Research Paper

Sludge Production Characteristics of Sedimentation · Dissolved Air Flotation (SeDAF) Process for Enhanced Phosphorus Removal

Yeoju Jang¹ · Jinhong Jung² · Hyangyoun Chang¹ · Nari Park¹ · Miratul Maghfiroh¹ · Weonjae Kim^{2,*}

¹University of Science and Technology (UST, KICT School), Civil & Environmental Engineering

²Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Department of Land, Water and Environment Research, Environmental Resource Research Center

(Received August 18, 2020; Revised October 21, 2020; Accepted November 5, 2020)

Objectives : In order to prevent eutrophication and algal blooms, Ministry of Environment in Korea reinforced the effluent standards of wastewater treatment facilities. As a result, many advanced wastewater treatment processes have been implemented nationwide. Current conventional treatment systems have usually been facing high operational costs and large sludge production problems. Therefore, it is essential to develop more economic and efficient process to cope with these issues.

Methods : The sedimentation and dissolved air flotation (SeDAF) process has been developed, that integrates sedimentation and dissolved air flotation. Several simulation experiments were carried out to verify and optimize the operation conditions of the SeDAF process. Removal efficiencies of each water quality item and sludge mass balance were analyzed intensively in the SeDAF process using the modified jar-test.

Results and Discussion : Removal efficiencies of the SeDAF process were higher and more stable than those of sedimentation process. Several ‘sludge production/coagulant dosage’ ratios were analyzed and the representative value of $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ as SS / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ as Al_2O_3 was obtained in the SeDAF process. Fractions of suspended solids (SS) and total phosphorus (T-P) in sludge were measured; the ratios of flotation sludge to sedimentation sludge and fractions of flotation sludge in total sludge had their typical convergence ranges for the conditions of optimal coagulant dosage.

Conclusions : The ratios or fractions of SS and T-P in sludge could be applied as the evaluation indicators of the SeDAF process. The reduction of coagulant dosage could be corresponded directly to the reduction of sludge production.

Keywords : Sedimentation · Dissolved Air Flotation (SeDAF), Sludge Production Characteristics, Phosphorus · Suspended Solid Removal, Enhanced Phosphorus Removal, Wastewater Treatment

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

* Corresponding author E-mail: wjkim1@kict.re.kr Tel: 031-910-0303 Fax: 031-910-0291

연구논문

인 고도처리를 위한 일체형 침전부상공정(SeDAF)의 슬러지 발생특성

장여주¹ · 정진홍² · 장향연¹ · 박나리¹ · 미라틀 매크피로¹ · 김원재^{2,*}

¹과학기술연합대학원대학교 건설환경공학

²한국건설기술연구원 국토보전연구본부 환경자원재생연구센터

목적: 공공수역의 부영양화를 방지하기 위하여 환경부에서는 공공하수처리시설의 방류수 수질기준을 강화한 결과, 국내 하수처리시설에는 다양한 인 고도처리공정이 도입되었다. 기존의 인 고도처리시스템은 일반적으로 과도한 약품비 및 슬러지 발생 등의 문제를 안고 있기 때문에 새로운 공정의 개발이 필수적이다.

방법: 본 연구에서는 침전과 부상분리를 통합한 일체형 침전부상공정(SeDAF)을 개발하고, 해당 공정의 운전조건을 최적화하기 위하여 여러 모의실험을 수행하였다. 수정된 Jar-test 기법을 사용하여 SeDAF 공정에서의 수질 변화 및 슬러지 발생특성을 집중적으로 분석하였다.

결과 및 토의: 전 수질항목에서 침전공정 대비 침전부상공정의 제거효율이 우수하고 안정적인 것으로 나타났다. SeDAF 공정에서는 응집제 주입농도의 증가에 따라 슬러지 발생량이 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ as SS} / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ as Al}_2\text{O}_3$ 씩 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 최적처리조건(최적 응집제 주입조건)에서 부상슬러지 및 침전슬러지 내 고형물질(suspended solids, SS) 및 총인(total phosphorus, T-P)의 부하비율(ratio)과 총 슬러지 대비 부상슬러지 내 SS 및 T-P의 부하분율(fraction)은 일정한 범위로 수렴하는 것으로 나타났다.

