

응집인자 최적화 및 다단응집 시스템을 이용한 탈수 케이크 감량

김형준* · 배영한† · 이상희**

이양화학(주) 환경기술연구소 · *부산정보대학 경찰소방행정계열 · **인천환경공단 환경연구개발팀

(2008년 6월 5일 접수, 2008년 8월 28일 채택)

Reduction of Dehydrated Cake by the Optimization of Flocculation Factors and the Single Flocculant/Dual Flocculation System

Hyung-Jun Kim* · Young-Han Bae† · Sang-Hee Lee**

R&D Team, Eyangchemical Co., Ltd. · *School of Police & Fire Protection Administration, Busan College of Information Tech.

**R&D Team, Incheon Metropolitan City Environmental Installation Corp.

ABSTRACT : The flocculation characteristics of polyacrylamide base flocculants were estimated to reduce the moisture content of the dehydrated cakes. The dewaterability for sewage sludge was found to have a marked effect depending on the flocculant type, agitating speed and time, kind of dissolution water, etc. The optimal agitating speed and time were 700 rpm and 3 sec, respectively, in this experimental condition. and the dewaterability was proportion to the agitating speed upto 700rpm. When recycle water as the dissolution water was used, the solution viscosity of all kind of flocculants was decreased. However, the change of its viscosity are not proportioned to the dewaterabilities for each flocculant. Flocculation system of combinations of the first and sencond flocculation using single flocculant was investigated. Effects of the ratio of first and second dosage for dual flocculation on the dewaterability were also investigated. The optimum conditions of dual flocculation system are 75% and 50% as first dosages for low and high viscous flocculant for total dosage of common flocculation, respectively. Based on the results, an overall mechanism of dual flocculation system is proposed and it is envisaged that optimization of flocculation processes in this way can result in considerable savings in cost.

Key Words : Flocculant, Dual Flocculation, Dehydration, Reduction of Moisture Content

요약 : 탈수된 케이크의 함수율을 저감하기 위하여 폴리아크릴아마이드계 고분자 응집제의 응집특성을 평가하였다. 하수 슬러지의 탈수효율은 응집제의 종류, 교반 속도 및 시간, 용해수의 농도 등에 관계된 두드러진 영향이 있음을 알게 되었다. 최적 교반 속도 및 시간은 실험조건에서 각각 700 rpm 및 3초이었다. 탈수효율은 700 rpm까지는 비례적으로 증가하였다. 응집제의 용해수로 재이용수를 사용하였을 때, 모든 종류의 용해점도는 감소되었다. 그러나 그 점도 변화는 각 응집제의 탈수효율과 비례하지는 않았다. 1차 및 2차 응집반응의 조합으로 한가지 응집제를 사용한 응집 시스템을 평가하였다. 2단 응집공정의 1차 및 2차 투입량 비율의 탈수효율에 대한 영향 또한 평가하였다. 2단 응집 시스템의 최적 조건은 저 및 고점도 응집제에 각각에 대하여 총 투입량 대비 1차 투입량이 75%와 50%이었다. 그 결과를 기초로, 2단 응집의 전체 메커니즘을 제안하였으며, 이러한 방법으로 응집 공정들을 최적화함으로써 비용 절감이 가능함을 예상할 수 있었다.

주제어 : 고분자 응집제, 다단응집, 탈수, 함수율 저감

1. 서론

1972년 채택된 런던협약은 폐기물의 해양투기로 인한 해양오염을 방지하기 위한 국제협약으로 우리나라는 1992년에 가입, 1994년부터 가입국으로서 효력이 발생하여 1996 의정서 기준을 앞두고 있다. 이에 2012년부터 해양투기가 완전 금지됨에 따라 최근 부각되고 있는 폐기물 재활용과 함께 하수 슬러지(Sludge)를 탈수한 케이크(Cake)의 처리 방식에 있어서도 새로운 연구의 필요성이 재인식되고 있다. 국내 하수 슬러지의 경우 2003년을 기준으로 294개 하수

처리장에서 1일 7,052톤의 케이크가 발생되고 있으며, 2010년 기준으로 1일 1만톤의 케이크가 발생될 것으로 예상되고 있다. 그 예로 인천광역시의 경우 하수슬러지의 발생량은 '07년 대비 '10년의 증가량은 신설되는 학익(35.8), 검단(26.9), 영종(1.6), 송산(1.4)처리시설과 증설되는 공촌(5), 운북(8), 송도(59)와 축산분뇨 통합시설(가좌, 25.6) 등의 가동으로 그 발생량이 급격하게 증가될 것으로 예상된다. 발생된 하수 슬러지 탈수 케이크 중 10%인 654톤/일만이 재활용되며, 재활용 분야도 복토재(매립지) 34%, 녹생토 34%, 시멘트 원료 22%, 지렁이 사육 7%, 퇴비화 2% 및 토지 개량제 1%로 77%는 해양투기에 의존하고 있는 것이 현실이다.¹⁾

최근 고도처리 공정의 도입 및 소규모 처리장의 신설 등

† Corresponding author

E-mail: yhae@eyangchem.co.kr

Tel: 052-270-0776

Fax: 052-270-0725

으로 기존의 슬러지 성상인 생물학적으로 감량화된 소화 슬러지 외 잉여슬러지, 생 슬러지, 원심농축 및 부상농축에 의한 농축 슬러지 등 그 종류가 다양해졌으며, 슬러지의 농도범위도 0.5~5%로 큰 차이가 있고, 인의 배출을 방지하기 위한 잉여슬러지를 직탈수하는 등 많은 변화가 이루어지고 있다.

