

점성액체 기포탑에서 탑의 직경이 기포, wake 및 연속액상 체류량에 미치는 영향

임대호 · 장지화 · 강 용[†] · 전기원^{*}

충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
^{*}한국화학연구원, 그린화학연구단
305-600 대전시 유성구 장동 100
(2011년 1월 7일 접수, 2011년 1월 29일 채택)

Effects of Column Diameter on the Holdups of Bubble, Wake and Continuous Liquid Phase in Bubble Columns with Viscous Liquid Medium

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 7 January 2011; accepted 29 January 2011)

요 약

점성액체 기포탑에서 기포, wake 및 연속액상들의 체류량 특성을 고찰하였다. 기포탑의 직경(0.051, 0.076, 0.102 and 0.152 m ID), 기체 유속(0.02~0.16 m/s) 그리고 연속액상의 점도(0.001~0.050 Pa·s)가 기포, wake 및 연속액상의 체류량에 미치는 영향을 검토하였다. 기포, wake 그리고 연속액상들은 이중 전기 저항탐침방법에 의하여 성공적으로 구별할 수 있었다. 압축된 여과공기와 물 또는 CMC 수용액을 각각 기체와 연속액상으로 사용하였다. 기포탑에서 기포와 wake 상들을 연속적으로 검출하기 위해 자료수집장치(DT 2805 Lab Card)와 컴퓨터를 사용하였다. 탐침 써킷로부터 수집된 아날로그 자료는 디지털 자료로 변환되었으며, 이들 자료를 이용하여 기포탑에서 상승하는 단일기포 뿐만이 아니라 다중기포들의 후면에서 wake 상을 검출할 수 있었다. 기포와 wake 상의 체류량은 각각 기포탑의 직경과 연속액상의 점도가 증가함에 따라 감소하였으나 연속액상의 체류량은 증가하였다. 그러나, 기포와 wake의 체류량은 각각 기체 유속이 증가함에 따라 증가한 반면 연속액상의 체류량은 감소하였다. wake 상 체류량에 대한 기포 체류량의 비율은 기포탑의 직경 또는 기체의 유속이 증가함에 따라 감소한 반면 연속액상의 점도가 증가함에 점성액체 기포탑에서 기포, wake 그리고 연속액상의 체류량은 본 연구의 실험범위에서 다음과 같은 실험변수의 상관식으로 나타낼 수 있었다. $\epsilon_B = 0.043D^{-0.18}U_G^{0.56}\mu_L^{-0.13}$, $\epsilon_W = 0.003D^{-0.85}U_G^{0.46}\mu_L^{-0.10}$, $\epsilon_C = 1.179D^{0.09}U_G^{-0.13}\mu_L^{0.04}$.

Abstract – Holdup characteristics of bubble, wake and continuous liquid phases were investigated in bubble columns with viscous liquid media. Effects of column diameter(0.051, 0.076, 0.102 and 0.152 m ID), gas velocity($U_G=0.02\sim0.16$ m/s) and liquid viscosity($\mu_L=0.001\sim0.050$ Pa·s) of continuous liquid media on the holdups of bubble, wake and continuous liquid phases were discussed. The three phase such as bubble, wake and continuous liquid phases were classified successfully by adapting the dual electrical resistivity probe method. Compressed filtered air and water or aqueous solutions of CMC(Carboxy Methyl Cellulose) were used as a gas and a liquid phase, respectively. To detect the wake as well as bubble phases in the bubble column continuously, a data acquisition system(DT 2805 Lab Card) with personal computer was used. The analog signals obtained from the probe circuit were processed to produce the digital data, from which the wake phase was detected behind the multi-bubbles as well as single bubbles rising in the bubble columns. The holdup of bubble and wake phases decreased but that of continuous liquid media increased, with an increase in the column diameter or liquid viscosity. However, the holdup of bubble and wake phases increased but that of continuous media decreased with an increase in the gas velocity. The holdup ratio of wake to bubble phase decreased with an increase in the column diameter or gas velocity, however, increased with an increase in the viscosity of con-

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

[‡]이 논문은 KAIST 입선기 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

tinuous liquid media. The holdups of bubble, wake and continuous liquid media could be correlated in terms of operating variables within this experimental conditions as: $\varepsilon_B = 0.043D^{-0.18}U_G^{0.56}\mu_L^{-0.13}$, $\varepsilon_W = 0.003D^{-0.85}U_G^{0.46}\mu_L^{-0.10}$, $\varepsilon_C = 1.179D^{0.09}U_G^{-0.13}\mu_L^{0.04}$.

