

《報文》 HWAHAK KONGHAK Vol. 18, No. 3, June 1980, pp. 133-140
(Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers)

二重氣泡塔에서의 流體의 흐름

金 炯 一 · 朴 晉 用

서울대학교 공과대학 화공과

(접수 1979. 11. 28)

The Flow Pattern of Liquid in a Gas-Lift Column

Hyoung-Il Kim and Jin-Yong Park

*Department of Chemical Engineering, College of Engineering
Seoul National University, Seoul 161, Korea*

(Received November 28, 1980)

요 약

내부폭기형 동심원통 이중기포관내에서의 액체의 유동특성을 물-공기계에 관하여 실험적으로 연구하였다. 액체 혼합의 정도는 폭기관에서는 연속 혼합조 흐름(tanks-in-series flow) 그리고 순환관에서는 플러그 흐름(plug flow)으로 표시되는 유동모형에 의하여 적합하게 표현될 수 있었다. 폭기관 단위의 단위 탱크의 높이에 해당하는 단위혼합높이(Height of Mixing Unit)를 정의하고 유입액체의 기체에 따른 이의 관계식을 제시하였다.

Abstract

The flow pattern of liquid was experimentally studied in a gas-lift column where water and air were continuously introduced into the inner column of two coaxial cylinders.

The flow of liquid in the inner aeration column was well represented by the tanks-in-series model while that in the recycle column was more close to plug flow.

The height of mixing unit (HMU) was defined as height of unit tank in the aeration column and was correlated to the gas and liquid velocities.

1. 서 론

二重氣泡塔은 흡수탑 또는 발효조로서 널리

응용되고 있다.^{4,7,9} 산업적으로 사용되는 이중기포탑에는 여러가지 형태가 있으나,⁴ 그 작동원리는 가장 기본적으로 널리 쓰이는 同心圓桶 二重氣泡塔의 원리와 동일하다. 즉

기체의 체유량의 차이에 의한 평균밀도의 차이에 따라 폭기관과 순환관 사이에는 유체의 순환이 별다른 기계적인 장치 없이도 자연적으로 유발되고 이는 이중기포탑의 특성과 장점의 기본이 된다.^{4,7,9)}

이중기포탑에 관한 실험 및 이론적인 연구는 Chakravarty 등¹⁾의 기체의 체유량에 관한 실험 연구, Gasner³⁾의 물질 전달에 관한 실험연구, Ho 등⁴⁾이 행한 발효조로서의 이중기포탑의 설계 및 운전에 관한 모사연구 등이 보고되어 있으나 그 유동특성에 관하여는 보고된 바가 없다.

본 연구는 전해질 용액을 사용한 추적인자(tracer) 실험을 통하여 연속류 내부폭기형 동심원통 이중기포탑의 유동특성을 물과 공기계에 관하여 구명하고 이를 적합한 유동모형으로 표시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 이중기포탑의 장치를 나타낸다. 기포탑은 내부직경과 길이가 각각 10.3cm, 151cm이고 두께가 0.2cm인 내부관과 직경과 길이가 각각 14.6cm, 169.2cm인 외부관으로 구성되어 있다. 로타미터에 의하여 정량으로 유입된 공기는 기포탑 바닥에서 직경 7cm의 관에 직경 2mm의 구멍 42개를 뚫어 만든 공기분산관을 통하여 분산되었으며, 역시 로타미터에 의하여 정량된 물은 기포탑 하부의 유입관을 통하여 내부폭기관내로 유입되어 공기와 병류로 위로 흘러 상부에서 유출되었다.

추적인자로서는 KCl 용액을 사용하였으며, 이를 물의 유입부에 펄스(pulse)로 주사하고 기포탑의 유출구에서 물의 전기 전도도를 측정하여 도표기록계(chart recorder)에 의하여 기록하였다. 전기전도도 측정장치의 회로와 탐사침(probe)은 Khang 등⁶⁾의 고감도연속측정장치를 수정하여 사용하였으며, 이의 상세한 도면과 제작 과정은 金⁵⁾의 논문에서 상세히 보고 되어있다.

