Korean Chem. Eng. Res., 52(4), 516-521 (2014)
http://dx.doi.org/10.9713/kcer.2014.52.4.516
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

고점성 낮은표면장력 매체 기포탑에서 열전달

김완태 · 임대호 · 강 용†

충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 대학로 99
(2013년 12월 31일 접수, 2014년 2월 17일 수정본 접수, 2014년 2월 20일 채택)

Heat Transfer in Bubble Columns with High Viscous and Low Surface Tension Media

Wan Tae Kim, Dae Ho Lim and Yong Kang†

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yeseong-gu, Daejeon 305-764, Korea
(Received 31 December 2013; Received in revised form 17 February 2014; accepted 20 February 2014)

요 약

고점성이며 낮은 표면장력 매체로 구성된 기포탑에서 축방향 국부 열전달 계수와 총괄 열전달 계수에 대해 고찰하였다. 기체공탑유속(0.02~0.10 m/s), 액체 점도(0.1~0.3 Pa·s) 그리고 액체 표면장력($66.1\sim72.9\times10^{-3}$ N/m)이 국부 및 총괄 열전달 계수에 미치는 영향을 검토하였다. 열전달 영역은 기포탑 내부 열원과 기포탑 간의 열전달계로 구성하였다. 즉, 기포탑의 중앙에 수직 열원을 설치하여 내부 열원으로 하였다. 열전달 계수는 주어진 운전조건에서 열원에 제공되는 열량과 내부 열원과 기포탑 간의 온도차를 연속적으로 측정하여 결정하였다. 국부 열전달 계수는 기체공탑유속이 증가함에 따라 증가하였으나 기체 분산판으로 부터의 축방향 거리가 증가함에 따라, 액체의 표면장력이 증가함에 따라 감소하였다. 총괄 열전달 계수는 기체공탑유속이 증가함에 따라 증가하였으나 액상의 점도와 표면장력이 증가함에 따라서는 감소하였다. 총괄 열전달 계수는 기체공탑유속, 액상의 점도와 표면장력의 함수로 상관계수 0.91의 상관식을 얻을 수 있었으며 넛셀 수, 레이놀즈 수, 플란틀 수 그리고 웨버 수의 함수로 상관계수 0.92의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$h = 2502U_G^{0.236}\mu_L^{-0.250}\sigma_L^{-0.028}$$

$$Nu = 325Re^{0.180}Pr^{-0.067}We^{0.028}$$

Abstract – Axial and overall heat transfer coefficients were investigated in a bubble column with relatively high viscous and low surface tension media. Effects of superficial gas velocity (0.02~0.1 m/s), liquid viscosity (0.1~0.3 Pa·s) and surface tension ($66.1\sim72.9\times10^{-3}$ N/m) on the local and overall heat transfer coefficients were examined. The heat transfer field was composed of the immersed heater and the bubble column; a vertical heater was installed at the center of the column coaxially. The heat transfer coefficient was determined by measuring the temperature differences continuously between the heater surface and the column which was bubbling in a given operating condition, with the knowledge of heat supply to the heater. The local heat transfer coefficient increased with increasing superficial gas velocity but decreased with increasing axial distance from the gas distributor and liquid surface tension. The overall heat transfer coefficient increased with increasing superficial gas velocity but decreased with increasing liquid viscosity or surface tension. The overall heat transfer coefficient was well correlated in terms of operating variables such as superficial gas velocity, liquid surface tension and liquid viscosity with a correlation coefficient of 0.91, and in terms of dimensionless groups such as Nusselt, Reynolds, Prandtl and Weber numbers with a correlation of 0.92;

$$h = 2502U_G^{0.236}\mu_L^{-0.250}\sigma_L^{-0.028}$$

$$Nu = 325Re^{0.180}Pr^{-0.067}We^{0.028}$$

Key words: Heat Transfer, Viscous Liquid, Bubble Column, Low Surface Tension

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kangyong@cnu.ac.kr
‡이 논문은 KAIST 양지원 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.
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.