탈수된 하수슬러지를 처리하는 방법의 선정기준 중 케이크의 함수율이 큰 평가인자로 적용이 된다. 또한, 하수 슬러지의 탈수 케이크의 매립, 해양투기 또는 소각 등 그 처리 비용이 매우 고가이기 때문에 처리 비용을 줄이기 위해서는 함수율을 낮춰 케이크의 감량화를 도모하기 위해 수십 년간 다양한 연구가 수행되어왔다. Keiding 등²⁾은 이온강도에 따른 활성 슬러지의 표면 전위와 체외고분자의 변화를 관찰하여 활성슬러지 플록의 형태를 제시하였고, Yin 등³⁾은 초음파를 이용하여 잉여 슬러지 탈수에 관한 연구를 수행하여 함수율을 10% 저감하였으나 그 원리는 규명하지 못하였다. 배 등⁴⁾은 에멀전형 가교 구조의 고분자 응집제를 이용한 다중응집방식을 연구하여 탈수효율의 개선이 가능함을 연구하였으며 또한 용해수 중의 이온성 물질과 응집제의 상호관계에 대한 연구⁵⁾를 수행하여 응집제의 가수분해도의 영향을 평가하여 용해수 선정의 기초자료를 제시하였다. J. Vaxelaire⁶⁾는 활성슬러지 내 수분분포에 대한 조사를 통하여 탈수효율의 인자에 대한 기초 자료를 제시하였다. 그러나 슬러지 탈수공정에서 탈수성을 향상시키기 위해서 대부분의 처리장에서 적용이 되고 있는 고분자 응집제에 대한 연구는 미미한 현실이다.

윤 등⁷⁾은 슬러지 탈수 전처리의 최적조건 선정을 위해 응집제의 종류, 주입량 등의 선정을 위한 실험방법으로 표준 전단력 교반기와 CST를 이용하여 최적 주입량 선정에 대한 연구를 수행하였다. 이 등⁸⁾은 소화 슬러지의 수리학적 부하가 소화 슬러지의 탈수성에 미치는 영향을 평가하여 그 결과로 수리학적 체류시간에 따른 소화효율과 탈수성과는 서로 반대된다는 결론을 도출하였으며, 고분자 응집제의 첨가에 따른 슬러지의 탈수성 및 점도 특성에 대하여 서 등⁹⁾이 연구한 결과가 있다. 유 등¹⁰⁾은 상수 슬러지에 대하여 휘발성 고형분 함량과 입자분포의 변화가 탈수특성에 미치는 영향에 관하여 연구하여 상수 슬러지의 비저항에 대하여 휘발성 고형분 함량과 함께 새롭게 정의된 입자크기균등도의 함수로서 나타내었다. 정수장 슬러지의 농축 및 탈수특성 향상에 대한 연구를 김 등¹¹⁾이 수행하여 응집제의 분자량보다는 이온성이 탈수성에 더 큰 영향이 있다는 것과 소석회를 이용하여 pH를 적정하게 조절하여 탈수 및 농축특성을 향상시킬 수 있다고 보고하였다. 이¹²⁾는 혼합 슬러지에 대하여 탈수성 연구를 위해 벤토나이트 슬러지에 유리 비드입자의 혼합량을 증가시켜 탈수성을 향상시켜 슬러지 특성변화에 따른 탈수성 개선에 관한 보고를 하였으며, 정수 슬러지의 특성이 탈수성능에 미치는 영향¹³⁾ 등 슬러지 특성에 따른 탈수성에 대한 연구를 수행하였다.

정수처리 공정에 대하여 응집제의 적정 주입률 결정을 위한 Jar-test 적용에 대한 연구, 2단혼화공정의 탁도와 유기물질 응집특성 연구 및 가중응집제와 슬러지 반응을 통한 고속응집공정에 대한 연구 등 무기계 응집제의 응집반응에 대한 연구는 다수 수행이 되었다. 그러나 하수 슬러지의 탈수공정에 대한 연구 분야에서는 가장 기초가 되는 고분자 응집제에 대한 연구가 미미한 현실이며, 실제 하수 처리장들에서는 상이한 응집반응 특성의 고분자 응집제에 대한 반응성 및 적용성에 대한 평가 없이 사용을 하고 있다. 또한 과투입과 저투입 및 미반응과 과잉반응 등 반응조건을 조절이 어려워 슬러지 탈수성을 악화시킬 수 있기 때문에 탈수성 개선을 위한 시스템 개발이 요구되나 그 연구도 미미한 현실이다.¹⁴⁻¹⁷⁾

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 하수 슬러지의 탈수 공정에서 성능 인자로서 응집제의 종류와 투입량 및 응집반응에서의 교반속도 및 시간 등과 탈수효율의 상관관계를 평가하고, 고분자 응집제의 2단 투입방식을 통한 새로운 응집 시스템을 개발하여 탈수공정을 최적화하고, 탈수케이크의 함수율 저감을 위한 감량화 기술의 개발하고자 한다.

2. 실험

2.1. 슬러지의 종류

실험에 사용된 탈수 전 슬러지는 S 하수처리장의 하수 슬러지를 사용하였으며, 그 물성은 총고형분(Total solids) 2.35%, pH 6.69 및 전도도 1.846 mS/cm이었으며, 총고형분은 폐기물 공정시험법에 명기된 대로 항온건조기를 이용하여 측정하였다.

2.2. 응집제

실험에 적용한 분말(Powder)형 폴리아크릴아마이드(Polyacrylamide)계 고분자 응집제는 이양화학(주)사제 음이온성(polyacrylamide-co-acrylic acid), 비이온성(polyacrylamide homopolymer) 및 양이온성으로 (polyacrylamide-co-trimethyl ammonium ethyl acrylate chloride)를 사용하였다.

고분자 응집제의 물성 중 응집제의 하전과 분자량의 척도로써 용해액의 점도를 측정하였다. 응집제의 분자량은 제조사 정보에 따른 것이며, 점도측정은 Brookfield사제 LVTDV-II를 이용하여 spindle No.2를 이용하여 60 rpm에서 측정하였으며, 각 응집제의 점도 측정을 위한 조건은 측정범위가 넓은 1.0 wt %로 용해하여 25℃로 항온하여 측정하였다.

응집실험은 실제 사용 조건인 0.2 wt %로 용해하여 용해 후 즉시 사용하였다.

고분자 응집제의 하전량의 측정은 습식법¹⁸⁾으로 분석하였다.

2.3. 탈수 효율 실험

탈수공정에 사용되는 고분자 응집제는 대부분 공업용수

또는 상수 등의 용수에 용해 후 사용되므로 실험의 재현성을 위해 응집제의 용해수를 초순수를 이용하여 인공적으로 제조하였으며, 그 물성은 전도도 0.150 mS/cm, 경도는 CaCO₃ 경도로 70 mg/L, pH는 6.8로 조절하여 용해하였다.

