

## 기포탑에서 작은기포와 큰기포의 크기 구별

서명재 · 진해룡 · 임대호 · 임 호 · 강 용<sup>†</sup> · 전기원\*

충남대학교 화학공학과  
305-764 대전시 유성구 대학로 99  
\*한국화학연구원  
305-600 대전시 유성구 가정로 141  
(2011년 8월 26일 접수, 2011년 9월 30일 채택)

## Size Verification of Small and Large Bubbles in a Bubble Column

Myung Jae Seo, Hae-Ryong Jin, Dae Ho Lim, Ho Lim, Yong Kang<sup>†</sup> and Ki-Won Jun\*

School of Chemical Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

\*Green Chemical Technology Division, Korea Research Institute of Chemical Technology,

141 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea

(Received 26 August 2011; accepted 30 September 2011)

### 요 약

동력학적 기체유출방법(dynamic gas disengagement method)과 이중전기저항 탐침방법(dual electrical resistivity probe method)을 동시에 사용하여 기포탑에서 큰 기포와 작은 기포의 크기를 구별하였다. 기포탑의 일정한 운전조건에서 기포탑 내부에 채류하는 큰 기포와 작은 기포의 채류량은, 기포탑에 유입되는 기체의 유입을 차단한 후 시간의 흐름에 따른 기포탑 내부의 압력강하 변화를 측정하여 동력학적 기체유출방법에 의해 측정하였다. 기포의 크기와 빈도수는 동력학적 기체유출방법에 의해 큰 기포와 작은 기포의 채류량을 측정하는 동일한 운전조건에서 측정하였으며 이들 자료들로부터 기포의 크기에 따른 기포의 채류량을 결정하였다. 기포탑에서 큰 기포와 작은 기포의 크기결정은 동력학적 기체유출방법에 의해 얻은 큰 기포와 작은 기포의 채류량과 이중전기저항 탐침법에 의해 구한 크기의 범위를 아는 기포들의 채류량을 비교하여 결정하였다. 여과된 압축 공기와 물을 기체상과 연속액상을 사용하였으며, 기포탑의 직경은 0.102 m이고 높이는 1.5 m이었다. 기포탑에서 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기는 4.0~5.0 mm 이었는데, 기체의 유속이 낮은 범위에서는 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기가 5.0 mm 정도이었으나 기체의 유속이 상대적으로 큰 범위에서는 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기가 4.0 mm 정도가 되었다.

**Abstract** – Size verification of small and large bubbles in a bubble column was investigated by employing the dynamic gas disengagement (DGD) method and dual electrical resistivity probe (DRP) method, simultaneously. The holdups of large and small bubbles in the bubble column in a given operating condition were obtained by means of the DGD method by measuring the pressure drop variation in the column with a variation of time after stopping the gas input into the column. The size and frequency of bubbles were measured by the DRP method in the same operating condition, from which the bubble holdup of each range of size was obtained. The verification of size in determining the large or small bubbles was decided by comparing the holdups of large or small bubbles measured by the DGD method with that measured by the DRP method. Filtered compressed air and tap water were used as a gas and a continuous liquid medium. The diameter and height of the bubble column were 0.102 m and 1.5 m, respectively. The demarcation size between the large and the small bubbles in the bubble column was 4.0~5.0 mm; the demarcation size was about 5.0 mm when the gas velocity was in the relatively low range, but about 4.0 mm when the gas velocity was in the relatively high range, within this experimental conditions.

Key words: Demarcation Bubble Size, Bubble Column, Small Bubble, Large Bubble, Bubble Holdup

### 1. 서 론

연속상인 액상에 분산상인 기포가 존재하는 기포탑은 기체 반응 물을 연속적으로 액상반응물과 매우 효과적으로 접촉시킬 수 있는

특성이 있을 뿐만 아니라 기체상에 포함된 특정성분을 액체상으로 전달하거나 액체상에 있는 특정성분을 기체상으로 전달하기가 용이하여 배기가스에 포함된 이산화탄소나 황화합물 또는 질소화합물 등의 기체를 포집하거나 특정성분의 회수 등에 매우 광범위하게 사용될 수 있다[1,2]. 기포탑의 특성은 기포탑 내부공정에서 생성되어 상승하는 기포의 특성에 큰 영향을 받게되는데 이는 기포의 흐름특성

