



활성슬러지 침전성 향상을 위한 활성탄 가중응집제 적용 연구

Application of activated carbon induced ballasted flocculation for improving activated sludge settleability

김용범·양혜지·최영균*

Yongbum Kim·Hyeji Yang·Younggun Choi*

충남대학교 환경IT융합공학과

Department of Environmental IT Convergence Engineering, Chungnam National University

pp. 113-120

pp. 121-133

pp. 135-142

pp. 143-152

pp. 153-162

pp. 163-174

ABSTRACT

The effects of activated carbon originated Ballasted Flocculant (BF) on the settleability of activated sludge and the recovery of BF by Hydro-cyclone (HC) were analyzed experimentally. Two kinds of BF (M-I: 125-250 μm , M-II: 250-425 μm in dia.) and three kinds of activated sludges with different SS concentration (2,300-7,100 mg/L) were applied for this study. With the dosage variation of BF from 0.14 to 1.3 g-BF/g-SS, we could obtain 24-31% improvement in SV30 (Sludge Volume after 30min sedimentation) for the lowest SS concentration sludge (2,300 mg/L). Whereas the SV30 improvement was much higher as 44-48% for the highest SS concentration sludge (7,100 mg/L). The settling characteristics of the sludge with BF followed Vesilind model the best among three models (Vesilind, Takacs and Cho model). HC could effectively separate BF with the separation efficiency of 70-90% and over 95% separation efficiency could be obtained when the HC was applied twice.

Key words: Ballasted flocculant, Recovery efficiency, Sludge settling, Sedimentation model, Sludge induced activated carbon

주제어: 가중응집제, 회수율, 슬러지 침전성, 침전모델, 슬러지 기반 활성탄

Received 24 March 2021, revised 30 March 2021, accepted 1 April 2021.

*Corresponding author: Younggun Choi (E-mail: Choi@cnu.cc.kr)

- 김용범 (석사과정) / Yongbum Kim (Master Student)
대전광역시 유성구 대학로 99, 34134
99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea
- 양혜지 (석사과정) / Hyeji Yang (Master Student)
대전광역시 유성구 대학로 99, 34134
99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea
- 최영균 (교수) / Younggun Choi (Professor)
대전광역시 유성구 대학로 99, 34134
99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

소규모 하수처리장은 유입부하의 변동이 크고 대규모 하수처리장에 비해 전문적인 유지관리가 불가능한 경우가 많아 방류수질이 악화되는 경우가 많다 (Metcalf and Eddy, 2015). 특히 생물반응조 시스템을 채택하고 있는 소규모 하수처리시설은 슬러지의 침전성 불량 현상이 빈번히 발생한다. 국내에서 운영 중인 500 m³/d 미만의 소규모 하수처리시설은 총 3,440개소이고 500 m³/d 이상 소규모 하수처리시설은 총 671개소이다 (Ministry of Environment, 2019). 이 중 500 m³/d 미만의 소규모 하수처리시설에서 운영상의 어려움이 많이 확인되고 있으며, 500 m³/d 이상의 소규모처리시설에 비해 방류수질 기준 초과빈도가 2-5배 정도 높은 것으로 보고되었다 (Kim and Kim, 2016). 이러한 수질 기준 초과는 생물반응조 시스템의 최종침전조 운영효율과 밀접한 연관이 있다. 유입부하의 심각한 변동 및 적절한 유지관리의 부재가 생물학적 고형물의 안정적인 침전을 저해하고 처리수질의 악화를 직접적으로 초래한다고 볼 수 있는 것이다 (Seo et al., 2004). 이에 소규모 하수처리시설의 활성슬러지 침전성을 개선하고자 가중응집제(Ballasted Flocculant, BF)를 활용한 연구가 최근 들어 활발히 진행되고 있다 (Chhuon et al., 2020; Kim and Kim, 2016; Kim and Seo, 2019).

가중응집제는 기본적으로 비중이 커야하고 미생물에 독성이 없어야 한다. 대표적인 가중응집제로서 micro-sand, magnetite, bentonite, 유리입자, diatomite, 제강슬래그, mill scale 등이 있으며, 실험실 규모에서 실규모까지 다양한 형태의 연구가 수행되었다 (Chhuon et al., 2020; Dejardins et al., 2002; Kim et al., 2003; Lee et al., 2017; Miklos et al., 2013; Moon et al., 2017; Park et al., 2002). 가중응집제는 슬러지의 침전성을 개선시킬 수 있을 뿐만 아니라 탁도제거에도 유리한 것으로 알려져 있다. 또한 일부 가중응집제의 경우 회수가 용이하여 재사용이 가능한 것으로 보고되었다 (Kim and Seo, 2019; Lee et al., 2017). Actiflo[®](Veolia Water Solutions & Tech. Inc.)와 RapiSand[™](WesTech Eng. Inc.) 공정에서 주로 활용되는 micro-sand 가중응집제의 경우에는 응집보조제인 polymer를 함께 사용하여 슬러지의 침전효율을 극대화시키는 것으로 알려져 있다 (Gasperi et al., 2012). 그러나 SS 농도가 높은 하수처리장 월류수(Combined Sewer Overflow, CSO)의 경우에는 micro-sand

를 주입하여도 처리효율에 큰 변화가 없다는 결과도 보고되었다 (Gwon et al., 2011). 제강슬래그를 가중응집제로 활용한 연구에서는 FeCl₃ 또는 PACl 응집제를 직접 투입한 경우에 비해 10배 이상의 침전속도 향상을 도모할 수 있는 것으로 보고되었다 (Kim et al., 2003). 그러나 이 연구에서는 가중응집제 주입량 산정 시 슬러지의 SS농도를 고려하지는 않았으며, 가중응집제 회수에 대한 연구도 수행하지는 않았다 (Kim et al., 2003). magnetite와 mill scale을 활용한 연구에서는 가중응집제 적용 시 슬러지의 침전성이 크게 향상되는 것을 확인하였으나, 가중응집제의 크기에 따라 반응조의 바닥에 침적되거나 회수가 원활히 되지 않는 문제를 함께 보이는 것으로 나타났다 (Arol and Aydogan, 2004; Chhuon et al., 2020; Lee et al., 2017; Seo and Kim, 2019; Zhang et al., 2017).

