

유동층 액-액 추출기에서 액적의 크기 및 상승속도

정성현 · 김재한 · 강태규 · 강 용[†] · 김상돈*

충남대학교 화학공학부, *한국과학기술원 생명화학공학과
(2004년 5월 27일 접수, 2004년 10월 19일 채택)

Size and Rising Velocity of Liquid Drops in Liquid-Liquid Fluidized-Bed Extractors

Sung-Hyun Jung, Jae-Han Kim, Tae-Gyu Kang, Yong Kang[†], and Sang Done Kim*

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

*Department of Biomolecular and Chemical Engineering KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received May 27, 2004; accepted October 19, 2004)

직경이 0.102 m이고 높이가 2.5 m인 유동층 액-액 추출기에서 액적의 크기와 분포 그리고 상승속도의 특성에 대하여 연구하였다. 분산상(0~0.04 m/s)과 연속상(0.02~0.14 m/s)의 유속변화, 그리고 유동고체 입자의 크기변화(1.0, 2.1, 3.0, 6.0 mm)에 따른 액적의 특성을 검토하였다. 액적의 흐름 거동은 추출기 내부에서 액적의 흐름 거동은 분산상과 연속상의 증가와 액적의 크기에 따라 상당히 영향을 받았다. 액적의 크기는 분산상의 속도가 증가함에 따라 증가하였지만, 유동입자의 크기가 증가함에 따라서는 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 연속상의 유속이 증가함에 따른 액적의 크기는 국부적인 최대값을 나타낸 후 감소하는 경향을 나타내었다. 액적의 크기와 상승속도는 실험변수들과 잘 상관됨을 알 수 있었다.

Characteristics of size, rising velocity and distribution of liquid drops have been investigated in an immiscible liquid-liquid fluidized-bed extractor whose diameter was 0.102 m and 2.5 m in height. Effects of velocities of dispersed (0~0.04 m/s) and continuous (0.02~0.14 m/s) liquid phases and fluidized particle size (1, 2.1, 3 or 6 mm) on the liquid drop properties in the extractor have been determined. The resultant flow behavior of liquid drops became more complicated with increasing the velocity of dispersed or continuous liquid phase. The resultant flow behavior of liquid drops depended strongly upon the drop size and its distribution. The drop size increased with increasing dispersed phase velocity, but decreased with increasing particle size. However, the size of liquid drop exhibited a local maximum with increasing continuous liquid velocity. The size and rising velocity of liquid drops have been well correlated in terms of operating parameters.

Keywords: liquid drop size, drop rising velocity, fluidized-bed extractor, liquid-liquid-solid