1. 서 론

기포탑은 다른 다상의 접촉공정에 비하여 구조가 간단하고 연속운전이 용이할 뿐만이 아니라 유지 보수비가 적으면서도 기체와 액체상들을 효과적으로 접촉시킬 수 있어서 불균일 상의 접촉공정과 반응기로 널리 사용되고 있다[1-5]. 이러한 특성과 장점을 가지고 있는 기포탑을 새로운 공정이나 반응기로 응용하고 적용하기 위해서는 기포탑 공정이나 반응기의 설계와 최적 조업조건 설정 그리고 장치의 제작이 필요한데 이를 위해서는 기포탑 반응기나 접촉공정의 운전효율과 생산효율에 대한 예측이 필수적이라 할 수 있다[6-9]. 그러나, 이에 대한 공학적 자료와 문헌들은 매우 제한되어 있으며, 특수한 경우들에 국한되어 있어서 기포탑 반응기나 접촉공정의 개발에 큰 걸림돌이 되어왔다. 특히, 대부분의 석유화학공정, GTL 공정, 폐수처리공정, 미생물 배양공정 등에서 사용되는 액상의 매체는 점성이 크며 표면장력이 낮은 경우가 일반적인데 이들 매체의 조건에서 열전달 특성에 대한 연구는 국·내외를 막론하고 매우 미흡한 실정이다.

기포탑을 응용할 수 있는 다상의 불균일계 반응공정이나 접촉공정에서 공정의 운전온도는 기체-액체의 접촉효율뿐만 아니라 물질전달, 반응특성, 생성물의 종류, 생성물의 선택도 등에 큰 영향을 미치므로 이들 반응공정이나 접촉공정의 운전온도는 최적의 조건으로 유지되어야 한다[10-15]. 따라서, 본 연구에서는 고점성과 낮은 표면장력을 나타내는 액상의 매체로 구성된 기포탑에서 열전달 계수를 측정하고 열전달 특성을 고찰하였으며, 연속액상의 점성과 표면장력이 기포탑의 열전달 계수에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실 험

본 연구에서 사용한 기포탑은 직경이 0.102 m이고 높이가 1.5 m인 stainless steel관을 사용하였다. 실험 변수로는 기체공탑유속, 액상의 점도, 액상의 표면장력을 선정하였으며, 각 실험조건에서 기포탑의 축방향 위치가 열전달에 미치는 영향을 고찰하였다. 기체공탑유속의 범위는 0.02~0.10 m/s, 액상의 점도는 0.1~0.3 Pa·s, 액상의 표면장력은 $64.5\sim75.1\times10^{-3}$ N/m 범위에서 실험을 진행하였다. 액상으로는 물과 CMC(Carboxy Methyl Cellulose) 수용액 그리고 에탄올 용액을 사용하였다. 액체의 점도는 20 ºC에서 LVDV-II Pro 점도계로 측정하였고, 표면장력은 KRUSS 장력계(K8600형)로 측정하였다. 본 연구에 사용한 액상의 물성은 Table 1에 나타내었다. 기체를 균일한 압력으로 유지하고 일정한 유속으로 기포탑 내부에 주입하기 위하여 5마력의 압축기를 사용하였으며, 유입되는 기체의 양을 조절하기 위하여 기체유량계를 설치하였고 니들밸브로 이 양을 조절하였다.

실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 반응기 중앙에 100 W의 열원(heater, 직경 0.005 m × 길이 1.0 m)을 설치하였으며, 전원공급기를 사용하여 단위 시간당 일정한 열을 공급하였다. 열원표면의 온도(T_h)는 J-type 열전대(thermocouple)를 열원 표면에 부착시켜 측정하였고, 기포탑 내부의 온도(T_b)를 측정하기 위하여 기포탑 내부에 J-type 열전대(thermocouple)를 각각 다른 위치의 4지점에 설치하였다[10-12]. 기포탑 내부에서 온도를 측정한 위치는 무차원 좌표로 축 방향으로 H/L의 값이 0.2, 0.4, 0.6 그리고 0.8인 위치를 선정하였다. 본 연구의

