

삼상슬러리 기포탑에서 액상의 표면장력이 열전달 계수에 미치는 영향

임 호* · 임대호* · 진해룡* · 강 용*,† · 정 현**

*충남대학교 화학공학과
305-764 대전광역시 유성구 대학로 99
**한국에너지기술연구원
305-343 대전광역시 유성구 가정로 152
(2011년 9월 28일 접수, 2011년 11월 29일 채택)

Effects of Liquid Surface Tension on the Heat Transfer Coefficient in a Three-Phase Slurry Bubble Column

Ho Lim*, Dae Ho Lim*, Hae-Ryong Jin*, Yong Kang*,† and Heon Jung**

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

**Korea Institute of Energy Research, 100 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea

(Received 28 September 2011; accepted 29 November 2011)

요 약

산업현장에서 자주 접하는 액상의 물성인 표면장력이 상대적으로 작은 액상으로 구성된 삼상슬러리 기포탑에서 총괄 열전달 특성을 고찰하였다. 기포탑 내부의 열전달 현상은 기포탑 내부의 수직 열원과 기포탑 간의 열전달계를 구성하여 고찰하였으며 열전달 계수는 정상상태에서 열원표면의 온도와 기포탑 내부의 평균 온도의 차를 측정하여 결정하였다. 기체유속(U_G), 슬러리 상에 포함된 고체입자의 분율(C_S) 그리고 연속 액상의 표면장력(σ_L)이 기포탑 내부의 총괄 열전달 계수(h)에 미치는 영향을 규명하였다. 기포탑 내부 열원 표면과 기포탑 벌크영역 간의 온도차는 시간의 변화에 따른 온도차 요동을 측정하여 그 평균값으로 결정하였다. 기포탑 내부 열원표면과 기포탑 벌크 영역 간의 온도차 요동은 연속 액상의 표면장력이 감소할수록 진폭이 감소하였으며 온도차의 평균값도 감소하였다. 내부 수직 열원과 기포탑 간의 총괄 열전달 계수는 기체의 유속과 슬러리 상에 포함된 고체입자의 분율이 증가함에 따라 증가하였으며 연속 액상의 표면장력이 증가함에 따라 감소하였다. 표면장력이 물보다 작은 연속 액상의 기포탑에서 측정된 총괄 열전달 계수는 본 연구의 범위 내에서 실험변수와 무차원군의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

Abstract – Characteristics of overall heat transfer were investigated in a three-phase slurry bubble column with relatively low surface tension media, which has been frequently encountered in the fields of industry. The heat transfer phenomena was examined in the system which was composed of a coaxial vertical heater and a proper of bubble column. The heat transfer coefficient was estimated from the measured mean value of temperature difference between the heater surface and the column proper at the steady state condition. Effects of gas velocity (U_G), solid fraction in the slurry phase (C_S) and surface tension (σ_L) of continuous liquid media on the overall heat transfer coefficient (h) in the bubble column were determined. The mean value of temperature difference was estimated from the data of temperature difference fluctuations with a variation of time. The amplitude and mean value of temperature difference fluctuations with respect to the elapsed time appeared to decrease with decreasing the surface tension of liquid phase. The overall heat transfer coefficient between the immersed heated and the bubble column increased with an increase in the gas velocity or solid fraction in the slurry phase, but it decreased with an increase in the surface tension of continuous liquid media. The overall heat coefficient in the slurry bubble column with relatively low surface tension media was well correlated in term of operating variables and dimensionless groups within this experimental conditions.

Key words : Surface Tension, Three-phase Slurry, Bubble Column, Heat Transfer Coefficient, Vertical Heater, Temperature Fluctuations

