

## 충전탑의 특성 및 충전물의 형상인자

이 원 국 · 이 철 호

한국과학원 화학공학과

(접수 1978. 11. 14)

## Packed Column Characteristics and Shape Factor of Packing Materials

Won Kook Lee and Choul Ho Lee

*Department of Chemical Engineering  
 Korea Advanced Institute of Science, Seoul 132, Korea*

*(Received November 14, 1978)*

### 요 약

$K_2CO_3$ - $KHCO_3$  완충용액에 NaOCl을 촉매로 첨가한 후 ionic strength를 일정하게 유지하기 위해 KCl을 넣고  $CO_2$ 를 흡수시키는 일차반응을 수반하는 흡수계를 사용하여 구형과 입방체로 된 1/2", 3/8", 1/4" 크기의 poly-propylene 충전물에 대해 실험하고 Dankwerts' plot을 하여 volumetric mass transfer coefficient,  $k_L a$ , 와 effective interfacial area,  $a$ , 를 구한 후 Davidson의 idea를 기초로 하여 충전탑을 이론적으로 해석하고, 여러가지 충전물에 대한 실험결과를 검토하여

$$Y \equiv \ln[k_L a (\rho \mu / g D^3)^{1/2} / 0.54]$$

$$f \equiv \frac{1}{6} \ln(a_i^4 / d_c^3) \quad \text{로 놓으면}$$

$$Y = 0.64 \ln L + f$$

$$d_c = 12.6 \sqrt{a_i} - 10.8$$

이라는 식을 얻을 수 있었으며, 이 모식화식을 해석하여  $k_L a$ 가 액체유속의 0.64승에 비례하며 형상인자가 total area만의 함수가 됨을 밝혔다.

### Abstract

$CO_2$  was absorbed by water with first order chemical reaction in a packed column. In the liquid phase  $K_2CO_3$ - $KHCO_3$  was used as a buffer solution, adding KCl and NaOCl for constant ionic strength and catalytic effect, respectively. Sphere-and square-shaped polypropylene pack-

ing materials were used and volumetric mass transfer coefficient,  $k_L a$ , and effective interfacial area,  $a$ , were determined from these experiments by using Dankwerts' plot. A semi-empirical equation was derived and compared with the experimental result of this work as well as other investigators. A good agreement was obtained between the data and the following modeling equations.

$$Y = 0.64 \ln L + f$$

$$\text{where } Y = \ln[k_L a (\rho \mu / g D^3)]^{1/2} / 0.54$$

$$f = \frac{1}{6} \ln(a_i^4 / d_c^3)$$

$$d_c = 12.6 a_i - 10.8$$

## 1. 서 론

충전탑은 흡수, 추출, 증류등에 널리 쓰이며 분자확산 현상을 이용하여 유효성분을 분리하는 장치로서, 여러가지 형태의 충전물에 대해서 유효표면적, 액체체류량, 압력강하, 액체의 유동 특성, 기체유속의 영향등이 연구되어 왔다.<sup>2), 5), 12), 13), 14)</sup>

물질전달속도는 충전물의 형태와 크기, 기체와 액체의 물리적 특성 및 유속, 이들의 distributor 및 충전탑의 치수, 화학반응의 참여여부, 액체중에 포함된 전해질이온의 농도등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다.<sup>21)</sup>

Davidson은 충전물을 평방체로 가정하여 충전탑을 모식화한 결과

$$H = 0.1833 Re^{1/4} \quad (1)$$

$$\text{단 } H \equiv H_L (g d^3 / r^2)^{1/2} (D/r)^{1/2} / d$$

의 결과를 얻었다.

