

슬러지 탈수 전처리의 최적조건 결정을 위한 연구

1. 서론

폐수처리 과정중 침전조에서는 상당히 많은 양의 슬러지가 발생한다. 이 슬러지는 Vacuum filter, Belt press, Filter press, Centrifuge 등의 탈수 장치에 유입되어 탈수과정을 거치게 된다.

그러나, 탈수장치에 유입되는 슬러지의 수분함량이나 크기분포, 밀도, 기계적 강도에 따라 탈수장치에 고부하가 발생하거나 탈수처리후 cake의 수분함량에 영향을 미친다. 또한, 슬러지 처리에 드는 비용은 수처리 전체에 소요되는 비용의 약 50% 이상을 차지하고 있기 때문에 슬러지 탈수성은 cake의 함수율 뿐만 아니고 슬러지 처리비용에도 큰 비중을 차지한다. 슬러지 전처리 목적은 전처리 약품을 이용하여 슬러지의 탈수성질을 개선함으로써 슬러지의 부피와 cake의 수분함량을 줄이고 탈수장치의 부하를 낮춤으로써 슬러지 처리비용을 최대한 절감하고자 하는 것이다. 따라서 슬러지의 전처리는 탈수장치에 따라 다소 차이가 있지만, 응집제의 선정, 주입량 그리고 교반 강도 등의 화학적조건 및 수리학적조건에 의해 영향을 받으며, 전처리후 탈수장치 및 pump 등의 기계적 전단력을 받게 되는 것이다. 그러나 실제 처리장에서는 이러한 전처리조건에 대해서 거의 무시하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 화학적슬러지 및 생물학적슬러지에 대하여 최대의 탈수효율을 가질 수 있도록 최적의 전처리를 위한 응집제의 종류 및 강도 등의 화학적 조건에 관한 영향을 조사하였고, 탈수특성을 측정하는 방법으로서 비교적 측정이 까다롭고 많은 시간이 소요되는 여과 비저항값 측정대신에 신속하고 간편하게 측정할 수 있는 방법을 제시 하였으며, pump 및 탈수장치 등의 기계적 전단력을 고려한 슬러지탈수 전처리의 최적조건 결정에 필요한 절차를 설정하기 위하여 연구를 수행하였다.

2. 전처리 최적조건 결정을 위한 평가방법

슬러지의 농축 혹은 탈수를 위한 최적 전처리조건을 결정하기 위해 응집제의 선정과 주입량의 결정은 슬러지를 구성하는 입자의 화학적 성질과 사용되는 농축

윤태일 (인하대학교 환경공학과 교수)
김낙주 · 김창균 (인하대학교 대학원)

혹은 탈수장치에 따라 다르지만 일반적으로 다음과 같은 변수를 평가하여 결정할 수 있다.

(1) 슬러지와 상등액간의 계면 강하속도(hindered settling velocity) 및 상등액의 수질

보통 1 l graduated cylinder를 이용하여 전처리된 슬러지의 초기 침강속도를 측정한다. 만약 계면이 뚜렷하게 나타나면 침전속도는 응집제의 양을 결정하기 위한 효과적인 방법이 될 수 있다. 그러나, 계면이 뚜렷하지 않은 경우 상등액의 탁도를 측정하여 응집제의 양을 결정하는 방법이 유용하다.

(2) 전처리후 농축된 슬러지의 농도 또는 슬러지의 최종 침전부피

적당한 침전시간 후에 주어진 슬러지가 차지하는 최종 침전부피에 의해 결정되는데 깨지기 쉬운 플럭의 특성때문에 응집제와 탈수장치의 변수에 따라 침전부피는 약 30배까지 차이가 발생할 수 있다. 결국 슬러지의 최종침전부피는 관련된 장치비용에 직접적인 영향을 미친다.