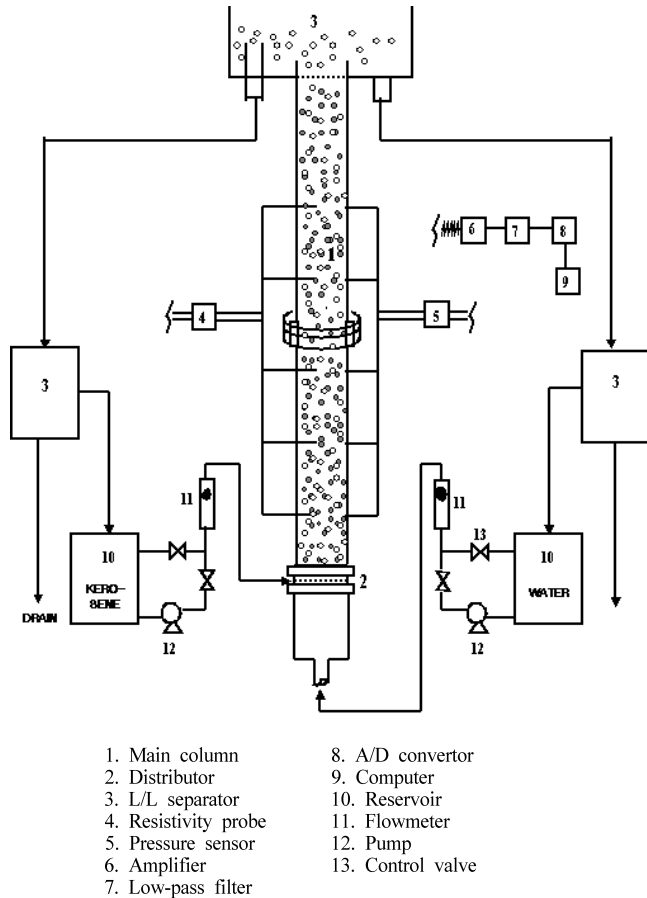
1. 서 론

액체-액체 유동층은 다른 불균일 접촉공정이나 반응기에 비하여 각 상들의 효과적인 접촉과 용이한 연속조작에 기인하는 매우 높은 열 및 물질전달 등의 장점 때문에 화학공정, 석유화학, 생물화학 및 환경공학의 분야에 널리 이용되어질 수 있다. 특히, 액-액 유동층은 섞이지 않는 액체로부터 추출에 의해 반응물을 회수하거나 섞이지 않는 액-액 촉매반응에 매우 유용하게 응용될 수 있을 뿐만 아니라, 이 반응기는 액체의 성질변화나 액상의 별도처리 없이도 액상으로부터 일정한 성분의 추출이나 분리를 쉽게 할 수 있다는 장점을 가지고 있다[1-3]. 따라서, 액체-액체 계면에서 동반되는 화학반응을 이용하여 증금속의 회수 공정이나 에스테르의 수소첨가공정 등을 개발하기 위한 연구들이 꾸준히 진행되고 있다[4,7].

액체-액체 유동층 접촉이나 추출공정에서 가장 중요한 요소 중의 하나는 액체-액체의 접촉 계면 특성과 이 계면에서의 물질전달 현상인데, 액체-액체 유동층을 이용한 반응기나 추출공정에서 서로 섞이지 않는 두 액체들은 연속상과 액적(liquid drop)의 분산상으로 존재하게 되므로, 이들 연속상과 분산 액적의 흐름과 접촉현상은 액체-액체 유동층 추출공정의 특성을 결정한다고 할 수 있다. 또한, 액-액 유동층 반응기에서 액적의 크기 등 흐름 특성은 분산상과 연속상 사이의 물질전달 계수의 결정에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 액적의 크기와 상승속도는 유동층 추출 반응기의 추출 반응 효율과 성능을 결정짓는 중요한 변수라 할 수 있다. 뿐만 아니라, 유동층 추출기 내부에서 분산액적의 거동은 열과 운동량 전달에도 매우 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에 분산 액적의 흐름과 접촉거동에 대한 정보는 액체-액체 유동층 추출기의 운전이나 설계에 필수적인 요소라 할 수 있다[8-13].

그러나, 지금까지 몇몇 연구자들이 이에 대한 연구를 수행해 왔지만[14], 서로 섞이지 않는 액-액 유동층 계에서 액적의 특성과 분포에

† 주 저자(e-mail: kangyong@cnu.ac.kr)



- 1. Main column
- 2. Distributor
- 3. L/L separator
- 4. Resistivity probe
- 5. Pressure sensor
- 6. Amplifier
- 7. Low-pass filter
- 8. A/D converter
- 9. Computer
- 10. Reservoir
- 11. Flowmeter
- 12. Pump
- 13. Control valve

Figure 1. Experimental apparatus of liquid-liquid fluidized-bed extractor.

대한 연구는 국내·외를 막론하고 매우 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 액-액 유동층 추출기에서 액적의 크기 및 상승속도를 이중저항 탐침법에 의해 측정하고 이를 분석함으로써 액-액 유동층 추출공정에서 액적의 흐름 거동과 그 특성을 검토하였다. 또한, 액-액 추출기 내부에서 연속상과 분산상의 유속과 유동입자의 크기가 이들 액적의 크기와 상승 속도에 미치는 영향을 고찰함으로써 액체-액체의 접촉에 의한 흡착, 흡수 및 액-액 반응을 연속적이고 경제적이며 매우 효율적으로 수행할 수 있는 액체-액체 유동층 추출 공정의 운전이나 설계에 필수적인 공학적 자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험

