

## Trickle Bed 반응기에서 액상흐름의 체류시간 분포에 관한 연구

김 기 창 · 이 종 원

화 학 과

(1981. 12. 30 접수)

## 〈요 약〉

다공성 촉매 입자가 충전된 짐적상 반응기에서 액상 체류시간 분포에 관한 이론식을 PDE 모델로부터 유도하여 보았다. 본 논문에서 유도된 액상 체류시간 분포에 관한 이론식에서는 충전 입자의 공극률, 추적자 입자 입자 크기에 유효접촉 계수등을 이용하며, 입자의 다공성이 액체흐름의 체류시간 분포에 미치는 영향을 고려할 수 있었다.

Residence Time Distribution of Liquid Phase  
in the Trickle Bed Reactor

Kim, Ki Chang · Lee, Jong Won

Dept. of chemistry

(Received December 30, 1981)

## 〈Abstract〉

In the trickle bed reactor packed with porous catalyst particles, the theoretical equation for the residence time distribution curve of the liquid phase was derived from the PDE model.

The RTD curve defined in this paper was correlated for the porosity of particle, and the effective diffusivity of tracer. Therefore the theoretical equation of RTD curve derived in this work was assumed to be well fitted with the characteristics of trickling flow in the porous catalytic reactor.

## I. 서 론

액상 촉매 반응기의 대표기인 침적로는 삼상스터터 반응기와 짐적상(trickle bed) 반응기가 있다. 이들 중 특히 짐적상 반응기는 기유화학 공정에서 크게 촉매를 이용한 기·액반응을 위하여 사용될 수 있는 반응기의 한 형태로서 수소화 반응, 수소결가 탄화 반응, 고강화 효소등을 이용한 반응등에 주로 이용될 수 있다.<sup>1)</sup> 짐적상 반응기에서는 충전층내를 액체가 0.83~8.3(kg/m<sup>2</sup>·sec) 속도 범위내에서 흐르게 되므로, 이와 같은 액상흐름 상태에서는 액체의 체류시간 분포에 따라 반응 전환율이 현저하게 달라진다.<sup>1,2)</sup> 따라서 짐적상 반응기의 체류시간 분포에 대한 연구는 반응기 설계의 기초자료가 되므로 많은

연구자들의 관심을 끌고 있다.<sup>1-4)</sup> 짐적상 반응기에서는 반응물인 액체가 충전된 촉매입자와 부분적으로 접촉하게 되므로, 짐적상 반응기에서의 반응속도는 실제 반응속도보다 감소하게 된다. 따라서 반응기 설계에서는 이와 같은 영향을, 반응물과 촉매입자간의 유효접촉계수(contacting effectiveness factor)를 정의함으로써 보정하게 된다.<sup>2,5)</sup> 이러한 유효접촉계수는 액상반응물의 반응기내 체유량(liquid hold-up)과 상관이 있으며, 이들에 대한 체계적인 연구는 체류시간 분포에 관한 연구를 수반하게 된다. 따라서 본 논문에서는 공업적 이용도가 큰 다공성 촉매입자의 짐적상 반응기에서, 액상 체류시간 분포에 대한 기초 연구를 하고자 하였다.

지금까지 보고된 trickle bed 에서의 액체체류시간 분포에 관한 연구는 대부분이 세공이 없는 입자에

대한 경우이며,<sup>6,7,8)</sup> 체류시간 분포에 대한 이론적 모델로는 plug-dispersion-exchange(PDE)모델<sup>9,10)</sup> time delay 모델<sup>11)</sup> 등이 제시된 바 있다. 이들의 연구 결과에서 보면, 무공성 입자의 경우 어느 정도 만족할 만한 결과를 얻고 있으나, 다공성 촉매 입자의 경우에는 모델의 적용 가능성만 예측되고 있는 실정이며, 최근 몇편의 연구보고<sup>12,13)</sup>만이 다공성 촉매 입자층에서의 체류시간 분포를 다루고 있다.

