

액체-고체 순환유동층의 상승관에서 액상의 점도가 고체체류량 및 열전달계수에 미치는 영향

이찬기 · 강석환 · 신광식 · 송평섭 · 강 용[†] · 김상돈*

충남대학교 화학공학과

305-764 대전시 유성구 궁동 220

*한국과학기술원 생명화학공학과

305-701 대전시 유성구 구성동 373-1

(2003년 3월 17일 접수, 2003년 5월 1일 채택)

Effects of Liquid Viscosity on the Solid Holdup and Heat Transfer Coefficient in the Riser of Liquid-Solid Circulating Fluidized Beds

Chan-Gi Lee, Suck-Hwan Kang, Kwang-Sik Shin, Pyung-Seob Song, Yong Kang[†] and Sang-Done Kim*

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

*Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,

373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

(Received 17 March 2003; accepted 1 May 2003)

요 약

직경이 0.102 m이고 높이가 3.5 m인 액체-고체 순환유동층에서 액체의 점도가 고체입자의 체류량과 열전달계수에 미치는 영향을 검토하였다. 밀도가 2,500 kg/m³인 유리구슬($d_p=1.0, 1.7, 2.1$ 또는 3.0 mm)과 CMC 용액($\mu_L=0.96-38$ mPas)을 각각 고체상과 액체상으로 사용하였다. 액체-고체 순환유동층에서 고체입자의 체류량은 액체의 유속이나 점도가 증가함에 따라 감소하였고 유동입자의 크기나 입자의 순환속도가 증가함에 따라 증가하였다. 액체-고체 순환유동층에서 열전달계수는 액체의 점도가 증가함에 따라 감소하였고 유동입자의 크기나 순환속도가 증가함에 따라 증가하였으나, 액체의 유속이 증가함에 따라서는 큰 변화가 없었다. 액체-고체 순환유동층에서 고체입자의 체류량과 열전달계수는 다음과 같이 실험변수와 무차원군에 의해 상관식으로 얻을 수 있었다.

$$\epsilon_s = 0.783 U_L^{-0.100} G_s^{0.164} d_p^{0.302} \mu_L^{-0.036}$$

$$h = 4349.3 U_L^{0.010} G_s^{0.099} d_p^{0.151} \mu_L^{-0.015}$$

$$\left(\frac{hd_p}{k_L}\right) = 1259 \left(\frac{c_p \mu_L}{k_L}\right)^{-0.018} \left(\frac{G_s}{U_L \rho_s}\right)^{0.078} \left(\frac{d_p}{D}\right)^{1.229}$$

Abstract – Effects of liquid viscosity on the solid holdup and heat transfer coefficient have been investigated in the riser of a liquid-solid circulating fluidized beds, whose diameter is 0.102 m and 3.5 m in height. Glass beads ($d_p=1.0, 1.7, 2.1$ or 3.0 mm) whose density is 2,500 kg/m³ and aqueous solutions of carboxymethyl cellulose (CMC)($\mu_L=0.96-38$ mPas) have been used as the solid and liquid phase, respectively. It has been found that the solid holdup decreases with increasing liquid velocity or viscosity, but it increases with increasing solid particle size or solid circulation rate. The heat transfer coefficient decreases with increasing liquid viscosity but it increases with increasing particle size or solid circulation rate, however, it does not change considerably with increasing liquid velocity. The solid holdup and heat transfer coefficient have been well correlated in terms of operating variables or dimensionless groups as follow:

$$\epsilon_s = 0.783 U_L^{-0.100} G_s^{0.164} d_p^{0.302} \mu_L^{-0.036}$$

$$h = 4349.3 U_L^{0.010} G_s^{0.099} d_p^{0.151} \mu_L^{-0.015}$$

$$\left(\frac{hd_p}{k_L}\right) = 1259 \left(\frac{c_p \mu_L}{k_L}\right)^{-0.018} \left(\frac{G_s}{U_L \rho_s}\right)^{0.078} \left(\frac{d_p}{D}\right)^{1.229}$$

