

이중관 기포탑내에서 CMC수용액중의 기액간 물질전달

한승완 · 최일곤 · 윤영웅* · 김상렬

동아대학교 화학공학과

*동명전문대학 공업화학과

(1992년 10월 27일 접수, 1993년 6월 1일 채택)

Mass Transfer between Gas and Liquid through CMC Solutions in a Bubble Column with a Draught Tube

Seung Wan Han, Il Gon Choi, Young Woung Yun* and Sang Yeul Kim

Department of Chemical Engineering, Dong-A University

**Department of Industrial Chemistry, Dong-Myung Junior College*

(Received 27 October 1992; accepted 1 June 1993)

요 약

흡출관이 내장된 기포탑내에서 기체체류량 ϵ_g 와 용량액상물질전달계수 K_La 를 비뉴턴류인 CMC수용액의 농도, 기체속도, 흡출관의 직경 및 높이에 따라 실험하였다. 기체체류량 ϵ_g 는 용액의 농도감소와 흡출관의 직경비가 증가함에 따라 증가하고 흡출관의 높이에는 무관하였다. 용량액상물질전달계수 K_La 는 용액의 농도와 흡출관의 높이비가 증가함에 따라 감소하며 흡출관의 직경비에는 무관하였다. 기체체류량 ϵ_g 와 용량액상물질전달계수 K_La 에 대한 무차원식이 실험의 결과로부터 제안되었다.

Abstract—The gas holdup ϵ_g and volumetric liquid-phase mass transfer coefficient K_La in a bubble column with a draught tube were studied experimentally with variation of the concentration of CMC solutions, gas velocity and diameter and height of the draught tube. The gas holdup ϵ_g increased with decreasing concentration of CMC solutions and increasing the diameter ratio of the draught tube to column diameter but was not affected by H/H_T . The volumetric liquid-phase mass transfer coefficient K_La decreased with increasing concentration of CMC solutions and the height ratio of the draught tube to column height but was not affected by the diameter ratio of the draught tube to column diameter. Dimensionless equations of the gas holdup ϵ_g and the volumetric liquid-phase mass transfer coefficient K_La were proposed from the experimental results.

1. 서 론

이중관 기포탑은 칼럼내에 흡출관을 부착한 형태로서 고체로 인한 막힘의 문제가 없고, 용액의 조성을 쉽게 균일화할 수 있어 에어리프트형 반응기로써 폐수처리, 폭기조 및 발효공업 등에 널리 이용되고 있으며 합성수지의 제조과정중에 발생하는 수용성 미세분진이나 악취

성 폐가스를 처리하는 흡수탑이나 탈취탑 설계에도 적용될 수 있다. 또한 생체 고정화기술의 발달과 함께 균체의 효소 등을 이용하는 생체 촉매 반응장치로도 쓰여지고 있다.

최근에 Koide 등[1-11]은 단일기포탑과 이중관 기포탑에서의 임계기체속도, 액순환속도, 압력차 및 계면활성제의 영향을 검토하고 나아가서 이들 장치에서의 뉴

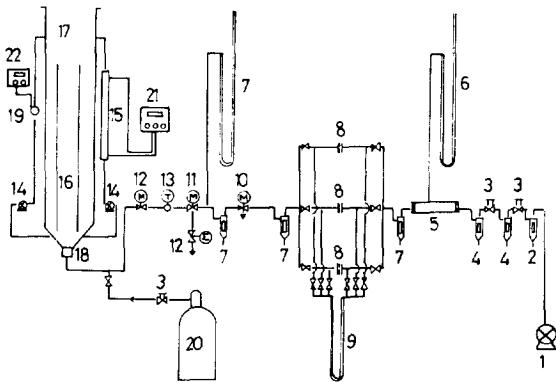


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

1. Compressor
2. Dust separator
3. Pressure regulator
4. Water separator
5. Separator(oil fume)
6. Manometer(mercury)
7. Filter
8. Orifice
9. Manometer(H₂O)
10. Flow rate control valve(needle)
11. 3-way solenoid valve
12. 2-way solenoid valve
13. Thermometer
14. Circulation
15. Heat exchanger
16. Draught tube
17. Column
18. Distributor
19. D.O. sensor
20. Nitrogen bomb
21. Temperature controller
22. D.O. meter

튼류와 현탁부유물의 특성에 따른 실험을 행하여 이들 사이의 상관관계를 수식화하였으며, Heck와 Onken[12] 등도 이들 흡출관의 존재 유무에 따른 현탁입자의 이력에 대한 효과를 검토하였다.

