

## 체류시간에 따른 정수장슬러지의 탈수특성

# Dewatering Characteristic of Water Treatment Plant Sludges based on Detention Time

문용택\* · 김병군 · 김연권 · 김홍석

Moon, Yong-taik\* · Kim, Byung-goon · Kim, Youn-kwon · Kim, Hong-suck

한국수자원공사 수자원연구원

(2007년 9월 10일 논문 접수; 2007년 12월 12일 최종 수정논문 채택)

### Abstract

The dewaterability of a sludge can be characterized by two ways: the residual moisture content in the sludge cake after dewatering process, and the filtration of the sludge. Time to filter (TTF) represents filtration processes that are special cases of the flow through a solid matrix concept. TTF characterizes a resistance to filtration. The sludge resistance, in turn, can be subdivided into resistances associated with the solid phase and the liquid phase to evaluate the effect of each of the two phases on sludge dewaterability.

In order to determine the dewatering characteristics of the water sludge samples, TTF and zeta potential were measured. For these studies cationic polymer was chosen for water sludge dewatering experiments. The zeta potential of thickener sludges neared from minus values to zero values till 4 days after sampling. The dewaterability of thickener sludges using cationic polymer was deteriorated according to the increase of detention time.

As the detention time was increased from 4 to 10 days, the optimal dose of the polymer was increased from 4 to 8mg/L. Therefore, the optimal detention time plays an important part for the dewaterability of a sludge.

**Key words:** Dewaterability, Time to filter (TTF), Zeta potential, Detention time

**주제어:** 탈수성, 여과시간, 제타전위, 체류시간

## 1. 서 론

정수장에서 배출수 처리의 대상이 되는 것은 주로

침전지의 배출슬러지와 여과지의 세척배출수로서 그 성분은 원수중의 부유물질 대부분과 용해성 물질의 일부 및 응집제 등으로 대개 무기성분이나 최근에는 하천의 오탁이나 부영양화 등의 진행에 따라 유기물

\*Corresponding author Tel: +82-42-870-7552, FAX: +82-42-870-7549, E-mail: ytmooon@kwwater.or.kr (Moon, Y.T.)

질이 점차 증가하고 있어 정수장에 따라서는 슬러지의 유기성분 비율이 많은 경우도 있다.

정수장 슬러지의 취급성을 향상시키고, 부피를 줄이기 위해 사용되는 유기고분자 응집제는 슬러지 처리뿐만 아니라 수처리에서도 사용이 가능한데 현재 우리나라에서는 인체에 미치는 해를 우려해서 수처리에서는 사용하지 않고 슬러지 처리에만 사용하고 있다.

침전지에서 침전 후 농축조에서 농축된 슬러지의 특성은 수처리된 원수 내의 부유물 특성과 이 부유물을 응집시키기 위해 사용된 응집제에 의해 형성되며, 이러한 농축 슬러지가 지니는 입자 특성을 고려 슬러지 입자들 사이에 존재하는 수분을 효과적으로 탈수시키기 위하여 적합한 유기고분자 응집제를 선정, 슬러지의 취급성을 향상시키고 부피를 줄이므로써 매립처분이 용이하고 매립 비용을 줄일 수 있다.

정수장 슬러지의 농축 공정은 침전 여과 혹은 연수화 공정 이후에 시작된다. 농축 공정들은 정수장의 수처리 공정으로부터 발생된 높은 고형물을 함유한 슬러지의 경제적인 처리를 위하여 필수적이다. 슬러지의 농축은 개량 및 탈수와 같은 농축 이후의 공정에 직접적인 영향을 주며, 효과적이고 경제적인 정수장 운영과 비효과적이고 높은 비용을 초래하는 정수장 운영의 차이를 만들 수 있다. 정수장 슬러지는 가장 일반적으로 중력식 농축조를 사용하여 농축되어지며 중력식 벨트 농축조나 부상 농축조의 공정도 정수장 슬러지의 농축을 위해 사용된다.

