

## 구형 입자를 현탁시킨 이중관 기포탑에서의 기-액간 물질전달

최일곤\* · 백진호 · 한승완 · 김상렬†

동아대학교 공과대학 화학공학과

\*동광화학공업주식회사

(1996년 5월 13일 접수, 1997년 1월 18일 채택)

## Mass Transfer between Gas and Liquid in a Spherical Particle-Suspended Bubble Column with Draught Tube

Il-Gon Choi\*, Jin-Ho Paek, Seung-Wan Han and Sang-Yeul Kim†

Department of Chemical Engineering, Dong-A University, Pusan, Korea

\*Dong Kwang Chemical Co. LTD, Pusan, Korea

(Received 13 May 1996; accepted 18 January 1997)

### 요 약

현탁기포탑은 불용성 생성물이나 고체 입자를 담체로 하는 생체 고정화 반응장치로서 많이 이용된다. 이를 위해 구형 수지 입자를 현탁시킨 이중관 기포탑내에서 기체체류량과 액상용량 물질전달계수를 기체유속, 입자의 농도와 크기 및 흡출관의 직경에 따라 각각 0.02-0.1225 m/sec, 0-20 % 및 0.05-0.09 m 범위에서 실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 기체체류량과 액상용량 물질전달계수는 입자의 농도와 크기가 증가함에 따라 감소하였으며 실험자료의 다중회기분석을 통하여 이들 사이의 상관관계를 수식화하였다.

$$K_L a \frac{D_o^2}{D_t} = 4.9424 \times 10^3 \text{Re}^{0.5327} (1 - \phi_s)^{0.5719} \left( \frac{d_p}{d_{pr}} \right)^{-0.1258} \left( \frac{D_t}{D_o} \right)^{0.0589} \epsilon_G^{0.3344}$$

**Abstract**—The effects of gas velocity, the concentration and size of particle, and diameter of draught tube on the gas holdup and the volumetric liquid phase mass transfer coefficient in a urea resin-particle-suspended bubble column were studied experimentally.  $\epsilon_G$  and  $K_L a$  were decreased with increasing the concentration and size of particle and based on these observations, correlation equation for gas holdup and volumetric liquid phase mass transfer coefficient was obtained through a regression analysis of experimental data.

$$K_L a \frac{D_o^2}{D_t} = 4.9424 \times 10^3 \text{Re}^{0.5327} (1 - \phi_s)^{0.5719} \left( \frac{d_p}{d_{pr}} \right)^{-0.1258} \left( \frac{D_t}{D_o} \right)^{0.0589} \epsilon_G^{0.3344}$$

**Key words:** Particle Size, Particle Concentration

### 1. 서 론

2중관 기포탑은 흡출관(draught tube)을 삽입한 형태로서 장치내에 채류하는 용액을 순환시켜 농도를 쉽게 균일화할 수 있고 안정된 대류순환을 통해 열전달이나 물질전달을 위해 접촉면적을 높일 수 있어 공업적으로 많이 이용되고 있다[1-4].

특히 고체입자가 현탁된 2중관 기포탑은 상승하는 기포가 슬러리를 혼합시키는 동시에 반응에 필요한 물질을 공급하거나 회수하는 역할을 하므로 접촉 수산화공정, 박테리아에 의한 생물 반응장치인 폭기조로도 널리 적용된다. 최근에는 낮은 유속에서 교반과 산소의 공급이 가능하므로 바이오 테크의 발전과 함께 균체와 효소 등을 이용한 생체촉매장치나 식물세포 배양장치로서도 그 중요성이 커지

고 있다[5, 6].

Heck와 Onken[7, 8]은 이들 흡출관의 존재 유무에 따른 현탁입자의 효과에 대해서 발표한 바 있고, Koide[2, 4]는 기포탑이나 2중관 기포탑에서 기체의 임계속도, 현탁입자의 종류와 물성, 흡출관의 기하학적 특성 및 용액의 물성에 따른 기체체류량과 액상용량 물질전달계수를 구하였다.

또한 Salvacion[9]은 겔입자를 현탁시킨 기포탑에서 알코올을 첨가하여 물에 대한 알코올 첨가가 기체체류량과 액상용량 물질전달계수에 미치는 영향을 검토하여 흐름영역에 대한 실험식을 제안하였다. 특히 Murayama[10]는 생물학적 폐수처리에 적용시키기 위해 활성탄 입자를 현탁시킨 이중관 기포탑내에서의 물질전달에 대한 연구를 보고한 바 있다.

