

쿠엣트 응집기를 이용한 고형물의 응집 및 고 - 액 분리에 관한 실험적 연구 제 2부 : 응집속도 모델링

전 귀* · 최창균

서울대학교 화학공학과
(1989년 5월 30일 접수, 1989년 8월 7일 채택)

Experimental Studies on Flocculation of Solid Particles and Solid-Liquid Separation with Couette Flocculators Part 2: Flocculation Kinetic Modeling

G. Jeon* and C. K. Choi

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
(Received 30 May 1989; accepted 7 August 1989)

요 약

테일러 와류의 형성이 가능한 쿠엣트 응집기에서 수용액 중 고형물의 응집 및 분리특성을 고찰하기 위하여 실리카 및 카올린 현탁입자에 양이온계 고분자 응집제를 투여한 실험계를 대상으로 연속실험을 실시하였다. 최대 분리효율을 얻기 위해 투여되는 고분자 응집제의 최소 농도는 현탁입자 농도의 0.425승에 비례하였으며 고분자 응집제의 현탁입자에 대한 흡착률은 현탁입자의 농도가 증가할수록 감소하였다. 응집물의 파열이 일어나지 않는 범위에서 초기 현탁입자의 농도, 응집 후 침강 분리되지 않은 현탁입자의 농도, 평균 속도구배 및 체류시간을 함수로 하는 경험적 응집속도 모델을 기존의 LaMer-Healy 모델과 Huck-Murphy 모델을 기초로 구하였다.

Abstract—The study on flocculation in a Couette flocculator showing Taylor vortices and subsequent solid-liquid separation characteristics were conducted experimentally. For this study, silica or kaolin suspensions in water were used to investigate flocculation by cationic polymers. The minimum flocculant concentration to show the maximum separation efficiency was found proportional to 0.425-power of the suspension concentration. The adsorption ratio of polymer flocculant on suspended particles decreased as the suspension concentration increased. An empirical flocculation kinetic model without floc breakage was suggested to combine the kinetic model of Huck and Murphy into that of LaMer and Healy. The important parameters were the initial suspension concentration, the unflocculated suspension concentration, the retention time and the root-mean-square velocity gradient.

1. 서 론

본 연구에서는 새로운 형태의 응집기로서 테일러 와

류(Taylor vortex)의 형성이 가능한 쿠엣트 응집기를 활용하여 수용액 중 고형물의 응집특성을 조사하고 응집속도 모델을 제시하는데 목적을 두었다. 제 1부 연구

*현주소 : 동양시멘트(주) 기술연구소

[1]에서는 쿼엣트 응집기에서의 최적 체류시간과 테일러 수를 찾아내어 최적 응집조건의 상관성을 조사하였다.

응집속도론에 관한 많은 연구가 수행되어 왔으나 고분자 응집제를 사용한 응집속도 모델에 대하여 연구된 예는 매우 드물다. 일반적으로 이용 가능한 응집속도 모델들은 미분방정식 형태로 표현된다. 또한 응집속도 모델의 주된 연구대상인 회분계 혹은 플러그 흐름 관형 반응기(PFTR)에 대한 모든 모델들은 해를 가져야만 한다. 그러나 이들 모델 중 단지 Smoluchowski 모델만이 해를 구할 수 있다[2]. 본 연구에서는 기존의 많은 모델 중에서 연속계에 적용 가능하며 고분자 응집제의 투여로 인한 흡착가교 반응이 고려된 입자의 응집속도 모델들을 검토하였다. 응집속도 모델을 검토하기 위해서는 먼저 현탁입자와 고분자 응집제의 응집특성이 조사되어야 한다. 특히 고분자 응집제의 입자표면 흡착률이 밝혀져야 한다. 본 연구에서는 고분자 응집제의 투여량이 현탁입자의 응집에 미치는 영향을 살펴보고 응집제의 투여량이 최적 응집조건에서 나타내는 상관성과 입자표면 흡착률과의 관계를 검토하였다. 또한 최적 응집조건을 나타내는 매개변수들과 기존의 응집속도 모델을 토대로 새로운 경험적 모델을 제시하고 그 타당성을 검토하였다.

2. 실험

2-1. 시료

본 연구에서는 현탁입자로서 실리카 입자인 한불화합의 화이트 카본과 락우공업의 카울린 입자들을 사용하였다. 화이트 카본은 평균 입자크기가 $1.3\mu\text{m}$ 인 Tix-O-Sil 34M을 선정하였다. 고분자 응집제는 Mitsui-Cyanamid 회사의 양이온계 응집제 Acccofloc C-482와 Acccofloc C-480, 이온화도가 Acccofloc C-480과 유사한 Dow Chemical 회사의 Separan CP-402를 사용하였다. 현탁입자의 물리적 특성과 준비방법, 고분자 응집제의 준비방법은 제1부 연구[1]와 동일하다.

