

ORIGINAL ARTICLE

# 침전 및 부상 공정에서 PAC 응집제 종류별 $PO_4^{3-}$ 이온 제거 효율 비교

최정학 · 김주섭<sup>1)</sup> · 박종원<sup>2)</sup> · 민성기<sup>3)</sup> · 이해연<sup>3)</sup> · 이창한<sup>4)</sup>\*

부산가톨릭대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>(주)이에스티그린, <sup>2)</sup>부산가톨릭대학교 소방방재학과, <sup>3)</sup>한국무기응집제공업협동조합,

<sup>4)</sup>부산가톨릭대학교 환경행정학과

## Comparison of the $PO_4^{3-}$ Ion Removal Efficiency Using Various PAC Coagulant Types in Sedimentation and Flotation Processes

Jeong-Hak Choi, Ju-Seop Kim<sup>1)</sup>, Jong-Won Park<sup>2)</sup>, Seong-Kee Min<sup>3)</sup>, Hye-Yeon Lee<sup>3)</sup>, Chang-Han Lee<sup>4)</sup>\*

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

<sup>1)</sup>ESTGreen Co., Ltd., Ulsan 44776, Korea

<sup>2)</sup>Department of Fire and Disaster Prevention, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

<sup>3)</sup>K-BIZ, Seoul 03929, Korea

<sup>4)</sup>Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

### Abstract

In the present study, we aimed to determine the optimal polyaluminum chloride (PAC) dosage in raw water based on the  $PO_4^{3-}$ -P concentration using PAC coagulants with aluminum concentrations of 10%, 12%, and 17%. The correlation between the Al/P molar ratio and the removal efficiency of aggregated Al- $PO_4^{3-}$ -P flocs was evaluated using sedimentation and flotation processes. As the  $PO_4^{3-}$ -P concentration in the raw water increased, the Al/P molar ratio gradually decreased from 6.14 to 1.98. The Al/P molar ratio of PAC formulations with higher aluminum contents showed a decreasing trend in the following order: PAC 17% < PAC 12% < PAC 10%. An increase in the Al/P molar ratio led to a slight increase in the average particle size of Al- $PO_4^{3-}$ -P flocs formed during the coagulation process. At optimal Al/P molar ratios,  $PO_4^{3-}$ -P removal efficiency ranged from approximately 80% to 93% for both the coagulation/precipitation and coagulation/flotation processes. The coagulation/flotation process exhibited a slightly higher  $PO_4^{3-}$ -P removal efficiency than coagulation/precipitation.

**Key words** : PAC, Sedimentation, Flotation, Coagulation, Phosphorus

### 1. 서론

최근 기후변화로 이상고온, 강수량 감소, 일조량 증가 현상이 빈번해지면서 낙동강 유역의 취수장에서 유해 납조류로 인한 조류 관심 및 경계경보가 여러 차례 발령된 바 있으며, 생활하수, 하수처리장, 농경지, 축산

시설 등에서 다량의 인과 질소를 함유한 하·폐수가 수계로 유출됨에 따라 조류 발생 빈도가 증가하고 있다 (Kim et al., 2015). 조류의 대량 증식은 하천 내 용존 산소 고갈, 어류 집단 폐사 및 대사 부산물인 지오스민과 2-MIB (2-Methylisoborneol)로 인한 수돗물의 이취미를 유발하고, 소독 과정에서 발암성 물질인 THM

Received 24 July, 2024; Revised 21 August, 2024;

Accepted 24 August, 2024

\*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.

(Trihalomethane) 생성을 야기할 수 있다 (Sarvajayakesavalu et al., 2018; Lee et al., 2019). 2011년부터 국내에서도 조류 발생의 심각성을 우려하여 총량규제 도입과 총인(T-P)에 대한 방류수 수질기준을 강화하였고, 500 m<sup>3</sup>/일 이상의 하수처리시설은 방류수역에 따라 0.2~2 mg/L로 강화된 기준을 적용하고 있다(Lee et al., 2012; Park et al., 2014).

