

파일럿규모 슬러리 기포탑에서 기포체류량의 축방향, 반경방향 분포

임대호 · 장지화 · 강 용[†] · 전기원^{*}

충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
*한국화학연구원 그린화학연구단
305-600 대전시 유성구 장동 100
(2010년 8월 4일 접수, 2010년 8월 25일 채택)

Axial and Radial Distributions of Bubble Holdup in a Slurry Bubble Column with Pilot Plant Scale

Dae Ho Lim, Ji Hwa Jang, Yong Kang[†] and Ki Won Jun^{*}

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

^{*}Green Chemical Technology Division, Korea Research Institute of Chemical Technology,

100 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea

(Received 4 August 2010; accepted 25 August 2010)

요 약

직경 1.0 m인 파일럿 규모 슬러리 기포탑에서 기포체류량의 축방향, 반경방향분포를 고찰하였다. 기체의 유속, 연속 액상의 표면장력 그리고 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율이 기포탑 내부 기포의 축방향 및 반경방향 분포에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구의 실험조건 모두에서 체류량은 기포탑의 중심으로부터 반경방향 무차원 거리가 증가함에 따라 감소하였으며, 기포탑의 분산판으로부터 축방향의 무차원의 거리가 증가함에 따라 증가하였다. 기포체류량의 반경방향 불균일도는 기체의 유속이 증가함에 따라 연속 액상의 표면장력이 감소함에 따라 증가하였으나 슬러리상에 포함된 고체입자 분율에는 크게 영향을 받지 않았다. 본 연구의 범위에서 축방향과 반경방향 기포체류량의 분포는 각각의 실험변수의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

Abstract – Axial and radial distributions of bubble holdup were investigated in a slurry bubble column with pilot plant scale(D=1.0 m). Effects of gas velocity, surface tension of continuous liquid medium and solid fraction in the slurry phase on the axial and radial distributions of bubble holdup were examined. The bubble holdup decreased with increasing radial dimensionless distance from the center of the column, while it increased with increasing dimensionless distance in the axial direction from the distributor, in all the cases studied. The radial non-uniformity of bubble holdup increased with increasing gas velocity but decreasing surface tension of liquid medium, while it was not dependent upon the solid fraction in the slurry phase. The axial non-uniformity of bubble holdup increased with increasing gas velocity, but it does not change considerably with variations of liquid surface tension or solid fraction in the slurry phase. The axial and radial distributions of bubble holdup were well correlated in terms of operating variables within this experimental conditions.

Key words: Axial and Radial Distribution, Bubble Holdup, Slurry Bubble Column, Surface Tension, Pilot Plant Scale

1. 서 론

슬러리 기포탑은 연속상인 액상과 분산상인 기포의 접촉효과가 좋을 뿐만 아니라 연속상에 의해 연속적으로 이동 및 접촉이 원활한 고체촉매입자나 흡수, 흡착등에 사용되는 고체매체입자를 사용할 수 있기 때문에 공업적으로 그 응용가치가 증명되고 있다[1-4].

특히, 촉매입자를 이용하여 액상에서 p-xylene을 terephthalic산으로 산화시키거나, cyclohexane을 cyclohexanol로, glucose를 glutonic으로 산화시키는 반응을 비롯하여 많은 유기화합물을 함유하고 있는 폐수를 처리하는 공정에 이르기까지 실제공정에서 슬러리 기포탑반응기는 매우 광범위하게 사용되고 있다.

기체, 액체, 고체의 삼상이 존재하는 슬러리 기포탑의 장점을 활용하여 공업적으로 많이 사용되고 있는 슬러리 기포탑 반응기는 그러나, 반응기 내부에 분산상으로 존재하는 기포의 거동이 불규칙적으로 무작위적일 뿐만이 아니라 운전조건이나 설계변수 등에 의해

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

^{*}이 논문은 전북대학교 김기주 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

기포의 거동 및 동특성이 변화하므로 반응기의 성능이 큰 영향을 받게 된다. 따라서, 슬러리 기포탑 반응기 내부에서 기포체류량 거동은 슬러리 기포탑 반응기의 해석에 매우 중요한 요소가 된다. 그 중에서도 기포탑 반응기 내부에서의 분포는 기체 반응물의 분포와 혼합 정도를 나타내므로 슬러리 기포탑 반응기의 성능결정에 주요제어인자가 되어왔다[1,2,5].