Key words: Liquid-Solid, Circulating Fluidized Bed, Viscous Liquid Medium, Solid Holdup, Heat Transfer Coefficient

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

의 열전대를 사용하였고, 액체-고체 순환유동층의 상승관에서 내부열원과 유동층간의 열전달계수는 열원에 가해진 열량(Q), 열원표면과 유동층간의 평균 온도차 ΔT 를 구하여서 식 (3)에 의해 구하였다.

$$h = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \quad (3)$$

상승관 내부에 수직으로 설치된 열원에 가해지는 열량(Q)은 전압을 조절할 수 있는 power supply에 의해 일정하게 유지되도록 하였으며, 유동층의 상승관 내부의 온도는 유동층 bulk영역의 온도를 측정하여 사용하였는데, 그 지점은 열원을 중심으로 고체의 순환 투입구에서부터 측방향으로 1, 1.5, 2 그리고 2.5 m의 4지점을 선정하여 각 지점온도의 평균값을 유동층 내부온도로 하였다[4].

3. 결과 및 고찰

액체-고체 순환유동층의 상승관에서 유동하며 존재하는 고체입자는 촉매, 흡착제, 흡수제, 접착제, 반응물 등으로 사용될 수 있으므로 이들의 체류량은 액체-고체 순환유동층 반응기의 성능과 용량에 직접적인 영향을 미칠 뿐 만 아니라 반응기 내부에서 열전달이나 물질전달 등 전달현상에도 크게 영향을 미치므로 유동 고체입자의 체류량을 측정하였다. 액체-고체 순환유동층의 상승관에서 연속상인 액체의 유속이 고체 유동입자의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 상승관에서 고체입자의 체류량은 액체의 유속이 증가함에 따라 약간 감소하는 것을 알 수 있으나, 고체입자가 순환되지 않는 일반적인 액체-고체 유동층에서는 고체입자의 체류량이 액체유속의 증가에 따라 크게 감소하는 현상과 대조적이라 할 수 있다[13-16]. 액체-고체 순환유동층에서는 유동고체 입자가 상승관의 순환 투입부에서 단위시간당 일정량 투입되기 때문에 액체유속이 증가하여도 고체체류량이 크게 감소하지 않는 것을 알 수 있다.

액체-고체 순환유동층의 상승관에서 유동입자의 크기가 고체입자의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 고체 체류량은 유동입자의 크기가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 고체 유동입자의 크기가 증가함에 따라 유동입자의 최소유동화속도 (U_L)가 증가하기 때문에 같은 액체유속의 조건에서 유동입자의 크기에 따른 체류량을 비교하기 어려우므로 고체 유동입자의 유동상태가 유사한 경우에 입자크기가 고체 체류량에 미치는 영향을 검토

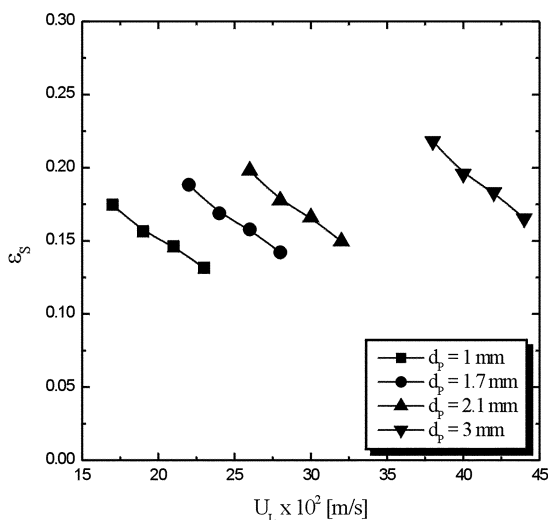


Fig. 2. Effects of liquid velocity on the solid holdup in the riser of liquid-solid circulating fluidized beds ($G_s=2 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $\mu_L=0.024 \text{ Pa}\cdot\text{s}$).