2-2. 실험장치 및 방법

쿼엣트 응집기에 의한 연속실험장치는 Fig.1과 같고 실험장치의 설명, 실험방법 및 실험영역은 제1부의 연구와 동일하며 제1부에 상세히 설명되어 있다[1].

2-3. 응집정도 측정

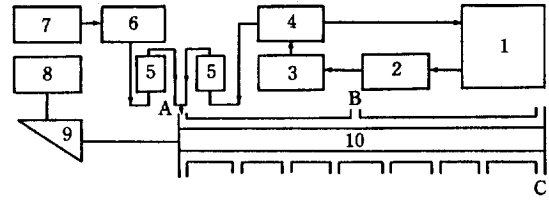


Fig. 1. Schematic diagram of continuous experiments.

- | | |
|----------------------------|----------------|
| 1. Suspension storage tank | 3. Slurry pump |
| 2. Intermediate tank | 5. Flow meters |
| 4. Head tank | |
| 6. Varistaltic pump | |
| 7. Flocculant storage tank | |
| 8. DC motor | 9. Gear |
| 10. Couette flocculator | |

응집정도는 빛의 투과도에 의한 고형물의 분리효율을 기준으로 삼았다. 침전물의 부피, 응집물의 제타전위, 잔여 고분자 응집제의 농도, 윗물에 남아 있는 고형물의 평균 입자크기 등을 측정하여 분리효율에 의한 응집정도의 기준을 보완하였다. 투과도는 제1부의 연구[1]와 동일한 방법으로 측정되었으며 이를 분리효율로 환산하였다. 침전물의 부피는 회분 침강기에서 침강 시작 100초 후에 측정하였다. 이 때 윗물에 부유되어 있는 입자들의 평균 크기를 원심 입자크기 분포 분석기(Horiba Co., Model CAPA 300)로 측정하였다. 응집물의 제타전위는 침강하는 응집입자를 채취하여 제타전위 측정기(Zeta Meter Inc., Model ZM-80)로 측정하였다. 제타전위 측정시 측정 cell의 막힘을 제거하기 위하여 응집입자 중 그 크기가 2mm 이상인 것은 제거하였다. 채취한 시료를 3시간 정치시켜 윗물에 부유된 입자들을 모두 제거한 후 윗물 밑 6cm 지점에서 맑은 물을 5cc 취하고 여기에 페놀프탈레인 용액 2cc를 혼합하여 응집에 참여치 않은 잔여 고분자 응집제를 착색시킨 뒤 분광광도계의 340nm 파장에서 잔여 고분자 응집제의 농도를 측정하였다[3]. 고분자 응집제는 최적 응집조건에 투여된 농도의 3-6배까지 투여하였으며 실험은 상온에서 실시되었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 고분자 응집제 농도의 영향

효율적인 응집 및 고-액 분리를 이루기 위해서는 먼저 분리하고자 하는 현탁액에 효과적으로 작용하는 응집제를 선정하여야 한다. 또한 응집제의 선정에 부가하

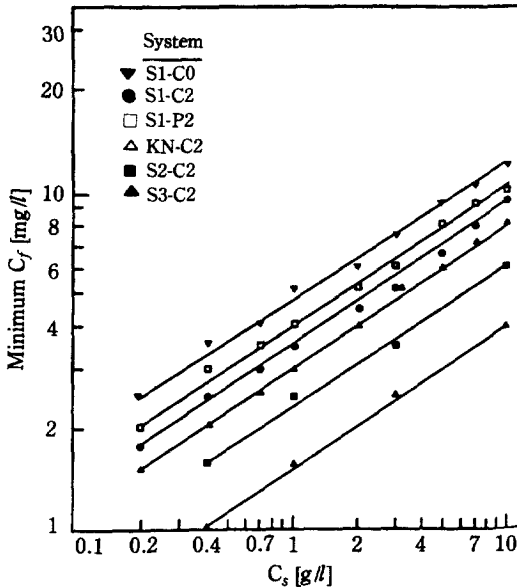


Fig. 2. Conditions of maximum separation efficiency with minimum dosage of flocculant.

여 응집제의 투여량을 결정하여야 한다. 응집제의 투여량은 분리효율과 조업비에 직결되기 때문에 매우 중요한 과제이다.

