

## 固—液充填流動層에서 固體粒子들의 軸方向混合에 關한 研究(Ⅱ)

金 泰 玉 · 崔 益 授\* · 姜 雄 基

고려대학교 이공대학 화학공학과

(접수 1977. 4. 18)

## A Study of Longitudinal Particle Mixing in a Screen-Packed Liquid-Solid Fluidized Bed (Ⅱ)

Tae OK Kim, Ik Soo Choi\*, and Woong Ki Kang

Department of Chemical Engineering, Korea University,

Seoul 132, Korea

(Received April 18, 1977)

### 요 약

본연구에서는 고—액유동층에 원통형금망을 충전시켜 유동층의 높이에 따른 고체입자들의 축방향 혼합을 분산모델로 해석하였다. 연구결과 빠른 액체의 유속에 대해 다음과 관계가 있었다.

$$D(\text{cm}^2/\text{sec}) \propto (U/U_{mf}-1)^{1.6} \text{ for } U/U_{mf} > 3$$

또한 실험결과는 본연구에서 제안된 random walk model과 실험전범위내에서 잘 맞았으며 다음식이 성립하였다. ( $u/u_{mf} < 2.45 \sim 9.83$ ,  $d_s = 0.046 \sim 0.077\text{cm}$ )

$$D(\text{cm}^2/\text{sec}) = 35.7 (U^2 - U_{mf}^2)^{1/2} d_s / (1 - \varepsilon)$$

### Abstracts

In this investigation, the longitudinal particle mixing in a liquid-solid fluidized bed packed with screen cylinders was studied by employing a colorimetric concentration tracer impulse method. In batch systems, the results showed that the dispersion model was in good agreement with the present experiments and the longitudinal dispersion coefficient was related with the liquid velocity at the higher liquid velocities as following for the screen packed fluidized bed:

$$D^2(\text{cm}^2/\text{sec}) \propto (U/U_{mf}-1)^{1.6} \text{ for } U/U_{mf} > 3$$

A random walk model was also proposed and gave an excellent agreement with the experimental results for all the range of present experiments ( $U/U_{mf} = 2.45 \sim 9.83$ ,  $d_r = 0.046 \sim 0.077\text{cm}$ ) as follows:

$$D(\text{cm}^2/\text{sec}) = 35.7 (U^2 - U_{mf}^2)^{1/2} d_s / (1 - \varepsilon)$$

\*원주소: 한국과학기술정보센터

## 1. 서 론

유동층에서의 고체입자혼합은 대부분 기포탑에서 이루어졌고 bed 내에서 기포의 생성경향으로 복잡다양하여 오랫동안 많이 연구되었고<sup>1-6)</sup> 고-액유동층상에서 고체입자의 혼합도 많은 사람에게 의해 연구되었다<sup>7-10)</sup>. Handley 등은<sup>8)</sup> 유동층상의 고체입자의 flow pattern에 대하여, Carlos와 Richardson은<sup>10)</sup> 측방향혼합계수를 kinetic theory와 Einstein equation으로 해석하였고 Kennedy와 Bretton<sup>11)</sup>은 측방향혼합계수가 액체유속에 비례함을 보였다. Cairns 등은<sup>12)</sup> 유효확산계수가 입자의 밀도에 비례함을 보였고 Ramamurthy 등<sup>13)</sup>은 고체입자의 크기에 따른 유동층확장과 혼합에 대해 연구하였다.

최근 유동층에 관한 연구는 Ghar 등<sup>14)</sup>이 서로다른 입자의 혼합과 tracer 영향을 밝혔고 Krishnaswamy 등은<sup>15)</sup> 측방향혼합에서 reduced dispersion coefficient가 reduced velocity에 비례함을 보였으며 최 등은<sup>16)</sup> 고-액층전유동층상에서 고체입자의 측방향혼합이 dispersion model을 만족하는 것을 입증하였으며 측방향분산계수와 액체유속과의 관계를 얻었다. 이 밖에도 고체입자의 circulation과<sup>17,18)</sup> 혼합에<sup>19,20)</sup> 관한 연구도 많다.

