



응집슬러지를 이용한 하수슬러지의 탈수성 및 침강성 개선

Improvement of dewaterability and settleability of sewage sludge using coagulation sludge

소수현¹·이병하²·박준홍³·차호영⁴·김한수⁵·송경근^{1*}

Soo-Hyun So¹·Byung-Ha Lee²·Joon-Hong Park³·Ho-Young Cha⁴·Han-Soo Kim⁵·Kyung-Guen Song^{1*}

¹한국과학기술연구원 물자원순환연구단, ²KG 케미컬(주), ³연세대학교 사회환경시스템공학부, ⁴자인엔텍(주)

⁵서울시립대학교 환경공학부

¹Center for Water Resource Cycle, Korea Institute of Science and Technology, ²KG Chemical Co. Ltd.

³School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, ⁴Zignentech Co. Ltd.

⁵School of Environmental Engineering, University of Seoul

ABSTRACT

This study aimed to investigate the feasibility of improving dewaterability and settleability of sewage sludge using coagulation sludge. When mixed with sewage sludge and coagulation sludge at 1:1 ratio, capillary suction time(CST) and specific resistance to filtration(SRF) decreased by about 56% and 68%, respectively. It is found that total solids(TS) and volatile solids(VS) of mixing sludge are increased by about 59% and 53%, respectively. Also, the turbidity of the mixing sludge supernatant was reduced from 99 to 16 NTU. It is observed that the mixing of sewage sludge and coagulation sludge at 1:1 showed better effect than using poly-aluminum chloride(PAC) coagulant at 25 mg/L.

Key words: Coagulation sludge, Conditioning, Dewaterability, Settleability, Sewage sludge

주제어: 응집슬러지, 개량, 탈수성, 침전성, 하수슬러지

1. 서론

공공하수처리시설에 유입되는 하수량은 지속적으로 증가하고 있으며, 하수슬러지 발생량 역시 더불어 증가되고 있다. 환경부에서는 공공수역의 수질개선과 부영양화 방지를 위해 하수처리시설의 최종 방류수 수질 기준을 2012년 1월 1일 이후 강화하여, 하수 중의 질소와 인의 제거를 중점 관리하고 있다. 특히 무기응집제의 사용이 총 인 처리에 가장 합리적인 방법으로 제안되었으며 (Mesdaghinia et al., 2003; Xie et

al., 2005; Han et al., 2012), 이에 따라 응집제를 사용한 물리화학적 공정이 많이 도입되었다. 방류수 수질 기준을 만족시키기 위한 응집공정의 강화는 화학슬러지 발생량을 증가시키며 이를 처리하기 위한 대책이 필요하다.

또한, 하수처리의 최종산물인 하수슬러지는 지속적으로 증가하는 추세이나, 런던협약 이행에 따라 2012년 1월 1일부터 해양배출이 전면 금지되며 전량 육상 처리 되고 있다. 하수슬러지는 지역 및 계절 등에 따른 성상과 유입량의 변화가 크며, 응집슬러지와는 달리 유기물 함량 및 함수율이 높아 탈수 및 농축이 어려운 경우가 많다. 하수슬러지의 처리는 농축, 소화,

Received 13 February 2018, revised 5 March 2018, accepted 12 March 2018

*Corresponding author: Kyung - Guen Song (E-mail: kgsong@kist.re.kr)

pp. 077-087
pp. 089-096
pp. 097-106
pp. 107-113
pp. 115-122
pp. 123-130
pp. 131-143
pp. 145-152
pp. 153-158
pp. 159-168
pp. 169-181
pp. 183-192
pp. 193-200

탈수 공정을 거치게 되며, 이에 따른 처리비용이 매년 상승하고 있는 추세이다. 무기응집제, 유기성 고분자 응집제(폴리머) 등의 탈수 약품 주입을 통해 슬러지의 함수율을 저감시키고 있으며, 2014년 서울시 기준으로 연간 약 1,654,721 kg, 일일 평균 약 4,533 kg을 사용하여 전년도 대비 약 16% 증가된 것으로 보고되었다 (Han et al., 2015).

탈수약품은 무기응집제와 유기 고분자 응집제로 분류할 수 있으며, 무기응집제는 항상 +전하를 띠고 유기 고분자응집제는 양쪽 성질을 다 띠게 할 수 있어 음이온성, 양이온성, 양쪽성 유기응집제로 나누어진다 (Kwak, 2009). 유기 고분자응집제는 슬러지에 주입되어 슬러지 입자 표면에 부착되어 표면부착수의 탈착, 표면중화에 의한 입자간의 반발력 감소 및 가교현상을 통해 탈수성이 증가된 슬러지 케익을 형성하며 (Kim, 2006), 특히 플럭의 크기 증가와 침전속도 증대에 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