본 연구는 이중관 기포탑내에서의 비뉴튼류인 CMC (Carboxy Methyl Cellulose) 수용액을 사용하여 기액간 물질전달을 흡출관의 기하학적 형상인 직경과 높이, 분산판의 특성, 용액의 물성 및 기체유속에 따른 영향을 검토하고 이들 사이의 상관관계를 구명함으로써 탈취탑 및 해양 녹조류 배양 등의 장치설계를 위한 기초자료로 이용코저 한다.

2. 실험

Table 1. Properties of liquids used at 25°C

Solution	Conc. (wt%)	ρ_L (kg/m ³)	σ (N/m)	$D_L \times 10^9$ (m ² /s)	k (N·s ^m /m ²)	n
Deionized water	—	997.1	0.07196	2.60	—	—
CMC	0.05	997.1	0.07137	2.60	0.0013	0.998
	0.15	997.8	0.07105	2.60	0.0028	0.893
	0.30	998.2	0.07049	2.60	0.0075	0.809
	0.50	998.2	0.06826	2.60	0.0083	0.716
	0.70	1000.4	0.06643	2.60	0.0091	0.661

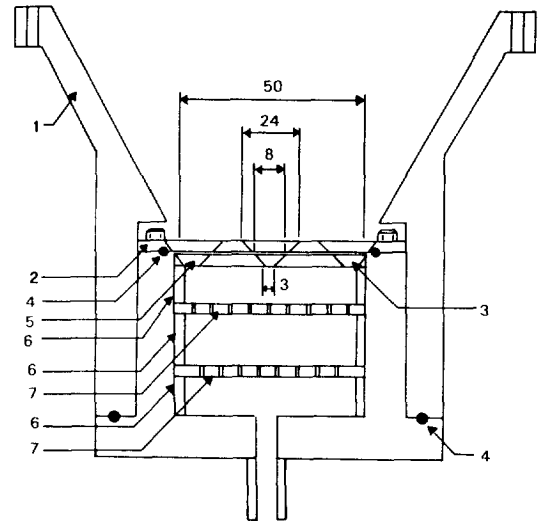


Fig. 2. Schematic diagram of gas distributor(unit:mm).

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

2-1. 실험장치

본 실험에 사용한 장치는 Fig. 1과 같다. 기포탑은 투명한 아크릴 원통으로 만들었으며 내경이 0.14 m, 높이가 2.8 m이었다. 탑내에 내경이 0.05-0.09 m이었고, 높이가 0.5-1.5 m인 흡출관(draught tube)을 설치하였으며, 기체 분산기는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 공경이 0.003 m인 5개의 구멍이 뚫린 스테인레스판에 300 mesh의 wire gauze를 덮고 그 위에 스테인레스 rim으로 고정시켰다.

기체속도 U_G 는 2.01×10^{-2} - 1.225×10^{-1} m/s로 하였다. 기체의 속도를 일정하게 하기 위하여 air tank를 부착하였으며, 압력설정을 위해서 먼저 수은 마노미터를 통과한 공기를 유속 변화에 따라 선택된 오리피스를 거쳐 다시 한번 마노미터를 조정한 후 탑 속으로 분산시켰다. 이 때 유량의 조절 밸브는 오리피스 후단에 설치하여 분산판의 마찰손실에 의한 공기의 유속 변화를 최소화 하였다.

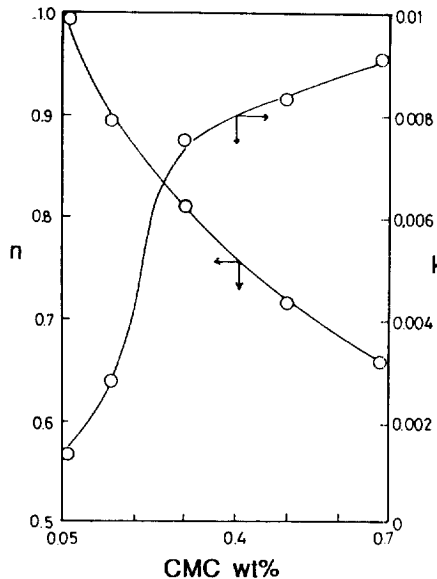


Fig. 3. Consistency index k and flow behavior index n as a function of CMC concentration.