본 연구에서는 고체입자를 담체로 하는 생체 고정화반응장치나 침전성 제품을 목표로 하는 액상 산화공정에 2중관 기포탑을 응용하여 고상인 유기성 생체와 비중이 유사한 요소수지 입자를 현탁시켜 기체속도, 입자의 농도와 크기 및 흡출관의 직경변화에 따른 기체체류량과 액상용량 물질전달계수에 미치는 영향을 검토하고 이들 사이의 상관관계를 수식화하여 기-액-고 반응장치의 설계와 운전조작에 필요한 기초자료로 제공하고자 한다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 기포탑은 투명한 아크릴 원통으로 만들었으며 내경이 0.14 m, 높이가 2.8 m이다. 기포탑 내에 내경이 각각 0.05 m, 0.075 m, 0.09 m이고 높이가 0.5 m인 아크릴 원통으로 만든 흡출관을 설치하였으며, 탑 하부에 설치된 기체분산기는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 내경이 0.05 m이고 공경이 0.003 m인 5개의 구멍이 뚫린 스테인레스판에 입자가 구멍으로 스며드는 것을 막기 위해 300 mesh의 니켈 wire gauze를 덮고 그 위에 스테인레스림으로 고정시켰다.

공기압축기는 15 Hp의 피스톤식 압축기이며, 공기압축시에 윤활유의 미스트나 흙이 노즐에 필름상으로 오염되어 유량의 변동이 생기지 않도록 흡분리기를 사용하였고, 유입공기 중의 수분을 제거하기 위하여 제습기를 부착하였다. 또한 기체의 속도를 일정하게 유지되도록 공기 탱크를 부착하고, 뿐만 아니라 압력과 액체온도(25±0.2 °C)를 조절하기 위하여 압력조절기와 자동 온도조절기를 설치하였다. 아울러 기체를 액체와 완전히 분리시켜 유입되도록 액체 사이클론도 부착하였다.

### 2-2. 실험재료

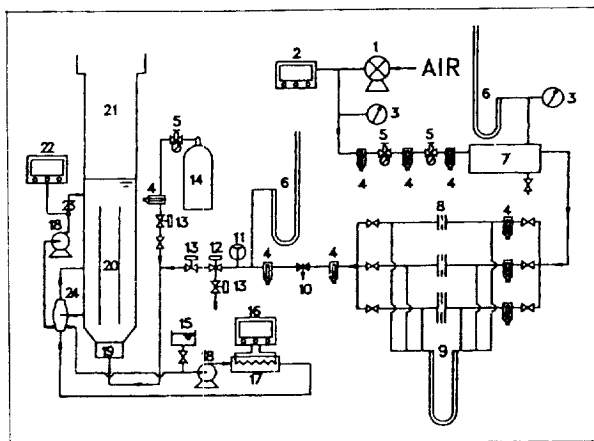


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- |                                |                            |
|--------------------------------|----------------------------|
| 1. Air compressor              | 13. 2-way solenoid valve   |
| 2. Pressure controller         | 14. Nitrogen bomb          |
| 3. Pressure gauge              | 15. Liquid injector        |
| 4. Filter                      | 16. Temperature controller |
| 5. Pressure regulator          | 17. Heat exchanger         |
| 6. Manometer(mercury)          | 18. Pump                   |
| 7. Separator(oil fume)         | 19. Gas distributor        |
| 8. Orifice                     | 20. Draught tube           |
| 9. Manometer(H <sub>2</sub> O) | 21. Column                 |
| 10. Flow rate control valve    | 22. D.O meter              |
| 11. Thermometer                | 23. D.O sensor             |
| 12. 3-way solenoid valve       | 24. Liquid cyclone         |

본 실험에서 사용된 물은 이온교환수이며, 요소수지 입자는 동광 화학(주) 제품인 요소수지 분말재료를 금형틀에서 가온·가압하여 완전한 구형입자를 만들었으며 입자밀도는 KSM-3015의 고체밀도 측정방법에 의해 측정하였다. 이들 물성치는 Table 1에 나타내었다.

### 2-3. 실험방법

#### 2-3-1. 용액의 물성

물의 비중은 Gay-Lussac형 비중병으로, 표면장력은 Du Noüy식 표면장력계(Fisher Model 20)로 측정하고 이온교환수의 점도는 Ostwald 점도계로 측정하였다.

