

간헐포기 소화슬러지의 개량과 탈수 특성에 관한 비교 연구

김성홍* · 최영균*** · 정태학***

*조선대학교 토목공학과

**성균관대학교 토목환경공학과

***서울대학교 지구환경시스템공학부

A Comparative Study on the Conditioning and Dewaterability of Digested Sludge from Intermittent Aerobic Digestion

Seong Hong Kim* · Young Gyun Choi*** · Tai Hak Chung***

*Department of Civil Engineering, Chosun University

**Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University

***Department of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

(Received 11 May 2004, Accepted 7 June 2004)

Abstract : Synthetic organic polyelectrolytes can be used to condition sludges to enhance their dewaterability. When conditioning biological sludges, the charge on the polymer has a significant impact on the effectiveness of the polymer as a conditioner. The objectives of this investigation were to determine the most effective type and dosage of polymer for conditioning digested sludge prior to dewatering, and to investigate the relationship between dewaterability and particle size. 3 types of digested sludge were used under the different digestion processes like anaerobic digestion, aerobic digestion and intermittent aerobic digestion. CST(capillary suction time), TTF(time-to-filter) and SRF(specific resistance to filtration) were tested as a dewaterability index and the number of particle distribution was analyzed using particle size analyzer. The results indicate that cationic polymer appears to be required for effective conditioning of these 3 types digested sludge and the optimal polymer dosage is about 0.6% of SS. CST and TTF are well correlated with mean particle diameter of which the dimension order is 1.7.

keywords : Sludge conditioning, Particle size analysis, Dewaterability, Capillary suction time, Time-to-filter, Specific resistance to filtration

1. 서 론

하수처리장에서 발생하는 슬러지는 대부분 소화공정을 거쳐 감량화, 안정화된 후 탈수처리된다. 소화공정은 혐기성소화와 호기성소화로 대별된다. 간헐포기소화는 호기성소화의 한 변형으로 포기와 비포기를 적절히 배분함으로써 알칼리도 부족에 따른 pH 저하, 포기에 따른 동력비 감소, 영양염류 제거 등의 효과를 더 얻을 수 있다(김 등, 2002). 혐기성 소화 및 호기성 소화슬러지는 탈수성이 그다지 좋지 않기 때문에 화학적 개량(conditioning)을 통해 탈수성을 크게 개선한 후 탈수하는 것이 일반적이다. 화학적 개량은 보통 분자량 1백만 이상의 고분자 응집제를 주입하는 것으로, 전하중화(charge neutralization), 가교작용(bridging) 등에 의해 슬러지 고형물 및 플러이 서로 응집됨으로써 입도는 커지고 탈수성은 개선된다.

Houghton 등(2002)은 일차 및 잉여슬러지의 혼합슬러지

에 대한 혐기성소화에서 혐기성 소화조로 유입되는 잉여슬러지의 비율이 높을수록 작은입경의 입자수가 감소한다고 하였다. Lawler 등(1986)은 적절하게 운전되는 혐기성소화 실험을 통해 비저항값과 입자의 비표면적이 잘 일치하며 또한, 혐기성 소화조가 적절하게 운전되는 경우에는 미세입자의 분해에 따라 비표면적이 감소하고 이 때문에 비저항값은 줄어들어 결국 탈수성은 좋아진다고 하였다.

Cole과 Singer(1985)는 혐기성 소화슬러지에 대한 유기고분자 응집제 주입실험을 통해 분자량 1백만 이상의 양이온계 폴리머는 탈수성 증진에 매우 효과적이며, 이온밀도(charge density)는 그다지 중요하지 않다고 하였다. 또한, 탈수성을 높이기 위해 별도로 슬러지 입자를 중화시킬 필요는 없다고 하였다.

Rebhun 등(1989)은 탈수성의 지표로 고형물 생성량(Net sludge solids yield)을 사용할 것을 제안하였다. 고형물 생성량은 단위시간, 단위필터면적당 여과되는 슬러지의 질량으로 표시되며, 비저항값과 관련이 있다. 비저항값이 슬러지 케이크의 저항을 기준으로 표시한 값인 반면 고형물 생성량은 말 그대로 고형물의 생성 속도를 기준으로 표시한

* To whom correspondence should be addressed.
choiuk@skku.edu

것이므로 특히 응집제의 최적 주입량 결정이나, 탈수여포(filter)의 효율 분석 등에 효과적이라고 하였다.

