

가압 삼상슬러리 기포탑의 설계 및 Scale-up을 위한 수력학적 Similarity 해석

서명재 · 임대호 · 진해룡 · 강 용[†] · 정 현* · 이호태*

충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
*한국에너지기술연구원 청정화학연료연구센터
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
(2009년 8월 13일 접수, 2009년 9월 15일 채택)

Analysis of Hydrodynamic Similarity of Pressurized Three-Phase Slurry Bubble Column for its Design and Scale-up

Myung Jae Seo, Dae Ho Lim, Hae Ryong Jin, Yong Kang[†], Heon Jung* and Ho Tae Lee*

Department 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 13 August 2009; accepted 15 September 2009)

요 약

가압으로 운전되는 삼상슬러리 기포탑에서 기포 체류량과 압력강하를 목적함수로 하여 기포탑의 설계 및 scale-up을 위한 수력학적 similarity를 고찰하였다. 또한, 본 연구에서 선택한 각 실험변수가 기포탑의 직경변화에 따라 기포탑 내 기포 체류량에 미치는 영향을 분석하였다. 슬러리 기포탑에서 기체체류량 및 압력강하의 결정에 영향을 미치는 주요 인자로서 기체유속(U_G), 연속 슬러리 상의 점도($\mu_{SL,eff}$) 및 표면장력(ρ_{SL}), 운전압력의 변화에 따라 변화하는 기체상의 밀도(ρ_G)와 슬러리 밀도(ρ_{SL})의 차($\rho_{SL}-\rho_G$), 기포탑 내부에서 단위길이 당 압력강하($\Delta P/L$), 기포탑의 직경(D) 그리고 기포탑에서 다상흐름에 작용하는 중력의 영향을 고려하기 위해 중력가속도(g) 등을 선정하였다. 선정된 7개의 슬러리 기포탑의 수력학적 특성에 영향을 미치는 파라미터들과 3개의 기본차원들로부터 차원해석에 의해 수력학적 특성을 지배하는 4개의 무차원 군을 도출하였다. 도출된 무차원 군인 레이놀즈 수, 프라우드 수 그리고 웨버 수 등이 기포탑에서 기포체류량에 미치는 영향을 검토하였다. 기포탑 내부에서의 압력강하와 기체 체류량 등을 무차원 군의 상관식으로부터 효과적으로 예측할 수 있었다. 본 연구의 결과는 가압슬러리 기포탑의 설계 및 scale-up 등에 매우 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract – Hydrodynamic similarity was investigated in pressurized three-phase slurry bubble columns by selecting the bubble holdup and pressure drop as objective functions, for the effective design and scale-up of it. In addition, effects of operating variables on the bubble holdup with variation of column diameter were also analyzed. Gas velocity(U_G), viscosity($\mu_{SL,eff}$) and surface tension(ρ_{SL}) of slurry phase, density difference between the slurry and gas phases($\rho_{SL}-\rho_G$) depending on the operating pressure, pressure drop per unit length($\Delta P/L$), column diameter(D) and gravitational acceleration(g) were chosen as governing parameters in determining the bubble holdup and pressure drop in the column. From the dimensional analysis, four kinds of dimensionless groups were derived from the 7 parameters and 4 fundamental dimensions. Effects of dimensionless groups such as Reynolds, Froude and Weber numbers on the bubble holdup in the column were discussed. The pressure drop and bubble holdup could be predicted from the correlation of dimensionless groups effectively, which could be used as useful information for the design and scale-up of pressurized slurry bubble columns.

Key words: Similarity, Three-Phase Slurry, Bubble Column, Scale-up

1. 서 론

수송이 편리한 액체연료를 합성가스나 석탄 등의 고체로부터 생산하기 위해서는 기체, 액체 그리고 고체 입자들의 접촉과 반응이

매우 중요한데 삼상슬러리 기포탑은 이와같은 반응에 매우 효과적인 반응기로 알려져 있다. 특히, 가압의 삼상슬러리 기포탑 반응기는 Fisher-Tropsch 반응과 같은 불균일 촉매반응을 매우 효과적으로 수행할 수 있기 때문이다[1-4]. 그러나, 가압의 삼상슬러리 기포탑 반응기의 설계나 scale-up 그리고 최적조업조건 설정이나 결점진단 등을 위한 공학적 자료는 국내·외를 막론하고 매우 부족할 뿐만 아니라 또 각 국에서 에너지 안보차원에서 보안을 유지하고 있기 때

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

*이 논문은 KAIST 김상돈 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

문에 기술도입도 매우 어려운 실정이다.

이와같은 가압의 삼상슬러리 기포탑 반응기에서는 기체, 액체 및 고체 입자들의 접촉과 흐름에 의해 반응이 일어나는 동력학적 계를 이루므로 반응기 내에서의 열전달 및 물질전달이나 각 상의 접촉과 혼합 등이 매우 불규칙적이며 비선형적이므로 이들 반응기의 설계나 scale-up을 위한 주요 파라메타 값들에 대한 예측은 매우 어려운 실정이다[5-8]. 불균일상 반응기 내부에서의 전달현상과 흐름현상들은 슬러리 기포탑 반응기의 직경변화에 따라서도 매우 다양한 형태로 바뀌는데 이는 슬러리 기포탑 반응기에서 불균일상으로 존재하는 기포의 특성이 변화하기 때문으로 해석되고 있다[9-11].

