



하수처리시설에서 인 고도처리를 위한 일체형 침전부상공정(SeDAF)의 응집제 주입농도 자동제어기법 검토

Automatic control of coagulant dosage on the sedimentation and dissolved air flotation(SeDAF) process for enhanced phosphorus removal in sewage treatment facilities

장여주¹·정진홍²·김원재^{2*}

Yeju Jang¹·Jinhong Jung²·Weonjae Kim^{2*}

¹과학기술연합대학원대학교 건설환경공학

²한국건설기술연구원 국토보전연구본부 환경자원재생연구센터

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

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

ABSTRACT

To remove phosphorus from the effluent of public wastewater treatment facilities, hundreds of enhanced phosphorus treatment processes have been introduced nationwide. However, these processes have a few problems including excessive maintenance cost and sludge production caused by inappropriate coagulant injection. Therefore, the optimal decision of coagulant dosage and automatic control of coagulant injection are essential. To overcome the drawbacks of conventional phosphorus removal processes, the integrated sedimentation and dissolved air flotation(SeDAF) process has been developed and a demonstration plant(capacity: 100 m³/d) has also been installed. In this study, various jar-tests(sedimentation and / or sedimentation-flotation) and multiple regression analyses have been performed. Particularly, we have highlighted the decision-making algorithms of optimal coagulant dosage to improve the applicability of the SeDAF process. As a result, the sedimentation jar-test could be a simple and reliable method for the decision of appropriate coagulant dosage in field condition of the SeDAF process.

Received 30 August 2020, revised 14 October 2020, accepted 5 November 2020.

*Corresponding author: Weonjae Kim (E-mail: wjkim1@kict.re.kr)

- 장여주(공학석사) / Yeju Jang (Master of Engineering)
경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea
- 정진홍(수석연구원) / Jinhong Jung (Senior Researcher)
경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea
- 김원재(연구위원) / Weonjae Kim (Research Fellow)
경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, 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.

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

And, we have found that the SeDAF process can save 30 - 40% of coagulant dosage compared with conventional sedimentation processes to achieve total phosphorus (T-P) concentration below 0.2 mg/L of treated water, and it can also reduce same portion of sludge production.

Key words: Sedimentation-dissolved air flotation(SeDAF), Enhanced phosphorus removal, Wastewater treatment, Coagulant dosage, Decision making algorithm

주제어: 침전부상공정, 인 고도처리, 하수처리, 응집제 주입농도, 의사결정 알고리즘

1. 서 론

기후변화로 인한 지속적인 수온 상승, 정체수역 증가로 인한 유속 감소, 하수처리장의 방류수 및 축산농가 등으로부터 유출되는 영양염류 등이 조류 대발생의 원인이 되고 있다 (Wetzel, 2001; Kim et al., 2007). 영양염류 증가에 의한 부영양화를 방지하기 위하여 환경부에서는 1996년 이후 총인(Total phosphorus; T-P)을 하수처리시설 방류수 수질기준 항목에 추가하였으며, 2012년 이후에는 그 기준을 0.2-2.0 mg/L로 낮추는 등 지속적으로 공공수역의 수질관리를 강화해 왔다 (Lee, 2014; Chang, 2017). 이와 같은 정부의 시책에 부합하기 위하여 국내 공공하수처리시설에서는 총인 고도처리공정을 도입하여 오염물질 배출부하를 감소시키기 위한 노력을 지속하고 있으며 (Lee, 2014; George and Franklin, 2016), 국내 500 m³/d 규모 이상의 하수처리시설 625개소 중 330개소에서 인 고도처리시설을 도입하여 운영하고 있는 실정이다 (Chae and Oh, 2012).

물리화학적 인 고도처리공정은 화학물질을 이용하여 응집 후 여과, 침전 또는 부상 등의 고형물 분리를 통해서 인을 제거하는 방식이다. 저농도의 처리수질을 달성할 수 있고 운전이 용이한 장점이 있으나 지속적인 응집제 주입과 슬러지 발생 및 처리 등의 문제를 안고 있으며, 저탁도 상태에서 운영하여 추가적인 오염물질의 제거를 달성해야 하는 문제로 인하여 응집제가 과도하게 주입된다 (Kim et al., 2010). 이러한 운영방식은 응집제 자체의 비용 증가뿐만 아니라 슬러지 발생량 증가에도 영향을 미치며 슬러지의 탈수성을 불량하게 하는 등 품질에도 악영향을 미치는 것으로 알려져 있어, 하수처리장의 운영효율을 떨어뜨리는 중요한 요인이 되고 있다 (Lee et al., 2018, So et al., 2018). 따라서, 목표수질에 부합하도록 하는 적절한 응집제 농도를 결정하고 주입하는 응집공정의 제어기법은 인 고도처리공정의 핵심이라고 할 수 있다.

하수처리시설의 원수 및 단위공정별 유입수는 T-P 및 고형물질(Suspended solids, SS)의 농도가 높거나 부하변동이 큰 특징이 있어, 이에 안정적으로 대응할 수 있으면서 처리수의 수질기준을 만족할 수 있는 공정이 필요하다 (Ministry of Environment, 2019). 기존에 도입된 고도처리공정 중에서 침전공정의 경우에는 유지관리가 수월하고 고농도 원수의 유입 및 부하변동에도 대응이 용이한 특징이 있으나, 저농도의 원수가 유입되면 응집제 및 폴리머(Polymer) 등의 화학약품을 과도하게 주입하게 됨에 따라 운전비용이 증가하고 슬러지가 과도하게 발생하는 등의 문제점이 있다 (Malley and Edzwald, 1991). 한편, 부상분리공정(Dissolved air flotation; DAF)의 경우에는 상대적으로 소량의 응집제만 주입하더라도 부상분리가 가능하며 슬러지의 발생량이 적고 함수율이 낮으며 탈수성이 우수하다는 장점이 있으나, 통상 유입수의 탁도가 약 100 NTU 이상인 고탁수에 대해서는 처리효율이 현저히 저하되는 단점이 있으므로 전단에 예비침전지 등의 안정화조를 구축하여야 한다 (Edzwald et al., 1994; Ministry of Environment, 2017).

하수처리시설에서 기존의 인 고도처리공정의 문제점을 해결하기 위해 개발된 일체형 침전부상공정(Integrated sedimentation and dissolved air flotation process; SeDAF process)의 적절한 운전성을 확보하기 위하여, 실험실 규모 및 실증플랜트를 활용한 현장연구를 통한 SeDAF 공정의 설계·운전인자의 적정성, 처리 효율 및 여러 운전특성 등에 대해서는 별도의 논문에서 보고한 바 있다 (Jang et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d).

본 연구에서는 하수처리시설의 인 고도처리공정 중에서, 특히 SeDAF 공정을 대상으로 하여, 실증플랜트 및 실규모 시설을 운용하는 데 있어 필수적인 응집제 주입농도 결정기법에 대하여 집중적으로 검토하였다. 이를 위하여 jar-test 기반의 침전 및 침전부상 공정 모의실험을 실시하고, 이 결과를 토대로 적절한 응집제



주입농도 결정기법을 제안하였다. 제안된 응집제 주입농도 결정기법을 실증플랜트에 적용하여 처리효율 및 운전성을 검증하였다. 또한, 인 고도처리공정에서 응집공정의 자동화를 목적으로 한 응집제 주입농도 의사결정 알고리즘을 제시하였다.