본 연구에서는 기존의 가중응집제가 가지고 있는 여러 문제점들, 특히 낮은 가중응집효율 및 가중응집제 회수의 어려움을 해결하고자 슬러지 기반 가중응집제의 적용성을 평가하였다. 하수슬러지의 건조탄화를 통해 제작된 활성탄 가중응집제를 농도 2,300-7,100 mg/L 활성슬러지에 투입하여 침전성 개선효율과 hydro-cyclone 적용 시 가중응집제 회수율을 파악하였다. 또한 가중응집제가 적용된 슬러지의 이론적 침전 특성을 다양한 종류의 침전경험식 적용을 통해 도출하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 가중응집제

본 연구에서 가중응집제로 활용한 활성탄은 C 하수처리장의 슬러지를 1,100°C에서 탄화하여 제조하였다. 이 활성탄은 고온에서 탄화된 탄소알갱이의 미립자로서 강알칼리성이다. 현장에서는 발전소 또는 시멘트 회사의 보조연료로 사용되고 있다 (Oh et al., 2016). 가중응집제로 사용된 활성탄의 성분분석 결과는 Table 1과 같다. 활성탄은 회분함량이 약 50% 이상, 발열량은 약 3,000 kcal/kg 이상이며, 중금속 함유량이 낮아 가중응집제로 충분히 활용 가능한 것으로 보고되었다 (Oh et al., 2016). 활성탄은 Ball Mill(Dathan Scientific Co. Ltd., Korea)을 이용하여 분쇄 후 표준체(Sie200-040, Sie200-060, Sie200-120, Korea)를 이용하여



Table 1. Composition of the sludge induced activated carbon

Component	Weight(%)	Atomic(%)
C	53.79	65.52
O	28.84	26.38
Mg	1.39	0.83
Al	2.39	1.29
Si	2.99	1.56
P	5.69	2.69
S	0.27	0.12
K	0.97	0.36
Ca	2.67	0.98
Fe	0.99	0.26

125-250 μm(M-I)과 250-425 μm(M-II)로 구분하여 사용하였다.

2.2 침전성 평가

가중응집제 주입에 따른 슬러지의 침전특성을 파악하기 위해 SV₃₀(Sludge Volume after 30min settling, mL/L), SVI₃₀(Sludge Volume Index after 30min settling, mL/g), ZSV(Zone Settling Velocity, m/hr)를 분석하였다 (Metcalf and Eddy, 2015). 실험에 사용된 활성슬러지는 D 하수처리장 반송슬러지를 2,300, 4,300, 7,100 mg/L가 되도록 희석하여 사용하였다. 활성탄은 125-250 μm(M-I)와 250-425 μm(M-II) 각 크기별로 1, 2, 3 g이 되도록 주입하였다. 따라서 총 실험 경우의 수는 (슬러지 농도 3구간) × (활성탄 크기 2 종류) × (활성탄 주입량 3구간) = 18회가 되었다.

각각의 회분실험은 가중응집제 주입 직후 jar-tester (C-JT-1, Changshin science, Korea)에서 5분간 150 rpm의 속도로 교반 후 1 L mass-cylinder로 옮겨서 실시하였다. Mass-cylinder로 옮길 때에는 초기 energy-dissipating 시간을 최소화하기 위해 최대한 서서히 슬러지를 주입하였다.

2.3 가중응집제 회수율 평가

본 연구에서는 가중응집제의 회수를 위해 물리적 선별 방법인 hydro-cyclone(HC)을 적용하였다. Hydro-cyclone은 원심력과 비중차에 의해 유체로부터 부유입자가 고액분리 되는 장치로서 본 실험에 사용된 HC를 Fig. 1에 제시하였다.

가중응집제의 회수는 슬러지의 성상에 따라서도 큰 차이를 나타내기 때문에 앞서 제시하였던 D 하수처리장

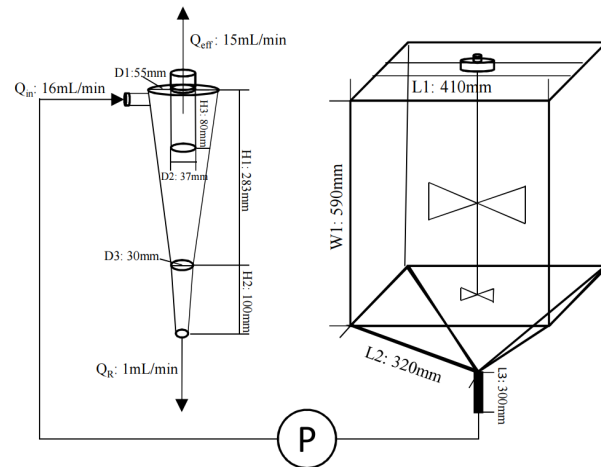


Fig 1. A schematic of hydro-cyclone(HC) used for separation of ballasted flocculant(BF).

슬러지를 대상으로 한 총 18회의 침전특성 실험과는 별도로 총 세 종류의 슬러지를 대상으로 실험을 실시하였다. D 하수처리장, DS 하수처리장, A 하수처리장에서 반송슬러지를 채취하여 일정 농도로 희석한 후 M-I, M-II 활성탄을 각각 2 g씩 원수조에 주입, 가중응집제 회수율을 파악하였다. 이때 슬러지의 농도는 4,300 mg/L로 고정하였다. HC 원수조의 부피, 유입유량, 상부 유출유량, 하수배출량은 Fig. 1에 함께 제시하였다. HC를 운전하기 이전에 내부 배관 등에 혼합액이 충분히 채워질 수 있도록 10분간 사전 운전한 이후 본격적으로 가중응집제 회수실험을 진행하였다. 회수시간은 1분으로 하였으며 HC 상하부로 배출되는 활성탄을 채집하여 충분히 세척한 이후 건조 무게를 측정하여 회수율을 평가하였다.