본 연구의 실험은 Figure 1에서 보는 바와 같이 직경이 0.102 m이고 높이가 2.5 m인 내열 유리관(pyrex glass column)에서 수행하였다 [11,14]. 고체입자는 연속상의 분배기로서 사용되는 직경이 3 mm이고 균일하게 분포된 147개의 오리피스를 가진 perforated 판이 지지하고 있다. 분배기는 주 반응기 부분과 액체 저장탱크에서 2.54 cm 직경의 관을 통해 연속상이 유입되는 스테인리스 스틸 분배기 사이에 위치한다. 분산상인 등유는 직경이 6.35 mm의 관에 2 mm 직경의 오리피스 28개를 설치한 4개의 분배관을 통해 상승관에 주입하였다. 연속상과 분산상의 흐름 유속은 유량계로 측정하였으며, 구형밸브(globe valve)를 이용하여 유동층에 유입되는 유량을 조절하였다.

Table 1. Physical Properties of Liquids at 20 °C

Liquid phase	Density [kg/m ³]	Viscosity [mPa.s]	Thermal Conductivity [mW/mK]	Surface Tension [mN/m]
Water	1000	1.0	600	72.0
Kerosene	780	2.5	150	28.0

연속상과 분산상의 체류량은 압력강화와 층높이 그리고 유체와 고체 특성으로부터 얻었다. 본 연구에서 연속상으로는 물을 사용하였으며, 분산상은 등유를 그리고 고체상으로는 밀도가 2500 kg/m³이고 직경이 각각 1.0, 2.1, 3.0, 6.0 mm인 유리 구슬을 사용하였다. 물과 등유의 물리적인 특성은 Table 1에 요약하여 나타내었다. 분산상과 연속상의 공탕 속도(superficial velocity)의 범위는 각각 0~0.04 m/s, 0.02~0.14 m/s이었다. 연속상과 분산상의 혼합 유출액은 3개의 경사분리기(decant)에 의해 분리시켰다. 팽창된 층의 높이는 측정된 기술기의 변화점을 이용하여 얻을 수 있었다[15].

액적 상당길이와 상승속도로 표시되는 액적 크기는 이중저항 탐침법에 의해 측정되었다[16]. 1.75 V의 직류가 흐르는 탐침은 분산상과 연속상 사이에서의 전도도 차이를 측정하였다. 이중저항 탐침은 에폭시 수지로 코팅된 직경 7 mm의 스테인리스스틸로 구성되어 있으며, 분배기로부터 측방향으로 1.0 m 떨어진 높이의 관의 중앙 지점에 설치하였다. 두 탐침의 tip 간격은 수평으로 2 mm 이었고, 직경이 0.2 mm인 백금선을 사용하였다. 각 탐침의 회로에서 얻어진 아날로그 신호는 A/D 변환기를 이용하여 디지털 자료로 변환하였다. 자료 획득 장치(DT2805 Lab Card)에 의해 얻어진 자료의 측정 속도는 500 Hz로 15 s 동안 측정하였으며, 이 자료들은 off-line으로 해석하였다. 본 연구에서 이중저항 탐침법에 의한 액적의 크기는 0.01~9.0 mm의 범위에서 계산될 수 있었다[14,15]. 물과 등유(kerosene)의 저항(resistivity)차는 액체-액체 및 액체-액체-고체 유동층에서 삼상유동층이나 삼상순환유동층에서의 물과 기체의 저항차보다 작게 발생하므로 그 차이를 높이기 위해 물에 0.1 N 농도의 NaOH 수용액을 주입하였다. 액적의 크기와 상승속도는 수정되고 디지털화된 탐침신호와 기포 지체시간의 관계로부터 계산되었다[14].

3. 결과 및 고찰

액적의 상당길이는 탐침의 두 tip에 의해 측정된 디지털 자료로부터 결정된다. Figure 2는 두 탐침 사이에서 얻어진 전형적인 전류신호로서 이 신호들은 디지털 자료를 전환하기 위해 수정되고 디지털화되어야 한다. 액적 상당길이의 수밀도 분포는 Figure 3에서 보는 바와 같이 대수 정규(logarithmic normal) 분포로 표현할 수 있다. 액적의 상당길이의 평균값은 이 분포 곡선에 의해 결정된다. Figure 3에서 볼 수 있듯이 분산 액상(U_d)의 유속이 증가함에 따라 액적의 크기 분포는 더욱 넓어지며 평균값이 증가하는 것을 알 수 있다.