Key words: Bubble Column, Phase Holdup, Wake Phase, Viscous Liquid Media

1. 서 론

점성액체 기포탑은 기체상과 연속액상의 접촉과 혼합 그리고 기체상과 연속액상간의 물질전달 효과가 탁월하기 때문에 다상들간의 접촉이 일어나며 연속적으로 운전되는 화학공학분야의 기체-액체 반응을 동반하는 많은 공정들뿐만이 아니라 생물화학공학의 공정들 폐수처리 및 대기오염 방지를 위한 환경공학분야의 많은 공정들에서 응용되고 활용되어 왔다[1-3]. 그러나, 기포탑을 실제공정에 적용하기 위해서는 기포탑의 직경과 높이등 그 규모가 매우 커져야 하며, 기포탑 규모의 변화에 따라 액체와 기포의 흐름 형태나 특성이 변화하기 때문에 이에 따른 운전조건도 변화 하여야 한다[3-8]. 규모가 큰 기포탑 공정의 설계를 위해서는 기포탑 규모의 변화에 따른 수력학적 특성과 열전달 및 물질전달 등 전달현상의 특성들에 대한 많은 자료들이 필수적이라 할 수 있다. 그러나 현재 까지 이들 자료는 국내외를 막론하고 매우 부족한 실정이다. 기포탑에 대한 연구들은 많이 진행되어 왔지만 각 연구들은 대부분 실험실적 규모의 매우 작은 규모에서 각각의 특성에 맞는 운전조건을 설정하여 수행되었기 때문에 기포탑 규모가 커지게 되면 이들 자료의 적용에 한계가 있어왔기 때문이다.

따라서, 현장에서 기포탑 반응기나 공정의 설계 및 제작을 위해서는 많은 가정을 도입할 수 밖에 없었고 가정을 도입한 후에도 알려지지 않은 변수들에 대한 값(unknown values)의 추정이 불가피하여 부득이 현장의 경험을 바탕으로 이들 값들을 추정할 수 밖에 없었던 것이 현재의 상황이라 할 수 있다. 그러므로, 현장에서 실제로 응용되는 점성유체 기포탑의 설계나 scale-up, 최적 운전조건의 설정 등을 위해서는 기포탑 규모의 변화에 따라 기포탑 내부에서 각 상들의 흐름거동과 수력학적 특성 그리고 열전달 및 물질전달 거동의 변화 등에 대한 정보는 매우 중요하다고 하겠다.

한편, 기포탑이나 삼상유동층과 같이 기체가 기포의 형태로 분산상으로 존재하는 공정들에서는 기체와 연속액상간의 접촉거동이나 열 및 물질전달 현상 등이 기포의 후면에 형성되는 wake에 의해 큰 영향을 받는 것으로 보고되고 있으나 이에 대한 정보는 매우 미흡한 실정이다[1,2,9-11]. 기포탑이나 삼상의 흐름영역에서 기포의 후면에 형성된 wake의 특성에 대한 연구가 진행되고 있으나, 이들 대부분의 연구는 단일 기포의 후면에 형성된 wake의 특성이나 wake의 형성 메커니즘에 대한 연구로 국한되는 경우는 많았다[12-17]. 기포탑, 삼상 유동층 또는 슬러리 삼상 기포탑에서 wake의 특성과 wake의 인식으로 인해 각 공정에서 형성되는 각 상들의 기능에 대

한 연구들도 새롭게 조명되어가고 있다[18-22].

따라서, 본 연구에서는 점성 액체 기포탑에서 기포탑 직경이 변화할 때에 기포탑 내부에서 다상들의 흐름과 접촉거동의 기본이 되는 분산상으로 존재하는 기포와 기포의 후면에 형성되는 wake 상 그리고 연속액상의 체류량이 변화하는 특성을 고찰하였다.

2. 실 험

본 연구에서 사용한 점성액체 기포탑 반응기는 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 직경이 0.051, 0.076, 0.102 그리고 0.152 m이고 높이가 1.5 m인 stainless steel로 제작된 column을 주탑으로 사용하였다[8,22,23]. 실험 변수로는 기체유속, 기포탑의 직경, 그리고 연속액상의 점도로 선정하였으며, 기체로는 여과된 압축공기를 사용하였다. 기포탑 계 내에서 기체유속의 범위는 0.02~0.16 m/s, 연속액상의 점도는 0.001~0.050 Pa·s 범위에서 실험을 수행하였다. 액상으로는 물과 CMC(Carboxy Methyl Cellulose) 수용액을 사용하였는

