

호기성 삼상 역 유동층의 물질전달 특성

김상우 · 송평섭 · 김현태 · 강 용[†] · 김상돈^{*}

충남대학교 화학공학과

^{*}한국과학기술원 화학공학과

(2002년 5월 3일 접수, 2002년 6월 18일 채택)

Mass Transfer Characteristics in Aerobic Three-Phase Inverse Fluidized Beds

Sang-Woo Kim, Pyung-Seob Song, Hyun-Tae Kim, 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 3 May 2002; accepted 18 June 2002)

요 약

직경이 0.152 m이고 높이가 2.5 m인 호기성 삼상 역 유동층에서 기체 체류량과 액상의 축방향 혼합 그리고 기체-액체 부피 물질전달특성에 대한 연구를 수행하였다. 기체와 액체의 유속 그리고 유동입자의 종류(유동입자의 밀도)가 기체 체류량, 액상의 축방향 혼합계수 그리고 기체-액체 부피 물질전달계수에 미치는 영향을 결정하였다. 물과 여과된 압축공기 그리고 밀도가 877.3 kg/m³ 및 966.6 kg/m³인 직경이 0.004 m인 구형의 저밀도 폴리프로필렌입자와 폴리에틸렌 입자를 각각 액체, 기체 그리고 유동 고체상으로 사용하였다. 삼상 역 유동층에서 기체 체류량은 압력강하 분포자료로부터 정압강하법에 의해 결정하였으며, 액상의 축방향 분산 계수와 기체-액체 부피 물질전달계수는 액상의 축방향 용존산소 농도분포를 이용하여 축방향 분산모델에 의해 결정하였다. 호기성 삼상 역 유동층에서 기체 체류량과 액상의 축방향 분산계수 그리고 기체-액체 부피 물질전달계수는 기체 및 액체유속이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 기체 유속의 영향이 액체 유속의 영향에 비해 더 크게 나타났다. 같은 유동조건에서 고체의 밀도가 큰 폴리에틸렌 입자의 경우가 폴리프로필렌을 유동입자로 사용할 경우에 비해 기체 체류량과 액상의 축방향 분산계수 그리고 기체-액체 부피 물질전달계수가 큰 값을 나타내었다. 호기성 삼상 역 유동층에서 기체 체류량, 액상의 축방향 분산계수 그리고 기체-액체 부피 물질전달계수는 기체 및 액체의 유속 그리고 유동입자 밀도의 상관식으로 각각 나타낼 수 있었다.

Abstract – Gas holdup, axial dispersion coefficient of liquid phase and gas-liquid mass transfer characteristics have been investigated in a aerobic three-phase inverse fluidized bed whose diameter and height are 0.152 m and 2.5 m, respectively. Effects of gas and liquid velocities and particle density(particle kind) on the gas holdup, axial dispersion coefficient of liquid phase and volumetric gas-liquid mass transfer coefficient have been determined. Tap water, filtered compressed air and low density polypropylene particle($\rho_s=877.3 \text{ kg/m}^3$, $d_p=0.004 \text{ m}$) or polyethylene particle($\rho_s=966.6 \text{ kg/m}^3$, $d_p=0.004 \text{ m}$) have been used as a liquid, gas and fluidized solid phase, respectively. The gas holdup has been obtained from the pressure drop profiles by means of static pressure drop method, and the axial dispersion coefficient of liquid phase and volumetric gas-liquid mass transfer coefficient have been determined by means of axial dispersion model from the knowledge of axial profile of dissolved oxygen concentration. It has been found that the gas holdup, axial dispersion coefficient and volumetric gas-liquid mass transfer coefficient have increased with increasing gas and liquid velocities, but the effects of gas velocity have been dominant in aerobic three phase inverse fluidized beds. In the beds of polyethylene particle(relatively heavier particle) the values of ϵ_G , D_z and $k_L a$ have exhibited higher than those in the beds of polypropylene particles(relatively lighter particle). The values of gas holdup, axial dispersion coefficient and gas-liquid mass transfer coefficient have been well correlated in terms of gas and liquid velocities and particle density.

Key words: Aerobic Three-phase, Inverse Fluidized Bed, Mass Transfer, Gas Holdup, Axial Dispersion Coefficient

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

1. 서 론

삼상 역 유동층은 전통적인 삼상 유동층의 장점인 삼상간의 접촉 효과가 좋고, 몇 밀 물질 전달 효과가 탁월하다는 장점을 그대로 유지하면서도 유동 입자에 작용하는 중력이 아닌 부력에 대하여 유동화 시키는 역 유동화의 특성을 이용할 수 있으므로, 유동 입자의 밀도가 액체보다 작은 경우나 다공성의 입자 그리고 미소입자 등의 사용에도 그 용도를 확장시킬 수 있을 뿐 아니라 에너지 소비가 낮으며, 고체 입자의 마모를 최소화 할 수 있다는 장점도 있다[1-6]. 또한, 삼상 역 유동층은 기체 유속만으로도 유동화가 가능하기 때문에 발효공정 등의 생물공학, 폐수처리 등의 환경공학, 생화학 그리고 다른 주변산업에도 그 응용성은 더욱 확대될 수 있을 것으로 예견된다. 특히, 삼상 역 유동층은 유동입자의 둘레에 형성되는 생물학적 필름(biofilm)의 두께를 미세하게 조절할 수 있기 때문에 생물학적 폐수처리 및 반응, 효소 고정화 등에 매우 유용하게 응용될 수 있다[7-11].

