

기포탑에서 점성수용액의 가스전달에 관한 연구

A Study on Gas Transfer of Viscous Aqueous Solutions in a Bubble Column

최 일 곤*·김 상 렬**
Il-Gon Choi·Sang-Yeul Kim

ABSTRACT

The gas holdup and volumetric liquid phase mass transfer coefficient with the variation of the concentration of CMC aqueous solution, gas velocity, diameter and area of the draught tube were investigated.

As the results of the experiments, the gas holdup and volumetric liquid phase mass transfer coefficient decreased with decreasing the concentration of CMC aqueous solution, increased with increasing the gas velocity and increased with increasing the circulated area ratio of the draught tube.

1. 서 론

기포탑은 에어리프트형 반응기로서 폐수처리공정, 광물침출장치등에 널리 사용되고 있으며, 산업현장의 제조공정중에 발생하는 수용성 미세분진이나 악취성 폐가스를 처리하는 흡수탑이나 탈취탑 설계에도 적용되고 있다.

최근에는 물리적 흡수에 의한 기포탑내에서 식물세포의 성장이나, 바다속의 녹조류 특성변화를 관찰할 수 있으므로 그 중요성이 높아지고 있다.

비뉴튼류에 대한 기액간 실험은 Marrucci¹⁾가 기

포의 액막에 대한 이론식을 밝혔으며, Schumpe 등²⁾은 슬러리 기포탑내에서의 기액간 물질거동에 대하여 조사하였다.

Sada 등³⁾은 3상에서의 물질전달과 기체체류량의 특성을 연구하였으며, Wakao와 Smith⁴⁾는 pellet층매에서의 확산에 대한 효과를 검토하였다.

한편 Koide 등^{5~7)}은 뉴튼류와 현탁 부유물의 특성에 따른 실험을 행하였으며, Furusaki 등^{8,9)}은 여러가지 용액속에 부유된 겔의 확산이론을 검토하여 확산계수를 구하였다.

그러므로 본 연구에서는 기포탑내에서의 비뉴튼류인 CMC(Carboxy Methyl Cellulose)수용액을

* 동광화학(주)

** 동아대학교 화학공학과

사용하여 액의 농도, 기체 속도, 흡출관의 직경 및 높이의 변화에 따른 기체체류량과 액상용량물질 전달계수에 따른 영향을 검토하고 이들 사이의 상관관계를 구명함으로써 기포탑내의 물질전달에 의한 폐수처리, 수용성 합성수지 분진의 제진과 미반응 악취성 가스제거 시설 등의 장치설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

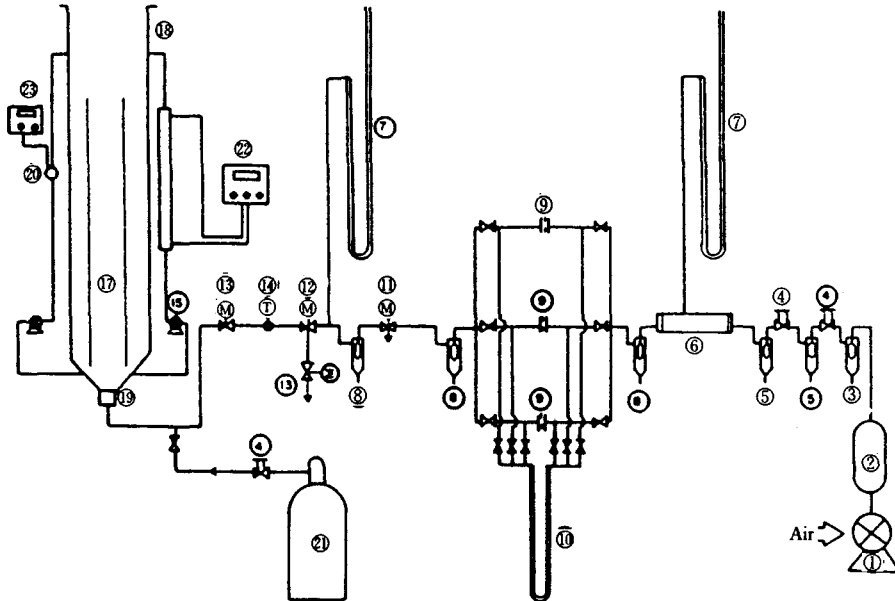
2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용한 장치는 Fig. 1과 같다. 기포탑

은 내경이 14cm이고 높이가 280cm인 투명한 아크릴 원통으로 만들었다. 탑내의 흡출관의 높이는 150cm이고 내경이 5cm, 7.5cm, 9cm를 사용하였으며, 탑하부의 기체분산기는 공경이 0.3cm인 5개의 구멍이 뚫린 스텐레이스 판에 300mesh의 wire gauge를 덮고 그 위에 스텐레이스 림으로 고정시켰다.