대부분의 다상 반응기의 경우 실험실적 규모의 장치나 공정을 산업적으로 활용하고 공업화하기 위해서는 그 규모를 크게 하여야 하는데, 반응기의 규모를 크게 할 때에 반응기의 직경은 반응기 자체의 특성 결정에 매우 중요한 설계요소로 알려져 있는데, 이는 반응기의 직경변화에 따라 다상의 접촉이 일어나는 반응기 내에서의 수력학적 흐름과 접촉현상 그리고 열 및 물질전달 특성들이 매우 변화하기 때문이다[3,4,12]. 기포탑의 직경변화가 수력학적 특성에 미치는 영향에 대한 연구로는 기포탑의 직경변화가 액체의 재순환 속도에 미치는 영향 등이 검토되고 있으며, 기포탑에서 반경방향에 대한 기체 체류량 변화와 축방향의 액체속도분포를 예측할 수 있는 상관식들이 제시되고 있다[1,2].

가압의 상태로 운전되는 삼상 슬러리 기포탑 반응기의 설계 및 scale-up 등을 위해서는 반응기의 scale이 변화함에 따라 반응기 내부에서 진행되는 반응특성과 반응물질 그리고 생성물질들의 거동에 대한 고찰이 매우 중요한 정보를 제공할 수 있다. 특히, 합성가스 등 기체의 원료로부터 액체 생성물을 생산하는 합성석유 생산공정과 같은 경우에는 기체-기체 반응에서 고체 입자의 촉매가 사용되므로 이들 각 상들의 흐름거동과 상과 상들 간의 접촉거동들은 반응의 전환율과 수율 그리고 생성물의 선택도 등의 결정에 매우 중요한 요소가 된다[3,4,13,14].

이와 같은 다상들 간의 접촉과 흐름거동을 동반하는 삼상 슬러리 반응기는 동력학적 계를 이루므로 반응기의 산업적 활용을 위해 scale을 증대시킬 경우 반응기의 scale의 변화는 이들 각 상들의 흐름거동과 접촉강도 및 흐름영역(flow regime) 등의 수력학적인 변화를 가져오게 된다. 따라서 반응기의 scale의 변화에 따라 반응 전환율 등 반응특성을 그대로 유지하기 위해서는 반응기 scale의 변화를 단순한 산술적인 변화만을 고려하여서는 안되며 반응기 전체의 수력학적 특성의 변화를 고려하여야 한다. 즉, 반응기의 scale의 변화에 따른 반응 system의 수력학적 similarity를 고찰함으로써 반응기의 scale의 변화에도 불구하고 목적하는 반응의 전환율을 유지할 수 있도록 system을 설계하고 반응조건을 설정할 수 있다.

그러나, 삼상슬러리 기포탑 반응기의 scale-up에 대한 연구는 국내·외적으로 매우 미흡하여 기포탑 반응기의 공업화에 큰 걸림돌이 되어왔다. 따라서, 본 연구에서는 가압 삼상슬러리 기포탑 반응기의 설계 및 scale-up에 필요한 주요정보를 제공하고자 삼상슬러리 기포탑 반응기에서 수력학적 현상의 similarity를 고찰하였다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 가압 슬러리 기포탑(pressurized slurry bubble column)은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직경이 0.051, 0.102 그리고

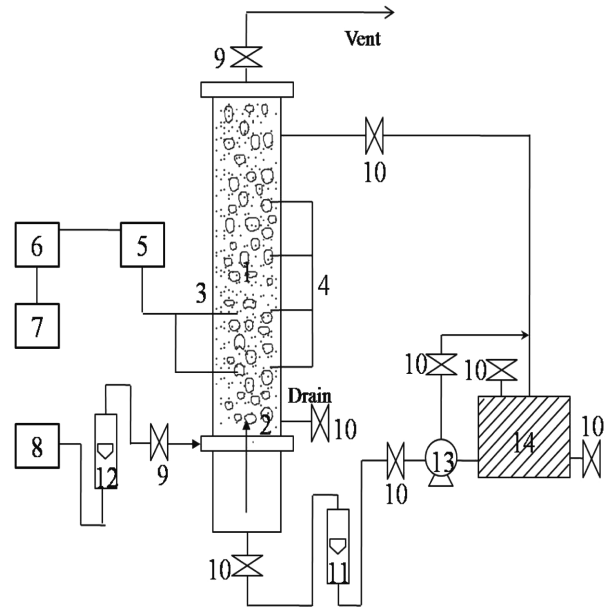


Fig. 1. Experimental apparatus

- | | |
|--------------------|--------------------------------|
| 1. Main column | 9. Needle valve |
| 2. Gas distributor | 10. Globe valve |
| 3. Pressure probe | 11. Liquid flowmeter |
| 4. Sampling tap | 12. Gas flowmeter |
| 5. Pressure sensor | 13. Slurry pump |
| 6. A/D converter | 14. Slurry reservoir |
| 7. Computer | 15. N ₂ distributor |
| 8. Compressor | 16. N ₂ bomb |

0.152 m이고 높이가 1.5 m인 stainless steel로 제작된 스테인리스관을 사용하였다[12-14]. 실험이 진행되는 동안 기포탑 내부에서 주어진 운전조건에 맞는 압력을 일정하게 유지하기 위하여 가압 기포탑에 압력조절장치를 부착하였으며 기포탑계를 sealing을 하였다. 본 연구의 실험변수로는 운전압력, 기체유속, 액상의 점도 그리고 슬러리 농도 및 기포탑관의 직경을 선정하였다. 기포탑에서 연속상인 액상으로는 물과 CMC(Carboxy Methyl Cellulose) 수용액을, 기체로는 filtering이 된 압축공기를 사용하였다. 기포탑계 내에서 기체유속의 범위는 0.02~0.16 m/s, 시스템 압력의 범위는 0.1~1.0 MPa, 액상의 점도는 1.0~38 mPas 범위에서, 그리고 슬러리 농도는 밀도가 2,500 kg/m³이고 입도가 0.4~0.7 μm인 glass bead를 0~20 wt%의 범위에서 변화시키면서 실험을 수행하였다.