수중의 인을 제거하는 방법으로 생물학적 및 물리·화학적 처리가 적용되고 있으며, 화학적 처리는 다른 처리에 비해 인 제거 효율 및 경제성이 높다고 알려져 있다 (Eduah et al., 2020; Kajjumba and Marti, 2022). 국내 하수처리장의 경우, 화학적 응집 및 침전에 의한 고도처리로 하수 내 총인이 80% 이상 제거된다고 하였으며(Kim et al., 2014), 하수처리 시 인 제거를 위한 응집 및 침전 공정에서 황산알루미늄(Aluminum sulfate), PAC(Polyaluminium chloride) 및 PAHCS (Polyaluminum hydroxy chloro sulfate)와 같은 다양한 무기응집제를 사용하여 응집제 소요량, 슬러지 발생량, 소요 전력량 등을 비교한 경제성 평가에서 PAC가 가장 우수하다고 하였다. PAC는 무기고분자 형태로 알루미늄이 존재하기 때문에 염기도 조절이 가능하고 원수의 pH 변화에도 다른 응집제에 비해

상대적으로 높은 응집 효율을 나타내어 일반적인 하수처리 공정에서 많이 사용되고 있으며, Al 함량 및 Al/OH 몰비에 따라 염기도를 조절할 수 있어 다양한 원수 수질에도 안정적인 응집 효율을 나타낼 수 있다 (Han and Moon, 2012; Chen et al., 2018; Toor et al., 2019).

수중의 인 제거를 위한 침전 및 부상 공정에서 응집제로 사용되는 Al계 무기응집제들은 원수의 pH, 인 농도, 응집제 종류 등에 따라 제거 효율이 달라지기 때문에 각 운전 변수의 영향에 대한 지속적인 실험적 검증이 필요하다(Kim and Chung, 2014). Al 함량이 다른 PAC(10%, 12%, 그리고 17%)를 이용한 인의 응집 및 침전 실험 결과에서 초기 pH 8~10에서 Al/P 몰비와 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거율은 각각 1.28~6.18과 40.2~92.5%이었으며, Al/P 몰비가 4에서는 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거율이 90% 이상으로 높아지는 경향을 보였다(Choi et al., 2023).

조류, 휴믹 물질, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 등과 같은 저밀도 및 이온성 물질은 무기응집제를 이용한 응집 처리 시 저밀도 플록이 형성되기 때문에 응집/침전 공정을 대체할 수 있는 응집/부상 공정이 적용되고 있다(Park and Lee, 2000; Ahn and Lee, 2011). 하지만, PAC를 포함한 무기응집제를 적용하여 이온성 물질인 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P를

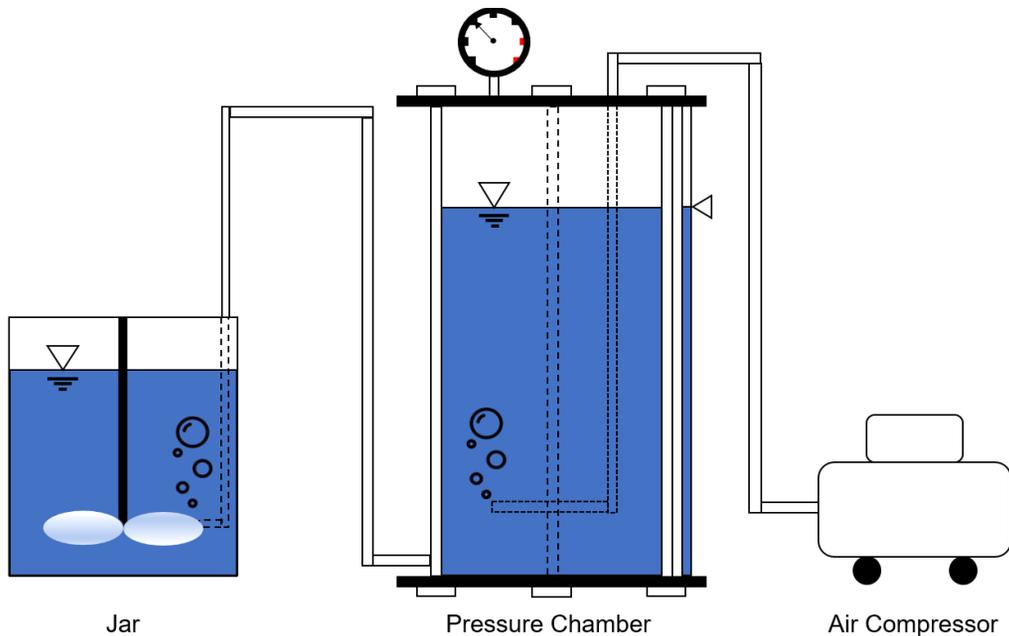


Fig. 1. DAF (Dissolved air flotation) experiment equipment.

