

## 침전포말 분리에 관한 연구

이성식\* · 신정호

\*동아대학교 화학공학과

부산대학교 화학공학과

(1985년 6월 3일 접수, 1985년 11월 7일 채택)

## A Study on the Removal of Fine Particles by Dispersed Air Flotation

Sung-Sik Lee\* and Jeong-Ho Shin

*\*Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Dong-A University*

*Department of Chemical Engineering, College of Engineering,*

*Pusan National University*

(Received 3 June 1985; accepted 7 November 1985)

### 요 약

기포포말에 의한 미립자 분리시 입자의 분리기구를 충돌영역과 확산영역으로 나누어 각 영역에서의 모델식을 제시하고, 이들을 실험치와 비교하였으며, 두 영역에 함께 속하는 입자들의 혼합영역에 대하여서도 각 모델식을 동시에 적용하여 모델식의 적응성을 검토하였다.

본 연구에서의 입자는 평균입도가  $5.0\ \mu\text{m}$ ,  $0.9\ \mu\text{m}$ ,  $0.3\ \mu\text{m}$ 의  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 를, 계면활성제는 Cetylthylidimethyl Ammonium Bromide를 각각 사용하였고, 이들에 적용할 수 있는 실험식을 각각 구하였다.

**Abstract**—A theoretical model was proposed for the removal of fine particles by dispersed air flotation.

This model was divided into collision and diffusion region.

The results from the model were compared with those from experiments. Experiments were carried out using Cetylthylidimethyl Ammonium Bromide and suspension of  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  in the batch system.

A mixed system composed of both region particles was well expressed by the model combining the collision and diffusion model.

### 1. 서 론

용액 중에 존재하는 미립자나 콜로이드 입자의 분리는 공업적으로 대단히 중요하지만 입자의 크기가 너무 작아 재래식 침강이나 여과로는 효과적이고 경제적인 분리가 어렵다. 따라서 최근에는 상승하는 기포를 도입하여 흡착 분리시키는 침전포말분

리 조작이 널리 이용되고 있으며 [1], 많은 연구가 시도되고 있다 [2~12].

상승하는 기포에 의한 미립자분리 제거시 중요한 인자로는 입자의 크기, 기포의 크기, Hamaker 상수 등과 같은 물리적 성질과 입자와 기포표면에 관계되는 화학적 성질등이 있으며, 이들 인자 상호간에 관한 연구로는 부유속도에 대한 입자크기의 영향

[13], 입자크기와 부유속도와와의 관계[14], 기포에 의한 미립자 분리시 입자크기와 기포크기의 영향[15], 입자가 기포에 흡착되는 조건[16], 흡착과 임계부유[17], 침전포말 분리시 기초적 모델[18], 표면의 전하분포와 부유효과[19], 입자의 표면화학과 유체역학적 상호작용[20], 중유유입자의 분리제거[21], 수소기포에 의한 초미립자의 포집[22] 등 많은 연구가 있다.

그러나 실제 분리기구는 입자와 상승하는 기포 사이의 유체역학적 과정과, 각 계면간의 분자상호작용인 화학적 특성을 동시에 해석해야 하므로 대단히 복잡하여 아직까지 완전히 구명되지 않고 있다.

포말에 의한 입자의 기구는 입자의 크기에 따라 충돌영역(Collision Region)과 확산영역(Diffusion Region)으로 나눌 수 있는데, 충돌영역이란 기포표면과 입자반경사이에서 결정된 수력학적 궤도 안에서 입자와 기포가 충돌하는 영역으로  $3\mu\text{m}$  이상[23]의 크기를 갖는 입자가 여기에 속한다. 이 이하의 크기를 갖는 입자는 브라운 확산에 의하여[24] 기포표면에 흡착되는데 이 영역을 확산영역[23]이라 한다.

본 연구는 기포포말에 의한 미립자 분리시, 유체역학적 거동과 계면간의 분자 상호작용을 동시에 고려한 모델식을 얻기 위하여 분리 메카니즘을 입자의 크기에 따라 충돌영역(Collision Region)과 확산영역(Diffusion Region)으로 나누어 모델식을 제시하고, 포집제로 양이온 계면활성제인 Cetyldimethyl Ammonium Bromide를, 미립자는  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 를 각각 사용하여 입자의 크기  $0.05\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ , 기포 크기  $0.05\text{cm}\sim 0.22\text{cm}$ , 용액의 pH는 4~12범위에서 각각 실험하여 물리적 인자와 화학적 인자를 동시에 고려한 실험치와 모델식의 계산치와 비교하여 그 모델식의 타당성을 고찰하고, 또 각 모델식을 충돌영역에 속하는 입자와 확산영역에 속하는 입자의 혼합입자에 대해서도 동시에 적용하여 모델식의 적용성 여부를 검토하였다.

