

역 유동층의 동역학적 특성 연구

김동석 · 서봉국 · 이민규* · 송승구

부산대학교 공과대학 화학공학과

*제주대학교 공과대학 화학공학과

(1993년 2월 10일 접수, 1993년 6월 21일 채택)

Hydrodynamic Characteristics in Inverse Fluidized Bed

Dong-Seog Kim, Bong-Kuk Sea, Min-Gyu Lee* and Seung-Koo Song

Department of Chemical Engineering, Pusan National University

**Department of Chemical Engineering, Cheju National University*

(Received 10 February 1993; accepted 21 June 1993)

요 약

Draft tube를 사용한 역 유동층에서 gas의 유입에 따른 gas holdup의 변화와 액체 평균 순환 속도 및 물보다 밀도가 낮은 polystyrene 입자의 유동 특성을 관찰하였다. 기체속도와 gas holdup의 관계는 $\epsilon_{gr}=0.056U_{gr}$ 로 나타났으며, 그 관계는 Chisti의 결과와 유사하였다. 액체 평균 순환 속도는 직접 유량 측정 장치를 이용하여 초기 수위의 변화에 따른 그 변화를 관찰하였다. Polystyrene 입자와 유체의 물리적 값인 Archimedes number, Ar과 최소 유동화 속도에서의 minimum fluidization Reynolds number, Re_{mf} 는 $Re_{mf}=0.0018Ar+18.76$ 의 관계를 가져, 유체와 입자의 물성만으로 최소 유동화 속도를 예측할 수 있었다.

Abstract—The variation of gas holdup, the liquid circulation velocity and fluidization characteristics of polystyrene particles in inverse fluidized bed were observed by varying the gas flow rate. The relationship between the superficial gas velocity and the gas holdup was found as $\epsilon_{gr}=0.056U_{gr}$, which showed similar to the Chisti model. The liquid circulation velocity was measured directly and gave good relationship with those physical properties of particle and circulating fluid. Since Archimedes number, Ar, and Reynolds number at the minimum fluidization velocity, Re_{mf} appeared to give the relationship of $Re_{mf}=0.0018Ar+18.76$, the minimum fluidization velocity could be predicted with the informations of physical properties of particle and fluid involved in the bed.

1. 서 론

역 유동층은 air lift 반응기의 변형된 형태이다. 일반적인 air lift 반응기는 물보다 무거운 입자를 공기의 힘으로 부상시켜 입자의 흐름이 반응기 하부에서 상부로 형성되게 하는데, 역 유동층은 물보다 가벼운 입자를 공기의 직접적인 힘에 의해 입자를 유동시키는 것이 아

니라 공기에 의해 순환되는 액체의 힘에 의해 입자를 유동시키는 형태로써 입자의 흐름이 반응기 상부에서 하부로 형성된다.

역 유동층의 동역학적인 특성에 대해서는 알려진 바가 많지 않으므로 air lift 반응기에 대한 해석을 이용하여 동역학적인 특성을 설명하여 왔다. Fields와 Slater[1]는 tracer 분산을 이용한 실험에서 draft tube 직경의 크

기와 액체의 종류를 달리하여 기체 속도에 따른 Bodenstein NO를 측정함으로써 확산의 영향을 고찰하였고, Lele와 Joshi[2]는 전체 반응기 체적과 직경에 따른 물질전달속도와 액체 순환 속도를 측정하여 그에 대한 경험적인 모델을 제시하였고, Koide 등[3]은 입자의 크기와 액체의 물성을 변화시킨 실험에서 기체속도에 따른 gas holdup, ϵ_g 과 총괄산소전달계수, K_{La} 와의 관계를 나타내고 ϵ_g 와 K_{La} 를 예측할 수 있는 모델을 제시한 바 있다.

또한, Kennard와 Janekeh[4]은 gas holdup이 기체속도의 0.88승에 비례하고 순환되는 액체속도는 기체속도의 m승에 비례한다고 보고하였고, Karamanev 등[5]은 gas holdup이 기체속도의 1.2승에 비례하고 K_{La} 가 gas holdup의 0.89승에 비례한다고 보고한 바 있다.