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

*이 논문은 한국에너지기술연구원 조순행 박사의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

1. 서 론

고체의 촉매입자들을 연속 액상과 혼합하여 슬러리 상태의 연속 상으로 만들어 사용함으로써 기체 반응물과의 접촉과 반응효과를 극대화할 수 있는 삼상슬러리 기포탑 반응기는 석탄의 액화 공정(CTL)이나 Fisher-Tropsch 방법을 사용한 합성가스나 천연가스로부터 액체오일을 합성하는 GTL 공정뿐만 아니라 촉매를 사용한 기체-기체 또는 기체-액체 반응과 같은 불균일계 반응에 매우 효과적으로 사용될 수 있기 때문에 삼상슬러리 기포탑반응기에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다[1-4]. 삼상슬러리 기포탑 반응기에서 반응물은 일반적으로 기체상인 경우가 많으므로 반응기 내부에서 기체상의 반응에 영향을 미치는 주요 요소인 기체상의 체류량에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 또한, 기체-액체간의 물질전달 현상에 의한 반응이 일어나므로 기체-액체간의 부피물질 전달계수에 대한 연구와 반응이 진행될 때의 반응 전환율에 대한 연구들이 진행되어 왔으며 삼상슬러리 기포탑내부에서 반응물인 기체 체류량이나 기체-액체간의 부피물질 전달계수에 영향을 미치는 기포의 거동과 특성에 대한 연구들이 진행되어 왔다[5-8].

삼상슬러리 기포탑에 분산상으로 존재하는 기포의 거동과 흐름 특성은 삼상슬러리 반응기 내부에서 다상들의 전체적인 흐름현상인 수력학적 특성뿐만 아니라 열전달 특성을 결정하여 주기 때문에 기포의 거동과 흐름특성은 반응기의 설계나 scale-up에 매우 중요한 인자로 알려져 있다[5-7]. 따라서, 슬러리 기포탑과 같은 다상의 불균일계 공정 내부의 열전달 특성은 연속 액상의 물성에 따라 매우 불규칙적이고 비선형적이어서 결정론적 방법에 기초한 모델식에 의해 해석되기가 어려움기 때문에 여러 가지의 실험적인 측정방법을 사용하여 측정하는 기술들이 개발되어지고 있다[9-15]. 그러나 이들 많은 연구들은 연구에 사용한 모델식에 도입된 가정들이 열전달 현상에 잘 맞지 않아서 해석의 결과가 실제 현상과 잘 맞지 않는 경우들이 종종 있어 왔다. 따라서, 열전달 및 흐름특성을 통계학적 방법에 의해 해석하고자 하는 연구들이 설득력을 얻고 있다[16,17].

삼상 슬러리 기포탑 반응기의 효과적인 운전이나 반응조건 조절 등을 위해서는 반응기 내부에서 열의 출입을 동반하며 일어나는 현상들을 해석하는 것이 필수적이므로 이를 위해 현실적으로 도입할 수 있는 주요 상태 변수는 압력과 온도라 할 수 있다. 따라서, 삼상슬러리 기포탑에서 압력변화와 요동특성에 대한 연구들도 꾸준히 진행되고 있으나, 온도 요동이나 열전달 현상에 대한 연구는 상대적으로 미약한 것으로 알려져 있다[16,17]. 반응기의 설계나 scale-up 등을 위해서는 이들 미약한 자료들을 외삽이나 내삽들의 방법으로 활용하고 있는 실정이다[2,5-7]. 특히 슬러리 액체상은 연속상을 형성하고 있으므로 기포탑에서 액체상의 물성은 열전달 및 열의 흐름특성에 큰 영향을 미칠 수 있으나 이에 대한 실험적, 공학적 자료는 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 슬러리 기포탑에서 연속상인 액상의 물성

중 중요한 요소인 액체의 표면장력의 변화가 슬러리 기포탑 내부의 열전달 현상에 미치는 영향을 고찰하였다. 특히 액상의 표면장력은 발효나 알콜 생성 등 생물공정이나 계면활성제가 다량 포함된 폐수 처리공정에서 필수적으로 변화하므로 본 연구의 결과는 이들 공정의 운전이나 설계 등에 매우 긴요한 공학적 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험