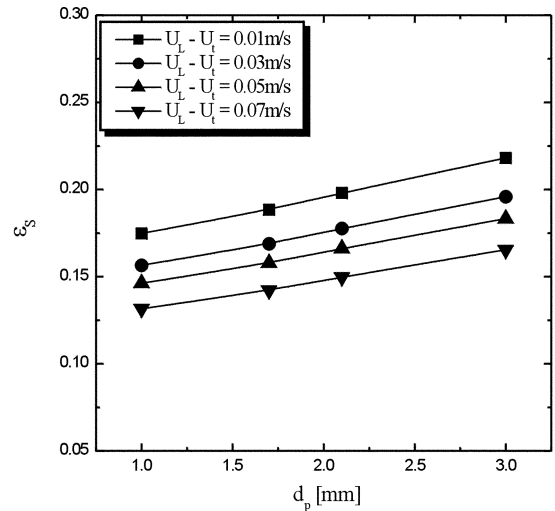


Fig. 3. Effects of particle diameter on the solid holdup in the riser of liquid-solid circulating fluidized beds ($G_s=2 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $\mu_L=0.024 \text{ Pa}\cdot\text{s}$).

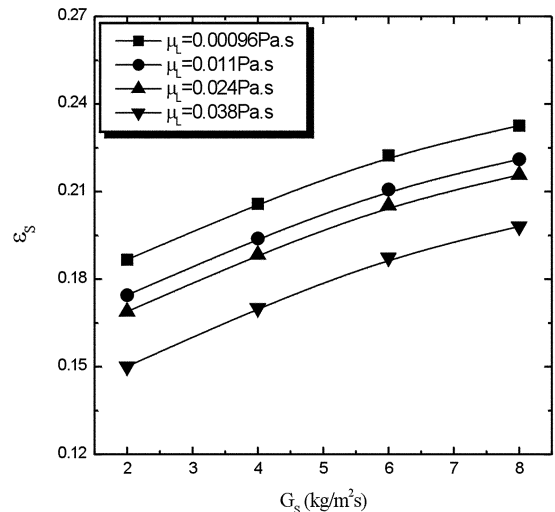


Fig. 4. Effects of solid circulation rate on the solid holdup in the riser of liquid-solid circulating fluidized beds ($U_L=0.24 \text{ m/s}$, $d_p=1.7 \text{ mm}$).

하고자 (U_L-U_i)가 유사한 조건에서 그 영향을 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 유동 입자의 크기가 증가함에 따라 유동입자에 작용하는 중력에 의한 힘이 증가하므로 유사한 유동화 조건에서 유동고체 입자의 체류량은 증가한다고 할 수 있다.

액체-고체 순환유동층의 상승관에서 유동입자의 순환속도가 유동입자의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 고체순환부로부터 단위시간당 상승관에 투입되는 고체 유동입자의 양이 증가함에 따라 상승관의 고체 체류량은 증가하는 것으로 설명할 수 있다. 점성유체로 유동화되는 액체-고체 순환유동층에서 액체의 점도가 유동입자의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 상승관에서 고체의 체류량은 액체의 점도가 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 이 감소경향은 고체가 순환하지 않는 일반적인 액체-고체 순환유동층에서 액체의 점도가 증가함에 따라 감소하는 경향에 비하여 매우 작게 나타났다. 비뉴턴 점성유체를 사용한 액체-고체 순환유동층의 상승관에서 유동 고체입자의 체류량은 본 연구의 실험범위내에서 식 (4)와 같이 실험변수의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$\varepsilon_s = 0.783 U_L^{-0.100} G_s^{0.164} d_p^{0.302} \mu_L^{-0.036} \quad (4)$$

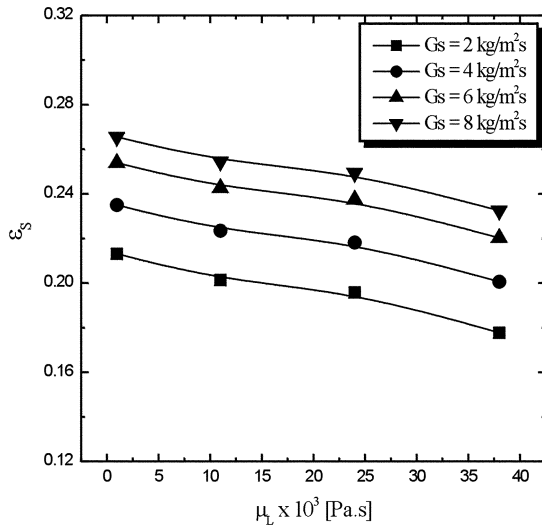


Fig. 5. Effects of liquid viscosity on the solid holdup in the riser of liquid-solid circulating fluidized beds ($U_L=0.4$ m/s, $d_p=3$ mm).