## 2. 이 론

충돌영역에서 입자의 포집효율(Collection Efficiency)을 상승하는 기포와 입자간의 충돌효율(Col-

lision Efficiency)  $E_1$  과 충돌한 입자가 기포에 흡착 동반되는 효율(Attachment Efficiency)  $E_2$  의 곱으로 보면 다음 식(1)과 같다.

$$E = E_1 \times E_2 \quad (1)$$

액내에서 기포가 수직상방향으로 운동한다면 한 개의 기포가 분리하는 입자의 총량( $N'_p$ )은 식(2)로 표시할 수 있으며

$$N'_p = E_1 \cdot E_2 \cdot v \cdot C'_p \quad (2)$$

dt 시간동안 분리되는 입자의 총량은 다음 식(3)과 같다.

$$dN'_p = n'_p(t) dt = E_1 \cdot E_2 \cdot v \cdot C'_p \cdot N_b / \theta \cdot dt \quad (3)$$

여기서  $v$ 는 한 개의 기포가 분리탐을 상승하는 공간이며  $C'_p$ 는 입자의 농도,  $N_b$ 는 기포의 수,  $\theta$ 는 탐내에서 기포의 체류시간이다. 따라서 t 시간 동안에 분리되는 입자의 총량은 다음과 같다.

$$N'_p(t) = \frac{N_b \cdot v \cdot E}{\theta} \int_0^t C'_p(t) dt \quad (4)$$

t=0에서  $C'_p = C'_{p0}$ 라고 하면 시간 t에서 탐내 입자의 농도( $C'_p(t)$ )는 다음 식(5)가 된다.

$$\begin{aligned} C'_p(t) &= C'_{p0} - \{N'_p(t) / (\frac{\pi}{4} \cdot L \cdot D_c^2)\} \\ &= C'_{p0} - \frac{N_b \cdot E}{\theta} \left(\frac{D_b}{D_c}\right)^2 \int_0^t C'_p(t) dt \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서  $D_b$ 는 기포의 직경,  $D_c$ 는 탐의 직경, L는 탐의 높이이다.

기체의 유량을 Q라면 기포의 수  $N_b$ 는  $Q \cdot \theta / (\frac{\pi}{6} \cdot D_b^3)$ 이므로 식(5)는 다음과 같다.

$$C'_p(t) = C'_{p0} - \left(\frac{3U_g \cdot E}{2D_b}\right) \int_0^t C'_p(t) dt \quad (6)$$

확산영역에서는 입자가 브라운 운동을 하므로 액내에서의 입자의 농도가 균일하다면 입자의 분리속도는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n''_p = K \cdot A \cdot (C''_p - C''_{pi}) \quad (7)$$

여기서 A는 기포표면적, K는 입자의 전달속도계수,  $C''_p$ 는 액 본체의 입자의 농도,  $C''_{pi}$ 는 경막에서의 입

자의 농도이다. 기-액 계면에서 액막층의 농도  $C_{pi}=0$ 로 가정하면  $dt$  시간 동안 확산에 의하여 분리되는 입자의 양 ( $N_p''$ )은 식(8)과 같다.

$$dN_p'' = n_p''(t) dt = K \cdot N_b \cdot \pi \cdot D_b^2 \cdot C_p''(t) dt \quad (8)$$

따라서  $t$  시간 동안 분리되는 입자의 양은 식(9)와 같다.

$$N_p''(t) = K \cdot N_b \cdot \pi \cdot D_b^2 \int_0^t C_p''(t) dt \quad (9)$$

$t=0$ 에서  $C_p'' = C_{p0}''$ 라면 시간  $t$ 에서 입자의 농도는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} C_p''(t) &= C_{p0}'' - N_p''(t) / \left( \frac{\pi}{4} \cdot L \cdot D_c^2 \right) \\ &= C_{p0}'' - \left( \frac{6 \cdot U_g \cdot K}{D_b \cdot U_b} \right) \int_0^t C_p''(t) dt \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $U_b$ 는 기포의 상승속도이다. 그러므로 탑내의 총입자의 평균농도 ( $C_p^I(t)$ )는 다음과 같이 식(6)과 식(10)의 합으로 된다.

$$C_p^I(t) = C_p^I(t) + C_p''(t) \quad (11)$$

식(6)과 식(10)의 해를 각각 구하여 식(11)에 대입하면 다음식(12)를 얻는다.

$$\begin{aligned} C_p^I(t) &= C_{p0}^I \cdot \text{Exp} \left( -\frac{3 U_g \cdot E}{2 D_b} \cdot t \right) \\ &+ C_{p0}'' \cdot \text{Exp} \left( -\frac{6 U_g \cdot K}{D_b \cdot U_b} \cdot t \right) \end{aligned} \quad (12)$$

실험결과와 식(12)의 비교에 의해 두 계의 인자  $E$ 와  $K$ 를 정하여 줌으로서 식(12)를 실제의 system을 만족시키는 모델로 발전시켜 나갈 수 있다.