다공성 촉매 입자가 충전된 겹거상 반응기의 액체 체류시간 분포에서는 촉매 입자의 공격률이 상당히 영향을 미치게 되며, 또한 체류시간 분포의 실험적 방법인 추적자 응답법에서, 사용되는 추적자의 촉매 세공내 유효확산계수를 고려한 체류시간 분포의 이론적 고찰이 수행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 이미 제시된 바 있는 PDE 모델의 기본개념을 토대로, 다공성 촉매입자가 충전된 점직상 반응기에서 촉매입자의 공격률, 추적의 유효확산계수를 고려한 체류시간 분포의 이론식을 유도하여 보고, 이 이론식에서 정의되는 몇개의 파라미터들이 액체 체류시간 분포에 미치는 영향을 조사하여 보고자 하였다.

II. 이 론 식

다공성 입자가 충전된 고정층내에 액체가 trickling flow 형태로 흐를때, 액체의 체류시간 분포를 PDE 모델로 묘사하여 보고자 한다. 다공성 입자가 충전된 층내에 액체가 흐를때, 액체의 체유량은 동적 체유량 및 정적 체유량으로 구분될 수 있으며 정적 체유량은 다시 외부 정적체유량 및 내부 정적체유량으로 구분될 수 있다.<sup>14,15)</sup> 내부 정적체유량은 주로 충전된 입자의 공격률, 입자세공의 직경 등에 영향을 받으며, 외부 정적체유량 및 동적체유량은 입자의 기하적 형태, 입자의 크기, 층의 공격률, 액체의 유속 및 기타 액체의 물성(점도, 표면장력) 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 이상의 세가지 형태의 액체 체유량이 존재하는 경우, 액체의 체류시간 분포에 PDE 모델이 적용될 수 있다고 가정하고 추적자 응답법에 대한 관련식을 유도하여 보고자 한다.

우선 다음과 같은 가정을 한다.

1) 충전층내 입자간의 공간에는 액체의 동적체유량과 외부 정적체유량이 형성되고, 이들 체유량은 충전층 전체에 걸쳐 일직하게 유지 된다.

2) 입자의 세공내 체유량은 내부정체 체유량이며, 이 체유량은 외부 정적체유량이 형성되는 영역과 접하고 있다.

3) 액체의 동적체유량이 형성되는 영역에서 유체는 분산흐름 형태로 흐른다.

4) 동적체유량 및 외부정체체유량이 형성되는 영역 간에는 추적자의 물질이동이 일어난다.

5) 내부정체체유량의 영역, 즉 입자의 세공내에서는 추적자의 확산이동이 있다.

6) 충전된 입자는 다공성 구형입자라 볼 수 있으며, 추적자는 입자표면에 흡착하지 않는다.

이상과 같은 가정이 성립할때, 다음 그림과 같은 유체흐름 모형에 대하여 물질수지 관계식은 얻어 보고자 한다.

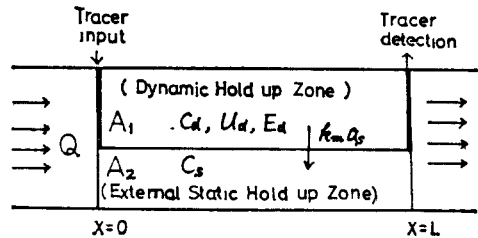


Fig.1 Liquid flow Model

입자간의 공간에서 액체의 동적체유량 및 외부 정적체유량에 해당되는 유체단면<sup>9)</sup>을  $A_1, A_2$ 라 하면 다음과 같은 관계가 성립할 수 있으며, 두 유체단

$$A_1 + A_2 = A \epsilon (\beta_d + \beta_{es}) \tag{1}$$

면의 비를,

$$\phi \equiv \frac{A_1}{A_1 + A_2} = \frac{\beta_d}{\beta_d + \beta_{es}} \tag{2}$$