물리, 화학적 방법에 의한 슬러지 개량은 슬러지의 탈수 특성 개선에 의한 탈수 비용을 감소시키기 위하여 가장 보편적으로 사용되는 방법으로, 정수처리 과정에서 발생하는 대부분의 슬러지는 중력을 이용해서 농축을 실시하고, 농축 후 벨트 프레스 등을 사용하여 슬러지를 탈수하기 전에 유기고분자 응집제를 이용하여 농축조에서 농축된 슬러지의 탈수 특성을 향상시키는 방법을 사용하고 있다.

슬러지와 관련된 수분형태는 플록 구조에 기초하여 정의되나 아직 단일하게 일치되어 있지 않아 연구자 및 측정방법에 따라 차이를 보이고 있다. 자유수와 간극수를 자유수로, 표면수와 부착수를 결합수라 칭한다. 이렇듯 슬러지 내에 다른 물리·화학적 수분형태가 존재하는 것은 고형입자와의 사이에서 결합에너지의 차이가 존재하기 때문이라고 알려져 있다

(Vesilind, P.A., 1994). 기계적 압착에 의한 수분의 제거는 고형입자와 결합력이 낮은 형태의 수분부터 이루어지며 물리·화학적으로 결합되어 그 결합 에너지가 높아질수록 제거되기 어려워진다. 따라서 슬러지에서 가장 쉽게 제거되는 물은 배수, 농축, 기계적 탈수를 통해 제거되는 자유수이며, 간극수는 충분한 기계적 에너지로 플록 구조가 파괴되어 압축되는 경우 자유수로 전환되어 제거된다. 대부분의 기계적 탈수 공정에서 제거 대상이 되는 수분형태는 자유수와 간극수이며, 표면수와 결합수는 기계적 탈수공정으로는 제거되기 힘들어 열적, 화학적 전처리를 필요로 하기 때문에 탈수공정에서 주 관심대상이 된다. 일반적으로 표면수와 부착수를 기계적 탈수의 이론적 한계라 한다(구윤희 등, 1998). 탈수성에 대해 TS 농도가 변화하더라도 폴리머의 최적 주입률은 탈수여역의 제타전위가 "0" 부근에서 최적으로 나타나는 것으로 알려졌다(변 등, 2006; Chu and Lee, 1999).

본 연구에서는 저수지를 취수원으로 하는 S 정수장의 농축조의 시설용량이 과다하여 슬러지의 장기체류(체류시간 7~10일)에 의한 혐기화된 슬러지의 탈수기로의 유입이 탈수에 미치는 영향을 파악하기 위해 농축슬러지의 체류시간별 슬러지의 탈수성 평가(약품주입량 및 제타 포텐셜)를 수행하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

시료는 S 정수장 농축조의 침전슬러지를 체류시간별 약품주입량을 달리하여 수행하였으며, 약품은 양이온계 중이온성 유기고분자 응집제인 C-7650을 사용하였으며, 체류시간별 폴리머 주입량과 약품의 특성은 Table 1, Table 2에 나타냈다. 최적약품주입량 산정은 체류시간별로 슬러지에 폴리머 주입량을 2~50mg/L로 증가시키면서 TTF의 측정치에서 최소값을 나타내는 변곡점 범위에서 다시 세분화하여 폴리머 주입을 하여 최저를 나타내는 변곡점을 최적주입량으로 하였다. 계절별 슬러지의 탈수특성 실험에서 고탁도가 유입되는 여름철에는 슬러지의 침강성이 높아 농축조에서 유출되는 슬러지의 농도가 매우높아 탈수특성평가의 대상에서 제외시켰다. 계절별 S 정수장슬러지의 농도에 따른 폴리머 주입량을 달리하여 30sec 동안 교반시킨 후 여과지의 무게를 측정 한 후

**Table 1.** Seasonal Experiments of Sludges on Detention time

Seasons	Spring	Autumn	Winter
Detention time(day)	4~27	10~29	3~14
Polymer dosage(mg/L)		2~50	