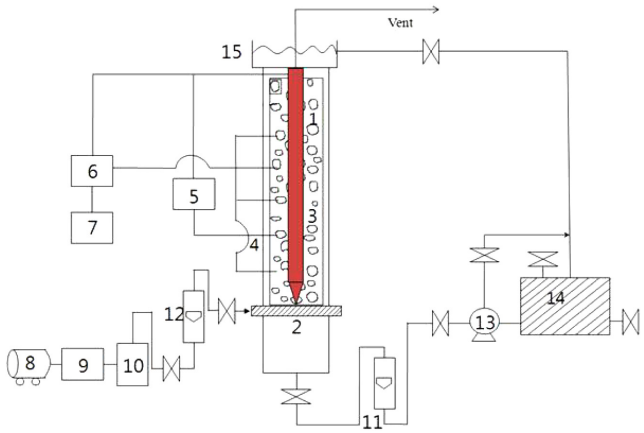

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

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

Table 1. Physical properties of liquid media

Liquid Medium	$\mu_{L,app} \times 10^3$ (Pa·s)	$\sigma_L \times 10^3$ (N/m)	ρ_L (kg/m^3)	K (Pa·s^n)	n
Aqueous CMC solution (I)	100	72.9	1006	6.40	0.17
Aqueous CMC solution (II)	150	74.1	1008	9.15	0.18
Aqueous CMC solution (III)	200	74.4	1009	11.6	0.19
Aqueous CMC solution (IV)	300	75.1	1011	15.7	0.21
Mixture of CMC solution (I) & Ethanol (1 wt%)	100	69.6	1006	6.40	0.17
Mixture of CMC solution (I) & Ethanol (3 wt%)	100	67.1	1005	6.75	0.16
Mixture of CMC solution (I) & Ethanol (5 wt%)	100	64.5	1003	7.10	0.15
Mixture of CMC solution (II) & Ethanol (1 wt%)	150	70.8	1007	9.15	0.18
Mixture of CMC solution (II) & Ethanol (3 wt%)	150	68.7	1006	9.60	0.17
Mixture of CMC solution (II) & Ethanol (5 wt%)	150	65.3	1005	10.1	0.16
Mixture of CMC solution (III) & Ethanol (1 wt%)	200	72.2	1009	11.6	0.19
Mixture of CMC solution (III) & Ethanol (3 wt%)	200	69.3	1009	12.2	0.18
Mixture of CMC solution (III) & Ethanol (5 wt%)	200	65.7	1008	12.8	0.17
Mixture of CMC solution (IV) & Ethanol (1 wt%)	300	73.9	1011	15.7	0.21
Mixture of CMC solution (IV) & Ethanol (3 wt%)	300	69.7	1011	16.5	0.20
Mixture of CMC solution (IV) & Ethanol (5 wt%)	300	66.1	1010	17.4	0.19

Table 2. Experimental Conditions

Bubble column	I.D. 0.102 m × Height 1.5 m
Distributor type	Perforated plate
Orifice diameter	1 mm
Gas phase	Compressed dried air
gas velocity	0.02~0.10 m/s
Liquid phase	Water, aqueous CMC & Ethanol solution
Liquid viscosity	0.1~0.3 Pa·s
Liquid surface tension	0.0~5.0 wt%
Heater	
Heater type	Immersed tube, Iron constantan
Heater diameter	0.005 m
Heater capacity	100 W
Heating area	0.01884 m^2
Temperature measurement	
Thermocouples	J-type
Sampling rate	500 Hz
Sample size	5000 points
Sampling time	10 sec
Data acquisition system	NI cDAQ-9174 Chassis
Lab. card	NI 9205 Analog Input Module
Software	Labview 2009, ORIGIN7.5

실험 조건은 Table 2에 요약하여 나타내었다.

