

## 쿠엣트 응집기내에서 실리카 분말의 응집에 관한 실험적 연구

이광현 · 최창균

서울대학교 공과대학 화학공학과  
(1991년 2월 7일 접수, 1991년 6월 5일 채택)

### An Experimental Study on Flocculation of Silica Particles in a Couette Flocculator

Gwang Hyun Lee and Chang Kyun Choi

Department of Chemical Engineering, College of Engineering Seoul National University,  
Seoul 151-742, Korea

(Received 7 February 1991; accepted 5 June 1991)

#### 요 약

본 연구에서는 쿠엣트 응집기내에서 현탁 입자의 응집에 관한 실험적 결과와 이론적 모델식을 살펴보았다. 실리카 현탁액에서 양이온계 고분자 응집제를 사용하여 실리카 분말을 응집시킬 때 최적 조건을 찾기 위하여 응집에 현탁 입자와 응집제의 농도, 그리고 캠프 수(Gt)가 미치는 영향을 조사하였다. 응집물의 파열이 발생하지 않는 범위에서 응집 속도식을 유도하였으며 이는 실험값과 잘 일치하였다. 또한 최적 캠프 수가  $9 \times 10^4 - 1 \times 10^5$ 의 범위인 것으로 나타났다.

**Abstract**—This study involves both experimental results and theoretical modeling on flocculation of suspended particles in a Couette flocculator. When fine silica particles suspended in water was flocculated by a cationic polymeric flocculant, effects of the suspension concentration, flocculant concentration, and Camp number(Gt) on flocculation were investigated in order to find the optimum condition. Based on the present experimental results, it is shown that the flocculation model which was driven under the assumption of no floc-breakage represents the experimental data very well. And the resulting, optimum Camp number is placed in the range of  $9 \times 10^4 - 1 \times 10^5$ .

#### 1. 서 론

1917년 Smoluchowski[1]는 정지상태와 층류 영역에서 충돌에 관한 응집 모델을 발표하였다. 그는 입자의 충돌은  $1 \mu\text{m}$ 보다 작은 미세 입자들에 대하여는 유체의 열에너지에 의한 입자의 확산으로 이루어지며 이보다 큰 입자들의 충돌은 유체 운동에 의존한다고 하였다. 1943년 Camp와 Stein[2, 3]이 평균속도구배(root-mean-square-velocity-gradient)를 정의하여 Smoluchowski의

응집 모델을 난류 영역까지 확장시켰다.

일반적으로 고형물의 응집에는 교반탱크 응집기가 주로 사용되어 왔으나, 이는 유동형태가 매우 불규칙적이고, 이론적으로 해석하기 복잡하여, 균일한 혼합강도를 유지하는데 어려움이 있고, 형성된 응집물의 파열이 일어나기 쉽다는 단점이 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위한 응집기의 형태로 쿠엣트 흐름을 이용한 응집기가 사용되고 있으며, 1968년 van Durren[4]에 의하여 최초로 쿠엣트 응집기내에서의 응집의 모델링이

이루어졌으며, Ives와 Bhole[5, 6]은 이와 관련된 전산기 모사를 하였다. 그리고 Boadway[7], 전과 최[8], 그리고 전[9] 등에 의해 실험과 모델 수정이 이루어졌다.

입자의 응집에 영향을 미치는 중요한 변수로는 교반 시간과 교반속도, 응집제 농도와 현탁액 농도, 응집제 특성 그리고 현탁액 특성 등을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 전과 최[8], 그리고 전[9]의 연구를 기초로 확충하여 새로운 응집 모델을 설정하고, 실리카 현탁액에 고분자 응집제를 첨가하여 여러 변수들에 따른 응집현상을 고찰하였다. 본 연구에서의 응집 실험은 내부원통이 회전하여 테일러 와류(Taylor vortex)가 발생 가능한 수평 쿨렛 응집기에서 수행되었다. 유동조건은 Wendt[10]의 경험식을 근거로 한 평균속도구배가 난류인 영역이었으며 본 실험에서 응집정도는 분광계에 의한 투과도를 기준으로 측정되었다.

## 2. 테일러 수와 평균속도구배

중심이 같은 두 개의 원통 사이를 흐르는 유체의 유동은 내부원통이 회전에 따라 원심력에 의해 내부원통 가까이 존재하고 있는 유체들이 고정된 외부원통 방향으로 나가려는 경향이 있다. 따라서 유체층은 불안정하게 되어 축방향에 따라 규칙적이며 서로 반대 방향으로 회전하는 고리상 배열의 와류, 즉 테일러 와류가 형성된다[11].

주어진 조건에서 내부원통의 회전수가 어떤 임계치 이상으로 증가될 때 유체의 유동이 불안정하게 되는데, 이러한 불안정한 상태에 도달하는 조건은 코리올리스크(Coriolis force)과 점성력의 비인 테일러 수(Taylor number)라는 아래에 정의된 무차원 군을 기준으로 설명된다.

$$Ta = \frac{u_1 d}{\nu} \left( \frac{d}{R_1} \right)^{1/2} = \left( \frac{d}{R_1} \right)^{1/2} Re \quad (1)$$

$$Re = \frac{u_1 d}{\nu} \quad (2)$$

여기서  $u_1$ 은 내부원통의 회전방향 속도,  $d$ 는 두 원통 사이의 간격,  $\nu$ 는 동점도,  $R_1$ 은 내부원통의 반경,  $Re$ 는 레이놀즈 수를 나타낸다.

