

외부 순환식 Air-Lift 기포탑에서의 액체의 흐름특성

權善吉 · 咸榮敏* · 都東燮

高麗大學校 工科大学 化學工學科

(1982년 6월 25일 접수)

The Flow Characteristics of Liquid in an Air-Lift Bubble Column with an External Recirculation

Seon-Gil Kwon, Yeong-Min Hahm* and Dong-Sup Doh

*Department of Chemical Engineering,
Korea University, Seoul 132, Korea*

(Received; June 25, 1982)

요 약

외부 순환을 동반한 Air-lift 기포탑에서 액체높이 및 기체유속을 변수로 하여 액체의 흐름특성을 규명 하였다. 혼합시간 및 순환시간을 정의하고 이들을 Peclet 수와 관련 지었다. Peclet 수는 혼합 시간과 순환시간과의 비가 증가 함에따라 또 탑내 액체의 높이와 탑높이와의 비가 증가 함에 따라 증가 하였으며 그 관계는 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$Pe = 23.25(T_M/T_C)^{0.13}(h/H)^{2.19}$$

ABSTRACT

The flow characteristics of liquid was investigated in an air-lift bubble column with an external recirculation of liquid. The Peclet number was correlated in terms of the defined mixing and circulation times. The Peclet number increased with increasing the ratio of mixing time to circulation time and of liquid height to column height. The relationship could be expressed by the following correlation:

$$Pe = 23.25(T_M/T_C)^{0.13}(h/H)^{2.19}$$

* 단국대학교 화학공학과

1. 서 론

최근 Air-lift에 의한 액체의 재순환을 이용하여 발효조로서 응용되고 있는 기포탑은 교반장치가 필요없이 만족할만한 혼합효과, 물질전달효과, 열전달효과의 특성을 나타내며 또 장치의 단순, 다양, 경제성등으로 산업에 많이 적용되고 있고¹⁾ 근래에 와서도 이에대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{15~18)}

이중 기포탑에 대한 연구로는 Gasner²⁾가 기포탑 중앙에 평판으로 된 장애판을 수직으로 단직육면체형 기포탑을 개발하여 기포탑의 합체현상을 줄여 물질전달이 증가 함을 보였으며, Lin³⁾ 등은 탑순환 발효조에서의 산소 전달과 혼합에 대하여 연구 하였다. 그리고 Achwal⁴⁾ 등은 기체-액체가 병류로 흐르는 층진탑에서 체류시간 분포에 대하여 연구 하였다. 이밖에도 많은 연구자들이 이중 기포탑에 대하여 기포탑내에서의 산소의 물질 전달과 액체의 체류량 그리고 혼합 정도에 대해 많은 고찰을 하였지만,^{15~18)} 외부순환식 Air-lift 기포탑의 특성을 규명하는데 있어 흐름의 특성은 거의 고려하지 않았다.

본 연구는 외부 순환을 동반한 Air-lift 기포탑의 흐름의 특성을 규명하였다. 즉 기체 체류량, 혼합시간, 순환시간, 혼합정도의 특성과 순환속도의 결정에 의한 외부 순환식 Air-lift 기포탑의 Performance에 관하여 실험을 하고 이들의 상관 관계에 대하여 고찰 하였다.

2. 이론적 고찰

기포탑내의 유체의 흐름이 dispersed flow 이고,¹¹⁾ Reservoir에서의 액체의 흐름은 Plug flow 라고 간주하여 다음과 같은 가정을 도입하여 이론식을 전개 하였다.

1. 반경 방향의 농도구배는 없다.
2. 기포탑내에서 유체의 속도는 일정하다.
3. 기포탑 전역에서의 축방향 분산계수는 상수로 취급 될 수 있다.