(3) 전처리된 슬러지의 여과에 대한 비저항

슬러지의 여과속도 또는 여과에 대한 비저항을 측정하는 것으로 여과 비저항 측정은 Swanwick가 건조상에서 건조시킨 슬러지의 수율과 관련 시킴으로서 시작되었다. 관련되는 비저항식은 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{2A^2PrB}{C\mu} \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

여기에서 α : 여과 비저항 계수(m/kg)

A: 여과지의 면적(m²)

Pr: 진공압력(N/m², mmHg)

B: 여과시간(time) / V에 대한 관계직선의 기울기(sec/m²)

μ : 여액의 점도(kg/m·sec)

C: 여액의 단위부피당 건조 고형물의 농도(kg/m²)

(4) CST(Capillary Suction Time)의 측정 및 플럭의 강도평가

CST의 측정은 여과 비저항 측정법에 비해 매우 단순하고 빠른시간내의 슬러지의 여과성을 결정한다. CST 장치는 전단력 교반기와 함께 플럭의 강도측정에 이용된다.

슬러지 처리에 드는 비용은 수처리 전체에 소요되는 비용의 약 50% 이상을 차지하고 있기 때문에 슬러지 탈수성은 cake의 함수율 뿐만 아니고 슬러지 처리비용에도 큰 비중을 차지한다. 슬러지 전처리 목적은 전처리 약품을 이용하여 슬러지의 탈수성질을 개선함으로써 슬러지의 부피와 cake의 수분함량을 줄이고 탈수장치의 부하를 낮춤으로써 슬러지 처리비용을 최대한 절감하고자 하는 것이다.

일반적으로 최적 전처리조건으로 처리된 슬러지가 농축조 또는 여과장치로 이동될 때 pump등의 전단력에 의해 슬러지가 쉽게 파괴되는 경향이 있다. 이러한 전단력 때문에 탈수장치에서 응집제를 효율적으로 사용할 수 없으며 또한 실험자료를 이용하여 실제 크기 장치 효율을 예측하는 경우 큰 오류를 범하기 쉽다. 그러므로 pump와 여과장치에서 발생하는 전단력을 등가치로 표현하여 응집제 선정과 주입량의 결정에 고려되어야 한다.

Gale은 전처리된 슬러지가 탈수처리 장치에서나 혹은 펌핑과정에서 받을 수 있는 전단력을 표준 전단력 교반기와 CST장치를 이용하여 관련지었다. 표 1은 표준전단력 교반장치로서 교반강도 1,000rpm으로 교반할 때 교반시간과 각 탈수 장치와의 관계를 나타낸 것이며 여기서 표현된 전단등가(shear equivalent)는 곧 교반시간이 된다. 즉 각 탈수장치에서 받을 수 있는 전단력을 표현한 것이다.

표 1. Shear equivalent of typical dewatering system

Types of dewatering system	Shear equivalent(s)
belt press	0
vacuum filter	10
filter press	40
centrifuge	very variable

3. 실험

3.1 시료

(1) 화학적 슬러지 : Kaolin인공현탁액에 대하여 Jar tester로서 aluminium sulfate와 PAC(Poly Aluminium Chloride) 각각의 무기응집제를 사용하여 화학적 슬러지를 얻었다. 이때 얻어진 alum과 PAC슬러지의 농도는 각각 9g/ℓ와 10g/ℓ이다.

(2) 생물학적 슬러지 : 인천시 소재 D우유공장의 폐수처리장으로부터 채취 하였으며 농도는 약 10g/ℓ였다.

3.2 응집제

응집과 슬러지 전처리를 위해 사용된 약품은 표 2에 나타내었다.

표 2. Types of coagulant and conditioning chemicals

Coagulants		Sludge conditioning chemicals	
chemical	Used on	chemical	used on
Aluminum sulfate	10,000 mg/ℓ	SC-020	0.1% and 0.05%
PAC (Poly Aluminum Chloride)	1%	SC-050 A	〃
		SC-030	〃
		SA-307	〃
S C-020 Cationic polymer (M.W.4×10 ⁶)	500mg/ℓ	SN-557	〃
S C-050 Cationic polymer (M.W.6×10 ⁶)	〃	FeCl ₃	1000mg/ℓ
S C-030 Cationic polymer (M.W.5×10 ⁶)	〃	Ca(OH) ₂	〃
S C-107 Anionic polymer (M.W.12×12 ⁶)	〃		
S C-307 Anionic polymer (M.W.10×10 ⁶)	〃		
S C-557 Anionic polymer (M.W.12×10 ⁶)	〃		

3.3 실험장치

(1) CST장치 : 슬러지의 여과성을 간단하게 측정하는 장치로서 원리는 흡수지 한장에 의한 모세관 흡

수력의 작용하에서 소량의 슬러지 여과속도를 측정하는 것이며 사용한 여과지는 Whatman chromato No. 17로서 7cm 정방형의 크기로 잘라 사용하였다.