본 연구의 실험에 사용한 슬러리 기포탑은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 직경이 0.076 m이고 높이가 1.5 m인 스텐레스 강으로 제작된 관을 사용하였다. 기체상으로는 여과기로 여과되고 압력이 조절되는 압축공기를 사용하였으며 액상으로는 물과 에틸알코올 수용액을 사용하였고 슬러리 상으로는 밀도가 2,500 kg/m³이고 입도가 40~70 μ m인 유리구슬을 액상과 혼합하여 사용하였다. 실험변수로는 기체의 유속, 슬러리상에 포함된 고체 입자의 농도 그리고 액상의 표면장력을 독립변수로 선정하였다. 기체유속의 범위는 0.04~0.12 m/s이었고, 슬러리상에 포함된 고체입자의 농도는 무게분율로 0~0.3이었으며 액체의 표면장력 변화범위는 55.73~72.01 $\times 10^{-3}$ N/m이었다. 본 연구에서 사용한 액상의 물성은 Table 1에 나타내었다.

슬러리 기포탑 내부에 유입되는 기체의 유속을 측정하고 유입되는 기체의 양을 조절하기 위하여 기체 유량계와 압력조절계를 각각 사용하였으며 미세 기체유입량은 니들 밸브를 사용하여 조절하였다. 슬러리 기포탑에 유입되는 기체는 기포탑 내부에 설치된 다공판 형태의 기체 분산판을 통해 탑 내부에 분산시켰으며, 기체분산판의 노즐 직경은 1 mm이었다[3,8].

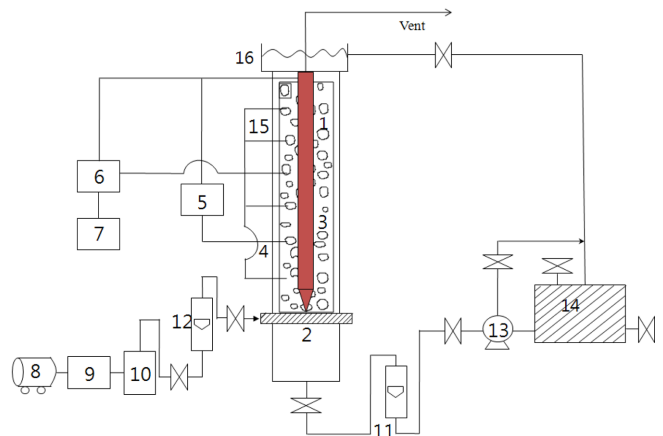


Fig. 1. Experimental apparatus

- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1. Main column | 9. Gas filter |
| 2. Gas distributor | 10. Regulator |
| 3. Heater | 11. Liquid flowmeter |
| 4. Thermocouple | 12. Gas flowmeter |
| 5. Digital indicator | 13. Slurry pump |
| 6. A/D converter | 14. Slurry reservoir |
| 7. Computer | 15. Pressure tap |
| 8. Compressor | 16. Weir |

Table 1. Physical properties of liquid phase

| Liquid Medium | $\mu_{L,app} \times 10^3$ (Pa.s) | $k_L \times 10^3$ (W/m \cdot K) | $\sigma_L \times 10^3$ (N/m) | ρ_L (kg/m ³) |
|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Water | 0.960 | 609.12 | 72.75 | 1000 |
| Mixture of water & Ethanol (2 wt%) | 0.952 | 600.16 | 65.18 | 999.5 |
| Mixture of water & Ethanol (3 wt%) | 0.948 | 595.68 | 60.92 | 999.0 |
| Mixture of water & Ethanol (5 wt%) | 0.940 | 586.71 | 55.73 | 998.0 |

슬러리 기포탑 내부에 열을 공급하기 위한 열원으로 기포탑의 중앙에 직경이 0.006 m이고 높이가 0.1 m 인 카트리지 형태의 수직 열원을 설치하였으며 일정 운전조건에서 이 열원과 슬러리 기포탑 내부간의 온도차를 측정하여 총괄 열전달 계수를 결정하였다. 슬러리 기포탑 내부의 온도와 수직 열원 표면의 온도측정은 J-type의 열전대를 사용하였으며, 슬러리 기포탑 내부의 열원에서 기포탑으로 전달된 열량(Q)과 열원표면과 기포탑 내부의 온도차(ΔT)를 측정하여 식 (1)에 의해 총괄 열전달계수를 구하였다.