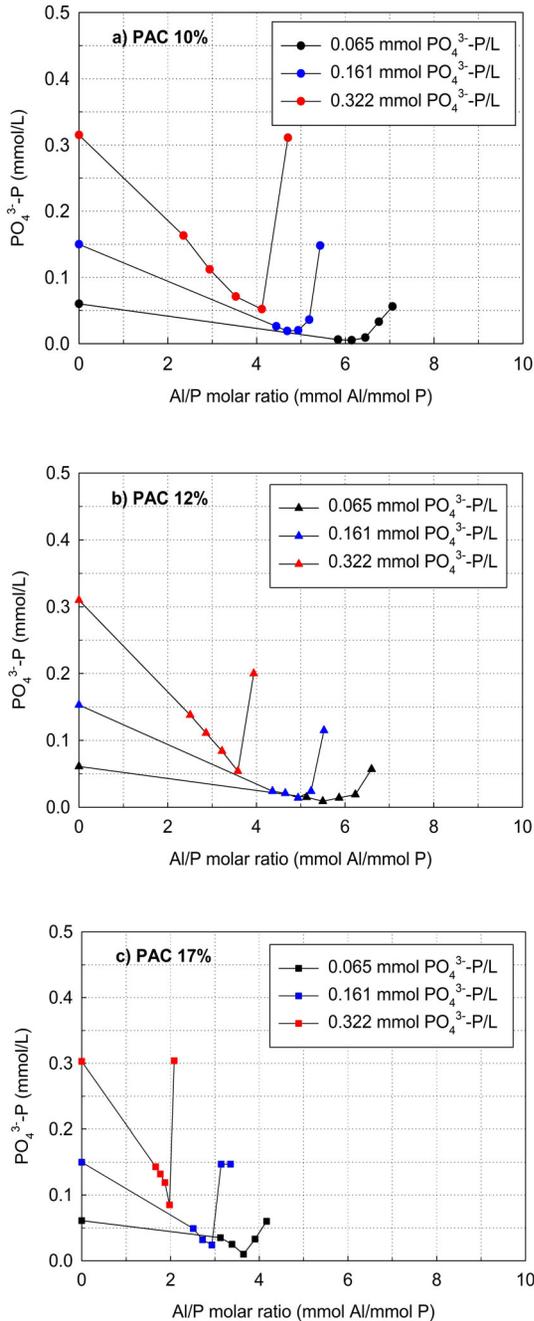


Fig. 2. Effect of Al/P molar ratio on residual PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> ion concentration by coagulation/precipitation process using PAC (10%, 12%, and 17%) as a coagulant at various PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P concentrations (0.065, 0.161, and 0.322 mmol/L).

응집 처리에 있어 후속 공정인 침전과 부상 공정의 효율 비교연구는 미미한 실정이며, 응집/부상 공정에서의 다양한 운전 조건에 따른 효율 평가와 최적 운전 조건 도출에 관한 연구가 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 10%, 12% 및 17%의 Al 함량을 가진 PAC를 이용하여 초기농도가 다른 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 응집 시 최적 PAC 주입량을 도출하고, 최적 응집 조건에서 침전 및 부상 공정의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거 효율을 비교 평가하였다. 또한 응집 후 생성된 플록의 입도분석을 통해 플록 입자의 크기분포와 부상 효율 간의 상관관계를 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험 재료 및 분석 방법

PAC 응집제는 E사의 PAC 10% (Al 함량 10%, 염기도 68%), PAC 12% (Al 함량 12%, 염기도 65.9%) 및 PAC 17% (Al 함량 17%, 염기도 60.5%) 3종을 사용하였다. 각 PAC 응집제별로 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거 성능을 정량화하기 위하여 주입된 PAC 응집제의 Al 이온과 표준용액의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 이온 농도를 몰 단위로 환산하여 제거 효율을 비교하였다. PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 표준용액은 제일인산칼륨(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, Junsei Chemical Co., Ltd., Japan) 시약을 탈이온수로 일정 비율로 희석하여 0.065 mmol PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P/L (2 mg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P/L), 0.161 mmol PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P/L (5 mg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P/L) 및 0.322 mmol PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P/L (10 mg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P/L)의 농도로 제조하여 사용하였다. 제조된 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 표준용액 및 희석용액은 0.5 M 수산화나트륨(NaOH, Junsei Chemical Co., Ltd., Japan) 용액을 이용하여 초기 pH를 10.0으로 조절하여 실험을 진행하였다. 시료의 pH는 pH meter(Mettler Toledo, S400, Switzerland)를 이용하여 측정하였으며, 시료 내 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 농도는 총인 분석 kit (HS-TP-L, HUMAS Co., Ltd., Korea)와 총인 수질분석기 (HS-1000 Plus, HUMAS Co., Ltd., Korea)를 사용하여 분석하였다. Al-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 플록의 입자크기분포(PSA : particle size distribution)는 입도분석기 (QICPIC-LIXELL, Sympatec GmbH, Germany)를 이용하여 응집/침전과 응집/부상 공정의 처리 과정에서 입자크기의 변화를 관찰하였다.