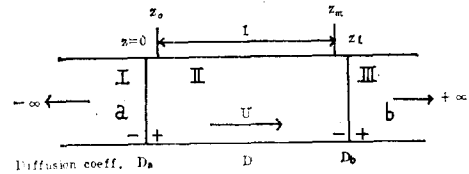


Fig. 1. Theoretical Model

4. Tracer impulse 는 delta function 이다.

5. Response 측정은 충분히 빠르다.

Fig. 1의 구간 I, II, III에서 미소구간을 잡고 물질수지를 취하여 Dimensionless group 으로 바꾸어 정리하면 각 구간에서 다음과 같은 미분식이 성립한다.

$$I. \frac{1}{P_{ea}} \frac{\partial^2 C_a}{\partial Z^2} - \frac{\partial C_a}{\partial Z} - \frac{\partial C_a}{\partial \theta} = 0, Z \leq 0 \quad (1)$$

$$II. \frac{1}{P_e} \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{\partial C}{\partial Z} - \frac{\partial C}{\partial \theta} = -\delta(\theta) \delta(Z - Z_0), 0 \leq Z \leq Z_1 \quad (2)$$

$$III. \frac{1}{P_{eb}} \frac{\partial^2 C_b}{\partial Z^2} - \frac{\partial C_b}{\partial Z} - \frac{\partial C_b}{\partial \theta} = 0, Z \geq Z_1 \quad (3)$$

위의 미분방정식을 풀기 위한 경계조건은 다음과 같다.

$$C_a(-\infty) = \text{finite}$$

$$C_b(+\infty) = \text{finite}$$

$$C_a(0^-) - \frac{1}{P_{ea}} \frac{dC_a(0^-)}{dZ}$$

$$= C(0^+) - \frac{1}{P_e} \frac{dC(0^+)}{dZ}$$

$$C(Z_1^-) - \frac{1}{P_e} \frac{dC(Z_1^-)}{dZ}$$

$$= C_b(Z_1^+) - \frac{1}{P_{eb}} \frac{dC_b(Z_1^+)}{dZ}$$

$$C_a(0^-) = C(0^+)$$

$$C(Z_1^-) = C_b(Z_1^+)$$

(1), (2), (3)식을 Laplace transform 으로 정리하고 경계조건을 대입하여 풀면 다음과 같다.

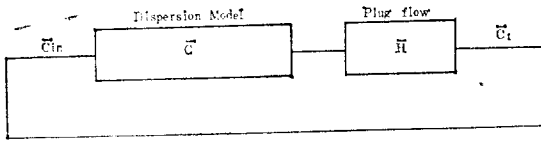


Fig. 2. Dispersion Model

$$\bar{C} = \frac{\exp\left\{-P_e\left(\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{s}{P_e}} - \frac{1}{2}\right)\right\}}{2\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{s}{P_e}}} \quad (4)$$

기포탑내의 유체의 흐름을 dispersed flow 라 간주하고, Reservoir에서의 흐름을 Plug flow 라고 보아 Fig. 2를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{C}_1 = \bar{C}_{in} * \bar{C} * \bar{H}$$

Where : \bar{C}_{in} = Dirac delta function

$$\bar{C} = \frac{\exp\left\{-P_e\left(\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{s}{P_e}} - \frac{1}{2}\right)\right\}}{2\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{s}{P_e}}}$$

$$\bar{H} = \exp(-\theta_P S)$$

Inversion 하면

$$C_1 = \sqrt{\frac{P_e}{4\pi(\theta - \theta_P)}} \exp\left\{-\frac{P_e}{4(\theta - \theta_P)}[1 - (\theta - \theta_P)]^2\right\}$$

액체가 저순환되므로 Convolution 을 계속하 면 다음과 같은 무한급수식으로 나타낼 수 있다.

$$C = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\frac{P_e}{4\pi(\theta - i\theta_P)}} \exp\left\{\frac{-P_e}{4(\theta - i\theta_P)}[i - (\theta - i\theta_P)]^2\right\} \quad (5)$$