Fig. 2는 본 연구에서는 검토된 여러 가지 실험계에 대하여 각 현탁입자 농도에서 최대 분리효율을 얻기 위하여 투여된 최소 응집제의 양을 나타내고 있다. 여기서 C_s 는 현탁입자의 농도, C_f 는 응집제의 농도를 나타낸다. Fig. 2에서 S1은 Tix-O-Sil 34M, S2는 Ze-O-Sil 39, S3는 Ze-O-Sil 45로 실리카 입자를 나타내며 KN은 카올린 입자를 나타낸다. 또한 C2는 Accofloc C-482, C0는 Accofloc C-480, P2는 Separan CP-402 응집제를 나타내는 약자로서 이들의 조합으로 실험계를 표시하였다. Fig. 2에서 S1-C0, S1-C2, S1-P2와 KN-C2 실험계의 결과는 제1부의 연구[1]에서 이미 살펴본 바 있다. 여기서 체류시간은 제1부의 연구결과[1]를 토대로 150초를 기준으로 하였으며 테일러 수는 각 현탁입자의 농도에서 최대 분리효율을 나타내는 점을 기준으로 삼았다. 내부원통의 교반속도로 사용되는 테일러 수는 제1부의 연구[1]에서 정의된 바와 동일하다. Fig. 2에서 현탁입자와 응집제 농도간에 일정한 상관성이 있음을 예측할 수 있다. 이들 상관성을 살펴보면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$C_{f,opt} = h_1 C_s^{h_2} \quad (1)$$

여기서 h_1 , h_2 는 실험상수이며 하첨자 opt는 최적 조건

Table 1. Values of constants h_1 and h_2 of Eq. (1)

Symbol	System	h_1	h_2
S1-C0	Tix-O-Sil 34M-Accofloc C-480	0.244	
S1-C2	Tix-O-Sil 34M-Accofloc C-482	0.189	
S1-P2	Tix-O-Sil 34M-Separan CP-402	0.210	0.425
S2-C2	Ze-O-Sil 39-Accofloc C-482	0.118	
S3-C2	Ze-O-Sil 45-Accofloc C-482	0.080	
KN-C2	kaolin-Accofloc C-482	0.160	

을 나타낸다. Fig. 2의 결과를 이용하여 최소자승법으로 h_1 과 h_2 를 구하면 Table 1과 같다.

Table 1의 결과를 살펴보면 지수 h_2 가 일정함을 알 수 있다. 지수 h_2 가 여러 가지 실험계에 대하여 일정한 것은 쿼트 응집기가 가지는 유동학적 특성이라 판단되며 계수 h_1 은 현탁입자의 크기 및 종류와 응집제의 분자량과 이온화도에 의한 실험계의 화학적 특성차가 응집시에 반영된 것으로 예측된다. Iler[4]와 Black 등[5]은 응집에 필요한 응집제의 양은 현탁입자의 농도와 비례관계를 이루어 그 비가 일정하며 입자의 크기가 클수록 응집에 필요한 응집제 양이 적게 된다는 연구결과를 발표하였다. 실제로 Fig. 2에서 보면 입자의 크기가 클수록 단위 무게당의 입자수가 적게 되어 응집에 필요한 응집제 양이 적음을 관찰할 수 있다.

앞에서 논의된 결과는 최대 분리효율을 가지면서 투여되는 최소 응집제의 양에 대한 것이었다. 그러면 응집제의 투여량에 따른 현탁입자의 표면 흡착률 θ 를 검토해 보기 위하여 최적 응집조건은 표면 흡착률이 0.5일 때 일어난다는 기존의 연구결과들[3, 6, 7]과 표면 흡착률이 0.5 이하라는 Mabire 등[8]의 연구결과를 대비시켜 확인할 필요가 있다. Table 2의 실험치는 잔여 고분자 응집제의 농도를 측정하여 잔여 고분자 응집제가 존재하기 시작하는 시점을 입자의 표면 흡착률이 1이라고 가정하고 그 때의 고분자 응집제 투여농도와 Fig. 2에서 구한 최소 투여농도의 비로부터 각 현탁입자의 표면 흡착률을 계산하여 얻었다. 실험결과 사이에 많은 차이가 있게 됨을 알 수 있다. 즉 $C_s=0.2\text{g/l}$ 에서는 최소 응집제 농도의 2-3배에서 잔여 응집제가 존재하기 시작하며 $C_s=7\text{g/l}$ 에서는 최소 응집제 농도의 5-6배에서 잔여 응집제가 존재함을 알 수 있다. 이로 보

아 Mabire 등[8]의 연구가 더욱 타당함을 알 수 있다. 그러나 $C_s=0.2\text{g/l}$ 에서는 표면 흡착률이 약 0.5가 되는 것과 기존의 연구들[3, 6, 7]이 현탁입자의 농도가 낮은 쪽에서 흡착실험을 수행한 것으로 보아 현탁입자의 농도가 낮을 때는 표면 흡착률이 0.5라는 연구결과들도 타당한 것으로 생각된다. 그러나 현탁입자의 농도가 증가할수록 표면 흡착률이 0.5 이하에서 최적 응집 조건이 존재함을 Table 2를 통하여 짐작할 수 있다. 그러므로 $C_s=0.2\text{g/l}$ 에서 표면 흡착률이 0.5라 가정하고 식 Huck와 Murphy[2]가 제시한 충돌효율인자, $\theta(1-\theta)$ 에 관하여 고려하면 다음과 같다.