그러나 삼상 역 유동층에 대한 연구는 현재 매우 미흡한 실정이며, 다만 기체-액체상이나 액체-고체상의 접촉을 다루는 이상 역 유동층(two-phase inverse fluidized bed)이나 난류 접촉 그리고 열전달 특성 등에 대한 연구들이 지금까지 꾸준히 이루어지고 있는 정도이다[2, 3, 12, 13].

삼상 역 유동층이 그 산업적 응용분야인 폐수처리나 생물공학 및 생화학 분야의 반응기나 접촉공정으로 사용되기 위해서는 이들 반응기나 접촉공정의 설계나 scale-up · 운전조건의 결정 및 처리량의 결정 등에 대한 공학적 정보가 매우 필요하다. 즉, 호기성 삼상 역 유동층의 경우 연속상인 액상의 미디어에 전달되는 산소의 양과 전달속도 등 기체-액체간의 물질전달 특성은 호기성 반응기나 접촉공정의 성능과 처리량을 결정하는 결정적인 주요인자라 할 수 있다[6-8]. 그럼에도 불구하고, 호기성 삼상 역 유동층에서 전달현상 등에 관한 연구는 국내 · 외를 막론하고 매우 미흡한 실정이다[2, 3, 10].

따라서 본 연구에서는 호기성 삼상 역 유동층에서 기체-액체 물질전달 및 연속 액상의 축방향 혼합과 기체 체류량에 대한 체계적 고찰을 함으로써 호기성 공정이나 생물공정 및 반응기 그리고 다상 접촉 반응기나 공정의 개발에 필요한 설계, 최적조업조건 및 조업 범위의 결정, scale-up 그리고 공정의 이상 유무 진단(fault diagnosis) 등에 필수적인 공학적 자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험

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

유동 고체입자로는 밀도가 877.3 kg/m³이고 직경이 0.004 m인 구형의 폴리프로필렌 입자와 밀도가 966.6 kg/m³이고 직경이 0.004 m인 구형의 폴리에틸렌 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 다공관 형태의 액체 분산판을 사용하였는데, 액체 분산판은 직경 0.003 m의 구멍을 삼각피치로 0.003 m 간격으로 균일하게 배치하였다. 한편, 기체분산상은 유동층의 하부에서 주입되어 상부로 상승하도록 하였는데 기체 분산상의 균일한 분포를 위해 유동층 하부 판에 직경 0.00635 m의 관을 균일하게 4개 삽입하여 용접한 후 이 판에 직경 0.001 m의 오리피스를 일정 간격으로 만들어 사용하였다. 이와 같은 액체상과 기체분산상의 주입방법은 삼상 유동층에서 사용했을 경우 매우 효과적으로 기체 분산상을 판에 주입시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[14-16].

수력학적 특성을 고찰하기 위해 유동층 상부의 액체 분산판으로부터

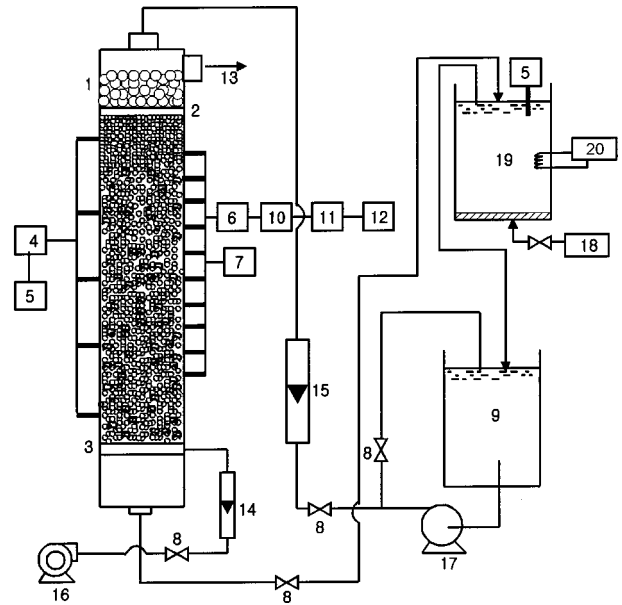


Fig. 1. Experimental apparatus.