액체-액체 유동층 추출기에서 분산상의 유속(U_d)이 액적 상당길이(D_d)에 미치는 영향을 Figure 4에 나타내었다. 이 그림에서 액적의 상당길이는 분산상의 유속이 증가함에 따라 점차적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 분산상의 유속이 증가함에 따라 상승관에 존재하는 액적의 체류량과 빈도수가 증가하여 액적의 합체 현상이 증가하기 때문이다. 또한 분산상의 유속이 증가함에 따라 액적의 크기가 증가하는 쪽은 직경이 3.0이나 6.0 mm의 유리구슬을 포함한 상승관보다 직경이 1.0이나 2.1 mm의 유리구슬을 포함한 상승관에서 크게 나타

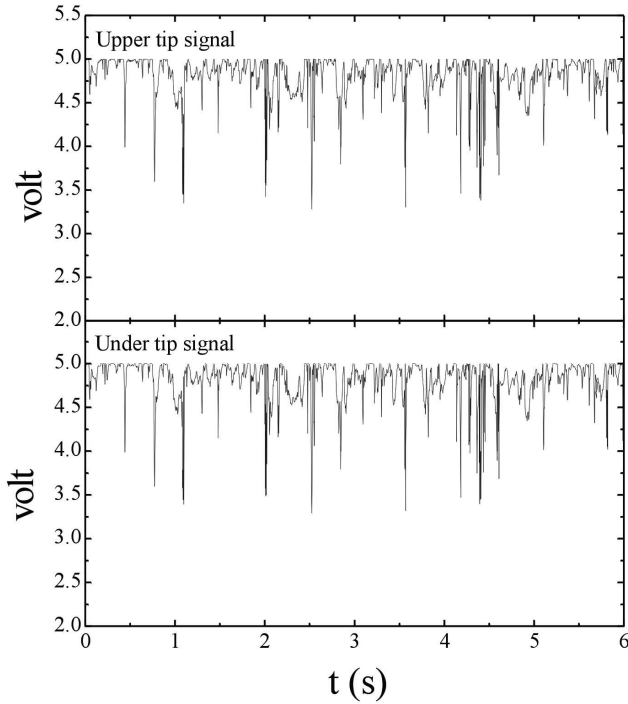


Figure 2. Typical output signals from the resistivity probe ($U_c = 0.06 \text{ ms}^{-1}$, $U_d = 0.02 \text{ ms}^{-1}$, $d_p = 2.1 \text{ mm}$).

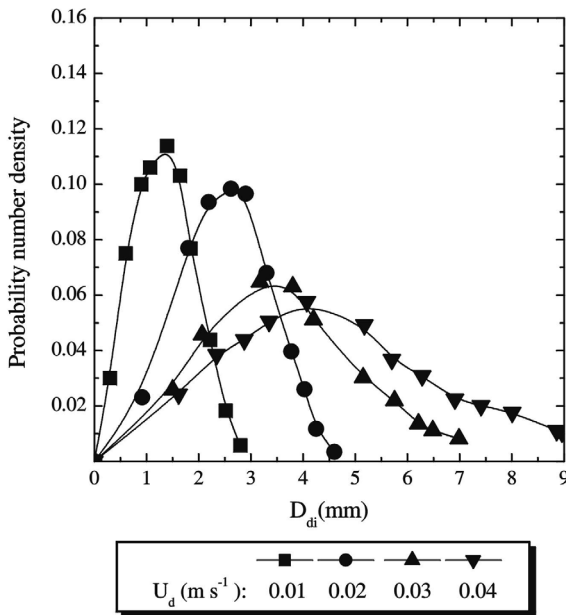


Figure 3. Probability density of the chord length of liquid drop in the liquid-liquid fluidized-bed extractors ($U_c = 0.04 \text{ ms}^{-1}$, $d_p = 1 \text{ mm}$).

