

ORIGINAL ARTICLE

Al 함량이 다른 PAC를 이용한 응집 조건 별 인 제거효율 평가

최정학 · 윤건곤¹⁾ · 이창한^{2)*}

부산가톨릭대학교 환경공학과, ¹⁾부산가톨릭대학교 청정시스템공학과, ²⁾부산가톨릭대학교 환경행정학과

Evaluation of Phosphorus Removal Efficiency at Various Coagulation Conditions Using Polyaluminum Chloride with Different Al Contents

Jeong-Hak Choi, Geon-Gon Yoon¹⁾, Chang-Han Lee^{2)*}

Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

¹⁾Department of Green Process System Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

²⁾Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

Abstract

In this study, lab-scale phosphorus coagulation/precipitation experiments were performed using three types of polyaluminum chloride (PAC) with different Al contents (10%, 12%, and 17%). The PO₄-P removal efficiencies at various operating conditions, such as initial PO₄-P concentration, initial pH, and Al/P molar ratio, were evaluated, and correlations among the operating factors affecting phosphorus coagulation/precipitation with PAC were derived to optimize the process efficiency. When the initial PO₄-P concentration was 0.065 and 0.161 mmol P/L under an initial pH of 8-10, the optimal PAC dose was 0.126-0.378 and 0.189-0.667 mmol Al/L, respectively. Under these conditions, the Al/P molar ratio was 2.16-6.18 and 1.28-4.30, respectively, and the PO₄-P removal efficiency was in the range of 40.2-92.5%. When the Al/P molar ratio was 2 or less under an initial pH condition of 6-8, the PO₄-P removal efficiency was approximately ≤40% owing to insufficient Al³⁺ ions. However, when the Al/P molar ratio is 3-5, the PO₄-P removal efficiency improved to approximately 80-90%. Thus, the optimal Al/P molar ratio to achieve a PO₄-P removal efficiency of over 90% was determined to be approximately 4 in the PO₄-P coagulation/precipitation process using PAC.

Key words : Coagulation, Precipitation, PAC, Phosphorus, Al/P molar ratio, pH

1. 서론

과도한 비료 사용과 가축 분뇨, 공장 폐수, 도시 하수 등이 수계로 유출되어 수중 영양염의 농도가 높아지면서 부영양화 현상을 유발하게 된다 (Yun et al., 2012; Kim et al., 2015; Jung et al., 2020). 부영양화 구역에서 적절한 수온과 일조량이 주어지면 조류가 폭발적으로 성장하게 되는데, 이로 인해 수생태계 파괴, 정수

비용 증가, 음용수 품질 저하 등의 다양한 문제가 발생한다 (Jeon et al., 2015; Park et al., 2017; Woo et al., 2020).

영양염류 중 하나인 인(phosphorus)은 조류의 주요 성장제한 인자로 알려져 있으며, 수중 용존 PO₄-P가 0.02~0.03 mg/L의 낮은 농도로 존재하여도 조류의 성장을 촉진시킬 수 있다고 보고되고 있다 (Lee et al., 2016; Sarvajayakesavalu et al., 2018; Eduah et

Received 13 October, 2023; Revised 24 October, 2023;

Accepted 25 October, 2023

*Corresponding author : Chang-Han Lee, Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

Phone : +82-51-510-0624

E-mail : chlee@cup.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© 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.

al., 2020; Moon, 2021). 이에 국내에서는 부영양화 방지를 위해 2011년부터 총량규제를 도입하였고, 2012년부터는 하수처리용량 500 m³/일 이상 시설에 대해 방류 수역(I~IV 지역)에 따라 총인(T-P)의 방류수 수질기준을 0.2 mg/L 이하~2 mg/L 이하로 강화하여 이를 충족시키기 위한 하수고도처리 시설이 운용되고 있다 (Lee et al., 2012; Park et al., 2014).

하수에서의 인 제거를 위한 방법으로는 생물학적 처리와 화학적 처리가 주로 사용되고 있다 (Kajjumba and Marti, 2022). 생물학적 처리는 인을 제거하기 위한 전통적인 방법으로 알려져 있으나, 계절 변화에 따른 영향이 크고 추가적인 외부 탄소원(external carbon source)을 필요로 하며, 낮은 제거효율을 보이는 등 한계점을 가지고 있다 (Yang et al., 2010; Park, 2011). 화학적 처리에서 대표적인 응집·침전 공정은 운영이 간편하고, 낮은 표면부하율(surface loading rate)을 가지면서 높은 제거효율을 보이는 인 제거 방법으로 평가되고 있다 (Lee et al., 2016; Hu et al., 2023). 응집·침전 공정은 알루미늄(AlCl₃, Al₂(SO₄)₃), 철(FeCl₃, Fe₂(SO₄)₃), 칼슘(CaCl₂, Ca(OH)₂), 마그네슘(MgCl₂) 등의 금속염을 응집제로 사용하여 인산염(PO₄³⁻) 형태의 인을 침전 가능한 플록(floc)으로 응집/응결시켜 제거하는 방법이다 (Tran et al., 2012; Ge et al., 2018; Wen et al., 2021).

