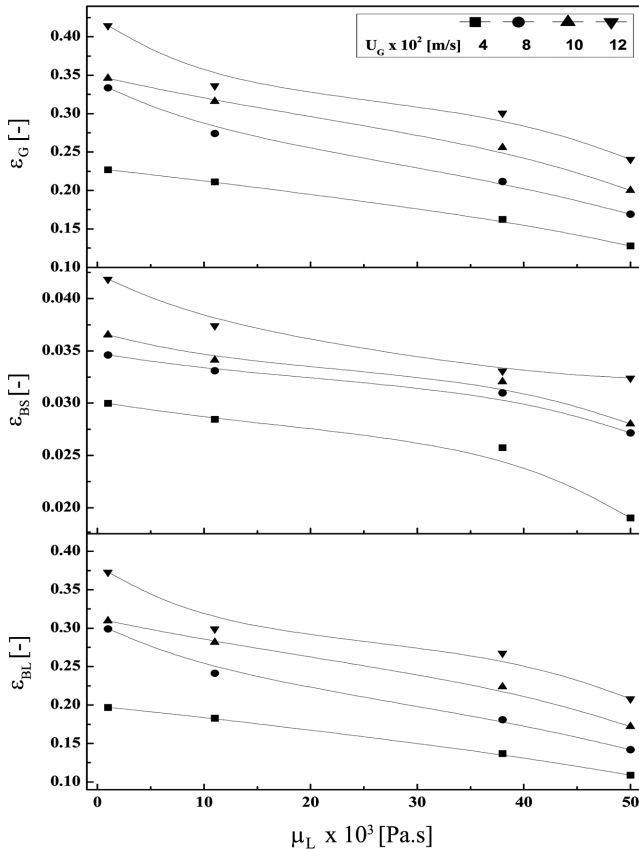


Fig. 5. Effects of liquid viscosity on the holdups of total gas, large bubble and small bubble in a viscous slurry bubble column ( $C_s=0.05$ ).

동을 하는 큰 기포들도 연속액상의 점도가 증가하면 상승하면서 합체현상이 더욱 많이 일어나 기포들의 크기는 더욱 증가하게 되고 기포의 상승속도는 기포의 크기가 증가하게 되면 더욱 커져서 기포탑 내부에 머무르는 기포의 체류시간의 감소를 가져와 큰 기포의 기포탑 내부의 체류량도 감소하는 것으로 판단할 수 있다. 슬러리 기포탑에서 슬러리에 포함된 고체입자의 농도가 큰 기포와 작은 기포의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 슬러리에 포함된 고체입자의 농도가 증가할수록 큰 기포의 체류량과 작은 기포의 체류량이 모두 감소하여 전체 기체의 체류량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 슬러리 상에 포함된 고체입자들이 슬러리 상에 분산되어 있는 작은 기포들의 합체를 도와주기 때문에 작은 기포들은 합체되어 비교적 큰 기포가 되며, 고체입자의 증가에 따라 연속상인 슬러리 상의 점도가 증가하기 때문에 큰 기포들도 합체가 잘 되어 더 큰 기포가 되기 때문으로 해석할 수 있다. 일반적으로 슬러리 기포탑이나 일반 기포탑에서 기포의 크기가 증가하면 기포탑 내부에서 기포의 상승속도가 증가하게 되어 기포의 체류량은 감소하는 것으로 보고되고 있다[1-7].

점성 슬러리 기포탑에서 이중 전기저항에 의해 측정된 큰 기포의 상승속도( $U_B$ )와 슬러리 기포탑 내부에서 기체의 속도(interstitial velocity)를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 점성슬러리 기포탑에서 큰 기포의 상승속도( $U_B$ )가 기포탑 내부에서 전체 기체체류량에 기초한 내부 기체유속(interstitial velocity)인  $U_G/\epsilon_G$ 보다 큰 값을 나타내고 있다. 이는 점성슬러리 기포탑 내부에서