본 연구에서는 흡수현상을 이론적으로 해석하여  $k_L a$  (volumetric mass transfer coefficient)를 충전물의 함수로 표현하고  $1/2''$ ,  $3/8''$ ,  $1/2''$  크기의 구형과 입방체를 충전물로 사용하여  $k_L a$ 를 구한 후 이들을 서로 비교하여 물질전달속도를 예측할 수 있는 지표를 제시하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2-1. 흡수속도

Dankwerts' surface renewal model에 의하

면 용액내에서 용질이 급속한 일차반응을 일으킬 때의 평균속도  $\bar{R}$ 는

$$\bar{R} = S \int_0^\infty R e^{-s\theta} d\theta$$

$$= S \int_0^\infty -D \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0} d\theta$$

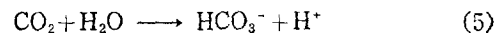
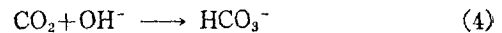
$$= A^* k_L \sqrt{1 + D k_1 / k_L^2} \quad (2)$$

가 되며<sup>1)</sup> 단위부피당 유효표면적을  $a$ 라 할때 단위부피당 평균 흡수속도  $\bar{R}a$ 는

$$\bar{R}a = a A^* \sqrt{k_L^2 + D k_1} \quad (3)$$

으로 표시된다.

한편  $\text{CO}_2$ 와 alkali carbonate solution은



의 두 가지 반응을 일으키며 (4)식의 반응은 2차반응으로 1차 반응인 (5)식의 반응보다 반응속도가 크나 적절한 촉매를 사용하여 (4)식의 반응속도를 무시할 수 있을 만큼 (5)식의 반응속도를 증가시킬 수 있게 된다.

Pohorecki는  $\text{NaOCl}$ 을 촉매로 사용하여 laminar jet technique을 써서 (5)식의 반응속도를 구한 결과

$$r = k_1 [\text{CO}_2] \quad (6)$$

$$k_1 = k_{\text{H}_2\text{O}} + [\text{OCl}^-] \{1518 + 1381 [\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-]\} \quad (7)$$

가 됨을 밝힌 바 있다.

### 2-2. 충전탑의 modeling

충전물을 높이가  $d$ 이고 폭이  $d/2$ 인 평방체이며 모든 표면적이 유효면적으로 작용한다고 가정 한 후 random packing 된 충전물의 horizontal

angle 및 flow path length 의 분포가 일차적이  
라고 가정하면, 충전탑 단위 부피당 충전물의 겹  
수를  $N$  라면 유효표면적  $a$  와 liquid path 의 수  
직길이  $b$  는

$$a = d^2 \cdot N$$

$$= d^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^d k \lambda y d\theta$$

$$= kd^3 / 2 \tag{8}$$

$$b = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^d ky \sin\theta dy d\theta$$

$$= kd^2 / 2 \tag{9}$$

가 되므로 liquid loading  $\Gamma$  는

$$\Gamma = \frac{L}{bd} = \frac{2L}{kd^3} = \frac{\pi L}{a} \tag{10}$$

가 되며 액체유속  $V$  는 물질수지식과 경사진표  
면을 흐르는 liquid film 의 두께에 관한 식에 의  
해

$$V = \frac{3\Gamma}{2\rho\delta} = \frac{3\Gamma}{2\rho} \left( \frac{\rho^2 g \sin\theta}{3\mu\Gamma} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{11}$$

가 된다.

또한 충전물 한계에 대한 흡수속도는

$$\bar{R}a' = k_L d^2 (A^* - A^0) \tag{12}$$

이 되며 <sup>7), 15)</sup> Dankwerts' surface renewal mo-  
del에 의하면<sup>1)</sup> 물질전달속도  $k_L$  은

$$k_L = \sqrt{DS} \tag{13}$$

로 쓸 수 있으며, 표면 경신을  $S$  를 액체가 충  
진물의 표면을 흘러내리며 기체에 노출되는 사  
간으로 보면 (12)식은

$$\bar{R}a' = d^2 (A^* - A^0) \sqrt{DV/d}$$

$$= (A^* - A^0) \sqrt{DVd^3} \tag{14}$$

이 되므로 충전탑의 단위 부피당 흡수속도는

$$Ra = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^d (A^* - A^0) k \sqrt{DVy^3} dy d\theta \tag{15}$$

가 되며  $kLa$  는

$$kLa = \frac{(A^* - A^0) k}{A^* - A^0} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^d \sqrt{DVy^3} dy d\theta \tag{16}$$

이 되어 (8)식, (10)식, (11)식을 대입하여  $k, \Gamma$   
및  $V$  를 소거하여 정리하면

$$kLa = 0.54 (gD^3 / \rho\mu)^{\frac{1}{3}} (a^4 / d^3)^{\frac{1}{3}} L^{\frac{1}{3}} \tag{17}$$

과 같은 충전탑의 modeling equation 을 얻을 수  
있다.