여기서  $E$ 와  $K$ 는 계의 변수, 조작변수의 함수로 표시될 수 있다.

### 3. 실험

포말분리 장치는 Fig. 1과 같이 내경 4cm, 높이 100 cm인 유리관으로 되어 있으며 관 하단에는 50~200  $\mu\text{m}$ 의 공경을 가진 glass filter로 만든 4종의 분산판을 설치하였으며 이때 사진촬영으로 구한 평균 기포크기는 각각 0.05 cm, 0.1 cm, 0.17 cm, 0.22 cm이었다. 기체는 공기를 사용하였으며 분산판을

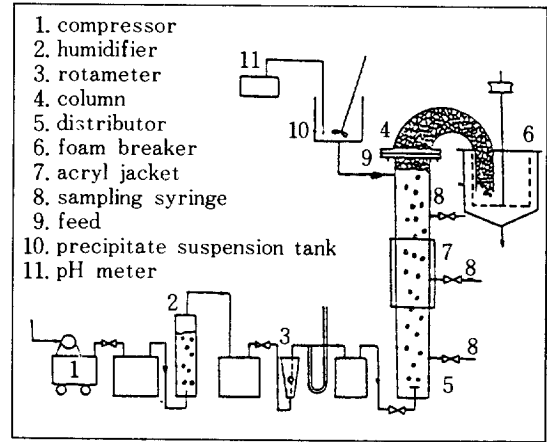


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

통하여 유량이 7.6 cm<sup>3</sup>/min로 25±0.1°C의 온도로 유지된 용액 중에 분산시켰다. 입자는  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (Union Carbide제)로 입도분포가 Fig. 2a, Fig. 2b와 Fig. 2c와 같이 충돌영역에서는 5.0  $\mu\text{m}$ 의 입자를 확산 영역에서는 0.3  $\mu\text{m}$  및 0.9  $\mu\text{m}$  입자를 각각 사용하였다. 계면활성 물질은 Cetyledimethyl Ammonium Bromide (東京化成제)로 농도는  $1 \times 10^{-4}$  mole/l로 하였다.

실험은 증류수 2l에 1.6g의 입자를 혼합시킨 뒤 일정농도의 계면활성제를 가하고 0.1 N-HCl와 0.1 N-NaOH를 사용하여 일정 pH로 조절하였다. 5분간 강하게 교반시킨 다음 이 현탁액을 분리탑에

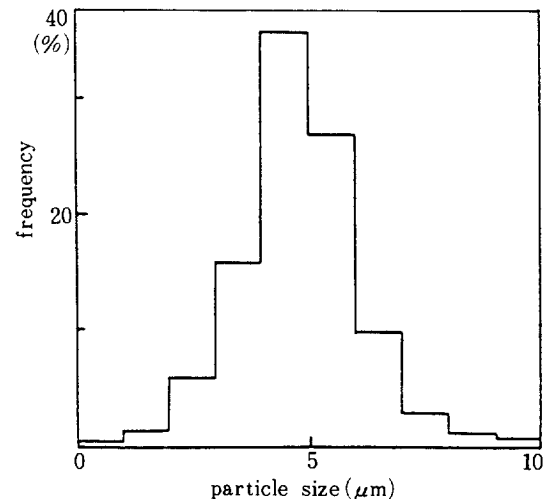
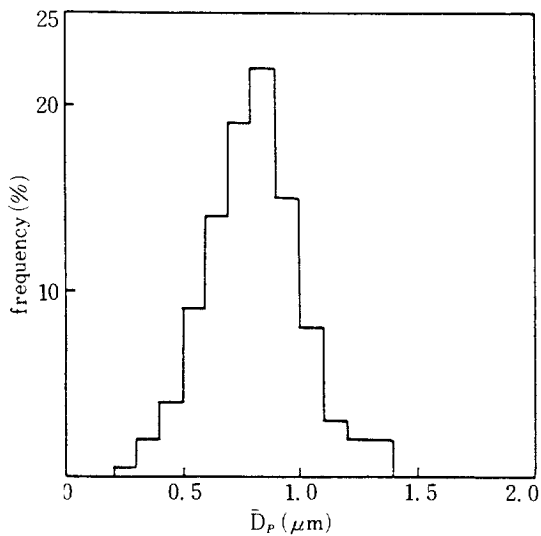
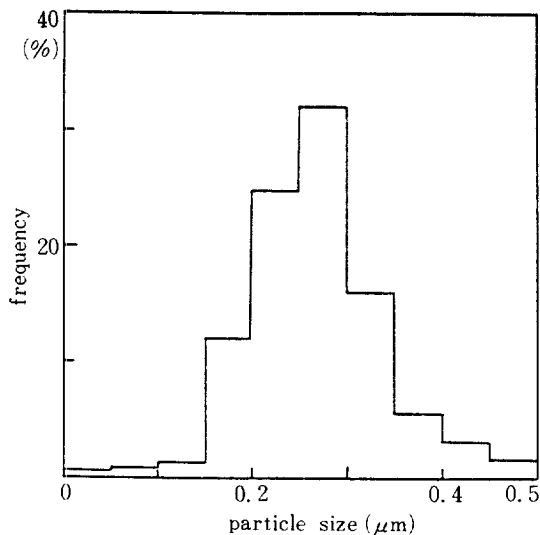