기체를 균일한 압력으로 유지하고 일정한 유속으로 기포탑 내부에 주입하기 위하여 공기여과기(filter)가 부착된 공기압축기를 사용하였으며, 유입되는 기체의 양을 조절하기 위하여 공기유량기(rotameter)를 설치하였으며 니들 밸브로 그 양을 조절하였다. 액체는 1톤 유량의 액체 탱크에서 3마력의 공업용 펌프를 사용하여 밸브와 액체유량기(flowmeter)를 통해 기포탑의 관에 공급하였다. 본 연구에서 사용한 액상의 물성은 Table 1에 나타내었다.

가압기포탑 내부의 압력을 측정하기 위해 기포탑의 벽면에 압력 센서를 설치하여 일정 운전조건에서 가압 삼상 슬러리 기포탑이 정상상태에서 도달하였을 때 압력 강하 및 압력차 요동을 측정하였다. 이들 압력변화기로 측정된 기포탑 내부의 압력차로부터 DT-VEE 프로그램 상에서 실시간(real-time) on-line으로 기체와 액체의 체류량이 구하여지도록 하였으며 압력변화기로부터 측정된 pressure-time 신호자료들은 증폭기(amplifier)와 low-pass filter를 거친 후, A/D 변

Table 1. Physical properties of continuous liquid medium

Liquid Medium	Apparent Viscosity $\mu_{SL,eff} \times 10^3$ (Pa.s)	Surface Tension $\sigma_{SL} \times 10^3$ (N/m)	Density ρ_{SL} (kg/m ³)
Water	0.96	72.9	1000
Aqueous Solution of CMC(0.1 wt%)	11.0	73.2	1001
Aqueous Solution of CMC(0.2 wt%)	24.0	73.3	1002
Aqueous Solution of CMC(0.3 wt%)	38.0	73.6	1003

$$1) \mu_{SL,eff} = K \dot{\gamma}_{SL,eff}^{n-1} \quad (16,17), \quad \dot{\gamma}_{SL,eff}^{n-1} = 2,800 \left(U_G - U_L \frac{\varepsilon_G}{\varepsilon_L} \right) [17]$$

환기를 이용하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시켰으며 이들의 자료를 데이터획득장치(data acquisition system, DT-2805 Lab-Board, DT-VEE software)를 사용하여 PC에 저장하였다[12-14].

또한, 기포탑에서 기포의 흐름에 의한 기포의 특성을 측정하고자 resistivity probe를 기포탑의 중앙에 위치하도록 설치하여 기포탑 내부에서 슬러리를 통과하며 상승하는 기포의 크기와 빈도수, 상승 속도 및 기포 체류량을 측정하였다. 이렇게 측정된 신호는 DT-VEE 프로그램 상에서 on-line으로 나타나게 하였으며 자료의 재현성을 고찰하기 위하여 2~4회 반복 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

삼상슬러리 기포탑에서 수력학적 특성을 결정하는 주요인자 중의 하나는 슬러리 기포탑 내부에 분산상으로 존재하는 기포의 흐름 특성이라 할 수 있다. 따라서, 기포의 bubbling 현상의 similarity 해석을 위하여 각 실험조건에서 기포의 체류량을 측정하였다.

삼상 슬러리 기포탑에서 기체의 유속과 기포탑의 직경이 기포의 체류량(ε_G)에 미치는 영향을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 기포탑 내부에 기포의 체류량은 기체유속이 증가함에 따라 증가하였으나 기포탑의 직경이 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 가압슬러리 기포탑에서 기포탑의 직경이 증가함에 따라 같은 운전조건에서 슬러리의 체류량이 증가하기 때문에 상대적으로 기포의 체류량은 감소한다고 설명할 수 있다[3,4,12]. 또한, 기체유속의 증가에 따라 기포체류량이 증가하는 경향은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 감소하였다.

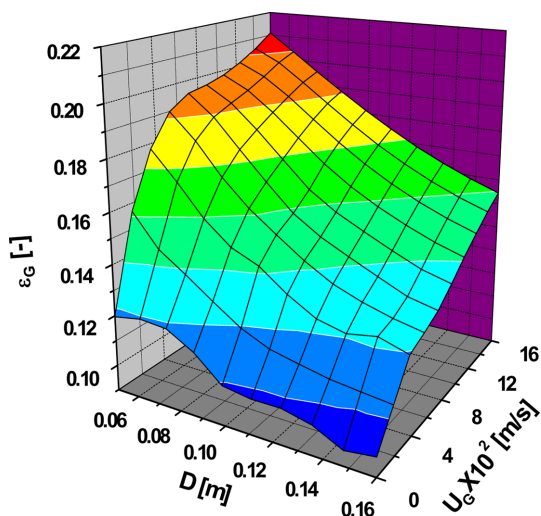


Fig. 2. Effects of U_G & D on ε_G in three-phase slurry bubble columns.

