

쿠엣트 응집기를 이용한 고형물의 응집 및 고-액 분리에 관한 실험적 연구

제 3부 : 쿠엣트 응집기의 대형화와 응용성

전 귀* · 최창균

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

Experimental Studies on Flocculation of Solid Particles and Solid-Liquid Separation with Couette Flocculators Part 3: Scale-up of Couette Flocculators and its Application

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 5 August 1989)

요 약

테일러 와류의 형성이 가능한 두 개의 쿠엣트 응집기를 활용하여 수용액 중 고형물의 응집 및 분리특성을 고찰하였다. 연속실험을 통하여 두 응집기에 대한 유동학적 유사성을 조사하고 응집기의 대형화 가능성을 검토하였다. 최적 체류시간은 두 개의 쿠엣트 응집기에 대하여 약 150-180초로 확인되었다. 또한 두 개의 응집기가 동일한 회전수에서 최적 응집조건을 나타내었다. 응집기의 대형화 인자, 현탁입자의 농도와 고분자 응집제의 농도로부터 최적 테일러 수를 나타내는 상관식을 얻었다. 고형물의 응집 후 연속적이고 효율적인 고-액 분리를 도모하기 위하여 쿠엣트 응집기에 경사판 침전장치를 부착시켜 각종 성능실험을 실시하였다. 이러한 연속식 실험장치는 분리성능이 우수하였으며 이들 장치의 실용성과 응용성이 가능한 것으로 판단되었다.

Abstract—The study of flocculation in Couette flocculators showing Taylor vortices and subsequent solid-liquid separation characteristics were conducted experimentally. In continuous experiments two flocculators were used to extract the hydrodynamic similarity and proper parameters for the flocculator scale-up. The optimum retention time was found about 150-180 seconds in the present experiments. Also, optimum flocculation conditions in two flocculators were reached at the same rotational speed of the inner cylinder. With these results a correlation of the optimum Taylor number was obtained as a function of the scale-up factor, the suspension concentration and the flocculant concentration. To facilitate the solid-liquid separation an inclined plate settler was attached to the Couette flocculator. Through continuous experiments in this combined apparatus it was found that the separation performance was excellent. All these results show that the Couette flocculator with the inclined plate settler may be used efficiently in solid-liquid separation.

*현주소 : 동양시멘트(주) 기술연구소

1. 서 론

임펠러나 터빈을 이용한 교반장치는 화학공업과 연관된 여러 공업분야에서 가장 일반적인 혼합공정으로 사용되고 있다. 그러나 교반장치를 응용한 교반탱크 응집기는 유동형태가 매우 불규칙적이고 복잡하여 응집제의 균일 혼합도를 유지하는데 어려움이 따른다. 또한 교반기 선단영역과 교반기 영역에서 교반강도에 의한 에너지 분산율이 매우 커서 형성된 응집물의 파열이 일어나기 쉽다[1-3]. 이러한 단점을 개선하기 위하여 교반탱크 응집기를 개조한 여러 가지 형태의 응집기와 새로운 형태의 응집기가 검토되어 왔으며 실용화를 위한 노력이 지속되고 있다. 제 1부 연구[4]에서는 소형 쿠엣트 응집기를 활용하여 최적 응집조건을 구명하였으며, 제 2부 연구[5]에서는 최적 응집조건을 나타내는 매개변수들로부터 응집속도 모델을 제시하고 그 타당성을 검토하였다. 본 연구에서는 새로운 형태의 응집기로서 내부원통이 회전하는 소형 쿠엣트 응집기를 활용하여 수용액 중 고형물의 응집 및 분리특성을 조사한 결과를 토대로, 기하학적 유사성을 갖는 중형 응집기를 제작하여 소형 응집기와 동일한 실험을 실시하고 두 응집기의 성능을 비교하였다. 이들 결과로부터 두 응집기에 대한 유동학적 유사성을 조사하여 쿠엣트 응집기의 대형화 가능성을 검토하였다.

중력침강에 의한 고-액 분리방법은 여과법이나 원심분리법 등에 비하여 장치비나 운영비가 매우 적게 들어 경제적이기 때문에 고-액 분리를 요하는 분야, 특히 수처리 공정에서 중요한 단위조작으로 취급되고 있다. 중력침강을 이용한 침전장치의 한 형태로 경사판 침전장치가 주목을 받고 있다. 이는 경사판 내에서 입자의 침강거리가 짧아 고-액 분리에 필요한 침전장치 내의 체류시간이 단축되고 침전장치의 크기가 감소되며, 침전물이 경사판의 기울기에 의하여 자동으로 침강되어 침전장치의 청소를 필요로 하지 않고 응집물의 침강시부수적인 응집이나 응집물의 pellet 화가 이루어진다는 장점을 지니고 있기 때문이다. Culp 등[6]은 경사판의 각도에 따른 고-액 분리효율을 관찰하고 수처리 공정에 적용시킬 수 있는 몇 가지 침전장치를 제작하여 실용성을 검토하였다. 또한 Willis[7]는 기존의 이론과 설계기법을 토대로 기술적인 검토와 공정의 적용성 실험을 실시하였으며 실제공정의 적용예를 발표하였다. 본 연구에서는 Willis[7]의 설계기법을 중심으로 경사판 침전장치를 제작하여 쿠엣트 응집기와 연결시켜 연속실험을 실시하고, 쿠엣트 응집기에서의 응집특성이

경사판 침전장치에서 체계적으로 반영되는가를 조사하였다. 또 이들 두 장치의 조합에 의한 응집 및 고-액 분리가 연속적이고 효율적으로 이루어져 하나의 공정으로써 활용 가능한가를 검토하였다.