θ_P 가 0.25 이고 Peclet Number 가 5, 15, 25, 30 인 경우에 대하여 각각 (5)식을 θ 와 C 의 관계로 도시해보면 Fig. 3 과 같이 나타낼 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 4 에 나타낸 바와같이 기포탑과 저장조 (Reservoir)는 내경이 각각 5.6 cm 이고 높이가

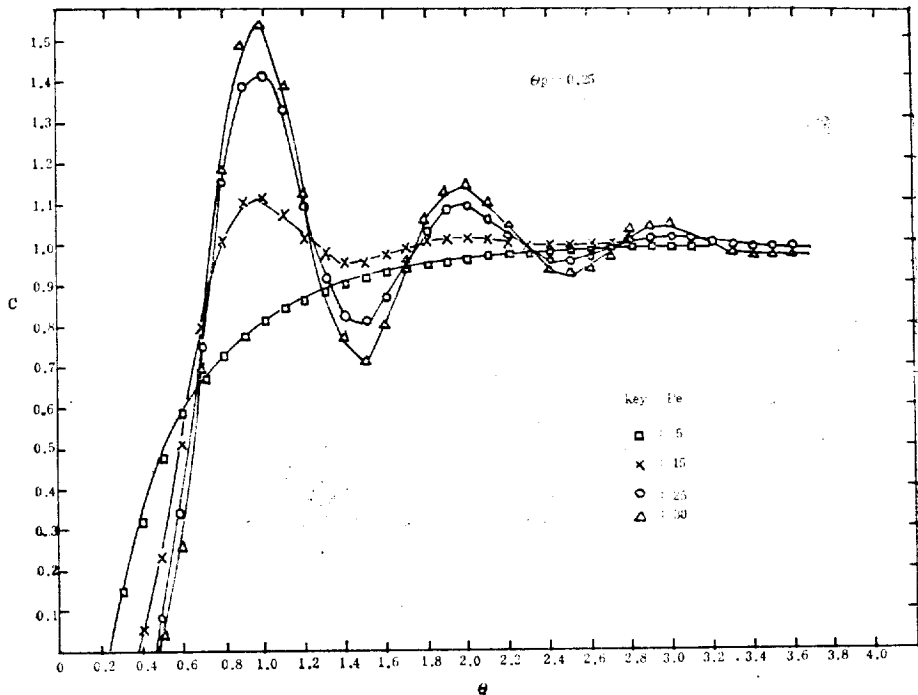
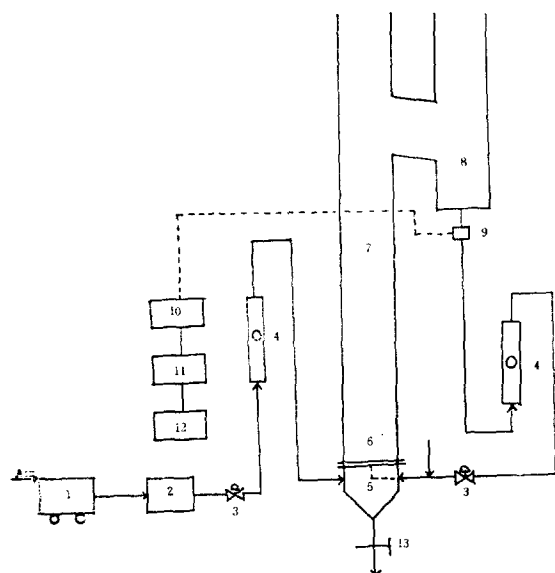


Fig. 3. Four Calculated Response Curves



1. Air Compressor
2. Holding Tank
3. Needle Valve
4. Rotameter
5. Gas Chamber
6. Gas Distributor
7. Bubble Column
8. Reservoir
9. Conductivity Cell
10. Wheatstone Bridge
11. Amplifier
12. Recorder
13. Cock Valve