Novak과 Bandak(1989)은 상수슬러지와 하수처리장의 혐기성 소화슬러지를 대상으로 CST와 교반강도의 관계로부터 최적의 교반 조건인 G값을 제시하였다. 이들에 따르면 최적의 교반조건은 $G^3 \cdot t$ 에서 얻을 수 있으며, G의 지수인 x는 2.8에서 1.0 이하까지 변한다고 하였다.

Randall 등(1975)의 호기성소화 실험에서 탈수성에 최적인 소화온도는 35°C이며, 이보다 높은 온도에서는 비저항값이 급격히 증가하여 탈수성이 악화된다고 하였으며, Barbusinski와 Koscielniak(1997)은 호기성 소화슬러지에 대한 입도분석을 통해 소화기간이 길수록 평균입도는 점점 줄어든다고 하였다.

본 연구의 목적은 슬러지 소화 방법인 혐기성소화, 호기성소화, 간헐포기소화의 소화 방법이 다른 경우의 소화슬러지의 탈수 특성을 비교분석하고, 적절한 고분자 응집제의 종류 및 최적 주입량을 실험을 통해 제시하는 것이다. 또한, 슬러지의 입도분석 실험을 통해 입도와 탈수성의 상관성을 규명하는 것이 본 연구의 이차적인 목적이 된다.

2. 실험 재료 및 방법

본 연구에 사용된 원슬러지는 표준활성슬러지법으로 운전되는 G하수종말처리장에서 발생하는 1차 및 잉여슬러지의 혼합슬러지이다. 실험실로 반입된 슬러지는 먼저 40번체(공극크기=0.42mm)로 거른 후 수돗물을 사용하여 TS 기준 10,000mg/L 정도가 되도록 희석하여 실험실 규모의 호기성 및 간헐포기소화 반응조로 유입시켜 소화 실험을 실시하였다. 호기성 소화조는 1일 1주기로 운전되는 간헐유입 간헐배출형의 연속회분식 소화조이며, EHRT(Equivalent Hydraulic Retention Time, 등가수리학적체류시간) 기준 10일로 운전하였다. 간헐포기 소화조 역시 EHRT 10일의 1일 1주기로 운전되는 연속회분식 소화조이며, 2시간 포기-2시간 비포기를 반복함으로써 간헐포기소화가 되도록 하였다. 호기성 소화와 간헐포기 소화의 소화조는 20±4°C의 상온에서 운전되었다. 혐기성 소화슬러지는 혐기성 소화공정을 채택하고 있는 G하수처리장의 소화슬러지로서, 실험실로 반입하여 역시 40번체로 거른 후 별도의 희석을 하지 않은 슬러지이다. 탈수 실험에 사용된 슬러지의 성상을 Table 1에 표시하였다.

실험에 사용된 고분자응집제는 국내 Y사에서 시판중인 폴리아크릴아마이드 계통의 유기고분자이며, 효과적인 응집

Table 1. Characteristics of sludges used in this experiments (mg/L except pH)

Constituents	raw sludge (before digestion)	aerobic digestion sludge	intermittent aerobic digestion sludge	anaerobic digestion sludge
pH	6.0	4.9	6.8	7.3
Alkalinity (as CaCO ₃)	295	10	30	2,270
TS	9,800	10,800	10,400	14,400
VS	7,300	7,900	7,300	8,900
TSS	9,400	9,300	9,800	13,600
VSS	7,000	7,100	7,000	7,800
SCOD	1,700	420	220	860

제의 종류 및 주입율을 파악하기 위해 양이온계, 비이온계, 음이온계의 3종류의 응집제를 선정하였다. 응집제의 특성을 Table 2에 표시하였다.

