

삼상 역 유동층의 열전달 특성

박희영 · 김상우 · 조용준 · 강 용[†] · 김상돈*

충남대학교 화학공학과

*한국과학기술원 화학공학과

(2001년 5월 22일 접수, 2001년 7월 27일 채택)

Heat Transfer Characteristics of Three-Phase Inverse Fluidized Beds

Hee-Young Park, Sang-Woo Kim, Yong-Jun Cho, Yong Kang[†] and Sang-Done Kim*

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

*Department of Chemical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received 22 May 2001; accepted 27 July 2001)

요 약

직경이 0.152 m이고 높이가 2.5 m인 삼상 역 유동층에서 열전달특성에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 내부열원과 유동층 간의 열전달계에서 수력학적 특성과 열전달과의 연관성을 고찰하기 위해 압력강하, 층팽창, 상체류량 같은 수력학적 특성을 검토하였다. 기체와 액체의 유속 그리고 층공극률이 열전달 계수에 미치는 영향을 결정하였다. 물과 여과된 압축공기 그리고 밀도가 877.3 kg/m³, 직경이 4 mm인 저밀도 폴리프로필렌을 각각 액체, 기체 및 고체상으로 사용하였다. 액체최소유동화속도와 각 상의 체류량은 압력강하 분포자료로부터 정압강하법에 의해 결정하였다. 삼상 역 유동층에서 열전달계수는 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였으나 액체의 유속 및 층공극률의 변화에 따라서는 최대값을 나타내었다. 액체최소유동화속도는 기체의 유속이 증가함에 따라 점차적으로 감소하였다. 내부열원과 유동층 간의 열전달 계수는 본 연구의 실험범위에서 실험변수의 함수와 무차원군으로 각각 상관식을 나타낼 수 있었다.

Abstract – Heat transfer characteristics have been investigated in a three-phase inverse fluidized bed whose diameter and height are 0.152 m and 2.5 m, respectively. Hydrodynamics such as pressure drop, bed expansion and phase holdups have been also examined to analyze the relation between the hydrodynamics and the heat transfer coefficient in the immersed heater-to-bed heat transfer system. Effects of gas and liquid velocities and bed porosity on the heat transfer coefficient have been determined. Tap water, filtered compressed air and low density polypropylene whose density and diameter are 877.3 kg/m³ and 4 mm have been used as a liquid, gas and solid phase, respectively. The minimum liquid fluidization velocity(U_{Lmf}) and individual phase holdups have been obtained from the pressure drop profiles by means of static pressure drop method. It has been found that the heat transfer coefficient has increased with increasing gas velocity, but it has exhibited a maximum value with the variation of liquid velocity or bed porosity in three phase inverse fluidized beds. The minimum liquid fluidization velocity had decreased gradually with an increase in the gas velocity. The heat transfer coefficient has been well correlated as a function of operating variables and in terms of dimensionless groups, respectively, within this experimental conditions.

Key words : Three-Phase, Inverse Fluidized Bed, Heat Transfer Minimum Liquid Fluidization Velocity, Bed Porosity

1. 서 론

삼상 역 유동층은 고체입자의 밀도가 액체보다 작기 때문에 기체는 유동층의 밑부분에서 상승방향으로 흐르는 반면, 액체는 관의 하향방향으로 흐르는 항류(countercurrent) 흐름에 의해 유동화 된다. 즉, 액체상을 고체입자에 작용하는 순 부력에 반대방향으로 흐르게 하여 유동층의 윗부분부터 아래방향으로 유동화시킬 수 있다[1-4].

이러한 삼상 역 유동층은 전통적인 삼상 유동층의 장점인 접촉 효과가 좋고, 열 및 물질 전달 효과가 탁월하다는 장점 외에도 중력이 아닌 부력에 반하여 유동화시키는 역 유동화의 특성을 이용할 수 있으므로 다공성의 입자나 미소입자 등의 사용에도 그 용도를 확장시킬 수 있다 하겠다. 삼상 역 유동층은 대부분의 경우 입자의 겉보기 밀도가 작거나 매우 미소한 입자를 사용하게 되므로 느린 액체 유속으로 유동화가 되기 때문에 에너지 소비가 낮으며, 고체 입자의 마모를 최소화 할 수 있다는 장점도 있다. 또한 기체 유속만으로도 유동화가 가능하기 때문에 생물학적 폐수처리, 생화학 그리고 다른 주변산업에도 그 응용성은 더욱 확대될 수 있을 것으로 예견된다. 특히, 삼상 역 유동층은 유동입자

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kangyong@hanbat.cnu.ac.kr

의 둘레에 형성되는 생물학적 필름(biofilm)의 두께를 미세하게 조절할 수 있기 때문에 생물학적 폐수처리 및 반응, 효소고정화 등에 매우 유용하게 응용될 수 있다 하겠다[5-9].