기체의 유속은 2.01~12.25cm/sec로 하였으며, 기체의 속도를 일정하게 하기 위하여 air tank를 부착하고, 압력설정을 하기 위하여 수은 마노미터를 조정한 후 탑속으로 분산시켰다. 이때 유량의 밸브는 오리피스 후단에 설치하여 분산판의 마찰 손



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

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

실에 의한 공기의 유속변화를 최소화 하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 실험재료

실험에 사용된 물은 이온교환수이며, CMC는 일본순정화학(주)의 일급시약으로 각 농도의 수용액을 만들었으며, 물성은 Table 1과 같다.

수용액의 비중은 Gay-Lussac형 비중병으로, 표면장력은 Du Nouy식 표면장력계로 측정하였다. 이온교환수의 점도는 Ostwald점도계로 측정하고 비뉴턴성 유체인 CMC의 수용액은 Brookfield Synchro Lectric Viscometer(LV Model U. S. A)를 사용하여 흐름조밀도 지수(Flow consistency index) K 및 흐름거동지수(Flow behavior index) n을 각각 측정하였다.

또한 용액중의 산소확산계수는 문헌¹⁰⁾에서 구하였다.

Table 1 Properties of liquids used at 25°C

Solution	Conc wt%	ρ_L g/cm ³	σ dyne/cm	$D_L \times 10^5$ cm ² /sec	K dyne.sec ⁿ /cm ²	n
deionized water	-	0.9971	71.96	2.60	-	-
CMC	0.05	0.9971	71.37	2.60	0.013	0.998
	0.15	0.9978	71.05	2.60	0.028	0.893
	0.30	0.9982	70.49	2.60	0.075	0.809
	0.50	0.9988	69.26	2.60	0.083	0.716
	0.70	1.0004	66.43	2.60	0.091	0.661

2.2.2 기체체류량과 액상용량물질전달계수

25°C에서 액의 높이를 170cm로 맞춘 후 유수분리기와 제습기를 거쳐 조절기와 마노미터로 조정된 공기를 탑하부에 설치된 분산판을 통하여 기포탑내에 분산시킨 다음, 각 수용액의 농도와 기체 유속의 변화에 따라 정지시의 액체 높이와 공기 유입시의 액체 높이를 측정하여 식 (1)로 부터 기체 체류량을 측정하였다.

$$\epsilon_g = \frac{(H_F - H_L) \frac{\pi}{4} D_0^2}{\left\{ H_F - \frac{1}{2} (D_0 - D_d) \sqrt{3} \right\} \frac{\pi}{4} D_0^2 + \frac{\pi}{24} (D_0^3 - D_d^3) \sqrt{3} - V_i} \dots (1)$$

또한 액상용량물질전달계수 K_{La} 의 산출은 용액속에 공기중의 산소를 물리적으로 흡수시키는 방법과 용액속에 Na_2SO_3 를 첨가하여, 이를 산화시켜서 구하는 방법등¹¹⁾이 있으나 본 연구에서는 물

리적인 흡수방법으로 실험을 행하였으며, 용존산소의 측정은 산소측정기(Resomount, U. S. A., Model 4010)를 사용하여 측정하였다.

먼저 용액중의 산소가 없어질 때까지 기포탑내에 질소를 불어넣어 용액중의 산소를 제거한 다음 산소의 초기농도 C_0 를 측정한 후, 다시 밸브를 열어 공기를 유속에 따라 일정시간 기포탑 속으로 분산시켜 산소농도 C를 측정하였다.

또한 포화산소농도 C^* 는 공기를 용액중에서 충분히 포화시킨 후 측정하였다. 이때 식 (2)와 같이 산소농도 C와 시간 t의 관계를 얻을 수 있으며, 직선의 기울기로 부터 액상용량물질전달계수를 얻었다.

$$K_{La} = - \left\{ 2.303(1 - \epsilon_g)/t \right\} \log \left\{ (C^* - C) / (C^* - C_0) \right\} \dots (2)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기체유속의 영향

Fig. 2, 3은 흡출관의 내경이 5cm일때 기체유속의 변화에 따른 기체체류량과 액상용량물질전달계수를 나타내었다.