슬러지에 주입할 응집제는 과립상으로 물에 용해시켜 1,000mg/L로 제조하여 사용하였으며, 응집제 주입량은 슬러지의 SS 기준량 당 %로 나타내었다. 탈수성의 지표로서 CST(Capillary suction time), TTF(Time-to-Filter), SRF(Specific resistance to filtration)의 3가지를 측정하였다. CST와 TTF는 Standard Methods(APHA, AWWA and WEF, 1992)에 따랐으며, 각 시료에 대하여 CST는 5회 측정 후 최대값과 최소값을 제외한 나머지 3개의 값을 산술 평균하였고, TTF는 3회 측정 후 산술평균값을 취하였다. SRF는 Lawler 등(1986)의 방법에 따랐으며, 직경 9cm의 Buchner funnel과 Whatman No. 1 종이필터를 사용하였고, 흡입압력은 38cmHg이었다. 응집제 주입에 따른 탈수성과 슬러지 입경과의 상관관계를 분석하기 위해 입도분석을 실시하였으며, Particle Sizing Systems사의 ACCUSIZER 780을 사용하였다. 입도분석은 0.5µm~400µm 범위에서 128채널을 사용하였는데, 각 채널의 폭은 log 단위 등간격으로 조정하였으므로 작은 입자 부분은 채널 폭이 작고(최소 0.03µm) 큰 입자 부분은 채널 폭이 크게(최대 17.3µm) 구분되었다.

3. 결과 및 고찰

원슬러지와 3 종류의 소화슬러지를 대상으로 적절한 응집제의 종류를 선정하기 위해 양이온계, 비이온계, 음이온계 응집제를 주입한 후 CST 등의 탈수성 지표를 측정하였다. 예로서, 간헐포기 소화슬러지에 대하여 3종류의 다른

Table 2. Basic properties of the polymers used in sludge conditioning

Polymer	Charge type	Charge density	Viscosity (centipoise) 0.2%	pH	Apparent specific weight	Molecular weight (million)
C-410P	cationic	strong	170~220	4~7	0.6~0.8	5
N-100P	nonionic	-	40~80	6~8	0.6~0.8	12
A-331P	anionic	strong	200~270	6~8	0.7~0.9	15

응집제를 각각 주입하였을 때의 CST 변화를 Fig. 1에 표시하였다. CST는 슬러지로부터 물이 용출되는 속도를 시간(초)으로 표시하는 것으로서 비이온계인 N-100P나 음이온계인 A-331P를 주입했을 때는 오히려 CST값이 증가하여 탈수성이 악화되는 것으로 나타났으나, 양이온계인 C-410P를 주입했을 때는 탈수성이 현저히 개선되는 것을 알 수 있다. 비이온계나 음이온계 응집제가 오히려 탈수성을 악화시키고, 양이온계 응집제 만이 탈수성이 개선되는 이러한 현상은 원슬러지나 호기성 슬러지, 혐기성 슬러지에서 모두 나타나 소화 전후 혹은 소화 방법에 따른 적절한 응집제의 종류는 차이가 없게 나타났다. 이는 소화슬러지는 대부분 음전하(-)를 띠고 있고, 제타전위가 -10mV~30mV (Mikkelsen and Keiding, 2002; Lee and Liu, 2000) 정도이기 때문에 비이온계 혹은 음이온계 응집제를 주입하면 전하중화 효과가 없거나 혹은 더 악화되어 입자의 응집을 기대할 수 없기 때문으로 판단된다.

원슬러지와 3 종류의 소화슬러지에 대한 양이온계 응집제 주입율에 따른 CST 변화를 Fig. 2에 함께 표시하였다. 응집제 주입이 없는 경우의 CST값은 슬러지마다 다소 차이를 보였는데, 원슬러지와 혐기성 소화슬러지에서 가장 큰 값을 보여 각각 333초, 337초로 나타났고, 호기성 소화슬러지가 그 다음으로 189초를 보였다. 간헐포기 소화슬러지는 117초로서 가장 작은 CST 값을 보였다. CST값이 최소가 되는 최적 응집제 주입율은 슬러지 종류별로 약간씩 차이가 있었는데, 간헐포기 소화슬러지는 0.4%, 원슬러지와 혐기성 소화슬러지는 0.6%, 호기성 소화슬러지는 0.8%로 나타났다. 또한, 슬러지의 종류에 관계없이 최적 주입율 이상으로 응집제를 투여하는 경우는 과잉주입현상(overdosing)이 나타나 탈수성은 악화되었다.