#### 2-3-2. 기체체류량

25 °C에서 액의 높이를 0.7 m로 맞추는 후 유수분리기와 포화기를 거쳐 조절기와 마노미터로 조절된 공기를 탑하부에 설치된 분산판을 통하여 0.02001-0.1225 m/sec의 기체속도로 탑내에 분산시킨 다음 입자의 농도와 입경의 범위는 각각 0-20 vol%와 0.003-0.005 m, 흡출관의 직경 0.05-0.09 m에 따라 정지시의 액체의 높이와 공기 유입시의 높이를 측정하여 식 (1)로부터 기체체류량을 구하였다.

$$\epsilon_G = \frac{(H_F - H_L) \frac{\pi}{4} D_o^2}{\left[ H_F - \frac{1}{2} (D_o - D_d) \sqrt{3} \right] \frac{\pi}{4} D_o^2 + \frac{\pi}{24} (D_o^3 - D_d^3) \sqrt{3} - V_i} \quad (1)$$

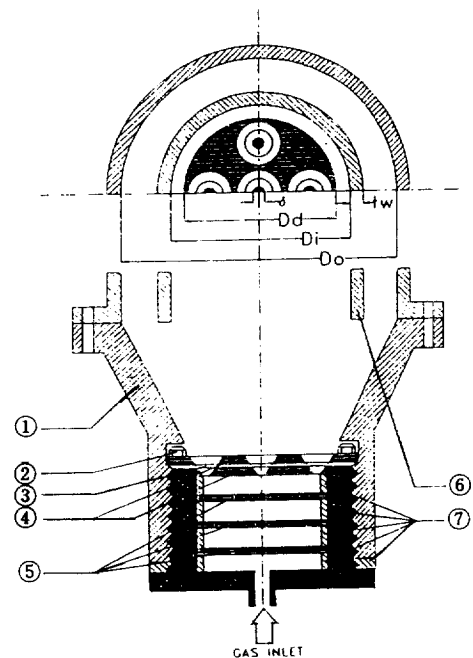


Fig. 2. Details of gas distributor.

- |                          |                  |
|--------------------------|------------------|
| 1. Conical bottom        | 5. Buffer plate  |
| 2. Stainless steel rim   | 6. Draught tube  |
| 3. Stainless steel gauze | 7. Rubber o-ring |
| 4. Perforated plate      |                  |

Table 1. Properties of deionized water and particles at 25 °C

| Deionized water                   |   |   |   | Particles                                     |                 |
|-----------------------------------|---|---|---|---|-----------------|
| $\rho_L$<br>[kg·m <sup>-3</sup> ] | $\mu_L$<br>[kg·m <sup>-1</sup> ·sec <sup>-1</sup> ] | $\sigma_L \times 10^{-3}$<br>[N·m <sup>-1</sup> ] | $D_L \times 10^9$<br>[m <sup>2</sup> ·sec <sup>-1</sup> ] | $\rho_s \times 10^3$<br>[kg·m <sup>-3</sup> ] | $d_p$<br>[m]    |
| 997.1                             | 8.94  | 71.96   | 2.42  | 1.39  | 0.003,<br>0.005 |

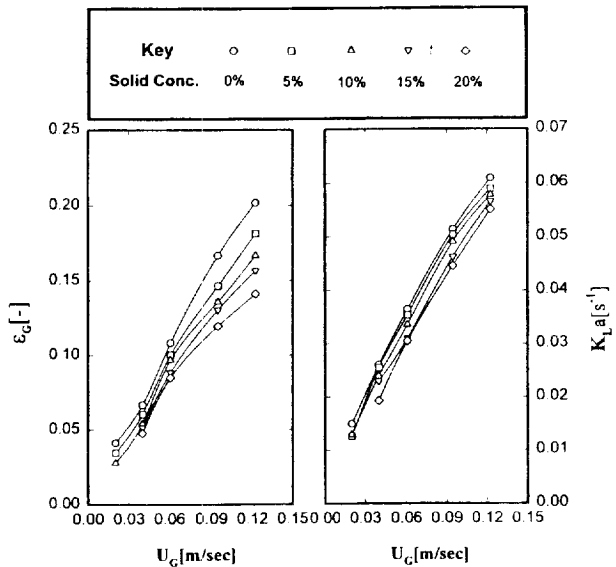


Fig. 3. Effect of superficial gas velocity on  $\epsilon_g$  and  $K_L a$  ( $D_i=0.09$  m,  $d_p=0.003$  m).

### 2-3-3. 액상용량 물질전달계수

액상용량 물질전달계수,  $K_L a$ 의 산출은 용액속에 공기 중의 산소를 물리적으로 흡수시키는 방법[2]과 용액속에  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 를 첨가하여, 이를 산화시켜 구하는 방법[11]이 있으나 본 실험에서는 물리적 흡수 방법으로 실험하였으며, 용존산소의 측정은 산소센서(YSI CO., INC., U.S.A., Model 58)를 사용하여 측정하였다.