쿠엣트 응집기에 관련된 연구는 1968년 이래 본격적으로 추진되어 왔으나 대부분의 경우 테일러 와류를 활용하지 않아 좋은 효과를 거두지 못하였다. 그러나 부분적으로 미국 Shell 회사의 "Shell pelletizing separator"와 같은 장치가 개발되어 폐수 중의 soot 제거에 활용되고 있다고 알려져 있다[8]. 쿠엣트 흐름의 안정성 연구가 열 및 물질전달계까지 파급되고 테일러 와류에 대한 연구가 활발히 진행되면서, 테일러 와류를 활용하는 전동기의 냉각장치[9], 건조장치[10], 열교환기[11] 등의 개발 가능성이 검토되었다. 최근에는 화학반응기[12], 물질전달 촉진장치[13], 발효장치[14, 15], 여과장치[16, 17], 전기착색장치[18], 전기영동장치[19] 등이 개발 가능성이 검토되어 실용화 단계에 이르고 있다. 대표적인 예가 스위스 Sulzer 회사에서 개발한 역학적 압력 여과기이다. 위에서 언급된 바와 같이 본 연구와 관련된 많은 연구가 활발히 진행되고 있으며 산업적 응용이 실로 넓어 그 중요성이 널리 인식되고 있다. 이러한 추세를 감안할 때 본 연구의 독창성과 응용성, 나아가 산업화의 가능성이 인식될 것으로 생각된다.

2. 실험 험

2-1. 시료

본 연구에서는 현탁입자로서 실리카 입자인 한불화합의 화이트 카본과 락스공업의 카울린 입자들을 사용하였다. 화이트 카본은 평균 입자 크기가 $1.3\mu\text{m}$ 인 Tix-O-Sil 34M을 선정하였다. 고분자 응집제는 Mitsui-Cyanamid 회사의 Accofloc C-482와 Accofloc C-480 및 이온화도가 Accofloc C-480과 유사한 Dow Chemical 회사의 Separan CP-402를 사용하였다. 현탁입자의 물리적 특성과 준비방법, 고분자 응집제의 준비방법은 제 1부 연구[4]와 동일하다.

2-2. 실험장치 및 방법

2-2-1. 쿠엣트 응집기에 의한 연속실험

쿠엣트 응집기는 두 개의 아크릴 원통으로 소형 응집기와 동일한 기하학적 유사성을 갖도록 내경과 외경의 비를 0.65로 제작하였으며 응집물의 중력에 의한 침강을 막기 위하여 수평으로 설치하였다. 쿠엣트 응집기에

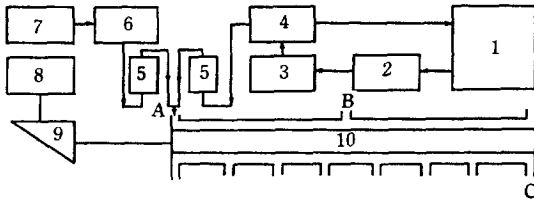


Fig. 1. Schematic diagram of continuous experiments.

- | | |
|----------------------------|----------------|
| 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 | |

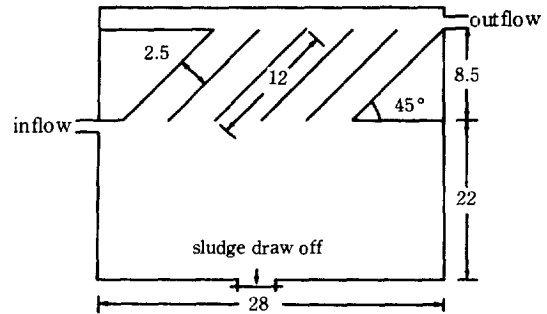
Table 1. Specifications of Couette flocculators (unit: cm)

apparatus	I.D.	O.D.	d	L
Small flocculator	3.0	4.60	0.8	76.5
Large flocculator	5.0	7.68	1.34	76.5

의한 연속실험 장치는 Fig.1 과 같다. 실험장치의 설명, 실험방법 및 실험영역은 제1부 연구[4]와 동일하며 제1부에 상세히 설명되어 있다. 두 쿠틀트 응집기의 체원은 Table 1 과 같다. 중형 응집기를 이용한 연속실험에서도 현탁액과 응집제 용액의 혼합비는 10으로 고정하였으며 현탁액의 응집기내 체류시간을 333초까지 확장하여 실험을 실시하였다. 응집 정도의 측정방법은 제1부의 연구[4]와 동일하다.

2-2-2. 쿠틀트 응집기와 경사판 침전장치의 부차에 의한 연속실험

경사판 침전장치가 효율적인 성능을 발휘하기 위해서는 기본적으로 경사판내에 흐르는 유체는 반드시 층류(혹은 점성)흐름이어야 한다. 이는 침강하는 응집물들이 경사판에서 연속적으로 흘러내려 침전장치의 침전조로 안정되게 쌓여야 하고 경사판에 침전된 응집물이 난류에 의하여 휩쓸려 뒤편으로 유출되는 것을 방지해야 하기 때문이다. 일반적으로 점성 흐름에서는 층류영역이 경사판내에서 레이놀즈 수가 2300보다 작을 때 형성되거나 대부분의 경사판 침전장치 설계에서는 레이놀즈 수가 400보다 작아야 한다[7]. 또한 경사판 내에서의 체류시간이 충분히 커야 된다. 왜냐하면 최적의 응집상태에서 침전장치의 출구쪽 경사판으로 유입된 응집물이



width: 5.3, unit: cm
10 inclined plate, square geometry

Fig. 2. Specifications of inclined plate settler.

충분히 분리될 수 있는 시간적 여유가 필요하기 때문이다. 본 연구에서 사용된 경사판 침전장치의 설계방법은 Willis[7]의 연구에 상세히 다루어져 있다.