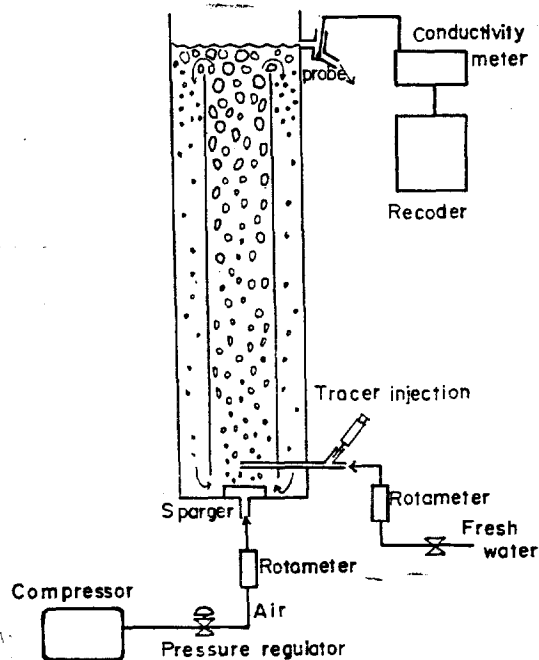


Fig. 1. This graph shows the schematic diagram of the experimental set up

2.2. 실험방법

기포탑에 물과 공기를 일정한 유량으로 유입한 후 정상상태에 도달하도록 30분간 대기한 다음 전도도측정 장치와 기록계를 점검 및 영점수정하고 출력 신호가 안정된 후 주사기로 KCl 포화용액 50cc를 물 유입관에 펄스로 주입하였다. 실험은 추적인자 곡선(tracer curve)이 목적으로 원래의 기선(base line)에 다달을 때까지 계속 하였으며, 이후 공기와 물의 유입밸브를 순간적으로 잠근다음 액면 높이의 감소율로써 전체기포탑내의 공기의 체류량(holdup)을 측정하였다. 위의 실험을 공기와 물의 속도를 내부관 기준으로 각각 $V_g=0.25\sim3.50\text{cm/sec}$, $V_l=0.12\sim1.12\text{cm/sec}$ 의 범위 내에서 변화 시켜가며 반복하였다.

3. 실험 결과 및 해석

3.1. 체류량(Holdup)

Fig. 2는 물과 공기속도에 따른 기포탑 전체

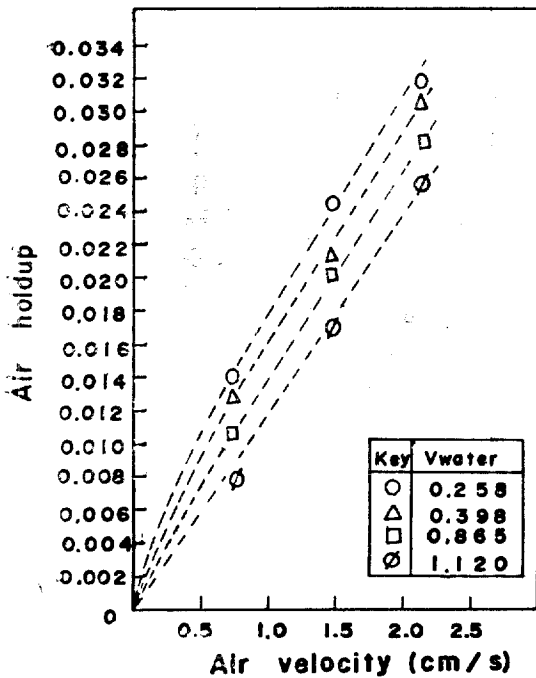


Fig. 2. This graph shows the total air holdup for various liquid and air velocities

의 공기의 체류량에 관한 실험 데이터를 보여준다. 공기의 체류량은 공기의 속도에 따라 증가하나 증가하나 액체의 속도에 따라서는 감소함을 볼 수 있는데 이러한 경향은 단일 기포탑에

서 관찰된 현상과^{2,10)} 일치한다. 그러나 추적인자 곡선(tracer curve)으로부터 측정된 액체의 순환유량을 유출유량으로 나눈 액체의 순환비(Recycle ratio)가 20~200 인본 실험 조건하에서 상대적으로 미소한 액체의 유입속도(Fresh water velocity)가 전체 체류량에 미치는 영향이 무시될 수 없음은 매우 주목된다. 이러한 현상은 반복실험 중 일관성 있게 재현 되었는데 기포가 대부분 내부의 폭기관에 치중한 본 실험의 전반에 걸쳐서 액체의 순환 및 혼합 등 기포탑의 유동 상태는 체류량의 변화에 따른 예상되었던 현상과 잘 부합되었다.