2. 연구방법 혹은 재료 및 실험방법

2.1 일체형 침전부상공정(SeDAF)의 개요

일체형 침전부상공정(SeDAF)의 개요는 Fig. 1과 같다. 공정의 단계는 혼화, 응집, 침전 및 부상분리공정으로 구성되어 있으며, 유입수는 혼화조-응집조-침전부상조-최종처리수조의 순서로 이동한다.

침전부상조는 하부와 상부가 각각 침전부(Sedimentation zone) 및 부상부(Flotation zone)로 구성되어 있으며, 두 공정은 공간적인 구분은 없으나 수류의 흐름은 침전부 완료 후 부상부의 순서로 형성된다. 여기서, 하부의 침전부로 유입된 원수는 평행한 흐름으로 이동하는 과정에서 침강성 플록의 침전이 이루어지며, 침전부가 완료되는 조의 말단부에서는 미세기포수(가압수)가 유입되어 수직으로 상승하는 흐름을 나타낸다. 부상분리공정에서 수류의 흐름은 침전부와 반대 방향으로 흐르게 되며, 이 과정에서 미소한 저밀도의 부상성 플록이 분리된다.

이후 최종처리수는 조의 중간부에 있는 최종처리수 유공관으로 유입되어, 별도의 동력 사용 없이 최종처리수조로 이동한다.

2.2 Jar-test 기반 침전 및 침전부상공정 모의실험 개요

Jar-test를 기반으로 한 SeDAF 공정의 모의실험을 수행하는 절차는 Fig. 2와 같다. 침전공정의 모의실험은 2 L의 jar에 원수를 충전한 후 200 rpm으로 혼화 0.5분, 85 rpm으로 10분간 1차 교반한 다음, 45 rpm으로 10분간 2차 교반을 실시하였으며, 교반 종료 후 20분간 정지하였다. 침전공정 완료 후 분석시료와 부상공정 모의실험용 실험수를 채수하였다. 부상공정은 침전공정 완료실험수를 1 L jar에 충전한 후 미세기포수 150 mL(총 유량의 15%)를 하부에 천천히 주입한 다음, 5분이 경과한 후 분석시료를 채수하였다. 미세기포수는 Platypus® DAF jar-tester 실험장치를 이용하여 증류수를 공급하고 4-5 kg/cm²의 고압에서 과포화수를 생성한 뒤 대기압 상태로 분출시켜 제조하였다. 증류수에 의한 희석효과는 희석배수를 반영하여 추후 교정하였다. 본 실험에 적용된 미세기포수는 부상공정에 적합한 100 μm 이하의 기포를 고농도로 포함하고 있음을 확인하였다. 50-70 μm의 미세기포가 가장

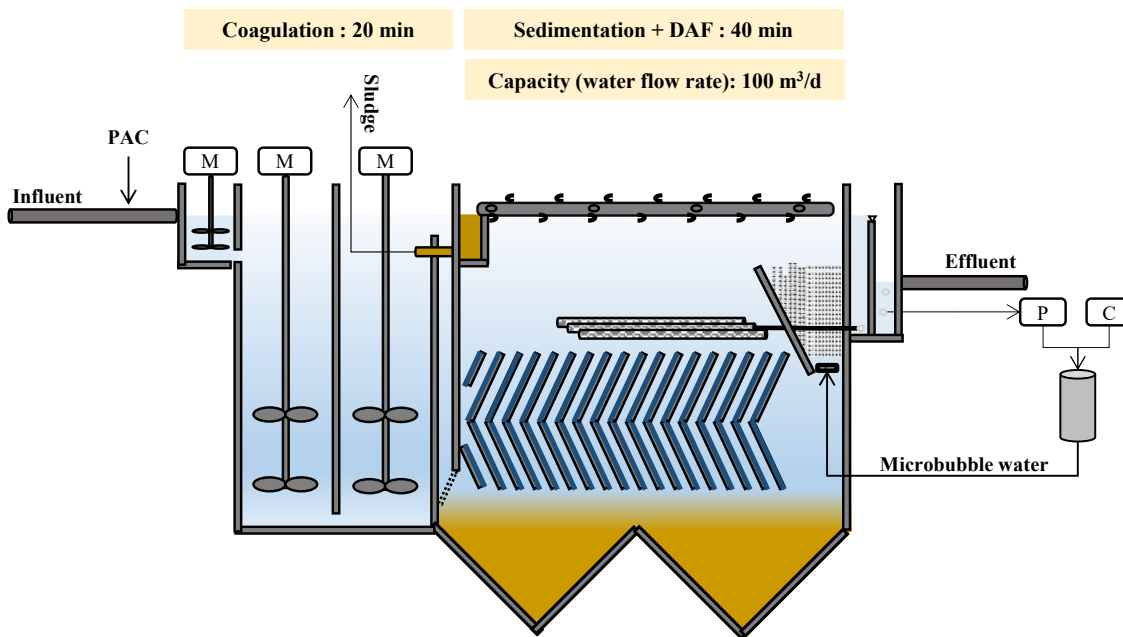


Fig. 1. Scheme of SeDAF process.

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

높은 밀도로 분포하는 것으로 나타났으며, 평균 540.6 개/mL의 수밀도를 갖는 것으로 분석되었다. 모의실험 중 침전공정은 침전단일공정에 해당하며, 전체공정은 침전부상공정에 해당한다.

원수(유입수)는 고도처리 유입수인 2차침전지 유출수를 대상으로 하였다. 연중 원수의 pH는 6.9-7.3(평균 7.10), 수온은 15-25°C(평균 21.0), 총알칼리도는 43.9-127.7 mg/L as CaCO₃(평균 84.00)의 범위를 나타내었다. 본 원수는 생물학적 공정과 2차침전지를 경유한 이후에 유입되기 때문에 pH, 수온 및 알칼리도 등은 상대적으로 안정된 특성을 갖는 것으로 나타났다. 실험의 제어조건은 T-P 농도를 기준으로 설정하였으며, 하수처리시설에서 인 고도처리공정 유입수의 일반적인 T-P 농도 범위인 0.03-3.0 mg/L에 해당하도록 하였다 (Kim et al., 2010). 유입수의 농도 조절이 필요할 경우에는 2차침전지의 전 단계인 생물학적 처리공정에서 유출되는 슬러지를 소량 주입하여 조절하였다. 응집제로는 알루미늄계열의 poly aluminium chloride (PAC) (Al₂O₃ 10%, basicity 40%)를 사용하였다. PAC는 과량의 응집제를 주입한 조건에서도 pH, 알칼리도 및 응집효율의 저하(재안정화) 현상이 잘 발생하지 않는다는 특징을 갖고 있다. 한편 PAC를 활용한 예비실험 결과, 2차 침전지 유출수의 pH, 수온 및 알칼리도의 변동이 최종처리수질에 미치는 영향은 크지 않았으며 응집제의 주입농도가 결정적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

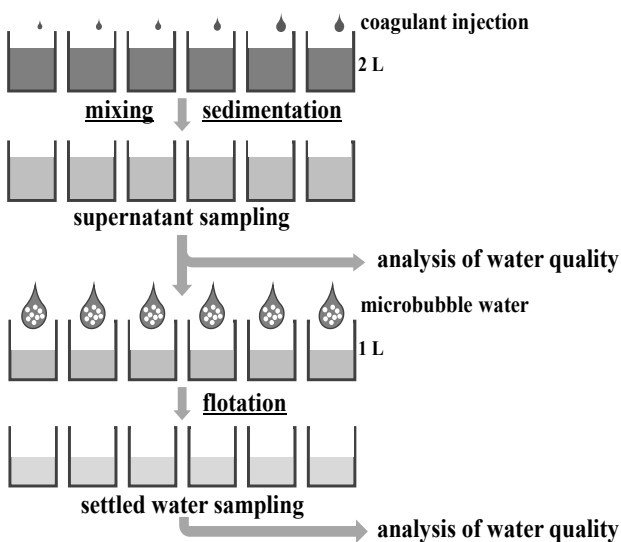


Fig. 2. Procedure of sedimentation and / or flotation jar-test.

