

점성유체 액/고 순환유동층에서 입자의 순환속도

홍성규 · 장형륜 · 임대호 · 유동준 · 강 용[†]

충남대학교 응용화학공학과
 34134 대전광역시 유성구 대학로 99
 (2016년 2월 2일 접수, 2016년 8월 4일 수정본 접수, 2016년 8월 17일 채택)

Solid Circulation Rate in a Viscous Liquid-Solid Circulating Fluidized Bed

Sung Kyu Hong, Hyung Ryun Jang, Dae Ho Lim, Dong Jun Yoo and Yong Kang[†]

Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

(Received 2 February 2016; Received in revised form 4 August 2016; accepted 17 August 2016)

요 약

점성유체 액체-고체 순환유동층에서 고체순환속도의 특성에 대해 고찰하였다. 주액체유속, 2차액체의 유속, 유동입자의 크기, 액체의 점도 그리고 입자의 재순환을 위한 장치에서 입자 저장층의 높이가 입자의 순환속도에 미치는 영향을 검토하였다. 입자의 순환속도는 주액체의 유속, 2차액체의 유속, 액체의 점도 그리고 입자저장층의 높이가 증가함에 따라 증가하였으나, 유동입자의 크기가 증가함에 따라서는 감소하였다. 순환유동층의 상승관에서 유동입자의 상승속도는 주액체유속과 2차액체의 유속비(U_{L1}/U_{L2})와 유동입자의 크기가 증가함에 따라 감소하였다. 상승관에서 입자의 미끄러짐속도 즉, 연속액상의 유속과 유동입자의 상승속도비(U_L/U_S)는 연속 액상의 점도가 증가함에 따라 감소하였으나, 유동입자의 크기가 증가함에 따라 증가하였다. 본 연구에서 구한 고체 순환속도는 실험변수 및 무차원군의 함수들로 상관식을 얻을 수 있었다.

Abstract – Characteristics of solid circulation rate in the liquid-solid circulating fluidized beds with viscous liquid medium were investigated. Effects of primary and secondary liquid velocities, particle size, liquid viscosity and height of solid particles piled up in the solid recycle device on the solid circulation rate were considered. The solid circulation rate increased with increasing primary and secondary liquid velocities, liquid viscosity and height of solid particles in the downcomer, but it decreased with increasing particle size. The particle rising velocity in the riser decreased with increasing the ratio of U_{L1}/U_{L2} and particle size. The slip velocity of liquid and particle, U_L/U_S , decreased with increasing liquid viscosity but it increased with increasing particle size. The values of solid circulation rate were well correlated in terms of operating variables and dimensionless groups.

Key words: Solid circulation rate, Viscous, Liquid-solid, Circulating fluidized bed

1. 서 론

액체-고체 유동층은 연속액상에서 입자들을 유동화하므로 입자의 동특성을 활용할 수 있어서 공정 내부에서 열전달이나 혼합효과가 뛰어나고 액체-고체의 물질전달도 우수할 뿐만 아니라 연속적으로 운전이 가능하므로 생산효율이나 공정의 수율을 극대화 할 수 있는 등 다양한 장점을 가지고 있으므로 이에 대한 많은 연구들이 꾸준히 진행되었다[1-4]. 액체-고체 유동층은 연속액상의 유속이 유동입자

의 최소유동화속도(U_{mf})와 종말속도(terminal velocity)의 사이에서 운전해야 액체와 고체 유동입자들의 효과적인 접촉이 이루어지므로 액상의 유속에 의한 제한을 탈피하기 위한 연구들이 진행되고 있다.

생물화학공학, 촉매공학, 바이오의학, 음식 및 발효공학, 부품소재 공학, 미세분체공학, 환경공학 등의 분야에서 사용되는 고체유동입자는 대부분 다공성이며 그 밀도가 낮으므로 유동입자의 종말속도가 상대적으로 낮아 액체유속의 운전범위가 낮은 범위에 제한될 수 밖에 없어서 공정전체의 생산효율을 높일 수 없었다. 뿐만 아니라, 액체-고체 유동층을 응용하여 현장에 적용시킨 액체-고체 유동층 공정이나 반응기에서 실제 사용하는 대부분의 액상은 점성유체인 경우가 많기 때문에 사용하는 고체유동입자의 종말속도가 상대적으로 낮아져서 액체-고체 유동층공정이나 반응기의 운전범위가 국한될 수밖에 없었다[1-4].

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kangyong@cnu.ac.kr

*이 논문은 고려대학교 김성현 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.