HC의 상부로 유출된 활성탄의 유출율과 하부로부터 회수된 활성탄의 회수율은 식 (1)과 (2)에 따라 계산되었다. HC를 반복해서 적용하였을 경우 회수율 계산에서는 이전 HC의 상부로부터 유출된 활성탄량(mass)을 다음 단계 HC 적용시 주입량으로 적용하였다.

$$R_T = \frac{M_T}{M} \times 100 \quad (1)$$

$$R_B = \frac{M_B}{M} \times 100 \quad (2)$$

여기서,

R_T: HC의 상부로 유출된 활성탄의 유출율(%)

R_B: HC의 하부로 회수된 활성탄의 회수율(%)

M: HC로 주입된 활성탄의 전체 mass(g)
 M_T: HC 상부로 유출된 활성탄 mass(g)
 M_B: HC 하부로부터 회수된 활성탄 mass(g)

2.4 슬러지 침전모델

D 하수처리장 반송슬러지를 단계별로 희석하여 얻은 1-7 g/L 농도의 활성슬러지를 대상으로 M-I, M-II 활성탄을 주입(2 g/L)하여 분석한 ZSV 결과를 다양한 슬러지 침전모델에 적용하였다. 침전특성의 이론적 해석을 위해 본 연구에서 적용한 침전모델은 Vesilind (Vesilind, 1968), Takacs(Takacs et al., 1991), Cho(Cho et al., 1993) model이고, 각각 식 (3), (4), (5)와 같다. 세 모델 모두 활성슬러지의 침전특성에 대한 이론적 해석을 위해 광범위하게 적용되고 있는 모델이다.

$$V_s = V_0 e^{-nX} \tag{3}$$

$$V_s = V_0 e^{-r_b X - X_{min}} - e^{-r_p X - X_{min}} \tag{4}$$

$$V_s = k' \frac{e^{-n'X}}{X} \tag{5}$$

여기서,
 V_s: ZSV (m/hr)
 V₀: max. settling velocity (m/hr)
 n: Vesilind constant (L/g)
 n': Cho's constant
 X: SS concentration (g/L)
 r_b: settling constant at hindered settling velocity
 r_p: settling constant at low SS concentration
 k': Cho's mass flux constant (kg/m² · hr)

3. 결과 및 고찰

3.1 가중응집제가 활성슬러지 침전특성에 미치는 영향

D 하수처리장 반송슬러지를 단계별로 희석하여 얻은 2,300, 4,300, 7,100 mg/L 농도의 활성슬러지를 대상으로 M-I, M-II 활성탄을 주입하여 분석한 SV₃₀ 결과를 Table 2에 제시하였다. 슬러지 기반 가중응집제의 투입량을 1, 2, 3 g으로 달리 적용하면서 슬러지의 SV₃₀을 파악한 결과 가중응집제 투입에 따른 침전성 개선효과가 뚜렷이 나타났다. 가중응집제 주입 질량비를 0.14-1.3 g-BF/g-SS으로 변경시키며 슬러지 침전성 (SV₃₀) 개선 효과를 평가한 결과, 초기 슬러지 농도가 높을수록 침전성 개선효과가 더 큰 것으로 확인되었다. 초기 슬러지 농도 2,300 mg/L일 때, 침전성 (SV₃₀)이 24-31% 개선된 반면, 슬러지 농도가 7,100 mg/L일 때에는 44-48%로 개선효과가 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다. Cho et al. (2012)의 연구결과에 의하면 분말활성탄은 응집과정에서 플록의 밀도를 증가시켜 침전속도를 전반적으로 향상시키고 슬러지의 압밀침전을 가속화시킬 수 있다고 하였다. 또한 Kim (2018)의 연구에 의하면 슬러지 침전성 개선을 위해 활성탄을 투입한 시료와 투입하지 않은 대조군을 비교 분석하였을 경우 가중응집제를 투입한 시료가 대조군에 비해 더 빠른 침강속도를 나타내는 것으로 보고하였다. 이는 가중응집제의 투입에 따라 슬러지의 자중이 증가해 침전속도를 가속화한다는 선행연구 결과와도 일치한다 (Kim et al., 2017; Kim, 2018; Kim and Seo, 2019).

SV₃₀ 분석결과를 바탕으로 활성슬러지의 대표적 침전성 지표인 SVI₃₀을 계산하여 Fig. 2에 제시하였다.

Table 2. Effects of activated carbon dosage and SS concentration on the SV30

Particle size	Dosage (g)	SS concentration (mg/L)		
		2,300	4,300	7,100
		SV ₃₀ (mL/L)	SV ₃₀ (mL/L)	SV ₃₀ (mL/L)
Control	0 (Control)	210	400	850
M-I (125-250 μm)	1	140	360	570
	2	140	350	480
	3	145	250	440
M-II (250-425 μm)	1	170	395	565
	2	155	280	520
	3	160	270	480