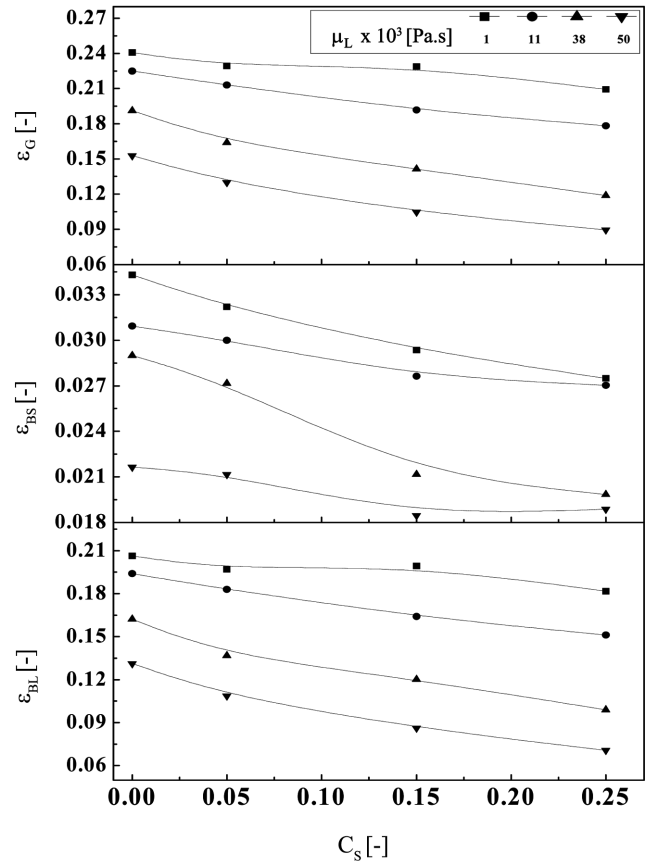


Fig. 6. Effects of solid fraction in slurry phase on the holdups of total gas, large bubble and small bubble in a viscous slurry bubble column ( $U_G=0.1$  m/s).

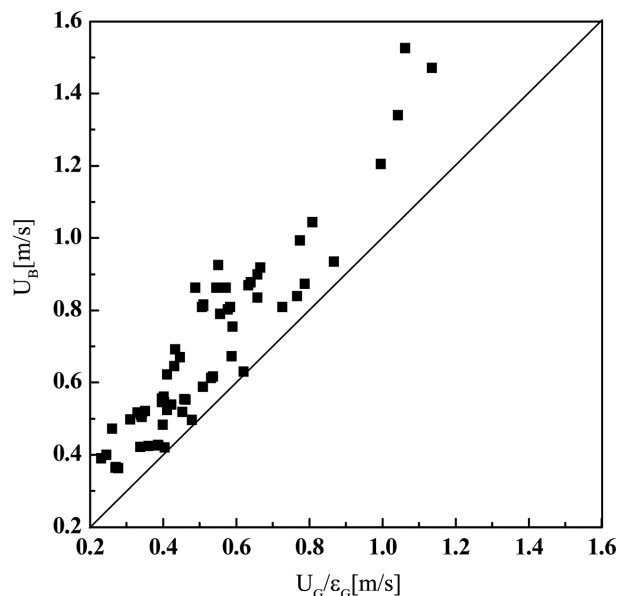


Fig. 7. Comparison of bubble rising velocity of large bubbles with interstitial gas velocity based on the total gas holdup.

기포의 상승에 기포탑 내부에 존재하는 전체 기체가 다 영향을 미치는 것이 아님을 나타내고 있다. 즉, 기포탑 내부에서 큰 기포의 상승에는 큰 기포들만이 영향을 미치며 작은 기포들은 기포들의 거동에 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 슬러리 기포탑에서 기체의 유

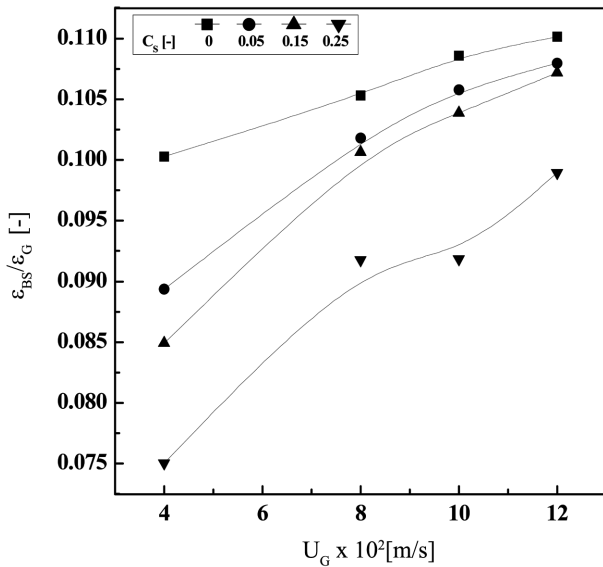


Fig. 8. Effects of gas velocity and solid fraction in slurry phase on  $\varepsilon_{BS}/\varepsilon_G$  a viscous slurry bubble column ( $\mu_L=0.038$  Pa·s).

