

기-액병류하향 충전탑에서 액체의 흐름과 축방향혼합특성

조지훈* · 성기천** · 김태옥

명지대학교 공과대학 화학공학과
*한국산업안전공단 산업안전연구원 화학연구실
**(주) 우신화장품
(1993년 5월 11일 접수, 1993년 7월 2일 채택)

Flow and Axial Mixing Characteristics of Liquid Phase in a Packed Column with Gas-Liquid Cocurrent Downflow

Ji-Hoon Cho*, Ki-Chun Sung** and Tae-Ok Kim

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Myong Ji University, Seoul 120-728, Korea
*Dept. of Chemistry, Industrial Safety Research Institute, Korea Industrial Safety Corporation,
In Chon 403-120, Korea

**Woo Sin Cosmetics Co., Bu Cheon 421-130, Korea
(Received 11 May 1993; accepted 2 July 1993)

요 약

기-액흐름이 병류하향으로 흐르는 충전탑에서 액체의 흐름과 축방향혼합특성을 연구하였다. 실험에서 측정된 액체의 체류시간분포로부터 제시된 3가지 혼합모델, 즉 축방향분산모델(ADM), 정체지역이 존재하는 플러그흐름모델(PFM)과 정체지역이 존재하는 축방향분산모델(DSM)을 사용하여 혼합모델의 매개변수들을 산출하였다. 그리고 조업조건에 따른 각 혼합모델의 적용성과 매개변수들을 해석하였다. 실험결과, 액체의 흐름과 혼합특성은 모델 DSM으로 잘 해석할 수 있었으며 액체의 Reynolds수(Re_L)가 약 40이상에서는 유동지역의 흐름특성이 플러그흐름에 근접하였다. 또한 곡선맞춤법으로 산출된 정체지역의 분율은 모델 PFM에서보다 모델 DSM에서 작았으며 액체속도가 증가할수록 정체지역의 분율은 감소하였으나 유동지역과 정체지역간의 물질전달계수는 증가하였다. 그리고 $Re_L > 40$ 에서 모델 ADM과 모델 DSM으로 산출된 유동지역에서의 Peclet수는 충전물인 유리구슬의 직경과 액체속도가 증가할수록 증가하였다. 이 때 조업조건에 따른 이들 매개변수에 대한 상관식을 얻었다.

Abstract—For downward cocurrent gas-liquid flow in a packed column, the flow and axial mixing characteristics of liquid phase were investigated. Based on experimental residence time distributions of liquid phase, parameters of mixing models were evaluated with three proposed mixing models: the axial dispersion model (ADM), the plug flow model with stagnant zone (PFM), and the axial dispersion model with stagnant zone (DSM). Accordingly, the applicability and parameters of each mixing model were analyzed for various operating conditions. We found that the flow and mixing characteristics of liquid phase could be analyzed well by DSM, and also that the flow characteristics in the dynamic zone tended to access the plug flow at higher liquid Reynolds number (Re_L). Also, the fraction of stagnant zone estimated by the curve fitting method for the case of DSM was less than that of PFM. As liquid velocity increased, the fraction of the stagnant zone was decreased while the mass transfer coefficient between the dynamic and the stagnant zones was

increased. In the dynamic zone, the calculated Peclet numbers in both ADM and DSM were increased with increasing the diameter of glass bead as a packing material and increasing liquid velocity at $Re_L > 40$. In these conditions, correlations of these parameters were obtained for various operating conditions.

1. 서 론

기체흡수, 증류, 또는 화학반응을 수행하는 물질전달 장치로 널리 사용되는 충전탑은 석유정제공업, 화학반응과 합성공업, 공해와 폐수처리공업, 그리고 생물화학공업 등의 다양한 분야에서 응용되고 있다[1-3]. 일반적으로 충전탑은 기체흡수나 불활성 충전물이 존재하는 기-액반응계에서는 향류로 조업하고 촉매반응계에서는 소형의 구형입자나 실린더 형태의 고체충전물을 사용하여 하향 또는 상향의 병류로 조업한다[4, 5].

기-액흐름을 병류하향시키는 점적상반응기(trickle bed reactor)는 액체의 범람(flooding)현상이 없어 조업범위가 넓고 압력강하가 낮은 장점이 있어서 1930년대에 포름알데히드와 아세트알데히드로부터 부틸렌디올을 공업적으로 제조하는데 사용되었다[6]. 그후 윤활유의 hydrofinishing과 hydrotreating공정, 원유의 hydrodesulfurization공정, 석유화학공업, 기-액반응과 생물화학공정 등의 분야에서 사용되고 있다[7-9].

이와 같은 충전탑의 특성은 기-액흐름특성에 따라 변화할 뿐만 아니라[10] 유체의 물리적 성질과 고체입자의 특성에 따라 복잡다양하여 대부분의 연구는 국부적인 조건에서 수력학적특성과 혼합특성, 그리고 열전달 및 물질전달에 관하여 해석하였다[11-13]. 특히 액체의 혼합특성은 다상계의 반응이 주로 기상 또는 액상내의 고체표면에서 일어나서 반응전환율과 생성물의 선택도에 영향을 미치기 때문에[14] 반응기의 성능결정에 매우 중요하여 많은 연구가 진행되어 왔는데 제안된 혼합모델로는 분산모델, 다양한 혼합조모델, 시간지연모델, 분포함수모델, 그리고 중요한 비이상흐름인 정체지역을 고려한 모델 등이 있다[15-17]. 그러나 액체혼합모델에서 사용된 매개변수의 값은 혼합모델의 종류와 산출방법, 그리고 조업조건에 따라 차이가 있기 때문에 실제계의 적용에는 많은 어려움이 있다.

