

## 管内가스送入에 의한 揚液作用

鄭 雨 昌

漢陽大學校 工科大學 化學工學科

(접수 1974. 1. 15)

## Gas Lift Action of Gas Liquid Flow in a Tube

Woo-Chang Chung

*Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Hanyang Univ., Seoul, Korea*

### 요 약

가스分散板을 多孔板으로 使用하였을 때 氣泡塔에서 gas hold up과 相對速度와의 關係式을 얻었고 이式을 利用하여 氣泡塔內에 draft管을 장치하였을때 이 draft 管內의 가스速度에 따르는 液流速을 推算하여 實測値와 좋은 一致를 보았다.

### Abstract

Bubble column reactor with a draft tube is often used as a chemical reactor to promote the circulation of liquid in the reactor. When this circulation of liquid promotes the dispersion of solid particles, a column of this type is called as a pachuca tank which is used for leaching of solid. However, studies on the quantitative treatment of the circulation of liquid are scarce. In this paper a general method of prediction for gas lift action was investigated. The gas hold up and slip velocity of bubble swarms in tube were quantitatively correlated by considering the effects of tube diameter, tube length, and gas distributors. By using the correlations for the slip velocity and the gas hold up, the liquid velocity in the draft tube was predicted and these values were in good agreement with experimental values.

### 1. 緒 論

氣泡塔反應裝置의 一形式으로서 內部에 draft 管을 넣

어 이 管內에 가스를 送入시켜 塔內의 液體의 攪拌을 促進시키는 形式이 가끔 利用된다. 이 形式은 例로서 懸濁氣泡塔과 같이 固體微粒子를 包含하는 系에서 固體의 分散을 均一하게 시키는데 특히 有效하며 固體處

理를 목적으로한 pachuca tank<sup>1-3)</sup>가 이 形式의 하나이다.

또 draft 管이 塔液面보다 充分히 높이 나와 있을 경우는 air lift pump<sup>4-6)</sup>로서 腐食性的 液體의 揚液等에 使用되고있다.

그러나 이 揚液作用의 定量的研究例는 매우 드물다. 揚液作用의 原理는 다음과 같이 生覺할 수 있다. 卽 가스를 管內에 送入하면 管內外에 壓力差가 생기며 이 壓力差를 적게하기 위하여 液이 管內에 흘러간다고 볼 수 있다.

本研究에서는 管內의 가스의 體積率  $\phi$ (gas hold up)와 가스(氣泡群)의 上昇速度의 關係를 명확히하고 이 結果를 利用하여 draft 管內에서의 液速度의 推算이 可能한가를 규명함을 目的으로하고있다.

## 2. 揚液作用의 原理

Draft 管의 分散板으로부터의 거리  $H$ 와 液面의 높이  $h$ 와의 比  $\frac{h}{H}$ 를 浸水率  $K$ 라한다. 揚液作用의 driving force는 分散板上的 管內外的 壓力差임으로

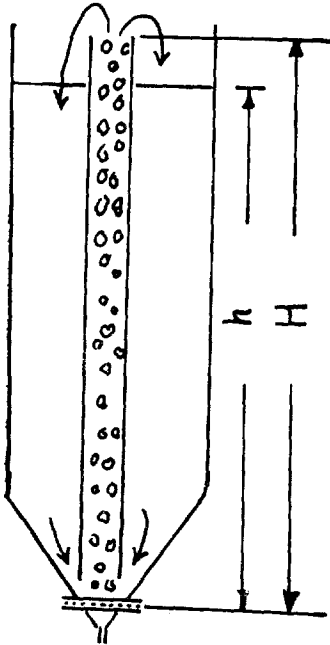


Fig. 1 Pachuca tank

$$\begin{aligned} \text{driving force} &= \rho_l g h - \rho_l g H(1-\phi) \\ &= \rho_l g H(K-1+\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

로된다. 이 driving force는 draft 管入口에서의 縮流에 의한 壓力損失 draft 管內의 摩擦壓損失 出口에서의 end

effect에 의한 壓力損失 및 外管에서의 摩擦壓損失에 의하여 소모된다. 만일 이들 抵抗이 무시된다고하면  $K < 1$  일때  $K=1-\phi$ 인 gas hold up이 되면 液이 흐르기 시작하며  $K > 1$  일때는 적은 가스量으로 많은 液體를 흐르게 할것이다.