- | | |
|-----------------------|-------------------------------|
| 1. Calming section | 11. Lab. card |
| 2. Liquid distributor | 12. Computer |
| 3. Gas distributor | 13. Vent line |
| 4. Sampling vessel | 14. Gas flow meter |
| 5. DO meter | 15. Liquid flow meter |
| 6. Pressure sensor | 16. Air compressor |
| 7. Manometer | 17. Pump |
| 8. Control valve | 18. N ₂ bomb |
| 9. Reservoir | 19. N ₂ purge tank |
| 10. Amplifier | 20. T-Controller |

0.25 m 위치부터 축방향으로 0.25 m 간격마다 압력 탭을 만들어 압력센서와 압력변환기를 각각 설치하여 자료처리장치와 PC에 연결하였다. 본 연구의 조업범위는 액체유속이 0-0.06 m/s, 기체유속이 0.002-0.01 m/s의 범위에서 실험하였다.

호기성 삼상 역 유동층에서의 기체 체류량은 정압강하법에 의해 다음의 식들에 의해 구하였다.

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

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

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

압력 탭이 설치된 반대편의 벽면에는 역 유동층의 상부 액체분산판으로부터 축방향 거리에 따른 액상의 용존산소(dissolve oxygen)량을 측정하기 위하여 상부의 액체 분산판으로부터 무차원 축방향 거리 0.15, 0.3, 0.5, 0.65 및 0.8 되는 지점에 각각 시료 채취 탭을 설치하였으며, 이들 탭에서 solenoid valve에 의하여 일정량의 시료를 취하여 용존산소 측정기(Oxi340-A, WTW)에 의해 용존산소를 측정하였다.

호기성 삼상 역 유동층내의 압력강하 측정과 용존산소 측정을 위한 시료의 채취는 역 유동층이 정상 상태(steady state)에 도달된 다음에 행하였으며, 액상과 기상 유속의 흐름은 각각 보정된 rotameter들을 사용하여 측정하였다. 채취된 각 시료들의 용존산소의 측정은 각 시료를 magnetic 혼합기에서 온도 조절기에 의하여 일정온도(20 °C)를 유지하면서 행하였으며, 재현성을 위하여 여러 번 반복 측정하였다. 역 유동층의 상부에서 액상 분산판을 거쳐 유동층에 유입되는 액상은 purge tank

에서 질소 가스에 의해 purge되어 용존 산소의 양을 $1.1 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ 로 유지하였으며 purge tank의 온도는 $20^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 온도조절기에 의해 유지시켰다.

호기성 삼상 역 유동층에서 액상의 축방향 분산 계수(D_z)와 기체-액체 부피 물질전달계수($k_L a$)는 역유동층에 축방향 분산모델(axial dispersion model)을 적용하여 구하였다[17, 18]. 역 유동층에 액상의 축방향 분산 모델을 적용하기 위해 용존산소의 축방향 수지는 좌표축의 양의 방향을 액상의 흐름방향인 상부에서 하부로 잡았으며, 축방향 좌표의 원점은 유동층 상부의 액체분산판으로 하여 식 (4)로 쓸 수 있으며, 이를 풀기 위해 경계 조건인 식 (5)와 (6)을 도입할 수 있다.

$$\frac{1}{Pe_L} \frac{d^2 C}{d\xi^2} - \frac{dC}{d\xi} + St(C^* - C) = 0 \quad (4)$$

$$X = 0, C = C_0 + \frac{1}{Pe^*} \left. \frac{dC}{dX} \right|_{X=0} \quad (5)$$

$$X = 1, \left. \frac{dC}{dX} \right|_{X=1} = 0 \quad (6)$$

여기서,

$$Pe_L = \frac{U_L L}{\epsilon_L D_z}, St = k_L a \frac{L}{U_L}, X = \frac{Z}{L} \quad (7)$$

이며 C^* 는 산소의 평형농도로 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다[17-18].

$$C^* = a + bX \quad (8)$$

식 (8)에서 a, b 는 상수이며 이들은 각각 식 (9)와 (10)으로 쓸 수 있다.

$$a = (y/H)(P + \rho_L g \epsilon_L L) \quad (9)$$

$$b = -(y/H)\rho_L \epsilon_L g L \quad (10)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 기체 체류량(ϵ_G)

호기성 삼상 역 유동층에서 상승하는 기체의 유속과 하강하는 액체의 유속 그리고 유동입자의 밀도(ρ_p)가 기체의 체류량에 미치는 영향을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 삼상 역 유동층에서 기체 체류량은 기체의 유속이 증가함에 따라 증가하였다. 역 유동층에서 기체 유속의 증가는 유동층 내부에 주입되는 기체량의 증가를 의미하기 때문에 유동층 내부에 기포로 존재하는 분산상의 양이 많아져 기체 체류량의 증가를 예견할 수 있다. Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 삼상 역 유동층에서 하강하는 연속 액상의 유속증가는 유동층 내부에 존재하는 기체 체류량의 증가를 가져왔다. 이는 역 유동층에서 기체와 액체는 서로 향류로 흐르므로, 액체의 유속이 증가함에 따라 유동층에서 상승하는 기포의 상승속도의 감소를 가져와 기포의 층 내 체류시간을 증가시켜 기체 체류량이 증가한다고 할 수 있다. 한편, 같은 기체유속과 액체유속의 유동조 조건에서는 유동입자의 밀도가 큰 폴리에틸렌의 경우가 상대적으로 밀도가 작은 폴리프로필렌의 경우보다 기체 체류량이 큰 것으로 나타났다(Fig. 2(c)). 이는 유동조체 입자의 밀도가 비교적 큰 경우(966.6 kg/m^3)인 폴리에틸렌은 연속 액상인 물보다 밀도가 약간 작으므로 연속 액상보다 밀도가 많이 작은 폴리프로필렌(877.3 kg/m^3)에 비하여 기체와 액체의 흐름이 있는 역 유동층에서 비교적 자유롭게 거동할 수 있는 반면, 폴리프로필렌의 경우는 역 유동층의 내부에서 자유롭게