순환되는 액체속도를 예측하기 위한 모델식으로, Jones[6]는 액체순환을 일으키는 힘은 gas bubble이 등은 상태에서 액체를 통과하여 팽창하면서 한 일에 기인한다고 생각하고 액체 순환 속도를 예측할 수 있는 모델을 제안하고, 이를 flow follower 방법을 이용하여 실제 측정된 액체 순환 속도와 비교하였으며, Chisti 등[7]은 airlift loop내에서 전체적인 에너지 수지를 고려하여 액체 순환 속도를 예측하고 pH 측정방법에 의해 실측된 액체 순환 속도와 비교하였다.

Koide 등[8]은 draft tube와 annular tube의 비가 액체 평균 순환 속도에 미치는 영향을 관찰하고, 그 비가 0.6일 때 최소의 액체 평균 순환 속도를 나타낸다고 보고하였다.

본 연구에서는 역 유동층을 생물학적 폐수처리공정에 적용시키기 위한 기초 연구의 일환으로, 역 유동층내의 gas holdup과 액체 평균 순환 속도 및 입자의 최소 유동화 속도를 고찰하였다. 이때의 최소 유동화 속도는 입자의 유동이 시작되는 기체 유량속도로부터 구한 액체 평균 순환 속도를 의미한다. Gas holdup은 역 유동층에서 매우 중요한 인자이므로 여러 연구자들의 결과와 비교해 보았다. 액체 평균 순환 속도는 Jones나 Chisti가 측정했던 간접적인 방법이 아니라, 직접 액체의 유량을 채취하여 이 유량을 annular tube의 단면적으로 나누어 액체 평균 순환 속도로 하였다. 또한, 입자가 유동을 최초로 시작할 때의 액체 평균 순환 속도인 최소 유동화 속도와 입자 및 유체의 물성치만으로 표시된 Archimedes number(Ar)와의 관계식을 구하여 입자의 크기 또는 유체의 종류의 변화에 따른 최소 유동화 속도를 예측할 수 있도록 하였다.

2. 실험

2-1. 실험재료

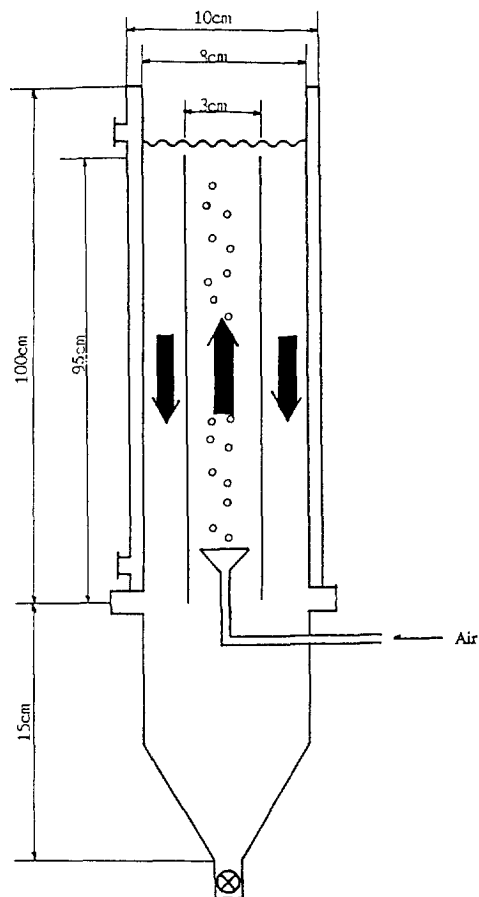


Fig. 1. Schematic diagram of inverse fluidized bed reactor.