본연구에서는 유동층내의 고체입자의 bulk-circulation을 감소시키고 유동층의 균일한 팽창을 위해 사용함 충전물<sup>5,21,22)</sup> 중에서 그 효용성이 제시된<sup>23)</sup> 금망충전물을 사용하여 고체입자의 혼합을 colorimetric concentration tracer impulse 기법으로 실험하여 dispersion model과 비교하고 고체입자와 액체유속 및 bed expansion이 longitudinal dispersion coefficient에 미치는 영향을 random walk model로 해석 검토하였다.

## 2. 이론적 모델

### (1) Dispersion Model<sup>16)</sup>

Fig. 1은 이론적모델을 나타낸 것이며 그방정

식과 해는 다음과 같다.

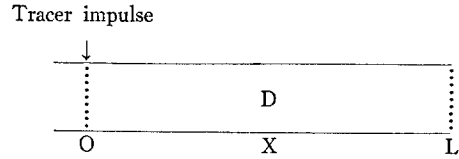


Fig. 1 Theoretical model

$$D \frac{\partial^2 C(X, t)}{\partial X^2} = \frac{\partial C(X, t)}{\partial t} \quad (1)$$

초기조건과 경계조건

$$C(X, 0) = \delta(X) \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial C(X, t)}{\partial X} \right|_{X=0} = \left. \frac{\partial C(X, t)}{\partial X} \right|_{X=L} = 0 \quad (3)$$

식 (1)의 해는

$$C(X', t) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 D t}{L^2}\right] \cos n \pi X' \quad (4)$$

$$\text{단 } X' = \frac{X}{L}$$

이며 특히  $X' = \frac{1}{2}$ 인 경우의 농도기울기는 다음과 같다<sup>24)</sup>.

$$\left( \frac{\partial C}{\partial X'} \right)_{X'=\frac{1}{2}} \cong -2\pi \exp\left[-\frac{\pi^2 D t}{L^2}\right], \quad \text{for } \frac{D t}{L^2} > 0.08 \quad (5)$$

### (2) Random Walk Model

입자의 운동이 random 하고 확산하는 입자의 농도가 낮을때 입자간의 평균충돌거리와 시간은 유효확산계수를 사용하여 Einstein의 확산방정식으로부터 다음식이 얻어진다<sup>25)</sup>.

$$\overline{\Delta Z^2} = 2D_E \theta \quad (6)$$

이때 입자의 평균충돌시간,  $\theta$ 는

$$\theta = \left| \frac{\overline{\Delta Z}}{V} \right| \quad (7)$$

로 생각할수 있으며 입자의 평균속도,  $V$ 는 superficial liquid velocity와는 다음과 같은 관계가 있다<sup>26)</sup>.

$$\rho_s V^2 \propto \rho_f (U^2 - U_{mf}^2) \quad (8)$$

또 분자운동론의 결과를 이용한 Maxwell's formula<sup>27)</sup>를 사용하여 mean free path는 입자의 직경과 bed voidage와는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|\Delta Z| \propto \frac{d_s}{1-\epsilon} \quad (9)$$

따라서 식 (6), (7), (8), (9)로부터 축방향분산계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = K(U^2 - U_{mf}^2)^{\frac{1}{2}} d_s / (1-\epsilon) \quad (10)$$

### 3. 실험장치 및 방법

사용한 실험장치는 Fig. 2에 표시한 바와같이 높이 250cm, 내경 5cm인 투명원통관과 부속물로 되어있다. 충전물은 20~35mesh 크기의 시멘트분탈 강도시험 용모래를 사용하였고 tracers로는 Dupont red oil로 채색시킨 유동입자와 크기, 밀도가 같은 모래를 사용하였으며 이들의 물리적 성질은 다음과 같다.

