

## 젖은 벽탑에서의 산소 전달에 관한 연구

도갑수 · 이승용

승전대학교 공과대학 화학공학과

(1983년 12월 21일 접수, 1984년 5월 16일 채택)

### A Study on the Oxygen Transfer in the Wetted-Wall Column

Kap-Soo Doh · Seung-Yong Lee

Department of Chemical Engineering, College of Engineering,

Soong-Jun University, Seoul 151, Korea

(Received 21, December 1983; accepted 16, May 1984)

#### 요 약

젖은 벽탑을 사용하여 증류수에 의한 공기중의 산소의 물질전달에 대하여 온도와 액체유량의 영향을 연구하였다. 실험결과치로부터 총괄액상물질전달계수를 계산하였다. 실험은 Reynolds 수가 220~540, 온도가 5~40°C의 제한된 범위에서 행하였다.

본 연구의 결과로서;

1. 총괄액상물질전달계수에 대한 온도의 영향은 다음과 같다.

$$K_{L(T)} = K_{L(20)} 1.007^{(T-20)}$$

2. 젖은 벽탑에서 실험결과치의 무차원 상관관계식은 다음과 같다.

$$Sh_L = 83.89 (Re_r)^{0.0782} (Sc_L)^{0.2607}$$

#### Abstract—A Study on the Oxygen Transfer in the Wetted-Wall Column

The effect of temperature and liquid flow rate in the mass transfer of oxygen to liquid water in the wetted wall column was studied. The over-all liquid phase mass transfer coefficient were calculated from the experimental data. The runs were made over a limited range of Reynolds number 220 to 540 and temperature 5°C to 40°C.

As a result of this study:

1. The effect of temperature on over-all liquid phase mass transfer coefficient was obtained as follow.

$$K_{L(T)} = K_{L(20)} 1.007^{(T-20)}$$

2. The dimensionless correlation of the experimental data in the wetted wall column was obtained as follow.

$$Sh_L = 83.89 (Re_r)^{0.0782} (Sc_L)^{0.2607}$$

#### I. 서 론

기체와 액체간의 물질전달 메카니즘에 관한 대표

적인 이론은 Lewis[1]와 Whitman[2]이 제안한 이중경막이론과 Higbie[3]가 제안한 침투이론이 있다. 이 외에도 이중경막이론과 침투이론을 기초로

해서 많은 모델이 발표되었다[4~8].

액체에 대한 기체의 용해도가 작은 경우 기체경막저항은 무시되고 액체경막 저항이 지배저항이 되는데, 이에 관한 연구결과로는 Lamourelle등[9]이 젖은 벽탐에서 실험을 하여 난류영역에서의 액상물질전달계수는 확산계수의 0.4승에 비례한다고 보고하였으며 또한 결과치를 상호 관련시켜 Sherwood 수는 Reynolds수의 1.506승, Schmidt수의 0.5승에 비례하는 무차원식을 발표하였다. Hikita등[10]은 액상물질전달계수에 대한 점도의 영향에 관한 연구결과를 발표하였다.

본 연구에서는 생화학적 호기성 폐수 처리공정에 필요한 산소전달을 위한 장치로 흡수탑의 설계에 필요한 물질전달계수를 얻기 위하여 젖은 벽탐을 사용해서 공기중의 산소를 증류수에 흡수시키는 실험에 착수하였다. 실험은 대기압, 증류영역에서 행하였고, 그 결과를 이중경막이론으로 해석하여 총괄액상물질전달계수에 대한 온도와 액체유량의 영향을 조사하였으며 여기서 얻은 결과치를 상호관련시켜 무차원 상관관계식을 얻었다.