**Table 1.** PAC coagulant dosage and Al/P molar ratio ( $= C_{Al}/C_{PO_4^{3-}-P}$ ) at various initial  $PO_4^{3-}-P$  concentrations (0.065, 0.161, and 0.322 mmol/L)

$C_{PO_4^{3-}-P}$ (mmol/L)	Coagulant dosage and Al/P molar ratio					
	PAC 10%		PAC 12%		PAC 17%	
	$C_{Al}$ (mmol Al/L)	Al/P molar ratio	$C_{Al}$ (mmol Al/L)	Al/P molar ratio	$C_{Al}$ (mmol Al/L)	Al/P molar ratio
0.065	0.352	5.835	0.311	5.132	0.189	3.124
	0.371	6.142	0.334	5.498	0.205	3.384
	0.389	6.449	0.356	5.865	0.221	3.645
	0.408	6.756	0.378	6.231	0.236	3.905
	0.426	7.063	0.400	6.598	0.252	4.165
0.161	0.667	4.445	0.667	4.361	0.378	2.513
	0.704	4.692	0.712	4.652	0.410	2.722
	0.741	4.939	0.756	4.942	0.441	2.932
	0.778	5.186	0.801	5.233	0.473	3.141
	0.815	5.433	0.845	5.524	0.504	3.351
0.322	0.741	2.353	0.778	2.507	0.504	1.666
	0.927	2.942	0.890	2.865	0.536	1.770
	1.112	3.530	1.001	3.223	0.567	1.874
	1.297	4.119	1.112	3.582	0.599	1.978
	1.483	4.707	1.223	3.940	0.630	2.083

## 2.2. 회분식 침전/부상분리 실험방법

부상분리 실험을 위해 회분식 DAF 장치를 이용하였으며, 응집/부상 실험용 회분식 DAF 장치의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 시료 내  $PO_4^{3-}-P$  제거를 위한 응집/침전/부상 실험은 DAF-jar tester (ECE engineering Co. Ltd., USA)를 사용하였다. 응집 실험에 사용된 DAF-jar tester는 6개의 교반장치를 갖춘 것으로 패들(paddle)의 크기는 6.0 cm (가로) × 4.0 cm (세로)이다. 사용된 Jar는 1.3 L 용량으로 8.0 cm (가로) × 8.0 cm (세로) × 20.0 cm (높이) 규격의 아크릴 재질 사각형 용기이다.

응집과 응결 실험은 320 rpm ( $G : 1,000 s^{-1}$ )에서 60 sec 동안 급속교반을 진행한 이후, 30 rpm ( $G : 44.2s^{-1}$ )에서 900 s 동안 완속교반을 진행하였다. 응집 및 응결 조건에서의  $Gt$  값은 각각 60,000과 39,780이었다. 응집 및 응결 실험 종료 후, 침전 실험은 30 min간 정치 후 바닥면으로부터 높이 5.5 cm 지점에 있는 tap을 통하여 상층수 시료를 채취하였다. 또한, 부상실험은 정치 시간없이 DAF를 이용하여 가

압수를 주입하고 15 min간 플록을 부상분리 후 tap을 통하여 하층수를 채취하여  $PO_4^{3-}-P$  제거 효율을 평가하였다. 이때 가압수의 압력과 반송비를 각각 4.0~6.0 kgf/cm<sup>2</sup>와 20%로 조절하면서 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 초기 $PO_4^{3-}-P$ 농도와 PAC 응집제 주입량에 따른 응집 효율 비교

Fig. 2와 Table 1은 0.065, 0.161, 그리고 0.322 mmol  $PO_4^{3-}-P/L$ (2, 5, 그리고 10 mg  $PO_4^{3-}-P/L$ )의 초기농도인 조건에서 a) PAC 10%, b) PAC 12%, 그리고 c) PAC 17%의 응집제를 이용하여 응집 및 침전 실험 후 Al/P 몰비에 따른 처리수의  $PO_4^{3-}-P$  농도 변화를 나타낸 것이다. 3종의 PAC 종류별로 각각 Al/P 몰비를 2.353~7.063, 2.507~6.598, 그리고 1.666~4.165의 범위로 주입한 결과, 최적 응집 효율을 나타내는 Al/P 몰비의 범위는 원수의  $PO_4^{3-}-P$  농도에 따라 6.14~4.11, 5.49~3.58,