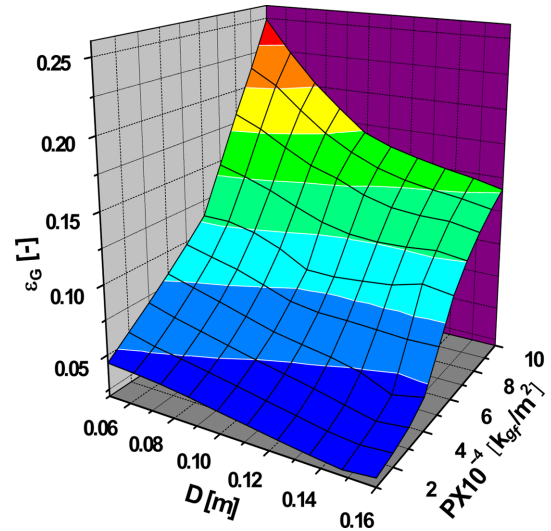


Fig. 3. Effects of P & D on ε_G in three-phase slurry bubble columns.

삼상 슬러리 기포탑에서 운전압력과 기포탑 직경이 기포의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 기포탑 내부에 기포의 체류량은 운전압력이 증가함에 따라 증가하였으며 이와같은 현상은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 점점 감소하였다. 가압 슬러리 기포탑에서 운전압력의 증가는 기포의 크기를 작게 하여 기포의 상승속도를 작게 하여주므로 일정 유속조건에서 기포탑에 유입된 기체는 크기가 작은 기포로 존재하므로 그 빈도수는 매우 증가하게 된다. 기포탑에서 기포의 상승속도는 기포에 작용하는 부력의 크기가 큰 영향을 미치는데 기포의 크기가 작은 경우에는 자연스럽게 기포의 상승속도가 감소하게 되어 기포들이 기포탑 내부에서 머무는 체류시간(residence time)이 증가하게 되므로 기포탑 내부에 기포의 체류량이 증가한다고 할 수 있다. 가압 기포탑에서 운전압력이 증가하면 기포의 크기가 작아짐과 동시에 작은 기포들의 크기의 차가 크지 않으므로 이들 기포들이 기포탑에 머무는 체류시간도 크게 다르지 않으므로 기포탑 내부에서 기포의 체류시간분포와 기포 크기의 확률밀도함수 등은 매우 좁고 뾰족한 모양을 나타내는 것으로 보고되고 있다[14,15]. 또한 Fig. 3에서 기포탑의 운전압력이 증가함에 따라 기체 체류량이 증가하는 경향은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 점점 감소하는 것으로 나타나는데, 이는 기포탑의 직경이 증가함에 따라 일정 유속의 운전조건에서 기포탑에 유입되는 기체의 양이 점점 증가하므로 기포탑 내부에 존재하는 기포의 개수 즉, 빈도수가 같은 유속조건의 직경이 작은 기포탑의 경우보다 많이 증가하게 되나, 이들 기포들이 움직일 수 있는 기포탑 내부의 공간이 점점 증가하여져서 이들 기포들끼리 서로 접촉하여 합체

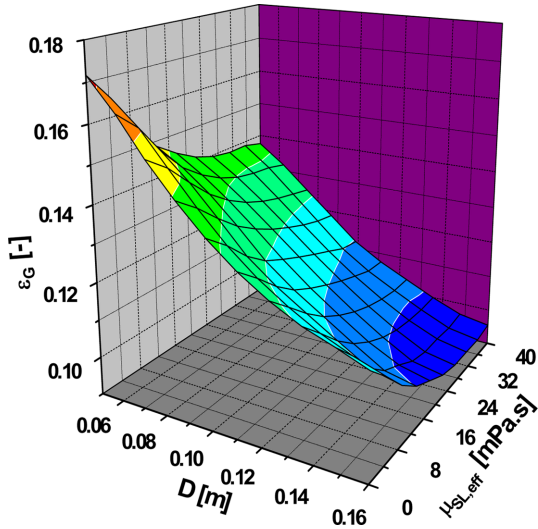


Fig. 4. Effects of $\mu_{SL,eff}$ & D on ϵ_G in three-phase slurry bubble columns.

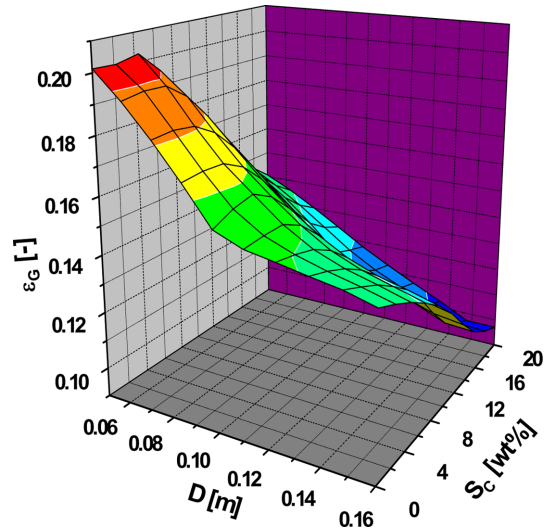


Fig. 5. Effects of S_C & D on ϵ_G in three-phase slurry bubble columns.