액체-고체 유동층의 많은 장점들을 그대로 활용하면서도 공정의 운전범위를 효과적으로 넓히고 공정의 생산효율을 극대화시키기 위해 도입된 액체-고체 순환유동층에 대한 연구는 현시점에서 이러한 의미에서 매우 긴급하다고 하겠다. 액체-고체 순환유동층에서는 유동입자가 연속적으로 순환되므로 기존의 액체-고체 유동층에 비하여 액체의 유속이 빨라 액체-고체가 접촉하면서 흐르는 과정에서 발생하는 난류현상이 증가하여 열전달 및 물질전달의 효과가 뛰어난 것으로 발표되고 있다[5-9].

액체-고체 순환유동층의 가장 큰 특성인 고체유동입자의 순환에 대한 정보는 그러나 현재 국내·외를 막론하고 매우 미흡한 실정이다. 분산상으로 존재하는 고체유동입자가 순환되는 속도에 대한 연구는 몇몇 연구자들에 의해 수행되었으나 대부분 장치의 개발과 실험적 측정이 어려우므로 진행에 어려움을 겪고 있다[10-16]. 따라서, 본 연구에서는 점성유체 액체-고체 순환유동층에서 입자의 순환속도에 대해 고찰하였다. 주액체와 2차액체의 유속, 입자의 크기, 하강관에서 입자가 쌓인 높이 그리고 연속액상의 점도가 고체유동입자의 순환속도에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험

본 연구의 실험에 사용한 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같은 직경 0.102 m이고 높이가 3.5 m인 액체-고체 순환 유동층을 사용하였다.

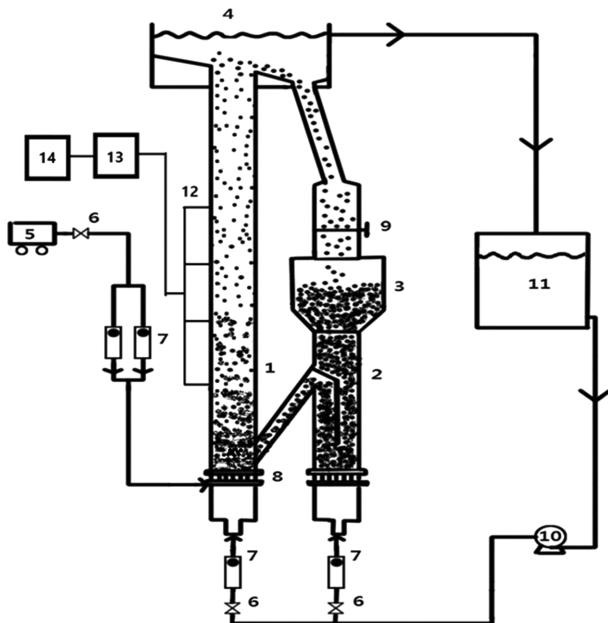


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | | |
|------------------|--------------------|----------------------|
| 1. Riser | 6. Control valve | 11. Liquid reservoir |
| 2. Down Comer | 7. Flowmeter | 12. pressure tap |
| 3. Hopper | 8. G/L distributor | 13. A/D converter |
| 4. L/S separator | 9. Butterfly valve | 14. Computer |
| 5. Compressor | 10. Pump | |

순환유동층은 상승관, 액체-고체 분리영역 그리고 고체입자 순환장치 등 3개의 부분으로 구성되었다[17-20]. 상승관에 유입되는 주액체는 상승관 밑 부분에 설치된 액체분산판을 통해 유입시켰으며 액체 유량기로 유속을 측정하였다. 고체입자 하강관 하부에 설치한 입자의 순환장치에 2차액체를 분산판을 통해 유입하였으며, 이 유속을 조절하고 유량을 측정하였다. 상승관의 상부에 위치한 액체와 고체의 분리영역은 밀도에 의해 액체상과 고체입자가 분리되도록 하였으며 분리된 액체는 액체저장조로 보내지고 고체 유동입자는 중력에 의해 하강관으로 내려가 입자저장조에 쌓여서 저장입자층을 형성하도록 하였다. 상승관에서 압력강하를 측정하기 위하여 고체입자가 재순환되는 입구로부터 0.5 m 윗부분에서부터 0.2 m의 간격으로 4개의 지점에 압력탭과 압력변환기를 설치하여 압력강하를 측정하였다. 고체입자순환속도는 일정한 운전조건의 정상상태에서 나비모양발브(Butterfly Valve)를 사용하여 하강관에 쌓인 입자의 양을 측정하여 얻었으며, 실험오차를 줄이기 위하여 같은 조건에서 3-4회 실시하여 평균값으로 결정하였다[17-20]. 연속액상인 액체의 점도를 변환시키기 위하여 CMC (Carboxymethyl Cellulose)수용액을 사용하였는데 Brookfield LVDVII Viscometer로 측정된 겔보기 점도(Apparent Viscosity) 범위는 $1.0 \sim 38.9 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 이었다. 본 연구의 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