본 연구는 기-액흐름이 병류하향으로 흐르는 충전탑에서 조업조건에 따른 여러 가지 혼합모델의 적용성을 검토하고 산출된 매개변수에 대한 상관식을 제시함으로써 고정층 반응기의 설계와 조업의 기초자료로 활용되도록 하기 위하여 액체의 흐름과 축방향혼합특성을 해석하였다.

2. 이 론

액체의 흐름지역은 축방향분산모델의 적용이 가능한 유동지역과 완전혼합흐름인 정체지역으로 되어 있으며 이들 지역간에는 물질전달이 일어난다고 가정하여 x 방향에 대한 물질수지를 세우고 정리하면 유동지역에서는 식 (1)과 같다.

$$\phi \frac{\partial C_d}{\partial t} = \phi D_L \frac{\partial^2 C_d}{\partial x^2} - u_L \frac{\partial C_d}{\partial x} - K(C_d - C_s) \quad (1)$$

또한 정체지역에서는 식 (2)와 같다.

$$(1-\phi) \frac{\partial C_s}{\partial t} = K(C_d - C_s) \quad (2)$$

여기서 C_d 와 C_s 는 각각 유동지역과 정체지역에서 추적자 농도, ϕ 는 액체흐름중 유동지역의 분율, D_L 은 액체가 차지하는 단면적을 기준으로 한 액체의 축방향분산계수, 그리고 K 는 물질전달계수이다.

식 (1)과 (2)를 무차원식으로 나타내면

$$\frac{\partial C_d}{\partial z} + \phi \frac{\partial C_d}{\partial \theta} + N(C_d - C_s) = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C_d}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$(1-\phi) \frac{\partial C_s}{\partial \theta} = N(C_d - C_s) \quad (4)$$

이고 초기 및 경계조건은 식 (5)와 같다[18].

$$\theta = 0, C_d = C_s = 0$$

$$z = 0, \delta(\theta) = C_d - \frac{1}{Pe} \frac{\partial C_d}{\partial z} \quad (5)$$

$$z = 1, \left. \frac{\partial C_d}{\partial z} \right|_{z=1} = 0$$

여기서 $z = x/L$, $\theta = t/\bar{t}$, $N = K\bar{t}$, $Pe = u_L L/D_L$, $\bar{t} = L/u_L$ 이다.

식 (4)-(5)로부터 얻은 체류시간분포함수 $C(\theta)$ 의 해는 식 (6)과 같다[17].

$$C(\theta) = \exp\left(\frac{-N\theta}{\phi}\right) h(\theta, \phi) + \int_0^\infty g(u, \theta, \phi) du \quad (6)$$

$$\text{단, } h(\theta, \phi) = \left(\frac{Pe}{\pi\phi\theta}\right)^{1/2} \cdot \exp\left[\frac{-Pe(\theta-\phi)^2}{4\phi\theta}\right] - \frac{Pe}{2\phi} \\ \cdot \exp(Pe) \cdot \text{erfc}\left[\left(\frac{Pe}{\phi\theta}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\theta+\phi}{2}\right)\right]$$

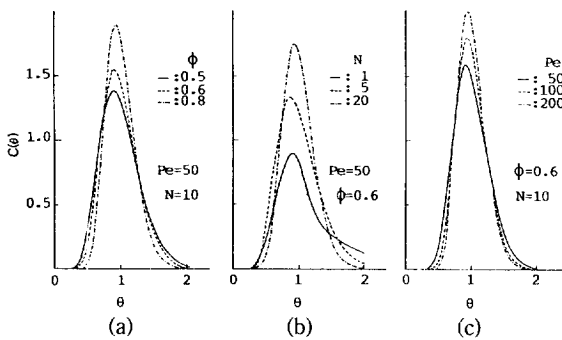


Fig. 1. Typical residence time distribution curves of axial dispersion model with stagnant zone.

$$g(u, \theta, \phi) = \frac{N}{\phi} \left[\frac{\phi u}{(1-\theta)(\theta-\phi)} \right]^{1/2} \cdot I_1 \left\{ 2N \left[\frac{u(\theta-u)}{\phi(1-\phi)} \right] \right\}^{1/2} \cdot \exp \left[-\frac{N(u-2\phi u+\phi\theta)}{\phi(1-\phi)} \right] h(u, \phi)$$

여기서 $\text{erfc } x$ 와 I_1 은 각각 보조차함수(complementary error function)와 1차 Bessel함수이다.

식 (6)의 매개변수인 ϕ 와 N 및 Pe 의 변화에 대하여 계산된 이론체류시간분포곡선의 대표적인 변화는 Fig. 1과 같다.

또한 식 (6)의 전달함수로부터 Laplace limiting theorem에 의하여 구한 무차원 가변도(variance)는 다음과 같다[19].