이 중 Al 기반의 무기고분자 응집제인 PAC (polyaluminum chloride)는 기존의 황산알루미늄(alum, Al₂(SO₄)₃·14~18H₂O)에 비해 염기도가 높아 pH의 영향이 적고, 상대적으로 높은 응집효율을 보여 최근까지 하수처리에 널리 사용되고 있다 (Han and Moon, 2012; Chen et al., 2018; Toor et al., 2019). PAC는 제조 시 Al 함량 조절이 가능하며, Al³⁺ 이온과 OH⁻ 이온 간의 몰비(molar ratio)에 따라 다양한 염기도를 가진다 (Han et al., 2012).

PAC를 이용한 응집·침전 공정에서의 인 제거효율은 초기 인 농도, pH, 인 화합물의 형태, 응집제 주입량 (Al/P 몰비) 등 다양한 운전인자의 영향을 받기 때문에 (Kim and Chung, 2014), 각 운전인자를 최적화하는 연구가 필요하다. 하지만, 최근까지 진행된 많은 연구에서 인의 응집·침전에 영향을 미치는 다양한 운전인자들을 복합적으로 다룬 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 Al 함량이 다른 3종의 PAC를 초기 인(PO₄-P) 농도와 pH 변화 조건에 적용하여 응집·침전 효율을 평

가하고, 최적의 운전 조건을 도출하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 인 시료 및 PAC 응집제

실험에 사용된 인(PO₄-P) 시료는 제일인산칼륨(KH₂PO₄, Junsei Chemical Co., Ltd., Japan) 시약을 사용하여 일반 하수에서의 저농도 및 고농도 인을 기준으로 P 기준 1.80~1.92 mg PO₄-P/L (0.058~0.062 mmol PO₄-P/L)와 4.56~4.85 mg PO₄-P/L (0.147~0.157 mmol PO₄-P/L)의 농도로 제조하였으며, 시료의 초기 pH는 0.5 M의 NaOH 용액을 사용하여 7.57~9.93 범위로 조절하였다. 제조된 인 용액의 초기 인 농도와 초기 pH를 Table 1에 나타내었다. 응집제는 E사로부터 실제 수처리 현장에 적용되고 있는 PAC 10% (Al 함량 10%, 염기도 68%), PAC 12% (Al 함량 12%, 염기도 65.9%) 및 PAC 17% (Al 함량 17%, 염기도 60.5%)의 3종을 사용하였으며, PAC에 포함된 Al 단위 몰 당 인 제거 효율을 비교 평가하고자 하였다.

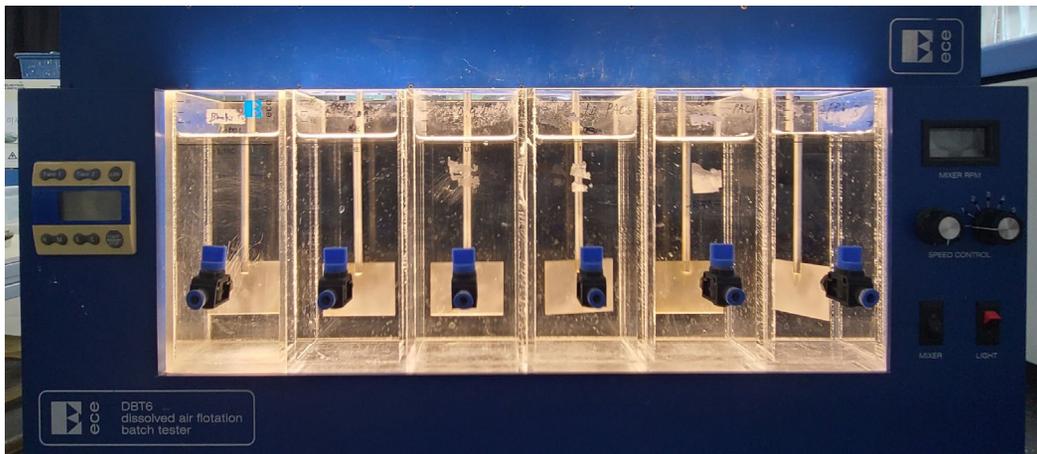
2.2. 응집·침전 실험 및 인 분석

응집·침전 실험은 교반속도 조절이 가능한 jar tester (ECE engineering Co., Ltd., USA)를 사용하였으며, 6.0 cm (가로) × 4.0 cm (세로) 크기의 6개 패들(paddle)이 각각 구성되어 있다. Jar는 8.0 cm (가로) × 8.0 cm (세로) × 20.0 cm (높이) 규격의 아크릴 재질 사각형 용기(V = 1.28 L)를 사용하였다. 응집·침전 실험을 위한 jar tester 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 응집 실험은 인 조제수를 6개의 jar에 각각 1 L씩 담고, PAC 응집제 주입 직후 급속 교반(320 rpm, G : 1000 s⁻¹)을 1 min간, 완속 교반(30 rpm, G : 44.2 s⁻¹)을 15 min간 진행하였다. 완속 교반 완료 후, 침전을 위해 30 min간 정지하였다. 침전 후 바닥면에서부터 높이 5.5 cm 지점에 있는 tap을 통하여 상등수 시료를 채취하였다. 채취한 시료의 인(PO₄-P) 농도는 총인 분석 kit (HS-TP-L, HUMAS Co., Ltd., Korea)와 총인 수질분석기(HS-1000 Plus, HUMAS Co., Ltd., Korea)를 사용하여 정량 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 1. Initial concentrations and pH conditions of prepared phosphorus solution