고체유동입자는 직경이 0.5, 1.0, 2.0 그리고 $3.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ 이고 밀도가 2500 Kg/m^3 인 유리구슬을 사용하였다. 본 연구에서는 액체-고체 순환유동층에서 상승관의 하반부에 위치한 액체분산판을 통해 상승관에 직접 유입되는 액체의 유속을 주액체유속(Primary liquid velocity, U_{L1})이라 하고, 하강관을 통해 유입되는 액체의 유속을 2차액체유속(Secondary liquid velocity, U_{L2})이라 하였다. 하강관의 하부에 유입되는 2차액체는 하강관의 입자저장조에 있는 입자들을 중력과 압력구배에 의해 유동화시켜 상승관에 순환되도록 하였다. 상승관에서 액체의 유속 U_L 은 주액체의 유속 U_{L1} 과 2차액체유속 U_{L2} 의 합으로 결정하였는데, 이는 식 (1), (2)에 의해 확인할 수 있었다.

$$\varepsilon_L + \varepsilon_S = 1.0 \quad (1)$$

$$\Delta P/L = (\varepsilon_L \rho_L + \varepsilon_S \rho_S)g \quad (2)$$

즉, 식 (1), (2)에 의해 얻을 수 있는 상승관에서의 액체체류량(ε_L)값과 액체의 유속(U_L)과의 관계에서 상승관에서 액체의 유속을 주액체유속 U_{L1} 과 2차액체유속 U_{L2} 의 합으로 결정할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

액체-고체 순환유동층에서 상승관의 하반부에 유입되어 상승관을 흐르면 입자들을 유동화시키는 주 액체유속인 U_{L1} 이 고체 유동입자의 순환속도(Circulation velocity)에 미치는 영향을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 상승관에서 주 액체유속의 증가는 유동입자들이 순환하는 속도의 증가를 가져왔다. 이는 상승관에서 주

Table 1. Summary of experimental conditions

Solution	$\rho_L (\text{kg/m}^3)$	$K \times 10^3 (\text{Pa}\cdot\text{s})$	n	$\sigma_L, \times 10^3 (\text{N/m})$	$\mu_{L1}, \times 10^2 (\text{m/s})$	$\mu_{L2}, \times 10^2 (\text{m/s})$
Water	1000	1.000	1.000	72.9	25~34	12~19
CMC(1)	1001	21.69	0.882	73.2	25~34	12~19
CMC(2)	1002	43.82	0.847	73.3	25~34	12~19
CMC(3)	1003	71.64	0.825	73.6	25~34	12~19

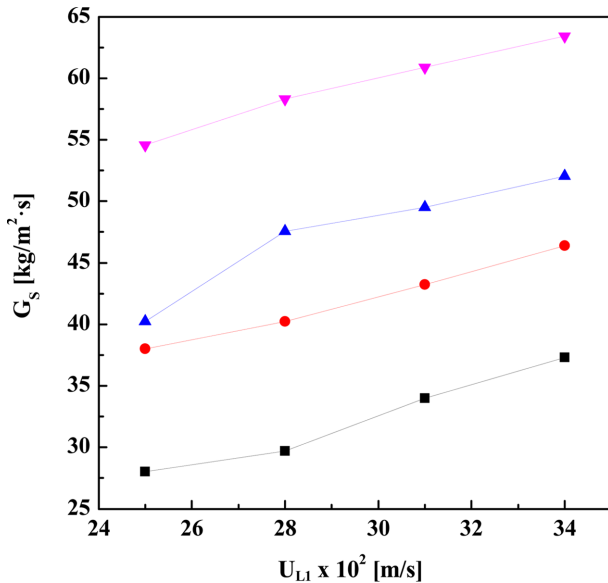


Fig. 2. Effects of primary liquid velocity on the solid circulation rate.

	■	●	▲	▼
$\mu_L \times 10^3$ [Pa·s]	11	24	38	38
$d_p \times 10^3$ [m]	2	2	2	1
$h \times 10^2$ [m]	130	130	150	150
$U_{L2} \times 10^2$ [m/s]	13	15	17	17

액체유속이 증가하면 상승관에서 비말동반(Entrained)되는 고체유동입자들의 양이 증가하므로 하강관 상부에서 하부로 이동되는 유동입자의 양이 증가되기 때문에 해석할 수 있다. 상승관에서 상승하는 주 액체의 유속이 증가하면 액체의 흐름에 의해 유동입자에 가해지는 Drag 힘이 증가하게 되어 중력에 의해 상승관에서 하강하려는 입자들을 상승하게 하여 결국 액체의 흐름과 함께 비말동반되어 하강관으로 이송된다고 할 수 있다.