**Table 2.** Polymer characteristics used in this study

Product name	Charge	Charge Density	Viscosity,cps
C-7650	Cationic	Medium	280~300*

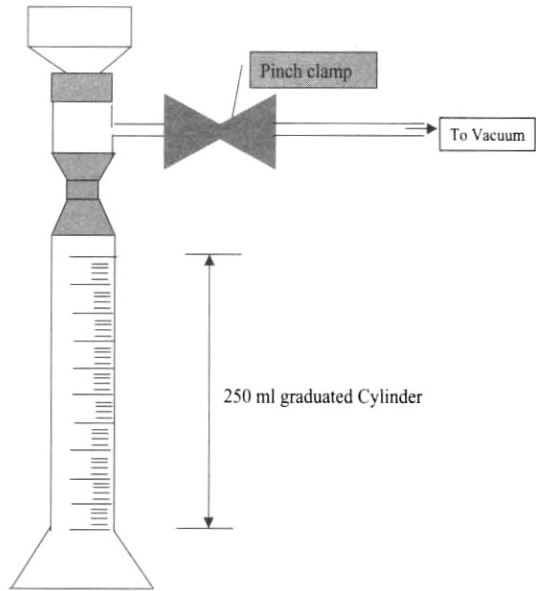
\*viscosity values at 25°C, 100 rpm for a solution of 0.2%.

Buchner funnel을 여과장치에 부착한다. 실험방법은 여과지의 표면에 증류수를 소량 뿌려 여과지와 funnel을 밀착한 후 100ml 생슬러지와 개량된 슬러지를 여과지에 붓는다. 슬러지를 부은 다음 중력에 의해 자연적으로 여과되는 수분이 제거될 때까지 기다린다. 진공압력을 15in·Hg로 일정압력 유지한다. 이때부터 시간을 0으로 한다. 10ml 간격으로 실린더에 여과되는 시간을 기록한다. 더 이상 수분이 나오지 않을 때, 진공펌프의 작동을 중단한다. 여과 후 여액(filtrate)의 부피를 측정하고, 온도를 측정한다. 고�형물량은 수질공정시험법에 의거하여 수행되었다. 비저항 시험을 보다 단순화시킨 것이 여과시간 실험(TTF)이다. TTF는 전체 여과량의 1/2에 해당하는 여과시간으로 정의되며(Eaton 등, 1995; ASCE, 1996), 실험장치는 Fig. 1에 나타내었다. 여과지는 표준방법에 나온 Whatman No. 1, No. 2를 사용해 보았으나 펌프에 압력을 가하면 여과지가 손상되어 고�형물이 같이 빠져나오고, 여과시간이 너무 짧아 측정이 어려웠다. 따라서 본 실험에 사용된 여과지는 Toyo No. 5C를 사용했다. 또한 제타전위는 ZETASIZER 2000/3000 분석기를 이용하여 TTF 측정실험시 여과된 액의 제타전위를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 고�형물 함량별 최적의 약품주입량변화

최적약품주입량 산정은 체류시간별로 슬러지에 플



**Fig. 1.** TTF equipment with side arm adaptor.

리머 주입량을 2~50mg/L로 증가시키면서 TTF의 측정치에서 최소값을 나타내는 변곡점 범위에서 다시 세분화하여 폴리머 주입을 하여 최저를 나타내는 변곡점을 최적주입량으로 하였다. 또한 같은 체류시간이라도 계절에 따라 최적 응집제 주입량이 다른것은 계절별 원수의 부유물질과 슬러지의 고�형물함량 차이로 폴리머 주입량이 다르게 나타나는 것으로 알려졌다(문 등, 2001).

#### 3.1.1. 춘계에서의 주입량 변화

S 슬러지의 고�형물 함량이 0.42%인 경우 체류시간에 따른 주입량의 변화를 Table 3, Fig. 2에 나타내었다.