경사판 침전장치의 경사판은 일반적으로 많이 사용되는 넓이 m 인 25 mm 인 정사각형을 선정하였고 침전장치의 길이와 폭의 비가 5 : 1인 제원을 기준으로 삼았다. 또 경사판의 각도는 45°로 하고 장치내의 체류시간 t_p 를 3분으로 정하여 위 네 가지 기초자료를 중심으로 본 연구의 실험영역에 맞게 침전장치를 제작하였다. 경사판 침전장치의 형태와 제원을 나타내면 Fig.2와 같다. 연속 실험장치는 제1부의 실험장치에서 설명된 쿠틀트 응집기 시료 채취부에 6.3 mm 튜브로 경사판 침전장치를 연결시키면 된다. 응집기와 침전장치에서의 운전이 정상적으로 이루어질 때까지 예비운전을 수행한 후 침전장치에서 유출되는 맑은 물을 침전장치 유출구에서 10 cc 취하여 투과도를 측정하였다. 투과도는 10 분 간격으로 측정하여 침전장치의 운전시간에 따른 성능변화를 2시간 동안 관찰하였다. 투과도는 제1부 연구[4]와 동일한 방법으로 측정되었으며 이를 분리효율로 환산하였다. 경사판 침전장치는 실험조건에 따라 각각의 시료 채취부로 옮겨 설치하였다. 실험은 상온에서 실시되었다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서는 소형 응집기의 응집 및 고-액 분리특성을 토대로 응집기의 내경과 외경의 비가 동일하고 크기가 2.78배인 중형 응집기를 사용하여 소형 응집기에서 관찰된 응집변수의 영향을 재검토하였다. 중형 응집기에서의 고분자 응집제 투여량은 소형 응집기와 거의 유사하였으므로 체류시간과 테일러 수의 영향을 중점적

으로 검토하였다. 중형 응집기의 응집 정도는 본 연구의 주 관심사인 분리효율을 기준으로 검토되었다. 본 연구에서 내부원통의 교반속도로 사용되는 무차원 테일러 수 Ta 는 아래와 같은 식으로 표현된다[20].

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

여기서 d 는 두 원통 사이의 간격, R_1 은 내부원통의 반경, R_2 는 외부원통의 반경, u_1 은 내부원통의 회전방향 속도, ω_1 은 내부원통의 각속도를 나타내며 Re 는 레이놀즈 수, ν 는 유체의 동점도를 나타낸다.

3-1. 체류시간의 영향과 중형 및 소형 응집기의 성능 비교

이미 검토된 소형 응집기는 응집현상이 체류시간 초기에 급격히 일어나는 점을 감안하여 이들 현상을 면밀히 관찰하고자 체류시간을 최대 3분으로 제한한 바 있다. 그러나 소형 응집기에서 나타난 최적 체류시간이 소형 응집기가 가지는 최대 체류시간 근처에 위치하여 그 이후의 경향을 살펴볼 수 없는 단점을 가지고 있다. 그래서 중형 응집기를 이용하여 먼저 축방향의 레이놀즈 수가 61.3이 되게 유지시켜 소형 응집기의 실험조건인 69.1에 최대한 유사하게 고정하고 체류시간을 약 6분으로 확장하여 실험을 실시하였다.

Fig. 3은 중형 응집기에서 테일러 수를 변화시키면서 체류시간의 영향을 검토한 대표적인 예이다. 여기서 E 는 분리효율, Ta 는 테일러 수, t_R 는 체류시간, C_s 는 현탁입자의 농도, C_f 는 응집제의 농도를 나타내며 FL은 중형 응집기를 표시한다. 또 S1은 실리카 입자(Tix-O-Sil 34M), C2는 Accofloc C-482 응집제를 나타낸다. Fig. 3에서 흥미로운 점은 체류시간이 약 180초 정도에서 분리효율의 증가경향이 거의 없으며 테일러 수가 매우 큰 경우에는 가장 높은 분리효율을 나타내는 체류시간이 감소하는 경향을 나타내는 것이다. 또한 소형 응집기에서 부분적으로 관찰된 바와 같이 테일러 수가 낮을수록 가장 높은 분리효율을 나타내는 체류시간이 증가하는 현상이 동일하게 관찰되나 체류시간이 길어지면 테일러 수가 작더라도 분리효율의 증가현상이 둔화됨을 관찰하였다.

이러한 점을 좀 더 상세히 관찰하기 위하여 Fig. 4와 5에 중형 및 소형 응집기에서의 체류시간에 따른 분리효율을 비교하여 보았다. 여기서 FS는 소형 응집기, KN은 카울린 입자를 나타내며, 이외에도 CO를 Accofloc C-480, P2를 Separan CP-402 응집제로 나

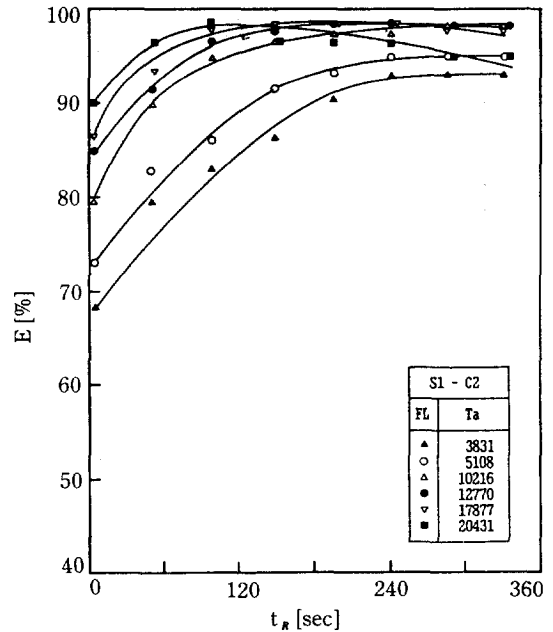


Fig. 3. Effect of retention time on separation efficiency for large flocculator ($C_s=1$ g/l; $C_f=3.5$ mg/l).