TTF는 흡입여과시험에서 여과액이 100mL가 될 때까지 걸리는 시간으로 CST와 마찬가지로 시간(초)으로 표시한다. 실험 결과 응집제를 주입하지 않은 경우의 TTF값은 원슬러지와 3 종류의 소화슬러지 모두에서 1시간 이상으로 매우 크게 나타났고 4시간 이상인 경우(원슬러지)도 있었다. 양이온계 고분자응집제 주입에 따른 원슬러지와 소화슬러지의 TTF 변화를 Fig. 3에 함께 표시하였다. 응집제 주입량에 비례하여 TTF값은 급속히 감소하여 원슬러지는 응집제 주입율이 1.0%일 때 최소값 20초를 보였고, 호기성 슬러지, 간헐포기 소화슬러지, 혐기성 소화슬러지는 주입율 0.6%일 때 최소값 24~41초 정도를 보였다. TTF 실험 결과 역시 최적 주입율 이상으로 응집제를 주입한 경우에는 과잉주입현상이 나타났다.

음이온계 응집제나 비이온계 응집제를 주입한 경우의 TTF 실험에서는 여지폐색(clogging)이 심하게 일어나 대부분의 시료에서 여과액 부피 대략 20mL 이후에는 여과시간이 지속되어도 여과액이 더 이상 증가하지 않아 TTF값을 구할 수 없었다. SRF나 TTF 실험에서 여지의 폐색으로 인해 결과가 부정확하거나 혹은 실험 자체가 불가능하게 되는 이유로서 Zhao 등(1998)은 슬러지 미세입자에 의한 여지 공극 및 슬러지 케이크 모세관의 막힘이나, 경우에 따

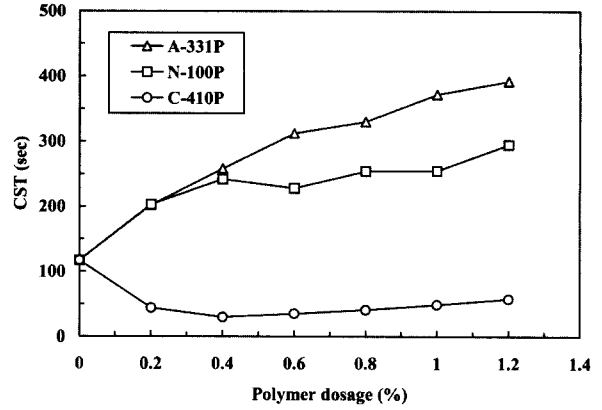


Fig. 1. CST changes with polymer dose for the conditioning of digested sludge from intermittent aerobic digestion.

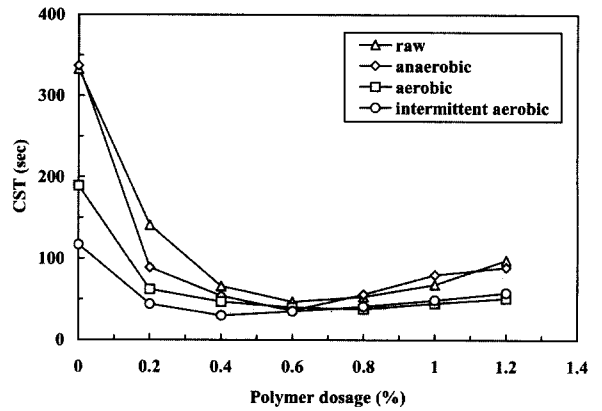


Fig. 2. CST changes with cationic polymer dose for the conditioning of digested sludge from different digestion processes.

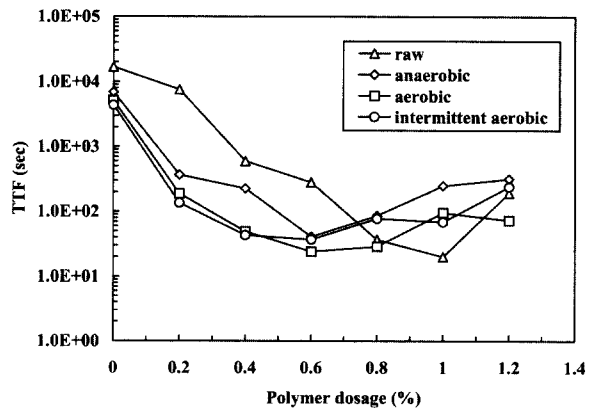


Fig. 3. TTF changes with cationic polymer dose for the conditioning of digested sludge from different digestion processes.