슬러지의 고�형물 함량이 0.42%인 경우 체류시간 4일, 7일, 10일, 15일, 17일, 21일, 25일, 27일이 경과함에 따라 최적주입량은 4mg/L, 6mg/L, 8mg/L, 10mg/L, 10mg/L, 12mg/L, 12mg/L, 12mg/L로 증가하는 경향을 보여 체류시간이 증가하면 약품주입량이 증가하였다.

**Table 3.** Dewatering Characteristic of Sludges on Detention time (Spring, TS: 0.42%)

Detention time(day)	4	7	10	15	17	21	25	27
optimal dose(mg/l)	4	6	8	10	10	12	12	12

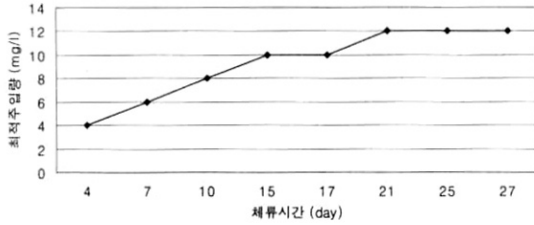


Fig. 2. Dewatering Characteristic of Sludges on detention time (Spring, TS: 0.42%).

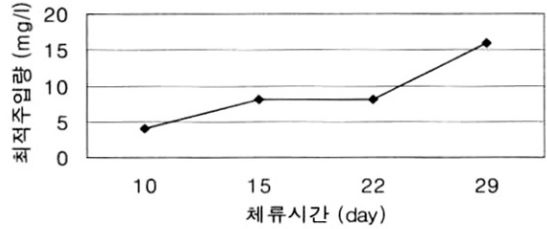


Fig. 3. Dewatering Characteristic of Sludges on detention time (Autumn, TS: 2.6%).

Table 4. Dewatering Characteristic of Sludges on detention time (Autumn, TS 2.6%)

Detention time (day)	10	15	22	29
optimal dose (mg/l)	4	8	8	16

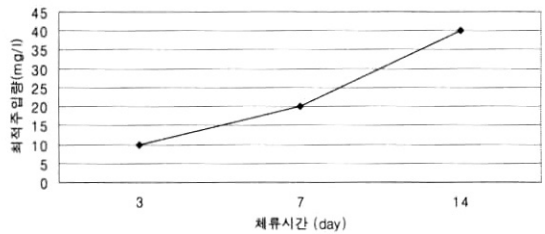


Fig. 4. Dewatering Characteristic of Sludges on detention time (Winter, TS: 1.96%).

Table 5. Dewatering Characteristic of Sludges on detention time (Winter, TS: 1.96%)

Detention time(day)	3	7	14
optimal dose (mg/l)	10	20	40

### 3.1.2. 추계에서의 주입량 변화

S 정수장 슬러지의 고형물 함량이 2.6%인 경우 체류시간에 따른 주입량의 변화를 Table 4, Fig. 3에 나타내었다.

슬러지의 고형물 함량이 2.6%인 경우 체류시간 10일, 15일, 22일, 29일이 경과함에 따라 최적주입량은 4mg/L, 8mg/L, 8mg/L, 16mg/L로 증가하는 경향을 보여 체류시간이 증가하면 약품주입량이 증가하였다.

### 3.1.3. 동계에서의 주입량 변화

S 정수장 슬러지의 고형물 함량이 1.96%인 경우 체류시간에 따른 주입량의 변화를 Table 5, Fig. 4에 나타내었다.

슬러지의 고형물 함량이 1.96%인 경우 체류시간 3일, 7일, 14일이 경과함에 따라 최적주입량은 10mg/L, 20mg/L, 40mg/L로 증가하는 경향을 보였다.

따라서 춘계, 추계, 동계의 실험결과 S 정수장 슬러지의 체류시간이 증가하면 유기고분자 응집제의 주입량이 증가하고, 입자분산에 의한 응집효율이 저하되고, 단지 점도에 의한 입자간의 결합력만 작용하여 탈수효율이 떨어진다고 판단된다. 따라서 체류시간의 증가는 유기고분자 응집제 주입량을 증가시키고, 탈수효율을 저하시켜 현재 운영되는 체류시간(7~10일)보다 짧게 운영하여 약품주입량 절감 및 탈수효율을 향상시킬 필요가 있다.

