

## 충전식 회전 원반 반응기의 동특성 및 모델링

한재성\* · 송규민 · 홍원희 · 장호남

한국과학기술원 화학공학과  
\*MIT공과대학 화학공학과  
(1992년 10월 27일 접수, 1993년 6월 3일 채택)

## Dynamic Characteristics and Modeling of Rotating Packed Disk Reactor

Jae-Sung Han\*, Kyu-Min Song, Won-Hi Hong and Ho-Nam Chang

Department of Chemical Engineering, KAIST  
\*Department of Chemical Engineering, MIT  
(Received 27 October 1992; accepted 3 June 1993)

### 요 약

충전식 회전 원반 반응기에서의 흐름 형태를 50% 글리세린 수용액과 물감을 이용하여 조사하였다. 관찰에 의하면 반응기에서의 혼합영역은 유체가 원반과 같은 방향으로 회전하는 영역과 반대방향으로 회전하는 영역으로 나눌 수 있었고, 두 영역에서의 유체흐름은 난류이며 유체는 완전 혼합되었다. 반응기내 유체의 체류시간 분포를 설명하기 위하여 완전 혼합되는 2개의 영역과 셋길로 구성되는 3변수 다단모델을 설정하였으며 모델의 변수는 실험값과 Marquardt의 최적화 연산식을 이용하여 구했다. 모델은 실험값을 잘 대변하고 있음을 확인하였고 체류시간 분포의 해석을 위한 관계식이 제안되었다.

**Abstract**—The flow pattern in a rotating packed disk reactor was studied by using dye tracers in 50% glycerin solution. Based on the observation it was postulated that the fluid can be divided into two regions of mixing; one region where fluid rotates in the same direction of the disk, and the other region where fluid rotates in the opposite direction. The fluids in the two regions were highly turbulent and perfectly mixed. A three-parameter multi-step model was adopted, with each step composed of two perfect mixing regions and a bypassing, to illustrate the residence time distribution of fluid in the reactor. The parameters of the model were obtained from the experimental data, using Marquardt's optimization algorithm. The model was in good agreement with the experimental data. Correlations were proposed for the analysis of residence time distribution.

### 1. 서 론

충전식 회전 원반 반응기는 액상, 기상, 고상의 삼상이 모두 반응에 참여하는 경우 사용할 수 있는 삼상반응기이다. 충전식 회전 원반 반응기에서는 담지체에 담

지된 촉매가 고상을 형성하고 기체의 전달 속도가 반응에 절대적인 조건으로 작용할 때 사용할 수 있으며, 생화학 반응의 경우에는 고정화된 효소나 고정화된 세포가 입자의 형태로 고상을 형성하며 배지가 액상을 형성하고 대사에 직접 참여하는 공기중의 산소가 기상을

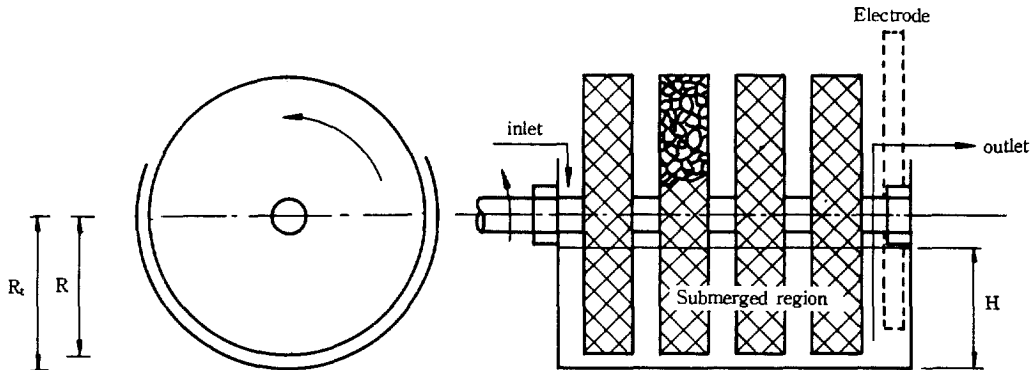


Fig. 1. Schematic diagram of RPDR.

형성한다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 축이 회전함에 따라 원반속에 채워진 입자들은 일정한 주기로 액상과 기상을 교대로 접촉하게 된다. 이 때, 축의 회전속도, 액상의 수위 및 입자의 크기 등의 변화에 따라 입자들에 딸려 올라가는 액체의 양이 달라지게 되며, 이렇게 딸려 올라가는 액체의 양이 많고 적음에 따라 고체를 둘러싼 액막의 두께도 달라지게 되고, 그 결과 기체의 전달속도도 달라지게 된다.

생화학 반응기에서는 산소의 전달이 매우 중요하기 때문에 전달능력을 높이기 위하여 RBC(rotating biological contactor)[1, 2]나 bio-drum[3]이 개발되어 발효와 폐수처리를 위해 사용되고 있다. 그러나 RBC는 원반 표면에 효소나 세포를 고정화시키므로 축의 회전속도가 큰 경우에 표면의 고정화된 물질들이 유실될 위험이 있으며 bio-drum에서는 정체영역을 형성할 가능성이 많아 생산성을 감소시킬 요인이 된다.