Fig. 2a. Particle size distribution  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

Fig. 2b. Particle size distribution  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ .Fig. 2c. Particle size distribution  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

채운 후 공기를 분산시켜 입자를 분리시켰다. 일정 시간 간격으로 세 지점 (Fig. 1. ⑧)에서 각각 5cc씩 취하여 혼합한 뒤 항온조에서  $100^\circ\text{C}$ 로 24시간 건조 후 중량분석법 (Microbalance, Sarcorius Model 450/M96)으로 농도를 각각 정량하였다. 4종의 분산판으로 얻어진 각 기포의 크기는 사진촬영으로 (Lens Makro Kilar D 1:2.8/4 cm, 노출시간 1/1,000 sec, 필름 ASA 1,000) 구하였으며, Sauter 평균직경 ( $\sum n d_i^3 / \sum n d_i^2$ )을 취하였다. 입자의 크기는 입도분석장치 (Luzex Model 450)로 각각 측정하여 평균치

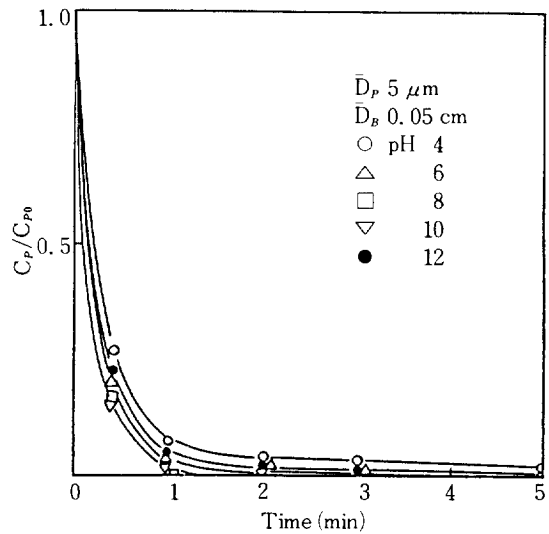


Fig. 3. Removal rate in collision region.

를 취하였다. 기포상승속도는 현탁액 높이 80cm를 통과하는데 소요되는 시간을 20회 직접 측정하여 그 평균치를 각각 구하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4-1. 충돌영역

충돌영역에서 pH와 기포크기의 변화에 따라 실험한 대표적인 결과는 Fig. 3과 같다.

전 pH 영역에서 빠른 속도로 분리가 일어났으며

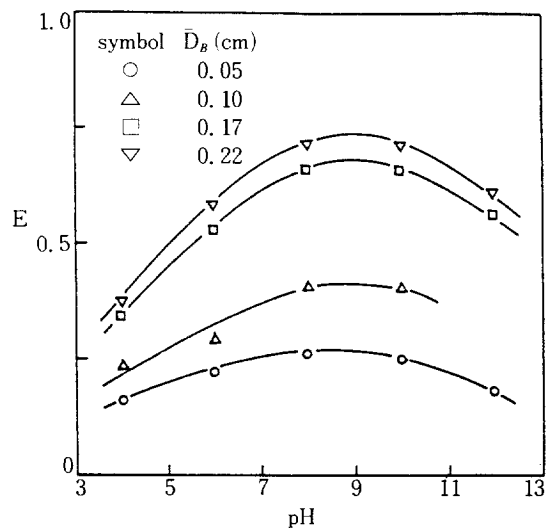


Fig. 4. Relation of collection efficiency to pH.

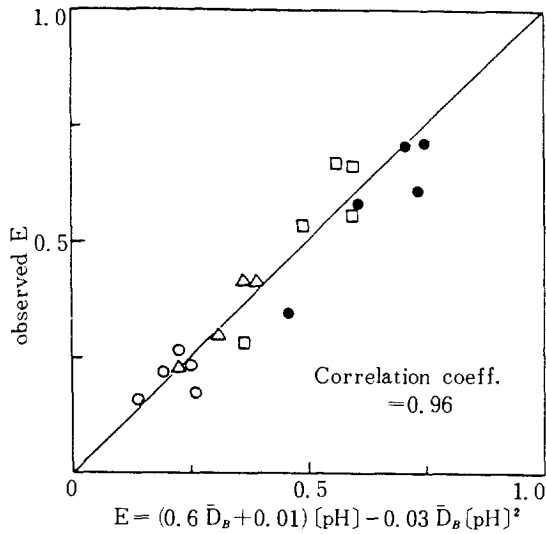


Fig. 5. Correlation of collection efficiency.

