

## 간헐포기 소화 슬러지의 고분자 응집제에 의한 개량과 입도 분포 변화에 관한 연구

김희준 · 김성홍\* · 최재성\*

서울대학교 지구환경시스템공학부, \*조선대학교 토목공학과

## A Study on the Conditioning with Polymer and the Particle Size Distribution of Intermittent Aerobic Digestion Sludge

Hee Jun Kim · Seong Hong Kim\* · Jae Seong Choi\*

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

*\*Department of Civil Engineering, Chosun University*

(Received July 6, 2004; Accepted August 1, 2004)

### ABSTRACT

Synthetic organic polyelectrolytes can be used to condition sludges to enhance their dewaterability. Intermittent aerobic digestion is a useful digestion technology and has many advantages like neutral pH, low installation cost and easiness to operation. The objectives of this study were to investigate the dewaterability of intermittent aerobic digestion sludge and to find the relationship between dewaterability and particle size distribution change under the conditioning of intermittent aerobic digestion sludge by cationic polyelectrolyte. Digested sludge from intermittent aerobic digestion was used and cationic polyacrylamide polymer was added as a conditioner. CST(capillary suction time), TTF(time-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 polyelectrolytes is useful to enhance dewaterability of intermittent aerobic digestion sludge. Mean particle diameter was increased as polymer dosage increased and its value was reached up to 100  $\mu\text{m}$  on the condition of optimal cationic polymer dosage. CST and TTF are well correlated with mean particle diameter when the weighting order is 1.7. By the optimal conditioning with cationic polymer, particles in the filtrate are also reduced significantly and this means that conditioning is helpful to main stream by reducing SS loading from return flow.

**Keywords:** Intermittent aerobic digestion, Particle size distribution, Conditioning, Dewaterability, Polymer

### I. 서 론

하수처리장에서 발생하는 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 플러키 서로 응집되므로써 입도는 커지고 탈수성은 개선된다<sup>1)</sup>.

슬러지의 탈수성에 영향을 미치는 인자는 슬러지의

종류 또는 소화 방법, 온도, 고형물 함량, 슬러지 침도, 표면전하분포, 입도분포 등 매우 많으며,<sup>2)</sup> 그 중에서도 입도와 탈수성의 관계는 많은 연구자들에 의해 검토되고 보고되었다. Houghton 등<sup>3)</sup>은 일차 및 잉여슬러지의 혼합슬러지에 대한 혐기성소화에서 혐기성 소화조로 유입되는 잉여슬러지의 비율이 높을수록 작은 입경의 입자수가 감소한다고 하였다. Lawler 등<sup>4)</sup>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. Barbusinski와 Koscielniak<sup>5)</sup>은 호기성 소화슬러지에 대한 입도분석을 통해 소화기간이 길수록 평균입도는 점점 줄어든다고 하였다. 이와

<sup>1)</sup>Corresponding author : Department of Civil Engineering, Chosun University  
Tel: 82-62-230-7079, Fax: 82-62-230-7083  
E-mail: gochamp@chosun.ac.kr

같은 기존 연구들을 종합해 볼 때 유기 응집제 주입에 의한 응집은 슬러지 표면의 제타포텐셜(zeta potential)을 감소시키고, 슬러지 입자간 응결을 촉진하여 플럭화하는 과정이며, 이 때문에 슬러지의 평균입경은 증가하는 것이다. 소화공정은 크게 혐기성소화와 호기성소화로 대별된다. 간헐포기소화는 호기성소화의 한 변법으로 포기와 비포기를 적절히 배분함으로써 알칼리도 부족에 따른 pH 저하 방지, 포기에 따른 동력비 감소, 영양염류 제거 등의 효과를 더 얻을 수 있다. 간헐포기에 의한 슬러지 소화에서 고형물 감소 동력학, 영양염류 제거 효과, 운전 인자 등은 많이 보고되었으나<sup>6,7)</sup> 아직까지 간헐포기 소화된 슬러지의 화학적 개량이나 입도 분포 및 변화, 탈수성 등에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 간헐포기 소화슬러지의 후처리 단계에서 이루어지는 개량 및 탈수에 관한 것으로서, 연구 목적은 유기 응집제 주입율에 따른 탈수성 변화를 파악하고, 슬러지의 입도분석을 실시하여 입도와 탈수성의 상관성을 규명하는 것이다.