(coalescence)할 수 있는 확률이 증가하지 않을 뿐만 아니라 슬러리 상과의 빈번한 접촉과 마찰에 의해 기포의 크기는 오히려 작아지지만[12,13], 기포탑 직경의 증가에 따라 넓어진 공간에 머무는 슬러리 상의 체류량이 상대적으로 증가하기 때문에 운전압력의 증가에 따른 기체 체류량의 증가 경향은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 점점 감소된다고 할 수 있다.

삼상 슬러리 기포탑에서 연속액상의 점도와 기포탑의 직경이 기포의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 기포탑 내부의 기포 체류량은 연속액상의 점도가 증가함에 따라 감소하였으며 이와같은 연속액상의 점도가 기포체류량에 미치는 영향은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 점점 감소하였다.

가압 슬러리 기포탑에서 연속 슬러리 상의 점도가 증가함에 따라 기포의 체류량이 감소하는 것은 연속액상의 점도가 증가함에 따라 기포탑 내부에서 상승하는 기포의 크기가 증가하게 되는데[4,12-15], 기포의 크기가 증가하면 기포에 작용하는 부력(buoyance force)도 증가하게 되어 기포의 상승속도가 증가하여 기포의 기포탑 내부에서의 체류시간이 감소하게 되므로 기포의 체류량이 감소한다고 할 수 있다. 한편, 기포탑의 직경이 증가하면 기포탑 내부에 존재하는 기포들의 흐름거동 영역이 넓어지게 되어 기포와 기포간의 접촉에 의한 합체현상이 감소하게 되므로 기포의 크기는 작아지게 된다. 이와같은 현상은 기포탑 내부에 기포 체류량을 증가시키는 효과가 있지만, 이와동시에 기포탑의 직경 증가에 따라 기포탑 내부에 액체의 체류량이 증가하게 되므로 기포 체류량 증가를 막아주는 효과가 있다. 이들 두 가지의 효과가 기포탑 내부에 기포 체류량의 변화에 영향을 미치기 때문에 기포탑의 직경이 증가함에 따라 연속액상의 점도가 기포 체류량에 미치는 영향은 약간 감소하는 것으로 해석할 수 있다.

삼상슬러리 기포탑에서 슬러리 상에 포함된 고체의 분율과 기포탑의 직경이 기포의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 기포탑 내부에 기포의 체류량은 슬러리 상에 포함된 고체입자의 분율이 증가함에 따라 기포의 체류량은 감소하였으며 이와같은 경향은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

가압 삼상 슬러리 기포탑 반응기의 수력학적 similarity를 검토하기 위하여 수력학적 계의 parameter를 7개 선정하였다. 수력학적 주요 parameter로는 삼상 슬러리 기포탑 반응기에서 분산상으로 존재하는 기포의 특성과 체류량 그리고 반응기 내부에서 생성되는 난류현상(turbulence)에 직접적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있는 기체유속(U_G)과, 기포탑 반응기 내부에서 연속상을 이루는 액체상의 흐름거동과 기포-액체상의 접촉 흐름에 영향을 미치는 액체의 점도($\mu_{SL,eff}$)와 슬러리 기포탑 내부에서 기포의 생성 및 합체와 분해 등에 영향을 미치는 액체상의 표면장력(σ_{SL}), 슬러리 기포탑이 가압상태로 운전되므로 가압상태로 운전되는 삼상 슬러리 기포탑의 운전압력변화에 따른 액체상의 밀도와 기체상의 밀도 차($\rho_{SL}-\rho_G$), 기포와 액체 그리고 슬러리 상의 흐름과 접촉거동에 의한 기포탑 내부에서의 압력강하($\Delta P/L$), 기포탑반응기의 직경(D), 그리고 기포탑 반응기가 수직형태이므로 슬러리 기포탑 반응기 내부에서 흐름거동을 하는 기체나 슬러리 상은 중력의 영향을 받으므로 중력가속도(g) 등을 선택하였다. 본 연구의 실험에서 고려된 주요변수인 이들 parameter로부터 차원해석(dimensional analysis)에 의해 식 (1)과 같은 4개의 무차원 군을 얻었다. 즉, 본 연구에서 고려된 파라미터의 수는 7개이고 이들 파라미터들의 기본 차원은 3개이므로 차원해석에 의해 본 연구에서 사용한 실험 시스템을 지배하는 무차원 군을 4개 얻을 수 있었다.

$$F\left(\frac{(\Delta P/L)D^2}{U_G \mu_{SL,eff}}, \frac{DU_G(\rho_{SL}-\rho_G)}{\mu_{SL,eff}}, \frac{U_G^2}{gD}, \frac{U_G \mu_{SL,eff}}{\sigma_{SL}}\right) = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 두 번째 무차원 군은 레이놀즈 수(Reynolds number)이고 세 번째 무차원 군은 프라우드 수(Froude number)인데, 두 번째 무차원 군과 네 번째 무차원 군을 곱하여 식 (2)와 같은 새로운 무차원 군인 웨버 수(Weber number)를 얻을 수 있었다.

$$\left[\frac{DU_G(\rho_{SL}-\rho_G)}{\mu_{SL,eff}}\right] \left[\frac{U_G \mu_{SL,eff}}{\sigma_{SL}}\right] = \frac{DU_G^2(\rho_{SL}-\rho_G)}{\sigma_{SL}} \quad (2)$$

따라서, 식 (1)과 (2)에서 가압슬러리 기포탑 내부에서의 압력강하를 나타내는 항을 다른 항들의 함수로 나타내면 식 (3)를 얻을 수 있다.