Fig. 4. Schematic Flow Diagram

125 cm, 35 cm 인 아크릴 원통관으로 만들었다. 기체 분산판의 기공은 0.4 mm 이며, 기공수는 24 개로 하였으며 실험장치에서 나타내는 모든 연결은 염화비닐튜브로 배관 하였다. 공기는 탑 하부의 Gas chamber 와 기체 분산판을 통해 탑 저로 들어가고, 액체는 일정높이까지 채우고 공기가 주입되면 밀도차에 의한 체적팽창으로 액체가 저장조 및 유량계를 거쳐 탑저로 순환된다. 순환되는 유량은 유량계로 측정되며 이를 순환 속도라 하였고, Peclet Number 와 순환시간, 혼합시간은 Tracer(0.3% NaCl)의 주입에 의한 Impulse-Response technique 에 의한 체재시간 분포 곡선을 해석하여 구하였다. 순환시간은 기포탑과 저장조를 한번 순환하는데 걸리는 시간

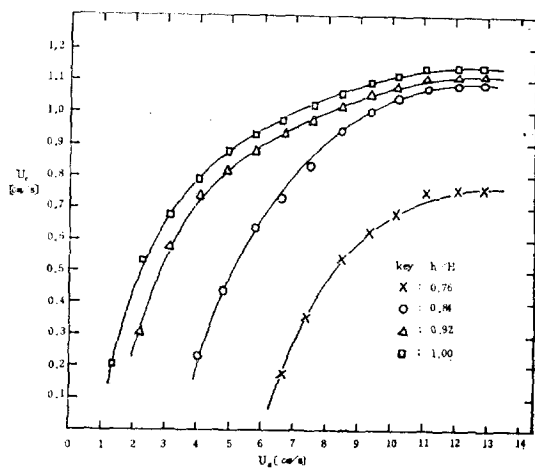


Fig. 5. Effect of gas velocity on circulation rate

으로서 응답곡선(Fig. 3 참고)에 나타난 두개의 인접된 농도 피크사이의 경과시간으로부터 결정할 수 있으며, 혼합시간은 기포탑과 저장조를 반복순환 하는동안 거의 균일하게 혼합하는데 필요한 시간으로서 이때부터 응답곡선은 거의 일정하게 기록된다. 본실험에서는 임의로 응답시간임계(response time limit)를 $\pm 5\%$ 로 정하였으며, 따라서 응답이 최종치의 $\pm 5\%$ 안에 접근하기 시작할때까지의 시간을 혼합시간으로 간주하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 순환속도와 기체 체류량

공기가 기포탑에 주입되면 밀도차에 의하여 액체가 저장조를 거쳐 순환이 일어난다. 이때 순환되는 액체의 양은 유량계로 측정되며 이를 순환 속도라 정의하여 Fig. 5에 순환속도, U_c ,에 미치는 기체유속의 영향을 도시 하였으며 기체유속이 증가 함에따라 기체 체류량이 증가하여 $(h/H + \epsilon_G)$ 은 증가하게 되므로 순환속도가 증가하게 된다. 또한 순환속도, U_c ,는 액체의 높이와 탑높이의 비, h/H ,에 따라서도 증가하게 되고 기체유속이 높은 영역에서는 기체 체류량의 증가가 거의 없으므로 거의 일정하게 된다.

