

쿠엣트 응집기를 이용한 고형물의 응집 및 고-액 분리에 관한 실험적 연구 제 1부 : 최적 응집조건

전 귀 · 최창균

서울대학교 공과대학 화학공학과
(1989년 5월 30일 접수, 1989년 7월 12일 채택)

Experimental Studies on Flocculation of Solid Particles and Solid-Liquid Separation with Couette Flocculators Part 1. Optimum Flocculation Conditions

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 12 July 1989)

요 약

테일러 와류를 보이는 쿠엣트 응집기를 활용하여 수용액 중 고형물의 응집 및 분리특성을 고찰하였다. 실리카 및 카올린 현탁입자에 양이온계 고분자 응집제를 투여한 연속식 실험계에서 최적 체류시간은 약 150초 정도인 것으로 나타났다. 최적 응집조건을 나타내는 테일러 수는 고형물의 농도가 1g/l 이하에서는 각 실험계마다 일정하였으며 현탁입자의 농도가 3-10g/l 범위에서는 고형물의 농도에 따라 감소하였다. 또한 최적 테일러 수는 현탁입자와 고분자 응집제의 농도를 함수로 하는 무차원 상관식으로 표현되었다. 최적 응집조건에서의 캠프 수는 1.37×10^4 - 5.90×10^4 범위로 분산되는 경향을 보였다.

Abstract— The study on flocculation in a Couette flocculator showing Taylor vortices and subsequent solid-liquid separation characteristics was conducted experimentally. In this study silica or kaolin suspensions in water were used to investigate flocculation by cationic polymers. In the present experiments the optimum retention time was found to be about 150 seconds. The optimum Taylor number reached a constant value, when the suspension concentration was less than 1 g/l. For the suspension concentration of 3-10 g/l, the optimum Taylor number decreased with an increase in suspension concentration. With these results a correlation of the optimum Taylor number was obtained as a function of the suspension concentration and the flocculant concentration. The resulting Camp number at optimum conditions was found to scatter in the range of 1.37×10^4 - 5.90×10^4 .

1. 서 론

화학공업, 소재공업, 광공업 등에서 물질의 정제, 분리 및 회수를 목적으로 고-액 분리공정이 널리 활용되

고 있다. 더욱이 음료수, 생활폐수 및 산업폐수 처리분야에서 고-액 분리공정이 차지하는 비중은 매우 크다. 따라서 21세기를 향한 현 시점에서, 관련 기술을 진작시켜 생산성 향상은 물론 관련 공정의 설계기법과 최적

조업조건 확립에 필요한 교육 및 연구가 병행되어야 한다는 의식이 선진각국에서 고취되고 있다.

수용액 중의 미세한 고형물들을 효율적으로 분리하기 위하여 중력, 압력, 원심력 등을 이용하는 각종 장치, 특히 응집기, 침강기, 여과기, 원심분리기 등이 널리 활용되고 있다. 그러나 이들 장치를 효율적으로 활용하기 위해서는 수용액 중에 현탁되어 있는 고형물을 응집시키는 조작이 매우 중요하다. 고형물을 응집시키는 데에는 고분자 응집제의 개발에 부가하여 유동학적 측면이 고려되어야 한다. 후자는 관련된 장치개발에 필수적인 요인이다.

본 연구에서는 새로운 형태의 응집기로서 테일러 와류(Taylor vortex)의 형성이 가능한 쿠엣트 응집기를 활용하여 수용액 중 고형물의 응집특성을 조사하고 그 분리특성의 체계화를 목적으로 하였다. 쿠엣트 응집기와 관련된 연구는 1968년 이래 본격적으로 추진되어 왔으나 대부분의 경우 테일러 와류를 활용하지 않아 응집에 좋은 효과를 보이지 못하고 있다[1]. 그러나 내부원통이 회전하는 쿠엣트 응집기는 자체내에서 발생하는 테일러 와류에 의하여 응집제의 효율적인 혼합이 가능하며 유체에 균일한 운동량이 전달되어 교반기에 의한 응집에 비하여 균일한 응집을 일으키는 물론 조직적인 응집현상 규명을 가능하게 해줄 것으로 예상된다[2]. 본 연구에서의 주안점은 유동학적 측면에서 최적 조업조건을 대표할 수 있는 테일러 수(Taylor number)와 캠프 수(Camp number) 및 체류시간을 찾아내어 소요되는 동력을 예측함으로써 쿠엣트 응집기를 위시한 각종 응집기의 최적 조업조건 설정에 유동학적 측면의 유사성을 적용함에 두었다.

2. 실험

2-1. 시료

본 연구에서는 현탁입자로서 실리카 입자인 한불화학의 화이트 카본과 락우공업의 카올린 입자들을 사용하였다. 화이트 카본은 평균 입자크기에 따라 Ze-O-Sil 45, Ze-O-Sil 39, Tix-O-Sil 34M 세 종류를 선정하였다. 이들 네 가지 입자의 물리적 특성은 Table 1과 같다. 현탁액은 화이트 카본이나 카올린 입자를 실험에 요구되는 농도만큼 계량하여 물과 함께 시료저장 탱크에 넣고 3분간 1350 rpm에서 교반시켜 준비하였다. 고분자 응집제는 회분실험을 통하여 선정된 Acrylamide계 응집제인 Mitsui-Cyanamid 회사의 양이온계 응집제 Accofloc C-482(양이온화도 20-30%)와 Accofloc C-480(양이온화도 90-100%), 양이온화도가 Accofloc C-480과 유사한 Dow Chemical 회사의 Separan CP-402를 사용하였다. 이들 응집제는 자석 교반기로 400 rpm에서 1시간 동안 증류수 1000 cc에 0.5g을 용해시켜 0.05% 용액으로 만들어 사용하였다. 실험 수행시에는 0.05% 응집제 용액을 현탁액에 투입시키고자 하는 농도로 묽혀서 사용하였다. 본 연구에서는 Mitsui-Cyanamid 회사에서 제공한 기술자료[3]에 근거하여 응집제의 용해효율이 최적인 조건에서 응집제를 용해시켰다. 본 연구에서 검토된 실험계를 Table 2에 정리하였다.