위의 체류량 데이터를 만족시키며, 또한 적어도 본 실험의 범위 근처에서 사용될 수 있는 상관식에는 여러가지 형태가 있겠으나, 본 연구에서는 $H_0 = a \cdot [\exp(-bV_l)] \cdot V_g^c$ 와 $H_0 = [a/(1+bV_l)] \cdot V_g^c$ 의 두가지 상관식이 가능한 실질적인 극한 경우를 만족 시킴을 고려하여 이를 검토한 결과 전자가 좀더 만족스러운 결과를 주었다. 즉

$$H_0 = 0.02[\exp(-0.45V_l)] \cdot V_g^{0.68} \quad (1)$$

이는 $V_g=0$ 일때 $H_0=0$ 그리고 $V_l=0$ 일때 H_0 = 유한 값 이라는 극한의 경우를 만족시키며, 또한 회분식(batch) 액체($V_l=0$)의 경우에 관한 Chakravarty¹¹⁾의 실험 데이터와도 비교적 잘

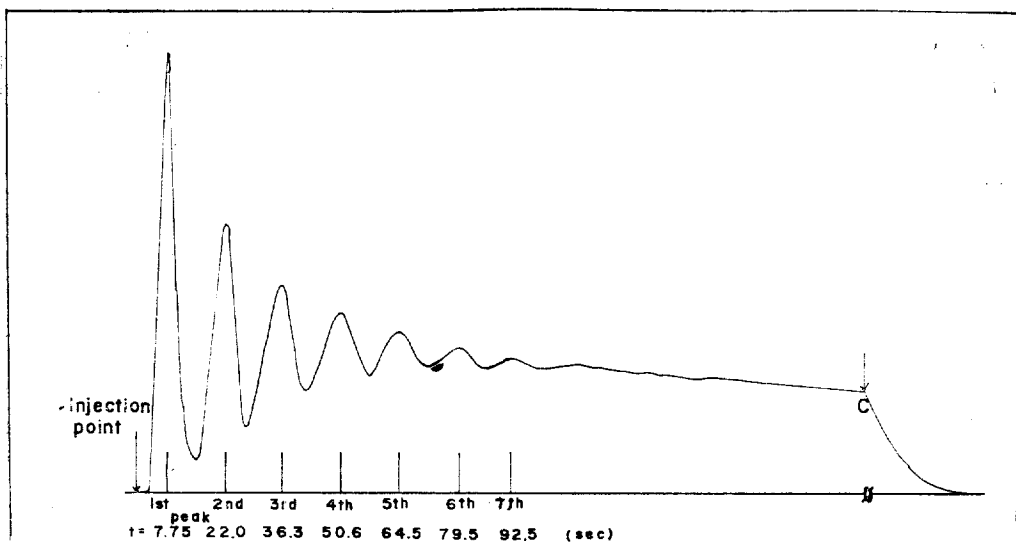


Fig. 3. This graph shows a typical tracer curve. Note that the curve after C well fits an exponential washout curve

일치한다.

3.2. 추적인자 곡선(Tracer Curve) 및 유동 모형

Fig. 3는 전형적인 실험 추적인자 곡선으로서 환류시스템에서 기대되는 피크(peak)들을 명백히 보여준다. 기록계의 속도를 감소시킨후(C 이후)의 곡선은 매우 빠른 순환계에서 기대되는⁸⁾ 혼합류형의 washout 곡선을 보여준다.

이중기포탑내의 발효과정의 수식모형에서 Ho 등⁹⁾은 폭기관과 순환관을 공히 연속 혼합조 흐름(tanks-in-series flow) 모형으로 가정하였으나, 본 실험중 저자는 간단한 예비실험을 통하여 순환관에서의 액체의 흐름이 폭기관에서의 그것에 비하여 플러그 흐름(plug flow)에 매우 근사함을 관찰하였다. 즉 액체의 유입관에 염료를 주입시키고 기포탑 내에서의 이의 유동상태를 관찰한 결과 폭기관내에서는 상당한 혼합이 이루어졌으나 순환관에서는 일정한 폭의 염료구간(dye zone)이 형성된 채 그대로 관류하였는데 이는 순환관에서의 혼합이 폭기관에서의 그것에 비하여 상대적으로 매우 약하며 따라서 폭기관을 연속 혼합조 흐름(tanks-in-series flow) 그리고 순환관을 플러그 흐름(plug flow)으로 표시한 Fig. 4의 유동 모형이 적합함을 의미한다.