하강관의 하부에서 유입되어 하강관의 입자저장층으로부터 상승관으로 입자를 이송하기 위한 2차액체유속의 변화가 유동입자의 순환속도에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 하강관에 유입되는 2차액체유속이 증가함에 따라 유동입자의 순환속도는 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 2차액체유속이 증가함에 따라 하강관의 하부에서 유동화 되는 고체유동입자들의 양이 증가하여 하강관에서 상승관으로 유입되는 유동입자의 양이 증가한다고 할 수 있다. Fig. 2와 3을 비교하여 보면, 고체 유동입자의 순환속도는 주액체유속의 영향보다 2차액체유속의 변화에 따른 영향이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 주액체의 유속변화에 따라 2차액체유속을 효과적으로 조절하여 고체유동입자의 순환속도를 조절할 수 있다고 하겠다[16-18].

유동입자의 크기가 유동입자의 순환속도에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 다른 모든 운전조건이 일정할 때 유동입자의 크기가 증가하면 고체순환속도는 점점 감소함을 알 수 있다. 이는 유동입자의 크기가 증가함에 따라 일정조건에서 중력의 작용에 의해 상승관에서 상승하는 유동입자의 상승속도가 감소하여 상승관에서 액체의 흐름과 함께 비말동반되는 유동입자의 양이 감소하여서 유동입자의 순환속도는 감소한다고 할 수 있다[17-19].

액체-고체 순환유동층의 하강관에서 저장입자층의 높이가 고체입자의 순환속도에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼

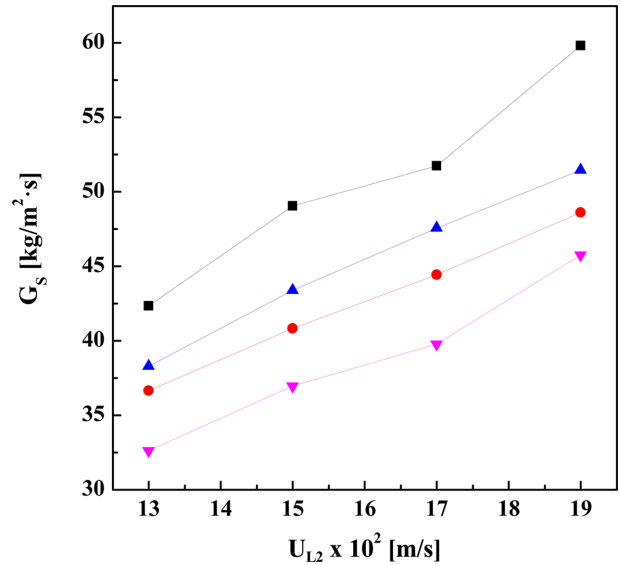


Fig. 3. Effects of secondary liquid velocity on the solid circulation rate.

	■	●	▲	▼
$\mu_L \times 10^3$ [Pa·s]	11	24	38	38
$d_p \times 10^3$ [m]	1	2	2	3
$h \times 10^2$ [m]	130	150	150	170
$U_{L1} \times 10^2$ [m/s]	25	25	28	28

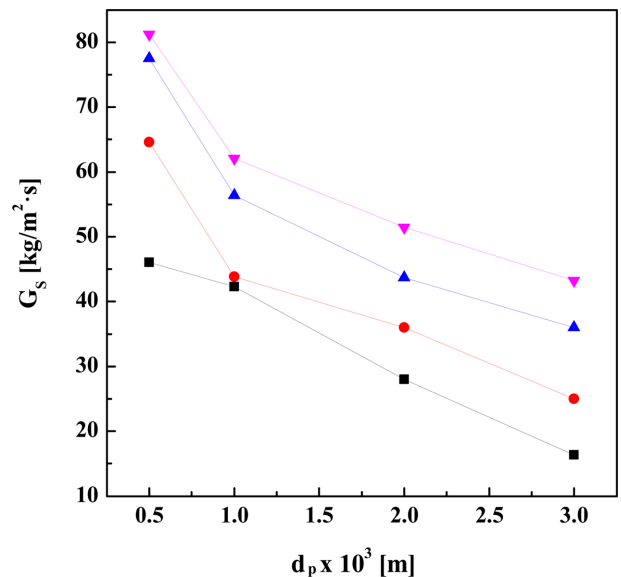


Fig. 4. Effects of particle size on the solid circulation rate.