중심이 같은 두개의 원통사이에 흐르는 유체에 내부원통의 회전에 의하여 전달되는 회전우력과 평균속도구배는 테일러 와류가 존재하지 않는 층류 영역에 국한되어 있는 경우에 Navier-Stokes 식을 해석함으로써 이론적인 계산이 가능하다. 그러나 유체의 유동이 불안정하게 되어 테일러 와류가 생성되거나 난류 형태가 되면 이론적인 해석이 매우 어렵게 된다. 이러한 경우

특정한 구간에서 타당성을 지닌 많은 경험식들에 의존하게 된다.

Camp와 Stein[2, 3]은 평균속도구배를 정의하여 Smoluchowski[1]에 의하여 제안된 층류 영역에서의 응집속도 모델을 난류 영역으로 확장시켰다. 그들이 정의한 평균속도구배는 다음 식과 같다.

$$G = \left( \frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{1/2} = \left( \frac{P}{V\mu} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$P = \omega T \quad (4)$$

여기서  $\varepsilon$ 은 단위질량당 동력 손실량,  $\nu$ 는 동점도,  $V$ 는 유체의 부피,  $P$ 는 동력 손실량,  $\omega$ 는 각속도, 그리고  $T$ 는 회전우력을 나타낸다.

쿨렛 응집기에 대한 회전우력은 1933년 Wendt[10]가 제안한 경험식이 가장 타당성을 가지고 있다고 알려져 왔으며 각각의 영역에 대한 식들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{T}{\pi \rho L R_1^4 \omega_1^2} = 0.46 \left\{ \frac{(R_2 - R_1) R_2}{R_1^2} \right\}^{1/4} Re^{-0.5} \quad (5)$$

( $4 \times 10^2 < Re < 10^4$ )

$$\frac{T}{\pi \rho L R_1^4 \omega_1^2} = 0.073 \left\{ \frac{(R_2 - R_1) R_2}{R_1^2} \right\}^{1/4} Re^{-0.3} \quad (6)$$

( $Re > 10^4$ )

여기서  $L$ 은 응집기의 길이,  $R_2$ 는 외부원통의 반경을 나타낸다. 식 (5)와 (6)을 이용하면 난류 영역까지의 회전우력을 산출할 수 있으며, Camp와 Stein이 제안한 식 (4)와 (3)에 대입하면 각각의 영역에서 평균속도구배 관계식을 구할 수 있다.

## 3. 응집속도 모델

Smoluchowski[1]가 응집에 관한 수학적인 모델식을 제시한 이후 응집속도론에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔으나 응집에 가장 큰 영향을 준다고 말할 수 있는 응집제에 대한 항을 응집 모델의 대상으로 고려해 준 경우는 매우 드물다. 단지 몇몇 연구에서 응집제의 흡착율을 응집 모델식을 전개하여 나가기 위한 기본 인자로 고려하여 준 경우가 있을 뿐이다[8, 9].

본 연구에서는 Smoluchowski의 충돌율에 관한 이론을 기초로 하여 응집제 초기 농도를 고려하여 준 새로운 응집속도식을 유도하겠다.

### 3-1. 현탁액과 응집제의 혼합

파열이 일어나지 않는 범위내에서 입자의 합체만을

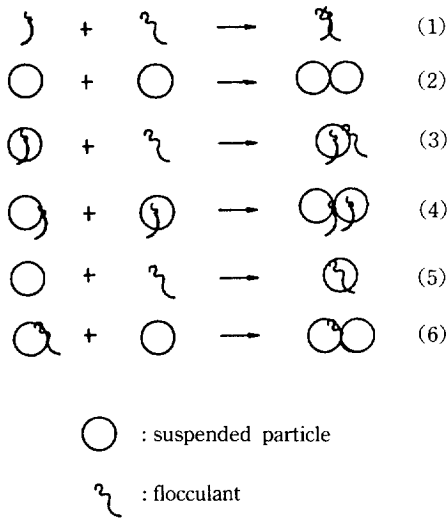


Fig. 1. Schematic representation of possible adsorption by mixing.

고려하여 줄 경우 응집물 형성시 입자 크기의 영향을 무시하고 충돌 분율은 단지 응집제의 특성에 불과하다는 두 가지 가정을 부여하면 현탁액과 응집제의 혼합에 의한 가능한 흡착은 Fig. 1의 6가지 메카니즘으로 간단히 나타낼 수 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 단순 혼합에 의하여 같은 두 입자가 반발력을 극복하고 흡착하기란 매우 어려우므로 메카니즘 (1)과 (2)는 무시될 수 있다.

