

가압 삼상슬러리 기포탑에서 직경변화에 따른 기체-액체 물질전달 특성

서명재 · 임대호 · 신익상 · 손성모 · 강 용[†]

충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
(2009년 4월 20일 접수, 2009년 5월 11일 채택)

Mass Transfer Characteristics in Pressurized Three-phase Slurry Bubble Columns with Variation of Column Diameter

Myung Jae Seo, Dae Ho Lim, Ik Sang Shin, Sung Mo Son and Yong Kang[†]

School of Chemical Engineering, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea
(Received 20 April 2009, accepted 11 May 2009)

요 약

가압 삼상슬러리 기포탑에서 탑의 직경변화에 따라 기체-액체 물질전달 특성을 고찰하였다. 기체 유속, 운전압력, 액체 점도, 슬러리상에서 고체입자의 양 그리고 탑의 직경이 기체-액체 부피물질전달계수에 미치는 영향을 결정하였다. 운전변수들이 물질전달계수에 미치는 영향은 기포탑의 직경이 변화함에 따라 다르게 나타났다. 기체-액체 부피물질전달계수는 기체유속이나 운전압력이 증가함에 따라 증가하였으나, 기포탑의 직경, 액체의 점도 그리고 슬러리상에 고체입자의 농도가 증가함에 따라 감소하였다. 기체-액체 물질전달계수가 기체유속 증가에 따라 증가하는 경향과 액체의 점도가 증가함에 따라 감소하는 경향은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 점차 감소하였다. 그러나, 운전압력과 슬러리상에 포함된 고체입자의 농도가 기체-액체 물질전달계수에 미치는 영향은 기포탑의 직경이 변화함에 따라 큰 영향을 받지 않았다. 본 연구의 실험범위에서 기체-액체 물질전달계수는 다음 식과 같은 실험변수의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$k_L a = 0.02 D^{-0.26} U_G^{0.28} P^{0.43} \mu_L^{-0.04} S_c^{-0.35}$$

Abstract – Gas-liquid mass transfer characteristics were investigated in pressurized three-phase slurry bubble columns with variation of column diameter. Effects of gas velocity, operating pressure, liquid viscosity, solid content in the slurry phase and column diameter on the gas-liquid volumetric mass transfer coefficient($k_L a$) were determined. The effects of operating variables on the mass transfer coefficient tended to change with variation of column diameter. The mass transfer coefficient increased with increasing gas velocity or operating pressure but decreased with increasing column diameter, liquid viscosity or solid concentration in the slurry phase. The increase trend of $k_L a$ value with increasing gas velocity and the decrease trend of $k_L a$ value with increasing liquid viscosity, tended to decrease gradually with increasing column diameter. However, the effects of operating pressure and solid concentration in the slurry phase on the $k_L a$ value did not change considerably with variation of column diameter. The values of $k_L a$ were well correlated with operating variables with in this experimental conditions as $k_L a = 0.02 D^{-0.26} U_G^{0.28} P^{0.43} \mu_L^{-0.04} S_c^{-0.35}$.

Key words: Three-phase, Slurry, Bubble Column, Mass Transfer

1. 서 론

삼상 슬러리 기포탑 반응기는 다른 다상접촉반응기에 비하여 기체-기체, 기체-액체 및 액체-고체 그리고 기체-액체-고체 등 다상들 간의 접촉효과가 탁월하며 슬러리 상을 이루는 고체 촉매입자들을 반응기 전체에 균일하게 분산시킬 수 있으므로 반응기 내부의 반응 전환율과 반응선택성을 높은 수준으로 유지할 수 있을 뿐만 아니라

반응물들의 반응 부피의 극대화를 가져와 반응기의 생산효율을 증대시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 반응기 내부에서 고체상을 이루는 촉매입자들을 연속적으로 다룰 수 있어서 활성이 저하된 촉매입자들을 재활성화 하거나 새로운 촉매입자를 반응기에 투입하기가 용이하여 반응기의 연속조작이 가능하다는 등의 많은 장점들이 있기 때문에 합성석유생산공정, 발효공정, 석유정제공정, 폐수처리공정, 생물학적 반응공정 등에 공업적으로 그 응용성이 점차 증대되고 있다[1-3].