라서는 과잉주입된 고분자응집제 자체가 여지의 폐색에 영향을 미치기 때문이라고 하였다.

양이온계 응집제 주입에 따른 슬러지의 SRF값을 Table 3에 표시하였다. 응집제를 주입하지 않은 경우의 SRF값은 원슬러지에서 3.55×10^{14} m/kg으로 가장 크게 나타났고, 간

헤파기슬러지에서 9.20×10^{13} m/kg으로 가장 작게 나타났다. 양이온계 응집제를 주입함에 따라 SRF값은 각각 감소하였으며, 최적의 응집제 주입을 근처에서는 SRF를 계산할 수 없었고, 과잉주입현상이 일어나 다소 탈수성이 악화되는 구간에서 다시 SRF값이 약간 상승하는 결과를 보였다. SRF를 계산할 수 없었던 이유는 다음과 같다.

Table 3. SRF test results

Cationic polymer addition rate (%)	SRF (10^{12} m/kg)			
	raw sludge (before digestion)	aerobic digestion sludge	intermittent aerobic digestion sludge	anaerobic digestion sludge
0.0	355	184	92.0	144
0.2	102	6.34	5.83	18.4
0.4	-	2.01	-	-
0.6	-	-	-	-
0.8	-	-	-	-
1.0	1.93	1.12	-	2.12
1.2	1.93	4.61	0.612	2.63

SRF 계산식은 다음 식 (1)과 같다(Lawler 등, 1986).

$$r = \frac{20PA^2b}{\mu w} \quad (1)$$

- 여기에서 P = 흡입압력; (Pa)
- A = Whatman #1 여과지 면적; (cm^2)
- μ = 점도; (Pa · sec)
- w = 여과액 단위체적 당 필터케이크의 고형물량; (g/cm^3)
- r = 비저항; (m/kg)이다.

b값은 sec/cm^6 의 단위를 가지며, 여과액 부피(V)와 경과 시간(θ)을 측정하여 V와 θ/V 의 관계에서 선형을 나타내는 구간의 기울기로 정의된다. 그런데 유효한 응집제에 의해 슬러지가 잘 응집되고 탈수성이 크게 개선된 경우에는 여과 시간에 정비례하여 여과액이 증가하였다. 이 때 θ/V 와 V의 기울기로서 계산되는 b값은 0으로 산출되게 되고 식 (1)에 따라 비저항값 역시 0으로 계산되게 된다. 이것은 마치 고형물이 없는 물을 대상으로 탈수성 실험을 했을 때와 같은 결과이다.

혐기성 소화슬러지에 비이온계 응집제와 음이온계 응집제를 0.4% 비율로 주입한 경우의 SRF 값은 모두 1.96×10^{14} m/kg으로 나타나 응집제를 주입하지 않았을 때의 SRF 값 1.44×10^{14} m/kg보다 더 높았다.

응집제를 주입하지 않은 경우 소화 방법별 탈수성을 비교해 보면, CST값은 소화전 슬러지와 혐기성 소화슬러지가 거의 비슷한 값으로 가장 높게 나타났고, 호기성 소화슬러지, 간헐포기 소화슬러지 순이었다. TTF나 SRF 역시 소화 이전이나 혐기성 소화슬러지에 비해 호기성 혹은 간헐포기

소화슬러지가 낮게 측정되었다. 따라서, 슬러지를 소화함으로써 탈수성은 개선되며, 일반적인 혐기성 소화보다 오히려 호기성소화나 간헐포기소화가 탈수성 개선에는 더 효과적임을 알 수 있다. 그러나 실제 처리장에서는 응집제 주입 등의 방법으로 슬러지를 개량한 후 탈수하는 것이 보통이므로 소화슬러지 자체의 탈수성 비교는 그다지 큰 의미는 없을 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 최적 응집제 주입량은 소화 방법별로 약간씩 차이는 있다. 그러나 최적 주입의 조건에서는 CST는 30~38초, TTF는 24~41초 정도로 큰 차이는 없었다.