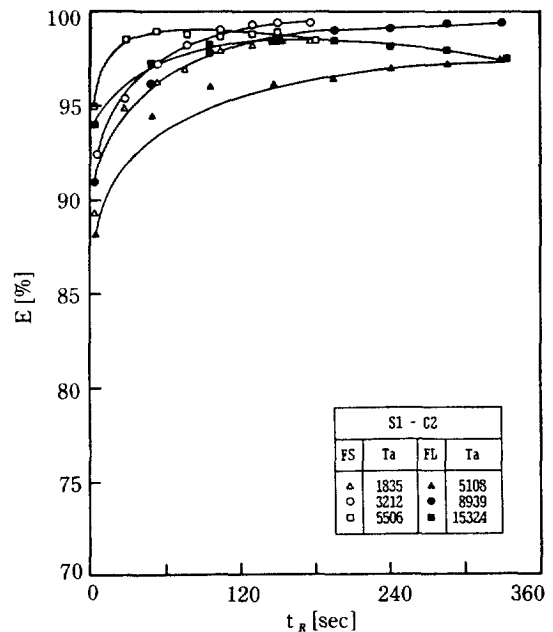


Fig. 4. Comparisons of effect of retention time on separation efficiency between small and large flocculators ($C_s=5$ g/l; $C_f=6.5$ mg/l).

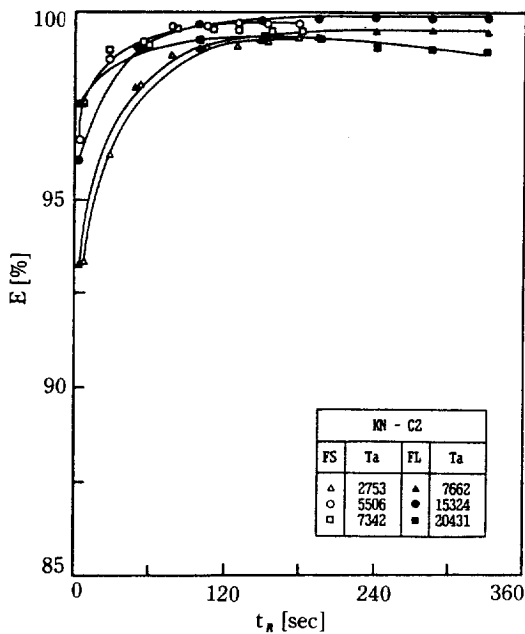


Fig. 5. Comparisons of effect of retention time on separation efficiency between small and large flocculators ($C_s=7$ g/l; $C_f=7$ mg/l).

타내었으며 이들 조합으로 본 연구에서 검토된 실험계를 표시하였다. Fig. 4와 5는 테일러 수와 현탁입자의 농도 및 실험계를 변화시켜 얻은 결과들 중에서 대표적인 예를 나타낸 것이다. 비교된 실험결과에서 내부원통의 회전수는 소형 응집기와 동일하나 테일러 수가 중형 및 소형 응집기에서 다르게 표현된다. 그러나 소형 응집기의 테일러 수에 대형화인자(scale-up factor) 2.78을 곱하면 중형 응집기에 사용된 테일러 수가 된다. 여기서 응집기의 대형화 인자는 두 응집기가 동일한 기하학적 유사성을 가지므로 두 응집기의 부피비로 표시된다. Fig. 4와 5의 결과를 통하여 분리효율은 체류시간이 약 3분대에서 증가경향이 거의 멈추며 테일러 수가 크면 그 이전에 가장 높은 분리효율을 나타내고 분리효율이 감소함을 관찰할 수 있었다. 이러한 경향은 실리카 입자에 Accofloc C-480 응집제나 Separan CP-402 응집제를 투여한 실험계에서도 동일하게 관찰되었다. 또한 체류시간에 대한 분리효율의 감소경향은 크지 않으나 대체로 최적 체류시간을 나타내고 있었다. 전반적으로 소형 응집기의 분리효율이 중형 응집기보다 좀 더 높은 것으로 관찰되었다. 이러한 점은 소형 응집기에서 더욱 효율적인 혼합이 이루어지며 응집기의 대형화에 따라 테일러 와류간의 상호간섭이 증가되어 응집

성능을 저하시키는 것으로 생각된다[12]. Fig. 5는 현탁입자가 Fig. 4의 경우와 다름에도 불구하고 체류시간의 영향이 동일하게 나타나는 것으로 보아 쿼트 응집기에서의 체류시간은 실험변수로 고려되기 보다 응집기의 설계변수로 고려함이 타당한 것으로 판단된다. 또 현탁입자의 농도가 증가하면 중형과 소형 응집기의 분리효율 차가 매우 작음을 관찰할 수 있었다. 그러므로 고농도 현탁액의 응집은 매우 효율적이며 응집기의 성능 차이를 작게 보여 응집기의 대형화 가능성을 확실하게 뒷받침해 준다고 예측된다.

소형 응집기에서 검토된 결과와 중형 응집기에서 검토된 결과를 종합하여 보면 체류시간이 3분대에 이르러 응집이 거의 다 이루어지고 그 이상의 시간에서는 응집이 매우 서서히 이루어지거나 응집물의 파열이 일어난다고 생각된다. 그러므로 쿼트 응집기의 활용시 응집을 위한 최적 체류시간은 약 150-180초가 타당하다고 판단된다.

3-2. 테일러 수의 영향

중형 응집기에서 테일러 수의 영향에 대한 검토는 소형 응집기에서와 동일한 절차로 실시된 실험을 토대로 하고 있다. Fig. 6은 중형 응집기를 사용한 실험에서 볼 수 있는 전형적인 테일러 수의 영향을 나타내고 있다. 중형 응집기를 사용한 실험에서 나타나는 경향은 소형 응집기와 거의 동일하여 고분자 응집제의 최적 투여량이 일치하였다. 반면에 중형 응집기에서 체류시간이 333초로 소형 응집기보다 거의 2배가 크기 때문에 테일러 수의 영향을 보다 선명하게 관찰할 수 있었다. Fig. 6을 통하여 체류시간이 145초 이상에서 최적 테일러 수는 하나로 일치하며 더 큰 테일러 수에서는 분리효율이 감소함을 알 수 있었다.