기포탑이나 슬러리 기포탑에서 기포의 체류량 측정은 압력강하 측정방법, 전기전도도 측정방법, 전기저항측정방법, 초음파측정방법, 광학측정방법(optical probe measurement), X-ray 측정방법, γ -ray 측정방법, 정전용량(electrical capacitance) 측정방법 그리고 기체 유출 동특성(dynamic gas disengagement) 측정방법 등 많은 연구방법에 의해 그 동안 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 왔으나[6-9], 이들 대부분의 연구는 기포탑의 직경이 실험실 규모를 벗어나지 못하여 왔다.

그러나, 실험실 규모의 작은 장치에서 얻은 실험적 측정결과만으로는 반응기나 공정의 규모를 크게 증가시키는 scale-up이나 공장 규모의 설계를 위해서는 그 응용이나 적용성에서 많은 제한점을 가져왔다. 또한, 수치모사방법에 의한 CFD(computational fluid dynamics) 모델 등을 사용하여 반응기나 공정을 해석하여도 이에 도입된 많은 가정들 때문에 그 결과가 현실적으로 적용 가능한지의 여부를 판단하는 데는 많은 애로점을 가지고 있었다.

따라서, 본 연구에서는 직경 1.0 m의 파일럿 규모 슬러리 기포탑에서 기포 체류량의 분포를 반경방향과 측방향의 실험 위치에서 측정하여 슬러리 반응기 내부 전체에서 기포 체류량의 분포특성을 고찰하였다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 삼상 슬러리 기포탑 반응기 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직경이 1.0 m이고 높이 3.0 m인 아크릴로 제작된 기포탑을 사용하였다. 본 연구의 실험 변수로는 기체유속, 액상의 표면장력 그리고 슬러리상에 포함된 고체입자의 무게분율을 선정하였으며, 각 실험조건에서 기포탑의 반경방향 및 측방향 기포의 체류량을 측정하였다. 연속상의 액상으로는 물과 에틸알코올의 혼합용액을 사용하였는데, 에틸알코올의 혼합비율에 따라 액상의 표면장력을 $59.31 \sim 72.75 \times 10^{-3}$ N/m로 변화시켰다.

기포탑 내부에서 측 방향 및 반경방향의 일정지점에서 기포의 체류량은 이중전기저항탐침(dual electrical resistivity probe)을 사용하여 측정하였는데, 기포의 체류량은 식 (1)에 의해 결정되었다[10-13].

$$\epsilon_b = \frac{\sum t_i}{T} \quad (1)$$

식 (1)에서 t_i 는 전기저항탐침이 기포에 노출된 시간이며, T 는 총 측정시간을 나타낸다. 전기저항탐침에서는 10V의 직류전압을 걸어 주어서 액체상과 기포의 전기적 저항차이를 감지하도록 하였다. 기포탑 내부에서 기포의 체류량을 측정한 위치는 무차원 좌표로 반경방향은 r/R 의 값이 0, 0.3, 0.6 그리고 0.8인 위치를 선정하였으며 측방향으로는 H/L 의 값이 0.2, 0.35, 0.45 그리고 0.6인 위치를 선정하였다. 여기서, r 은 기포탑의 중심축으로부터의 반경방향으로의 거리를 나타내고 R 은 반경이며, H 는 기체분산판으로부터 측 방향의 거리를 나타내고 L 은 기포탑의 높이를 나타낸다. 전기저항탐침은 직경

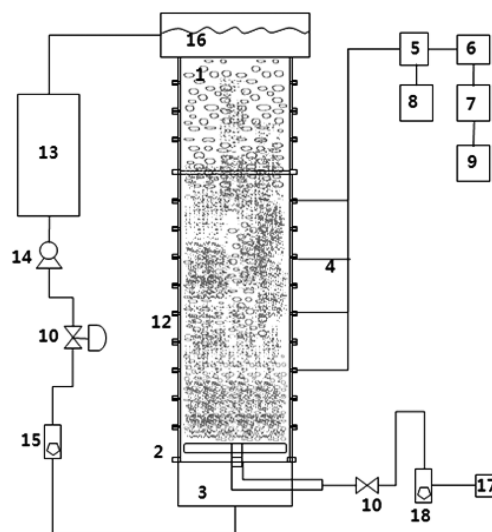


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|----------------------------|-----------------------|
| 1. Main column | 10. Valve |
| 2. Gas distributor | 11. Globe valve |
| 3. Calming section | 12. Pressure tap |
| 4. Resistivity probe | 13. Liquid reservoir |
| 5. Resistivity circuit | 14. Liquid pump |
| 6. A/D converter | 15. Liquid flow meter |
| 7. Date acquisition system | 16. Weir |
| 8. D/C power supplier | 17. Compressor |
| 9. Computer | 18. Gas flow meter |