이와같은 공업적, 산업적 활용도의 획기적인 증가에 따라 삼상슬러리 기포탑반응기와 접촉공정에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

[‡]이 논문은 서울대학교 최창균 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

다. 즉, 삼상슬러리 기포탑 반응기의 동특성과 수력학적 특성을 규명하고 삼상슬러리 기포탑 반응기 내부에서 기체 반응물인 기체의 체류량과 기포의 크기, 상승속도, 개수 등 기포의 특성에 대한 연구들이 진행되어 오고 있으며, 반응기 내부에서의 열 전달 및 기체-액체간의 물질전달 특성 등이 연구되고 있다[4-8].

특히, 합성가스나 석탄 등으로부터 합성연료를 생산하기 위한 공정(GTL, CTL) 등에 가압의 삼상슬러리 기포탑 반응기는 매우 효과적으로 사용될 수 있는 것으로 알려져 있다[9-12]. 그러나, 가압의 삼상슬러리 기포탑 반응기의 설계나 Scale-up 그리고 최적조업조건 설정이나 Fault Diagnosis 등을 위한 공학적 자료는 현재 매우 부족할 뿐만 아니라 또 각국에서 에너지 안보차원에서 보안을 유지하고 있기 때문에 기술도입도 매우 어려운 실정이다. 최근에는 삼상슬러리 기포탑 반응기와 같은 다상들간의 접촉과 반응을 수행하는 반응공정의 효과적인 제어와 결점진단 그리고 설계와 Scale-up 등에 대한 정보를 확보하기 위해 통계학적 방법인 Chaos 이론들을 도입하여 다상의 불균일 반응계의 거동을 해석하려는 연구들도 진행되고 있다. 그러나 이에 대한 정보는 국내·외를 막론하고 매우 미흡한 실정이다[11-14].

가압의 삼상슬러리 기포탑 반응기에서는 삼상의 접촉과 흐름에 의해 반응이 일어나는 동력학적 계를 이루므로 반응기 내부에서의 열 전달 및 물질전달이나 각상의 접촉과 혼합 등이 매우 불규칙적이며 비선형적이다. 이와 같은 전달현상과 흐름현상들은 기포탑의 직경 변화에 따라서도 매우 다양한 형태로 바뀌는데 이는 기포탑에서 불균일상으로 존재하는 기포의 특성이 변화하기 때문이다. 대부분의 다상 반응기의 경우 실험실적 규모의 장치나 공정을 산업적으로 활용하기 위해 공업화하기 위해서는 그 규모를 크게하여야 하는데 반응기의 직경은 특히 반응기 자체의 특성 결정에 매우 영향을 미치는데 이는 반응기의 직경변화에 따라 다상의 접촉이 일어나는 반응기 내부에서의 수력학적 흐름과 접촉 현상 그리고 열 및 물질 전달 특성들이 매우 변화하기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 이와 같은 정보를 제공하기 위한 방안의 하나로 삼상슬러리 기포탑의 직경변화가 기포탑 내부에 분산상으로 존재하는 기포와 연속상인 슬러리상 간의 부피 물질전달계수에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 가압슬러리 기포탑(pressurized slurry bubble column)은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직경이 0.051, 0.076, 0.102, 0.152 m이고 높이가 1.5 m인 Stainless steel로 제작된 column을 사용하였다[6]. 기포탑 내부는 주어진 운전조건에 맞는 압력을 일정하게 유지하기 위하여 가압 기포탑 장치를 sealing하였다. 실험변수로는 운전압력, 기체유속, 액상의 점도, 탑의 직경 그리고 슬러리 농도를 선정하였으며, 액상으로는 물과 CMC(Carboxy Methyl Cellulose)

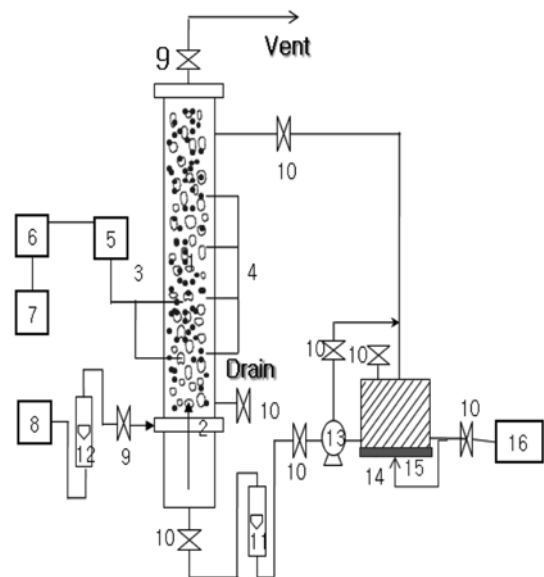


Fig. 1. Experimental apparatus.