Coagulant	Initial pH	Initial concentration	
		(mg PO ₄ -P/L)	(mmol PO ₄ -P/L)
PAC(10%)	6.61	4.63	0.150
	7.57	1.92	0.062
	7.80	4.72	0.152
	9.53	1.82	0.059
	9.63	4.81	0.155
PAC(12%)	6.53	4.85	0.157
	7.60	1.80	0.058
	7.82	4.77	0.154
	9.82	1.89	0.061
	9.83	4.85	0.157
PAC(17%)	6.49	4.84	0.156
	7.58	1.81	0.058
	7.69	4.56	0.147
	9.93	1.89	0.061
	9.76	4.78	0.154

**Fig. 1.** Image of used jar tester for coagulation/precipitation experiments in this study.

3.1. 초기 pH별 PAC 주입량에 따른 인 제거 양상

초기 pH 6, 8 및 10의 조건에서 PAC(10%, 12%, 17%) 주입량에 따른 잔류 PO₄-P 농도 변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2 a)의 초기 pH 6인 조건에서 초기 PO₄-P 농도가 0.161 mmol P/L일 때, PAC(17%)는 0.151 mmol Al/L까지 주입하더라도 잔류 PO₄-P 농도는 0.156 mmol P/L에서 0.150 mmol P/L로 거의

감소하지 않았다. 하지만, PAC(10%)와 PAC(12%)는 PAC 주입량이 증가할수록 잔류 PO₄-P 농도는 점차 감소하였으며, PAC(10%)와 PAC(12%)를 각각 0.111 mmol Al/L와 0.133 mmol Al/L로서 최적 PAC 주입량이 되면, 잔류 PO₄-P 농도가 0.119 mmol P/L과 0.127 mmol P/L까지 감소하였다. PAC(10%)의 경우, 0.148 mmol Al/L이상 주입하게 되면, 잔류 PO₄-P 농

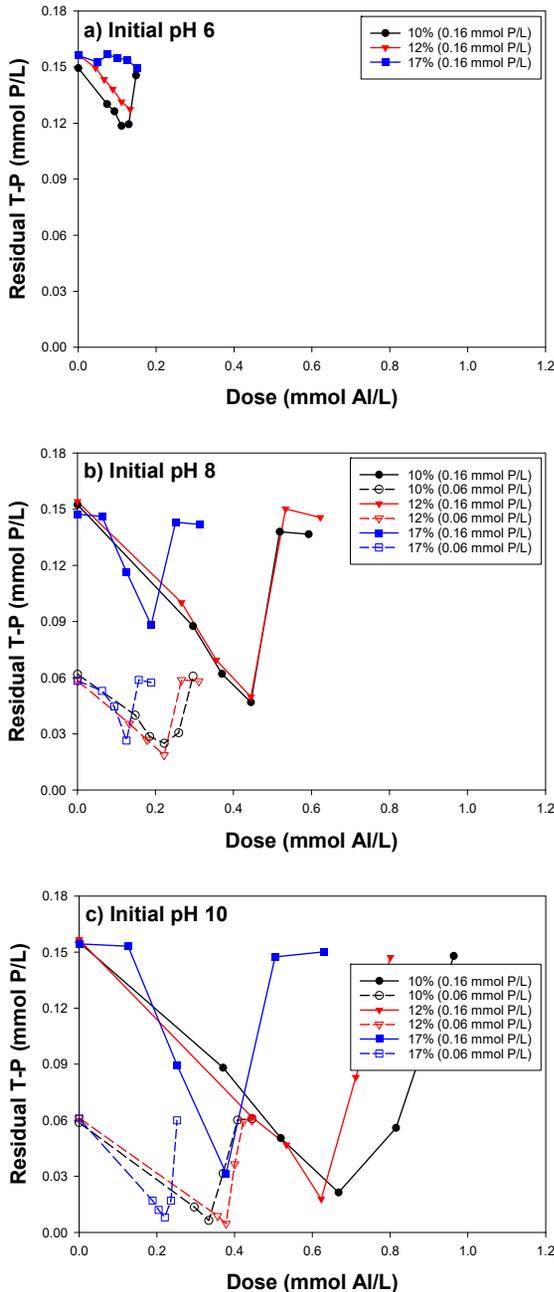


Fig. 2. Variation of residual $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration on PAC dosage at different initial pH.

도는 0.146 mmol P/L로 다시 증가하였다.