이 0.2 mm인 백금선으로 만들어졌으며 두끝의 거리는 2 mm이었다.

전기저항탐침법에 의해 측정된 시간의 변화에 따른 전기저항의 변화자료는 증폭기와 여과기(filter)를 거친 후 A/D변환기를 이용하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 변화시켰으며 이들 자료들은 데이터 획득장치(data acquisition system, NI cDAQ-9174 Chassis, NI 9205 Analog Input Module, Labview 2009)를 사용하여 PC에 저장하였다[10-13]. 이렇게 측정된 자료는 Labview 2009 프로그램상에서 on-line으로 해석하였으며 측정자료의 재현성을 고찰하기 위해 2~4회 반복하였다.

3. 결과 및 고찰

파일럿 규모 슬러리 기포탑에서 기포의 반경방향 및 측 방향분포의 전형적인 예를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 직경 1.0 m의 슬러리 기포탑에서 기포의 반경방향 분포는 기포탑의 중심에서 기포체류량이 가장 많으며 벽면으로 갈수록 기포의 체류량은 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 기포탑의 직경이 작은 경우에서도 나타나는데[5-7], 본 연구의 실험과 같이 기포탑의 직경이 큰 경우에도 더욱 확실히 나타났다. 즉, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 Chen 등[14]의 실험결과는 직경이 0.44 m인 경우이고 Ueyama 등[15]의 경우는 직경이 0.60 m인 경우인데, 이들 기포체류량 값이 본 실험 결과에서 얻은 기포체류량보다 큰값을 나타낼 수 있다. 이는 기포탑의 직경이 증가할수록 기포의 체류량이 감소하기 때문으로 해석할 수 있다[14,15,16-18]. 또한, Fig. 2에서 기포체류량의 반경반향 감소경향이 Chen 등[14]의 실험결과와 본 연구의 실험결과가 약간 다르게 나타났다. 이것은 기체분산판 등 다른 실험조건에 기인하는 것으로 해석할 수 있다[1-3]. 그러나,

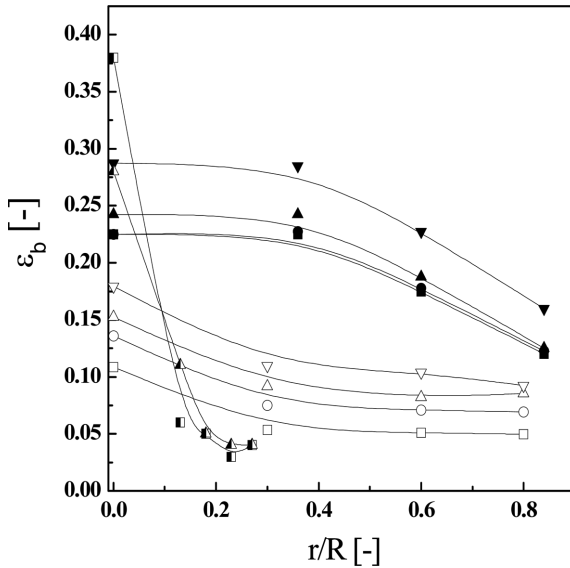


Fig. 2. Variations of axial and radial distributions of bubble holdup.