## 3.2. 제타전위의 변화

천연콜로이드입자, 세립현탁입자는 표면에 음의 전하를 가지며 상호간의 반발로 입자충돌의 방해를 하고 있기 때문에 양의 전하를 주지 않으면 안 된다. 양이온성의 유기고분자 응집제의 제1작용은 Zeta 전위의 저하이다. 소수성콜로이드입자의 경우에는 Zeta 전위를 저하시켜 형성되어 있는 전기이중층을 압축함으로써 응결이 생겨 침정화시킬 수 있다. 원슬러지의 제타전위가 폴리머량을 증가시키에 따라 제타전위가 음의 방향에서 양의 방향으로 증가하다가 제타전위가 0 부근에서 탈수효율이 가장 좋게 나타난다고 보고하였으나(Chu and Lee, 1999), 본 실험결과는 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다.

### 3.2.1. 춘계 실험

춘계 S 정수장 슬러지의 고형물 함량별 약품 주입에 따른 TTF와 제타전위의 변화를 조사하기 위하여 양이온계 중이온성 고분자 응집제 C-7650을 사용하

**Table 6.** Variances of zeta potential and dewaterability on original and conditioned sludges(Spring).

#1*	Polymer dosage (mg/l)	0	1	2	3	4	5
	TTF(sec)	27	22	25	32	35	37
	Zeta Value(mV)	-5.7	-3.0	-3.8	-2.5	-2.7	-2.4
#2*	Polymer dosage (mg/l)	0	2	4	6	8	10
	TTF(sec)	48	25	23	26	31	33
	Zeta Value(mV)	-6.3	-2.3	-2.7	-2.6	-2.7	-2.6
#3*	Polymer dosage (mg/l)	0	10	20	30	40	50
	TTF(sec)	113	86	48	30	40	52
	Zeta Value(mV)	-4.3	-3.3	-3.9	-2.6	-2.4	-1.9

\*solid concentration: #1\*: 0.12%, #2\*: 0.42%, #3\*: 1.23%

**Table 7.** Variances of zeta potential and dewaterability on original and conditioned sludges (Autumn)

#1*	Polymer dosage (mg/l)	0	2	4	6	8	10
	TTF(sec)	27	17	15	16	17	23
	Zeta Value(mV)	-13.9	-5.3	-10.4	-5.8	-4.1	-3.8
#2*	Polymer dosage (mg/l)	0	4	8	12	16	20
	TTF(sec)	19	12	14	21	23	30
	Zeta Value(mV)	-10.2	-6.9	-7.5	-4.2	-4.4	-4.0
#3*	Polymer dosage (mg/l)	0	30	60	90	120	150
	TTF(sec)	48	25	30	45	64	125
	Zeta Value(mV)	-12.5	-6.5	-4.2	-3.5	-3.0	-3.3

\*solid concentration: #1\*: 1.2%, #2\*: 2.6%, #3\*: 7.9%

었다.

Table 6에서 보는 바와 같이 슬러지의 고형물 함량이 0.12%일 때 원슬러지의 TTF와 제타전위는 27 sec, -5.6mV이었고, 약품을 1mg/L 주입시 탈수효율이 가장 좋게 나타났으며, 이때의 제타전위는 -3.0mV로 0의 방향으로 증가하였으나 약품 주입량의 증가에 따라 제타전위는 증가하여 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

슬러지의 고형물 함량이 0.42%일 때 원슬러지의 TTF와 제타전위는 48sec, -6.3mV이었고, 약품을 4mg/L 주입시 탈수효율이 가장 좋게 나타났으며, 이때의 제타전위는 -2.7mV로 0의 방향으로 증가하였으나 약품 주입량별 제타전위의 값은 비슷하게 나타났다.