(2) 표준전단력 교반장치 : 슬러지의 성질조정 및 플럭의 강도 측정을 위한 장치이며, 이 기기의 교반범위는 50~3500rpm이다.

(3) 여과장치 : 슬러지의 여과 비저항 값을 측정하기 위한 장치로서 Buchner funnel장치를 개량한 것으로 표준 작동압력은 381mmHg였고 여과지는 직경 11cm인 원형의 Toyo 5C를 사용하였으며, 측정시료의 부피는 100ml이다.

3.4 실험방법

Alum과 PAC를 응집제로 사용한 슬러지와 활성슬러지를 Gale의 실험방법에 따라 5종의 유기응집제와 2종의 무기응집제로서 다음과 같이 전처리하였다.

- 250ml beaker에 100ml의 슬러지를 취한다.

- 표준전단력 교반기의 회전수를 1000rpm(1710 s⁻¹)으로 고정시키고 10sec동안 교반시키면서 20ml의 전처리 응집제를 슬러지에 가한다.

(1) CST-Stirring test

전처리된 슬러지에 대해 10, 30, 60, 80sec 씩 교반하고, 이 교반시간을 누적시켜 더함으로서 전체 교반시간은 0, 10, 40, 100, 180sec가 된다. 각각의 교반시간이 끝난 직후 끝을 자른 pipette (7mm)으로 일정용량 (8ml) 취하여 CST측정장치의 cell에 옮겨 붓고 CST 값을 측정한다.

(2) 여과 비저항 계수(α) 측정

표준전단력 교반기로서 표 1에 나타난 바와 같이 Filter press에 대한 전단등가 즉 교반속도 1000rpm으로서 40sec동안 교반시킨 후 여과장치의 funnel에 옮겨 시간에 따른 여액부피를 측정하여 식(1)로서 산출한다.

(3) 초기 침전속도

전처리된 슬러지에 대해 α 값 측정시와 동일 조건으로 교반 시킨후 200ml의 Graduated cylinder에 넣고 Hindered settling에 의한 초기 침전속도를 측정한다.

(4) 최종 침전부피

초기 침전속도의 실험조건을 그대로 유지하면서 24시간 후의 침전부피를 측정한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 CST-Stirring test

그림 2는 alum 슬러지에 대하여 양이온 고분자응집제를 각각 다른 농도로 변화 시키면서 교반에 따른 CST변화를 나타낸 것이다.

그림 2에서 점선은 고분자 응집제로 전처리하지 않은 alum슬러지의 교반에 따른 CST변화를 나타낸 것으로, 1000rpm의 교반속도로 교반하면 alum슬러지의 플러입자가 파괴되어 입자의 크기가 감소하기 때문에 CST값이 증가할 것이라고 여겨짐에도 불구하고 CST값은 거의 변화하지 않음을 보여 주고 있다.