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

수용액을, 기체로는 filtering이 된 압축공기를 사용하였다. 기포탑에 투입되는 기체유속의 범위는 0.02~0.16 m/s, 시스템 압력의 범위는 0.1~1.0 MPa, 액상의 점도는 1.0~38 mPa·s 범위에서, 그리고 슬러리 농도는 밀도가 2,500 kg/m³이고 입도가 0.4~0.7 μm인 glass bead를 0~20 wt%로 5 wt% 간격으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 본 연구에 사용한 액상의 물리적 특성은 Table 1.에 나타내었다.

기체를 균일한 압력으로 유지하고 일정한 유속으로 기포탑 내부에 주입하기 위하여 압축기를 사용하였으며, 유입되는 기체의 양을 조절하기 위하여 로타미터(rotameter)를 설치하였고 니들 밸브로 그 양을 조절하였다. 액체는 2톤 용량의 액체 탱크에서 공업용 펌프를 사용하여 밸브와 flowmeter를 통해 공급하였다 일정 반응 조건에서 가압 삼상 슬러리 기포탑이 정상상태에서 도달하였을 때 압력 강하를 측정하였다.

가압 슬러리 기포탑에서 기체-액체 부피 물질전달계수는 가압 슬러리 기포탑 내에서 연속상의 축 방향 용존산소량을 측정하여 축방향 분산모델을 적용하여 구하였다[1]. 가압 슬러리 기포탑 내에서 액상의 축 방향 용존산소량의 변화를 측정하기 위하여 가압 슬러리 기포탑의 벽면에 0.1 m 높이에 따라 10개의 sampling tap을 설치하였으며, 일정실험 조건에서 액상의 시료채취는 기-액 분리기를 사용하여 동시에 하였다. 채취된 시료의 용존산소량 측정은 상온에서 교

Table 1. Physical and rheological properties of liquid phase

	Dynamic viscosity (mPa·s)	Surface tension (mN/m)	Density (kg/m ³)	K (Pa·s ⁿ)	n	Diffusivity (cm ² /s)	Kinematic viscosity (m ² /s)
Water	0.961	72.9	1000	0.001	1	2.22×10 ⁻³	9.61×10 ⁻⁷
CMC 0.1 wt%	11	73.2	1001	21.69×10 ⁻³	0.882	0.48×10 ⁻³	1.10×10 ⁻⁷
CMC 0.2 wt%	24	73.3	1002	43.82×10 ⁻³	0.847	0.26×10 ⁻³	2.40×10 ⁻⁷
CMC 0.3 wt%	38	73.6	1003	71.69×10 ⁻³	0.825	0.19×10 ⁻³	3.79×10 ⁻⁷

반되는 Do-meter계를 사용하여 측정하였다. 기포탑에 보내지는 슬러리상은 슬러리 저장조에서 질소로 Purge하여 슬러리상에 포함된 산소의 농도를 $0.5 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ 이하로 하였다.

본 연구에서 적용한 축방향 분산 모델은 정상상태에서 용존산소의 물질수지로부터 얻을 수 있는 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다[1, 3, 4].

$$\frac{1}{Pe} \frac{d^2 C}{dx^2} - \frac{dC}{dx} + St(C^* - C) = 0$$

$$x = 0, C = C_0 + \left. \frac{1}{Pe} \frac{dC}{dx} \right|_{x=0} \quad (1)$$

$$x = 1, \left. \frac{dC}{dx} \right|_{x=1} = 0 \quad (2)$$

$$Pe = \frac{U_G L}{D_{zE_L}}, St = (k_L a) \frac{L}{U_G}, x = Z/L \quad (3)$$

$$C^* = a + bx \quad (4)$$

$$a = \frac{Y}{H} (P_T + \rho_L g \varepsilon_L L) \quad (5)$$

$$b = -\frac{Y}{H} \rho_L g \varepsilon_L L \quad (6)$$

여기서, Pe 는 Peclet 수, St 는 Stanton 수를 나타내며 X 는 무차원 길이를, 그리고 C^* 는 용존산소의 평형농도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