Table 1. Packing

Mesh size of screen	Thickness of wire	Dimension of opening	Dimension of screen cylinder	Volume fraction
8mesh screen packing	0.84mm	2.38mm	1.5cm X 1.5cm	0.026

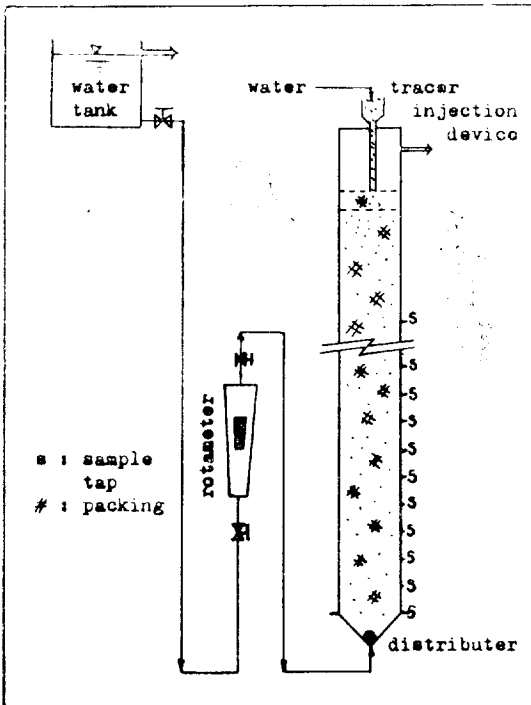


Fig. 2. Flow diagram.

Table 2. Sample size and physical properties

Particle size	Mean particle diameter [cm]	Bulk density [gr/cm <sup>3</sup> ]	Minimum velocity fluidization [cm/sec]
20-24mesh	0.077	2.68	0.87
24-28mesh	0.065	2.71	0.62
28-32mesh	0.055	2.70	0.42
32-35mesh	0.046	2.69	0.28

유동입자 2,300g을 column에 넣은후 액체유속을 1.12~5.24cm/sec 범위에서 조절하여 유동층을 실험하고자하는 높이로 한 다음 tracer 입자 150g을 Tracer injection device로 유동층에 가능한 한 disturbance를 주지않게 주입하고 60~635 sec 동안 유동시켰다. 일정시간 유동후액체의 공급을 중단하여 유동층을 고정시키고 sample tap에서 시료를 취하여 건조기에서 60~70°C로 완전건조시킨후 시료일부를 취하여 채색된 색깔을 acetone으로 녹인후 자외선분광 분석장치로 흡광도를 측정하여 각 점에서의 농도를 계산하였다. 이때 농도와 흡광도는 직선관계가 있음을 확인하였다.  $U_{mf}$ 의 측정은 유동화시킨후 액체유속을 감소시켜 고정상이 될때의 유속을 유동층높이와 액체의 log-log plot 상에서 교차점으로 하였다 (Fig. 3).

### 4. 실험결과 및 고찰

#### (1) 축방향 고체혼합과 Dispersion Model

Fig. 4a-b는 충전유동층에서 고체입자들의 농

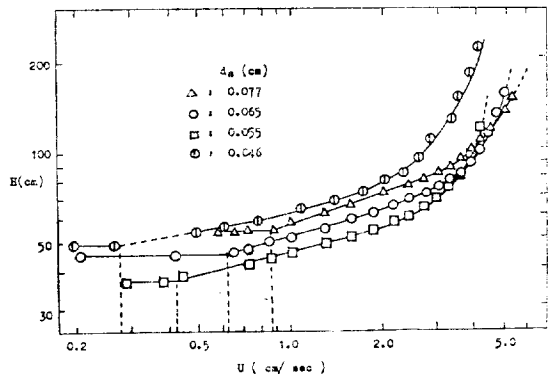


Fig. 3. Relation between bed height and liquid superficial velocity.