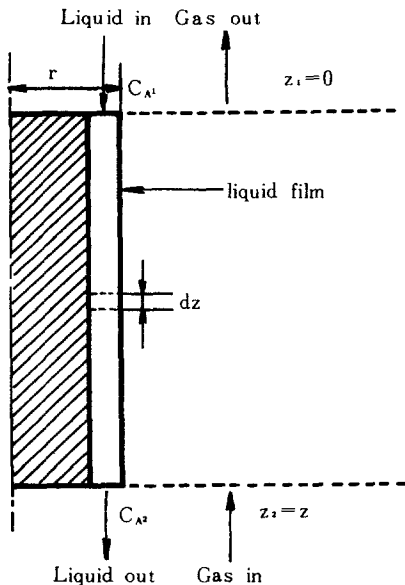


Fig. 1. Gas-liquid interface in the wetted wall column

## II. 이 론

기체와 액체가 접한 경계면에서 액체에 대한 기체의 용해도가 작은 경우 이중경막이론에 의한 물질전달속도식은 다음과 같이 표시된다.

$$N_A = k_L A (C_A^* - C_A) = K_L A (C_A^* - C_A) \dots \dots \dots (1)$$

Fig. 1과 같은 젖은 벽탐에서 미소구간  $dz$ 에서의 물질수지식은 다음과 같다.

$$dN_A = d(V_L C_A) = V_L dC_A \dots \dots \dots (2)$$

장치에서 미소면적  $dA = 2\pi r dz$ 이므로 정상상태에서는 식(2)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dN_A = (N_A/A) 2\pi r dz = V_L dC_A \dots \dots \dots (3)$$

식(1)을 식(3)에 대입하여 다음식을 얻는다.

$$K_L (C_A^* - C_A) 2\pi r dz = V_L dC_A \dots \dots \dots (4)$$

식(4)를 적분하면 식(5)와 같이 된다.

$$-\ln(C_A^* - C_A) = K_L 2\pi r z / V_L + C \dots \dots \dots (5)$$

여기서  $K_L$ ,  $V_L$ 는 상수이다.

식(5)에서  $-\ln(C_A^* - C_A)$ 를  $z$ 에 대하여 도식하였을 경우 직선이 얻어지면 직선의 기울기로부터 총괄액상물질전달계수를 계산할 수 있다.

$K_L$ 와 다른 변수들 사이의 관계를 고찰하기 위하여 Buckingham의 Pi이론으로 차원해석을 하면 다음과 같다.

$$Sh_L = f(Re_r, Sc_L) \dots \dots \dots (6)$$

여기서  $Sh_L = K_L D \rho_m M / D_L \rho_L$  (—)

$$Re_r = 4 V_L \rho_L / \pi D \mu_L$$
 (—)

$$Sc_L = \mu_L / D_L \rho_L$$
 (—) 이다.

젖은 벽탐에 대한 무차원식의 일반적인 형태는 식(7)과 같고 실험치를 이용하여 상수  $k$ ,  $m$ ,  $n$ 을 계산할 수 있다.

$$Sh_L = k (Re_r)^m (Sc_L)^n \dots \dots \dots (7)$$

## III. 실험

### 1. 실험장치 및 시약

본 실험에 사용된 장치를 Fig. 2에 도식하였다. 본 장치는 기체와 액체간의 물질전달을 위한 젖은 벽탐과 기체와 액체를 향온시키는 향온조, 압축기, 펌프, 기체를 포화시키는 포화기, 유량조절장치 및 측정장치로 구성되어 있다.

실험에 사용한 모든 시약은 특급시약을 처리없이

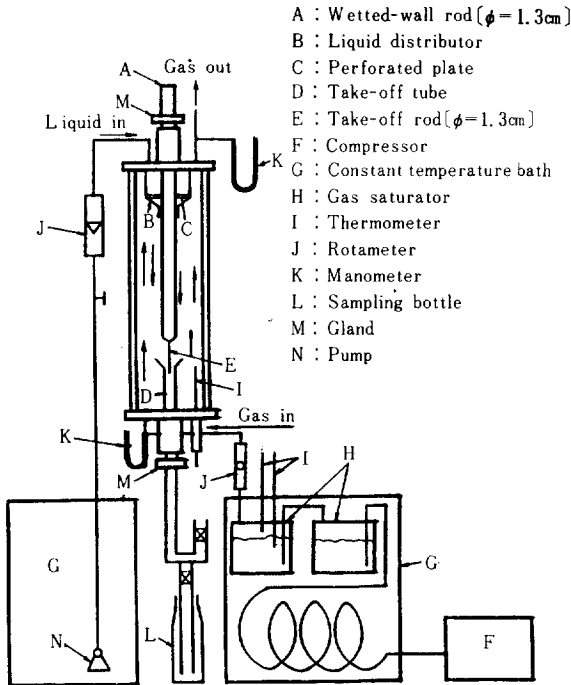


Fig. 2. Schematic diagram for experiment

그대로 사용하였다.