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

\*이 논문은 서울과학기술대학교 손재익 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

에 따라 기포탑 내부에서의 수력학적특성뿐만 아니라 기체-액체간 계면에서의 물질전달과 공정내부에서 열전달 등의 전달현상도 변화하기 때문이다[3-8]. 기포의 흐름특성 중에서 특히 기포의 크기는 일정 조업조건에서 기포의 상승속도와 기포의 빈도수 등에도 큰 영향을 미치므로 반응기나 공정내부에 존재하는 기포의 체류량과 직접적인 관계가 있다. 따라서, 기포의 크기에 대한 정보는 기포탑 연구와 기포탑을 활용한 여러 다상 흐름공정의 설계와 조작 등에 매우 중요한 제어인자가 되어 왔다.

기포탑에서 기포의 크기에 대한 연구는 주로 기포탑 내부에 탐침(probe)을 삽입하여 기포의 특성을 측정하는 방법으로 수행되었는데 이 방법은 크게 세가지로 분류할 수 있다. 즉, 전기 전도도 탐침(electrical conductivity probe)을 사용하는 방법[9]과 전기저항 탐침(electrical resistive probe)을 사용하는 방법[6,7,10] 그리고 광학 화이버 탐침(optical fiber probe)을 사용하는 방법[11,12] 등으로 분류되는데 이들 각각의 방법으로 측정된 기포의 크기와 특성들은 약간의 다른 값을 나타내나 이들 측정값들 사이에는 일정한 관계를 나타내고 있다고 보고되고 있다[12].

한편, 기포탑에 존재하는 기포들은 크기에 따라 두가지 종류 즉, 큰 기포와 작은 기포로 구분되고 있는데 이들 큰 기포와 작은 기포들의 체류량은 동력학적 기체유출방법(dynamic gas disengagement method, DGD)에 의해 측정되고 있다[1,5,7]. 그러나, 기포탑에 존재하는 이들 기포들을 구분하는 크기의 한계가 명확하지 않아 기포탑을 응용한 반응기나 접촉공정의 설계, 모델화 그리고 최적조업조건 등의 결정 등에 한계성을 가지고 있었다. 즉, Zhang 등[13]이나 De Swart 등[14]은 기포탑에서 작은 기포의 크기를 1 mm보다 작은 기포로 분류하였으나 Krishna 등[15,16]은 기포탑에서 큰 기포와 작은 기포의 크기 구분을 4 mm로 하기도 하고 또 때에 따라 7 mm로 하기도 하였다. 따라서, 본 연구에서는 동력학적 기체유출(DGD) 방법과 이중전기저항탐침(Dual Electrical Resistive Probe, DRP) 방법을 사용하여 기포탑에 존재하는 기포들이 큰 기포와 작은 기포로 구별될 때 그 크기의 한계를 규명하고자 하였다.

## 2. 실험

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는바와같은 직경이 0.102 m이고 높이가 1.5 m인 스텐레스강을 사용하여 제작한 기포탑을 사용하였다. 연속상인 액체로는 물을 그리고 기체상으로는 여과된 압축공기를 사용하였다. 기포탑 내부의 일정영역에서 압력강하 변화를 측정하기 위하여 기체 분산판으로부터 0.2 m 떨어진 위치에서부터 0.2 m 간격으로 압력탭을 설치하였다. 압력탭에 의해 측정된 압력변동신호는 압력센서와 압력변화기를 거치면서 볼트-시간의 신호로 바뀌어 증폭기와 필터 그리고 A/D 변화기에 의해 디지털 신호로 변환되어 데이터 획득장치(DT-2805 Lab Card, DT-VEE Software)에 의해 PC에 입력시켜 저장되었다. PC에 저장된 압력변동 신호는 off-line 프로세스에 의해 통계적으로 처리되었다. 압력변동 신호의 자료는 500 Hz의 속도로 측정하였으며 자료의 길이를 25,000 이상으로 하여 각 실험조건에서 압력강하의 특성을 분석할 수 있도록 하였다[17-21]. 기포의 수직길이  $L_{Vi}$ 는 다음의 방법에 의해 결정하였다. 즉, 두 tip 간의 신호시간 차이를  $t_i$ , 기포가 탐침에 머무는 시간을  $t_{2i}$  하면, 두 탐침간의 거리  $l$ 은 기포의 수직길이  $L_{Vi}$ 와 식 (1)과 (2)의 관계식으로 나타낼 수 있으므로 이들 식에 의해 기포의 평균수직길이( $L_p$ )