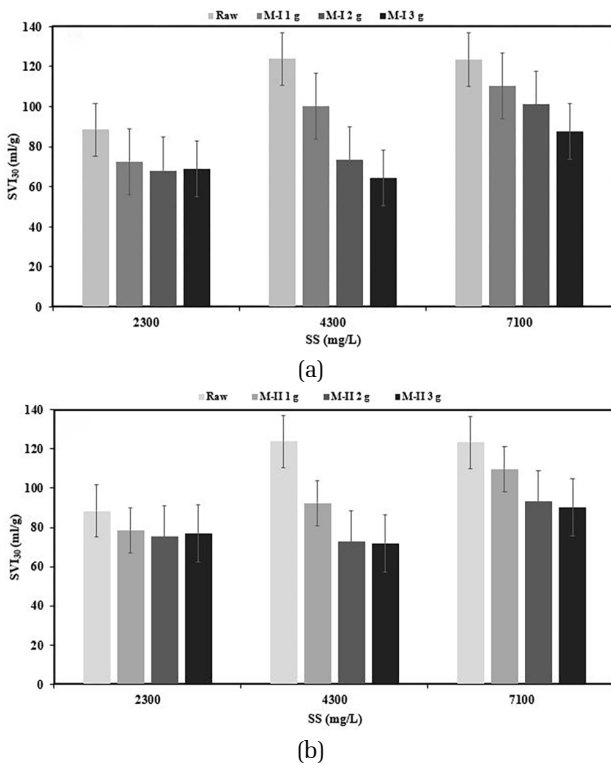


Fig. 2. Effects of M-I (a) and M-II (b) dosage on the SVI₃₀ of the sludge.

SVI₃₀ 결과는 당연히 SV₃₀과 동일한 경향을 갖는 것으로 확인되었다. 특히 슬러지 농도 4,300과 7,100 mg/L 일 경우 대조군 슬러지의 SVI₃₀이 모두 120 ml/g 내외로 비교적 높게 나타났으나, 가중응집제 첨가에 따라 침전성이 급격히 개선되어 비교적 높은 슬러지 농도에서도 SVI₃₀이 100 ml/g 이하로 낮아질 수 있는 것을

확인하였다. 처리 용량 500 m³/d 이하의 소규모 하수 처리시설은 유입부하의 변동이 심해서 활성슬러지의 침전성이 불량한 경우가 매우 많다. 따라서 이러한 소규모처리시설에 본 연구에서 사용한 슬러지 기반 활성탄을 적용할 경우 슬러지의 침전 안정성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

슬러지 플록에 활성탄(M-I, M-II)의 부착특성을 확인하기 위해 실체현미경(Leica EZ4 HD)를 이용한 관찰결과를 Fig. 3에 제시하였다. M-I 활성탄이 M-II 활성탄에 비해 슬러지 플록에 확연히 잘 부착되는 것으로 나타났다. 이는 활성탄의 우수한 흡착 특성과 비중으로 인해 슬러지 플록에 활성탄이 잘 침투되어 부착되는 것으로 판단된다.

3.2 침전모델을 이용한 가중응집슬러지의 침전특성 평가

활성슬러지의 침전특성에 대한 이론적 해석을 위해 상당히 많이 사용되는 세 가지 모델(Vesilind model, Takacs model, Cho model)을 적용하여 슬러지 기반 가중응집제가 활성슬러지의 침전성에 미치는 영향을 이론적으로 파악해보고자 하였다.

침전모델에 포함된 여러 동력학 상수들을 도출하기 위해 Fig. 4과 Table 3에 제시된 ZSV(Zone Settling Velocity)값을 사용하였다. 슬러지의 침전특성을 이론적으로 해석하는 것은 2차침전지의 운영인자 결정과 하수처리장의 부유물질 제거효율 파악에 직접적으로 영향을 주기 때문에 매우 중요한 과정이라 할 수 있다 (Bakiri and Nacef, 2020).

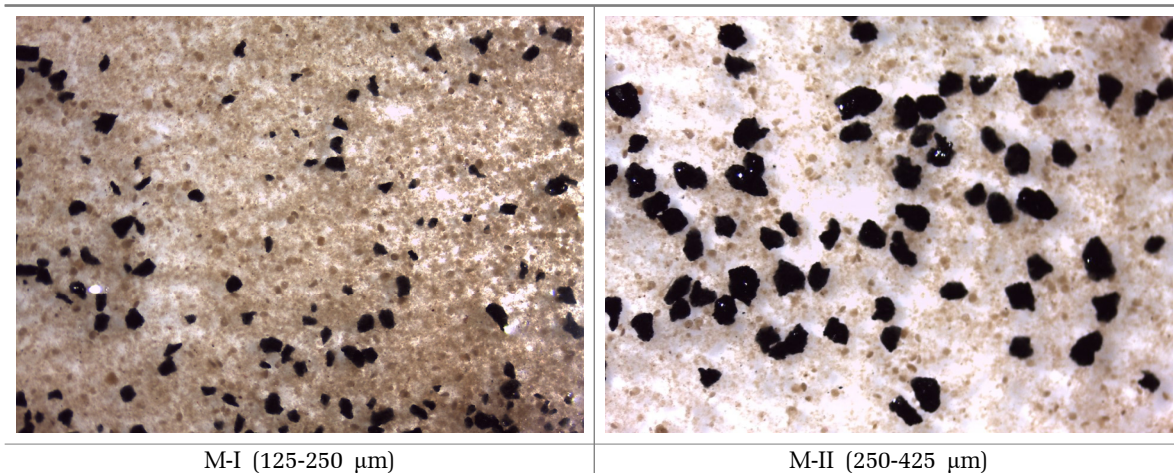


Fig. 3. Photos of M-I and M-II BF(ballasted flocculant) attached on the activated sludge.

