

# 화학적인 개량이 하수슬러지의 부상농축효율에 미치는 영향

## Effect of Chemical Conditioning on Flotation and Thickening Efficiencies of Sewage Sludge

이창한<sup>†</sup> · 안갑환\*  
Changhan Lee<sup>†</sup> · Kabhwan Ahn\*

부산가톨릭대학교 환경공학과 · \*부산가톨릭대학교 환경행정학과  
Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan  
\*Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan

(2009년 3월 9일 접수, 2009년 8월 7일 채택)

**ABSTRACT** : Chemical sludge conditioning is widely used to improve the dewatering efficiency. It is treated with commonly used conditioners, and then thickened and dewatered with a mechanical device. This paper aims to examine the flotation and thickening efficiencies of sewage sludge for conditioning conditions, such as anaerobic storage time, kinds of coagulant and dosages, and flotation conditions, such as sludge concentration and A/S ratio, using an dissolved air flotation apparatus. Experimental results showed that the specific surface area and specific resistance to filtration (SRF) were significantly increased and the flotation and thickening efficiencies were decreased with anaerobic storage time. However, the flotation and thickening efficiencies faintly decreased in sewage sludges conditioned as  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$ , and PSO-M. Flotation and thickening efficiencies in conditioned sewage sludge could be sustained up to 96% at A/S ratio of 0.01 mL/mg or over.

**Key words** : Sewage sludge, Flotation, Thickening, Microbubble, Conditioning, DAF

**요약** : 화학적인 슬러지 개량은 하수슬러지의 탈수성을 개선하기 위해 주로 사용된다. 이 공정은 개량제를 이용하여 처리한 후 농축 및 탈수된다. 본 연구는 DAF 부상장치를 이용하여 하수슬러지의 개량(혐기성 보관시간, 응집제 종류, 및 주입량) 및 부상조건(슬러지 농도 및 A/S 비)에 따른 부상농축효율을 평가한 것이다. 혐기성 보관시간에 따라 하수슬러지의 비표면적과 여과비저항은 증가하였다.  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$  및 PSO-M을 주입하여 개량된 하수슬러지는 보관시간이 경과에 따라 부상농축효율이 거의 감소되지 않았다. 개량된 하수슬러지는 A/S 비가 0.01 mL/mg 이상이면, 부상농축효율이 저하되지 않고 96% 이상 유지할 수 있었다.

**주제어** : 하수슬러지, 부상, 농축, 미세기포, 개량

## 1. 서론

우리나라 연간 하수슬러지 발생량과 처리량은 1996년 129만톤/년에 비하여 2005년에는 총 발생량이 256만톤/년으로 두 배이상 증가하였고, 하수슬러지의 발생량이 지속적으로 증가되고 있다.<sup>1,2)</sup> 하수슬러지 처리는 육상매립이 1996년에 1008톤/년에서 2005년에 44톤/년으로 감소한 반면 소각 및 해양투기에 대한 비중이 점차 증가하고 있다.<sup>3)</sup>

하수슬러지는 함수율과 유기물 함량이 높아 부패로 인한 환경 및 위생 측면의 위해성이 높기 때문에 “하수슬러지의 직매립을 금지하는 규정(시행 : 2003년 7월 1일)”을 도입되어 운영되고 있다.<sup>4)</sup> 이 규정은 현실적인 대안으로 함수율 75% 이하의 하수슬러지만 매립할 수 있도록 제한적 범위 내에서 허용하였

으며, 소각 등의 새로운 처리방안을 모색하고 있으나 효과적인 대안이 되지 못하고 있다. 또한, 런던협약에 따른 해양환경관리법 시행으로 2008년 8월부터 하수처리장 슬러지의 해양투기를 금지하고 있다. 미국의 EPA는 1994년 2월부터 하수슬러지의 유효이용에 관한 사항을 “하수슬러지의 재사용에 관한 법(The Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, 40 CFR Part 503)”으로 제정하여 하수슬러지를 폐기하기 보다는 재이용으로 유도하고 있다.<sup>5)</sup>

하수슬러지 처리공정은 슬러지의 종류 및 성상에 따라 처리공정이 달라지나, 일반적으로 농축, 개량, 탈수, 그리고 건조 등의 수분을 제거하는 공정과 소화, 퇴비화, 소각, 습식공기산화 등의 슬러지 내의 유기물질을 안정화시키는 공정으로 구성된다. 슬러지 처리공정은 무기염 또는 유기고분자 응집제를 주