그러나, 삼상 역 유동층에 대한 연구는 현재 매우 미흡하며 국내·외적으로 이제 시작단계에 있는 실정이라 하겠다[10-12]. 다만, 기체-액체 상이나 액체-고체상의 접촉을 다루는 이상 역 유동층(Two-Phase Inverse Fluidized Bed)이나 난류 접촉층에 대한 연구들이 지금까지 꾸준히 이루어지고 있다[13-16]. 삼상 역 유동층이 그 응용분야인 폐수처리나 생화학 분야의 반응기로 사용될 경우 반응기나 접촉공정의 온도를 일정 온도로 유지해야 하는 경우가 빈번함에도 불구하고 삼상 역 유동층에서 열전달현상에 관한 연구는 국내·외를 막론하고 거의 이루어지지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 삼상 역 유동층의 공업적 응용에 중요한 필수적 공학적 자료인 열전달 특성에 대해 고찰하였으며, 삼상 역 유동층의 수력학적 특성이 이들 열전달 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험

본 연구에서 사용된 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직경이 0.152 m ID이고 높이가 2.5 m인 아크릴 관을 사용하였다.

유동 고체입자로는 밀도가 877.3 kg/m³이고 직경이 4 mm인 구형의 폴리프로필렌 입자를 사용하였으며, 연속액상(continuous liquid phase)으로는 물을, 기체분산상(dispersed phase)으로는 여과된 압축공기를 사용하였다.

유동입자의 역 유동을 위해 연속액상을 유동층의 상부에서 하부로 일정유속으로 균일하게 흐르게 하기 위해 다공판 형태의 액체 분산판을 사용하였는데, 액체 분산판은 직경 3 mm의 구멍을 삼각피치로 균일하게 배치하였다. 한편, 기체분산상은 유동층의 하부에서 주입되어 상부로 상승하도록 하였는데 기체 분산상의 균일한 분포를 위해 유동층 하부 판에 직경 6.35 mm의 관을 균일하게 4개 삽입하여 용접한 후 이 관에 직경 1 mm의 오리피스를 일정 간격으로 만들어 사용하였다. 이와 같은 액체상과 기체분산상의 주입방법은 삼상 유동층에서 사용했을 경우 매우 효과적으로 액체상과 기체 분산상을 관에 주입시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[12, 17-19].

수력학적 특성을 고찰하기 위해 기체 분산판으로부터 0.25 m 위치부터 축방향으로 0.25 m 간격마다 압력탭을 만들어 액체 마노미터와 압력센서를 각각 설치하였다. 또한 열전달 특성을 고찰하기 위해서 유동층 중앙에 직경이 0.0254 m 길이가 2.0 m인 열원을 설치하였고 일정한 열량을 공급할 수 있도록 전원공급기(power supply)와 연결하였다. 유동층 내부와 열원간의 온도측정을 위하여 iron-constantan 재질의 J-type 열전대를 사용되었다. 유동층 내부의 온도는 유동층 중심부와 유동층 컬럼 벽면의 중간지점에 액체 분산판으로부터 0.3 m 하단부터 축방향으로 0.15 m의 간격을 두고 4개의 열전대를 설치하였으며 이들 각 열전대에서 얻어지는 값의 평균값을 유동층 내부온도로 하였다. 열원표면의 온도는 같은 재질의 J-type의 열전대 4개를 열원표면에 부착시켜 각 실험조건에서의 평균값으로 열원표면의 온도를 구하였다.

본 연구의 조업범위는 액체유속이 0-7 cm/s, 기체유속이 0.2-1.0 cm/s를 넘지 않는 범위에서 실험하였다.