2-2. 실험장치 및 방법

쿠엣트 응집기는 두 개의 아크릴 원통을 사용하여 외경이 46 mm, 내경이 30 mm, 길이가 765 mm, 내경

Table 1. Physical properties of solid particles

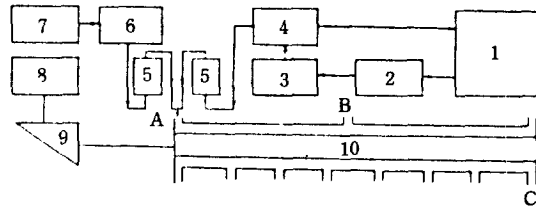
Classification	Silica			Kaolin
	Ze-O-Sil 45	Ze-O-Sil 39	Tix-O-Sil 34M	
SiO ₂ %	97.2	96.9	92.0	43.4
Al ₂ O ₃ %	—	0.35	0.1	40.9
H ₂ O (combined) %	2.8	2.75	7.9	15.7
pH (5 g/100cc)	6-7	6-7	6-7	5-5.5
Specific gravity	1.95	1.95	2.0	2.6
Bulk density g/cc	0.28	0.25	0.08	—
Particle collected in sieve ASTM 80 mesh %	<5	0.02	0.05	1.0
Average particle size (Coulter counter) μm	20.0	10.0	2.0-3.0	—
Average particle size (Horiba CAPA-300) μm	17.0	7.0	1.3	11.2

Table 2. Summary of systems studied

Symbol	Specification
C0	Flocculant: Accofloc C-480
C2	Flocculant: Accofloc C-482
P2	Flocculant: Separan CP-402
KN	Kaolin
S1	Silica: Tix-O-Sil 34M
S2	Silica: Ze-O-Sil 39
S3	Silica: Ze-O-Sil 45

과 외경의 비를 0.65로 제작하였으며 응집물의 중력에 의한 침강을 막기 위하여 수평으로 설치되었다. 쿠프트 응집기에 8개의 시료 채취부를 응집기의 외부원통에 등간격으로 설치하였다. 이들 각각의 채취부는 응집기 내의 유동이 정상상태에 도달하였을 경우에 교반시간으로 간주할 수 있다[4]. 또 응집기의 외부원통 윗쪽에 3개의 공기 유출구를 설치하여 실험초기에 응집기의 내부에 차 있는 공기를 유출시키고 실험 중에 유입되는 공기를 제거할 수 있게 하였다. 응집기의 양 끝에는 회전시 마찰을 줄이기 위하여 베어링(KBC-6205Z)을 설치하였다. 응집기의 내부원통이 회전하면 응집기의 내부원통과 회전축 부분의 베어링 틈으로 공기가 흡입될 수 있다. 그러나 회전축 외부에 O-ring을 삽입하고 그 위에 진공 그리스(Dow-Corning, Cat. No.970 V)를 칠하여 공기의 흡입을 방지할 수 있었다. 쿠프트 응집기에 의한 연속실험 장치는 Fig. 1과 같다.

연속실험을 실시하기 위하여 40l의 시료 저장탱크를 제작하였으며 이곳에 1/30 마력의 교류 전동기와 임펠러를 설치하여 현탁액을 준비할 수 있도록 하였다. 응집제 용액 역시 1l의 응집제 용액 저장탱크를 설치하였으며 응집제 용액의 연속적인 주입을 도모하고자 varistaltic 펌프(Manostat, Model Solid-state)를 사용하였다. 현탁액은 순환펌프(Fisher Scientific Co., Model B-6-3)에 의하여 head 탱크로 보내져서 일정유량은 응집기로 주입되고 나머지는 시료 저장탱크로 순환시켰다. 이들 두 용액은 모두 유량계를 통하여 유량이 보정되고 측정되었다. 응집기 입구에 T자형 3.2mm 노즐을 설치하여 현탁액과 응집제 용액의 급속혼합을 유도하였다[5, 6]. 이때 현탁액과 응집제 용액의 혼합비는 10으로 고정하였다[2]. 응집기의 내부원통은 1/30 마력 직류 전동기로 회전시켰다. 회전수는 직류 전동기 조절장치로 조정되었으며 회전수의 편차를 줄이기 위하여 변속기어를 사용하였다. 이때 회전수의 편차는 ± 5 rpm에 국한되었다. 유동이 정상상태에 이르도

**Fig. 1. Schematic diagram of continuous experiments.**

1. suspension storage tank
2. intermediate tank
3. slurry pump
4. head tank
5. flow meters
6. varistaltic pump
7. flocculant storage tank
8. DC motor
9. gear
10. Couette flocculator

록 약 10-15분의 예비운전을 수행한 후 각각의 시료 채취부에서 시료를 회분 침강기(5×25cm 아크릴원통)에 약 350cc 채취하였다. 시료 채취는 응집기 맨 끝에서부터 차례로 실시되며 시료 채취 후 5분간의 예비 운전시간을 두어 유동을 정상상태로 유지시켰다. 채취된 시료로부터 응집 정도를 측정하였다. 실험은 상온에서 실시되었다.

연속실험은 현탁액의 농도가 0.2-10g/l 범위에서 9가지 농도, 응집기 내부원통의 회전수가 100-1000rpm인 영역에서 7-10개의 회전수를 선정하여 실시되었다. 고분자 응집제의 농도는 현탁액의 농도에 따라 변화시켜 최대 분리효율을 나타내는 응집제 농도의 3-6배까지 투여하였다. 현탁액의 응집기 내 체류시간은 응집이 초기에 급격히 일어나는 현상을 관찰하기 위하여 본 연구의 기초연구[1, 7]를 토대로 177초까지 고려하였다. 연속실험에서는 현탁액의 크기와 농도 및 종류, 응집제의 농도와 종류 등에 대하여 교반시간과 테일러 수 및 캄프 수가 갖는 상관성이 조사되었다. 실험은 현재까지 연구결과가 보고된 바 없는 테일러 와류를 가진 종류와 테일러 와류를 가진 난류영역을 중심으로 실시되었으며 테일러 와류가 없는 난류영역까지 검토되었다.

2-3. 응집정도 측정

응집정도는 빛의 투과도에 의한 고형물의 분리효율을 기준으로 삼았다. 또한 침전물의 부피를 측정하여 분리효율에 의한 응집정도의 기준을 보완하였다. 빛의 투과도는 채취된 시료를 100초간 침강시킨 뒤 액면 밑 6cm 지점에서 10ml의 용액을 취하여 분광광도계(Bausch & Lomb Co., Model Spectronic 20)에서

500 nm 의 파장으로 측정하였다. 이때 증류수의 투과도를 100 으로 하여 투과도의 기준점을 삼았다. 측정된 투과도는 현탁입자의 농도 검량선과 비교하여 잔여입자의 농도로 환산하였다. 응집에 의하여 제거된 현탁입자의 분리효율은 다음과 같이 표현된다.

$$E = \{1 - C_s/C_{s0}\} \times 100 \quad (1)$$

여기서 E 는 분리효율, C_{s0}는 초기 현탁입자의 농도, C_s는 측정된 잔여 현탁입자의 농도를 나타낸다. 침전물의 부피는 회분 침강기에서 침강시작 100초 후에 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 테일러 수와 평균 속도구배