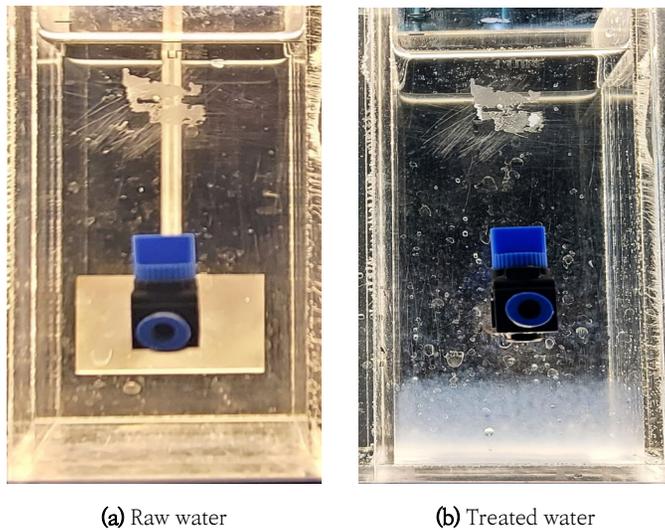
Fig. 2 b)의 초기 pH 8인 조건에서 초기 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.161 mmol P/L일 때, PAC(10%)과 PAC(12%)가 0.445 mmol Al/L로 주입되면 잔류 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도는 각각 0.047 mmol P/L와 0.050 mmol P/L로 가장 낮은 결과를 보였다. PAC(17%)는 0.189 mmol Al/L에서 잔류 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.088 mmol P/L로 감소하였지만, PAC(10%)과 PAC(12%)에 비해 잔류 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도는 높게 나타났다. 초기 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.065 mmol P/L일 때, PAC(10%)과 PAC(12%)는 0.222 mmol Al/L로 주입되는 조건에서 잔류 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 각각 0.025 mmol P/L와 0.019 mmol P/L로 감소하였으며, PAC(17%)는 0.126 mmol Al/L로 주입되는 조건에서 잔류 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.026 mmol P/L로 감소하였다.

Fig. 2 c)의 초기 pH 10인 조건에서 초기 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.161 mmol P/L일 때, PAC(10%)과 PAC(12%)를 각각 0.667 mmol Al/L와 0.623 mmol Al/L로 주입하였을 때, 잔류 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.021 mmol P/L와 0.018 mmol P/L로 크게 감소되었다. 또한, PAC(17%)는 pH 8의 결과와 유사하게 비교적 낮은 PAC 주입량인 0.378 mmol Al/L에서 잔류 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.032 mmol P/L로 상당히 감소하는 결과를 보였다. 초기 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.065 mmol P/L일 때, PAC(10%), PAC(12%) 및 PAC(17%)는 각각 0.334 mmol Al/L, 0.378 mmol Al/L 및 0.221 mmol Al/L가 최적의 PAC 주입 조건으로 나타났으며, 잔류 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도는 각각 0.006 mmol P/L, 0.005 mmol P/L 및 0.008 mmol P/L로서 크게 감소하는 경향을 보였다.

초기 pH 6, 8 및 10에서 최적 PAC(10%, 12%, 17%) 주입량에 따른 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거효율을 Table 2에 나타내었다. 초기 pH 6에서는 최적 PAC(10%, 12%, 17%) 주입량에서도 용액 중의 PO_4^{3-} 이온이 응집제로 주입된 Al^{3+} 이온과 충분히 AlPO_4 로 응집되지 않아 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거효율이 4.3~20.7%로 매우 낮게 나타났다. 초기 pH 8에서는 최적 PAC(10%, 12%, 17%) 주입량의 조건에서 Fig. 3 b)와 같이 용액 중의 수화된 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 와 응집된 AlPO_4 로 보이는 미세한 플록이 사각형 용기 하부로 침전되면서 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거효율이 40.2~69.3%로 높아졌다. 초기 pH 10에서는 용액 중에 OH^- 이온 농도가 높아져 최적 PAC(10%, 12%, 17%) 주입량에서 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 와 AlPO_4 로의 수화 및 응집효율이 향상 되어 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거

Table 2. Effect of PO₄-P removal efficiency on optimal PAC dosage at different initial pH

Coagulant	pH		Dose (mmol Al/L)	R (%)
	Initial	Final		
PAC (10%)	6.0	5.84	0.111	20.7
	8.0	6.57	0.222	59.7
		6.13	0.445	69.3
	10.0	7.43	0.334	89.2
		6.68	0.667	86.3
PAC (12%)	6.0	5.73	0.133	18.6
	8.0	6.55	0.222	68.1
		5.83	0.445	67.7
	10.0	7.19	0.378	92.5
		6.57	0.623	88.7
PAC (17%)	6.0	4.38	0.151	4.3
	8.0	6.45	0.126	54.7
		6.29	0.189	40.2
	10.0	6.74	0.221	87.3
		6.35	0.378	79.5

**Fig. 3.** Images of raw water and treated water after coagulation/precipitation process.

효율이 86.3%~92.5%로 더 증가하는 것으로 판단된다.