먼저 용액 중의 산소가 없어질 때까지 탭내에 질소를 공급하여 용액 중의 산소를 제거한 다음 산소의 초기농도,  $C_0$ 를 측정 후 다시 밸브를 열어 공기를 유속에 따라 일정시간 탐속으로 분산시켜 산소농도,  $C$ 를 측정하고 또한 포화산소농도,  $C'$ 는 공기를 용액 중에서 충분히 포화시킨 후 측정하였다. 이때 식 (2)와 같이 산소농도  $C$ 와 시간  $t$ 의 관계를 반대수 방정식에서 구한 기울기로부터 액상용량 물질전달계수  $K_L a$ 를 얻었다.

$$K_L a = -[2.303(1 - \epsilon_g)/t] \log[(C' - C)/(C' - C_0)] \quad (2)$$

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1. 기체체류량과 액상용량 물질전달계수에 미치는 제인자

#### 3-1-1. 기체속도

Fig. 3에서 나타난 바와 같이 기체속도가 증가함에 따라 기체체류량과 액상용량 물질전달계수는 증가하였으며, 기체속도가 낮은 0.02001 m/sec에서는 입자농도의 증가에 따른 기체체류량의 변화폭이 작아짐을 알 수 있다. 이것은 기체속도가 증가할수록 기-액간의 접촉면적이 증가하기 때문이고, 낮은 유속에서는 입자농도의 증가에 따라 기-액-고 삼상 유동에 대한 저항이 증가하여 환형관에서의 순환속도의 감소와 동시에 현탁된 입자에 의한 소포(거품)속도의 증가에 기인한다.

#### 3-1-2. 입자의 농도

Fig. 4는 흡출관 높이 0.5 m, 정지액위를 0.7 m로 하여 흡출관 직경을 각각 0.05 m, 0.075 m 및 0.09 m로 변화시켜, 0.003 m 요소수지의 입자농도 변화에 따른 기체체류량과 액상용량 물질전달계수의 변화를 나타낸 것인데 Fig. 4에서와 같이 요소수지 입자의 농도가 증가함에 따라 기체체류량과 액상용량 물질전달계수는 감소하였다. 이는 액상보다 밀도가 높은 요소수지 입자의 농도가 증가함으로써 입자

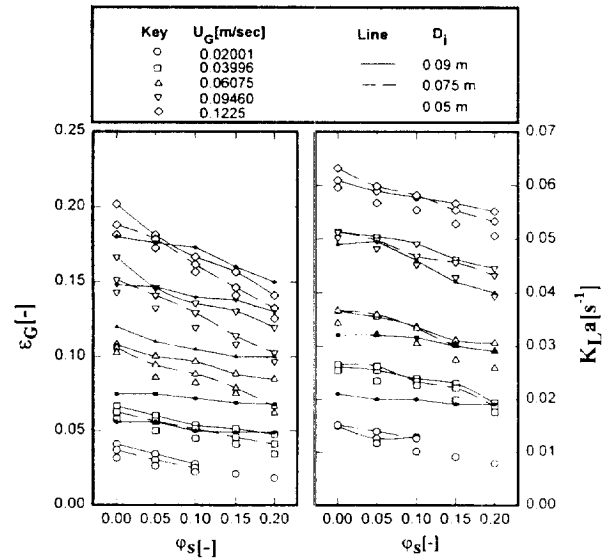


Fig. 4. Effect of solid concentration on  $\epsilon_g$  and  $K_L a$  ( $d_i=0.003$  m).

cf. Koide's exp.[Ref. 4]:  $D_i=0.082$  m,  $d_p=0.0029$  m

Key:

$U_G$ [m/sec]: 0.021 0.035 0.055 0.10 0.15

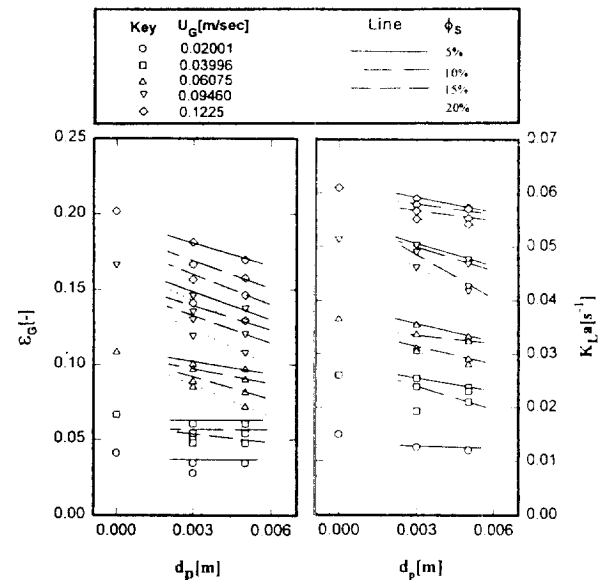


Fig. 5. Effect of particle size on  $\epsilon_g$  and  $K_L a$  ( $D_i=0.09$  m).