	■	●	▲	▼
$\mu_L \times 10^3$ [Pa·s]	11	11	24	24
$h \times 10^2$ [m]	130	130	150	150
$U_{L1} \times 10^2$ [m/s]	25	28	28	31
$U_{L2} \times 10^2$ [m/s]	13	15	15	17

수 있듯이 하강관에 쌓여있는 저장입자층의 높이가 증가함에 따라 하강관의 하부에서 유입되는 2차액체 유체에 의해 유동되는 입자의 양이 증가되어 하강관에서 상승관으로 이송되는 고체입자의 양이 증가하므로 고체입자의 순환속도는 증가한다. 이는 하강관에 쌓여있는 저장입자층의 높이가 증가함에 따라 입자들에 작용하는 중력

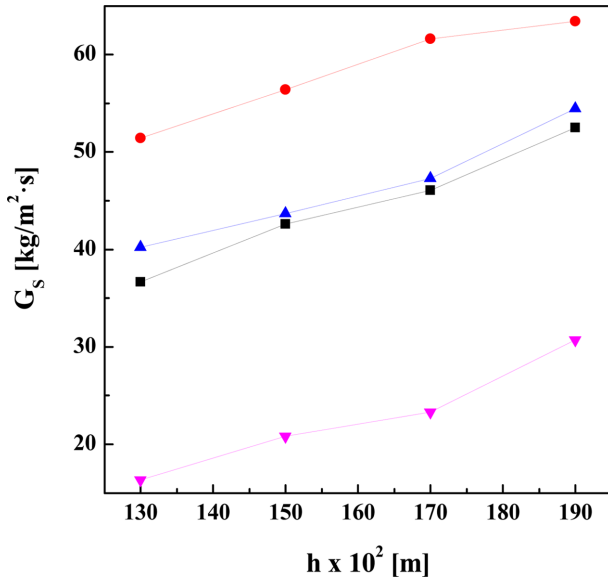


Fig. 5. Effects of solid particles piled up in the solid recycle device on the solid circulation rate.

	■	●	▲	▼
$\mu_L \times 10^3$ [Pa·s]	11	24	24	11
$d_p \times 10^3$ [m]	1	1	2	3
$U_{L1} \times 10^2$ [m/s]	25	28	28	25
$U_{L2} \times 10^2$ [m/s]	13	15	15	13

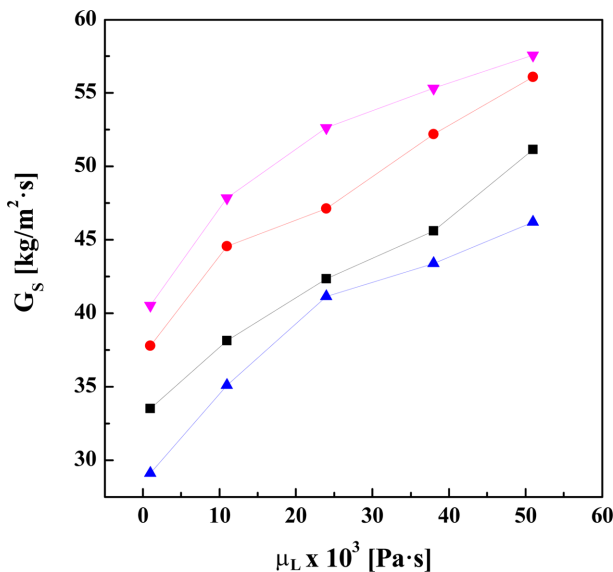


Fig. 6. Effects of liquid viscosity on the solid circulation rate.

	■	●	▲	▼
$d_p \times 10^3$ [m]	1	1	2	2
$h \times 10^3$ [m]	130	150	150	170
$U_{L1} \times 10^2$ [m/s]	25	25	28	28
$U_{L2} \times 10^2$ [m/s]	13	15	15	17

의 힘이 증가되어 입자들이 하강관의 하부로 이동하려는 경향이 증가되기 때문으로 해석할 수 있다[18,19].