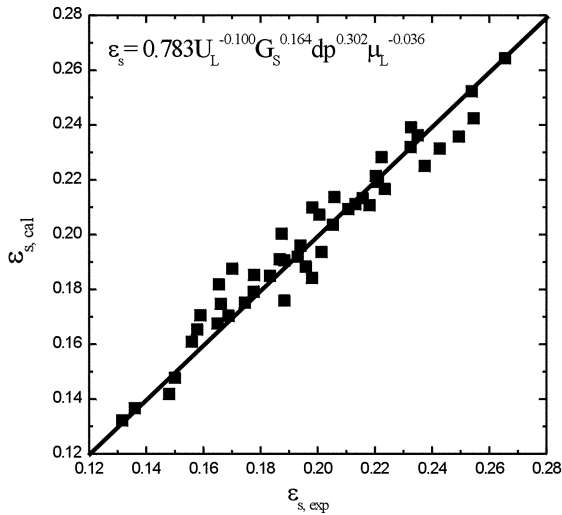


Fig. 6. Comparison of solid holdup between the experimental and the calculated values in liquid-solid circulating fluidized beds.

식 (4)의 상관계수는 0.95로 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 실험결과와 잘 맞는 것을 알 수 있다. 식 (4)의 적용범위는 $0.17 \text{ m/s} \leq U_L \leq 0.42 \text{ m/s}$, $2 \text{ kg/m}^2\text{s} \leq G_s \leq 8 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $1 \times 10^{-3} \text{ m} \leq d_p \leq 3 \times 10^{-3} \text{ m}$, $0.96 \times 10^{-3} \text{ Pa.s} \leq \mu_L \leq 38 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ 이었다.

비뉴튼 점성유체를 사용한 액체-고체 순환유동층의 상승관에서 내부 수직열원과 상승관간의 총괄열전달계수를 유동 입자의 크기별로 액체의 점도가 변화함에 따라 Fig. 7-8에 나타내었다. Fig. 7-8에서 볼 수 있듯이, 유동 고체입자의 크기가 1.0-3.0 mm 범위에서 모든 경우에 액체의 점도가 증가함에 따라 열전달계수는 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 액체의 점도가 증가함에 따라 상승관 내부에서 상승하는 고체 입자의 유동저항이 둔화되기 때문으로 해석할 수 있다. 액체-고체 유동층에서 고체입자는 유동하면서 상승하는 액체 성분들과 내부열원과 접촉을 하면서 난류현상을 유발하여 열전달계수를 증가시키는 작용을 하는 것으로 보고 되고 있다[1, 13-15]. 뿐만 아니라, 이중열전달 모델[14, 15]에 의하면, 유동층 내부에 존재하는 수직열원의 주위에 점성액체에 의한 경계층(boundary layer)이 형성되는데 이 경계층의 두께가 액체의 점도가 증가함에 따라 증가하게 되어 열원표면에서의 열전달을 크게 저하시켜 액체의 점도가 증가함에 따라 열전달계수는 감소한다고 할 수 있