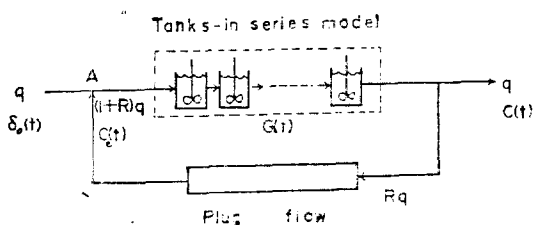


Fig. 4. This graph shows a model for the flow of liquid in the gas-lift column

Levenspiel⁸⁾에 의하면 위의 유동모형의 펄스(pulse) 입력에 대한 출력 $C(t)$ 는

$$C(t) = \frac{1}{R} \sum \left(\frac{R}{1+R} \right)^k \cdot \frac{1}{T_m^{kN}} \cdot \frac{[t - (k-1)T_p]^{kN-1}}{(kN-1)!} \cdot e^{-[t - (k-1)T_p]/T_m} \quad (2)$$

로 주어지며, 이 때 N, R, T_p 는 각각 탱크수,

순환비 그리고 순환관에서의 체류 시간을 나타낸다.

3.3. 순환액체의 속도

폭기관과 순환관에서의 유체의 평균체류시간을 각각 T_m 과 T_p 라 하고 추적인자곡선의 피크(peak)간의 상호 간섭이 심각하지 않다면, n 번째 피크가 나타나는 시간 T_n 은 Eq. (2)에 의하여 다음 식으로 주어진다. 즉

$$T_n \approx n(T_p + T_m) - T_p \quad (3)$$

본 실험의 범위내에서 피크간의 상호 간섭이 존재하기는 하나 그 간섭의 정도는 심각한 편이 아니고 (Fig. 3참조), 따라서 Eq. (3)은 근사적으로 성립되며, Fig. 5는 전형적인 추적인자 곡선들에 관한 T_n vs. n 의 도표와 그로부터 T_p 와 T_m 을 구하는 과정을 보인다.

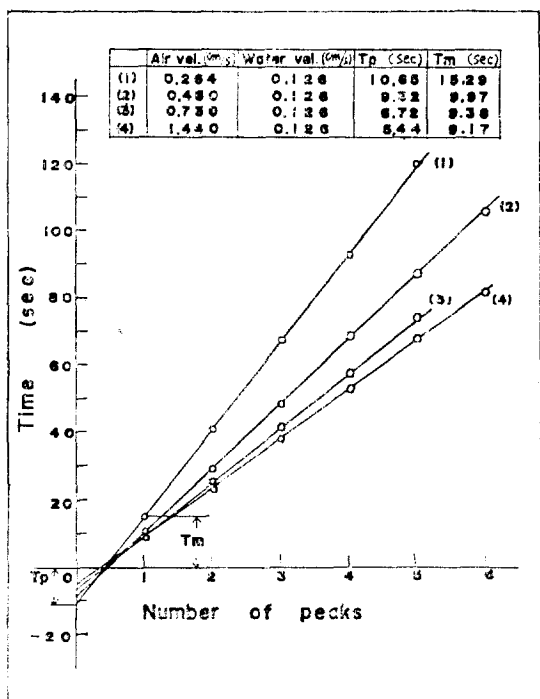


Fig. 5. This graph shows that Eq. (3) is a good approximation for the peaks of tracer curves and illustrates how to evaluate T_m and T_p

Fig. 6는 T_p 로부터 구한 순환 액체의 폭

기관에서의 속도를 보인다. 순환 액체의 속도는 공기의 속도에 따라 초기에 급격히 증가하나 공기 속도가 2.0cm/sec 이상이 되면 매우 둔화되는데 이러한 폭기영역에서는 약간의 기포가 순환액체를 따라 폭기관으로 부터 순환관으로 비탈 동반(entainment) 되어 양쪽관간의 평균밀도차를 감소시키기 때문이다. 또한 순환액체의 속도는 유입액체의 속도의 증가에 따라 상당히 감소하는데 이는 Fig. 2에서 관찰된 바와 같이 체류량(holdup)의 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