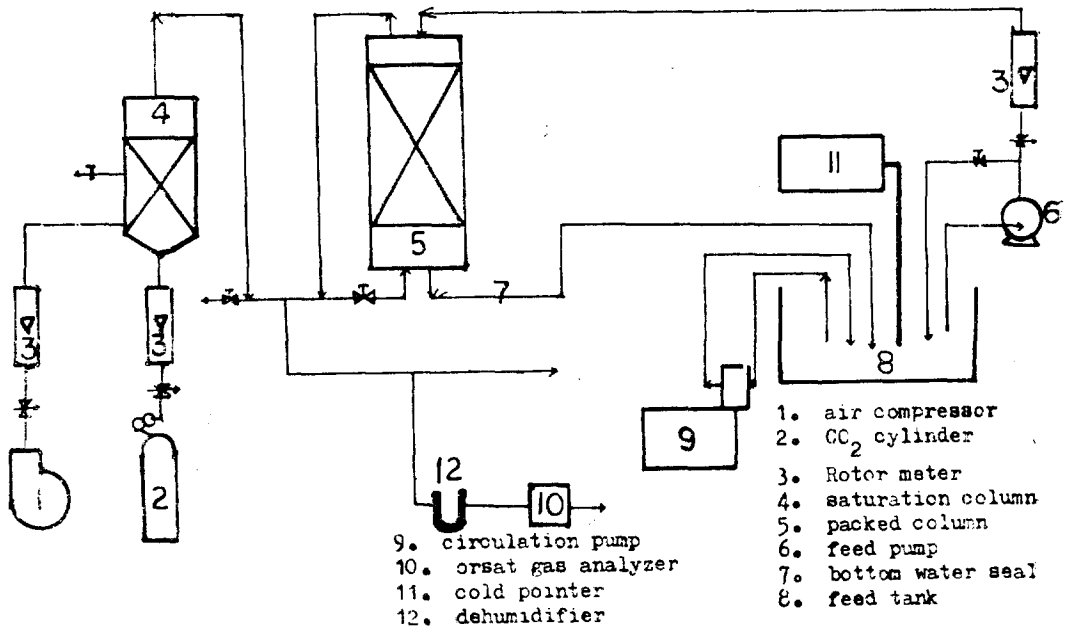


Figure 1. Schematic Diagram of Experimental Equipment

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3-1. 실험장치

실험장치의 계통도는 Figure 1과 같으며 흡수탑은 6mm 두께의 외경 4" 짜리 M.M.A. cylinder로 만들었고, 충전높이와 흡수탑내경의 비가 0.5~7 사이에서는 wall effect를 무시할 수 있으므로<sup>2)</sup> 흡수탑의 높이를 80cm로 제작하였고 기체 도입을 위해 20cm의 공간을 두었다.

용액분배기는 직경 8cm의 원통형으로 0.5cm의 구멍 19개를 뚫어 일정한 수두에 의한 익류에 의해 고르게 살포되도록 하였으며 기체도입장치는 샷갓형으로 제작하여 용액이 들어가는 것을 방지하였다.