라 정의 하면, 동적체유량이 형성되는 영역에서 유체 유속  $u_d$ 는

$$u_d = \frac{Q}{A \epsilon \beta_d} = \frac{Q}{A \epsilon \phi (\beta_d + \beta_{es})} \tag{3}$$

라 정의될 수 있다. 이상의 정의에 따라 추적자에 대한 물질수지를 세워 보면, 우선 동적체유량이 형성되는 영역에서는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\frac{\partial C_d}{\partial t} = E_d \frac{\partial^2 C_d}{\partial x^2} - u_d \frac{\partial C_d}{\partial x} - \frac{K_m a_s}{\epsilon \beta_d} (C_d - C_s) \tag{4}$$

외부 정적체유량이 형성되는 영역에서는 다음과 같은 관계가

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{\phi K_m a_s}{\epsilon (1 - \phi) \beta_d} (C_a - C_s)$$

$$-\frac{3(1-\epsilon)}{\epsilon\gamma\rho} \left[ D_i \left( \frac{\partial C_i}{\partial r} \right)_{r=r_s} \right] \quad (5)$$

성립되고, 내부 정체체유량이 형성되는 입자의 세공 내에서는,

$$D_i \left[ -\frac{\partial}{\partial r} \left( \gamma^2 \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) \right] - \gamma^2 \epsilon_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

와 같은 식이 성립 된다.

한편 다음과 같은 무차원 변수를 정의 하고,

$$Z = \frac{x}{L}, \quad \theta = \frac{t}{\tau} = \frac{tu_d\varphi}{L}, \quad \eta = \frac{r}{r_p} \quad (7)$$

아래와 같은 무차원군을 정의하면,

$$P_e = \frac{u_d L}{E_d}, \quad N = \frac{K_m a_s L}{\beta_d u_d \epsilon} \quad (8)$$

$$N_2 = \frac{3(1-\epsilon)D_i L}{\epsilon\gamma\rho^2 u_d}, \quad N_3 = \frac{\epsilon_i \gamma\rho^2 u_d}{D_i L} \quad (9)$$

윗식들은 다음과 같이 변형된다.

$$\varphi \frac{\partial C_d}{\partial \theta} = \frac{1}{P_e} \frac{\partial^2 C_d}{\partial Z^2} - \frac{\partial C_d}{\partial Z} - N(C_d - C_s) \quad (10)$$

$$\varphi \frac{\partial C_i}{\partial \theta} = \left( \frac{\varphi N}{1-\varphi} \right) (C_d - C_s) - N_2 \left( \frac{\partial C_i}{\partial \eta} \right)_{\eta=1} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 C_i}{\partial \eta^2} + \frac{2}{\eta} \frac{\partial C_i}{\partial \eta} - N_3 \varphi \frac{\partial C_i}{\partial \theta} = 0 \quad (12)$$

위의 편미분 방정식들의 경계조건은 추지자의 주 입방법 및 위치, 추지자 농도 검출의 위치등에 따라 여러 형태의 경계 조건들이 제시 되고 있으나, 본 논문에서는 고정층 입구에서 추지자가 impulse 함수로 주입되는 경우, 층의 입구 및 출구의 경계조건은 doubly infinite 모델이 적용된다고 가정 했으며<sup>14)</sup>, 한편 고체입자와 외부 정체체유량 간의 경막물질 전달은 무시 될 수 있다고 가정 하였다. 따라서 경계 조건들은 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\theta=0, \quad C_d(Z, \theta) = C_s(Z, \theta) = C_i(\eta, \theta) = 0 \quad (13)$$

$$Z=0, \quad C_d(Z, \theta) = \delta(\theta) \quad (14)$$

$$Z=\infty, \quad C_d(Z, \theta) = 0, \quad C_s(Z, \theta) = 0 \quad (15)$$

$$\eta=0, \quad \left( \frac{\partial C_i}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (16)$$

$$\eta=1, \quad C_s(Z, \theta) = C_i(\eta, \theta) \quad (17)$$

한편 충전층 출구에서의 유체 체류시간 분포함수  $E(\theta)$ 는,

$$E(\theta) = C_d(Z, \theta) |_{z=1} \quad (18)$$

라 할 수 있으므로, 위의 (10), (11), (12)으로 부터 (13)-(17)식의 경계조건에 의하여  $C_d(1, \theta)$ 의 해를 Laplace 변환형태로 얻은 결과는 다음과 같다.