그런데 上記抵抗 가운데 draft 管入口에서의 壓損失 및 draft 管內 摩擦壓損失는 무시되지 않음으로 이들 抵抗과 driving force와의 收支가 유지될것이다. 또 이들 抵抗중 특히 管入口에서의 壓損失는 裝置의 形態에 의하여 달라짐으로 이들을 구할때는 實驗에 의하지 않으면 안된다.

지금 氣液 2相流를 고려할때 使用되는 相對速度는 다음과 같이 定義된다.<sup>11)</sup>

$$U_s = \frac{U_g}{\phi} - \frac{U_l}{1-\phi} \quad (2)$$

여기서  $U_g$  및  $U_l$ 은 각각 가스速度(空筒基準) 및 液速度(空筒基準)이다. 이식에서 液이 흐르지 않는 回分操作일때는  $U_s = U_l/\phi$ 로되며 이는 氣泡 또는 氣泡群의 上昇速度를 表示한다. (2)式을  $U_l$ 에 관하여 변형하면

$$U_l = (1-\phi) \left( -\frac{U_g}{h} - U_s \right) \quad (3)$$

로된다. (3)式에서  $U_g$ 를 操作條件이라하면  $\phi$ 와  $U_s$ 의 關係가 다른 어떤方法에 의해서 구하여졌다하면  $U_l$ 이 決定될수 있음을 表示하고 있다. 이식이 揚液操作에도 適用될 수있음은 명확하다. 따라서  $\phi$ 와  $U_s$ 의 關係를  $U_g$ ,  $U_l$ , 塔長  $l$ , 塔徑  $D$  및 分散板을 변경하면서 測定하여 놓으면 이 結果를 利用하여  $U_l$ 을 推算할수 있음이 기대된다.

## 3. Gas hold up 및 Wall friction

### 3-1 Gas hold up

Gas hold up  $\phi$ 의 測定法에는 2點間의 壓力差에 의한 方法, X線透過法, 寫眞測定法 및 電極法等의 方法이 있는데 比較的의 精度가 좋고 간단히 구하는 方法은 2點間의 壓力差를 測定하는 方法이다.

Fig. 2에서 A, B에서의 힘의 收支를 취하면

$$\Delta P = \rho_g \frac{g}{g_c} \phi \Delta l + \rho_l \frac{g}{g_c} (1-\phi) \Delta l + \Delta P_w + \Delta P_e \quad (4)$$

로 表示된다. 여기서  $\Delta P_w$ 는 2相流의 壁에서의 摩擦壓損失이며  $\Delta P_e$ 는 液速度의 加速에 의한 壓力損失을 表示한다.

그런데 液速度가 60cm/sec 이하에서는 加速에 의한

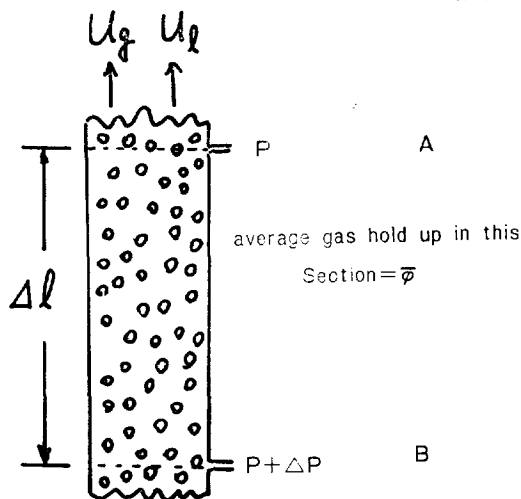


Fig. 2 A section of bubble column.

壓損失項은  $\Delta P_w$ 에 比하여 무시된다. 空氣물系에서는  $\rho_g \ll \rho_l$ 임으로 (4)式은

$$\Delta P = \rho_l \frac{g}{g_c} (1 - \bar{\phi}) \Delta l + \Delta P_w \quad (5)$$

로된다. 따라서 壓力差  $\Delta P$ 를 水마노메타 또는 差壓變換器로 구하고  $\Delta P_w$ 의 項을 3-2節에서 說明하는 方法으로 算出하여 精確한 gas hold up을 구할수 있다. (3-2參照)

### 3-2 Wall friction

氣-液 2相流에서 管壁의 摩擦壓損失에 관한 研究는 매우 많은데 研究者에 따라 實驗結果가 모두 다르고 實驗式도 매우 精度가 나쁘다. 氣-液 2相流에서는

$$\frac{\Delta P}{\rho_l x} = \frac{2\tau_w}{g_c \rho_l R} + (1 - \bar{\phi}) \frac{g}{g_c} \quad (6)$$