### 3-2. 응집제의 입자수 감소

응집제의 입자수 감소는 Fig. 1의 (3)과 (4) 메카니즘에 의하여 발생한다고 볼 수 있으며, 이 메카니즘에 Smoluchowski가 정의한 충돌율식을 적용시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$Z_g = \frac{4}{3} N_f N_f d_g^3 G \quad (7)$$

여기서  $N_f$ 는 단위 부피당 응집제 입자수,  $d_g$ 는 평균 응집제 직경, 그리고  $G$ 는 평균속도구배이다. 위 식 (7)에 충돌 분율을 곱하면 시간에 따른 응집제 입자수의 감소에 관계하는 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dN_f}{dt} = -\frac{4}{3} \xi_g d_g^3 N_f^2 G = -k_1 N_f^2 G \quad (8)$$

$$k_1 = \frac{4}{3} \xi_g d_g^3 \quad (9)$$

여기서  $\xi_g$ 는 응집제가 붙은 입자간의 충돌 분율을 나타낸다. 위 식 (8)을 초기조건  $t=0$ 일 때  $N_f=N_{f0}$ 에 대

하여 적분하면 다음과 같은 식이 된다.

$$N_f = \frac{N_{f0}}{k_1 N_{f0} G t + 1} \quad (10)$$

여기서  $N_{f0}$ 는 초기 응집제 단위부피당 입자수,  $N_f$ 는 시간  $t$ 에서의 단위부피당 응집제 입자수를 나타낸 것이다. 식 (10)에서  $Gt$ 는 평균속도구배( $G$ )와 체류시간( $t$ )의 곱으로 표시되어지는 무차원 형태이며, 이를 캠프 수(Camp number)라 부르고 있다.

### 3-3. 현탁 입자수 감소

응집제 입자수 감소의 유도 과정과 유사한 방법으로 Fig. 1의 (5)와 (6) 메카니즘에 대하여 충돌율을 적용시키면 현탁 입자수 감소를 고려하여 준 식을 구할 수 있다. 따라서 식 (7), (8)과 유사한 형태의 단위시간당 현탁 입자수의 감소는 다음식들로 나타낼 수 있다.

$$Z_g = \frac{4}{3} N_s N_f d_g^3 G \quad (11)$$

$$\frac{dN_s}{dt} = -\frac{4}{3} \xi_g d_g^3 N_s N_f G = -k_2 N_s N_f G \quad (12)$$

$$d_g^3 = \frac{(d_s + d_f)^3}{2} \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{4}{3} \xi_g d_g^3 \quad (14)$$

여기서  $\xi_g$ 는 응집제가 흡착된 입자와 현탁 입자간의 충돌 분율,  $N_s$ 는 단위부피당 현탁 입자수,  $d_s$ 는 현탁 입자 평균직경을 나타낸다.

식 (12)에  $N_f$ 에 관하여 나타낸 식 (10)을 대입하면 캠프 수, 즉  $Gt$ 를 매개변수로 하는 다음식이 된다.

$$\frac{dN_s}{dt} = -k_2 \frac{N_{f0}}{k_1 N_{f0} G t + 1} N_s G \quad (15)$$

위 식에 초기조건  $t=0$ 일 때  $N_s=N_{s0}$ 을 적용하여 적분하면 다음식들로 나타낼 수 있다.

$$\ln(N_s/N_{s0}) = \ln(k_1 N_{f0} G t + 1) \cdot k_3 \quad (16)$$

$$N_s = \frac{N_{s0}}{(k_1 N_{f0} G t + 1)^{k_3}} \quad (17)$$

$$k_3 = \frac{k_2}{k_1} = \frac{\xi_g d_g^3}{\xi_g d_g^3} \quad (18)$$

여기서  $N_{s0}$ 는 초기 단위부피당 현탁 입자수,  $N_s$ 는 시간  $t$ 에서의 단위부피당 현탁 입자수를 나타낸다.

### 3-4. 농도항으로 전환

식 (17)의  $N_s$ ,  $N_f$ 는 단위부피당 입자수에 관한 항이므로 실험적 연구와 연관시키기란 매우 어렵다. 그러므로  $N_s$ ,  $N_f$ 를 농도에 관한 항으로 변환시켜 주는 것이 실제 이용에 보다 큰 가치가 있으리라 여겨진다. 초기 응집체의 입자수는 초기 농도에 비례하게 되므로 식 (19)로 표현할 수 있다.

$$N_{f0} = \frac{N_A}{m_f} C_{f0} \quad (19)$$

여기서  $N_A$ 는 아보가드로,  $m_f$ 는 응집체의 평균 몰 분자량,  $C_{f0}$ 는 초기 응집체 농도이다. 또한 현탁 입자에 관하여서는 아래의 비례 식 (20)과 (21)로 나타낼 수 있다.