<sup>†</sup> Corresponding author : E-mail : chlee@cup.ac.kr Tel : 051-510-0624 Fax : 051-510-0628

입하는 화학적인 개량을 거친 후 진공여과, 원심분리, 벨트형 여과기, 및 압력여과 등으로 슬러지에 포함된 수분을 제거하는 공정으로 구성되어 있다. 탈수된 슬러지 케익의 함수율은 약품의 종류와 양, 슬러지 특성, 교반조건, 및 탈수기의 종류에 따라 달라진다.<sup>6)</sup> 탈수된 하수슬러지 케익은 처리 후 포함된 함수율에 따라 재이용 방안 및 경제적 효용성이 달라진다.

하수슬러지의 탈수성(dewaterability)은 응집(biofloculation)과 개량(conditioning)을 포함하는 중력, 부상분리(DAF : Dissolved Air Flotation), 또는 원심분리에 의한 농축(thickening) 성능에 따라 달라진다. 저 밀도(1.01~1.09 g/cm<sup>3</sup>)인 하수슬러지는 중력 및 원심분리 보다 부상에 의한 농축효율이 높다는 결과를 Haarhoff와 Bezuidenhout가 보고하였다.<sup>7)</sup> Bratby<sup>8)</sup>은 저밀도인 하수슬러지의 부상농축에서 스크레퍼 및 슬러지 배출 주기에 따른 효율적인 슬러지 농축을 위한 설계 및 운전인자를 도출하였다. 박<sup>9)</sup> 등은 고형물 플럭스와 관련된 영향인자를 이용하여 중력과 부상농축의 성능을 비교하였다. 광<sup>10)</sup> 등은 계체군 수치 모델과 충돌-부착계수를 이용하여 생물학적 플럭의 부상분리 메커니즘을 해석한 바 있다. 또한, 전해부상을 이용하여 활성슬러지<sup>11)</sup>와 상수슬러지<sup>12)</sup>의 농축효율을 비교하여 현장 적용가능성을 제시한 결과도 보고되었다.

본 연구는 혐기성 보관조건에서 하수슬러지 성장 및 화학적인 개량에 따른 부상농축효율을 비교하였으며, 응집제 주입조건 및 A/S 비에 따른 하수슬러지의 부상농축효율을 정량적으로 검증하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 응집제

응집제는 시약용 황산알루미늄(Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> · 13~14H<sub>2</sub>O)과 철염(Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O), 및 폴리황산알루미늄마그네슘(PSO-M)을 사용하였다. 각 응집제는 표준용액을 Al과 Fe 이온을 기준으로 하여 10 g/L로 제조한 후 주입량을 조절하였다.

### 2.2. 부상농축 실험

회분식 부상농축 실험은 실험실 규모의 DAF-jar tester(ECE engineering, Co., Ltd)를 사용하였으며(Table 1), 이 장치는 회분식 jar tester형 부상장치로서 6조의 1.3 L 사각형 실린더에 평판형 임펠러(W40 mm×H30 mm)가 부착되어 있다. 가압수의 압력과 반송율은 각각 5 kgf/cm<sup>2</sup>와 33.3~100.0%로 조절하여 실험하였다. 회분식 부상실험은 혼합(mixing)를 340 rpm(G : 1120s<sup>-1</sup>)으로 60초로 하고, 응

Table 1. Summary of DAF design and operating parameters

Parameter		DAF jar-tester	
Pretreatment	Mixing	Type	Impeller
		Intensity, 1/s	1120
	Coagulation	Retention time, s	60
		Type	Impeller
Bubble generation	Intensity, 1/s	51.6	
	Retention time, s	1200	
Bubble generation	Recycle	Type	Saturator
		Pressure, kg/cm <sup>2</sup>	5.0-5.5
	Recycle	Retention time, s	15
		ratio, %	33.3-100.0

집(coagulation)을 40 rpm(G : 51.6s<sup>-1</sup>)으로 1,200초로 하여 실험하였다. 또한 부상시간은 10분으로 실험하였다. 유출수의 처리율은 탁도측정계(2100N IS Turbidimeter, HACH)로서 측정하여 처리효율을 비교하였다. 응집조건은 교반시간(t)과 강도(G)에 따른 탁도 및 부상농축효율을 비교하였다.

