

전해질용액 기포탑에서 기포특성

유동준 · 임대호 · 전종설 · 양시우 · 강 용[†]

충남대학교 응용화학공학과
34134 대전시 유성구 대학로 99
(2016년 3월 16일 접수, 2016년 3월 31일 수정본 접수, 2016년 4월 1일 채택)

Bubble Properties in Bubble Columns with Electrolyte Solutions

D. J. Yoo, D. H. Lim, J. S. Jeon, S. W. Yang and Y. Kang[†]

Department of Chemical Engineering & Applied Chemistry, Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea
(Received 16 March 2016; Received in revised form 31 March 2016; accepted 1 April 2016)

요 약

직경 0.152 m이고 높이 2.5 m인 전해질용액 기포탑에서 기포의 크기(chord length)와 상승속도 등 기포의 물성에 대해 고찰하였다. 기포의 크기와 상승속도는 이중저항탐침법을 사용하여 측정하였다. 기체와 액체의 유속 그리고 액상의 이온강도가 기포의 크기와 상승속도에 미치는 영향을 결정하였다. 기포의 크기는 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였으나 액체의 유속과 액상의 이온강도가 증가함에 따라서는 감소하였다. 기포의 상승속도는 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하고 액상의 이온강도가 증가함에 따라 감소하였으나 액체유속의 변화에 따라서는 약한 최대값을 나타내었다. 기포의 크기와 상승속도는 운전변수들의 상관식으로 잘 나타낼 수 있었다.

Abstract – Bubble properties such as size (chord length) and rising velocity were investigated in a bubble column with electrolyte solutions, of which diameter was 0.152m and 2.5m in height, respectively. The size and rising velocity of bubbles were measured by using the dual electrical resistivity probe method. Effects of gas and liquid velocities and ionic strength of liquid phase on the size and rising velocity of bubbles were determined. The bubble size increased with increasing gas velocity but decreased with increasing liquid velocity or ionic strength of liquid phase. The rising velocity of bubbles increased with increasing gas velocity and decreased with increasing ionic strength of liquid phase, however, it showed a slight maximum value with varying liquid velocity. The size and rising velocity of bubbles were well correlated with operating variables.

Key words: Bubble column, Electrolyte solution, Ionic strength, Bubble size, Rising velocity

1. 서 론

연속상인 액상에 분산상인 기포가 흐르는 기포탑은 장치가 간단하며, 유지비용과 운전비용이 적으면서도 기체와 액체의 접촉효과가 뛰어나 기체-액체반응, 기체나 액체에 있는 특정성분의 분리, 흡수, 흡착 등에 매우 효율적으로 사용될 수 있어서 오일에 포함된 황성분 등 특정성분의 제거나 크래킹을 위한 석유화학공학, 호기성 미생물을 이용한 식품, 발효공학, 대기오염이나 폐수처리를 위한 환경공학, 기체성분으로부터 오일성분의 탄화수소 합성을 위한 에너지 공학, 미생물의 배양을 이용한 의약공학 등에 매우 광범위하게 사용되어 왔다[1-3]. 기포탑은 액상과 기체상의 접촉과 흐름에 따라 기체와 액체

간의 물질전달이 일어나며 무작위한 액체와 기체의 접촉에 의해 독특한 물리화학적 계를 형성하므로, 기포의 특성은 기포탑의 특성과 성능을 결정하는데 중요한 인자가 되어 왔다. 뿐만 아니라, 기포탑을 공학적, 산업적으로 활용하기 위한 기포탑 반응기에서는 반응온도의 조절이 중요한데, 기포의 특성은 기포탑 반응기 내부에서의 열전달 현상에도 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[4-7].