본 연구에 사용된 역 유동층을 Fig. 1에 나타내었다. 역 유동층은 annular tube의 내경과 draft tube의 내경을 각각 8 cm와 3 cm로 하고 annular tube의 높이와 draft tube의 높이를 각각 100 cm와 95 cm로 하는 총 부피가 5L인 아크릴 원형관을 사용하였고 입자로는 polystyrene을 비중(0.38-0.7)과 입자 크기(1.4-1.74 mm)를 변화시키면서 사용하였으며 공기를 draft tube내에서 최대 6 cm/sec의 기체 속도로 상향으로 주입시켜 annular tube내의 물보다 가벼운 입자들의 유동을 유도하여 층 팽창을 시켰다.

2-2. 액체 평균 순환 속도의 측정방법

일반적으로 역 유동층내의 액체 평균 순환 속도를 측정하기 위하여 물과 비중이 유사한 입자를 사용하여 그 입자의 속도를 측정함으로써 액체 순환 속도로 이용하는 flow follower법[6]이나 반응기내에 산성용액을 순간적으로 투입하여 pH의 흐름을 센서로 측정하는

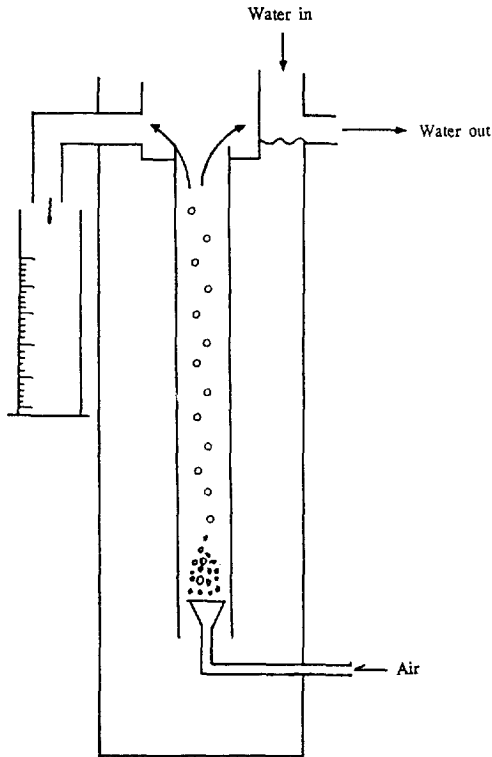


Fig. 2. Schematic diagram for measuring liquid circulation velocity.

방법[7]들이 이용되지만, flow follower법은 입자가 반응기내의 위치에 따라 속도가 달라질 수 있어 진정한 의미의 액체 순환 속도라 할 수 없고, pH 측정방법은 산성용액이 액체내에서 확산하여 분산됨으로써 센서가 감지하는 시간의 차이가 클 수 있어 많은 오차를 함유하고 있는 방법들이라 할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 annular tube에서의 액체 평균 순환 속도를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 장치를 사용하여 초기에 관내의 수위를 일정하게 유지한 상태에서 관 내부로 air를 공급하여 gas holdup의 증가로 인하여 넘쳐 나온 유량을 측정하여 annular tube의 단면적으로 나눈 평균 속도를 액체 평균 순환 속도로 하였으며, 이 때 관 외부의 수위는 관을 통해 물이 유출되더라도 항상 일정하게 유지할 수 있게 하였다. 이 실험에 사용된 관의 크기는 실제 실험에 사용된 draft tube의 크기와 동일하게 하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. Superficial gas velocity와 gas holdup과의 관계

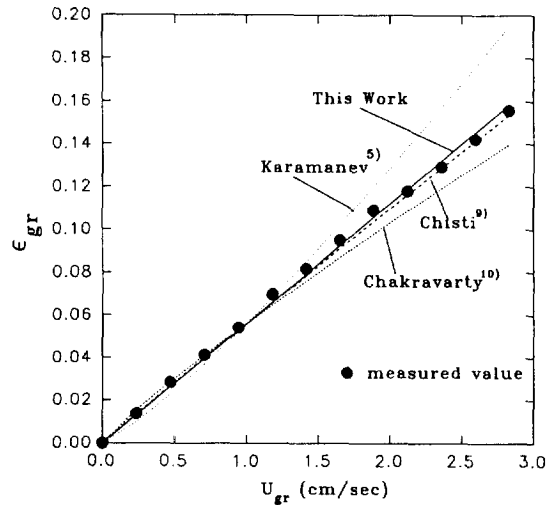


Fig. 3. Effect of superficial gas velocity on gas holdup.

