ISSN(Print): 1225-7672 / ISSN(Online): 2287-822X
DOI https://doi.org/10.11001/jksww.2024.38.4.233

하수처리장 총인 제거율 개선을 위한 고분자 응집제 적용 및 최적 운전인자 도출

Application of polymer coagulants and optimization of operational parameters to improve total phosphorus removal efficiency in wastewater treatment plants

김규원[1] · 최윤성[2] · 이승환[3,*]
Gyu-won Kim[1] · Yun-Seong Choi[2] · Seung-Hwan Lee[3,*]

[1]에코비트워터 김천사업소
[2]에코비트워터 예천하수슬러지사업소
[3]금오공과대학교 환경공학과
[1]Gimcheon Works Environment Team, Ecorbit Water
[2]Yecheon Sewage Sludge Treatment Plant, Ecorbit Water
[3]Department of Environment Engineering, Kumoh National Institute of University

ABSTRACT

This study evaluates the potential of various coagulants to enhance the efficiency of total phosphorus removal facilities in a sewage treatment plant. After analyzing the existing water quality conditions of the sewage treatment plant, the coagulant of poly aluminium chloride was experimentally applied to measure its effectiveness. In this process, the use of poly aluminium chloride and polymers in various ratios was explored to identify the optimal combination of coagulants. The experimental results showed that the a coagulants combination demonstrated higher treatment efficiency compared to exclusive use of large amounts of poly aluminium chloride methods. Particularly, the appropriate combination of poly aluminium chloride and polymers played a significant role. The optimal coagulant combination derived from the experiments was applied in a micro flotation method of real sewage treatment plant to evaluate its effectiveness. This study

Received 26 March 2024, revised 10 May 2024, accepted 16 May 2024.

*Corresponding author: Seung-Hwan Lee (E-mail: dLee@kumoh.ac.kr)

1 김규원 (사원) / Gyu-won Kim (Associate)
경상북도 김천시 공단로 58, 39559
58, Gongdan-ro, Gimcheon-si, Gyeongsangbuk-do 39559, Republic of Korea

2 최윤성 (소장) / Yun-Seong Choi (Chief)
경상북도 예천군 예천읍 상동길 49-50, 36830
49-50, Sangdong-gil, Yecheon-eup, Yecheon-gun, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

3 이승환 (정교수) / Seung-Hwan Lee (Professor)
경상북도 구미시 대학로 61, 39177
61, Daehak-ro, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do 39177, 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. 199-208
pp. 209-221
pp. 223-232
pp. 233-242

presents a new methodology that can contribute to enhancing the efficiency of sewage treatment processes and reducing environmental pollution. This research is expected to make an important contribution to improving to phosphorus remove efficiency of similar wastewater treatment plant and reducing the ecological impact from using coagulants in the future.

Key words: Poly aluminium chloride, Polymer, Coagulant dosage ratio analysis, Improvement of total phosphorus treatment efficiency

주제어: 폴리염화알루미늄, 중합체, 응집제 투입 비율 분석, 총인 처리효율 개선

1. 서 론

정부는 하수도 수질관리 강화를 위하여 방류수 수질 기준을 지속적으로 강화하고 있으며, 특히 총인(Total Phosphorus, TP)의 경우 1996년 방류수 수질 기준에 포함된 후 2001년 10월 한 차례 강화되었고 2012년 1월부터 설계용량, 지역, 항목에 따라 차등으로 강화되었으며 수역에 따라 기존 2.0 mg/L에서 최대 0.2 mg/L까지 강화됐다 (Seo et al., 2014; Jeong et al., 2014). 또한 같은 해 수질오염총량관리제를 시행하여 현재까지 운영되고 있다 (Jeong et al., 2011). 최근에는 방류수 재이용에 대한 필요성이 높아지면서 재이용에 적합한 수질 기준 항목 확대 등이 요구되고 있다 (Kim, 2018).

인은 하천 등 자연 상태에서는 미량으로 존재하나 생활하수 내에서는 높은 농도로 포함되어 있다. 일반적으로 일상생활에서 사용되는 합성세제, 음식물 쓰레기 등에서 많이 발생 된다. 특히 합성세제가 절반 이상의 비율을 차지하고 있다 (Hong, 2022). 일반적으로 미생물이 흡수 가능한 인의 양에는 한계가 있으며 일반적으로 약 1.0 mg/L가 최저 농도로 보고되고 있다 (Park et al., 2011). 기존 생물학적 처리공정으로는 강화된 수질기준을 만족시키는데 어려움이 있어 다양한 공법의 총인처리시설이 전국적으로 설치되고 있다 (Jeong et al., 2011). 인은 상대적으로 수중에서 용해도가 낮기 때문에 침전물 형태로 제거하기가 용이하다. 이런 기작에 의해 미생물에 흡수된 상태로 제거되며 저농도 인의 경우 생물학적 처리공정에 비해 화학적 처리공정의 효과가 더욱 뛰어나다 (Han et al., 2012).