$$h = \frac{Q}{A\Delta T} \quad (1)$$

슬러리 기포탑 내부와 수직 열원간의 온도차는 일정 운전조건에 따라 요동하며 변화하므로 시료 채취시간(sampling time)에 따라 온도차(ΔT) 시료의 평균값을 결정하여 사용하였다[15-17]. 슬러리 기포탑 내부의 수직열원과 기포탑 간의 온도차 요동은 DT-VEE 프로그램 상에서 실시간(real time) 온라인으로 측정하였다. 측정된 신호자료는 증폭기(amplifier)와 low-pass filter를 이용하여 noise를 제거하였으며, A/D 변환기를 이용하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 변화시킨후 데이터 획득장치(data acquisition system, DT-2805 Lab-Board, DT-VEE software)를 사용하여 PC에 저장하였다. 이들 자료는 DT-VEE 프로그램 상에서 자료의 재현성을 위하여 온라인으로 2~4회 측정하여 자료를 선정하였다.

3. 결과 및 고찰

삼상 슬러리 기포탑에서 연속상인 액상이 물보다 표면장력이 작은 알코올 수용액을 사용한 경우에 표면장력의 변화에 따라 슬러리 기포탑 내부의 열원과 기포탑 간의 온도차 요동 변화를 시간에 따라 Fig. 2에 나타내었다. 삼상 슬러리 기포탑 내부에서 열원과 기포탑 간

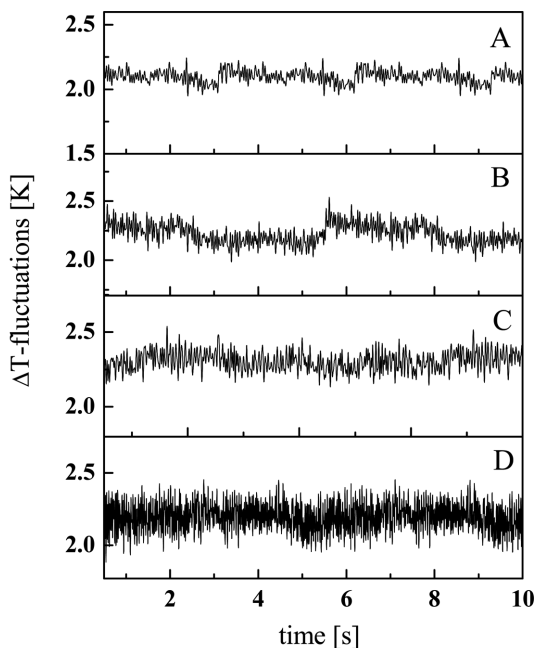


Fig. 2. Typical example of ΔT - fluctuations in three phase slurry bubble columns ($U_G = 0.04$ m/s, $C_s = 0.3$).

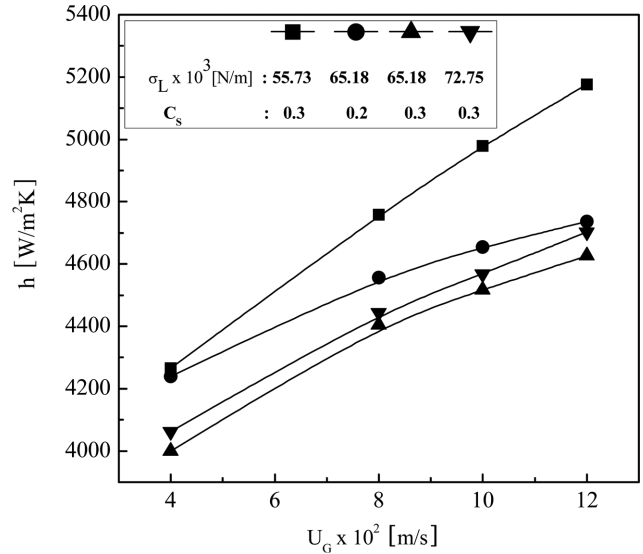


Fig. 3. Effects of gas velocity on the heat transfer coefficient in three phase slurry bubble columns with relatively low surface tension media.