$$N_{s0} = \frac{N_A}{m_s} C_{s0} \quad (20)$$

$$\frac{N_s}{N_{s0}} = \frac{C_s}{C_{s0}} \quad (21)$$

여기서  $m_s$ 는 현탁 입자의 평균 몰 분자량,  $C_{s0}$ 는 초기 현탁액 농도, 그리고  $C_s$ 는 시간  $t$ 에서의 현탁액 농도를 나타내는 항들이다. 위 식 (19)와 (21)을 식 (17)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 응집속도 모델식이 된다.

$$C_s = \frac{C_{s0}}{(k_5 C_{f0} Gt + 1)^{k_3}} \quad (22)$$

$$k_5 = \frac{4}{3} \frac{N_A}{m_f} \xi_{ff} d_{ff}^3 \quad (23)$$

본 연구에서 유도되어진 식 (22)는 지금까지 발표되었던 응집 모델식들과 Smoluchowski 충돌 이론에 기초를 두었다는 것은 유사하지만 응집체 농도항을 포함시켰다는 매우 특이한 형태로 나타내진다.

### 3-5. 상수값의 계산

식 (22)는  $k_5 C_{f0} Gt$  값이 1보다 클 때와 작을 때에 따라 다음의 식들로 간단히 나타낼 수 있다.

(1)  $k_5 C_{f0} Gt \ll 1$ 일 때

$$1 - \frac{C_s}{C_{s0}} = k_5 k_3 C_{f0} Gt \quad (24)$$

(2)  $k_5 C_{f0} Gt \gg 1$ 일 때

$$C_s = \frac{C_{s0}}{(k_5 C_{f0} Gt)^{k_3}} \quad (25)$$

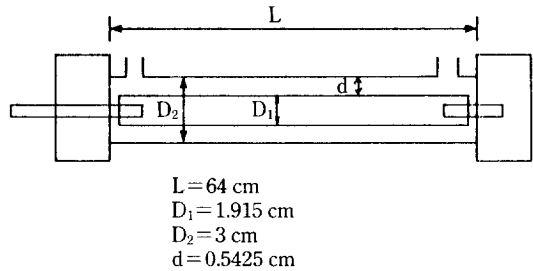


Fig. 2. Schematic diagram of Couette flocculator.

$$\ln \left( \frac{C_{s0}}{C_s} \right) = k_3 \ln (k_5 C_{f0} Gt)$$

$$= k_3 \ln k_5 + k_3 \ln (C_{f0} Gt) \quad (26)$$

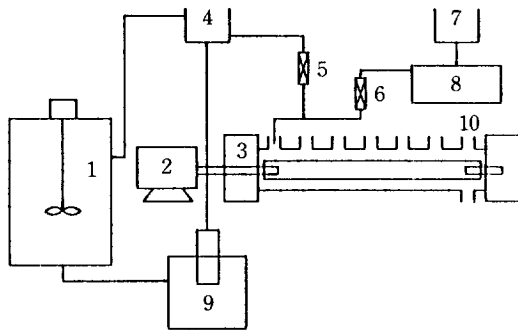
식 (24)와 (26)을 이용하면 실험상수  $k_3$ 와  $k_5$ 를 간단히 구할 수 있다.

## 4. 실험

본 연구에서는 전[9]의 연구를 기초로 하여 현탁액과 응집체의 농도를 각각 변화시키면서 실험이 행해졌다. 현탁입자(평균 입자 크기;  $1.34 \mu\text{m}$ )는 한불화학(주)의 화이트카본(Tix-o-Sil 34M)을 사용하였으며 현탁 입자의 물리적 특성은 제조회사에서 제공한 자료를 이용하였다. 고분자 응집제는 Mitsui Cyanamid Co.의 양이온계 Acccofloc C-482(분자량;  $10^7$ )를 사용하였다. 고체 입자로 된 응집체는 자석 교반기를 사용하여 원하는 양을 증류수에 녹여 사용하였다. 모든 경우 현탁액과 응집체 농도는 g/l를 기준으로 삼았다.

### 4-1. 실험장치

쿠엣트 응집기는 두 개의 아크릴 원통을 사용하여 두 원통 사이에 유체가 흐르게 제작하였으며 내부원통 외경과 외부원통 내경의 비를 0.638로 하였고 수평으로 설치하였다. 응집기에 필요한 동력은 1/8-마력 직류전동기를 사용하였으며 원하는 회전수는 직류 전압조절기를 사용하여 얻을 수 있었다. 내부원통 회전시 회전축과 베어링 사이 틈으로 흡입되는 공기를 막기 위하여 회전축 외부에 O-ring을 끼우고 진공 그리스를 사용하였다. 쿠엣트 응집기에 6개의 시료 채취부를 응집기 외부원통의 윗 부분에 설치하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 쿠엣트 응집기와 응집기 제원을 나타낸 것이다. 현탁액은 80 l 시료 저장탱크에서 순환펌프(Fisher Scientific Co., Model B-6-3)를 사용하여 head 탱크로 보내져 일정 유량을 응집기로 주입하도록 하였고, 그 나머지는



1. Suspension storage tank
2. D. C. motor
3. Couette flocculator
4. Suspension head tank
5. Suspension flow meter
6. Flocculant flow meter
7. Suspension storage tank
8. Varistaltic pump
9. Intermediate tank and slurry pump
10. Sample port

Fig. 3. Schematic diagram of continuous experiments.