연구대상시설은 G시에 위치한 공공하수처리장으로 용존부상공법(DAF)을 기반으로 둔 마이크로부상공법의 총인처리시설을 운영하고 있다. 해당 시설의 2018~2021년 연평균 총인 제거율은 각각 61.8% 62.6%, 62.9%, 63.5%이며 해당 기간 중 유입수의 최고 총인 농도는 1.344 mg/L이다. 총인처리시설로 유입되는 총인의 농도가 1.0 mg/L를 초과하는 경우 대상시설의 방류수질기준인 0.5 mg/L 이하로 안정적인 처리가 어려우며, 적정 PAC 주입농도를 초과하는 경우 탁도가 증가하여 총인 제거율을 높이기 위해 PAC 주입농도를 높이는데 한계가 있다. 이러한 이유로 기존 PAC 10%를 대체할 수 있는 대안이 필요하다. 연구대상시설은 고농도 총인 유입수가 발생하는 경우 고상의 양이온 폴리머를 인력을 통해 수동으로 투입하여 제거율을 높이는데 사용하였으나 적정 주입농도에 대한 연구가 진행된 적이 없으며 인력을 통한 투입으로 취약시간대 고농도 유입 시 안정적인 총인 제거가 어려운 실정이다. 또한 총인 제거를 위한 응집제 적용과 관련된 연구 논문 중 실제 하수처리장에 적용하여 장기간 운영 데이터를 수집한 연구는 부족하다. 이러한 문제를 해결하고자 연구대상시설의 총인처리시설에 사용 중인 PAC 10%를 폴리머와 혼합하여 적용하는 방법과 PAC 17%를 단독으로 적용하는 방법을 비교하여 적합한 응집제를 실험실 규모에서 평가하고 실규모 총인처리시설에 적용하여 1년간의 운전 데이터를 수집하였다. 해당 연구는 대상 하수처리장의 총인 제거율을 70% 이상으로 유지하여 안정적인 수질관리와 나아가 비슷한 조건의 하수처리장에서 응집제를 적용하기 위한 정보를 제공하는데 기여하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 연구대상시설 개요

본 연구에 바탕이 되는 시설은 G시의 제1 산업단지 내에 위치한 하수처리장으로 설계용량 80,000 ㎥/day으로 운영 중이다. 공법은 TEC-BNR로 생물학적 처리공법을 기반으로 두고 있으며 외부탄소원으로 처리장으로 반입되는 음식물쓰레기를 살발효 시켜 발생된

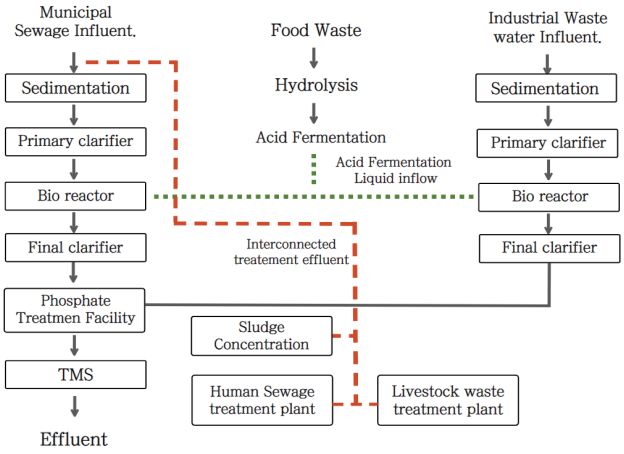


Fig. 1. Flow diagram of water treatment system.

산발효 액을 생물 반응조로 공급한다. Fig. 1.은 연구대상시설의 공정도를 나타내고 있다. 하수 계열과 공단하수 계열이 별도로 유입되어 각 계열 공정에 따라 처리 후 최종 침전 후 혼합되어 총인처리시설로 유입된다.

2.2 연구대상시설 총인처리시설

Table 1은 연구대상시설의 총인처리시설의 주요 재원이다. 운영 중인 공법은 마이크로부상공법으로 시설용량 80,000 ㎥/day으로 설계되었다. 총인처리시설 유입부에 위치한 착수정에는 총인 처리를 위한 폴리염화알루미늄(PAC 10%)이 투입되며 혼합 후 가압부상조의 부상분리 시스템을 거쳐 유출된다.

2.3 마이크로부상공법

Fig. 2.는 연구대상시설의 마이크로부상공법의 공정도를 나타내고 있다. 미세기포를 사용하여 유입수 내 floc과 부착하여 수면으로 띄워내는 부상분리를 기반

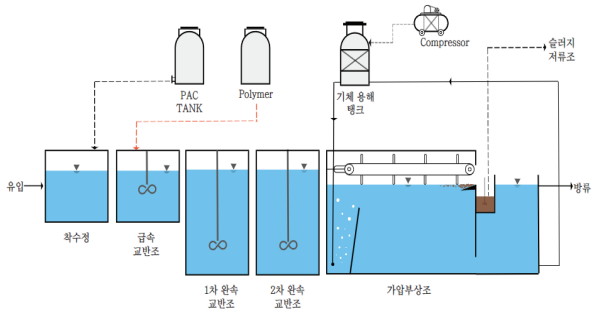


Fig. 2. Schematic diagram of phosphate treatment plan facility.

으로 하고 있다. 미세기포의 정의는 활용하는 분야에 따라 조금씩 차이를 보이지만 일반적으로 10~100 μm를 미세기포라고 정의한다 (Sim, 2017). 또한 1~3 mm/min의 상승속도를 가지며 설계수질을 만족하기 위해서는 균일하고 미세한 공극의 버블 생성이 요구된다 (Goo, 2023). 50 μm 미만의 미세기포는 부상 과정에서 수축 후 소멸한다. 이 과정에서 기포의 크기가 점점 작아지고 표면적이 증가하여 기포와 액체 간의 접촉 면적이 커지며 기체 전달율이 증가하게 된다 (Sim, 2017). 연구대상시설의 마이크로부상공법은 운전압력 2.5 kg_f/cm^2에서 1~40 μm의 미세기포를 발생시켜 하수처리에 이용하고 있다. 폴리머 용해장치 적용 후 운전 조건은 급속교반기 55Hz, 완속 교반기 40~45Hz의 범위로 운전하였으며, 착수정에서 PAC 10%가 투입되고 급속 교반조에 용해된 액상 폴리머가 투입된다. 총인처리시설은 총 2계열로 급속교반조(W 3.0m × L 3.5m × He 2.3m)로 유입되어 1차, 2차 완속교반조(W 5.0m × L 5.0m × 4.7m × 2지)를 거쳐 가압부상조(W 6.0m × L 11.0m × He 2.9m × 4지)로 이동한다. PAC 투입은 총인처리시설에 설치된 주입펌프의 Hz 변화를 통해 투입되는 PAC의 농도를 조절하