기포탑에서 총괄 열전달계수는 국부온도요동(ΔT_i)과 국부 열전달계수(h_i)를 측정한 후 식 (1)에 의해 결정하였다.

$$h = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{q/A}{\Delta T_i} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} h_i \quad (1)$$

기포탑에서 온도요동과 국부 열전달계수의 측정은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 열원표면과 기포탑 내부에 설치된 J-type의 열전대에 연결된 온도센서로부터 temperature-time 신호자료를 Low-pass filter, A/D 변환기를 거쳐 디지털 신호자료로 변환한 후 데이터 획득 장치(Data acquisition system, NI cDAQ-9174 Chassis, NI 9205 Analog Input Module, Labview 2009)를 사용하여 PC에 저장하였다. 온도 요동 신호의 측정 속도는 500 Hz이었으며 측정시간은 10 sec로 하여 sample size를 5000 point로 하였으며[10-12] 이는 각 조건에서 기포탑 내부의 동적 열전달 요동의 해석에 충분하였다. 이렇게 측정된 자료는 Labview 2009 프로그램 상에서 off-line으로 해석하였으며 자료의 재현성을 고찰하기 위하여 2~4회 반복하였다.

3. 결과 및 고찰

고점성 기포탑에서 기포탑 내부에 설치된 열원의 표면과 기포탑의 bulk 영역 간의 온도차 변화를 측정하여 그 특성을 Fig. 2에 나타내었다. 내부 열원과 기포탑 내부 사이의 열전달은 이들 간의 온도차 변화 특성에 따라서 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다[10-12]. 기포탑에서 액체의 점도와 표면장력의 변화에 따라 측정된 전형적인 온도차 요동(Fluctuations)은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 기포탑 내 연속액상의 표면장력이 증가함에 따라 내부 열원과 기포탑 반응기 간의 온도차 평균값은 증가하며, 온도차 요동의 진폭도 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기포탑 내 기포의 크기가 변화하는 이유에서 찾아볼 수 있는데, 액상의 표면장력이 증가하면 기체 체류량은 감소하지만 기포탑 내부에 기포의 크기가 증가하여 기포의 크기 분포가 넓어져 기포의 개별 거동이 증가하기 때문으로 해석할 수 있다

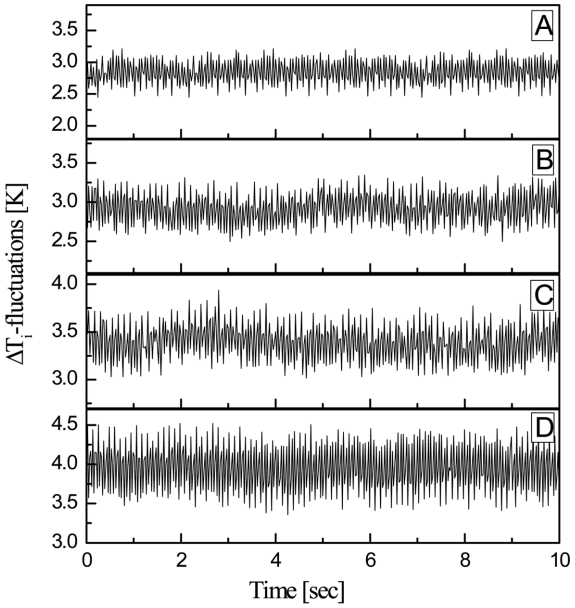

Fig. 2. Typical example of ΔT_i - fluctuations in bubble columns (U_G = 0.02 m/s, μ_L = 0.2 Pa·s, H/L = 0.2).

	A	B	C	D
$\sigma_L \times 10^3$ [N/m]:	69.6	70.8	72.2	73.9

[11,12,14]. 그러나, 연속 액상의 표면장력이 증가하면 기포의 거동이 전체적으로 둔화하여 기포탑 내부에서 열전달에 효과적인 난류현상의 감소를 가져오기 때문에 열원 표면과 기포탑 내부 간의 온도차 요동의 평균값은 증가한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 기포탑 내부의 온도변화를 반응기의 축 방향의 각 지점에 따라 측정하였는데, 각 지점에서의 온도는 일정운전조건에서 측정된 온도차 요동자료의 평균 값으로 결정하였다.