$$\theta(1-\theta)=K_x C_s^a \quad (2)$$

여기서 K_x 와 a 는 실험에 의하여 정해지는 상수와 지수이다. Table 2의 실험결과와 θ 가 저농도부에서 0.5라는 초기 가정을 만족시키는 식 (2)의 상수 K_x 와 지수 a 를 최소자승법으로 구하면 S1-C2 실험계에 대하여 $K_x=0.55$, $a=-0.15$ 가 되며 식 (2)는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\theta(1-\theta)=0.55C_s^{-0.15} \quad (3)$$

식 (3)에 의하여 예측된 흡착률을 Table 2에 나타내어 실험값과 비교하였다. Table 2의 결과에서 실험치

Table 2. Comparisons of surface coverage fraction of Tix-O-Sil 34M particle by Accofloc C-482 flocculant from experiment and Eq. (3)

C_s [mg/l]	θ	
	Experiment	Estimation
200	0.3-0.5	0.46
400	—	0.34
700	—	0.29
1000	0.25-0.35	0.27
2000	0.2-0.3	0.23
3000	0.2-0.3	0.21
5000	—	0.19
7000	0.15-0.2	0.18
10000	—	0.17

Table 3. Values of constant K_2 of Eq. (12)

(unit: $[\text{mg/l}]^{-0.85}$)			
S1-C2	S1-C0	S1-P2	KN-C2
3.95×10^{-6} *	2.48×10^{-6}	2.62×10^{-6}	3.0×10^{-6}
$(2.21 \sim 5.68) \times 10^{-6}$	$(1.02 \sim 3.93) \times 10^{-6}$	$(1.03 \sim 4.21) \times 10^{-6}$	$(1.40 \sim 4.61) \times 10^{-6}$

*: average value of below range

에 대하여 식 (3)에 대한 예측값은 대체로 잘 만족됨을 알 수 있다. 그러므로 식 (3)을 일반적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\theta(1-\theta)=K_x C_s^{-0.15} \quad (4)$$

여기서 K_x 는 실험계에 대한 상수이다. Huck와 Murphy[1]가 제시한 식과 비교할 때 지수가 다른 것은 응집기의 형태가 다르기 때문인 것으로 생각되며 식 (1)과 유사하게 해석할 수 있다.

LaMer와 Smellie[9]는 충돌효율 인자를 수학적으로 유도하였다. 그러나 이들은 충돌효율 인자를 유도하는 과정에서 다항식의 복잡성을 선형화하기 위하여 C_f 를 포함하는 3차항 이상은 가정에 의하여 소거하여 아래와 같은 식을 제안하였다.

$$\theta(1-\theta)=K_y (C_f/C_s) \quad (5)$$

여기서 K_y 는 비례상수이다. 그러나 이를 좀 더 엄밀하게 고려하면 충돌효율 인자를 다음 식과 같이 일반적으로 표현할 수 있다.

$$\theta(1-\theta)=K_z (C_f^b/C_s) \quad (6)$$

여기서 K_z 는 비례상수이다. 식 (6)에 본 연구에서 구한 실험식 (1)을 대입하고 식 (4)와 비교하면 지수 b 가 2로 표현된다. 그러므로 본 연구의 결과를 통하여 충돌효율 인자는 아래와 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\theta(1-\theta)=K_x (C_f^2/C_s) \quad (7)$$

여기서 $K_x=h_1^2 K_z$ 이다.

앞에서는 잔여 고분자 응집제의 농도에 의한 흡착률을 살펴보았다. 고분자 응집제의 농도가 침전물의 부피나 제타전위 및 윗물의 입자크기에 대한 영향이 어떠한지를 살펴보기 위하여 고분자 응집제의 농도에 대하여 이들 각각이 갖는 관계와 분리효율을 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 E 는 분리효율, V_s 는 침전물의 부피, D_{Fr} 은 침강 후 윗물에 남아 있는 응집물의 평균크기, Z 는 제타전위를 나타내며 Ta 는 테일러 수, t_R 은 체류시간, t_s 는 침강시간을 나타낸다. Fig. 3을 살펴보면 가장 높은 분리효율을 나타내는 최소 응집제 농도에서