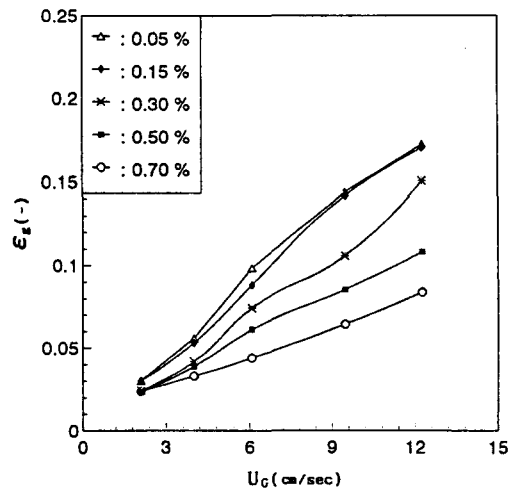


Fig. 2 Effect of gas velocity on gas holdup

Fig. 2는 기체체류량에 미치는 인자를 나타낸 것으로 기체의 유속이 증가할 수록 증가하고 있으나, CMC의 농도가 0.05~0.15%의 범위에서는

그 차이가 그다지 나타나고 있지 않다. 이것은 흐름 조밀도의 급격한 증가로 인하여 낮은 농도 범위에서는 기체의 합일현상의 변화가 유사하기 때문이다.

또한 Fig. 3은 액상용량물질전달계수에 미치는 인자의 영향을 나타낸 것으로 기체유속의 변화에 대한 액상용량물질전달계수는 농도가 0.05~0.3w%일 경우에는 기체유속의 증가에 따라 급속히 증가하고 있으나, 0.5~0.7w%의 경우는 완만한 증가를 나타내고 있다.

이는 낮은 농도에서는 K값의 급격한 증가로 기포의 합일현상이 크게 감소하고, 높은 농도에서는 K값의 완만한 증가로 기포의 합일현상이 둔화되기 때문이다.

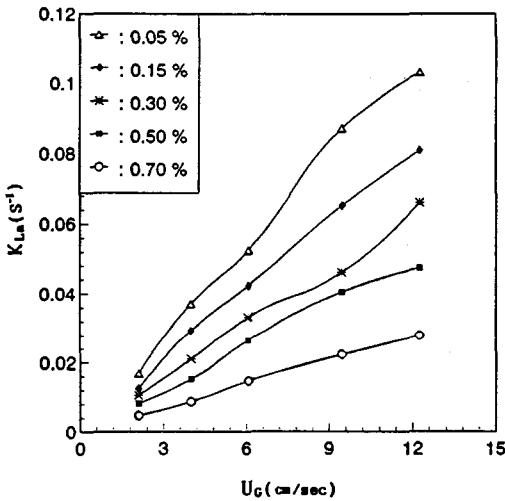


Fig. 3 Effect of gas velocity on liquid phase mass transfer coefficient

3.2 농도의 영향

Fig. 4, 5는 흡출관의 내경이 5cm일때 CMC수용액의 농도에 따른 기체체류량과 액상용량물질전달계수를 나타낸 것으로서 CMC농도가 증가할수록 감소하고 있다. 특히 높은 농도에서는 이러한 감소 경향이 완만하게 나타나고 있다. 이는 농도 증가에 비해 흐름조밀도정수의 증가가 완만하여 기포의 합일현상이 둔화되기 때문이다.