의 불균일로 인해 기포합체현상이 심해지기 때문이며 흡출관에서 환형관으로의 순환유속이 감소되고 와류가 형성되는 흡출관의 상단 부분과 하단부분에서 입자로 인해 유동에 장애를 받아 와류효과가 감소되기 때문이다.

따라서 흡출관의 최상단 부분에서 기포의 탈포속도가 증가되어 기포량이 감소되므로 상승기포가 액상과의 계면에서 접촉효과가 낮아지고 물질전달이 원활하지 못해 액상용량 물질전달계수가 감소한다. 또한 칼슘알지네이트의 구형입자를 현탁시킨 Koide[4]의 실험 경우도 본 실험의 경우와 같이 입자의 농도가 증가함에 따라  $\epsilon_g$ 와  $K_L a$ 가 감소하는 경향이나 본 실험인 요소수지 입자보다 유사한 기체속도에서  $\epsilon_g$ 와  $K_L a$ 가 훨씬 크게 나타났는데 이는 요소수지 입자보다 칼슘알지네이트의 밀도가 낮기 때문이다.

#### 3-1-3. 입자의 크기

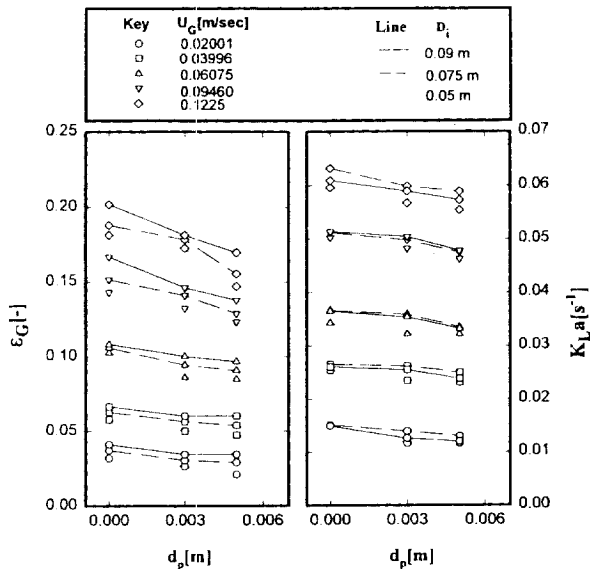


Fig. 6. Effect of particle size on  $\epsilon_G$  and  $K_La$  ( $\phi_s=5\%$ ).

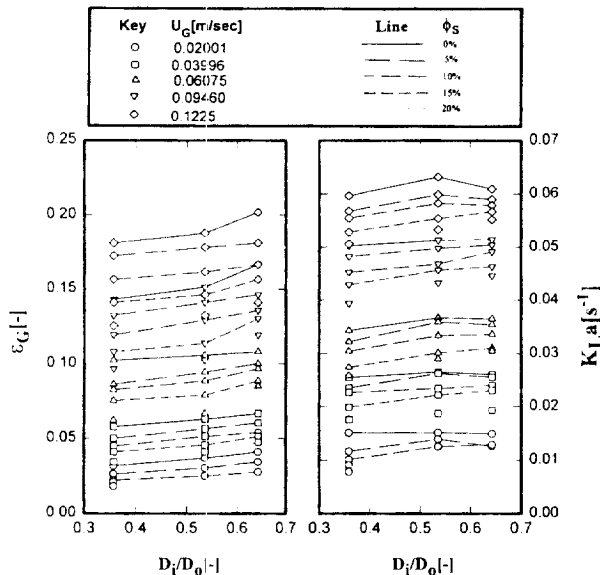


Fig. 7. Effect of diameter ratio of draught tube to bubble column on  $\epsilon_G$  and  $K_La$  ( $d_p=0.003$  m).

Fig. 5에서 나타난 바와 같이 요소수지 입자의 농도가 증가하고 입경이 커질수록 기체체류량과 액상용량 물질전달계수는 감소하였다. 이는 입자의 직경이 커짐에 따라 단위입자의 표면적에 대한 중량비가 증가하여 부유성과 순환유속이 감소되어 기-액의 원활한 접촉을 방해하기 때문이다.