질소와 인 처리에 따라 발생한 응집슬러지는 하수슬러지에 비해 유기물 함량이 낮고, 젤라틴 형태를 나타내어 탈수 및 농축이 어렵다. 그러나 응집슬러지는 수산화알루미늄과 같은 금속수화물이 다량으로 존재하며, 이러한 금속수화물은 다양한 이온물질과 결합할 수 있는 충분한 양전하와 음전하를 띠고 있다. 따라서 응집슬러지를 하수슬러지와 혼합하는 경우 슬러지 입자 표면의 정전기를 중화하여 입자간 반발력을 줄이며, 입자 사이의 가교현상으로 하수슬러지의 탈수성 및 침강성을 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 하수슬러지의 탈수성 및 침강성 개선을 위한 개량제로서 응집슬러지의 사용 가능성을 살펴보고, 적절한 혼합비율을 제시하며 하수슬러지의 처리 및 처분의 개선과 함께 응집슬러지의 처리방안을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 방법

본 연구에서는 경기도 Y하수처리장의 2차 침전지에서 채취한 침전슬러지를 이용하여 실험을 진행하였다. 무기개량제(응집제) 주입량에 따른 하수슬러지의 응집 특성을 평가하기 위해 무기개량제인 PAC(폴리염화알루미늄, Poly-aluminum Chloride)를 Al^{3+} 농도 기

준으로 0, 5, 10, 15, 20, 25 mg Al/L로 주입하여 비교를 진행하였다. PAC는 물속의 부유물질에 대해 전기적 중화능력과 OH 가교작용에 있어 우수하여 고농도의 원수 처리에 유용하다. 본 실험에서 무기개량제는 PAC ($[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$, 17% as Al_2O_3 , 영진환경, 한국)을 사용하였다.

하수슬러지의 개량제 대체소재로서 응집슬러지의 사용 가능성을 평가하였다. 응집슬러지의 확보를 위해 하수처리장 2차 처리수를 대상으로 응집 침전조를 이용한 연속 실험을 진행하여 실험에 필요한 응집슬러지를 확보하였다. 응집슬러지 확보를 위한 연속 응집실험은 하수 2차 처리수의 총 인 농도를 기준으로 무기응집제를 주입하였다. 하수 2차 처리수의 총 인 농도는 1.04 mgP/L 이었으며, 무기응집제로는 PAC를 Al : P 몰(mole)농도 비율로 주입하였다. 응집·침전조에 대상 시료를 3.47 L/min으로 주입하고 PAC는 280 μ l/min으로 주입하여 Al : P 몰(mole)농도 비율을 4:1로 맞추었다. 응집·침전조는 교반장치가 부착된 급속교반조와 완속교반조 및 침전조로 구성된다. 급속교반조의 체류시간은 1분이며 약 250 rpm으로 급속교반을 수행하였으며, 완속교반조의 체류시간은 15분으로 60 rpm으로 완속교반을 수행하였으며, 30분의 침전시간을 갖는 침전조를 이용하여 침전시킨 후 응집슬러지를 확보하였다. 13시간 연속운전을 수행하여 약 8 L의 침전된 응집 슬러지를 확보하였으며, 이를 실험에 사용하였다. 하수슬러지와 응집슬러지의 혼합은 부피비를 기준으로 9:1, 6:1, 3:1, 2:1, 1:1로 혼합하며 슬러지 개량실험을 수행하였다.

2.2 분석 방법

본 연구에 사용된 하수슬러지와 응집슬러지는 특성 비교를 위하여 MLSS, MLVSS, SV_{30} , VS, TS, SRF 등 항목을 측정하였다.

무기개량제 및 응집슬러지를 이용하여 개량 하수슬러지에 대하여 각각 기본특성과 침강성, 탈수성을 비교하였다. 기본 특성 파악을 위하여 각 시료의 TS, VS, 함수율을 분석하였으며, 침강성 평가를 위하여 SV_{30} , SVI 및 농축 후 여액의 탁도를 측정하였다. 슬러지의 탈수성 평가를 위해 Triton Electronics사의 Type 319 CST 분석기를 이용하여 CST 분석하였다. CST는 표준 CST 여과지로부터 발생한 모세관 흡인압에 의해서 부



유물로부터 주지의 여과량이 흡수되는데 걸리는 시간으로부터 도출되며, 탈수성이 불량한 경우 CST 값이 크게 나타나고 탈수성이 우수한 경우 작은 값이 나타난다 (Im, 2002). CST 실험을 통하여 도출된 시간을 이용하여 여과에 대한 저항 값(m/kg)을 의미하는 SRF를 다음과 같은 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$SRF = \frac{2 \cdot A^2 \cdot P_t \cdot b}{C_1 \cdot \mu} \quad (1)$$

- A : 여과지 크기 (mm²)
- P_t : 여과압력 (Pa)
- b : 멀티CST 라인의 구배를 각각 링에 있는 여과물 양으로 나눈 값 (s/cm⁶)
- C₁ : 슬러지 내 액상용량대비 고형슬러지의 질량 (g/cm³)
- μ : 여과속도 (cp)