삼상 역 유동층에서의 기체, 액체 및 유동 고체입자 상들의 체류량은 정압강하법에 의해 아래의 식들에 의해 구하였다[17-19].

$$-\frac{dP}{dz} = (\epsilon_s \rho_s + \epsilon_L \rho_L + \epsilon_G \rho_G)g \quad (1)$$

$$\epsilon_s = \frac{W_s}{\rho_s A_1 H} \quad (2)$$

$$\epsilon_s + \epsilon_L + \epsilon_G = 1 \quad (3)$$

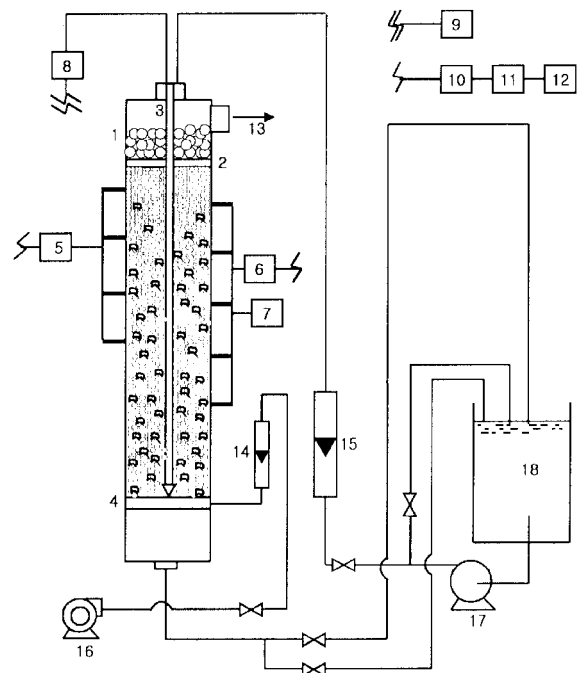


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. Calming section | 10. Amplifier |
| 2. Liquid distributor | 11. Lab card |
| 3. Heater | 12. Computer |
| 4. Gas distributor | 13. Vent line |
| 5. Thermocouples | 14. Gas flow meter |
| 6. Pressure sensor | 15. Liquid flow meter |
| 7. Manometer | 16. Air compressor |
| 8. Thermocouple | 17. Pump |
| 9. Power supply | 18. Reservoir |

유동층 내부에서 내부 열원과 유동층간의 총괄 열전달 계수는 열원에 가해진 열량과 열원표면과 유동층간의 온도차로부터 아래의 식에 의해 계산하였다.

$$h = \frac{Q}{A_2 \Delta T} \quad (4)$$

여기서, Q는 열원에 가해진 열량을 나타내며 ΔT 는 열원표면과 유동층간의 평균온도차를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

삼상 역 유동층에서, 기체의 유속을 일정하게 유지한 조건에서 액체의 유속을 증가시키면 유동층 내의 단위길이 당 압력강하는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 액체 유속을 증가시킨 처음에는 압력강하가 급격히 일어나며 최소값을 보인 후에 다시 증가한 후 완만한 변화를 하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 유동층 내부에서의 압력강하 양상으로부터 일정 기체유속의 조건에서 입자가 최소유동화 하는 액체의 유속(U_{Lmf})을 구할 수 있다[3, 4, 11]. 본 연구에서도 액체유속이 증가함에 따라 압력강하가 최소값을 나타내는 조건을 최소 유동화 조건으로 보고 이때의 액체 유속을 최소 유동화 속도로 결정하였다. 이와 같이 결정된 액체의 최소유동화 속도는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 기체 유속이 증가함에 따라 단조 감소하는 것을 알 수 있다. 삼상 역 유동층에서 유동입자의 밀도가 연속액상의 밀도와 큰 차이가 나지 않는 경우에는, 부유되어 있는 입자에 약간의 힘만 가해져도 입자가 유동화 할 수 있는데 기체의 유속을