간헐포기슬러지를 대상으로 양이온계 응집제 주입에 따른 입도변화를 알아보기 위해 입도분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 4에 표시하였다. Fig. 4를 보면 응집제를 주입하지 않은 경우(0.0%)에는 $10\mu m$ 이하의 미세입자가 대단히 많이 분포하나 응집제를 0.4% 주입한 경우에는 $10\mu m$ 이하의 입자수는 거의 10^3 분의 1 이하로 크게 줄어드는 반면 $70\mu m$ 이상의 입자수는 증가함을 알 수 있다. 응집제 주입율이 더욱 증가하여 0.8% (혹은 1.2%)인 경우는 $100\mu m$ 이상인 입자수가 크게 증가하였고, $400\mu m$ 이상이 되는 입자수도 180개/ml 이상으로 분석되었다.

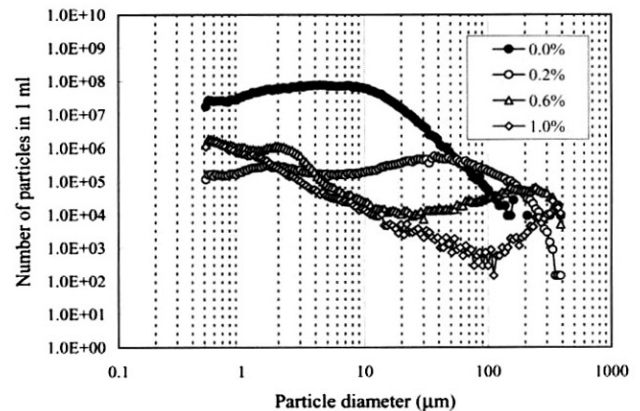


Fig. 4. Particle distribution changes with cationic polymer dose for the conditioning of digested sludge from intermittent aerobic digestion.

탈수성과 입도와의 상관관계를 분석하기 위해 다음과 같이 고찰하였다. 슬러지의 평균입경을 산출하는 것에는 여러 가지 방법이 있다. 가장 쉽고 혼한 방법은 식 (2)와 같은 개수가중평균입경이 있으며, 이외에도 식 (3)~(5)와 같이 길이가중평균, 면적가중평균, 체적가중평균 등이 있다(Particle Sizing Systems, 2001).

$$D^N = \frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (\text{Number-wt. mean}) \quad (2)$$

$$D^L = \frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i \cdot D_i}{\sum_{i=1}^n N_i D_i} \quad (\text{Length-wt. mean}) \quad (3)$$

$$D^A = \frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i^2 \cdot D_i}{\sum_{i=1}^n N_i D_i^2} \quad (\text{Area-wt. mean}) \quad (4)$$

$$D^V = \frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i^3 \cdot D_i}{\sum_{i=1}^n N_i D_i^3} \quad (\text{Volume-wt. mean}) \quad (5)$$

D^N = number weighted mean particle diameter

D^L = length weighted mean particle diameter

D^A = area weighted mean particle diameter

D^V = volume weighted mean particle diameter

n = number of channels ($n = 128$ in this experiments)

N_i = number of particles in channel i with diameter D_i

D_i = diameter of channel i (use geometrical average channel diameter)

그러나 위와 같은 여러 가지의 평균입경과, 탈수성의 지표 중 하나인 CST의 상관관계를 구해보면 결정계수(r^2)값이 모두 0.5 이하로서 매우 낮게 나타났다. 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 실수차원의 가중평균을 구하였다 즉, 실수인 k 차원의 가중평균입경을 가정하여 식 (6)과 같이 전개하고 k 의 변화에 따른 가중평균입경과 CST를 회귀분석하고, 결정계수값이 가장 크게 되는 k 를 도출하였다. k 의 변화에 따른 결정계수값의 변화는 Fig. 5와 같다. 즉, 결정계수값이 최대가 되는 k 는 1.68일 때이며, 이 때의 결정계수는 0.890이 된다. 같은 방법으로 $\ln(\text{TTF})$ 와 k 의 변화에 따른 평균입경의 회귀분석시 결정계수값을 구해보면 결정계수가 최대가 되는 k 는 1.71일 때이고 이 때 결정계수는 0.952이다.