### 2.3. 탈수성 측정

슬러지의 탈수성은 Buchner funnel test에 의한 방법으로 측정하였다. 수류식 진공펌프(aspirator)를 이용하여 진공 압력을 700 mmHg으로 고정하였다.

슬러지의 탈수성은 액체가 고체입자층을 통과하는 여과현상에 대한 이론식으로부터 유도된 비저항값(specific resistance)으로써 표현될 수 있다. 비저항값은 슬러지의 여과성을 측정하는 지표가 되며, 일정한 점도를 가지는 여액이 케이크 층을 통과할 때 일정한 유속을 얻을 수 있는 압력차와 수치적으로 비례하는 관계를 나타내는 수정된 Darcy 식을 이용하여 다음과 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{P_T A^2}{\mu(\gamma CV + R_M A)} \quad (1)$$

식 (1)을 얻고 적분하면 다음과 같다.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu\gamma CV}{2P_T A^2} + \frac{\mu R_M}{P_T A} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 탈수시간(t)과 탈수여액량(V)의 t/V와 V에 대한 관계를 y = bx + a로 나타내었고, 기울기 b와 절편 a으로부터 식 (3)을 이용하여 여과비저항(r)을 구하였다.

$$\gamma = \frac{2P_T A^2 b}{\mu C} \quad (3)$$

여기에서 A는 여재 면적(m<sup>2</sup>), P<sub>T</sub>는 여과압력(N/m<sup>2</sup>, mmHg), R<sub>M</sub>는 여재의 여과비저항(m/kg), 총 여과비저항

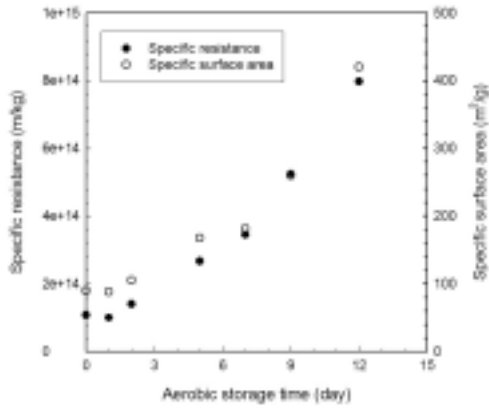


Fig. 1. Variation of aerobic storage time on specific resistance and surface area with activated sludge.

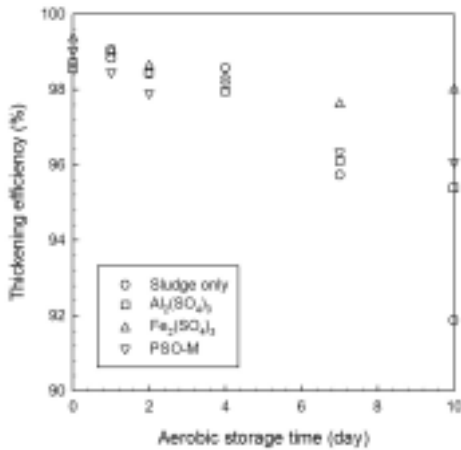


Fig. 2. Effect aerobic storage time on thickening efficiency by flotation.

(m/kg),  $r$ 은 활성슬러지의 여과비저항(m/kg),  $t$ 는 여과시간(sec), 그리고  $\mu$ 는 여액의 점도(kg/m · sec)이다.

### 2.4. 활성슬러지 비표면적 측정

활성슬러지 비표면적은 염료흡착법을 이용하여 염료(Rhodamine B)가 활성슬러지의 흡착된 양으로부터 비표면적(표면적당 염료 단위 체적)이 계산하여 식 (4)을 이용하여 비표면적을 구하였다.<sup>13)</sup>

$$S_0 = xN_A\sigma \quad (4)$$

여기에서  $S_0$ 는 활성슬러지의 비표면적(m²/g),  $x$ 는 염료의 흡착량( $\mu\text{mol/g}$ ),  $N_A$ 는 아보가드로수( $6.023 \times 1,023 \text{ molecules/mol}$ ),  $\sigma$ 는 염료분자가 차지하는 면적(m²/molecule)이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 하수슬러지 성상 및 농도에 따른 부상농축 효율