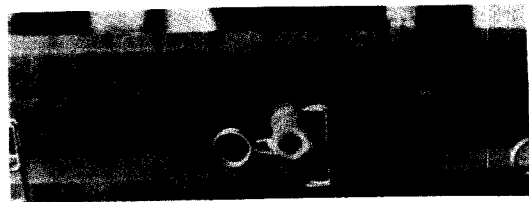
중심이 같은 두 원통 사이에 있는 유체의 유동은 내부원통의 회전수가 어떤 임계치 이상으로 증가될 때 유체가 원심력에 의하여 외부원통 방향으로 추진력을 받아 불안정한 상태가 되며 그 결과로서 원통의 축방향을 따라 규칙적으로 서로 반대인 고리상의 배열로 와류가 형성되는데 이것을 테일러 와류라 한다[8]. 이러한 유동양상은 Coriolis 력과 점성력의 비로 표현되는 다음에 정의되어 있는 테일러 수 Ta 로 구분된다.

$$Ta = \frac{u_1 d}{\nu} \left(\frac{d}{R_1}\right)^{1/2} = \frac{R_1^{1/2} d^{3/2}}{\nu} \omega_1 = \left(\frac{d}{R_1}\right)^{1/2} Re \quad (2)$$

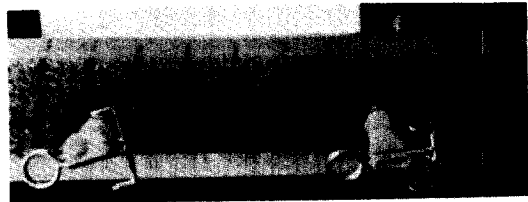
$$Re = \frac{u_1 d}{\nu} \quad (3)$$

여기서 d 는 두 원통 사이의 간격, R₁은 내부원통의 반경, R₂는 외부원통의 반경, u₁은 내부원통의 회전방향 속도, ω₁은 내부원통의 각 속도를 나타내며 Re 는 레이놀즈 수, ν 는 유체의 동점도를 나타낸다. 식 (2)를 살펴보면 테일러 수는 레이놀즈 수, 장치의 형태인자와 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. Fig.2는 응집기 내부에서 발생하는 테일러 와류를 가시화한 것이다. (a)는 생성된 테일러 와류가 완전히 발달되지 않아 와류간의 경계가 다소 불안정함을 나타낸다. 테일러 와류가 완전히 발달되면 (b)와 같이 와류간의 경계가 명확해지며 하나의 테일러 와류 안에 규칙적이며 회전 방향이 반대인 고리상의 와류가 생성되어 이중와류를 형성하게 된다. 테일러 수가 증가되면 유동은 심한 난류에 접어들며 테일러 와류는 소멸되고 (c)와 같이 된다.

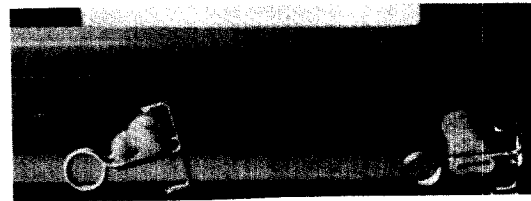
쿠엣트형 장치에 대한 회전우력(torque)과 유체에



(a) Ta = 1835



(b) Ta = 3671



(c) Ta = 9177

Fig. 2. Growth of Taylor vortices (C_s = 3 g/l; C_T = 5 mg/l).

전달되는 동력간의 상관성은 교반 탱크형 장치에 비하여 연구된 바 적다. 그러나 평균 속도구배의 개념은 수처리 공정에서 광범위한 응용범위를 차지하고 있다. 그러므로 쿠엣트 응집기에서 정의되는 테일러 수와 평균 속도구배간의 관계를 모색하여 쿠엣트 응집기에서의 평균 속도구배를 해석할 필요가 있다. 본 연구에서는 여러 유동영역에서 회전우력과 동력 수 사이의 관계를 모색한 연구들을 정리하여 이들 연구간의 상호 연관성과 타당성을 검토하였다[2]. 이를 토대로 본 연구에서 사용한 응집기에 대하여 적합한 평균 속도구배 G는, Wendt[9]가 제시한 회전우력 실험식으로부터, 아래 식으로 유도되었다.

$$G = \left\{ \frac{0.165 \nu^2 R_1^{1/4} R_2^{1/4}}{(R_1 + R_2) a^5} \right\}^{1/2} Ta^{1.25} \quad (4)$$

(Ta ≤ 9000)

위의 식에서 상수는, 동일한 회전속도에서, 응집기 내부에 액체가 차 있는 경우에 소요된 동력으로부터 공기만 차 있을 때에 소요된 동력을 빼어 액체에 전달된 순수한 동력을 구하고 이를 환산하여 구하였다[10, 11]. 식 (4)로부터 산출되는 평균 속도구배에 체류시간

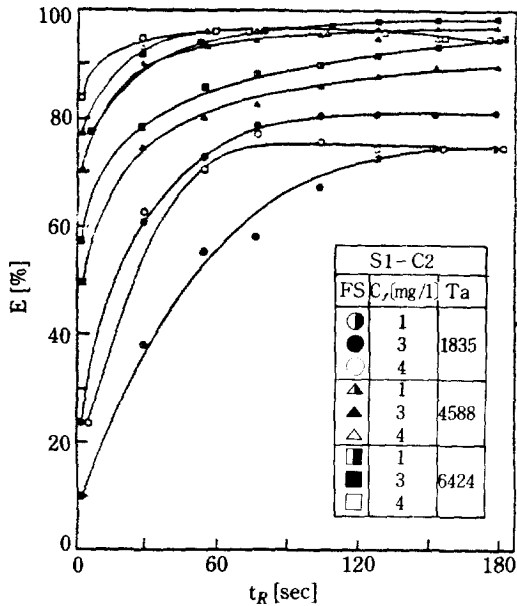


Fig. 3. Effect of retention time on separation efficiency ($C_s=1$ mg/l).

을 곱하면 캄프 수가 산출되며, 이 캄프 수의 값은 응집제들의 성능비교 및 응집속도 모델에 활용될 수 있다. 식 (4)에 의한 평균 속도구배의 예측값은 측정치에 대하여 $\pm 6\%$ 의 오차를 나타내었다.

3-2. 체류시간의 영향

Villegas와 Letterman[12]은 응집기내의 체류시간은 실험변수라기 보다 장치의 설계에 필요한 설계변수로 고려되어야 한다고 하였다. 본 연구에서는 실험계와 응집제의 농도, 테일러 수, 입자크기 등을 변화시키면서 체류시간이 분리효율과 침전물의 부피에 미치는 영향을 검토하였으며 쿼트트 응집기에서의 최적 체류시간을 조사하였다.

Fig.3은 응집제의 농도와 테일러 수를 변화시키면서 체류시간에 따른 분리효율을 나타낸 것이다. 여기서 FS는 본 연구에서 사용된 소형 쿼트트 응집기를 나타내며 C_s 는 응집제의 농도, t_R 은 체류시간을 나타낸다. 테일러 수가 낮은 경우에는 체류시간에 따른 분리효율의 증가현상은 계속되며 테일러 수가 증가할수록 체류시간 초기에 분리효율의 증가가 매우 큼을 관찰할 수 있었다. 반면에 테일러 수가 2000 이상이 되고 체류시간이 2분 이상이 되면 분리효율의 증가현상은 매우 완만해지며 테일러 수가 매우 큰 경우에는 분리효율이 체류시간 2분대에서 거의 최대를 보임을 알 수 있었다.