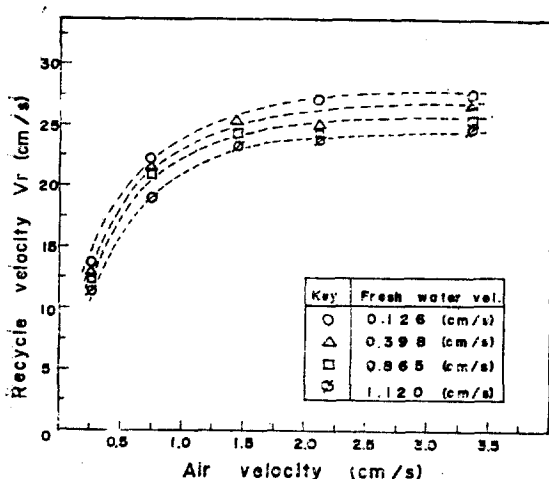


Fig. 6. This graph shows the recycle liquid velocity for various air and water velocities

공기와 유입 액체의 속도에 대한 순환 액체의 관제식은 본 실험의 범위 근처에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_r = 22.9[\exp(-0.13V_i)] \cdot V_e^{0.35} \text{ (cm/sec)} \quad (4)$$

3.4. 단위혼합높이(Height of Mixing Unit)

폭기관내의 탱크수는 추적인자 곡선으로 부터 다음의 과정을 거쳐 계산되었다. 즉 면적제와 매우 빠른 환류제에 관한 exponential wash-out 원리⁸⁾에 의하여 추적인자 곡선의 면적을 구하고, 산출된 전체 면적에 의하여 추적인자 곡선을 정규화(normalization)하고, 첫번째 피크의 정규화된 높이를 측정한 다음, 이를 첫번째 피크와 두번째 피크간의 상호간섭이 매우 미

약함을 고려하여 (Fig. 3의 추적인자 곡선 참조) Eq. (3)으로부터 유도된 Eq. (5)에 의한 첫번째 피크의 높이와 비교하여 탱크의 수 N 을 결정하였다.

$$C_1(t_{max}) = \frac{1}{(1+R)T_m} \cdot \frac{N(N-1)^{N-1}}{(N-1)!} \cdot e^{-(N-1)} \quad (5)$$

실제 기포탑 설계 및 운전에 유용하게 쓰일 수 있는 폭기관의 단위탱크의 높이 (단위 혼합 높이; Height of Mixing Unit; HMU)는 실제 폭기관의 높이를 위에서 구한 탱크수로 나누어 줌으로써 계산 되었다.

Fig. 7은 공기와 물의 유입 속도에 따른 단위 혼합 높이를 보인다. 단위 혼합 높이는 공기의 속도에 따라 초기에는 급격히 증가하나 공기의 속도가 증가될수록 매우 둔화됨을 볼 수 있는데 이는 액체의 순환속도의 공기속도에 따른 의존도에 관한 Fig. 6의 경향과 일치한다.

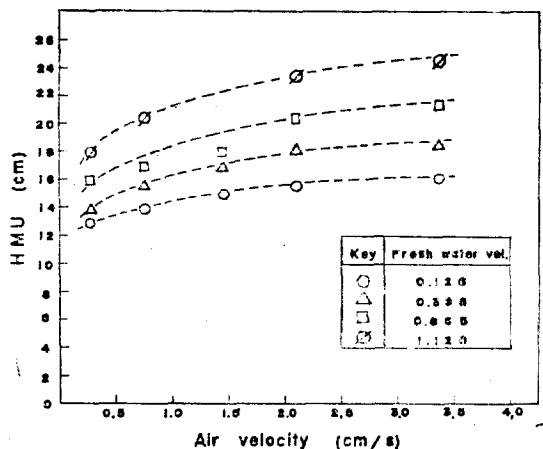


Fig. 7. This graph shows the Height of Mixing Unit for various air and water velocities

Fig. 8은 액체의 유입 속도에 따른 단위혼합 높이를 보인다. 단위혼합높이는 유입속도의 증가에 따라 초기에는 완만하게 그리고 유입속도가 증가할수록 급격히 변하고 있는데 이 역시 유입속도의 증가에 따라 폭기관의 체류량이 줄어들고 (Fig. 2 참조), 순환 액체의 속도가 늦어짐으로서 (Fig. 6 참조) 혼합의 정도가 강해짐을 의미한다.