## II. 실험 재료 및 방법

본 연구에 사용된 슬러지는 표준활성슬러지법으로 운전되는 G하수종말처리장에서 발생하는 1차 및 잉여슬러지의 혼합 농축슬러지이다. 실험실로 반입된 슬러지는 먼저 40번체(공극크기=0.42 mm)로 거른 후 수돗물을 사용하여 희석하여 실험실 규모의 간헐포기소화 반

**Table 1.** Characteristics of sludges used in this experiments

Constituents	Raw sludge (before digestion)	Digested sludge
pH	6.0	6.8
Alkalinity (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	295	30
TS (mg/l)	9,800	10,400
VS (mg/l)	7,300	7,300
TSS (mg/l)	9,400	9,800
VSS (mg/l)	7,000	7,000
SCOD (mg/l)	1,700	220

**Table 2.** Basic properties of the polymer used in sludge conditioning

Polymer	Charge type	Charge density	Viscosity (Centipose) 0.2%	pH	Apparent specific weight	Molecular weight (million)	Addition rate
C-410P	cationic	strong	170~220	4~7	0.6~0.8	5	0.0~1.2%

응조로 유입시켜 소화 실험을 실시하였다. 간헐포기 소화조는 EHRT(Equivalent Hydraulic Retention Time, 등가수리학적체류시간) 10일의 1일 1주기로 운전되는 연속회분식 소화조이며, 2시간 포기-2시간 비포기를 반복함으로써 간헐포기소화가 되도록 하였다. 소화조는 20±4°C의 상온에서 운전되었다. 탈수 실험에 사용된 소화슬러지는 소화 전 후의 탈수성 변화를 비교하기 위해 인위적으로 상징액을 일부 버리고 원슬러지의 고형물 농도와 비슷하게 맞춘 것으로서, 사용된 슬러지의 성상을 Table 1에 표시하였다. 실험에 사용된 고분자응집제는 국내 Y사에서 시판중인 폴리아크릴아마이드 계통의 유기고분자이며, 양이온계, 비이온계, 음이온계의 3종류의 응집제를 선정하여 예비실험을 실시한 결과 비이온계와 음이온계 응집제는 응집효과가 없거나 혹은 탈수성이 더 악화되는 결과를 보였으므로 응집 및 탈수성 개선에 효과적인 양이온계 응집제를 사용하였다. 사용된 양이온계 응집제의 성상 및 주입율을 Table 2에 표시하였다.

슬러지에 주입할 응집제는 과립상으로서 물에 용해시켜 1,000 mg/l로 제조하여 사용하였다. 응집제 주입량은 슬러지의 SS 기준량 당 %로 나타내었고, 주입율은 0.0~1.2%까지 변화시켰다. 탈수성의 지표로서 CST(Capillary Suction Time)와 TTF(Time to Filtration)를 측정하였으며 분석 방법은 Standard Methods<sup>8)</sup>에 따랐다. 또한, 응집제 주입에 따른 탈수성과 슬러지 입경과의 상관관계를 분석하기 위해 입도분석을 실시하였는데, 입도분석은 Particle Sizing Systems사의 ACCUSIZER 780을 사용하였다. 입도분석 범위는 최소 0.5 µm에서 최대 400 µm까지이며, 128채널을 사용하였다. 각 채널의 폭은 로그 단위 등간격으로 설정하였으므로 작은 입자 부분은 채널 폭이 작고(최소 0.03 µm) 큰 입자 부분은 채널 폭이 크게(최대 17.3 µm) 구분되었다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 소화슬러지의 탈수성