의 관계가 성립하며 佐々木<sup>7)</sup> 등이 指摘한 바와같이 右邊의 第1項은 第2項에 比하여 무시할정도로 적다. 따라서  $\Delta p / \rho_l x$ 를 靜壓差로부터 구하여 가스 및 液體를 同時に 密閉시켜  $(1 - \bar{\phi})$ 를 구하며  $\tau_w$ 를 산출한다는 從來의 方法에 의하여서는 實驗誤差를 고려하면 氣泡流動에서의  $\tau_w$ 를 구한다는것이 거의 不可能하다.

單相流에서 擴散律速의 電極反應을 利用하여 管壁에 符着시킨 微小電極에서의 局所物質移動係數를 구하여 이로부터 局所의  $\tau_w$  또는 摩擦係數를 구한 研究가 있다. <sup>8~10)</sup>

특히 小出等<sup>11)</sup>은 分散板으로서 多孔質板을 使用하여 氣泡流動에서의  $\tau_w$ 를 實驗의으로 測定하였다.

즉 單相流에서의  $k_{l0}$  및  $\tau_{w0}$ 와 氣-液 2相流에서의  $k_l$

및  $\tau_w$ 의 관계는

$$k_l / k_{l0} = (\tau_w / \tau_{w0})^{1/3} \quad (7)$$

이다. 여기서 만일  $k_l / k_{l0}$  및  $\tau_{w0}$ 를 알면  $\tau_w$ 를 계산할수 있다.

따라서 本研究에서는 分散板을 多孔板으로 使用하여 氣-液 2相流의  $\tau_w$ 를 구하고 이로부터 精確한  $\phi$ 를 구하여 使用하였다.

## 4. 實 驗

本研究에 使用된 實驗裝置는 Fig. 3에 圖示하였다. 氣泡塔은 內徑 50mm 및 길이 2,000mm의 아크릴樹脂製파이프이며 全配管은 모두 鹽化비닐管으로 하였다

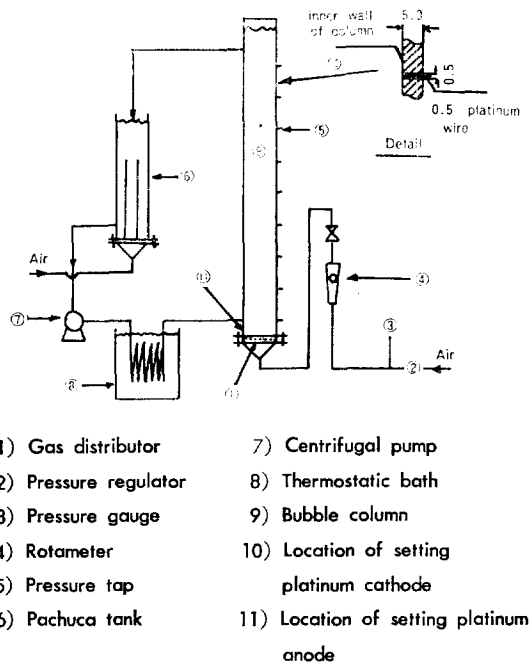


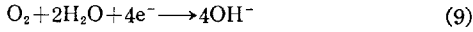
Fig. 3 Experimental apparatus.

使用한 流體는 空氣 및 0.02N KCl 水溶液이다. 즉 25°C의 0.02N KCl 水溶液을 ポン프에 의하여 塔底로부터 供給시키고 空氣는 塔底의 分散板으로부터 불어넣는다.

本實驗에서는 KCl을 支持電解質로하여 水溶液中에 溶存되어있는 酸素(25°C에서 물에대한 酸素의 溶解度는  $2.86 \times 10^{-4}$  mol/l)의 陰極에서의 擴散電流를 測定하는것이다. 測定할 擴散電流  $i_d$ 와 局所物質移動係數와의 관계는<sup>11)</sup>

$$i_d / nFA = k_l (C_o - C_w) \quad (8)$$

이다. 陰極에서의 反應은



이며 이 反應의 경우  $n=4$ 이다.