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma_r^2}{t^2} = \left[\frac{2}{Pe} - \frac{2}{Pe^2}(1-e^{-Pe}) \right] + \frac{2(1-\phi)^2}{N} \quad (7)$$

특히 정체지역이 존재하는 축방향분산모델에 대한 식 (1)-(7)에서 정체지역이 없는 경우($\phi=1$)에는 Pe 만의 함수인 축방향분산모델과 동일하며 유동지역이 플러그 흐름인 경우($Pe=\infty$)에는 정체지역이 존재하는 플러그 흐름모델이 된다.

3. 실험

3-1. 실험장치

충전탑은 내경이 6 cm, 높이가 142 cm인 수직원통형 관으로 액체분산기, 기-액분산기, 충전지역, 그리고 충전물지판으로 구성되었다. 길이가 5 cm인 기-액분산기는 직경이 5 cm인 액체분산기로부터 낙하된 액체가 내경이 0.5 cm이고 정사각형으로 배열된 12개의 관을 통하여, 그리고 기체는 직경이 0.15 cm인 37개의 모세관을 통하여 각각 분리되어 충전층에 주입되도록 하였다. 탑의 공극률과 동일하게 제작한 충전물지판은 정

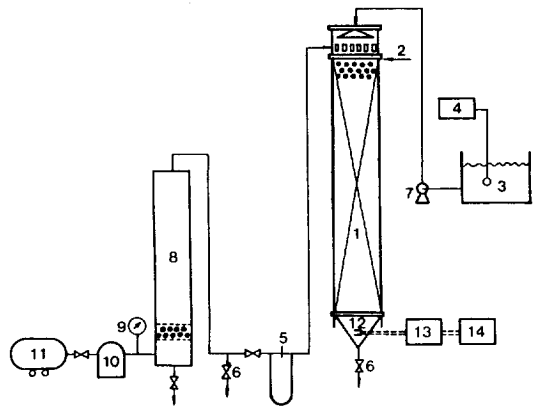


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|------------------------------|------------------------|
| 1. Packed column | 8. Air humidifier |
| 2. Tracer injection point | 9. Pressure gauge |
| 3. Constant temperature bath | 10. Holding tank |
| 4. Temperature controller | 11. Air compressor |
| 5. Manometer/rotameter | 12. Conductivity cell |
| 6. Needle valve | 13. Conductivity meter |
| 7. Circulation pump | 14. Recorder |

사각형으로 배열된 직경 0.15 cm인 144개의 모세구로 되었다.

실험장치는 Fig. 2와 같다.

3-2. 실험방법

충전물은 밀도가 2.52 g/cm³이고 직경이 0.3 cm와 0.6 cm인 유리구슬을 사용하여 불규칙 배열로 충전하였으며 측정된 탑의 공극률은 0.38이었다. 실험은 기상으로 공기를, 그리고 액상으로 증류수를 사용하여 20±2°C의 온도범위에서 기체와 액체속도를 각각 0.817-15.666 cm/s와 0.147-1.380 cm/s로 변화시키면서 정상상태에서 전해질 용액(소금수용액)을 추적자로 하여 전도도방법에 의한 충격-응답곡선을 얻었다. 이 때 조업방법에 따라 유동특성이 변화하는 다중정상상태의 존재를 방지하기 위하여 유체를 높은 유량으로 흘려 충전물의 표면이 충분히 젖도록 한 후 실험하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 액체혼합모델의 해석

이론에서 제시된 혼합모델을 정체지역의 존재여부와 유동지역의 혼합특성에 따라 3가지 혼합모델, 즉 정체지역이 없는 축방향분산모델(ADM), 정체지역이 존재하는 플러그흐름모델(PFM), 그리고 정체지역이 존재

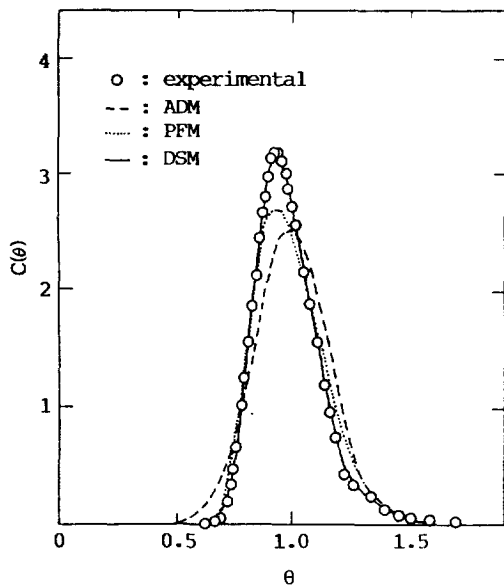


Fig. 3. Comparison between experimental and calculated response curves: $d_p=0.3$ cm, $U_L=0.651$ cm/s, and $U_G=2.350$ cm/s.

하는 축방향분산모델(DSM)로 구분하여 매개변수를 산출하고 조업조건에 따른 혼합모델의 적용성을 정성적 방법과 정량적 방법으로 해석하였다.

모델 ADM에서는 식 (7)에서 $\phi=1$ 이므로 단일 매개변수인 Peclet수를 무차원 가변도로부터 계산하였다. 그러나 정체지역이 존재하는 경우는 매개변수가 2개 이상이므로 안정된 값을 얻기 위하여 식 (7)을 이용한 곡선 맞춤법을 사용하였다. 즉 $C(\theta)$ 의 계산값(C_{ic})과 실험값(C_{ie})이 일치되기 위한 목적함수, F를 식 (8)과 같이 정의하였다.

$$F = \sum_{i=1}^n (C_{ic} - C_{ie})^2 / n \quad (8)$$

여기서 n은 실험값의 개수이다.