#### 3-2. 실험방법

실험에 사용된 충전물은 구형과 입방형으로 각각 1/2", 3/8", 1/4"의 세가지 크기로 모두 여섯 종류였으며 각 충전물의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of Packing Materials

Nominal size, inch	Sphere			Square		
	1/2	3/8	1/4	1/2	3/8	1/4
Height, cm	1.243	0.952	0.624	1.244	0.938	0.643
Outside dia. cm	1.243	0.952	0.624	1.262	0.940	0.650
Inside dia. cm				0.892	0.620	0.414
Thickness, cm				0.185	0.160	0.118
Surface area, cm	4.854	2.847	1.223	10.178	5.853	2.737
Packing density #/cm <sup>3</sup>	0.562	1.320	4.568	0.298	0.750	2.020
Total area, cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup>	2.728	3.758	5.587	3.194	4.390	5.529
Porosity, %	40.63	41.01	42.97	67.43	69.17	71.16

부하점이하에서는 기체유속이 충전탑의 특성에 그리 큰 영향을 주지 않는다는 것은 Schulman 등에 의해 이미 잘 알려진 사실이므로<sup>14)</sup> 기체유속은 180cm<sup>3</sup>/sec로 고정하였고 용액의 유속은 부하점이하의 4점을 취하였다. 실험에 사용

된 용액의 조건과 실험조건은 각각 Table 2 및 Table 3와 같다.

Table 2. Liquid Condition

Contents	Amount
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.6 gmol/l
KHCO <sub>3</sub>	0.25 gmol/l
KCl	1.96 gmol/l
NaOCl	0~0.27 gmol/l
[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ]/[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	2.4
pH	10.2±0.2

Table 3. Operating Condition

Contents	Amount
P <sub>CO<sub>2</sub></sub>	0.1 atm
Packed height	50 cm
pH	9.2~8.5
Temperature	21°C
Pressure	1.0 atm
Liquid flow rate	59~29.6 cm <sup>3</sup> /sec
Liquid density	1.189~1.208 g/cm <sup>3</sup>
Liquid viscosity	1.114~1.375 cp
Gas flow rate	180 cm <sup>3</sup> /sec

실험에 의해 결정해야 할 물리정수에서  $k_1$ 은 Pohorecki Equation (7)식을 사용하여 구했으며 hypochorite ion의 농도는 standard iodometric technique을 사용하여 구했다.<sup>6)</sup> 또 carbonate-bicarbonate ion의 농도는 pH meter를 써서 titration curve를 작성한 후그의 변곡점으로 부터 구했으며 diffusivity는 Stokes-Einstein Equation을 이용하여 구하였고<sup>1)</sup> CO<sub>2</sub>의 solubility는 Vankrevelen and Hoftijzer에 의해 얻어진 방법으로 구했다.<sup>1)</sup>

### 4. 결과 및 고찰

#### 4-1. 유효표면적

(3)식의 양변을 제곱하여 정리하면

$$\left(\frac{\bar{R}a}{A^*\sqrt{D}}\right)^2 = a^2k_1 + k_L^2a^2/D \quad (18)$$

이 되므로 실험에 의해 구한  $k_L$  값에 대한 좌편의 값을 plot 하면 그 기울기의 평방근으로부터 유효표면적  $a$ 를 구할 수 있고 그 절편으로부터 물질전달 계수  $k_L$ 을 구할 수 있다.

3/8" 구형 및 입방체에 대하여 Dankwerts' plot을 하면 Figure 2 및 Figure 3과 같고 이런 방법에 의해 구해진 각 충전물들의  $a$  값을 Table 4에 수록하였다.

Table 4. Effective Interface Area of Various Conditions

Liquid rate g/cm <sup>2</sup> min	Sphere			Square		
	1/2"	3/8"	1/4"	1/2"	3/8"	1/4"
66.5	1.10	1.15	1.23	0.80	1.09	1.34
55.3	1.03	1.14	1.22	0.73	0.93	1.23
44.4	0.90	0.99	1.10	0.54	0.78	1.18
33.3	0.91	0.82	1.08	0.44	0.70	1.10

unit: cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>

Table 4에서 보듯이 충전탑의 유효표면적  $a$ 는 액체유속이 증가함에 따라 증가하며 충전물의 공칭치수가 증가함에 따라 감소하게 된다.