pH가 8~10 부근에서 가장 분리속도가 컸다. 또 기포의 크기가 작을수록 분리속도는 증가하였다. 이들 실험결과와 식 (6)을 이용하여 최소자승법으로 구한 기포의 포집효율은 Fig. 4와 같이 기포의 크기가 클수록 증가하였으며 기포 단위면적당 포집효율은 각 pH에 대하여 기포크기가 작을수록 증가하였으며 이는 Samygin[25]의 실험결과와 일치하였다. 또 각 기포크기에서 pH 8~10 사이에서 포집효율은 가장 컸으며 이는  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 는 물과 접촉하면 계면이 수화되어 pH에 따라 입자의 전하가 달라진다

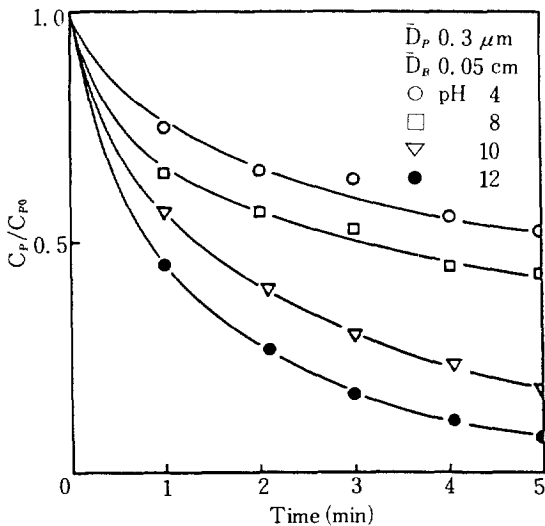


Fig. 6. Removal rate in diffusion region.

[26]. 알려진  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  입자의 전체 표면전하가 0인 등전점 pH 영역은 8~11[27]이므로 여기에 해당된다. Fig. 4에서 포집효율(E), pH 및 기포크기 간의 상관관계는 다음과 같이 되었다.

$$E = (0.6 \bar{D}_B + 0.01) [pH] - 0.03 \bar{D}_B [pH]^2 \quad (13)$$

식 (13)에서 계산한 E와 실험에서 구한 E를 Fig. 5에 도시한 결과 서로 잘 일치하였다.

#### 4-2. 확산영역

확산영역에서는 입자크기가 0.3  $\mu\text{m}$ 와 0.9  $\mu\text{m}$ 를 각각 실험하였으며 그 대표적인 결과는 Fig. 6과

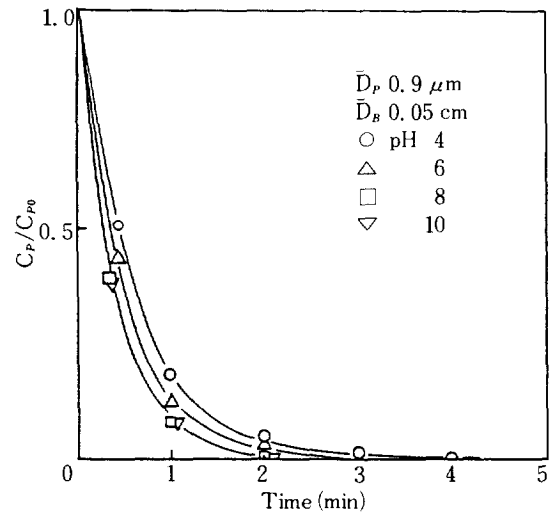


Fig. 7. Removal rate in diffusion region.

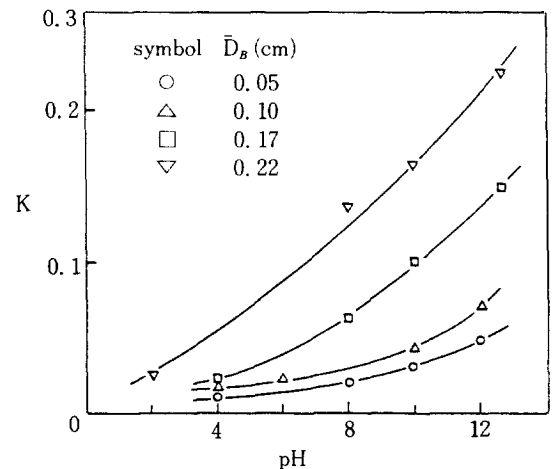


Fig. 8. Relation of particle transfer coefficient to pH.