결론: 슬러지 내 부하비율(ratio) 및 부하분율(fraction) 인자를 모니터링함으로써 일체형 침전부상공정(SeDAF) 운전조건에 적정성을 판단할 수 있는 것으로 나타났으며, 응집제 주입농도의 저감이 슬러지 발생량의 감소로 직결됨을 확인하였다.

주제어: 침전부상공정(SeDAF), 슬러지 발생 특성, 인·고형물 제거, 인 고도처리, 하수처리

1. 서론

하수처리시설에서 인 고도처리공정으로 유입되는 원수는 고형물(suspended solids; SS) 농도가 높으며 부하변동이 큰 특징이 있어, 인 고도처리시설은 이러한 유입원수의 부하변동에 효율적으로 대응가능하며 처리수질을 안정적으로 유지할 수 있어야 한다.¹⁻³⁾ 기존 침전공정의 경우 고농도 원수 유입 시 운전 및 유지관리 측면에서 용이하며 부하변동에 강한 측면이 있지만, 2차 이상 침전공정을 경유한 유입원수는 탁도 물질과 인이 이미 상당부분 처리된 이후이기 때문에 추가적인 제거를 위해서는 응집제를 과다하게 주입한 스웍플록(sweep floc)의 형태로 처리하므로 운영비용의 증가와 과량의 슬러지 발생 등의 문제가 있다.^{4,6)} 부상분리공정(dissolved air flotation; DAF)의 경우 응집제를 소량 주입한 핀플록(pin floc)의 형태로 부상 및 제거가 이루어지며 발생한 슬러지의 함수율이 낮고 탈수성이 우수한 장점이 있으

나, 고탁수 원수 유입 시의 효율저하 및 처리수질의 안정성 확보에 문제가 있다. 국내에서 부상분리공정은 2012년 기준으로 표면여과공정(총 330개소 중 91개소)에 이어 두 번째(총 330개소 중 86개소)로 많이 도입된 인 고도처리시설에 해당한다.⁷⁻¹⁰⁾ 기존의 인 고도처리는 단일공정이 적용되고 있으며, 유입유량 및 수질 등의 조건이 안정적일 때에는 문제가 없으나 수질 변동이 큰 경우 빠른 대처가 어려우며 과다한 약품의 주입으로 슬러지가 과다 생성되는 등 경제성이 저하되는 측면이 있다. 이에 다양한 원수 조건에 적용이 가능하며, 슬러지 및 약품 저감을 통해 경제성이 향상된 인 고도처리공정의 개발이 필요한 실정이다.¹⁰⁻¹²⁾

본 연구에서는 기존의 인 고도처리공정의 단점을 보완한 새로운 공정으로 일체형 침전부상공정(Sedimentation·DAF process; SeDAF process)을 개발하였다. 해당 공정은 침전 + 부상분리(DAF)를 연계한 신공정으로, 한 반응조에서 침전공정과 부상공정이 상호 보완적으로 운영되도록 융복합적

Fig. 1. Conceptual diagram of SeDAF plant.

으로 구성된 공정이다.¹³⁻¹⁶⁾ 침전공정과 부상공정의 각 단위 공정을 연계적·효율적으로 운영하기 위하여 실험실 규모 연구를 수행하였고, 수질적 측면과 슬러지 발생특성 측면을 구분하여 분석을 수행하였으며, 최적 조건에 따른 특성을 도출하였다.

2. 실험방법 및 재료

2.1. 일체형 침전부상공정(SeDAF)

일체형 침전부상공정(SeDAF)의 개념도는 Fig. 1과 같다. 반응조는 혼화, 응집, 침전부상조로 구성되어 있으며, 수류의 흐름은 ‘혼화조-응집조-침전부상조-최종처리수조’의 순서로 이루어진다. 침전부상조는 한 반응조 내에서 격벽 없이 구성되어 있고, 하부와 상부는 각각 침전부 및 부상부에 해당하며, 수류의 흐름은 침전공정 완료 후 부상분리공정의 순서로 순차적으로 이루어진다. 응집 이후 수류의 흐름은 침전부 하단에서 평행하게 흐르며, 조의 말단부에 다다라서 미세기포수(가압수)가 유입되어 수직으로 상승하는 흐름을 나타낸다. 부상분리공정의 흐름은 침전부와 반대 방향으로 상부에서 평행하게 흐르게 된다. 응집완료 이후 형성된 플록은 원수의 성상에 따라 밀도가 높은 침강성 플록과 가벼운 부상성 플록이 혼재하는 상태가 된다. 이 때 침전부상공정의 운전을 통해서 상호 보완적인 플록의 제거가 가능하게 된다. 최종처리수는 중간부의 최종처리수 유공관을 통하여 별도의 동력 사용 없이 유출된다.