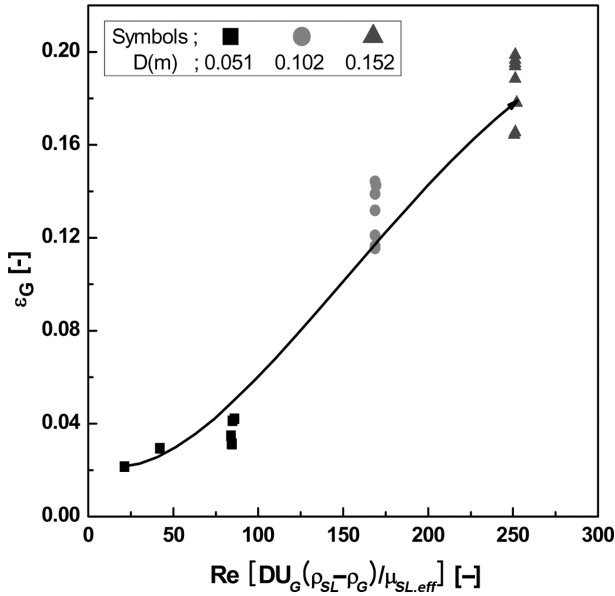


Fig. 6. Effects of Re on ϵ_G in three-phase slurry bubble columns.

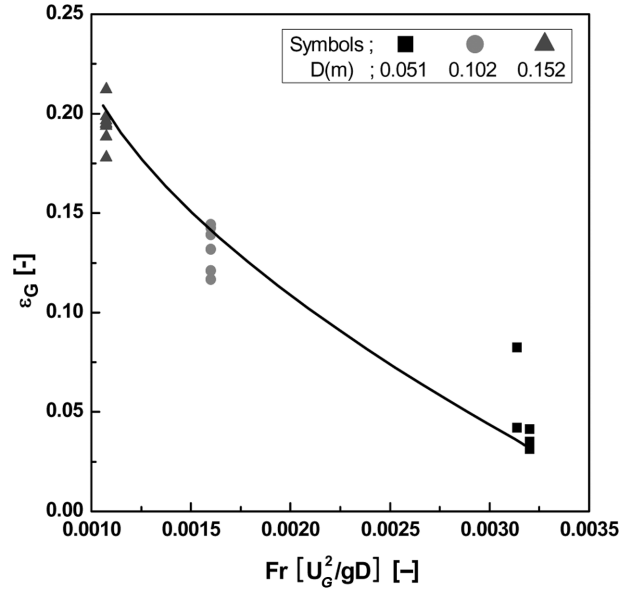


Fig. 7. Effects of Fr on ϵ_G in three-phase slurry bubble columns.

$$\left[\frac{(\Delta P/L)D^2}{U_G \mu_{SL,eff}} \right] = k \left(\frac{DU_G(\rho_{SL}-\rho_G)}{\mu_{SL,eff}} \right)^a \left(\frac{U_G^2}{gD} \right)^b \left(\frac{DU_G(\rho_{SL}-\rho_G)}{\sigma_{SL}} \right)^c \quad (3)$$

$$= k Re^a Fr^b We^c \quad (4)$$

본 연구의 실험결과 식 (3)에서 각 계수를 다중선형방법(multi-linear regression method)으로 구한 결과 식 (4)를 얻었으며 이 식의 상관계수는 0.99로 실험결과와 잘 일치하였다.

$$\frac{(\Delta P/L)D^2}{U_G \mu_{SL,eff}} = 0.80 Re^{0.96} Fr^{-1.04} We^{0.05} \quad (5)$$

본 연구에서 구한 가압 슬러리 기포탑의 수력학적 유사성(similarity)을 지배하는 각각의 무차원 군들이 기포탑의 수력학적 거동 중 가장 중요한 요소 중의 하나인 기포 체류량에 미치는 영향을 검토하고자 무차원 군의 하나인 Re 수가 기포 체류량에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 도출된 무차원 군인 레이놀즈 수의 변화는 기포탑 내부의 기포 체류량에 거의 선형적인 영향을 나타냈으며 기포탑의 직경이 0.051 m에서 0.152 m로 변화하여도 레이놀즈 수의 영향은 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 본 연구에서 정의된 레이놀즈 수의 증가에 따라 기포탑 내부의 기체 체류량은 점점 증가하는 것을 알 수 있다.

가압 슬러리 기포탑에서 도출된 무차원 군인 프라우드 수(Fr)가 슬러리 기포탑 내부의 기포 체류량에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 프라우드 수(Fr)가 증가함에 따라 기포탑 내부의 기체 체류량은 단조 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서도 기포탑의 직경이 0.051 m에서 0.152 m로 변화하여도 프라우드 수가 기포탑 내부의 기포 체류량에 미치는 영향은 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있다.