이것은 hydroxide flocc입자의 구조가 파괴되면서 오

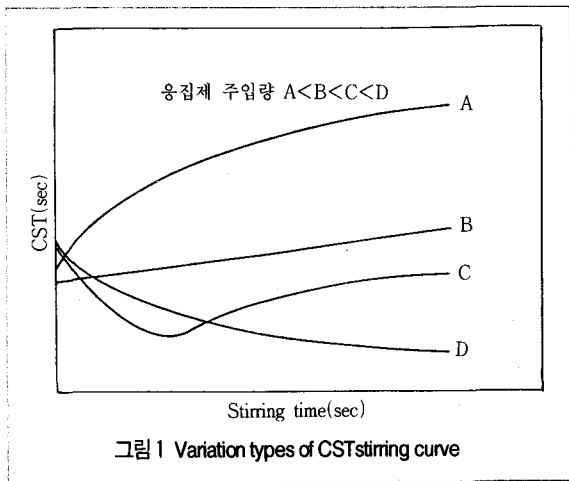


그림 1 Variation types of CSTstirring curve

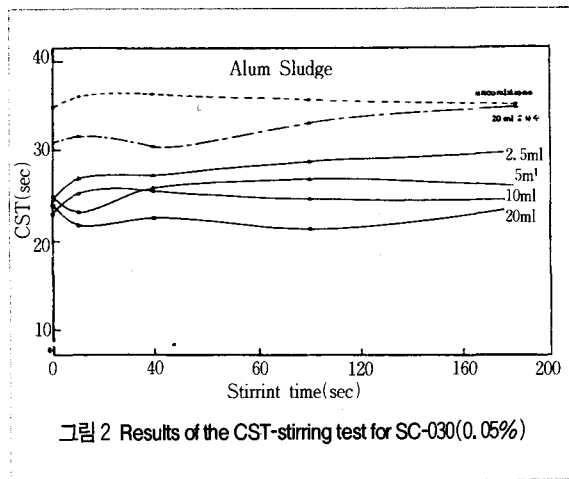


그림 2 Results of the CST-stirring test for SC-030(0.05%)

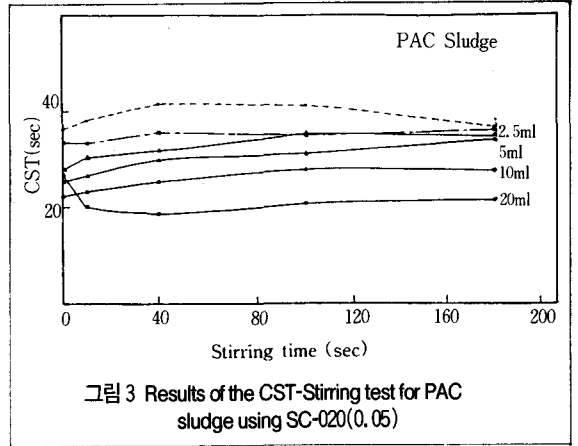


그림 3 Results of the CST-Stirring test for PAC sludge using SC-020(0.05)

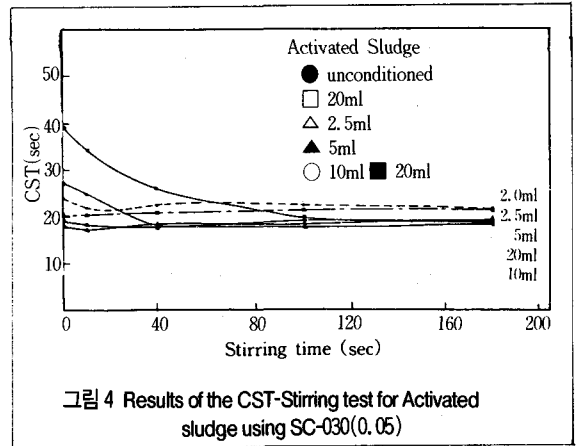


그림 4 Results of the CST-Stirring test for Activated sludge using SC-030(0.05)

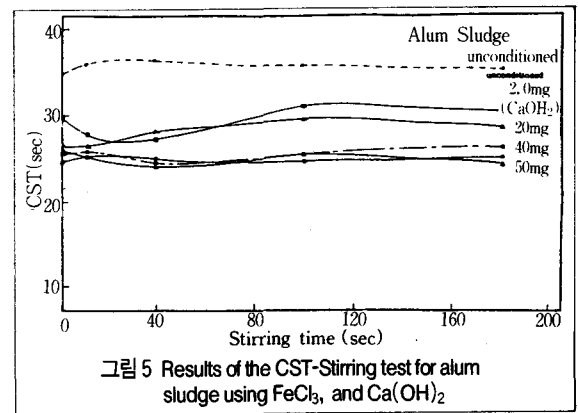


그림 5 Results of the CST-Stirring test for alum sludge using FeCl₃ and Ca(OH)₂

히려 슬러지의 농축특성이 개선될 수 있다고 한 Warden의 연구결과와 잘 일치하고 있다. 그림에서 일점쇄선은 고분자응집제의 부피와 동일하게 증류수 20ml를 이용하여 슬러지를 전처리한 결과를 나타내고 있다.

1000rpm에서 교반시간이 증가함에 따라 플럭이 파괴되어 입자의 크기가 감소함으로써 CST값이 증가하고 있다.

그림 2는 그림 1의 CST변화 모델과 유사한 경향을 나타내고 있으며 이 실험에 한정시켜 다음과 같이 평가할 수 있다. 그림 2의 경우 20ml(83.3mg / l)가 최적 주입량이라고 할 수 있다.