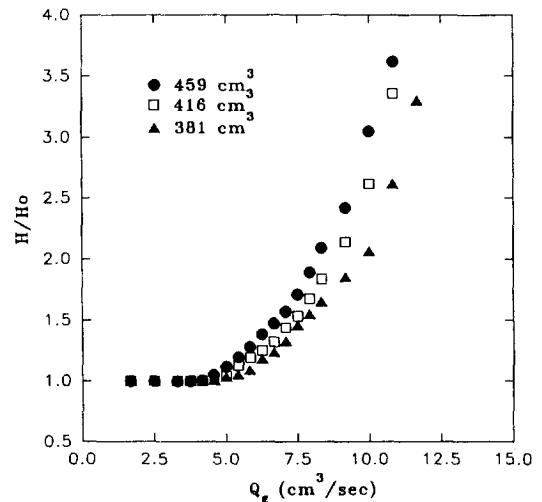


Fig. 4. Effect of initial particle volume on bed expansion.

물보다 비중이 적은 입자를 원활하게 유동시키는 기체평균속도가 3 cm/sec 이하에서는 gas holdup과 기체속도는 $\epsilon_{gr} = 0.056U_{gr}$ 의 일차 직선적인 관계로 나타났으며, 그 관계를 Fig. 3에 나타내었다. Air lift 장치에서 고찰된 식들과 비교한 결과, 기체속도가 낮은 영역에서는 모든 식이 본 실험값과 잘 일치하였으나, 기체속도가 증가함에 따라 Karamanev식과 Chakravarty식은 본 실험값으로부터 벗어나는 경향을 나타내었으며, Chisti식은 전 실험범위에서 비교적 잘 만족하였다.

3-2. 반응기내 입자의 초기 용적에 따른 유동의 변화

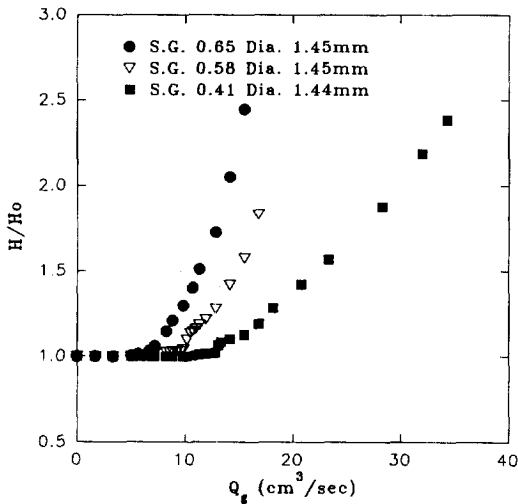


Fig. 5. Effect of particle density on bed expansion.

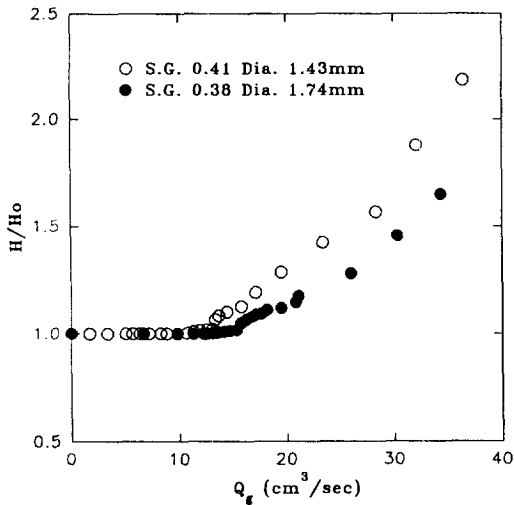
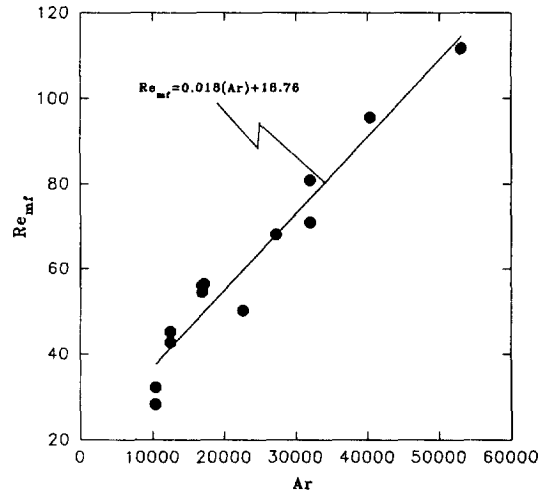