Fig. 6은 입자의 농도가 5%일 때 흡출관의 직경 변화에 따라 요소수지의 입경에 대한 기체체류량과 액상용량 물질전달계수를 나타내었다. Fig. 6에서와 같이 요소수지의 입경이 커지고 흡출관의 직경이 감소함에 따라 기체체류량과 액상용량 물질전달계수는 감소하였다.

이는 흡출관의 단면적이 작을 때 환형관으로의 순환속도가 감소됨으로써 기-액의 원활한 접촉이 이루어지지 않아 계면의 면적이 감소하여 물질전달효과가 감소하기 때문이다.

#### 3-1-4. 기포탐과 흡출관의 직경비

Fig. 7은 흡출관 높이가 0.5 m, 흡출관 직경이 각각 0.05 m, 0.075

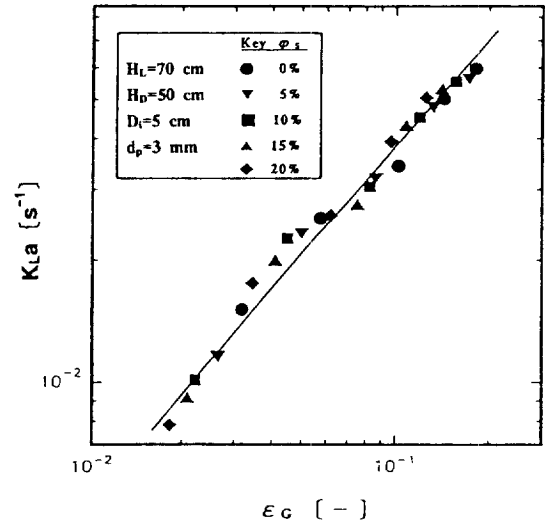


Fig. 8.  $\epsilon_G$  vs.  $K_La$ .

m, 0.09 m, 정지액위를 0.7 m로 하여 입경이 0.003 m인 입자의 농도를 0-20%로 변화시켜 각 기체속도에서 기포탐과 흡출관 직경비에 따른 기체체류량과 액상용량 물질전달계수의 변화를 나타내었다.

기체체류량은 기포탐과 흡출관의 직경비가 증가함에 따라 증가하였다. 이는 흡출관 단면적이 커져 기포의 상승에 따라 이루어지는 합체현상이 억제되고 흡출관의 직경비가 증가함에 따라 환형관의 단면적이 감소하여 환형관으로의 순환유속이 증가하여 탐내의 상단부와 하단부의 순환시간이 길어지기 때문이다.

액상용량 물질전달계수는 입자의 농도가 고농도일 때는 직경비가 증가함에 따라 다소 증가하였으나, 저농도일 때는 거의 변화가 없다. 이는 입자가 고농도일 때는 흡출관 직경비가 증가함에 따라 입자의 양이 순환되는 기-액계면에서 접촉효과를 다소 증가시키지만, 저농도의 경우 기포의 순환속도에 따른 기-액계면의 효과에는 아무런 영향을 주지 않기 때문이다.

### 3-2. 기체체류량과 액상용량 물질전달계수의 관계

Fig. 8에서 나타난 바와 같이 양대수 방안에 기체체류량에 대한 액상용량 물질전달계수의 변화를 플롯한 결과 기체체류량이 증가하면 거의 직선적으로 액상용량 물질전달계수도 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 기체체류량이 증가함에 따라 기-액간의 접촉면적이 커져 물질전달 효과가 크기 때문이다.

### 3-3. 기체체류량과 액상용량 물질전달계수의 상관식

기포탐에서 뉴튼류인 물에서의 기체체류량과 액상용량 물질전달계수를 기체속도, 용액의 물성 및 흡출관의 기하학적 형태 등에 따라 실험한 결과를 무차원화하면 다음과 같다.

#### 3-3-1. 기체체류량

실험에서 얻어진 자료 138개를 다중회귀분석을 통해 여러 가지 파라미터와 기체체류량의 관계를 무차원화하면 식 (3)과 같다.