도 분포곡선의 실험치와 이론치를 보였는데 이때 이론치는 실험으로 얻은 농도 분포곡선에서 식 (5)에 의해 기울기로부터 축방향분산계수를 구하여 식 (4)에 대입하여 얻었으며 이들그림에서 원통형 금당 충전 유동층에서 고체입자들의 축방향혼합은 dispersion model에 잘 맞음을 알수 있다. 여기기서 혼합시간이 짧을수록 tacer 주입시에 일어나는 disturbance effect가 커서 농도분포곡선은 다소편차를 내고 있으나 혼합시간이길

어 질수록 무시될수 있었다.

## (2) Bed Expansion 이 축방향혼합에 미치는 영향

Fig. 4b는 bed expansion이 증가함에 따라 완전 혼합에 이르는 시간이 짧음을 보여주며 이는 축방향분산계수가 액체유속과의 함수 관계가 있음을 의미하며 실험결과를 보여준 Table 3에서도 같은 현상을 볼수 있다.

Table 3. Longitudinal solid mixing data from batch fluidization experiments.

Rum no.	$d_s$ [cm]	$U/U_{mf}$ [—]	$t$ [sec]	$H$ [cm]	$\epsilon$ [—]	$D$ [cm <sup>2</sup> /sec]
1	0.077	2.53	300	120	0.325	7.37
2	"	2.53	500	121	0.330	8.17
3	"	2.84	100	72	0.284	8.70
4	"	4.42	200	162	0.493	19.77
5	"	4.42	250	162	0.493	19.46
6	"	4.42	300	162	0.493	17.54
7	"	5.15	240	200	0.584	29.42
8	"	5.15	360	200	0.584	24.71
9	"	6.05	80	140	0.591	35.63
10	0.055	2.84	350	71	0.199	4.86
11	"	4.42	90	85	0.327	9.39
12	"	6.05	360	124	0.542	19.43
13	"	7.44	60	125	0.616	27.70
14	0.055	2.45	600	122	0.336	2.89
15	0.055	2.84	450	121	0.331	3.94
16	"	2.90	240	76	0.242	3.34
17	"	4.81	300	150	0.487	7.29
18	"	4.81	450	150	0.487	6.68
19	"	5.57	420	161	0.490	8.64
20	"	5.57	450	161	0.490	9.20
21	"	6.05	150	95	0.420	8.47
22	"	6.24	480	205	0.594	12.25
23	"	6.44	240	200	0.584	14.12
24	"	6.44	480	200	0.584	13.9
25	"	6.52	635	200	0.584	11.55
26	"	7.45	130	103	0.444	10.72
27	"	7.50	540	240	0.649	10.87
28	"	7.72	450	242	0.649	18.49
29	0.046	5.01	590	127	0.345	3.90
30	"	6.53	480	160	0.487	6.46
31	"	6.53	450	160	0.487	7.34
32	"	6.53	635	160	0.487	5.92
33	"	9.83	150	113	0.491	10.79

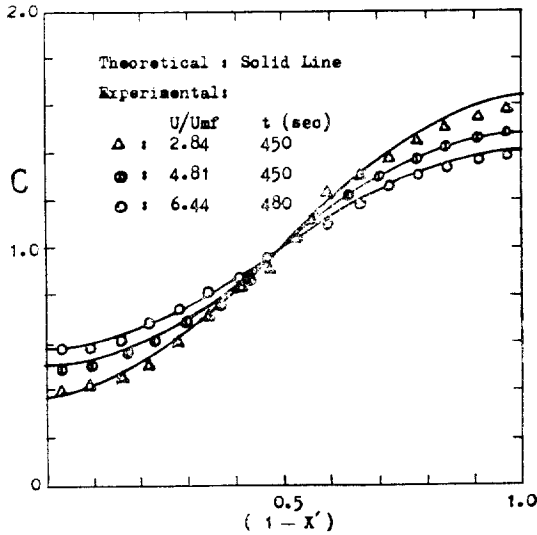


Fig. 4a Typical Longitudinal Particle Mixing Curves for a Packed Fluidized Bed;  $H=200\text{cm}$ ;  $d_s=0.055\text{cm}$ .