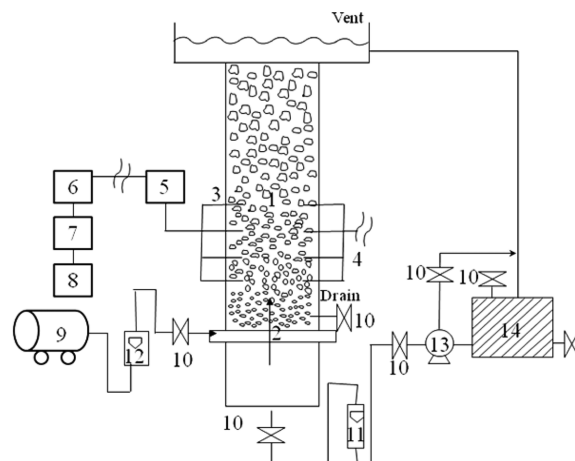


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- |                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| 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 |

를 결정하였다[17-19].

$$L_{Vi} = u_{Bi} \cdot t_{2i} = \frac{t_{2i}}{t_{1i}} \cdot l \quad (1)$$

$$L_{Vi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{Vi} \quad (2)$$

기포탑 내부에서 상승하는 기포의 크기를 측정하기 위하여 이중 전기저항 탐침(dual electrical resistivity probe)을 사용하였다. 이중 전기저항 탐침의 tip은 2 mm의 간격이 되도록 제작되었으며 기포탑의 기체 분산판으로부터 0.4 m의 높이에 설치하였다. 탐침에 의해 기포의 흐름에 따른 전기저항의 변화를 측정하기 위해 탐침에 5 V의 전압을 가하였으며 전기저항 변화 신호는 증폭기와 A/D 변환기를 사용하여 디지털 신호로 변환 후 자료수집장치(Data Acquisition System)에 의해 컴퓨터에 저장하였다. 전기저항 탐침에 의한 자료의 수집은 1,000 Hz의 속도로 하였으며 자료의 크기는 각 실험조건에서 30,000 개가 되도록 30초간 수집하였다[17-21].

기포탑에서 상대적으로 큰 기포와 작은 기포의 체류량을 결정하기 위해서는 동력학적 기체유출 측정방법(Dynamic Gas Disengagement)을 사용하였다[1,5]. 즉, 기포탑이 일정한 기체유속의 조건으로 정상상태로 운전될 때, 기체의 유입을 step 함수로 차단한 후 기포탑 내부에 존재하던 기포들이 기포탑에서 유출되면서 기포탑 내부의 압력 강하 변동을 측정하여 상대적으로 큰 기포와 작은 기포들의 체류량을 결정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

기포탑이 일정한 기체 유속으로 운전되고 있을 때 기포탑에 유입되는 기체의 유속을 스텝함수(step function)로 정지시키면 더 이상 기포탑 내부에 기체의 유입이 없어 기포탑 내부에 존재하던 기포만 기포탑의 상부로 상승하여 기포탑에서 유출된다. 이와같은 과정을 시간의 흐름에 따른 기포탑 내부의 압력강하로 나타내면 Fig. 2와 같

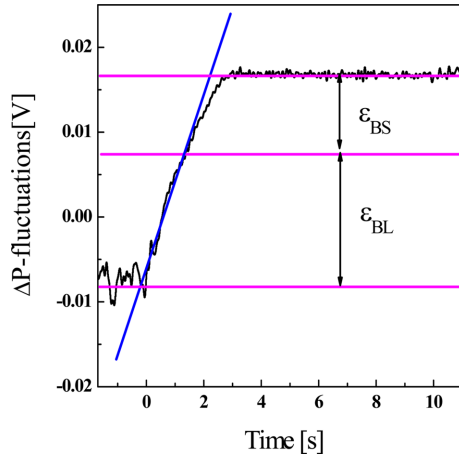


Fig. 2. Typical example of  $\Delta P$ -fluctuations in viscous bubble columns ( $U_G=0.1$  m/s).