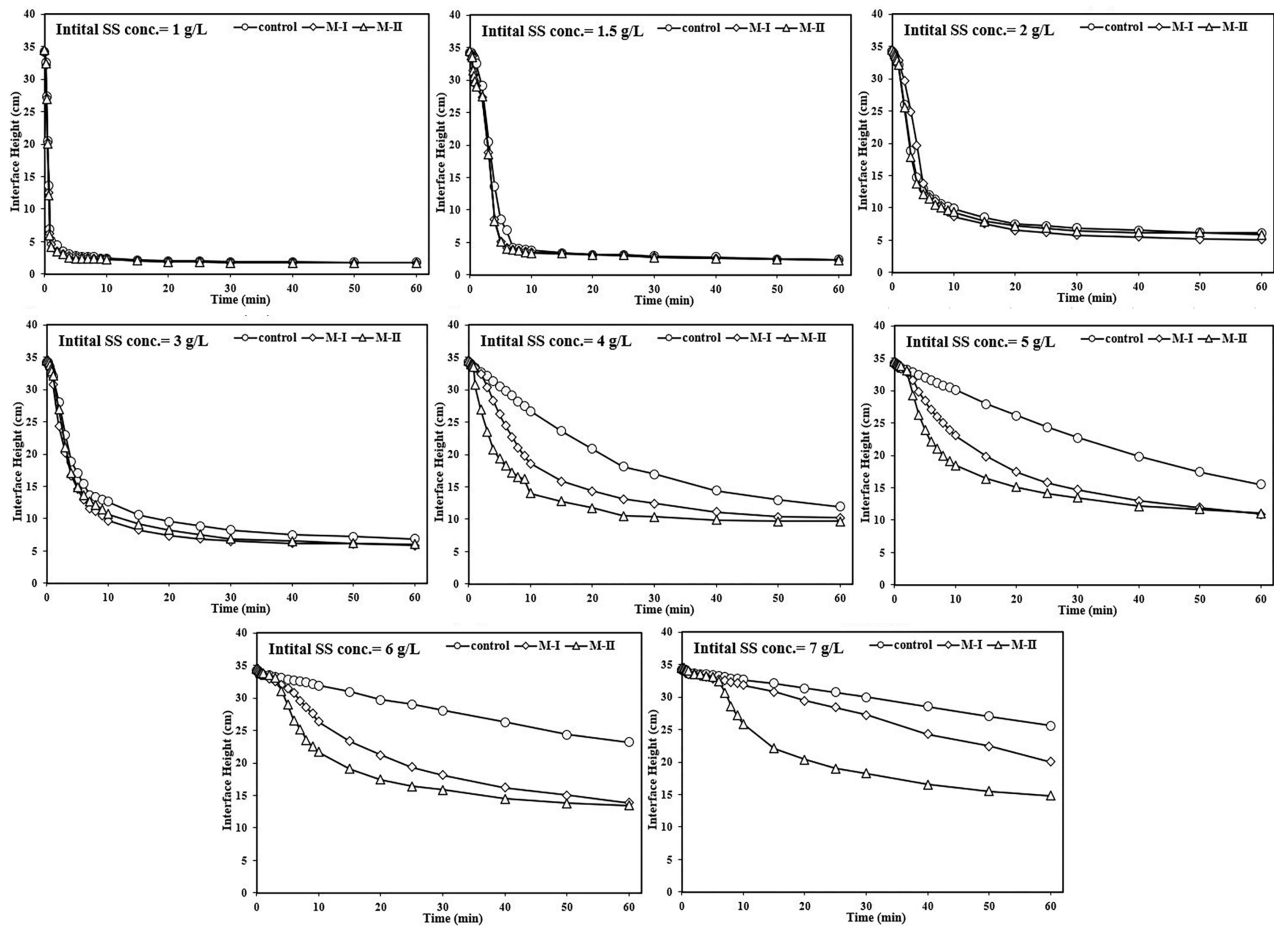


Fig. 4. Interface height variation of the sludge with different initial concentration for calculating ZSV.

Table 3. Zone settling velocity of the sludge

SS concentration (g/L)	Zone settling velocity (m/hr)		
	Control	M-I (125-250 μm)	M-II (250-425 μm)
1	4.25	4.27	4.28
1.5	3.10	3.57	3.61
2	3.13	2.42	3.35
3	2.40	2.90	2.80
4	0.41	0.99	2.27
5	0.27	0.59	1.18
6	0.15	0.31	0.41
7	0.12	0.16	0.19

Fig. 4에 제시한 슬러지 계면의 높이 변화로부터 계산된 ZSV를 Table 3에 제시하였고 이를 바탕으로 도출된 각 침전모델의 상수들을 Table 4에 제시하였다. Fig. 5에는 3가지 침전모델의 회귀분석을 통해 활성슬러지의 SS농도에 따른 침전속도 변화를 제시하였다. 예측결과 대조군(Control)슬러지와 M-I 가중응집제를

첨가한 슬러지는 Vesilind model을 잘 따르는 것으로 확인되었다. 단, 크기가 큰 M-II 가중응집제를 투입한 슬러지의 경우에는 Vesilind model과 Takacs model에 근사하는 것으로 나타났다. 반면 Cho model은 모든 실험결과와 일치하지 않는 것으로 확인되어 가중응집제를 투입한 슬러지의 이론적 해석에 활용되기에는



Table 4. Estimation of the parameters used for Vesilind, Takacs and Cho model

Sedimentation model	Experimental		
	Control	M-I (125~250 μm)	M-II (250~425 μm)
Vesilind model			
V_0	9.59 m/hr	8.75 m/hr	9.43 m/hr
n	0.669	0.550	0.492
R_2	0.898	0.899	0.882
Takacs model			
V_0	9.59 m/hr	8.75 m/hr	9.43 m/hr
r_b	0.669	0.550	0.492
r_p	0.306	0.569	0.247
R^2	0.770	0.449	0.798
Cho model			
k'	19.18 kg/m ² ·hr	17.50 kg/m ² ·hr	18.85 kg/m ² ·hr
n'	0.669	0.550	0.492
R^2	0.731	0.746	0.614