Table 1. Phosphate treatment facility resources (Yoon, 2011)

Classification	Content
Pressurized Water Generation	Recirculation Pressurization Method
Air Mixing	Injection into Gas Dissolution Tank
Gas-Liquid Contact Method	Gas Dissolution Tank : Liquid Film Contact
Gas-Liquid Contact Efficiency	Gas Dissolution Tank : 99%
Micro bubbles Size	1 μm~40μm
Operating Pressure	2.5 kg_f/cm^2

Table 2. Coagulant dosage concentration

Classification		Concentration (mg/L)						
PAC 10%	Dosage	12.0	24.0	36.0	48.0	60.0	72.0	84.0
	Al_2O_3	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4
PAC 17%	Dosage	12.0	24.0	36.0	48.0	60.0	-	-
	Al_2O_3	2.0	4.1	6.1	8.2	10.2	-	-

였다. 폴리머 투입 농도는 jar-test 결과를 바탕으로 총인처리시설의 PAC 투입농도를 36～48 mg/L, 폴리머 0.05% 0.10～0.20 mg/L로 설정하여 운전하였다.

2.4 연구대상시설 운영 현황

연구 대상시설은 하수와 공단하수가 각 계열로 최종침전지까지 처리 후 총인 처리시설로 혼입되어 처리하고 있다. 연구대상시설에서 운영 중인 실험실에서 일일 분석한 자료를 조사한 결과 연구시작 전 7개월 간(21년도 9월～22년도 3월)의 평균 총인 수질은 다음과 같다. 하수 유입 4.091 mg/L 공단하수 유입 3.395 mg/L, 총인처리시설 유입수 0.354 mg/L, 최종방류수는 0.121 mg/L 이다. 같은 기간 총인처리시설 유입수의 최고 농도는 0.712mg/L, 최종방류수는 0.239 mg/L이다. 폴리머 용해장치 설치 이후 수집한 데이터는 연구대상시설에서 운영 중인 실험실에서 실험한 결과와 약품 사용량 및 슬러지 발생량은 연구대상시설의 운영자료로 해당 자료는 국가하수도정보시스템에 입력되는 자료와 동일한 자료를 사용하였다.

2.5 Jar-test 실험방법

실험에 사용된 Jar-Tester는 창신과학에서 제조한 모델명 C-JT-1, 제품 규격 890 x 280 x 470(mm)의 tester를 사용하였으며 모든 테스트의 교반속도는 120 rpm에서 1분간 급속교반 하였고 60 rpm에서 15분간 완속교반 후 30분간 침전시켰다. Test에 사용된 응집제는 PAC(LID CHEMICAL, 비중 1.2) 10%, PAC(LID CHEMICAL, 비중 1.2) 17%와 보조응집제 polymer(SNF Korea co, 분말형 양이온성 고분자 응집제(Type B)를 이용하여 실시하였다.대상 시료는 해당 연구시설의 총인처리시설 유입구(착수정)에서 채수하였으며, 채취한 시료를 1 L 비이커에 각각 분취하여 교반 및 침전 후 상등액을 분석하였다. 수질 시험방법은 수질오염공정시험기준 총인 자외선/가시선 분광법, 부유물질(Suspended solids, SS)을 준수하여 분석하였으며, 시험에 사용된 장비는 총인 측정을 위해 HACH사의 분광광도계(DR-6000), pH 측정기는 TOA 사의 pH Meter(HM-30)를 사용하였다. 1차 test에서는 PAC 10%의 약품 주입농도에 변화를 주어 jar-test를 실시하였다. 2차 test는 PAC 17%를 1차 테스트와 동일한 주입농도로 test를 실시하여 10%와 비교하였을 때 제거율에서 어떤 차이를 보이는지 비교하였다. PAC 10%와 17%의 비교를 위해 각 샘플의 TP 제거에 사용된 Al_2/P 몰비를 비교하여 평가하였다. 3차, 4차 test는 1차 test에서 얻은 결과를 바탕으로 PAC 10%를 단독 주입 결과를 바탕으로 선정한 최적주입농도와 폴리머 0.05% 주입농도에 변화를 주어 PAC, 폴리머 혼합 test를 진행하였다. PAC 주입농도는 10%와 17% 동일하게 주입하였으며 단계별 주입량에 따른 Al_2O_3의 농도(mg/L)는 Table 2와 같다.