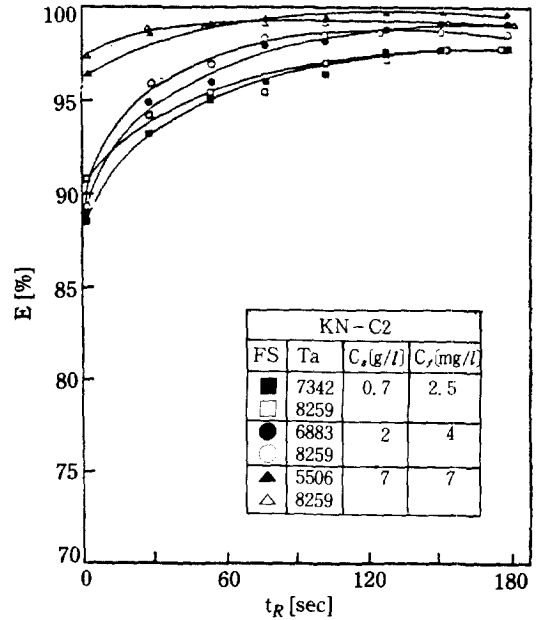


Fig. 4. Effect of retention time on separation efficiency (Kaolin-Accofloc C-482).

또한 응집제의 농도는 분리효율에만 관계됨을 확인하였다. 평균 입자크기가 다른 실리카 현탁입자에 동일한 응집제를 투입하여 관찰한 체류시간의 영향은 앞에서 언급된 결과와 유사하였다[5]. 그러나 단지 입자의 농도가 작을 때에는 최대 분리효율을 나타내는 체류시간이 고농도일 때보다 약간 길어졌다. 이러한 현상은 입자의 농도가 낮으면 입자간의 충돌과 응집물간의 충돌빈도가 고농도일 때보다 낮아서 충분한 응집이 이루어지기 위해서는 더 많은 체류시간이 요구되기 때문에 생기는 것으로 생각된다. Fig.4는 카올린 현탁입자에 C-482 응집제를 투입한 실험계로서 현탁입자의 농도, 응집제의 농도, 테일러 수를 변화시키면서 체류시간에 따른 분리효율의 영향을 나타낸 것이다. 이들 결과에서도 역시 체류시간의 영향은 약 2분대에서부터 분리효율의 증가가 매우 완만한 현상을 나타내어 앞에서 언급된 결과와 거의 일치함을 알 수 있었다. 단지 카올린 입자는 실리카 입자보다 더 큰 테일러 수에서 최대 분리효율을 나타내는 것이 다른 점임을 관찰하였다.

Fig.5는 실험계에 따른 침전물의 부피변화와 분리효율을 체류시간에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 V_s 는 침전물의 부피를 나타낸다. 침전물의 부피는 체류시간 약 60초 안에서 가장 크며 시간에 따라 점차 감소하거나 일정한 경향을 나타내었다. 체류시간 초기에 침전물의 부피가 증가하는 현상은 응집기 입구에서 급격히 섞

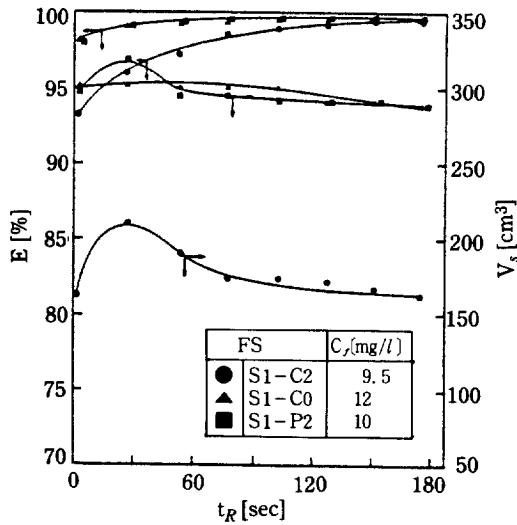


Fig. 5. Comparisons of separation efficiency with volume of sediment for various systems ($C_s=10$ g/l; $Ta=2753$).

인 현탁액과 응집제 용액이 혼합되면서 형성된 작은 응집물들이 서로 연결되어 크고 느슨한 응집물이 형성되기 때문이며, 이렇게 형성된 응집물들이 체류시간이 증가하면서 입자간의 조밀한 배열이 이루어져 응집물의 크기가 작아지기 때문이라 생각된다. 전반적으로 체류시간에 따른 침전물의 부피변화는 체류시간이 60초 이상에서는 거의 일정하며 단지 분리효율만이 증가함을 알 수 있었다. 이것은 체류시간에 대한 응집물의 크기 변화가 별다른 영향을 받지 않으며 주어진 외력에 대하여 입자간의 결합거리가 시간에 무관하게 평형을 이루기 때문이라 생각된다. 또한 Fig.5에서 실험계에 따른 침전물의 부피차이가 매우 큼을 관찰할 수 있다. 이러한 차이는 현탁입자와 응집제가 가지는 화학적 특성에 의하여 이들 둘이 혼합하고 응집될 때 나타내는 현상으로 흡착 에너지와 흡착에 의한 가교 거리차에 의하여 침전물의 부피차이를 가져온다고 생각된다. 흡착 에너지와 가교 거리차는 입자의 표면전하와 입자에 흡착되는 응집제의 분자량과 이온화도에 의하여 결정된다고 알려져 있다[13, 14]. 특히 실리카 입자에 대하여 C-482 응집제가 투입된 실험계의 침전물 부피가 C-480이나 CP-402가 투입된 실험계보다 침전물 부피가 거의 반 정도로 작음을 관찰할 수 있다. 그러므로 분리효율이 같더라도 침전물의 부피가 작게 되면 응집물내의 함유율이 낮아 침전물의 처리가 용이하게 된다. 이러한 장점이 응집제 선정의 또 다른 중요성을 강조하는 것이라 할 수 있다[3].

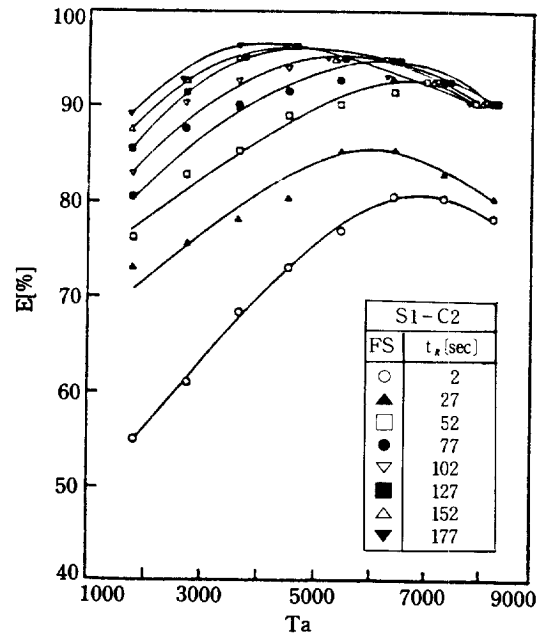


Fig. 6. Effect of Taylor number on separation efficiency ($C_s=0.7$ g/l; $C_f=3$ mg/l).