2-2. 실험재료

실험에 사용된 물은 이온교환수이며 CMC(Carboxy Methyl Cellulose)는 일본 순정(純正)화학 주식회사의 일급시약으로 각 농도에 따라 수용액을 만들었다. 각 수용액의 물성은 Table 1과 같다.

2-3. 실험방법

2-3-1. 용액의 물성

각 수용액의 비중은 Gay-Lussac형 비중병으로, 표면 장력은 Du Noüy식 표면장력계(Fisher Model 20)로 측정하였다. 이온교환수의 점도는 Ostwald 점도계로 측정하고, 비뉴턴성 유체인 CMC의 수용액은 Brookfield Syncro-Lectric Viscometer(LV Model U.S.A.)를 사용하여 흐름조일도지수(flow consistency index) k 및 흐름거동지수(flow behavior index) n 를 각각 측정하여 Fig. 3에 나타내었으며, 이것에 의해 비뉴턴류인 CMC 용액의 유효점도를 Nishikawa의 식[13]에 따라 $\mu_{eff} = k(5000U_g)^{n-1}$ 로 계산했다. 또한 용액중의 산소확산 계수는 문헌[14]에서 구하여 Table 1에 요약되어 있다.

2-3-2. 기체체류량

25°C에서 액의 높이를 흡출관 상부 0.2 m로 맞춘 후 유수분리기와 포화기를 거쳐 조절기와 마노미터로 조정된 공기를 탑하부에 설치된 분산판을 통하여 2.01×10^{-2} ~ 1.225×10^{-1} m/s의 기체속도로 탑내에 분산시킨 다음, 각 수용액의 농도와 기체속도에 따라 정지시의 액체높이와 공기 유입시의 높이를 측정하여 식 (1)로부터 기

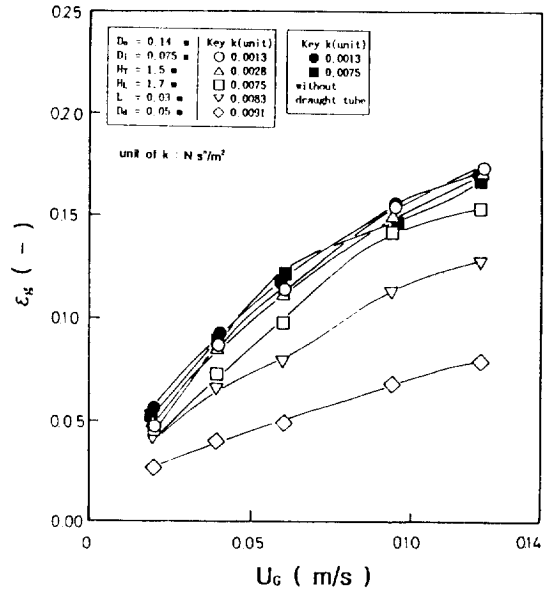


Fig. 4. Effect of U_g on ϵ_g in the column of CMC solutions.

체체류량을 계산하였다.

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

여기서 H_F 는 공기 유입시 액의 높이, H_L 은 정지시 액의 높이, D_o 는 기포탑의 내경, D_d 는 분산판의 직경 및 V_i 는 흡출관의 부피를 나타낸다.

2-3-3. 용액상량물질전달계수

액상용량물질전달계수 $K_L a$ 의 산출은 용액속에 공기중의 산소를 물리적으로 흡수시키는 방법[3]과 용액속에 Na_2SO_3 를 첨가하여, 이를 산화시켜서 구하는 방법[15] 등이 있으나 본 연구에서는 물리적 흡수방법으로 실험을 행하였으며, 용존산소의 측정은 산소측정기(Resomount, U.S.A., Model 4010)를 사용하여 측정하였다.

먼저 용액중의 산소가 없어질 때까지 탑내에 질소를 불어넣어 용액중의 산소를 제거한 다음 산소의 초기농도 C_0 를 측정한 후, 다시 밸브를 열어 공기를 유속에 따라 일정시간 탑속으로 분산시켜 산소 농도 C 를 측정하고, 또한 포화산소농도 C^* 는 공기를 용액중에서 충분히 포화시킨 후 측정하였다. 이 때 식 (2)와 같이 산소농도 C 와 시간 t 의 관계를 반대수 방안지에서 구한 기울기로 부터 액상용량물질전달계수 $K_L a$ 를 얻었다.