단위 혼합높이의 공기의 유입속도에 따른 극

한($V_g=0$)의 경우는 정의하기가 곤란하나 실험의 범위 근처에서 다음의 관계식은 실험데이터를 만족스럽게 표시 한다.

$$HMU = 14.27 [\exp(0.32 V_l)] \cdot V_g^{0.08} \text{ (cm)} \quad (6)$$

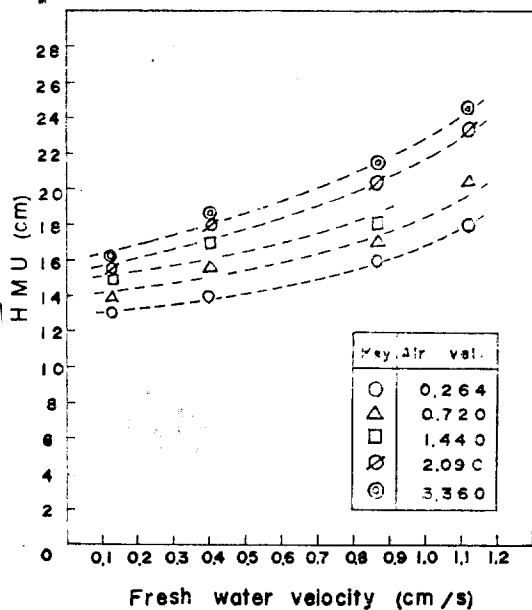


Fig. 8. This graph shows the Height of Mixing Unit for various air and water velocities

4. 결 론

본 연구는 내부폭기형 동심원통 이중기포관의 액체의 유동특성에 관하여 실험적인 연구를 행하고 다음의 결론을 얻었다.

(1) 기포탑내의 공기의 체류량은 공기의 속도에 따라 증가하고 유입액체의 속도에 따라 감소하였으며 실험의 범위내에서 다음식으로 표시되었다.

$$H_0 = 0.02 [\exp(-0.45 V_l)] \cdot V_g^{0.68}$$

(2) 순환관에서 폭기관으로 순환되는 유체의 폭기관내의 속도는 공기의 속도에 따라 증가하고 유입 액체의 속도에 따라 감소 하였으며, 실험의 범위 근처에서 다음 식으로 표시되었다.

$$V_r = 22.9 [\exp(-0.13 V_l)] \cdot V_g^{0.35}$$

(3) 이중기포탑의 액체의 유동 특성은 폭기관에서는 연속 혼합조 흐름(tanks-in-series flow) 그리고 순환관에서는 플러그 흐름(plug flow)으로 표현된 유동모형으로 표현되며, 이때 폭기관의 단위탱크의 높이를 표시하는 단위혼합높이(HMU)는 공기의 속도에 따라 증가하고 유입액체의 속도에 따라서도 또한 증가하였으며, 다음의 관계식으로 표시되었다.

$$HMU = 14.27 [\exp(0.32 V_l)] \cdot V_g^{0.08}$$

Nomenclature

- $C(t)$ tracer concentration in the outflow and recycle liquid at time t
 H_0 overall gas holdup, fractional volume
 k dummy variable
 N number of tanks
 R recycle ratio; volumetric flow rate of the recycle liquid/volumetric flow rate of the inlet liquid
 T_m mean residence time of the liquid in aeration column, sec
 T_n time for the n th peak, sec
 T_p mean residence time of the liquid in recycle column, sec
 t time, sec
 V_g gas velocity, cm/sec
 V_l fresh liquid velocity based on aeration column, cm/sec
 V_r recycle liquid velocity based on aeration column, cm/sec

References

1. M.Chakravarty, S.Begum, H. D. Singh, I. Baruah and M. S. Iyengar, Biotech. and Bioeng. Symp. 4, (1973), 363.

2. S.H. Eissa, M.M. El-Halwagi and M. A. Saleh, Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., **10**, 1, (1971), 31.
3. L. L. Gasner, Biotech. and Bioeng., **16**, (1974), 1179.
4. C. S. Ho, L. E. Erickson and L. T. Fan, Biotech. and Bioeng., **19**, (1977), 1503.
5. H. I. Kim, M. S. Thesis, Seoul National Univ., 1979.
6. S.J. Khang and T.J. Fitzgerald, Ind. Eng. Chem. Fundam., **14**, 3, (1975), 208.
7. 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.
8. O. Levenspiel, "Chemical Reaction Engineering," 2nd ed., Wiley, N.J., 1972, p294.
9. G. T. MacClean, L. E. Erickson, K. H. Hsu and L. T. Fan, Biotech. and Bioeng., **19**, (1977), 493.
10. T. Reith, S. Renken and B. A. Israel, Chem. Eng. Science, **23**, (1968), 619.