하수슬러지는 유기물 부하량 및 혐기성 보관시간에 따라 성상이 달라진다. Sorensen 등<sup>14)</sup>과 Rasmussen 등<sup>15)</sup>은 포기하지 않은 상태에서 혐기성 보관시간에 따라 상등액의 탁도가 증가하고 플록이 해체되면서 발생하는 미세한 플록 및 미생물 등으로 인하여 탈수시 케익의 공극을 폐쇄 및 여과비저항의 증가에 영향을 준다고 하였다. 이러한 영향 때문에 하수 및 소화슬러지를 탈수하기 전 화학적 개량을 거친다. Fig. 1은 혐기성 보관시간에 따른 하수슬러지 비표면적을 나타낸 것이다. 보관시간이 0~12일 동안 하수슬러지의 여과비저항은  $1.0872 \times 10^{14} \sim 7.9789 \times 10^{14} \text{ m/kg}$ 까지 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 활성슬러지의 비표면적은 90.4 m²/g에서 420.3 m²/g으로 여과비저항과 유사한 경향으로 증가하였다. Andreadakis 등<sup>16)</sup>과 Smith와 Coackley<sup>17)</sup>는 염료를 이용하여 측정된 활성슬러지 비표면적은 각각 60~189 m²/g과 40~142 m²/g임을 제시한바 있으며, Sorensen과 Wakeman<sup>18)</sup>은 혐기화 시간을 0~5일로 하였을 때 활성슬러지의 플록 구조가 느슨해지고 사상성 미생물의 증가하여 활성슬러지의 비표면적이 9~24 m²/g으로 증가한다고 보고한 바 있다. 또한, 이 등<sup>19)</sup>은 국내의 하수슬러지를 이용하여 비표면적( $s$ )과 여과비저항( $r$ )의 관계가 선형적인 상관관계를 나타낸다고 하였다.

Fig. 2는 보관시간에 따른 하수슬러지의 부상농축효율을 나타낸 것이다. Reali 등<sup>20)</sup>이 DAF를 이용한 혐기성 하수슬러지 농축실험에서 처리수/하수슬러지 탁도의 비율( $T_u/T_{u0}$ )을 이용하여  $Gt$ 값에 따른 부상속도를 비교한 것과 같이 본 실험에서도 하수슬러지 부상농축효율을 유입되는 슬러지 탁도( $T_0$ )와 유출수 탁도( $T$ )의 제거효율(식 (4)) 또는 부상농축효율(FE : Flotation and Thickening efficiency)로 정의하여 사용하였다.

$$FE = \frac{T_0 - T}{T_0} \times 100 \quad (4)$$

응집제가 주입되지 않은 하수슬러지의 보관시간에 따른 부상농축효율은 보관시간에 따라 부상농축효율이 98%에서 95%로 감소되는 경향을 보였으며, 이 결과는 보관시간에 따라 하수슬러지 플록의 해체되어 하수슬러지 플록과 미세기포의 부착효율이 저하되어 부상농축효율이 감소한 것으로 사료되며, Rosa와 Rubio<sup>21)</sup>의 응집과 부상장치에서 슬러지 플록과 기포 크기에 따른 부상효율의 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 그

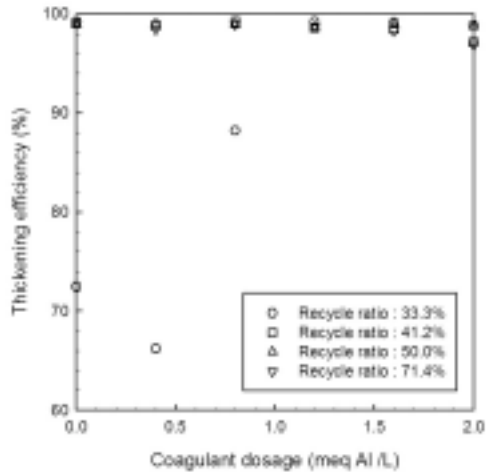


Fig. 3. Effect of  $Al_2(SO_4)_3$  dosage on thickening efficiency by flotation.