2.2. Jar-test 기반 침전부상공정 모의실험

2.2.1. Jar-test 기반 침전부상공정 모의실험 개요

인 고도처리를 위한 일체형 침전부상공정의 실험실 검증

을 위해 Jar-test 기반의 모의실험을 수행하였다. 해당 모의실험의 전체 공정은 Fig. 2(a)와 같다. 응집제로는 Poly Aluminium Chloride (PAC, Al_2O_3 10%, 염기도 40%)을 사용하였다. 실험조건은 2 L Jar에 원수를 충전하여 혼화 0.5분(200 rpm), 1차 교반 10분(85 rpm), 2차 교반 10분(45 rpm)순서로 진행하였고, 교반완료 시점으로부터 20분간 정지하여 침전공정 모의실험을 수행하였다. 부상공정은 침전공정 완료실험수 1 L에 미세기포수 150 mL(총 유량의 15%)를 하부에 주입하였으며, 주입 후 5분이 경과한 시점에 최종처리수를 채수하였다. 미세기포수는 Platypus® DAF Jar-tester 실험장치를 이용하여 제조 및 주입하였으며, 증류수를 사용하여 실험한 후 희석배수를 반영하여 분석결과를 교정하였다. 실험장치는 탱크 내부에 물과 공기를 접촉시킨 후 4-5 kg/cm^2 의 압력을 가하여 과포화수를 생성한 뒤 대기압 상태로 분출시켜 미세기포수를 제조하는 방식을 채택하고 있다. 부상공정 완료시점은 30 μm 이상의 미세기포가 전부 부상하는 데 소요되는 시간(1 L Jar의 수심인 10 cm 기준)을 Stokes' law로부터 도출하였으며, 50%의 안전율을 추가로 고려하여 총 시간(5분)을 설정하였다. 공정의 효과를 확인하기 위하여 침전공정 및 부상공정 완료 후 처리수와 슬러지를 각각 채수 및 채취하였다(Fig. 2(b)). 슬러지 발생특성을 파악하기 위해 채취된 슬러지 내 고형물질(suspended solids, SS) 및 총인(total phosphorus, T-P)의 물질수지 분석을 수행하였다.

Jar-test 원수는 고도처리 유입수인 2차침전지 유출수를 대상으로 하였으며, 실험의 제어조건은 원수 T-P 농도를 기준으로 설정하였다. 원수 범위는 기존 문헌에서 분석된 비고도처리시설 방류수 및 인 고도처리공정 유입수의 일반적 T-P 농도인 0.03 - 3.0 mg/L 범위에 해당하도록 하였으며, 해당 범위의 실험을 진행하기 위하여 원수의 농도 조절이 필

Fig. 2. Sedimentation and flotation Jar-test: (a) experimental procedure and (b) analysis procedure of sludge mass balance.

Table 1. Raw water qualities of lab-scale tests.

Items	Range (average)
T-P (mg/L)	0.3 - 3.0 (1.49)
PO ₄ -P (mg/L)	0.03 - 0.66 (0.164)
Turbidity (NTU)	2.1 - 37.8 (13.28)

요할 경우에는 2차침전지 전단계인 생물학적 처리공정에서 유출되는 슬러지를 주입하여 조절하였다. 원수 성상은 Table 1에 정리한 바와 같다.