$$K_L a = -\{2.303(1 - \epsilon_g)/t\} \log\{(C^* - C)/(C^* - C_0)\} \quad (2)$$

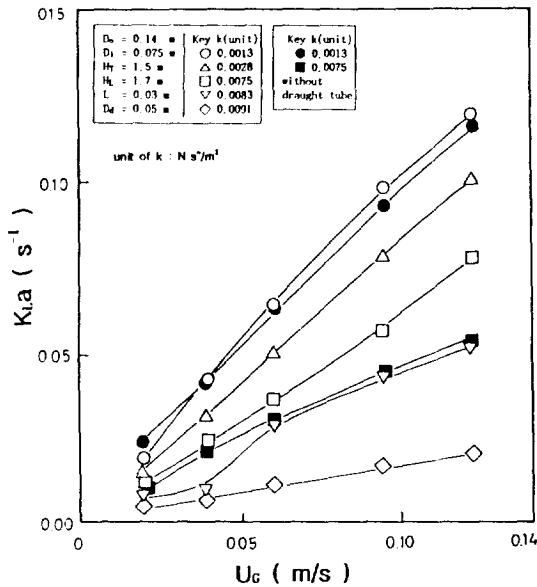


Fig. 5. Effect of U_g on K_La in the column of CMC solutions.

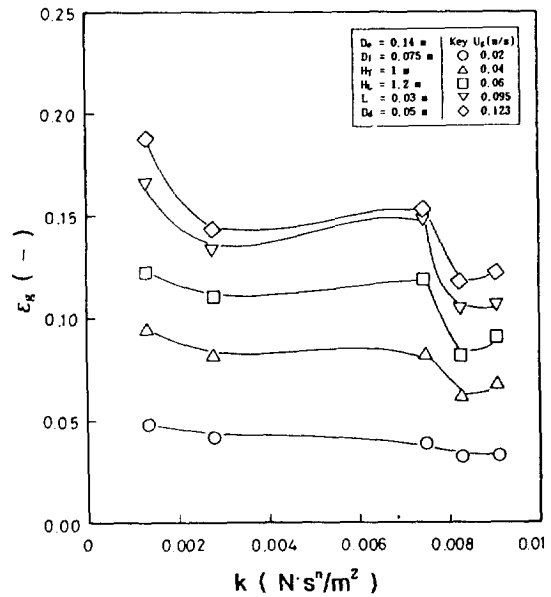


Fig. 6. Effect of CMC viscosity on ϵ_g .

3. 결과 및 고찰

3-1. 기체체류량과 용량액상물질전달계수에 미치는 제인자

3-1-1. 기체속도

Fig. 4 및 5에서처럼 기체속도가 증가하면 ϵ_g 과 K_La 는 증가한다. 그런데 흡출관을 사용하지 않을 때보다 기체 체류량 ϵ_g 는 적으나 용량액상물질전달계수 K_La 는 다소 크다. 이는 기체체류량의 경우는 흡출관의 직경과 기포탑의 직경비인 D_o/D_i 에 영향을 받으며 D_o/D_i 가 클수록, 즉 환형(annulus) 부분이 적을수록 기체체류량은 크므로 이로 인해 흡출관이 없는 경우가 다소 크며, 용량액상 물질전달계수는 흡출관의 입구와 출구의 순환용액과 기체와의 왕성한 교반으로 인한 난류성 혼합효과에 좌우되므로 흡출관을 사용할 때 접촉효과가 커져서 용량액상물질전달계수가 큰 것에 기인된다.

3-1-2. 용액의 농도와 흐름조밀도지수

Fig. 3에서와 같이 CMC용액의 농도가 증가함에 따라 흐름조밀도지수 k 가 증가한다. 따라서 Fig. 6에서와 같이 ϵ_g 는 CMC용액의 농도와 같은 변화를 하는 흐름조밀도지수 k 가 증가함에 따라 감소하며 기체속도가 클수록 감소 경향이 더욱 커지고 있다. 이는 용액 농도의 증가로 인해 흐름조밀도지수 k 가 증가하므로 해서 기포의 합체현상의 빈도가 증가함에 기인된다. 또한 Fig. 7에서와 같이 K_La 도 흐름조밀도지수 증가에 따라 감소하고 있으며 기체속도 증가에 따라 감소 경향은 ϵ_g 와 같이 더욱 커지고