	■	●	▲	▼	□	○	△	▽	■	▲
D [m]	0.44	0.44	0.44	0.44	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	0.6
L [m]	2.40	2.40	2.40	2.40	3.0	3.0	3.0	3.0	3.3	3.3
L/H [-]	0.21	0.37	0.55	0.71	0.2	0.35	0.45	0.6	0.1	0.46
U_G [m/s]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.08	0.08	0.08	0.08	0.05	0.05
$\sigma_L \times 10^3$ [N/m]	72.75	72.75	72.75	72.75	59.31	59.31	59.31	53.31	72.75	72.75
	Chen <i>et al.</i> [14] bubble column				This study slurry bubble column				Ueyama <i>et al.</i> [15] bubble column	

Ueyama 등[15]의 실험결과와 본 연구의 결과와 유사한 양상으로 반경방향의 거리가 증가함에 따라 기포체류량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 기포탑에서 상승하는 기포가 벽면과 접촉을 하지 않고 점점 중앙으로 모이는 벽면효과(wall effect) 때문으로 해석할 수 있다. 한편, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 기포의 체류량은 기포탑의 높이가 증가할수록 점점 더 증가해가는 것을 알 수 있는데, 이와 같은 현상은 슬러리 기포탑에서 연속상인 슬러리상이 기포의 상승에 따라 기포탑 내부에서 순환하는 현상이 일어나기 때문으로 해석할 수 있다. 즉, 기포탑에서 분산상인 기포가 상승하면 연속상인 슬러리상이 하강하는 기포탑 내부에서 순환현상이 일어나는데, 연속상의 하강현상은 연속상에 분포되어 있는 분산상인 기포의 상승을 감소시키는 효과를 나타내게 되어 기포가 기포탑의 상부에 머물러 있는 시간(residence time)을 증가시키게 되어 기포탑의 상부로 갈수록 기포의 체류량은 증가한다고 할 수 있다.

슬러리 기포탑에서 기체의 유속이 기포의 반경방향 체류량 분포에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 기포체류량의 반경방향 분포는 기체의 유속이 증가함에 따라 기포탑의 중심에서 벽면으로 갈수록 급하게 감소하면서 점점 불균형도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기체의 유속이 증가함에 따라 기포의 크기와 갯수가 증가하고 기포의 체류량이 증가하게 되므로 이들 기포들이 기포탑의 벽면보다는 중앙으로 모이려는 경향이 증가하기 때문으로 해석할 수 있다. 슬러리 기포탑 반응기에서 불균일한 반응의 전환율을 높이기 위해서는 다상안에서(multiphase) 물질전달이 잘 일어나야하는데, 이를 위해서는 기체반응물의 양이 충분해야 하며 기포탑 내부에서 기체 반응물과 촉매인 고체입자들의 접촉효율이 좋아야 한다[14,16-18]. 이와 같은 조건을 만족시키기 위한 방법의

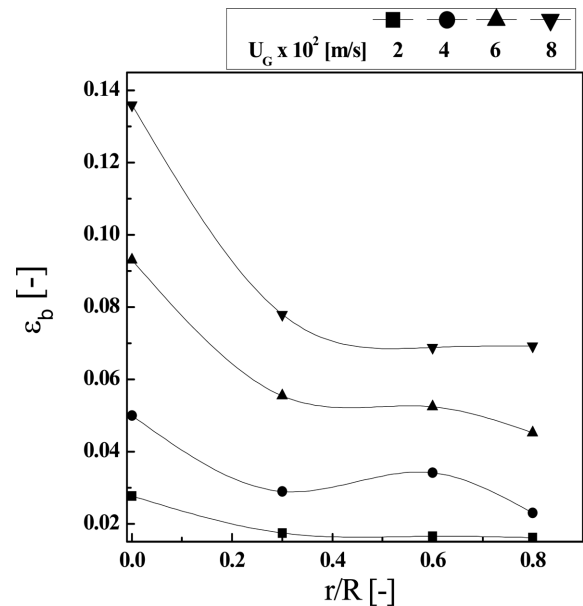


Fig. 3. Effects of gas velocity on the radial distribution of bubble holdup in a slurry bubble column reactor($H/L=0.35$, $\sigma_L=0.072$ N/m, $S_C=0.05$).

하나로 슬러리 기포탑 반응기 내부에서 기체의 흐름을 churn-turbulent 흐름 영역으로 운전조건을 유지하는 것이 중요한데[14,17,18], 이와 같은 조건에서는 기체의 유속이 크므로 기포체류량의 반경방향 불균형 분포가 심각하게 일어나는 것을 예측할 수 있다. 따라서, 실제 반응기의 설계에서는 기포체류량의 반경방향 불균일 분포를 고려하여 최적의 운전조건을 설정하는 것이 반응기의 효율과 성능 결정에 중요한 요소가 된다고 하겠다.