액체-고체 순환유동층에서 연속상인 액체의 점도가 고체입자의 순환속도에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있

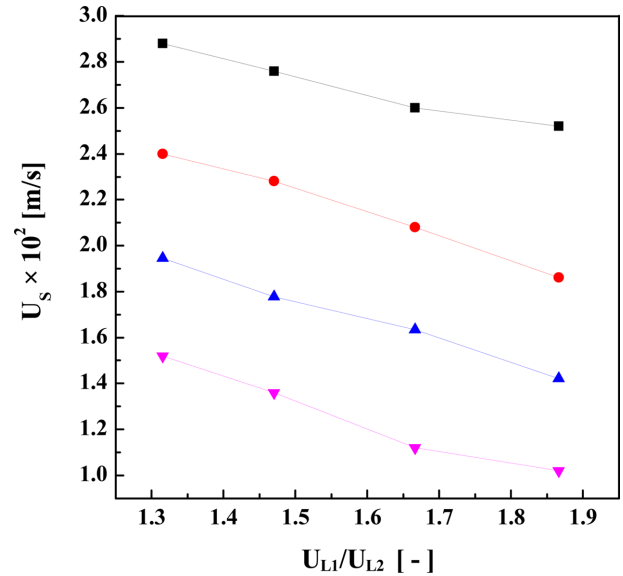


Fig. 7. Relation between the particle rising velocity and the ratio of U_{L1}/U_{L2} in the riser of viscous liquid-solid circulating fluidized beds ($\mu_L=0.024$ Pa·s, $h=1.5$ m).

	■	●	▲	▼
$d_p \times 10^3$ [m]	0.5	1	2	3

듯이 연속상인 액체의 점도가 증가함에 따라 고체입자의 순환속도는 증가함을 알 수 있다. 이는 액체-고체 순환유동층에서 고체입자는 연속상인 액체의 흐름에 분산상으로 존재하는데 액체의 점도가 증가함에 따라 액체의 흐름에 의해 고체유동입자에 전달되는 Drag 힘이 증가하므로, 상승관에서 액체의 흐름에 의해 비말동반되는 고체입자의 양이 많아지고, 하강관의 하부에서 유입되는 2차액체에 의해 유동되는 고체입자의 양도 많아지기 때문에 하강관에서상승관의 하부에 순환되는 고체입자들의 순환속도도 증가한다고 할 수 있다[17-20].

한편, 액체-고체 순환유동층의 상승관에서 유동입자의 상승속도 U_s 는 식 (3)과 같이 쓸 수 있는데, 상승관에 유입되는 주 액체의 속도와 2차액체의 속도 비인 U_{L1}/U_{L2} 가 유동입자의 상승속도에 미치는 영향을 분석하고자 이들의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 상승관에서 유동입자의 상승속도는

$$U_s = G_s / \rho_s \quad (3)$$

U_{L1}/U_{L2} 의 비와 입자의 크기가 증가함에 따라 감소하였다. 이는 상승관에서 유동입자의 상승속도에 2차액체의 유속이 미치는 영향이 크를 나타내는데 그 이유는 2차액체의 유속이 증가함에 따라 입자순환장치에서 상승관에 유입되는 유동입자의 양이 증가하기 때문으로 해석할 수 있다. 액체-고체 순환유동층의 상승관에서 상승하는 연속상인 액체와 분산상으로 존재하며 유동하는 유동입자들의 상승속도의 차는 이들 두 상들 간의 불균일계 접촉현상을 유발하게 된다. 즉, 이들 두 상들의 불균일계 접촉에 의해 상승관의 내부에서 난류현상이 일어나게 되며 이는 다른 두 상들 간뿐만 아니라 연속상인 액체상의 내부에서도 운동량과 열 및 물질들이 이동하는 현상을 유발하게 되므로 이들 상들 간의 접촉 효과와 효율은 매우 중요한 요소가 된다[10-14].

상승관에서 흐르는 두 상들 간의 접촉효과는 두 상들의 상대적인 상승속도의 차에 큰 영향을 받으므로, 본 연구에서는 연속 액상의

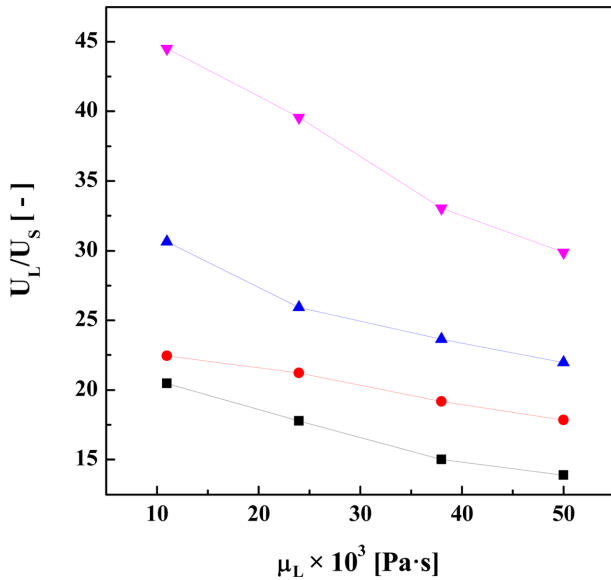


Fig. 8. Effects of liquid viscosity on the U_L/U_S in the riser of viscous liquid-solid circulating fluidized beds ($h=1.5$ m).