특히 Fig. 1에서와 같이 $C(\theta)$ 의 앞부분과 후미부분은 각각 주로 ϕ 또는 Pe와 N에 따라 변화할 뿐만 아니라 곡선의 후미부분은 N값에 민감하게 변화하므로 목적함수를 식 (9)와 (10)과 같이 절대오차와 상대오차의 함수로 구분하였다. 그리고 곡선의 앞부분에서는 F_1 이 최소가 되는 ϕ 또는 Pe를, 그리고 후미부분에서는 F_2 가 최소로 되는 N을 반복시행하여 산출하였다.

$$F_1 = \left[\frac{\sum (C_{ic} - C_{ie})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Table 1. Typical values of estimated parameters and objective function

Model	d_p (cm)	U_L (cm/s)	U_G (cm/s)	Pe	ϕ	N	F
ADM	0.3	0.651	2.350	78.4	—	—	0.198
			8.117	69.3	—	—	0.222
			1.014	2.350	83.6	—	—
	0.6	0.651	8.117	83.5	—	—	0.150
			2.350	91.1	—	—	0.075
			8.117	83.4	—	—	0.096
		1.014	2.350	136.0	—	—	0.067
			8.117	139.3	—	—	0.080
			2.350	—	—	—	—
PFM	0.3	0.651	2.350	—	0.718	6.5	0.060
			8.117	—	0.704	7.5	0.109
			1.014	2.350	—	0.724	9.0
	0.6	0.651	8.117	—	0.756	8.1	0.048
			2.350	—	0.696	8.5	0.008
			8.117	—	0.696	7.8	0.015
		1.014	2.350	—	0.691	12.1	0.004
			8.117	—	0.683	13.1	0.005
			2.350	—	—	—	—
DSM	0.3	0.651	2.350	80.6	0.980	6.7	0.028
			8.117	77.4	0.982	6.3	0.021
			1.014	2.350	86.8	0.982	7.9
	0.6	0.651	8.117	88.1	0.985	8.2	0.009
			2.350	94.9	0.976	9.0	0.005
			8.117	87.2	0.989	8.2	0.003
		1.014	2.350	142.3	0.991	11.2	0.004
			8.117	141.3	0.986	11.8	0.001
			2.350	—	—	—	—

$$F_2 = \left[\frac{\sum \left(\frac{C_{ic} - C_{ie}}{C_{ie}} \right)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Fig. 3은 혼합모델에 따른 $C(\theta)$ 의 계산값과 실험값을 비교한 그림이다. 모델 ADM에서는 Peclet수가 커서 계산값이 $\theta=1$ 에서 분산되는 정규분포함수의 형태를 갖지만 실험값은 정점이 $\theta<1$ 에서 나타나고 후미에서 느리게 감소하고 있다. 이것은 정체지역 또는 유동지역의 흐름보다 매우 느린 흐름이 존재하기 때문이며[19, 20] 이들 지역간에는 물질전달이 일어나서 곡선의 앞부분은 Fig. 1의 (b)와 같이 상대적으로 급격히 상승하게 된다. 따라서 조업조건에 따른 혼합모델의 적용성을 나타낸 Table 1에서와 같이 모델 ADM은 충전물의 크기가 클수록, 그리고 액체속도가 증가할수록 Peclet수가 증가하여 F값이 감소되지만 전 실험범위에서 F값이 커서 모델의 적용이 어려움을 알 수 있다.

모델 PFM은 모델 ADM보다 적용성이 우수하지만 곡선의 정점과 후미에서 다소 차이가 나고 있다. 이것은

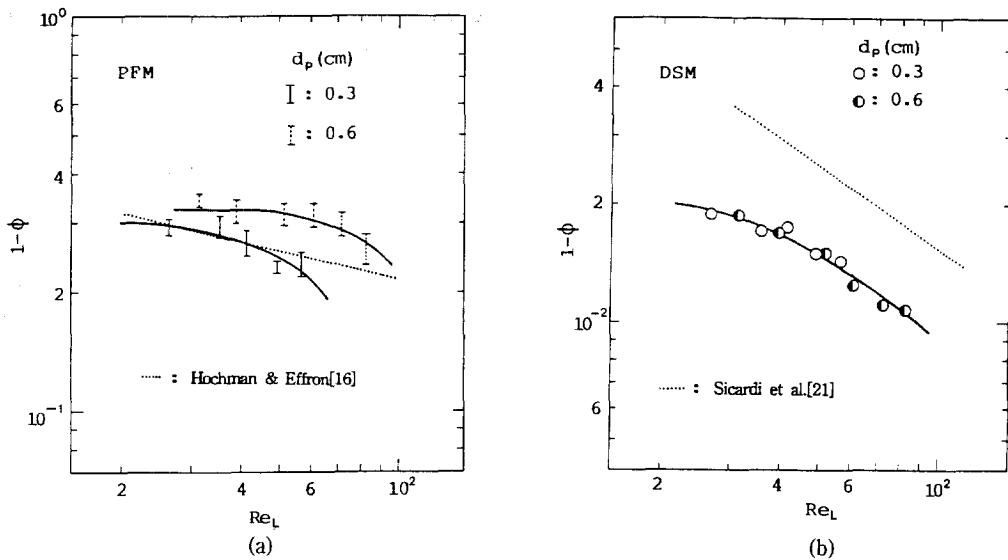


Fig. 4. Fraction of stagnant zone as a function of liquid Reynolds number.