$$E(s) = C_d(1, s) = \text{Exp} \left[ \frac{P_e(1 - \sqrt{1 + 4M(s)P_e})}{2} \right] \quad (19)$$

$$M(s) = \varphi s + N - \frac{N^2 \varphi}{G(s)(1-\varphi)}$$

$$G(s) = \varphi s + \frac{N \varphi}{1-\varphi}$$

$$+ N_2 \left[ \frac{\sqrt{N_3 \varphi s} \cosh(\sqrt{N_3 \varphi s}) - \sinh(\sqrt{N_3 \varphi s})}{\sinh(\sqrt{N_3 \varphi s})} \right]$$

윗 식으로 부터, 점적상 반응기의 체류시간 분포 함수  $E(\theta)$ 는  $P_e(E_d)$ ,  $N(K_m a_s)$ ,  $\varphi$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  등의 파라미터들로 정의 될 수 있음을 볼 수 있다.

### III. 이론식의 검토 및 고찰

앞에서 지적된 체류시간 분포함수의 특성 파라미터인  $P_e$ ,  $N$ ,  $\varphi$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  중  $P_e$ ,  $N$ ,  $\varphi$ 는 PDE 모델에서와 같은 의미를 가지며, 또한 이들은 반응기의 액체 유속에 따라 변화되는 파라미터들 이라 생각 된다.

한편  $N_2$ ,  $N_3$  파라미터들은 반응기 내의 액체 유속에는 무관한 변수라 볼 수 있는 충전된 입자의 공격율( $\epsilon_i$ ), 및 추지자의 입자 세공내 유효확산계수( $D_i$ ) 등에 의하여 정의된다. 따라서  $\epsilon_i$  및  $D_i$ 는 별도의 실험적 방법에 의하여 측정 될 수 있으므로, 앞서의 체류시간 분포에 대한 이론식들은  $E_d$ ,  $k_m a_s$ ,  $\varphi$  등의 세계 파라미터로 특징 지워진다고 볼 수 있다.

본 논문에서는  $P_e(E_d)$ ,  $N(k_m a_s)$ ,  $\varphi$  값들에 따른  $E(\theta)$  곡선의 변화를 검토하여 부연으로써 앞서의 이론식이 다공성 촉매 입자가 충전된 점적상 반응기의 체류시간 분포 해석에 적용 될 수 있는가를 고찰하여 보고자 하였다.

앞서의 (19)식은 추지자 주입이 impulse 함수 형태인 경우 이므로, 주파수 응답법에 의하여  $E(\theta)$ 을 계산하고자 하였다. 즉  $E(\theta)$ 의 Fourier 변환은  $F(i\omega)$ 라 하면

$$F(i\omega) = C_d(1, s) |_{s=i\omega} = R_e\{F(i\omega)\} + i I_m\{F(i\omega)\} \quad (20)$$

$$R_e\{F(i\omega)\} = \text{Exp} \left[ \frac{P_e}{2} + \lambda_1 \right] \cdot \cos \lambda_2 \quad (21)$$

$$I_m\{F(i\omega)\} = \text{Exp} \left[ \frac{P_e}{2} + \lambda_1 \right] \cdot \sin \lambda_2 \quad (22)$$

( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ : 부록참조)

와 같은 Fourier 변환  $F(i\omega)$ 을 얻을 수 있다. Fourier 변환  $F(i\omega)$ 로부터 Dang의 수치적변환 방