3. 결과 및 고찰

3.1 하수슬러지와 응집슬러지의 특성 비교

본 연구에서는 하수슬러지와 응집슬러지를 효과적으로 처리하기 위하여 슬러지 특성분석을 수행하였다. 사용된 하수슬러지와 응집슬러지의 특성은 Table 1에 나타내었다. 하수슬러지의 MLSS는 8450 mg/L, MLVSS는 7400 mg/L로 응집슬러지의 MLSS가 2450 mg/L, MLVSS가 1300 mg/L인 것에 비해 높게 나타났다. 하수슬러지의 MLVSS/MLSS 비율은 약 0.876으로 응집슬러지가 0.531의 비율을 가지는 것에 비해 높아, 무기개량제의 주입 및 낮은 유기물 함량을 가지는 응집슬러지와 혼합이

Table 1. Characteristics of sewage sludge and coagulation sludge

Parameter	Units	Sewage Sludge	Coagulation Sludge
MLSS	mg/L	8450	2450
MLVSS	mg/L	7400	1300
SV ₃₀	%	95	90
Residual Turbidity	NTU	98.7	45.6
VS/TS	%	84.4	33.9
SVI	-	11.2	36.7
SRF	m/kg	5.6 E+11	1.15 E+12

하수슬러지의 처리특성에 영향을 미칠 것으로 예상되었다. 슬러지의 탈수성은 슬러지 농도 증가에 따라 감소하는 것으로 보고되었으나 (Lee et al., 2010), 탈수효율은 플럭 크기 및 형태, 침강속도, 비표면적 등에 따라 상관관계가 나타난다 (Karr et al., 1978; Bruus et al., 1993). 다음과 같은 슬러지 특성분석을 통해 하수슬러지와 응집슬러지의 비교를 진행하였다.

슬러지 내 총 고형물(TS) 및 휘발성고형물(VS) 분석결과 하수슬러지의 총 고형물 내 휘발성 고형물 함량(VS/TS)은 응집슬러지보다 2배 이상 높게 나타났다. 하수슬러지 내 휘발성 고형물(VS)의 비율 증가는 슬러지의 단위체적 당 밀도를 낮춰 농축성과 탈수성을 저하시키는 것으로 알려져 있어, 하수슬러지의 탈수성은 응집슬러지의 탈수성에 비해 낮을 것으로 예상되었다. 이에 따라 슬러지 탈수성 평가를 위한 비여과 저항(SRF)을 측정하였다. SRF는 여과가 일어나면서 쌓이는 고체층에 의한 저항을 의미하며 값이 클수록 탈수성이 나쁨을 의미한다. 응집슬러지의 SRF 값은 하수슬러지에 비해 약 2배 이상 높게 나타나 하수슬러지에 비해 탈수성이 나쁜 것으로 확인되었다. 이는 슬러지 농도 및 VS/TS 결과로 예상한 것과 반대되는 경향으로 하수슬러지의 MLSS 함량 및 VS함량은 응집슬러지에 비해 높지만 슬러지 플록의 형태에 따라 탈수성 및 침강성에 영향을 받은 것으로 보인다. 낮은 VS 함량에도 하수슬러지에 비해 응집슬러지의 탈수성이 나쁜 것은 응집슬러지 특성이 원수 내 휘발성물질(유기물질)과 응집제에서 기인되며 밀도가 낮고 수산화물 함량이 높아 플럭의 상태가 젤라틴 형태로 팽윤해 있기 때문이다 (Kwon et al., 2001).

슬러지 침강성 평가를 위한 분석 결과 하수슬러지와 응집슬러지의 SV₃₀은 각각 95, 90%로 높았으며, SVI 값은 각각 11.2, 36.7로 나타났다. 슬러지의 침강속도를 나타내는 SVI 값은 50~150이 적절한 값으로 알려져 있으나, 모두 50 이하의 값으로 슬러지의 침강성이 다소 나쁜 것으로 판단되었다. 이는 슬러지 여액의 탁도가 다소 높은 것과 상응하는 결과로 하수슬러지 및 응집슬러지의 처분을 위해서는 약품을 이용한 개량 등의 처리가 필요함을 알 수 있었다.

3.2 무기개량제 이용에 따른 하수슬러지의 응집 특성

앞의 실험 결과 하수슬러지 및 응집슬러지의 침강성 및 탈수 특성을 확인하였다. 본 절에서는 이를 개

- pp. 077-087
- pp. 089-096
- pp. 097-106
- pp. 107-113
- pp. 115-122
- pp. 123-130
- pp. 131-143
- pp. 145-152
- pp. 153-158
- pp. 159-168
- pp. 169-181
- pp. 183-192
- pp. 193-200

선하기 위해 무기개량제를 주입하여 하수슬러지의 개량 가능성을 확인하며, 무기개량제 주입량에 따른 하수슬러지의 응집 특성을 평가하였다. 무기개량제로는 PAC를 사용하여 주입량의 변화에 따른 영향을 살펴 보았다. PAC의 주입량은 Al^{3+} 기준으로 나타내었으며 최대 25 mg/L까지 주입하여 응집실험을 진행하였다.