2.2.2. 최적처리조건

결과 분석에는 최적처리조건(Optimal treatment condition)의 개념을 도입하였다. 이는 1) 방류수 수질기준 항목 중 T-P 0.2 mg/L 및 SS 10 mg/L의 방류수질을 만족한 조건에서, 2) 응집제를 최소로 주입한 조건에 해당한다(Fig. 3). 현행 공공하수처리시설의 가장 엄격한 방류수 수질기준(I 지역)에서는 T-P 0.2 mg/L, SS 10 mg/L 이하로 배출하도록 규정하고 있다.¹⁷⁾ 처리효율이 증가할수록(처리수질이 낮아질수록) 응집제 주입량과 슬러지 발생량이 모두 증가하므로¹⁸⁾,

Fig. 3. Concept of optimal treatment condition.

하수처리장에서는 각 지역별 수질기준에 맞추어 처리수질을 설정하여 운영한다. 따라서 본 연구에서도 방류수 수질기준을 기준으로 한 최적처리조건을 도입하였으며, 가장 처리 수질기준이 높은 I지역의 T-P 0.2 mg/L 및 SS 10 mg/L (탁도 3 NTU)을 기준으로 하였다.

Fig. 4. Microbubble density analysis results of DAF Jar-tester.

2.2.3. 분석기기 및 방법

채수된 시료는 수소이온농도(pH), 탁도, T-P, 용존성인($\text{PO}_4\text{-P}$), 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD) 및 SS를 분석하였다. 측정에 사용한 기기로는 수온, 알칼리도 및 pH는 METTLER TOLEDO사의 Easy pH와 HANNA instrument사의 HI2210 pH Meter를 사용하였으며, 탁도는 HACH사의 TL2300을 사용하였다. T-P, $\text{PO}_4\text{-P}$ 및 COD의 수질항목 측정을 위해서는 C-MAC사의 시약을 사용, HACH사의 DR3900 분광광도계로 분석하였다. SS는 공정시험방법에 의거하여 분석하였다. 전체 데이터 분석에는 Microsoft Excel과 R 프로그램을 사용하였다. SS를 통한 슬러지 분석에 있어 TSS (total suspended solids) 및 VSS (volatile suspended solids)를 측정하여 FSS (fixed suspended solids)를 산정한 뒤, FSS는 슬러지 내 무기물로 VSS는 유기성 성분으로 간주하였다. Microbubble density는 레이저를 투사한 뒤 입자에 의한 산란각을 측정하여 입경과 수밀도를 측정하는 LaserTracTM PC3400을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Jar-test 기반 침전부상공정 모의실험 미세기포수 성장 분석

부상공정 모의실험에서 Platypus[®] DAF Jar-tester를 사용하여 생성된 미세기포수의 특징을 입경대별 수밀도로 분석하여 제시하였다(Fig. 4). 입경대별 수 측정은 총 5회 반복하였다. 실험결과, 본 미세기포 발생장치는 50 - 70 μm 입경대의 미세기포를 가장 많이 발생시키는 것으로 분석되었다. 해당 입경대의 범위는 421 - 721개/mL(평균 540.6개/mL)로 분석되었다. 이를 통해 부상공정에 적합한 100 μm 이하의 기포가 가장 높은 비율로 생성됨을 확인하였고, 발생된 미세기포수는 부상공정 모의실험의 적용에 적합함을 확인하였다.

3.2. Jar-test 기반 침전부상공정 모의실험 슬러지 발생특성 분석

3.2.1. 고형물(SS) 기준 슬러지 발생특성 분석

침전 및 부상공정에서 발생한 슬러지의 발생특성을 분석하

(a)

(b)

(c)

Fig. 5. SS fraction results in sludge and treated water: (a) 1st test, (b) 2nd test, and (c) organic and inorganic substance ratios in sedimentation sludge (2nd test).

였다. 원수 SS 10 mg/L 조건(Fig. 5(a), 이하 1차), 12.5 mg/L 조건(Fig. 5(b), 이하 2차)일 때 응집제 주입농도에 따른 침전슬러지(sludge after sedimentation 또는 sedimentation sludge) 및 부상슬러지(sludge after flotation 또는 flotation sludge)에 대한 SS 물질수지 분석결과를 제시하였다. 응집제 주입농도가 증가할수록 전체 SS의 총량이 증가하였다. 응집제 주입농도 2 mg/L as Al_2O_3 이하의 조건에서는 미처리 상태의 SS (residual SS fraction)가 잔류하고 있으나 그 이상의 조건에서는 침전과 부상공정에서 전부 제거되었다. 전체 응집제 주입조건에 대해 부상슬러지의 농도는 일정한 비율을 유지하고 있음에 비해, 침전슬러지는 응집제 주입농도의 증가에 따라 지속적으로 증가하였다. 응집제 주입농도 2 mg/L as Al_2O_3 이상의 조건에서는 발생한 총 슬러지(침전 + 부상슬러지) 내 SS 농도가 원수보다 약 135 - 149% 증가

Table 2. SS fractions according to coagulant dosage.