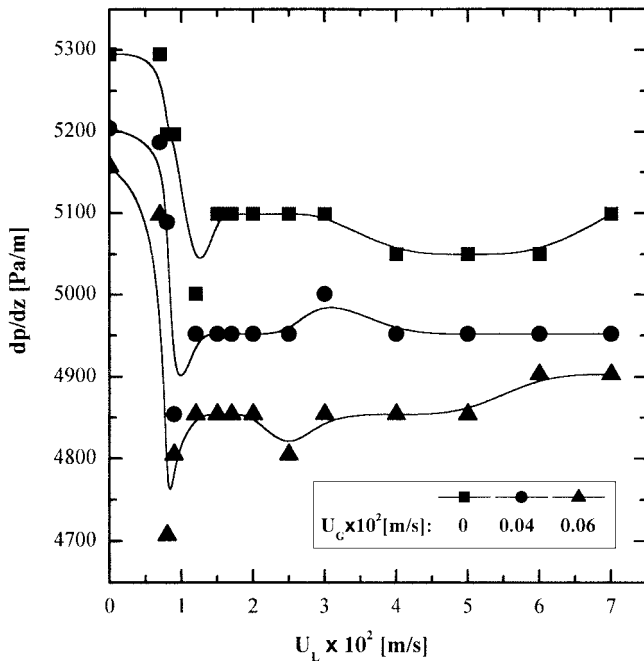
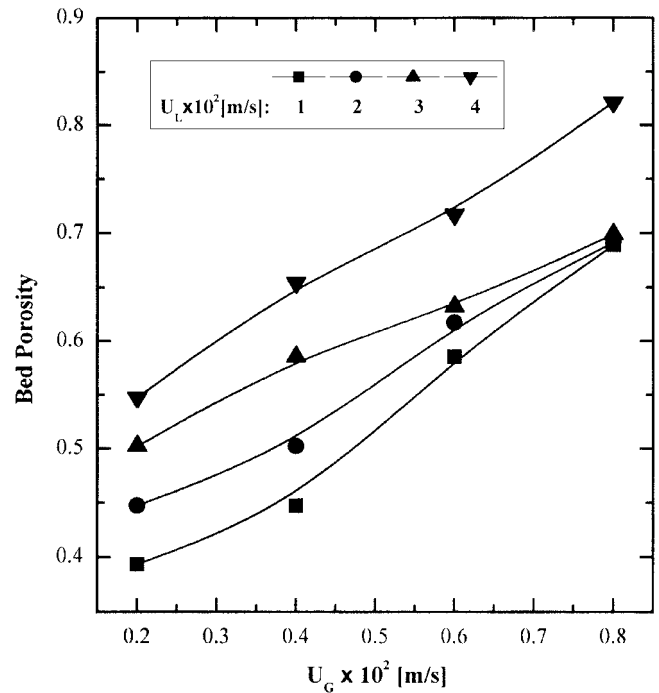
Fig. 2. Determination of U_{Lmf} in three-phase inverse fluidized bed.

Fig. 4. Effects of gas velocity on the bed porosity in three-phase inverse fluidized bed.