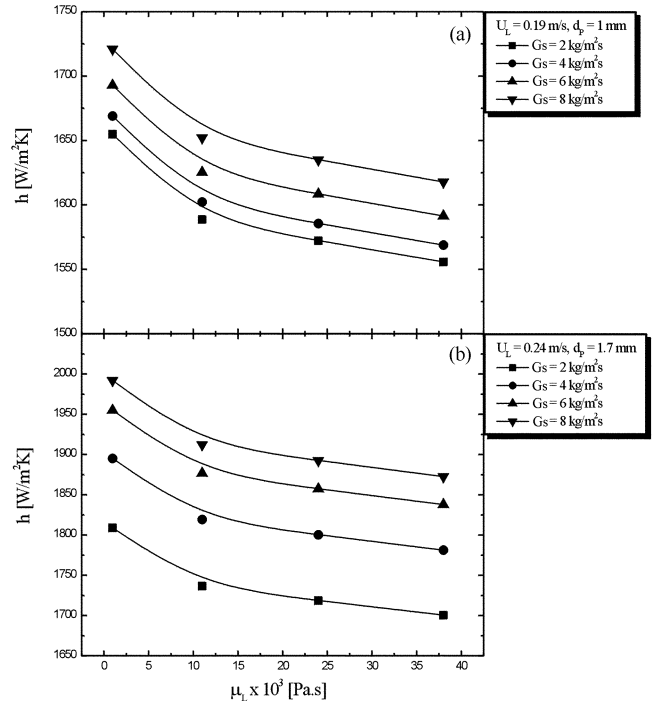


Fig. 7. Effects of liquid viscosity on the heat transfer coefficient in the riser of liquid-solid circulating fluidized beds.

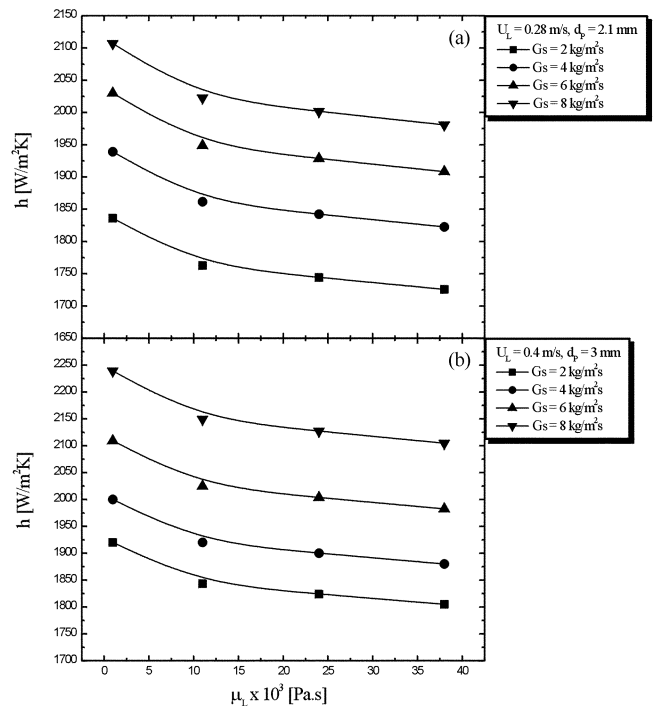


Fig. 8. Effects of liquid viscosity on the heat transfer coefficient in the riser of liquid-solid circulating fluidized beds.

다. 또한, 이들 그림에서 볼 수 있듯이, 상승관에서 열전달계수는 모든 경우 고체입자의 순환속도(G_s)가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명하였듯이 고체입자의 순환속도가 증가함에 따라 상승관 내부의 고체 체류량이 증가하게 되어(Fig. 4) 내부열원과 유동 입자간의 접촉효율을 증가시켜 열전달 효과가 증가되기 때문으로 해석할 수 있다. 액체-고체 순환유동층에서 액체유속이 열전달계수에 미치는 영향은 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이, 상승관에서

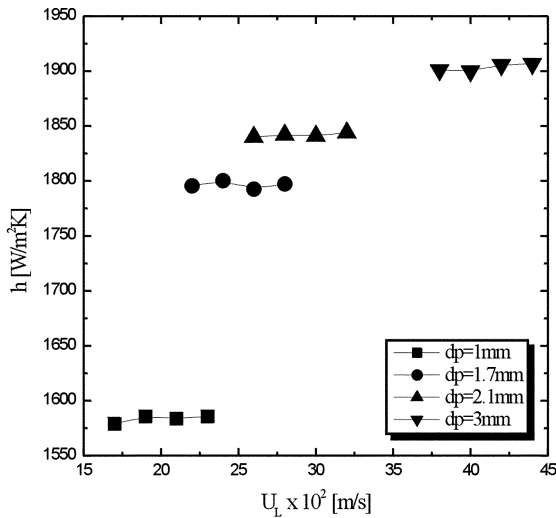


Fig. 9. Effects of U_L on the heat transfer coefficient in the riser of liquid-solid circulating fluidized beds ($\mu_L=0.024$ Pa.s, $G_S=4$ kg/m²s).