C.dosage (mg/L)	1 st test			2 nd test		
	SS fraction (mg/L)			SS fraction (mg/L)		
	S.sludge	F.sludge	Residual	S.sludge	F.sludge	Residual
0.0	4.0	3.0	2.1	-	-	-
0.5	-	-	-	6.0	2.8	3.3
1.0	6.7	3.3	3.9	8.0	2.3	3.7
2.0	10.0	3.5	1.6	16.0	2.6	2.4
3.0	16.7	2.6	0.0	18.0	3.3	0.0
4.0	22.0	2.6	0.0	19.3	2.4	0.0
5.0	27.0	1.8	0.7	23.3	1.7	0.0

* C.dosage: coagulant dosage / S.sludge: sludge after sedimentation / F.sludge: sludge after flotation

Table 3. Sludge ratios and flotation sludge fractions for SS.

Coagulant dosage (mg/L)	1 st test		2 nd test	
	Ratio	Fraction (%)	Ratio	Fraction (%)
	F.sludge : S.sludge	F.sludge / T.sludge	F.sludge : S.sludge	F.sludge / T.sludge
0.0	1 : 1.3	43	-	-
0.5	-	-	1 : 2.1	32
1.0	1 : 2.0	33	1 : 3.5	22
2.0	1 : 2.9	26	1 : 6.2	14
3.0	1 : 6.4	13	1 : 5.5	15
4.0	1 : 8.5	11	1 : 8.0	11
5.0	1 : 15.0	6	1 : 13.7	7

* F.sludge: sludge after flotation / S.sludge: sludge after sedimentation / T.sludge: total sludge

한 것으로 분석되었다.

추가로, Fig. 5(c)에 2차 침전슬러지 내 무기성 및 유기성 SS 성분비(ratio)를 제시하였다. 실험한 응집제 주입농도의 조건에서는 유기성 성분의 함량이 무기성 성분보다 큰 것으로 나타났다. 응집제 주입농도 2 mg/L as Al_2O_3 이상의 조건에서 유기성 성분의 함량은 증가가 크지 않은데 비해, 무기성 성분의 함량은 응집제 주입농도에 비례하여 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

이상의 응집제 주입농도에 따른 1차 및 2차 침전슬러지, 부상슬러지, 처리수 내 SS 분율(fraction)을 Table 2에 정리하였다.

앞서 분석한 응집제 주입농도에 따라 슬러지에 포함되어 있는 SS의 농도분율 분석결과에 최적처리조건(최적 응집제 주입조건)의 개념을 적용하여 Fig. 6에 도시(圖示)하였다. 주축은 SS 분율에 대하여 막대그래프로 나타내었으며, 보조축은 응집제 주입농도에 따른 처리수질을 꺾은선그래프로 나타내었다. 최적처리조건의 응집제 주입농도는 1차 실험에서 2 mg/L as Al_2O_3 , 2차 실험에서도 2 mg/L as Al_2O_3 로 분석되었다.

최적처리조건에서의 슬러지 발생특성을 분석하기 위해서 응집제 주입농도별 부상슬러지 : 침전슬러지 비율(ratio) 및 부상슬러지/침전슬러지 분율(fraction)의 분석결과를 Table 3

Fig. 6. SS fraction and T-P in treated water according to coagulant dosage: (a) 1st test and (b) 2nd test.

Fig. 7. Increase of sludge production according to coagulant dosage (n = 11).