가압 삼상슬러리 기포탑에서 기포의 흐름에 따른 슬러리상의 용존산소를 축방향으로 측정하여 이를 축 방향 분산모델에 적용하여 기포탑 내부에서 연속상인 슬러리상의 단위부피당 부피물질전달 계수를 구하였다. 슬러리 기포탑에서 측정된 축 방향 용존산소의 농도는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 축방향의 무차원 길이 X 의 증가에 따라 점차 증가해가는 것을 알 수 있다. 이와 같은 용존산소의 농도가 축 방향 거리의 증가에 따라 점진적인 증가를 하는 경향은 축 방향 분산모델을 적용하기에 적합하였다[1-4].

가압 삼상슬러리 기포탑에서 탑의 직경(D)과 기체유속 U_G 변화가

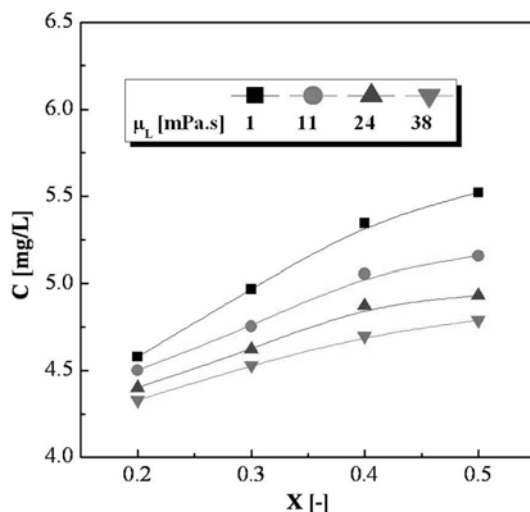


Fig. 2. Oxygen concentration profile along with the column height ($D=0.102 \text{ m}$, $U_G=4 \text{ m/s}$, $S_c=10\%$, $P=1 \text{ kg/cm}^2$).

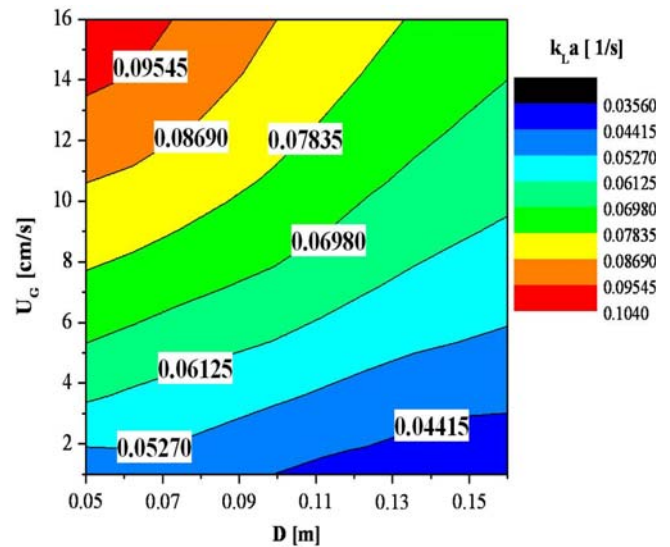


Fig. 3. Effects of D and U_G on $k_L a$ in pressurized three-phase slurry bubble columns ($S_c=10 \text{ wt\%}$, $\mu_L=24 \text{ mPa.s}$, $P=8 \text{ kg/cm}^2$).