액체유속의 증가는 내부열원과 유동층간의 열전달계수에 크게 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 상승관에서 액체유속의 유속이 증가하면 유동입자의 체류량은 약간 감소하지만, 액체유속의 증가에 따라 상승관 내부에서 유발되는 난류 (turbulence) 현상도 증가하게 되는데 이 난류현상의 증가는 내부열원과 유동층간의 열전달 효과를 증가시키게 되므로 점성액체 유속의 증가에 따라 열전달에 서로 상반되는 효과를 나타내는 두 요소를 때문에 열전달계수는 크게 변화하지 않는다고 설명할 수 있다. 액체-고체 순환유동층의 상승관에서 유동입자의 크기가 총괄 열전달계수에 미치는 영향도 Fig. 9에서 뚜렷이 볼 수 있는데, 모든 경우에 유동입자의 크기가 증가함에 따라 열전달계수값은 증가하는 것을 알 수 있다. 고체입자가 순환되지 않는 일반 액체-고체 유동층에서도 이와 같은 현상은 유사하게 나타나는데 [1, 2, 13, 15, 17], 이는 유동 고체입자의 크기가 증가함에 따라 유동하는 고체입자의 관성력 (inertia force)이 증가하게 되어 유동입자가 효과적으로 열원과 접촉하여 열원주위에 형성된 경계층 (boundary layer)의 두께를 얇게 해주기 때문에 열전달계수가 증가한다고 설명할 수 있다.

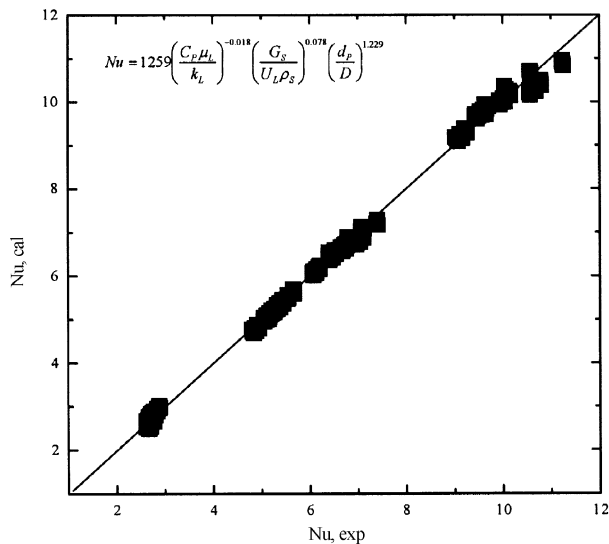


Fig. 10. Comparison of heat transfer coefficient between the experimental and calculated values in liquid-solid circulating fluidized beds.

본 연구의 실험범위에서 상승관에서의 열전달계수는 실험변수들의 상관식으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있는데 이 식의 상관계수는 0.95 이었다. 식 (5)의 적용범위는 $0.17 \text{ m/s} \leq U_L \leq 0.42 \text{ m/s}$, $2 \text{ kg/m}^2\text{s} \leq G_S \leq 8 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $1 \times 10^{-3} \text{ m} \leq d_p \leq 3 \times 10^{-3} \text{ m}$, $0.96 \times 10^{-3} \text{ Pa.s} \leq \mu_L \leq 38 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ 이었다.

$$h = 4349.3 U_L^{0.010} G_S^{0.099} d_p^{0.151} \mu_L^{-0.015} \quad (5)$$

또한, 열전달계수는 실험변수들의 무차원군으로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있는데 식 (6)은 상관계수가 0.99로 Fig. 10에서 보는 바와 같이 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

$$\left(\frac{h d_p}{k_L} \right) = 1259 \left(\frac{C_p \mu_L}{k_L} \right)^{-0.018} \left(\frac{G_S}{U_L \rho_S} \right)^{0.078} \left(\frac{d_p}{D} \right)^{1.229} \quad (6)$$

식 (6)의 적용범위는 $6.62 \leq C_p \mu_L / k_L \leq 167.72$, $38.96 \leq G_S / U_L \rho_S \leq 3484.69$, $0.02 \leq d_p / D \leq 0.03$ 이었다.