실제계가 완전한 플러그흐름이 아니어서 산출된 ϕ 가 실제보다 작기 때문에 Fig. 1의 (a)에서와 같이 계산된 $C(\theta)$ 의 정점이 낮아지게 된다. 따라서 Table 1에서와 같이 N 값이 큰 경우, 즉 충전물이 크거나 액체속도가 높은 경우에는 F 값이 약 0.04이하로 모델 PFM의 적용이 가능하였다.

모델 DSM에서는 모델 PFM에서와 비슷한 N 값을 갖지만 축방향분산의 고려로 ϕ 가 상당히 커서 $C(\theta)$ 의 정점이 상승하기 때문에 실험값과 계산값이 잘 일치하고 있으며 전 실험범위에서 F 값이 0.03이하로 모델 DSM의 적용이 가능하였다.

4-2. 액체의 흐름특성

액체흐름중 정체지역의 분율은 혼합모델에 관계없이 기체속도에 무관하였는데 기체속도가 증가할수록 액체 체류량이 감소되고 기포흐름에 의한 항력이 정적체류량을 감소시키기 때문으로 보인다. 또한 Fig. 4에서와 같이 점적흐름(trickle flow)인 낮은 액체속도에서는 액체속도의 증가에 따라 동적체류량과 정적체류량이 동시에 증가하기 때문에 정체지역의 분율이 액체의 레이놀즈수(Re_L)에 무관하였다. 그러나 Re_L 이 증가함에 따라 기포 분산이 이루어지는 맥동흐름(pulse flow)으로 전이되어 기포흐름에 의한 후류(wake)형성으로 정체지역의 분율이 급격히 감소하였다. 이것은 모델 PFM에서 0.48 cm 직경의 유리구슬을 사용한 Hochman과 Effron[16]의 결과, 그리고 모델 DSM에서 0.27 cm 직경의 실린더를 사용한 Sicardi 등[21]의 결과와 일치된다.

Table 2. Parameters in Eq. (11)

Flow regime	d_p (cm)	A		B	
		PFM	DSM	PFM	DSM
Trickle flow	0.3	0.29	10.82	0.	-1.54
	0.6	0.32	10.82	0.	-1.54
Pulse flow	0.3	38.0	10.82	-1.10	-1.54
	0.6	28.5	10.82	-1.10	-1.54

*Trickle-pulse flow transition boundary was used from data of Cho[22] at same experimental conditions.

모델 PFM에서 정체지역의 분율은 충전물의 크기가 작을수록 감소하였는데 이것은 고체입자의 표면적이 증가할수록 정적체류량은 증가하지만 유로의 단면적이 감소하여 탭내에 축적되는 액체량의 증가효과가 크기 때문이다[22]. 그러나 모델 DSM에서는 $C(\theta)$ 가 ϕ , Pe 와 N 에 따라 변화할 뿐만 아니라 정체지역의 분율이 매우 작아서 충전물의 크기영향은 무시될 수 있었다. 특히 Fig. 4의 (a), (b)를 비교하면 모델 DSM으로 산출된 정체지역의 분율이 모델 PFM에서보다 매우 작은 값을 갖는데 이것은 Fig. 1의 (a), (c)에서와 같이 축방향분산을 고려한 경우에는 응답곡선의 분산효과중 일부가 Pe 값에 반영되기 때문이다.

따라서 실제계에서 정체지역의 분율은 축방향분산이 일어나서 모델 PFM에서보다 작고 모델 DSM에서는 축방향분산효과가 유동지역 분율의 증가효과를 가지므로 산출값보다 클 것이다. 이 때 산출된 정체지역의 분율은 식 (11)의 상관식을 가졌으며 매개변수 A와 B

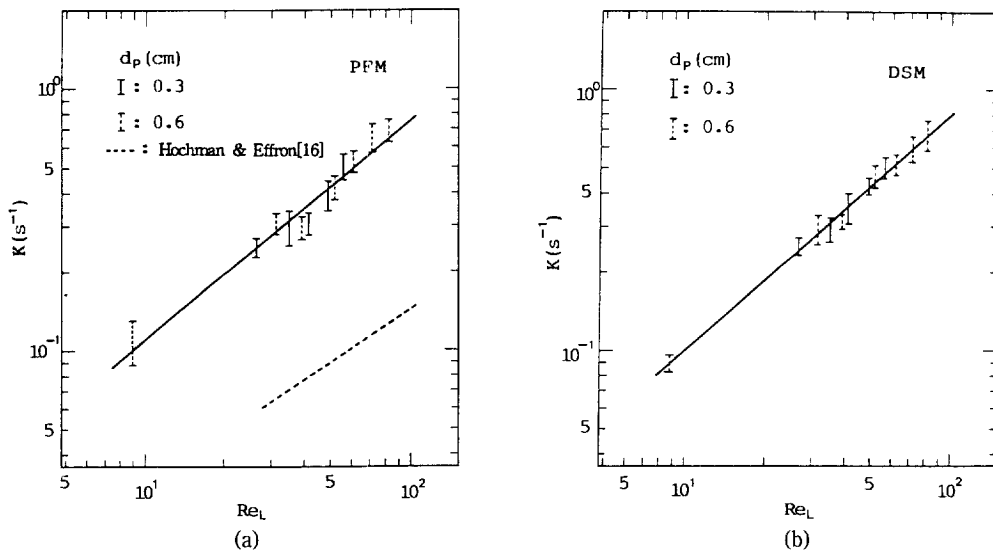


Fig. 5. Mass transfer coefficient as a function of liquid Reynolds number.