다. 즉, Fig. 2는 기포탑에 유입되는 기체가 차단된 후 기포탑에 존재 하던 기포들이 기포탑을 빠져 나감에 따라 기포탑 내부일정구간에서 압력강하가 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이와같은 기포탑 내부 에서 압력강하 정보로부터 기포탑 내부에 존재하는 기포상의 체류량 을 구할 수 있으므로, Fig. 2는 기포탑 내부에 유입되는 기체를 차단 한 후 시간의 흐름에 따라 기포탑 내부에 존재하던 기포 체류량의 변 화를 나타낸다고 할 수 있다. Fig. 2에서, 기포탑에 유입되는 기체를 차단한 후 시간의 흐름에 따라 변화하는 압력강하의 변화양상이 처음에는 급격히 증가하나 어느 정도 시간이 지난후에는 서서히 변화 하는 것을 알 수 있다. 기포탑에 유입되는 기체의 유속을 차단한 후 기포탑 내부에서 초기의 압력강하는 기포탑 내부에 존재하는 큰 기 포들이 기포탑으로부터 유출하는 것에 기인한 것이며 후반부의 압력 강하 변화는 작은 기포들의 유출에 기인한 것으로 알려져 있다 [1,5,7]. 이는 기포의 크기가 크면 기포탑에서 기포의 상승속도가 크 기 때문에 상대적으로 빨리 기포탑에서 유출되기 때문으로 해석할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이들 압력강하의 변화경계를 기포탑 내 부에 존재하는 큰 기포와 작은 기포의 체류량 결정 경계로 하였으며, 이와같은 기포탑 내부의 압력강하 변화자료로부터 기포탑내부에 존 재하는 큰 기포와 작은 기포들의 체류량을 구하였다.

한편, 기포탑이 정상상태(steady state)로 운전될 때 기포탑 내부에 존재하는 기포의 크기와 빈도수를 측정하기 위하여 이중 전기저항 탐침을 사용하였는데, 기포의 흐름이 전기저항 탐침에 의해 측정된 전형적인 예를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 전기저항 탐침에 액 체가 접촉되면 전기저항이 크게 변화가 없으나 기체가 접촉하면 전 기저항에 큰 변화가 일어나는 것을 볼 수 있다.

기포탑 내부에 존재하는 기포의 크기와 기포의 크기에 따른 기포 들의 빈도수를 구할 수 있으므로 이들 자료를 통계적으로 처리하여 기포크기의 확률 밀도함수를 구하였다[13-15]. 기포탑 내부에 존재 하는 기포의 크기에 따른 확률밀도함수의 전형적인 예를 Fig. 4에 나 타내었다. Fig 4와 같은 기포의 크기에 따른 확률밀도함수는 기포의 크기에 따른 빈도수를 나타내므로, 이들 자료들로부터 일정한 기포 탑의 조업조건에서 기포크기 분포의 메디안(median)값을 구하여 기 포크기의 평균값을 구하였다. 또한, 일정조업 조건에서 기포의 크기 에 따른 기포의 빈도수 자료로부터 기포의 크기에 따른 기포의 체류 량을 구할 수 있었다[17-19]. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 기체의 유속이

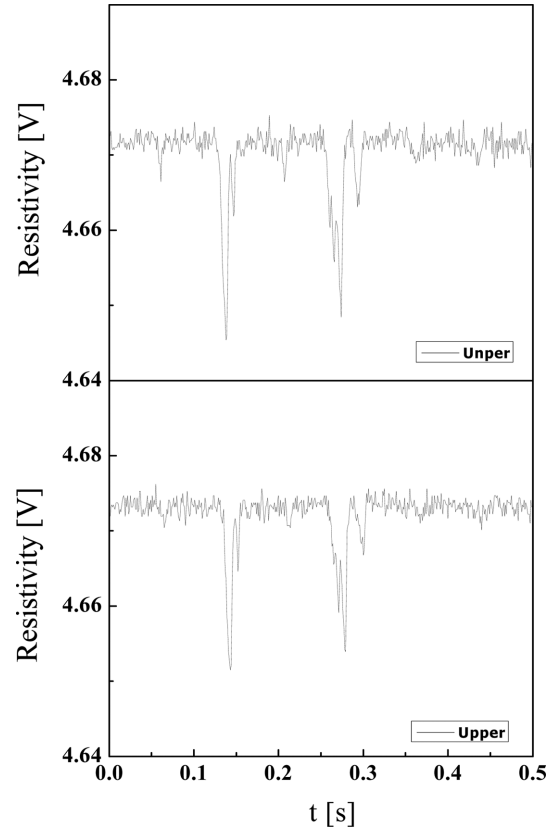


Fig. 3. Typical output signals from the dual-electrical resistivity probe (DRP) ( $U_G=0.8$  m/s).