反應速度가 擴散이 律速일때는  $C_w=0$ 가 된다. 따라서  $k_l$ 은  $i_d$ 를 測定함으로써 얻어진다. Fig. 3에表示된 陰極은 0.05cmφ인 白金線을 使用하였으며  $i_d$ 를 測定하는 電極回路는 Fig. 4와 같다.

$U_g$  및  $U_l$ 을 變경하면서  $i_d$ 를 測定하였으며 同時에 電極가까이에있는 2個의 靜壓孔에서 靜壓差( $\Delta P$ )를

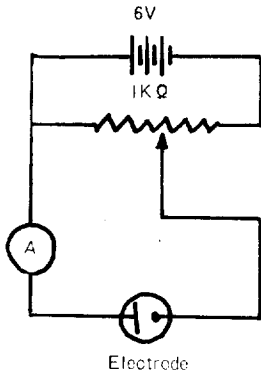


Fig. 4 Electrode circuits

差壓變換器로 測定하였다. Fig. 5는 分散板을 多孔板으로 使用하였을때  $U_g$  및  $U_l$ 을 變경하면서  $k_l$ 의 影響을 프로트한것이다. Fig. 5로부터 임의의  $U_g$  및  $U_l$ 일때의  $\tau_{w0}$  및  $k_l/k_{l0}$ 를 얻어서 (7)式에 代入하여 산출한  $\tau_w$ 와 測定한  $\Delta P$ 를 (6)式에代入하여 精確한  $\phi$ 를 구하였다.

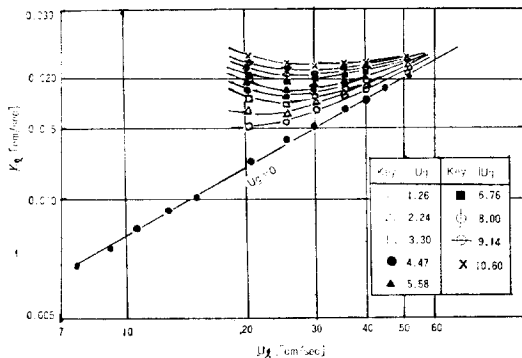


Fig. 5 Variation of  $k_l$  with gas velocity and liquid velocity when gas distributor is perforated plate.

本實驗에 使用된 가스分散板 및 Column 크기는 Table 1과 같다.

Table 1. Gas distributor and column size

Gas distributor	D [cm]	$\phi$ [cm]	N [—]	t [cm]	h [m]
Perforated plate	5	0.1	19	0.30	2
"	10	0.1	11	0.30	2
"	5	0.1	19	0.30	1
Single orifice plate	5	0.3	1	0.30	2
"	10	0.5	1	0.30	2

### 5. Gas hold up 및 相對速度

$U_g$  및  $U_l$ 을 變경하면서 測定한  $\phi$ 로부터 (2)式을 利用하여 相對速度  $U_s$ 를 計算할수있다.

가스分散板을 多孔板 및 單一孔板을 使用하고 Column 크기를 變경하면서  $U_s$ 와  $\phi$ 와의 關係를 검토한 결과  $0 < \phi < 0.20$  및  $30 < U_s < 50$  (cm/sec)의 범위에서

$$U_s = U_{s0} \{1 + 0.12 (U_l / U_{s0})^{1.63}\} + 1.35 \sqrt{gD} \phi \quad (10)$$

$$U_{s0} = 30 \text{ (cm/sec)}$$

가 成立함을 알수있었다. (10)式이 잘 成立하는가를 確認한것이 Fig. 6이다. Fig. 6에의하면 (10)式에 의하여 計算한  $U_{scl}$ 와 實測한  $U_{sobs}$ 는  $\pm 20\%$ 의 범위내에서 一致하였다.

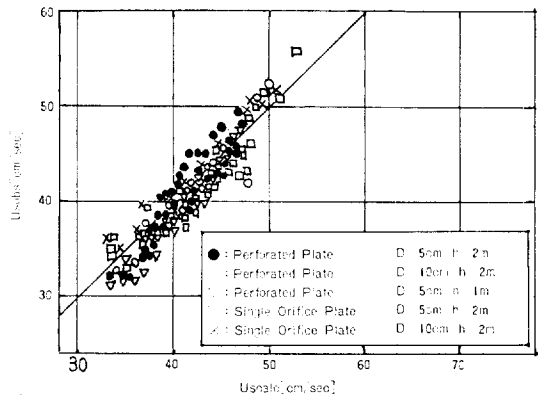


Fig. 6 Comparison of experimental data with values of slip velocity calculated using Eq (10).