이와 같이 기포탑반응기나 공정에서 기체-액체간의 물질전달과 반응기 내부의 열전달에 기포의 특성이 중요한 영향을 미치는 이유는 기포의 흐름과 액체-기포간의 접촉흐름특성을 나타내는 기포탑의 수력학적 특성이 기포의 특성에 의해 결정되기 때문이다. 기포탑의 수력학적 특성은 기포탑 반응기나 공정의 설계조건, 운전조건 그리고 기포탑운전의 목적함수에 따라 민감하게 변화할 수 있다. 따라서 기포의 발생과 흐름 그리고 액체상과의 접촉현상 등을 결정론적인 방법(Deterministic Method)에 의해 예측하기 어려워서 통계학적인 방법(Stochastic Method)이나 실험적인 방법에 의해 예측하여 왔으며, 기포탑의 수력학적 특성의 해석을 위해서는 실험결과에 의존하

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

여 왔다[6-10].

기포탑의 수력학적 특성을 결정하는 기포의 크기와 상승속도 등은 연속상인 액상의 물성에 의해 큰 영향을 받으므로 액상의 물성이 변화함에 따라 기포특성의 변화 및 이에 미치는 영향 등에 대한 다양한 실험들이 진행되어 왔다. 특히, 액상의 점도는 기포의 크기를 결정하는데 영향을 미치므로 액상의 점도 변화가 기포의 특성에 미치는 영향에 대한 연구와 실험이 많이 진행되었다. 또한 액상의 표면장력은 액체와 기체의 접촉표면에서 계면에 작용하는 장력의 결정에 영향을 미치므로 액체 표면장력의 변화가 기포의 특성에 미치는 영향에 대한 연구도 꾸준히 진행되어 왔다[5-11]. 그러나, 화학공정이나 반응기에서 액상은 전해질 용액인 경우가 많은데, 이 경우 전해질 용액의 이온 강도는 액체와 기체의 접촉계면에서 기포의 형성에 영향을 미칠 수 있는데도 불구하고 이에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다[12-16]. 따라서 본 연구에서는 전해질 용액을 액상으로 사용하는 경우의 기포탑에서 기포의 크기와 상승속도 등 기포의 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 각 실험변수가 기포특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는바와 같이 내경이 0.152 m이고 높이가 2.5 m인 기포탑을 사용하였다[3,9-11]. 기포탑을 구성하는 기체는 기체필터를 거친 압축공기를 사용하였으며 액상으로는 NaCl 수용액을 사용하였다. 액상의 NaCl 농도는 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30 mol/L 이었다. 본 연구의 실험에 사용한 연속액상의 특성은 Table 1에 나타내었다. 용액의 이온 강도는 식 (1)에 의해 결정하였다. 식 (1)에서 m_i 와 z_i 는 각각 몰농도와 전하를 나타낸다.

$$I = \frac{1}{2} \sum m_i z_i^2 \quad (1)$$

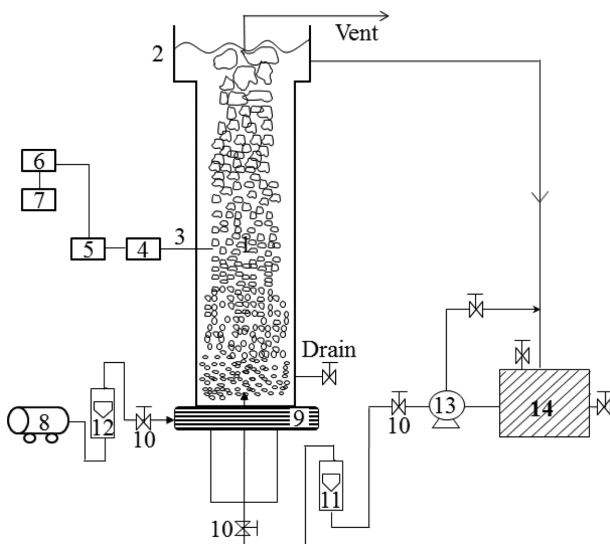


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

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

Table 1. Properties of aqueous solutions of NaCl

| Concentration (mol/L) | Density (Kg/m ³) | Surface tension $\times 10^3$ (N/m) | Ionic strength (mol/L) |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| 0 | 1.000 | 71.03 | 0 |
| 0.05 | 1.003 | 71.23 | 0.05 |
| 0.10 | 1.006 | 71.46 | 0.10 |
| 0.15 | 1.009 | 71.90 | 0.15 |
| 0.20 | 1.012 | 72.50 | 0.20 |
| 0.30 | 1.018 | 73.07 | 0.30 |