기포탑 내부에서 기체-슬러리 간의 부피물질전달 계수인 $k_L a$ 값에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 기체-슬러리 부피물질전달계수는 기체유속 U_G 가 증가함에 따라 증가하였으나, 기포탑의 직경이 증가함에 따라서는 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 기체유속의 증가에 따른 $k_L a$ 값의 변화 양상은 기포탑의 직경이 변화함에 따라 다르게 나타났다. 즉, 기포탑의 직경이 비교적 작은 경우($D \leq 0.07 \text{ m}$)에서는 기포탑 내부에서 기체-액체물질 전달계수 값은 기체유속의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하였으나, 기포탑의 직경이 증가함에 따라 U_G 가 $k_L a$ 의 변화에 미치는 영향은 점점 감소하였다. 이와같은 경향은 기포탑에서 탑의 직경이 증가하면 기포탑 내부에 존재하는 기포의 체류량이 감소하기 때문으로 해석할 수 있다. 즉, 기포탑의 직경이 증가함에 따라 같은 기체유속의 조건에서 기포탑 내부에 액체의 체류량이 증가하게 되는 데, 기포탑 내부에서 슬러리상이 연속상이므로 기체는 기포의 상태로 기포탑에서 상승하게 된다. 기포는 기포탑 내에서 불규칙적이며 무작위적으로 개개의 기포가 받는 부력(buoyancy force)에 따라 거동하며 상승하면서 다량의 불특정 기포들과 만나게 된다. 기포탑 내부에서 많은 기포들은 서로 만나면서 합체(coalescence)하게 되어 기포의 크기는 기포탑에서 상승하면서 점점 증가하게 된다. 기포탑에서 기포는 크기가 커지면 더 많은 부력을 받게 되므로 크기가 커진 기포의 상승속도는 점점 더 증가하게 된다. 그러나 기포탑의 직경이 커짐에 따라 동일 기체유속의 조건에서 기포탑에 액체의 양이 증가하게 되므로 기체의 체류량도 감소하여서 기체-슬러리상 간의 부피물질전달계수는 감소한다고 할 수 있다.

가압 삼상슬러리 기포탑에서 탑의 직경(D)과 압력(P)의 변화가 기포탑 내부에서 기체-슬러리간의 부피 물질전달계수에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 기체-슬러리상 간의 부피물질전달계수는 압력이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였으며, 기포탑의 직경이 증가함에 따라 같은 압력조건에서 $k_L a$ 값은 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 슬러리 기포탑에서 압력이 증가하면 기포탑 내부에 기포의 체류량이 증가하게 되어 기포탑 내부의 기체-슬러리간의 물질전달은 잘 일어나기 때문으로 해석

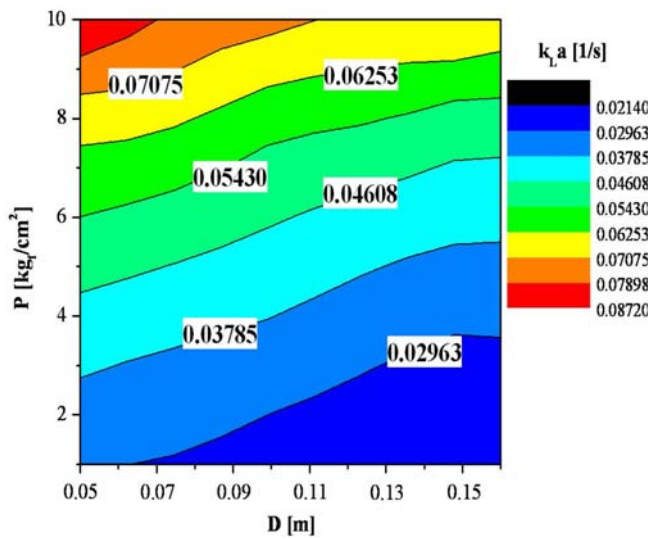


Fig. 4. Effects of D and P on in pressurized three-phase slurry bubble columns ($S_c=10$ wt%, $U_G=8$ cm/s, $\mu_L=24$ mPa.s).