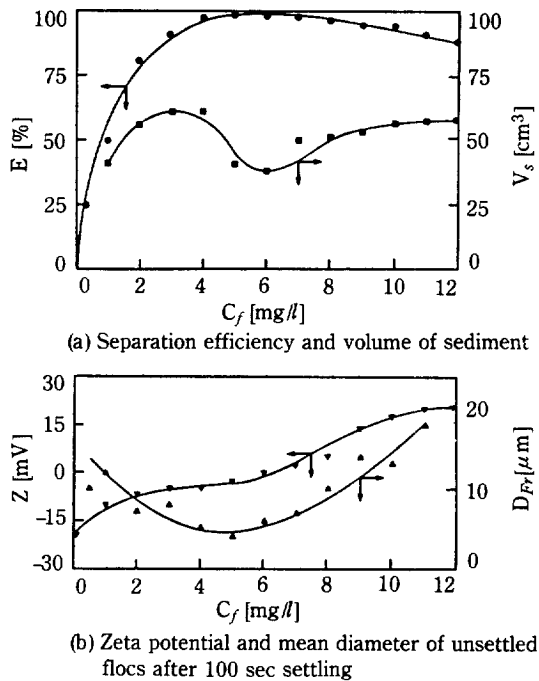


Fig. 3. Effect of flocculant concentration on flocculation (Tix-O-Sil 34M-Accofloc C-482; $C_s=3$ g/l; $T_a=3671$; $t_R=152$ sec; $t_s=100$ sec).

침전물의 부피는 거의 최소를 나타내며 분리효율이 가장 높은 부근에서 제타전위가 $\pm 5\text{mV}$ 임을 확인할 수 있었다. 또한 100초 침강 후 윗물에 남아 있는 입자크기는 분리효율이 가장 높은 부근에서 가장 작음을 알 수 있었다. 침전물의 부피가 거의 최소인 것은 입자와 응집제간에 가장 조밀한 응집물을 형성하기 때문이다. 응집제의 농도가 최적 농도보다 낮은 쪽에서는 작은 응집물들이 서로 형성하게 침전물을 이루어 침전물의 부피가 크고 응집제의 농도가 최적 농도보다 높은 쪽에서는 과다한 응집제의 투여로 크고 느슨한 응집물이 형성되기 때문에 침전물의 부피가 증가하는 것으로 생각된다. 이러한 현상은 Fig. 4의 사진을 통하여 확인할 수 있다. 왼쪽 사진은 침강기에서 침강 중인 응집물을 접사링을 부착한 사진기로 촬영한 것이며 오른쪽 사진은 이들 응집물을 채취하여 입체현미경 사진기(Olympus Co., Model PM-6)로 40배 확대하여 촬영한 것이다.

또한 일반적으로 응집이 가장 잘 일어날 때 응집물의 제타전위는 $\pm 5\text{mV}$ 를 나타낸다는 기존의 연구결과 [10, 11]가 본 연구에서도 확인되었다. 응집제의 투여량이 최적 농도보다 낮은 경우에 침강시간 100초 후까지 침전되지 않은 작은 응집물의 제타전위를 측정해 본

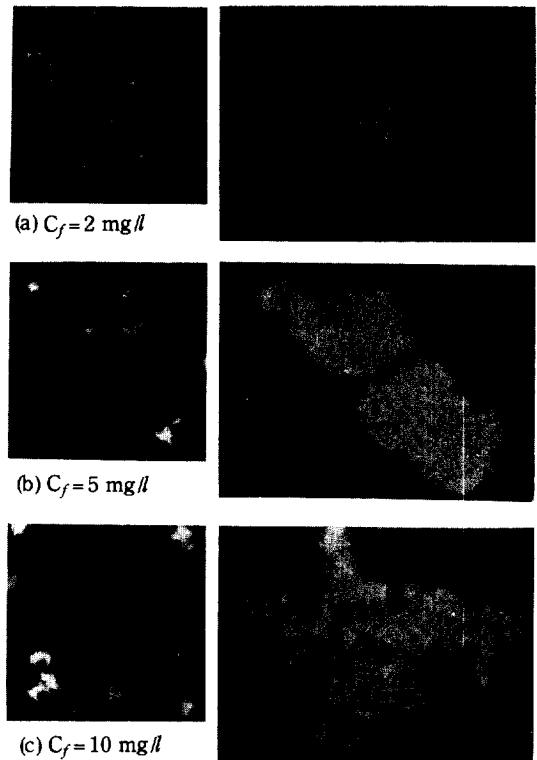


Fig. 4. Effect of flocculant concentration on floc size (Tix-O-Sil 34M-Accofloc C-482; $C_s=3$ g/l; $T_a=3671$; $t_R=152$ sec; $t_s=100$ sec).

결과 대부분의 입자들의 제타전위가 -13mV 이상을 나타내었다. 또한 테일러 수나 체류시간의 변화에 대하여서도 분리효율이 최대치 부근에서 침전된 응집물들은 거의 $\pm 5\text{mV}$ 의 제타전위를 나타내었으며 침전되지 않은 응집물들 역시 -10mV 이상의 제타전위를 나타내었다. 이러한 결과를 미루어 보아 응집물의 제타전위는 단지 응집제의 농도에 의해 결정되는 것으로 예측되며 응집이 잘된 응집물들의 제타전위는 거의 0에 가까워 이온교환에 의한 전하중화 작용이 주된 응집 기구임을 입증해 준다고 판단된다 [4, 12, 13]. 그러므로 응집이 가장 잘 이루어진 상태에서는 응집물이 조밀하게 뭉쳐져서 침전물의 부피가 작고 제타전위는 0에 가까울 것이다. 이 때 응집물들의 침강속도가 매우 크고 분리효율은 높게 되며 윗물은 분리가 잘 되어 매우 작은 크기의 응집물만이 남아 있을 것이다. 또한 응집제의 투여농도가 낮을 때는 침강속도가 느린 작은 응집물이 윗물에 남아 있게 되며 응집제의 투여농도가 과다하면 응집물의 크기가 크나 응집되지 않은 입자와 응집물의 재안정