온도차의 평균값은 Fig. 2와 같은 데이터를 off라인으로 regression 방법에 의해 구하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 액상의 표면장력이 작은 경우에 온도차 요동의 진폭은 액상의 표면장력이 큰 경우보다 더 작게 나타나며 온도차 요동의 평균값도 액상의 표면장력이 큰 경우보다 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 연속액상의 표면장력이 작은 경우에 온도차 요동자료의 진폭이 작아지는 것은 삼상 슬러리 기포탑 내부에 존재하는 기포의 크기가 작아지기 때문으로 해석할 수 있다[18,19]. 또한, 일정 운전조건에서 열원과 슬러리 기포탑 간의 온도차의 평균값이 감소하는 것은 열전달계수가 증가하는 것을 의미하므로, 이와같은 자료들로부터 삼상 슬러리 기포탑 내부에서 연속 액상의 표면장력이 기포탑 내부열원과 기포탑 간의 열전달계수에 미치는 영향을 검토하였다.

상대적으로 표면장력이 작은 연속액상의 삼상슬러리 기포탑에서 기체의 유속이 기포탑 내부 열원과 기포탑 간의 총괄 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 열전달 계수는 기체의 유속이 증가함에 따라 모든 경우에 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기체의 유속이 증가함에 따라 기포탑 내부에 유입되는 기체의 양이 증가하고 이에따라 기포탑 내부에 존재하는 기포의 양이 많아지기 때문으로 해석할 수 있다. 기포탑에서 기포는 분산상으로 존재하며 기포탑 내부에서 상승하면서 합체와 분체 그리고 액상과 무작위적인 접촉을 하므로 기포의 양이 증가하면 기포탑 내부에 난류현상이 증가하기 때문에 난류의 유체요소(fluid element)에 의해 열이 효과적으로 전달될 수 있으므로 총괄열전달계수는 증가한다고 할 수 있다[14-17].

표면장력이 작은 연속 액상의 슬러리 기포탑에서 슬러리 상에 포함된 고체입자의 분율이 기포탑 내부의 총괄 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 총괄 열전달 계수는 슬러리상에 포함된 고체 입자의 양이 증가함에 따라 점점 증가해가는 것으로 나타났다. 이와같은 경향은 문헌의 결과와도 일치하였다. 이는 슬러리상에 포함된 고체입자의 양이 증가함에 따라 기포탑 내부에 존재하는 기포의 크기가 증가하여 기포의 체류량은 약간 감소하지만 슬러리 상에 포함된 고체입자로 인하여 기포탑 내부

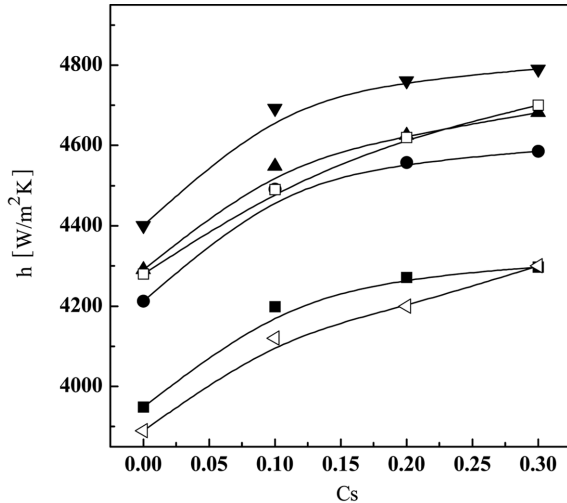


Fig. 4. Effects of slurry concentration on the heat transfer coefficient in three phase slurry bubble columns with relatively low surface tension media.

| | | | | | | |
|--------------------------------|------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| $U_G \times 10^2$ [m/s] : | 4.0 | 8.0 | 8.0 | 12.0 | 4.0 | 8.0 |
| $\sigma_L \times 10^3$ [N/m] : | 60.92 | 60.92 | 55.73 | 55.73 | 72.75 | 72.75 |
| $D \times 10^2$ [m] : | 7.62 | | | 10.2 | | |
| | This study | | | Sin et al.[3] | | |

에서 난류의 강도를 증가시킬 수 있기 때문으로 해석할 수 있다. 또한, 슬러리 상에 포함된 고체 입자의 분율이 증가함에 따라 연속상인 슬러리 상의 밀도(density)가 증가하여 연속상의 운동량(momentum)이 증가하게 되므로 열원주위에 형성된 열적 경계층에 가해지는 전단응력(shear stress)이 증가하여 열원 주위에 형성된 열적경계층(thermal boundary)의 두께도 줄일 수 있기 때문으로 사료된다.