Lee et al.(2012)은 초기 인 농도가 3.73 mg/L (0.120 mmol P/L)인 하수처리 유출수를 대상으로 PAC(17%)를 200~20 mg Al/L (0.074~0.741 mmol Al/L)로 주입하여 응집·침전효율을 평가하였으며, 10

mg Al/L (0.371 mmol Al/L)주입시까지 PAC 주입량에 비례하여 잔류 인 농도는 0.5 mg P/L (0.016 mmol P/L)로 감소하였다. 하지만, 응집제를 15 mg Al/L (0.556 mmol Al/L)이상으로 주입할 경우, 잔류 인 농도가 다시 증가하는 결과를 보였다. 이러한 결과는

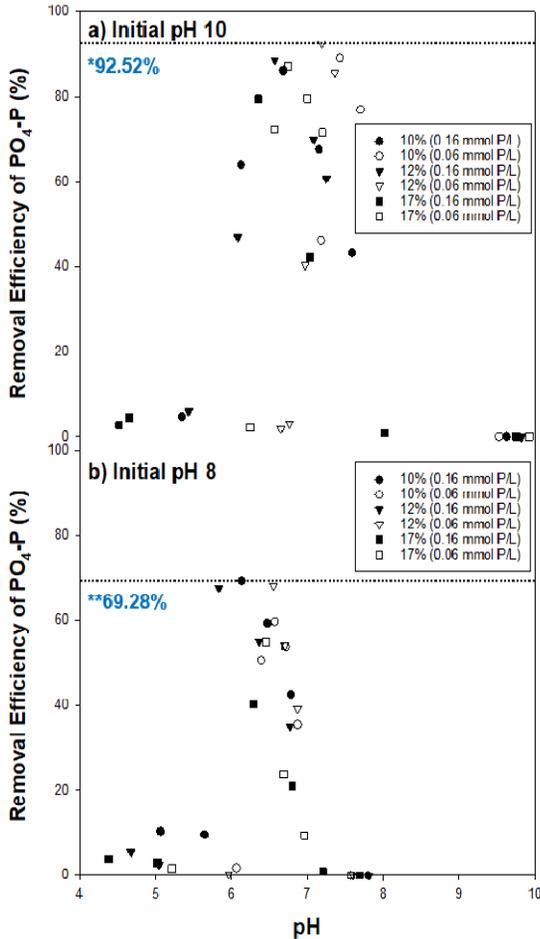


Fig. 4. Effect of initial pH conditions on $\text{PO}_4\text{-P}$ removal efficiency. (*92.52% is optimal removal efficiency at pH 10; **69.28% is optimal removal efficiency at pH 8)

PAC가 과량으로 주입되면 처리수의 pH가 6 이하로 감소하여 AlPO_4 생성반응이 저해되고, Al^{3+} 와 PO_4^{3-} 이온으로 재안정화되기 때문인 것으로 보고하였다.

3.2. 초기 pH에 따른 PAC 주입량과 인 제거율의 상관관계

초기 pH 8과 10에서 PAC(10%, 12%, 17%)에 의한 응집 및 침전 후 최종 pH와 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율의 상관관계를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 a) 초기 pH 10의 경우, 초기 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.161 mmol P/L의 조건에서 응집 및 침전 후 최종 pH는 6.12~7.25 범위이며, $\text{PO}_4\text{-P}$

제거율은 60.7~88.7%로 나타났다. 또한, 초기 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.065 mmol P/L의 조건에서 응집 및 침전 후 최종 pH는 6.57~7.43 범위이며, $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율은 71.7~92.5%로 증가하였다. Fig. 4 b) 초기 pH 8의 경우, 초기 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.161 mmol P/L의 조건에서 응집 및 침전 후 최종 pH는 5.8~6.5이며, $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율은 59.3~69.3%로 나타났다. 초기 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.065 mmol P/L의 조건에서 응집 및 침전 후 최종 pH는 6.55~6.57이며, $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율은 59.7~68.1%로 큰 차이를 보이지 않았다. 초기 pH 8에서 pH 10으로 증가함에 따라 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율이 약 60% 이상이면서 AlPO_4 가 Al^{3+} 와 PO_4^{3-} 이온형태로 재안정화되지 않는 중성영역의 최종 pH 범위가 증가하였으며, 최적 PAC(10%, 12%, 17%) 주입량에서 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율이 90% 이상으로 향상될 수 있음을 확인하였다. 본 연구 결과와 유사하게 Park (2011)은 PAC(11%)와 PAC(16%)를 인공 폐수와 하수처리장의 침전지 유출수에 적용한 연구에서, PAC를 3~10 Al^{3+}/P 몰비로 주입하였을 때, 인 제거율이 각각 83.4%~93.4%와 84.8~91.0%로 나타났음을 보고하였다.

초기 pH 6, 8 및 10에서 PAC(10%, 12%, 17%) 종류별 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율을 Fig. 5에 나타내었다. 이 결과는 Fig. 2의 PAC 주입량과 잔류 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도의 결과로부터 PAC 주입량을 Al/P 몰비와 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율로 환산하여 Al/P의 정량적인 상관관계를 비교한 것이다. Fig. 5 a) 초기 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.161 mmol P/L의 경우, 초기 pH 6에서는 Al/P 몰비가 0.28~0.97에서 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율이 약 20.7% 이하로 낮게 나타났다. 초기 pH 8에서는 PAC(10%), PAC(12%) 및 PAC(17%) 주입량이 각각 2.92와 2.89, 1.28 Al/P 몰비일 때 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율은 69.3%, 67.7% 및 40.2%이었다. 초기 pH 10에서는 PAC(10%), PAC(12%) 및 PAC(17%)를 각각 4.30, 3.97 및 2.45 Al/P 몰비로 주입 시 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율은 86.3%, 88.7% 및 79.5%이었다.