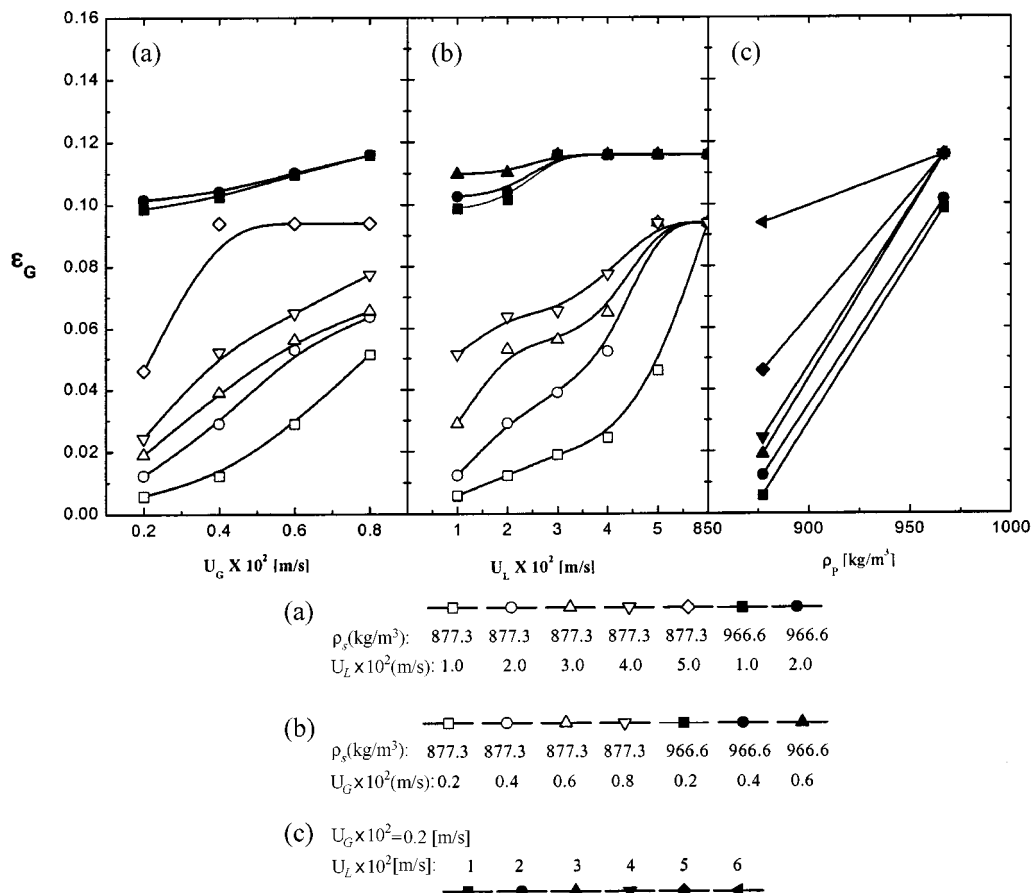


Fig. 2. Gas holdup in aerobic three-phase inverse fluidized beds.

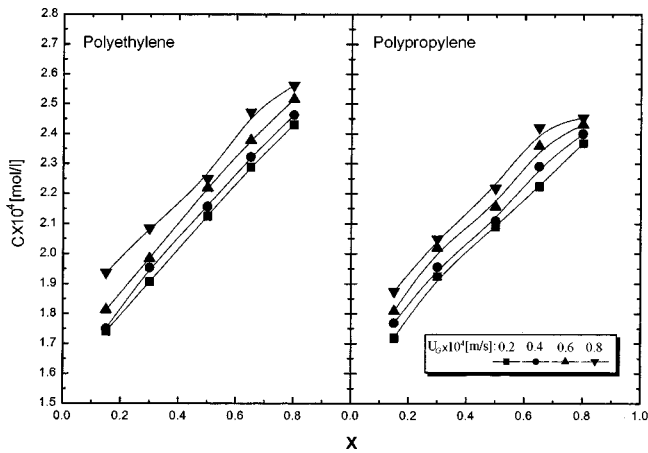


Fig. 3. Dissolved oxygen concentration profile in the axial direction of a column ($U_L \times 10^2 = 1$ m/s).