2.3 최적처리조건의 정의

Jar-test 기반 침전부상공정 모의실험을 수행하기 위해 ‘최적처리조건(Optimal treatment condition)’의 개념을 도입하였다. 하수처리시설의 인 고도처리공정에서 최종처리수의 수질(T-P)을 개선하기 위해서는 일반적으로 응집제 주입농도를 높게 되며, 그 결과로 슬러지 발생량 또한 증가하게 된다. 따라서, 실제 현장에서는 처리수질을 최대한 낮추기보다는 방류수 수질기준에 부합하도록 운전하는 것이 보통이다. 본 연구에서는 이러한 하수처리시설의 운전현황을 반영하기 위하여, 최적처리조건을 방류수 수질기준인 1) T-P 0.2 mg/L 및 SS 10 mg/L의 방류수질을 동시에 만족하고, 2) 응집제를 최소 농도로 주입한 조건으로 정의하였다 (Fig. 3). 추가로, 실시간 분석이 어려운 수질항목인 SS는 상관성이 높고 실시간 분석과 현장측정이 용이한 탁도로 대체하였다. 두 항목 사이의 상관관계를 분석하여 SS 10 mg/L은 탁도 3 NTU에 대응하는 선형회귀식에 따라 대체하여 사용하였다. 한편, 본 연구에서는 T-P 0.2 mg/L 이하를 만족하는 모든 실험조건에서 탁도 3 NTU 이하를 동시에 만족하고 있기 때문에 이후에는 T-P만을 기준으로 설명하였다.

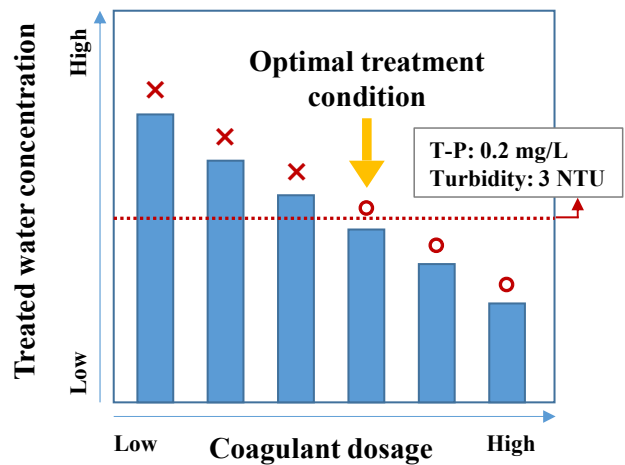


Fig. 3. Concept of optimal treatment condition.

2.4 실증플랜트를 활용한 침전부상공정의 실규모 검증

경기도 I 수질복원센터 내 2차침전지 유출수를 대상으로 SeDAF 공정의 실증플랜트를 구축하고 운전하였다. 일처리량 100 m³/d로 설계하였으며, 운전은 급속교반(0.5분)-2단 응집조(20분)-침전부상공정(20분)의



순서로 진행하였다. 실증플랜트의 운전인자 및 주요 운전결과에 대해서는 Jang et al. (2020d)의 문헌에 보다 상세히 기술하였다.

2.5 분석도구 및 기기

수질항목으로 수소이온농도(pH), 탁도, T-P, 용존성 인(PO₄-P), 화학적산소요구량(Chemical oxygen demand; COD) 및 SS를 분석하였다. pH는 HANNA instrument사의 HI2210 pH Meter를 사용하여 측정하였으며, 탁도는 HACH사의 TL2300을 사용하여 분석하였다. T-P, PO₄-P 및 COD의 측정을 위해 DR3900 분광광도계를 사용하였다. 본 연구에서 수행한 모든 측정 및 분석은 수질오염공정시험기준(국립환경과학원고시 제2020-18호)에 의거하였다. 데이터 분석 및 결과도출을 위한 통계해석에는 microsoft excel 및 IBM SPSS statistics (ver. 25)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 침전 및 침전부상공정의 최적 응집제 주입농도 도출

전체 jar-test 기반 침전 및 침전부상공정의 모의실험 결과를 Fig. 4에 정리하였다. 해당 그래프에는 유입수의 T-P 농도 0.29-3.00 mg/L에 걸쳐 도출된 전체 13 set의 결과를 응집제 주입농도별로 제시하였다. 또한, 침전공

정 이후 T-P 농도, 침전부상공정 이후 T-P 농도 및 각 조건별 응집제 주입농도를 도시하였다. 이를 통해, 1) 동일 유입수질에서 응집제 주입농도를 변화시킬 때, 2) 유입수 내 T-P 농도의 조건에 따라, 침전공정, 부상분리공정 및 전체 침전부상공정에서 제거되는 T-P의 분율과 미처리 T-P의 분율 각각을 파악할 수 있게 된다. 본 결과를 통해 침전공정 이후보다 침전부상공정 이후의 처리수질이 전체 조건에서 우수함을 확인할 수 있으며, 이는 침전공정에서 미처리된 T-P가 부상분리공정을 거침으로써 추가로 제거됨을 의미한다.

전체 결과(Fig. 4)에 ‘2.3 최적처리조건의 정의’에서 제시한 개념을 도입하면 침전공정과 침전부상공정의 각 조건에서, 목표수질(T-P 0.2 mg/L)을 만족하는 최적 응집제 주입농도를 도출할 수 있다. 원수농도 0.57 mg/L인 3번째 set의 경우에는 응집제를 각각 0-5 mg/L에 걸쳐 주입하였는데, 최적 응집제 주입농도로서 침전공정에서는 3 mg/L, 침전부상공정에서는 2 mg/L가 도출됨으로써, 침전공정에 비해 침전부상공정에서 요구되는 응집제 주입농도가 더 낮다는 사실을 확인할 수 있다. 본 연구의 전체 실험결과를 통해서 침전 및 침전부상공정에서 최적 응집제 주입농도의 상관성을 도출하고 해당 관계식을 3.2에 제시하였다.