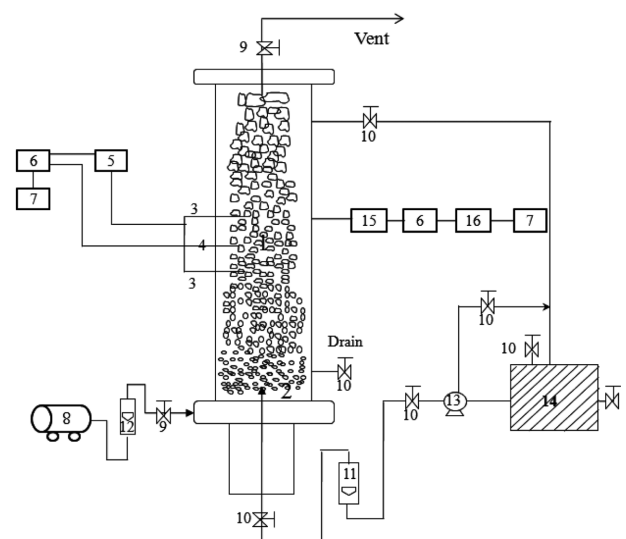


Fig. 1. Experimental apparatus.

- | | |
|----------------------|-----------------------------|
| 1. Main column | 9. Needle valve |
| 2. Gas distributor | 10. Valve |
| 3. Pressure probe | 11. Liquid flowmeter |
| 4. Resistivity probe | 12. Gas flowmeter |
| 5. Pressure sensor | 13. Slurry pump |
| 6. A/D converter | 14. Slurry reservoir |
| 7. Computer | 15. Resistivity circuit |
| 8. Compressor | 16. Data acquisition system |

Table 1. Physical and rheological properties of liquid phase

	apparent viscosity $\times 10^3$ (Pa·s)	surface tension $\times 10^3$ (N/m)	density (kg/m ³)	K (Pa·s ⁿ)	n	diffusivity $\times 10^9$ (m ² /s)	kinematic viscosity (m ² /s)
water	1	72.9	1000	0.001	1	2.22	9.61×10^{-7}
CMC 0.1 wt%	11	73.2	1001	21.69×10^{-3}	0.882	0.48	1.10×10^{-5}
CMC 0.2 wt%	24	73.3	1002	43.82×10^{-3}	0.847	0.26	2.40×10^{-5}
CMC 0.3 wt%	38	73.6	1003	71.69×10^{-3}	0.825	0.19	3.79×10^{-5}
CMC 0.4 wt%	50	73.9	1004	102×10^{-3}	0.802	0.15	4.98×10^{-5}

데 연속액상의 점도는 20 °C에서 LVDV-II Pro 점도계로 측정하였다. 본 연구에서 사용한 연속액상의 물성은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

기체를 일정한 유속으로 기포탑 내부에 주입하기 위하여 5마력의 공기압축기를 사용하였으며, 유입되는 기체의 양을 측정하기 위하여 기체 유량계(rotameter)를 설치하였고 니들밸브로 유입공기의 양을 조절하였다. 기포탑 내부에서 기포를 측정하기 위하여 분산판으로부터 0.5 m 위치에 이중 전기 저항탐침(dual-resistivity probe)를 설치하여 기포탑 내부에서 상승하는 기포와 wake 체류량을 측정하였다. 전기 저항탐침은 직경 7 mm의 stainless steel pipe로 제작하여 에폭시수지로 코팅하였으며 탐침의 tip으로는 0.2 mm의 백금선을 사용하였다[22,23]. 점성액체 기포탑에서 측정된 전기 저항탐침으로부터 신호는 1,000 Hz로 30초간 측정하여 증폭기(amplifier), Low-pass filter를 거친 후, A/D 변환기를 이용하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시켜, 데이터획득장치(data acquisition system, DT-2805 Lab-Board, DT-VEE software)를 사용하여 PC에 저장하였다. 저장된 디지털신호는 DT-VEE 프로그램 상에서 on-line으로 나타내어 해석하였다. 측정된 기포와 wake의 체류량 자료를 이용하여 식 (1)로부터 연속액상의 체류량을 결정하였다. 측정된 기포와 wake 자료의 재현성을 확인하기 위하여 자료의 위치를 조정하였으며 3~5회 측정하여 이들 자료의 평균값을 사용하였다[22,23].