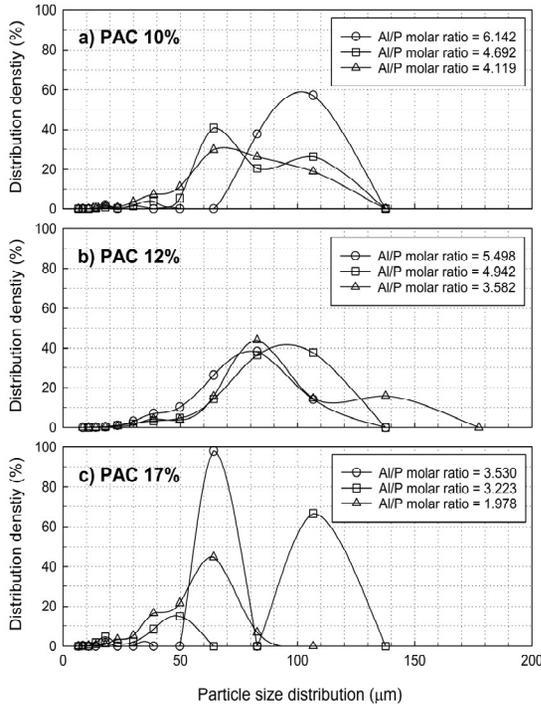


Fig. 3. Particle size distribution of Al-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>P flocs formed at optimum Al/P molar ratio.

3.65~1.98로 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 이 결과로부터 높은 Al 함량을 가지는 a) PAC 10%, b) PAC 12%, c) PAC 17% 순으로 원수에 포함된 단위 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P당 요구되는 Al 주입량이 점차 감소하는 경향을 보였다. 또한, PAC의 주입량이 부족하여 Al/P 몰비가 너무 낮아지거나, PAC의 주입량이 과다하여 Al/P 몰비가 일정 범위 이상으로 증가한다면 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거율이 크게 낮아지는 경향을 보였다. Jang et al.(2020)은 하수 고도처리시설의 응집/응결/SeDAF 공정에서 원수의 T-P 농도가 저농도(0.6 mg/L이하)와 고농도(0.6~3.0 mg/L) 범위에서 Al/P 비는 1.05 ~1.15(평균 1.09)에서 0.12~0.74(평균 0.37)로 점차 감소하는 경향을 보였으며, Al/P 비는 원수의 T-P 유입 농도에 따라 적정 범위가 달라진다고 보고하였다. 이 결과는 각 Al 함량에 다른 PAC 응집제에서 모두 초기 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도가 증가할수록 Al/P 몰비는 감소하는 결과와 일치하였으며, 동일한 초기 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도의 조건에서 Al 함량이 높은

PAC일수록 응집제 주입량이 낮아지는 경향을 보였다. Han and Kang(2015)이 제시한 결과에서 Al(III)계 PAC 응집제의 염기도가 증가하면 동일한 원수의 초기 탁도에서 탁도 제거율이 증가하며, 이는 PAC의 Al 함량 및 염기도 증가에 따라 가수분해되는 polymeric Al(III)종 함량이 높아져 응집 효율이 향상되기 때문이다.

### 3.2. 최적 응집 조건에서 Al-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 플록의 입자크기 분포

Fig. 3은 Fig. 2의 결과로부터 초기 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도 0.065, 0.161, 그리고 0.322 mmol PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P/L에서 PAC 10%, PAC 12%, 그리고 PAC 17%의 응집제가 최적 Al/P 몰비로 주입되었을 때 형성되는 Al-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 플록의 평균 입자크기분포를 나타낸 것이다. Fig. 3 a) PAC 10%에서 Al/P 몰비가 4.119~6.142일 때 평균 입자크기가 63.07~82.89 μm이었고, Fig. 3 b) PAC 12%에서 Al/P 몰비가 3.582~5.496일 때 평균 입자크기는 64.16~77.80 μm이었다. 또한, Fig. 3 c) PAC 17%에서 Al/P 몰비가 1.978~3.530일 때 평균 입자크기는 47.96~74.28 μm를 나타내었다. Al/P 몰비(1.0~1.8)가 증가하는 조건에서 응집제로 주입된 Al 이온에 의해 형성된 Al(OH)<sub>3</sub>이 용존성 인의 흡착하여 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 제거율이 증가한다고 보고한 결과(Han and Kang, 2010)와 유사하게 본 연구 결과에서도 PAC 종류에 따라 Al/P 몰비가 증가할수록 수중에서 형성되는 Al-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 플록의 평균 입자크기가 상대적으로 증가하는 경향을 보였다.