값은 Table 2와 같다.

$$1 - \phi = A Re_L^B \quad (11)$$

액체의 흐름특성에서 중요한 매개변수인 무차원 물질전달계수(N)는 Fig. 3에서와 같이 곡선의 후미부분에서 모델 PFM과 모델 DSM이 실험값과 비교적 잘 일치하여 Table 1과 같이 두 모델에서 거의 동일한 값을 나타내었다. 또한 액체속도가 증가할수록 Peclet수가 증가하여 전달단위수(no. of transfer units)를 의미하는 [23] N 값은 급격히 증가하였다. 그러나 공간시간에 따라 N 가 변화하므로 실제계에서는 물질전달계수가 유용하다.

물질전달계수는 Fig. 5에서와 같이 기체속도와 충전물의 크기에는 거의 영향을 받지 않으며 Re_L 만의 함수이었다. 이것은 물질전달이 액상간에 일어나서 분자확산에 의하지 않고 액체의 난류에 의존하기 때문이다[19]. 따라서 15.24 cm의 탑직경에서 모델 PFM으로 얻는 Hochman과 Effron[16]의 결과는 액체혼합정도의 차이로 본 실험에서 보다 상당히 작은 값을 나타내었다. 이 때 물질전달계수에 대한 상관식은 식 (12)와 같이 표시되었으며 식 (12)의 매개변수값은 각각 모델 PFM에서는 $A = 1.61 \times 10^{-2}$, $B = 0.84$ 이었고 모델 DSM에서는 $A = 1.26 \times 10^{-2}$, $B = 0.90$ 이었다.

$$K(s^{-1}) = A Re_L^B \quad (12)$$

4-3. 유동지역의 촉방향혼합특성

Table 1에서와 같이 유동지역의 Peclet수는 정체지

Table 3. Parameters in Eq. (13)

Flow regime	$d_p(\text{cm})$	A		B	
		PFM	DSM	PFM	DSM
Trickle flow	0.3	0.16	0.15	0.	0.
	0.6	0.16	0.15	0.	0.
Pulse flow	0.3	4.51×10^{-4}	2.96×10^{-4}	1.65	1.75
	0.6	4.44×10^{-3}	2.85×10^{-4}	1.19	1.29

역의 존재유무에 크게 영향을 받지 않아서 모델 ADM과 모델 DSM에서 거의 비슷한 값을 나타내었다.

Fig. 6은 충전물의 직경을 기준으로한 Peclet수(Bodenstein수, Pe_p)의 변화를 나타낸 것으로 혼합모델에 관계없이 낮은 액체속도에서는 점적흐름을 나타내어 액체혼합특성이 Re_L 에 무관하지만 Re_L 이 증가함에 따라 맥동흐름으로 전이되어 Pe_p 가 증가하였다. 이것은 Matsuura 등[24]의 결과와 같이 점적흐름은 기상이 연속상이고 맥동흐름에서는 기포분산이 일어나기 때문이다. 또한 기체속도가 증가할수록 액체의 촉방향분산계수가 증가되지만 액체체류량의 감소로 Pe_p 는 기체속도에 무관하였고 충전물의 크기가 작을수록 액체체류량의 증가로 액체의 실제속도가 감소되기 때문에 Pe_p 는 감소되었다. 따라서 Re_L 이 증가하여 플러그흐름에 근접할수록 충전물의 크기영향은 감소되며 모델 DSM에서는 물질전달계수의 증가로 모델 ADM에서보다 Re_L 의 영향이 증가되었다.