$$\varepsilon_B + \varepsilon_W + \varepsilon_C = 1.0 \quad (1)$$

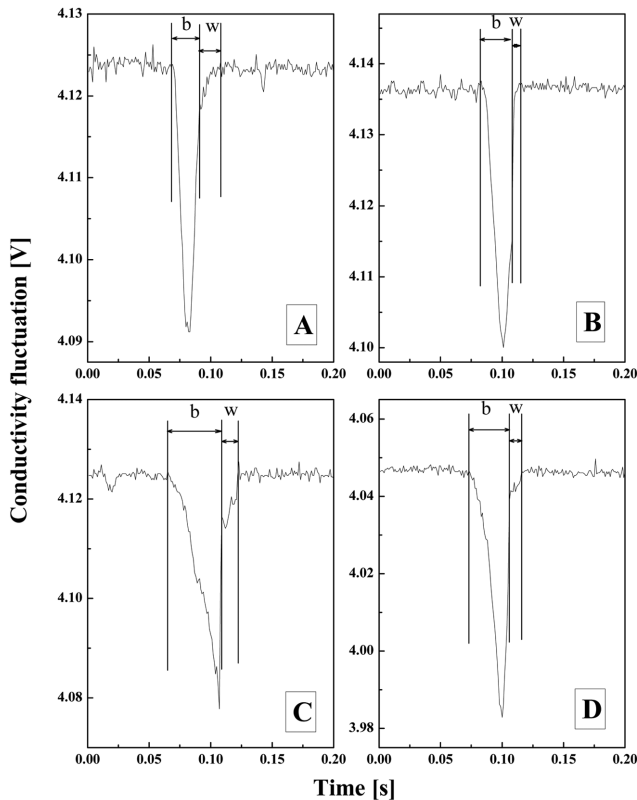


Fig. 2. Typical examples of bubble and wake detections in viscous bubble columns($D=0.152$ m, $\mu_L=0.011$ Pa·s).

	A	B	C	D
U_G [m/s] :	0.04	0.06	0.08	0.12

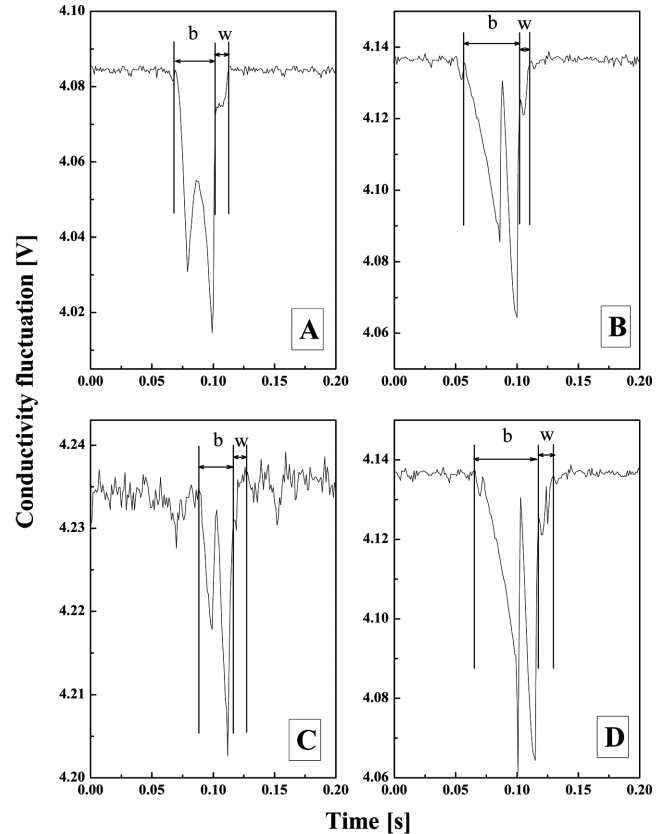


Fig. 3. Typical detections of multi-bubbles and wakes in viscous bubble columns($D=0.152$ m).

	A,B	C,D
U_G [m/s] :	0.04	0.06
μ_L [Pa·s] :	0.011	0.038

3. 결과 및 고찰

점성액체 기포탑에서 기포와 기포 후면에 형성되는 wake들은 Figs. 2와 3에서 보는바와 같이 기포탑 내부에 설치된 이중 전기저항탐침(dual-electric resistivity probe)에 의해 측정하였다. 즉, 전기 저항탐침에 연속액상의 영역에서 액상의 전기 전도도가 연속적으로 측정되다가 기포가 접촉되면 전기 전도도가 급격히 감소하였다. 그 후 기포가 상승하면서 기포 후면에 형성된 wake가 전기 저항탐침에 접촉하면 전기 전도도는 상승하여가서 wake가 탐침을 완전히 벗어나면 원래 상태의 연속액상이 접촉하는 전기 전도도 요동형태로 나타낸다. 이와 같은 전기 전도도 요동자료(conductivity fluctuations)에 의해 기포와 wake 그리고 연속액상의 평균 체류량을 결정하였다. 기포탑에서 상승하는 기포의 후면에 형성되는 wake는 기포의 상승에 따른 동 압력(dynamic pressure)의 변화에 따라 기체와 액체의 소용돌이 현상이 나타나는 영역이므로 이 영역은 기체와 액체를 모두 포함하고 있는 것으로 알려져 있다[18-21]. 이 영역에서는 기체와 액체의 접촉과 혼합이 매우 강하게 일어나므로 역학적 에너지의 소멸이 가장 크며, 이 영역의 거동특성이 기포탑 내부에서 열전달 현상과 기체-액체간의 물질전달 현상에 크게 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[1,6,9-11]. Fig. 2는 점성액체 기포탑의 직경이 0.152 m 인 경우 기체의 유속이 변화할 때 단일 기포의 경우에 나타나는 전기 전도도 요동 특성을 나타낸 것이며, Fig. 3은 기체의 유속과 연