쿠엣트 응집기에서 응집에 대한 체류시간의 영향을 종합하여 보면 실험계의 차이나 입자크기 및 응집제의 농도에 관계없이 최적 체류시간이 거의 일치하는 현상을 관찰하였다. 일반적으로 교반탱크 응집기에서는 응집을 위한 체류시간이 5-30분 정도를 요하는 것으로 알려져 있다[15, 16]. 반면에 본 쿠엣트 응집기에서는 응집에 필요한 체류시간이 약 150초이면 충분한 것으로 관찰되었으며 체류시간은 단지 충분한 응집을 유도하기 위하여 필요한 시간으로서 고려되어야 함을 확인하였다.

3-3. 테일러 수의 영향

응집에 대한 혼합강도의 중요성은 Smoluchowski [17]이래 지속적으로 강조되어 왔다. 왜냐하면 대부분의 현탁입자들은 그 크기가 커서 브라운 운동에 의하여 응집되지 않으므로 기계적 혹은 유동학적 에너지가 첨가되어야 입자간 반발에너지를 극복할 수 있으며, 이로 인하여 충돌빈도가 증가되어 응집이 쉽게 이루어질 수 있기 때문이다[18].

Fig.6은 체류시간을 변화시키면서 혼합강도의 척도로 표시된 테일러 수가 분리효율에 미치는 영향을 보여 주고 있다. 이 결과를 살펴보면 체류시간의 영향과는 다르게 테일러 수에 따라 분리효율이 가장 높은 점들이

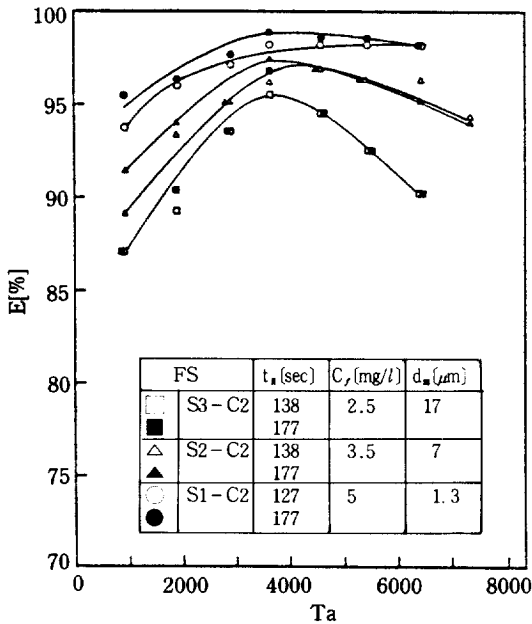


Fig. 7. Effect of mean particle size on optimum Taylor number ($C_s=3$ g/l).

각 체류시간마다 존재하는 것이다. 또한 체류시간이 낮은 경우는 각 체류시간에서 갖는 가장 높은 분리효율들이 테일러 수가 큰 쪽에서 나타남에 체류시간이 증가하면 가장 높은 분리효율을 나타내는 테일러 수가 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 그러므로 체류시간과 테일러 수가 분리효율에 대하여 상호 보완적인 관계를 가짐을 알 수 있다. 그러나 체류시간이 2분 이상에서는 각 체류시간에서 가장 높은 분리효율을 나타내는 테일러 수가 거의 같게 나타났다. 그러므로 3-2절에서 논의된 바와 같이 체류시간이 2분 이상이 되면 체류시간의 응집에 대한 영향이 거의 무관해짐을 다시 확인할 수 있다. 현탁입자의 농도가 증가하면 큰 테일러 수에 의한 분리효율의 감소현상이 둔화되며 $C_s=10$ g/l 인 경우에는 분리효율의 감소경향을 관찰하기가 힘들었다. 이러한 현상은 고농도 입자의 응집 및 분리시 상침강에 의한 미립자의 함입에 의한 것이라 생각되며 이 점은 고농도 입자의 응집 및 분리가 더욱 효율적임을 예측해준다.

Fig. 7은 평균 입자크기가 다른 3가지 실리카 입자에 대하여 테일러 수가 분리효율에 미치는 영향을 나타내고 있다. 여기서 d_m 은 평균 입자크기를 나타낸다. 이들 결과에서 보면 먼저 입자크기가 작을수록 분리효율이 높으며, 입자크기가 클수록 분리효율이 감소하는 경향이 두드러짐을 알 수 있다. 그러나 입자의 농도가 증

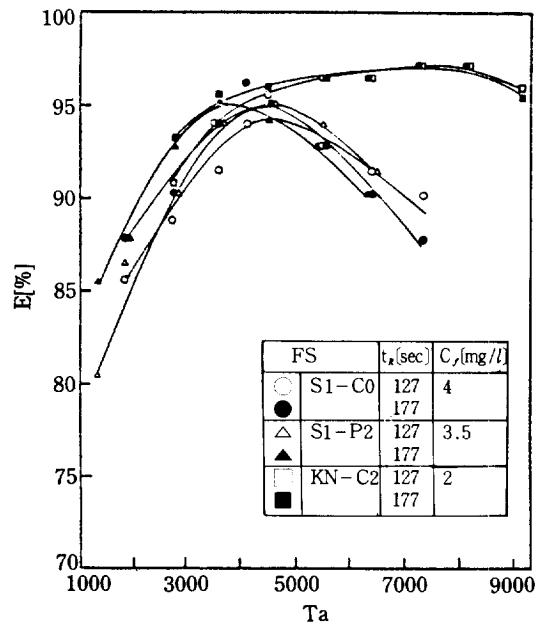


Fig. 8. Effect of flocculation system on optimum Taylor number ($C_s=0.7$ g/l).

가할수록 분리효율의 차이는 점점 없어지며 분리효율의 감소경향이 둔화되었다. 또한 입자의 크기에 큰 차이없이 최적 응집조건을 나타내는 테일러 수는 동일하며 단지 입자의 농도에 관계됨을 확인하였다. 입자의 크기가 작을수록 분리효율이 높은 원인은 동일한 현탁입자의 농도에서 작은 입자일수록 단위 무게당 입자수가 많으므로 충돌빈도가 높아 응집이 잘 이루어지기 때문이라 판단된다. 반면에 입자의 크기가 클수록 응집물의 크기와 공극율은 크나 응집물의 밀도는 감소한다. 그러므로 입자의 크기가 크면 동일한 혼합강도에서 유체의 전단력에 의해 응집물의 파열이 쉽게 일어나기 때문에 분리효율의 감소경향이 큰 것으로 생각된다[5, 14, 18]. 위에 설명된 결과는 실리카 입자의 응집물을 가시화한 사진으로부터 이미 확인된 바 있다[7]. 전반적으로 평균 입자크기가 1.3-17 μ m 범위에서 최적 응집조건을 나타내는 테일러 수는 입자크기에 영향을 받지 않고 단지 입자크기가 클수록 입자의 파열 가능성이 큼을 확인하였다.