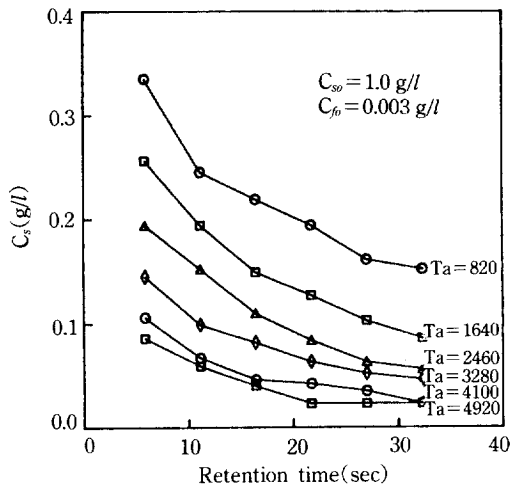


Fig. 4. Effect of retention time.

(C482, Tix-o-Sil 34 M, T = 10°C)

시료 저장탱크로 순환시켰다. 응집제 용액은 12 l의 응집제 저장 탱크로부터 Varistaltic 펌프(Manostat, Model Solid-state)에 의해 응집기로 주입되었다. 각각 유량계를 장치하여 유량을 측정하였고, 응집기 입구에 설치한 T자형 주입부에서 급속 혼합 후 응집기로 주입되어진다. 본 연구에 사용된 연속 실험장치는 Fig. 3과 같다.

#### 4-2. 실험방법

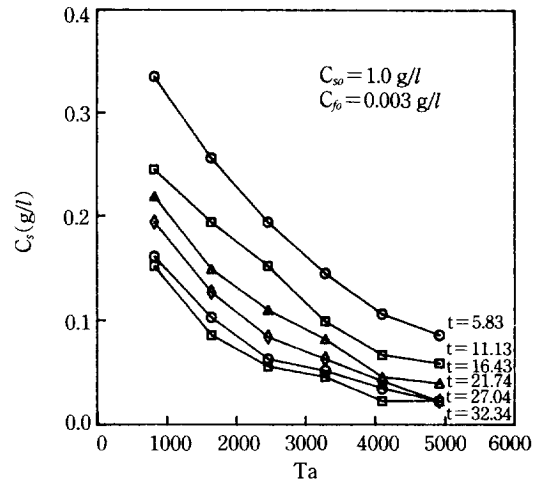


Fig. 5. Effect of Taylor number.

(C482, Tix-o-Sil 34 M, T = 10°C)

현탁액과 응집제 용액은 9 : 1의 비율로 혼합하여 주입하였다. 응집기의 내부원통을 회전시키면서 마지막에 위치한 시료 채취부를 통하여 공기를 제거한 후 응집기가 혼합액으로 가득 차게 되면 내부원통을 계획된 회전수로 회전시켰다. 약 5-10분의 예비운전을 수행하여 유동이 정상상태에 이르도록 한 후 50 ml 메스실린더에 6번째 시료 채취부로부터 시료 용액을 채취했다. 충분한 시간이 경과하면 응집된 입자의 대부분이 침강되고 응집에 참여하지 않은 현탁입자들만이 남아 있다는 가정하에 채취된 시료를 300초 동안 정지시킨 후 윗물을 취하여 투과도를 측정하여 분리효율의 기준으로 삼았다. 내부원통의 회전수를 200-1200 rpm 범위에서 변화시키면서 실험을 행하였다. 이는 유동 특성에 밀접한 관계가 있는 테일러 수가 820-4920인 영역이다. 응집제의 농도와 현탁액의 농도를 임의로 변화시키면서 실험을 반복하였다.

## 5. 결 과

### 5-1. 응집 경향 및 효율

현탁액 농도가 1.0 g/l, 응집제 농도가 0.003 g/l, 수온이 10°C일 때 테일러 수를 변화시키며 유속과 주입부에서 시료 채취부까지의 거리에 의해 결정되어지는 체류시간에 따른 농도 변화를 나타내면 Fig. 4와 같다. 테일러 수가 커질수록 체류시간 증가에 따른 농도 변화의 감소곡선이 완만해 짐을 볼 수 있다. 이로써 초기에 급격한 응집이 발생된다는 것을 알 수 있었다. 또한 같은 실험조건에서 체류시간을 변화시키면서 테일러 수에 따른 농도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에서 처럼

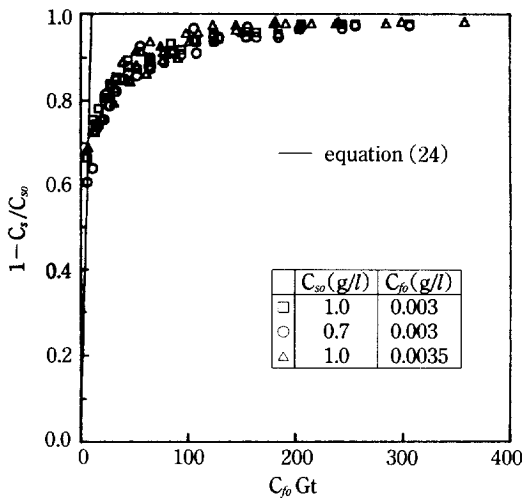


Fig. 6. Experimental data trend for small Camp number.  
(C482, Tix-o-Sil 34 M,  $T=10^\circ\text{C}$ )