그림 4는 활성슬러지에 대하여 SC-030을 사용하였을 때의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 alum, PAC슬러지 CST-stirring curve 양상과는 달리 응집제의 농도변화에 따라 교반시간에 대한 CST변화가 거의 없음을 알 수 있다. 그림에서 응집제 5ml가 주입된 경우를 최적주입량이라고 결정할 수 있지만 동일한 조건에서 구한 여과 비저항값과 비교하면 10ml를 주입한 경우가 최적 주입량이 된다. 그러므로 CST-stirring curve만으로 응집제의 최적주입량을 결정하기가 어렵다.

그림 5는 alum슬러지를 무기응집제로 전처리 한 경우를 나타낸 것으로서 CST값에 거의 차이가 없다. 이 결과는 PAC와 활성슬러지에 대해서도 마찬가지였다. 이는 무기응집제로 전처리할 경우에는 CST-Stirring test에 의한 최적조건 도출은 어렵다고 할 수 있다. 결국, 고분자응집제로서 전처리 할 경우에 각 탈수장치에 대한 전단평가에서 가장 낮은 CST값이 나타나는 것을 최적조건으로 결정할 수 있다.

그러나 이러한 개념을 확고히 적용하기 위해서는 CST값이 여과 비저항값을 직접 반영해 주어야 할 것이다.

4.2 응집제 종류에 따른 각종 parameter 들간의 관계

4.2.1 고분자응집제를 사용하였을 경우

(1) 여과 비저항 계수와 CST

그림 6은 alum 슬러지에 대하여 α 값과 CST값의 관계를 나타낸 것으로서 Gale의 연구결과와 마찬가지로 선형관계에 있음을 알 수 있다. PAC슬러지의 경우는 상관관계(r)이 0.99로서 실험대상 슬러지중 가장 높은 값을 나타내었으며 활성슬러지는 다소 낮은 0.6389를 나타내었다.

(2) 여과 비저항 계수(α)와 초기 침전속도

Alum슬러지를 전처리한 결과를 표 3에 나타내었다.

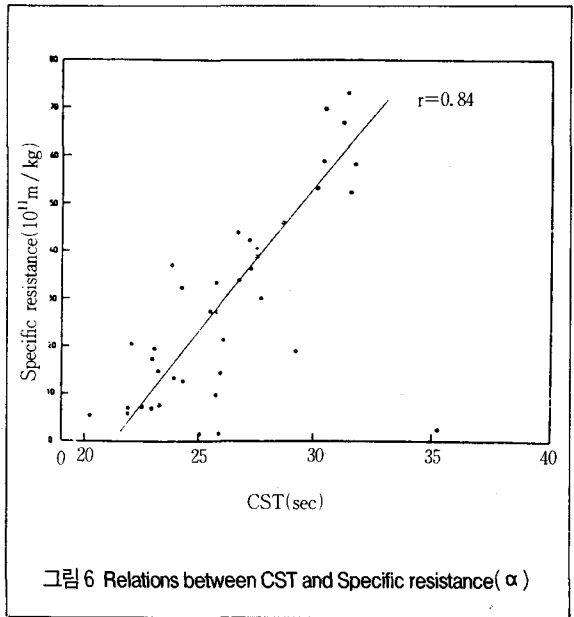


그림 6 Relations between CST and Specific resistance (α)

여기서 비저항 계수와 초기 침전속도와 관계는 α 값이 낮다고 해서 반드시 초기 침전속도가 빠른것은 아니지만 전반적인 경향을 볼 때 그와같은 관계를 따른다고 할 수 있다. 따라서 슬러지 전처리에 사용되는 응집제의 선정을 위한 예비실험으로 간단한 침전관실험이 바람직하다 하겠다.

PAC슬러지의 경우도 alum슬러지와 유사한 결과를 나타내었다. 그러나, 활성슬러지의 경우는 응집제농도의 변화에 따라 α 값의 변화가 뚜렷한데 반해 초기 침전속도의 변화가 거의 없었다. 그러므로 활성슬러지의 초기 침전속도 실험은 최적 응집제 선정에 위한 예비실험으로 부적당하다고 할 수 있다.