## 2. 실험방법

증류수에 용해되어 있는 산소를 제거하기 위하여  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 를 사용하였고, 촉매로는  $\text{CoCl}_2$ 를 사용하였다.

$\text{Na}_2\text{SO}_3$ 가 과잉으로 공급될 경우 실험에 의하여 흡수되는 산소와 반응하게 되므로 이를 방지하기 위하여 이론량의 90%만 가하여 용존산소를 제거하였다. 촉매량은 최소 1.5ppm이상 첨가하였다[11].

용존산소가 제거된 액체는 잔존 용존 산소농도를 측정된 후에 항온조 안에 있는 펌프로 rotameter를 통해 탐 상부에 도입되고 동시에 기체는 실험온도에서 포화시킨 후 탐 하부에 공급된다. 탐 상부에 도입된 액체가 액체분배기를 통해 젖은 벽탐을 film 형태로 흘러 내리면서 상승하는 기체와 접촉하게 하였다. 기체와 접촉한 액체는 take-off rod를 타고 take-off tube로 들어가게 하였고, 탐 상부로 나오는 기체는 대기 중으로 배출시켰다. take-off tube의 액위는 stagnant film 때문에 기인하는 end effect를 제거하기 위하여 take-off rod가 덮여지

도록 조절하였다.

액체시료는 흐름이 안정화 된 후에 take-off tube 하부에서 시료병을 5분 동안 over-flow시킨 다음 채취하였고, 들어가고 나가는 액체의 용존산소농도는 Winkler 적정법과 oxygen meter (YSI Model 54)을 병용하여 측정하였다.

기체유량은  $77.3\text{cm}^3/\text{sec}$ 로 일정하게 유지하였으며 액체유량은 3.5, 4.2, 4.9 및  $5.6\text{cm}^3/\text{sec}$ 로 변화시켰고, 실험온도는  $5\sim 40^\circ\text{C}$  범위에서 일정하게 유지시켰다. 또한 rod의 높이는  $3\sim 35\text{cm}$  범위에서 변화시켰다. 실험압력은 대기압이었으며 탐의 입구와 출구의 압력차는 거의 없었다.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 온도, 액체유량, rod의 높이 변화에 따른 총괄액상물질전달계수

실험온도를  $10^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$  및  $40^\circ\text{C}$ 로 일정하게 한 후 rod의 높이를  $3\sim 35\text{cm}$ 내의 일정한 값으로 변화시키면서 각각의 액체유량 3.5, 4.2, 4.9 및  $5.6\text{cm}^3/\text{sec}$ 에서  $C_A$ 를 측정하였다.

Fig. 3~6은 온도를 매개변수로 하여  $-\ln(C_A^* - C_A)$ 와 Z사이의 관계를 각 액체 유량에 대해서 도시한 것으로 이들의 관계가 직선적으로 증가함을 알 수 있었다. 따라서 각 직선의 기울기로부터 총괄액상물질전달계수를 계산하였고, 그 결과를 Table I에 무차원수와 함께 온도와 액체유량에 따라 나타내었다.

여기서 액체의 밀도는 Ostwald pycnometer를 사용하여 측정하였고, 액체의 점도는 glass제 Ostwald viscometer를 사용하여 측정하였다. 액상에서의 산소 확산계수는 Othmer와 Thakar식[12]을 사용하여 계산하였다.

$$D_L = 0.00014 / \mu_L^{1/3} V_A^{2/3} \dots\dots\dots (8)$$

이들 물성의 값을 용해도와 함께 Table II, III에 수록하였다.