고점성 기포탑에서 기체의 공탑유속이 기포탑 내부 축 방향의 국부 열전달계수(h_i)에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 기체공탑유속이 증가함에 따라 축방향 모든 위치에서 국부 열전달계수는 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 기체공

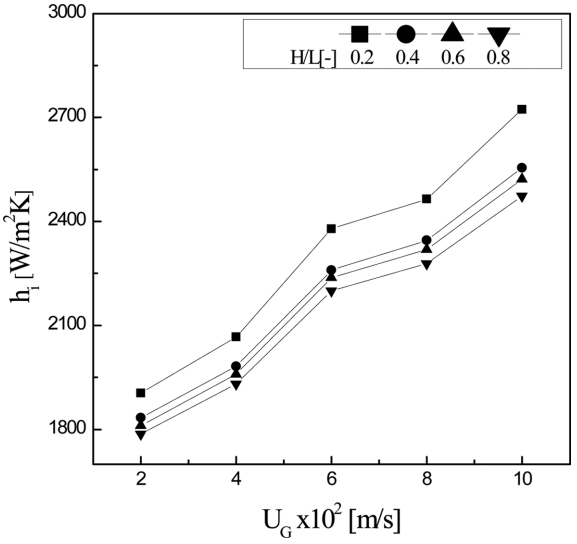

Fig. 3. Effects of gas velocity on the local heat transfer coefficient in the bubble columns (μ_L = 0.1 Pa·s, σ_L = 67.1 × 10^{-3} N/m).

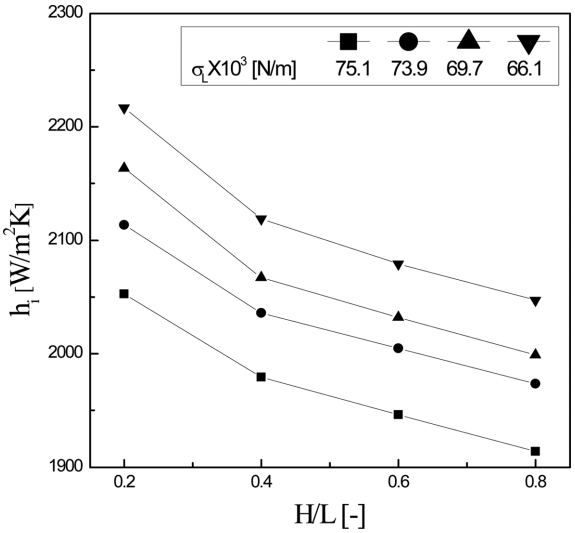

Fig. 4. Axial distribution of the local heat transfer coefficient in the bubble columns (U_G = 0.1 m/s, μ_L = 0.3 Pa·s).

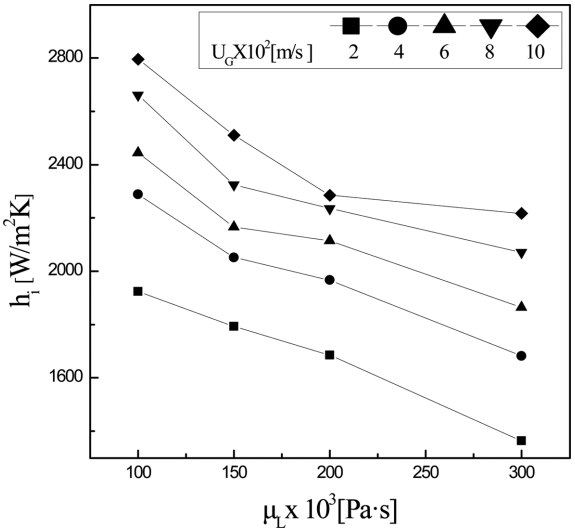

Fig. 5. Effects of viscosity on the local heat transfer coefficient in the bubble columns (σ_L = 65.4 × 10^{-3} N/m, H/L = 0.2).