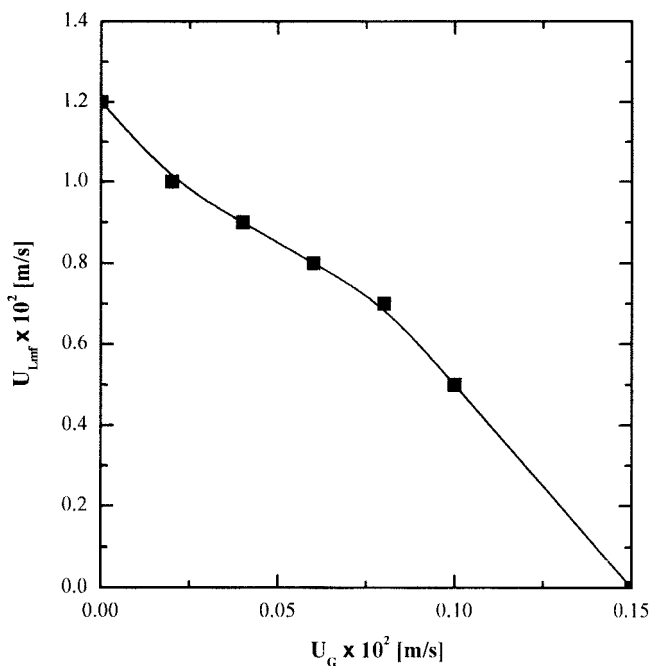
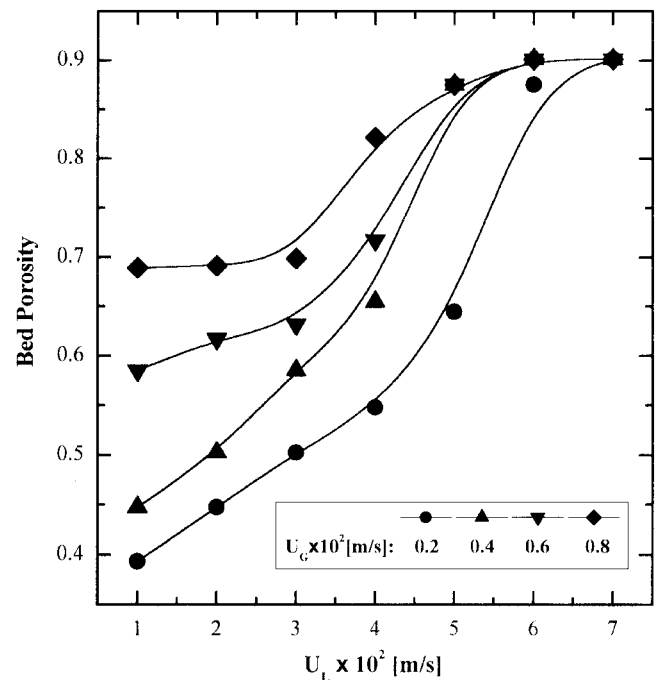
Fig. 3. Effects of gas velocity on U_{Lmf} in three-phase inverse fluidized bed.

Fig. 5. Effects of liquid velocity on the bed porosity in three-phase inverse fluidized bed.

증가시킴으로써 상승기포에 의해 유발되는 삼상 역 유동층 내부에서 존재하는 연속액상의 흐름 효과가 증가되어 입자를 유동화 하기에 필요한 액체의 유속은 감소한다고 할 수 있다[3, 4]. 따라서, 삼상 역 유동층에서 부유입자가 유동화 하기에 필요한 액상의 최소 유동화 속도(U_{Lmf})는 유동층 내부에서 상승하는 기체의 유속이 증가함에 따라 감소한다고 할 수 있다.

한편, 삼상 역 유동층에서 기체의 유속이 증가하면, 유동층 내에 존재하는 상승기포의 체류량이 증가하게 되며, 이로 인해 액체의 흐름효과도 증가하게 되어 부유입자들을 분산시키는 결과를 가져와 유동층의 높

이도 증가하게 된다. 따라서, Fig. 4에서 보는 바와 같이 기체의 유속이 증가하면 유동층의 높이 증가와 상승기포의 체류량의 증가를 가져와 충공극률이 증가한다고 할 수 있다. Fig. 5에는 액체 유속의 증가가 충공극률에 미치는 영향을 나타내었다. 유동층의 층 팽창은 하강하는 액체의 유속이 증가하면 매우 민감하게 증가하게 되어 같은 기체 유속의 유동조건에서 액체 체류량의 큰 증가를 가져와 Fig. 5에서 보는 바와 같이 충공극률이 크게 증가함을 알 수 있다.

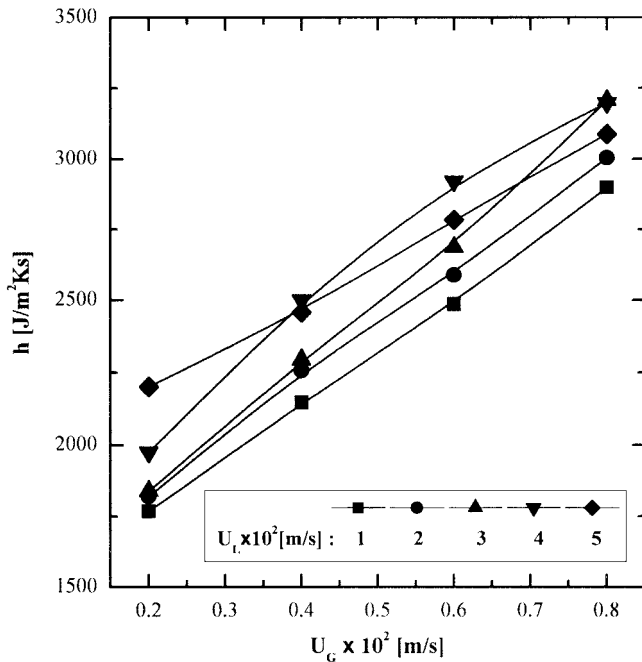


Fig. 6. Effects of gas velocity on h in three-phase inverse fluidized bed.