이는 액체유속이 증가함에 따라 surface rene-

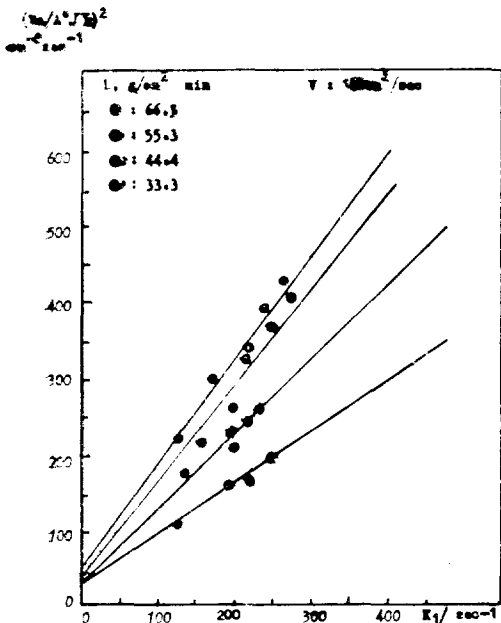


Figure 2. Dankwerts' Plot for 3/8" Sphere

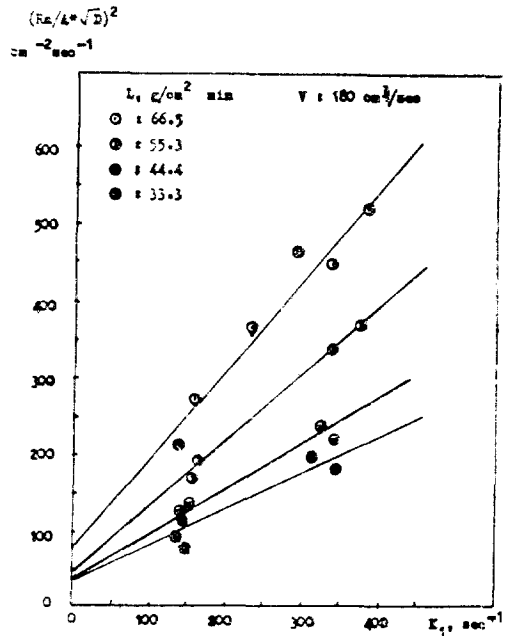


Figure 3. Dankwerts' Plot for 3/8" Sphere

wal rate  $S$ 가 증가하기 때문에 유효표면적  $a$ 가 증가하며 충전물의 공칭치수가 증가함에 따라 단위면적당의 total area,  $a_t$ ,가 감소하기 때문에 유효표면적  $a$ 가 감소하는 것으로 판단된다.

### 4-2. Modeling 식

Hikita, Kataoka, Nakanishi<sup>4)</sup> 등은 여러가지 크기의 Berl saddle 과 Rashig ring에 대하여 실험한 결과로부터

$$a/a_t = \alpha_1 \sigma^n L^{0.455} \tag{19}$$

$$\text{단 } n = \alpha_2 d_N^{\alpha_3}$$

의 식을 얻었으며 여기서  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 packing의 종류에 따라 결정되는 상수이다.

표면장력  $\sigma$ 가 일정할 경우 (19)식은

$$a/a_t = \alpha_4 L^{0.455} \tag{20}$$

$$\text{단 } \alpha_4 = \alpha_1 \sigma^{\alpha_2} d_N^{\alpha_3}$$

이 되므로 characteristic diameter  $d_c$ 를

$$d_c^3 \equiv d^3 / \alpha_4^4 \tag{21}$$

으로 정의하여 (17)식에 대입하면 volumetric mass transfer coefficient  $k_L a$ 는

$$k_L a = 0.54 (g D^3 / \rho \mu)^{1/4} (a_t^4 / d_c)^{1/4} L^{0.64} \tag{22}$$

이 된다.

(22)식의 양변의 자연대수를 취한 후 종합변수  $Y$ 와 형상인자  $f$ 를

$$Y \equiv \ln[k_L a (\rho u / g D^3)^{1/2} / 0.54] \quad (23)$$

$$f \equiv \frac{1}{6} \ln[a_i^4 / d_c^3] \quad (24)$$

로 정의하면 modeling 식은 (22)식에 의해

$$Y = 0.64 \ln L + f \quad (25)$$

가 된다.