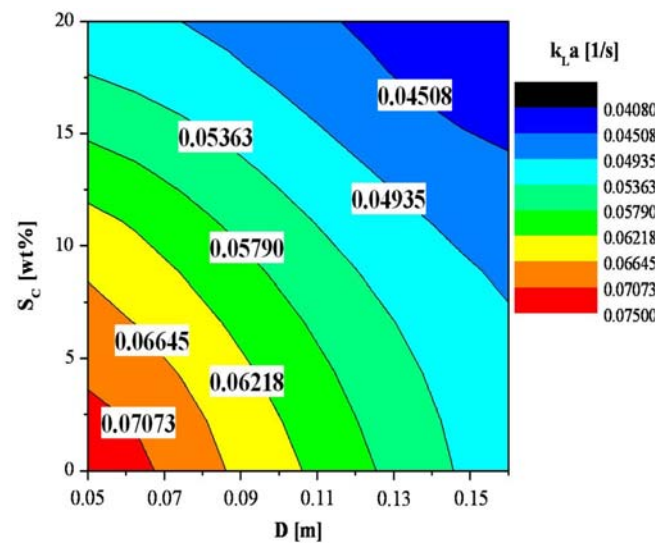


Fig. 6. Effects of D and S_c on in pressurized three-phase slurry bubble columns ($\mu_L=24$ mPa.s, $P=8$ kg/cm², $U_G=4$ cm/s).

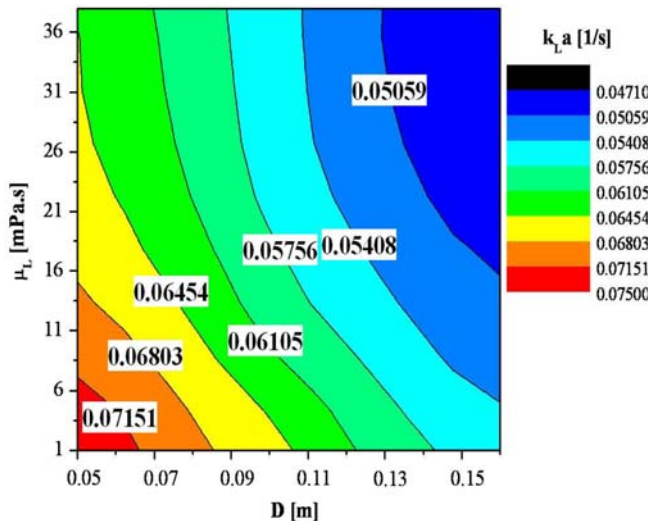


Fig. 5. Effects of D and μ_L on in pressurized three-phase slurry bubble columns ($S_c=10$ wt%, $P=8$ kg/cm², $U_G=4$ cm/s).

할 수 있다. 또한, 기포탑반응기에서 압력이 증가하면 기체상의 밀도가 증가하기 때문에 기체-액체 계면에서 기체로부터 액체상으로의 물질전달의 driving force인 기체 중 특정 성분의 농도차가 증가하기 때문에 물질전달 계수는 증가한다고 할 수 있다.

가압 삼상슬러리 기포탑에서 슬러리상의 점도와 기포탑의 직경이 기체-액체 부피물질전달계수, k_La 에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 k_La 값은 연속상인 슬러리상의 점도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으나, 기포탑의 직경이 5.08 cm에서 15.2 cm로 점차 증가함에 따라 이와 같은 경향은 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 기포탑의 직경이 10.2 cm 이상에서는 기체-액체 부피 물질전달 계수값이 슬러리상의 점도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 현저히 감소하였다. 기포탑 반응기에서 연속상인 액상이나 슬러리상의 점도가 증가하면 기포탑 반응기 내부에 존재하는 기포의 크기가 증가하여 기체의 체류량이 감소하기 때문에 기체-액체 부피물질전달계수는 감소한다고 보고되고 있다[1-5]. 그러

나, 기포탑의 직경이 증가함에 따라 기포의 크기가 연속상의 점도가 증가함에 따라 증가하는 경향이 현저히 감소하게 되므로[2, 6], 기포탑의 직경이 증가함에 따라 기포탑 내부에서 연속상인 슬러리상의 점도가 증가함에 따라 값이 감소하는 경향이 감소한다고 할 수 있다. 이와 같은 결과는 가압의 삼상슬러리 기포탑 반응기에서 기포탑의 직경이 증가함에 따라 연속 액상의 점도가 기체-액체 부피물질전달 계수에 미치는 영향은 감소한다고 할 수 있다.