슬러리 기포탑에서 슬러리 상의 표면장력이 기포체류량의 반경방향 분포에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 연속상인 슬러리상의 표면장력이 작은 경우에 기포체류량의

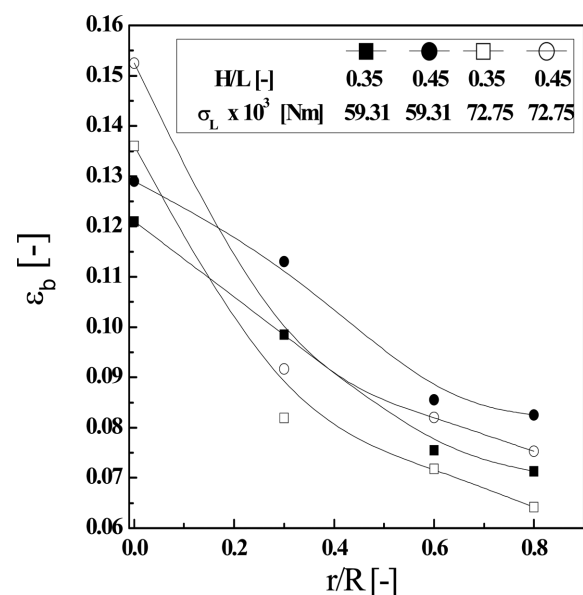


Fig. 4. Effects of liquid surface tension on the radial distribution of bubble holdup in a slurry bubble column reactor($H/L=0.6$, $U_G=0.02$ m/s, $S_C=0.05$).

반경방향 불균형정도는 감소한 것을 알 수 있다. 이는 연속상의 표면장력이 감소할수록 같은 기체의 유속조건에서 기포의 크기는 감소하고 갯수는 증가하며 기포의 체류량이 증가하여 이들 기포들이 기포탑의 벽면을 피해 중앙부분으로 모여들려는 경향이 감소하기 때문으로 해석할 수 있다. 이와 같이 연속액상의 표면장력이 감소하면 기포의 갯수가 증가하고 기포의 체류량이 증가하는 경향을 나타내는 것은 눈으로 쉽게 확인할 수 있었다. 기포탑의 직경이 작은 실험실 규모의 기포탑에서 기포 체류량의 상관식에 의해서도 기포의 체류량은 연속액상의 표면장력이 감소하면 증가하는 것으로 발표되고 있다[1]. 합성가스나 천연가스로부터 오일을 합성하고자 하는 GTL(gas-to-liquid) 공정과 같이 촉매를 사용한 기체반응의 결과 액상인 오일이 생성될 경우 이들 생성오일로 인해 슬러리 기포탑 반응기의 연속상인 슬러리상의 표면장력의 변화가 불가피하게 되므로 이에 따른 기포의 반경방향분포를 예측하는 것은 반응기 성능예측에 매우 중요한 일이라 하겠다.

슬러리 기포탑에서 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율이 기포의 반경방향 분포에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율이 증가함에 따라 전체적인 기포의 체류량은 감소하였으나, 본 연구의 범위($S_c=0 \sim 0.15$)에서 슬러리상에 포함된 고체입자의 양이 변화하여도 기포체류량의 반경방향 분포양상은 크게 변화하지 않는 경향을 나타내었다. 즉, 반경방향의 무차원 거리인 r/R 이 0.3이 되는 지점까지는 기포의 체류량이 많이 감소하였으나, 반경방향으로의 거리가 점점 증가함에 따라 기포체류량의 변화는 크게 나타나지 않았다.

슬러리 기포탑에서 기체상이 반응물인 경우 기포의 반경방향 분포뿐만 아니라 축방향의 분포도 전체 반응전환율과 반응기의 성능 결정에 중요한 요소가 되므로 본 연구에서는 각 실험변수가 기포체류량의 축방향 분포에 미치는 영향을 고찰하였다. 슬러리 기포탑에서 기체의 유속이 기포의 축방향 분포에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 기포체류량은 축방향 무차원거리가 증가함에 따라 점점 증가하였으며, 기체의 유속이 큰 범위