삼상 역 유동층에서 기체의 유속이 내부 열원과 유동층간의 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 기체의 유속이 증가함에 따라 열전달 계수는 단조 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 삼상 유동층에서와 유사하게 설명할 수 있다[17-19]. 즉, 삼상 역 유동층에서 기체의 유속이 증가하면 상승 기포의 체류량이 증가하며 수도 많아져서 기포와 기포들간의 접촉과 합체 뿐만 아니라 연속 액상과 분산 유동입자들과도 접촉하면서 유동층 내에 난류현상을 증가시킨다고 할 수 있다. 이와 같은 난류 현상의 증가는 유동층 내부에 작은 마이크로 소용돌이(micro eddy) 현상을 유발하여 내부 열원과 유동층간의 열전달 저항을 감소시켜 열전달 계수를 증가시킨다고 할 수 있다[17-19]. 뿐만 아니라, 기체 유속의 증가는 유동입자의 거동도 보다 활발하게 증가시키는데 이들 입자들은 유동층 내부에서 내부열원과 접촉하면서 내부열원 주위에 형성된 얇은 막(thin film)과 부딪혀 이 막의 두께를 감소시키는 효과를 가져와 결국 내부 열원 표면에서의 열전달 저항을 효과적으로 감소시켜 열전달 계수가 증가하게 된다고 설명할 수 있다.

한편, 삼상 역 유동층에서 액체의 유속이 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 열전달 계수는 액체의 유속이 증가함에 따라 증가하였다가 액체의 유속이 더욱 증가하면 다시 감소하는 경향을 나타내어, 액체유속의 증가에 따라 최대값을 나타낼 수 있다. 이와 같은 현상은, 역 유동층에서 액체 하강속도가 증가하게 되면 부유 입자들의 유동영역인 층의 팽창을 가져오며 이에 따라 입자들이 유동하면서 활발하게 연속액상 뿐만 아니라 내부열원과도 효과적으로 접촉하면서 층 내의 난류강도를 증가시킨다고 할 수 있다. 따라서, 액체 유속이 증가하면 내부열원과 유동층 간의 열전달 계수가 증가한다고 할 수 있다. 그러나, 액체 유속이 더욱 증가하면 유동층의 팽창이 더욱 커지며 유동고체 입자와 열원 표면간의 접촉 효과와 난류 강도가 감소하여 액체 유속의 증가에 따라 열전달 계수는 약간 감소한다고 할 수 있다. 따라서, 삼상 역 유동층에서 열전달 계수는 액체유속이 증가함에 따라 최대값을 나타낸다고도 할 수 있다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 내부 열원과 유동층간의 열전달 계수가 최대값을 나타내는 때의 액체유속은 기체의 유속이 증가함에 따라 점점 감소하는 것을 알

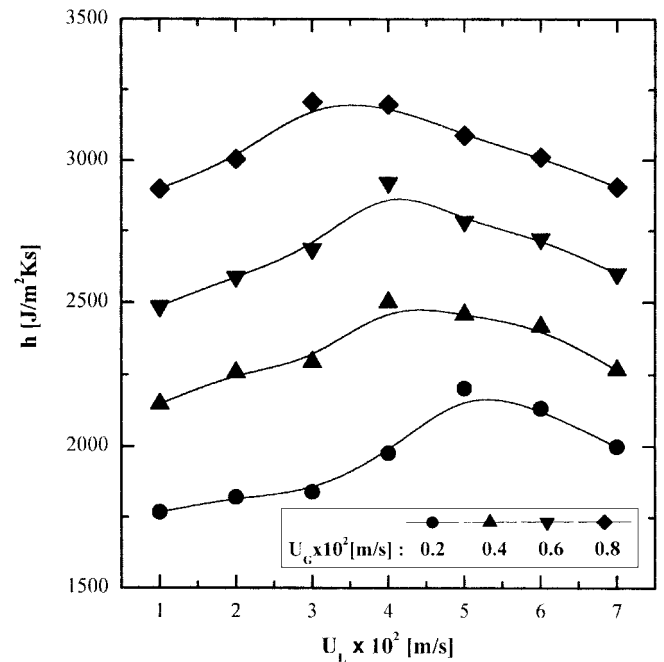


Fig. 7. Effects of liquid velocity on h in three-phase inverse fluidized bed.