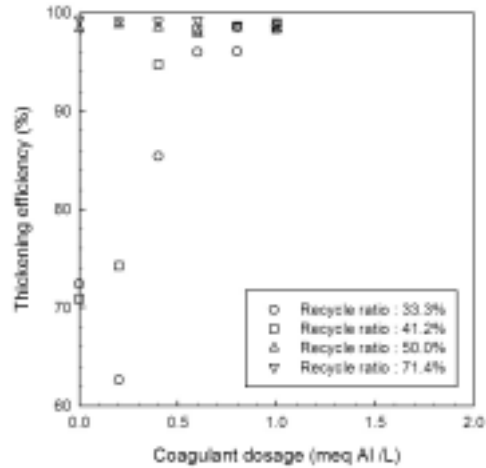


Fig. 5. Effect of POS-M dosage on thickening efficiency by flotation.

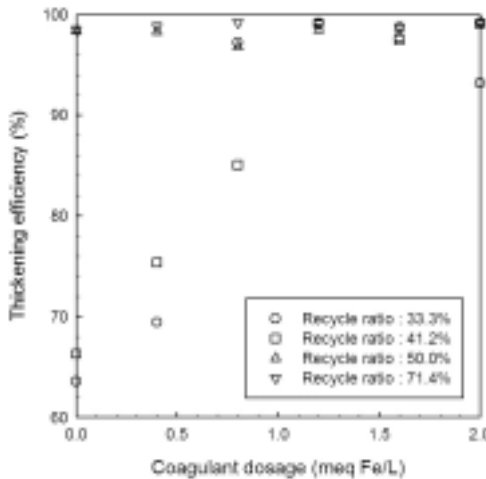


Fig. 4. Effect of  $Fe_2(SO_4)_3$  dosage on thickening efficiency by flotation.

러나,  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$  및 PSO-M와 같은 응집제를 주입하여 개량하면 하수슬러지 플록이 재응집되면서 미세기포와 플록간의 부착효율을 증가하여 부상농축효율이 높아지는 경향을 보였다.  $Fe_2(SO_4)_3$ 는 혐기성 보관시간이 7일이 경과하여도 부상농축효율이 98% 이상 높게 유지되었으며, 두 응집제에 비해  $Fe_2(SO_4)_3$ 가 개량 후 부상농축효율이 높게 나타났다.

### 3.2. 응집제 종류에 따른 하수슬러지 개량 및 부상 특성

Fig. 3, Fig. 4, 그리고 Fig. 5는 응집제 종류( $Al_2(SO_4)_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$  및 PSO-M)에 따른 하수슬러지의 개량 및 부상농축효율을 나타낸 것이다. Fig. 3은 슬러지 농도를 3,000 mg/L으로 일정하게 하고,  $Al_2(SO_4)_3$ 의 주입량에 따라 반송율을 33.3, 41.2, 50.0, 그리고 71.4%로 하여 부상농축효율을 비교하였다. 이 결과에서 응집제를 주입하지 않은 하수슬러지는

반송율이 33.3%에서 A/S 비가 0.0066 mL/mg으로 부상조의 설계기준인 0.01 mL/mg보다 30% 이상 낮고, 미세기포량이 부족하여 부상농축효율이 70% 정도로 저하되었다. 이 조건에서  $Al_2(SO_4)_3$ 를 1.2 meq/L (슬러지당  $Al_2(SO_4)_3$  량은 79.6 mgAl/gsludge) 이상 주입하면 부상효율이 98%로 높아지는 경향을 보였다. 그러나 반송율이 41.2% 이상으로 A/S 비를 높이면, 개량 조건에 대한 영향을 적게 받았다. Fig. 4는  $Fe_2(SO_4)_3$ 를 주입하였을 때 반송율에 따른 부상농축효율을 나타낸 것이다. 이 결과는 Fig. 3의 결과와 유사한 경향을 보였으나 반송율이 33.3%일 경우 2.0 meq/L 이상으로 과량이 주입되었을 경우 개량된 플록이 밀도가 높아져 부상농축효율이 감소하였다. Fig. 5는 PSO-M을 주입하였을 때 반송율에 따른 부상농축효율을 나타낸 것이다. Fig. 3과 Fig. 4의 결과와 달리 반송율이 33.3%일 경우 응집제 주입량을 0.6 meq/L로  $Al_2(SO_4)_3$ 와  $Fe_2(SO_4)_3$ 보다 응집제 주입량이 50% 정도 적게 주입된 조건에서도 부상농축효율은 95% 이상 유지되는 경향을 나타내었다. 이 결과는 PSO-M과 같은 무기고분자 응집제는 액체 상태에서 플럭 형성에 영향을 주는 알루미늄 수화물 이온이 고분자화 되어있어  $Al_2(SO_4)_3$ 과  $Fe_2(SO_4)_3$ 에 비해 수화에 의한 응집반응이 저하되는 현상이 적게 일어나기 때문에 슬러지 g당 응집제 주입량이 50% 이상 적어도 플럭형성이 원활하게 이루어져 부상농축효율은 높게 유지된 것으로 사료된다.