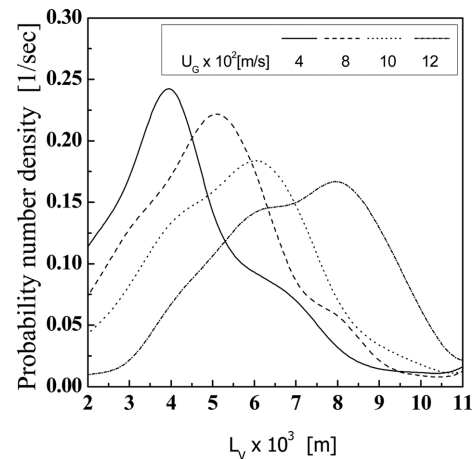


Fig. 4. Typical example of bubble size distribution measured by the dualelectrical resistivity probe (DRP).

증가함에 따라 기포 크기의 확률밀도함수는 오른쪽으로 이동하였으 며 확률밀도함수의 폭도 점점 넓어지는 것을 알 수 있다. 이는 기체 의 유속이 증가함에 따라 기포탑 내부에 유입되는 기포의 양이 많아 지고 기포들끼리의 충돌과 합체현상에 의해 기포의 크기가 점점 증 가하기 때문으로 해석할 수 있다. 또한, 기체의 유속이 증가하면 기 포의 크기가 커지기도 하지만 일정 크기 이상이 되면 기포가 기포탑 에서 상승하면서 불안정하게 되어 기포의 분쇄 현상도 일어나므로 기체의 유속이 증가하면 기포탑 내부에 존재하는 기포의 크기 분포 가 점점 넓어지는 것을 나타내고 있다.

한편, 기포탑에 존재하는 큰 기포와 작은 기포의 크기를 구별하기

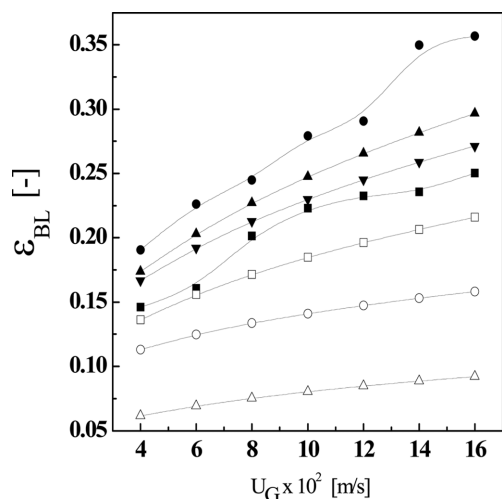
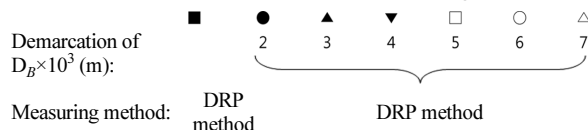


Fig. 5. Comparison of large bubble holdup measured by DGD method with those by DRP method with a variation of  $U_G$ .