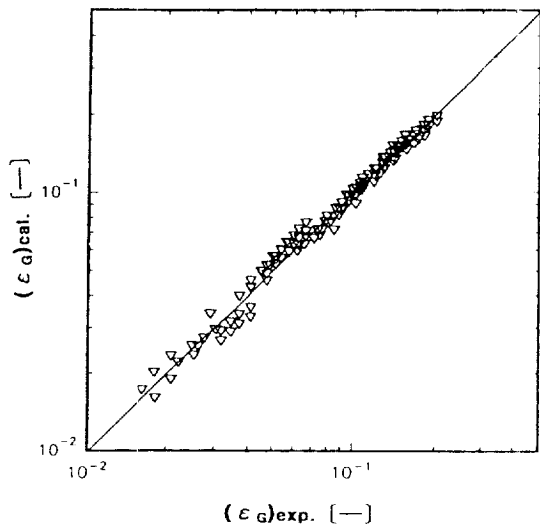
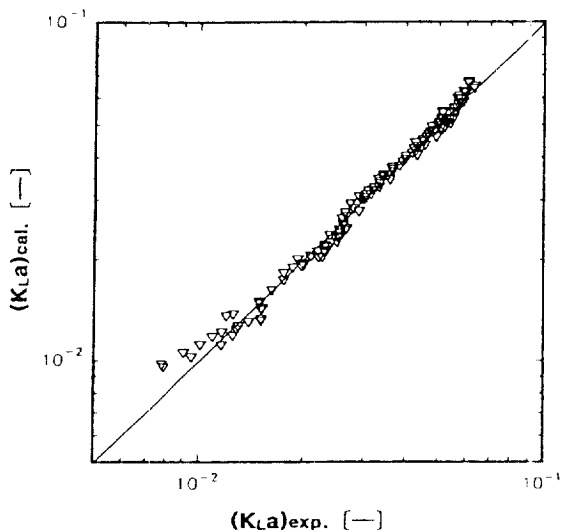
$$\frac{\epsilon_G}{(1-\epsilon_G)^4} = 8.8092 \times 10^{-7} \text{Re}^{1.3479} (1-\phi_s)^{-0.268} \left(\frac{d_p}{d_{pr}}\right)^{-0.1935} \left(\frac{D_t}{D_0}\right)^{0.4056} \quad (3)$$

여기서 무차원 인자들의 범위는 다음과 같다

$$3.1379 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 1.9126 \times 10^4$$

$$8.0 \times 10^{-1} \leq (1-\phi_s) \leq 1.00$$

$$6.0 \times 10^{-1} \leq (d_p/d_{pr}) \leq 1.00$$

Fig. 9. Comparisons of experimental and estimated  $\epsilon_g$  values.Fig. 10. Comparisons of experimental and estimated  $K_L a$  values.

$$3.571 \times 10^{-1} \leq (D_i/D_o) \leq 6.428 \times 10^{-1}$$

이때 상관계수는 99.4%이며 식 (3)으로부터 얻어진 계산치를 실험치와 비교한 결과를 Fig. 9에 나타낸 바 양호한 결과를 얻었다.

### 3-3-2. 액상용량 물질전달계수

실험에서 얻어진 자료 138개를 다중회귀분석을 통해 여러 가지 파라미터와 액상용량 물질전달계수와의 관계를 무차원화하면 식 (4)와 같다.

$$K_L a \frac{D_o^2}{D_t} = 4.9424 \times 10^4 \text{Re}^{0.5327} (1 - \phi_s)^{0.5719} \left( \frac{d_p}{d_{pR}} \right)^{0.0258} \left( \frac{D_i}{D_o} \right)^{0.0589} \epsilon_g^{0.3344} \quad (4)$$

여기서 무차원 인자들의 범위는 다음과 같다.

$$3.1379 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 1.9126 \times 10^4$$

$$8.0 \times 10^{-1} \leq (1 - \phi_s) \leq 1.00$$

$$6.0 \times 10^{-1} \leq (d_p/d_{pR}) \leq 1.00$$

$$3.571 \times 10^{-1} \leq (D_i/D_o) \leq 6.428 \times 10^{-1}$$

이때 상관계수는 99.4%이며 식 (4)로부터 얻어진 계산치와 실험치를 비교한 결과 Fig. 10과 같이 양호한 결과로 나타났다.

## 4. 결 론

요소수지 입자를 현탁시킨 이중관 기포탑내에서 기체채류량과 액상용량 물질전달계수를 기체속도, 입자농도, 입자크기 및 흡출관 직경을 각각 0.02001-0.1225 m/sec, 0-20 %, 0.003-0.006 m 및 0.05-0.09 m의 범위에서 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 기체채류량과 액상용량 물질전달계수는 기체유속이 증가함에 따라 증가하였다.

(2) 기체채류량과 액상용량 물질전달계수는 입자의 농도와 크기가 증가함에 따라 감소하였다.

(3) 기체채류량은 흡출관 직경이 증가함에 따라 완만한 증가를 보였고, 액상용량 물질전달계수는 입자가 고농도일 때 흡출관 직경이 증가함에 따라 다소 증가하나 저농도일 때는 거의 영향이 없었다.