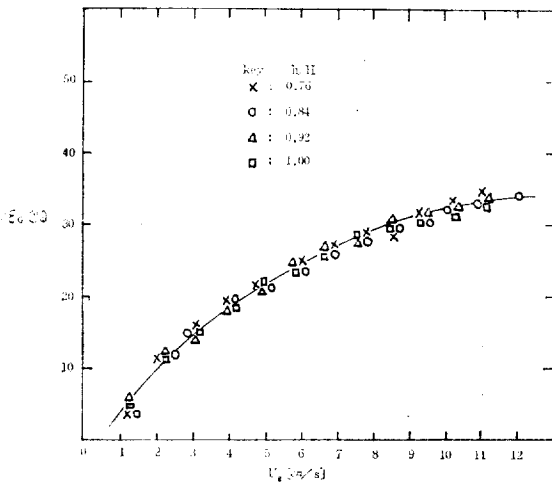


Fig. 6. Effect of superficial gas velocity on gas hold-up

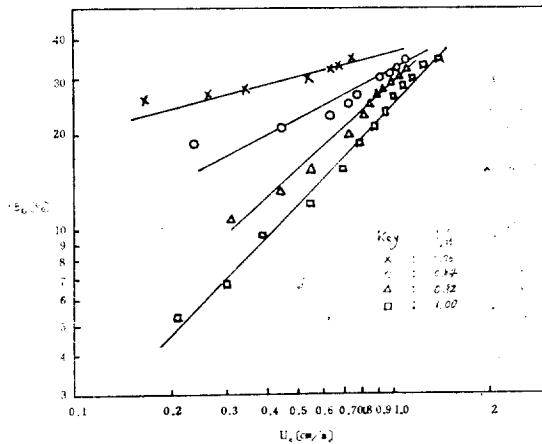


Fig. 7. Effect of circulation rate on gas hold-up

그리고 Fig. 5에서 보여 주듯이 h/H 가 0.76인 경우 기체유속이 6.1 cm/s가 되어야 순환이 일어나는 이유는 기체유속이 6.1 cm/s보다 커야 만이 $(h/H + \epsilon_G) > 1$ 이 되기 때문이다.

Fig. 6은 기체 체류량을 기체유속에 대해 도식한 것이다. 기체 체류량은 기체유속이 증가함에 따라 증가하나 액체의 높이에는 영향을 받지 않음을 보여준다. 또한 Fig. 7에 기체 체류량을 순환속도에 관해 도식한 바처럼 h/H 에 따라 일정한 관계는 보이지 않으나, h/H 가 1일때 기체 체류량은 $U_c^{1.13}$ 에 비례해서 증가함을 알 수 있다. 이는 일반 기포탑에서의 기체 체류량에 관

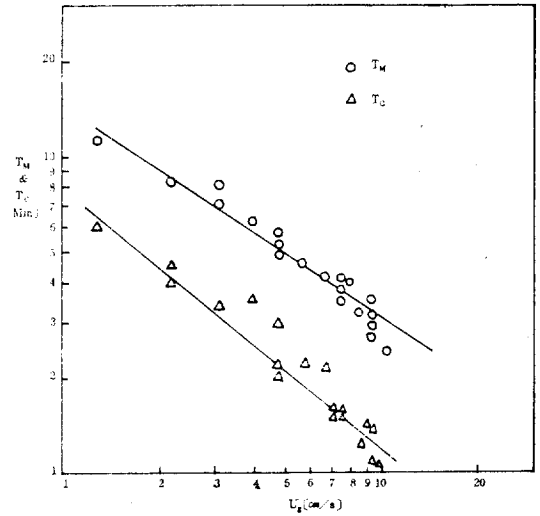


Fig. 8. Effect of gas velocity on mixing time and circulation time

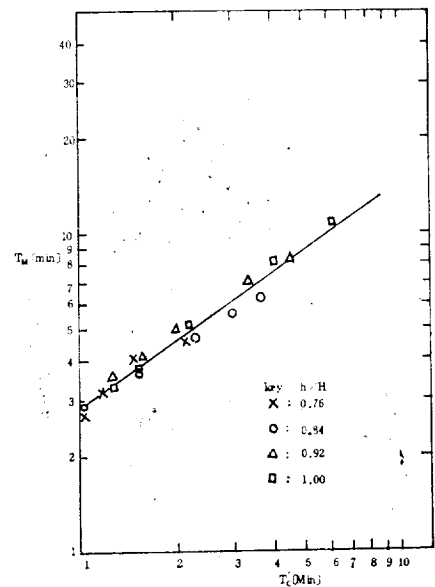


Fig. 9. Effect of circulation time on mixing time

한 Data를 간접적으로 순환속도로 나타낼 수 있음을 의미한다.