### 6. Gas lift action

Fig. 3의 아크릴樹脂製 pachuca tank의 draft 管內에서 가스에의한 揚液作用을 定量的으로 검토하기위하여 주어진 공기流速  $U_g$ 에서 液流速의 實測値와 推算値를 比較하였다.

使用한 pachuca tank의 直徑은 26 cm 및 길이는 120 cm이고 draft管의 直徑은 5 cm이다. 또한 본실험에서 空氣의 流速  $U_g$ 의 범위는 1~6[cm/sec]로 택하였다.

우선 draft管内의 주어진  $U_g$ 에서의  $U_L$ 을 實測하기 위하여 물과 比重이 같은 浮標를 유리球(dia 5mm)로 만들어 이 浮標가 pachuca tank의 上下에 表示된 區間을 지나가는 時間을 stop watch로 測定하여  $U_L$ 을 구하였다.

實測  $U_L$ 의 誤差를 적게하기 위하여 80번 이상 測定을 반복하였다.

또한 draft管内의  $U_L$ 은 다음과같이 推算하였다. 우선 주어진  $U_g$  및  $K$ 에서 2個의 靜壓孔을 利用하여  $\Delta P$ 를 測定한다음 다음과같은 計算을 하였다.

- 1)  $U_L$ 을 假定하였다.
- 2) 測定한  $\Delta P$  및  $\tau_w$ 를 (6)式에代入하여  $\phi$ 를 計算하였다.
- 3) (10)式으로부터  $U_g$ 를 計算하였다.
- 4) (3)式으로부터  $U_L$ 을 計算하였고 假定한  $U_L$ 과 비교하였다.
- 5) 만일 推算한  $U_L$ 과 實測한  $U_L$ 이 一致하지 않으면  $U_L$ 을 다시 假定하여 計算을 반복한다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 分散板으로 多孔板을 사용하고  $K$ 를 변경하였을때의 推算値와 實測値를 비교한것이다.

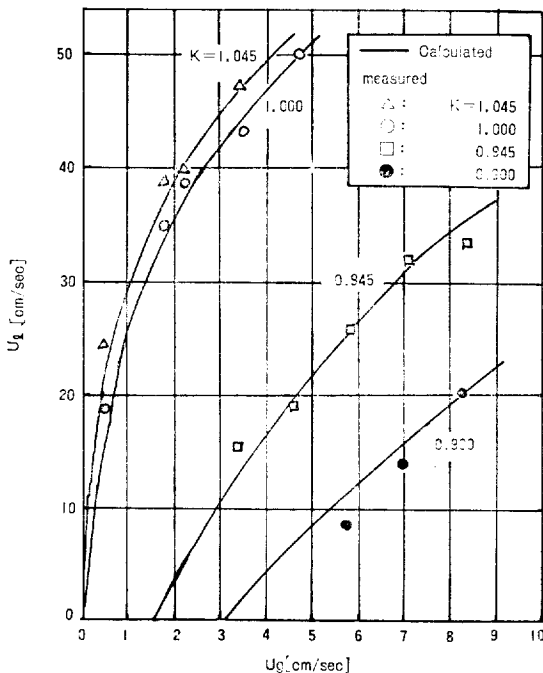


Fig. 7 Comparison of experimental data with values of liquid velocity estimated ( $l=110\text{cm}$ )

Fig. 7 및 Fig. 8에 의하면 推算値와 實測値가 잘 一致함을 알수있다.

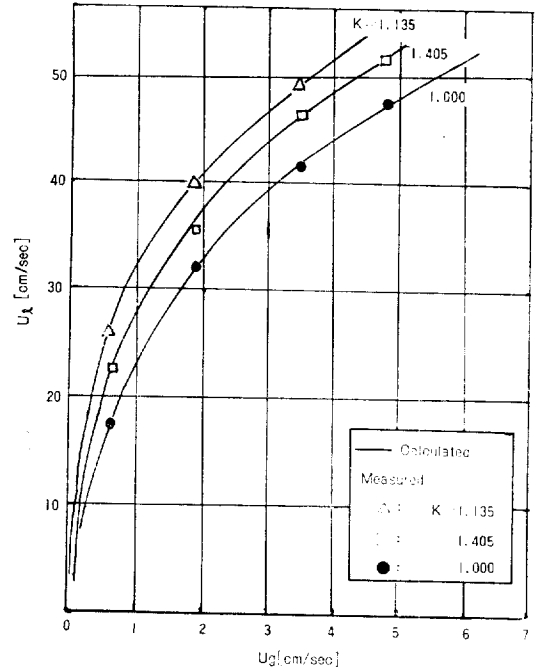


Fig. 8 Comparison of experimental data with values of liquid velocity estimated ( $l=74\text{cm}$ )