충진식 회전 원반 반응기는 고정화된 효소(glucose oxidase)에 의한 포도당 산화반응[4]과 Humicola Spp. 세포를 고정화시켜 Rifamicin S의 생산[5] 등 생화학 반응뿐 아니라 실리카에 담지시킨 Ni촉매로 식용유에 수소를 첨가[6]시키는 데에도 유용하게 사용되고 있다. 그러나 이들 반응기에 대한 특성을 해석하여 반응기화대를 하는 데는 체류시간 분포곡선이 필요하다. 일반 반응기에 대한 체류시간 분포곡선은 직렬-병렬로 연결된 완전 혼합기를 이용하여 모델링하고 이를 Laplace 영역에서 해석한다. 교반식의 반응기에 대한 체류시간분포는 이미 많이 조사되어져 있으며[7, 8] 이에 대한 결과를 여러 모델식[9]과 비교하여 왔다.

본 연구에서는 여러 조업조건의 변화에 따른 유체의 유속 경향을 알아보고 여러 조업변수와 장치변수의 변화에 따른 기체의 전달속도의 변화를 체류시간분포곡선으로부터 추적하기 위하여 반응이 없는 상태를 설정

하였다. 충전물은 유리구슬을 사용하였고 순수한 물을 공기와 접촉시키며 2N-KCl 용액을 펄스로 주입하여 출구에서 농도를 측정하였다. 체류시간을 기술하는 모델은 관측을 토대로 2개의 완전혼합부분과 셋길로 구성되는 혼합모델(mixed model)을 선정하였다.

## 2. 반응기내의 유동현상 및 모델링

### 2-1. 유동현상

50% 글리세린 용액은 뉴튼액체이지만 점도가 높아 잉크의 확산이 그리 빠르지 않아 유체의 유동현상을 관찰하기 용이하다. Fig. 2의 (a)에 표시된 것과 같이, 축이 회전함에 따라 원반은 용액속으로 들어가는 부분과 용액으로 빠져나오기 시작하는 부분을 갖게 된다. 용액으로 들어가기 시작하는 입자 사이의 공간을 메우기 위하여 이 부분에 있는 용액이 연속적으로 원반속으로 빨려 들어가게 되며, 이를 보충하기 위하여 통(trough) 부분의 유체는 대부분이 원반회전의 반대 방향으로 흐르게 된다. 또한 원반속으로 들어간 유액은 입자와의 마찰력과 회전관성력에 의해 축의 회전방향으로 흐르게 된다. 따라서 서로 반대 방향으로 흐르는 두 유체가 존재하게 되며 그 경계는 원반의 회전속도, 유량 등의 조업조건에 따라 원반속에 존재하기도 하고 원반 밖에 존재하기도 한다.

### 2-2. 체류시간분포 및 모델링

두 영역에 존재하는 유체들은 실제 매우 빠른 속도로 움직이면서 혼합되고 있으며 각각을 완전 혼합 부분으로 볼 수 있다. 따라서 Fig. 2(b)와 같은 P, X, Y의 3개의 파라미터를 갖는 3변수 다단모형으로 모델링을 할 수 있다. 여기서 Y는 축의 회전 반대 방향으로 흐르는 유체의 부피비이다. 따라서  $(1-Y)$ 는 입자와의 마찰력이

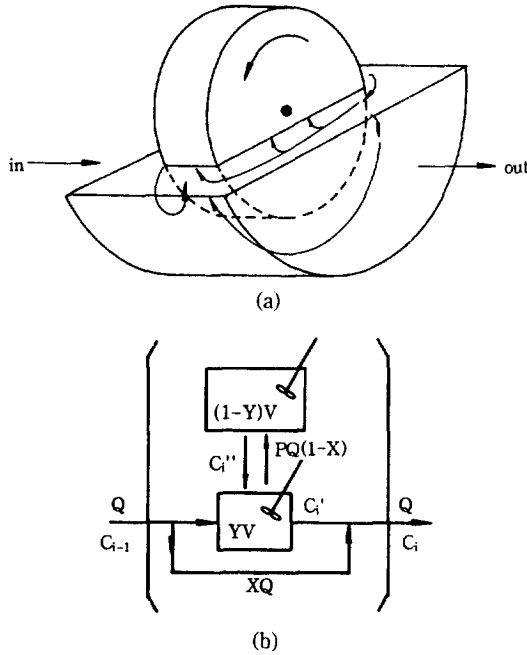


Fig. 2. (a) Schematic flow behavior and (b) proposed model.