### 3.3. 가압수의 최적 반송율 결정

Fig. 6은 하수슬러지 농도에 따른 부상농축효율을 나타낸 것이다. 실험조건은 응집제를 주입하지 않고 하수슬러지 농도 (500~6,000 mg/L)와 반송율(40~100%)을 변화시켰다. 최적 반송율을 결정하기 위한 반송율은 이 실험결과에서 개량 및 실

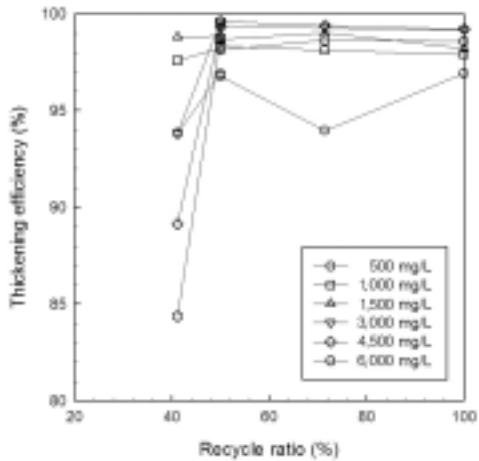


Fig. 6. Effect of recycle ratio on thickening efficiency by flotation.

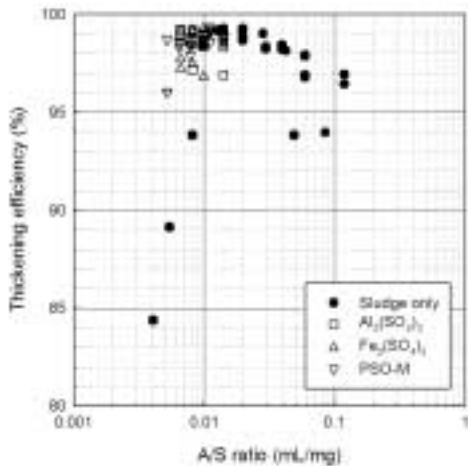


Fig. 7. Effect of A/S ratio on thickening efficiency by flotation with coagulant.

힘조건에 영향을 받는 33.3%를 제외하고, 41.2~100.0 %인 조건에서 수행하였다. 41.2%의 반송율은 하수슬러지 농도가 낮을수록 처리효율이 높아지는 경향을 보였으며, 71.4% 이상의 반송율은 유입되는 가압수(미세기포)량이 많기 때문에 하수슬러지 농도가 6,000 mg/L가 되어도 95% 이상의 높은 부상농축효율을 나타내었다.

Fig. 6의 결과를 A/S 비로 환산하여 Fig. 7에 나타내었다. A/S 비에 따른 부상농축효율은 A/S 비가 0.01 mL/mg 이상이었을 때 부상농축효율이 96%로 일정하게 유지되어 효율적인 부상농축이 가능할 것으로 판단되었다. A/S 비가 0.005~0.011 mL/mg인 조건에서  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$  및 PSO-M을 주입하여 부상농축효율을 비교하였으며, 개량에 의해 하수슬러지 플록 및 미세기포 부착효율이 증가하여 A/S 비가 0.01 mL/mg 이하에서도 부상농축효율이 96% 이하로 감

소되지 않는 경향을 보였다. 하수슬러지의 부상농축은 응집제에 의해 개량된 경우 A/S 비가 0.01 mL/mg 이하가 되어도 96% 이상의 부상농축효율을 얻을 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 하수슬러지의 특성과 화학적인 개량에 따른 DAF의 부상농축효율을 비교하였으며, 응집제 주입(개량) 및 부상조건(슬러지 농도 및 A/S 비)에 따른 부상농축효율을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

혐기성 보관시간에 따른 활성슬러지는 플록의 해체 및 분해가 일어나 활성슬러지 플록의 g당 표면적 및 여과비저항이 각각  $90.4\sim420.3\text{ m}^2/\text{g}$ 와  $1.0872\times 10^{14}\text{ m/kg}\sim7.9789\times 10^{14}\text{ m/kg}$ 으로 점차 증가하는 경향을 나타내었다.