(4) 기체속도, 용액의 물성, 입자의 크기와 농도 및 흡출관의 직경비에 따라 기체채류량과 액상용량 물질전달계수에 대한 상관식을 실험자료의 다중회귀분석을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\epsilon_g}{(1 - \epsilon_g)^4} = 8.8092 \times 10^{-4} \text{Re}^{1.3429} (1 - \phi_s)^{0.268} \left( \frac{d_p}{d_{pR}} \right)^{-0.1935} \left( \frac{D_i}{D_o} \right)^{0.4050}$$

$$K_L a \frac{D_o^2}{D_t} = 4.9424 \times 10^4 \text{Re}^{0.5327} (1 - \phi_s)^{0.5719} \left( \frac{d_p}{d_{pR}} \right)^{0.0258} \left( \frac{D_i}{D_o} \right)^{0.0589} \epsilon_g^{0.3344}$$

## 감 사

본 논문은 1995년도 동아대학교 연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 사용기호

- A : gas-liquid interfacial area [ $\text{m}^2$ ]
- a : specific gas-liquid interfacial area based on aerated liquid volume [ $\text{m}^{-1}$ ]
- C : concentration of oxygen [ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $C_i$  : concentration of oxygen in gas-liquid interface [ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $C_o$  : initial concentration of oxygen [ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $C^*$  : saturated concentration of oxygen [ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $D_d$  : diameter of distribution plate [m]
- D : inner diameter of draught tube [m]
- $D_L$  : diffusivity of dissolved oxygen in liquid [ $\text{m}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ ]
- $D_o$  : inner diameter of column [m]
- $d_p$  : diameter of solid particle [m]
- $d_{pR}$  : diameter of the largest solid particle [m]
- $H_d$  : height of draught tube [m]
- $H_e$  : height of aerated liquid during operation [m]
- $H_l$  : height of clear liquid [m]
- $K_L a$  : volumetric liquid-phase mass transfer coefficient based on aerat-

ed liquid volume [sec<sup>-1</sup>]  
 n : number of holes in gas distributor [-]  
 Re : modified Reynolds number(=D<sub>o</sub>U<sub>G</sub>ρ<sub>L</sub>/μ<sub>L</sub>) [-]  
 Sh : Schmidt number(=K<sub>a</sub>aD<sub>o</sub>/D<sub>L</sub>) [-]  
 t : time [sec]  
 t<sub>w</sub> : wall thickness of draught tube [m]  
 U<sub>G</sub> : superficial gas velocity [m/sec]  
 V<sub>1</sub> : volume of liquid in a stagnant state [m<sup>3</sup>]  
 V<sub>2</sub> : volume of aerated during operation [m<sup>3</sup>]  
 V<sub>3</sub> : volume of draught tube [m<sup>3</sup>]

#### 그리스 문자

δ : hole diameter in gas distributor [m]  
 ε<sub>G</sub> : average gas holdup [-]  
 μ<sub>L</sub> : viscosity of liquid [kg·m<sup>-1</sup>·sec<sup>-1</sup>]  
 ρ<sub>L</sub> : density of liquid [kg·m<sup>-3</sup>]  
 ρ<sub>s</sub> : density of solid particle [kg·m<sup>-3</sup>]  
 σ<sub>L</sub> : surface tension of liquid [N·m<sup>-1</sup>]  
 φ<sub>s</sub> : solid concentration in slurry [%]

#### 참고문헌

1. Koide, K., Yasuda, T., Iwamoto, S. and Fukuda, E.: *J. Chem.*

- Eng. Japan*, **16**, 7(1983).  
 2. Koide, K., Sato, H. and Iwamoto, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **16**, 407(1983).  
 3. Koide, K., Yamazoe, S. and Harada, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 287(1985).  
 4. Koide, K., Shibata, K., Ito, H., Kim, S. Y. and Ohtaguchi, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **25**, 11(1992).  
 5. Fukuda, H., Shiotani, T., Okada, W. and Morikawa, H.: *J. Ferment. Technol.*, **6**, 619(1978).  
 6. Chisti, M. Y. and Moo-Young, M.: *Biotech. and Bioeng.*, **31**, 487 (1988).  
 7. Heck, J. and Onken, U.: *Chem. Eng. Sci.*, **42**, 1211(1987).  
 8. Onken, U.: "Bubble Columns", German/Japanese Symposium, 49 (1988).  
 9. Salvacion, J. L., Murayama, M., Ohtaguchi, K. and Koide, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **28**, 434(1995).  
 10. Muroyama, K., Yasunishi, A. and Mitani, Y.: "Hydrodynamics and Gas-liquid Mass Transfer in an Airlift Slurry Reactor", Proceedings 3rd Pacific Chem. Eng. Congress, 303(1983).  
 11. Akita, K. and Yoshida, F.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **12**, 77(1973).