(3) 여과 비저항 계수(α)와 최종 침전부피

표3에서 보는 바와 같이 최종 침전부피가 적을 수록 α 값이 낮은 경향을 보임으로서 최종 침전부피를 이용하여 슬러지의 최적 전처리를 위한 응집제를 결정할 수 있다. PAC슬러지의 경우도 마찬가지이다. 그러나 활성슬러지의 경우 최종 침전부피의 변화는 거의 볼 수 없기 때문에 최종 침전부피를 통한 최적조건 결정은 어려울 것이다.

4.2.2 무기응집제를 사용한 경우

Alum, PAC, 그리고 활성슬러지를 $FeCl_3$ 와 $Ca(OH)_2$ 의 조합으로 전처리 하였을 경우 CST와 α 값과의 상

coagulant	conc (%)	dosage (ml)	40 sec stirring		
			$\alpha (\times 10^{11})$ (m/kg)	Settling rate (10^{-5} m/s)	P.S.T.* (ml)
0	0	raw	112.76	0.14	114
		20D.W.+	81.63	0.18	92
SC-020	0.1	20	3.94	176.84	64
		10	5.62	58.03	70
		5	20.23	7.87	79
		2.5	36.15	5.60	76
	0.05	20	5.46	7.53	89
		10	14.70	2.63	83
		5	33.19	0.99	77
		2.5	52.54	0.62	81
SC-030	0.1	20	2.16	2.90	90
		10	1.57	2.21	109
		5	7.54	1.52	93
		2.5	21.27	0.70	90
	0.05	20	6.93	3.45	87
		10	14.34	1.87	92
		5	27.06	1.06	92
		2.5	42.11	0.65	90
SC-050A	0.1	20	1.51	207.23	64
		10	6.71	105.69	72
		5	17.07	11.74	76
		2.5	33.86	4.70	71
	0.05	20	6.75	7.87	86
		10	19.38	2.76	81
		5	38.97	1.13	78
		2.5	58.63	0.83	81
SA-307	0.1	20	29.90	0.21	116
		10	57.63	0.21	119
		5	69.35	0.21	110
		2.5	70.59	0.21	110
	0.05	20	36.86	1.20	84
		10	45.60	0.69	85
		5	52.61	0.66	82
		2.5	66.31	0.35	89
SN-557	0.1	20	15.84	4.81	87
		10	9.51	2.86	104
		5	12.62	1.45	90
		2.5	32.40	0.87	86
	0.05	20	18.69	32.12	68
		10	10.30	10.88	78
		5	27.05	2.42	78
		2.5	43.68	1.10	74

* P.S.T.: Perfect sedimentation thickness

* D.W.: distilled water

응집제의 주입량이 증가할수록 초기 침전속도가 증가하므로 침전관 실험은 응집제의 최적주입을 제공하지 못한다. 그러나 초기침전속도의 크기는 여과비저항계수(α)를 비교적 잘 반영해주므로 여러가지 응집제를 동일한 양으로 주입하고 침전관실험을 하여 초기침전속도를 비교하면 응집제 선정을 간편하게 할 수 있음이 확인되었다.

◀ 표 3. Experimental results of alum sludge pretreatment

관관계값(r)은 각각 0.73, 0.57, 0.23으로 극히 낮은 값을 보였다. 또 α 값에 따른 초기 침전속도, 최종 침전부피 등의 변화양상은 CST-stirring결과에서와 마찬가지로 상반되는 결과를 보여주는데 무기응집제로 슬