Fig. 5 b) 초기 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.065 mmol P/L의 경우, 초기 pH 8에서는 PAC(10%), PAC(12%) 및 PAC(17%) 주입량이 각각 3.60, 3.82 및 2.16 Al/P 몰비일 때 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율은 59.7%, 68.1% 및 54.7%이었으며, 초기 pH 10에서는 PAC(10%), PAC(12%) 및 PAC(17%) 주입량이 각각 5.68, 6.18 및 3.61 Al/P 몰비일 때 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율은 89.2%, 92.5% 및 87.3%이었다. 초기 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도가 0.161 mmol P/L(초기 pH 8)

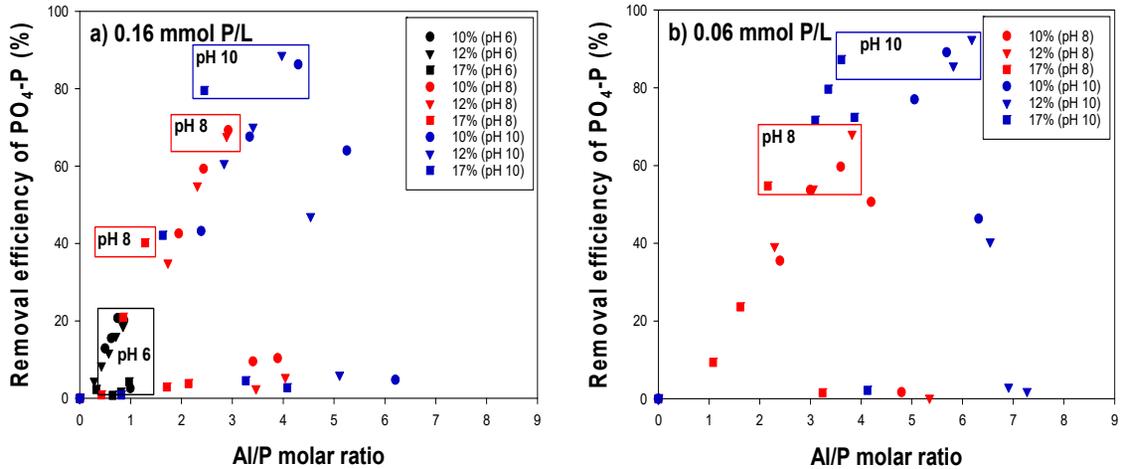


Fig. 5. Correlation between PO₄-P removal efficiency and Al/P molar ratio.

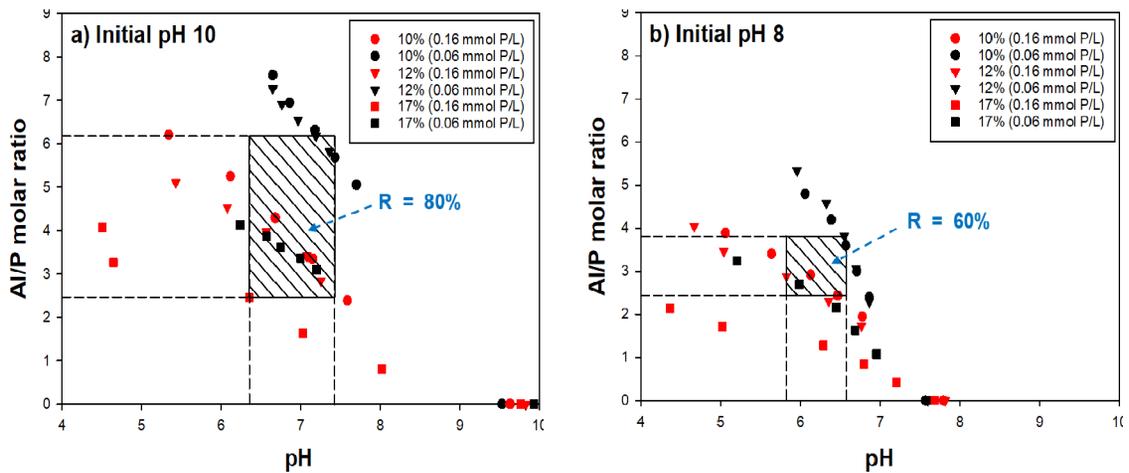


Fig. 6. Correlation between Al/P molar ratio and final pH.

에서 다른 응집제에 비해 PAC(17%)의 PO₄-P 제거율이 PAC(10%)와 PAC(12%)에 비해 상대적으로 낮았지만, 초기 PO₄-P 농도가 0.065 mmol P/L에서는 PAC(10%)와 PAC(12%)와 거의 유사한 PO₄-P 제거율을 나타내었다. PO₄-P 제거율과 Al/P 몰비는 정량적인 상관관계를 나타내는 것으로 판단되었다. Al/P 몰비가 2 이하(초기 pH 6~8)에서는 Al³⁺ 이온의 주입량이 부족하여 PO₄-P 제거율이 약 40% 이하이지만, Al/P 몰비가 3~5(초기 pH 8~10)에서는 PO₄-P 제거율이 약 90% 이상으로 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이 결

과로부터 PAC를 이용한 응집 및 침전 공정에서 PO₄-P 제거 시 Al/P의 몰비가 약 4일 때, 90%이상의 높은 PO₄-P 제거율을 나타내는 최적의 PAC 주입 범위로 판단된다.