개량되지 않은 하수슬러지는 보관시간이 0일과 7일에서 부상농축효율이 98%에서 95%로 감소하는 경향을 보였지만,  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$  및 PSO-M을 주입하여 개량을 하게 되면 하수슬러지 플록이 재응집되면서 보관시간이 경과하여도 부상농축효율이 일정하게 유지되었다. 최적조건에서 응집제에 의해 개량한 후 부상농축하면, A/S 비가 0.01 mL/mg 이하로 낮아져도 부상농축효율이 저하되지 않고 96% 이상 유지되었다.

KSEE

#### 사 사

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었으며(KRF-2007-331-D00240), 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 홍준석, "각국의 하수오니 관리현황", <http://www.me.go.kr/book/html/폐기물분야/5-10.htm>.
2. 김갑수, "국내의 하수슬러지 처리·처분 현황 및 개선방안", 대한환경공학회지, 29(1), 8~16 (2007).
3. 환경부, "하수도통계" (2005).
4. 환경부, "폐기물관리법", 법률 제6627호 (2002).
5. EPA, "Biosolids Generations, Use, and Disposal in the United States" (1999).
6. Metcalf and Eddy, "Wastewater Engineering : Treatment and Reuse", 1447~1622(2004).

7. Haarhoff J., and Bezuidenhout E., "Full-scale evaluation of activated sludge thickening by", *Water SA*, **25**(2), 153~166 (1999).
8. Bratby, J. R., and Ambrose, W. A., "Design and control of flotation thickeners", *Wat. Sci. Tech.*, **31**(3-4), 247~261(1995).
9. 박상철, 한무영, 독고석, 권순범, "DAF 슬러지의 부상식 농축: 고행물 플럭스법 적용과 영향인자", *상하수도학회지*, **20**(4), 617~626(2006).
10. 곽동희, 김성진, 임영환, "용존공기부상(DAF) 공정을 이용한 생물학적 플록의 부상분리", *상하수도학회지*, **18**(5), 649~655 (2004).
11. 최영균, 정태학, 엄익태, "전해부상을 이용한 활성슬러지의 농축효율 향상", *상하수도학회지*, **19**(3), 295~3005(2005).
12. 이준, 한무영, 독고석, 박용효, 김충일, 김미경, "전해부상에 의한 상수 슬러지 농축효율", *상하수도학회지*, **19**(2), 155~160 (2005).
13. 이창한, 윤준섭, 김도한, 나영수, 송승구, "Rhodamine B를 사용한 염료흡착법에 의한 활성슬러지의 비표면적 측정", *대한환경공학회지*, **23**(10), 1633~1639(2001).
14. Sorensen, P. B., Christensen, J. R., and Bruus, J. H., "Effect of small scale solids migration in filter cakes during filtration of wastewater solids suspensions", *Wat. Environ. Res.*, **67**(1), 25~32(1995).
15. Rasmussen, H., Bruus, J. H., Keiding, K., and Nielsen, P. H., "Observations on dewaterability and physical chemical and microbiological changes in anaerobically stored activated sludge from a nutrient removal plant", *Wat. Res.*, **28**(2), 417~425 (1994).
16. Andreadakis, A. D., "Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floc", *Wat. Res.*, **27**(12), 1707~1714 (1993).
17. Smith, P. G., and Coackley, P., "A method for Determining Specific Surface Area of Activated Sludge by Dye Adsorption", *Wat. Res.*, **17**(5), 595~598(1983).
18. Sørensen, B. L., and Wakeman, R. J., "Filtration characterisation and specific surface area measurement of activated sludge by Rhodamine B adsorption", *Wat. Res.*, **30**(1), 115~121(1996).
19. 이창한, 나영수, 김도한, 이송우, 송승구, "헴기화 시간에 따른 활성슬러지의 물리·화학적 특성변화", *한국환경과학회지*, **11**(4), 339~346 (2002).
20. Reali, M. A. P., Campos, J. R., and Penetra, R. G., "Sewage treatment by anaerobic biological process associated with dissolved air flotation", *Wat. Sci. Tech.*, **43**(8), 91~98(2001).
21. Rosa, J. J., and Rubio, J., "The FF (flocculation-flootation) process", *Miner. Eng.*, **18**(7), 701~707(2005).