거동하기보다는 서로 그룹을 지으며 거동하여 상승기포들의 흐름과 접촉하면서 기포의 합체를 폴리에틸렌의 경우보다 많이 유발한다고 할 수 있다. 또한, 같은 기체와 액체의 유속 조건에서 유동입자의 밀도가 작은 경우가 유동입자의 밀도가 큰 경우에 비하여 층 팽창률이 작으므로 유동고체 입자의 체류량이 크기 때문에 상대적으로 기체의 체류량은 감소한다고 할 수 있다.

3-2. 액상의 축방향 분산계수 (D_z) 및 물질전달계수 ($k_L a$)

호기성 삼상 역 유동층에서 액상의 축방향 분산계수와 기체-액체 부피 물질전달계수는 식 (4)의 해석적 해(analytical solution)로부터 유동층의 축방향에 따른 용존 산소의 양을 나타내는 용존산소 곡선에 의하여 얻을 수 있는데[17, 18], 본 연구의 실험 조건에서 역 유동층의 축방향 위치에 따른 용존 산소량의 변화는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 역유동층의 상부인 액상의 분산관을 기준으로 하여 하강하는 방향을 좌표축의 양의 방향으로 설정하였을 때 축 방향의 길이가 증가함에 따라 용존산소의 양이 증가함을 알 수 있다. 이는 축방향의 길이가 증가함에 따라 유동층내부에서 하강하는 액상과 상승하는 기포의 접촉시간이 증가하기 때문에 액체속에 포함된 산소의 농도가 증가된다고 할 수 있다. 특히, 기체와 액체가 병류로 상승하는 일반적인 유동층이나 기포탑에서는 축방향의 길이가 증가함에 따라 기체속 산소의 농도가 감소하여서 액상에 용해되는 용존산소농도의 증가율이 축방향길이 증가함에 따라 감소하나[17, 18], 본 연구와 같은 역 유동층에서는 액체와 기체의 흐름이 항류(counter current)이므로, 유동층에서 하강하는 액체가 축방향으로 하강할수록 산소의 농도가 높은 기포와 만나게 되기 때문에 액상에 산소가 용해되는 driving force인 산소 농도의 차가 병류(cocurrent)인 경우처럼 감소하지 않는 것을 알 수 있다.

호기성 삼상 역 유동층에서 상승하는 기체의 유속이 액상의 축방향 분산계수에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 액상의 축방향분산계수는 기체의 유속이 증가함에 따라 점점 증가하였다. 삼상 역 유동층에서 기체 유속의 증가는 유동층 내부에서 기포수와 분율의 증가를 가져와 기체 체류량이 증가하며(Fig. 2), 부력에 의해 상승하는 기포의 거동은 연속 액상이 유동층 내부에서 순환하는 흐름을 유발하여 액상의 혼합을 증가시키는 효과가 있기 때문에 액상의 분산계수는 증가한다고 할 수 있다. 역 유동층에서 부유하는 유동입자를 유동화시키기 위해 하강하는 액체 유속이 액상의 축방향 분산계수에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 연속액상의 축방향분산계수는 액체유속이 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 일정기체유속의 조건에서 액체의 하강속도의 증가는 유동입

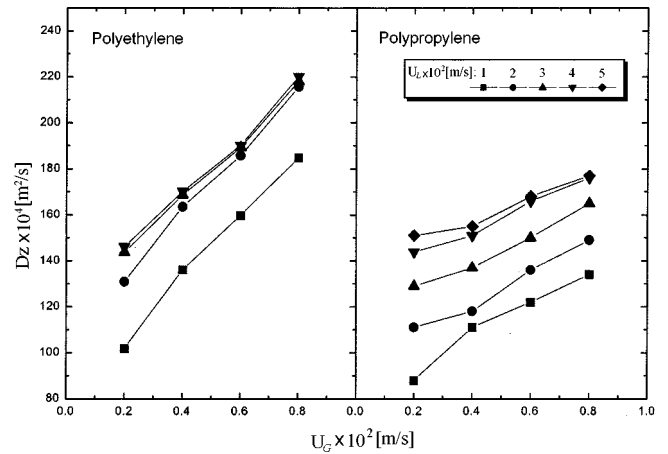


Fig. 4. Effects of gas velocity on the axial dispersion coefficient of liquid phase in aerobic three-phase inverse fluidized beds.

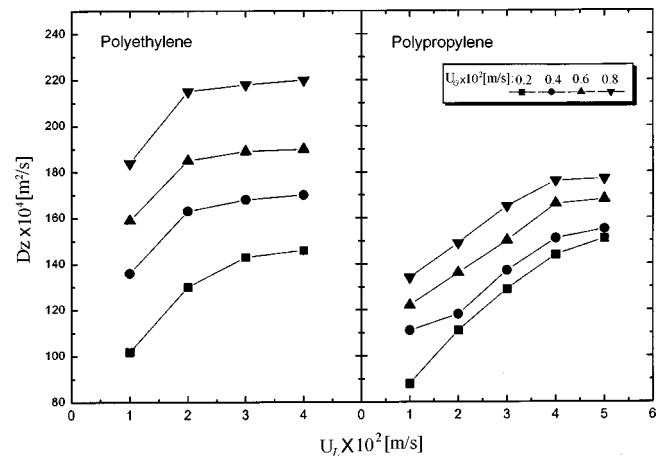


Fig. 5. Effects of liquid velocity on the axial dispersion coefficient of liquid phase in aerobic three-phase inverse fluidized beds.