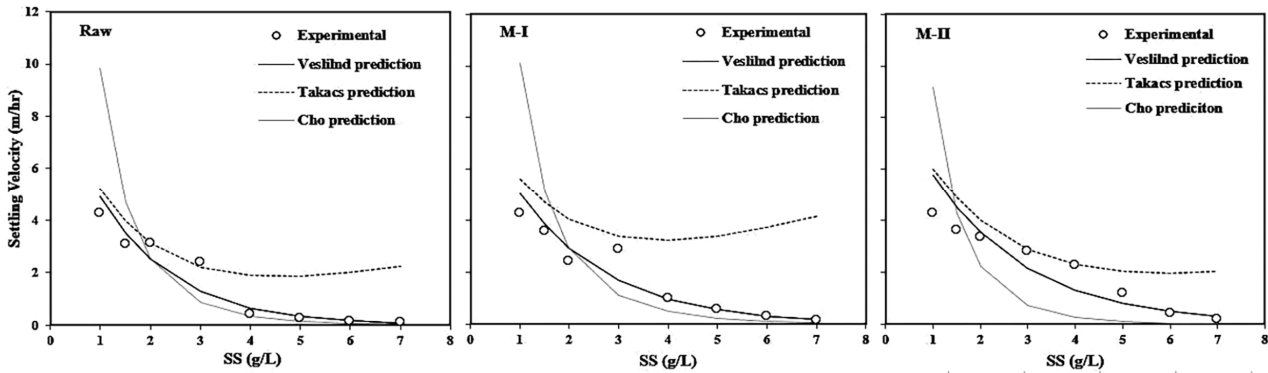


Fig. 5. Theoretical analysis of the settling velocity with three different models.

한계가 있는 것으로 보인다.

각 침전모델에서 제시하는 이론값과 실험을 통해 얻은 ZSV값 간의 상관계수인 R^2 값을 비교한 결과 Vesilind (1968) model, Takacs (1991) model, Cho (1993) model 순으로 상관성이 높은 것으로 확인되어 가중응집제를 투입한 슬러지의 침전특성 해석에는 Vesilind model이 가장 적합한 것으로 판단된다. Chouun et al. (2020)에 따르면 가중응집제로 mill scale을 적용하였을 경우 본 연구와 동일하게 Vesilind model이 슬러지의 침전특성 해석에 가장 적합한 것으로 보고하기도 하였다.

3.3 Hydro-cyclone(HC)을 이용한 가중응집제의 회수율 평가

활성슬러지의 침전성 개선을 위해 투입된 가중응집제는 가능한한 생물반응조로부터 회수를 하는 것이

반응조의 유효 용적 감소 방지 및 각종 기계 장치의 안전성 확보 차원에서 바람직하다. 가중응집제로 해외에서 많이 적용되는 micro-sand나 magnetite와 같은 입자는 비중이 상대적으로 크고 (2.5-5.5 g/cm³) 적용되는 입자의 크기 또한 수십 μm로 상대적으로 작아서 회수에 많은 문제점이 있는 것으로 알려져 있다 (Arol and Aydogan, 2004; Nadya et al., 2015; Seo and Kim, 2019). 그러나 본 연구에서 사용한 활성탄 기반 가중응집제는 비중도 상대적으로 낮고 크기도 비교적 커서 HC를 이용한 입자의 회수가 용이할 것으로 판단되었다. 따라서 일처리 용량 3만 m³/d 규모 이상의 세 곳 하수처리장 활성슬러지를 대상으로 가중응집제를 적용한 후 HC를 이용한 회수특성을 파악해 보았다.

Fig. 6에 각 처리장(D 하수처리장, DS 하수처리장, A 하수처리장) 활성슬러지를 대상으로 M-I, M-II 활성탄을 투입하여 침전, 분리된 슬러지를 대상으로 HC를

pp. 113-120

pp. 121-133

pp. 135-142

pp. 143-152

pp. 153-162

pp. 163-174

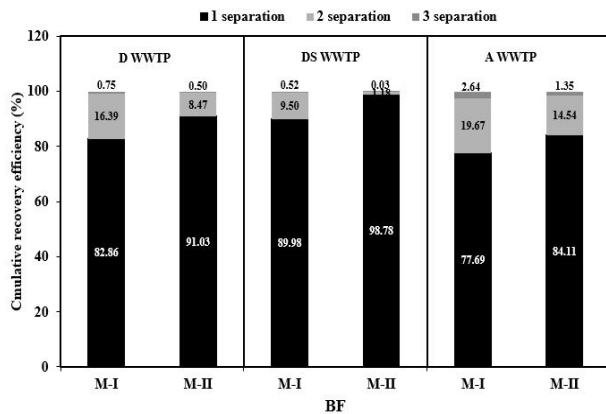


Fig. 6. Effects of BF size and activated sludge species on the BF recovery efficiencies by HC.

이용하여 가중응집제 누적 회수율 분석한 결과를 제시하였다. 각 처리장은 A₂O(Anaerobic Anoxic Oxidation)공법을 기반으로 운영되고 있으나 D 처리장과 DS 처리장은 방류수 총인 규제 농도 차이와 이로 인한 응집제 투입량이 다른 것으로 추정되며, A 처리장은 MBR(Membrane Bio-Reactor)이 적용되어 육안으로 관찰되는 슬러지의 성상이 다른 처리장과 확연한 차이를 나타내었다. 이렇듯 슬러지의 기본적인 성상이 다소 차이가 있었을 것으로 추정되었음에도 불구하고 HC를 이용하여 가중응집제를 회수한 결과, 슬러지 종류에 상관없이 1회 회수에서 70-90%의 비교적 높은 회수율을 나타내었다. 다만, MBR이 적용된 처리장 슬러지의 경우 가중응집제 회수율이 가장 낮은 것으로 확인되어 MBR 기반 활성슬러지의 비교적 높은 EPS(Extra-cellular Polymeric Substances) 농도가 가중응집제 회수에 저해 역할을 하였다고 판단되었다 (Lee et al., 2008; Lee et al., 2011; Sweity et al., 2011). 반대로 DS 처리장은 슬러지 플록의 크기가 다른 처리장에 비해 월등히 컸으며 이는 가중응집제의 높은 회수율과도 직접적인 연관이 있을 것으로 판단된다.