간헐포기 소화슬러지를 대상으로 양이온계 유기 고분자 응집제인 C-410P를 주입한 후 탈수성 지표인 CST

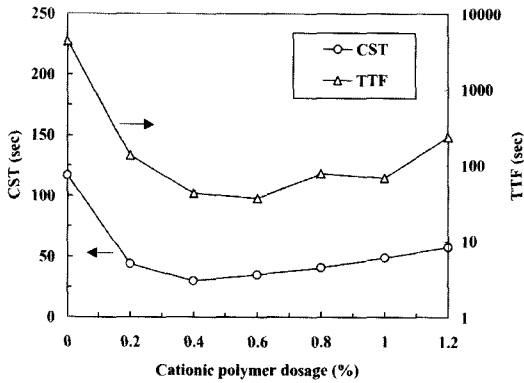


Fig. 1. Dewaterability(CST, TTF) changes with polymer dose for the conditioning of intermittent aerobic digestion sludge.

와 TTF의 변화를 Fig. 1에 표시하였다. CST는 슬러지로부터 물이 용출되는 속도를 시간(초)으로 표시하는 것으로서, TTF 값과 마찬가지로 값이 클수록 탈수성은 더 나쁜 것을 의미한다. 실험 결과 응집제를 주입하지 않은 경우에는 CST 값이 100초 이상으로 탈수성은 매우 좋지 않지만, C-410P를 주입했을 때는 CST 값이 감소하고 탈수성이 현저히 개선되는 것을 알 수 있다. CST가 최저가 되는 최적 응집제 주입율은 슬러지의 SS 기준 0.4%일 때였고, 이 때의 CST는 30초로서 타 소화공정인 혐기성 소화나 호기성 소화의 소화슬러지 개량시와 비슷한 수준이었다. TTF는 흡입여과시험에서 여과액이 100ml가 될 때까지 걸리는 시간으로 CST와 마찬가지로 시간(초)로서 표시한다. 특히, TTF는 응집제의 주입이 없는 경우는 1시간 이상으로 매우 길게 측정되었으나, 응집제 주입에 따라 급격한 감소를 보여 최적 주입율인 0.6%에서는 37초 정도로 측정되었다.

이와 같이 양이온계 유기 응집제를 주입할 때 응집이 잘 이루어지고 탈수성이 개선되는 것은 소화슬러지는 대부분 음(-)전하를 띠고 있고, 제타전위가  $-10\text{ mV} \sim -30\text{ mV}^{(12)}$  정도이기 때문에 비이온계 혹은 음이온계 응집제를 주입하면 전하중화 효과가 없거나 혹은 더 악화되어 입자의 응집을 기대할 수 없지만, 양이온계 응집제 주입에 따라 전하중화 반응으로 제타전위가 0 근처로 감소하므로써 입자간 플러킹 형성이 가능해지기 때문이다. 또한, 실험결과 CST 값 또는 TTF 값이 최저가 되는 양이온계 응집제 최적 주입율은 SS 기준 0.4~0.6% 정도일 때이며, 응집제 주입율이 이 보다 높으면 과주입현상(overdosing)이 나타나 오히려 탈수성이 악화되는 것으로 나타났다.

간헐포기슬러지를 대상으로 양이온계 응집제 주입에

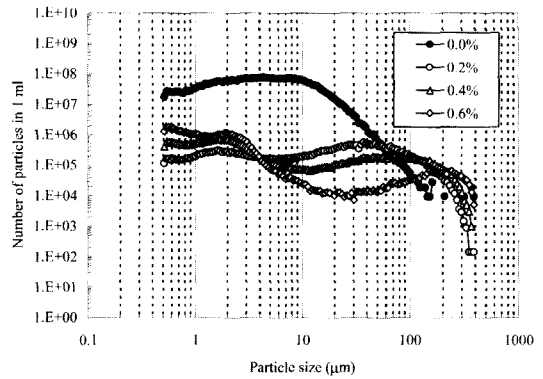


Fig. 2. Particle distribution changes with cationic polymer dose (0.0-0.6%).