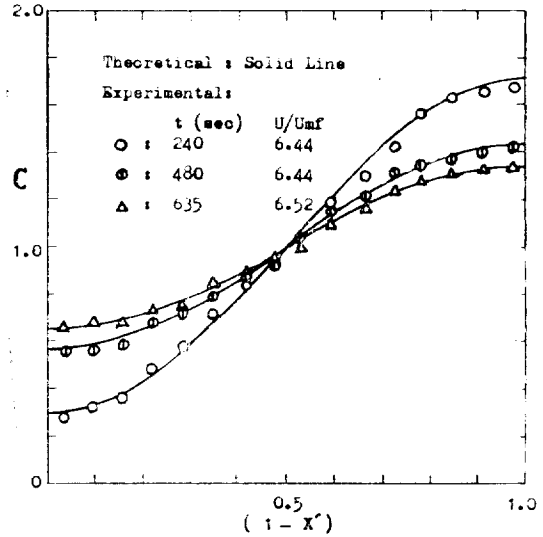


Fig. 4b Typical Longitudinal Particle Mixing Curves for a Packed Fluidized Bed;  $d_s=0.055\text{cm}$ .

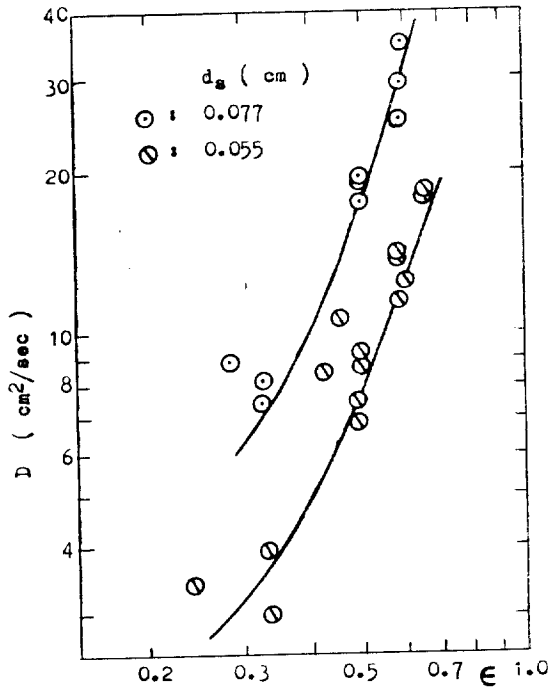


Fig. 5 Longitudinal dispersion coefficient as a function of the bed voidage.

Fig. 5는 batch operations에서 bed voidage,  $\epsilon$ , 를 다음과 같이 정의하여  $D$ 와의 관계를 그린것인데 bed voidage가 증가함에 따라  $D$ 가

$$\epsilon = \left( \frac{H-H_0}{H} \right) (1-\epsilon_p) \quad (11)$$

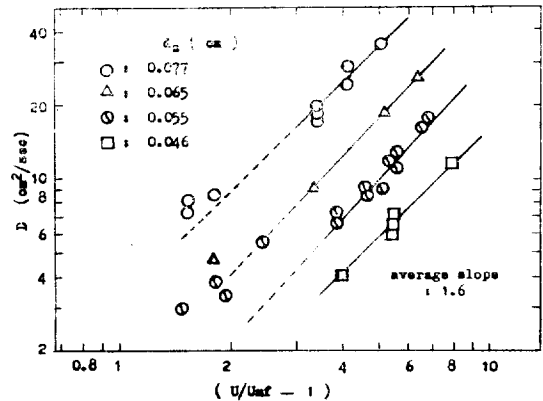


Fig. 6. Longitudinal dispersion coefficient as a function of the velocity ratio  $(U/U_{mf}-1)$ .

증가하는 경향을 보여주며  $\epsilon$ 가 0.3이하에서는  $D$ 가 더 증가하는데 이것은 Fig. 6에서도 같은 현상을 볼수 있다.