탑유속이 증가함에 따라 기포탑 내부에 단위 시간당 투입되는 기체의 양이 증가하기 때문에 기포탑 내부에 존재하는 기포의 크기와 빈도수가 모두 증가하기 때문으로 해석할 수 있다. 즉, 기체의 공탑유속이 증가하면 기포탑 내부의 기체의 체류량이 증가하기 때문에 열원의 표면과 기포탑 사이의 난류현상이 증가하게 되어 열전달효과가 증가하기 때문이라고 할 수 있다. 기포탑에서 축방향의 거리가 국부 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 국부 열전달 계수는 액상의 점도가 0.3 Pa·s의 고점도 일 때 모든 액상의 표면장력 조건에서 축방향 거리가 증가함에 따라 단조 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 축방향 국부 열전달 계수는 액상의 표면장력이 증가할수록 낮은 값을 나타내었다. 이는 기포탑 내부에서 기포와 액상의 흐름현상으로 설명할 수 있다. 즉, 본 연구의 실험조건에서 기포탑 내부에 기체 분산판을 통해 투입된 기포들은 기포탑의 밑 부분에서는 기포의 크기가 비교적 작아 이들 작은 기포들의 반경방향 분산에 의해 열전달에 필요한 효과적인 난류흐름을 유발하지만, 이들 기포들이 기포탑 하부에서는 반경방향으로 기포가 균일하게 분포되지만 축방향으로 상승함에 따라 Wall effect에 의해 벽면의 기포들이 기포탑 중앙으로 이동하여 최단거리로 유출되기 때문에 기포탑 상부에서는 기포들의 합체현상에 의해 기포의 크기가 점점 커지면서 상승속도는 증가하고 기포의 빈도수는 감소하게 된다. 이러한 현상들은 점점 작은 기포에 의한 난류현상의 감소를 가져와 열전달 효과가 감소하기 때문에 축방향 국부 열전달 계수는 점점 감소한다고 해석할 수 있다. 또한, 분산판을 통해 액상에 투입된 기포들은 액상의 표면장력이 증가함에 따라 분산판에서 형성되는 기포 자체의 크기가 증가하기 때문에 축방향 국부 열전달 계수도 액상의 표면장력이 증가함에 따라 낮은 값을 나타낸다고 할 수 있다[11,12,14].

고점성 기포탑에서 액체의 점도가 국부 열전달계수(h_l)에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 액체의 점도가 증가함에 따라 국부 열전달계수는 점차 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 액상의 점도가 증가함에 따라 기포의 합체현상이 증가하여서 [1,2,6,15] 기포의 크기가 증가하지만 기포의 빈도수가 감소하여 난류현상의 강도가 서서히 감소할 뿐만이 아니라, 기포의 거동에 의한

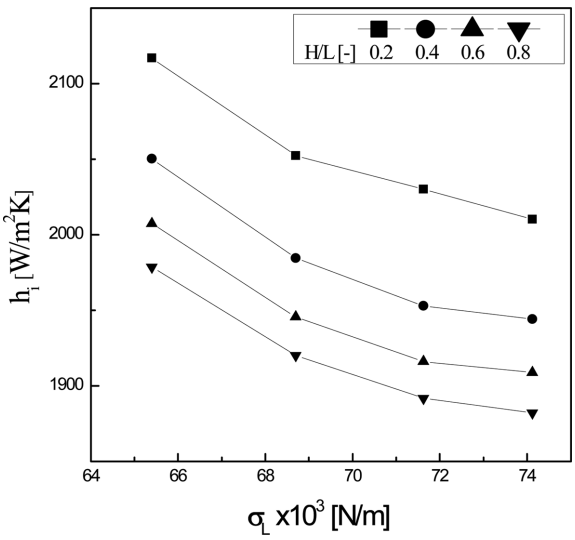

Fig. 6. Effects of liquid surface tension on the local heat transfer coefficient in the bubble columns (μ_L = 0.15 Pa·s, U_G = 0.04 m/s).

연속 액상의 혼합효과도 감소하여서 열전달의 효과가 상대적으로 감소하기 때문으로 해석 할 수 있다.