3.2 침전 및 침전부상공정에 대한 응집제 주입농도 관계식 도출

앞서 3.1에서는 전체 모의실험 결과를 바탕으로, 침

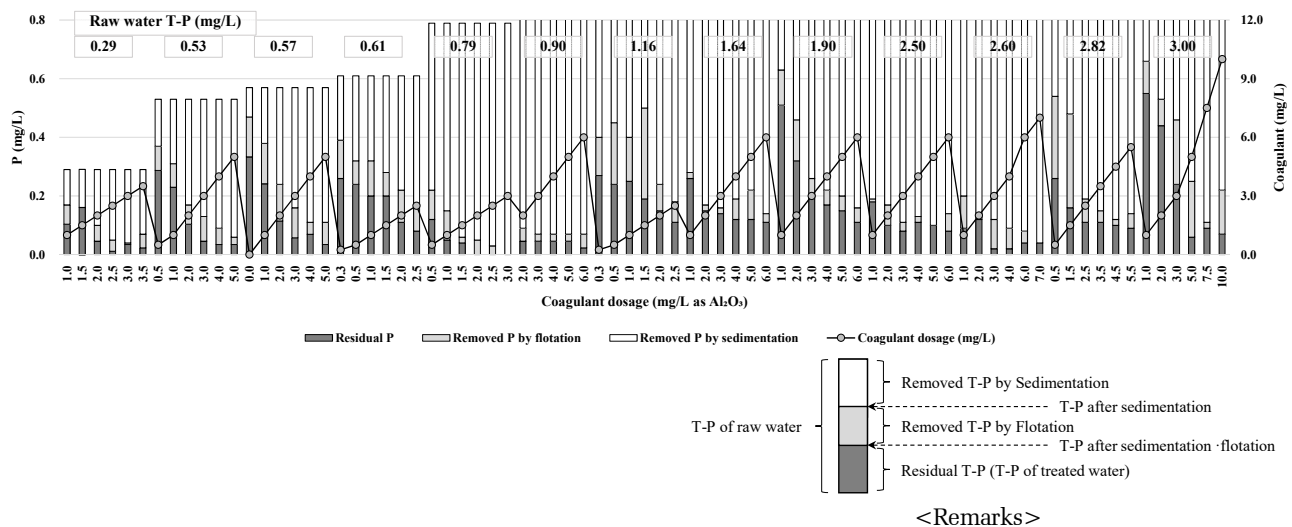


Fig. 4. Removed T-P according to raw water quality and coagulant dosage in sedimentation and flotation processes.

pp. 393-402
pp. 403-410
pp. 411-423
pp. 425-435
pp. 437-443
pp. 445-462
pp. 463-471
pp. 473-480
pp. 481-493
pp. 495-502
pp. 503-512

Table 1. Comparison of coagulant dosages between sedimentation jar-test and sedimentation-flotation jar-test (T-P criteria: 0.2 mg/L)

T-P of raw water (mg/L)	Coagulant dosage with T-P criteria 0.2 mg/L of treated water (mg/L)		T-P in treated water with optimal coagulant dosage (mg/L)		
	Sedimentation	Sedimentation-flotation	Sedimentation	Sedimentation-flotation	Difference (Δ P)
0.29	1.0	1.0	0.17	0.10	0.07
0.53	2.0	2.0	0.17	0.10	0.07
0.57	3.0	2.0	0.24	0.12	0.12
0.61	2.5	1.0	0.32	0.20	0.12
0.79	1.0	0.5	0.22	0.12	0.10
0.90	2.0	2.0	0.09	0.05	0.04
1.16	2.5	1.5	0.40	0.19	0.21
1.64	2.0	2.0	0.17	0.15	0.02
1.90	5.0	3.0	0.26	0.20	0.06
2.50	1.0	1.0	0.19	0.18	0.01
2.60	1.0	1.0	0.20	0.09	0.11
2.82	2.5	1.5	0.48	0.16	0.32
3.00	7.5	5.0	0.25	0.06	0.19

전과 침전부상공정에서 응집제 주입농도에 따른 T-P 처리수질을 확인한 바 있다. 이상의 내용을 바탕으로, 전체 유입수의 T-P 범위에 대하여 ① 최적처리조건 (T-P 0.2 mg/L)을 만족하는 침전공정 및 침전부상공정의 응집제 주입농도와 ② 최적 응집제 주입농도(침전부상공정 기준)를 주입했을 때 침전공정과 침전부상공정 간 처리수질의 차이를 set별로 정리하였으며, 그 내용은 Table 1과 같다.

위의 결과를 바탕으로 침전공정과 침전부상공정에서 최적 응집제 주입농도의 관계를 산점도로 Fig. 5(a)에 나타내었으며, 최적 응집제 주입농도(침전부상공정 기준)의 조건에서 침전공정과 침전부상공정의 처리수질의 차이를 상자수염그래프의 형태로 Fig. 5(b)에 제시하였다. 도출된 상관식은 $y = 0.60x + 0.31$ (y = 침전부상공정 최적 응집제 주입농도, x = 침전공정 최적 응집제 주입농도, $R^2 = 0.88$)과 같았다. 이는 침전공정에서 도출된 최적 응집제 주입농도의 60%에 해당하는 값이 침전부상공정의 최적 응집제 주입농도로 적용된다는 것을 의미하며, 침전공정에 대한 침전부상공정의 응집제 저감효율에 대한 지표로 이해할 수 있다. 한편, 동일한 농도의 응집제를 주입하는 조건에서 침전공정과 침전부상공정 사이의 처리수질의 차이를 분석한 결과로부터 T-P 0.05-0.25 mg/L(평균

0.11 mg/L)의 수치가 도출되었다. 이는 침전부상공정의 처리수질이 침전공정에 비해 T-P 평균 0.11 mg/L 씩 개선된다는 것을 의미한다.

추가적으로, 최적처리조건 기준을 T-P 0.2 mg/L로부터 T-P 0.1 mg/L로 강화했을 때를 상정하고, 위와 동일한 방식으로 ① 최적 응집제 주입농도 및 ② 침전공정과 침전부상공정 간 처리수질의 차이를 정리하여 제시하였다 (Table 2). 또한, 해당 결과를 바탕으로 T-P 0.1 mg/L를 만족하는 침전공정과 침전부상공정에 대한 최적 응집제 주입농도 사이의 관계(Fig. 6(a)) 및 최적 응집제 주입농도(침전부상공정 기준) 조건에서 침전공정과 침전부상공정 간 처리수질의 차이(Fig. 6(b))를 도출하였다.

다음의 최적 응집제 주입농도 관계로부터 $y = 0.70x + 0.05$ (y = 침전부상공정 최적 응집제 주입농도, x = 침전공정 최적 응집제 주입농도, $R^2 = 0.79$)의 상관식이 도출되었다. 침전부상공정에서의 최적 응집제 주입농도는 침전공정의 약 70%에 해당하며, 두 공정 간 처리수질의 차이는 T-P 0.05-0.16 mg/L(평균 0.08 mg/L)로 분석되었다.

최적처리조건 기준을 T-P 0.2 mg/L로부터 0.1 mg/L로 강화함에 따라 침전공정 대비 침전부상공정의 최적 응집제 주입농도는 약 60%에서 약 70%로 다소