4.2. 순환시간과 혼합시간

체재시간 분포 곡선의 두개의 인접한 농도 피크사이의 시간간격으로 부터 순환시간을 구하고 Tracer가 주입된 순간부터 응답시간임체(Resp-

onse time limit)까지의 시간으로 혼합시간을 정의하여 순환시간, T_C , 과 혼합시간, T_M , 을 기체 유속에 대해 Fig. 8에 도시 해보면 순환시간은 $U_g^{-0.93}$, 혼합시간은 $U_g^{-0.68}$ 에 비례하여 감소하며 이를 Fig. 9와 같이 T_M 을 T_C 에 대해 도시하여 상관시키면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_M = 8.48 T_C^{0.73} \quad (6)$$

4.2. 축방향 혼합

Fig. 10은 Peclet Number를 기체유속에 대해 도시한 것이다. 이그림에서 나타난 바와 같이 Peclet Number는 기체유속이 증가 함에 따라 거의 일정한 경향을 나타냈으며 탭내의 액체

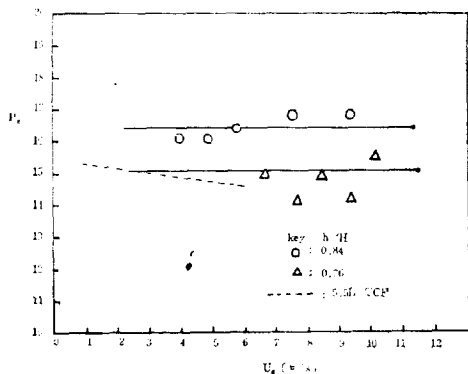


Fig. 10. Peclet number vs. superficial gas velocity

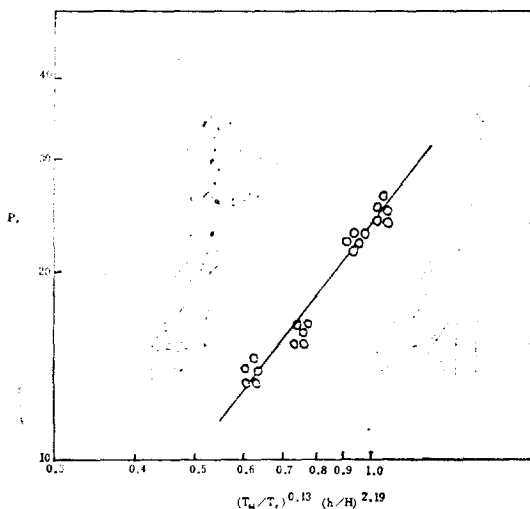


Fig. 11. Correlation for Peclet Number

의 높이와 탭높이와의 비가 증가 함에 따라 증가하는 것으로 나타났고, 위의 Peclet Number에 미치는 기체유속의 경우와 마찬가지로 순환속도에 대해서도 같은 경향을 보여준다.

또한 이것을 탑순환 발효조에서 Lin³⁰등이 기포탑 및 저장조의 전 System를 two phase flow로 하여 행한 실험과 비교 해본 결과 같은 범위에 있음을 알 수 있었다. 그리고 Peclet Number와 T_M/T_C , h/H 사이의 상관 관계를 도시해 보면 Fig. 11과 같이 나타나며 이를 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$P_e = 23.25 (T_M/T_C)^{0.13} (h/H)^{2.19} \quad (7)$$

5. 결 론

내경이 5.6 cm인 외부 순환을 동반한 Air-lift 기포탑에서 기체유속을 1.3~12.05 cm/s, 탭내의 액체의 높이와 탭높이와의 비를 0.76~1.00으로 변화 시키면서 기체 체류량, 혼합시간, 순환시간, Peclet Number에 대해 얻어진 실험 결과는 다음과 같다.