3.3 흡출관 면적비의 영향

Fig. 6에서의 기체체류량은 흡출관의 면적비가

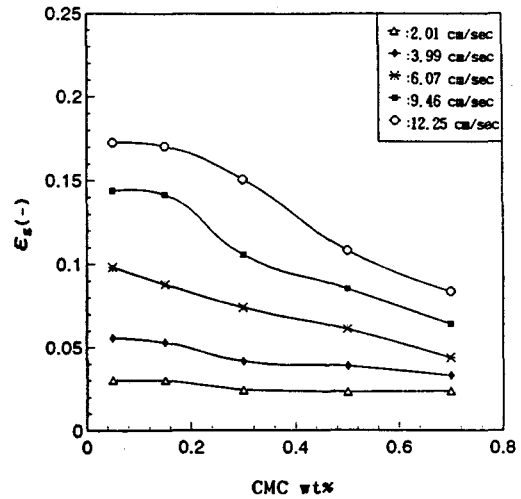


Fig. 4 Effect of different CMC aqueous solution on gas holdup

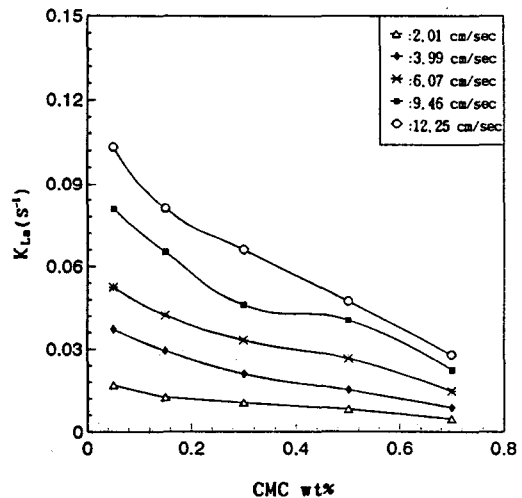


Fig. 5 Effect of different CMC aqueous solution on liquid phase mass transfer coefficient

커짐에 따라서 다소 증가하고 있다. 이는 흡출관 내부의 단면적 증가에 기인된다.

또한 Fig. 7의 액상용량물질전달계수는 기체의 유속이 6.07cm/sec이하에서는 흡출관의 면적비가 커짐에 따라서 증가하고 있으나, 기체의 유속이 9.46cm/sec이상에서는 면적비가 0.4058에서 급격하게 증가하고, 면적비가 0.7116에서는 약간 감소하고 있다. 이는 기체의 유속이 낮은 상태에서는

일반적 현상인 기체체류량이 증가하면 기액접촉 면적이 증가하므로 액상용량물질전달계수가 증가하고, 기체의 유속이 높은 상태에서는 기포의 합일현상에 의한 기액간의 접촉면적이 감소하여 액상용량물질전달계수가 낮아지는 것으로 생각된다.

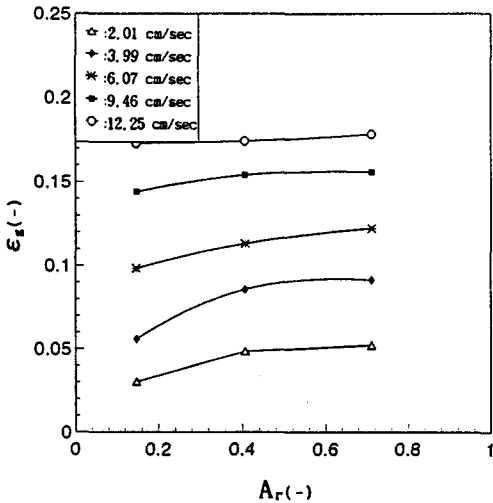


Fig. 6 Effect of column and draught tube area ratio on gas holdup

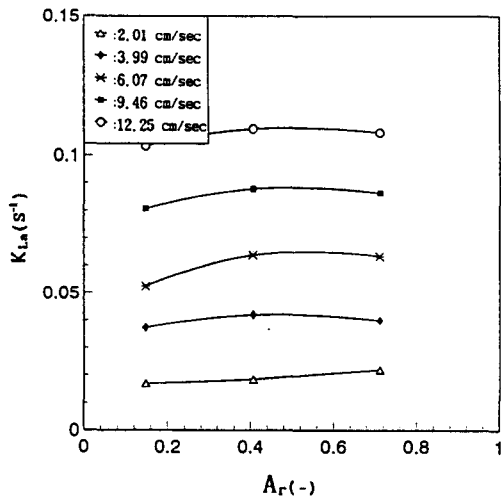


Fig. 7 Effect of column and draught tube area ratio on liquid phase mass transfer coefficient

3.4 기체체류량의 상관식

실험자료를 최소자승법에 따라 다음의 무차원 범위에서 기체체류량에 대한 상관식을 구하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{\epsilon_g}{(1-\epsilon_g)^4} = 2.188 \times 10^{-4} R_{eG}^{1.163} C_a^{-0.157} (A_i/A_0)^{0.261} (8 - \ln B_0)^{0.712} \dots \dots (3)$$

여기서, $198.54 \leq R_{eG} \leq 1210.04$
 $3.71 \times 10^{-4} \leq C_a \leq 2.429 \times 10^{-3}$
 $0.147 \leq A_i/A_0 \leq 0.7116$
 $2.684 \times 10^3 \leq B_0 \leq 2.903 \times 10^3$

식(3)에서 기체체류량의 상관도는 약 94.8%이었다.