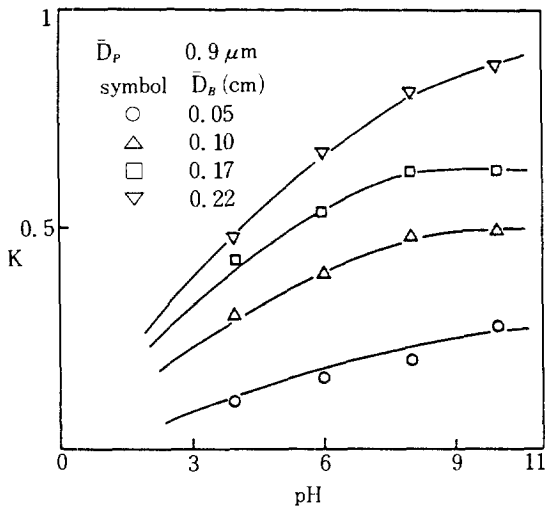


Fig. 9. Relation of particle transfer coefficient to pH.

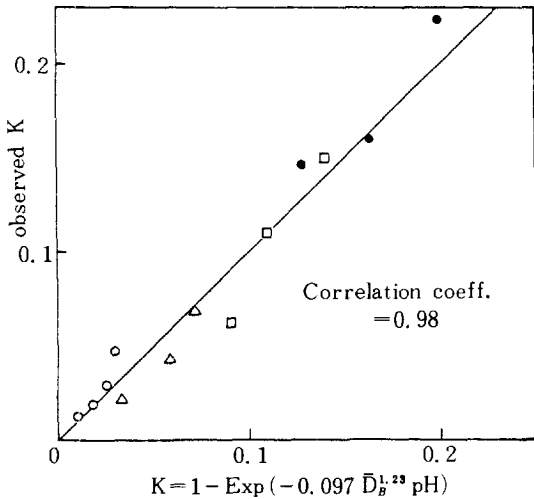


Fig. 10. Correlation of particle transfer coefficient.

Fig. 7 과 같다.

전 pH 범위에서 충돌영역에 비하여 분리속도는 훨씬 낮았다. 이들 실험결과와 식 (10)을 이용하여 최소자승법으로 구한 입자의 전달속도계수는 Fig. 8 과 Fig. 9 와 같이 pH가 증가할수록, 기포의 직경을 클수록 증가하였다. 입자전달속도계수 K, pH 및 기포 크기 간의 상관관계를 구한 결과는 식 (14) 및 식 (15)와 같다.

$$K = 1 - \text{Exp}(-0.097 \bar{D}_p^{1.23} (\text{pH})), \quad D_p = 0.3 \mu\text{m} \quad (14)$$

$$K = 1 - \text{Exp}(-0.45 \bar{D}_p^{0.8} (\text{pH})), \quad D_p = 0.9 \mu\text{m} \quad (15)$$

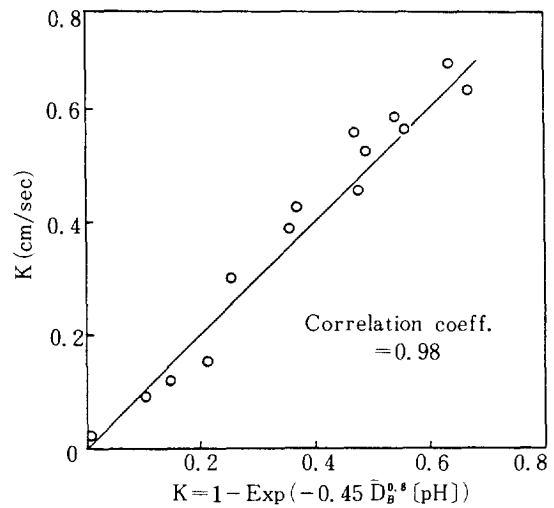


Fig. 11. Correlation of particle transfer coefficient.

식 (14) 및 식 (15)에서 계산한 K와 실험에서 얻은 K를 도시한 결과 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 서로 잘 일치하였다.

#### 4-3. 공존영역

본 연구의 모델식의 타당성을 검토하기 위하여 평균입자 크기가 충돌영역에 해당하는 입자와 확산영역에 속하는 입자를 각각 같은 중량비로 혼합시켜 분산시킨 후, 분리실험으로 얻은 값과 충돌영역

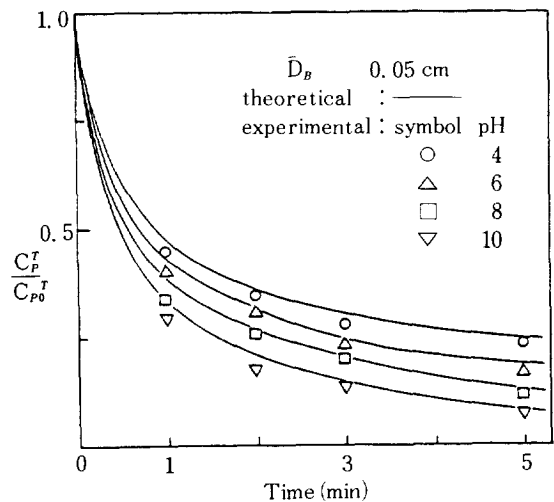


Fig. 12. Comparison of theoretical results with experimental results.