HC는 측면으로 고액분리 대상 원수를 유입시켜 빠른 회전 와류를 바탕으로 비중이 큰 입자를 분리할 수 있도록 설계되는 것이 일반적이다. 효율적인 고액분리를 위해서는 분리대상 입자의 비중차이도 중요하지만 입자의 크기도 큰 영향을 미치게 된다. HC에서 입자의 크기 차이는 유체 내에서 회전마찰계수(Rolling friction coefficient)와 미끄러짐 마찰계수(Sliding friction coefficient) 차이를 발생시키고 이는 결국 HC에 의한 입자의 분리 효율 차이로 이어지게

된다 (Xiong et al., 2020; Zhang et al., 2020). 본 연구에서 사용한 M-I(125-250 μm)과 M-II(250-425 μm) 사이에도 이와같은 현상이 뚜렷이 발생한 것으로 보이는데, Fig. 6으로부터 크기가 다른 두 가지 활성탄 기반 가중응집제가 슬러지 종류와 상관없이 일관된 차이를 보이는 것은 이러한 이론을 뒷받침하는 결과라고 판단된다. Tang et al. (2019)의 연구결과에서도 유사한 내용을 확인할 수 있는데, HC에 의한 입자 분리시 입자의 크기가 클수록 HC의 내벽에 충돌가능성이 증가하여 HC 하부로 회수되는 경향이 큰 반면, 입자의 크기가 상대적으로 작아지면 HC의 중심부에 입자가 모여 상부로 유출될 가능성이 높아진다고 하였다.

HC의 상부로 유출된 혼합액을 대상으로 HC를 이용한 가중응집제 회수 반복 실험을 수행한 결과 총 3회의 HC 적용시 100%에 가까운 가중응집제 회수율을 얻을 수 있었다. 다만, MBR 공정이 적용된 A 하수처리장 슬러지의 경우 상대적으로 가중응집제 회수율이 낮은 것으로 나타났는데 이는 MBR 공정이 높은 MLSS 농도로 운전되어 슬러지의 점도가 상대적으로 높았기 때문으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 적용한 가중응집제의 경우 125-425 μm 범위에서는 슬러지의 특성이나 종류와 상관없이 HC를 이용하여 충분히 회수가 가능하였으며 2회의 HC 적용만으로 95% 이상의 높은 회수율을 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 처리용량 5만 톤/일 규모 이상의 세 곳 공공하수처리장(D, DS, A 하수처리장)에서 채취한 활성슬러지를 대상으로 슬러지 기반 활성탄 가중응집제를 적용하였을 경우 침전성 개선 효과를 실험적으로 파악하였으며, 가중응집제의 유실을 방지하기 위해 HC를 이용하였을 경우 가중응집제의 회수 가능성을 정량적으로 확인하고자 하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

가중응집제를 적용하였을 경우 슬러지의 농도 범위를 2,300-7,100 mg/L 수준까지 변경하였음에도 불구하고 침전성 개선 효과를 뚜렷이 파악할 수 있었다. 특히 상대적으로 침전성이 좋지 않았던 고농도 슬러지에서 그 효과가 크게 나타났으며 이는 슬러지의 침전성 지표인 SVI₃₀과 ZSV를 분석함으로써 확인할 수 있었다. 가중응집제 첨가량에 따라 다소 차이는 있었지



만 0.14-1.3 g-BF/g-SS의 범위에서 비침가량을 변화시킬 경우 SVI₃₀ 기준 슬러지의 침전성을 약 24-48% 가량 향상시킬 수 있는 것을 확인하였다. 슬러지의 침전성은 초기 농도가 높을수록 더 크게 향상되는 것으로 나타났다. 가중응집제 투입에 따른 슬러지의 계면 침전 특성을 이론적으로 파악하기 위해 Vesilind, Takacs, Cho 등 세 가지 대표적인 슬러지 침전모델을 적용해 보았으며, Vesilind model이 가중응집제를 투입한 슬러지의 침전특성을 가장 잘 설명할 수 있는 것으로 파악되었다. HC를 이용하여 가중응집제를 회수한 결과 1회 HC 운영시 슬러지의 종류에 따라 70-90%의 회수율을 나타내었으며 HC로부터 분리되지 않고 유출된 혼합액을 대상으로 반복하여 HC를 적용하였을 경우, 적용된 모든 슬러지로부터 95% 이상의 가중응집제 회수효율을 얻을 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사(Kwater)와 한국연국재단(NRF, project#: NRF-2020R1A2C2006769)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Actiflo[®] Veolia Water Technology (2020). <https://www.veoliawatertechnologies.com/en/technologies/actiflo>, (September 15, 2020).
- Arol, A. and Aydogan, A. (2004). Recovery enhancement of magnetite fines in magnetic separation, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 232(23), 151-154.
- Bakiri, Z. and Nacef, S. (2020). Development of an improved model for settling velocity and evaluation of the settleability characteristics, *Water Environ. Res.*, 92(7), 1089-1098.
- Chhuon, R., Muhammad, K.S., Kim, S.H. and Choi, Y.G. (2020). Mill scale as a ballasted flocculant for enhancing the settleability of activated sludge, *J. Environ. Chem. Eng.*, 8(5), 104237.
- Cho, K.C., Lee, M.H., Park, J.H. and Jung, J.T. (2012). A study on removal of dissolved organic matter and phosphorus in eutrophic lake by coagulation process using powdered activated carbon, *J. Wetl. Res.*, 14(4), 629-635.
- Cho, S.H., Colin, F., Sardin, M. and Prost, C. (1993). Settling velocity model of activated sludge, *Water Res.*, 27(7), 1237-1242.
- Desjardins, C., Koudjonou, B. and Desjardins, R. (2002). Laboratory study of ballasted flocculation, *Water Res.*, 36(3), 744-754.
- Gasperi, J., Laborie, B. and Rocher, V. (2012). Treatment of combined sewer overflows by ballasted flocculation: removal study of a large broad spectrum of pollutants, *Chem. Eng. J.*, 211-212(15), 293-301.
- Gwon, E.M., Oh, S.K., Kim, H.S., Lee, S.K., Ha, S.Y., Lim, C.H., Park, J.H. and Kang, S.H. (2011). A performance evaluation of the highly efficient coagulation system for the treatment of overflows from primary clarifier in WWTP, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 25(3), 391-398.
- Kim, D.G., Park, D.W. and Jang, W.S. (2003). The study of a novel coagulation technology using the atomized molten slag as weighted coagulation additives, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 19(6), 655-662.
- Kim, S.P. and Kim, Y.K. (2016). Sedimentation assesment of sludge for reduction measuring time and volum of device in SVI, *J. Korea Soc. Water Sci. Technol.*, 24(5), 49-58.
- Kim, Y.K., Yun, S.Y. and Kim, S.P. (2017). Evaluation on the improvement of microbial settleability using thermal-treated sludge cake as a sedimentation accelerating additives(SAA), *J. Korea Soc. Water Sci. Technol.*, 25(5), 19-28.
- Kim, Y.K. (2018). Evaluation on the characteristics of sludge settleability improvement using sewage-sludge activated carbon, *J. Korea Soc. Water Sci. Technol.*, 26(5), 119-127.
- Kim, Y.K. and Seo, H.S. (2019). Evaluation on optimum codition of settleability improvement additives using an activated carbon made of sewage sludge, *J. Korea Soc. Water Sci. Technol.*, 27(5), 21-30.
- Lee, J.E., Choi, C.K. and Lee, K.H. (2008). The calibration curves for analysis of the protein and carbohydrate and the passive adsorption of hydrophilic membrane in activated sludge bioreactor, *J. Korea Soc. Water Sci. Technol.*, 16(3), 21-27.
- Lee, S.M., Heo, N.R. and Lim, K.H. (2011). Effect of MLSS concentration on the exocellular polymert constituent and biofouling intensity in the MBR, *J. Korean Soc. Urban Environ.*, 11(1) 97-103.
- Lee, J.S., Park, S.J. and Kim, J.O. (2017). Optimizing coagulation conditions of magnetic based ballast using response surface methodology, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 39(12), 689-697.
- Metcalf and Eddy. (2015). *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. 5th ed., MCGraw-Hill education Korea.