Fig. 8에서와 같이 식 (3)으로 부터 얻어진 추산치와 실험치를 비교한 결과 CMC농도가 0.05~0.3w%의 경우는 양호한 결과를 나타내고 있으나, CMC농도가 0.5~0.7w%의 경우에는 상당한 차이를 나타내었다. 이는 CMC농도가 0.05w%에서는 표면장력의 변화가 거의 없어 bond number를 무시한 가정에 일치하나, CMC농도가 0.5~0.7w%에서는 표면장력의 변화에 따른 bond number를 고려해야 함에 기인된다.

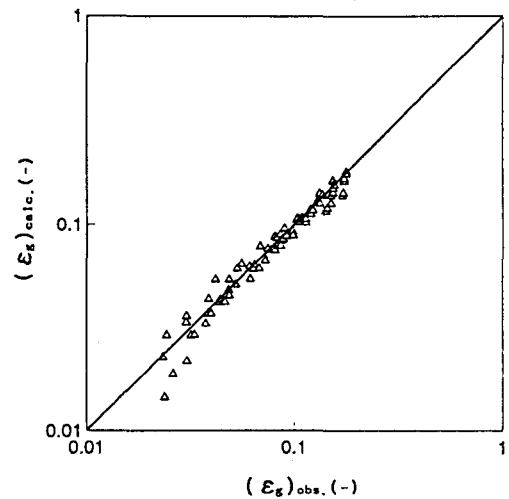


Fig. 8 Relation between experimental and calculated gas holdup values

3.5 물질전달계수의 상관식

실험자료를 최소자승법에 따라 다음의 무차원

범위에서 액상용량물질전달계수에 대한 상관식을 구하면 식 (4)와 같다.

$$K_{La} \frac{D_T^2}{D_L} = 3.984 \times 10^3 R_{eG}^{0.872} C_a^{-0.319} (A_i/A_0)^{-0.077} (8 - \ln B_0)^{0.973} \epsilon_g^{0.448} \dots\dots\dots (4)$$

- 여기서, $198.54 \leq R_{eG} \leq 1210.04$
 $3.71 \times 10^{-4} \leq C_a \leq 2.429 \times 10^{-3}$
 $0.147 \leq A_i/A_0 \leq 0.7116$
 $2.684 \times 10^3 \leq B_0 \leq 2.903 \times 10^3$
 $0.0238 \leq \epsilon_g \leq 0.1784$

식(4)에서 액상용량물질전달계수의 상관도는 약 98.2%이었다.

Fig. 9에서와 같이 식(4)로 부터 얻어진 추산치와 실험치를 비교한 결과 다소 차이를 나타내었는데 분산판의 기하학적 형태와 흡출관의 직경변화를 고려해야 함에 기인된다.

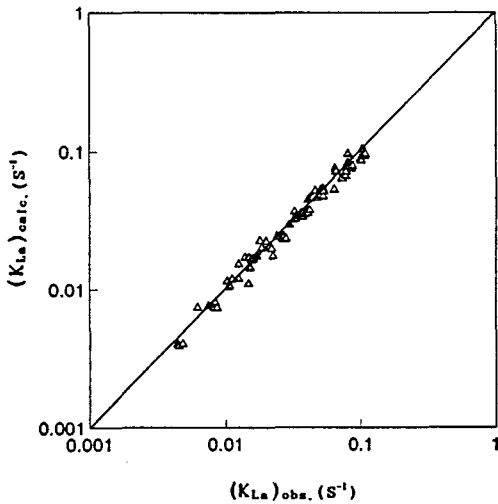


Fig. 9 Relation between experimental and calculated liquid phase mass transfer coefficient

4. 결 론

이중관 기포탑내에서 CMC수용액의 농도, 기체 유속, 흡출관의 직경 및 면적의 변화에 따른 기체 체류량과 액상용량물질전달계수를 얻었다.

- 1) CMC수용액의 농도가 증가함에 따라 기체체류량은 감소하였다.
- 2) 기체의 유속이 증가함에 따라 기체체류량은 증

가하였다.

- 3) 흡출관의 면적비가 증가함에 따라 기체체류량은 증가하였다.
- 4) CMC수용액의 농도가 증가함에 따라 액상용량물질전달계수가 감소하였다.
- 5) 기체의 유속이 증가함에 따라 액상용량물질전달계수가 증가하였다.
- 6) 흡출관의 면적비가 증가함에 따라 액상용량물질전달계수가 증가하였다.
- 7) 실험자료를 최소자승법에 따라 무차원 범위에서 기체체류량과 액상용량물질전달계수에 대한 상관식은 잘 일치하였다.