$$D^k = \frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i^{k-1} \cdot D_i}{\sum_{i=1}^n N_i D_i^{k-1}} \quad (k\text{-th order mean}) \quad (6)$$

D^k = k -th order mean particle diameter

이는 탈수성의 지표인 CST와 TTF를 기준으로 볼 때 슬러지의 평균입경은 개수가중평균(즉, $k=1$)과 길이가중평균(즉, $k=2$)의 사이에 존재하는 것을 의미한다. k 가 1.7 일 때, 양이온계 응집제 주입량에 따른 가중평균입경을 Fig. 6에 표시하였고, 가중평균입경과 CST의 관계 및 가중평균입경과 TTF의 관계를 Fig. 7에 표시하였다. 평균입경은 응집제를 주입하지 않은 경우에는 약 $10\mu\text{m}$ 정도이지만 응집제 주입량이 0.6%일 때까지 증가하여 약 $100\mu\text{m}$ 가 되며, 이 보다 주입량이 증가하면 오히려 평균입경은 감소한다. 또한,

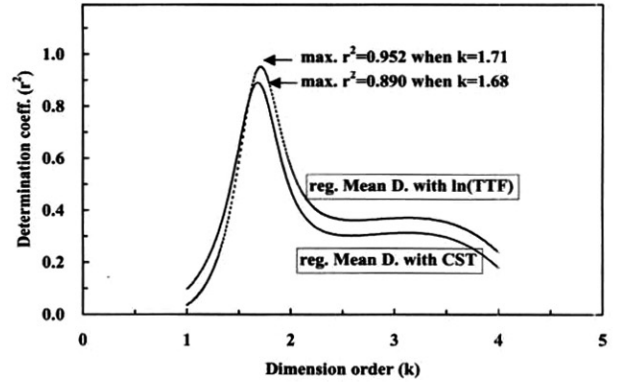


Fig. 5. Determination coefficient(r^2) when the dimension order(k) changes from 1.0 to 4.0(regression between weighted mean and CST, weighted mean and $\ln(\text{TTF})$).

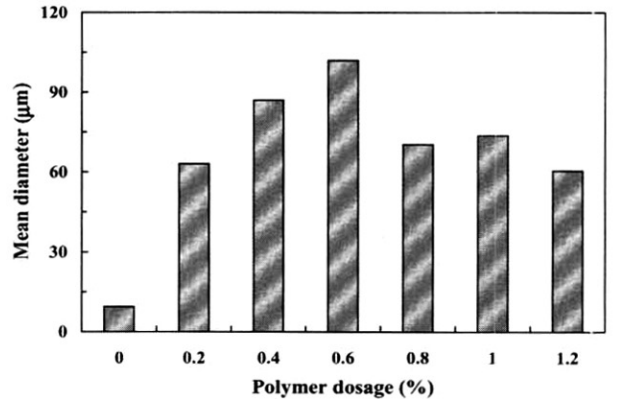


Fig. 6. Mean particle diameter according to cationic polymer dosage (when the dimension order is 1.7).

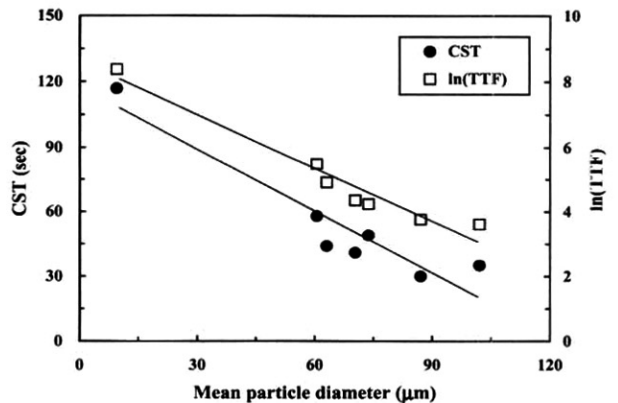


Fig. 7. Relationship between 1.7 order mean particle diameter and CST, TTF.

1.7차원의 가중평균입경과 CST 및 $\ln(\text{TTF})$ 는 부(-)의 상관관계가 있어 평균입경이 증가할수록 CST와 TTF는 감소하여 탈수성은 향상됨을 알 수 있다.