슬러지의 고형물 함량이 1.23%일 때 원슬러지의 TTF와 제타전위는 113sec, -4.3mV이었고, 약품을 30 mg/L 주입시 탈수효율이 가장 좋게 나타났으며, 이때의 제타전위는 -2.6mV로 0의 방향으로 증가하였으나 약품 주입량별 제타전위의 값은 비슷하게 나타났

다.

따라서 춘계의 S 정수장의 경우 제타전위의 측정에 의한 약품량을 주입하기 위해서는 제타전위가 -2.6 mV에서 -3.0mV 범위일 때 최적값으로 나타나 제타전위의 변화에 의한 약품주입은 어렵다고 판단된다.

### 3.2.2. 추계 실험

추계 S 정수장 슬러지의 고형물 함량별 약품 주입에 따른 TTF와 제타전위의 변화를 조사하기 위하여 양이온계 중이온성 고분자 응집제 C-7650을 사용하였으며 Table 7에 나타내었다.

Table 7에서 보는 바와 같이 슬러지의 고형물 함량이 1.2 %일 때 원슬러지의 TTF와 제타전위는 27 sec, -13.9mV이었고, 약품을 4mg/L 주입시 탈수효율이 가장 좋게 나타났으며, 이때의 제타전위는 -10.4 mV로 0의 방향으로 증가하였으나 약품 주입량의 증가에 따라 제타전위는 증가하여 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

슬러지의 고형물 함량이 2.6%일 때 원슬러지의

**Table 8.** Variances of zeta potential and dewaterability on original and conditioned sludges (Winter)

#1*	Polymer dosage (mg/l)	0	3	6	9	12	15
	TTF(sec)	80	36	39	47	67	70
	Zeta Value(mV)	-5.2	-4.4	3.4	11.5	9.6	10.1
#2*	Polymer dosage (mg/l)	0	10	20	30	40	50
	TTF(sec)	132	35	77	114	153	123
	Zeta Value(mV)	-7.7	5.7	12.8	12.2	15.7	14.8
#3*	Polymer dosage (mg/l)	0	40	80	120	160	200
	TTF(sec)	716	620	370	350	165	276
	Zeta Value(mV)	-4.7	-4.1	-4.2	13.0	9.1	-0.5

\*solid concentration: #1\*: 1.1%, #2\*: 1.96%, #3\*: 7.6%

TTF와 제타전위는 19sec, -10.2mV이었고, 약품을 4mg/L 주입시 탈수효율이 가장 좋게 나타났으며, 이때의 제타전위는 -6.9mV로 0의 방향으로 증가하였으나 약품 주입량의 증가에 따라 제타전위는 증가하여 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

슬러지의 고형물 함량이 7.9%일 때 원슬러지의 TTF와 제타전위는 48sec, -12.5mV이었고, 약품을 30mg/L 주입시 탈수효율이 가장 좋게 나타났으며, 이때의 제타전위는 -6.5mV로 0의 방향으로 증가하였으나 약품 주입량별 제타전위의 값은 비슷하게 나타났다.

따라서 추계의 S 정수장의 경우 제타전위의 측정에 의한 약품량을 주입하기 위해서는 제타전위가 -6.5mV에서 -10.4mV 범위를 최적값으로 하며, 제타전위의 최적범위가 넓어 제타전위의 측정에 의한 약품주입이 어렵다.

### 3.2.3. 동계 실험

동계 S 정수장 슬러지의 고형물 함량별 약품 주입에 따른 TTF와 제타전위의 변화를 조사하기 위하여 양이온성 중이온성 고분자 응집제 C-7650을 사용하였으며 Table 8에 나타내었다.

Table 8에서 보는 바와 같이 슬러지의 고형물 함량이 1.1%일 때 원슬러지의 TTF와 제타전위는 80sec, -5.2mV이었고, 약품을 3mg/L 주입시 탈수효율이 가장 좋게 나타났으며, 이때의 제타전위는 -4.4mV로 0의 방향으로 증가하였으나 약품 주입량의 증가에 따라 제타전위는 양의 방향으로 증가하여 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

슬러지의 고형물 함량이 1.96%일 때 원슬러지의

TTF와 제타전위는 132sec, -7.7mV이었고, 약품을 10mg/L 주입시 탈수효율이 가장 좋게 나타났으며, 이때의 제타전위는 5.7mV로 양의 방향으로 증가하였으며 약품 주입량의 증가에 따라 제타전위는 12mV 이상의 값으로 유지하였다.