### 3.3. 침전과 부상 공정의 Al/P 몰비에 따른 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거 효율 비교

Fig. 4는 침전과 부상 공정의 Al/P 몰비에 따른 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거 효율을 나타낸 것이며, 초기 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도가 0.065, 0.161, 그리고 0.322 mmol PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P/L에서 Fig. 2에서 도출된 최적 응집제 주입 조건으로 PAC 10%, PAC 12%, 그리고 PAC 17%의 응집제를 주입하였을 때 침전과 부상 공정의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거율을 비교하였다. 각 초기 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도 조건에서 PAC 10%를 각각 0.371, 0.741, 그리고 1.297 mmol Al/L 주입한 경우, 침전과 부상 공정의

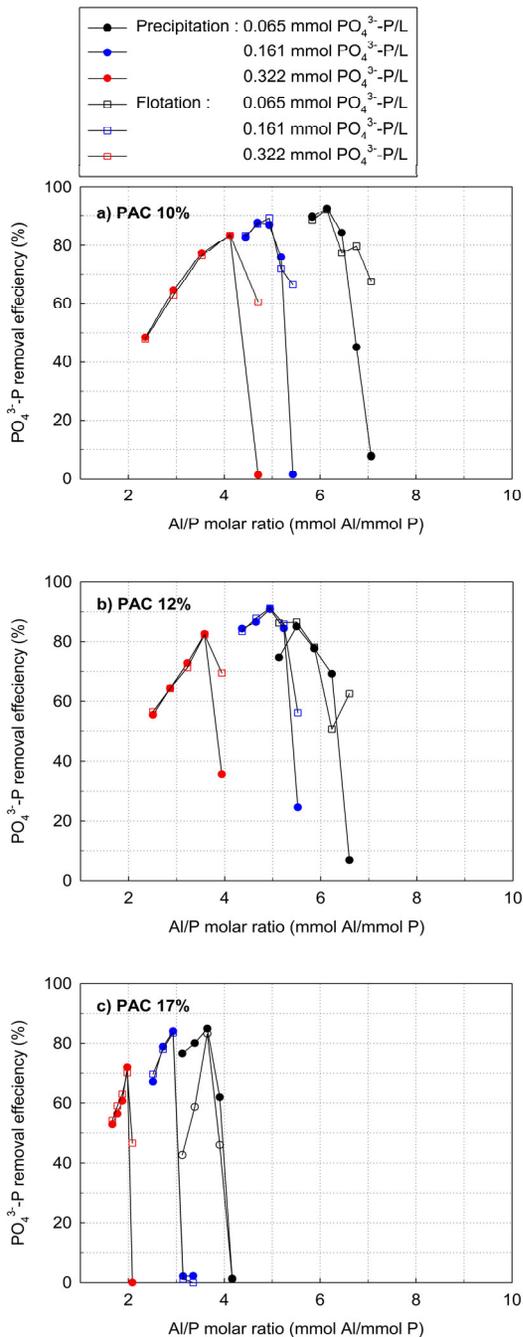
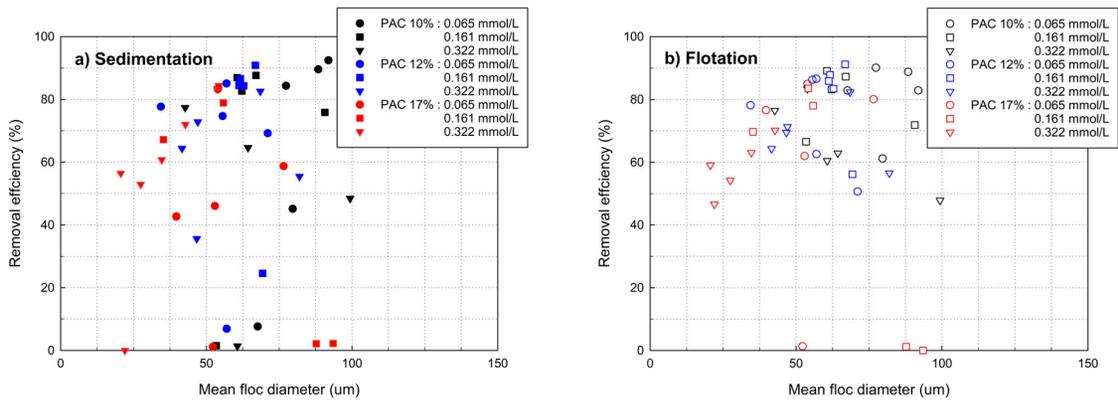