2.6 총인처리시설 폴리머 용해장치

2022년 12월 연구대상시설에 폴리머 용해장치가 설치되었다. 용해장치는 3단의 격벽으로 이루어져 있으며, 첫 번째 조에 고상 폴리머가 물과 함께 투입되고 두 번째, 세 번째 조에서 교반기를 통해 용해된 후 총인처리시설 급속 교반조로 폴리머가 투입된다. 일 최대 40 kg의 분말 폴리머 투입이 가능하며 현장에서 시스템 설정을 통해 0.05～0.20% 범위로 폴리머 농도 조절이 가능하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연구대상시설 jar-test 결과

PAC 10% 12 mg/L, 24 mg/L, 36 mg/L, 48 mg/L, 60 mg/L(1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0 mg Al_2O_3/L) 주입 결과 각

각 총인 제거율 34.9%, 47.4%, 62.0%, 67.5%, 68.8%로 나타났다. 주입량이 증가함에 따라 제거율도 증가하였으며, Al_2/P 몰비는 5.1, 6.9, 7.5, 9.1, 11.2로 제거되는 총인의 양 대비 사용되는 Al_2의 양은 계속해서 증가했다. PAC 17%의 경우 12 mg/L, 24 mg/L, 36 mg/L, 48 mg/L, 60 mg/L(2.0, 4.1, 6.1, 8.2, 10.2 mg Al_2O_3/L)로 주입하였으며 각각 총인 제거율 41.7%, 60.9%, 69.0%, 68.4%, 70.3%로 나타났으며 몰비는 6.9, 8.7, 11.3, 15.3, 18.5로 PAC 10%와 동일하게 주입농도가 증가할수록 몰비도 증가했다. PAC 단독 테스트 결과 주입된 Al_2O_3농도 6.0 mg/L를 초과할 경우 효율이 급격히 감소하는 것으로 관찰되어 PAC 10%를 72 mg/L, 84 mg/L를 추가로 테스트한 결과 주입 농도와 상관없이 PAC 10%와 17% 동일하게 Al_2O_3의 함량이 6.0 mg/L를 초과할 경우 몰비가 급격하게 상승하면서 효율이 감소하였다. ppm 단위로 응집제 주입량을 결정할 경우 응집제 특성에 따라 차이를 나타내지만 알루미늄 농도로 환산할 경우 비슷한 농도에서 최적 주입량 특성을 나타내는 것으로 보고된 바 있다 (Park et al., 2010). 해당 연구시설에서 사용 중인 PAC 10%의 염기도는 38%로 국내에서 이뤄진 5.9~38.5% 범위의 염기도에 차이를 두고 PAC 응집성능을 평가한 연구결과(염기도 38.5 % PAC의 제거율 57~65%)와 비슷한 결과를 보였다 (Choi et al., 2016). Table 3는 jar-test 결과를 나타낸 것으로 PAC 17%를 단계별로 주입한 결과 Al_2O_3 주입량에 비해 총인 제거율에서 큰 변화를 관찰하지 못했다. 사용된 Al_2의 양을 고려했을 때 Al_2/P의 몰비가 8.7, 11.3, 15.3으로 총인 제거에 사용되는 Al_2의 양이 급격하게 증가함에도 제거효율이 69%에 그쳤다. 해당 결과는 적정량 이상의 Al_2가 투

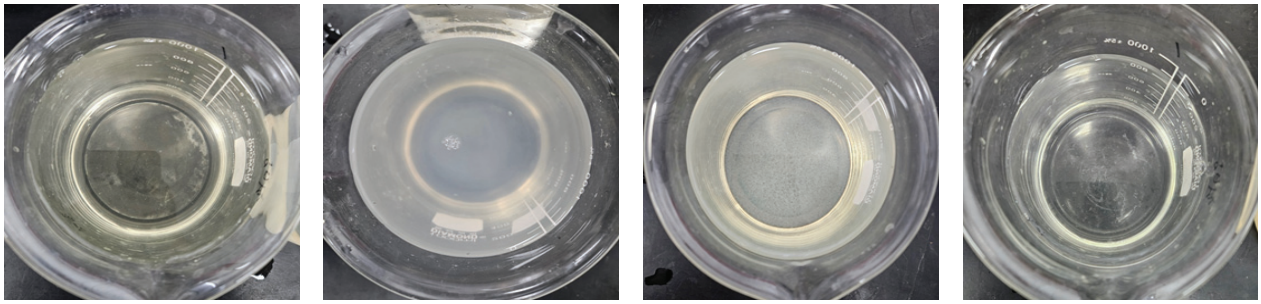
Table 3. Jar-test results

NO	Classification	Unit	Results					
1	PAC 10%	(mg/L)	-	12	24	36	48	60
	Al_2/P mol ratio	-	-	5.1	6.9	7.5	9.1	11.2
	pH	-	7.1	7.1	7.1	7.0	6.9	6.9
	SS	(mg/L)	7.0	6.3	6.7	7.4	7.6	8.6
	T-P	(mg/L)	0.433	0.309	0.250	0.180	0.152	0.148
	T-P Removal ratio	(%)	-	34.9	47.4	62.0	67.5	68.8
2	PAC 17%	(mg/L)	-	12	24	36	48	60
	Al_2/P mol ratio	-	-	6.9	8.7	11.3	15.3	18.5
	pH	-	7.1	7.1	6.9	6.9	6.8	6.7
	SS	(mg/L)	7.0	5.8	5.5	9.2	9.9	10.8
	T-P	(mg/L)	0.433	0.277	0.186	0.147	0.150	0.141
	T-P Removal ratio	(%)	-	41.7	60.9	69.0	68.4	70.3
3	PAC 10%	(mg/L)	36					
	Polymer 0.05%	(mg/L)	0.0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
	pH	-	7.1	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
	SS	(mg/L)	7.0	6.1	5.8	4.2	4.4	4.1
	T-P	(mg/L)	0.433	0.155	0.127	0.105	0.084	0.075
	T-P Removal ratio	(%)	-	64.2	70.7	75.8	80.6	82.7
4	PAC 10%	(mg/L)	48					
	Polymer 0.05%	(mg/L)	0.0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
	pH	-	7.1	7.0	6.9	7.0	6.9	6.9
	SS	(mg/L)	7.0	5.5	4.7	3.8	3.5	3.2
	T-P	(mg/L)	0.433	0.143	0.121	0.085	0.072	0.067
	T-P Removal ratio	(%)	-	67.0	72.1	80.4	83.4	84.5