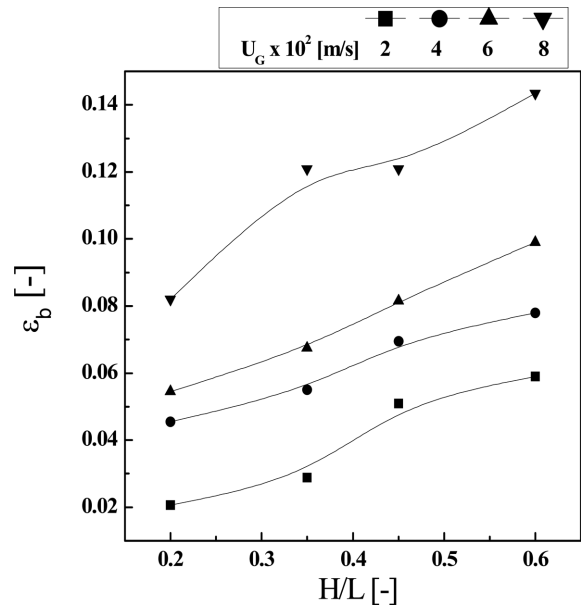


Fig. 6. Effects of gas velocity on the axial distribution of bubble holdup in a slurry bubble column reactor($r/R=0$, $\sigma_L=0.059$ N/m, $S_c=0.05$).

서 기체의 유속이 작은 범위와 비교하여 상대적으로 기포체류량이 축방향 무차원 거리가 증가함에 따라 증가하는 경향이 더욱 두드러지게 나타났다. 이는 기체유속이 큰 범위가 기포의 체류량이 크며 이 경우 기포의 상승에 따른 연속상의 순환 기류가 더욱 많아져서 기포탑 내부에서 축방향으로 높아짐에 따라 기포 체류량의 증가가 많은 것으로 해석할 수 있다.

슬러리 기포탑에서 연속상의 표면장력과 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율이 기포의 축방향 분포에 미치는 영향을 Fig. 7과 8에 각각 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 기포의 체류량은 연속액상의 표면장력이 증가할수록 전체적으로 작은 값을 나타내었

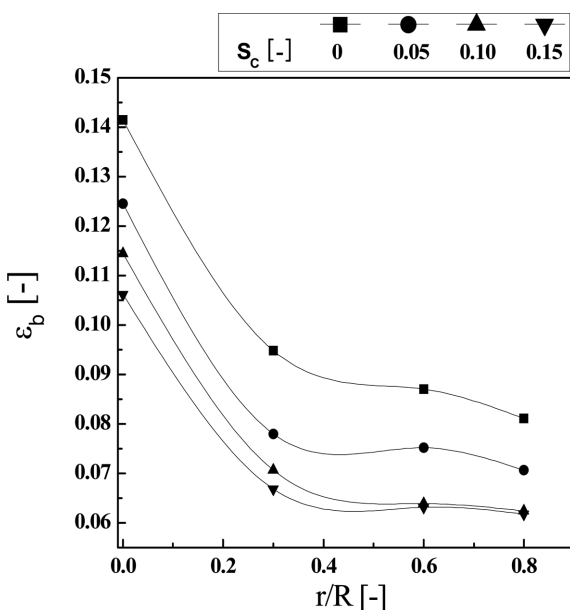


Fig. 5. Effects of solid content on the radial distribution of bubble holdup in a slurry bubble column reactor($H/L=0.45$, $U_G=0.06$ m/s, $\sigma_L=0.072$ N/m).

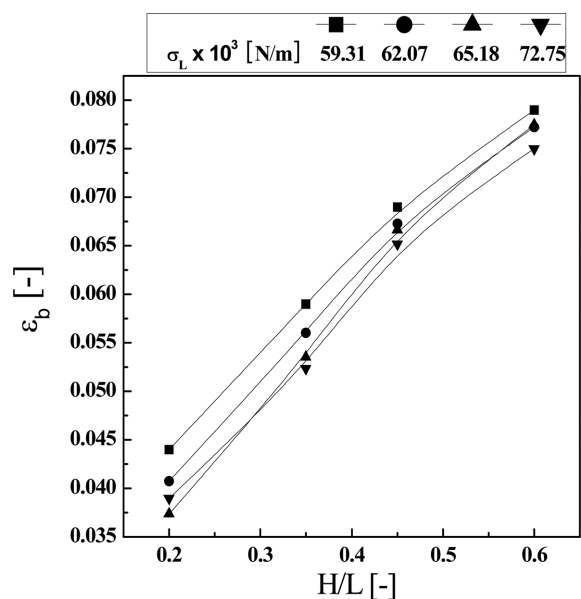


Fig. 7. Effects of liquid surface tension on the axial distribution of bubble holdup in a slurry bubble column reactor($r/R=0.6$, $U_G=0.06$ m/s, $S_c=0.05$).