에 나타내었다. 최적처리조건에서 부상슬러지 : 침전슬러지에 포함되어있는 SS 부하비율은 1 : 2.9 - 1 : 6.2의 범위를 갖는 것으로 분석되었다. 전체 슬러지 중 부상슬러지 내에 포함되어있는 SS 부하분율은 14 - 26%의 범위로 나타나 SS 부하비율과 유사하게 대체로 일정한 범위의 값으로 수렴하는 것을 확인하였다.

위의 결과를 종합하여 Fig. 7과 같이 응집제 주입농도에 따른 슬러지 내 SS 증가량을 분석하였으며, 침전슬러지와 부상슬러지를 더한 총 슬러지의 경우 응집제 주입농도의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 단순회귀 분석에 의해 도출된 값은 $4.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ as SS} / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ as Al}_2\text{O}_3$ 로서, 응집제 주입농도(Al_2O_3 기준) 1 mg/L 증가 시 약 4 mg/L의 슬러지(SS 기준)가 추가로 생성되는 것으로 나타났다.

3.2.2. 총인(T-P) 기준 슬러지 발생특성 분석

원수 T-P 0.57 mg/L 조건(Fig. 8(a), 이하 1차), 0.53 mg/L 조건(Fig. 8(b), 이하 2차)일 때 응집제 주입농도에 따른 침전슬러지 및 부상슬러지 내에 포함된 T-P 물질수지의 분석

(a)

(b)

Fig. 8. T-P fraction results in sludge and treated water: (a) 1st test and (b) 2nd test.

결과를 제시하였다. 응집제 주입농도의 증가와 관계없이 전체 T-P의 총 농도는 일정하되 분율만 변하는 것으로 관찰되었다.

침전슬러지 내 T-P 분율은 응집제 주입농도가 증가할수록 점차 증가하여 원수농도(총 농도)에 가깝게 수렴하는 것을 확인하였으며, 부상슬러지 내 T-P 분율은 일정한 농도를 유지하다가 최적처리조건 이후 점차 감소하였다(Table 4).

최적처리조건에서의 응집제 주입농도는 SS와 동일하게 1차 및 2차 실험에서 모두 2 mg/L로 분석되었다(Fig. 9).

최적처리조건에서의 부상슬러지 : 침전슬러지에 포함되어있는 T-P 부하비율(ratio)은 1 : 4.2 - 1 : 5.4의 범위를 갖는 것으로 분석되었으며, 전체 슬러지 중 부상슬러지 내에 포함

Table 4. T-P fractions according to coagulant dosage.

C.dosage (mg/L)	1 st test			2 nd test		
	T-P fraction (mg/L)			T-P fraction (mg/L)		
	S.sludge	F.sludge	Residual	S.sludge	F.sludge	Residual
0.0	0.22	0.10	0.23	-	-	-
0.5	-	-	-	0.22	0.09	0.19
1.0	0.30	0.11	0.16	0.30	0.10	0.15
2.0	0.38	0.09	0.08	0.38	0.07	0.07
3.0	0.51	0.05	0.04	0.45	0.05	0.03
4.0	0.50	0.05	0.04	0.47	0.04	0.02
5.0	0.45	0.04	0.03	0.48	0.02	0.02

* C.dosage: coagulant dosage / S.sludge: sludge after sedimentation / F.sludge: sludge after flotation

Fig. 9. T-P fraction and T-P in treated water according to coagulant dosage: (a) 1st test and (b) 2nd test.

되어 있는 T-P 부하분율(fraction)은 16 - 19%의 범위로 나타나 두 지표 모두 일정한 범위의 값으로 수렴하는 것을 확인하였다(Table 5).

3.3. 슬러지 발생특성을 고려한 침전부상공정의 운전 적정성 모니터링 지표 도출

이상에서 논의한 내용을 개념도로 정리하면 Fig. 10과 같다. 침전 및 부상 슬러지 내의 수질인자(SS 및 T-P 기준)의

Fig. 10. Concept of monitoring indices for sludge production characteristics according to coagulant dosage: (a) SS and (b) T-P.

부하비율 및 분율은 최적처리조건에서 일정한 범위를 갖게 되며, 현장운전 시 해당 인자를 모니터링할 경우 운전의 적

Table 5. Sludge ratios and flotation sludge fractions for T-P.