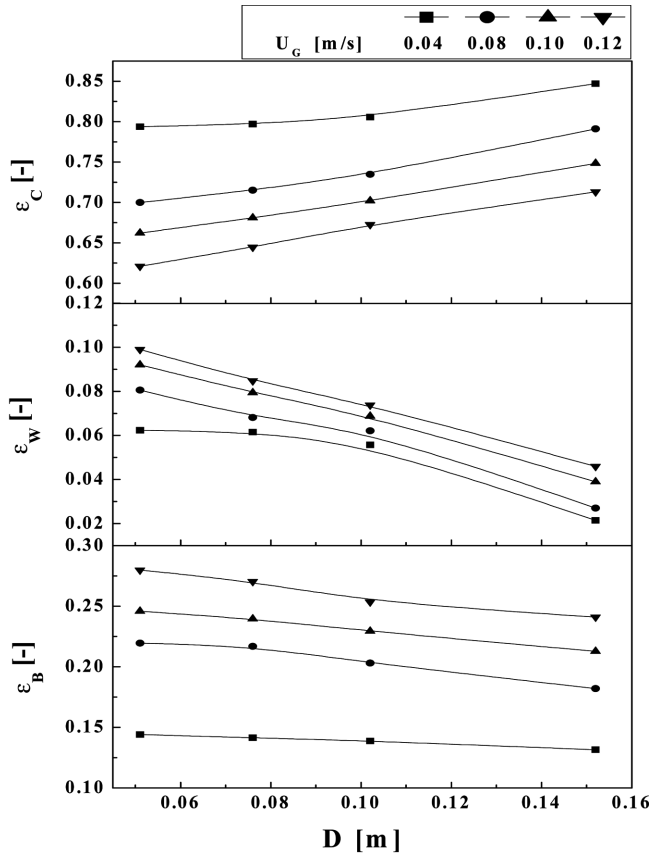


Fig. 4. Effects of column diameter and gas velocity on the holdups of bubble, wake and continuous liquid phase in bubble columns ($\mu_L=0.001$ Pa·s).

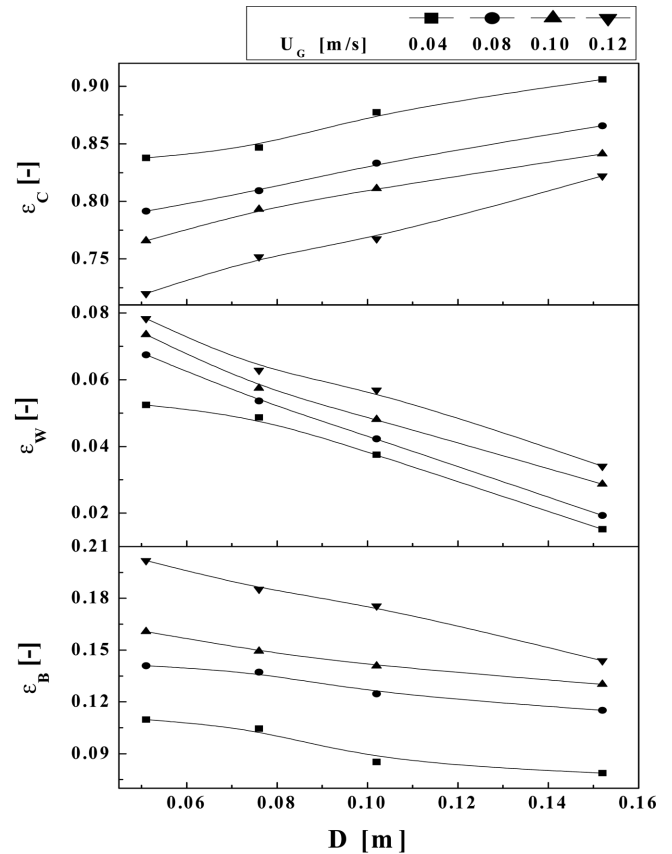


Fig. 5. Effects of column diameter and gas velocity on the individual holdups of bubble, wake and continuous liquid phase in bubble columns with viscous liquid medium ($\mu_L=0.038$ Pa·s).