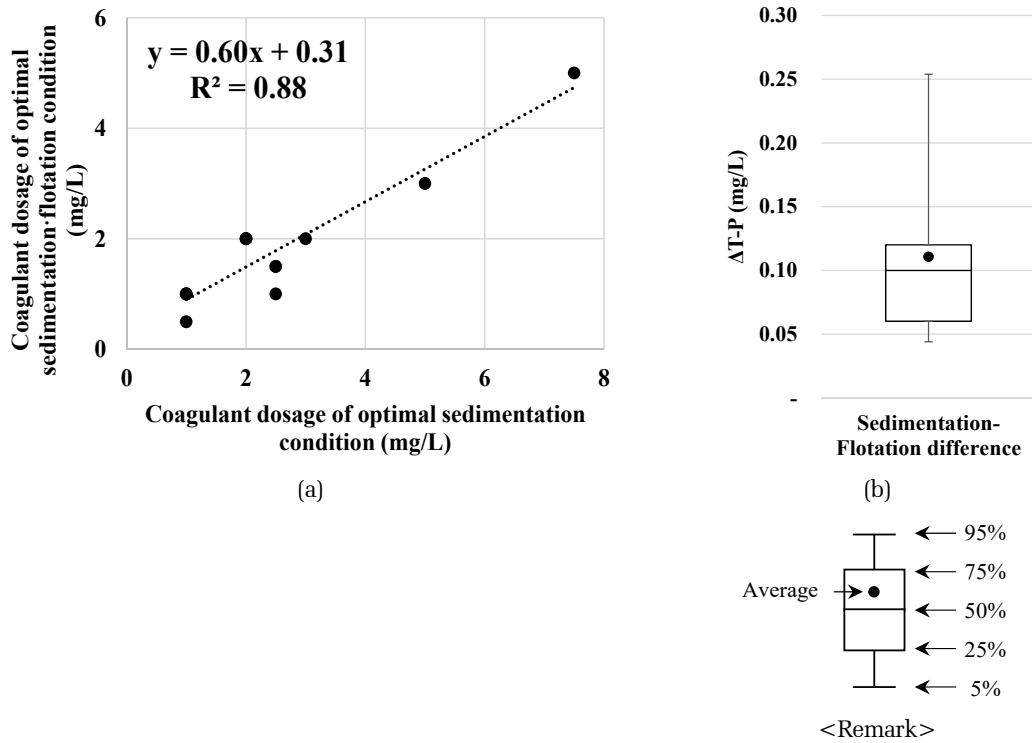


Fig. 5. Comparison of sedimentation jar-test and sedimentation-flotation jar-test (T-P criteria: 0.2 mg/L): (a) coagulant dosage and (b) difference of water quality.

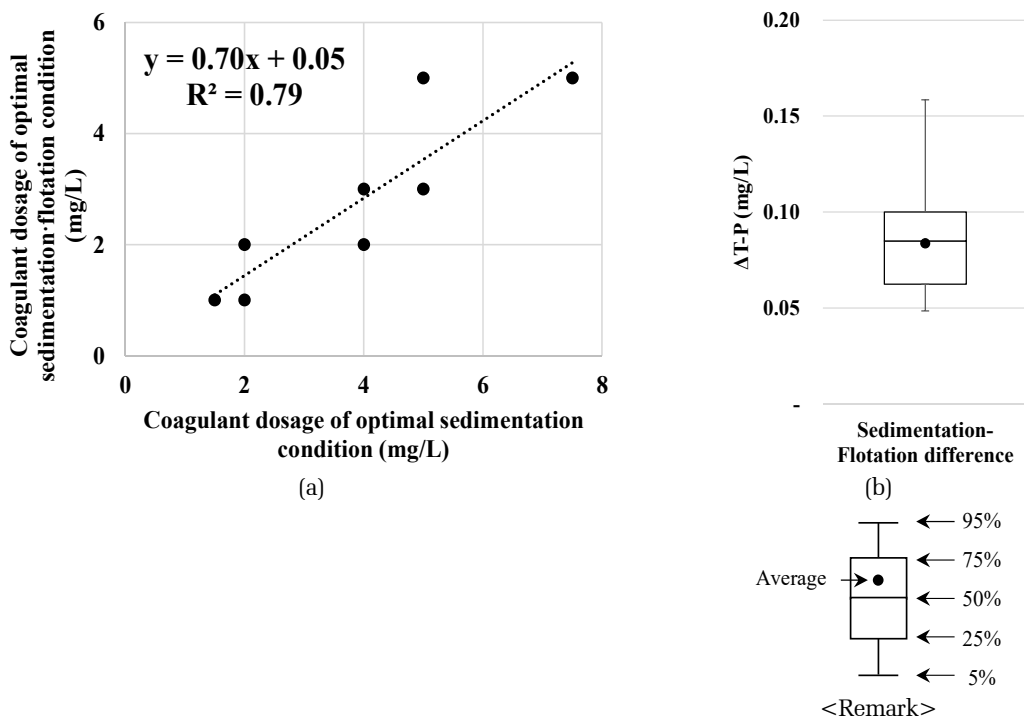


Fig. 6. Comparison of sedimentation jar-test and sedimentation-flotation jar-test (T-P criteria: 0.1 mg/L): (a) coagulant dosage and (b) difference of water quality.

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

Table 2. Comparison of coagulant dosages between sedimentation jar-test and sedimentation-flotation jar-test (T-P criteria: 0.1 mg/L)

T-P of raw water (mg/L)	Coagulant dosage with T-P criteria 0.1 mg/L of treated water (mg/L)		T-P in treated water with optimal coagulant dosage (mg/L)		
	Sedimentation	Sedimentation-flotation	Sedimentation	Sedimentation-flotation	Difference (ΔP)
0.29	2.0	1.0	0.17	0.1	0.07
0.53	4.0	2.0	0.17	0.1	0.07
0.57	5.0*	3.0	0.16	0.06	0.1
0.61	x	(2.5)	-	-	-
0.79	1.5	1.0	0.15	0.05	0.1
0.90	2.0	2.0	0.09	0.05	0.04
1.16	x	x	-	-	-
1.64	x	x	-	-	-
1.90	x	x	-	-	-
2.50	5.0	5.0	0.10	0.10	0
2.60	4.0	3.0	0.12	0.02	0.1
2.82	x	(4.5)	-	-	-
3.00	7.5*	5.0	0.25	0.06	0.19

*T-P in treated water: 0.11 mg/L

증가하며, 침전공정과 침전부상공정 간의 처리수질의 차이는 T-P 평균 0.11 mg/L에서 평균 0.08 mg/L로 다소 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 최종처리수의 목표수질이 T-P 0.1 mg/L 수준으로 매우 낮아짐에 따라 이를 달성하기 위한 응집제 주입농도가 증가하고, 이와 같이 낮은 농도에서는 응집제 주입농도의 증가율에 비해 T-P 제거효율의 제고율이 상대적으로 저하되는 일반적인 경향(Edzwald et al., 1994)과 부합하는 결과인 것으로 판단된다.

3.3 현장적용성 제고를 위한 응집제 주입농도 결정기법 검토

3.3.1 응집제 주입농도 결정기법의 개요

앞에서 논의한 결과를 바탕으로, SeDAF 공정의 현장적용성을 제고하기 위한 응집제 주입농도 결정기법을 Fig. 7에 총 3가지 방법으로 제시하였다. 방법 A는 침전부상공정 기반 jar-test를 수행하여 최적 응집제 주입농도를 결정하는 방법으로 가장 기본적인 결정기법에 해당한다. 유입수에 대해 직접 SeDAF 공정을 모의하는 2단계의 jar-test를 수행하여 그 결과를 바탕으로 결정하는 방법이다.

일반적인 침전공정 기반 jar-test는 이미 널리 쓰이고 있는 실험방법에 해당하나, (침전)부상공정 기반 jar-test의 경우에는 실험방법이 일반화되어있지 않으며 고가의 미세기포수 제조장치를 필요로 하므로, 현장적용이 일반적이지 않다는 어려움이 있다. 따라서 현장적용성을 향상시키기 위하여 침전공정 기반의 jar-test를 기준으로 최적 응집제 주입농도를 도출한 뒤 해당 값을 ‘침전 및 침전부상공정 간 응집제 주입농도의 상관식’에 대입하여 최종적으로 침전부상공정의 최적 응집제 주입농도를 도출하는 방식을 방법 B로 정의하였다. 방법 B에서는 유입수에 대해 기존 침전공정 기반의 jar-test만을 수행한 다음, 이 결과로부터 SeDAF 공정의 최적 응집제 주입농도를 결정하게 된다.