곡선 경사의 큰 차이를 볼 수는 없었으나, 체류시간과 테일러 수가 큰 경우( $Ta=5000$ ,  $t=21.74$ ) 실험값들이 한 점에 모임을 알 수 있다. 이는 분리 농도의 한계치가 존재함을 말해 주고 있는 것이다.

초기 첨가된 고형물에 대해 분리 제거된 고형입자 농도비를 분리효율이라 정의하면, 응집된 입자를 침강시킨 후 현탁되어 있는 고형물의 농도  $C_s$ 를 측정하여 분리효율( $1 - C_s/C_{s0}$ )의 계산이 가능하다. 초기 현탁 입자 농도가 0.7, 1.0 g/l, 초기 응집제 농도가, 0.003, 0.0035 g/l, 그리고 수온이  $10^\circ\text{C}$ 인 실험값들을  $C_{f0}Gt$  변화에 따른 분리효율에 대해 나타내면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 보듯이 각 실험이 유사한 경향을 보이면서 변해감을 알 수 있다. 또한  $C_{f0}Gt$ 가 증가함에 따라 분리효율도 증가하다가  $C_{f0}Gt$  값이 비교적 클 경우 분리효율의 변화 폭이 둔화되어 분리효율이 일정한 값(약 0.98)에 도달하게 됨을 알 수 있다.

## 5-2. 응집 모델식의 검증

$C_{f0}Gt$ 가 작은 경우에 간략화한 식 (24)와 큰 범위일 때의 식 (26)에 실험값들을 적용시키면 상수값의 계산이 가능하게 된다. 실험값들로부터  $C_{f0}Gt$ 의 변화에 따른 분리효율의 변화를 살펴보면 Fig. 6과 같다. 그림에서 실선은  $C_{f0}Gt$ 가 작은 경우에 나열된 실험값들의 기울기를 나타낸 것이다. 본 연구에서는  $C_{f0}Gt$ 가 비교적 큰 범위에서 실험하여, 식 (24)의 상수값을 개별적으로 결정할 수는 없었고 단지  $C_{f0}Gt$ 가 작은 영역에서  $k_3k_5$ 가 일정한 값을 가진다는 것만을 알 수 있었다. 또한  $C_{f0}Gt$ 가 큰 영역에서 실험값들이 같은 경향성을 보이며 변화하는 것은 식 (25)의 타당성을 보이고 있는 것이라 말할 수

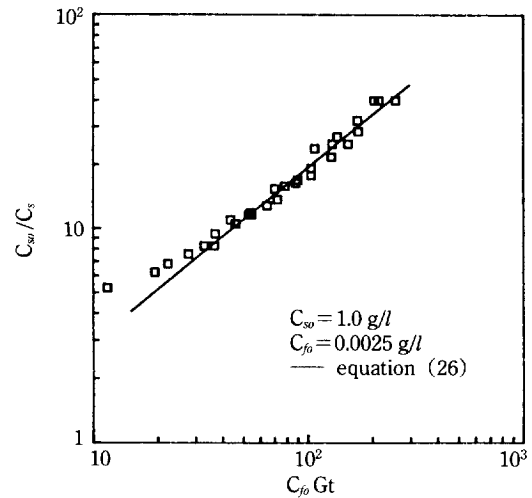


Fig. 7. Experimental data trend for large Camp number.  
(C482, Tix-o-Sil 34 M,  $T=21^\circ\text{C}$ )

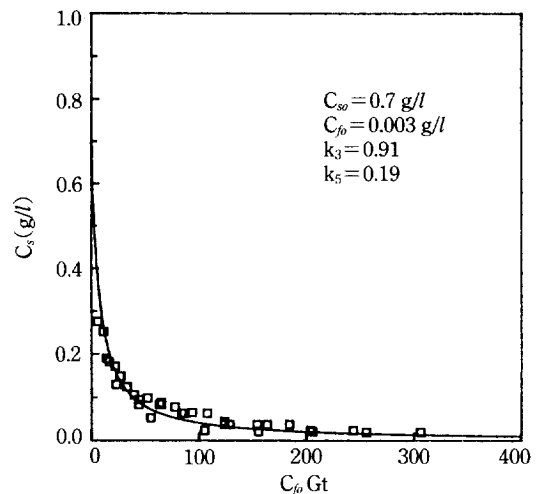


Fig. 8. Comparison of experimental results with equation (22).  
(C482, Tix-o-Sil 34 M,  $T=10^\circ\text{C}$ )