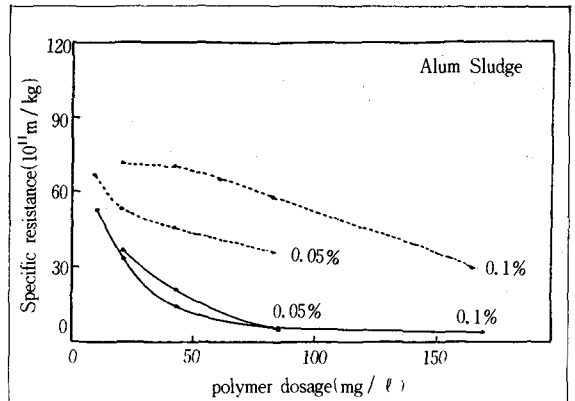
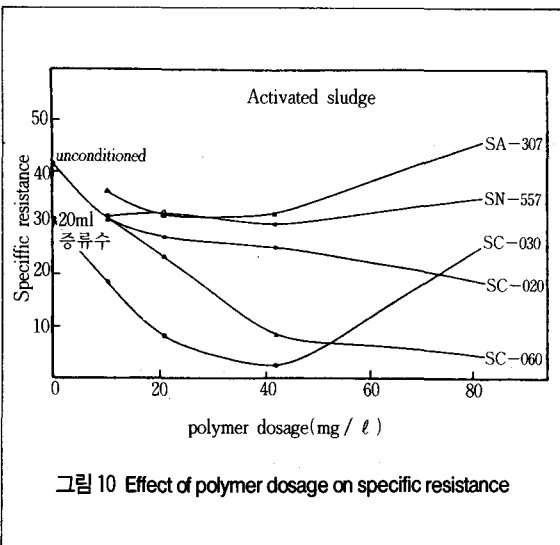
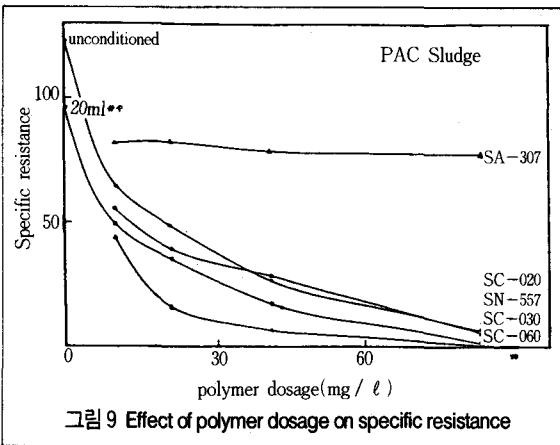
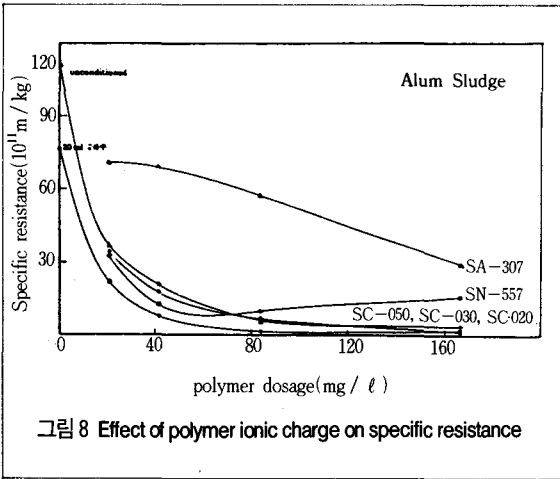


그림 7 Effect of polymer strength on specific resistance



러지를 전처리할 경우 최적탈수 전처리조건의 결정을 위한 예비실험으로서 CST, 초기 침전속도, 최종 침전부피 등의 실험을 이용한다면 큰 오류를 범할 수가 있을 것이다.

4.3 최적탈수 전처리조건에 미치는 고분자응집제의 영향

(1) 강도의 영향

농도가 각각 0.5%, 0.1%인 고분자응집제를 이용하여 alum슬러지를 전처리 하였을 경우 고분자응집제의 강도에 대한 α 값의 영향을 그림 7에 나타내었다. 그림에서 실선으로 나타난 양이온 고분자응집제의 경우 용액의 강도가 α 값에 미치는 영향이 점선으로 나타난 음이온 고분자응집제의 경우보다 작다는 것을 알 수 있었다.

그림 8은 alum슬러지에 대하여 이온성의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 음이온성 응집제는 농도변화에 따라 높은 α 값을 나타내고 있기 때문에 부적절한 응집제임을 알 수 있었으며 양이온성의 경우 종류에 관계없이 낮은 α 값을 보이므로 적절한 응집제라고 할 수 있다. 비이온성의 경우는 50 mg/l 부터 농도가 증가함에 따라 α 값이 증가함으로서 부적합한 응집제라 할 수 있다.