Fig. 6. Effect of particle size on bed expansion.

Fig. 4는 반응기내에 비중이 0.7이고 직경이 1.4 mm인 polystyrene 입자의 초기 용량을 459, 416 및 381 cm³으로 변화시키면서 기체유량에 따른 입자의 층 팽창율과의 관계를 나타낸 것으로써, 매디아의 초기 용적이 크면 클수록 입자의 층 팽창율은 더욱 급격하게 나타나는데 반해, 입자의 초기용적에 관계없이 항상 입자의 최소 유동화 속도는 일정하게 나타나는 것으로 보아 입자의 용적은 최소 유동화 속도와는 관계가 없음을 알 수 있었다.

3-3. 입자의 직경과 비중에 대한 영향

입자의 직경은 1.44-1.45 mm로 일정하게 유지하고

Fig. 7. Relationship of Ar and Re_{mf} .

입자의 비중을 0.65, 0.58, 0.41로 각각 변화시키면서 기체유량에 따른 층 공극율과의 관계를 Fig. 5에 나타내었는데, 비중이 작을수록 최소 유동화 속도는 늦게 나타났으며, 또한 층 팽창율도 낮게 나타났다.

Fig. 6은 입자의 비중을 0.38-0.41로 일정하게 유지한 상태에서 입자의 직경을 1.43 mm와 1.74 mm로 변화시키면서 기체유량에 따른 층 공극율과의 관계를 나타낸 그림으로서, 직경이 작을수록 최소 유동화 속도는 빨리 나타났고 층 팽창율도 급격하게 나타났다.

Fig. 5와 6에서 알 수 있듯이 입자의 최소 유동화 속도는 입자의 비중과 크기에 밀접한 관계를 가졌다. 그러므로 입자의 물리적 특성치인 직경과 비중을 포함한 무차원 변수 Archimedes number(Ar)와 최소 유동화 속도가 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있었으며, Fig. 7에 그 결과를 나타내었다. 즉, Ar이 증가하면 Re_{mf} 가 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있었으며, 그 관계는 아래와 같다.

$$Re_{mf} = 0.0018Ar + 18.76$$

위 관계로부터 입자와 유체의 물리적 특성값으로 된 Ar만 알면 최소 유동화 속도를 예측할 수가 있었다. 이러한 Ar과 Re_{mf} 와의 관계는 Ergun과 Orning[11], Abrahamsen과 Geldart[12], Baeyens와 Geldart[13] 등에 의하여 유체보다 무거운 입자를 사용한 유동층 반응기에서는 고찰되었지만 유체보다 밀도가 낮은 입자를 사용한 역 유동층 반응기에서는 보고된 바 없으며, 본 실험에서는 이러한 관계가 역 유동층에도 성립함을 알았다.