가압 삼상슬러리 기포탑에서 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율(농도)과 기포탑의 직경이 기체-액체 부피물질전달계수에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 기체-액체 부피물질전달계수 값은 슬러리상에 포함된 고체입자의 분율, S_c 가 증가함에 따라 점차 감소하였다. 이는 슬러리상에 고체입자를 첨가하면 슬러리상의 점도의 증가를 가져올 뿐만 아니라 기체와 접촉하는 액체의 계면이 상대적으로 매끄럽지 못하여 접촉면적의 상대적 손실을 가져오기 때문으로 해석할 수 있다. 또한, 기포탑 반응기에서 기체와 액체의 접촉은 기포탑에 분산상으로 존재하는 상승 기포의 후단에 형성되는 소용돌이 영역(Vortex Region)에서 매우 격렬하게 일어나므로 이 영역에서의 기체-액체 접촉에 의한 물질전달이 전체 물질전달의 수준(level)에 큰 비중을 차지하게 되는데, 기포탑 내에 연속 액상이 순수한 액체가 아닌 슬러리 상일 경우 슬러리상을 형성하고 있는 첨가된 고체입자 때문에 상승기포의 후단에 형성되는 소용돌이 영역에 함유되는 액상의 양이 상대적으로 감소하여 기체-액체 부피물질전달의 양이 상대적으로 감소하기 때문에 기포탑 내부의 연속 액상이 순수액상인 경우보다 슬러리 상일 경우의 기체-액체 부피물질전달 계수는 감소한다고 해석할 수 있다. 기포탑 내부의 일정운전 조건에서 상승하는 기포의 후단에 형성되는 소용돌이 영역에서는 일정한 에너지의 소멸이 일어나는데[3-5], 동일 에너지로 일어나는 소용돌이 현상에 함유되는 액체의 양이 슬러리의 양보다 상대적으로 많아지게 되는데 이는 슬러리에 포함된 고체입자의 밀도가 순수액체의 밀도보다 크기 때문이다. Fig. 6에서, 기포탑 내부의 연속상인 슬러리상에 포함된 고체입자의 농도 S_c 가 기체-액체 부피물질전달 계수인 k_La 에 미치는 영향은 기포탑의 직경이 증가하

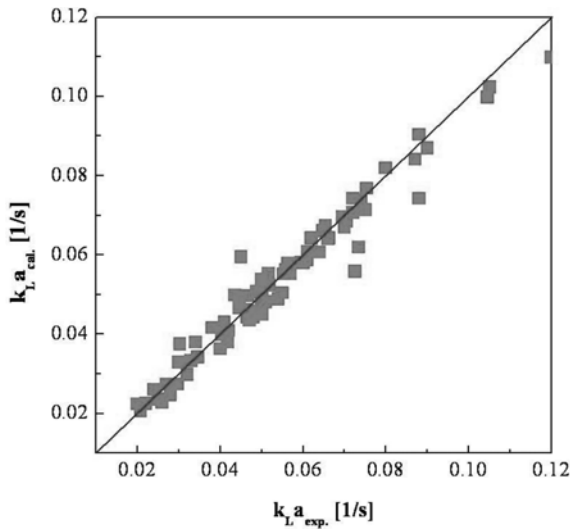


Fig. 7. Correlation of in terms of operating variables.

어도 거의 유사한 형태로 나타났다.

가압의 삼상 슬러리 기포탑 반응기에서 기포탑의 직경, 기체유속, 운전압력, 연속 액상의 점도 그리고 슬러리상에 함유된 고체입자의 농도 등 운전변수가 기체-액체 부피물질전달계수에 미치는 영향을 식 (7)과 같은 운전변수의 상관식으로 나타낼 수 있었는데, 이 식은 Fig. 7에서

$$k_L a = 0.02D^{-0.26}U_G^{0.28}P^{0.43}\mu_L^{-0.04}S_c^{-0.35} \quad (7)$$

보는 바와 같이 본연구의 범위에서 실험적으로 측정된 $k_L a$ 값과 상관계수 0.970으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 가압의 점성유체 삼상슬러리 기포탑에서 기체-액체 부피물질 전달 계수를 기포탑 내부 연속상인 슬러리상의 축 방향 용존산소를 측정하여 축 방향 분산 모델(Axial Dispersion Model)을 적용함으로써 효과적으로 구할 수 있었다.