식(25)는 차원이 건전하며 그 형태에서  $k_L a$ 가 액체유속의 0.64승에 비례하는 것으로 나타나는데 이 수치는 Davidson이 이론적으로 구한  $2/3$ ,<sup>3)</sup> Sherwood and Holloway가 0.5" Rashig ring에 대해서 구한 0.65<sup>13)</sup> 및 Vankrevelene and Hoftijzer가 구한  $2/3$ <sup>16)</sup> 등과 잘 부합됨을 알 수 있다.

### 4-3. 형상인자

(24)식을 만족시키는  $d_c$ 를 각각의 충전물에 대한 실험치로부터 Figure 4, Figure 5와 같이  $Y$  vs.  $\ln L$ 을 plot 하여  $f$ 를 구한 다음 이 값을 (24)식에 대입하여  $d_c$ 를 구하여 total area

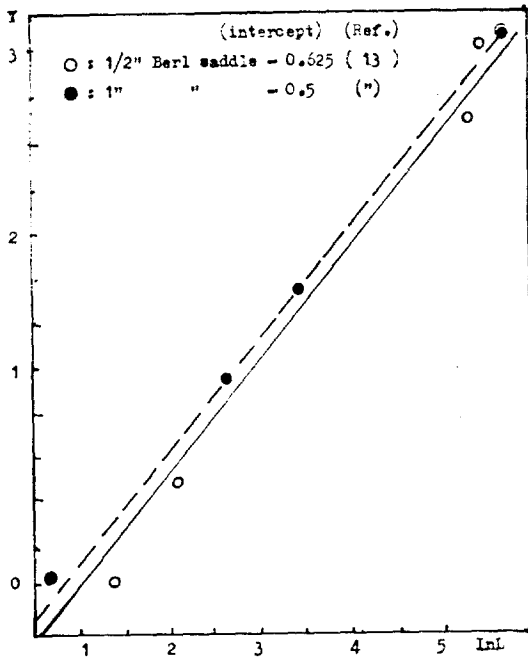


Figure 4. Plot of  $Y$  vs.  $\ln L$  for Berl Saddles of Different Size

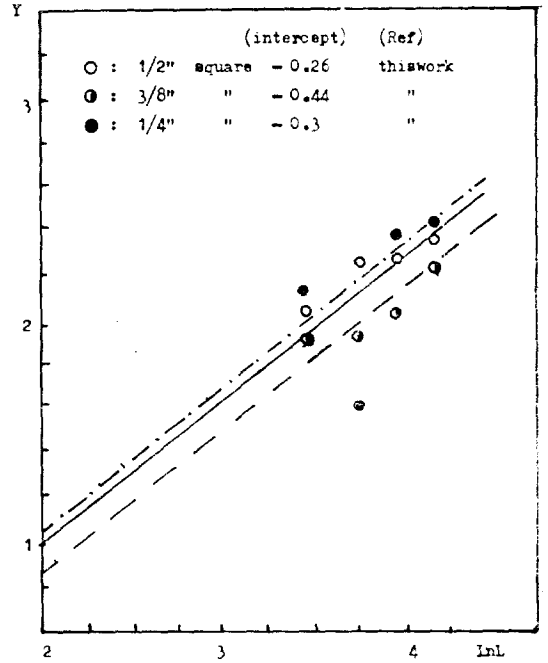


Figure 5. Plot of  $Y$  vs.  $\ln L$  for Squares of Different Size

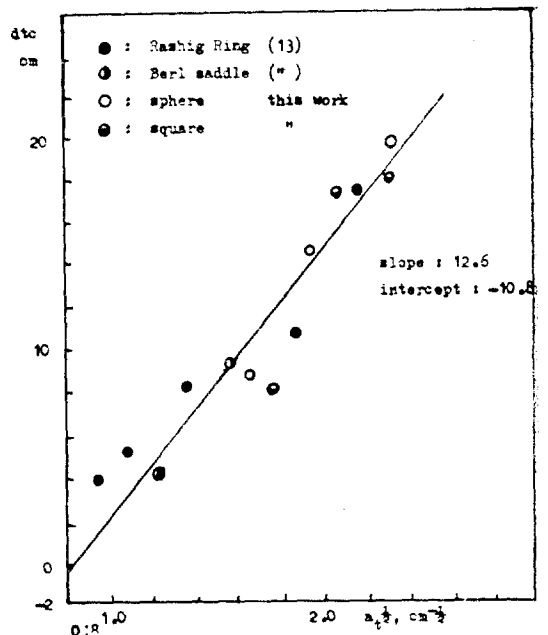


Figure 6. Plot of the Characteristic Diameter,  $d_{tc}$  vs. Square Root of Total Area,  $a_t^{1/2}$

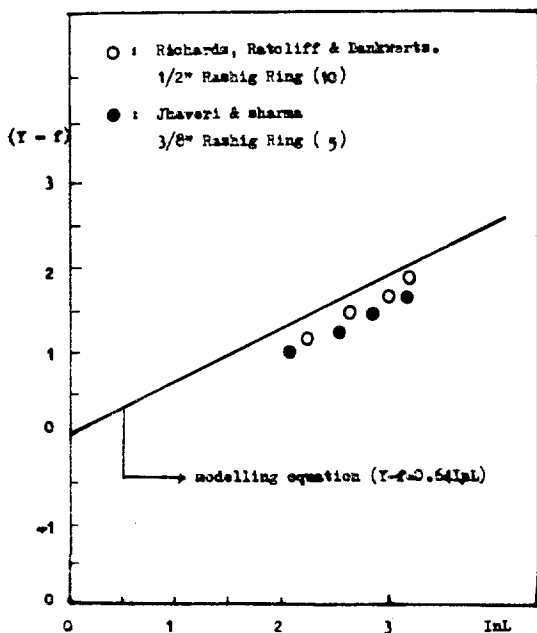


Figure 7. Comparison of Modelling Equation and Experimental Data

$a_t$ 와  $d_c$ 의 관계를 그림표로 나타내면 Figure 6과 같다. Figure 6으로 부터  $d_c$ 와  $a_t$  사이에는 본 실험의 범위내에서는