가압슬러리 기포탑에서 도출된 무차원 군인 웨버 수(We)가 슬러리 기포탑 내부의 기포 체류량에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 가압 기포탑에서 기포 체류량은 본 연구에서 도출된 무차원 군인 웨버 수(We)의 증가에 따라 기포탑의

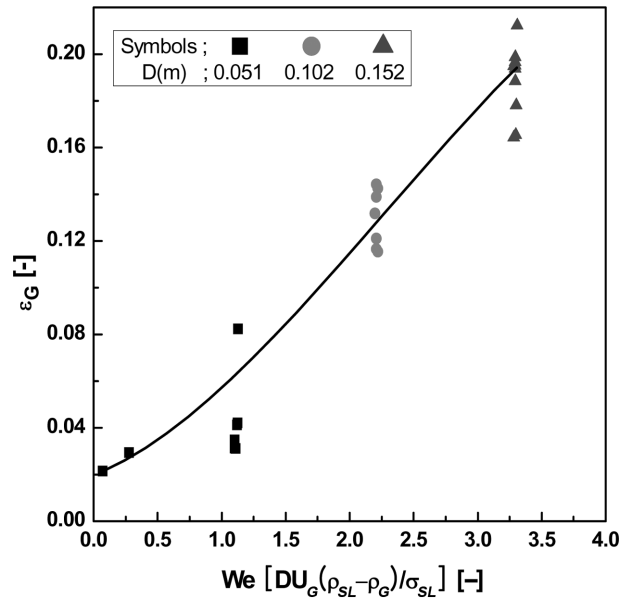


Fig. 8. Effects of We on ϵ_G in three-phase slurry.

직경이 0.051에서 0.152 m로 변함에도 불구하고 단조 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 기포탑에서 기포 체류량은 무차원 군인 웨버 수(We)와 밀접한 연관성을 가지고 있음을 알 수 있다.

가압 슬러리 기포탑에서 기포 체류량은 기포탑에서의 단위길이 당 압력강하($\Delta P/L$)를 측정하여 식 (6)을 사용하여 구할 수 있었다.

$$\Delta P/L = [\rho_{SL} - \epsilon_G(\rho_{SL} - \rho_G)]g \quad (6)$$

한편, 본 연구의 실험범위에서 기포탑의 단위길이 당 압력강하($\Delta P/L$)의 값을 무차원 군들의 관계식인 식 (3) 또는 (4)를 이용하여 일정한 운전조건에서 구할 수 있으므로 이렇게 구한 기포탑 단위길이 당 압력강하의 값을 이용하여 식 (5)와 (6)으로부터 기포탑 내부의 기포 체류량을 계산할 수 있는데, 실험적으로 측정된 기포체

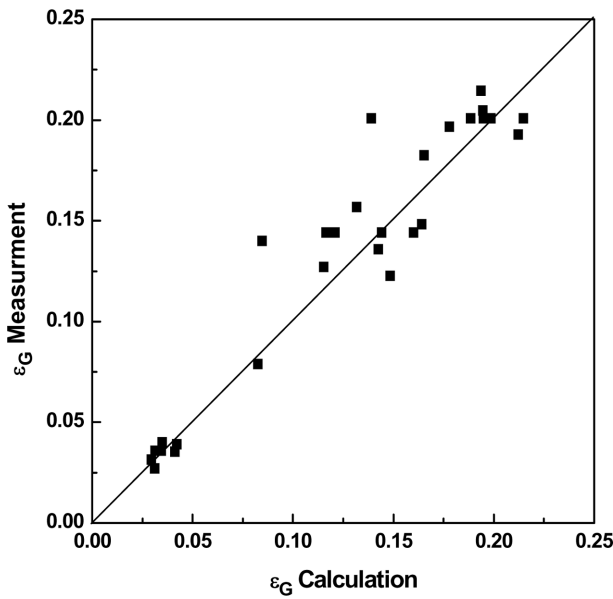


Fig. 9. Correlation of ϵ_G in terms of dimensionless groups.

류량과 상관식을 이용한 기포 체류량을 Fig. 9에서 비교하여 나타내었다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 실험적으로 측정된 기포 체류량과 상관식으로부터 계산된 기포 체류량은 상관계수 0.97의 범위로 잘 맞는 것을 알 수 있다. 특히, 본 연구의 실험범위인 기포탑의 직경이 0.051 m에서 0.152 m로 변화함에 따라라도 상관식으로부터 얻은 기포 체류량 값은 실제 측정된 값과 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구의 결과 얻은 수력학적 유사성을 나타내기 위한 무차원 군들의 상관식은 기포탑의 직경, 기체유속, 액체 점도 및 표면장력, 운전압력 그리고 슬러리 상에 포함된 고체 입자의 농도 등이 변화함에 따라 기포탑의 기포 체류량 예측에 매우 유효하게 사용할 수 있다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 가압 삼상슬러리 기포탑에서 기포 체류량은 기체유속이 증가함에 따라 증가하고 기포탑의 직경이 증가함에 따라 감소하였으며, 기체유속 증가에 따라 기포 체류량이 증가하는 경향은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 감소하였다.
- (2) 기포탑에서 운전압력이 증가함에 따라 기포체류량은 증가하였으며 이와같은 경향은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 감소하였다.
- (3) 기포탑에서 연속 액상의 점도와 슬러리 상에 포함된 고체입자의 함유율이 증가함에 따라 기포 체류량은 감소하였으며, 이와같은 경향은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 감소하였다.
- (4) 가압 삼상슬러리 기포탑의 수력학적 특성을 제어하는 주요 무차원 군 4개를 차원해석에 의해 얻을 수 있었으며 이들 무차원 군들은 기포탑의 기포 체류량과 압력강하 등 수력학적 파라미터들과 긴밀한 상관성을 나타내었다.
- (5) 본 연구의 결과 다음과 같은 기포탑의 직경이 변화하여도 적용할 수 있는 수력학적 similarity를 나타내는 무차원 군의 상관식을 얻을 수 있었다.