Fig. 4. Comparison of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  removal efficiency by coagulation/sedimentation and coagulation/flotation processes with Al/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  molar ratio using PAC (10%, 12%, and 17%) at various  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  concentrations (0.065, 0.161, and 0.322 mmol/L).

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거율은 각각 92.5%와 91.9%, 86.9%와 89.1%, 그리고 84.3%와 83.4%를 나타내었다. 동일한 조건에서 PAC 12%를 각각 0.344, 0.756, 그리고 1.112 mmol Al/L 주입한 경우, 침전과 부상 공정의  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거율은 각각 85.1%와 86.6%, 90.9%와 91.2%, 그리고 82.6%와 82.4%의  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 를 나타내었다. 또한, PAC 17%를 각각 0.221, 0.441, 그리고 0.599 mmol Al/L 주입한 경우, 침전과 부상 공정의  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거율은 각각 83.2%와 84.9%, 84.1%와 83.5%, 그리고 72.0%와 70.2%를 나타내었다.

PAC를 이용한  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  응집/부상 공정은 응집/침전 공정에 비해  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 제거율이 0.5~5% 정도 높은 결과를 보였다. 최적 PAC 주입량 이상으로 응집제를 주입할 경우, 응집/침전 공정의  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거율은 매우 낮아지면서 고액분리가 거의 되지 않는 현상을 나타내었지만, 응집/부상 공정은  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거율이 40~70% 범위로 유지되면서 저밀도 Al- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  플록의 고액분리가 가능하였다. 최적 PAC 주입량 이상이 되면 pH가 낮아지면서 생성된 Al- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  플록의 해체로 평균 입자크기가 작아져 침전 공정의  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 제거율이 급격히 낮아지나, 부상 공정은 생성된 Al- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 플록이 일부 해체되더라도 미세기포에 의한 고액분리가 가능해 일정 수준 이상의  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 제거율을 나타내었다. 이 결과로부터 PAC 주입량에 따른  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거 시보다 안정적인  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거율을 얻기 위해서는 침전과 부상 공정을 조합하여 적용하는 것이 효율적일 것이라 판단된다.

Fig. 5는 Fig. 4에 나타내었던 PAC 10%, PAC 12%, 그리고 PAC 17%의 최적 응집제 주입량 범위에서 응집/침전 및 응집/부상 처리 후 Al- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  플록의 평균 입자크기에 따른  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거율을 나타낸 것이다. 응집/침전 및 응집/부상 공정에서 PAC 주입량은 Al- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  플록의 평균 입자크기 변화에 주요한 요인 중 하나이다. 최적 응집 조건에 해당하는 Al- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  플록의 평균 입자크기분포 40~80  $\mu\text{m}$  범위에서 응집/침전과 응집/부상 공정의  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거율은 80~93%로 나타났으며, 응집/부상 공정이 응집/침전 공정보다 상대적으로 높은  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거율을 보였다. Al- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  플록의 평균 입자크기분포가 40  $\mu\text{m}$ 이하의 영역에서는 응집/침전과 응집/부상 공정에서 모두  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  제거율이 50~80% 범위로 낮아지는



**Fig. 5.** Mean Al-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P flocs diameter formed and subsequent removal efficiency of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P by coagulation/ sedimentation (a) and coagulation/flotation (b) processes using optimum PAC dosage at various PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P concentrations (0.065, 0.161, and 0.322 mmol/L).