위하여 기포탑에서 기체의 유속이 변화함에 따라 동력학적 기체유출 방법과 이중전기저항 탐침법에 의해 각각 측정된 큰 기포의 체류량을 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. Fig. 5에서 이중 전기저항 탐침법에 의해 측정된 큰 기포의 체류량( $\epsilon_{BL}$ )은 일정한 기체 유속조건에서 큰 기포와 작은 기포의 크기 경계를 각각 2, 3, 4, 5, 6 및 7 mm로 하였을 경우에 이 경계의 크기보다 큰 기포의 체류량을 나타낸 것이다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 일정 기체유속 조건에서 동력학적 기체 유출방법(DGD method)에 의해 측정된 큰 기포의 체류량은 전기저항 탐침법(DRP method)에 의해 측정된 기포들중에서 큰 기포와 작은 기포의 경계크기를 4 mm로 하였을 경우의 큰 기포의 체류량과 경계 크기를 5 mm로 하였을 경우의 큰 기포의 체류량 사이에 분포하였다. 또한, 동력학적 기체유출 방법에 의해 측정된 큰 기포의 체류량은 기체의 유속이 작은 범위( $U_G=0.04\sim0.06$  m/s)에서는 큰 기포와 작은 기포의 경계크기가 5 mm인 경우의 큰 기포의 체류량에 접근하였으나, 기체의 유속이 증가함에 따라( $U_G=0.08\sim0.16$  m/s) 점점 기포의 경계 크기가 4 mm인 경우의 큰 기포의 체류량에 접근하는 것을 알 수 있다. 이와같은 결과는 기포탑에서 기체의 유속이 작은 범위에서 큰 기포와 작은 기포의 경계는 5.0 mm 정도이나 기체의 유속이 큰 범위에서는 4.0 mm 정도가 됨을 의미한다고 할 수 있다.

한편, 기포탑 내부에서 전기저항 탐침법에 의해 측정된 기포의 크기와 빈도수 자료로부터 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기 선정에 따라 결정되는 작은기포의 체류량을 기체의 유속변화에 따라 Fig. 6에서 큰 기포와 작은 기포의 경계크기가 2 mm로 선정하면 이 경우 기포탑 내부에 작은 기포의 체류량은 매우 작은 값을 나타내는데 이는 기포탑에 존재하는 기포중 기포의 크기가 2 mm보다 작은 기포들의 체류량만을 고려하기 때문이다. 그러나, 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기를 7 mm로 선정하면 기포탑 내부에 존재하는 작은 기포의 체류량은 실제 존재하는 작은 기포의 체류량보다 매우 커질수 있음을 나타내고 있다.

기포탑 내부에 실제 존재하는 크기가 작은 기포의 체류량( $\epsilon_{BS}$ )과

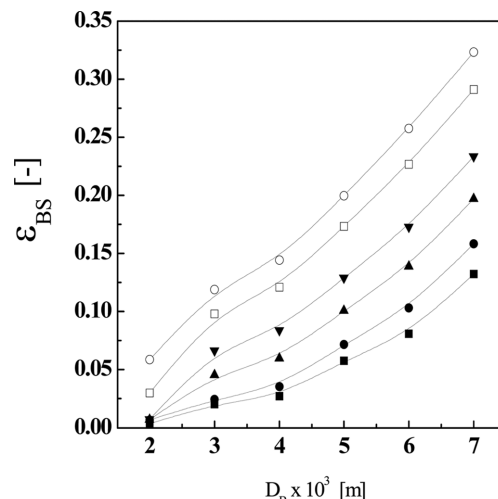


Fig. 6. Effects of Demarcation size of large and small bubbles on the small bubble holdup with a variation of gas velocity.

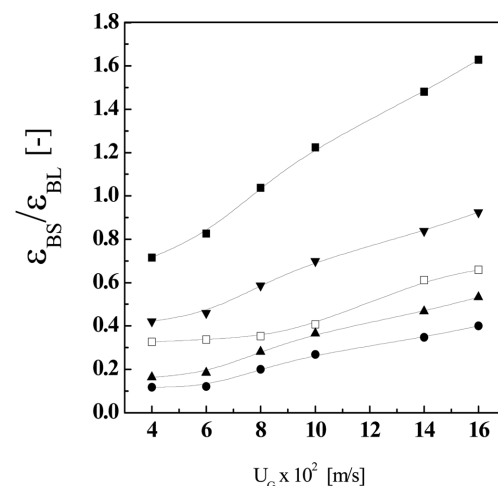
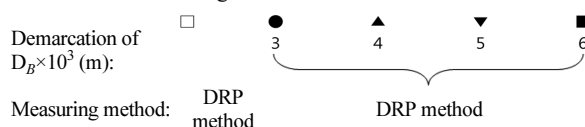


Fig. 7. Effects of Gas velocity on the ratio of  $\epsilon_{BS}/\epsilon_{BL}$  depending on the demarcation size of large and small bubbles.



