

하수 인 고도처리 · 자원화를 위한 인 결정여과공정(HCF, HAP Crystallization-Filtration) 운전 및 부산슬러지 특성 검토

장향연*, 박나리**, 임현민*, 안광호*, 정진홍*, 김원재*

*한국건설기술연구원

**과학기술연합대학원대학교(UST) 건설환경공학전공

e-mail:lotus900515@nate.com

Operation of HAP Crystallization-Filtration (HCF) process and characterization of its sludge for wastewater effluent

Hyangyoun Chang*, Nari Park**, Hyunman Lim*, Kwangho Ahn*,
Jinhong Jung*, Weonjae Kim*

*Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,

**Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Science and
Technology(UST)

요약

본 논문에서는 우리나라 호수나 하천의 부영양화 및 녹조의 대발생을 방지하고 대규모 하수처리장에 상용화되어있는 응집공정의 한계를 극복하고자 대체공정으로 고안된 인 결정여과공정(HCF, HAP crystallization-filtration process)의 pilot plant를 구축하고 운전 결과를 제시하였다. 또한, 여기서 발생하는 부산슬러지의 토양개량제로서의 자원화를 위한 특성분석을 실시하였다. 2017년 7월부터 2018년 9월까지 HCF pilot plant를 처리용량 27.1 - 135.6 m³/day으로 운전한 결과, 처리수의 T-P, PO₄-P 및 SS의 평균은 각각 0.13, 0.06, 1.6 mg/L를 나타내어 하수처리에서 HCF의 인 고도처리 가능성이 실증되었다. 또한, HCF 결정여과공정 부산슬러지를 SEM-EDX, XRD 및 FT-IR로 분석한 결과, 주요 구성 성분은 calcite, HAP, phosphoric acid 및 brusite로 나타나 산성화된 토양의 개량제(중화제)로서의 재활용 및 자원화 가능성이 시사되었다.

1. 서론

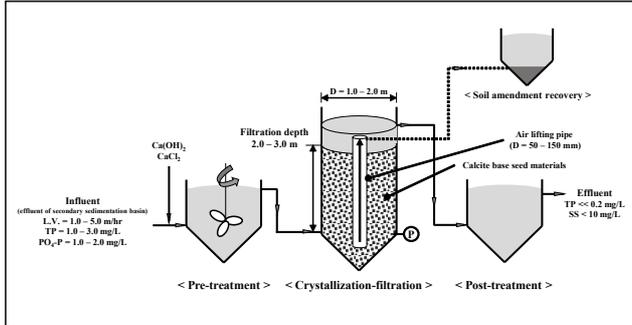
우리나라의 호수나 하천의 부영양화 및 녹조 방지를 위해서는 하수처리 방류수의 인 부하 관리가 필수적이다. 현재 대규모 하수처리장에는 응집공정이 상용화되어 있지만 알루미늄이 포함된 응집 슬러지의 재활용 또는 자원화에는 한계가 있다. 또한, 소규모 하수처리장(500 m³/day 규모 이하)에서는 처리유량과 부하의 불안정으로 인한 운전상의 어려움으로 T-P 농도 0.2 mg/L 이하로 방류하는 고도처리시설의 도입이 지연되고 있다. Hydroxyapatite(HAP) 결정화공정은 T-P 농도를 응집공정 수준으로 처리할 수 있어 이를 대체할 수 있는 고도처리 공정이다. 해외에서는 calcite(CaCO₃)를 crystal seed로 장기간 안정적인 인 제거 성과를 보고하였으나, 국내에서는 pilot 이상의 규모에서 운전된 성과가 없다.¹⁾ 또한, 유용한 광물자원으로 활용될 수 있는 calcite와 hydroxyapatite를 포함하는 슬러지의 특성분석과 자원화 방안에 대한 검토 또한 미흡한 실정이다. 탈탄산공정을 생략하는 hydroxyapatite 결정화공정의 경우에 고농도의 Ca²⁺와 처리수내 탄산염으로 인해 HAP을 포함하는 석회계 슬러지가 발

생하는데, 이는 산성화된 토양의 개량제(중화제)로 널리 사용될 수 있다.²⁾ 본 연구에서는 T-P 0.2 mg/L 이하를 안정적으로 달성하는 HCF(HAP crystallization-filtration) 결정여과공정의 pilot plant 설계·구축하고 운전 결과를 제시하였으며, 여기서 발생하는 부산슬러지의 특성을 분석하여 토양개량제로서의 자원화 가능성을 검토하였다.