화가 수반되어 응집물의 침강속도가 느리게 되므로 윗물에 남아 있는 응집물의 크기가 크게 됨을 예측할 수 있다. 또 Fig. 3과 4를 통하여 과다한 응집제의 투여는 응집물의 크기를 불규칙하게 하여 침전물의 부피를 증가시키고 분리효율을 감소시키는 요인이 됨을 관찰할 수 있다. 그러므로 침전물의 부피를 줄이고 분리효율을 최대로 얻기 위하여 필요한 최소의 응집제를 투여하는 것이 경제성면이나 침전물 처리면에서도 효과적임을 확인할 수 있었다.

3-2. 응집속도 모델

기본적인 응집속도 모델은 Smoluchowski[14]에 의하여 제시되었으며 Camp와 Stein[15]에 의하여 수처리에 적용되었다. 그들은 응집속도식이 입자농도의 제곱에 비례하거나 응집물의 부피가 일정하다고 하면 선형의 비례관계를 갖는다고 가정하였다. Camp와 Stein[15]은 총류영역에서 정의된 속도구배를 대신하여 쓸 수 있는 평균 속도구배를 정의하여 Smoluchowski 모델이 난류영역에까지 적용되도록 확장시켰다. 구형입자에 대하여 Smoluchowski[14]가 제안한 입자의 응집속도식은 Camp와 Stein[15]에 의하여 수정되어 아래 식으로 표현된다.

$$\frac{dC_s}{dt} = -\frac{2}{3} \xi d_s^3 C_{s0} C_s G \quad (8)$$

여기서 C_s 는 시간 t 에서의 입자농도, C_{s0} 는 처음에 존재하는 입자농도, ξ 는 응집을 이루는 충돌분율, d_s 는 입자의 직경, G 는 평균 속도구배를 나타낸다.

LaMer와 Healy[16]는 고분자 응집제를 이용한 정량적인 모델을 제시하였다. 그들의 연구는 교반강도가 한 개로 고정된 영역에서 교반강도의 표현으로 평균 속도구배를 사용하였으며 입자가 응집될 가능성을 응집제의 작용기가 입자표면에 흡착되는 흡착률 θ 와 미흡착률 $(1-\theta)$ 에 비례한다고 가정하였다. 이 때 θ 는 일반적으로 시간에 무관하게 일정하다는 가정을 포함한다. 또한 응집물의 형성과 단위 부피당 입자가 응집물에 응집되는 과정은 각각의 입자농도 C_s 의 제곱에 비례한다는 2차식을 가설로 세웠다. 위 가정하에 제시된 응집속도식은 다음과 같다.

$$\frac{dC_s}{dt} = -K_1 C_s^2 \theta (1-\theta) G \quad (9)$$

여기서 K_1 는 응집속도 상수이다.

식 (8)은 응집속도가 입자의 초기농도에 비례한다는 가정을 세워 고안된 것이다. 위 가정하에서 식 (8)을

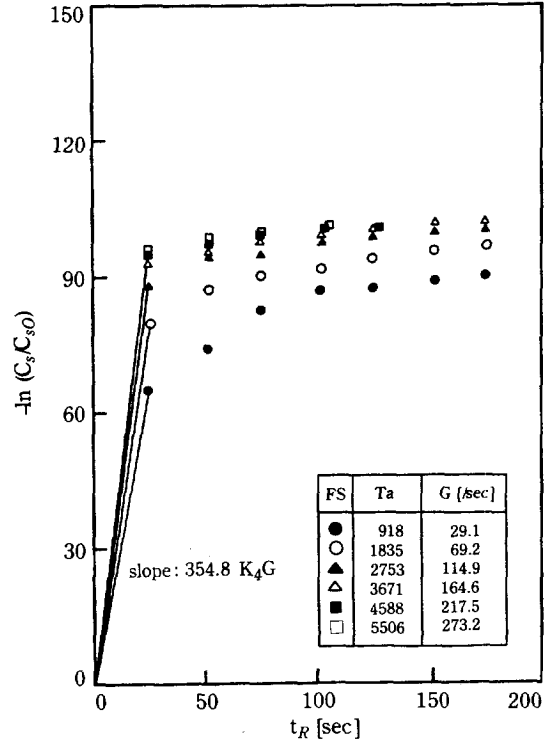


Fig. 5. Model prediction of Eq. (11) by experimental data (Tix-O-Sil 34M-Accofloc C-482; $C_s=1$ g/l; $C_f=4$ mg/l).