경향을 보였다. 또한, 평균 입자크기분포가 낮게 나타나는 영역에서는 일부 조건에서 응집/침전 공정의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거율이 10% 이하로 크게 감소하는 반면, 응집/부상 공정에서는 Al-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 플록의 평균 입자크기분포가 낮은 영역에서도 50% 이상의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거율이 유지되었다. 이는 Jang et al.(2021)이 제시한 미세입자를 이용한 미세기포 부상분리 공정효율 평가에서 일정한 시간 이상의 접촉시간이 유지된다면 상대적으로 크기가 작은 입자가 부상분리에 더 유리하다고 보고한 결과와 일치한다. 이 결과로부터 응집/부상 공정은 응집/침전 공정과 비교하여 최적 Al/P 물비를 벗어난 응집 조건에서도 안정된 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거율을 유지할 수 있으며, 실제 하폐수 고도처리 공정에서 원수의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도가 변화하더라도 안정적인 인 제거가 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Al 함량이 다른 PAC 10%, PAC 12%, 그리고 PAC 17%의 응집제를 이용하여 응집 공정에서 원수의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도에 따른 최적 PAC 주입량을 결정하고, 침전과 부상 공정을 이용하여 Al/P 물비와 응집된 Al-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 플록의 제거효율 간 상관관계를 평가하였다. 원수의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 농도가 증가함에 따라 Al/P 물비는 6.14~1.98로 점차 감소하였으며, 높은 Al 함량을 가지는 PAC 17%, PAC 12%, PAC

10% 순으로 단위 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P당 요구되는 Al 주입량이 점차 감소하는 경향을 보였다. 또한, Al/P 물비가 증가하면 응집 공정에서 형성되는 Al-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 플록의 평균 입자크기도 약간 증가하였다. 최적 Al/P 물비 1.98~6.14에서 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거율은 응집/침전과 응집/부상 공정에서 80~93% 범위를 나타내었고, 응집/부상 공정이 응집/침전 공정에 비해 상대적으로 높은 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 제거율을 보였다.

#### 감사의 글

2022년 성과공유형 공동기술개발사업 공동기술 R&D(2단계) 사업(RS-2022-00187244)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

Ahn, K. B., Lee, C. H., 2011, Flotation efficiency of the DAF pump system for mixing and coagulation conditions in raw drinking water, *J. Environ. Sci. Intern.*, 20, 639-645.  
 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.  
 Choi, J. H., Yoon, G. G., Lee, C. H., 2023, Evaluation of

- phosphorus removal efficiency at various coagulation conditions using polyaluminum chloride with different Al contents, *J. Environ. Sci. Int.*, 32, 731-739.
- Eduah, J. O., Nartey, E. K., Abekoe, M. K., Henriksen, S. W., Andersen, M. N., 2020, Mechanism of orthophosphate (PO<sub>4</sub>-P) adsorption onto different biochars, *Environ. Technol. Innov.*, 17, 100572.
- 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., Kang, L. S., 2015, Comparison of Al(III) and Fe(III) coagulants for improving coagulation effectiveness in water treatment, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 37, 325-331.
- Han, S. W., Kang, L. S., 2010, Removal mechanism of phosphorus in wastewater effluent using coagulation process, *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 32, 774-779.
- Jang, Y. J., Jung, J. H., Ahn, K. H., Lim, H. M., Kim, W. J., 2020, Applicability of Al/P (Aluminium/Phosphorus) ratio in SeDAF process for enhanced phosphorus removal, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 42, 539-547.
- Jang, M. H., Choi, Y. H., Jung, H. J., Jeong, Y. H., Kwak, D. H., 2021, Feasibility evaluation on single-collector collision model to separate microplastics in micro bubble flotation process, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 43, 10-19.
- 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. M., Ahn, B. Y., Kim, S. H., Kim, D. S., Kim, Y. H., Choi, Y. S., Yoon, S. H., Bae, S. J., Cho, Y. G., Kim, E. S., Song, M. S., Na, J. B., 2014, Analysis and assessment of removal efficiency for T-P in sewage treatment, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, 17, 73-81.
- 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, *Korean J. 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., Kwak, Y. W., Hong, S. H., 2019, Effects of TDS on formation of THMs in drinking water treatment, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 33, 225-234.
- Park, H. S., Lee, S. Y., 2000, Effect of coagulants and separation methods on algal removal in water treatment process, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 22, 279-289.
- 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.
- 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.
- 
- Professor. Jeong-Hak Choi  
Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan  
jhchoi@cup.ac.kr
  - Ju-Seop Kim  
Department of Environmental Measurement, ESTGreen Co., Ltd.  
influence03@naver.com
  - Professor. Jong-Won Park  
Department of Fire and Disaster Prevention, Catholic University of Pusan  
pjw2131@cup.ac.kr
  - Research director. Seong-Kee Min  
K-BIZ  
minsk@pknu.ac.kr
  - Researcher. Hye-Yeon Lee  
K-BIZ  
sljklm0324@naver.com
  - Professor. Chang-Han Lee  
Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan  
chlee@cup.ac.kr