1. 기체 체류량은 액체의 순환속도가 증가 함에 따라 증가 하는 경향을 나타낸다.

2. 혼합시간과 순환시간은 기체속도가 증가 함에 따라 각각 다음과 같이 감소하는 경향을 나타낸다.

$$T_C = 571.9 U_g^{-0.93}$$

$$T_M = 879.3 U_g^{-0.68}$$

또 혼합시간과 순환시간은 순환되는 액체의 속도가 증가 함에 따라 직선적으로 감소하는 경향이 있다.

3. Peclet Number와 T_M/T_C 그리고 h/H 사이의 상관 관계는 다음과 같다.

$$P_e = 23.25 (T_M/T_C)^{0.13} (h/H)^{2.19}$$

사 용 기 호

- C_i Concentration at distance $x = iH$ in column with recirculation
 C_∞ Concentration at infinite time in column with recirculation
 C Normalized concentration(C_i/C_∞)
 D_L Dispersion coefficient
 h Water height in the bubble column
 H Column height
 L Column Length
 Pe Peclet number($U_L L/D_L$)
 T Time
 T_C Circulation time
 T_M Mixing time
 T_P Mean residence time of the liquid in the reservoir
 U_C Circulation rate
 U_g Superficial gas velocity
 U_L Actual liquid velocity
 Z Dimensionless length

Greek Letters

- θ Dimensionless time(T/T_C)
 θ_P Dimensionless mean residence time(T_P/T_C)
 ϵ_G Gas hold-up

참 고 문 헌

1. C.S. Ho, L.E. Erickson and L.T. Fan, Biotech. and Bioeng., 19(1977), 1503.
2. L.L. Gasner, Biotech. and Bioeng., 16(1974), 1179.
3. C.H. Lin, B.S. Fang, C.S. Wu, H.Y. Fang, T.F. Kuo and C.Y. Hu, Biotech. and Bioeng., 18(1976), 1557.
4. S.K. Achwal and J.B. Stepanek, Can. J. Chem. Eng. 57 (1979), 409.
5. T. Reith, S. Renken and B.A. Israel, Chem. Eng. Sci., 23(1968), 619.
6. O. Levenspiel and W.K. Smith, Chem. Eng. Sci., 6(1957), 227.
7. R.M. Voncken, D.B. Holmes and H.W. Den Hartog, Chem. Eng. Sci., 19(1964), 209.
8. J.E. Harrell, J.J. Perona, Ind. Eng. Chem. Proc. Des. & Dev., 7(3) (1968), 464.
9. D.B. Holmes, R.M. Voncken and J.A. Dekker, Chem. Eng. Sci., 19(1964), 201.
10. B. Fu, H. Weinstein, B. Bernstein and A.B. Shaffer, I&E.C. Proc. Des. & Dev., 10(4) (1971), 501.
11. J.F. Wehner and R.H. Wilhelm, Chem. Eng. Sci., 6(1956), 89.
12. O. Levenspiel, "Chemical Reaction Engineering," 2nd ed. Wiley, N.Y. (1972).
13. Y.M. Hahm, Korea Univ., Thesis for degree of Ph.D (1980).
14. Y. Ohki and H. Inoue, Chem. Eng. Sci., 20(1965), 261.
15. M.Y. Murray, Can. J. of Chem. Eng. 53 (1975) 113.
16. H. Kubota, Y. Hosono and K. Fujie, J. of Chem. Eng. of Jap. 11(4) (1978), 319.
17. H. Takahashi and F. Yoshida, J. Ferment. Technol., 57(4) (1979), 349.
18. Y. Taitel, D. Bornea and A.E. Dukler, AlchE. J., 26(3) (1980), 345.