삼상 슬러리 기포탑에서 연속 액상의 표면장력이 내부열원과 기포탑 간의 총괄 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 연속 액상의 표면장력이 증가함에 따라 총괄 열전달 계수는 다소 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 연속 액상의 표면장력이 증가함에 따라 기포의 크기가 증가하여서[18,19] 기포탑 내부에 존재하는 기포의 체류량이 감소하기 때문으로 해석할 수 있

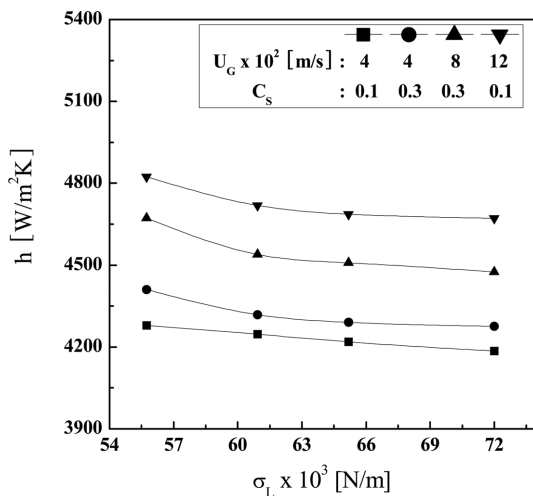


Fig. 5. Effects of liquid surface tension on the heat transfer coefficient in three phase slurry bubble columns.

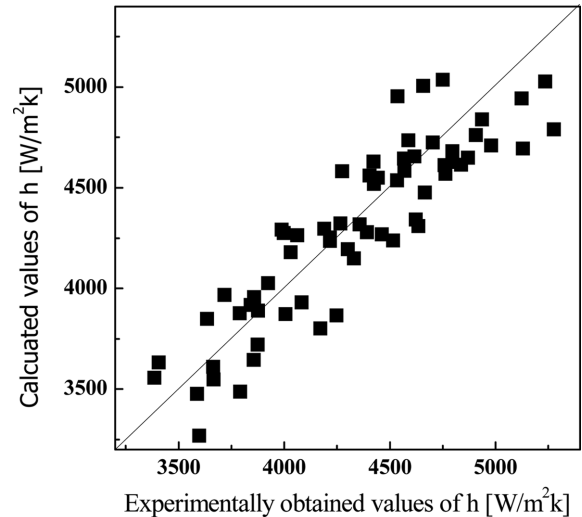


Fig. 6. Comparison between the calculated and experimentally obtained values of heat transfer coefficient in three phase slurry bubble columns with relatively low surface tension media.

다. 즉, 기포탑 내부에 존재하는 기포의 체류량이 감소하면 분산상으로 존재하는 기포의 흐름과 기포와 연속 슬러리상 간의 접촉현상 그리고 상승하는 기포들 간의 접촉에 의해 분쇄와 합체가 일어나는 현상들에 의해 야기 되는 기포탑 내부의 난류 흐름현상이 감소하기 때문에 기포탑 내부에서 일어나는 열전달 효과가 감소한다고 할 수 있다.

기포탑이나 삼상 유동층과 같은 다상의 접촉 흐름공정에서 내부 열원과 다상의 흐름 공정 사이의 열전달 현상들은 이중저항 연결 모델(two resistance-in-series model)로 해석되고 있다[20,21]. 이 모델에 의하면 열전달 저항은 기포탑 내부의 열원표면에 형성된 유체에 의한 열적경계층(thermal boundary layer)의 두께에 큰 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 기포탑 내부에서 기포 체류량의 감소에 따른 난류 현상의 감소는 내부열원표면에 형성된 경계층의 두께를 증가시키는 결과를 가져오기 때문에 이는 열원 표면에서의 열전달 저항을