$$d_c = 12.6 \sqrt{a_t} - 10.8 \quad (26)$$

의 관계가 성립됨을 알 수 있다.

(26)식의 결과를 보면 (24)식으로 정의된 형상인자  $f$ 는 total area  $a_t$ 만의 함수로 표현할 수 있으며  $a_t$ 가  $0.73 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$  이하인 충전물에 대해서는 모식화식이 무의미함을 알 수 있었다.

본 모식화식의 타당성을 검토하기 위해 Figure 7에 Richards, Ratcliff and Dankwerts의 실험치와<sup>10)</sup> Jhaveri and Sharma의 실험치<sup>5)</sup>로 부터  $(Y-f)$ 와  $\ln L$ 을 구하여 plot 하였다.

Figure 7을 보면  $k_L a$ 의 실험치가 이론식 보다 적게 나타나 있는데 이는 모식화식이 모든 충전물의 표면이 유효표면적으로 작용한다고 가정했기 때문에 실제로 발생하는 liquid holdup, water pocket 및 trickling 등의 현상에 의해 발생하는 유효표면적의 감소효과를 포함하지 못하기 때문인 것으로 추정된다.

## 5. 결 론

이상의 연구에 의해 본 실험에서 확인된 범위 ( $\ln L < 6, d_c < 1/2 \text{ in}$ ) 다음과 같은 semi-empirical equation을 얻었다.

$$Y = 0.64 \ln L + f$$

$$\text{단 } Y = \ln[k_L a (\rho \mu / g D^3)^{1/6} / 0.54]$$

$$f = \frac{1}{6} \ln(a_t^4 / d_c^3)$$

$$d_c = 18.6 \sqrt{a_t} - 10.8$$

이 modeling equation에 의하면 충전물의 형상인자는 total area,  $a_t$ 만의 함수로 표현될 수 있으며 volumetric mass-transfer coefficient는 liquid flow rate의 0.64승에 비례한다는 것을 알 수 있다.