무기개량제 주입량에 따른 여과시간(CST) 및 SRF 결과는 Fig 1에 나타내었다. Fig 1(a)에서 보듯이 무기개량제를 주입하지 않은 하수슬러지의 CST는 약 234 sec로 측정되었으며, 무기개량제 주입량이 증가함에 따라 CST가 점차 낮아지는 경향을 나타내었다. 무기개량제를 최대 25 mg/L로 주입했을 때, 약 137 sec의 짧은 CST로 측정되어 탈수성 개선에 상당한 효과가

있는 것으로 판단되었다. 이는 무기개량제가 탈수 케이크를 다공질화하며 수분구조에 영향을 미친 결과로 사료된다 (Song, 2008). 또한, CST 실험을 통하여 도출된 하수슬러지의 SRF 값은 약 5.6×10^{11} m/kg으로 나타났으며 무기개량제를 최대 25 mg/L로 주입했을 때, 약 2.28×10^{11} m/kg으로 낮아지는 결과를 확인하였다. 응집제 주입량이 증가할수록 침강 속도가 빨라지는 결과가 보고된 바 있으며 (Baik et al., 2014), CST와 SRF 결과를 통해 무기개량제의 주입이 하수슬러지의 탈수성 개선에 효과적임을 확인하였다.

Fig 2의 (a)와 (b)는 무기개량제 주입량에 따른 슬러지의 함수율과 SV_{30} 을 분석하여 나타낸 것이다. 하수슬러지의 함수율은 약 99 % 에서 무기개량제를 주입함에

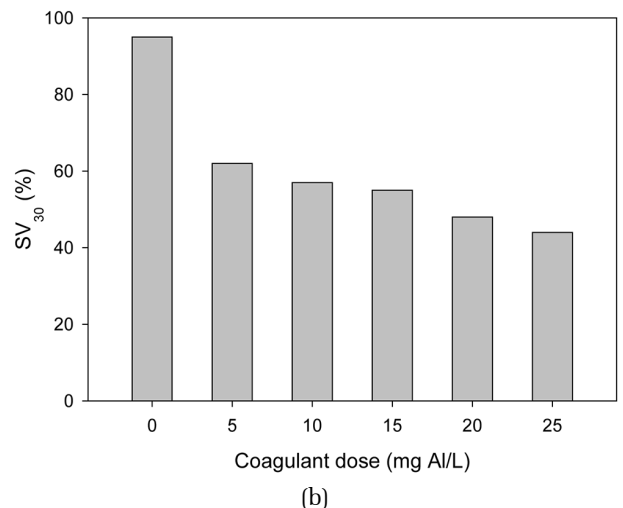
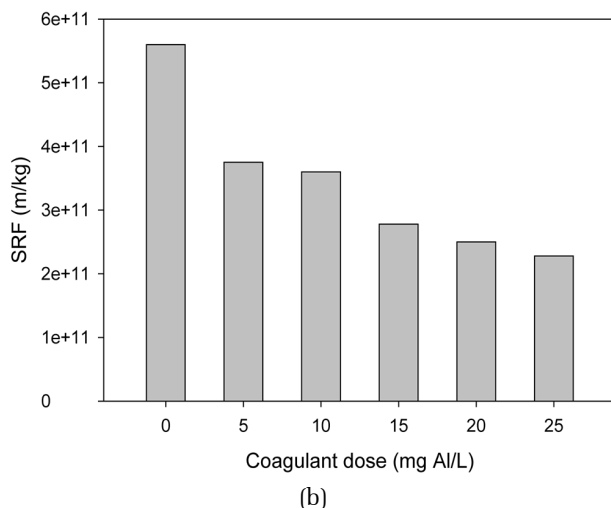
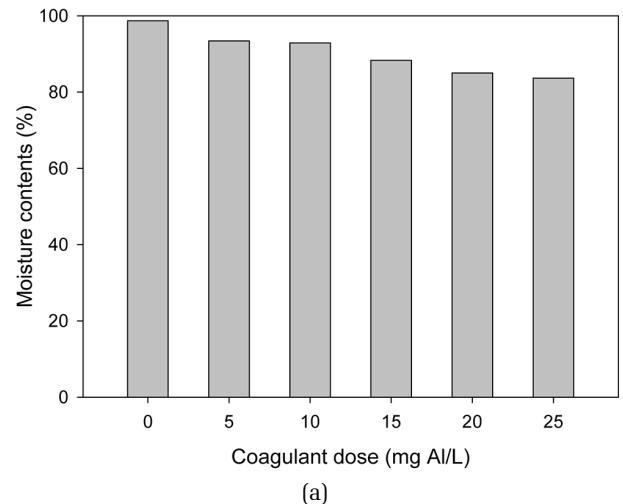
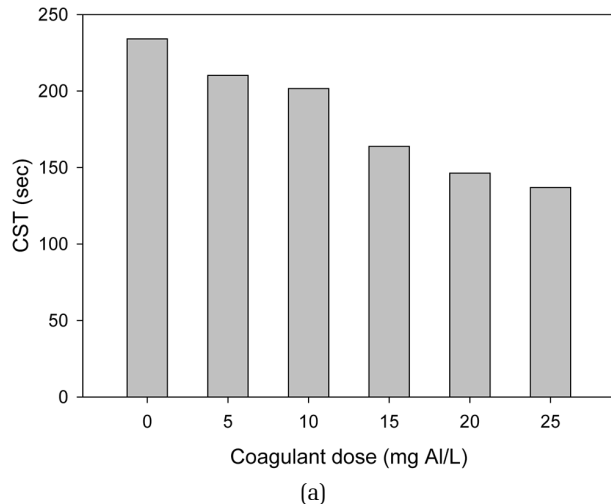