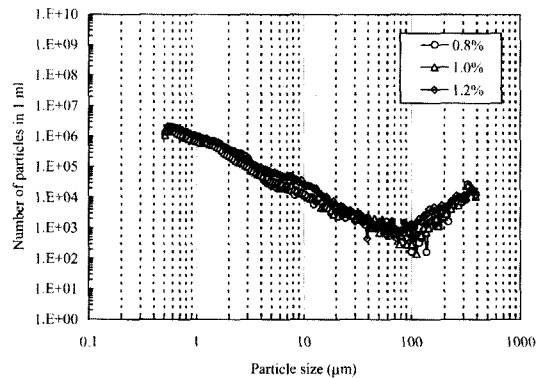


Fig. 3. Particle distribution changes with cationic polymer dose (0.8~1.2%).

따른 입도변화를 알아보기 위해 입도분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 표시하였다. Fig. 2를 보면 응집제를 주입하지 않은 경우(raw)에는  $10\text{ }\mu\text{m}$  이하의 미세입자가 대단히 많게 분포하나, 응집제를 0.4% 주입한 경우에는  $10\text{ }\mu\text{m}$  이하의 입자수는 거의 분의 1 이하로 크게 줄어드는 반면  $70\text{ }\mu\text{m}$  이상의 입자수는 증가함을 알 수 있다. 응집제 주입율이 더욱 증가하여 0.8%(혹은 1.2%)인 경우(Fig. 3)는  $100\text{ }\mu\text{m}$  이상인 입자수가 크게 증가하였고,  $400\text{ }\mu\text{m}$  이상이 되는 입자수도  $180\text{ 개/ml}$  이상으로 분석되었다.

2. 탈수성과 입도분포

탈수성과 입도와의 상관관계를 분석하기 위해 다음과 같이 고찰하였다. 슬러지의 대표입경을 산출하는 것에 여러 가지 방법이 있다. 가장 쉽고 흔한 방법은 개수가중평균입경이 있으며, 이외에도 길이가중평균, 면적이중평균, 체적이중평균 등이 있다.<sup>9)</sup> 이를 수식으로

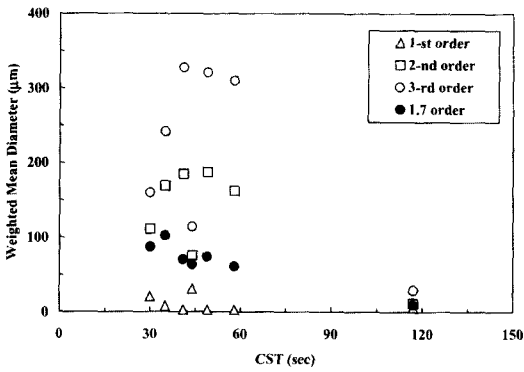


Fig. 4. Integer number weighted mean diameter and a real number weighted mean diameter.

정리하면 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있는데,  $k$  값이 1인 경우가 개수가중평균,  $k$  값이 2인 경우는 길이가중평균,  $k$  값이 3인 경우는 면적이중평균 등이 되는 것이다.

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

$D$  = weighted mean 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  $i$  (geometrical average channel diameter)

그러나 본 연구의 실험 결과를 위와 같은 방법으로 개수가중평균, 길이가중평균, 면적이중평균 입경을 구하고, 탈수성 지표인 CST와 함께 표시하면 Fig. 4와 같고, 결정계수( $r^2$ ) 값이 모두 0.5 이하로서 매우 낮게 나타나 상관성이 별로 없게 나타났다. 이것은 정수차원의 가중평균이 탈수성을 대표하는 대표 입경이 될 수 없음을 의미한다.

따라서, 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 실수차원의 가중평균을 구하였다 즉, 실수인  $k$  차원의 가중평균입경을 가정하고 결정계수값이 최대가 되는 가중차수 즉,  $k$  값을 찾도록 하였다. 그 결과로서  $k$ 의 변화에 따른 가중평균입경과 CST를 회귀분석하고 이 때 얻어지는 결정계수값의 변화를 그림으로 표시하면 Fig. 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 결정계수값이 최대가 되는  $k$ 는 1.68일 때이며, 이 때의 결정계수는 0.89가 된다. 평균입경과 TTF의 상관성을 구하는 경우에는

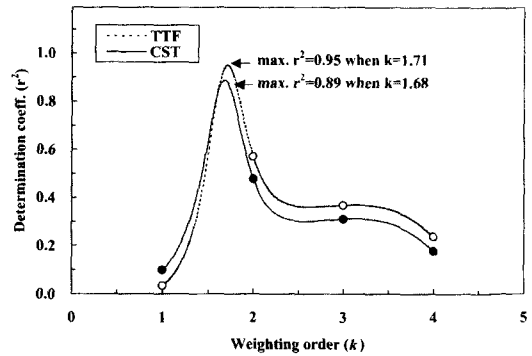


Fig. 5. Determination coefficient( $r^2$ ) when the weighting order ( $k$ ) changes from 1.0 to 4.0.