테일러 수의 영향을 좀 더 명확하게 관찰하기 위하여 현탁입자의 농도와 실험계를 변화시켜 비교한 결과가 Fig. 7이다. 이들 결과들은 체류시간이 3분 이상인 경우를 기준으로 하여 테일러 수의 영향을 관찰하였다. 이들 결과에서도 소형 응집기를 통하여 관찰한 바와 같이 실리카 현탁입자와 여러 응집제의 조합으로 이루어진 실험계는 최적 테일러 수가 유사하게 나타나며 카울린은 더 큰 테일러 수에서 최적점이 존재함을 관찰할 수 있었다. 또한 현탁액의 농도가 증가하면 최적 테일러 수는 점차 감소하며 테일러 수에 따른 분리효율의 감소경향이 둔화됨을 관찰하였다. 전반적으로 현탁입자의 농도가 1g/l 이하인 저농도 영역에서는 최적 테일러 수가 일정하며 현탁입자의 농도가 3g/l 이상에서는

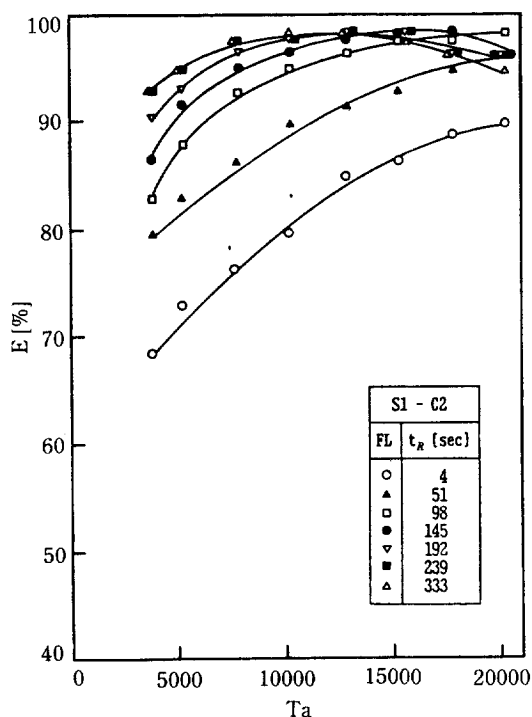
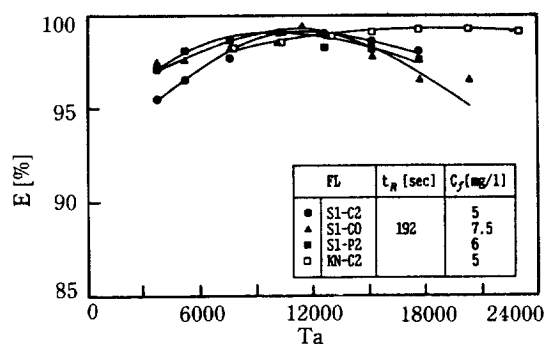


Fig. 6. Effect of Taylor number on separation efficiency for large flocculator ($C_s = 1$ g/l; $C_r = 3.5$ mg/l).

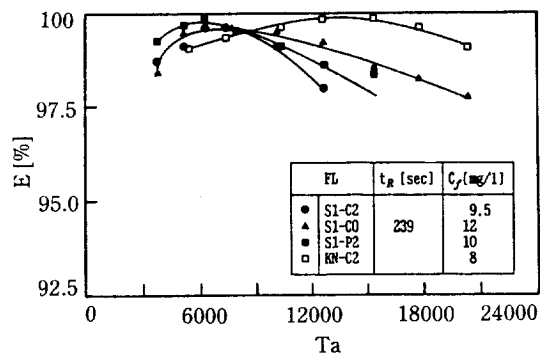
최적 테일러 수가 현탁입자의 농도에 따라 감소함을 관찰하였다. 이러한 현상은 이미 검토된 소형 응집기를 이용한 실험결과와 동일하다. 중형 및 소형 응집기에서 나타내는 최적 테일러 수는 다르나 내부원통의 회전속도가 동일한 점에서 최적조건이 일치함을 관찰하였다. 그러므로 소형 응집기에서 나타난 최적 테일러 수에 응집기의 대형화 인자 2.78을 곱하면 동일한 실험조건에서 관찰된 중형 응집기의 최적 테일러 수와 일치함을 확인하였다. 이 점은 매우 흥미로운 결과로 주목된다.

3-3. 최적 응집조건과 무차원 상관식

제 1부의 연구[4]에서 검토된 소형 응집기의 최적 응집조건과 동일하게 중형 응집기에서의 최적 응집조건을 현탁입자의 농도에 대하여 종합하면 Fig. 8과 같다. Fig. 8은 소형 응집기의 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 이들 둘의 차이점은 최적 테일러 수가 다른 것이며 투여된 최소 응집제량과 테일러 수가 현탁입자의 농도에 대하여 나타내는 경향은 동일함을 확인하였다. 그러므로 Fig. 8의 결과도 소형 응집기에서 관찰된 바와 같은 무차원 상관성을 나타낼 것으로 예측되며 이를 식



(a) $C_s = 3$ g/l



(b) $C_s = 10$ g/l

Fig. 7. Effect of flocculation system on optimum Taylor number for large flocculator ($C_s = 3, 10$ g/l).

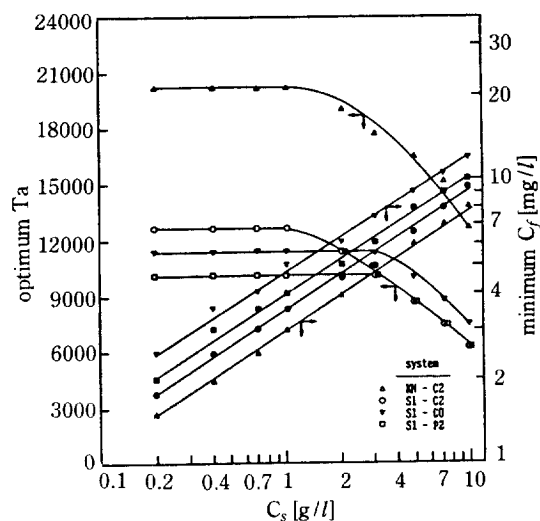


Fig. 8. Conditions of optimum Taylor number with minimum dosage of flocculant at maximum separation efficiency for large flocculator.