Fig. 8은 각 실험계에 대하여 테일러 수가 분리효율에 미치는 영향을 조사한 것이다. S1-C2 실험계는 Fig. 6에서 검토되었다. 이들 결과는 체류시간의 영향이 거의 없는 체류시간 2분 이상에서 비교하였다. Fig. 6과 8의 결과를 통하여 동일한 실리카 입자에 종류가 다른 응집제를 투입하면 최적 테일러 수가 거의 동일한

영역에서 나타나며 최적 테일러 수는 단지 현탁입자의 농도에 의존함을 알 수 있었다. 또한 카올린 입자와 C-482 응집제의 조합에 의한 실험계는 최적 테일러 수가 실리카 입자와 매우 다름을 확인하였다. 이러한 차이점은 현탁입자가 응집될 때 현탁입자의 물리적 특성이 응집제의 화학적 특성보다 강하게 작용되기 때문이라 생각된다. Table 1에서 카올린과 실리카 입자의 조성을 살펴보면 카올린에는 실리카 입자가 매우 적게 포함하고 있는 Al_2O_3 가 상당히 많이 포함되어 있다. 최적 응집조건을 나타내는 테일러 수가 다른 점은 Al_2O_3 입자가 현탁액상에서 응집될 때 SiO_2 입자보다 더 큰 혼합강도에서 응집되기 때문이라 생각된다. 이런 점을 구명하기 위해서는 입자표면 특성과 입자와 응집제간의 흡착 에너지에 대한 연구가 수반되어야 할 것이다.

현탁입자의 전체 농도에 대하여 관찰해 보면 전반적으로 최적 응집조건을 나타내는 테일러 수가 현탁입자의 농도가 1g/l 보다 작을 때는 각 실험계마다 일정하였으며, 현탁입자의 농도가 3g/l 이상에서는 최적 테일러 수가 현탁입자의 농도에 따라 감소함을 관찰하였다. 이는 현탁입자의 농도가 증가할수록 낮은 혼합강도에서 최대 분리를 이룰 수 있음을 의미한다. 이러한 현상은 현탁입자의 농도가 증가하면 단위 무게당 입자수가 증가하여 입자간 충돌빈도가 증가되므로 낮은 혼합강도에서 충분한 응집이 이루어질 수 있기 때문이라 생각된다. 이러한 결과는 Harris와 Kaufman[18], Ives와 Bhole[19]의 연구에서도 찾아볼 수 있다.

카올린 입자는 밀도가 실리카 입자보다 커서 단위무게당의 부피가 실리카 입자보다 훨씬 작다. 그래서 카올린 입자의 농도가 크더라도 침전물의 부피는 매우 작아서 침전물 부피의 비교는 수행할 수 없었다. 실리카 입자는 입자의 농도가 3g/l 이상에서는 침전물의 부피 비교가 가능하였다. Fig. 9는 체류시간과 실험계에 대하여 침전물의 부피를 측정하여 비교한 것이다. 3-2절에서는 체류시간에 대한 침전물의 부피변화가 체류시간이 짧은(1분 이내) 경우에서 조금 있을 뿐 체류시간의 영향은 거의 없음을 관찰하였다. 그러나 테일러 수에 대한 침전물의 부피변화는 낮은 테일러 수에서는 침전물의 부피가 크나 테일러 수가 증가하면서 침전물의 부피는 감소하여 거의 최소값을 보인 후 다시 증가함을 관찰하였다. 낮은 테일러 수에서 침전물의 부피가 큰 것은 크고 영성한 응집물을 형성하기 때문이며 응집물을 침강시키면서 찍은 사진을 통하여 이 사실을 확인할 수 있다. 크고 영성한 응집물이 테일러 수에 따라 고밀

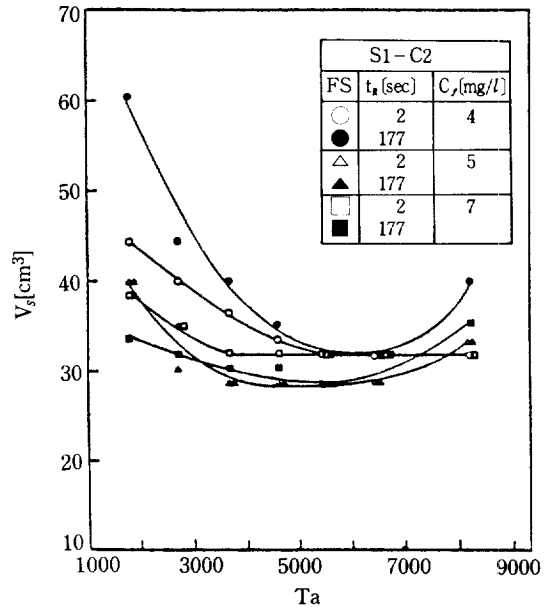


Fig. 9. Effect of Taylor number on volume of sediment ($C_s=3$ g/l).

화되어 그 크기가 작아지고 응집물의 밀도가 증가하는 것은 Yusa 등[20]에 의하여 제시된 pellet 응집물의 기본개념인 역학적 syneresis에 기인한 것이라 판단되며 체류시간보다 교반강도가 더욱 중요하게 작용한다는 기존의 연구들[20-22]이 이를 뒷받침하여 준다. 매우 큰 테일러 수가 부과되면 침전물의 부피가 증가하는 현상은 응집물에 부과된 외력이 응집물 표면에 과다한 압력차를 주어 응집물이 늘어지며 응집입자의 부분적 파열이 일어나기 때문이라 생각된다[22]. 입자의 고밀화 현상은 응집제의 농도가 증가할수록 더욱 강해짐을 관찰하였다. 그러나 과량의 응집제의 투여는 입자의 재안정화를 유도할 수 있으므로 피해야 할 것이다. Fig. 9에서도 3-2절에서 검토된 바와 같이 응집제의 종류에 따라 침전물의 부피가 크게 차이남을 다시 확인할 수 있었다.