pp. 113-120

pp. 121-133

pp. 135-142

pp. 143-152

pp. 153-162

pp. 163-174

- Ministry of Environment. (2019). Statistics of sewerage 2018, 11-1480000-000159-10, 1364
- Miklos, D., Griborio, A., Gellner, J., Pitt, P., Phipps, S. and Schultz, B. (2013). "Bentonite addition: a viable option for ballsted settling", *Proceedings of the Water Environment Federation*, 5-9 October, 2013, Chicago, USA.
- Moon, Y.G., Lee, J.S. Park, S.J. and Kim J.O. (2017). "Evaluation of effective density on Magnetite based ballasted flocculation using image analysis", *Proceedings of the 2017 Korean geo-environmental society conference*, 15 September, 2017, Seoul, Korea.
- Nadya, A., Faieza, A.A., Norzima, Z. and Ismail, H. (2015). Design and development of new debris strainer in water threatment plant, *Procedia Comput. Sci.*, 76, 209-216.
- Oh, S.C., Park, L., Kim, C.O., Jeeban, P. and Kim, J.W. (2016). Research on hazards and risk factors for carbonization process of sewage sludge, *Korea Occupational Safety & Health Agency*, 28.
- Park S.J., Kim, C.G. and Yoon, T.I. (2002). The studt of rapid coagulation adding weighted coagulant additives and settled sludges, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 24(8). 1325-1338.
- RapiSand™ Ballasted flocculation system (2020). <https://www.westech-inc.com/products/ballasted-flocculation-rapisand> (September 15, 2020).
- Seo, C.W., Jang H.S., Lee, S.H., Lee, S.M. and Sin, H.S. (2004). "Effect of initial solid concentration on estimation of settling parameter from single batch settling curve", *Proceedings of KSEE*, 4-6 November, 2004, Jeonju, Korea.
- Seo, H.S. and Kim, Y.K. (2019). "Material evaluation of sewage sludge activated carbon for use as weighted coagulant", *proceeding of the 2019 spring conference of the korea society of waste management*, 20-21 May, 2019, JEJU, Korea.
- Sweity, A., Ying, W., Ali-Shtayeh, M.S., Yang, F., Bick, A., Oron, G. and Herzner, M. (2011). Relation between EPS adherence, viscoelastic properties, and MBR operation: biofouling study with QCM-D, *Water Res.*, 45(19), 6430-6440.
- Tang, Z.J., Yu, L.M., Wang, F.G., Li, N., Chang, L.H. and Cui, N.B. (2019). Effect of particle size and shape on spearation in a hydrocyclone, *Water*, 11(1), 16.
- Takacs, I., Patry, G. and Nolasco, D. (1991). A dynamic model of the clarification-thickening process, *Water Res.*, 25(10), 1263-1271.
- Vesilind, A.P. (1968). Design of prototype strategy for the activated sludge process, *Water Sew Works*, 115(7), 302-307.
- Xiong, G., Gao, Z., Hong, C., Qiu, B. and Li, S., (2020) Effect of the rolling friction coefficient on particles' deposition morphology on single fibre, *Comput. Geotech.*, 121, 103450.
- Zhang, M., Xiao, F., Wang, D., Xu, X. and Zhou, Q. (2017). Comparison of novel magnetic polyaluminum chlorides involved coagulation with traditional magnetic seeding coagulation: Coagulation characteristics, treating effects, magnetic sedimentation efficiency and floc properties, *Sep. Purif. Technol.*, 182, 118-127.
- Zhang, Y., Mollon, G. and Descartes, S. (2020). Significance of third body rheology in friction at a dry sliding interface observed by a multibody meshfree model: influence of cohesion between particles, *Tribol. Int.*, 145, 106188.