(2) 운전변수인 기체유속, 운전압력, 액상점도 및 슬러리상에 포함된 고체입자의 농도가 기체-액체 부피물질전달계수에 미치는 영향은 기포탑의 직경이 변화함에 따라 다르게 나타났다. 즉, $k_L a$ 값은 기체유속이 증가함에 따라 증가하고 액상의 점도가 증가함에 따라 감소하였으나 이와같은 영향들은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 점점 감소하였다. 부피물질전달 계수는 기포탑의 운전압력이 증가함에 따라 증가하고, 슬러리상의 고체입자의 농도가 증가함에 따라 감소하였으며 이들의 영향은 기포탑의 직경이 증가함에 따라 크게 변화하지 않았다.

(3) 가압 삼상슬러리 기포탑 반응기에서 기체-액체 부피물질전달 계수는 기포탑의 직경이 증가함에 따라 점차 감소하였다.

(4) 본 연구의 범위에서 기체-액체 부피물질전달계수는 다음과 같은 운전변수의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$k_L a = 0.02D^{-0.26}U_G^{0.28}P^{0.43}\mu_L^{-0.04}S_c^{-0.35}$$

사용기호

- a : constant, Eq.(5)
- b : constant, Eq.(6)
- C : oxygen concentration[mol/l]
- C_0 : initial concentration[mol/l]
- C^* : equilibrium concentration[mol/l]
- D : column diameter[m]
- g : gravitation acceleration[m/s²]
- H : Henry's constant[l/mol]
- K : fluid consistency index[Pa·sⁿ]
- $k_L a$: volumetric mass transfer coefficient[1/s]
- L : Column height[m]
- n : flow behavior index
- Pe : Peclet number, Eq.(3)
- ΔP : pressure drop in the column[Pa]
- P_T : pressure at the top of column[Pa]
- S_t : Stanton number, Eq.(3)
- U_G : superficial gas velocity[cm/s]
- x : dimensionless distance, Eq.(3)
- z : axial distance

그리스 문자

- μ_L : liquid viscosity[Pa]

감 사

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

참고문헌

1. Deckwer, W. D., *Bubble Column Reactors*, John Wiley and Sons. Newyork(1992).
2. Krichma, R. and Sie, S. T., "Design and Scale-up of the Fischer-Tropsch Bubble Column Slurry Reactor," *Fuel Processing Technol.*, **64**, 73-105(2000).
3. Fan, L. S., *Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering*, Butterworths, Boston(1989).
4. Kim, S. D. and Kang, Y., "Heat and Mass Transfer in Three-phase Fluidized-Bed Reactors-An Overview," *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 3639-3660(1997).
5. 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 Surface Science and Catalysis*, **159**, 103-108(2006).
6. 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).
7. Kang, Y., Cho, Y. J., Woo, K. J. and Kim, S. D., "Diagnosis of Bubble Distribution and Mass Transfer in Pressurized Bubble Columns with Viscous Liquid Medium," *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 4887-4893 (1993).

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.*, **46**, 451-464(2008).
9. Kang, S. H., Son, S. M., Kang, Y., Bae, J. W. and Jun, K. W., "Effects of Pressure Fluctuations on the Heat Transfer Characteristics in a Pressurized Slurry Bubble Column," *Korean J. Chem. Eng.*, **25**, 897-904(2008).
10. Son, S. M., Kang, S. H., Kim, U. Y., Shin, I. S., Kang, Y. and Kim, S. D., "Oxygen Transfer in Three-phase Circulating Fluidized Bed with viscous Liquid Medium," *J. Chem. Eng. Japan*, **41**, 655-661 (2008).
11. Davis, B. H., "Overview of Reactors for Liquid phase Fischer-Tropsch Synthesis," *Catalysis Today*, **71**, 249-300(2002).
12. Maretto, C. and Krishna, R., "Modelling of a Bubble Column Slurry Reactor for Fischer-Tropsch Synthesis," *Catalysis Today*, **52**, 279-289(1999).
13. Bakopoulos, A., "Multiphase Fluidization in a Large-Scale Slurry Jet Loop Bubble Columns for Methanol and of Dimethyl Ether production," *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 538-557(2006).
14. Behkish, A., Lemoine, R., Sehabiaque, L., Oukaci, R. and Morsi, B. I., "Gas Holdup and Bubble Size Behavior in a Large-Scale Slurry Bubble Column Reactor Operating with an Organic Liquid under Elevated Pressures and Temperature," *Chem. Eng. J.*, **128**, 69-84 (2007).