고점성 기포탑에서 액상의 표면장력이 기포탑 내부의 국부 열전달 계수(h_l)에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 기포탑 내부의 열전달 계수는 표면장력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 표면장력이 증가함에 따라 액체와 접촉하는 기포들의 합체가 증가하기 때문에 기포탑 내부의 기포 크기가 커지게 되는데 이는 기포의 상승속도가 증가하게 되는 원인이 되어 기포들의 기포탑 내부에서의 체류시간을 감소시켜 기포탑 내부에 기포 체류량의 감소를 가져온다[15]. 즉, 기포탑 내부에서 연속상인 액상에 기포는 분산상으로 존재하면서 부력에 의해 상승하게 되는데 기체 체류량의 감소는 분산상의 거동에 의해 유발되는 연속상과의 접촉과 흐름현상에서 동반되는 난류현상의 감소를 가져와 기포탑 내부의 열전달 효과를 감소시켜서 내부 열원과 기포탑 간의 열전달 계수를 감소시킨다고 할 수 있다[11,12,15].

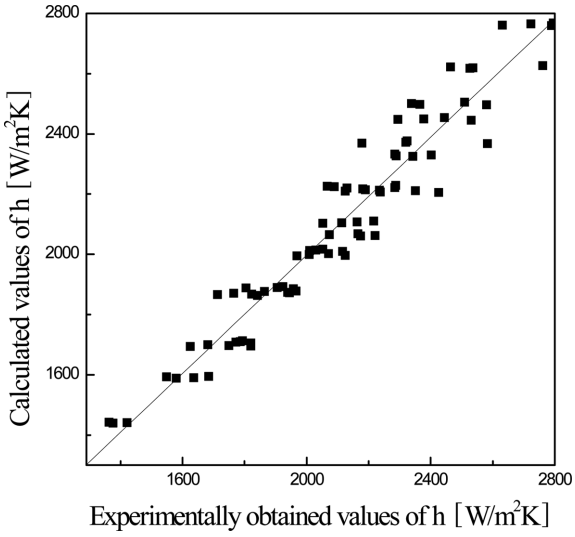

Fig. 7. Comparison between the calculated and experimentally obtained values of overall heat transfer coefficient in the bubble columns.

기포탑의 일정 운전조건에서 구한 축방향 국부 열전달 계수의 자료들로부터 식 (1)에 의해 총괄 열전달 계수를 결정하였다. 총괄 열전달 계수는 실험 변수인 기체공탑유속, 액상의 표면장력과 점도를 조작변수로 하여 비선형 함수인 식 (2)와 같은 상관식으로 나타낼 수 있었다. 식 (2)는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 상관계수 0.91로 실험적으로 측정한 총괄 열전달계수 값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

$$h = 2502U_G^{0.236}\mu_L^{-0.250}\sigma_L^{-0.028} \quad (2)$$

한편, 본 연구에서 구한 열전달 계수와 운전조건들을 적용성을 높히고 일반화하기 위해 식 (3)과 같은 무차원 군으로 나타내었다. 즉, 총괄 열전달 계수를 포함하는 Nusselt 수(hD/k_L)를 열전달 현상에 관여하는 연속 액상의 물성을 나타내는 Prandtl 수($C_{PL}\cdot\mu_L/k_L$)와 기포탑 내부에서 연속액상과 분산상인 기포의 접촉현상에 관여하는 Weber 수($D\rho_L(U_G)^2/\sigma_L$)의 함수로 나타내었다. 식 (3)은 상관계수 0.92로 실험결과를 잘 나타내었다.

$$Nu = 325Re^{0.180}Pr^{-0.067}We^{0.028} \quad (3)$$

4. 결 론

액상의 점도가 0.1~0.3 Pa·s 범위의 고점성이고 표면장력이 66.1 ~72.9 × 10^{-3} N/m로 낮은 범위인 액상으로 구성된 기포탑에서 축방향 국부 열전달 계수와 총괄 열전달 계수를 구하였다. 축방향 국부 열전달 계수는 기체 분산판으로부터 축방향 거리가 증가함에 따라 액상의 표면장력이 증가함에 따라 감소하였다. 본 연구의 실험범위에서 기포탑 내부 열원과 기포탑간의 총괄 열전달 계수는 기체의 공탑유속이 증가함에 따라 증가하였으나 액상의 점도와 표면장력이 증가함에 따라 감소하였다. 본 연구의 범위에서 총괄 열전달 계수는 다음과 같은 실험변수와 무차원 군으로 각각 나타낼 수 있었다.