$$\frac{(\Delta P/L)D^2}{U_G \mu_{SL,eff}} = 0.80 \text{Re}^{0.96} \text{Fr}^{-1.04} \text{We}^{0.05}$$

감 사

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

사용부호

- a_1 : constant in Eqs. (3) & (4)
- a_2 : constant in Eqs. (3) & (4)
- a_3 : constant in Eqs. (3) & (4)
- D : column diameter[m]
- Fr : Froude Number $\frac{U_G^2}{gD}$ [-]
- d_b : bubble size[cm]
- K : fluid consistency index[Pa.s]
- k : constant in Eq. (3)
- L : length in the column[m]
- n : flow behavior index[-]
- P : pressure[N/m²]
- P : pressure drop[N/m²]
- Re : Reynolds Number[-]
- S_C : solid content[wt%]
- U_G : gas velocity[m/s]
- U_L : liquid velocity[m/s]
- We : Weber Number $\frac{DU_G^2(\rho_{SL}-\rho_G)}{\sigma_{SL}}$ [-]

그리스 문자

- $\gamma_{SL,eff}$: shear rate[1/s]
- ϵ_G : bubble hold up[-]
- $\mu_{SL,eff}$: liquid viscosity[mPa.s]
- ρ_G : gas density[kg/m³]
- ρ_{SL} : liquid density[kg/m³]
- σ_{SL} : liquid surface tension[N/m]

참고문헌

1. Deckwer, W.-D., *Bubble column reactors*, John Wiley and Sons, New York(1992).
2. Fan, L. S., *Gas-liquid-solid fluidization engineering*, Butterworth Publishers, Stoneham, Ma, USA(1989).
3. Krishna, R. and Sie, S. T., "Design and Scale-up of the Fischer-Tropsch Bubble Column Slurry Reactor," *Fuel Processing Techno.*, **64**, 73-105(2000).
4. Krishna, R., de Swart, J. W. A., Ellenberger, J., Martina, G. B. and Maretto, C., "Gas Holdup in Slurry Bubble Columns : Effect of Column Diameter and Slurry Concentrations," *AIChE J.*, **43**, 311-316(1997).
5. Kang, Y., Park, S. H. and Kim, S. D., "Wavelet Transform Analysis of Pressure Fluctuation Signals in a Pressurized Bubble Col-

- umn," *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 6259-6265(2001).
6. Kang, Y., Cho, Y. J., Park, S. J., Fan, L. T. and Kim, S. D., "Characterization of Pressure Signals in a Bubble Column by Wavelet Transform," *J. Chem. Eng. Japan*, **34**, 158-165(2001).
 7. Kang, S. H., Son, S. M., Kang, Y., Bae, J. W. and Jun, K. W., "Effect of Pressure Fluctuations on the Heat Transfer Characteristics in a Pressurized Slurry Bubble Column," *KJChE*, **25**, 897-904(2008).
 8. Kang, Y., Cho, Y. J., Woo, K. J. and Kim, S. D., "Dynamic Characteristics of Heat Transfer Coefficient in Pressurized Bubble Columns with Viscous Liquid Medium," *Chem. Eng. Processing*, **41**, 699-706(2002).
 9. Behkish, A., Lemoine, R., Sehabiague, L., Oukaci, R. and Morsi, B. I., "Gas Holdup and Bubble Size Behavior in a Large-Scale Slurry Bubble Column Reactor Operating with on Organic Liquid Under Elevated Pressures and Temperatures," *Chem. Eng. J.*, **128**, 69-84(2007).
 10. Maretto, C. and Krishna, R., "Modelling of a Bubble Column Slurry Reactor for Fischer-Tropsch Synthesis," *Catal Today*, **52**, 279-289(1999).
 11. Gandhi, B., Prakash, A. and Bergougnou, M. A., "Hydrodynamic Behavior of Slurry Bubble Column at High Solids Concentrations," *Powder Technol.*, **103**, 80-94(1999).
 12. 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," *Korean J. Chem. Eng.*, **26**, 587-591(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," *Powder Technol.*, **113**, 158-167(2000).
 14. Kang, Y., Cho, Y. J., Woo, K. J., Kim, K. I. and Kim, S. D., "Bubble Properties and Pressure Fluctuations in Pressurized Bubble Columns," *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 411-419(2000).
 15. Wilkinson, P. M. and van Dierendonck, L. L., "Pressure and Gas Density Effects on Bubble Break-up and Gas Hold-up in Bubble Columns," *Chem. Eng. Sci.*, **45**, 2309-2315(1990).
 16. Kawase, Y. and Moo-young, M., "Influence of Non-newtonian Flow Behaviour on Mass Transfer Inbubble Columns with and Without Draft Tubes," *Chem. Eng. Commun.*, **40**, 67-83(1986).
 17. Schumpe, A., Decker, W.-D. and Nigam, K. D. P., "Gas-Liquid Mass Transfer in Three-Phase Fluidized Beds with Viscous Pseudoplastic Liquids," *Can. J. Chem. Eng.*, **67**, 873(1989).