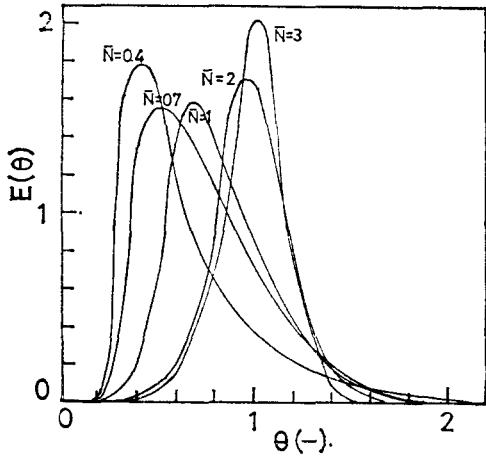


Fig.2 Plotting of  $E(\theta)$  vs.  $\theta$  at  $Pe=25$  and  $\phi=0.7$

범위에 의하여  $E(\theta)$  값을 계산 하였다. 본 논문에서는 Schuessler<sup>12)</sup>의 수리 결과로부터  $N_2, N_3$ 은 각각  $1.7 \times 10^{-3}, 1.4 \times 10^4$ 라 가정하고  $Pe, \phi, \bar{N}$  값 변화에 따른  $E(\theta)$ 을 얻었다. Fig.2에서는  $Pe=25, \phi=0.7$  상태에서  $\bar{N}$  값 변화에 따라 계산된  $E(\theta)$ 값을 그려 보았다. 그림에서 보면  $\bar{N}$  값이 작은 경우에는  $E(\theta)$ 곡선이 선한 tailing 현상이 나타나며,  $\bar{N}$  값이 증가함에 따라 이러한 tailing 현상은 점차 감소하고,  $\bar{N}$  값이 약 2이신에서 부터는 dispersion 모델에 가까워 지는 양상을 나타낸다.  $\bar{N}$  값이 커질수록 동적 체유량과 외부 정적 체유량간의 추격가의 둘

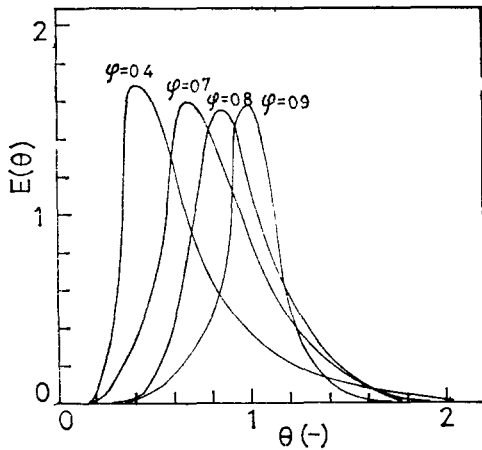


Fig.3 Plotting of  $E(\theta)$  vs.  $\theta$  at  $Pe=25, \bar{N}=1$

질이동 속도가 커짐을 의미하며 이러한 조건을 증진된 임가가 비교적 크거나, 유체흐름 속도가 큰 경우에 나타날 수 있는 현상이다. 따라서 이러한 경우에는 식체의 체유시간 손실이 dispersion 모델에 가까우리라 기대 되므로 Fig.2에서의 같은 양상을 타당하다고 생각 된다. Fig.3에서는,  $Pe=25, \bar{N}=1$  일때 계산된  $E(\theta)$  값을 도시하였다. 이 그림에서 보면  $\phi$  값이 매우 커지면 mixed flow 모델에, 1에 접근하면 dispersion 모델에 근사해 짐을 볼 수 있는데, 이는  $\phi$ 가 임지층 공간에 존재하는 전체 체유량(즉, 동적 체유량과 외부 정적 체유량의 합)이 대한 동적 체유량의 상대적인 비인 것으로 미루어 보아 타당한 현상이라고 생각 된다. Fig.4에서는  $Pe$  수 변화에 따른 영향을 조사하여 보았다. 그림에서 보면  $Pe$ 가 커짐에 따라 dispersion 모델에 가까워 짐을 볼 수 있으며, 또한  $Pe$ 가 커져짐에 따라 mixed flow 모델에 가까워 짐을 볼 수 있다. 이러한 현상은 일반적으로  $E_d$ 가 커져질수록 dispersion 모델에 근사되고,  $E_s$ 가 커질수록 mixed flow 모델에 근사 되므로 타당한 현상이라고 생각된다.