고분자 응집제가 투입되었을 때의 응집속도 모델로 수정하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dC_s}{dt} = -K_3 C_{s0} C_s \theta (1-\theta) G \quad (10)$$

여기서 $K_3 = (2/3) \xi d_s^3$ 이다.

식 (10)에 식 (4)를 대입하고 경계조건 $t=0$ 에서 $C_s=C_{s0}$; $t=t_R$ 에서 $C_s=C_s$ 를 적용하여 적분하면 아래와 같은 식이 성립된다.

$$C_s = C_{s0} \exp(-K_4 C_{s0}^{0.55} G t_R) \quad (11)$$

여기서 $K_4 = K_3 K_x$ 로 응집속도 상수이다. 또 LaMer-Healy 모델식 (9)에 식 (4)를 경계조건을 적용하여 적분하면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$C_s = \frac{S_{s0}}{K_2 C_{s0}^{0.55} G t_R + 1} \quad (12)$$

여기서 $K_2 = K_1 K_x$ 로 응집속도 상수이다. 식 (11)과 (12)의 평균 속도구배 G 는 제 1부 연구[1]에서 구한 실험식을 사용하였다.

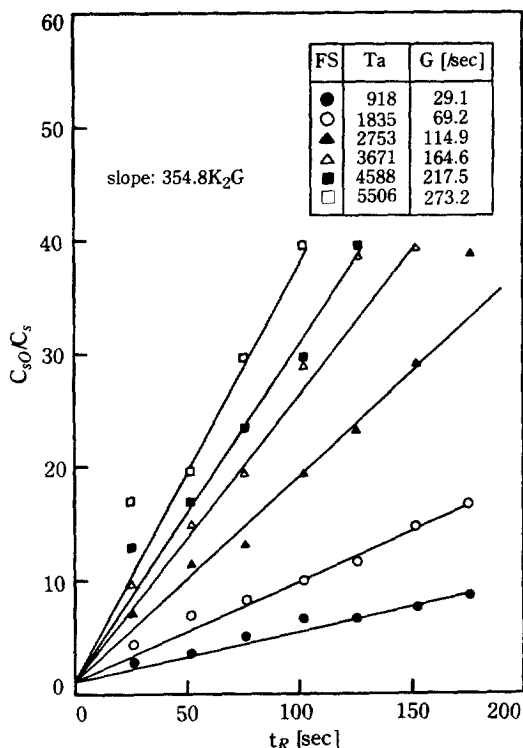


Fig. 6. Model prediction of Eq. (12) by experimental data (Tix-O-Sil 34M-Accofloc C-482; $C_s=1$ g/l; $C_f=4$ mg/l).

식 (11)과 (12)를 실험결과와 비교하여 보면 Fig. 5와 6으로 나타내어진다. 여기서 FS는 소형 응집기를 나타낸다. 이들 직선의 기울기는 각각 $K_1 C_{s0}^{0.85} G$ 와 $K_2 C_{s0}^{0.85} G$ 이며 절편은 0과 1이다. Fig. 5와 6을 비교하여 보면 식 (11)은 응집속도 모델로 적합하지 않으며 식 (12)는 실험결과를 잘 만족시켜 응집속도 모델로 타당함을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 현탁입자의 농도와 실험계가 다른 경우에도 동일하게 나타났다. 식 (11)은 모델의 설정시 응집속도가 입자의 초기농도와 특정 체류시간에서 응집되지 않은 입자의 농도에 비례한다는 가정을 도입한 것으로 이미 Smoluchowski [14]의 모델이나 Huck와 Murphy [2]의 모델에서 이 가정이 타당하지 않음을 입증한 바 있다. 즉 현탁입자의 응집속도가 입자의 농도 C_s 에 비례함을 다시 확인할 수 있다. 그러므로 입자의 응집속도식은 식 (9)가 타당하며 이에 의하여 경험적으로 구해진 식 (12)가 본 연구의 결과를 만족시켜 주는 입자의 응집모델로 설정될 수 있다.