Fig. 1. Effect of coagulant dose on the CST (a) and SRF (b) of sewage sludge.

Fig. 2. Effect of coagulant dose on the moisture contents (a) and SV_{30} (b) of sewage sludge.



따라 최대 약 84%까지 낮아졌으며, SV₃₀ 또한 95%에서 최대 44%까지 낮아져 무기개량제의 주입이 슬러지의 함수율과 침강성 개선에 상당한 효과가 있는 것으로 판단되었다. 또한, 하수슬러지의 혼합 농축 후 여액의 탁도는 무기개량제 주입 전에는 약 98.7 NTU 수준으로 높았으나, 무기개량제를 주입량을 5, 10, 15, 20, 25 mg/L로 증가시킴에 따라 약 67, 54, 46, 44, 36 NTU로 개선되는 경향을 나타냈다. 이는 무기개량제로 주입된 PAC의 3가 양이온인 Al³⁺가 슬러지 플럭을 구성하는 2가 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺ 등)과의 이온교환으로 플럭 응집성을 증가시키고 케이크 내 함수율을 감소시킨 결과 때문인 것으로 보인다 (Lee, 2008).

무기개량제 주입량에 따른 응집 실험을 진행한 후 슬러지의 TS, VS 및 VS/TS를 Fig 3에 나타내었다. 하수슬러지의 초기 TS는 약 9950 kg/m³, VS는 약 8400 kg/m³이었으며, 무기개량제를 최대 25 mg/L로 주입했을 때 TS는 약 14,150 kg/m³, VS는 약 10,700 kg/m³까지 증가되었다. 무기개량제 주입량이 증가하며 TS와 VS가 점차적으로 증가함에 따라, 슬러지 플럭이 응결되며 플럭의 크기가 증대한 결과로 판단되었다.

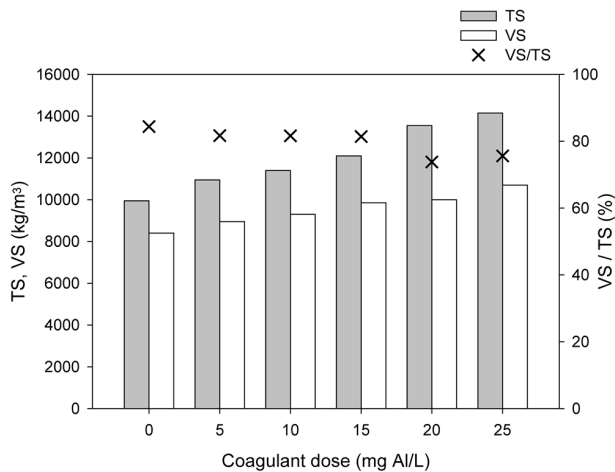


Fig. 3. Effect of coagulant dose on the TS and VS of sewage sludge.

3.3 대체소재로서 응집슬러지 이용에 따른 하수슬러지의 응집 특성 변화

앞의 실험 결과 무기개량제를 이용한 하수슬러지의 응집 특성을 확인하였다. 본 절에서는 무기개량제의 사용을 저감하고 대체소재로서 응집슬러지를 사용하기 위해 다양한 비율의 혼합 실험을 통해 응집슬러지

의 대체소재 가능성을 살펴보았다.