### 2. 총괄액상물질전달계수에 대한 온도의 영향

총괄액상물질전달계수에 대한 온도의 영향을 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7로부터  $K_L$ 은 온도가 증가할수록 직선적으로 증가함을 알 수 있었다. 이는

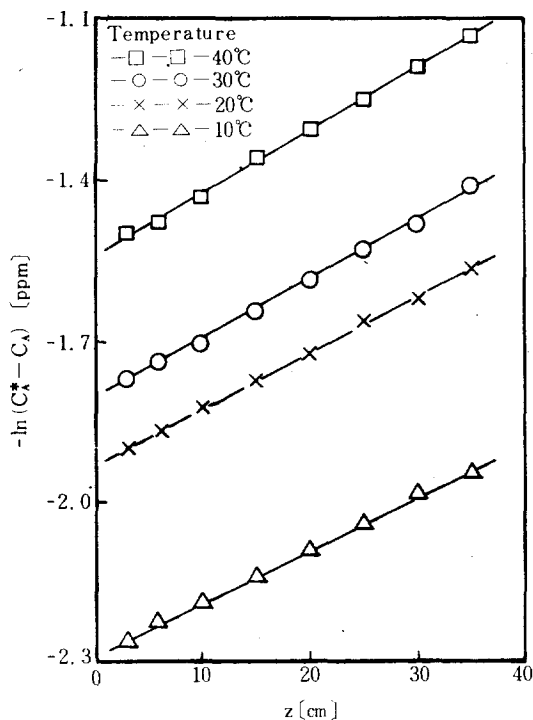


Fig. 3. Plots of  $-\ln(C_A^* - C_A)$  vs.  $z$  (liquid flow rate  $= 3.5 \text{ cm}^3/\text{sec}$ )

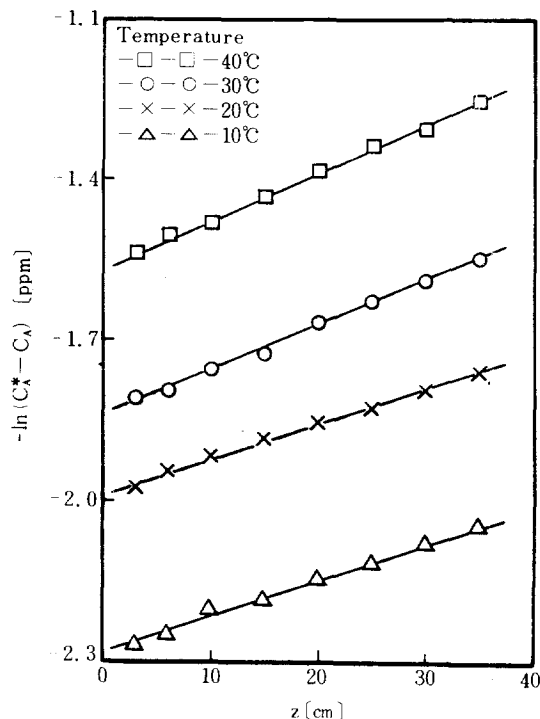


Fig. 5. Plots of  $-\ln(C_A^* - C_A)$  vs.  $z$  (liquid flow rate  $= 4.9 \text{ cm}^3/\text{sec}$ )

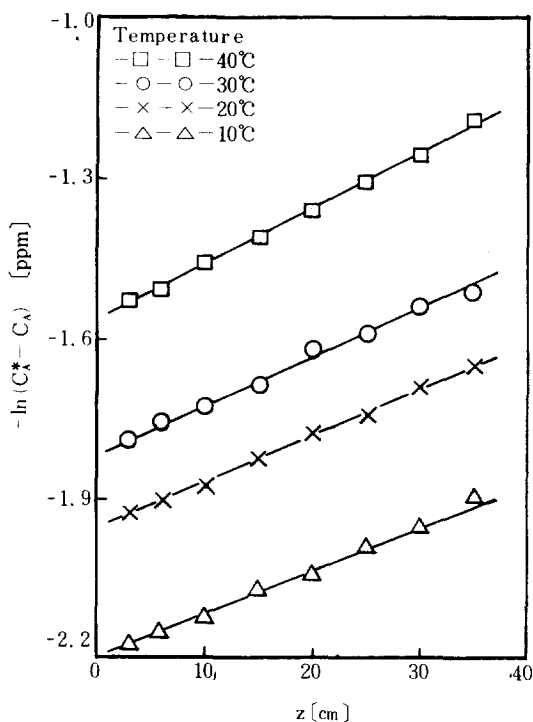


Fig. 4. Plots of  $-\ln(C_A^* - C_A)$  vs.  $z$  (liquid flow rate  $= 4.2 \text{ cm}^3/\text{sec}$ )