고분자 응집제의 탈수성능을 평가하기 위한 여수성 실험은 일반적으로 응집제의 성능평가방법으로 잘 알려져 있는 Jar-test(에프텍 기기, JT-FTL-6A)를 이용하여 300 mL 비이커에 슬러지를 200 mL를 첨가하고 일정량의 응집제를 주입한 후, 실험조건 내의 다른 여러 교반속도(150~700 rpm) 및 응집반응시간(3~120초)에서 응집반응 후 여수성을 측정하였다.

여수성 측정은 실제 처리장에서 사용되는 여과포를 부착한 깔때기를 이용하여 여과되는 탈리액의 무게를 Mettler 사제 PB-4002-S 및 Balance-link을 이용하여 1초경과 시마다 측정하여 항량이 되는 30초까지의 여액량을 측정하였다. 여수성 평가를 위한 측정치는 벨트프레스에서의 초기 여수성의 특성평가를 위해 10초 여액량을 기준으로 여수성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 응집제 종류의 영향 평가

응집 효율을 결정하는 가장 중요한 인자는 슬러지와 응집제의 종류이다. 따라서 탈수공정을 최적화하기 위한 예비실험으로 고분자 응집제의 하전량(-5.0~5.0 meq/g)과 분자량의 상대적 척도로 점도(1,000~5,000 cps)에 따른 탈수효율을 평가하였다. 응집반응조건은 Jar-test를 이용하여 300 rpm에서 30초간 응집반응을 시켰으며, 이 때 각 응집제의 투입량은 각각 100, 120 및 140 mg/L로 실험하여 초기 슬러지량(200 g) 대비 10초 후 탈리액량의 비율로 탈수효율을 평가하였다.

하전량이 0 meq/g 이하인 비이온 및 음이온계 고분자 응집제를 적용하였을 때는 플럭의 조대화가 이루어지지 않았으며, 이러한 결과는 하수 슬러지의 표면전하가 유기물에 의해 음하전으로 대전되어져 있기 때문이다. 하전량이 0 meq/g 초과인 양이온성 고분자 응집제를 적용한 결과, 각 투입량에서 최대탈수효율은 100 mg/L에서 3.3 meq/g 및 3,500 cps의 응집제가 39.5%, 120 mg/L에서 1.7 meq/g 및 1,800 cps의 응집제가 60.6%와 140 mg/L에서 1.7 meq/g 및 4,500 cps의 응집제가 58.3%로 최대 탈수효율을 나타내었다. 각 투입량에서의 결과의 평균을 Fig. 1과 2에 나타내었다.

Fig. 1에서 이온성 2.4 meq/g 및 3,300 cps의 점도의 고분자 응집제가 평균 40.8%의 최대탈수효율을 나타내었다. 탈리액의 평균 탁도는 이온성 4.0 meq/g 및 점도 3,700 cps의 고분자 응집제가 평균 7.09 NTU로 가장 낮은 탁도를 나타내었다. 평균탈수효율은 응집제의 이온성 및 점도가 중간 범위에서 가장 높음을 보였다. 탈리액의 탁도는 전

Items		Viscosity of 1% solution [cps.]				
		1000	2000	3000	4000	5000
Ionicity [meq/g]	0.5	21.6	26.0		21.0	
	1			31.1	39.3	
	1.5			32.6		30.6
	2	31.1	30.8			38.8
	2.5		34.5	40.8		31.9
	3			40.1	34.3	28.8
	3.5					
	4			36.0	31.2	28.4
	4.5	29.3				31.2
	5		26.2	27.6	32.7	

Dosage: 100, 120 and 140 mg/L
Sludge weight: 200 g

Fig. 1. Influence of ionicity and viscosity of flocculant on average of dewaterability[%] at 10 sec after filtration.

Items		Viscosity of 1% solution [cps]				
		1000	2000	3000	4000	5000
Ionicity [meq/g]	0.5	46.4	38.8		36.3	
	1			33.3	25.3	
	1.5			26.5		14.6
	2	14.8	30.9			27.2
	2.5		24.7	19.8		23.1
	3			14.5	16.2	13.0
	3.5					
	4			15.25	7.09	11.1
	4.5	15.2				11.7
	5		17.4	21.2	11.2	

Dosage: 100, 120 and 140 mg/L
Sludge weight: 200 g

Fig. 2. Influence of ionicity and viscosity of flocculant on average of turbidity[NTU] for filtrates at 10 sec after filtration.

체 응집제 종류에 대하여 응집제의 투입량, 양이온성 및 점도가 높아질수록 탈리액의 탁도가 낮아지며, 탈수효율이 높을수록 상대적 탈리액 탁도도 낮았다. 최저 탁도는 전체 실험조건 중 4.5 meq/g 및 5,000 cps의 응집제를 140 mg/L 투입 시 3.1 NTU로 가장 낮았다.

예비실험의 결과를 기초로 전체 실험조건 중 가장 탈수효율인 120 mg/L에서 60.6%를 나타낸 1.7 meq/g 및 1,800 cps의 응집제(이하 이온성 - 1 w% 점도, 1.7-1800)를 이용하여 탈수효율의 개선방법에 대한 추가 실험하였다.

3.2. 용해수의 영향 평가

폴리아크릴아마이드(Polyacrylamide)계 고분자 응집제는 수용성으로 물에 용해 후 적용하게 되어져 있으며, 완전히 용해가 되어야만 응집제 자체의 효율을 나타낼 수 있으므로 응집제를 용해하는 수질 또한 응집효율을 결정하는 중요한 인자이다.⁴⁾ 그러므로 응집제 용해수의 수질에 따른 영향평가를 위해 방류수를 사여과한 재이용수(RW, 전도도 1.3 mS/cm, pH 7.11) 및 1차 증류수(DW, 전도도 0.03 mS/cm, pH 6.73)를 이용하여 용해 후 Jar-tester에서 300 rpm로 30초간 응집반응시켜 탈수효율을 평가하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

용해점도가 낮은 1.7-1800의 경우, 0.2 w%로 용해 시 100 cps(DW) 및 52 cps(RW)로 재이용수에서 약 50%가 저하되었다. 동일조건에서의 점도에 따른 영향은 1.7-4500의 응집제의 점도변화인 280 cps(DW) 및 208 cps(RW)로 약 25%가 저하된 것과 비교 시 DW에서 점도가 높은 응집제가 용해수의 영향을 적게 받았다. 이온성에 따른 영향은 이온성이 높은 5.0-4500의 경우에는 324 cps(DW) 및 308 cps(RW)로 약 5%가 저하되어 응집제 용해 시 용해액의 점도는 이전 연구⁴⁾에서 수행된 것과 같이 응집제의 점도와 하전량은 재용해수 적용에 따른 점성저하 및 경시변화에 반비례함을 보여주고 있다.