기포의 크기와 상승속도는 이중전기저항탐침(dual electrical resistivity probe)계를 사용하여 측정하였다[3,9-11]. 기포탑에 유입되는 기체와 액체는 기체-액체 분산판을 통해 동일면에서 고르게 분산시켰다. 액체 분산판은 직경 3 mm의 구멍을 삼각패치로 균일하게 배치하였으며, 기체분산판은 직경 6.35 mm의 관을 4개 균일하게 액체분산판에 삽입하여 용접한 후 이 관에 직경 1 mm의 오리피스를 일정한격으로 만들어 사용하였다.

기포특성은 기체-액체 분산판으로부터 0.4 m의 상부지점에서 측정하였다. 기포특성을 측정하기 위한 전기저항탐침의 전압은 9.0 V이었으며 탐침으로부터 나오는 전기적 신호는 증폭기와 A/D변환기를 거쳐 디지털신호로 변환하였다. 기체상과 액체상의 전기저항이 뚜렷이 다르므로 전기저항 탐침의 tip간 신호시간차를 이용하여 다음 식들로부터 기포의 수직길이와 기포의 상승속도를 구하였다[3,9-11]. 즉, 저항탐침 tip간의 신호시간 차이를 t_i , 기포가 탐침에 머무는 시간을 t_{2i} , 탐침 tip간의 거리를 l 이라하면 단일기포의 수직길이와 평균 길이는 각각 식 (2)와 (3)으로, 단일 기포의 상승속도와 평균상승속도는 각각 식 (4)와 (5)와 같이 나타낼 수 있으므로 이들 식을 사용하여 기포의 평균 수직길이와 평균 상승속도를 구하였다.

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

$$L_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{Bi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_{2i}}{t_{1i}} \right) l \quad (3)$$

$$U_{Bi} = \frac{l}{t_{1i}} \quad (4)$$

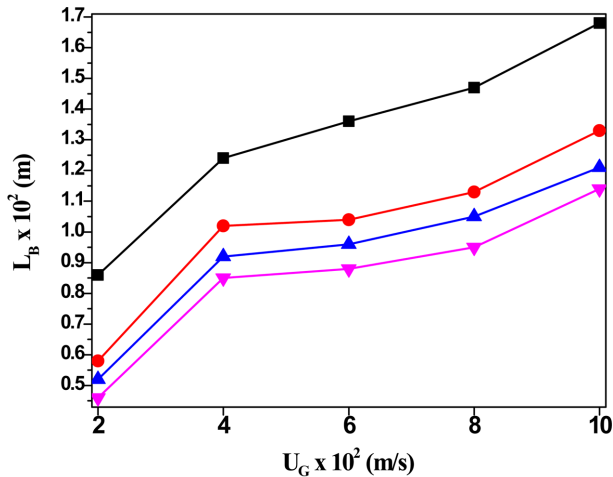
$$U_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{Bi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{l}{t_{1i}} \right) \quad (5)$$

실험적으로 측정된 기포의 특성자료는 데이터획득장치(DT2805 Lab Card, Data Translation Inc.)를 사용하여 저장하였는데 각 실험 조건에서 300 Hz로 30000개의 자료를 얻어 컴퓨터에 입력 후 오프라인으로 통계적으로 처리하여 해석하였다.