남을 알 수 있는데, 이는 상대적으로 큰 고체입자($d_p = 3.0, 6.0 \text{ mm}$)는 기-액-고 유동층에서 액적의 파괴 잠재력(breaking potential)을 가지고 있기 때문이다[8,17].

액-액 유동층 추출기에서 액적의 상당길이에 대한 연속 액체 유속의 영향을 Figure 5와 Figure 6에 나타내었다. 1.0 mm, 2.1 mm 유리구슬을 포함한 상승관에서 연속상의 유속이 증가함에 따라 액적의 상당

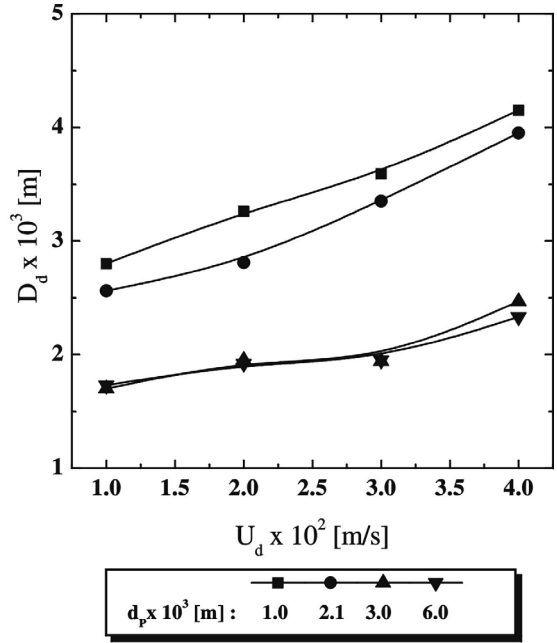


Figure 4. Effects of U_d on D_d in the liquid-liquid fluidized-bed extractors ($U_c = 0.06 \text{ m/s}$).

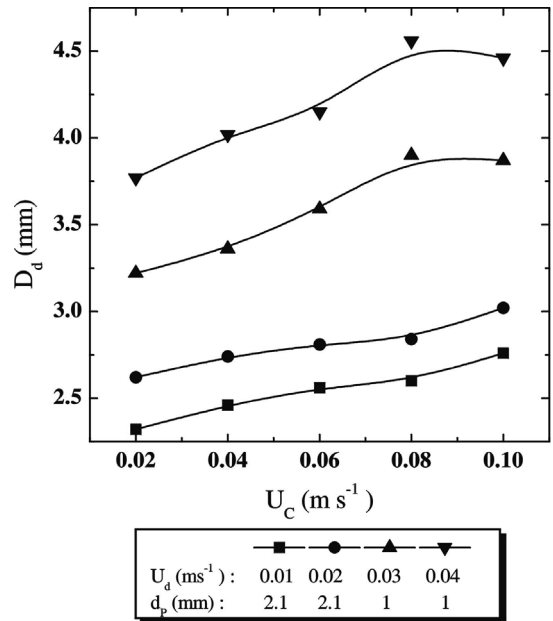


Figure 5. Effects of U_c on D_d in the liquid-liquid fluidized-bed extractors.

길이는 점차적으로 증가하였다(Figure 5). 이는 연속상의 유속이 증가함에 따라 부분적으로 층이 팽창할 뿐만 아니라, 상승하는 액적에 대한 항력의 증가에 따라 액적의 운동성이 매우 증가하기 때문이다. 즉, 상대적으로 작은 고체 입자는 관성력이 부족하므로 액적을 분쇄할 수가 없어서 1.0, 2.1 mm의 유리구슬을 포함한 유동층에서는 액적 운동성의 증가는 액적의 합체를 증가시킨다. 보통 분산상(등유)이 연속상(물)보다 쉽게 유리 표면과 접촉하며, 이것이 슬러리로부터 용매를 추출하는 경우에 액적의 합체를 보다 증가시킨다는 것은 이미 알려진