Fig. 3에서 저투입량인 100 mg/L에서 재이용수에 용해한 경우의 탈수효율(15.2%)이 증류수로 용해한 경우(30.0%) 대비 50%의 탈수효율을 나타내었다. 투입량을 증량한 경우, 재이용수를 적용한 경우가 140 mg/L에서 증류수에 용해한 경우의 42.6% 대비 43.6%와 180 mg/L에서 38.6% 대비 41.8%로 탈수효율이 더 높았다. 고분자 응집제에 대하여 용해수에 따른 점도 점도저하와 탈수효율이 비례적인 관계가 있지 않으며, 투입량에 따른 큰 의존도를 나타내었다. 이러한 원인은 증류수로 응집제를 용해한 경우, 용액의 점도가 높아 슬러지에서 분산속도가 느려 동일 응집반응 조건에서 초기 분산반응 시간이 재이용수 대비 약 3초 정도 느려지고 균일하게 분산되어 응집반응을 하지 못하기 때문이다. 또한, 투입량이 높을 경우 전체 반응에 필요한 시간이 재이용수의 45초 대비 약 1.5배의 시간이 소요됨에 따른 생성된 플러간의 잔류 점성으로 플러간극수의 탈수효율 저하현상이 발생함을 알 수 있었다. 탈리액의 점도는 UL Viscometer로 측정 시 잔류 점성에 의해 적정 투입 시 1 cps 대비 약 3 cps 정도 상승되었으며, 잔류 점성에 따른 유속저하로 탈수효율이 저하됨을 알 수 있었다.

투입량이 180 mg/L인 경우 플러가 과다하게 크게 형성되어 플러간의 간극수를 다량 함유하게 되고, 과투입에 의해 미반응 잔류 응집제에 의해 탈리액의 점성유발로 탈수효율이 저하되었다. 투입량이 140 mg/L인 경우 플러의 평균 크기가 약 5~8 mm로 플러 간극수의 형성을 최소화하고 잔류 점성의 영향이 최소화되어 53%의 탈수로 최대의 효율을 나타내었다.

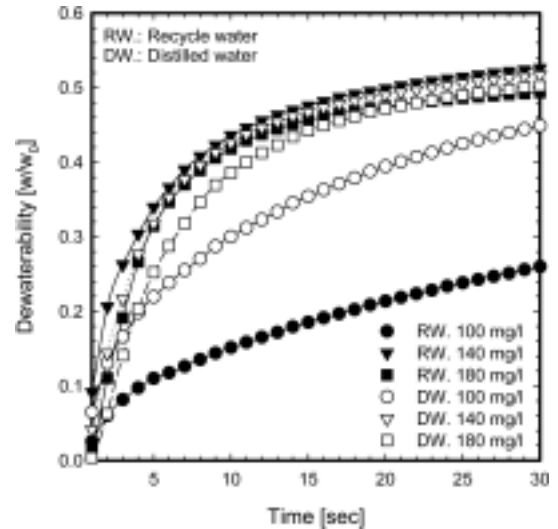


Fig. 3. Influence of dewaterability of 1.7-1800 on kinds of dissolution water at various dosage.

3.3. 응집제의 분자량에 따른 탈수효율의 영향 평가

응집제의 분자량에 따른 응집효율을 평가하기 위하여 각각 1.7-1800(분자량 300만 Dalton) 및 1.7-4000(분자량 800만 Dalton)의 응집제를 이용하여 응집제 투입량에 따른 탈수효율을 비교 실험한 결과를 Fig. 4와 5에 나타내었다. 응집반응조건은 1.7-4000의 경우 반응속도가 느리므로 Jar-tester를 이용하여 300 rpm에서 45초간 반응을 시켰다.

비교적 분자량이 낮은 1.7-1800은 그 투입량이 증가될수록 탈수효율이 비례적으로 증가하여 200~220 mg/L에서 63.0%의 최대탈수효율을 나타내었다. 그러나 분자량이 높은 1.7-4000의 적정 투입량은 140~160 mg/L이며 그 이상 투입 시에도 탈수효율은 동일한 응집반응에서는 저하되었다. 플러 잔류점성을 제거하기 위한 추가 응집반응 후에도 일정한 탈수효율을 나타내었으며, 최대탈수효율은 52.9%

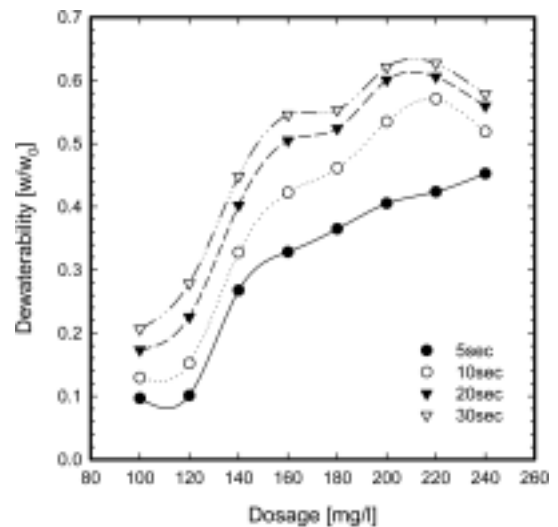


Fig. 4. Influence of dewaterability at each filtration time on dosage of 1.7-1800.

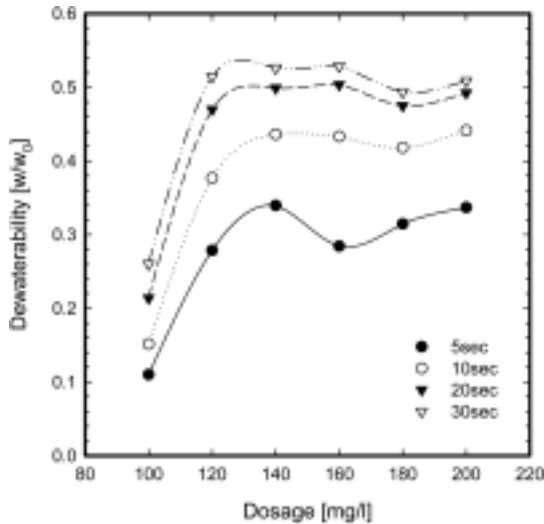


Fig. 5. Influence of dewaterability at each filtration time on dosage of 1.7-4000.