있다. 이러한 경향성이 나타나는 이유는 식 (24)의 상수들,  $k_3$ 와  $k_5$ 가  $C_{f0}Gt$ 가 큰 경우에도 일정한 값을 갖기 때문이라고 추측된다.  $C_{f0}Gt$ 가 큰 범위에서 유도된 식 (26)에서  $C_{f0}Gt$ 와  $C_{s0}/C_s$  변화에 따른 대수 그래프는 Fig. 7과 같이 나타난다. Fig. 7은 현탁액 농도가 1.0 g/l, 응집제 농도가 0.0025 g/l, 수온이  $21^\circ\text{C}$ 일 때의 실험값들을 나타낸 것이다. 그림에 보이듯이 대부분의 실험값들이 직선의 형태로 배열되었는데 이는 식 (26)이 적절한 표현임을 암시하는 것이다. 또한 간접적으로 식 (22)의 타당성을 입증하는 것이기도 하다.  $C_{f0}Gt$ 의 범

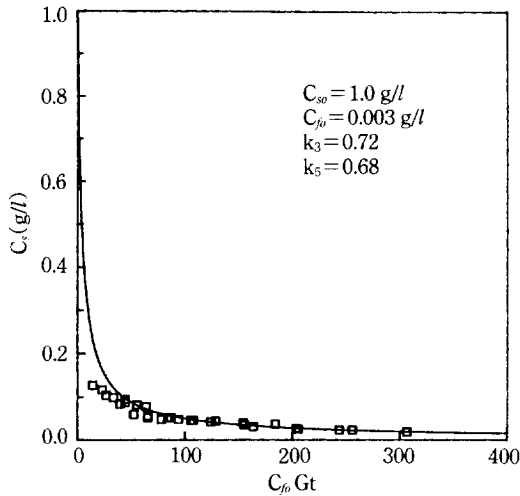


Fig. 9. Comparison of experimental results with equation (22).  
(C482, Tix-o-Sil 34 M, T=21°C)

위가 비교적 큰 영역에서 실험값들을 최적으로 만족시킬 수 있도록 나타내어진 Fig. 7에서 실선의 기울기가  $k_3$ , 절편이  $k_3 \ln(k_5)$ 라고 할 수 있다. 그 값으로부터 식 (22)의 두 상수를 구하였다. 위의 방법에 의하여 얻어진 상수들을 응집 모델식 (22)에 대입하여 그 결과로 얻은 이론적인 값과 실험값을 비교하여 나타내보면 Fig. 8, 9와 같다. Fig. 8은 수온이 10°C일 때 실험한 값들과 비교하여 나타낸 것이고, Fig. 9는 수온이 21°C일 때 실험 값들과 비교한 것이다. 그림들에서 실선은 식 (22)에 의한 이론적인 결과이며 사각형들은 실험에 의해 얻은 값들이다. Fig. 6-9에 보이듯이 응집 모델식 (22)가 고분자 응집제에 의한 현탁액의 응집 현상을 설명하는데 적당한 식이라 할 수 있다.

실험결과에 의해 계산된 실험 상수에 관하여 정리하면 다음과 같다. 수온이 10°C인 경우  $k_3$  값의 범위는 0.90-0.94,  $k_5$  값은 0.19-0.21이었고 수온이 21°C일 경우에는  $k_3$  값이 0.72-0.73,  $k_5$  값은 0.60-0.68의 범위에 있는 것으로 나타났다. 따라서 수온이 높을수록  $k_3$ 는 작은 값을 갖는 것에 반하여  $k_5$ 는 큰 값을 갖게 됨을 알 수 있다.  $k_3$  값보다  $k_5$  값의 변화가 심한 것으로 나타났는데 이는  $k_5$ 의 실험조건들에 대한 의존성이 높음을 나타내는 것이라 말할 수 있다. 상수  $k_3$ 가 수온이 증가할수록 작은 값을 갖게 되는 것은 상수  $k_3$ 가 현탁입자와 응집제가 붙은 입자 사이의 충돌 분율에 대한 응집제가 흡착된 입자 간의 충돌 분율의 비를 나타내기 때문이다. 즉 수온이 증가할 경우 현탁 입자와 응집제가 붙은 입자와의 충돌 분율의 증가 정도에 비해 응집제가 흡착된 입자들 사이의 충돌 분율의 증가 폭이 커진다고 말할

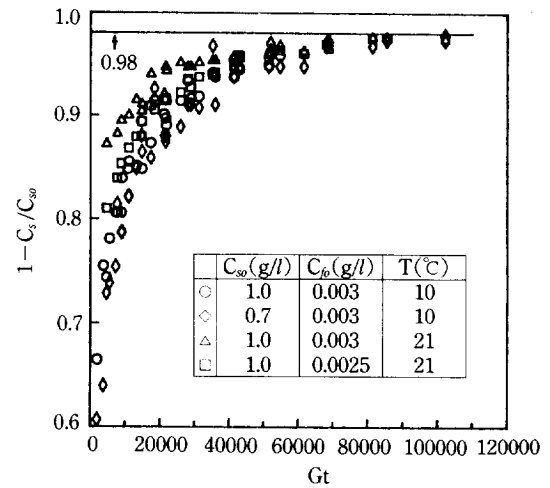


Fig. 10. Effect of Camp number on separation efficiency.