식 (12)를 이용하여 각 현탁입자의 농도와 실험계에

대한 총괄 응집반응 속도상수 K_2 를 구하고 이들 결과를 종합하여 Table 3에 나타내었다. Table 3의 결과에서 Tix-O-Sil 34 M-C-482 실험계의 속도상수가 가장 커서 응집속도가 빠르며 Tix-O-Sil 34 M-C-480과 Tix-O-Sil 34 M-CP-402 실험계의 속도상수가 비슷함을 관찰할 수 있다. 이 점은 제 1부의 연구 [1]에서 이미 예측된 바 있다. 응집속도 상수에는 현탁입자와 응집제간의 흡착속도가 내포되어 있어 이들 속도에 의하여 속도상수가 차이를 보이며 동일한 현탁입자에서 응집제의 이온화도가 유사한 C-480과 CP-402의 응집속도 상수가 비슷한 점이 이를 뒷받침하여 준다. Kaolin-C-482 실험계는 실리카 실험계와 입자특성이 다르므로 속도상수가 다르나 동일한 응집제에 대하여 비교하여 보면 실리카 입자보다 응집속도가 늦음을 알 수 있다. 응집속도 상수는 전반적으로 현탁입자의 농도가 증가할수록 크게 나타나는데 이는 고농도부에서 응집이 더욱 효율적이어서 분리효율이 높고 체류시간이 짧아지는 실험결과에 비추어 타당한 것으로 생각된다.

4. 결 론

쿠엣트 응집기를 이용하여 양이온계 고분자 응집제와 실리카 및 카올린 현탁입자의 응집 및 고-액 분리현상을 연구한 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 최대 분리효율을 얻기 위해 투여되어야 할 고분자 응집제의 최소농도는 주어진 현탁입자 농도의 0.425승에 비례함을 확인하였다. 이를 근거로 제의된 경험식 (4)가 타당성이 있음을 확인하였다.
2. 고분자 응집제의 현탁입자에 대한 흡착물은 현탁입자의 농도가 증가할수록 감소하였다. 전여 고분자 응집제 농도를 측정하여 충돌효율 인자를 나타내는 실험식을 설정하였다. 이를 근거로 응집물의 파열이 일어나지 않는 범위에서 초기 현탁입자의 농도, 응집 후 침강 분리되지 않은 현탁입자의 농도, 평균 속도구배 및 체류시간을 함수로 하는 경험적 응집속도 모델을 기존의 LaMer-Healy 모델과 Huck-Murphy 모델을 기초로 구하였다.

감 사

본 연구는 1987년도 문교부 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 이루어졌으며 이에 감사를 표하는 바입니다.

NOMENCLATURE

- a : exponent to be estimated
 b : exponent to be estimated
 C_f : flocculant concentration [mg/l]
 C_s : suspension concentration [g/l]
 C_{s0} : initial suspension concentration [g/l]
 D_F : mean floc diameter [μm]
 d_s : solid particle diameter [cm]
 E : separation efficiency [$\{1 - C_s/C_{s0}\} \times 100$]
 G : root mean square velocity gradient, $[P/V\mu]^{1/2}$ [1/sec]
 h_i : constant to be estimated [$i=1, 2$]
 K_i : flocculation rate constant [$i=1, 4$]
 K_x : constant
 K_y : constant
 K_z : constant
 Ta : Taylor number, $u_1 d^{3/2} / \nu R_1^{1/2}$, dimensionless
 t : time [sec]
 t_R : retention time [sec]
 t_S : settling time [sec]
 V_s : volume of sediment [cm^3]
 Z : zeta potential [mV]

Greek Letters

- β_i : constant [$i=1, 2$]
 θ : fraction of surface coverage
 ξ : fraction of collision resulting aggregation, dimensionless

REFERENCES

1. Jeon, G. and Choi, C.K.: *Hwahak Konghak*, **27**(6), 812 (1989).
2. Huck, P.M. and Murphy, K.L.: *J. Environ. Eng. Div. ASCE*, **104**, 767 (1978).
3. Higashitani, K., Kage, H. and Matsuno, Y.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **10**, 127 (1984).
4. Iler, R.K.: *J. Colloid Interface Sci.*, **37**, 364 (1971).
5. Black, A.P., Birkner, F.B. and Morgan, J.J.: *J. AWWA*, **57**, 1547 (1965).
6. Healy, T.W.: *J. Colloid Sci.*, **16**, 609 (1961).
7. LaMer, V.K. and Healy, T.W.: *J. Phy. Chem.*, **67**, 2417 (1963).
8. Mabire, F., Audebert, R. and Quivoron, C.: *J. Colloid Interface Sci.*, **97**, 120 (1984).
9. LaMer, V.K. and Smellie, R.H.: *J. Colloid Sci.*, **11**, 720 (1956).
10. Shull, K.E.: *J. AWWA*, **59**, 1164 (1967).
11. Higashitani, K. and Hosakawa, G.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **9**, 543 (1983).
12. Jankovics, L.: *Polymer Letters*, **2**, 247 (1964).
13. Dixon, J.K., et al.: *J. Colloid Interface Sci.*, **23**, 465 (1967).
14. Von Smoluchowski, M.: *Physik. Z.*, **17**, 557 (1916).
15. Camp, T.R. and Stein, P.C.: *J. Boston Soc. Civ. Engrs.*, **30**, 219 (1943).
16. LaMer, V.K. and Healy, T.W.: *Rev. Pure Applied Chem.*, **13**, 112 (1963).