크기가 큰 기포의 체류량( $\epsilon_{BL}$ )의 비와 기체 유속과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 기포탑 내부에 존재하는 작은 기포와 큰 기포의 체류량비( $\epsilon_{BS}/\epsilon_{BL}$ )는 기체의 유속이 증가함에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 기체의 유속이 증가하면 기포의 크기 분포가 넓어지는 현상과도 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서 기포탑에 존재하는 크기가 작은 기포와 큰 기포의 체류량의 비가 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기를 4 mm로 선정했을 때의 작은 기포와 큰 기포의 체류량 비와 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기를 5 mm로 선정했을 때의( $\epsilon_{BS}/\epsilon_{BL}$ ) 값 사이에 위치함을 알 수 있다. 또한, 이 경우에도 Fig. 5에서와 같이, 기체의 유속이 비교적 낮은 범위( $U_G=0.04\sim0.06$  m/s)에서는  $\epsilon_{BS}/\epsilon_{BL}$  값이 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기를 5 mm로 선정했을 때의( $\epsilon_{BS}/\epsilon_{BL}$ ) 값에 접근하였으며, 기체 유속이 비교적 큰 범위에서는 큰 기포와 작은 기

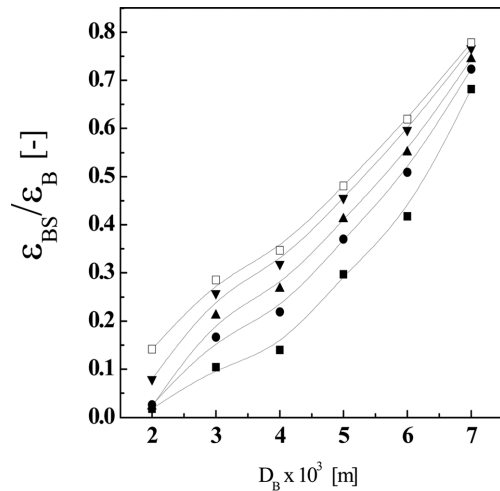


Fig. 8. Effects of demarcation bubble size on the ratio of  $\epsilon_{BS}/\epsilon_{BL}$  with a variation of gas velocity.

$U_G \times 10^2$  (m/s): ■ 4 ● 8 ▲ 10 ▼ 14 □ 16

포의 경계 크기를 4 mm로 선정하였을 때의 ( $\epsilon_{BS}/\epsilon_{BL}$ ) 값에 접근하는 것을 알 수 있다.

기포탑에서 큰 기포와 작은 기포의 경계가 되는 기포의 크기 선정이 기포탑 내부에 존재하는 작은 기포의 체류량이 전체 기포의 체류량에서 차지하는 비율( $\epsilon_{BS}/\epsilon_B$ )을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 기포탑 내부에 존재하는 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기를 2~3 mm 정도로 선정하면 기포탑 내부에 존재하는 작은 기포의 체류량 비율은 실제량보다 적어지며 또 이 기포들의 경계 크기를 6~7 mm 정도로 선정하면 기포탑 내부에 존재하는 작은 기포의 체류량 비율은 실제량보다 매우 큰 값을 나타낼 수 있다. 따라서, Fig. 5~8의 결과로부터 본 연구의 실험범위에서 기포탑 내부에 존재하는 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기는 4~5 mm 정도가 적합하다고 판단되는데, 기체의 유속이 작은 범위에서는 경계 크기가 5 mm 정도가 되며 기체의 유속이 큰 범위에서는 기포의 경계 크기가 4 mm 정도가 된다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

기포탑에서 크기가 비교적 큰 기포와 상대적으로 작은 기포의 경계를 나타내는 경계 크기를 동력학적 기체 유출 방법과 전기저항 탐침법을 동시에 사용하여 기포의 특성을 고찰함으로써 규명할 수 있었다. 연속액상으로 물을 그리고 분산기체상으로는 여과된 압축공기를 사용한 기포탑계에 존재하는 상대적으로 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기는 4.0~5.0 mm이었다. 기포탑에서 기체의 유속이 비교적 낮은 범위( $U_G=0.04\sim0.06$  m/s)에서의 큰 기포와 작은 기포의 경계 크기는 5.0 mm에 접근하였으며, 비교적 기체의 유속이 큰 범위( $U_G=0.08\sim0.16$  m/s)에서의 기포의 경계 크기는 4.0 mm에 접근하였다.