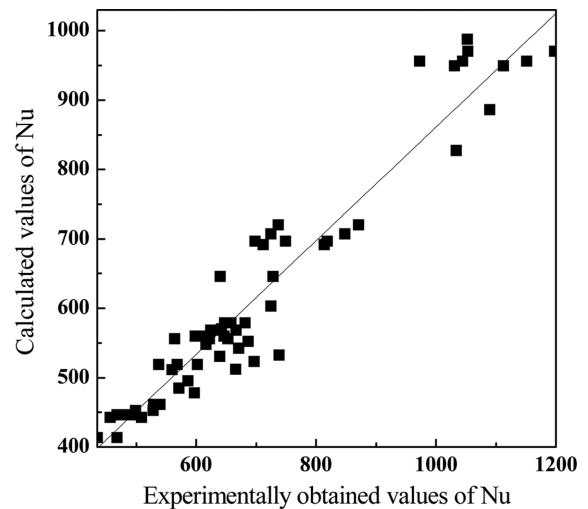


Fig. 7. Comparison between the calculated and experimentally obtained values of Nu in three phase slurry bubble columns with relatively low surface tension media.

증가시키는 효과를 가져와 열원과 기포탑 간의 총괄 열전달 계수는 감소하게 된다고 할 수 있다.

연속 액상의 표면장력이 상대적으로 작은 삼상 슬러리 기포탑에서 얻은 총괄 열전달 계수를 본 연구의 실험 변수인 기체유속, 슬러리 상에 포함된 고체입자의 농도 그리고 연속 액상의 표면장력의 비선형 함수로 식 (2)와 같은 상관식을 얻을 수 있었다. 식 (2)는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 상관계수 0.92로 실험적으로 측정된 총괄 열전달 계수 값과 잘 일치 하는 것을 알 수 있다.

$$h = 2538 U_G^{0.186} (1 - C_S)^{0.150} \sigma_L^{-0.104} \quad (2)$$

또한, 본 연구의 실험범위에서 얻은 총괄 열전달 계수를 식 (3)과 같은 무차원군의 함수로 나타낼 수 있었는데 이 식은 상관계수 0.97로 실험적 측정치와 잘 일치하였다(Fig. 7).

$$Nu = 3.939 Re_M^{-0.338} Pr^{2.617} We_M^{0.217} \quad (3)$$

4. 결 론

연속 액상의 표면장력이 상대적으로 작은 액상으로 구성된 삼상 슬러리 기포탑에서 열전달 특성을 기포탑 내부에 설치된 열원과 기포탑간의 온도차 요동을 측정함으로써 효과적으로 고찰하였다. 내부 열원과 기포탑 간의 총괄 열전달 계수는 기체의 유속과 슬러리 상에 포함된 고체입자의 분율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으나 연속 액상의 표면장력이 증가함에 따라서는 다소 감소하였다. 표면장력이 물보다 작은 연속 액상의 슬러리 기포탑에서 총괄 열전달 계수는 실험변수의 함수와 무차원군으로 각각 다음과 같은 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$h = 2538 U_G^{0.186} (1 - C_S)^{0.150} \sigma_L^{-0.104}$$

$$Nu = 3.939 Re_M^{-0.338} Pr^{2.617} We_M^{0.217}$$

감 사

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

사용기호

A : surface area of heater[m²]
 Cs : solid fraction in slurry phase[-]
 D : column height[m]
 h : overall heat transfer coefficient[W/m²K]
 Nu : Nusselt number($\frac{hD}{K_L}$)[-]
 Pr : Prandtl number($\frac{C_{pL}\mu_L}{K_L}$)[-]
 q : heat flow rate[W]
 Re_M : modified Reynolds number($\frac{d_p(1-c_s)u_G\rho_L}{\mu_L}$)[-]
 ΔT : temperature difference between the heater surface and the column proper
 t : time[s]

U_G : gas velocity[m/s]

We_M : modified Weber number ($\frac{d_p(1-c_s)\rho_L(U_G)^2}{\sigma_L}$)[-]

그리스 문자

σ : surface tension[N/m]