PAC슬러지의 경우는 그림 9에 나타내었는데 음이온성은 모두 농도에서 상당히 높은 α 값을 보이고 있으므로 부적합한 전처리 응집제라 할 수 있으며 양이온성은 농도가 증가함에 따라 비교적 낮은 α 값을 나타내므로 적합하다 할 수 있다. 활성 슬러지는 그림 10에서 보는 바와 같이 응집제의 이온성에 관계없이 농도의 변화에 따라 α 값의 변화폭이 상당히 크다.

4.4 최적 탈수 전처리 조건 결정을 위한 절차

응집제 선정 및 주입량의 최적조건을 결정하는 방법으로서 alum, PAC, 그리고 활성 슬러지를 대상으로 실험한 결과를 바탕으로 다음과 같은 절차를 설정할 수 있었다.

(1) 몇가지 응집제(4-5종)에 대해 침전관 실험을 하여 가장 느린 침전속도를 보이는 응집제는 제외시킨다.

(2) 선정된 응집제(2-3종)에 대해 주입량을 달리

하여 CST-stirring curve를 작성하고 부족량을 나타내는 주입량은 제외시킨다.

(3) CST-stirring test결과에서 100sec나 180sec에서 최소값이 나오고 그 최소값이 작을때는 주변의 주입량 중에서 범위를 더욱 축소시켜 주입량을 결정한다.

5. 결론

슬러지의 탈수 전처리에 있어서 최적조건을 결정하는데 보다 용이한 방법과 절차를 도출하고 여러가지 화학적조건에 대한 영향을 관찰하기 위한 목적으로 일련의 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) CST값과 여과 비저항계수(α)값과는 서로 선형관계가 있지만 최적조건을 결정하는데 있어서는 측정이 용이한 CST값이 여과 비저항 값(α)을 절대적으로 반영하지 못한다.

(2) 응집제의 주입량이 증가할수록 초기 침전속도가 증가하므로 침전관 실험은 응집제의 최적주입을 제공하지 못한다. 그러나 초기침전속도의 크기는 여과 비저항계수(α)를 비교적 잘 반영해주므로 여러가지 응집제를 동일한 양으로 주입하고 침전관실험을 하여 초기침전속도를 비교하면 응집제 선정을 간편하게 할 수 있음이 확인되었다.

(3) alum, PAC에 의한 화학적 슬러지 및 활성슬러지를 대상으로 전처리할 경우, 침전관 실험으로부터 몇가지 가능성 있는 응집제를 선정하고, 표준전단력 교반기와 CST장치에 의해 얻을 수 있는 CST-stirring curve의 양상과 CST값을 검토하여 최적 주입량을 결정하는 방법을 제시하였다.

참고문헌

1. Crocker, W.A. "Evaluation of Sludge Dewatering

Alternatives at a Metallurgical Refinery", J. WPCF, 54, 1417(1982)

2. 윤태일, Floc의 특성 평가에 관한 연구, 과학재단 연구보고서, 인하대학교, (1986)
3. Leeds, R.D., "Dilute Solids Laboratory Procedures", Hercules Inc., Environmental Services Div., Wilmington, Del.,(1972).
4. Thomas, C.M., "Flocculants", Filtration and Separation, 3, 211, (1966).
5. Daniels, S.L., "The Utility of Optical Parameters in Evaluation of Processes of Flocculation and Sedimentation", Chem. Eng. Prog. Symposium Series, 65, 171, (1969).
6. Clifford, H., "Principle of Surface Sculter", Technical Information Series, Hach Chemical Co., 4, (1971).
7. Swanwick, J.D., Lussignea F.W. and Baskerville R.C., Advance Water Poll. Res.(Br.) (1972).
8. Vesilind, P.A., Treatment and Disposal of Wastewater Sludge, Revised ed. Ann Arbor Science, (1971).
9. Gale, R.S. and Baskerville, R.C., "Polyelectrolytes in the Filtration of Sewage Sludges", Filtration and Separation, 7, 37, (1970).
10. Swanwick, J.D., Summary for the Use of Standard Stirring Test, Minutes from the Cost-68/2 Meeting. L, Ulmgren, Scandia Consult Int., Stockholm (1972).
11. Gale, R.S. and Niemitz, W., Communication of the European Communities, EUCCO / SP / 48 / 75, Final Report of the Management Committee, Nov (1975).
12. Warden, J.H., Filtration and Separation 18, 533, (1981) ◻

내가 버린 오염물질 순환되어 내 몸 속에