입되면 탁도가 증가하고 총인 제거효율이 감소하면서 많은 양의 Al_2가 사용된 것으로 보인다. 국내 연구 결과 중 PAC 주입 농도가 과도하게 높을 경우 처리수의 부유물 농도가 증가하고 총인 제거효율이 저하되는 것으로 나타났다 (Kim, 2015; Park et al., 2012). 또한 70% 이상의 총인 제거율을 달성하기 위해 36~48mg/L의 PAC 17%를 투입할 경우 단가 상승으로 인해 연간 약품 비용이 36% 상승할 것으로 예상되었다. PAC 10%를 대체하고 17% PAC를 단독으로 사용하는 것은 경제적인 측면을 고려했을 때 본 하수처리장에 적합하지 않은 것으로 판단된다. PAC 10% Al_2/P와 총인 제거율 비교에서 제거율이 크게 상승한 주입농도 36 mg/L와 Al_2/P 몰비가 급격하게 상승하기 전 주입농도 48 mg/L를 최적 농도로 결정하여 폴리머 주입 테스트를 진행했다. PAC 10% 36 mg/L, 48 mg/L를 고정으로 주입하고 폴리머를 단계별로 주입한 결과. 폴리머를 0.1 mg/L만 주입해도 기존 PAC 10% 단독으로 60 mg/L를 주입한 시료보다 총인 제거율이 상승하는 것을 볼 수 있었다. 또한 폴리머 0.15 mg/L를 주입할 경우 연구시설 설계용량을 기준으로 하루 12 kg의 분말폴리머를 사용하면 PAC 투입량에 따라 76~80%의 안정적인 총인 제거율을 확보 할 수 있다는 것을 의미한다. 해당 jar-test 결과를 바탕으로 실규모 총인처리시설에 폴리머 투입의 유효성을 검증하였고 이를 바탕으로 총인처리시설 응집제 투입량으로 PAC 10% 36~48 mg/L(3.6~4.8 mg Al_2O_3/L) 고상 폴리머 0.10~0.20 mg/L로 설정하여 운전하는 것이 적절하다고 판단하였다.

3.2 응집제 적용에 따른 pH와 SS 변화

총인처리시설 유입수를 채수하여 폴리머 적용 전후 SS 농도 변화와 pH 감소를 관찰한 결과, PAC 단독사용 시 주입농도가 증가함에 따라 SS 농도와 탁도가 상승하는 반면, 폴리머가 첨가된 샘플에서는 SS 농도가 감소하였다. 또한 탁도 증가는 공단하수 계열에서 크게 발생하였다. 이로 인해 총인처리시설로 유입되는 공단하수 계열의 유입수 비율이 증가함에 따라 수질 특성에 따라 최적 주입량 이상에서 적정 pH 범위를 벗어나는 경우 전하 역전으로 인해 탁도가 증가하는 현상이 발생할 수 있다 (Lee et al., 2010). 상수 원수를 대상으로 진행한 응집제 연구에서도 PAC의 Al 함량이 높을수록 주입량은 감소하였으나 탁도 제거성능은 PAC 10%, 12% 대비 PAC 17%가 낮게 보고되었으며, 모든 PAC 응집제에서 최적 주입량 이상 주입 시 탁도 제거성능이 감소하는 것으로 나타났다 (Park et al., 2023). 폴리머 주입이 응집 과정에서 탁도를 감소시키는데 기여한 것으로 판단된다. 또한 PAC 주입량 증가에 따라 pH는 6.7~7.1 범위에서 유지되었다. 본 연구시설에서 응집제 사용으로 인한 pH 저하 문제는 발생하지 않았다. 국내 하수처리장을 대상으로 한 연구에서도 하수처리장에서의 시료의 pH가 7.0으로 중성에 가까울 경우, 응집력을 높이기 위해 별도로 pH를 조절할 필요가 없다는 연구 결과도 있다 (Hwang et al., 2009). 또한 염기도가 낮은 응집제가 pH 변화가 크지만 monomeric Al^{3+}종이 증가하여 응집성능이 높다 (Choi et al., 2016). 연구대상시설의 PAC(염기도 38%)의 경우 해당 연구 내용에서 제시한 PAC 12% 의 염기도(5.9~38.9%) 중 함량의 차이는 있으나 높은 염



(a) Influent (b) Supernatant of PAC Injection Sample (c) Polymer + PAC Injection (d) Supernatant of sample(c)

Fig. 3. Reduction of turbidity.