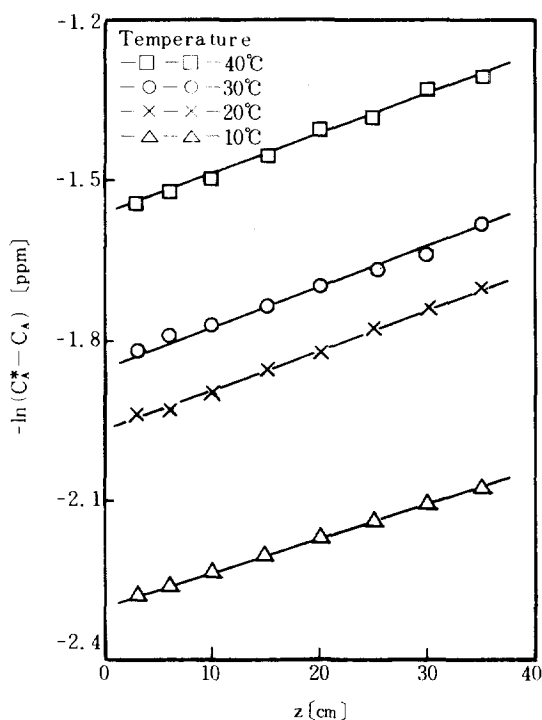


Fig. 6. Plots of  $-\ln(C_A^* - C_A)$  vs.  $z$  (liquid flow rate  $= 5.6 \text{ cm}^3/\text{sec}$ )

Table I.  $K_L$ ,  $Re_f$  and  $Sc_L$  values according to temperature and liquid flow rate

| Temp. (°C) | $V_L$ (cm <sup>3</sup> /sec) | $K_L \times 10^3$ (cm/sec) | $Re_f$ | $Sh_L$ | $Sc_L$ |
|------------|------------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|
| 10         | 3.5                          | 8.32                       | 241.13 | 795.98 | 1045   |
|            | 4.2                          | 8.42                       | 289.35 | 805.47 |        |
|            | 4.9                          | 8.52                       | 337.58 | 815.04 |        |
|            | 5.6                          | 8.63                       | 385.80 | 825.56 |        |
| 20         | 3.5                          | 8.91                       | 277.02 | 732.52 | 780    |
|            | 4.2                          | 9.04                       | 332.42 | 742.31 |        |
|            | 4.9                          | 9.14                       | 387.83 | 750.42 |        |
|            | 5.6                          | 9.26                       | 443.23 | 760.38 |        |
| 30         | 3.5                          | 9.57                       | 307.03 | 701.63 | 627    |
|            | 4.2                          | 9.65                       | 368.54 | 707.49 |        |
|            | 4.9                          | 9.80                       | 429.85 | 718.49 |        |
|            | 5.6                          | 9.93                       | 491.25 | 728.02 |        |
| 40         | 3.5                          | 10.26                      | 336.92 | 678.96 | 514    |
|            | 4.2                          | 10.40                      | 404.30 | 688.22 |        |
|            | 4.9                          | 10.50                      | 471.68 | 694.85 |        |
|            | 5.6                          | 10.60                      | 539.07 | 704.77 |        |

Table II. Physical properties of liquid feed

| Temperature (°C) | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Viscosity (g/cm. sec) |
|------------------|------------------------------|-----------------------|
| 5                | 0.99905                      | 0.015247              |
| 10               | 0.99891                      | 0.014201              |
| 15               | 0.99878                      | 0.013375              |
| 20               | 0.99811                      | 0.012351              |
| 25               | 0.99655                      | 0.011674              |
| 30               | 0.99617                      | 0.011122              |
| 35               | 0.99527                      | 0.010537              |
| 40               | 0.99366                      | 0.010110              |

Table II, III에 나타난 바와 같이 온도가 증가할수록 액상에서의 산소의 확산계수가 증가하고 또한 액체의 점도가 감소하기 때문에  $K_L$ 가 증가되는 것으로 생각된다.