분리효율과 침전물의 부피를 비교하여 보면 침전물의 부피가 거의 최소점을 이루기 바로 전에 최대 분리효율이 나타남을 관찰할 수 있었다. 기존의 연구들[21, 23]은 응집이 가장 잘 되어 분리효율이 최대를 이룰 때 침전물의 부피가 가장 크게 나타난다고 하였다. 그러나 쿠엣트 응집기에서는 응집물의 고밀화 현상이 수반되어 침전물이 거의 최소 부피를 이룰 때 분리효율이 가장 높게 나타났다. 이러한 점이 고-액 분리 후 침전물의 처리를 용이하게 해주는 쿠엣트 응집기의 장점이라 강

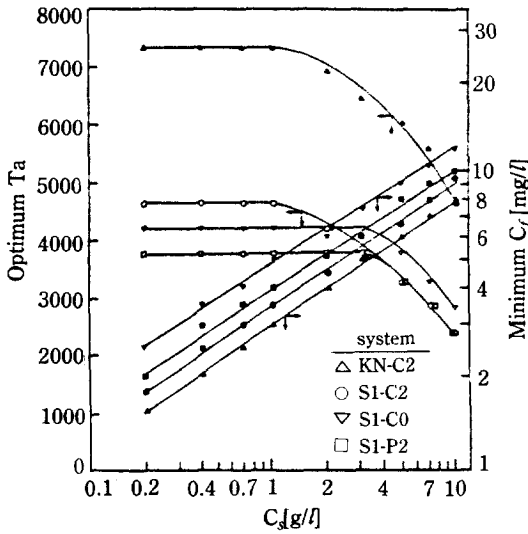


Fig. 10. Conditions of optimum Taylor number with minimum dosage of flocculant at maximum separation efficiency.

조할 수 있다.

3-4. 최적 응집조건과 무차원 상관식

체류시간이 2분 이상인 경우에서 최대 분리효율을 나타내는 최소 응집제 투여농도 및 최소 테일러 수 등의 최적 응집조건을 현탁입자의 각 농도와 실험계에 대하여 종합하면 Fig. 10 과 같다. 실리카 입자에 대하여 여러 가지 응집제의 조합에 따른 최적 응집조건들은 현탁입자의 농도에 대하여 응집제의 투여량이 다르며 소요 동력의 척도인 테일러 수는 $\pm 460 (\pm 50 \text{ rpm})$ 의 차이를 나타내었다. 반면에 카올린 입자를 응집시키기 위한 테일러 수는 매우 큼을 알 수 있었다. Fig. 10에서 여러 가지 실험계의 결과에 대하여 현탁입자의 농도가 1g/l 이하인 저농도 영역에서는 최적 테일러 수가 일정하며 현탁입자의 농도가 3g/l 이상에서는 최적 테일러 수가 현탁입자의 농도에 따라 감소함을 관찰할 수 있다. 그러므로 저농도부에서의 최적 응집조건은 균일하여 테일러 수를 일정하게 유지시키면 되며 고농도 현탁액에 대한 최적 응집조건은 테일러 수를 고려해 주어야 함을 예측할 수 있다. Fig. 11은 응집기 내부에서 실험조건에 따라 응집된 응집물들이 회분 침강기에서 침강 분리되는 과정을 보여주는 사진이다. 여기서 t_s 는 침강시간을 나타낸다. Fig. 11의 (a)와 같은 현탁액을 (d)와 같이 효율적으로 분리하기 위해서는 주어진 현탁액의 농도에 투여되어야 할 응집제 양, 체류시간 및 테일러 수 등의 최적 조합이 갖추어져야 함을 Fig. 11을 통하

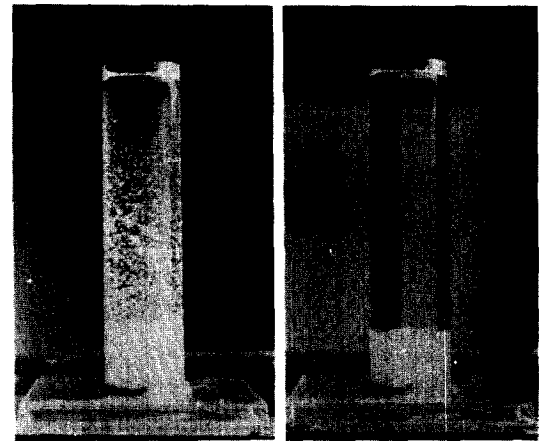
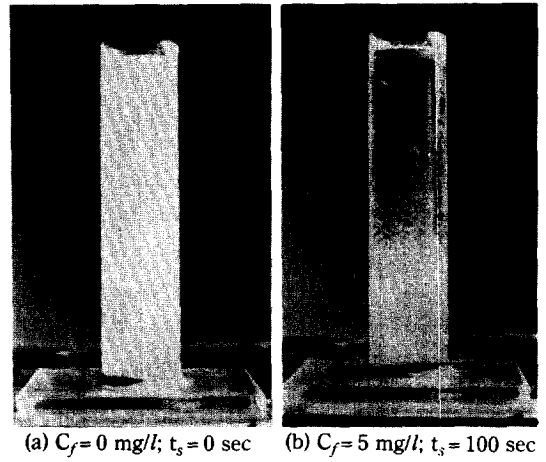


Fig. 11. Photographs of sedimentation cells ($C_s = 5 \text{ g/l}$; $Ta = 3212$; $t_R = 152 \text{ sec}$).

여 확인할 수 있다. 이들 변수간의 최적조건이 갖추어지면 100초의 짧은 침강시간에서 (d)와 같이 가장 높은 분리효율($\approx 100\%$)을 얻을 수 있다. 그러므로 이들 각각의 변수들을 면밀히 검토하여 변수간의 상호 연관성을 조사할 필요가 있다.

Fig. 10에서 종합검토된 결과들로부터 응집변수인 테일러 수, 현탁입자와 응집제 농도간의 연관성을 모색하기 위하여 테일러 수와 무차원 농도(C_s/C_f)를 고려하였다. Fig. 12는 위 두 무차원수에 대하여 Fig. 10의 결과를 나타낸 것이다. 즉 기울기는 응집기의 유동학적 특성을 나타내며 절편은 응집제와 현탁입자가 응집시 나타내는 화학적 특성을 표현하는 것으로 판단된다. 이러한 해석은 Villegas와 Letterman[12], Osasa 등 [24]의 연구에서 유사하게 찾아볼 수 있다. 이들의 연

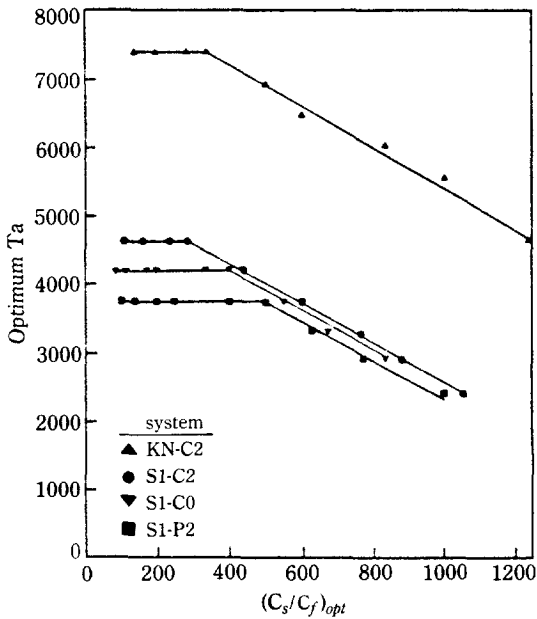


Fig. 12. Correlation between optimum Taylor number and dimensionless concentration at maximum separation efficiency.