이상의 결과와 Table 1을 비교하면 맥동흐름영역인 약 40이상의 Re_L 에서는 Pe_p 가 약 0.2이상을 나타내어

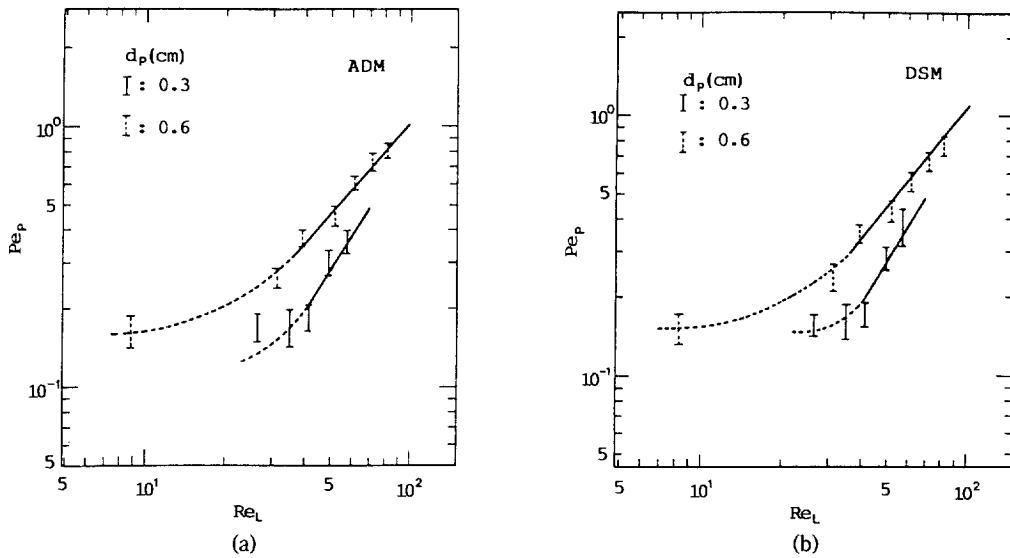
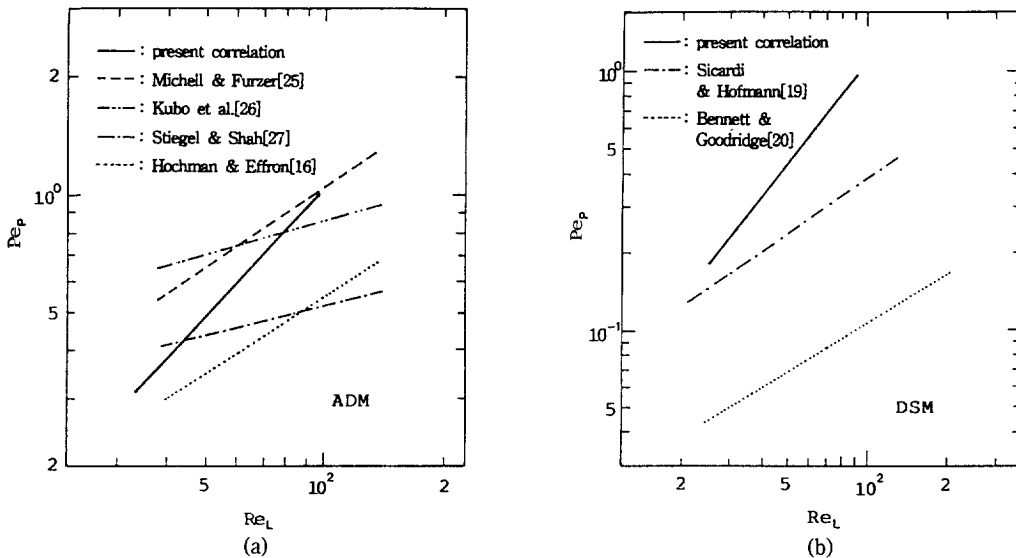


Fig. 6. Bodenstein number as a function of liquid Reynolds number.

Fig. 7. Comparison of Bodenstein number with literature data: $d_p = 0.6$ cm.

유동지역의 축방향혼합특성은 플러그흐름에 근접하여 모델 PFM의 적용이 가능하게 된다. 이 때 산출된 Bodenstein수는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있었으며 조업조건에 따른 매개변수 A와 B의 값은 Table 3과 같다.

$$Pe_p = A Re_L^B \quad (13)$$

Fig. 7은 모델 ADM과 모델 DSM을 사용한 연구결과를 비교한 것으로 본 연구결과가 모델 ADM에서는

하향계의 Michell과 Furzer[25], 그리고 상향계의 Kubo 등[26]의 결과와 비슷하나 하향계의 Hochman과 Effron[16], 그리고 상향계의 Stiegel과 Shah[27]의 결과보다는 Pe_p 가 다소 큰 값을 나타내고 있다. 또한 모델 DSM에서는 연구결과가 거의 보고되지 않은데 하향계에서 실린더를 사용한 Sicardi와 Hofmann[19], 그리고 상향계에서 ring을 사용한 Bennett와 Goodridge[20]의 결과보다 유리구슬을 사용한 본 실험에서 액체혼합정도가

감소되어 상당히 큰 Pe_p 값을 나타내었다.

이와 같이 연구결과에 따라 차이가 나는 것은 충전물의 종류와 조업조건, 그리고 매개변수의 산출방법, 즉 모멘트를 사용한 경우에 농도곡선의 후미부분에서 정체지역으로 인하여 형성되는 꼬리(tail)를 처리하는 방법과 시간영역에서 최적화하는 경우에는 목적함수와 오차의 한계설정 등에 따라 매개변수의 값이 변화될 수 있기 때문이다[18].

5. 결 론

유리구슬을 사용한 기-액병류하향 충전탑에서 액체의 흐름과 축방향혼합특성을 고찰한 결과는 다음과 같다.

(1) 액체의 흐름과 축방향혼합특성은 정체지역이 존재하는 축방향분산모델(DSM)로 잘 해석할 수 있었으며 액체의 Reynolds수가 약 40이상에서는 유동지역의 흐름특성이 플러그흐름에 근접하여 정체지역이 존재하는 플러그흐름모델(PFM)의 적용이 가능하였다.

(2) 곡선맞춤법에 의하여 산출된 정체지역의 분율은 모델 PFM에서보다 모델 DSM에서 상당히 작으며 액체속도가 증가할수록 정체지역의 분율은 감소되었으나 물질전달계수는 증가되었다.

(3) 유동지역에서 Peclet수는 충전물의 크기가 클수록, 그리고 Re_L 이 약 40이상에서 액체속도가 증가할수록 증가하였다. 이 때 조업조건에 따른 이들 매개변수들에 대한 상관식을 얻었다.