나 회전관성에 의해 축의 회전방향으로 흐르며 혼합되는 유체의 부피비가 된다. 또한  $P$ 는 이 두 영역간에 교류되는 유량을 나타내는 변수이며  $X$ 는 우회하는 정도를 나타낸다. Fig. 2(b)에서  $C_{i-1}$ 는  $(i-1)$ 단으로부터 유입되는 유체내 농도이며  $C_i$ 는  $i$ 단을 떠나는 유체내 농도이다. 따라서  $i$ 단에서의 물질수지식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$QC_i = Q(1-X)C_i' + QXC_{i-1} \quad (1a)$$

$$PQ(1-X)(C_i' - C_i'') = V(1-Y) \frac{dC_i''}{dt} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} Q(1-X)C_{i-1} + PQ(1-X)C_i'' \\ = Q(1-X)(1+P)C_i' + YV \frac{dC_i'}{dt} \end{aligned} \quad (1c)$$

이에 대한 초기조건은 다음과 같다.

$$t=0, C_i' = 0, C_i'' = 0 \quad (i \neq 1) \quad (1d)$$

Laplace 변환을 이용하여 해를 구하면

$$\begin{aligned} C_i(s) = \left[ \frac{((1-X)^2(1-Y)N/\bar{t})(s + (NB_1/\bar{t}))}{Y(1-Y)[s + (NB_1/\bar{t})][s + (NB_2/\bar{t})] - [P(1-X)N/\bar{t}]^2} + X \right] \\ C_{i-1}(s) \end{aligned} \quad (2a)$$

$$= F(s)C_{i-1}(s) \quad (2b)$$

와 같이 되며, 여기서  $B_1$ 과  $B_2$ 는

$$B_1 = (1-X)P/(1-Y) \quad (2c)$$

$$B_2 = (1+P)(1-X)/Y \quad (2d)$$

이다. 식 (2b)를 이용하여  $C_N$ 에 대하여 표현하면 다음과 같다.

$$C_N(s) = [F(s)]^{N-1} C_1(s) \quad (3)$$

한편  $t=0$ 일 때 추적자가 펄스로 입력되는 첫번째 단에서의 물질수지식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$QC_1 = Q(1-X)C_1' + Xq\delta(t=0) \quad (4a)$$

$$PQ(1-X)(C_1'' - C_1') = Q(1-X)C_1' + YV \frac{dC_1'}{dt} \quad (4b)$$

$$PQ(1-X)(C_1' - C_1'') = V(1-Y) \frac{dC_1''}{dt} \quad (4c)$$

여기서  $q$ 는 입력되는 추적자의 양이다. 이 식의 초기 조건은 다음과 같다.

$$t=0, C_1' = (1-X)q/VY; C_1'' = 0 \quad (4d)$$

이를 Laplace 변환을 이용하여 풀면

$$C_1(s) = (\bar{t}/N)F(s)C_0 \quad (5)$$

이 되며, 식 (3)과 (5)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{C_N(s)}{C_0} = \frac{\bar{t}}{N} [F(s)]^N \quad (6)$$

식 (6)으로부터 체류시간밀도함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{E}(\theta) = \sum_{i=1}^N N_i \binom{N}{i} (1-X)^{2i} X^{N-i} \left( \frac{1}{Y} \right)^i \\ \times \sum_{k=1}^i \frac{(N\theta)^{k-1}}{(k-1)!} \sum_{r=1}^k (-1)^{i-k-r} \\ \times \frac{(2i-k-r-1)!}{(i-r)!(i-k-r)!r!} \frac{1}{(R_1-R_2)^{2-k-r}} \\ \times (R_1+B_1)^{i-r} R_2^{N\theta} \\ + (-1)^{k+r} (R_2+B_1)^{i-r} R_2^{N\theta} + X^N \delta(\theta=0) \end{aligned} \quad (7a)$$

여기서  $R_1$ 과  $R_2$ 는 다음과 같다.

$$R_1 = -\frac{1}{2} B_1 + B_2 - \sqrt{(B_1+B_2)^2 - 4B_3} \quad (7b)$$

$$R_2 = -\frac{1}{2}B_1 + B_2 + \sqrt{(B_1 + B_2)^2 - 4B_3} \quad (7c)$$

$$B_3 = P(1-X)^2/(1-Y)Y \quad (7d)$$

### 2-3. 파라미터의 추정

모델로부터 구한  $\hat{E}(\theta)$ 와 실제 실험에서 구한  $E(\theta)$ 로부터 그 모델에 대한 파라미터를 구하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 Marquardt의 알고리즘을 이용하여 구하였다. 즉 비선형 함수인  $\hat{E}(\theta)$ 을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{E}(\theta) = f(\theta, \hat{A}_1, \hat{A}_2, \dots, \hat{A}_M) \quad (8)$$

여기서  $\hat{A}_j$ 는 모델 파라미터를 나타내며, 이를 선형화하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{E}(\theta_i) = \hat{E}_i = \hat{E}_i^* + \left( \frac{\partial \hat{E}_i^*}{\partial \hat{A}_1} \right) \Delta \hat{A}_1 + \left( \frac{\partial \hat{E}_i^*}{\partial \hat{A}_2} \right) \Delta \hat{A}_2 \\ + \dots + \left( \frac{\partial \hat{E}_i^*}{\partial \hat{A}_M} \right) \Delta \hat{A}_M \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta \hat{A}_j = \hat{A}_j - \hat{A}_j^* \quad (j=1, 2, \dots, M)$$

이 때 목적함수는  $S = \sum_{i=1}^N (E_i - \hat{E}_i)^2$ 이며 이것을 최소화하기 위한 필요조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial S}{\partial \hat{A}_j} = 0 \quad (j=1, 2, \dots, M) \quad (10)$$

이로부터 파라미터  $\hat{A}_j$ 를 Marquardt의 방법을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(M' M + \lambda I) \Delta \hat{A} = M'(E - \hat{E}^*) \quad (11)$$

여기서  $I$ 는 단위행렬이다. 식 (11)은 적당한  $\lambda$ 에 대하여  $\hat{A}_j$ 값은 초기값이 정확하지 않아도 빠르게 수렴하게 된다.