4. 결론

하수처리장에서 발생하는 슬러지를 여러 방법으로 소화

한 소화슬러지를 대상으로 유기고분자 응집제를 이용한 응집 및 탈수성 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

응집제를 주입하지 않은 경우 소화 이전이나 혐기성 소화를 한 경우보다 호기성 소화나 간헐포기 소화한 경우에 탈수성은 더 양호하다. 그러나, 양이온계 유기응집제를 최적 주입율로 주입한 경우 탈수성은 소화 방법에 따라 큰 차이는 없다.

플리머를 사용하여 슬러지를 개량하는 경우 탈수성 개선에는 양이온계 응집제가 효과적이며, 비이온계 혹은 음이온계 응집제는 오히려 탈수성이 악화된다. TTF를 탈수성 지표로 보았을 때 최적의 양이온계 응집제 주입량은 슬러지 소화 방법에 따라 큰 차이는 없이 슬러지 SS 기준 0.6% 정도이며, CST를 탈수성 지표로 보았을 때는 0.4~0.8%로 다소 차이가 있다. 또한, 최적의 주입량 이상을 주입하는 경우 과주입현상이 일어난다.

탈수성의 지표인 CST와 TTF는 평균입도와 부(-)의 상관성을 보여 평균입도가 증가하면 CST값이나 TTF값은 감소하여 결과적으로 탈수성은 증대된다. 또한, 간헐포기 소화 슬러지를 개량하고 평균입경의 변화를 산출할 때 가중차수는 1.7 정도가 적합하다.

사 사

본 연구는 2002년도 조선대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 김성홍, 김희준, 정태학, 간헐포기에 의한 슬러지의 호기성 소화 기술, *대한토목학회논문집*, **22**(2-B), pp. 245-252 (2002).
2. Anne I. Cole and Philip C. Singer, Conditioning of anaerobically digested sludge, *Journal of Environmental Engineering, American Society of Civil Engineering*, **111**(4), pp. 501-509 (1985).
3. C. H. Lee and J. C. Liu, Enhanced sludge dewatering by dual polyelectrolytes conditioning, *Water Research*, **34**(18), pp. 4430-4436 (2000).
4. C.W. Randall, B. Richards and P.H. King, Temperature effects on aerobic digestion kinetics, *Journal of Environmental Engineering, American Society of Civil Engineering*, **101**(EE5), pp. 795-811 (1975).
5. Desmond F. Lawler, Yoon Jin Chung, Shiaw-Jy Hwang and Barbara A. Hull, Anaerobic digestion: Effects on particle size and dewaterability, *Journal Water Pollution Control Federation*, **58**(12), pp. 1107-1117 (1986).
6. Jennifer I. Houghton, Joanna E. Burgess and Tom Stephenson, Off-line particle size analysis of digested sludge, *Water Research*, **36**, pp. 4643-4647 (2002).
7. John T. Novak and Nazih Bandak, Chemical conditioning and the resistance of sludges to shear, *Journal Water Pollution Control Federation*, **61**(3), pp. 327-332 (1989).
8. K. Barbusinski and H. Koscielniak, Activated sludge floc structure during aerobic digestion, *Water Science and Technology*, **36**(11), pp. 107-114 (1997).
9. L. H. Mikkelsen and K. Keiding, Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications of dewatering, *Water Research*, **36**, pp. 2451-2462 (2002).
10. M. Rebhun, J. Zall and N. Galil, Net sludge solids yield as an expression of filterability for conditioner optimization, *Journal Water Pollution Control Federation*, **61**(1), pp. 52-54 (1989).
11. Particle Sizing Systems, *ACCUSIZER MODEL 780 - USER MANUAL*, Particle Sizing Systems, Santa Barbara, CA, U.S.A, pp. 117-119 (2001).
12. APHA, AWWA and WEF, *Standard Methods - for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed., Washington DC, USA, pp. 2_68-2_70 (1992).
13. Y. Q. Zhao, E. N. Papavasiliopoulos and D. H. Bache, Clogging of filter medium by excess polymer during alum sludge filtration, *Filtration & Separation*, **December**, pp. 947-950 (1998).