다양한 혼합비율로 실험한 CST, SRF 결과를 Fig 4에 나타내었다. 하수슬러지와 응집슬러지를 9:1 부피비로 혼합하였을 때 CST는 약 182 sec로 측정되었으며, 이는 무기개량제를 10 mg/L 주입한 결과(약 202 sec)보다 짧은 결과로 상당한 개선 효과를 확인하였다. 또한 부피비를 1:1로 혼합하였을 때 CST는 101 sec로 아주 낮은 CST 결과로 앞선 실험에서 무기개량제를 최대주입량(25 mg/L)으로 주입한 결과(약 137 sec)보다 우수한 것으로 나타났다. 이는 응집슬러지 내 수산화알루미늄과 같은 금속수화물이 하수슬러지 입자 표면의 정전기를 중화하며, 플록을 증대시킨 결과로 판단되며 이로 인해 침전물이 향상된 것으로 보인다. 이와 유사하게 Alum

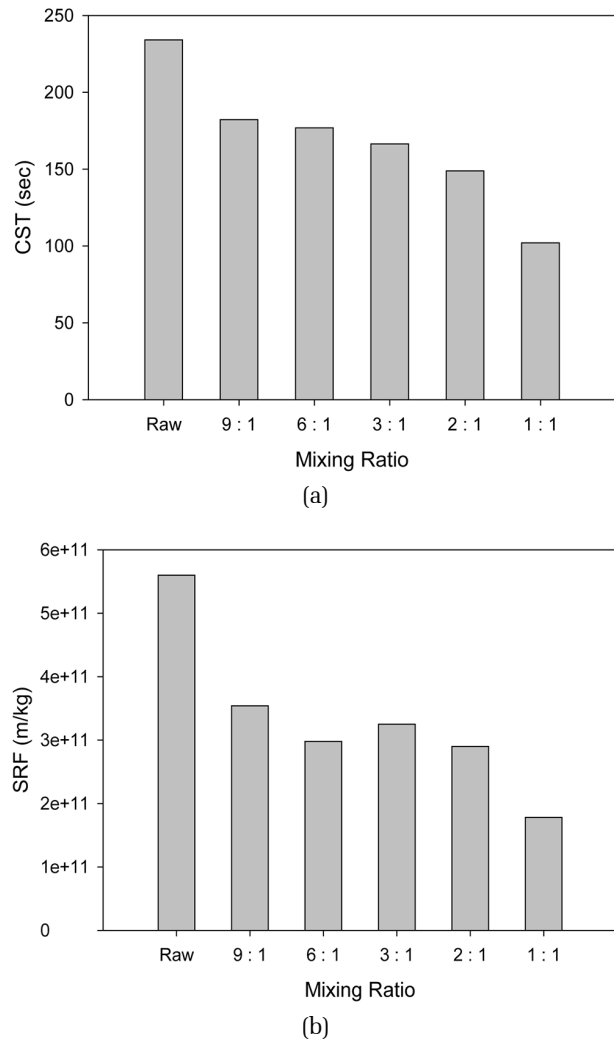


Fig. 4. Effect of mixing ratio on the CST (a) and SRF (b) of sewage sludge.



응집슬러지를 응집제 및 응집보조제로서 재활용 가능성을 평가한 연구에서 폐수의 현탁된 미립자와 유기물 등이 정전기적 중화에 의해 슬러지 플록에 흡착되어 수질이 개선된다고 보고된 바 있다 (Jangkorn et al., 2011). Fig 4(b)에서 보듯이 SRF는 부피비를 9:1로 혼합하였을 때 약 3.5×10^{11} m/kg으로 무기개량제를 10 mg/L 주입한 결과 보다 작게 나타났다. 이후 응집슬러지 비율을 증가시켜 6:1, 3:1, 2:1로 혼합비를 증가시켰을 때, SRF 값은 약 3.0×10^{11} m/kg으로 응집슬러지 비율 증가에 따른 감소는 미비한 것으로 확인되었다. 그러나 1:1 부피비로 혼합하였을 때는 SRF 값이 약 1.8×10^{11} m/kg으로 혼합 이전보다 약 68% 감소하여 무기개량제를 25 mg/L로 주입했을 때보다 탈수성이 우수한 결과를 얻었다.

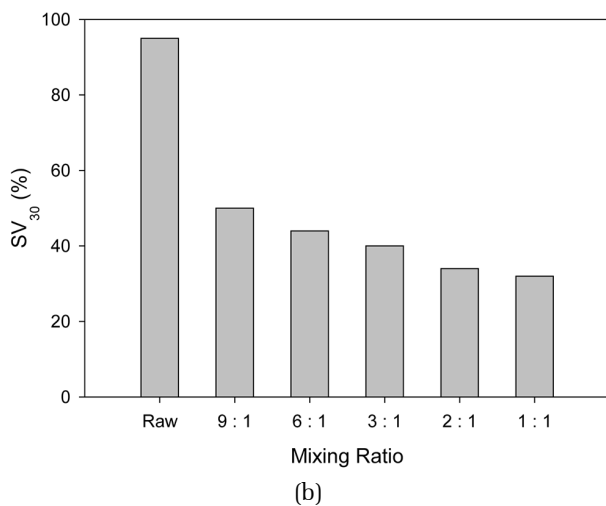
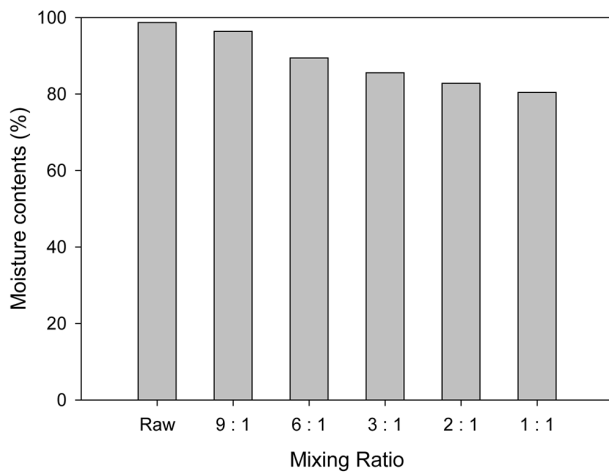


Fig. 5. Effect of mixing ratio on the moisture contents (a) and SV₃₀ (b) of mixed sludge.