로 약 10%의 탈리액량 차이를 나타내었다. Fig. 4와 5에서 5초 탈리액량의 경우 그 거동이 상이함을 나타내며, 저분자량의 응집제를 적용 시 10초 이후의 탈리액량은 감소하는 현상을 보이나 5초 탈리액량은 지속적으로 증가됨을 보였다. 고점도인 1.7-4000의 경우, 각 시간별로 차이가 없이 동일한 거동을 보였다. 이 결과는 플럭의 크기와도 관계가 있는 것으로 분자량이 작은 1.7-1800은 투입량을 증량하여도 상대적으로 플럭의 조대화작용이 적어 플럭의 크기가 8 mm 이상 성장하지 않아 중력여과상태에서 여과포 상부 탈수 케이크(cake)의 압밀성이 양호하였다. 1.7-4000를 적용한 경우 플럭이 15 mm 이상으로 조대화되어 생성된 플럭이 여과막의 역할을 하게 되어 자유수 및 간극수를 다수 함유하게 되어 초기 여수성이 저분자량과 비교 시 투입량의 영향을 크게 나타냄을 알 수 있다.

3.4. 응집반응 조건

응집 반응조에서의 교반속도 및 체류시간 등 응집반응 조건에 따라 형성된 플럭의 성상이 큰 차이를 보이므로 1.7-4000을 이용하여 다른 교반속도와 반응시간에서의 응집효율을 실험하였다.

Fig. 6은 1.7-4000을 120 mg/L 투입 후 Jar-tester로 150 rpm으로 반응시켜 30초에서 120초까지 일정간격으로 응집반응 후 탈수효율을 평가한 결과이다. 1.7-4000의 경우, 각 탈수시간에 따른 탈리액량의 변화 없이 일정한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 플럭의 크기는 45초간 반응한 상태에서 최대로 평균 3 mm의 크기를 나타내었다. 응집상태는 미세 플럭이 과다하며 탈리액 중의 현탁물질(Suspended Solids, SS)가 620 mg/L로 낮은 회수율을 보였다. 최대 탈수효율이 25.4%로 예비실험의 44.1%대비 절반수준이며, 30초간 반응한 경우 탈수효율이 14.0%로 가장 낮은 효율을 보였고 그 탈리액의 SS는 932 mg/L을 나타내었다. 전체 탈수효율에 대해서는 교반속도와 탈수효율이 현 실험

조건의 범위에서는 비례함을 알 수 있었다.

교반속도와 시간을 각각 700 rpm과 3초까지 조절하여 실험한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 700 rpm과 3초간 반응 시 10초 탈수효율이 56.5%로 150 rpm에서의 최대효율 대비 약 2배 이상의 탈수효율을 나타내었다. 탈리액의 SS 또한 41 mg/L로 회수율도 반응속도와 비례관계를 나타내었다. 1.7-4000을 이용하여 700 rpm으로 3초간 반응 시, 예비실험에서 최대효율을 나타낸 160 mg/L의 52.9% 대비 약 7%의 탈수효율 개선효과 및 25%의 투입량 저감효과를 나타내었다.

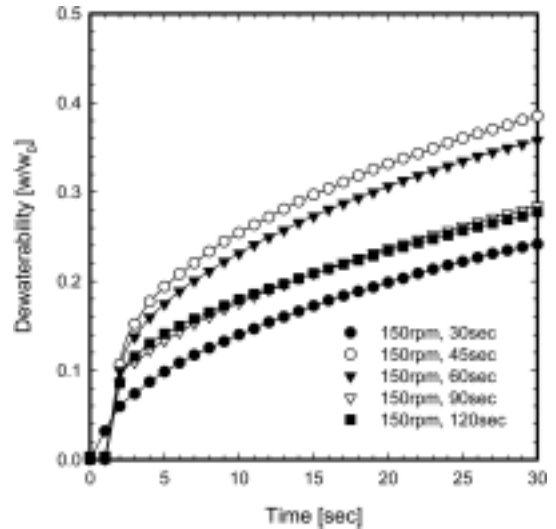


Fig. 6. Influence of dewaterability for 1.7-4000 on various agitating times(30, 45, 60, 90 and 120 sec) at same agitating speed(150 rpm). Flocculant(1.7-4000), dosage(120 mg/L) and sludge weight(200 g)

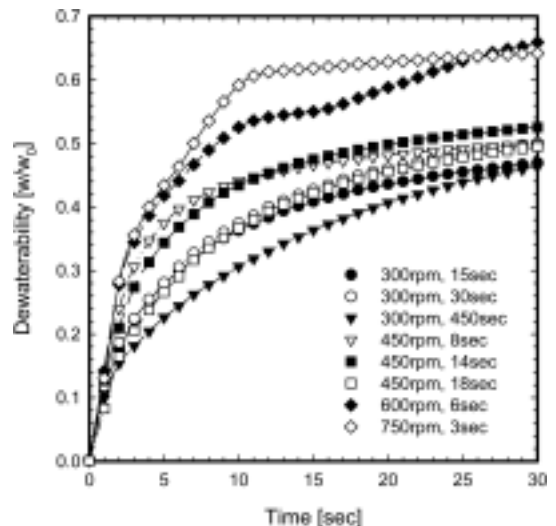


Fig. 7. Influence of dewaterability for 1.7-4000 on various agitating times(3~45 sec) and various agitating speed (300, 450, 600 and 750 rpm). Flocculant(1.7-4000), dosage(120 mg/L) and sludge weight (200 g)