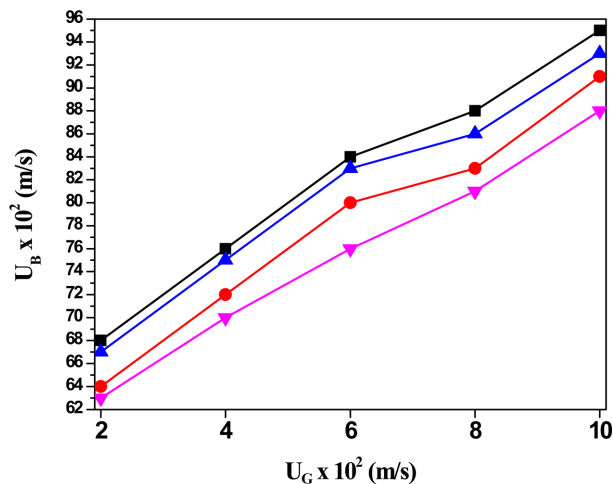
3. 결과 및 고찰

3-1. 기체유속이 기포의 크기와 상승속도에 미치는 영향

전해질용액 기포탑에 유입되는 기체유속이 기포의 크기와 상승속도에 미치는 영향을 Figs. 2와 3에 각각 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 기체의 유속이 증가함에 따라 기포의 수직길이(chord length)가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기체유속이 증가하면 기포탑에 유입되는 기체의 양이 증가하는데 기포탑에 유입된 기체는 연속상인

Fig. 2. Effects of U_G on L_B in bubble columns with electrolyte solutions.

| | | | | |
|-------------------------|---|------|------|------|
| I (mol/L) | 0 | 0.15 | 0.20 | 0.30 |
| $U_L \times 10^2$ (m/s) | 2 | 2 | 4 | 8 |

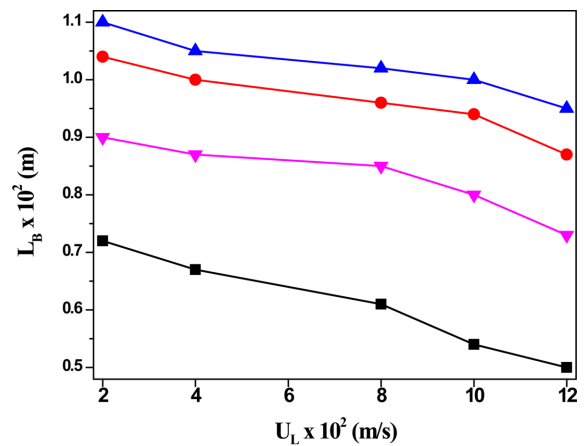
Fig. 3. Effects of U_G on U_B in bubble columns with electrolyte solutions.

| | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|
| I (mol/L) | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.30 |
| $U_L \times 10^2$ (m/s) | 10 | 2 | 8 | 4 |

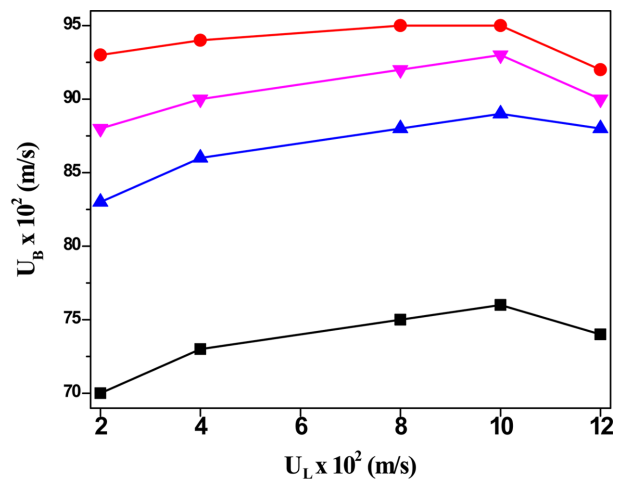
액상에 분산상인 기포로 존재하므로 기체의 양이 증가함에 따라 기포탑 내부에 존재하는 기포의 양이 많아지게 된다. 기포탑 내부에 존재하는 기포들은 액상에 비하여 밀도가 매우 작으므로 부력에 의하여 상승하게 되는데 상승하는 기포들은 서로 충돌하면서 무작위적으로 서로 합체되는 현상이 일어난다. 즉, 기포의 양이 많으면 기포들의 접촉과 충돌에 의해 합체현상도 빈번히 일어나서 기포의 크기는 증가한다고 할 수 있다[1-10]. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 기체의 유속이 증가함에 따라 기포의 상승속도도 증가하는데 그 이유는 기체유속의 증가에 따라 기포의 크기가 증가하기 때문이다. 기포의 크기가 큰 경우는 작은 경우보다 연속액상에 존재하면서 기포가 받는 부력이 증가하므로 기포의 상승속도도 빠르다고 할 수 있다.