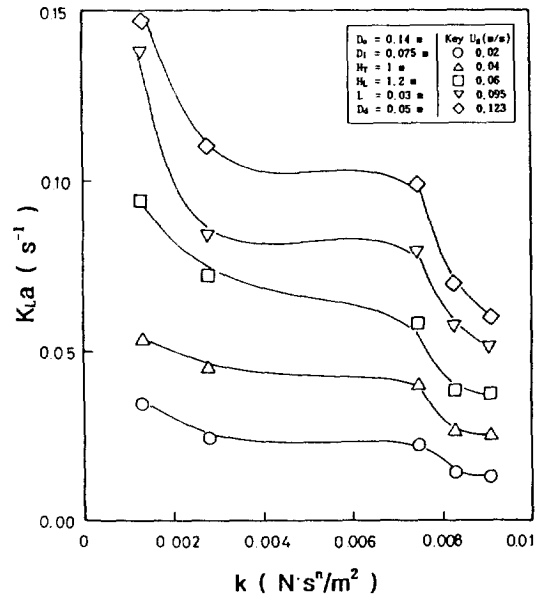
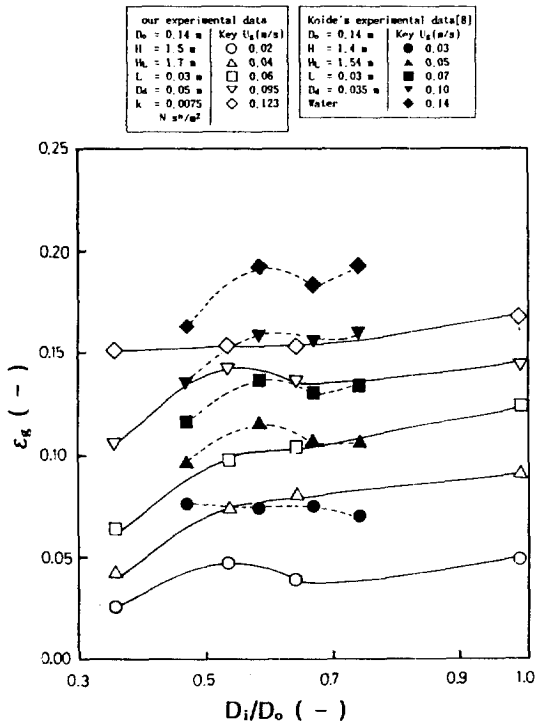
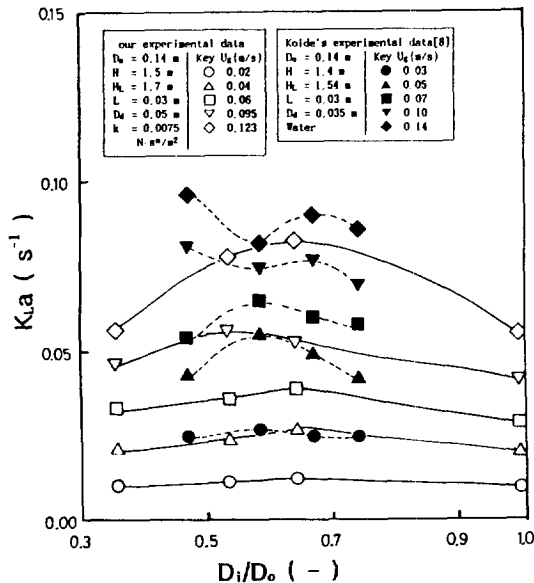


Fig. 7. Effect of CMC viscosity on K_La .

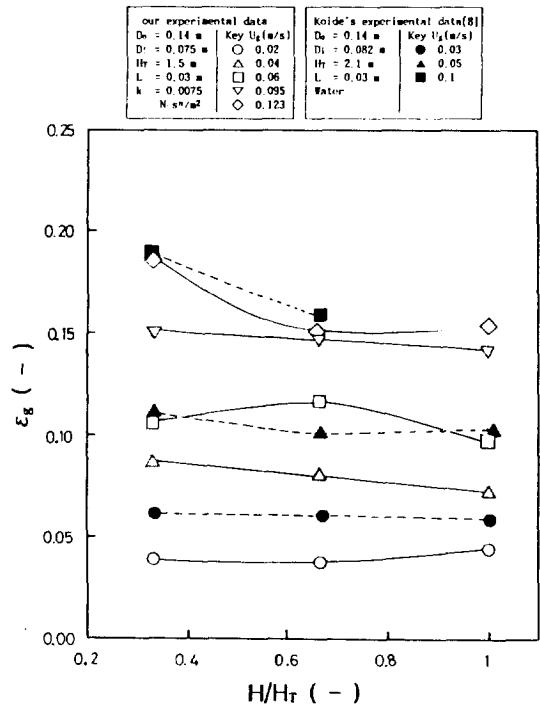
있다. 이는 기포의 합체현상이 커짐에 따라 기액간의 접촉면적이 작아져서 물질전달 효과가 감소함에 연유된다.