$d_p \times 10^3$ [m] ■ ● ▲ ▼
0.5 1 2 3

점도가 액체-고체상들의 상승속도 비인 U_L/U_S 에 미치는 영향을 고찰하였다. 즉, Fig. 8에서 볼 수 있듯이 액체의 점도가 증가함에 따라 U_L/U_S 의 값은 감소함을 알 수 있다. 이는 다른 운전조건이 동일한 조건에서 연속상인 액체의 점도가 증가하면 하강관에서 상승관에 유입되는 고체입자의 순환속도가 증가하고 또 상승관에서 상승하는 고체유동입자의 속도가 증가하기 때문으로 해석할 수 있다. 이와 같은 결과는 액체-고체 순환유동층에서 액체의 점도가 증가함에 따라 유동반응기의 상승관에서 일어나는 난류현상이 감소한다는 것을 의미하므로 운동량이나 열 및 물질전달 등의 이동현상도 감소한다고 예견할 수 있다. 그러나 Fig. 8에서 유동입자의 크기가 증가하면 상승관에서 액체의 유속과 유동입자의 상승속도 비는 점점 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 유동입자의 크기가 증가함에 따라 상승관에서 난류현상이 점점 증가한다고 할 수 있다. 실제로 다상순환유동층에서 연속액상의 점도가 증가하면 이와 같은 이동현상은 감소하였으나 유동입자의 크기가 증가하면 증가하는 것으로 발표되고 있다[1-5].

본 연구에서 구한 고체입자의 순환속도 G_S 는 $0.5 \times 10^{-3} \text{ m} \leq d_p \leq 3 \times 10^{-3} \text{ m}$ 와 $1.0 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s} \leq \mu_L \leq 38.9 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 의 범위에서 식 (4)와 같이 각 운전변수들의 함수인 상관식으로 나타낼 수 있었는데, 이 식은 상관계수 0.941로 실험결과를 잘 나타내었다. 또한, 상승관에서 상승하는 연속액상과 유동입자의 속도비인 미끄럼속도(U_L/U_S)는 무차원군으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있었다.

$$G_S = 31.016 U_{L1}^{0.553} L_{L2}^{0.635} d_p^{-0.392} \mu_L^{0.101} h^{0.303} \quad (4)$$

식 (5)에서 $\left[\frac{d_p U_L \rho_L}{\mu_L} \right]$ 은 유동입자의 레이놀즈 수를 나타내며 $\left[\frac{d_p}{h} \right]$ 는 유동 입자의 크기와 입자들이 하강관에 쌓인 높이의 비를 나타낸다. 식 (5)는 상관계수가 0.911로 실험결과를 잘 나타내었다.

$$\frac{U_L \rho_L}{G_S} \left[= \frac{U_L}{u_s} \right] = 119.821 \left[\frac{d_p U_L \rho_L}{\mu_L} \right]^{0.112} \left[\frac{d_p}{h} \right]^{0.289} \quad (5)$$

4. 결 론

연속상인 액체가 점성유체인 액체-고체 순환유동층에서 유동고체 입자의 순환속도 특성에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

상승관에 직접 유입되는 주액체의 유속과 하강관에 유입되는 2차 액체의 유속, 연속액상인 액체의 점도 그리고 하강관에 쌓이는 저장 입자층의 높이가 증가함에 따라 고체입자들의 순환속도는 증가하였으나 유동입자의 크기가 증가함에 따라 고체입자의 순환속도는 감소하였다. 상승관에서 상승하는 유동입자의 속도는 주액체유속과 2차액체유속의 비와 유동입자의 크기가 증가함에 따라 감소하였다. 상승관에서 연속상인 액체의 유속과 분산상인 고체유동입자의 상승속도비는 연속상인 액체의 점도가 증가함에 따라 감소하였으나, 유동입자의 크기가 증가함에 따라 증가하였다. 이와같은 결과는 점성 유체 액체-고체 유동층에서 액체의 유속이 증가하면 상승관에서 일어나는 난류현상의 강도가 감소하나 유동입자의 크기가 증가하면 난류현상의 강도가 증가하는 것을 설명해주는 중요한 단서가 된다고 하겠다.