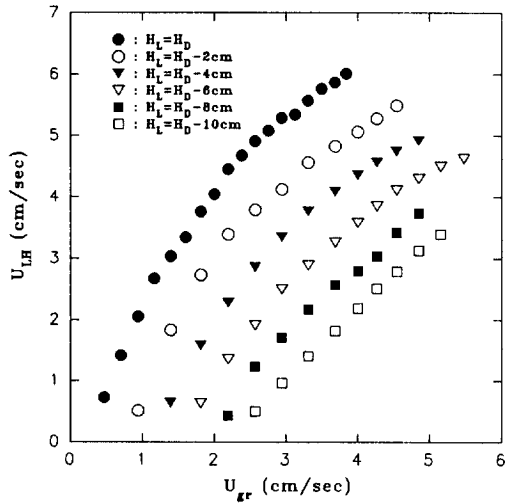


Fig. 8. Effect of superficial gas velocity on superficial liquid velocity.

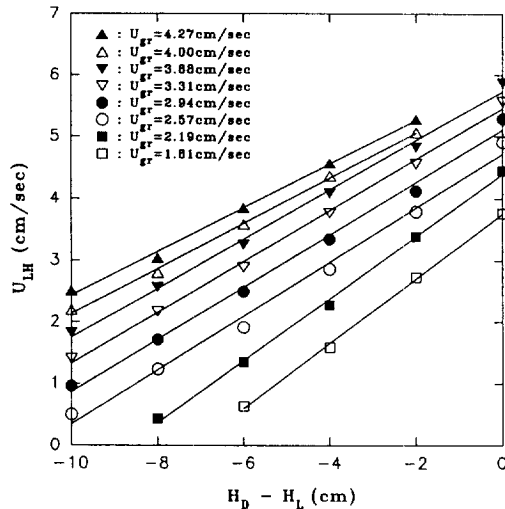


Fig. 9. Effect of initial liquid height on superficial liquid velocity.

3-4. 기체 유량에 따른 액체 평균 순환 속도의 변화

Fig. 8은 본 연구에서 사용한 직접유량측정장치를 이용하여 기체 유량에 따른 실제 유량을 측정된 액체 순환 속도를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 입자가 물보다 가벼워 순환되는 액체의 영향을 받지 않는 입자가 생길 수 있으므로, 이를 방지하기 위하여 초기 액체의 수위를 draft tube보다 낮게 유지함으로써 입자의 윗 부분이 draft tube보다 낮게 유지되게 하여 반응기내 입자를 모두 원활하게 유동시킬 수 있었다.

기체 속도에 따른 액체 평균 순환 속도의 변화를 초기

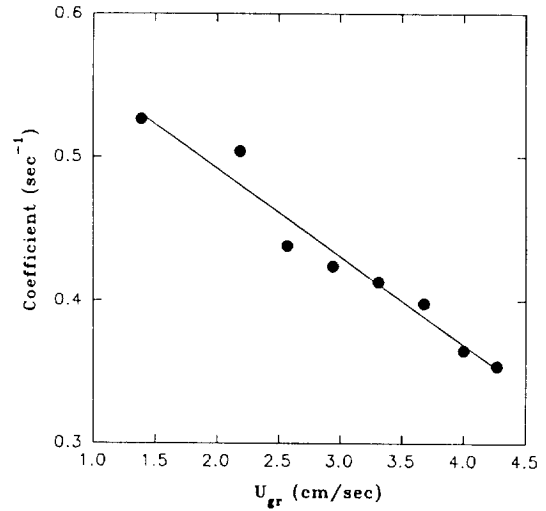


Fig. 10. Relationship on coefficient in Fig. 9 and superficial gas velocity.

수위별로 Fig. 9에 나타내었는데 기체 속도에 따른 액체 평균 순환 속도는 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보였고, 그 초기 기울기는 기체 속도가 적을수록 크게 나타났다. 그러므로 Fig. 9의 각 기울기를 기체 속도에 따라 Fig. 10에 나타내었는데, 그 관계는 $\text{Coeff.} = -0.06 U_{gr} + 0.6$ 으로 나타났다. 초기 수위를 draft tube 이하로 유지하였을 때의 액체 평균 순환 속도는 U_{LH} 는 앞의 관계와 초기 수위가 draft tube일 때의 액체 평균 순환 속도 U_{Lo} 를 측정함으로써 계산할 수 있었다.

$$U_{LH} = (-0.06 U_{gr} + 0.6) H_L + U_{Lo}$$

4. 결 론

역 유동층 반응기에서 입자를 유동시키는 힘은 기체의 유입으로 인한 draft tube내 gas holdup의 증가에 기인하며, 기체 속도와 gas holdup은 일차적인 상관관계에 있었다. 반응기내 입자의 최초 용적은 최소 유동화 속도에 영향을 미치지 않았으나, 입자의 최초 용적이 클수록 입자의 층 팽창율이 높게 나타났다.