사용기호

C_d	: tracer concentration in the dynamic zone [g/cm ³]
C_{ic}	: calculated value of $C(\theta)$ [-]
C_{ie}	: experimental value of $C(\theta)$ [-]
$C(\theta)$: C-curve [-]
C_s	: tracer concentration in the stagnant zone [g/cm ³]
d_p	: particle diameter [cm]
D_L	: axial dispersion coefficients of liquid phase [cm ² /s]
$\text{erfc} x$: complementary error function [-]
F	: objective function defined in Eq. (8) [-]
F_1	: absolute error function defined in Eq. (9) [-]
F_2	: relative error function defined in Eq. (10) [-]
$g(x)$: arbitrary function defined in Eq. (6) [-]
$h(x)$: arbitrary function defined in Eq. (6) [-]
I_1	: first order Bessel function [-]

K	: mass transfer coefficient between the dynamic and the stagnant zones [s ⁻¹]
L	: column height [cm]
n	: number of experimental data [-]
N	: dimensionless mass transfer coefficient, $K\bar{t}$ [-]
Pe	: Peclet number of liquid phase, $u_L L/D_L$ [-]
Pe_p	: Bodenstein number, $u_L d_p/D_L$ [-]
Re_L	: liquid Reynolds numbers, $\rho_L d_p u_L/\mu_L$ [-]
t	: time [s]
\bar{t}	: mean residence time [s]
u_L	: interstitial liquid velocity [cm/s]
U_G	: superficial gas velocity [cm/s]
U_L	: superficial liquid velocity [cm/s]
x	: axial distance [cm]
z	: dimensionless axial distance, x/L [-]

그리스 문자

$\delta(\theta)$: Dirac delta function [-]
θ	: dimensionless time, t/\bar{t} [-]
μ_L	: liquid viscosity [g/cm·s]
ρ_L	: liquid density [g/cm ³]
σ_c^2	: variance [s ²]
σ_θ^2	: dimensionless variance [-]
ϕ	: volume fraction of the dynamic zone [-]

참고문헌

1. Panvelkar, S. V., Tierney, J. W. and Shah, Y. T.: *Chem. Eng. Sci.*, **37**, 1582(1982).
2. Furzer, I. A. and Ho, G. E.: *AIChE J.*, **13**, 614 (1967).
3. Mata, A. R. and Smith, J. M.: *Chem. Eng. J.*, **22**, 229 (1981).
4. Sylvester, N. D. and Pitayagulsarn, P.: *I & EC Process Des. Dev.*, **14**, 421(1975).
5. Shah, Y. T.: "Gas-Liquid-Solid Reactor Design", McGraw-Hill, New York(1979).
6. Hofmann, H.: *Int. Chem. Eng.*, **17**, 19(1977).
7. Herskowitz, M. and Smith, J. M.: *AIChE J.*, **29**, 1 (1983).
8. Gianetto, A. and Silveston, P. L.: "Multiphase Chemical Reactors: Theory, Design, Scale-up", Hemisphere Pub. Co., New York(1986).
9. Satterfield, C. N.: *AIChE J.*, **21**, 209(1975).
10. Fukushima, S. and Kusaka, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **10**, 461(1977).
11. Charpentier, J. C. and Favier, M.: *AIChE J.*, **21**, 1213(1975).
12. Schwartz, J. G., Weger, E. and Dudukovic, M. P.:

- AIChE J.*, **22**, 953(1976).
13. Goenaga, A., Smith, J. M. and McCoy, B. J.: *AIChE J.*, **35**, 159(1989).
 14. Montagna, A. A. and Shah, Y. T.: *I & EC Process Des. Dev.*, **14**, 479(1975).
 15. Crine, M. and L'Homme, G.: "Encyclopedia of Fluid Mechanics: Vol. 6-Complex Flow Phenomena and Modeling", Chap. 9, edited by Cheremisinoff, N. P., Gulf Pub. Co., Houston(1987).
 16. Hochman, J. M. and Effron, E.: *I & EC Process Fundam.*, **8**, 63(1969).
 17. Yang, X. L., Euzen, J. P. and Wild, G.: *Chem. Eng. Sci.*, **45**, 3317(1990).
 18. Skomorokov, V. B. and Kirillov, V. A.: *Chem. Eng. J.*, **33**, 169(1986).
 19. Sicardi, S. and Hofmann, H.: *Chem. Eng. J.*, **20**, 251(1980).
 20. Bennett, A. and Goodridge, F.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **48**, 232(1970).
 21. Sicardi, S., Baldi, G. and Specchia, V.: *Chem. Eng. Sci.*, **35**, 1775(1980).
 22. Cho, J. H.: "Flow and Mixing Characteristics of Liquid Phase in a Packed Column with Gas-Liquid Cocurrent Upflow and Downflow", Ph.D. Thesis, Myong Ji University(1992. 8).
 23. Van Swaaij, W. P. M., Charpentier, J. C. and Villermaux, J.: *Chem. Eng. Sci.*, **24**, 1083(1969).
 24. Matsuura, A., Akehata, T. and Shirai, T.: *J. Chem. Eng. Japan*, **9**, 294(1976).
 25. Michell, R. W. and Furzer, I. A.: *Chem. Eng. J.*, **4**, 53(1972).
 26. Kubo, K., Aratani, T. and Mishima, A.: *Int. Chem. Eng.*, **23**, 85(1983).
 27. Stiegel, G. J. and Shah, Y. T.: *Can. J. Chem. Eng.*, **55**, 3(1977).