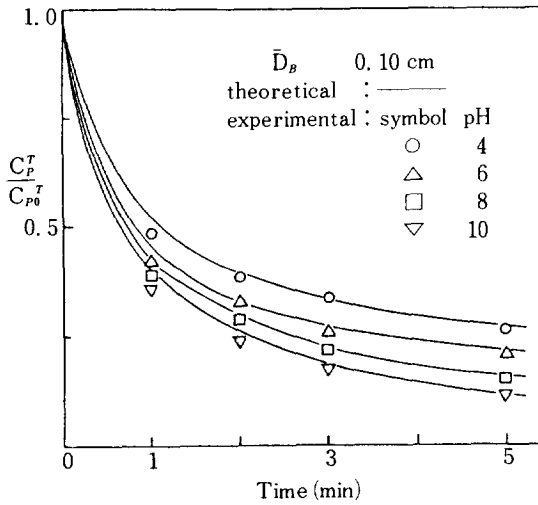


Fig. 13. Comparison of theoretical results with experimental results.

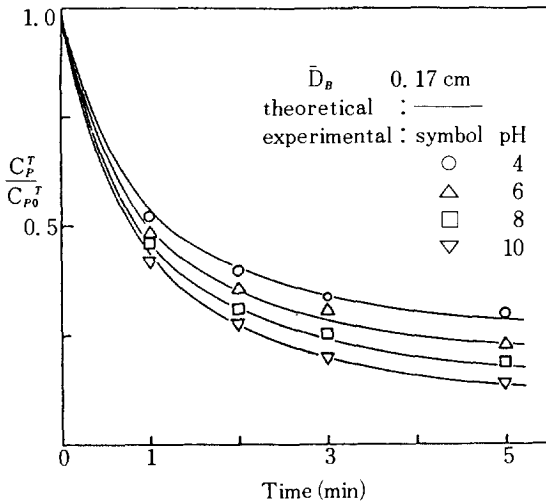


Fig. 14. Comparison of theoretical results with experimental results.

과 확산영역의 결합모델식인 식 (12)에서 구한 이론치를 Fig. 12~16과 같이 도시한 결과 서로 잘 일치하였다. 따라서 충돌영역과 확산영역으로 나누어 도출된 본 연구의 모델은 각 영역 뿐만 아니라 충돌영역과 확산영역이 동시에 포함되어 있는 공존영역에서도 잘 적용됨을 알 수 있다.

## 5. 결 론

이상과 같이 기포포말에 의한 미립자의 분리시

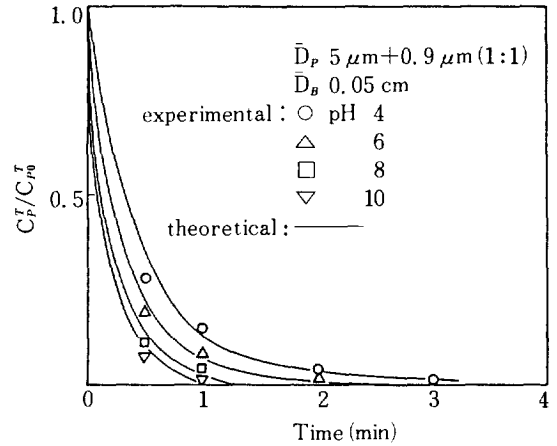


Fig. 15. Comparison of theoretical results with experimental results.

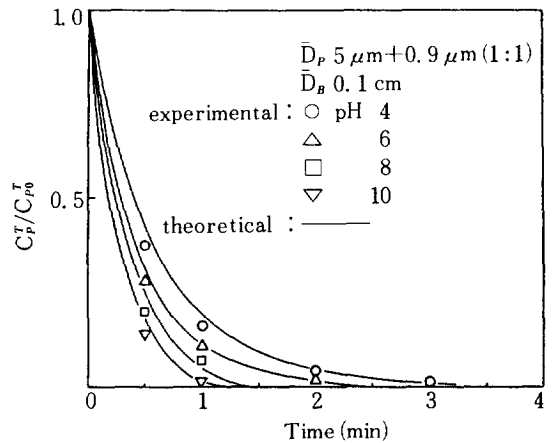


Fig. 16. Comparison of theoretical results with experimental results.