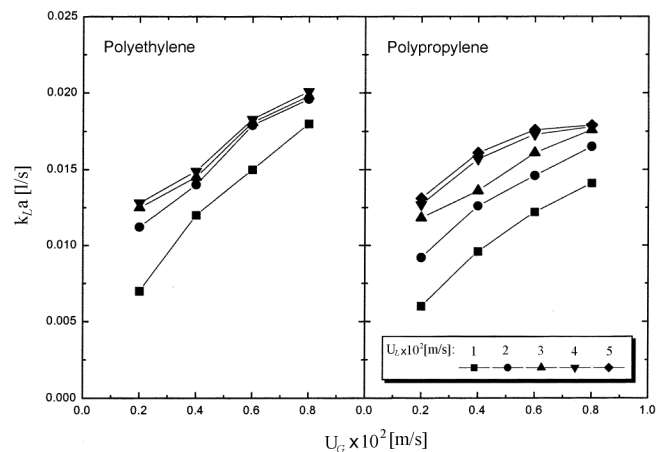


Fig. 6. Effects of gas velocity on $k_L a$ in aerobic three-phase inverse fluidized beds.

자 팽창률의 증가를 가져와 층공극률이 증가할 뿐만 아니라 액체 유속의 증가에 따라 층 내부의 난류현상이 증대되어 연속 액상의 혼합효과가 증대된다고 할 수 있다. 이와 같은 현상은 낮은 액체유속의 범위에서는 뚜렷이 나타나나, 높은 액체유속의 범위에서는 층팽창이 과도하게 일어나 유동입자의 난류강도가 줄어들기 때문에 액체유속의 증가에 따

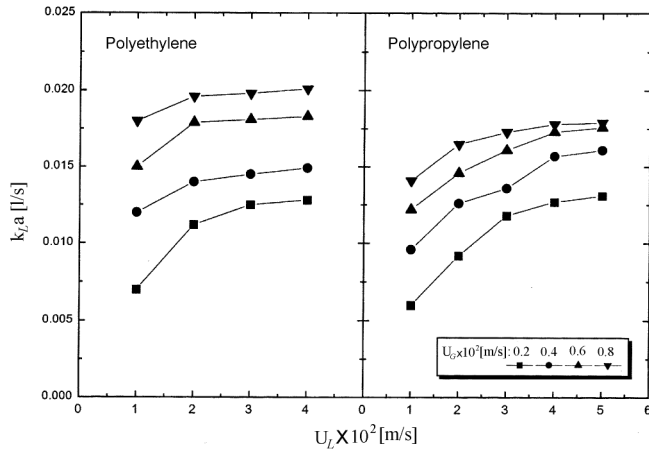


Fig. 7. Effects of liquid velocity on k_La in aerobic three-phase inverse fluidized beds.

라 Dz 의 값이 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다.

호기성 삼상 역 유동층에서 상승하는 기체의 유속이 기체-액체 부피 물질전달계수, k_La 에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 유동입자가 폴리에틸렌의 경우와 폴리프로필렌의 경우 모두 기체유속의 증가에 따라 기체-액체 부피 물질전달계수는 증가하였다. 이는, 기체 유속이 증가함에 따라 유동층내부에 기체 체류량이 증가하며 이에 따라 기포속에 포함된 산소의 양도 많아지기 때문에 일정 액체유속의 조건에서 기체-액체계면을 통해 액체로 전달되는 산소의 양이 많아진다고 할 수 있다. 또한, 기체유속이 증가하면 역 유동층 내부에서 연속액상의 순환흐름현상을 유도하기 때문에 기포산상의 증가에 의한 난류현상의 증가와 더불어 층 내 난류현상의 증대를 가져오는 효과가 있기 때문에 기체-액체 계면에서 미세 와류의 접촉과 흐름에 의한 micro eddy의 형성이 많아져 기체-액체 물질전달계수가 증가한다고 할 수 있다. 삼상 역 유동층에서 유동고체입자의 최소유동회속도가 기체의 유속이 증가함에 따라 감소하는 것은 바로 연속 액상의 순환 흐름 때문이라고 보고 되고 있다[2-5]. 호기성 삼상 역 유동층에서 하강하는 연속 액상의 유속이 기체-액체 부피물질전달계수에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 k_La 값은 액체의 유속이 증가함에 따라 폴리에틸렌, 폴리프로필렌 두 가지 입자의 경우 모두 증가하는 것은 알 수 있다. 이는 액체의 유속이 증가함에 따라 상승기포의 상승을 억제하여 기체의 체류량이 증가하기 때문으로 해석할 수 있다. 그러나 Fig. 7에서, 두 가지의 입자 모두의 경우에 대하여 액체의 유속이 처음 0.01 m/s에서 증가하기 시작할 때에는 기체-액체 부피 물질전달계수가 눈에 띄게 증가하였으나, 액체의 유속이 0.03-0.05 m/s정도로 높은 범위에서는 액체의 유속이 증가함에 따라 k_La 값의 증가가 매우 둔화되어서 뚜렷한 증가추세는 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 기체와 액체가 병류로 상승하는 일반적인 삼상 유동층에서와 같이 액체의 유속이 증가함에 따라 유동층내부에서 난류의 강도가 증가되기도 하지만, 유동층의 팽창이 심화되어서 액체체류량의 큰 증가를 가져오기 때문에 연속액상의 단위 부피당 기체-액체 물질전달계수인 k_La 의 값은 크게 증가하지 않는다고 할 수 있다.