3-2. 액체유속이 기포의 크기와 상승속도에 미치는 영향

액체유속의 증가가 기포탑에서 상승하는 기포의 크기와 상승속도에

Fig. 4. Effects of U_L on L_B in bubble columns with electrolyte solutions.

| | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|
| I (mol/L) | 0.05 | 0.15 | 0.20 | 0.30 |
| $U_G \times 10^2$ (m/s) | 2 | 6 | 8 | 4 |

Fig. 5. Effects of U_L on U_B in bubble columns with electrolyte solutions.

| | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|
| I (mol/L) | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.30 |
| $U_G \times 10^2$ (m/s) | 10 | 8 | 4 | 10 |

미치는 영향을 Figs. 4와 5에 각각 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 연속상인 액체의 유속이 증가함에 따라 기포의 크기는 점점 감소하였다. 이는 액체의 유속이 증가함에 따라 기포탑 내부에서 액체와 기체의 접촉에 의한 난류(turbulence)현상이 증가하기 때문으로 해석할 수 있다[8-11]. 즉, 기포탑 내부의 난류현상의 증가는 기체-액체 계면에서의 난류강도의 증가를 가져와 기포가 분쇄되므로 기포의 크기가 감소한다고 할 수 있다. 이러한 기포의 분쇄현상은 연속상인 액상이 전해질 용액일 경우에 더 민감하다고 할 수 있다[12,13]. Fig. 5에 기포탑에서 액체 유속의 증가가 기포의 상승속도에 미치는 영향을 나타내었는데, 기포의 상승속도는 액체의 유속이 0.02~0.10 (m/s)의 범위에서는 연속액상의 유속이 증가함에 따라 약간 증가하였다. 이는 연속액상의 흐름속도 증가가 연속상에 분포하는 분산상인 기포의 상승속도 증가에도 영향을 미치는 것을 나타내고 있다. 즉, 기포탑에서 기포의 상승속도는 액체와 기체의 밀도 차에 의한 부력과 연속상인 액상의 흐름속도에 의해 영향을 받는다고 할 수 있다. Fig. 5에서

액체의 유속이 0.12(m/s)인 경우에는 기포의 상승속도가 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Fig. 4에서도 알 수 있듯이 액체의 유속이 다소 빠른 경우에 기포의 분쇄현상이 일어나서 기포의 크기가 작아져 액체와 기포의 밀도차에 의한 부력의 영향이 감소하여 상승속도가 약간 감소한다고 해석할 수 있다.

3-3. 이온 강도(ionic strength)가 기포의 크기와 상승속도에 미치는 영향

전해질용액에 의한 이온 강도(ionic strength)가 기포의 크기와 상승속도에 미치는 영향을 Figs. 6과 7에 각각 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 전해질용액에 의한 연속액상의 이온강도가 증가함에 따라 기포의 크기는 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 연속액상의 이온강도가 증가함에 따라 기포의 분쇄현상이 증가되어 기포의 크기가 감소한다고 할 수 있다. 액상이 전해질 용액일 경우에는 기포와 액체의 접촉계면에서 액상의 쌍극자모멘트가 존재하는데 이는 기체-

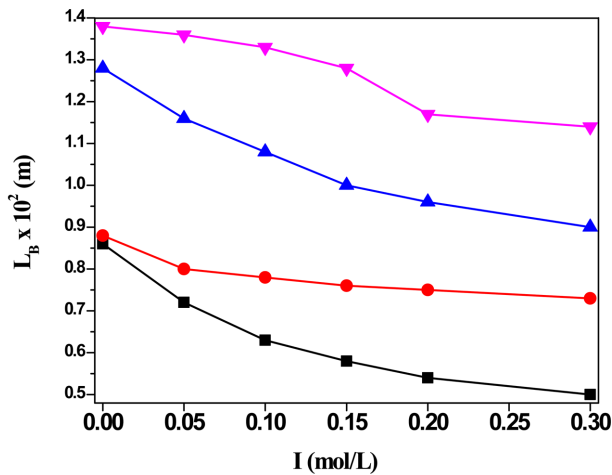


Fig. 6. Effects of I on L_B in bubble columns with electrolyte solutions.