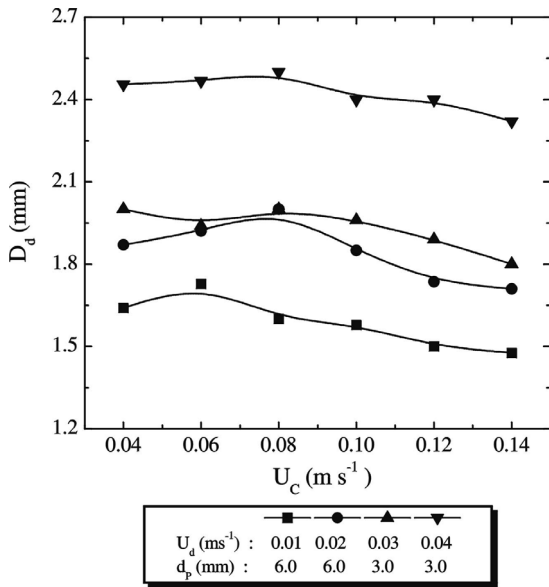


Figure 6. Effects of U_c on D_d in the liquid-liquid fluidized-bed extractors.

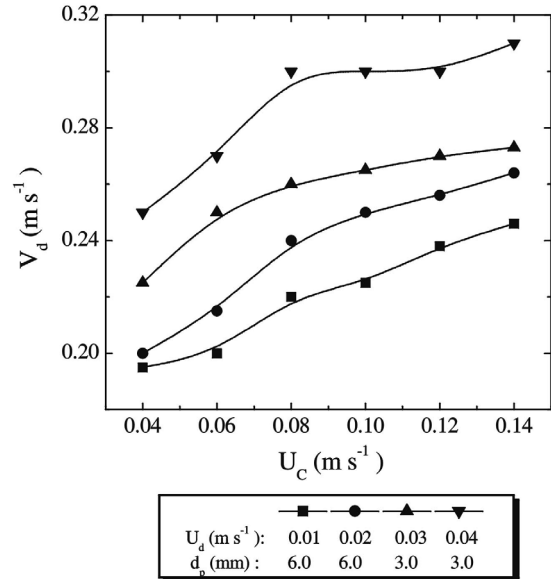


Figure 8. Effects of U_c on V_d in the liquid-liquid fluidized-bed extractors.

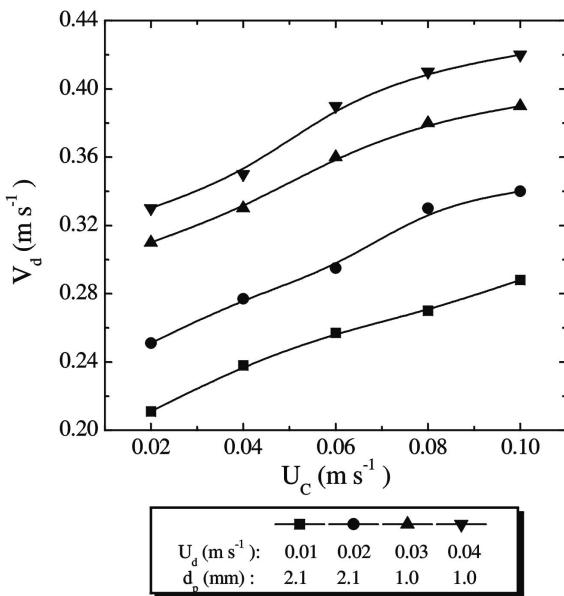


Figure 7. Effects of U_c on V_d in the liquid-liquid fluidized-bed extractors.

사실이다[18]. 왜냐하면 등유의 점성은 물의 점성보다 크지만 표면장력은 물보다 작기 때문이다(Table 1). 그러나 3.0 mm, 6.0 mm의 유리 구슬을 포함한 유동층(Figure 6)에서 액적의 상당길이는 연속상의 유속이 증가함에 따라 낮은 유속에서는 증가하지만 연속상의 크기가 더욱 증가함에 따라서는 국부적인 최대값을 나타낸 후 감소하는 경향을 나타낸다. 상대적으로 높은 연속상의 유속에서는 연속상의 유속이 증가함에 따라 액적의 상당길이가 증가하지 않고 약간 감소하는데, 이는 액적의 분쇄 잠재력을 가진 유동 입자의 움직임이 작아지기 때문이다.