입자의 크기가 클수록, 또 비중이 적을수록 최소 유동화 속도는 크게 요구되었으며, 최소 유동화 속도와 Archimedes number와의 직선관계, $Re_{mf} = 0.0018 Ar + 18.76$ 를 유도하여 최소 유동화 속도를 예측할 수 있었다.

또한, 초기 수위를 draft tube 이하로 유지하였을 때의 액체 평균 순환 속도, U_{LH} 는 초기 수위가 draft tube일 때의 액체 평균 순환 속도, U_{Lo} 와 기체 속도, U_{gr} 및 초기수위, H_L 등에 대하여 다음과 같이 나타내었다.

$$U_{LH} = (-0.06U_{gr} + 0.6)H_L + U_{Lr}$$

사용기호

- Ar : $\frac{g dp^3 \rho_l}{\mu_l^2} (\rho_l - \rho_p)$ [-]
 dp : particle diameter [cm]
 g : gravitational accelation [cm/sec²]
 H_i : initial bed height [cm]
 H_d : height of draft tube [cm]
 H_L : initial liquid height [cm]
 H : bed height [cm]
 Re_{mf} : $\frac{dp U_{Lr} \rho_l}{\mu_l}$ [-]
 Q_g : gas flow rate [cm³/sec]
 U_{Lr} : superficial liquid velocity in downcomer [cm/sec]
 U_{LH} : superficial liquid velocity according to the variance of initial liquid height [cm/sec]
 U_{gr} : superficial gas velocity in riser [cm/sec]
 ε_{gr} : gas holdup in the riser [-]
 ρ_l : liquid density [g/cm³]
 ρ_p : particle density [g/cm³]
 μ_l : viscosity of liquid [g/cm·sec]

참고문헌

1. Fields, P. R. and Slater, N. K. H.: *Chemical Engi-*

neering Science, **38**(4), 647(1983).

2. Lele, S. S. and Joshi, J. B.: *The Chemical Engineering Journal*, **49**, 89(1992).
3. Koide, K., Shibata, K., Ito, H., Kim, S. S. and Ohtaguchi, K.: *J. of Chem. Eng. of Japan*, **25**(1), 11 (1992).
4. Kennard, M. and Janekeh M.: *Biotechnology and Bioengineering*, **38**, 1261(1991).
5. Karamanev, D. G., Nagamune, T. and Endo, I.: *Chemical Engineering Science*, **47**(13/14), 3581(1992).
6. Jones, A. G.: *Chemical Engineering Science*, **40**(3), 449(1985).
7. Chisti, M. Y., Halard, B. and Moo-Young, M.: *Chemical Engineering Science*, **43**(3), 451(1988).
8. Koide, K., Horibe, K., Kawabata, H. and Ito, S.: *J. of Chemical Engineering of Japan*, **17**(4), 368(1984).
9. Chisti, M. Y.: "Airlift Bioreactor", Elsevier Applied Science, London and New York(1989).
10. Chakravarty, M., Begum, S., Singh, H. D., Baruah, J. N. and Iyengar, M. S.: *Biotechnology Bioengineering Symposium*, **4**, 363(1973).
11. Ergun, S. and Orning, A. A.: *Ind. Eng. Chem.*, **41**, 1179(1949).
12. Abrahamsen, A. R. and Geldart, D.: *Power Technol.*, **26**, 35(1980).
13. Baeyens, J. and Geldart, D.: *Fluidisation et ses Applications*, 263(1973).