## 3. 실험

추적자를 이용하여 RTD를 측정하기 위한 실험장치를 Fig. 3과 같이 설치하였다. 실험에 사용된 반응기는 아크릴 수지로 제작되었으며, 입자를 싸고 있는 원반은 입자들이 빠져나가지 않고 유체의 흐름만 자유롭게 통과할 수 있도록 그물망으로 만들었다. Table 1에는 반응기의 각 부분의 크기가 나와 있다. 반응기로 입출력되는 유량을 일정하게 유지시키기 위하여 하나의 회전축으로 2개의 peristaltic 펌프가 동시에 작동되었다. 또한 원동

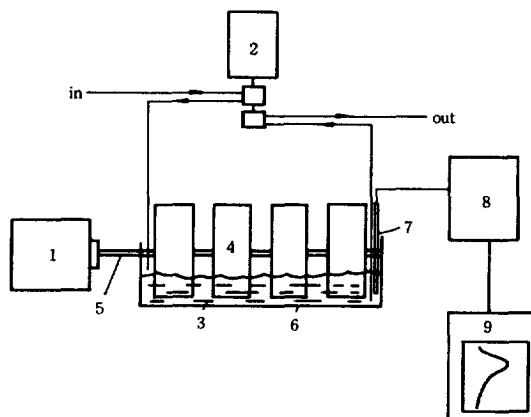


Fig. 3. Experimental apparatus.

- |                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| 1. Motor                        | 5. Rotating shaft     |
| 2. Double-head peristaltic pump | 6. Trough             |
| 3. Water                        | 7. Electrode          |
| 4. Disks with glass beads       | 8. Conductivity meter |
|                                 | 9. Recorder           |

Table 1. Dimension of RPDR used in this study

Radius of disk	5.6 cm
Thickness of disk	2.0 cm
Distance between disks	1.0 cm
Radius of rotation	1.0 cm
Radius of reactor	5.9 cm

기(Ultramaster Flex and Servodyne System, Cole-Parmer)를 사용하여 반응기내 원반을 저속의 일정속도로 회전시켰다. 펄스로 주입되는 2N-KCl 용액은 출구부분에서 전극을 통하여 측정되었다. 이 때 사용되는 전도도계는 이 농도 범위에서 선형의 변전반응을 보이며 이 값들은 기록계에 전달되어 기록되었다. 반응기를 작동시켜 평균체류시간( $V/Q$ )의 4-5배가 되는 충분한 시간동안 조업한 후 정상상태에 도달하면 약 1cc의 2N-KCl용액을 입구에 펄스로 주입하였다. 이로부터 평균체류시간의 4배 정도의 시간동안 기록계로 출구에서의 KCl농도를 기록하였다.

이 반응기의 동특성을 조사하기 위하여 축의 회전속도(약 7-60 RPM), 유속(약 10-100 cc/min), 액상의 수위(150-400 cc) 그리고 비드의 크기(3, 4, 5 mm)를 변화시켜 체류시간을 측정하였다.

## 4. 결과 및 토의

축의 회전속도(RPM)의 변화에 따른 체류시간 분포

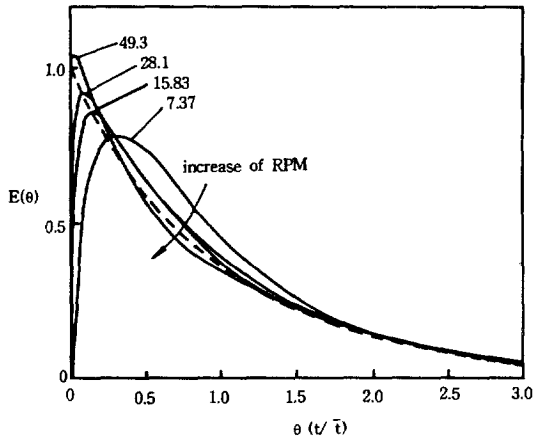


Fig. 4. Effect of RPM on E-curve in the condition of  $Q=10.21$ , total hold-up(THU)=300 and bead size=3 (broken line; perfect mixing).

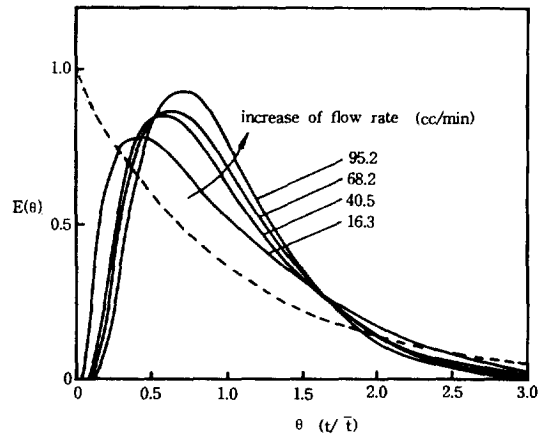


Fig. 6. Effect of flow rate on E-curve in the condition of  $RPM=13$ ,  $THU=300$  and bead size=3(broken line; perfect mixing).