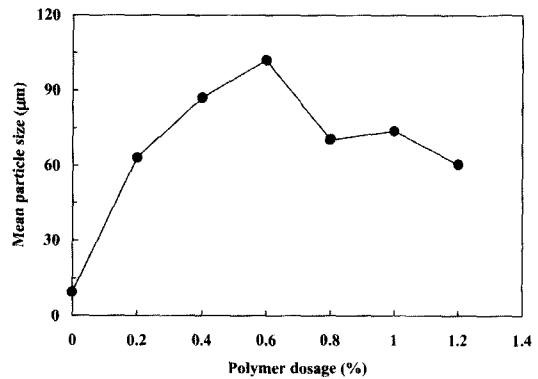


Fig. 6. 1.7 order weighted mean particle size according to cationic polymer dosage.

TTF값 대신에 TTF의 자연로그 값인  $\ln(TTF)$ 를 사용하는 것이 더 적합할 것이다. 이는 Fig. 1에서도 보는 바와 같이 응집제에 의한 개량시 응집제 주입량에 따라 TTF 값은 로그 스케일로 변하기 때문이다. 따라서  $\ln(TTF)$ 와  $k$ 의 변화에 따른 평균입경을 회귀분석하고, 각각의 결정계수값을 구해보면 결정계수가 최대가 되는  $k$ 는 1.71일 때이고 이때 결정계수는 0.95이다.

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

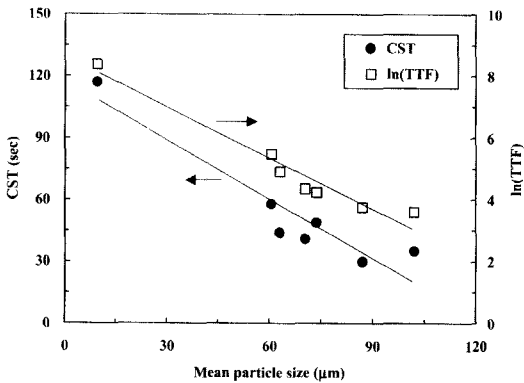


Fig. 7. Relationship between 1.7 order weighted mean particle size and CST, TTF.

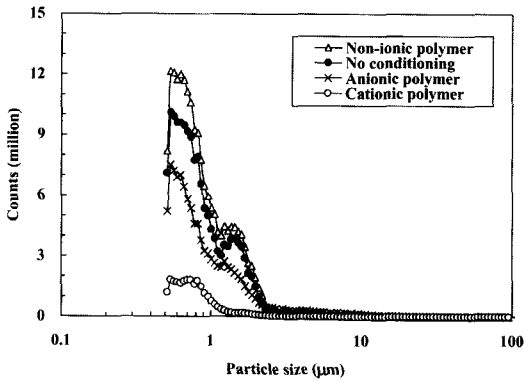


Fig. 8. Particle distribution of filtrate.

가중평균입경과 CST 및 ln(TTF)는 부(-)의 상관관계가 있어 평균입경이 증가할수록 CST와 TTF는 감소하여 탈수성은 향상됨을 알 수 있다.