## 7. 結 論

가스分散板이 多孔板일때 draft管이 없는 氣泡塔에서 gas hold up과 相對速度와의 關係式을 얻었고((10)式) 이式으로부터 draft管이 들어있는 氣泡塔(pachuca tank)에서 draft 管内의 液流速을 推算할수있게 되었다.

## Nomenclature

- A: Surface area of electrode [ $\text{cm}^2$ ]
- $C_0$ : Concentration of  $\text{O}_2$  in bulk liquid [ $\text{g-mole/cm}^3$ ]
- $C_w$ : Concentration of  $\text{O}_2$  at the electrode surface [ $\text{g-mole/cm}^3$ ]
- D: Column diameter [cm]
- F: Faraday's constant [coul/g-equiv]
- g: Gravitational acceleration [ $\text{cm/sec}^2$ ]
- $g_c$ : Conversion factor [ $\text{g}\cdot\text{cm/G}\cdot\text{sec}^2$ ]
- h: Distance to liquid surface from distributor [cm]
- H: Distance to top of draft tube from distributor [cm]

$i_d$ : Diffusion current [A]  
 $k_l$ : Local mass transfer coefficient [cm/sec]  
 $k_{l0}$ : Local mass transfer coefficient in single phase liquid flow [cm/sec]  
 $K$ : Submersion ratio of draft tube ( $=h/H$ ) [—]  
 $l$ : Length of draft tube [cm]  
 $n$ : Number of electrochemical equivalence [g-equiv]  
 $N$ : Number of pores [—]  
 $\Delta P$ : Frictional pressure drop [G/cm<sup>2</sup>]  
 $\Delta P_a$ : Pressure drop by acceleration of fluid [G/cm<sup>2</sup>]  
 $\Delta P_w$ : Pressure drop by friction at the wall [G/cm<sup>2</sup>]  
 $R$ : Column radius [cm]  
 $t$ : Thickness of gas distributor [cm]  
 $U_g$ : Gas linear velocity [cm/sec]  
 $U_l$ : Liquid linear velocity [cm/sec]  
 $U_s$ : Slip Velocity defined by Eq(2) [cm/sec]  
 $U_{s0}$ : Slip velocity when liquid velocity is zero [cm/sec]  
 $U_{sca}$ : Slip velocity calculated [cm/sec]  
 $U_{sob}$ : Slip velocity observed [cm/sec]  
 $x$ : Distance measured in flow direction [cm]  
 $\rho_g$ : Density of gas [g/cm<sup>3</sup>]  
 $\rho_l$ : Density of liquid [g/cm<sup>3</sup>]  
 $\bar{o}$ : Pore diameter of gas distributor [cm]

$\tau_w$ : Shear stress at the wall [g/cm sec<sup>2</sup>]  
 $\tau_{w0}$ : Shear stress at the wall in single phase liquid flow [g/cm sec<sup>2</sup>]  
 $\bar{\phi}$ : Gas hold up [—]

## References

- 1) A. G. W. Lamont, *Can. J. Chem. Eng.*, **36**, 153 (1958).
- 2) 八田四郎次他, 化學工學 **19**, 482 (1955).
- 3) 山口巖, 森俊郎, ケミカルエンジニアリング, **2**, 44 (1965).
- 4) D. J. Nicklin, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **41**, 29 (1963).
- 5) J. F. Richardson and D. J. Higson, *ibid.*, **40**, 169 (1962).
- 6) 井伊谷銅一, 化學工學, **16**, 111 (1952).
- 7) 佐々木貞治, 化學工學, **28**, 770 (1964).
- 8) 漆山祥司, 化學工學協會第28年會, (1963).
- 9) L. Paul van Reiss and T. J. Hanratty, *A. I. Ch. E.*, **9**, 154 (1963).
- 10) 漆山祥司, 化學工學, **32**, 267 (1968).
- 11) 小出耕造, 久保田宏, 化學工學, **30**, 801 (1966).