슬러지 혼합 비율에 따른 혼합슬러지의 탈수성 및 침강성 평가를 위해 혼합 슬러지의 함수율과 SV₃₀을 분석하여 나타내었다. Fig 5(a)에서 보듯이 함수율은 9:1 혼합비에서 약 96%, 1:1 혼합비에서는 약 80%까지 낮아졌다. 9:1 부피비 혼합에서 슬러지의 함수율 감소는 다소 미비했으나, 응집슬러지의 혼합 부피비를 증가시킴에 따라 2:1, 1:1 혼합 실험에서는 무기개량제를 25 mg/L 주입한 결과(약 84%)보다 개선되는 결과를 확인하였다. 하수슬러지와 응집슬러지의 혼합으로 추가적인 플록 형성 및 플록 크기가 증대되어 나타난 결과로, 플록의 크기가 커짐에 따라 슬러지의 탈수성이 개선된 것으로 보인다 (Fitria et al., 2014). 또한 SV₃₀은 초기 95%에서 1:1 비율로 혼합시 약 32%까지 감소되어 플록의 크기 증대가 탈수성뿐만 아니라 침강 속도까지 개선시키는 것을 확인하였다 (Dyer et al., 1999).

Fig 6은 하수슬러지와 응집슬러지의 혼합 비율에 따라 TS, VS 및 VS/TS 결과를 나타낸 것이다. 하수슬러지와 응집슬러지의 혼합 비율이 증가함에 따라 TS와 VS가 각각 약 59%, 53% 증가되어 슬러지 플록의 크기가 증대하는 것을 확인하였다. 또한 응집슬러지의 VS 함량은 하수슬러지에 비해 적기 때문에, 혼화를 통해 VS/TS가 약 81% 수준까지 감소하는 것으로 나타났다. 혼합 전 하수슬러지 여액의 탁도는 약 99 NTU, 응집슬러지 여액의 탁도는 약 46 NTU 였으나, 1:1 비율로 혼합 뒤 여액의 탁도는 약 16 NTU 수준까지 감소하였다. 이를 통해 추가적인 개량제의 주입 없이

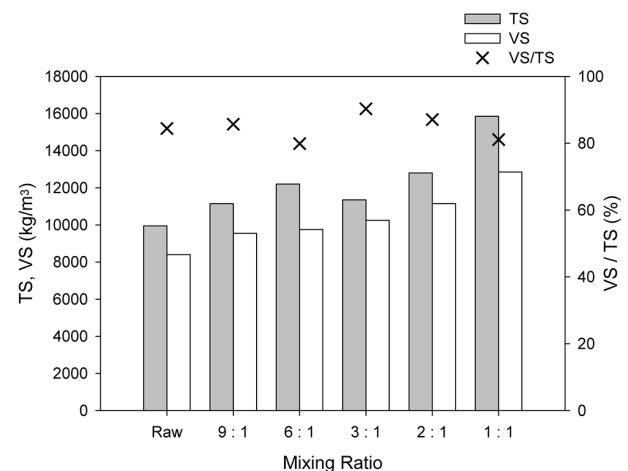


Fig. 6. Effect of mixing ratio on the TS and VS of mixed sludge.



응집슬러지와와의 혼합으로 하수슬러지의 개량뿐만 아니라 슬러지 여액의 수질 개선에도 효과가 있음을 확인하였다.

향후 현장적용을 위해서는 총인 처리를 위한 응집 시설에서는 배출되는 응집슬러지를 별도 저장하여 슬러지 농축조 주입 전 하수슬러지와 일정비율로 혼합하여 농축조로 이송함으로써 슬러지의 침전성을 향상시킬 수 있을 것이며, 하수처리시설 여건 등으로 응집 슬러지의 확보가 어려운 경우에는 정수공정에서 배출되는 응집슬러지의 혼합도 고려해 볼 수 있을 것이다. 이 경우에는 추가적인 실험을 통하여 슬러지의 특성 변화를 확인하고 적절한 혼합비율을 확인할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 하수슬러지의 개량을 위한 무기개량제의 이용 및 대체소재로서 응집슬러지의 이용에 대해 적용가능성 및 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 무기개량제를 이용하여 탈수성 및 침강성을 평가한 결과, 25 mg/L 까지 주입량이 증가함에 따라 슬러지의 탈수성 및 침강성이 향상되는 것으로 나타났다.