Table 2. Comparisons of β_1 and β_2

system	FS		FL (f = 2.78)				C _s [g/l] range
	β_{1FS}	β_{2FS}	prediction		experiment		
			f β_{1FS}	f β_{2FS}	β_{1FL}	β_{2FL}	
S1-C0	5420		15068		15100		1 ≤ C _s ≤ 10
S1-C2	5320	3.0	14790	8.34	14800	8.3	3 ≤ C _s ≤ 10
S1-P2	5160		14345		14300		3 ≤ C _s ≤ 10
KN-C2	8400		23350		22500		1 ≤ C _s ≤ 10

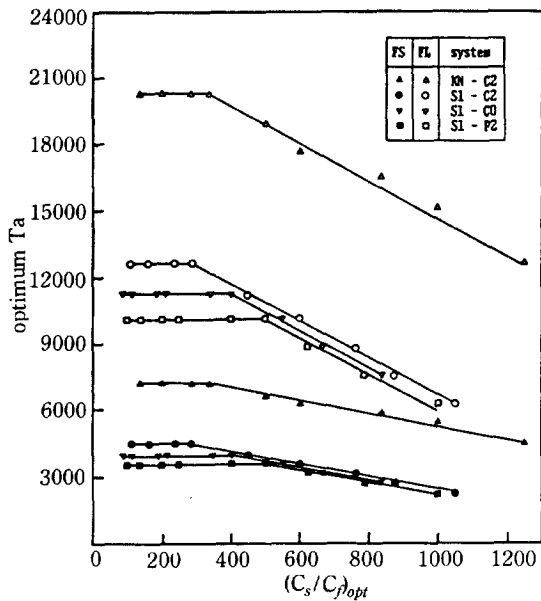


Fig. 9. Comparisons of optimum Taylor number with dimensionless concentration at maximum separation efficiency between small and large flocculator.

으로 표현하면 아래와 같다.

$$Ta_{opt} = \beta_1 - \beta_2 (C_s/C_f)_{opt} \quad (2)$$

$$(3g/l \leq C_s \leq 10g/l)$$

$$(1g/l \leq C_s, \beta_2 = 0)$$

Fig. 8의 결과를 무차원 농도와 테일러 수로 나타내고 소형 응집기의 결과와 비교하면 Fig. 9와 같다. Fig. 9의 결과에 대하여 식 (2)를 고려하여 중형 응집기의 결과에 대한 각각의 상수를 구하면 Table 2와 같다. Table 2에 소형 응집기에 의한 결과를 수록하여 중형 응집기의 결과와 비교할 수 있도록 하였다. 식 (2)와 Table 2의 결과는 Fig. 9의 결과에 대하여 $\pm 5\%$ 범위에서 잘 일치하였다. 이 결과에서 예측되는 점은 식 (2)의 β_1 과 β_2 가 두 응집기에서 서로 다르

나 응집기의 대형화 인자를 도입하므로써 두 응집간의 상관성을 찾아볼 수 있으리라는 점이다. 그러므로 응집기의 대형화 인자, f를 도입하여 새로운 상관식을 고려하면 아래와 같다.

$$Ta_{opt} = f [\beta_1 - \beta_2 (C_s/C_f)_{opt}] \quad (3)$$

$$(3g/l \leq C_s \leq 10g/l)$$

$$(1g/l \leq C_s, \beta_2 = 0)$$

식 (3)은 특정 현탁입자의 농도에서 최대 분리효율을 얻기 위하여 투여되어야 할 최소 응집제 농도와 응집기의 교반조건을 나타내는 테일러 수를 최적조건으로 나타낸 것이며 이 때 체류시간은 150초를 기준으로 삼았다. 식 (3)을 고려하여 Table 2에 소형 응집기의 결과로부터 중형 응집기의 결과를 예측한 결과를 수록하였다. Table 2의 결과를 검토하여 보면 두 응집기의 최적 응집조건을 나타내는 상관식 (3)은 $\pm 4\%$ 의 오차에서 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그러므로 기준이 되는 응집기에 대한 최적조건이 명시되면 응집기의 대형화에 따른 최적조건은 기준 응집기의 최적조건을 나타내는 무차원 상관식에 응집기의 대형화 인자를 곱하여 구할 수 있다. 식 (3)은 응집기의 형태인자(d/R_1)가 0.53인 쿼엣트 응집기에서의 최적 응집조건을 나타내는 경험식이다.

3-4. 쿼엣트 응집기와 경사판 침전장치의 부착에 의한 연속식 고-액 분리장치

쿼엣트 응집기에서 응집된 응집물을 연속적으로 침강 분리시킬 필요가 있다. 이 점은 실제공정에서 응용하기 위하여 필요한 단계이기도 하다. 쿼엣트 응집기와 경사판 침전장치에 의한 일련의 실험은 실리카 현탁입자와 Accofloc C-482 응집제의 조합에 의한 실험계에서 실시되었다. 제 1부의 연구[4]에서 검토된 바와 같이 이들 실험계가 가장 작은 침전물 부피를 갖고 분리효율이 높기 때문에 대표적으로 선정된 실험계이다. 중형과 소형 응집기에서 최적조건을 나타내는 최소 응집제량을

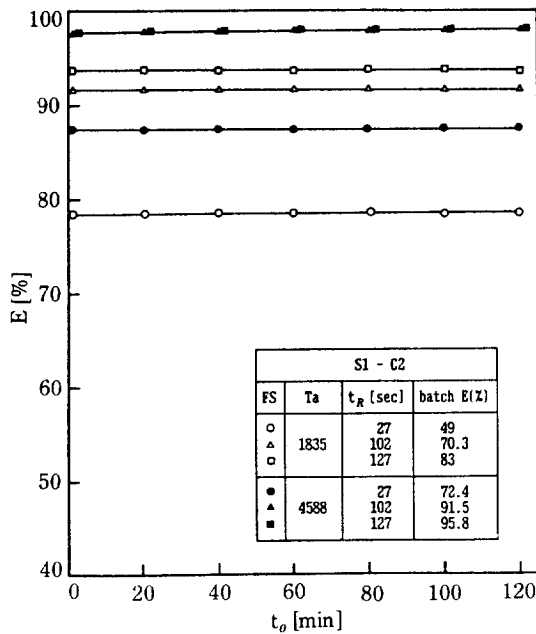


Fig. 10. Performance of inclined plate settler with small flocculator ($C_f = 0.4$ g/l; $C_r = 2.5$ mg/l).