사용부호

d_p	: particle diameter [m]
G_S	: solid circulation rate [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$]
K	: fluid consistency index [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$]
n	: flow behavior index
U_{L1}	: primary superficial liquid velocity [m/s]
U_{L2}	: secondary superficial liquid velocity [m/s]
U_L	: superficial liquid velocity [m/s]
U_S	: superficial solid velocity [m/s]
μ_L	: liquid viscosity [Pa·s]
ρ_L	: liquid density [kg/m^3]
ρ_S	: solid density [kg/m^3]
σ_L	: surface tension [N/m]

감 사

본 연구는 충남대학교 차세대연구과제지원(2015년)으로 수행되었습니다.

Reference

1. Fan, L. S., Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering, Butterworth, Boston, U.S.A.(1989).
2. Kim, S. D. and Kang, Y., "Dispersed Phase Characteristics in Three-phase Fluidized Beds," Mixed Flow Hydrodynamics, Advances in Engineering Fluid Mechanics, Gulf Pub. Co., New York, U.S.A. (1996).
3. Kim, S. D. and Kang, Y., "Hydrodynamics, Heat and Mass Transfer in Inverse and Circulating Three-phase Fluidized-bed Reactors for Wastewater Treatment," *Surf. Sci., Catal.*, **159**, 103-108(2006).
4. Atta, A., Razzak, S. A., Nigam, K. D. P. and Zhu, J. X., "(Gas)-liquid-solid Circulating Fluidized Bed Reactors: Characteristics and Applications," *I&EC Research*, **48**, 7876-7892(2009).

5. Cho, Y. J., Song, P. S., Lee, C. K., 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.*, **192**, 257-271(2005).
6. Shin, K. S., Song, P. S., Lee, C. K., 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).
7. Vidyasagar, S., Krishnaiah, K. and Sai, P. S. T., "Macroscopic Properties of Liquid-solid Circulating Fluidized Bed with Viscous Liquid Medium," *Chem. Eng. Process: Process Intensif.*, **50**, 42-52(2011).
8. Natarajan, P., Velraj, R. and Seeniraj, R. V., "Hydrodynamic Similarity in Liquid-solid Circulating Fluidized Bed Risers," *Powder Technol.*, **264**, 166-176(2014).
9. Song, L. and Zhu, J., "Experimental Investigation of the Effects of Particle Properties on Solid Holdup in an LSCFB Riser," *Chem. Eng. J.*, **197**, 322-329(2012).
10. van der Meer, E. H., Thorpe, R. B. and Davidson, J. F., "Dimensionless Groups for Practicable Similarity of Circulating Fluidized Beds," *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 5368-5376(1999).
11. Gnanasundaram, N., Loganathan, M. and Perumal, K., "Solid Holdup in Liquid Solid Circulating Fluidized Bed with Viscous Liquid Medium," *Alexandria Eng. J.*, **53**, 958-968(2014).
12. Lim, D. H., Lim, H., Jin, H. R. and Kang, Y., "Holdup and Flow Behavior of Fluidized Solid Particles in a Liquid-solid Circulating Fluidized Bed," *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(3), 371-377(2014).
13. Lan, Q., Bassi, A. S., Zhu, J. X. J. and Margaritis, A., "Continuous Protein Recovery from Whey Using with a Liquid-solid Circulating Fluidized Bed Ion Exchange Extraction," *Biotech. Bioeng.*, **78**, 157-163(2002).
14. Petal, A., Zhu, J. and Nakhla, G., "Simultaneous Carbon, Nitrogen and Phosphorous Removal from Municipal Wastewater in a Circulating Fluidized Bed Bioreactor," *Chemosphere*, **65**, 1103-1112(2006).
15. Petal, M., Bassi, A. S. and Gomaa, H., "Investigation of a Dual-particle Liquid-solid Circulating Fluidized Bed Bioreactor for Extractive Fermentation of Lactic Acid," *Biotechnol. Prog.*, **24**, 821-831(2008).
16. Lim, D. H., Jang, J. H., Kang, Y. and Jun, K. W., "Flow Behavior of Wakes in a Three-phase Slurry Bubble Column with Viscous Liquid Medium," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(3), 974-979(2011).
17. 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 Processing Technol.*, **108**, 2-7(2013).
18. 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).
19. 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).
20. Lee, J. S., Jin, H. R., Lim, H., Lim, D. H., Kang, Y., Kim, S. D. and Jun, K. W., "Interfacial Area and Liquid-side and Overall Mass Transfer Coefficients in a Three-phase Circulating Fluidized Bed," *Chem. Eng. Sci.*, **100**, 203-261(2013).