2) 하수슬러지의 개량에 있어, 무기개량제의 대체소재로서 응집공정에서 나오는 응집슬러지의 활용 가능성을 확인하였으며, 슬러지의 특성 및 현장 조건에 따라 적절한 비율로 활용 시 하수슬러지 개량 효율을 높일 수 있을 것으로 기대되었다. 또한, 무기개량제 사용량 저감 및 슬러지 처분성 개선에 따라 경제성에서도 효과적일 것으로 예상되었다.

3) 하수슬러지 및 응집슬러지는 발생 시기 및 지역, 공정, 사용 약품 등에 따라 많은 차이점을 가지고 있어 대체소재로서 응집슬러지를 사용하기 위해서는 다양한 조건에 대한 후속연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(17CTAP-C116746-02)의 지원에 의하여 수행된 연구 결과이며, 이에 감사드립니다.

References

Baik, S.J., Jo, J.M., Song, H.W. and Han, L.S. (2014). Variation of Sedimentation & Dewaterability Characteristics of Sewage Sludge under various, J. Korean Soc. Water Environ., 30(3), 311-318.

Bruus, J.H., Christensen, J.R., and Rasmussen, H. (1993). Anaerobic storage of activated sludge: effects on conditioning and dewatering performance, Water Sci. Technol., 28(1), 109-116.

Dyer, K.R., Manning, A.J. (1999). Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions, J. Sea Res., 41(1-2), 87-95.

Fitria, D., Scholz, M., Swift, G.M., and Hutchinson, S.M. (2014). Impact of sludge floc size and water composition on dewaterability, Chem. Eng. Technol., 37(3), 471-477.

Han, G.S., Kim, G.H., Jang, S.Y., Ahn, B.S., Lee, G.S., Lee, J.G., Choi, Y.J., Kwon, H.G and Jeon, T.S. (2015). Reduction of sludge dewatering chemicals and improvement of water content, The Office Of Waterworks Seoul Metropolitan Government, pp. 864-889.

Han, S.W., Lee, C.H., Lee, J.K. and Kang, L.S. (2012). Changes in the Removal Efficiency of Total Phosphorus by the Basicity of Al(III) Coagulant, J. Korean Soc. Water Wastewater, 26(2), 229-236.

Im, H.J. (2002). Dewatering of Thickened and Digested sludge of Sewage Treatment using Polymer, Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology, pp. 13-15.

Jangkorn, S., Kuhakaew, S., Theantanoo, S., Klinla-Or, H., and Sriwiriyarat, T. (2011). Evaluation of reusing alum sludge for the coagulation of industrial wastewater containing mixed anionic surfactants, J. Environ. Sci., 23(4), 587-594.

Karr, P.R., Keinath, T.M. (1978). Influence of particle size on sludge dewaterability, J. Water Pollut. Control. Federation, 50(8), 1911-1930.

Kim, J.E. (2006). Estimation of dewatering factor for optimized dewatering system of sewage sludge, Master's Thesis, Dong-A University, pp. 35-41.

Kwak, J.U. (2014). *Physico-chemical Principle & Practice of Water Treatment*. Sung-An dang, Chapter 17.

Kwon, J.H., Koo, S.B. and Rye, S.H. (2001). Seasonal variation in dewatering characteristics of waterworks sludge, J. Korean Soc. Water Wastewater, 15(1), 58-63.

Lee, C.H. (2008). The Sludge Conditioning and Dewatering Properties of Waste Sludge with Metal Salt, J. Korean Soc. Environ. Eng., 30(8), 775-779.

Lee, C.H., Ahn, K.H. and Song, S.K. (2010). Dewatering

pp. 077-087

pp. 089-096

pp. 097-106

pp. 107-113

pp. 115-122

pp. 123-130

pp. 131-143

pp. 145-152

pp. 153-158

pp. 159-168

pp. 169-181

pp. 183-192

pp. 193-200

- characteristics for physico-chemical properties with sewage sludge, *KSBB J.*, 25(1), 41-46.
- Mesdaghinia, A.R., MASOUD, A., NASERI, S., and Vaezi, F. (2003). Effect of coagulants on electrochemical process for phosphorus removal from activated sludge effluent, *Iran. J. Public Health.*, 32(4), 1-7.
- Park, W.C., Lee, M.A. and Sung I.W. (2014). Phosphorus Removal from Advanced Wastewater Treatment Process Using PAC, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 36(2), 96-102.
- Song, H.S. (2008). Auto-control of polymer dose for efficient dewatering of sewage sludge, Master's Thesis, Inje University, pp. 25-43.
- Xie, W., Wang, Q., Ma, H., Ohsumi, Y., and Ogawa, H.I. (2005). Study on phosphorus removal using a coagulation system, *Process Biochem.*, 40(8), 2623-2627.