Figure 7과 Figure 8은 분산상과 연속상의 유속 증가에 따른 액적의

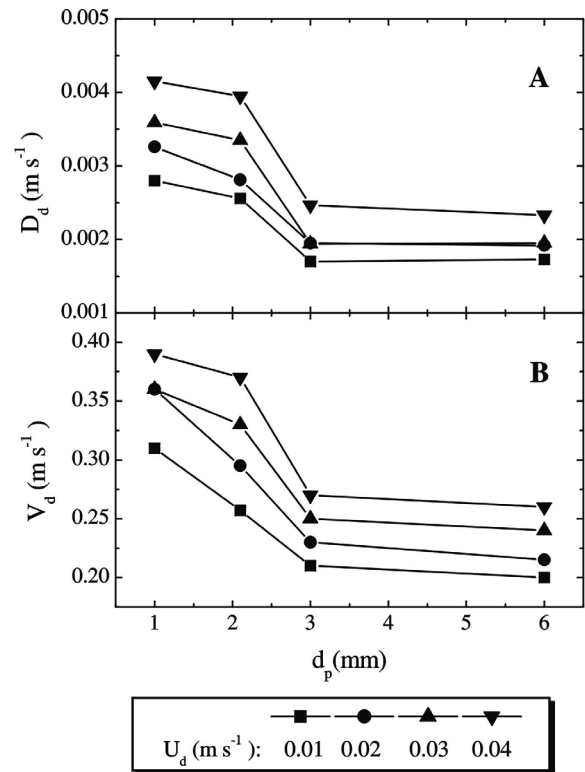


Figure 9. Effects of d_p on D_d and V_d in the liquid-liquid fluidized-bed extractors ($U_c = 0.06$ m/s).

상승속도를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 액적의 상승속도는 본 연구의 모든 경우에 분산상의 유속이 증가함에 따라 증가하였다. 이는 Figure 4에서 보았듯이 분산상의 유속이 증가함에 따라 액적의 상당길이가 증가하기 때문에 주어진 연속상과 고체입자크기에서 분산상이 증가함에 따라 상승속도는 액적의 상당길이에 비례하여 증가한

다. 또한, 액적의 상승속도는 연속상의 유속이 증가함에 따라 증가한다. 비록 상대적으로 큰 입자($d_p = 3.0, 6.0$ mm)를 포함한 상승관에서 연속상의 유속이 증가함에 따라 액적의 상당길이가 증가하지는 않지만, 연속상의 유속이 증가함에 따라 상승속도의 값은 증가한다(Figure 8). 왜냐하면 연속상에 의해 상승하는 액적에 작용하는 상승방향의 항력은 연속상의 유속이 증가함에 따라 증가하기 때문이다. 또한, 이는 Kim 등[14]의 실험 결과와 유사한 경향임을 알 수 있다.

Figure 9는 유동 고체입자 크기가 액적의 상당길이와 상승속도에 미치는 영향을 나타낸 그림으로 유동 고체입자의 크기가 증가함에 따라 액적의 상당길이와 상승속도가 감소함을 알 수 있다. 이는 유동 고체입자가 액적을 분쇄하는 잠재력에 기인한다. 고체 유동입자의 크기가 크면 클수록 유체의 표면장력과 점성을 극복하는 관성력이 증가하기 때문에 유동 고체입자의 크기가 증가함에 따라 액적의 분쇄 잠재력은 보다 효과적으로 작용한다. 더불어 고체 유동입자의 크기가 증가함에 따라 고체 체류량도 증가하는데, 이는 주어진 분산 액상과 연속 액상의 유속에서 층 팽창의 감소를 유발한다. 유동층에서 상승속도는 액적의 상당길이에 비례하므로 상당 길이와 상승속도가 감소하게 된다.