3.3. 최종 pH와 Al/P 몰비의 상관관계

초기 pH 8과 pH 10에서 PAC 주입량에 따른 최종 pH와 Al/P 몰비의 상관관계를 Fig. 6에 나타내었다. 초기 pH 10에서는 최종 pH 6.35~7.43 범위와 Al/P 몰비 2.45~6.18 범위가 겹치는 사각형 영역에서 약

80% 이상의 PO₄-P 제거율을 나타내었다. 또한, 초기 pH 8에서는 최종 pH 5.83~6.57 범위와 Al/P 몰비 2.43~3.82 범위의 공통영역에서 약 60% 이상의 PO₄-P 제거율을 나타내었다. 초기 pH 8에서는 Al/P 몰비가 2.4~3.8에서만 60% 이상의 PO₄-P 제거율을 나타내지만, 초기 pH를 10으로 높일 경우, Al/P 몰비 2.5~6.2의 더 넓은 PAC(10%, 12%, 17%) 주입량 범위에서 80% 이상의 PO₄-P 제거율을 나타내었다. 이로 부터 초기 pH 10에서는 PAC(10%, 12%, 17%) 주입량이 약 50% 정도 감소하더라도 약 80% 이상의 PO₄-P 제거율을 확보할 수 있었다. 이는 무기응집체에 의한 응집/침전 시 최종 pH 5.4~7.0이 되는 범위의 응집제 주입량에서 인 제거율이 높아진다고 보고한 Son et al.(2012)의 결과와 Al/P 몰비가 2 이상으로 과량의 Al 이온이 주입되었을 때 상대적으로 높은 인 제거율을 나타낸다는 연구결과(Han and Moon, 2012)와 일치하였다. 하지만, 최적 pH 범위 이상으로 높은 Al/P 몰비로 응집제를 주입하게 되면, 응집제 과다주입으로 생성되는 플록의 표면전하가 양전하(+)를 띠게 되는 전하역전 현상의 발생으로 플록이 해체되고 크기가 감소하여 침전효율이 낮아지는 경향을 보인다(He et al., 2019).

4. 결론

본 연구에서는 Al 함량이 다른 3종의 PAC(10%, 12%, 17%)를 이용한 인의 응집/침전 실험을 통해 다양한 공정변수별 PO₄-P 제거율을 평가하여 최적의 공정효율을 나타내는 운전인자들 간의 상관관계를 도출하였다. 초기 pH 8~10 조건에서 초기 PO₄-P 농도가 0.065와 0.161 mmol P/L일 때, 최적 PAC 주입량은 각각 0.126~0.378 mmol Al/L와 0.189~0.667 mmol Al/L이었다. 이 조건에서 Al/P 몰비는 각각 2.16~6.18와 1.28~4.30이었고, PO₄-P 제거효율은 40.2~92.5%의 범위를 보였다. 초기 pH 6~8 조건에서 Al/P 몰비가 2 이하일 경우, Al³⁺ 이온의 주입량이 부족하여 PO₄-P 제거율이 약 40% 이하로 나타났지만, Al/P 몰비가 3~5에서는 PO₄-P 제거율이 약 80~90%로 높아지는 결과를 보였다. 이로부터 PAC를 이용한 응집 및 침전 공정에서 PO₄-P 제거 시 최적의 Al/P의 몰비는 약 4의 범위이며, 이 때 PO₄-P 제거율은 90% 이상을 유지할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2023년 부산가톨릭대학교 교내학술연구비 및 중소기업기술정보진흥원에서 시행한 2022년 성과공유형 공동기술개발사업 공동기술R&D(2단계) 사업임(RS-2022-00187244)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Chen, Y., Wu, Y., Wang, D., Li, H., Wang, Q., Liu, Y., Peng, L., Yang, Q., Li, X., Zeng, G., Chen, Y., 2018, Understanding the mechanisms of how poly aluminum chloride inhibits short-chain fatty acids production from anaerobic fermentation of waste activated sludge, *Chem. Eng. J.*, 334, 1351-1360.
- Eduah, J. O., Nartey, E. K., Abekoe, M. K., Henriksen, S. W., Andersen, M. N., 2020, Mechanism of orthophosphate (PO₄-P) adsorption onto different biochars, *Environ. Technol. Innov.*, 17, 100572.
- Ge, J., Meng, X., Song, Y., Terracciano, A., 2018, Effect of phosphate releasing in activated sludge on phosphorus removal from municipal wastewater, *J. Environ. Sci.*, 67, 216-223.
- Han, H. J., Moon, B. H., 2012, Effect of Rapid Mixing Intensity and Coagulant Dosages on Phosphorus Removal by Coagulation, *Clean Technol.*, 18, 404-409.
- Han, S. W., Lee, C. H., Lee, J. K., 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, 229-236.
- He, W., Xie, Z., Lu, W., Huang, M., Ma, J., 2019, Comparative analysis on floc growth behaviors during ballasted flocculation by using aluminum sulphate (AS) and polyaluminum chloride (PACl) as coagulants, *Sep. Purif. Technol.*, 213, 176-185.
- Hu, K., Li, W., Mu, H., Ren, S., Zhu, H., Zeng, K., Wang, B., Liang, J., Zhang, Q., Yang, L., Zhao, W., Xiao, J., 2023, In-situ anaerobic treatment removes the passivation layer of sponge iron to restore the nitrogen and phosphorus removal performance of SBR, *Process Saf. Environ. Prot.*, 174, 79-94.
- Jeon, B. S., Han, J., Kim, S. K., Ahn, J. H., Oh, H. C., Park, H. D., 2015, An Overview of problems cyanotoxins produced by cyanobacteria and the solutions thereby, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 37, 657-667.
- Jung, D. G., Kim, S. D., Kwon, S. Y., Lee, J. Y., Kim, Y. S.,