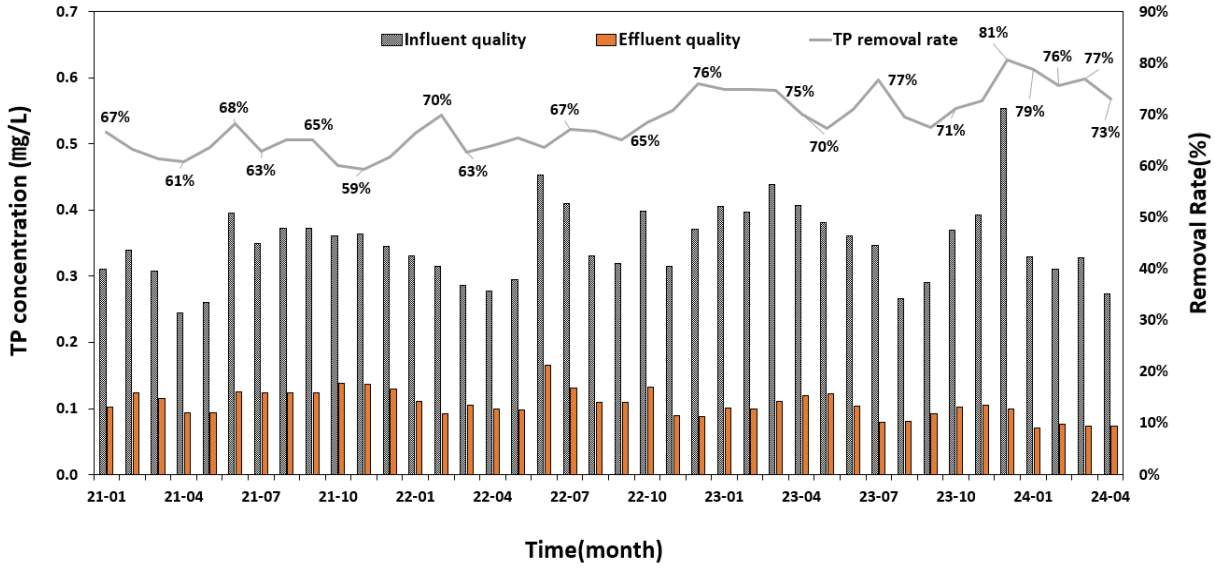


Fig. 4. Total phosphourus removal rates (%) from 2021 to 2024.

기도에 속하며, pH 감소가 적고 총인 제거율 70% 이하의 낮은 응집성능을 보였다. 폴리머 사용으로 인한 탁도 변화를 명확하게 관찰하기 위하여 PAC와 반응하여 탁도가 증가하는 공단하수 계열의 최종침전지 유출수를 채수하여 관찰한 결과를 Fig. 3에 제시하였다. (a)는 공단하수 최종침전지 유출수 샘플이며, (b)는 PAC 10%를 60 mg/L 주입 후 30분 침전 후 상등액을 분취한 결과이다. (c)는 유입수에 PAC 10% 60 mg/L와 0.05% 폴리머를 0.15 mg/L 주입하여 30분간 침전시킨 모습이다. (d)는 (c)의 상등액 샘플로 백탁현상이 현저하게 감소하였다.

3.3 실규모 총인처리시설 운영결과

3.3.1 수질 안정성 개선

Fig. 4는 2021년도부터 2024년도 4월까지의 총인 유입수 및 방류수 수질 농도와 총인 제거율을 보여준다. 연구 시작 전 2021년 1월~2022년 3월까지의 평균 TP 농도는 총인 유입수 0.330 mg/L, 최종방류수 0.116 mg/L로 평균 제거율 64%였다. 폴리머 용해 장치가 설치되어 운영된 기간인 2022년 12월~2024년 2월까지 1년간 총인 유입수 0.375 mg/L, 최종방류수 0.097 mg/L 제거율은 평균 73%로 증가하였다. 특히 연구 기간 중 2023년 12월 발생한 불명수로 인해 3일간 평균 1.562 mg/L, 최대 1.819 mg/L의 고농도 인이 총인처리

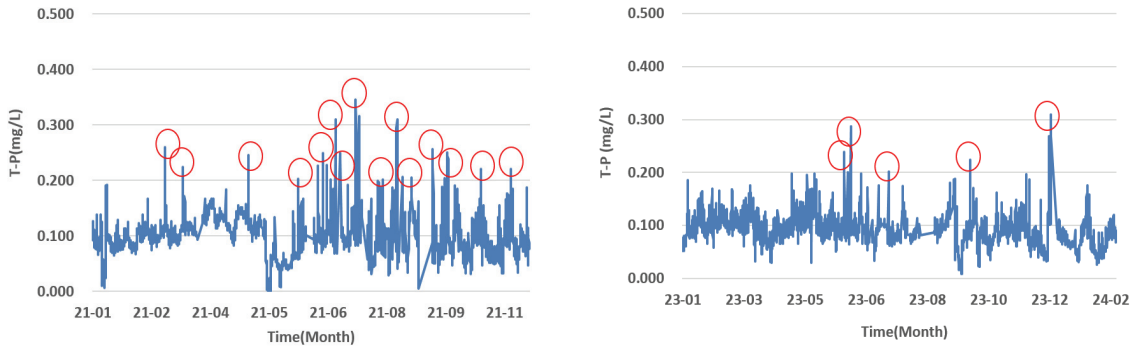


Fig. 5. Comparison of TMS time data, 2021 and 2023.

Table 4. Annual chemical usage in total phosphorus treatment facilities and total sludge production at the wastewater treatment plant.