방법 C의 경우, 기존에 분석된 데이터를 바탕으로 유입수의 지표항목(T-P 또는 탁도)에 대하여 응집제 주입농도를 결정하는 선형회귀식을 도출해 둔 상태에서, 향후 운전 시 유입수 지표항목의 수질을 측정하여 최적 응집제 주입농도를 결정하는 방식이다 (Jang et al., 2020a). 하수처리시설의 인 고도처리공정에서 응집제 주입농도를 결정하기 위한 지표항목으로서의 T-P 및 탁도의 유용성에 대해서는 여기에서 상술하지 않았다 (Jang et al., 2020d).

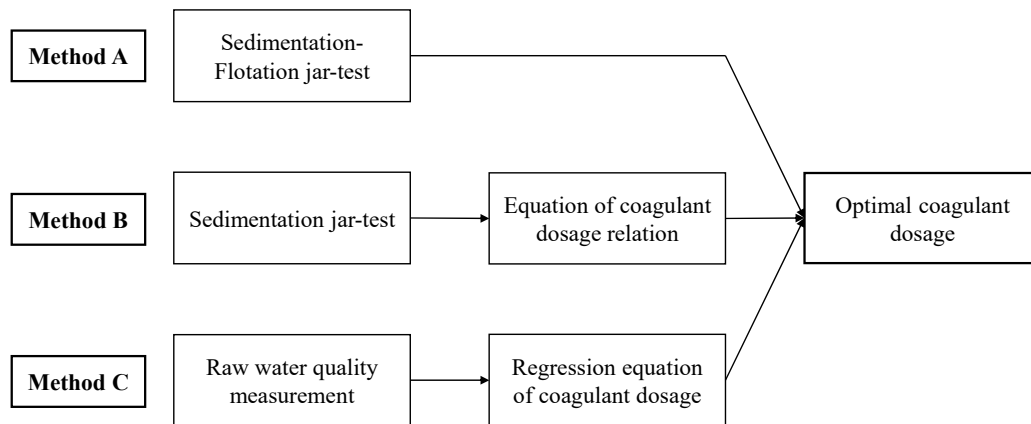


Fig. 7. Several decision methods of appropriate coagulant dosage for enhanced phosphorus removal.

3.3.2 침전공정 및 부상분리공정의 T-P 제거특성 검토

위의 3.3.1에서 논의한 세 가지 방법 중에서, 방법 A와 방법 C는 주지(周知)의 사실에 해당하므로 여기에서는 별도의 논의를 생략할 수 있을 것으로 판단된다. 여기에서는 방법 B가 유효한지에 대해 집중적으로 논의하였다.

Fig. 8에 응집제 주입농도에 따른 T-P 제거농도의 분포를 유입수의 농도그룹별로 제시하였다. 여기에서는 ‘제거농도’를 유입수와 처리수의 농도의 차, 즉, 제거된 오염물질의 농도로 정의하였다. 침전공정 이후에는 응집제 주입농도가 동일하더라도 유입수의 농도그룹별로 제거농도에 명확한 차이가 관찰된다 (Fig. 8(a)). 즉, T-P 제거농도는 응집제 주입농도에 따라 미소하게 증가하지만 보다 직접적으로 유입수의 농도가 높은지 낮은지에 따라 결정된다는 것을 보여준다. 이와는 달리, 부상 분리공정의 T-P 제거농도에는 유입수의 농도그룹별 차

이가 뚜렷하지 않고 혼재되어 있을 뿐만 아니라 T-P 제거농도 자체도 침전공정(T-P 제거농도 0.0-3.0 mg/L) 대비 약 1/10 수준(T-P 제거농도 0.0-0.3 mg/L)으로 낮아지는 것이 관찰되었다 (Fig. 8(b)). 즉, 유입수의 전체 T-P 제거농도는 침전공정에서 사실상 높은 상관성으로 결정되며, 부상분리공정이 미치는 영향은 상대적으로 미미할 뿐만 아니라 응집제 주입농도에 대해서도 무작위하게 높은 독립성을 갖고있는 것으로 나타났다. 이상의 논의는 침전공정의 결과만을 사용하여 응집제 주입농도를 도출하는 방법 B가 충분히 유효할 수 있음을 시사하는 것으로 판단하였다.

3.3.3 응집제 주입농도 결정기법의 현장적용 사례 검토

앞서 제시된 응집제 주입농도 결정기법 A, B, C를 실증플랜트의 유입수 조건에 대하여 적용하고, 각각 최

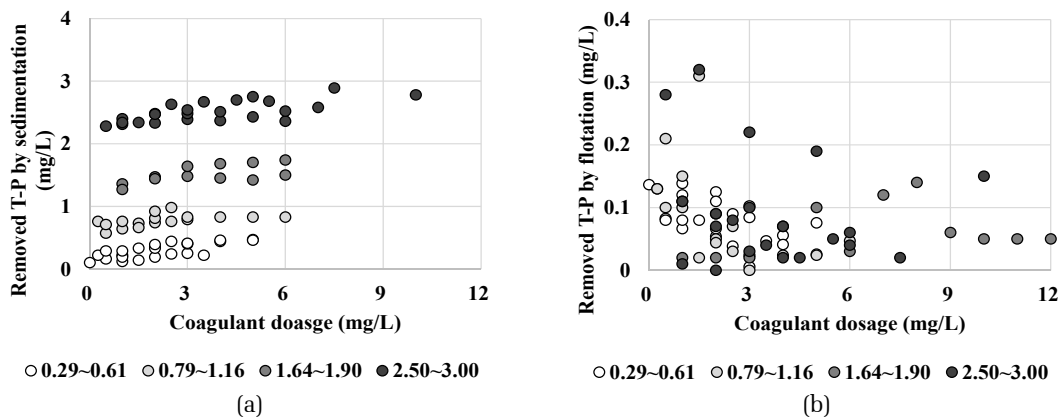


Fig. 8. Scatter plot of removed T-P according to coagulant dosage in accordance with raw water group: (a) sedimentation and (b) flotation.

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

Table 3. Case study for optimal coagulant dosage decision

Raw water quality		T-P 0.41 - 0.60 mg/L, PO ₄ -P 0.15 mg/L, reactive P 0.17 mg/L	
Optimal coagulant dosage (T-P criteria 0.2 mg/L)	Classification	Sedimentation	Sedimentation-flotation
	Method A	-	2.0 mg/L
	Method B	2.5 mg/L	1.8 mg/L
	Method C	-	0 mg/L

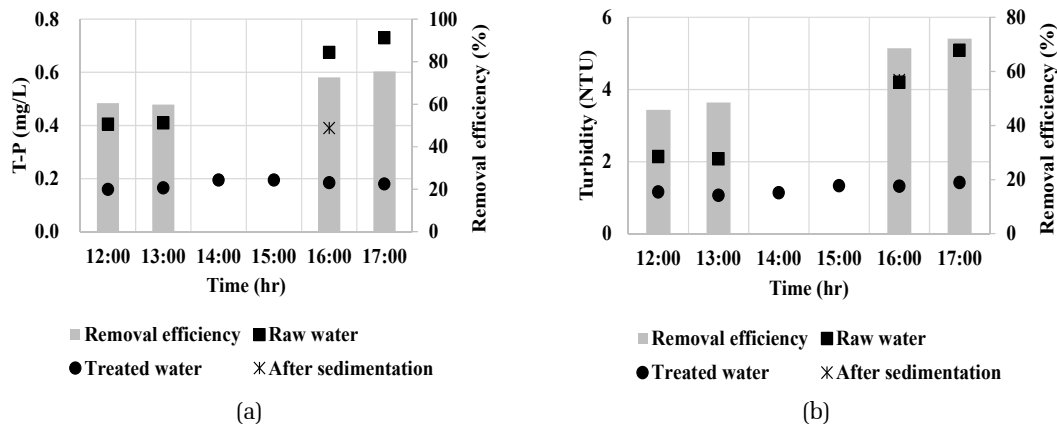


Fig. 9. T-P and turbidity of raw water, treated water, and their removal efficiencies with coagulant dosage of 1.8 mg/L: (a) T-P and (b) turbidity.