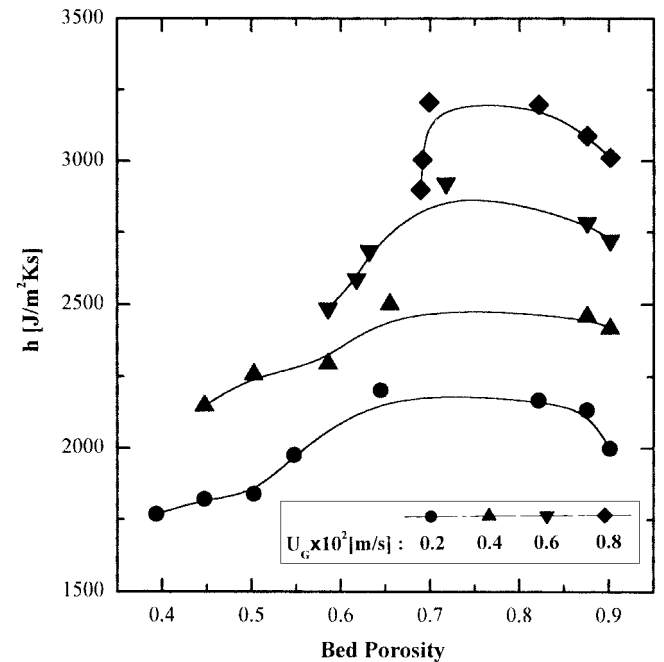


Fig. 8. Effects of bed porosity on h in three-phase inverse fluidized bed.

수 있다. 이는 삼상 역 유동층에서는 부유유동입자의 밀도가 작으므로 기체의 유속이 증가함에 따라라도 유동층의 층이 팽창하므로 이에 따라 유동입자의 체류량이 감소하게 되기 때문으로 해석할 수 있다. 또한 Fig. 3에서도 설명하였듯이 기체의 유속이 증가함에 따라 부유입자의 유동화를 위한 액체의 최소유동화속도가 감소하기 때문으로도 설명할 수 있다. 이와 같은 현상은 삼상 역 유동층에서 층공극률이 층 내부의 열전달 계수에 미치는 영향을 나타낸 Fig. 8에서도 잘 나타나 있다. 이 그림에서, 기체유속이 증가함에 따라 층공극률의 변화폭이 좁아지는 것은 바로 앞에서 설명한 바와 같이 액체의 유속뿐만 아니라 기체의 유속이 증

가함에 따라서도 역 유동층의 층공극률은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

삼상 역 유동층에서 내부열원과 유동층간의 열전달 계수를 본 연구의 실험범위에서 기체유속과 액체유속의 함수로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있었다. 식 (5)의 상관계수는 0.972로 실험결과와 잘 일치하였다. 또한, 이들 열전달 계수를 식 (6)과 같은 무차원군의 함수로 나타낼 수 있었으며 식 (6)의 상관계수는 0.912이었다.

$$h=15680 U_G^{0.310} U_L^{0.050} \quad (5)$$

$$Nu=0.65 R_e^{0.820} P_r^{0.660} \quad (6)$$

4. 결 론

삼상 역 유동층에서 열전달 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 삼상 역 유동층에서 기체유속이 증가하면 연속액상의 흐름효과가 증가되어 입자를 유동화하기에 필요한 액체의 유속이 감소하기 때문에 최소액체유동화 속도(U_{Lmp})는 기체의 유속이 증가함에 따라 감소하였다.

(2) 삼상 역 유동층에서 기체 유속이 증가하면 상승 기포의 체류량이 증가하여 난류현상과 마이크로 소용돌이 현상을 유발할 뿐만 아니라 유동입자의 거동을 활발하게 증가시켜 열전달 저항을 효과적으로 감소시키기 때문에 기체 유속이 증가함에 따라 열전달 계수는 증가하였다.