Year	Annual average chemical usage (kg/yr)		Phosphorous sludge production (m^3/yr)	Total sludge production (m^3/yr)
	PAC 10%	Polymer		
2019	1,702,643	-	22,291	242,024
2020	1,656,369	-	14,304	216,649
2021	1,728,381	-	15,361	200,870
2022	1,532,870	420	17,356	203,761
2023	1,451,265	3,105	24,898	228,168

시설에 유입되었으며, 해당 기간 동안의 총인 제거효율은 평균 88.3%로 최종 방류수의 평균 TP 농도는 0.192 mg/L이었다. 이는 폴리머 용해 장치가 도입되기 전 2022년 10월 총인처리시설 유입수의 TP 농도가 2.184 mg/L로 유입되었을 때 제거율 52.5%와 비교하여 현저한 개선을 보였다. 일반적으로 PAC는 저농도에서 낮은 제거율을 나타내는 경향이 있으며 (Edzwald et al., 1994) 고농도 유입수가 발생하였을 때 평균 73% 보다 높은 88.3%의 제거효율을 나타낸 것으로 보인다.

또한 Fig. 5는 2021년과 2023년도의 수질 TMS 시간 자료를 분석한 결과이다. 0.200 mg/L 이상 상승하는 빈도가 감소하고 0.100 mg/L 이상의 처리수가 방류된 횟수가 2021년 285회에서 2023년 185회로 감소하였다.

3.3.2 폴리머 용해 장치 설치 전후 약품 사용량 및 슬러지 발생량 변화

Table 4는 연구대상시설의 2019년부터 2023년 12월까지 사용된 응집제의 연간 사용량 및 슬러지 발생량을 나타내고 있다. 2019년도부터 폴리머 적용 연구가 시작되기 전 2021년까지 평균 PAC 사용량은 약 170만 kg/yr로 나타났다. 폴리머 용해 장치의 도입과 함께 PAC 사용량은 2021년 대비 16% 감소하였으며, 폴리머 사용량은 현장 적용 전 2022년 pilot으로 420 kg을 사용하였으며, 용해 장치가 설치 된 2023년도에 연간 3,105 kg를 사용하였다. 국내 연구 결과 중 PAC를 단독 주입하였을 때에 비해 다른 응집제와 혼합하여 사용할 경우 PAC 사용량이 감소하는 것으로 나타났다 (Kim, 2015). 사용량 변화로 인한 비용 변화는 2021년 PAC 사용량과 2023년의 PAC 및 폴리머 사용량을 동일 단가(연구 대상시설 2023년 계약 단가)로 비교할 경우 2021년 4억 1,400만원에서 2023년 3억 6,000만원으로 약 5,400만원 감소한 것으로 나타났다. 폴리머 용해장치 설비 투자 비용인 약 8,500만원을 회수하기 위해 1.6년이 소요된다. 폴리머의 사용 증가는 하수처리 공정의 안정성 및 처리 효율성 향상에 기여할 뿐만 아니라 외부적 영향을 최소화 하는데 중요한 역할을 하였다. 슬러지 발생량의 경우 폴리머 사용으로 인한 연간 슬러지 발생량 증가에 주는 영향은 크지 않았다. 총인에서 발생 되는 슬러지의 TS(%)는 연평균 2.0 미만으로 함수율이 98%를 차지하며 해당 연구 시설에서 발생 되는 전체 슬러지 발생량 중 총인처리시설 슬러지의 비중은 연평균 약 10%로 적은 비중이 원인으로 나타났다.

4. 결 론

본 응집제 적용 사례는 법적 방류수질 준수를 위해 G시에 위치한 하수처리장(시설용량 80,000 m^3/day)에서 운영 중인 총인처리시설의 총인 제거율을 향상시켜 평균 70% 이상의 총인 제거율을 목표로 실험실 규모에서 응집제 폴리염화알루미늄과 폴리머를 혼합하여 최적 주입량을 산정하고, 이를 실규모 하수처리장에 적용하여 최적 운영 조건을 도출하고 1년간의 운영 데이터를 수집하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

1. PAC 10%, PAC 17%, 폴리머를 사용하여 jar-test를 진행한 결과 PAC 17%는 PAC 10% 대비 평균 5.9% 높은 효율을 보였다. 또한 주입농도 36 mg/L, 48 mg/L(6.1, 8.2 mg Al_2O_3/L)주입하였을 때 총인 제거율 69.0%, 68.4%로 목표 제거율에 가깝게 측정되었다. 하

지만 Al_2/P 몰비가 크게 증가하고 부유물질 농도가 상승하였다. 해당 농도로 연구대상시설에 운영할 경우 약품 비용이 연간 36% 증가할 것으로 예상되었다. PAC 10%는 36 mg/L에서 효율이 47.4%에서 62.0%로 현저하게 증가하였으며, 48 mg/L를 초과하여 주입할 경우 Al_2/P 몰비가 증가하고 총인 제거율 증가율이 감소하였다. PAC 10%와 17%는 함유된 Al_2O_3 6.0mg/L를 초과할 주입 할 때 Al_2/P 몰비 증가 폭이 커지면서 총인 제거효율이 감소하였다.

2. PAC 10% 36.0～48.0 mg/L와 폴리머 0.05～0.25 mg/L를 혼합 실험한 결과 폴리머를 0.1 mg/L만 주입하여도 PAC 10% 단독 60.0 mg/L를 투입한 샘플보다 높은 71～72%의 제거율을 보였다. 해당 결과를 통해 폴리머의 사용이 총인 제거율을 높이는데 유효하다는 결론을 내렸으며, 실규모 총인처리시설에 PAC 10% 36.0～48.0 mg/L(3.6～4.8 mg Al_2O_3/L), 폴리머 0.1～0.2 mg/L를 최적주입농도 범위로 설정하였다.