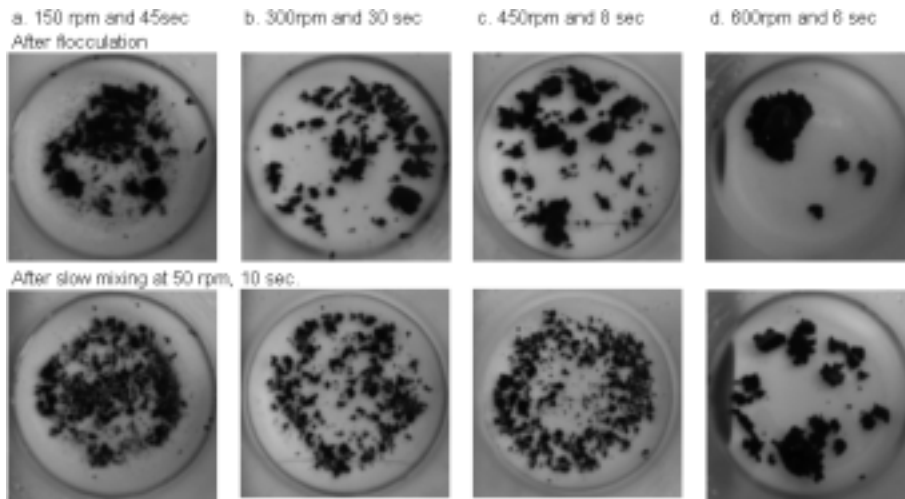


Fig. 8. Photograph of the generated floc at various agitating speeds and times.
 Flocculant(1.7-4000), dosage(120 mg/L), sludge weight(200 g) and diameter of slide(40 mm)

700 rpm에서 6초 이상 반응 시 플러크가 해체되어 2 mm의 플러크 크기를 나타내어 150 rpm 45초 반응 시보다 플러크의 크기는 작으나 탈수효율은 32.1%으로 약 1.5배의 효율을 나타내었다. 이와 같은 결과는 150 rpm 교반 시 45초에서의 플러크의 크기가 가장 조대화 되었으나 약 5 mm 정도로 상대적으로 가장 작으며 미세 플러크 또한 다량 함유되어 있기 때문으로 평가되었다. 700 rpm에서는 미세플러크가 관찰되지 않았으며 추가 교반 시 플러크가 해체되지 않았으므로 압밀에 의해 크기가 작아진 것으로 평가되었다. 전체 조건에서 플러크의 크기가 가장 큰 반응조건은 600 rpm에서 6초간 반응 시 플러크의 크기가 15 mm로 나타내었다.

Fig. 8은 상부 사진은 각 교반조건(150, 300, 450 및 600 rpm)에서 응집반응시간을 달리하여 그 최적 반응시간에서 생성된 플러크를 8 g 정도 채취하여 청수에 분산시켜 플러크의 형성상태를 관찰한 사진이며, 하부 사진은 상기 조건에서 형성된 플러크의 강도를 평가하기 위하여 동일한 조건인 50 rpm에서 10초간 교반하여 플러크의 해체정도를 관찰한 사진이다. 150 rpm으로 교반한 경우의 플러크 상태는 300 rpm 이상에서 생성된 플러크와 비교 시 미세 플러크가 관찰되었다. 50 rpm으로 추가 교반 시 300 rpm 이상의 교반속도에서는 플러크는 해체되나 미세 플러크의 생성 없이 균일하게 플러크 크기가 감소되었다. 그러나 150 rpm의 조건에서는 미세 플러크가 추가 형성되어 탈수 시 여과포 세공 막힘 현상을 유발하여 탈수효율이 저하시키는 결과 및 탈리액 중의 SS 유출로 회수율이 낮아지는 결과가 도출되었음을 알 수 있었다.

고분자 응집제와 슬러지 입자간의 응집 메커니즘은 1차적으로 슬러지와 응집제가 균일하게 분산이 되어야 하나 저속교반 시 점성이 높은 고분자 응집제가 분산되지 못하여 미세 플러크의 형성이 과다함이 관찰되었다. 또한, 고분자 응집반응의 특성으로 생성된 플러크가 해체되고 다시 재응집되는 과정을 반복하게 되어 조대화가 되기에 1차 분

산과정을 최대한 빠르게 진행하고 미세 플러크가 형성되는 초기 응집단계와 다시 이 플러크가 조대화 되는 가교단계가 동시에 일어나도록 강한 교반에 의한 강한 응집공정이 더욱 효율적인 것으로 평가되었다. 저점도인 1.7-1800에 대한 비교실험 결과에서도 적정 응집반응을 위한 교반속도 및 응집반응시간이 600 rpm에서 3초로 최적 교반조건에서 교반시간이 짧아지는 경향만을 나타내어, 600 rpm으로 교반 시에 그 이하의 저속교반 시보다 응집효율이 개선되는 현상은 동일하게 평가되었다. 따라서 응집 반응조에서의 회전수 및 체류시간을 반응조의 크기 및 교반속도를 조절하여 탈수효율 및 플러크 상태를 개선할 수 있음을 알 수 있었다.

상기 결과를 토대로 전단 고속교반기(최대 교반속도: 1,200 rpm)를 이용하여 응집 반응조 전단에 적용한 실증 규모의 설비를 이용하여 실험한 결과, 다른 모든 응집조건이 동일한 상태에서 고속교반을 900~1,000 rpm으로 적용한 결과 탈수 후 함수율이 약 3% 정도 저감되는 것을 알 수 있었다.

3.5. 2단 응집 시스템

고분자 응집제를 이용한 탈수공정에서 응집제 투입방식에 따른 영향을 평가하기 위하여 2단 응집 방식에 대한 응집효율을 평가하였다. 기 보고된 연구들에서는 이액형 또는 삼액형 약품을 각각 상이한 위치에 투입하여 그 효율을 개선하는 것과는 달리 동일한 응집제를 다른 위치와 응집조건으로 투입하는 방식으로 실험하였다. 응집반응조건은 응집제를 1차 투입 후 300 rpm에서 20초간 반응하고, 다시 2차 투입으로 분할 투입하여 동일조건에서 응집반응을 하는 2단 응집반응을 적용하였으며, 투입량은 1차 및 2차 투입량의 비율을 조절하여 그 특성을 평가하였다.