Fig. 8은 총괄액상물질전달계수에 대한 온도의 영향을 20°C를 기준으로 한 단일 관계를 얻기 위하여 도식한 것으로 각 점들은 액체유량에 관계없이 동일 직선상에 놓임을 알 수 있었고, 따라서 이 직선으로부터 다음과 같은 하나의 관계식을 얻었다.

Table III. Diffusivities and solubilities of oxygen in distilled water

| Temperature (°C) | Diffusivity $\times 10^5$ (cm <sup>2</sup> /sec) | Solubility (ppm) |
|------------------|--|------------------|
| 5                | 1.258  | 12.79            |
| 10               | 1.360  | 11.27            |
| 15               | 1.453  | 10.03            |
| 20               | 1.586  | 9.02             |
| 25               | 1.688  | 8.18             |
| 30               | 1.780  | 7.44             |
| 35               | 1.889  | 7.10             |
| 40               | 1.977  | 6.60             |

(Fig. 8에서 액체유량 4.2cm<sup>3</sup>/sec에 대하여는 5°C 간격으로 실험하여 그 값을 표시하였음)

$$K_{L(t)} = K_{L(20)} 1.007^{(t-20)} \dots\dots\dots (9)$$

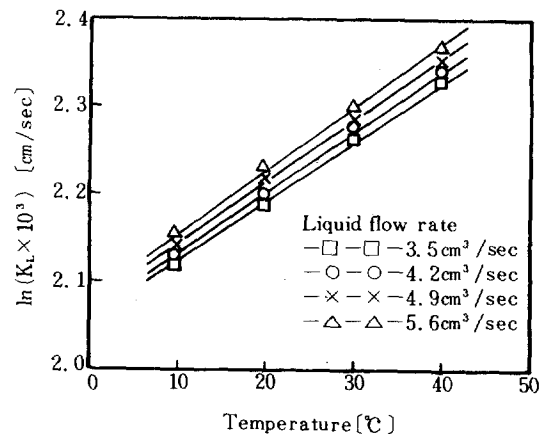


Fig. 7. Effect of temperature on over-all liquid phase mass transfer coefficient

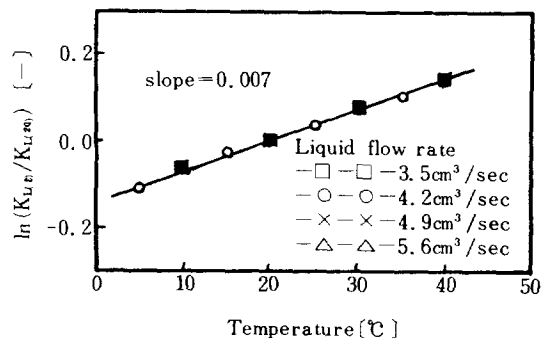


Fig. 8. Plot of  $\ln(K_{L(t)}/K_{L(20)})$  vs. temperature

### 3. 무차원 상관관계

젖은 벽탑에서 물질전달 무차원 상관관계식의 일반적인 형태는 식(7)과 같다. 무차원 상관관계식을 구하기 위하여  $Re_f$ ,  $Sh_L$  및  $Sc_L$  사이의 관계를 Fig. 9~11에 나타내었다.

Fig. 9로부터 양대수 좌표상에서  $Sh_L$ 과  $Re_f$  사이의 관계가 각각의 온도에서 직선적으로 증가함을 알 수 있었다. 각 직선의 기울기를 계산한 결과, 기울기가 거의 비슷한 값을 나타내며, 그 평균 기울기 0.0782를 얻었다. 이것은  $Sh_L$ 가  $Re_f$ 수의 0.0782승에 비례한다는 것을 나타내는 것이다.