속액상의 점도가 변화할 때 다중기포의 경우를 나타낸 것이다. 이들 Fig에서 볼 수 있듯이 기포탑에서 단일기포나 다중기포의 모든 경우에 wake 영역은 전기 전도도의 변화가 기포의 영역과 연속액상 영역의 중간부분에 위치하여 이들 영역들과 구별되게 측정됨을 알 수 있다.

연속액상이 물인 경우 기포탑에서 탑의 직경과 기체유속이 기포, wake 및 연속액상의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 연속액상의 체류량은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 증가하였으나 기체유속이 증가함에 따라 감소하였다. 기포탑에서 wake와 기포의 체류량은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 감소하였으며 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였다. 이와 같은 현상은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 기포탑의 전체 체적은 직경의 제곱에 비례하여 증가하나 기포탑에 유입된 기체는 분산상인 기포의 형태로 존재하므로 기포탑 체적의 증가에 비례하여 균일하게 분포하지 못하기 때문에 분산상의 체류량은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 감소한다고 할 수 있다. 기포의 체류량이 감소하므로 상승하는 기포의 후면에 형성되는 wake 영역의 체류량도 기포탑의 직경이 증가함에 따라 감소한다고 할 수 있다. 따라서, 기포탑에서 탑의 직경이 증가함에 따라 감소하는 분산상의 양 만큼 연속액상의 체류량은 증가한다고 할 수 있다. 기포탑에서 탑의 직경이 증가함에 따라 연속액상 체류량의 증가현상은 다른 연구자들의 연구결과에서도 보고되고 있다[2-4]. 한편, 기포탑에서 기체의 유속이 증가하면 기포탑에 유입되는 공기의 양이 증가하게 되어 기포의 체류량

이 증가하게 되고, wake의 양도 증가하지만, 이에 따라 연속액상의 체류량은 감소한다고 할 수 있다.

연속액상이 점성 유체인 경우에도 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 탑의 직경과 기체의 유속이 증가함에 따라 변화하는 각 영역의 체류량은 연속액상이 물인 경우와 비교하여 절대값들은 다르지만 변화하는 양상은 유사한 것을 알 수 있다. 점성액체 기포탑에서 연속액상의 점도가 기포탑의 연속액상, wake 및 기포의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 연속액상의 점도가 증가함에 따라 기포와 wake의 체류량은 감소하였으나 연속액상의 체류량은 증가하였다. 이는 연속액상의 점도가 증가함에 따라 기포탑에 유입된 기체들에 의해 생성되는 기포들의 합체현상이 증가하여 기포들의 크기가 커지므로 기포의 상승속도의 증가를 가져와 기포의 기포탑 내부 체류시간이 감소하기 때문에 기포의 체류량이 감소한다고 할 수 있다. 기포탑에서 기포의 체류량이 감소하면 기포의 후면에 형성되는 wake의 체류량도 감소하게 되는 효과가 나타나므로 연속액상의 체류량은 증가한다고 할 수 있다. 한편, 기포탑에서 기포의 후면에 형성되는 wake 체류량은 기포의 체류량과 밀접한 관계가 있으므로 wake의 체류량과 기포의 체류량의 비를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_W = n\varepsilon_B \quad (2)$$