(3) 삼상 역 유동층에서 열전달 계수는 액체 유속이나 층공극률이 증가함에 따라 최대값을 나타내었으며, 열전달계수가 최대값을 나타낼 때의 액체유속은 기체유속이 증가함에 따라 감소하였다.

(4) 삼상 역 유동층에서 열전달 계수는 본 실험범위 내에서 기체 및 액체유속의 상관식과 무차원군인 Nusselt 수, Prandtl 수 그리고 Reynolds 수에 의해 다음과 같은 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$h=15680 U_G^{0.310} U_L^{0.050}$$

$$Nu=0.65 R_e^{0.820} P_r^{0.660}$$

사용기호

A_1	: cross-sectional area of the column [m^2]
A_2	: surface area of heater [m^2]
C_p	: specific heat [cal/kgK]
d_p	: particle diameter [mm]
g	: gravitational acceleration [m/s^2]
H	: bed height [m]
h	: heat transfer coefficient [cal/ m^2Ks]
k_L	: thermal conductivity of liquid phase [cal/mKs]
Nu	: Nusselt number [-], $hd_p(1-\epsilon_s)/k_L\epsilon_s$
Pr	: Prandtl number [-], $C_p\mu_L/k_L$
Re	: Reynolds number [-], $d_p(U_G+U_L)\rho_L/\mu_L\epsilon_s$
Q	: heat flow [cal/s]
T	: temperature [K]

ΔT : mean temperature difference [K]

U_G : superficial gas velocity [m/s]

U_L : superficial liquid velocity [m/s]

W_S : weight of solid particle [kg]

그리스 문자

ϵ : phase holdup [-]

ρ : density [kg/m^3]

μ : viscosity [Pas]

하첨자

G : gas phase

L : liquid phase

S : solid phase

참고문헌

1. Fan, L. S.: Butterworths, Boston, Stoneham, MA(1989).
2. Fan, L. S., Muroyama, K. and Chern, S. H.: *Chem. Eng. J.*, **24**, 143 (1982).
3. Ibrahim, Y. A. A., Briens, C. L., Margaritis, A. and Bergongnou, M. A.: *AIChE J.*, **42**, 1889(1996).
4. Legile, P., Menard, G., Laurent, C., Thomas, D. and Bernis, A.: *Int. Chem. Eng.*, **32**, 41(1992).
5. Garcia-Calderon, D., Buffiere, P., Moletta, R. and Elmaleh, S.: *Wat. Res.*, **32**, 3593(1998).
6. Tang, W. T. and Fan, L. S.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**, 128(1990).
7. Chern, S. H., Muroyama, K. and Fan, L. S.: *Chem. Eng. Sci.*, **38**, 1167(1983).
8. Choi, H. S. and Shim, M. S.: *Korean J. Chem. Eng.*, **16**, 670(1999).
9. Buffiere, P. and Moletta, R.: *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 1233(1999).
10. Nikolov, V., Farag, I. and Nikov, I.: *Bioprocess Eng.*, **23**, 427(2000).
11. Lee, D. H., Epstein, N. and Grace, J. R.: *Korean J. Chem. Eng.*, **17**, 684(2000).
12. Park, H. Y., Cho, Y. J., Lee, C. K. and Kang, Y.: Proc. of International Symposium on Chemical Engineering, Feb. 8-11, Cheju Island, 305(2001).
13. Karamanev, D. G. and Nikolov, L. N.: *AIChE J.*, **38**, 1916(1992).
14. Femin Bendict, R. J., Kumaresan, M. and Velan, M.: *Bioprocess Eng.*, **19**, 137(1998).
15. Lakshmi, A. C., Balamurugan, M., Sivakumar, M., Samuel, T. N. and Velan, M.: *Bioprocess Eng.*, **22**, 461(2000).
16. Nikov, I. and Karamanev, D.: *AIChE J.*, **37**, 781(1991).
17. Kang, Y., Suh, I. S. and Kim, S. D.: *Chem. Eng. Com.*, **34**, 1(1985).
18. Kang, Y. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **25**, 81(1987).
19. Kang, Y., Kim, J. S., Woo, K. J., Nam, C. H., Kim, S. H. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **36**, 275(1998).