적 응집제 주입농도를 도출한 사례를 제시하면 Table 3과 같다.

응집제 주입농도 결정기법 A를 적용하기 위해 침전부상공정 jar-test를 수행한 결과, 최적 응집제 주입농도로 2.0 mg/L as Al₂O₃가 도출되었다.

앞에서 논의한 3.2를 바탕으로, 응집제 주입농도 결정기법 B를 활용하여 최적 응집제 주입농도를 도출하였다. 침전공정 jar-test를 실시한 결과, 침전공정의 최적 응집제 주입농도로 2.5 mg/L as Al₂O₃가 도출되었다. 이를 3.2에서 도출한 침전-침전부상 응집제 주입농도 관계식($y = 0.6x + 0.31$, y = 침전부상공정 최적 응집제 주입농도, x = 침전공정 최적 응집제 주입농도)에 대입하여 침전부상공정의 최적 응집제 주입농도 1.8 mg/L를 도출하였다. 방법 B에 따라 결정된 응집제 주입농도를 바탕으로 실증플랜트를 운전한 결과 (Fig. 9), 최종처리수의 T-P는 0.2 mg/L 이하, 탁도는 2 NTU 이하를 안정적으로 만족하는 것으로 나타났다.

3.4 현장적용성 제고를 위한 응집제 주입농도 자동제어기법 제안

위에서 논의한 방법 A와 방법 B는 모두 jar-test를

실시해야만 하는 어려움이 따른다. 한편, 방법 C를 활용하면 보다 용이하게 응집제 주입과정을 자동화할 수 있는 장점이 있다. 하수처리시설에서 2차 침전지 유출수를 대상으로 하는 SeDAF 공정에서, 적정 응집제 주입농도는 유입수의 T-P 농도와 매우 높은 상관성을 갖고 있다는 사실이 보고된 바 있다 (Jang et al., 2020a)(식 1).

$$\text{Coagulant dosage (mg/L as Al}_2\text{O}_3) = (1.297 \times \text{유입수 T-P (mg/L)}) - 0.811 \quad (1)$$

한편, T-P 항목을 분석하기 위해서는 가열 및 발색이 필요하기 때문에 현장 조건에 따라서 즉시측정 또는 연속측정이 곤란할 수 있다. 이와 관련하여, 유입수 수질항목 간 상관관계 분석을 통하여, 하수처리시설에서 2차 침전지 유출수의 경우 T-P와 가장 상관성이 높은 항목이 탁도라는 사실이 보고된 바 있다 (Jang et al., 2020d). 따라서 T-P의 측정에 곤란이 따르는 경우 또는 정밀한 조작이 필요치 않은 경우에는 T-P를 탁도로 대체하여 응집제 주입농도를 산정하는 방식과 이를 반영한 자동제어기법의 알고리즘을 제시하고자 하였다.

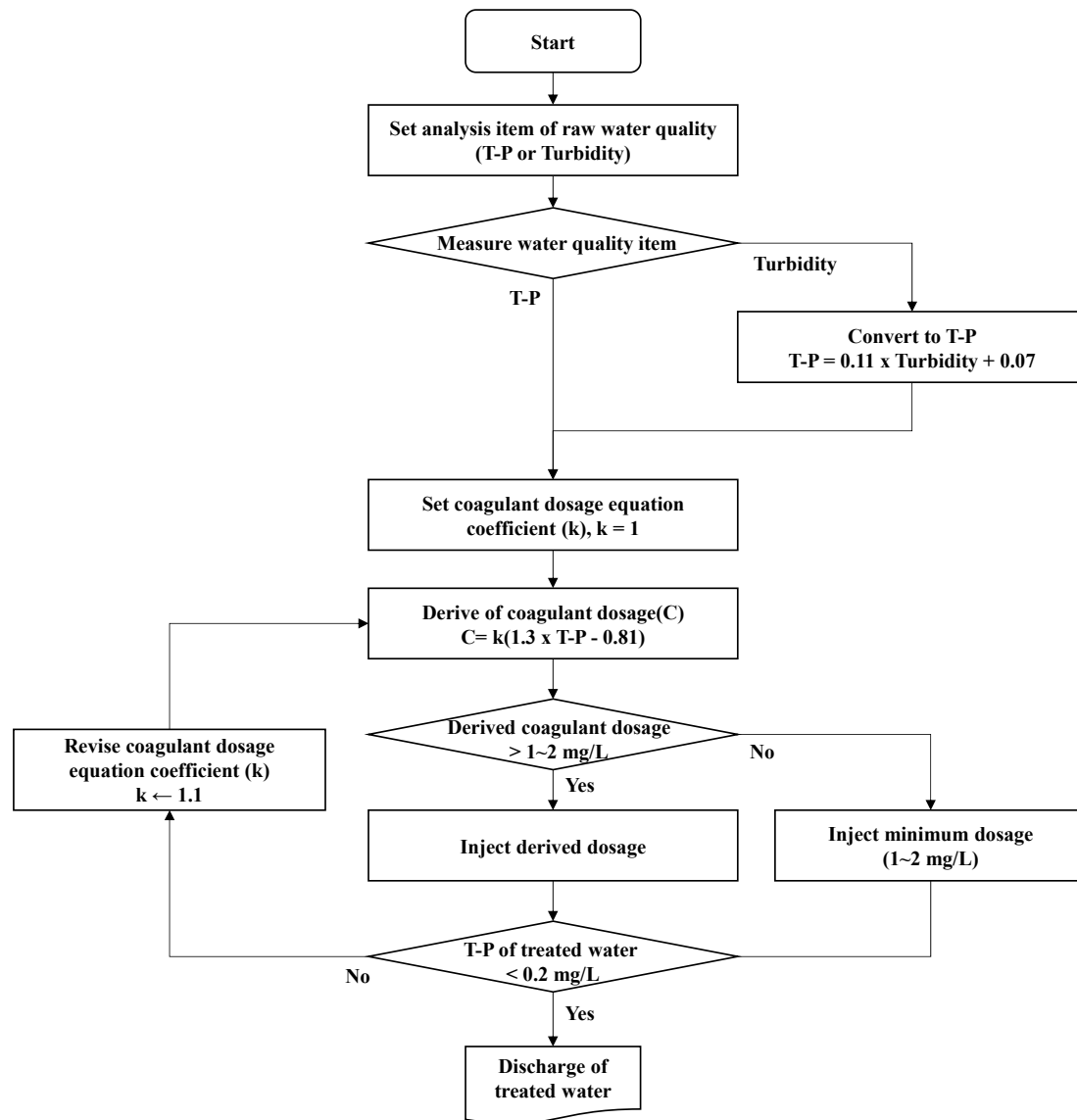


Fig. 10. Decision making algorithm of optimal coagulant dosage for automatic operation in SeDAF process.