수 있다. 상수  $k_5$ 가 수온이 증가함에 따라 증가하는 값을 갖게 되는 이유는  $k_5$ 가 응집제가 흡착된 입자들간의 충돌 분율에만 비례적으로 관계하기 때문이라고 생각된다. 결과적으로 본 실험결과를 본 연구에서 제안된 응집 모델식, 즉 식 (22)의 타당성을 어느 정도 입증한다고 말할 수 있다.

### 5-3. 캠프 수의 영향

본 연구에서 여러 변수를 변화시키며 행한 실험값들에 대한 분리효율을 종합하면 Fig. 10과 같다. 캠프 수가 증가함에 따른 더 이상의 농도 변화가 일어나지 않는 준평형상태를 최적응집조건이라 정의하면 이 값은, 그림에서 실선으로 나타낸 바와 같이, 분리효율이 98% 정도일 때라고 말할 수 있다. 이 때 캠프 수의 범위는  $9 \times 10^4 - 1 \times 10^5$  정도로 나타나 어떤 일정한 영역을 갖는 최적 캠프 수가 존재하리라는 예측을 할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 Smoluchowski의 충돌 이론에 기초하여 쿠엣트 응집기내에서 실리카 현탁액과 고분자 응집제 입자간의 응집에 관한 새로운 응집 모델식을 제시하였다. 이 모델식은 본 연구의 실험결과를 잘 대변하여 주었다. 본 모델식에 의하면 캠프 수( $Gt$ )가 가장 중요한 매개인자이며 실험 상수값들은 주로 온도에 의존하는 것으로 나타났다. 본 실험범위내에서는 온도가 높아질수록 응집제가 붙은 입자들 사이의 충돌 분율이 증가되어 분리효율의 증가를 가져오는 것으로 사료된다. 또한 캠프 수가  $9 \times 10^4 - 1 \times 10^5$ 의 범위에서 분리효율이 98% 정도에 도달함을 알 수 있었다. 앞으로 현탁액의 농도,

응집체의 농도 변화를 비롯한 보다 정밀한 실험을 통하여 응집 모델식을 확충할 계획이다.

## 감 사

본 연구는 한국과학재단 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사를 표하는 바입니다.

## NOMENCLATURE

C	: concentration [g/l]
d	: width of gap [cm]
$d_f$	: flocculant particle diameter [cm]
$d_s$	: solid particle diameter [cm]
G	: root-mean-square-velocity-gradient [1/sec]
Gt	: Camp number
$k_i$	: constants in equations (2) to (20)
L	: length of cylinder [cm]
m	: average molecular weight [g/mol]
$N_A$	: Avogadro number [number/mol]
N	: particle number per unit volume
P	: power transmitted to fluid [g cm <sup>2</sup> /sec <sup>3</sup> ]
R	: cylinder radius [cm]
Re	: Reynolds number, $u_1 d / \nu$
t	: retention time [sec]
T	: torque transmitted to fluid [g cm <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> ]
Ta	: Taylor number, $u_1 d^{3/2} / \nu R_1^{1/2}$
u	: peripheral velocity [cm/sec]
V	: volume of fluid [cm <sup>3</sup> ]
Z	: collision rate [(number) <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> sec]

## Greek Letters

$\epsilon$	: total power dissipated per unit mass of fluid [cm <sup>2</sup> /sec <sup>3</sup> ]
------------	--

$\mu$	: viscosity [g cm/sec]
$\nu$	: kinematic viscosity [cm <sup>2</sup> /sec]
$\xi$	: fraction of collision
$\rho$	: density [g/cm <sup>3</sup> ]
$\omega$	: angular velocity [rad/sec]

## Subscripts

f	: flocculant
fo	: initial flocculant
s	: solid particle
so	: initial solid particle
1	: inner cylinder
2	: outer cylinder

## REFERENCES

1. Von Smoluchowshi, M.: *Physik. Z.*, **17**, 557(1916).
2. Camp, T. R. and Stein, P. C.: *J. Boston Soc. Civ. Engrs.*, **30**, 219(1943).
3. Camp, T. R.: *Trans. ASCE*, **120**, 1(1955).
4. Van Duuren, F. A.: *J. Sanit. Eng. Div. ASCE*, **94**, 671(1968).
5. Ives, K. J. and Bhole, A. G.: *Water Res.*, **9**, 1085 (1975).
6. Ives, K. J. and Bhole, A. G.: *Water Res.*, **11**, 209 (1977).
7. Boadway, K. J.: *J. Environ. Eng. ASCE*, **104**, 901 (1978).
8. 전귀, 최창균: *화학공학*, **24**, 157(1986).
9. 전귀: 서울대학교 공학박사 학위논문(1988).
10. Wendt, F.: *Ingen. Arch.*, **4**, 577(1933).
11. Schlichting, H.: "Boundary Layer Theory", 7th ed., McGraw-Hill, New York, NY(1979).