Table 3. Values of constants β_1 and β_2 of Eq. (5)

System	β_1	β_2	C_s [g/l] range
S1-C0	5420	3.0	$1 \leq C_s \leq 10$
S1-C2	5320		$3 \leq C_s \leq 10$
S1-P2	5160		$3 \leq C_s \leq 10$
KN-C2	8400		$1 \leq C_s \leq 10$

구는 평균 속도구배와 체류시간의 곱으로 표시되는 무차원 캄프 수를 사용하여 실험식을 제안하였다. 반면에 본 연구에서는 체류시간의 영향이 배제된 무차원 테일러 수를 사용하여 아래와 같은 실험식을 구하였다.

$$Ta_{opt} = \beta_1 - \beta_2 (C_s/C_f)_{opt} \quad (5)$$

(3g/l ≤ C_s ≤ 10g/l)
(C_s ≤ 1g/l, β₂ = 0)

여기서 β₁, β₂는 실험상수이며 하첨자 opt는 최적 응집조건을 나타낸다. Fig. 12에서 각 실험계에 대한 상수 β₁, β₂를 구하면 Table 3과 같다. 식 (5)와 Table 3의 결과는 Fig. 12의 결과에 대하여 ±3%의 오차범위에서 매우 잘 일치하였다.

앞에서 검토된 최적 응집조건에서의 캄프 수는 1.37×10⁴-5.90×10⁴범위로 나타나 교반탱크 응집기의 최적 조건을 나타내는 캄프 수 10⁴-10⁶과 비슷한 값을 나

타내었다. 그러나 캄프 수를 기준으로 한 최적 응집조건의 상관성은 확인되지 않았다. 그러므로 쿠엣트 응집기의 최적 응집조건은 테일러 수를 기준으로 나타내는 것이 타당하다고 판단된다.

4. 결 론

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

1. 응집은 체류시간 초기에 급격히 일어나고 체류시간이 2분 이상에서는 응집이 매우 완만하게 일어나며 체류시간에 의한 분리효율의 감소경향은 매우 작음을 관찰하였다.

2. 최적 응집조건을 나타내는 체류시간은 현탁입자의 종류, 농도 및 크기, 응집제의 종류 및 농도에 무관하게 약 150초로 확인되었다.

3. 테일러 수에 대한 분리효율의 감소경향은 체류시간의 영향보다 크게 나타났으며 현탁입자의 농도가 증가할수록 분리효율의 감소경향은 작게 나타남을 관찰하였다. 이러한 현상은 응집되지 않은 입자들이 침강분리시 상침강에 의하여 응집물 내에 함입되어 나타나는 것으로 판단되었다.

4. 최적 응집조건을 나타내는 테일러 수는 현탁입자 농도가 1g/l 이하에서는 각 실험계마다 일정하였으며 현탁입자의 농도가 3-10g/l 범위에서는 현탁입자의 농도에 따라 감소하였다.

5. 쿠엣트 응집기에서의 평균 속도구배는 Wendt의 경험식에 잘 일치하였으며 최적 응집조건에서의 캄프 수는 1.37×10⁴-5.90×10⁴범위로 나타났다.

감 사

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

NOMENCLATURE

- C_f : flocculant concentration [mg/l]
- C_s : suspension concentration [g/l]
- C_{so} : initial suspension concentration [g/l]
- d : width of gap [cm]
- d_m : mean particle diameter [μm]
- E : separation efficiency [(1-C_s/C_{so}) × 100]

- G : root mean square velocity gradient, $[P/V\mu]^{1/2}$ [/sec]
 R_i : radius of cylinder [$i = 1, 2$] [cm]
 Re : Reynolds number, $u_1 d / \nu$, dimensionless
 Ta : Taylor number, $u_1 d^{3/2} / \nu R_1^{1/2}$, dimensionless
 t_R : retention time [sec]
 t_s : settling time [sec]
 u_1 : peripheral velocity [cm/sec]
 V_s : volume of sediment [cm³]

Greek Letters

- β_i : constant [$i = 1, 2$]
 ν : kinematic viscosity of fluid [cm²/sec]
 ω_1 : angular velocity of inner cylinder [rad/sec]

REFERENCES

- Jeon, G. and Choi, C.K.: *Hwahak Konghak*, **24**, 157 (1986).
- Jeon, G.: Ph.D. Dissertation, Seoul National Univ., Seoul, Korea (1989).
- Mitsui-Cyanamid Technical Laboratory: Technical Report 1-(2), Tokyo (1982).
- Ives, K.J. and Bhole, A.G.: *Water Res.*, **9**, 1085 (1975).
- Letterman, R.D., Quon, J.E., and Gemmell, R.S.: *J. AWWA*, **65**, 716 (1973).
- Lindquist, G.M. and Stratton, R.A.: *J. Colloid Interface Sci.*, **55**, 463 (1976).
- Jeon, G., Lee, H.M., and Choi, C.K.: The 1st Korea-Japan Symp. Sepa. Tech., October, 105 (1987).
- Schlichting, H.: "Boundary Layer Theory", 7th ed., McGraw-Hill, New York, NY (1979).
- Wendt, F.: *Ingen. Arch.*, **4**, 577 (1933).
- Camp, T.R. and Stein, P.C.: *J. Boston Soc. Civ. Engrs.*, **30**, 219 (1943).
- Magaritis, A. and Wilke, C.R.: *Biotech. Bioeng.*, **20**, 709 (1978).
- Villegas, R.A. and Letterman, R.D.: *J. Environ. Eng. Div. ASCE*, **102**, 102 (1976).
- Tambo, N. and Watanabe, Y.: *Water Research*, **13**, 429 (1979).
- Glasgow, L.A. and Luecke, R.H.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **19**, 148 (1980).
- Wagner, E.G. and Hudson, H.E.: *J. AWWA*, **73**, 218 (1981).
- Toml, D.T. and Bagster, D.F.: *Trans. IChemE*, **56**, 1 (1978).
- Von Smoluchowski, M.: *Physik, Z.*, **17**, 557 (1916).
- Harris, H.S. and Kaufman, W.J.: *J. Sanit. Eng. Div. ASCE*, **92**, 95 (1966).
- Ives, K.J. and Bhole, A.G.: *Water Res.*, **11**, 209 (1977).
- Yusa, M., Suzuki, H., and Tomaka, S.: *J. AWWA*, **67**, 397 (1975).
- Yusa, M. and Gaudin, A.M.: *Ceramic Bull.*, **43**, 402 (1964).
- Thomas, D.G.: *AIChE J.*, **10**, 517 (1964).
- Slater, R.W. and Kitchener, J.A.: *Disc. Faraday Soc.*, **42**, 267 (1966).
- Osasa, K., Sambuichi, M., and Nakakura, H.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **11**, 589 (1985).