이상과 같은 검토에서 보면, mixed flow와 dispersion flow의 중간 영역이라 볼 수 있는 trickling flow 조건에 관한 본 논문에서 정의된 이론식에 의하여 적당한  $Pe, N, \phi$  값을 선택함으로써 trickling flow의 체유시간 손실과 같은 도가낼 수 있으리라 생각된다.

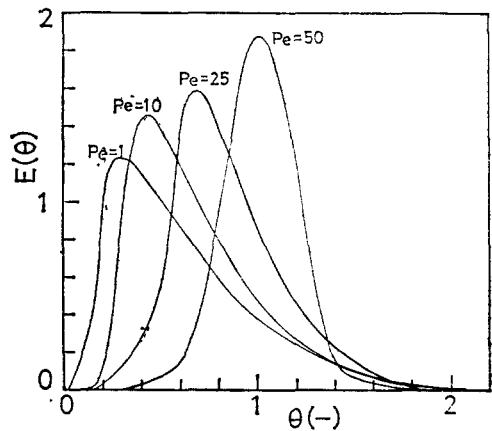


Fig.4 Plotting of  $E(\theta)$  vs.  $\theta$  at  $\phi=0.7$  and  $\bar{N}=1$ .

## Nomenclature

## IV. 결 론

본 논문에서는 다공성 촉매입자가 충전된 점적상 반응기에서의 체류시간 분포에 관한 이론식을 PDE 모델로부터 유도하여 보았다. 몇 개의 계산 결과를 통하여 액상 체류시간 분포에 관한 특성 파라미터는  $E_d$ ,  $\varphi$ ,  $k_m a_s$  등 시개의 변수로 볼 수 있고, 촉매입자의 다공성에 대한 영향은 무차원 변수  $N_2$ ,  $N_3$ 로 보강될 수 있으리라 생각 된다.

$E_d$ ,  $\varphi$ ,  $k_m a_s$  변수는 액체의 유속에 영향을 받을뿐 아니라,  $N_2$ ,  $N_3$  조건에 따라서도 달라 지리라 생각되며, 이러한 내용들은 실험적 결과로부터 고찰될 수 있다고 본다.

## 〈부 록〉

21), 22) 식의  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda_1 = -\frac{P_e}{2}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2)^{\frac{1}{4}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$\lambda_2 = -\frac{P_e}{2}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2)^{\frac{1}{4}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1}\right)$$

이때  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\varphi_1 = 1 + \frac{4m_1}{P_e}, \quad \varphi_2 = \frac{4m_2}{P_e}$$

$$m_1 = \bar{N} - \frac{\bar{N}^2 \varphi g_1}{(1-\varphi)(g_1^2 + g_2^2)},$$

$$m_2 = \varphi w + \frac{\bar{N}^2 \varphi g_2}{(1-\varphi)(g_1^2 + g_2^2)},$$

$$g_1 = \frac{N\varphi}{1-\varphi} + \frac{N_2 k_1}{l_3^2 + l_4^2}, \quad g_2 = \varphi w + \frac{N_2 k_2}{l_3^2 + l_4^2}$$

한편  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ,  $l_4$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ 는 다음과 같다.

$$a \equiv \sqrt{N_3 \varphi w / 2}$$

$$l_1 = \cosh a \cdot \cos a, \quad l_2 = \sinh a \cdot \sin a$$

$$l_3 = \sinh a \cdot \cos a, \quad l_4 = \cosh a \cdot \sin a$$

$$k_1 = (al_1 - al_2 - l_3)l_3 + (al_1 + al_2 - l_4)l_4$$

$$k_2 = (al_1 + al_2 - l_4)l_3 - (al_1 - al_2 - l_3)l_4$$

## 후 기

본 논문은 1980년도 문교부 학술조성 연구비의 도움으로 수행 되었으며, 연구비 지급에 대하여 감사 드린다.