**3. 탈수여액의 입도분포**

양이온계 고분자 응집제인 C-410P를 SS 기준 0.4% 비율로 주입하여 슬러지를 개량하고 탈수하였을 때 탈수여액의 입도분포를 측정하여 비이온계 혹은 음이온계 응집제를 주입한 경우와 함께 Fig. 8에 표시하였다. 탈수시험에서 사용되는 여과지는 Whatman #1으로 공칭 공극 크기는 11 µm 정도이다. 따라서 이론상으로도 입경 11 µm 이상의 입자는 모두 걸리지게 되는데 본 실험 결과에서도 탈수여액의 입도는 대부분 5 µm 이하에서 나타났고, 10 µm를 넘는 경우는 없었다. 응집제를 주입하여 슬러지가 서로 응집됨으로서 탈수여액의 입자수도 크게 감소하였는데, 그림에서 보는 바와 같이 응집제를 주입하지 않았을 때 혹은 비이온계 응집제나 음이온계 응집제를 주입하여 슬러지를 개량했을 때 보

다 양이온계 응집제를 주입하여 탈수성이 개선되었을 때는 1 µm 이하의 미립자 수가 크게 감소함을 알 수 있다. 이는 응집제를 주입하여 개량하는 것이 슬러지의 탈수 처리성을 개선하는 것 뿐만 아니라 반류수인 탈수여액의 수질도 개선하여 결과적으로 반류수의 부하를 경감시키는 효과가 있음을 의미한다.

**IV. 결 론**

하수처리장에서 발생하는 슬러지를 간헐포기소화 방식으로 소화한 슬러지를 대상으로 양이온계 유기고분자 응집제를 이용한 개량 및 탈수성 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

양이온계 유기고분자 응집제는 간헐포기 소화슬러지의 개량에 효과적이며, 탈수성 향상을 위한 최적 주입율은 슬러지 SS 기준 0.4~0.6% 정도이다. 또한, 최적 주입량 이상을 주입하는 경우 과주입현상이 일어나 탈수성은 오히려 저하되고, 가중평균입경 역시 감소한다.

간헐포기 소화슬러지를 개량하고 탈수성의 대표입경을 산출할 때 가중차수는 1.7 정도가 적합하다. 가중차수가 1.7일 때 탈수성의 지표인 CST와 TTF는 평균입도와 부(-)의 상관성을 보여 평균입도가 증가하면 CST값이나 TTF값은 감소하여 결과적으로 탈수성은 증대된다.

고분자응집제에 의한 슬러지 개량시 탈수성 향상 뿐만 아니라 탈수여액의 입자수도 현저히 감소함으로써 반류수의 부하를 경감시키는 효과가 있다.

**감사의 글**

본 연구는 2003년도 조선대학교 연구보조비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

**참고문헌**

1. Mikkelsen, L. H. and Keiding, K. : Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications of dewatering. *Water Research*, **36**, 2451-2462, 2002.
2. Lee, C. H. and Liu, J. C. : Enhanced sludge dewatering by dual polyelectrolytes conditioning. *Water Research*, **34**(18), 4430-4436, 2000.
3. Jennifer I. Houghton, Joanna E. Burgess and Tom Stephenson : Off-line particle size analysis of digested sludge. *Water Research*, **36**, 4643-4647, 2002.
4. Desmond F. Lawler, Yoon Jin Chung, Shiao-Jy Hwang and Barbara A. Hull : Anaerobic digestion -

- Effects on particle size and dewaterability. *Journal Water Pollution Control Federation*, **58**(12), 1107-1117, 1986.
5. Barbusinski, K. and Koscielniak, H. : Activated sludge floc structure during aerobic digestion. *Water Science and Technology*, **36**(11), 107-114, 1997.
  6. 김성홍, 김희준, 정태학 : 간헐포기에 의한 슬러지의 호기성 소화 기술. 대한토목학회논문집, **22**(2-B), 245-252, 2002.
  7. Park, J. A., Kim, S. H. and Hur, J. M. : Nutrient release during the Aerobic and Alternant Aerobic Sludge Digestion. 한국환경위생학회지, **26**(4), 82-87, 2000.
  8. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation : *Standard Methods - for the Examination of Water and Wastewater*. Ed. by Greenberg, A. C., Clesceri, L. S., Eaton, A. D. 18th Edition, APHA, 2-68-2-70, 1992.
  9. Particle Sizing Systems : ACCUSIZER MODEL 780 - USER MANUAL, Particle Sizing Systems, Santa Barbara, CA, U.S.A., 117-119, 2001.