투여한 상태에서 응집을 시키고 테일러 수와 체류시간을 변화시키면서 분리효율을 관찰하였으며 현탁입자의 농도에 대한 경향도 관찰하였다.

Fig. 10은 경사판 침전장치의 운전시간(t_o)에 따른 분리효율을 나타내고 있으며 회분 침강기에 의한 분리효율을 도표에 나타내어 비교할 수 있도록 하였다. 이들 결과를 통하여 경사판 침전장치에 의한 분리효율은 매우 균일하게 이루어지며, 분리성능이 우수하여 응집기에서의 체류시간을 100초 정도만 가져도 그 이상의 체류시간을 가진 응집물과 동일한 분리효율을 나타내는 점을 관찰하였다. 또한 고농도측보다 저농도측의 분리효율을 증가시켜 회분 침강결과에서 관찰된 저농도부의 분리효율이 낮은 단점을 개선해주는 특성을 나타내었다. 이에 부가하여 2시간의 연속실험 중에도 분리효율의 변화가 거의 없이 균일하게 고-액 분리가 일어나 연속식 응집 및 고-액 분리가 가능함을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 소형 응집기에 의하여 응집된 현탁액을 회분침강시켜 구한 분리효율과 경사판 침전장치를 거쳐 구한 분리효율을 테일러 수에 따라 비교한 것이다. 여기서 IPS는 경사판 침전장치를 쿼엣트 응집기에 부착하여 얻은 결과를 나타낸다. 이들 결과에서 관찰할 수

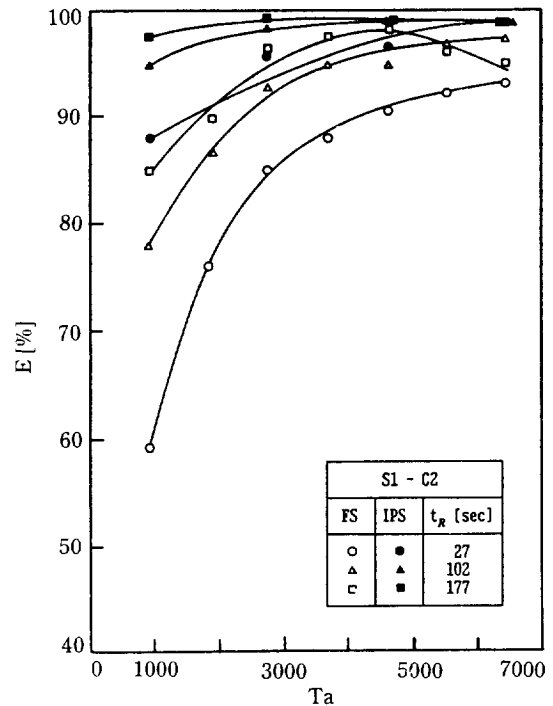


Fig. 11. Comparisons of separation efficiency between batch and continuous settling for small flocculator ($C_f = 1$ g/l; $C_r = 3.5$ mg/l).

있는 것은 회분침강기에 의한 분리효율이 테일러 수가 증가하면 감소되는 경향을 경사판 침전장치에서는 거의 상쇄시켜 주어 높은 테일러 수에서도 분리효율을 일정하게 유지시켜 주는 특성이었다. 이러한 특성은 파열된 응집물들이 경사판 침강기를 거치면서 재응집과정과 입자함입 과정을 수반하기 때문이라 생각되며 이러한 특성이 경사판 침전장치가 가지는 장점이라 판단된다[6, 7, 21-23]. 또한 최대 분리효율을 나타내는 테일러 수가 회분침강기에서 얻은 결과와 비교하여 낮아지는 경향이 있음을 관찰하였다. Fig. 12는 중형 응집기에 경사판 침전장치를 부착하여 연속분리 실험을 실시한 결과이다. 중형 응집기에 경사판 침전장치를 부착하여 실시된 실험과 소형 응집기에 의한 실험의 차이는 경사판 침전장치 내의 체류시간(t_p)이 123초로 소형 응집기를 통한 경사판 침전장치 내의 체류시간 182초보다 짧은 것이다. 또한 응집기 내의 체류시간이 중형 응집기의 경우 333초까지 관찰되었다. Fig. 12의 결과 역시 소형 응집기에 의한 결과와 유사하며 회분침강기를 사용한 실험 결과에서 나타나는 분리효율의 감소경향을 억제시켜 주고 최대 분리효율을 나타내는 테일러 수를 줄여 주어,

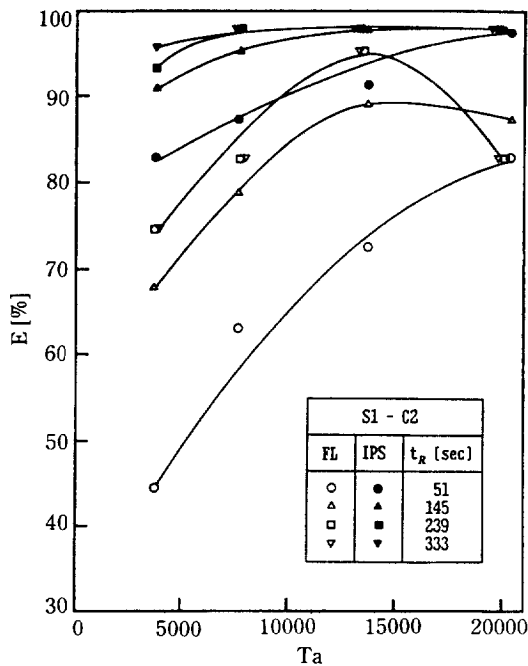


Fig. 12. Comparisons of separation efficiency between batch and continuous settling for large flocculator ($C_s = 0.4$ g/l; $C_f = 2.5$ mg/l).