3-1-3. 흡출관의 직경

Fig. 8에서는 흡출관과 기포탑의 직경비 D_o/D_i 에 대한 기체체류량을 물에서 실험된 Koide[8]의 보고와 비유

Fig. 8. Effect of draught tube diameter on ϵ_g .Fig. 9. Effect of draught tube diameter on $K_L a$.

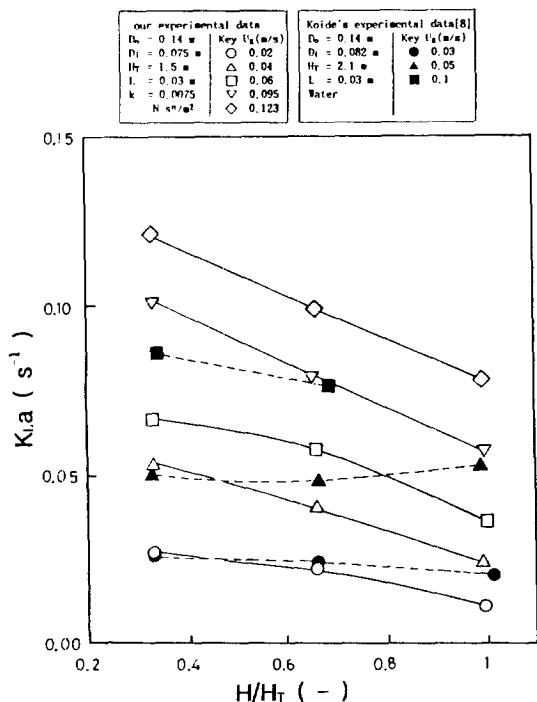
트류인 CMC수용액에서 얻어진 실험치를 함께 나타내었다. 그 결과 CMC수용액이나 물의 경우 양편 다 D_i/D_o 값이 증가하면 기체체류량이 조금 증가하는 것으로 나

Fig. 10. Effect of draught tube height on ϵ_g .

타났다. 이는 D_i/D_o 값이 커지면 환형부분보다 흡출관 내의 단면적이 커져서 기체체류량이 증가하는데 연유된다. 또한 Fig. 9는 D_i/D_o 에 대한 용량액상물질전달계수를 비뉴튼류인 CMC수용액에서 얻어진 자료와 물에서 측정한 Koide[8]의 실험치를 나타내었다. Fig. 9에서와 같이 용량액상물질전달계수는 D_i/D_o 에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 칼럼내에서의 순환액체의 물질전달은 주로 흡출관의 하단과 상단부분 근처에서 급격한 난류로 인한 물질전달 효과에 영향을 받고 흡출관이나 환형관내에서의 물질전달 효과는 크지 않기 때문이다.

3-1-4. 흡출관의 높이

Fig. 10에서는 흡출관 H/H_T 에 대한 기체체류량을 CMC수용액과 물에 대한 Koide의 실험결과를 함께 나타내었다. Fig. 10에서와 같이 두 경우 모두 H/H_T 는 가스흐름에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며 이는 기체체류량이 D_i/D_o 에만 영향을 받고 흡출관의 높이에는 무관하기 때문이다. 그러나 Fig. 11에서처럼 H/H_T 에 대한 용량액상물질전달계수는 물에 대한 Koide의 실험치는 거의 영향을 받지 않으나 비뉴튼류인 CMC수용액의 경우 H/H_T 가 증가하면 용량액상물질전달계수가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 순환용액내의 기체흡수효과는 와류가 형성되는 난류흐름부분인 흡출관의 상

Fig. 11. Effect of draught tube height on K_{La} .

단부분과 하단부분에서 가장 크다. 점도가 낮은 뉴튼류는 순환흐름이 커서 환형부분에 대한 H/H_T 에 거의 영향을 받지 않으나, 비뉴튼류의 경우 점도가 크기 때문에 순환시간이 길어 흡출관 상단과 하단부분에서의 접촉효과의 기회가 작은데 연유된다.