3.3. 상관식

호기성 삼상 역 유동층에서 기체 체류량과 연속 액상의 축방향 분산 계수 그리고 기체-액체 부피 물질전달계수는 식 (11), (12) 및 (13)과 같이 유동층의 조작변수인 기체와 액체의 유속 그리고 유동고체입자의 밀도의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

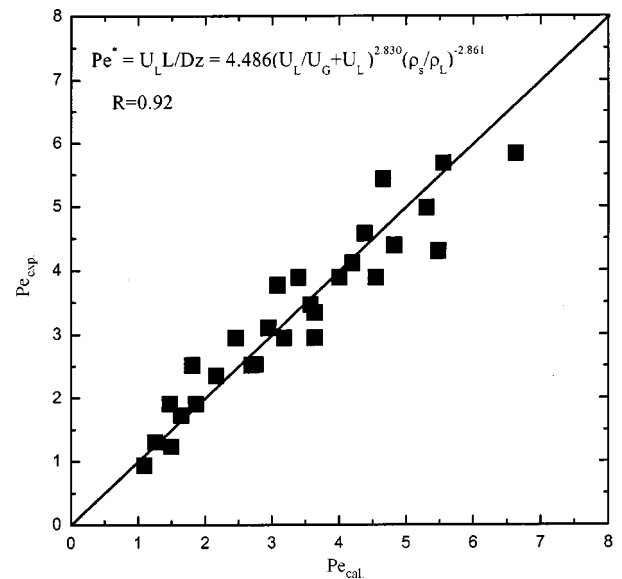


Fig. 8. Comparison between the experimental and calculated values of Peclet number.

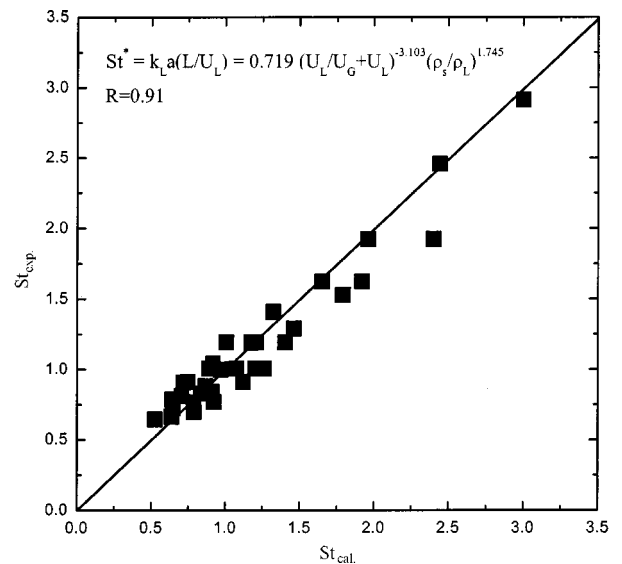


Fig. 9. Comparison between the experimental and calculated values of Stanton number.

$$\epsilon_G = 301.9 U_G^{0.867} U_L^{0.842} \left(\frac{\rho_s}{\rho_L} \right)^{8.919} \quad (11)$$

$$Pe^* = \frac{U_L L}{Dz} = 4.486 \left(\frac{U_L}{U_G + U_L} \right)^{2.830} \left(\frac{\rho_s}{\rho_L} \right)^{-2.861} \quad (12)$$

$$St^* = \frac{k_L a L}{U_L} = 0.719 \left(\frac{U_L}{U_G + U_L} \right)^{-3.103} \left(\frac{\rho_s}{\rho_L} \right)^{1.745} \quad (13)$$

식 (11), (12) 및 (13)의 상관계수는 각각 0.90, 0.92 및 0.91이며, 이들 식은 실험결과와 잘 일치하였다(Fig. 8-9).

4. 결 론

호기성 삼상 역 유동층의 공업적 응용을 위해 기체와 액체의 흐름이 병류로 흐르는 조건에서 기체 체류량은 정압강하법에 의해 그리고 연

속 액상의 축방향 혼합계수와 기체-액체 부피 물질전달계수는 액상의 축방향 분산모델에 의해 실험적 방법으로 성공적으로 얻을 수 있었다.