액적의 상당길이(D_d)와 상승속도(V_d)는 각각 식 (1)과 (2)처럼 실험 변수들의 상관식으로 나타낼 수 있었으며, 두 식의 상관계수는 각각 0.923과 0.914이었다.

$$D_d = 0.0061 U_d^{0.302} U_c^{0.144} d_p^{-0.160} \quad (1)$$

$$V_d = 0.210 U_d^{0.165} U_c^{0.187} d_p^{-0.240} \quad (2)$$

4. 결 론

액-액 유동층 추출기에서 액적의 크기와 분포, 그리고 상승속도와 같은 액적의 특성 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 액적의 상당길이는 분산상의 유속이 증가함에 따라 증가하였지만, 유동 고체입자의 크기가 증가함에 따라서는 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 상대적으로 큰 유동입자($d_p = 3.0$ mm)를 포함하는 유동층에서는 연속상의 유속이 증가함에 따라 약간의 최대값을 나타내었지만, 그리 큰 변화를 보이지는 않았다. 작은 유동입자($d_p = 1.0$ mm)를 포함하는 유동층에서는 연속상의 유속이 증가함에 따라 액적 상당길이의 값이 증가하였다. 분산 및 연속상의 유속증가에 따라 액적의 상승속도는 증가한 반면, 유동 고체입자의 크기 증가에 따라서는 감소하는 경향을 나타내었다.

사 용 기 호

d_p : particle diameter (m)
 D_d : liquid drop chord length (m)

D_{di} : individual chord length (m)
 L : height of the column (m)
 P : pressure (Volt)
 r : radial coordinate (m)
 R : radius of the column (m)
 t : time (s)
 U_c : continuous liquid phase velocity (m/s)
 U_d : dispersed liquid phase velocity (m/s)
 V_d : mean liquid drop rising velocity (m/s)

Subscripts

c : continuous liquid phase
 d : dispersed liquid phase

참 고 문 헌

1. P. Dakshinamurty, K. Veerabhadrarao, and A. B. Venkatarao, *I & EC Process Des. Dev.*, **18**, 638 (1979).
2. P. Dakshinamurty, V. Subrahmanyam, R. V. Prasadarao, and D. Vijayasarithi, *I & EC Process Des. Dev.*, **23**, 132 (1984).
3. S. D. Kim, M. J. Lee, and J. H. Han, *Can. J. Chem. Eng.*, **67**, 276 (1989).
4. A. M. Dehkordi, *J. Chem. Eng.*, **87**, 227 (2002).
5. B. Ghosh, D. C. Makherjee, S. Bhattacharjee, and B. Chaudhure, *Can. J. Chem. Eng.*, **79**, 148 (2001).
6. P. S. Song, H. T. Kim, Y. Kang, S. J. Kim, and S. D. Kim, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 807 (2003).
7. P. S. Song, H. T. Kim, S. M. Son, Y. Kang, S. J. Kim, and S. D. Kim, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 903 (2003).
8. S. D. Kim and Y. Kang, *Advances in Engineering Fluid Mechanics Series*, N.P. Cheremisinoff ed., Gulf Pub. Co., 845 (1996).
9. A. M. Dehkordi, *AIChE J.* **48**, 2230 (2002).
10. Y. Kang, J. S. Kim, K. J. Woo, C. H. Nam, S. H. Kim, and S. D. Kim, *Hwahak Konghak*, **36**, 275 (1998).
11. S. D. Kim, J. S. Kim, C. H. Nam, S. H. Kim, and Y. Kang, *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 5173 (1999).
12. K. S. Shin, C. K. Lee, S. H. Kang, Y. Kang, S. D. Kim, and S. J. Kim, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 896 (2003).
13. B. A. A. van Woezik and K. R. Westerterp, *Chem. Eng. Process*, **39**, 299 (2000).
14. S. D. Kim, D. Y. Kim, and J. H. Han, *Can. J. Chem. Eng.*, **72**, 222 (1994).
15. K. J. Woo, J. S. Kim, Y. Kang, and S. D. Kim, *Chem. Eng. Technol.*, **24**, 829 (2001).
16. A. Matsuura and L. S. Fan, *AIChE J.*, **30**, 894 (1984).
17. L. S. Fan, Butterworths, Stonehair, MS (1989).
18. J. A. Golding and D. W. Koren, *Hydrometallurgy*, **33**, 227 (1993).