Fig. 9는 1.7-1800을 이용하여 전체 투입량(1차 및 2차 투입량의 합)을 140 mg/L로 하여 300 rpm에서 각각 20초간 반응한 결과, 응집제를 1회 투입하는 단일투입방식의 탈

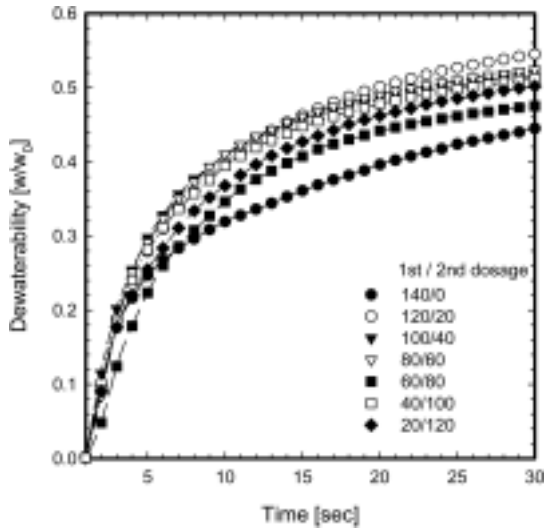


Fig. 9. Dehydration characteristics of the dosage ratio in a dual flocculation system using 1.7-1800.

수효율인 10초(32.0%) 및 30초(44.5%) 대비 1차 투입량을 57~71%로 투입한 경우 10초(40.9% 및 41.0%) 및 30초(52.4% 및 51.7%)로 약 18~25%의 탈수효율이 증가하였다. 1차 및 2차 투입량 비율에 따른 최적조건은 1차 투입량을 기준으로 43%를 투입 시 탈수효율이 가장 낮고, 증가 또는 감소될수록 탈수효율 증가 되었으며, 0 또는 100%로 될 때까지 다시 감소하는 결과를 나타내었다.

Fig. 10에 나타낸 결과는 1.7-4000을 이용하여 2단 응집 시스템을 적용한 것으로 저점도의 1.7-1800과는 달리 1차 투입량의 비가 50%일 때 최대 탈수효율인 10초(45.0%) 및 30초(62.2%)를 나타내었다. 예비실험의 결과인 10초(40.6%) 및 30초(48.7%) 대비 약 탈수효율이 10~28%가 증가되는 결과를 보였다. 따라서 응집제의 2단반응 적용에 의해 탈수효율을 개선할 수 있으며, 응집제의 점도와 무관하게 2단 응집 시스템의 적용이 가능함을 알 수 있었다. 특히,

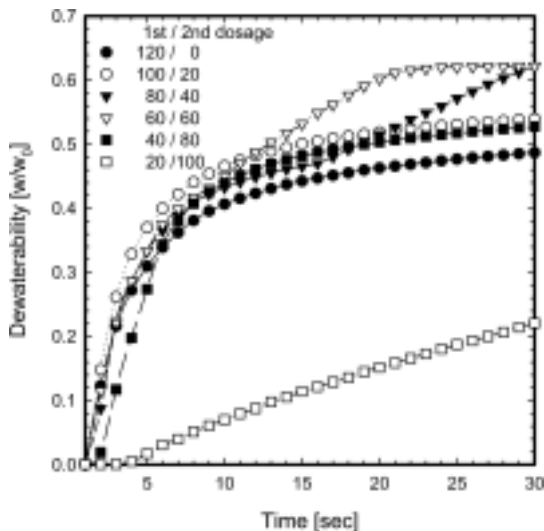


Fig. 10. Dehydration characteristics of the dosage ratio in a dual flocculation system using 1.7-4000.

Table 1. Mechanism of dual flocculation at various dosing conditions

Dosing ratio		Structures of Floc		
1st	2nd	1st	High shearing	2nd
100%	0%			
75%	25%			
50%	50%			
25%	75%			
0%	100%			

1.7-4000의 경우와 같이 고점도에 의해 슬러지와 분산성이 낮은 응집제의 경우, 1차 투입량을 70% 정도로 저투입량에서 분산성 개선 후 2차 투입으로 조대화 공정을 통한 2단 응집으로 탈수효율의 개선이 가능하였다.

Table 1은 2단 응집공정을 적용 시 메커니즘을 제시하기 위하여 각 조건에서의 응집된 플록 상태를 비교한 표이다. 응집제를 한번만 투입하여 응집하는 1단 응집반응 시의 투입량을 100%로 가정할 경우, 2차 응집반응의 투입량 비율을 0%에서 100%로 증량 시 1차 응집반응에 의해 형성된 플록은 응집반응이 지속되는 동안 플록의 압밀이 되고 일부 플록은 해체되어져 그 크기가 작아진다. 1차 응집반응이 초기 플록의 형성 및 조대화공정이 순차적으로 진행되어야하는 공정인 반면 2차 응집반응 공정이 조대화 공정이다. 그러므로 요구되는 응집제량은 초기 플록을 형성하기 위해 투입된 응집제의 25%만으로도 충분히 플록을 조대화할 수 있었다.

조대화된 플록의 내부 플록을 평가하기 위하여 약 10 g의 플록을 200 g의 증류수에 넣고 Jar-tester로 150 rpm에서 형성된 플록이 해체될 때까지 교반하여 해체된 플록의 상태로 내부 플록의 균일성을 평가하였다. 1차 투입량이 25%로 절대량이 부족한 경우, 초기 플록이 너무 작고 2차 응집된 플록 관찰 시 조대화 플록, 미세 플록 및 잔류 SS 등이 관찰되었다. 따라서 조대화된 플록 내부의 플록 상태가 불균일하여 균일한 세공형성이 어려워 1차 투입량이 많은 경우보다 탈수효율이 저하되었음을 알 수 있었다. 최적 조건인 1차 투입량이 70% 수준인 경우 1차 응집반응에 의해 형성된 플록이 일부 조대화되어져 있는 상태이며 2차 투입된 응집제와의 응집반응에 의해 플록이 조대화되어 해체된 플록 관찰 시 균일한 중간 크기의 플록으로 해체됨으로써 Table 1의 2차 응집 반응 후의 플록과 같이 세공형성이 용이하여 탈수효율이 다른 조건에서보다 높은 결과가 도출된 것으로 평가되었다.