## 사용 기호

- $a$  단위부피당 유효표면적 ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )
- $a'$  충전물의 단위표면적 ( $\text{cm}^2$ )
- $a_t$  단위부피당 충전물의 표면적 ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )
- $A^*$  계면에서의 용질의 평형농도 ( $\text{gmol}/\text{cm}^3$ )
- $A^0$  용액내에서의 용질의 농도 ( $\text{gmol}/\text{cm}^3$ )
- $d$  충전물의 외경 (cm)
- $d_c$  충전물의 특성치수 (cm)
- $d_N$  충전물의 공칭치수 (cm)
- $D$  확산계수 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )
- $f$  식(24)로 정의된 형상인자
- $g$  중력가속도 ( $\text{gcm}/\text{sec}^2$ )
- $H_L$  전달단위의 높이 (cm)
- $k$  확률상수 ( $\text{cm}^{-4}$ )
- $k_1$  1차반응 속도 정수 ( $1/\text{sec}$ )
- $k_L$  물질전달 계수 ( $\text{cm}/\text{sec}$ )
- $L$  액체유량 ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ )
- $p$  단위부피당 liquid path의 총길이 ( $\text{cm}/\text{cm}^3$ )
- $r$  반응속도 ( $\text{gmol}/\text{sec}$ )
- $\bar{R}$  평균흡수율 ( $\text{gmol}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ )
- $S$  표면경신율
- $V$  액체유량 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )

## 회 략 문 자

- $\alpha$  packing 의 종류에 따라 결정되는 상수  
 $\sigma$  표면장력 (dyne/cm)  
 $\Gamma$  liquid loading (g/cm sec)  
 $\gamma$  kinematic viscosity (cm<sup>2</sup>/sec)  
 $\theta$  packing 이 수경면과 이루는 각  
 $\delta$  film 의 thickness (cm)  
 $\rho$  액체의 밀도 (g/cm<sup>3</sup>)  
 $\mu$  액체의 점도 (g/cm·sec)

## 참 고 문 헌

1. P.V. Dankwerts, "Gas-Liquid Reaction" McGraw-Hill, New York, (1970).
2. P.V. Dankwerts and Gillham, *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **44**(1966), 42.
3. Davidson, *Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs.*, **37**(1959), 131.
4. H. Hikita, J. Takaoka and Nakanishi, *Kagaku Kogaku*, **24**(1960), 3.
5. Jhaveri and Sharma, *Chem. Eng. Sci.*, **23**(1963), 669.
6. Dean, "Lange's Handbook of Chemistry," 11th ed., McGraw-Hill, New York, p. 10-288.
7. Perry and Chilton, "Chemical Engineers' Handbook," 4th ed., McGraw-Hill, New York, Section 14.
8. R. Pohorecki, *Chem. Eng. Sci.*, **23**(1968), 1447.
9. G.A. Ratcliff and J.D. Holdcraft, *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **41**(1963), 315.
10. G.M. Richards, G.A. Ratcliff and P.V. Dankwerts, *Chem. Eng. Sci.*, **19**(1964), 325.
11. Samuel Sideman, *I.&E.C.*, **58**(1966), 32.
12. M.M. Sharma and P.V. Dankwerts, *British Chemical Engineering*, **15**(1970), No. 4, 522.
13. T.K. Sherwood and Holloway, *Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs.* **36**(1940), 39.
14. H.I. Shulman, C.F. Ullrich and Wells, *J.A.I. Ch.E.*, **1**(1955), No.2, 247.
15. F. Yoshida and Y. Miura, *I.&E.C.*, **42**(1950), 1099.
16. Yoshida and Koyanagi, *I.&E.C.*, **50**(1958), No. 3, 365.