응집기를 운전하는데 소요되는 동력을 감소시켜 주며 응집만에 의한 분리효율을 더욱 증가시켜 주는 경향을 나타내었다. 그러므로 쿼트 응집기에 경사판 침전장치를 부착하여 연속분리를 수행하면 더욱 효율적인 고-액 분리를 달성할 수 있으리라 판단된다. 중형 응집기와 경사판 침전장치의 연결에 의한 운전시간의 영향은 소형 응집기와 동일하게 2시간의 운전시간에 대하여 분리효율의 변화는 관찰되지 않았다. 앞의 결과들로부터 쿼트 응집기와 경사판 침전장치의 연결에 의한 고-액 분리공정은 매우 효율적이라 생각되며 이에 대하여 면밀한 검토가 요구된다. 이러한 공정은 화학공업, 광공업 등 물질의 정제, 분리 및 회수를 목적으로 하는 산업분야에서 활용될 수 있을 것으로 예측된다.

4. 결 론

두 개의 쿼트 응집기와 경사판 침전장치를 이용하여 양이온계 고분자 응집제와 실리카 및 카울린 현탁입자의 응집 및 고-액 분리현상을 연구한 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 최적 응집조건을 나타내는 체류시간은 현탁입자의 종류, 농도 및 크기, 응집제의 종류 및 농도에 무관하게 두 쿼트 응집기에 대하여 약 150-180초로 확인되었다.

2. 최적 응집조건을 나타내는 테일러 수는 현탁입자 농도가 1 g/l 이하에서는 각 실험제마다 일정하였으며 현탁입자의 농도가 3-10 g/l 범위에서는 현탁입자의 농도에 따라 감소하였다. 또한 두 개의 응집기가 동일한 회전수에서 최적 응집조건을 나타내었다. 이러한 실험 결과로부터 최적 응집조건을 나타내는 테일러 수에 대한 두 응집기의 상관성을 대변할 무차원식 (3)을 설정하여 이의 타당성을 입증하였다.

3. 쿼트 응집기와 경사판 침전장치로 이루어진 연속식 고-액 분리장치는 고-액 분리효율이 높고 일정하여 성능이 우수함을 나타내었다. 또한 이들 장치의 실용성과 응용성이 가능한 것으로 판단되었다.

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]
- d : width of gap [cm]
- E : separation efficiency [$\{1 - C_s/C_{s0}\} \times 100$]
- f : scale-up factor, dimensionless
- 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_o : operation time [min]
- t_p : plate retention time [sec]
- t_R : retention time [sec]
- t_s : settling time [sec]
- u_1 : peripheral velocity [cm/sec]

Greek Letters

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

REFERENCES

1. Tomi, D.T. and Bagster, D.F.: *Trans. IChemE*,

- 56, 1 (1978).
2. Pandya, J.D. and Spielman, L.A.: *Chem. Eng. Sci.*, **38**, 1983 (1983).
3. Koh, P.T.L., Andrews, J.R.G. and Uhlherr, P.H.T.: *Chem. Eng. Sci.*, **39**, 975 (1984).
4. Jeon, G. and Choi, C.K.: *Hwahak Konghak*, **27**(6), 812 (1989).
5. Jeon, G. and Choi, C.K.: *Hwahak Konghak*, **28**(1), 30 (1990).
6. Culp, G., Hansen, S. and Richardson, G.: *J. AWWA*, **60**, 681 (1968).
7. Willis, R.M.: *J. AWWA*, **70**, 331 (1978).
8. Yusa, M., Suzuki, H. and Tomaka, S.: *J. AWWA*, **67**, 397 (1965).
9. Kaye, J. and Elgar, E.C.: *J. Heat Transfer Trans. ASME*, **80**, 753 (1958).
10. Astill, K.N.: *J. Heat Transfer Trans. ASME*, **86**, 383 (1964).
11. Kataoka, K., Doi, H. and Komai, T.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **20**, 57 (1977).
12. Kataoka, K. and Takigawa, T.: *AIChE J.*, **27**, 504 (1981).
13. Gu, Z.H. and Fahidy, T.Z.: *Chem. Eng. Sci.*, **40**, 1145 (1985).
14. Margaritis, A. and Wilke, C.R.: *Biotech. Bioeng.*, **20**, 709 (1978).
15. Mariorella, B., Wilke, C.R. and Blanch, H.W.: *Adv. Biochem. Eng.*, **20**, 43 (1981).
16. Tobler, W.: *Filt. Sepa.*, **16**, 630 (1979).
17. Tobler, W.: *Filt. Sepa.*, **19**, 329 (1982).
18. Scott, C.D.: *Sepa. Sci. Tech.*, **21**, 905 (1986).
19. Yoshisato, R.A., Korndorf, L.M., Carmichael, G.R. and Datta, R.: *Sepa. Sci. Tech.*, **21**, 727 (1986).
20. Schlichting, H.: "Boundary Layer Theory", 7th ed., McGraw-Hill, New York, NY (1979).
21. Graham, W. and Lama, R.: *Can. J. Chem. Eng.*, **41**, 31 (1963).
22. Oliver, D.R. and Jenson, V.G.: *Can. J. Chem. Eng.*, **42**, 191 (1964).
23. Zahavi, E. and Rubin, E.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **14**, 34 (1975).