기포탑에서 모든 운전조건에서 기포의 크기에 따라 일정하게

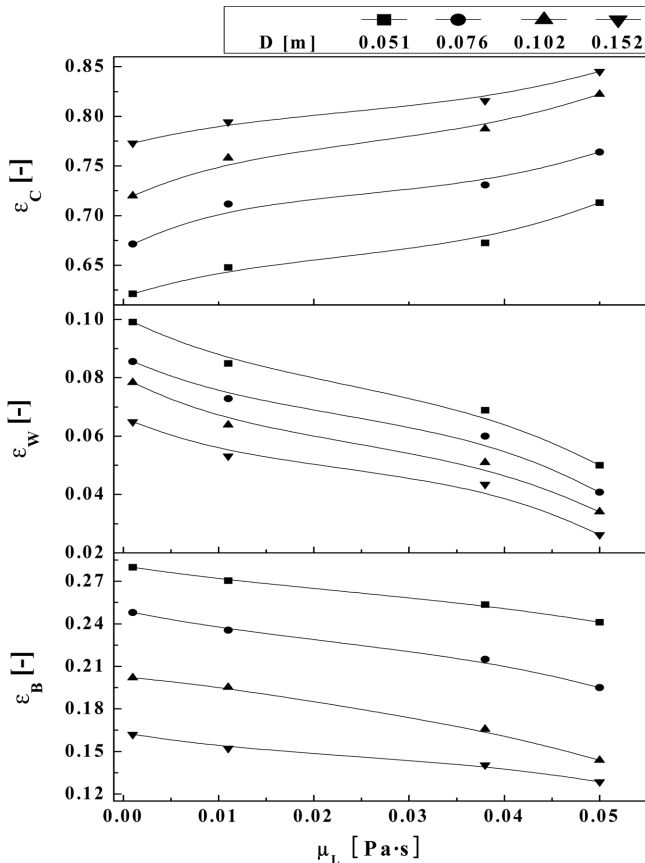


Fig. 6. Effects of liquid viscosity and column diameter on the individual holdups of bubble, wake and continuous liquid phase in bubble columns with viscous liquid medium ($U_G=0.12$ m/s).

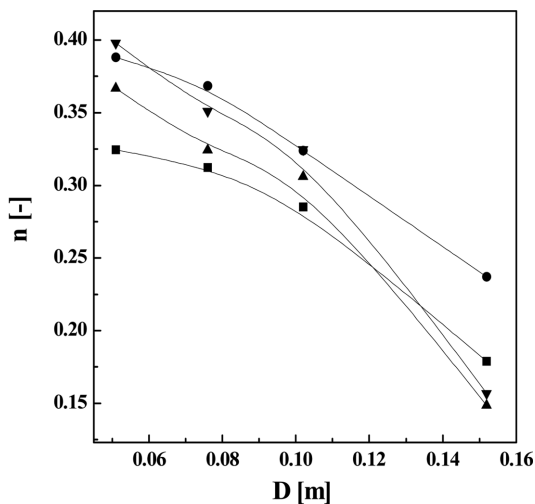


Fig. 7. Effects of column diameter and liquid viscosity on the value of m in bubble columns with viscous liquid medium

μ_L [Pas]	0.001	0.011	0.011	0.038
U_G [m/s]	0.08	0.08	0.12	0.12

wake의 영역이 형성되는 것이 아니라, 운전조건이나 연속액상의 물성의 변화에 따라 상승기포의 후면에 형성되는 wake의 크기가 다르게 나타나기 때문에, 기포탑의 직경과 기체의 유속 그리고 연속액상의 점도변화가 wake 영역 체류량과 기포 영역 체류량의 비에

미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 wake 영역의 기포 체류량에 대한 비는 기포탑의 직경이나 기체의 유속이 증가함에 따라 감소하지만 연속액상의 점도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

점성액체 기포탑에서 기포와 wake 그리고 연속액상의 체류량은 식 (3)~(5)와 같이 본 연구의 실험범위에서 탑의 직경, 기체 유속 그리고 연속액상의 점도의 함수로 나타낼 수 있었다.

$$\varepsilon_B = 0.043D^{-0.18}U_G^{0.56}\mu_L^{-0.13} \quad (3)$$

$$\varepsilon_W = 0.003D^{-0.85}U_G^{0.46}\mu_L^{-0.10} \quad (4)$$

$$\varepsilon_C = 1.179D^{0.09}U_G^{-0.13}\mu_L^{0.04} \quad (5)$$

식 (3)~(5)의 상관계수는 각각 0.958, 0.924 및 0.954으로 실험결과와 잘 맞는 것으로 나타났다.

4. 결 론

이중 전기저항탐침방법에 의하여 점성액체 기포탑에서 기포와 wake 그리고 연속액상의 체류량을 효과적으로 측정할 수 있었다. 점성액체 기포탑에서 기포와 wake의 체류량은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 감소하였으나 연속액상의 체류량은 증가하였다. 기포탑에 유입되는 기체의 유속이 증가함에 따라서 기포와 wake의 체류량은 증가하였으나 연속액상의 체류량은 감소하였다. 점성액체 기포탑에서 연속액상의 점도가 증가함에 따라 분산상인 기포와 wake의 체류량은 감소하였으나 연속액상의 체류량은 증가하였다. 점성액체 기포탑에서 상승기포의 후면에 형성되는 wake와 기포의 체류량의 비는 기포탑의 직경과 기체유속이 증가함에 따라 감소하였으나 연속액상의 점도가 증가함에 따라 증가하였다.

감 사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(3A-3-1).