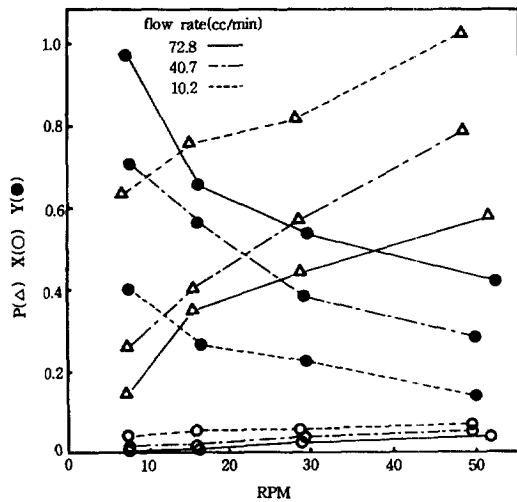


Fig. 5. Variation of  $P$ ,  $X$  and  $Y$  with respect to RPM ( $THU=300$ , bead size=3).

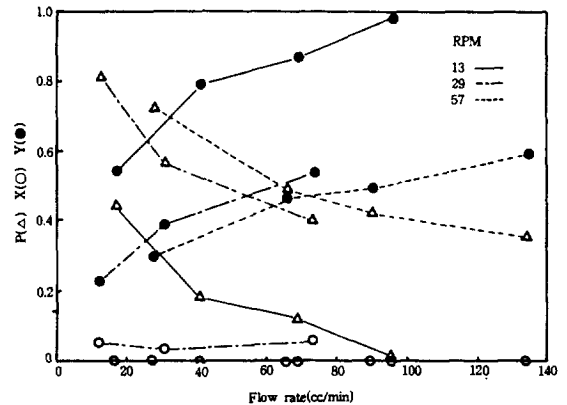


Fig. 7. Variation of  $P$ ,  $X$  and  $Y$  with respect to flow rate ( $THU=300$ , bead size=3).

곡선의 변화는 Fig. 4에서 각 유량에 대한 경향을 볼 수 있다. 따라서 RPM의 증가에 따라 혼합반응기에 가까워지며 꼬리부분이 길어지는 경향이 있음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2(b)의 모델에서 RPM이 증가함에 따라 두 혼합영역간에 교류되는 유체의 양 $[PQ(1-X)]$ 이 증가하고, 원반의 회전에 영향을 받는 유체의 부피비 $(1-Y)$ 가 커지는 것을 의미한다. 축의 회전속도가 증가함에 따라 원반의 회전에 영향을 받아 축의 회전방향으로 유동하는 부분이 증가하게 되며 이에 따라 두 유체영역의 경계는 원반 바깥쪽으로 이동된다. 즉 유체의 회전관성이 커지므로 이에 영향을 받는 유체의 영역 $(1-Y)$

이 넓어진다는 것을 의미한다. 또한 축의 회전속도가 증가함에 따라 단위시간당 원반속으로 들어갔다 나오는 유체의 양 $[PQ(1-X)]$ 도 증가한다. 이 때 원반에 의해 떨어져 올라가는 양의 차이 등으로 인해 정확한 비례관계가 성립하는 것은 아니다. 이것을 정량적으로 표시하면 Fig. 5와 같다. 여기서 우회되는 양 $(QX)$ 의 변화는 거의 무시됨을 알 수 있다.

유량의 변화에 따른 체류시간분포곡선의 변화는 Fig. 6에서 볼 수 있다. 유량이 커지면 이 반응기는 완전 혼합반응기로부터 점점 벌어지는 경향을 보이는데 이것은 RPM의 증가에 따른 경향과는 반대로  $P$ 가 감소하고  $Y$ 가 증가하는 효과로 나타난다. 유량이 증가하면, 원반속으로 들어가는 유체를 보충해 주기 위해 축의 반대 방향으로 유동하는 유체중 원반속으로 들어가지

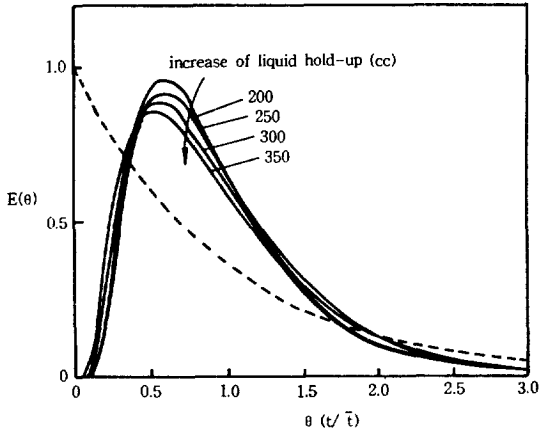


Fig. 8. Effect of liquid hold-up on E-curve in the condition of RPM=11.6, Q=51.9 and bead size=3.