속과 슬러리상 중 고체입자의 분율이 기체 체류량 중 작은 기포의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 기체의 유속이 증가함에 따라 기포탑 내부에 체류하는 전체 기체의 양중 작은 기포가 차지하는 분율은 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기체유속이 증가하면 기체의 관성력이 증가되기 때문에 기체가 연속 액상을 파고드는 힘이 증가하게 되어 매우 작은 기포의 형태로 액상과 더불어 액상중에 머무는 기포의 양이 증가한다고 할 수 있다. Fig. 8에서 기체의 유속이 0.1 m/s 이상으로 증가하면 기포탑 내부에 체류하는 전체 기체량의 9~11% 정도가 작은 기포의 형태로 기포탑내에 체류하는 것으로 나타나고 있다. 슬러리상의 고체입자의 분율이 증가하면 슬러리상 내부에 존재하는 고체입자들과의 접촉을 피하여 작은 기포들간의 접촉은 증가하게 되어 기포들의 크기는 점점 증가하게 되어 독립거동을 할 수 있는 비교적 큰 기포

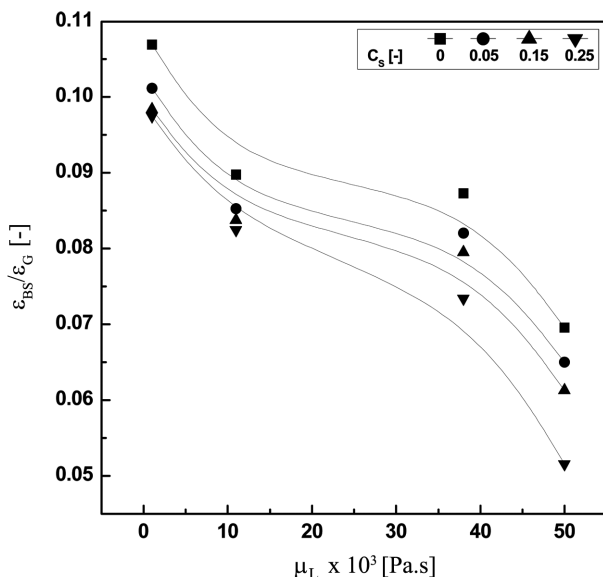


Fig. 9. Effects of liquid viscosity on  $\varepsilon_{BS}/\varepsilon_G$  in a viscous slurry bubble column ( $U_G = 0.1$  m/s).

로 형성되기 때문에 작은 기포의 형태로 기포탑 내부에 체류하는 기포의 체류량은 감소한다고 할 수 있다(Fig. 7). 슬러리 기포탑에서 연속 액상의 점도가 기체 체류량 중 작은 기포의 체류량이 차지하는 분율( $\varepsilon_{BS}/\varepsilon_G$ )에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 연속액상의 점도가 증가하면 전체 기체체류량 중 작은 기포가 차지하는 분율이 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 점성 기포탑에서 연속액상의 점도가 증가하면 기포들의 합체현상에 의해 기포의 크기가 증가하여 전체 기체의 체류량이 감소하게 되는 데[3-6], Fig. 9와 같은 결과로부터 기포탑 내부에 체류하는 큰 기포들보다 크기가 작은 기포들의 체류량이 연속상의 점도 증가에 따라 더욱 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 같은 기체 유속의 조건에서 연속상의 점도가 증가하면 기체가 연속상 내부를 파헤치고 분산되는 힘이 점점 제한되기 때문에 연속상 내부에 작은 기포로 체류하기가 어렵기 때문으로 해석할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

점성슬러리 기포탑내부에 체류하는 기체체류량을 개별 거동을 할 수 있는 큰 기포의 체류량과 개별거동을 할 수 없는 작은 기포의 체류량으로 구별할 수 있었다. 크기 2 mm 미만의 작은 기포의 점성슬러리 기포탑내 체류량은 기포탑 내부에 유입되는 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였으며, 연속액상의 점도와 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율이 증가함에 따라 감소하였다. 점성슬러리 기포탑에 체류하는 전체 기체의 체류량중 작은 기포가 차지하는 분율은 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였으며 연속액상의 점도와 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 점성슬러리 기포탑에서 기포의 상승속도에 작은 기포의 체류량은 영향을 미치지 못하였다.