| | | | | |
|-------------------------|---|----|---|----|
| | ■ | ● | ▲ | ▼ |
| $U_G \times 10^2$ (m/s) | 2 | 4 | 6 | 10 |
| $U_L \times 10^2$ (m/s) | 2 | 12 | 4 | 8 |

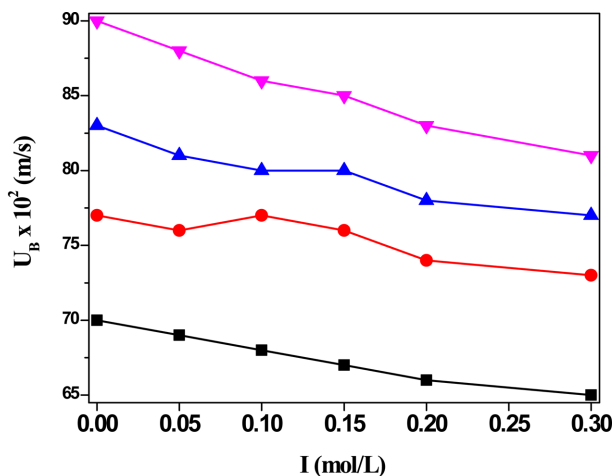


Fig. 7. Effects of I on U_B in bubble columns with electrolyte solutions.

| | | | | |
|-------------------------|----|----|---|---|
| | ■ | ● | ▲ | ▼ |
| $U_G \times 10^2$ (m/s) | 2 | 4 | 6 | 8 |
| $U_L \times 10^2$ (m/s) | 12 | 10 | 2 | 4 |

액체의 계면에서 기포의 안정성을 감소시켜 기포가 쉽게 분쇄되는 여건을 조성한다고 할 수 있다[12-17]. 전해질용액의 이온강도가 기포의 상승속도에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었는데 Fig. 6에서 예측할 수 있듯이 동일한 기포탑의 운전조건에서 기포의 크기가 이온강도가 증가함에 따라 감소하므로 부력의 영향을 받는 기포의 상승속도도 액상의 이온강도가 증가함에 따라 점점 감소하는 것을 알 수 있다.

3-4. 기포의 크기와 상승속도의 관계 및 실험변수간의 상관관계

전해질용액의 기포탑에서 기포의 크기와 상승속도는 밀접한 관계가 있으므로 본 연구의 실험범위에서 기포의 크기와 상승속도의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 기포의 상승속도는 기포크기의 0.42승에 비례하는 것으로 나타났다. 일반적인 기체-고체 유동층에서 기포의 상승속도는 기포크기의 0.50승에 비례한다고 발표되고 있으나 본 연구의 결과 연속액상이 전해질용액의 경우의 기포탑에서 기포의 상승속도는 기포크기의 0.42승에 비례하였다.

본 연구의 실험범위에서 측정된 기포의 크기와 상승속도를 각각 실험변수의 상관식으로 식 (6)과 (7)로 나타낼 수 있었다. 식 (6)과 (7)의 상관계수는 각각 0.905 및 0.952로 Figs. 9와 10에서 볼 수 있듯이 실험결과와 잘 맞는 것을 알 수 있다.