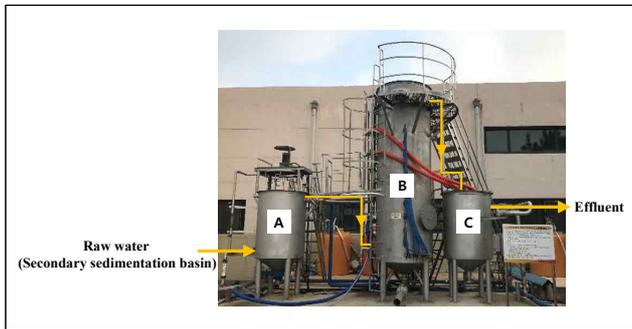
2. 연구방법

본 연구를 위해 경기도 I하수처리장에 구축된 처리용량 27.1 - 135.6 m³/day 결정여과공정(HCF) pilot plant의 개요도와 현장사진은 각각 그림 1, 그림 2와 같다. 전처리 조건은 pH 10.0 - 11.0(Ca(OH)₂ 사용), Ca²⁺ 농도 80 mg/L(CaCl₂ 사용)로 설계하였다. 결정여과조(B)는 선속도 1.0 - 5.0 m/hr, 상향류로 운전되며, 여재는 2.0 - 3.0 mm의 석회석 모래를 충전하였다. 역세척은 중앙에 Air lifting pipe를 설치하여 여재를 순환시켜 실시하였다. 역세척수는 처리수와 분리배출되도록 설계하였고, 침전시켜 역세척 슬러지를 회수하였다. 회수된 HCF 슬러지는 SEM(Scanning Electron

Microscopy), EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), XRD(X-ray Diffraction), FT-IR(Fourier Transform-Infrared Vacuum Spectrometry)을 활용하여 그 특성을 분석하였다.



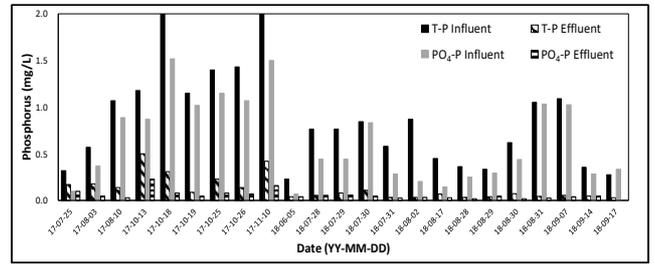
[그림 1] Schematic representation of the HCF process.



[그림 2] Pilot HCF process plant in the Il-san Wastewater Treatment Center (50.4 m³/d).

3. 결과 및 고찰

2차침전지 유출수를 원수로 한 HCF pilot plant의 운전결과 (Jul. 2017 - Sep. 2018)를 그림 3과 표 1에 나타내었다. 처리수의 평균 T-P와 PO₄-P는 각각 0.13, 0.06 mg/L를 나타내었다. 2018년 Pilot plant의 운전조건을 개량한 결과, 처리수의 평균 T-P와 PO₄-P는 0.05, 0.04 mg/L로 2017년에 비해 크게 안정되었다. SS도 방류수 수질기준(10.0 mg/L) 이하로 안정적으로 유출되었다. T-P와 PO₄-P의 평균 처리효율을 검토한 결과, 약 85% 이상의 인(P)이 칼슘화합물 결정으로 석출되어 HCF 반응조에서 여과·제거되었다.

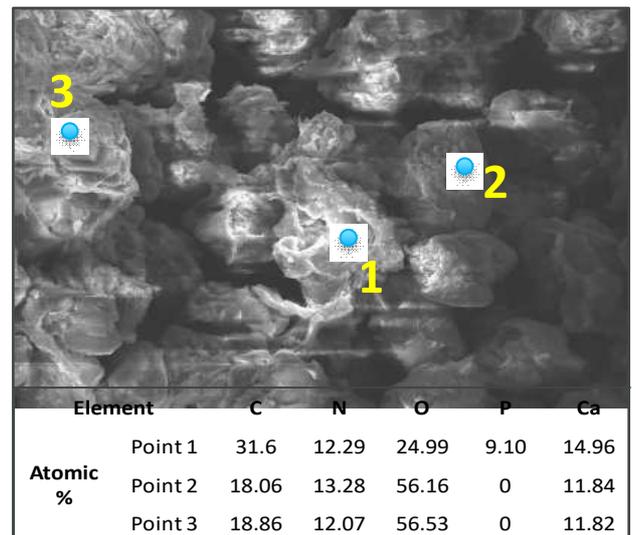


[그림 3] Operating results of HCF pilot plant during Jul. 2017 - Sep. 2018.