$$h = 2502U_G^{0.236}\mu_L^{-0.250}\sigma_L^{-0.028}$$

$$Nu = 325Re^{0.180}Pr^{-0.067}We^{0.028}$$

Nomenclatures

A : effective surface area of heater [m^2]
C_{PL} : specific heat of liquid phase [J/kg·K]
D : column diameter [m]
H : length of bubble column [m]
h : heat transfer coefficient [W/m^2K]
h_i : axial local instantaneous heat transfer coefficient [W/m^2K]
k_L : thermal conductivity of liquid phase [W/mK]
L : distance from the distributor [m]
Nu : Nusselt number $\left(\frac{hD}{K_L}\right)$ [-]
Pr : Prandtl number $\left(\frac{C_{PL}\mu_L}{K_L}\right)$ [-]
q : heat flow rate [W]
Re : Reynolds number $\left(\frac{DU_G\rho_L}{\mu_L}\right)$ [-]
We : Weber number $\left(\frac{D\rho_L(U_G)^2}{\rho_L}\right)$ [-]
ΔT_i : temperature difference between the heater surface and the column proper [K]
U_G : superficial gas velocity [cm/s]

Greek letters

μ_L : liquid viscosity [Pa·s]
ρ_L : liquid density [kg/m^3]
σ_L : liquid surface tension [N/m]

References

1. Fan, L. S. Gas-liquid-solid fluidization engineering, Butterworth, Boston (1989).
2. Deckwer, W. D., Bubble column reactor, John Wiley and Sons, NY (1992).
3. 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).
4. Muroyama, K., Imai, K., Oka, Y. and Hayashi, J., "Mass Transfer Properties in a Bubble Column Associated with Micro-bubble Dispersion," *Chem. Eng. Sci.*, **100**, 464-473(2013).
5. Kang, H. W. and Park, S. B., "Doping of Fluorine into $SrTiO_3$ by Spray Pyrolysis for H_2 Evolution Under Visible Light Irradiation," *Chem. Sci. Eng.*, **100**, 384-391(2013).
6. Kim, S. D. and Kang, Y., "Heat and Mass Transfer in Three-phase Fluidized-bed Reactors : Overview," *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 3639-3660(1997).
7. Kim, S. D. and Kang, Y., "Hydrodynamics, Heat and Mass Transfer in Inverse and Circulating Three-phase Fluidized-bed Reactors for Waste Water Treatment," *Stud. Surf. Sci. Catal.*, **159**, 103-108 (2006).
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-phse Inverse Fluidized Beds," *Korean Chem. Eng. Res.*,

46, 451-464(2008).
9. Sathe, M., Joshi, J. and Evans, G., "Characterization of Turbulence in a Reactangular Bubble Column," *Chem. Eng. Sci.*, **100**, 52-68(2013).
10. 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).
11. Lim, D. H., Jang. J. H., Jin, H. R., Kang, Y. and Jun, K. W., "Heat Transfer in Three-phase (G/L/S) Circulating Fluidized Beds with Low Surface Tension Media," *Chem. Eng. Sci.*, **66**, 3145-3151 (2011).
12. Jin, H. R., Lim, H., Lim, D. H., Kang, Y. and Jun, K. W., "Heat Transfer in a Liquid-solid Circulating Fluidized Bed Reactor with Low Surface Tension Media," *Chinese J. Chem. Eng.*, **21**, 844-849 (2013).
13. Lim, D. H., Jang, J. H., Kang, Y. and Jung, H., " Flow Behavior of Wakes in a Three-phase Slurry Bubble Column with Viscous Liquid Medium," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**, 974-979(2011).
14. 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 Process. Technol.*, **108**, 2-7(2013).
15. 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).