사용기호

D	: diameter of column[m]
K	: consistency index in power-law model[Pa s^n]
k	: flow behavior index[-]
L	: length of test section[m]
n	: ratio of wake to bubble holdup[-]
ΔP	: pressure drop in the test section[Pa]
t	: time[s]
U_G	: gas velocity[m/s]

그리스 문자

α	: diffusivity[m/s]
ε_B	: bubble phase holdup[-]
ε_C	: continuous liquid phase holdup[-]
ε_L	: liquid phase holdup[-]
ε_W	: wake phase holdup[-]

- μ_L : liquid viscosity[Pas]
 ν : kinematic viscosity[m/s]
 ρ_B : gas density[kg/m³]
 ρ_L : liquid density[kg/m³]
 σ_L : surface tension of liquid phase[N/m]

참고문헌

1. Fan, L. S. and Tsuchiya, K., "Bubble Dynamics in Liquids and Liquid-solid Suspension," *Stoneham, MA, Butherworth Heinemann* (1990).
2. Deckwer, W. D., "Bubble Column Reactors," *John Wiley and Sons Ltd.*(1992).
3. 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).
4. Van Baten, J. M., Ellenberger, J. and Krishma, R., "Scale-up Strategy for Bubble Column Slurry Reactors Using CFD Simulations," *Catal. Today*, **79-80**, 259(2003).
5. 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(2009).
6. 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(2009).
7. 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(2009).
8. Shin, I. S., Son, S. M., Kim, U. Y., Kang, Y., Kim, S. D. and Jung, H., "Multiple Effects of Operating Variables on the Bubble Properties in Three-phase Slurry Bubble Columns," *KJChE*, **26**, 587-591(2009).
9. Kim, S. D. and Kang, Y., "Dispersed Phase Characteristics in Three-phase Fluidized Beds," *Mixed-flow Hydrodynamics, Advances in Engineering Fluid Mechanics*, Gulf Pub. Co., New York, U.S.A. (1996).
10. Kim, S. D. and Kang, Y., "Heat and Mass Transfer in Three-phase Fluidized-bed Reactors - an Overview," *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 3639 (1997).
11. 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(2008).
12. Funfschilling, D. and Li, H. Z., "Flow of Non-newtonian Fluids Around Bubbles: PIV Measurements and Birefringence Visualization," *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 1137(2001).
13. Sousa, R. G., Riethmuller, M. L., Pinto, A. M. F. R. and Campos, J. B. L. M., "Flow Around Individual Taylor Bubbles Rising In Stagnant CMC Solutions: PIV Measurements," *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 1859(2005).
14. Nogueira, S., Riethmuller, M. L., Campos, J. B. L. M. and Pinto, A. M. F. R., "Flow Patterns in the Wake of a Taylor Bubble Rising Through Vertical Columns of Stagnant and Flowing Newtonian Liquids: An Experimental Study," *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 7199 (2006).
15. Celata, G. P., Cumo, M., D'Annibale, F. and Tomiyama, A., "The Wake Effect on Bubble Rising Velocity in One-component Systems," *Int'l J. Multiphase Flow*, **30**, 939-961(2006).
16. Lertnuwat, B. and Bunyajitradulya, A., "Effects of Interfacial Shear Condition and Tailing - Corner Radius on the Wake Vortex of a Bubble," *Nuclear Eng. Des.*, **237**, 1526-1533(2007).
17. Chen, R. C. and Chou, I. S., "Wake structure of a single bubble rising in a two-dimensional column," *Expt. Therm. Fluid Sci.*, **17**, 165-178(1998).
18. Chen, R. C., Wang, F. M. and Lim, T. J., "Bubble Wake Dynamics of a Single Bubble Rising in a Two-dimensional Liquid-solid Fluidized Bed," *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 4831 (1999).
19. Li, Y., Zhang J. and Fan, L. S., "Numerical Simulation of Gas-liquid-solid Fluidization Systems Using a Combined CFD-VOF-DPM Method: Bubble Wake Behavior," *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 5101 (1999).
20. Tsuchiya, K. and Fan, L. S., "Prediction of Solid Concentration Profiles in Three-phase Reactors by a Wake Shedding Model," *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 1167(1988).
21. Kitano, K. and Fan, L. S., "Near-wake Structure of a Single Gas Bubble in a Two-dimensional Liquid-solid Fluidized Bed : Solid Holdup," *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 1355-1361(1988).
22. Jang, J. H., Lim, D. H., Kang, Y. and Jun, K. W., "Holdup Characteristics of Three Functional Regions in a Slurry Bubble Column," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **48**, 359-364(2010).
23. 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).