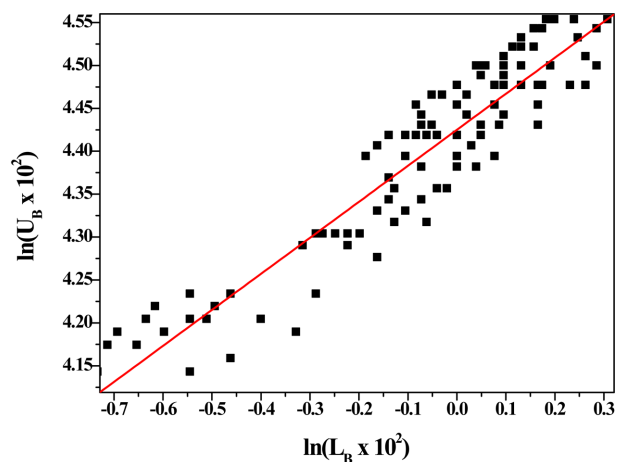


Fig. 8. Relation between L_B and U_B in bubble columns with electrolyte solutions.

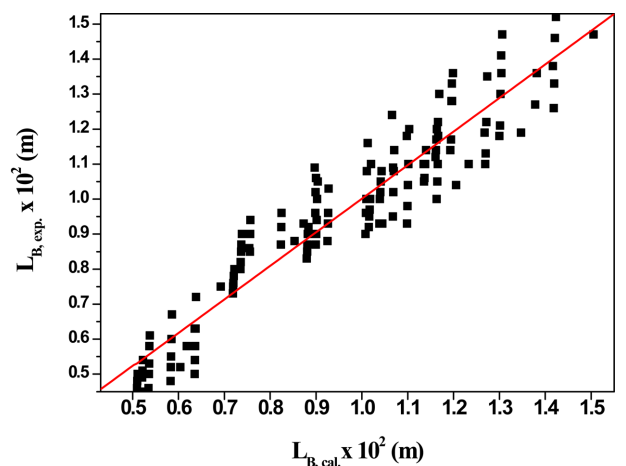


Fig. 9. Correlation of L_B in terms of operating variables.

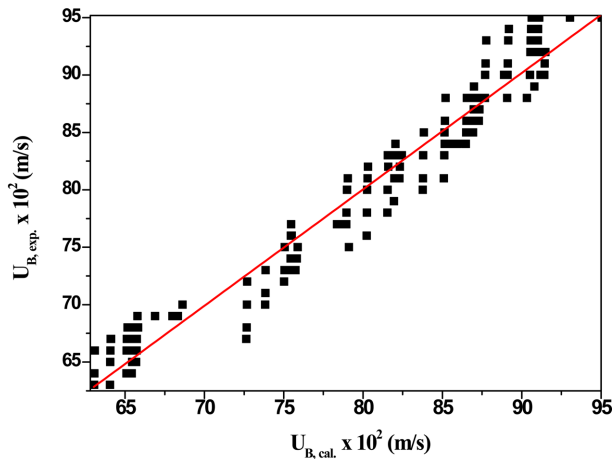


Fig. 10. Correlation of U_B in terms of operating variables.

$$L_B = 2.74 U_L^{-0.124} U_G^{0.498} I^{-0.003} \quad (6)$$

$$U_B = 153.8 U_L^{0.024} U_G^{0.020} I^{-0.001} \quad (7)$$

4. 결 론

연속액상이 전해질 용액인 기포탑에서 기포특성을 고찰한 본 연구의 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기포의 크기(수직길이)는 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였으나 연속액상의 유속 및 액상의 이온강도가 증가함에 따라 감소하였다.

(2) 기포의 상승속도는 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하고 용액의 이온강도가 증가함에 따라 감소하였으며 액체의 유속이 증가함에 따라서는 증가하다가 감소하며 약한 최대값을 나타내었다.

(3) 기포의 상승속도는 기포크기의 0.42승에 비례하였으며, 기포 크기와 상승속도는 각각 기체 및 액체 유속 그리고 연속액상 이온강도의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

감 사

본 연구는 한국연구재단의 연구비지원(NRF-2013R1A1A2059124)으로 수행되었으며 귀 재단에 감사드립니다.