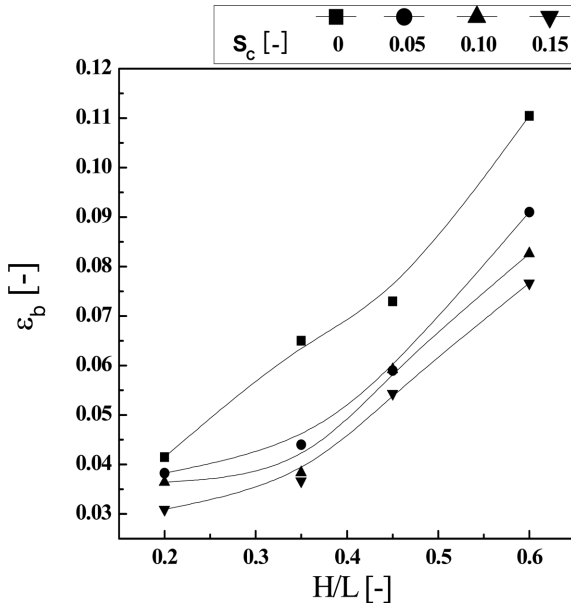


Fig. 8. Effects of solid content on the axial distribution of bubble holdup in a slurry bubble column reactor($r/R=0$, $\sigma_L=0.072$ N/m, $U_G=0.04$ m/s).

나, 표면장력이 변화하여도 축방향의 무차원 거리가 증가함에 따라 모든 경우에 거의 선형적으로 증가하였다. 한편, Fig. 8에서 기포의 체류량은 연속상이 슬러리상인 경우와 액상인 경우의 구별이 나타났으며 본 연구의 범위에서 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율이 증가함에 따라 기포체류량의 전체적인 값은 감소하였으나 기포체류량의 축방향분포 양상에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

본 연구의 범위에서 기포체류량을 반경방향 무차원거리(r/R), 축방향 무차원거리(H/L), 기체유속(U_G), 액상의 표면장력(σ_L) 그리고 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율(S_C)의 함수로 식 (2)와 같은 상관식을 얻을 수 있었다. 식 (2)는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 상관계수 0.958로 실험결과와 잘 맞는 것을 알 수 있다.

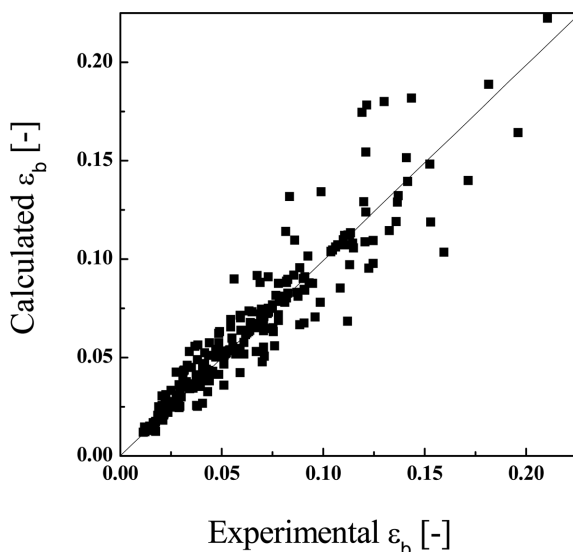


Fig. 9. Comparison of ε_b values between the estimated and the experimentally obtained.

$$\varepsilon_b = 0.047(r/R)^{-0.07} (H/L)^{0.66} U_G^{1.05} S_C^{-0.07} \sigma_L^{-0.30} \quad (2)$$