호기성 삼상 역 유동층에서 기체 체류량은 기체와 액체유속이 증가함에 따라 증가하였으며, 유동입자의 밀도가 큰 경우가 작은 경우보다 주어진 기체와 액체 유속의 조건에서 기체 체류량은 큰 값을 나타내었다. 역 유동층에서 하강하는 연속액상의 축방향 혼합계수와 기체-액체 부피 물질전달계수도 모두 기체의 유속과 액체의 유속이 증가함에 따라 증가하였으며, 유동입자의 밀도가 큰 경우가 액상의 축방향 혼합계수와 물질전달계수 모두 큰 값을 나타내었다. 호기성 삼상 역 유동층에서 기체 체류량, 액상의 축방향 혼합계수 그리고 기체-액체 부피물질전달계수는 본 연구의 실험범위 내에서 다음식과 같이 실험변수의 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$\varepsilon_G = 301.9 U_G^{0.867} U_L^{0.842} \left(\frac{\rho_s}{\rho_L} \right)^{8.919}$$

$$Pe^* = \frac{U_L L}{Dz} = 4.486 \left(\frac{U_L}{U_G + U_L} \right)^{2.830} \left(\frac{\rho_s}{\rho_L} \right)^{-2.861}$$

$$St^* = \frac{k_L a L}{U_L} = 0.719 \left(\frac{U_L}{U_G + U_L} \right)^{-3.103} \left(\frac{\rho_s}{\rho_L} \right)^{1.745}$$

감 사

본 연구는 한국학술진흥재단의 2001년도 선도연구자 지원 사업(과제 번호: E00295)에 의해 수행되었으며 귀 재단에 감사드립니다.

사용기호

a	: constant in Eq. (8)
b	: constant in Eq. (8)
C	: oxygen concentration [mol/l]
C _o	: initial oxygen concentration [mol/l]
C*	: equilibrium concentration [mol/l]
Dz	: axial dispersion coefficient of liquid phase [m ² /s]
g	: gravitational acceleration [m ² /s]
H	: Henry's constant [atm · l/mol]
k _L a	: volumetric mass transfer coefficient [1/s]
L	: column height [m]
Pe	: peclet number defined in Eq. (7)
ΔP	: pressure drop in the column [N/m ²]
P _T	: pressure at the top of the column [Pa]
St	: stanton number defined in Eq. (7)
X	: dimensionless distance defined in Eq. (7)
y	: gas-phase mole fraction of oxygen
z	: axial distance [m]

U _G	: superficial gas velocity [m/s]
U _L	: superficial liquid velocity [m/s]

그리스 문자

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

하첨자

G	: gas phase
L	: liquid phase
S	: solid phase

참고문헌

1. Kim, S. D. and Kang, Y.: *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 3639(1997).
2. Park, H. Y., Kim, S. W., Cho, Y. J., Kang, Y. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **39**, 619(2001).
3. Cho, Y. J., Park, H. Y., Kim, S. W., Kang, Y. and Kim, S. D.: *I&EC Research*, **21**, 2058(2002).
4. Ibrahim, Y. A. A., Breins, C. L., Margaritis, A. and Bergongnou, M. A.: *AIChE. J.*, **42**, 1889(1996).
5. Legile, P., Menard, G., Laurent, C., Thomas, D. and Bernis, A.: *Int. Chem. Eng.*, **32**, 41(1992).
6. Garcia-Calderon, D., Buffiere, P., Moletta, R. and Elmaleh, S.: *Wat. Res.*, **32**, 3593(1998).
7. Tang, W. T. and Fan, L. S.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**, 128(1990).
8. Chem, S. H., Muroyama, K. and Fan, L. S.: *Chem. Eng. Sci.*, **38**, 1167(1983).
9. Choi, H. S. and Shim, M. S.: *Korean J. Chem. Eng.*, **16**, 670(1999).
10. Buffiere, P. and Moletta, R.: *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 1233(1999).
11. Nikolov, V., Farag, I. and Nikov, I.: *Bioprocess Eng.*, **23**, 427(2000).
12. Lee, D. H., Epstein, N. and Grace, J. R.: *Korean J. Chem. Eng.*, **17**, 684(2000).
13. Karamanev, D. G. and Nikolov, L. N.: *AIChE. J.*, **38**, 1916(1992).
14. Kang, Y., Cho, Y. J., Woo, K. J., Kim, K. I. and Kim, S. D.: *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 411(2000).
15. Cho, Y. J., Kim, S. J., Nam, S. H., Kang, Y. and Kim, S. D.: *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 6107(2001).
16. Kang, Y., Kim, J. S., Woo, K. J., Nam, C. H., Kim, S. H. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **36**, 275(1998).
17. Deckwer, W.-D., Nguyen-Tien, K., Schumpe, A. and Serpemen, Y.: *Biotech. Bioeng.*, **24**, 461(1982).
18. Kang, Y., Min, B. T., Nah, J. B. and Kim, S. D.: *AIChE. J.*, **36**, 1255(1990).