사용부호

| | |
|-------|--|
| I | : Ionic strength [mol/L] |
| l | : distance between the probe tips [m] |
| L_B | : vertical chord length of bubbles [m] |
| m_i | : molarity [mol/L] |
| t_1 | : time difference of signal between the probe tips [s] |
| t_2 | : bubble duration time at the probe tips [s] |
| U_B | : rising velocity of bubbles [m/s] |
| U_G | : superficial gas velocity [m/s] |
| U_L | : superficial liquid velocity [m/s] |
| z_i | : ionic charges [-] |

References

- Deckwer, W. D., Bubble column Reactors, John Wiley & Sons, England, 239-267(1992).
- Ferreira, A., Pereira, G., Teixeira, J. A. and Rocha, F., "Statistical Tool Combined with Image Analysis to Characterize Hydrodynamics and Mass Transfer in a Bubble Column," *Chem. Eng. J.*, **180**, 216-228(2012).
- Lim, D. H., Park, J. H., Kang, Y. and Jun, K. W., "Structure of Bubble Holdups in a Viscous Slurry Bubble Column with Low Surface Tension Media," *Fuel Proc. Technol.*, **108**, 2-7(2013).
- Gan, Z. W., Yu, S. C. M. and Law, A. W. K., "PDA Measurements in a Three-phase Bubble Column," *AIChE J.*, **59**, 2286-2307(2013).
- Lim, D. H., Yoo, D. J. and Kang, Y., "Characteristics of Gas-liquid Mass Transfer and Interfacial Area in a Bubble Column," *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**, 315-320(2015).
- Dudukovic, M. P., Lorrachi, F. and Mill, P. L., "Multi Phase Catalytic Reactors : A Perspective on Current Knowledge and Future Trends," *Catalysis Review*, **44**, 12-246(2002).
- Krishna, R. and Sie, S. T., "Design and Scale-up of Fischer-Tropsch Bibble Column Slurry Reactor," *Fuel Proc. Technol.*, **64**, 73-105 (2000).
- Shin, I. S., Son, S. M., Kim, U. Y., Kang, Y., Kim, S. D. and Jung, H., "Multiple Effects of Operating Variables on Bubble Properties in Three-phase Slurry Bubble Columns," *Korean J. Chem. Eng.*, **26**, 587-591(2009).
- Jin, H. R., Lim, D. H., Lim, H., Kang, Y., Jung, H. and Kim, S. D., "Demarcation of Large and Small Bubbles in Viscous Slurry Bubble Columns," *I & EC Research*, **51**, 2062-2069(2012).
- Kang, Y., Cho, Y. J., Woo, K. J. and Kim, S. D., "Bubble Properties and Pressure Fluctuations in Pressurized Bubble Columns," *Chem. Eng. Sci.*, 411-419(2000).
- Son, S. M., Song, D. S., Lee, C. K., Kang, S. H., Kang, Y. and Kusakabe, K., "Bubbling Behavior in Gas-liquid Countercurrent Bubble Column Bioreactors," *J. Chem. Eng. Japan*, **37**, 990-998(2004).
- Al Taweel, A. M., Idhbeaa, A. O. and Ghanem, A., "Effect of Electrolytes on Interphase Mass Transfer in Microbubble-sparged Airlift Reactors," *Chem. Eng. Sci.*, **100**, 474-485(2013).
- Weissenborn, P. and Pugh, R., "Surface Tension of Aqueous Solutions of Electrolytes : Relationship with Ion Hydration, Oxygen Solubility and Bubble Coalescence," *J. Colloid & Interface*, **184**, 550-563(1996).
- Craig, V. S. J., Ninham, B. W. and Pashley, R. M., "The Effect of Electrolytes on Bubble Coalescence in Water," *J. Phys. Chem.*, **97**, 10192-10197(1993).
- Chang, S. K., Kang, Y. and Kim, S. D., "Mass Transfer in Two and Three-phase Fluidized Beds," *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 524-530(1988).
- Weissenborn, P. K. and Pugh, R. J., "Surface Tension and Bubble Coalescence Phenomena of Aqueous Solutions of Electrolytes," *Langmuir*, **11**, 1422-1426(1995).
- Alves, S. S., Orvalho, S. P. and Vasconcelos, J. M. T., "Effect of Bubble Contamination on Rise Velocity and Mass Transfer," *Chem/Eng. Sci.*, **60**, 1-9(2005).