3-2. 여러 가지 파라미터에 대한 기체체류량과 용량액상물질전달계수

3-2-1. 기체체류량

기체의 속도, 용액의 농도 및 흡출관의 직경과 높이비에 따른 기체체류량을 최소자승법에 따라 상관식을 구하면 식 (3)과 같다.

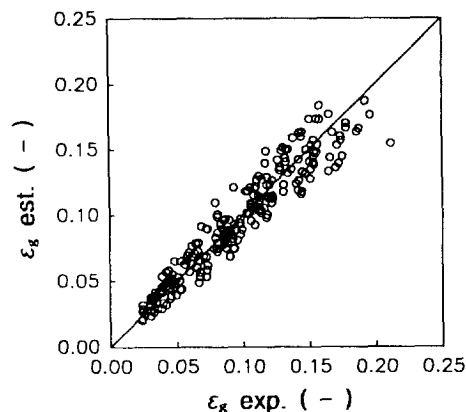
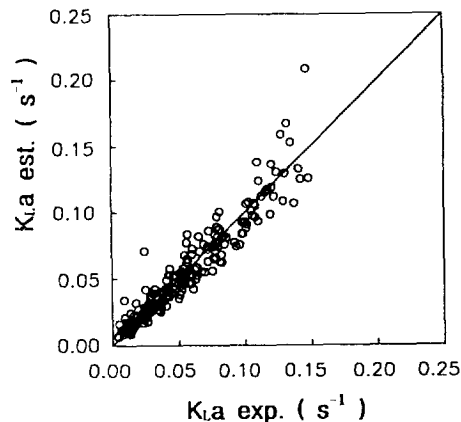
$$\frac{\varepsilon_g}{(1-\varepsilon_g)^4} = 2.96 \times 10^{-4} \text{Re}_G^{0.97} \text{Ga}^{0.07} (8 - \ln \text{Bo})^{0.52} (D_i/D_o)^{0.59} (H/H_T)^{-0.16} \quad (3)$$

여기서 Re_G 는 기체의 Reynolds 수, Ga 는 Galilei 수, Bo 는 Bond 수, D_i/D_o 는 기포탑과 흡출관의 내경비 및 H/H_T 는 흡출관의 높이에 대한 비이다.

이 때 실험범위는 아래와 같다.

$$1.985 \times 10^2 \leq \text{Re}_G \leq 1.210 \times 10^3$$

$$1.200 \times 10^8 \leq \text{Ga} \leq 6.527 \times 10^{10}$$

Fig. 12. comparison of experimental and estimated ε_g values.Fig. 13. comparison of experimental and estimated K_{La} values.

$$2.684 \times 10^3 \leq \text{Bo} \leq 2.903 \times 10^3$$

$$0.357 \leq D_i/D_o \leq 0.643$$

$$0.3333 \leq H/H_T \leq 1.0000$$

Fig. 12에 보인 바와 같이, 식 (3)으로부터 얻어진 추산치와 실험치를 비교한 결과로 실험자료 225개에 대해 약 7.3%의 오차(상관관계: $\gamma = 0.963$)로 양호한 결과를 나타내었다.

3-2-2. 용량액상물질전달계수

기체의 속도, 용액의 농도 및 흡출관의 직경과 높이비에 따른 용량액상물질전달계수를 최소자승법에 따라 상관식을 구하면 식 (4)와 같다.

$$K_{La} \frac{D_o^2}{D_L} = 7.58 \times 10^{-2} \text{Re}_G^{0.21} \text{Ga}^{0.1} (10 - \ln \text{Bo})^{18.4} (D_i/D_o)^{-0.24} (H/H_T)^{-0.44} \varepsilon_g^{0.87} \quad (4)$$

이 때 실험범위는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} 1.985 \times 10^2 &\leq Re_G \leq 1.210 \times 10^3 \\ 1.200 \times 10^8 &\leq Ga \leq 6.527 \times 10^{10} \\ 2.684 \times 10^3 &\leq Bo \leq 2.903 \times 10^3 \\ 0.357 &\leq D_i/D_o \leq 0.643 \\ 0.3333 &\leq H/H_T \leq 1.0000 \\ 3.57 \times 10^{-2} &\leq \epsilon_g \leq 1.925 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

식 (4)로부터 얻어진 추산치와 실험치를 비교한 결과 Fig. 13과 같이 실험자료 225개에 대해 약 9.7%의 오차 (상관관계: $\gamma=0.954$)를 가진 양호한 결과를 나타내었다.