4. 결 론

(1) 점성유체를 사용한 액체-고체 순환유동층의 상승관에서 고체 체류량은 액체의 유속과 점도가 증가함에 따라 감소하였으나, 고체입자가 순환하지 않는 일반 액체-고체 유동층에 비하여 액체의 유속이 증가함에 따라 고체입자의 체류량은 크게 감소하지 않았다. 상승관에서 고체 체류량은 유동입자의 크기와 입자의 순환속도가 증가함에 따라 증가하였으며, 상승관에서 고체 체류량은 다음과 같이 실험변수들의 상관식으로 나타낼 수 있었다. 이 상관식의 적용범위는 $0.17 \text{ m/s} \leq U_L \leq 0.42 \text{ m/s}$, $2 \text{ kg/m}^2\text{s} \leq G_S \leq 8 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $1 \times 10^{-3} \text{ m} \leq d_p \leq 3 \times 10^{-3} \text{ m}$, $0.96 \times 10^{-3} \text{ Pa.s} \leq \mu_L \leq 38 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ 이었다.

$$\epsilon_S = 0.783 U_L^{-0.100} G_S^{0.164} d_p^{0.302} \mu_L^{-0.036}$$

(2) 점성유체 액체-고체 순환유동층의 상승관에서 내부 수직열원과 총괄열전달계수는 유동 입자의 크기와 고체순환속도가 증가함에 따라 증가하였으며 액체의 점도가 증가함에 따라 감소하였으나 액체유속이 증가함에 따라서는 크게 변화하지 않았다. 상승관에서의 열전달계수는 다음과 같이 실험변수와 무차원군의 상관식으로 나타낼 수 있었으며, 적용범위는 $6.62 \leq C_p \mu_L / k_L \leq 167.72$, $38.96 \leq G_S / U_L \rho_S \leq 3484.69$, $0.02 \leq d_p / D \leq 0.03$ 이었다.

$$h = 4349.3 U_L^{0.010} G_S^{0.099} d_p^{0.151} \mu_L^{-0.015}$$

$$\left(\frac{h d_p}{k_L} \right) = 1259 \left(\frac{C_p \mu_L}{k_L} \right)^{-0.018} \left(\frac{G_S}{U_L \rho_S} \right)^{0.078} \left(\frac{d_p}{D} \right)^{1.229}$$

감 사

본 연구는 한국과학재단의 연구비지원 (R01-2002-000-00337-0)으로 수행되었으며 귀 재단에 감사드립니다.

사용기호

A	: surface area of heater [m ²]
C_p	: specific heat [J/kgK]
D	: column diameter [m]
d_p	: particle size [mm]
G_S	: solid circulation rate [kg/m ² s]
g	: gravity acceleration [m/s ²]
h	: heat transfer coefficient [W/m ² K]

k_L	: thermal conductivity of liquid phase [W/mK]
L	: bed height [m]
Nu	: Nusselt number [-], hd_p/K_L
ΔP	: pressure drop [Pa]
Q	: heat flow rate [W]
ΔT	: temperature difference [K]
U_L	: liquid velocity [m/s]
U_t	: minimum fluidizing velocity of particle [m/s]

그리스 문자

ϵ	: phase holdup [-]
μ	: liquid viscosity [Pa.s]
ρ	: density [kg/m ³]