#### 감 사

본 연구는 한국에너지기술연구원의 연구지원(A7-2802)으로 이루어졌으며 귀 기관에 감사드립니다.

#### 사용기호

- $C_s$  : slurry particle fraction
- $L$  : Column height[m]
- $P$  : pressure[MPa]
- $t$  : time[s]
- $U_G$  : gas velocity[m/s]
- $U_B$  : rising velocity of large bubbles[m/s]

#### 그리스 문자

- $\varepsilon_G$  : total gas phase holdup[-]
- $\varepsilon_{BL}$  : large bubble holdup[-]
- $\varepsilon_{BS}$  : small bubble holdup[-]
- $\varepsilon_L$  : liquid phase holdup[-]
- $\mu$  : viscosity[kg/m s]
- $\rho$  : density[kg/m<sup>3</sup>]

## 아래첨자

- G : gas phase  
S : slurry phase

## 참고문헌

1. Fan, L. S., *Gas-Liquid-Solid Fluidization engineering*, Butterworths, Boston(1989).
2. Deckwer, W. D., *Bubble Column Reactors*, John Wiley and sons, New York(1992).
3. Kim, S. D. and Kang, Y., "Dispersed Phase Characteristics in Three-phase Fluidized Beds," in *Mixed-Flow Hydrodynamics*(N. P. Chermisinoff ed.), Gulf Publishing Co.(1996).
4. Kim, S. D. and Kang, Y., "Heat and Mass Transfer in Three-phase Fluidized-Bed Reactors-An Overview," *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 3639-3660(1997).
5. Kim, S. D. and Kang, Y., "Hydrodynamics, Heat and Mass Transfer in inverse and Circulating Three-Phase Fluidized-Bed Reactors for waste water Treatment," *Studies Sur. Sci. Cat.*, **159**, 103-108(2006).
6. 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," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **46**, 451-464(2008).
7. Son, S. M., Shin, I. S., Kang, Y., Cho, Y. J. and Yang, H. C., "Characteristics of Heat Transfer in Three-phase Swirling Fluidized Beds," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **36**, 56-62(2008).
8. Maretti, C. and Krishna, R., "Modelling of a Bubble Column Slurry Reactor for Fischer-Tropsch Synthesis," *Catalysis Today*, **52**, 279-289(1999).
9. Krishna, R. and Sie, S. T., "Design and Scale-up of the Fischer-Tropsch Bubble Column Slurry Reactor," *Fuel Processing Technol.*, **64**, 73-105(2000).
10. Seo, M. J., Lim, D. H. Shin, I. S., Son, S. M. and Kang, Y., "Mass Transfer Characteristics in Pressurized Three-phase slurry Bubble Columns with Variation of Column Diameter," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **47**, 459-464(2009).
11. Jang, J. H., Seo, M. J., Lim, D. H., Kang, Y., Jung, H. and Lee, H. T., "Heat Transfer Model and Energy Dissipation Rate in Bubble Columns with Continuous Operation," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **47**, 587-592(2009).
12. Seo, M. J., Lim, D. H., Jin, H. R., Kang, Y., Jung, H. and Lee, H. T., "Analysis of Hydrodynamic Similarity of Pressurized Three-phase Slurry Bubble Column for its Design and Scale-up," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **47**, 720-726(2009).
13. Li, H. and Prakash, A., "Influence of Slurry Concentrations on Bubble population and Their Rise Velocities in a Three-phase Slurry Bubble Column," *Power Technol.*, **113**, 158-167(2000).
14. Kang, Y., Cho, Y. J., Woo, K. J. and Kim, S. D., "Diagnosis of Bubble Distribution and Mass Transfer in Pressurized Bubble Columns with viscous Liquid Medium," *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 4887-4893(1999).
15. Behkish, A., Lemoine, R., Schabiaque, L., Qukaci, R. and Morsi, B. L., "Gas Holdup and Bubble Size Behavior in a Large-Scale Slurry Bubble Column Reactor Operating with on Organic Liquid under Elevated Pressure and Temperature," *Chem. Eng. J.*, **128**, 69-84(2007).