Fig. 6에서 무차원속도,  $U/U_{mf}$ , 가 3이상에서는  $D$ 가  $\left( \frac{U}{U_{mf}} - L \right)$ 와 양대수그래프에서 직선관계를 보여주나 3이하에서는 증가하고 있다. 이는 액체유속이  $U_{mf}$ 에 가까워 질수록 유동입자가 wall 근처에서 channeling 현상이 일어나서

tracer 입자의 영향에 의한 혼합정도가 커졌으며 이런 현상은 기고계에서도 일어나며<sup>28)</sup> 높은 유량범위에서 실험치와 잘 일치한다<sup>26)</sup>.

고-액계 금탕충전유동층에서 고체입자의 측방향분산계수는 액체유속과 다음과 같은 관계가 있었다.

$$D \propto \left( \frac{U}{U_{mf}} - 1 \right)^{1.6} \text{ for } \frac{U}{U_{mf}} > 3 \quad (12)$$

(3) 액체유속, bed expansion과 고체입자의 크기가 측방향혼합에 미치는 영향

Fig. 7은  $D$ 를  $(U^2 - U_{mf}^2)^{1/2} d_s / (1 - \epsilon)$ 의 함수로 나타낸 것인데 실험전범위에서 식 (10)과 잘 일치하여 random walk model이 잘 적용되며 계산된  $K$ 값은 35.7이었다.

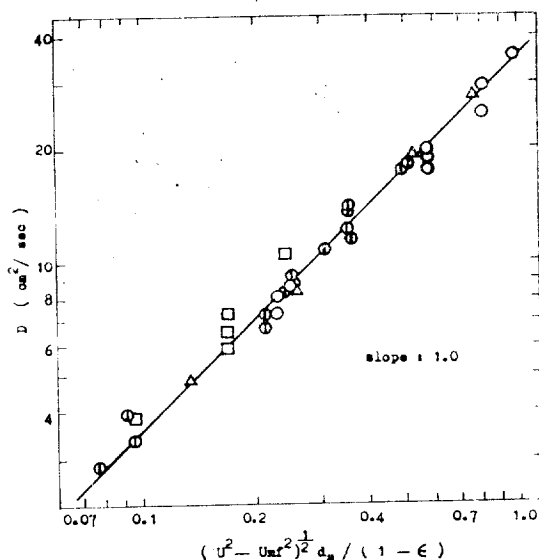


Fig. 7. Longitudinal dispersion coefficient as a function of superficial liquid velocity, bed voidage and solid particle diameter.

그 결과식은 다음과 같다.

$$D(\text{cm}^2/\text{sec}) = 35.7 (U^2 - U_{mf}^2)^{1/2} d_s / (1 - \epsilon) \quad (13)$$

## 5. 결 론

고-액충전유동층에서 고체입자들의 측방향혼

합에 대한 본연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 고체입자들의 측방향혼합은 dispersion model에 잘 맞는다.

(2) 고체입자들의 측방향분산계수는 액체 유속의 함수만으로 표시될때는 낮은 범위에서는 잘 일치하지 않았고  $U/U_{mf}$ 가 3 이상에서  $(U/U_{mf} - 1)^{1.6}$ 에 비례하였다.

(3) 실험전범위에서 random walk model이 매우 잘 적용되었으며 액체유속, bed voidage 및 입자의 직경과는 다음과 같은 관계식이 있었다.