3. 폴리머 현장 적용 결과, 2021년 대비 2023년의 총인 제거율은 64%에서 73%로 약 10% 향상되었으며, 2024년 4월까지의 평균 총인 제거율은 76%로 나타났다. 2023년 12월 발생한 총인처리시설 유입 농도 1.819 mg/L의 고농도 유입수에서 제거효율이 88.3%까지 상승하는 안정적인 제거율을 보였다.

4. 폴리머 적용 전 2021년 대비 약품 사용량은 연간 PAC 10% 27.7만 kg이 감소하였으며 폴리머 3,100 kg이 증가하였다. 동일 단가를 적용하였을 때 2021년 대비 2023년 약품 비용은 5,400만원 감소하였으며, 폴리머 용해장치 설치 투자 비용 8,500만원을 회수하는데 1.6년이 소요되는 것으로 나타났다. 폴리머 사용으로 인한 슬러지 발생량 변화는 제한적이었다. 총 슬러지 발생량에서 생슬러지와 잉여슬러지의 비율이 약 80%, 총인에서 발생 되는 슬러지는 약 10%로 총 슬러지 발생량에 비해 총인 슬러지의 비중이 낮은 것이 원인이었다.

본 연구를 통해 수집된 데이터는 총인처리 공정에서 폴리머의 적용을 통해 기존 화학적 처리 방법을 보완하고 총인 제거효율을 개선할 수 있는 유의미한 방법임을 시사한다. 특히, 폴리머 사용량의 증가와 PAC 사용량의 감소는 화학적 처리공정에서 물질 균형을 통해 안정적 수질관리를 가능하게 하는 전략적인 선택이 될 수 있다.

사 사

본 연구는 국립금오공과대학교 교수 연구년 기간 중 수행 되었습니다. (2024년)

References

Choi, J.S., Lee, B.H., Kim, K.P., and Baek, D.J. (2016). Improved Coagulant for High Efficiency Phosphorus removal in secondary effluent of waste water treatment plant, J. Korean Soc. Water Wastewater., 30(6), 683-690.

Edzwald, J.K., Bunker, D.Q., Dahlquist, J., Gillberg, L., and Hedberg, T. (1994). Chemical Water and wastewater treatment III, Springer-Veriag, Berlin, 3-18.

Goo, G.H. (2023). Improvement of sewage treatment process using microbubbles, Ph.D. dissertation, Hoseo National University, Seoul, South Korea, 22-25.

Hwang, E.J. and Cheon, H.C. (2009). High-rate phosphorous removal by PAC (Poly Aluminum Chloride) coagulation of A_2O effluent, J. Korean. Soc. Environ. Eng., 31(8), 673-678.

Hong, S.H. (2022). Effect of adding acid fermented solution in sewage treatment plant utilizing TEC-BNR process., Master's Thesis, Ajou Universitsy, Suwon, South Korea, 11.

Han, S.W., Chun, M.H., Park, J.M., Kang, D.H., and Kang, L.S. (2012). Effect of microbial activity by using the coagulants in the biological treatment process, J. Korean. Soc. Environ. Eng, 34(1), 16-22.

Jeong, W.G. and Rim, J.M. (2011). Analysis of the cost effectiveness according to T-P standard enforcement of public sewage treatment facilities, J. Ind. Technol., 31(A), 135-145.

Jeong, D.H., Choi, I.C., Cho, Y.S., Chung, H.M., Kwon, O.S., Yu, S.J., Yeom, I.T., and Son D.H. (2014). A study on the management system improvement of effluent water qualities for public sewage treatment facilities in korea, J. Environ. Impact Assess., 23(4), 296-314.

Kim, J.T. (2018) A study on Strengthening Option of T-N Effluent Water Quality Standards of Sewage Treatment Plants, J. Korean Soc. Water Environ., 34(2), 216-225.

Kim, Y.J. (2015). An Optimization of the Phosphorus

Coagulation Dose Ratio for Biologically Treated Sewage Effluent, Ph D dissertation, Honam National University, Gwangju, South Korea, 30-97.

Korea Ministry of Environment (MOE). (2022). 2021 Statistics of Sewerage.

Korea Ministry of Environment (MOE). (2023). 2022 Statistics of Sewerage.

Korea Ministry of Environment (MOE). (2024). 2023 Statistics of Sewerage.

Lee, B., Jun, H.B., Tian, D.J., Park, N.B., and Lee, Y.J. (2010). The effects of pH and dosages according to qualities of raw waters and basicity of coagulants, J. Korean Soc. Water Wastewater., 24(5), 581-593.

Park, H.Y., Park, S.M., Lee, K.C., Kwon, O.S., Yu, S.J., and Kim, S.J. (2011). survey of physicochemical methods and economic analysis of domestic wastewater treatment plant for advancded treatment of phosphorus removal, J. Korean Soc. Environ. Eng., 33(3), 212-221.

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.

Park, J.W., Min, S.K., Lee, H.Y., Yun, C.J., and Lee, C.H. (2023). Comparing flotation efficiency of algae-containing raw water using pac coagulants, J. Environ. Sci. Int., 35(5), 355-363.

Seo, J.M., Cho, Y.B., Choi, Y.M., and Park, C.H. (2014). A feasibility study on optimization system of coagulant dosing for total phosphorous treatment, J. Korean Soc. Environ. Eng., 36(7), 483-491.

Sim, I.T. (2017). A study on the application of sub-micron bubble to the wastewater treatment aeration system, Master's Thesis, Seoul National University, Seoul, South korea, 3-5.

Yoon, H.H. (2011). Evaluation of the applicability of micro-floating system as a total phosphorus process, Master's Thesis, Kumoh National Institute of University, Gumi, South Korea, 30.