본 연구에서는 다수의 jar-test 및 실증플랜트 유입수질(n=87) 사이의 상관관계를 분석하여 T-P와 탁도간의 상관식을 다음과 같이 도출하였다 (식 2).

$$\begin{aligned} \text{유입수 T-P (mg/L)} &= & (2) \\ (0.11 \times \text{유입수 탁도 (NTU)}) &+ 0.07 \quad (R^2 = 0.81) \end{aligned}$$

위의 식 2를 기준에 보고된 응집제 주입농도 결정식(식 1)에 활용함으로써 (Jang et al., 2020a), SeDAF 공정에 적용가능한 응집제 주입농도 자동제어기법(안)을 제시하고 이를 Fig. 10에 도시하였다. 이를 활용하면 유입수의 T-P 또는 탁도를 측정함으로써 위의

상관식에 의거하여 응집제 주입농도를 결정하는 응집제 주입농도 자동제어시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결론

본 연구에서는 응집제 사용량 및 슬러지 발생량 저감 측면에서 기존의 인 고도처리공정에 비해 경제성을 향상시킨 일체형 침전부상공정(SeDAF process)의 운영성에 대한 고찰을 수행하였다. 특히, SeDAF 공정의 현장적용성을 제고하기 위한 운영방법 중에서 적

pp. 393-402
pp. 403-410
pp. 411-423
pp. 425-435
pp. 437-443
pp. 445-462
pp. 463-471
pp. 473-480
pp. 481-493
pp. 495-502
pp. 503-512

정한 응집제 주입농도의 결정기법에 대하여 집중적으로 검토하였다. 최적처리조건(처리수 T-P 0.2 mg/L 이하를 만족하는 최소 응집제 주입조건)을 정의하고, 다양한 응집제 주입농도 결정기법을 제시하는 한편, 100 m³/d 규모의 실증플랜트(경기도 G시 소재)에서 각 결정기법의 적용성을 실증하였다. 본 연구의 주요한 결과는 다음과 같다.

- (1) 최적처리조건(T-P 0.2 mg/L)을 만족하는 침전공정과 침전부상공정의 응집제 주입농도를 비교·검토한 결과, $y = 0.60x + 0.31$ (y = 침전부상공정 최적 응집제 주입농도, x = 침전공정 최적 응집제 주입농도, $R^2 = 0.88$)이 도출되었다.
- (2) 강화된 최적처리조건(T-P 0.1 mg/L)을 만족하는 침전공정과 침전부상공정의 응집제 주입농도를 비교·검토한 결과, $y = 0.70x + 0.05$ (y = 침전부상공정 최적 응집제 주입농도, x = 침전공정 최적 응집제 주입농도, $R^2 = 0.79$)의 상관식이 도출되었다.
- (3) 최적처리조건을 달성하기 위한 침전부상공정의 응집제 사용량은 침전공정에 비해 60-70%의 주입만으로도 동일한 효율을 얻을 수 있으며, 이를 통해 SeDAF 공정을 도입할 경우 기존의 인 고도처리공정에 비해 응집제 사용량 및 슬러지 발생량을 30-40%까지 저감할 수 있는 것으로 분석되었다.
- (4) 응집조건에 따른 응집제 사용량 저감특성을 정량적으로 분석한 결과를 바탕으로, 현장적용성을 제고하기 위하여 다음의 3가지 응집제 주입농도 결정기법을 제안하였다.
 - 방법 A: jar-test 기반 침전부상공정 모의실험 수행
 - 방법 B: jar-test 기반 침전공정 모의실험 수행 후 침전-침전부상공정 응집제 주입농도 관계식 대입
 - 방법 C: 유입수 농도(T-P 또는 탁도)를 활용한 응집제 주입농도 회귀분석식 대입
- (5) 특히, 본 연구에서는 하수처리시설의 인 고도처리공정에서 유입수의 T-P 또는 탁도를 활용하여 응집제 주입농도를 결정할 수 있는 방법 C를 바탕으로 한 응집제 주입농도 자동제어기법을 제안하고, 이 기법의 실험적 근거에 대하여 검토하였다.

사 사

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제번호: 20200425). 이에 감사드립니다.

References

- Chae, M.B. and Oh, S.C., Ministry of Environment. (2012). A study on the improvement methods for treatment efficiency of phosphorus treatment facilities, 1-183.
- Chang, H.Y. (2017). Phosphorus removal by hydroxyapatite crystallization using limestone filter bed in wastewater effluent, Master's thesis, University of Science and Technology, Daejeon, Korea, 1-67.
- Edzwald, J.K., Bunker, D.Q., Dahlquist, J., Gillberg, L. and Hedberg, T. (1994). *Chemical Water and Wastewater Treatment III*. Springer-Verlag, Berlin, 3-18.
- George, T. and Franklin, L.B. (2016). *Wastewater Engineering*. 5th edition, Donghwa Publishing, Seoul, 1-1942.
- Jang, Y.J., Jung, J.H., Chang, H.Y., Park, N.R., Lim, H.M. and Kim, W.J. (2020a). Decision of optimal coagulant dosage for SeDAF(sedimentation and dissolved air flotation) process applicable to enhanced phosphorus removal, KSWST J. Water Treat., 28(4), 33-42.
- Jang, Y.J., Jung, J.H., Chang, H.Y., Park, N.R., Maghfiroh, M. and Kim, W.J. (2020b). Sludge production characteristics of Sedimentation-Dissolved air flotation (SeDAF) process for enhanced phosphorus removal, J. Korean Soc. Environ. Eng., 42(11), 529-538.
- Jang, Y.J., Jung, J.H., Ahn, K.H., Lim, H.M. and Kim, W.J. (2020c). Applicability of Al/P (aluminium/phosphorus) ratio in SeDAF process for enhanced phosphorus removal, J. Korean Soc. Environ. Eng., 42(11), 539-547.
- Jang, Y.J., Jung, J.H., Lim, H.M. and Kim, W.J. (2020d). Empirical evaluation for design parameters and operating characteristics of the integrated sedimentation and flotation process (SeDAF) at demonstration-plant scale, J. Korean Soc. Water Wastewater, (In press).
- Kim, B.C., Sa, S.H., Kim, M.S., Lee, Y.K. and Kim, J.K. (2007). The limiting nutrient of eutrophication in reservoirs of Korea and the suggestion of a reinforced phosphorus standard for sewage treatment effluent, J. Korean Soc. Water Environ., 23(4), 512-517.
- Kim, S.J., Park, S.M., Park, H.Y., Lee, K.C. and Kwon, O.S., National Institute of Environmental Research. (2010). Best



available technology and management practice using physicochemical methods for phosphorus removal in municipal wastewater treatment plants in the priority areas of the 4 major rivers, NIER No. 2010-01-1176, 1-23.

Lee, H.K. (2014). A Case study on the Evaluation of efficiency treatment plant TP treatment facility in public sewage source, Master's thesis, Chonnam National University, Chonnam, Korea, 1-54.

Lee, J.I., Jo, Y.M., Jung, H.Y. and Hong, I.S., Gyeonggi Research Institute. (2018). Method for efficient treatment of sewage sludge, Policy Res., 2018-39, 1-100.

Malley, (Jr.) J.P. and Edzwald, J.K. (1991). Laboratory comparison of DAF with conventional treatment, J Am Water Works Assoc, 83(9), 56-61.

Ministry of Environment. (2017). Korean design standards of water treatment facility, KC Code KDS 57 55 00, 1-100.

Ministry of Environment. (2019). Korean design standards of sewage facility, KC Code KDS 61 00 00, 1-107.

So, S.H., Lee, B.H., Park, J.H., Cha, H.Y., Kim, H.S. and Song K.G. (2018). Improvement of dewaterability and settleability of sewage sludge using coagulation sludge, J. Korean Soc. Water Wastewater, 32(2), 89-96.

Wetzel, R.G. (2001). *Limnology*, 3rd edition, Academic press, Massachusetts, 239-288.

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512