4. 결 론

이중관 기포탑내에서 비뉴튼류인 CMC용액중의 가스 홀드업과 액상용량물질전달계수를 용액의 농도, 기체의 속도, 흡출관의 직경 및 높이에 따라 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기체체류량과 액상용량물질전달계수는 기체의 속도가 증가할수록 증가하였다.

(2) 기체체류량과 액상용량물질전달계수는 CMC용액의 흐름조밀도지수 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

(3) 흡출관의 직경비가 커짐에 따라 기체체류량은 조금 증가하나 용량액상물질전달계수는 거의 영향을 받지 않는다.

(4) 흡출관의 높이비가 커지면 용량액상물질전달계수는 감소하나 기체체류량에는 무관하였다.

(5) 실험에서 얻어진 자료로부터 기체체류량과 용량액상물질전달계수에 관한 식 (3)과 (4)를 얻었다.

사용기호

Bo : Bond number ($=dD_o^2\rho_L/\sigma$), dimensionless [-]
 C : concentration of oxygen [mol/m³]
 C₀ : initial concentration of oxygen [mol/m³]
 C* : saturated concentration of oxygen [mol/m³]
 D_d : diameter of distribution plate [m]
 D_i : inner diameter of draught tube [m]
 D_L : diffusivity of dissolved gas [m²/s]
 D_o : inner diameter of column [m]
 g : gravitational velocity [m/s²]
 H : height of draught tube [m]
 H_F : level of aerated liquid during operation [m]
 H_L : clear-liquid height [m]
 H_T : height of highest draught tube [m]

Ga : Galilei number ($=gD_o^3/\nu_{eff}^2$), dimensionless [-]
 k : fluid consistency index [N·sⁿ/m²]
 K_{La} : volumetric liquid-phase mass transfer coefficient based on aerated liquid volume [1/s]
 L : distance between lower end of draught tube and base plate of column [m]
 n : flow behavior index [-]
 Re_G : Reynolds number of gas ($=D_oU_g\rho_g/\mu_g$, dimensionless [-])
 t : real time [s]
 U_g : superficial gas velocity [m/s]
 V_i : volume of draught tube [m³]

그리스 문자

ϵ_g : average gas holdup [-]
 μ_{eff} : effective dynamic liquid phase viscosity [kg/m·s]
 μ_g : gas viscosity [kg/m·s]
 ν_{eff} : effective kinematic viscosity of liquid [m²/s]
 ρ_g : gas density [kg/m³]
 ρ_L : liquid density [kg/m³]
 σ : liquid surface tension [N/m]

참고문헌

- Koide, K., Yasuda, T., Iwamoto, S. and Fukuda, E.: *J. Chem. Eng. Japan*, **16**, 7(1983).
- Koide, K., Kurematsu, K., Iwamoto, S., Iwata, Y. and Horibe, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **16**, 413(1983).
- Koide, K., Sato, H. and Iwamoto, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **16**, 407(1983).
- Koide, K., Horibe, K., Kawabata, H. and Ito, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **17**, 368(1984).
- Koide, K., Takazawa, A., Komura, M. and Matsunaga, H.: *J. Chem. Eng. Japan*, **17**, 459(1984).
- Koide, K., Horibe, K., Kitaguchi, H. and Suzuki, N.: *J. Chem. Eng. Japan*, **17**, 547(1987).
- Koide, K., Iwamoto, S., Takasaka, Y., Matsuura, S., Takahashi, E. and Kimura, M.: *J. Chem. Eng. Japan*, **17**, 611(1984).
- Koide, K., Horibe, K., Kawabata, H. and Ito, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 248(1985).
- Koide, K., Yamazoe, S. and Harada, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 287(1985).
- Koide, K., Terasawa, M. and Takekawa, H.: *J. Chem. Eng. Japan*, **19**, 341(1986).
- Koide, K., Shibata, K., Ito, H., Kim, S. Y. and Ohtaguchi, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **25**, 11(1992).

12. Heck, J. and Onken, U.: *Chem. Eng. Sci.*, **42**, 1212 (1987).
13. Nishikawa, M., Kato, H. and Hashimoto, K.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **16**, 133(1977).
14. Nakanoh, M. and Yoshida, F.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **19**, 190(1980).
15. Akita, K. and Yoshida, F.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **12**, 77(1973).