Coagulant dosage (mg/L)	1 st test		2 nd test	
	Ratio	Fraction (%)	Ratio	Fraction (%)
	F.sludge : S.sludge	F.sludge / T.sludge	F.sludge : S.sludge	F.sludge / T.sludge
0.0	1 : 2.2	31	-	-
0.5	-	-	1 : 2.4	29
1.0	1 : 2.7	27	1 : 3.0	25
2.0	1 : 4.2	19	1 : 5.4	16
3.0	1 : 10.2	9	1 : 9.0	10
4.0	1 : 10.0	9	1 : 11.8	8
5.0	1 : 11.3	8	1 : 24.0	4

* F.sludge: sludge after flotation / S.sludge: sludge after sedimentation / T.sludge: total sludge

정성을 판단할 수 있는 하나의 지표로 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 최적처리조건을 전후하여 부상공정에 의해 제거된 슬러지 중의 SS 및 T-P (flotation sludge) 분율이 급감하며, 미처리 SS 및 T-P (residual SS and T-P)가 최소화되는 공통된 특징을 갖는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 인 고도처리공정의 단점을 보완한 새로운 공정으로 일체형 침전부상공정(SeDAF process)을 개발하였으며¹³⁻¹⁶⁾, SeDAF 공정의 운전특성을 파악하기 위하여 수정된 Jar-test 기법을 기반으로 하여 침전과 부상의 각 단위공정을 모사한 실험실 규모 연구를 수행하였다. 여러 실험분석을 통하여 최적처리조건에서의 수질적 운전특성 및 슬러지 발생특성을 집중적으로 규명한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 같은 농도의 응집제를 주입한 경우를 서로 비교한 결과, 침전공정 대비 SeDAF 공정에서 더 개선된 SS 및 T-P의 처리수질과 제거효율의 안정성이 확인되었다.

2) Poly Aluminium Chloride (PAC, Al_2O_3 10%, 염기도 40%)를 응집제로 사용한 본 실험조건에서 SeDAF 공정의 슬러지 발생량은 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ as SS / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ as Al_2O_3 의 비율을 갖는 것으로 분석되었다. 응집제 사용량에 따라 슬러지 발생량 또한 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타나, 응집제 주입농도의 저감이 슬러지 발생량의 감소에 직접적으로 기여할 것으로 판단된다.

3) SeDAF 공정의 최적처리조건(최적 응집제 주입조건)에서 부상슬러지 및 침전슬러지에 각각 포함되어있는 수질인자 부하비율(ratio)을 분석한 결과, 일정한 범위로 수렴하는 경향성이 관찰되었으며 SS는 1 : 2.9 - 6.2, T-P는 1 : 4.2 - 5.4의 범위를 갖는 것으로 나타났다.

4) SeDAF 공정의 최적처리조건에서 전체 슬러지 중 부상슬러지 내에 포함되어 있는 수질인자의 부하분율(fraction)을 분석한 결과, 일정한 범위로 수렴하는 경향성이 관찰되었으며 SS는 14 - 26%, T-P는 16 - 19% 범위를 갖는 것으로 나타났다.

5) SeDAF 공정의 현장 운영 시에는 최종처리수의 목표수질을 달성하는 것뿐만 아니라 슬러지 내 수질인자(SS 및 T-P)의 부하비율(ratio) 및 부하분율(fraction)을 일정한 범위 내로 유지함으로써 적절한 운전이 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제번호: 20200039-001). 이에 감사드립니다.