Fig. 10에서는  $\ln(Sh_L/Re_f^{0.0782})$ 와  $\ln Sc_L$ 사이의 관계가 직선적으로 증가함을 알 수 있었다. Fig. 10으로부터 계산한 무차원 상관관계식은 다음과 같다.

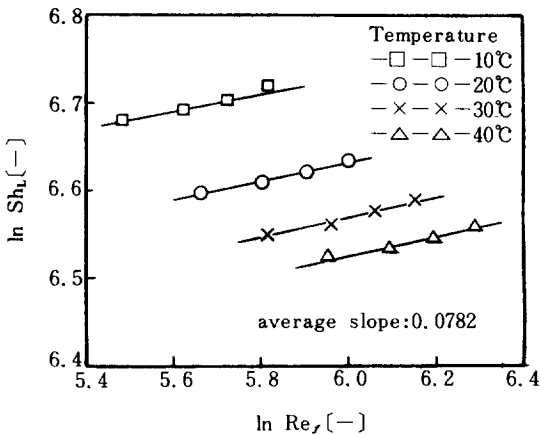


Fig. 9. Plots of  $\ln Sh_L$  vs.  $\ln Re_f$

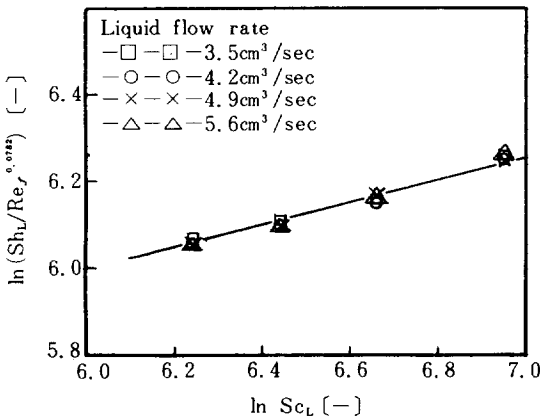


Fig. 10. Plot of  $\ln(Sh_L/Re_f^{0.0782})$  vs.  $\ln Sc_L$

$$Sh_L = 83.89 (Re_f)^{0.0782} (Sc_L)^{0.2607} \quad (10)$$

식(10)에서  $Sh_L$ 가  $Re_f$ 에 대한 영향이 적은 것은 유체가 층류로 흐르며 산소의 물에 대한 용해도가 아주 작은 점을 들 수 있다.

Fig. 9, 10으로부터 계산된 무차원식과 실험값을 비교한 결과는 Fig. 11에 도시하였다. 실험치와 계산치는 5%오차범위 내에서 잘 일치하였다.

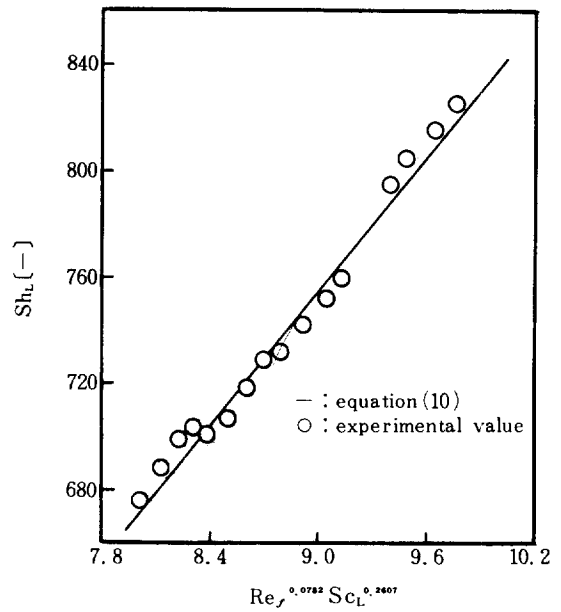


Fig. 11. Comparison of calculated values with experimental values

## V. 결 론

지름 1.3cm인 젖은 벽탑에서 rod의 높이를 3~35cm로 변화시키면서 공기중의 산소를 증류수에 흡수시키는 실험을 행하여 그 결과 및 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 총괄액상물질전달계수에 대한 온도의 영향은 다음과 같다.