모델에 관한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 침전포말 분리에서 충돌영역과 확산영역으로 나누어 해석하여 이론적인 모델식을 제시하였으며, 그 모델식은 실험결과와 잘 일치하였다.
2. 충돌영역 입자와 확산영역 입자의 혼합제인 공존영역에서도 충돌과 확산의 결합모델로 잘 적용되었다.
3.  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 분리실험으로 구한 입자포집효율 및 입자전달속도 계수는 다음과 같다.

$$E = (0.6 \bar{D}_B + 0.01) [\text{pH}] - 0.03 \bar{D}_B [\text{pH}]^2$$

$$K = 1 - \text{Exp}(-0.097 \bar{D}_B^{1/2} [\text{pH}]), \quad (\bar{D}_P = 0.3 \mu\text{m})$$

$$K = 1 - \text{Exp}(-0.45 \bar{D}_B^{0.8} [\text{pH}]), \quad (\bar{D}_P = 0.9 \mu\text{m})$$

## NOMENCLATURE

A	: surface area of a bubble	(cm <sup>2</sup> )
C	: particle concentration	(g/cm <sup>3</sup> )
D	: diameter	(cm)
E	: collection efficiency	(-)
E <sub>1</sub>	: collision efficiency	(-)
E <sub>2</sub>	: attachment efficiency	(-)
K	: particle transfer rate coefficient	(cm/sec)
L	: length of column	(cm)
N	: quantity of particle removed	(g)
n	: particle removal rate	(g/sec)

## Subscripts

B	: bubble
C	: column
g	: gas
i	: interface between bubble and bulk solution
N	: number
o	: initial
p	: particle

## Superscripts

I	: collision region
II	: diffusion region
T	: coexistin region (collision and diffusion)
-	: average

## REFERENCES

- Hyde, R.A. et al. : *J. AWWA*, July, 369 (1977).
- Barnes, J.C. et al. : *Sep. Sci. & Tech.*, **14**, 9, 774 (1979).
- Wilson, D.J. : *Sep. Sci.*, **12**, 3, 231 (1977).
- Sato, Y. et al. : *J. Chem. Eng. J.*, **13**, 5, 385 (1980).
- Wilson, D.J. : *Sep. Sci.*, **13**, 2, 107 (1978).
- Berg, E.W. and Downey, D.M. : *Analytica Chimica Acta*, **120**, 237 (1980).
- Wilson, D.J. and Thackston, E.L. : EPA-600/2-80-138, June (1980).
- Manohar, C., Kelkar, V.K. and Yakhmi, J. V. : *J. Colloid and Interface Sci.*, **89**, 54 (1982).
- Takahashi, T., Miyahara, T. and Nishizaki, Y. : *J. Chem. Eng. J.*, **12**, 5, 394 (1979).
- Volharot, D. et al. : *J. of Colloid and Interface Sci.*, **83**, 2, 645 (1981).
- Sasaki, T. et al. : *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **55**, 3717 (1982).
- Yoshihiro, F. and Shinichi, Y. : *AIChE. J.*, **31**, 201 (1985).
- Gaudin, A.M., Schuhmann, R. and Schlechten, A.W. : *J. Phys. Chem.*, **46**, 901 (1942).
- Reay, D. and Ratcliff, G.A. : *Can. J. Chem. Eng.*, **53**, 481 (1975).
- Collins, G.L. and Jameson, G.L. : *Chem. Eng. Sci.*, **31**, 985 (1976).
- Deryagin, D.V., Rulov, N.N. and Dukhin, S.S. : *Kolloidn. Zh.*, **39**, 4, 680 (1977).
- Bleier, A., Goddard, E.D. and Kulkarni, R.D. : *J. Colloid Interface Sci.*, **59**, 3, 490 (1977).
- Richmond, P. : *Chemistry and Industry*, **1**, 792 (1977).
- Lai, R.W.M. and Fuerstenau, D.W. : *Soc. of Min. Eng. AIME Trans.*, **260**, 104 (1976).
- French, R.M. and Wilson, D.J. : *Sep. Sci. and Tech.*, **15**, 5, 213 (1980).
- Sato, Y., Murakami, Y., Hirose, T., Uryu, Y. and Hirata, K. : *J. Chem. Eng. Jpn.*, **13**, 5 (1980).
- Fukai, Y. and Yun, S. : *Chem. Eng. Sci.*, **35**, 1097 (1980).
- Reay, D. and Ratcliff, G.A. : *Can. J. Chem. Eng.*, **51**, 178 (1973).
- Charles R. O'Melia : *Envir. Sci. and Tech.*, **14**, 9, 1054 (1980).
- Samygin, V.D., Chertilin, B.S. and Nebera, V.P. : *Coll. J.U.S.S.R.*, **39**, 965 (1977).
- Ladislav, S. : "Solid-Liquid Sep." Butterworths Press, London, 1981, pp. 79.
- Yoshino, Z. : *Kagaku Kogaku*, **47**, 2, 92 (1983).