5. 결론

탈수공정에 적용되는 폴리아크릴아마이드계 고분자 응집

제의 응집반응 조건에 따른 각 응집제별 응집특성은 탈수 효율에 큰 영향을 가진다. 본 연구에서는 다양한 이온성과 점도를 가진 응집제를 적용하여 여러 투입량 범위에서 실험에 적용한 소화 슬러지에 대한 적정 응집제 및 운전조건을 선정하여 그 탈수효율을 개선할 수 있었으며, 그 결과는 이온성(2.4 meq/g) 및 1 w% 점도(3,300 cps)의 응집제가 본 실험조건에서는 범용적 적용이 가능한 응집제이며, 각 투입량별 최대탈수효율은 100 mg/L에서 3.3 meq/g 및 3,500 cps의 응집제가 39.5%, 120 mg/L에서 1.7 meq/g 및 1,800 cps의 응집제가 60.6%와 140 mg/L에서 1.7 meq/g 및 4,500 cps의 응집제가 58.3%로 최대 탈수효율을 나타내었다.

다른 종류의 용해수를 이용하여 용해수 종류에 따른 점성 거동 및 탈수효율을 비교하고, 그 상관관계를 평가하여 응집제 용해액의 점도저하는 응집제 자체의 점도와 하전량에 반비례하며, 저투입량에서는 탈수효율 저하와 비례한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 재이용수를 적용한 경우에 고투입량에서는 탈수효율이 더 우수하여 용해수에 따른 점도 점도저하와 탈수효율이 비례적인 관계가 있지 않음을 알 수 있었다.

응집제의 분자량에 따른 응집효율은 비교적 분자량이 낮은 응집제는 적정 투입량 범위가 넓으나 분자량이 높은 응집제 적정 투입량은 낮은 응집제의 70% 정도이나 그 범위가 좁은 특성을 보였다. 탈수 거동에서도 저분자량의 응집제를 적용 시 10초 이후의 탈리액량은 감소하는 현상을 보이나 5초 탈리액량은 지속적으로 증가됨을 보이며, 고분자량 응집제의 경우, 각 시간별로 차이가 없이 동일한 거동을 보이는 등 상이한 형태의 투입량에 따른 탈수효율을 보였다.

응집반응의 교반속도와 시간의 영향 또한 중요한 응집인자이다. 현 실험조건에서 700 rpm과 3초로 교반속도를 높이고 짧은 시간을 반응시킨 경우, 플럭의 크기 및 강도가 개선되어 동일 투입량에서 약 2배 이상 탈수효율의 차이를 나타내었으므로 응집반응조의 크기 및 교반기의 회전 속도를 통해 탈수효율이 개선이 가능함을 알 수 있었다.

새로운 2단 응집방식의 적용결과, 분자량이 낮은 1.7-1800의 경우, 1차 투입량을 57~71%로 투입한 경우 단일 투입 대비 약 18~25%의 탈수효율이 증가하였으나 분자량이 높은 1.7-4000은 1차 투입량의 비가 50%일 때 최대 탈수효율을 나타내며, 10~28%의 탈수효율이 증가되었다. 또한, 2단 응집공정은 응집제의 종류와 무관하게 응집반응조건의 조절로 탈수효율의 개선이 가능하였다.

참고 문헌

1. 환경부, “유기성오염물 처리 종합대책,” pp. 2~6(2006).
2. Keiding, K. and Nielsen, P. H., “Desorption of organic

macromolecules from activated sludge: Effect of ionic composition,” *Water Res.*, **31**(7), 1665~1672(1997).

3. Yin, X., Han, P., Lu, X., and Wang, Y., “A review on the dewaterability of bio-sludge and ultrasound pretreatment,” *Ultrasonics Sonochemistry*, **11**, 337~348(2004).
4. Bae, Y. H. and Lee, S. S., “Estimation for Dewaterability on Interaction Between Cationic Flocculants And Ionic materials In Dissolving Water,” *Environ. Eng. Res.*, **11**(5), 266~276(2006).
5. Bae, Y. H. and Lee, S. S., “A Single Flocculant/Dual Flocculation System for Dewatering Using a Branched Self inverting Emulsion Flocculant,” *Environ. Eng. Res.*, **11**(4), 208~216(2006).
6. Vaxelaire, J. and Clezac, P., “Moisture distribution in activated sludges: a review,” *Water Res.*, **38**, 2215~2230(2004).
7. 윤태일, 김낙주, 김창균, “슬러지 탈수 전처리의 최적조건 결정을 위한 연구,” *대한환경공학회지*, **14**(4), 309~316(1992).
8. 이윤환, 조광명, 이면주, “소화슬러지의 수리학적 부하가 소화슬러지의 탈수성에 미치는 영향,” *대한환경공학회지*, **18**(6), 693~705(1996).
9. 서정원, 송태준, 박진원, 이태희, 이승무, “고분자 응집제의 첨가에 따른 슬러지의 탈수성 및 점도 특성,” *대한환경공학회지*, **18**(12), 1609~1618(1996).
10. 유명진, 명규남, “휘발성 고형분 함량과 입자분포의 변화가 상수슬러지의 탈수특성에 미치는 영향,” *대한환경공학회지*, **19**(2), 255~268(1997).
11. 김승현, 문성용, “정수장 슬러지의 농축 및 탈수특성 향상에 관한 연구,” *대한환경공학회지*, **19**(5), 643~650(1997).
12. 이정언, “혼합 슬러지의 탈수성에 관한 연구,” *대한환경공학회지*, **26**(8), 925~932(2004).
13. 이정언, “정수슬러지의 특성이 탈수성능에 미치는 영향,” *대한환경공학회지*, **25**(8), 1059~1066(2003).
14. 전향배, 채선하, 백흥기, 신항식, “Alum의 응집 Mechanism을 고려한 2단혼화공정의 탁도 및 유기물질 응집특성 연구,” *대한환경공학회지*, **19**(5), 633~642(1997).
15. 박노석, 박희경, 김응용, 한승철, “응집제의 적정 주입률 결정을 위한 수리학적 상사성의 Jar-test 적용,” *대한환경공학회지*, **23**(11), 1865~1874(2001).
16. 윤태일, 김재형, 김민숙, 이면주, 정재기, “수처리에서 응집에 미치는 고분자 응집제 주입 지점의 영향,” *대한환경공학회지*, **12**(4), 207~216(1991).
17. 서정원, 송태준, 박진원, 이태희, 이승무, “고분자 응집제 첨가에 따른 슬러지의 탈수성 및 점도 특성,” *대한환경공학회지*, **18**(12), 1609~1618(1996).