#### 감 사

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(3A-3-1).

#### 사용기호

$D_B$  : Sauter mean diameter of bubbles [m]  
 $L_V$  : bubble chord length [m]  
 $n$  : flow behavior index [-]  
 $t$  : time [s]  
 $U_G$  : gas velocity [m/s]

#### 그리스 문자

$\epsilon_B$  : total gas phase holdup [-]  
 $\epsilon_{BL}$  : large bubble holdup [-]  
 $\epsilon_{BS}$  : small bubble holdup [-]

#### 아래첨자

G : gas phase

#### 참고문헌

- Dechwer, W. D., Bubble Column Reactors, John Wiley and Sons Ltd.,(1992).
- Nigam, K. D. P. and Schumpe, A., Three-phase Sparged Reactors.
- 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).
- 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).
- Krishna, R. and Sie, S. T., "Design and Scale-up of the Fischer-Tropsch Bubble Column Slurry Reactor," *Fuel Process. Technol.*, **64**, 73-105(2000).
- Lim, D. H., Jang, J. H., Kang, Y. and Jun, K. W., "Axial and Radial Distributions of Bubble Holdup in a Slurry Bubble Column with Pilot Plant Scale," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **49**, 200-205 (2011).
- Jin, H. R., Song, Y. H., Kang, Y., Jung, H. and Lee, H. T., "Holdup Characteristics of Small Bubbles in a Viscous Slurry Bubble Column," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **49**, 83-88(2011).
- 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).
- Chem, Z., Zheng, C. and Hofmann, H., "Local Bubble Behavior in Three-Phase Fluidized Beds," *Can. J. Chem. Eng.*, **76**, 315-318 (1998).
- Matsuura, A. and Fan, L. S., "Distribution of Bubble Properties in a Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed," *AIChE J.*, **30**, 894-903 (1984).
- Saberi, S., Shakourzadmu, K., Bastoul, D. and Militzer, J., "Bubble size and Velocity Measurement in Gas-Liquid Systems: Application of fiber optic technique to Pilot Plant Scale," *Can. J.*

- Chem. Eng.*, **70**, 253-257(1995).
12. Wang, T., Wang, J., Yang, W. and Jin, Y., "Bubble Behavior in Gas-Liquid-Solid Three-phase Circulating Fluidized Beds," *Chem. Eng. J.*, **84**, 397-404(2001).
  13. Zhang, L., Li, T., Ying, W. and Fang, D., "Rising and Decending Bubble Size Reactor," *Chem. Eng. Res. Des.*, **86**, 1143-1154(2008).
  14. De Swart, J. W. A., Van Vliet, R. E. and Krishina, R., "Size, Structure and Dynamics of Large Bubbles in a Two-Dimensional Slurry Bubble Column," *Chem. Eng. Sci.*, **51**, 4619-4629(1996).
  15. Krishna, R. and Van Bate, J. M., "Simulting the Motion of Gas Bubbles in a Liquid," *Nature*, **398**, 208(1999).
  16. Krishna, R., Van Baten, J. M., Wreanu, M. I. and Ellenkerger, J., "Design and Scale up of a Bubble Column Slurry Reactor for Fischer - Tropsch Synthesis," *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 537-545(2001).
  17. Son, S. M., Song, P. S., Lee, C. G., Kang, S. H., Kang, Y. and Kusakabe, K., "Bubbling Behavior in Gas-Liquid Countercur-  
rent Bubble Column Bioreactors," *J. Chem. Eng. Japan*, **37**, 990-998(2004).
  18. Son, S. M., Kang, S. H., Kim, U. Y., Kang, Y. and Kim, S. D., "Axial Variation and Distribution of Bubble Properties in Gas/Liquid Countercurrent Fluidized Beds," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **42**, 235-240(2004).
  19. Son, S. M., Kang, S. H., Kim, U. Y., Kang, Y. and Kim, S. D., "Bubble Properties in Three-Phase Inverse Fluidized Beds with Viscous Liquid Medium," *Chem. Eng. Processing*, **46**, 763-741(2007).
  20. 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**, 671-677(2005).
  21. 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**, 254-261(2001).