아래첨자

L : liquid phase

참고문헌

- Deckwer, W.-D., Bubble Column Reactors, John Wiley and sons., NY. (1992).
- Krishna, R. and Sie, S. T., "Design and scale-up of the Fischer-Trapsch Bubble Column Slurry Reactor," *Fuel Process. Technol.*, **64**, 73-105(2000).
- Shin, I. S., Son, S. M., Lim, D. H., Kang, Y., Jung, H. and Lee, H. T., "Multiple Effects of Operating Variables on Heat Transfer in Three-phase Slurry Bubble Columns," *Korean J. Chem. Eng.*, **27**, 1015-1020(2010).
- Maretto, C. and Krishna, R., "Modeling of a Bubble Column Slurry Reactor for Fischer-Tropsch Synthesis," *Catal. Today*, **52**, 279-289(1999).
- Krishna, R., de Swart, J. W. A., Ellenberger, J., Martina, G. B. and Maretto, C., "Gas Holdup in Slurry Bubble Columns: Effects of Column Diameter and Slurry Concentration," *AIChE J.*, **43**, 311-316(1997).
- 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 Temperatures," *Chem. Eng. J.*, **128**, 69-84(2007).
- 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 Bubbles for its Design and Scale-up," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **47**, 720-726(2009).
- 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).
- Saxena, S. C., Rao, N. S. and Saxena, A. C., "Heat Transfer from a Cylindrical Probe Immersed in a Three-Phase Slurry Bubble Column," *Chem. Eng. J.*, **44**, 141-156(1990).
- Li, H. and Prakash, A., "Heat Transfer and Hydrodynamics in a Three-Phase Slurry Bubble Column," *I&EC Research*, **38**, 4688-4694(1997).
- Deckwer, W. D., Louisi, T., Zaldi, A. and Fan, L. S., "Heat Transfer Characteristics in Slurry Bubble Column at Elevated Pressures and Temperatures," *I&EC Process Des. Dev.*, **19**, 699-708(1980).
- Yang, G. Q., Luo, X., Law, R. and Fan, L. S., "Heat Transfer Characteristics in Slurry Bubble Columns at Elevated Pressures and Temperatures," *I&EC Research*, **39**, 2568-2577(2000).
- 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**, 587-592(2009).
14. Kang, Y., Lee, K. I., Shin, I. S., Son, S. M., Kim, S. D. and Jung, H., "Characteristic of Hydrodynamics, Heat and Mass Transfer in Three-phase Inverse Fluidized beds," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **46**, 451-464(2008).
 15. Son, S. M., Lee, K. I., Kang, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Heat Transfer Coefficient in Viscous Three-phase Inverse Fluidized Beds," *AIChE J.*, **53**, 3011-3016(2007).
 16. Son, S. M., Shin, I. S., Kang, Y., Cho, Y. J. and Yang, H. C., "Characteristics of Heat Transfer in Three-phase Swirling Fluidized Beds," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **46**, 56-62(2008).
 17. Cho, Y. J., Woo, K. J., Kang, Y. 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).
 18. Lim, D. H., Jang, J. H., Kang, Y. and Jun, K. W., "Axial and Radial Distributions of Bubble Holdup in a slurry Bubble Column with Pilot plant scale," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **49**, 200-205(2011).
 19. Lim, D. H., Jang, J. H., Jin, H. R., Kang, Y., Jung, H., Kim, S. D. and Kim, W. H., "Heat Transfer in Three-phase (G/L/S) Circulating Fluidized Beds with Low Surface Tension Media," *Chem. Eng. Sci.*, **66**, 3145-3151(2011).
 20. Shin, K. S., Song, P. S., Lee, C. G., Kang, S. H., Kang, Y., Kim, S. D. and Kim, S. J., "Heat Transfer Coefficient in Viscous Liquid-Solid Circulating Fluidized Beds," *AIChE J.*, **51**, 671-677(2005).
 21. Kang, S. H., Son, S. H., Kim, U. Y., Kang, Y., Cho, Y. J. and Kang, H. K., "Heat Transfer Resistances in Three-phase Circulating Fluidized Beds," *J. Ind. Eng. Chem.*, **13**, 33-39(2007).