References

1. Ministry of Environment, Korean Design Standards of Sewage Facility, Ministry of Environment, Sejong, Korea, pp. 1-107(2019).
2. Metcalf & Eddy, Inc., Wastewater Engineering, 5th ed., McGraw-Hill Education, USA, pp. 1-1942(2016).
3. W. C. Park, M. A. Lee, I. W. Sung, Phosphorus removal from advanced wastewater treatment process using PAC, J. Korean Soc. Environ. Eng., 36(2), 96-102(2014).
4. J. P. Malley Jr., J. K. Edzwald, Laboratory comparison of DAF with conventional treatment, J.-Am. Water Works Assoc., 83(9), 56-61(1991).
5. Gyeonggi Research Institute, Method for Efficient Treatment of Sewage Sludge(2018).
6. C. J. Cheong, Removal of microalgae using inorganic coagulants in coagulation and sedimentation processes for water treatment, J. Korean Soc. Environ. Eng., 30(1), 85-89 (2008).
7. J. K. Edzwald, D. Q. Bunker, J. Dahlquist, L. Gillberg, T. Hedberg, Dissolved air flotation: pretreatment and comparisons to sedimentation, Chemical Water and Wastewater Treatment III, R. Klute, H. H. Hahn (eds), Springer, Berlin, Germany, pp. 3-18(1994).
8. K. C. Lee, Characteristics of phosphorus removal in treated sewage using microbubble flotation system, Ph.D. thesis, University of Seoul(2011).
9. L. K. Wang, N. K. Shammass, W. A. Selke, D. B. Aulenbach, Flotation Technology, Humana Press, Totowa, USA, pp. 1-665(2010).
10. Ministry of Environment, A Study on Improvement Methods for Treatment Efficiency of Phosphorus Treatment Facilities, Ministry of Environment, Sejong, Korea, pp. 1-183(2012).
11. Y. J. Jang, J. H. Jung, H. M. Lim, W. J. Kim, Applicability of integrated SeDAF (Sedimentation·Dissolved air flotation) process for advanced wastewater treatment, in Proceedings of KSWW · KSWE, KSWW · KSWE, pp. 451-452(2019).
12. S. J. Kim, S. M. Park, H. Y. Park, K. C. Lee, O. S. Kwon, Best Available Technology and Management Practice using Physicochemical Methods for Phosphorus Removal in Municipal Wastewater Treatment Plants in the Priority Areas of 4 Major Rivers, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea, pp. 1-23(2010).
13. Y. J. Jang, J. H. Jung, H. Y. Chang, N. R. Park, H. M. Lim, W. J. Kim, Decision of optimal coagulant dosage for SeDAF (sedimentation and dissolved air flotation) process applicable to enhanced phosphorus removal, KSWST Jour. Wat. Treat., 28(4), 33-42(2020).
14. Y. J. Jang, J. H. Jung, K. H. Ahn, H. M. Lim, W. J. Kim, Applicability of Al/P (aluminium/phosphorus) ratio in SeDAF process for enhanced phosphorus removal, J. Korean Soc. Environ. Eng., 42(11), 539-547(2020).
15. Y. J. Jang, J. H. Jung, H. M. Lim, W. J. Kim, Empirical evaluation for design parameters and operating characteristics of the integrated sedimentation and flotation process at the

- pilot-scale plant, J. KSWW, (In press)(2020).
16. Y. J. Jang, J. H. Jung, W. J. Kim, Automatic control of coagulant dosage on the sedimentation and dissolved air flotation (SeDAF) process for enhanced phosphorus removal in sewage treatment facilities, J. KSWW, (In press)(2020).
 17. Korea Ministry of Government Legislation, <http://www.law.go.kr>, May(2020).
 18. H. Y. Park, S. M. Park, K. C. Lee, S. J. Yu, O. S. Kwon, S. J. Kim, Survey of physicochemical methods and economic analysis of domestic wastewater treatment plant for advanced treatment of phosphorus removal, J. Korean Soc. Environ. Eng., 33(3), 212-221(2011).

Authors

Yeoju Jang

University of Science and Technology (UST, KICT School),
Civil & Environmental Engineering, Master of Engineering,
0000-0001-5858-5548

Jinhong Jung

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
(KICT), Department of Land, Water and Environment Research,
Environmental Resource Research Center, Ph.D.,
0000-0002-9698-597X

Hyangyoun Chang

University of Science and Technology (UST, KICT School),
Civil & Environmental Engineering, Ph.D. Candidate,
0000-0002-6808-6985

Nari Park

University of Science and Technology (UST, KICT School),
Civil & Environmental Engineering, Ph.D. Candidate,
0000-0003-3297-6203

Miratul Maghfiroh

University of Science and Technology (UST, KICT School),
Civil & Environmental Engineering, Ph.D. Candidate,
0000-0001-6030-6675

Weonjae Kim

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
(KICT), Department of Land, Water and Environment Research,
Environmental Resource Research Center, Ph.D. & Professor,
0000-0001-5676-5131