$$K_{L(1)} = K_{L(20)} 1.007^{(t-20)}$$

2. 증류영역에서 젖은 벽탑에서의 무차원 상관관계식은 다음과 같았다.

$$Sh_L = 83.89 (Re_f)^{0.0782} (Sc_L)^{0.2607}$$

## Nomenclature

- A : interfacial area for transfer ( $\text{cm}^2$ )  
 $C_A$  : concentration of gas in the bulk of liquid ( $\text{g-mole}/\text{cm}^3$ )  
 $C_A^*$  : saturated concentration of gas in the bulk of liquid ( $\text{g-mole}/\text{cm}^3$ )  
D : diameter of wetted wall rod containing liquid film thickness (cm)  
 $D_L$  : diffusivity of oxygen in liquid ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )  
H : Henry's law constant ( $\text{g-mole}/\text{cm}^3 \cdot \text{atm}$ )  
k : constant in equation (7)  
 $k_L$  : liquid film mass transfer coefficient ( $\text{g-mole}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot (\text{g-mole}/\text{cm}^3)$ )  
 $K_L$  : over-all liquid phase mass transfer coefficient ( $\text{g-mole}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot (\text{g-mole}/\text{cm}^3)$ )  
 $K_{L,20}$ ,  $K_{L,t}$  : over-all liquid phase mass transfer coefficient at  $t^\circ\text{C}$  and  $20^\circ\text{C}$ , respectively ( $\text{g-mole}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot (\text{g-mole}/\text{cm}^3)$ )  
m : constant in equation (7)  
M : average molecular weight in the liquid phase ( $\text{g}/\text{g-mole}$ )  
n : constant in equation (7)  
 $N_A$  : rate of mass transfer ( $\text{g-mole}/\text{sec}$ )  
r : radius of wetted wall rod containing liquid film thickness (cm)  
 $Re_f$  : film Reynolds number ( $4V_L\rho_L/\pi D\mu_L$ )  
 $Sc_L$  : liquid Schmidt number ( $\mu_L/D_L\rho_L$ )  
 $Sh_L$  : liquid Sherwood number ( $K_L D \rho M / D_L \rho_L$ )  
t : temperature ( $^\circ\text{C}$ )  
 $V_A$  : molal volume of oxygen at normal boiling point ( $\text{cm}^3/\text{g-mole}$ )  
 $V_L$  : volumetric flow rate of water ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )  
z : height of rod (cm)

## Greek letters

- $\rho_L$  : density of liquid feed ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 $\rho_m$  : molar density of liquid phase ( $\text{g-mole}/\text{cm}^3$ )  
 $\mu_L$  : viscosity of liquid feed ( $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{sec}$ )

## Subscripts

- f : film  
L : liquid

## References

1. Lewis, W. K. : Ind. Eng. Chem., **8**, 825 (1916).
2. Whitman, W. G. : Chem. and Met. Eng., **29**, 147 (1923).
3. Higbie, R. : AIChE. J., **31**, 365 (1935).
4. Danckwerts, P. V. : Ind. Eng. Chem., **43**, 1460 (1951).
5. Toor, H. L. and Marchello, J. M. : AIChE. J., **4**, 97 (1958).
6. Hikita, H. Asai, S. and Takatsuka, T. : Chem. Eng. J., **11**, 131 (1976).
7. Hikita, H. Asai, S. Yano, A. and Nose, H. : AIChE. J., **28**, 1009 (1982).
8. Hikita, H. Asai, S. and Tsuji, T. : AIChE. J., **23**, 538 (1977).
9. Lamourelle, A. P. and Sandall, O. C. : Chem. Eng. Sci., **27**, 1035 (1972).
10. Hikita, H. Asai, S. and Azuma, Y. : Can. J. Chem. Eng., **56**, 371 (1978).
11. Ramalho, R. S. : "Introduction to waste Treatment Processes" Academic Press, p. 129 (1977).
12. Othmer, D. F. and Thakar, M. S. : Ind. Eng. Chem., **45**, 589 (1953).