아래첨자

L	: liquid phase
S	: solid phase

참고문헌

1. Fan, L. S., Butterworths, Stonehair, MA(1989).
2. Kim, S. D. and Kang, Y., "Heat and Mass Transfer in Three-Phase Fluidized-Bed Reactors-an Overview," *Chem. Eng. Sci.*, **52**(21), 3639-3660(1997).
3. Cho, Y. J., Kang, T. G., Kang, Y., Kim, S. D. and Fan, L. T., "Liquid Radial Dispersion in Liquid-Solid Circulating Fluidized Beds with Viscous Liquid Medium," *Chem. Eng. Commun.*, in press(2003).
4. Cho, Y. J., Nam, S. H., Kim, S. J., Kang, Y. and Kim, S. D., "Heat Transfer and Bubble Properties in Three-Phase Circulating Fluidized Beds," *Chem. Eng. Sci.* **56**(4), 1275-1281(2001).
5. Zheng, Y. and Zhu, J. X., "The Onset Velocity of a Liquid-Solid Circulating Fluidized Bed," *Powder Technol.*, **114**(3), 244-251(2001).
6. Zhu, J. X., Zheng, Y., Karamanev, D. G. and Bassi, A. S., "(Gas-) Liquid-Solid Circulating Fluidized Beds and their Potential Application to Bioreactor Engineering," *Can. J. Chem. Eng.*, **78**(1), 82-94(2000).
7. Zheng, Y. and Zhu, J. X., "Overall Pressure Balance and System stability in a Liquid-Solid Circulating Fluidized Bed," *Chem. Eng. J.*, **79**(2), 145-153(2000).
8. Zheng, Y., Zhu, J. X., Wen, J., Martin, S. A., Bassi, A. S. and Margaris, A., "The Axial Hydrodynamic Behavior in a Liquid-Solid Circulating Fluidized Bed," *Can. J. Chem. Eng.*, **77**(2), 284-294(1999).
9. Kuramoto, K., Tanaka, K., Tsutsumi, A., Yoshida, K. and Chiba, T., "Microscopic Flow Structure of Solid Particles in Circulating Liquid-Solid Fluidized Bed Riser," *J. Chem. Eng. Japan.*, **31**(2), 258-265(1998).
10. Kuramoto, K., Tsutsumi, A. and Chiba, T., "High-Velocity Fluidization of Solid Particles in a Liquid-Solid Circulating Fluidized Bed System," *Can. J. Chem. Eng.*, **77**(2), 291-298(1999).
11. Liang, W. G., Zhu, J. X., Jin, Y., Yu, Z. Q., Wang, Z. W. and Zhuo, J., "Radial Nonuniformity of Flow Structure in a Liquid-Solid Circulating Fluidized Bed," *Chem. Eng. Sci.*, **51**(10), 2001-2010(1996).
12. Cho, Y. J., Song, P. S., Kim, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D., "Stochastic Analysis of Gas-Liquid-Solid Flow in Three-Phase Circulating Fluidized Beds," *J. Chem. Eng. Japan.*, **34**(2), 254-261(2001).
13. Kang, Y., Suh, I. S. and Kim, S. D., "Heat Transfer Characteristics of Three-Phase Fluidized Beds," *Chem. Eng. Commun.*, **34**, 1-13(1985).
14. Kang, Y. and Kim S. D., "On the Heat Transfer Mechanism in Three-Phase Fluidized Beds," *Korea J. Chem. Eng.*, **5**(2), 154-163(1988).
15. Kang, Y., Fan, L. T. and Kim, S. D., "Immersed Heater-to-Bed Heat Transfer in Liquid Solid Fluidized Beds," *AIChE J.*, **37**(7), 1101-1106(1991).
16. Kato, Y., Kago, T., Uchida K. and Morooka, S., "Liquid Holdup and Heat Transfer Coefficient Between Bed and Wall in Liquid Solid and Gas-Liquid-Solid Fluidized Beds," *Powder Technol.*, **28**(1), 173(1981).
17. Muroyama, K., Fukuma M. and Yasunishi, A., "Wall-to-Bed Heat Transfer in Liquid-Solid and Gas-Liquid-Solid Fluidized Beds," *Can. J. Chem. Eng.*, **64**, 399(1986).