4. 결 론

직경이 1.0 m의 파일렛 규모 슬러리 기포탑 내부에서 기포의 체류량을 반경방향과 축방향의 모든 위치에서 측정하여 구함으로써 파일렛 규모 기포탑 내부에 기포의 체류량 분포를 해석할 수 있었다. 모든 실험조건에서 기포의 체류량은 반경방향 무차원 거리가 감소함에 따라, 축방향 무차원 거리가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 파일렛 규모 기포탑에서 기체의 유속이 증가함에 따라, 그리고 연속액상의 표면장력이 감소함에 따라 기포체류량의 반경방향 분포의 불균형은 점점 증가하였으며 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율이 기포체류량의 반경방향 분포에 미치는 영향은 크지않게 나타났다. 파일렛 규모 기포탑에서 기포의 유속이 증가함에 따라 축방향으로의 기포체류량은 점점 증가하는 경향을 나타내었으나, 연속액상의 표면장력과 슬러리 상에 포함된 고체입자의 분율이 기포체류량의 축방향분포에 미치는 영향은 크지 않았다.

본 연구의 실험범위에서 기포의 반경방향, 축방향 분포는 다음과 같은 실험변수의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

감 사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(3A-3-1).

사용기호

d_p : particle diameter[mm]
 H : height of axial dispersion[m]
 L : column height[m]
 r : diameter of radial dispersion
 R : column diameter
 S_C : solid fraction[-]
 t : time[s]
 U_G : gas velocity[m/s]

그리스 문자

ε : holdup[-]
 μ : viscosity[Pa·s]
 ρ : density[kg/m³]
 σ : surface tension[N/m]

하첨자

b : bubble phase
 L : liquid phase
 sl : slurry phase

참고문헌

- Deckwer, W. D., *Bubble column Reactors*, John Wiley and Sons Ltd., (1992).

2. Nigam, K. D. P. and Schumpe, A., "Three-phase Sparged Reactors," *Gorden and Breach*(1996).
3. Mill, P. L. and Chandhari, R. V., "Reaction Engineering of Emerging Oxidation Process," *Catal. Today*, **48**, 17-29(1999).
4. Pinta, A. and Levec, J., "Catalytic Liquid-Phase Oxidation of Refractory Organics in Waste Water," *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 2395-2400(1992).
5. 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).
6. Jang, J. H., Seo, M. J., Lim, D. H., Kang, Y. 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).
7. Seo, M. J., Lim, D. H., Jin, H. R., Kang, Y., Jung, H. and Lee, H. T., "Analysis of Hydrodynamics Similarity of Pressurized Three-phase Slurry bubble column for its Design and Scale-up," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **47**, 720-726(2009).
8. 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).
9. Kim, S. D. and Kang, Y., "Hydrodynamics, 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).
10. Son, S. M., Song, P. S., Lee, C. G., Kang, S. H., Kang, Y. and Kusakabe, K., "Bubble Behavior in Gas-liquid Counter Current Bubble Column Bioreactor," *J. Chem. Eng. Japan*, **37**, 990-998 (2004).
11. Son, S. M., Yun, J. H., Kim, H. T., Song, P. S., 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).
12. 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**, 736-741 (2007).
13. Lee, K. I., Son, S. M., Kim, U. Y., Kang, Y., Kang, S. H. and Kim, S. D., "Particle Dispersion in Viscous Three-phase Inverse Fluidized Beds," *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 7060-7067(2007).
14. Chen, J., Gupta, P., Degleesan, S., Al-Dahhan, M. H., Dudukovic, M. P. and Toseland, B. A., "Gas holdup Distributions in Large-Diameter Bubble Columns Measured by Computed Tomography," *Flow Measurement and Instrumentation*, **9**, 91-101(1998).
15. Ueyama, K., Morooka, S., Kolde, K., Kaji, H. and Mlyuchi, T., "Behavior of Gas Bubbles in Bubble Columns," *Ind. Eng. Process Des. Dev.*, **19**, 592-599(1980).
16. Jin, H., Yang, S., Guo, Z., Guangxiang, H. and Tong, Z., "The Axial Distribution of Holdups in an Industrial-Scale Bubble column with Evaluated Pressure Using -ray Attenuation Approach," *Chem. Eng. J.*, **115**, 45-50(2005).
17. 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).
18. Neathery, J. K. and Davis, B. H., "FT Catalyst Performance: Comparison Between Pilot-scale SBCR and CSTR Systems," *Catal. Today*, **84**, 3-8(2003).