않고 우회하는 양이 증가하게 된다. 따라서 이를 대신 하기 위하여 더욱 많은 양의 유체가 축의 회전 반대 방향으로 흐르게 되므로 Y는 증가하고 P는 감소하게 된다. 이에 대한 정량적인 분석은 Fig. 7에서 볼 수 있으며 우회하는 양(QX)의 변화는 Fig. 4에서 마찬가지로 무시할 수 있을 정도로 작다.

반응기내 액상 총 부피를 THU(Total Hold-Up)이라 할 때, THU의 변화에 따른 체류시간분포곡선은 Fig. 8에서와 같은 경향을 보였다. 실제로 THU를 증가시키면 축의 회전 반대 방향으로 흐르는 유체의 절대량은 증가하지만 전체량에 대한 그것의 비율(Y)은 감소하게 된다. 또한 THU의 증가에 따라 P는 증가하게 된다. 그러나 RPM의 변화에 대한 체류시간분포곡선의 변화 보다는 심하지 않다.

Fig. 9는 원반내에 충전되어 있는 입자의 크기에 따른 Y, P 그리고 X값의 변화를 나타내고 있다. 입자의 크기가 커짐에 따라 Y는 조금씩 증가하고 P는 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있으나 본 실험 범위(3-5 mm)에서는 거의 일정한 값들을 갖는다고 볼 수 있다.

본 실험에서는 조업변수로서 축의 회전속도(RPM)와 유량(Q) 그리고 액상의 총 부피(THU) 및 입자의 크기를 변화시키며 Y, P, X의 변화를 살펴보았다. 그러나 입자의 크기에 대한 Y, P, X의 변화는 다른 변수에 비해 무시할 만하다. 위의 세 변수를 무차원 변수인  $\pi_H$ ,  $Re_i$  그리고  $Ek^*$ 로 나타내었다.

$$\pi_H = \frac{H}{R_i} \quad (12)$$

$$Re_i = \frac{Q}{vH} \quad (13)$$

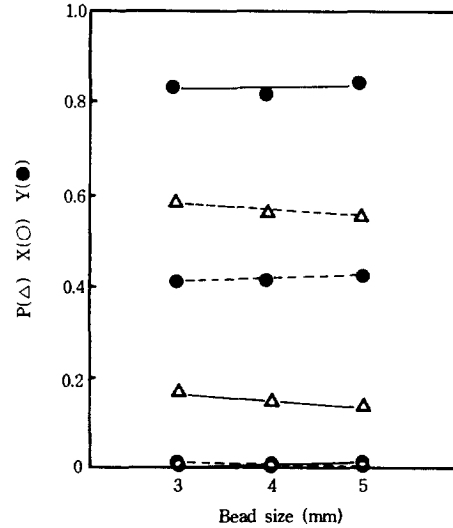


Fig. 9. Variation of P, X and Y with respect to bead size in the condition of flow rate=68.6 and THU=300 (broken line; RPM=52.17, solid line; RPM=7.97).

$$Ek^* = \left( \frac{v}{\omega R^2} \right) \left( \frac{R_i - R}{R} \right)^{-3/2} \quad (14)$$

여기서  $R_i$ 는 반응조의 반경,  $R$ 은 원반의 반경이고  $v$ 는 유체의 동력학적 점도이다. 그리고  $H$ 는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 액상의 수위가 되며 기초실험으로부터 THU와는 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있었다.

$$H = 0.01 \times (THU) + 0.73 \quad (150 < THU < 400) \quad (15)$$

$Re_i$ 는 반응조에 있어서 유속에 대한 효과를 나타내는 무차원 변수로서 정의되는데,  $\{(R_i - R)/R\}^{-3/2}$ 는 두 원통 사이의 유동을 나타내는 Taylor수에 근거한다.

$$Ta = \left( \frac{\omega R^2}{v} \right) \left( \frac{R_i - R}{R} \right)^{-3/2} \quad (16)$$

이들 무차원 변수를 이용하여 모델변수인 Y와 P를 나타내면 Fig. 10, 11과 같으며 이로부터 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$Y = 0.168(\pi_H)^{-0.071} Re_i^{0.499} Ek^{*0.451} \quad (Re_i = 4-35, Ek^* = 0.2-2) \quad (17)$$

$$P = 6.547(\pi_H)^{3.247} Re_i^{-0.736} Ek^{*-0.801} \quad (Re_i = 5-35, Ek^* = 0.4-2) \quad (18)$$

RPDR과 유사한 형태의 반응기로 RBC를 들 수 있는데 이것은 원반의 표면에 고정화된 효소가 있기 때문에 유체가 원반속으로 들어가지 않아 유동현상은 RPDR

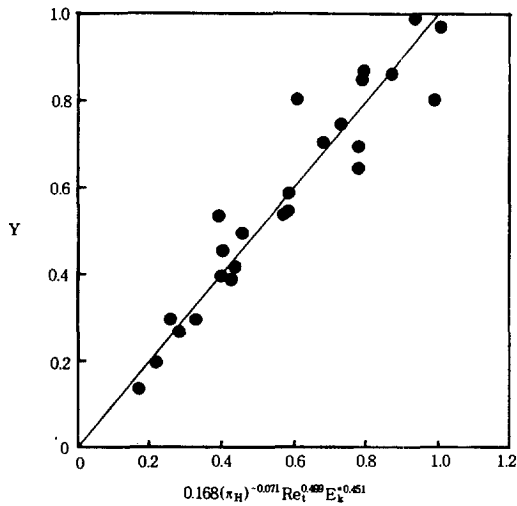


Fig. 10. Least square fitting of  $\ln Y$  ( $Re_i=4-35$ ,  $Ek^*=0.2-2$ ).