$$D(\text{cm}^2/\text{sec}) = 35.7 (U^2 - U_{mf}^2)^{1/2} d_s / (1 - \epsilon)$$

## 사용 기호

- $C$  tracer concentration, gm tracer/gm total
- $d_s$  solid particle diameter, cm
- $D$  longitudinal dispersion coefficient,  $\text{cm}^2/\text{sec}$
- $D_E$  effective diffusivity,  $\text{cm}^2/\text{sec}$
- $H$  total bed height, cm
- $H_0$  static bed height, cm
- $K$  constant in equation (10), —
- $L$  fluidized bed height, cm
- $t$  mixing time from the tracer injection sec
- $X$  length from the top of the bed, cm
- $X'$  dimensionless length from the top of the bed, —
- $U$  superficial liquid velocity,  $\text{cm}/\text{sec}$
- $v$  particle velocity,  $\text{cm}/\text{sec}$
- $\overline{\Delta Z}$  mean free path, cm
- $\overline{\Delta Z^2}$  mean square axial displacement of the particles,  $\text{cm}^2$
- $\epsilon$  bed voidage or volume fraction, —
- $\rho$  apparent density,  $\text{gm}/\text{cm}^3$
- $\theta$  mean time interval between particle collisions, sec

## subscripts

- $f$  fluid
- $m_f$  minimum fluidization
- $p$  packing
- $s$  solid particle

참고 문헌

1. L. Massimilla and S. Bracale, *Rci. Sci.*, **27**(1957), 1509.
2. E. R. Gilliland and E. A. Mason, *Ind. Eng. Chem.*, **44**(1952), 218.
3. M. Leva and M. Grummer, *Chem. Eng. Progr.*, **48**(1952), 307.
4. E. Talmor and R. F. Benenati, *AIChE J.*, **9**(1963), 539.
5. J. D. Gabor, *AIChE J.*, **10** (1964), 345.
6. J. D. Gabor, *AIChE J.*, **11**(1965), 127.
7. P. N. Rowe and B. A. Partridge, *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **43**(1965), T 157.
8. D. Handley, A. Doraisamy, K. L. Buther and N. L. Franklin, *Trans. Instn. Chem. Eng.*, **44**(1964), T 260.
9. C. R. Carlos and J. F. Richardson, *Chem. Eng. Sci.*, **22**(1967), 705.
10. C. R. Carlos and J. F. Richardson, *Chem. Eng. Sci.*, **23**(1968), 825.
11. S. G. Kennedy and R. H. Bretton, *AIChE J.*, **13**(1966), 24.
12. E. J. Cairns and J. M. Prausnitz, *AIChE J.*, **6**(1960), 400.
13. K. Ramamurthy and Subbrazuk, *Ind. Eng. Chem. Process and Develop.*, **12**(1973), 184.
14. R. N. Ghar, A. Kumer and P. Sen Gupta, *Indian J. Tech.*, **13**(1975), 215.
15. P. R. Krishnaswamy and L. W. Shemit, *Canadian J. Chem. Eng.*, **5**. (1972), 419.
16. *ibid* **14**(1976), 143.
17. M. Isida and T. Shirai, *J. Chem. Eng. Japan*, **8**(1975), 477.
18. S. N. Abrahams and W. Resnick, *Trans. Instn. Engrs.*, **52**(1974), 80.
19. H. Littman, *AIChE J.*, **10**(1964), 924.
20. J. Bridgwater and A. M. Scott, *Trans. Instn. Chem. Engrs*, **52**(1974), 317.
21. E. N. Zeigler and W. T. Brazelton, *Ind. Eng. Chem. Design and Develop.*, **2**(1963), 276.
22. S. N. Nalpan and J. K. Donnelly, *Canadian J. Chem. Eng.*, **51**(1973), 8.
23. J. P. Sutherland and G. L. Osberg, *AIChE J.*, **9**(1963), 437.
24. W. K. Kang and G. L. Osberg, *Canadian J. Chem. Eng.*, **43**(1966), 142.
25. J. O. Hinze, "Turbulence," McGraw Hill, New York (1965).
26. E. Ruckenstein, *Ind. Eng. Chem. Fund.*, **3**(1964), 260.
27. J. H. Jeans, "The Dynamical Theory of Gases," Cambridge Uni. Press (1921).
28. H. Kramers, M. D. Westermann, J. H. Groot and F. A. Dupont, Third Congress of European Federation of Chemical Engineers, B1(1962).