슬러지의 고형물 함량이 7.6%일 때 원슬러지의 TTF와 제타전위는 716sec, -4.7mV이었고, 약품을 160mg/L 주입시 탈수효율이 가장 좋게 나타났으며, 이때의 제타전위는 9.1mV로 양의 방향으로 증가하였으나 약품 주입량별 제타전위의 값의 경향은 나타나지 않았다.

따라서 동계의 S 정수장의 경우 제타전위의 측정에 의한 약품량을 주입하기 위해서는 제타전위가 -4.4mV에서 12mV 범위를 최적값으로 하며, 제타전위의 최적범위가 넓어 제타전위의 측정에 의한 약품주입이 어렵다. 응집 후의 최적주입량으로 첨가시 제타전위의 값이 양의 값을 나타낸 것은 장기간의 농축에 의한 슬러지의 부패로 인한 입자분산 및 낮은 온도에 의해 응집은 일어나지 않고, 단지 양이온계의 이온에 의한 제타전위의 증가로 판단된다.

## 4. 결 론

1. 춘계, 추계, 동계에 있어서 S 정수장 슬러지의 체류시간에 따른 최적 응집제 주입률을 살펴본 결과, 슬러지의 체류시간이 증가함에 따라 제타전위가 증가하고 응집제 주입량도 함께 증가하였다. 따라서 입자분산에 의한 응집효율이 저하되고, 점도에 의한 입자간의 결합력만 작용하여 탈수효율도 저하될 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 약품주입량 절감 및 탈수

효율을 향상시키기 위해서는 슬러지의 체류시간을 현재 운영되는 7~10일보다 짧게 운영할 필요가 있다.

2. 계절별 고형물함량별 최적의 약품주입량과 제타전위의 변화는 춘계에는 제타전위가 -2.6mV에서 -3.0mV 범위, 추계에는 제타전위가 -6.5mV에서 -10.4mV 범위, 동계에는 제타전위가 -4.4mV에서 12mV 범위를 최적값으로 하여 제타전위의 최적범위가 넓어 제타전위에 의한 최적의 약품주입은 어렵다고 판단된다. 특히, 동계에는 응집후의 최적주입량으로 첨가시 제타전위의 값이 양의 값을 나타낸 것은 장기간의 농축에 의한 슬러지의 부패로 인한 입자분산 및 낮은 온도에 의해 응집은 일어나지 않고, 단지 양이온계의 이온에 의한 제타전위의 증가로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 변석중, 이승원, 권재현, 이수용, 김영선, 이석현 (2006) 정수장슬러지의 Streaming Potential을 이용한 폴리머 최적주입량 및 탈수효율향상 연구, 한국물환경학회, 대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집.
2. 구윤희, 명규남외 3인 (1998) 상수슬러지의 수분분포와 탈수성에 대한 영향인자, 서울시립대학교 대학원.
3. 문용택, 류제라 (2001) 정수장슬러지의 폴리머 개량에 의한 탈수특성, 상하수도학회지, 15(1), pp. 28-38.
4. Chu C.P. and Lee. D.J. (1999) Moisture distribution in sludge: Effects of polymer conditioning, *J. Envir. Eng.*, 125(4), pp. 340-345.
5. Vesilind, P.A. (1994) The Role of Water in Sludge Dewatering, *Water Environmental Research*, 66(1), pp. 4-11.
6. Eaton, A.D., Clesceri, L.S. and A.E. Greeberg (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th. Ed., APHA, AWWA, WEF, pp. 82-83.
7. ASCE, Management of water treatment plant residuals. Technology Transfer Handbook, U.S. EPA/625/R-95/008, p. 44, 1996.