- $A$ : Column cross section(cm<sup>2</sup>)  
 $\epsilon$ : Bed porosity(-)  
 $\epsilon_p$ : Particle porosity(-)  
 $Q$ : Volumetric flow rate of liquid (cm<sup>3</sup>/sec)  
 $\beta_d$ : Dynamic liquid hold up (fraction of void volume) (-)  
 $\beta_{es}$ : External static liquid hold up (fraction of void volume) (-)  
 $u_d$ : Liquid velocity of dynamic liquid hold up zone(cm/sec)  
 $C_d$ : Normalized concentration of tracer in dynamic hold up zone (mole/cm<sup>3</sup>)  
 $C_s$ : Normalized concentration of tracer in external static hold up zone (mole/cm<sup>3</sup>)  
 $C_i$ : Normalized concentration of tracer in internal static hold up zone (mole/cm<sup>3</sup>)  
 $k_m a_s$ : Volumetric mass transfer coefficient between dynamic hold up zone and external static hold up zone (sec<sup>-1</sup>)  
 $L$ : Length of bed(cm)  
 $\gamma_p$ : Diameter of particle(cm)  
 $E_d$ : Axial dispersion coefficient for dynamic liquid hold up zone (cm<sup>2</sup>/sec)  
 $D$ : Effective internal diffusivity of tracer (m<sup>2</sup>/sec)  
 $\theta$ : Dimensionless time(-)  
 $w$ : Frequency in fourier transformation  
 $s$ : Parameter of Laplace transformation

## Cited Literature

- 1) Charles N. Satterfield, AICHEJ., **21** (2), 209(1975)
- 2) A. Cianetto, G. Baldi, V. Specchia and S. Sicardi, AICHEJ., **24**(6), 1087(1978).
- 3) H. Clarke Henry and J. B. Gilbert, I.E.C. Process Des. Develop., **12**(3), 328(1973)
- 4) Y. T. Shah, G. J. Stiegel and M. M. Sharma, AICHEJ. **24**(3), 339(1978)
- 5) J. G. Schwartz, E. Weger and M. P. Dubukovic, AICHEJ., **22**(5), 894(1976)

- 6) J. M. Hochman and E. Efron, I. E. C. Fundamentals, **8**(1), 63(1969)
- 7) I. A. Furzer and R. W. Michell, AICHEJ., **16**(3), 381(1970)
- 8) V. Specchia and G. Baldi, Chem. Eng. Sci., **32**, 515(1977)
- 9) J. Villermaux and W. P. M. Van Swaaij, Chem. Eng. Sci., **24**, 1097(1969)
- 10) W. P. M. Van Swaaij, J. C. Harpentier and J. Villermaux, Chem. Eng. Sci., **24**, 1083(1969)
- 11) B. A. Buffam, L. G. Gibilaro and M. N. Rathor, AICHEJ., **16**(2), 218(1970)
- 12) A. J. Colombo, G. Bald and S. Sicardi, Chem. Eng. Sci., **31**, 1101(1980)
- 13) H. A. Seirafi and J. M. Smith, AICHEJ., **26**(5), 711(1980)
- 14) C. Y. Wen and L. T. Fan, "Models for flow systems and Chemical reactors", Marcel Dehker, Inc, New York(1975)
- 15) Y. T. Shah, "Gas-Liquid-Solid reactor design", McGraw Hill Inc., New York(1979)
- 16) N. D. P. Dang and L. G. Gibilaro, The Chem. Eng. J., **8**, 157(1974)
- 17) W. E. Schiesser and Lenon Lapidus, AICHEJ., **7**(1), 163(1961).