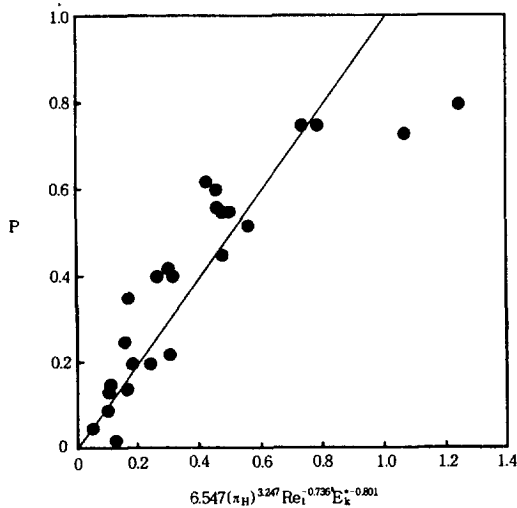


Fig. 11. Least square fitting of  $\ln P$  ( $Re_i=5-35$ ,  $Ek^*=0.4-2$ ).

과는 다르다. RBC에 대한 모델링은 원반사이의 유체 영역과 원반 가장자리의 제트흐름에 지배되는 영역으로 나누어 해석하였다[2]. 여기서  $Re_i$ 와  $Ek^*$ 의 변화에 따른 RPDR과 RBC에 대한  $Y$ 와  $P$ 의 경향을 Fig. 12의 (a)와 (b)에서 비교하였다. Fig. 12의 (a)에서 유속의 증가에 따른  $Y$ 값의 증가폭은 RPDR이 RBC에 비해 컸으며 이것은 축 방향의 흐름이 원반을 통과할 수 있는 경우가 없는 경우에 비해 유속의 영향을 더 크게 받는 것을 의미한다. 또한  $P$ 값은  $Re_i$ 의 증가에 대하여 감소하는 경향을 보이는데 역시 RPDR의 경우가 더 크다.  $Ek^*$ 의

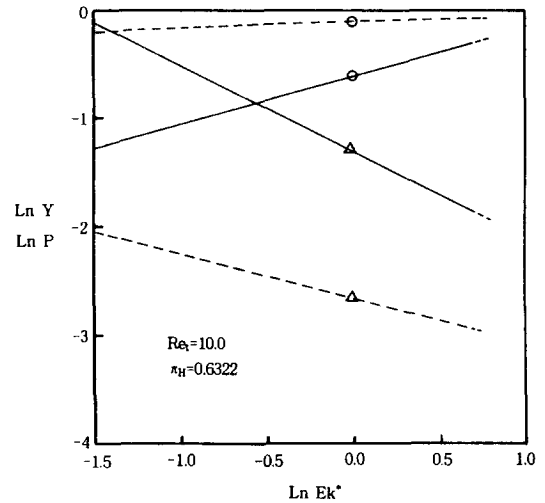
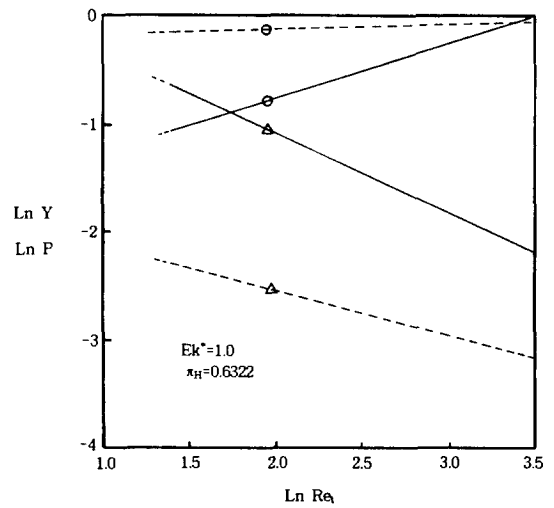


Fig. 12.  $Y$  and  $P$  as a function of (a)  $Re_i$  at  $Ek^*=1$  and  $\pi_H=0.6322$  and (b)  $Ek^*$  at  $Re_i=10$  and  $\pi_H=0.6322$  (broken line: RBC, solid line: RPDR,  $\circ$ :  $Y$ ,  $\triangle$ :  $P$ ).

변화에 대한  $Y$ 값의 변화는 Fig. 12의 (b)에서 볼 수 있으며 원반의 RPM이 커질수록 원반에 의해 떨어져 올라가는 유체의 양( $1-Y$ )이 커지는 것을 의미한다. 따라서 공극이 있는 RPDR의 경우가 RBC의 경우보다 그 영향을 많이 받는 것으로 보인다. 그리고  $P$ 가  $Ek^*$  값이 증가할수록 감소되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 회전 속도가 커질수록 유체의 교류량이 늘어나는 것을 의미하며 RPDR이 RBC에 비해 큰 것도 공극의 효과인 것으로 보인다.