기 호 설 명

- A_i : cross-sectional area of draught tube(cm^2)
- A_0 : cross-sectional area of draught tube outside in column (cm^2)
- A_r : cross-sectional area ratio of draught tube and draught tube outside in column (-)
- B_0 : bond number($gD_T^2 \rho_L / \sigma$) (-)
- C : intergration of oxygen (mol/m^3)
- C_a : capiral number($U_g m / \sigma$) (-)
- C_0 : initial concentration of oxygen (mol/m^3)
- C^* : saturated concentration of oxygen (mol/m^3)
- D_d : dimeter of distribution plate (cm)
- D_L : diffusivity of dissolved gas (cm^2/sec)
- D_T : inner diameter of column (cm)
- H_F : level of aerated liquid during operation (cm)
- H_L : clear-liquid height (cm)
- K_{La} : volumetric liquid-phase mass transfer coefficient based on aerated liquid volume (1/sec)
- m : K multiplied($U_g=50$) exp^m (-)
- R_{eG} : Reynolds number of gas ($D_T U_g \rho_g / \mu_g$) (-)
- t : time (sec)
- U_g : gas velocity based on cross section of empty column and based on average static pressure in column (cm/sec)
- V_i : volume of draught tube (cm^3)

μ_g : viscosity of gas (g/cm. sec)
 ϵ_g : average gas holdup (-)
 σ : liquid surface tension (dyne/cm)
 ρ_L : liquid density (g/cm³)

참 고 문 헌

- 1) G. Marrucci, A Theory of Coalescence, Chem. Eng. Sci., Vol. 24, PP. 975~985, 1969.
- 2) A. Schumpe, A. K. Saxena and L. K. Fang, Gas/Liquid Mass Transfer in a Slurry Bubble Column, Chem. Eng. Sci., Vol. 42, pp. 1787~1797, 1987.
- 3) E. Sada et al., Gas Holdup and Mass Transfer Characteristics in a Three-Phase Bubble Column, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., Vol. 25, No. 2. pp. 472~476, 1986.
- 4) N. Wakao and J. M. Smith, Diffusion in Catalyst Pellets, Chem. Eng. Sci., Vol. 17, pp. 825~834, 1962.
- 5) K. Koide, K. Shibata, H. Ito, S. Y. Kim and K. Ohtaguchi, Gas Holdup and Volumetric Liquid Phase Mass Transfer Coefficient in a Gel Particle Suspended Bubble Column with Draft Tube, J. Chem. Eng. Japan, Vol. 25 No. 1, pp. 11~16, 1992.
- 6) K. Koide, K. Horibe, H. Kitaguchi and N. Suzuki, Contributions of Annulus and Draught Tube to Gas-Liquid Mass Transfer in Bubble Columns with Draught Tube, J. Chem. Eng. Japan, Vol. 17 No. 5, pp. 547~549, 1987.
- 7) K. Koide, S. Yamazoe and Schigehiko, Effects of Surface Active Substances on Gas Holdup and Gas Liquid Mass Transfer in a Bubble Column, J. Chem. Eng. Japan, Vol. 18, No. 4, pp. 287~292, 1985.
- 8) Y. Sun, S. Furusaki, Effect of Intraparticle Diffusion on the Determination of the Gas-Liquid Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in a Three-Phase Fluidized Bed Containing Porous Particles, J. Chem. Eng. Japan, Vol. 22, No. 5, pp. 556~559, 1989.
- 9) Y. Sun, S. Furusaki, A. Yamauchi and K. Ichimura, Gas Holdup and Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in a Three-Phase Fluidized Bed Bioreactor, Bio. Technol. Bio. Eng., Vol. 21, No. 1, pp. 15~20, 1989.
- 10) M. Nakanohand and F. Yoshida, Gas Absorption by Newtonian and Non-Newtonian Liquid in a Bubble Column, Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., Vol. 19, pp. 190~194, 1980.
- 11) K. Koide, H. Sato and S. Iwamoto, Gas Holdup and Volumetric Liquid Phase Mass Transfer Coefficient in Bubble Column with Draught Tube and With Gas Dispersion into Annulus, J. Chem. Eng. Japan, Vol. 16, No. 5, pp. 407~413, 1983.