- Lee, J., Kim, J. K., Kim, S. W., Kong, S. H., Jung, D., 2020, Development of a portable Total-phosphorus monitoring system for preventing eutrophication in advance, *J. Sens. Sci. Technol.*, 29, 342-347.
- Kajjumba, G. W., Marti, E. J., 2022, A Review of the application of cerium and lanthanum in phosphorus removal during wastewater treatment: Characteristics, mechanism, and recovery, *Chemosphere*, 309, 136462.
- Kim, J. O., Chung, J., 2014, Implementing chemical precipitation as a pretreatment for phosphorus removal in membrane bioreactor-based municipal wastewater treatment plants, *KSCE J. Civil Eng.*, 18, 956-963.
- Kim, M. K., Moon, B., Kim, T. K., Zoh, K. D., 2015, A Study on production & removal of microcystin, taste & odor compounds from algal bloom in the water treatment processes, *The Korean Journal of Public Health*, 52, 33-42.
- Lee, B. H., Park, J. H., Cha, H. Y., Maeng, S. K., Song, K. G., 2012, Effects of dolomite addition on phosphorus removal by chemical coagulation of secondary treated effluent, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 26, 443-451.
- Lee, S. K., Park, M. S., Yeon, S. J., Park, D. H., 2016, Optimization of chemical precipitation for phosphate removal from domestic wastewater, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 30, 663-671.
- Moon, Y. E., 2021, A Study on the Spatio-temporal distribution characteristics of phytoplankton by water environment factors in Okjung Reservoir, *The Journal of Jeonbuk Studies*, 3, 235-280.
- Park, H. K., Jung, E. Y., Son, H. J., Choi, J. T., 2017, Reduction of Blue-green Algae and Its By-products using Intake of Deep Water in Summer, *J. Environ. Sci. Intern.*, 26, 393-399.
- Park, H. S., 2011, Phosphorus removal effective from Al(III) coagulant, *J. Korea Society of Environmental Administration*, 17, 43-48.
- Park, W. C., Lee, M. A., Sung, I. W., 2014, Phosphorus removal from advanced wastewater treatment process using PAC, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 36, 96-102.
- Sarvajayakesavalu, S., Lu, Y., Withers, P. J. A., Pavinato, P. S., Pan, G., Chareonsudjai, P., 2018, Phosphorus recovery: a need for an integrated approach. *Ecosyst. Health Sust.*, 4, 48-57.
- Son, S. M., Jutidamrongphan, W., Park, K. Y., 2012, Addition of coagulants for phosphorus removal from Combined Sewer Overflows (CSOs), *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 26(2), 295-302.
- Toor, U. A., Shin, H., Kim, D. J., 2019, Mechanistic insights into nature of complexation between aluminum and phosphates in polyaluminum chloride treated sludge for sustainable phosphorus recovery, *J. Ind. Eng. Chem.*, 71, 425-434.
- Tran, N., Drogui, P., Blais, J. F., Mercier, G., 2012, Phosphorus removal from spiked municipal wastewater using either electrochemical coagulation or chemical coagulation as tertiary treatment, *Sep. Purif. Technol.*, 95, 16-25.
- Wen, Y., Zheng, Z., Wang, S., Han, T., Yang, W., Jonsson, P. G., 2021, Magnetic bio-activated carbons production using different process parameters for phosphorus removal from artificially prepared phosphorus-rich and domestic wastewater, *Chemosphere*, 271, 129561.
- Woo, C. Y., Yun, S. L., Kim, S. K., Lee, W., 2020, Occurrence of harmful Blue-green algae at algae alert system and water quality forecast system sites in Daegu and Gyeongsangbuk-do between 2012 and 2019, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 42, 664-673.
- Yang, S., Yang, F., Fu, Z., Wang, T., Lei, R., 2010, Simultaneous nitrogen and phosphorus removal by a novel sequencing batch moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment, *J. Hazard. Mater.*, 175, 551-557.
- Yun S. Y., Ryu, J. N., Oh, J. I., 2012, T-P removal efficiency according to coagulant dosage and operating cost analysis, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 34, 549-556.

-
- Professor. Jeong-Hak Choi
Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan
jhchoi@cup.ac.kr
 - master's course. Geon-Gon Yoon
Department of Green Process System Engineering, Catholic University of Pusan
rmsmf414@naver.com
 - Professor. Chang-Han Lee
Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan
chlee@cup.ac.kr