## 5. 결 론

충전식 회전 원반 반응기를 이용한 동특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 충전식 회전 원반 반응기에서는 원반과의 마찰력과 원반의 회전에 의한 회전관성에 의해 그 원반의 회전방향으로 유동하며 혼합되는 유체의 영역과 원반속으로 빨려 들어가는 양을 보충하기 위하여 원반의 회전 반대 방향으로 연속적으로 유동하며 혼합되는 영역 등 두 혼합영역으로 나눌 수 있다.

(2) 이러한 현상을 바탕으로 하여 두 영역간의 부피비, 특히 원반의 회전 반대 방향으로 유동하는 유체의 부피비(Y)와 두 영역간의 교류량[PQ(1-X)], 그리고 우회되는 양(QX) 등을 파라미터로 하는 3변수 다단모델로 반응기를 모델링하였으며 이 모델이 실험값을 잘 대변하고 있음을 확인하였다.

(3) 원반의 회전수(RPM), 유량(Q), 원반의 침수정도(H), 입자의 크기 등의 조업조건을 변화시켜 가면서 각 경우에 대한 파라미터의 변화를 추적한 결과 다음과 같은 관계를 얻을 수 있었다.

$$Y = 0.168(\pi_H)^{-0.071} Re_t^{0.499} Ek^{*0.451} \quad (Re_t = 4-35, Ek^* = 0.2-2)$$

$$P = 6.547(\pi_H)^{3.247} Re_t^{-0.736} Ek^{*-0.801} \quad (Re_t = 5-35, Ek^* = 0.4-2)$$

(4) 본 반응기를 RBC와 비교해 본 결과, 유량이 많고 원반의 회전속도가 느린 경우(폐수처리)에는 본 반응기가 더 나은 효율을 갖는다는 것을 알 수 있었다.

## 사용기호

$\hat{A}$	: model parameter estimated at ith step computation
$\hat{A}^*$	: model parameter estimated at (i-1)th step of computation
$C_i$	: concentration of tracer from ith stage [mole/cc]
$C'_i$	: concentration of tracer from ith trough-side batch [mole/cc]
$C''_i$	: concentration of tracer from ith disk-side batch [mole/cc]
$Ek^*$	: Ekman number defined by eq. (14)
H	: height of liquid level [cm]
M	: matrix defined by eq. (11)
N	: total number of stage in model
P	: relative flow rate between two perfect mixing regions
Q	: flow rate [cc/min]
q	: amount of traces injected [cc]

R	: radius of disk [cm]
$R_t$	: radius of trough [cm]
$Re_t$	: Reynolds number defined by eq. (13)
s	: independent variable in Laplace domain [1/min]
t	: independent variable in time domain [min]
$\bar{t}$	: mean residence time(NV/Q)
Ta	: Taylor number
THU	: total hold-up [cc]
V	: liquid volume in one stage [cc]
X	: relative amount of bypass with respect to overall flow rate
Y	: volume ratio of trough-side batch

## 그리스 문자

$\alpha$	: constant defining the relation of l and (1-Y)
$\delta$	: unit impulse function
$\lambda$	: correction factor defined by Marquardt
$\pi_H$	: dimensionless variable expressing hold-up effect(H/ $R_t$ )
$\nu$	: dynamic viscosity [cm <sup>2</sup> /sec]
$\theta$	: normalized time(t/ $\bar{t}$ )
$\omega$	: rotating speed [RPM]

## 지 수

i	: i-th stage in model
j	: j-th parameter in model
M	: total number of parameter in model
N	: total number of data points for RTD curve

## 참고문헌

- Smith, E. D. and Bandy, J. T.: 11, Proc. 1st Nat. Symp. Rotating Biological Contactor Techn. Univ. Pittsburg(1980).
- Kim, M. J., Ghim, Y. S. and Chang, H. N.: *Chem. Eng. Sci.*, **39**(5), 813(1984).
- Fisette, G. R.: 325, Proc. 1st Nat. Symp. Rotating Biological Contactor Techn. Univ. Pittsburg(1980).
- Chang, H. N., Joo, I. S. and Kim, Y. S.: *Biotech. Lett.*, **6**, 487(1984).
- Choi, S., Ghim, Y. S., Chang, H. N. and Rhee, J. S.: *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **63**, 135(1986).
- Chung, B. H., Chang, H. N. and Han, M. H.: *J. Ferment. Tech.*, **64**, 343(1986).
- Thijert, M. D. G., Oyeveaar, M. H., Kuper, W. J. and Westerp, K. R.: *Chem. Eng. Sci.*, **47**(13), 3339(1992).
- Chapman, C. M., Gibilaro, L. G. and Nienow, A. W.:



- Chem. Eng. Sci.*, **37**, 891(1982).
9. Westerterp, K. R., van Swaaij, W. P. M. and Beenackers, A. A. C. M.: *Chemical Reactor Design and Operation*, John Wiley & Sons(1973).
10. Lehmkuhl, G. D. and Hudson, J. L.: *Chem. Eng. Sci.*, **26**, 1601(1971).
11. Chanhnan, S. P., Bell, J. P. and Adler, R. J.: *Chem. Eng. Sci.*, **27**, 585(1972).