[표 1] Operating results of HCF pilot plant during Jul. 2017 - Sep. 2018

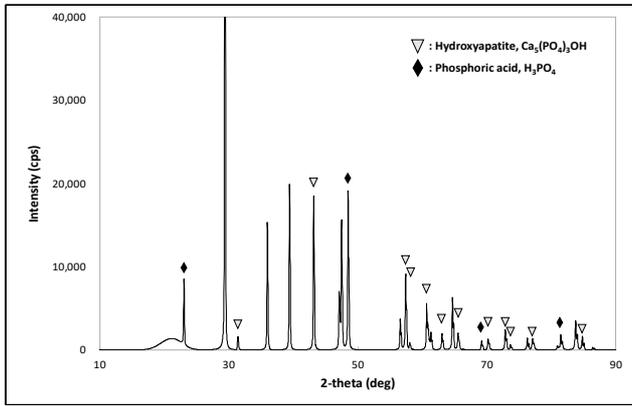
	Influent	Effluent	Removal efficiency (%)
pH	6.4-7.0 (avg.6.7)	9.3-10.8 (avg.10.3)	
T-P (mg/L)	0.23-2.05 (avg.0.86)	0.03-0.50 (avg.0.13)	46.9-96.0 (avg.84.7)
PO ₄ -P (mg/L)	0.07-1.52 (avg.0.63)	0.00-0.23 (avg.0.06)	0.0-100.0 (avg.84.1)
SS (mg/L)	0.0-77.0 (avg.11.3)	0.0-5.0 (avg.1.6)	0.0-100.0 (avg.76.6)

HCF 결정여과공정 부산슬러지의 SEM-EDX 분석결과를 그림 4에, XRD 분석결과를 그림 5에 나타내었다. SEM-EDX로 분석된 슬러지의 원자분율은 calcite(CaCO₃) 또는 HAP으로 추측되었다. 또한, XRD spectrum 분석결과, 슬러지의 주요 구성성분은 calcite, HAP, phosphoric acid(H₃PO₄) 및 brusite로 나타났다. 그림 6의 FT-IR 분석결과, 슬러지는 대부분 인산염 및 탄산염의 무기물로 구성되어 있으며, 유입수의 인 농도가 높을수록 슬러지 내 HAP의 함량이 calcite보다 높은 것으로 나타났다. 고농도의 Ca²⁺을 주입하여 탈탄산공정을 생략한 인 결정여과공정의 부산슬러지는 HAP 이외에도 CaCO₃와 칼슘-인 화합물로 구성되어 있는 것으로 나타났다.

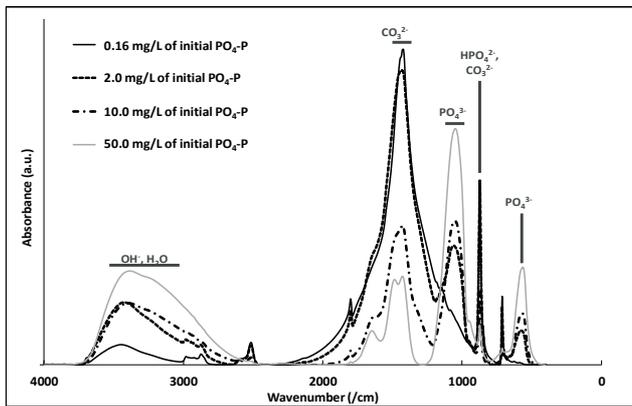


[그림 4] SEM-EDX analysis results of the HCF sludge.

neutralization”, Journal of Environmental Management, 133, pp. 374-377, 2014.



[그림 5] XRD analysis results of the HCF sludge.



[그림 6] FT-IR analysis results of the HCF sludge.

4. 결론

- 1) HCF pilot plant의 장기운전 결과, 우리나라 하수처리 방류수 수질기준(I지역) T-P 0.2 mg/L 이하를 안정적으로 달성하여 인 결정여과공정의 고도처리 가능성이 실증되었다.
- 2) HCF 결정여과공정 부산슬러지의 주요 구성성분은 고농도의 calcite(CaCO₃)와 HAP을 포함하는 칼슘-인 화합물로 나타났으며, 산성화된 토양의 개량제(중화제)로서의 재활용 및 자원화 가능성이 시사되었다.

사사

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(2021-0156)의 연구비지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Donnert, D., Salecker, M., “Elimination of Phosphorus from municipal and industrial wastewater”, Water Science & Technology, 40, pp. 195-202, 1999.
- [2] Gulsen, T., Ali, I.A., Taskin, O., Ekrem, K., “Using marble wastes as a soil amendment for acidic soil