



인 제거 입상소재를 적용한 여과수로 설계인자의 실험적 결정

Experimental determination of design parameters for filtration trench using phosphorus removal granular materials

장여주¹·임현만²·정진홍²·안광호²·장향연¹·박나리¹·김원재^{2,*}

Yeou Jang¹·Hyunman Lim²·Jinhong Jung²·Kwangho Ahn²·Hyangyoun Chang¹·Nari Park¹·Weonjae Kim^{2,*}

¹과학기술연합대학원대학교 스마트도시·건설융합, 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223

²한국건설기술연구원 국토보전연구본부, 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223

¹University of Science and Technology (UST), Smart City & Construction Engineering, 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223

²Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Department of Land, Water and Environment Research 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

ABSTRACT

The algal blooms in stagnant streams and lakes have caused many problems. Excessive algae leads to disturbance of ecosystem and overload of water treatment processes. Therefore, phosphorus(P), source of algal blooms, should be controlled. In this study, a filtration trench has been developed to convert dissolved phosphorus into hydroxyapatite(HAP) so that it could be crystallized on the surface of 'phosphorus removal granular material'; and residual particulate phosphorus could be removed by additional precipitation and filtration. The front and rear parts of filtration trench consisted of 'phosphorus removal granular material contact bed' and 'limestone filtration bed', respectively. As a result of the column test using phosphorus removal granular material and limestone serially, PO₄-P was removed more than 90% when EBCT(empty bed contact time) of the contact bed was over 20 minutes; and T-P represented 60% of removal efficiency when total EBCT was over 1.5 hours. The results of column tests to figure out the sedimentation characteristics showed that more than 90% of particulate phosphorus could be removed within 24 hours. It was necessary to optimize the filtration part in order to increase removal efficiency of T-P additionally. Also, it was confirmed through the simulation of Visual MINTEQ that most of particulate phosphorus in the column tests is the form of HAP. Based on the results of the study, it could be suggested that the design parameters are over 0.5 hour of EBCT for phosphorus removal granular material contact bed and over 1.5 hours of EBCT for limestone filtration bed.

Key words: Phosphorus removal, Filtration trench, Dissolved and particulate phosphorus, Design parameter, Visual MINTEQ

주제어: 인 제거, 여과수로, 용존성 및 입자성 인, 설계인자, 비주얼 민테크

1. 서론

유속이 느린 하천 및 호소에서는 인체에 유해한 마이

크로시스틴(microcystin) 등의 독소를 발생시키는 남조류(cyanobacteria)의 대발생이 문제가 되고 있다 (Kim and Hwang, 2004). 과도한 조류의 발생은 하천의 생태계를 교란시키고, 수생생물의 생존을 어렵게 한다. 또한 이러한 하천 및 호소를 상수원으로 하는 정수처리 공정에서

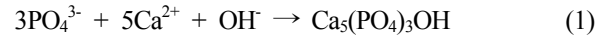
Received 8 October 2018, revised 9 December 2018, accepted 14 December 2018.

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

부하를 가중시키게 되며, 1) 여과지 폐쇄, 2) 응집제 과다 투입, 3) 조류의 대사산물에 의한 트리할로메탄(trihalomethane, THM)의 생성 및 4) 맛·냄새의 유발 등 다양한 문제가 야기되는 것으로 알려진 바 있다 (Lim et al., 2000; Kim et al., 2017). 남조류를 포함한 미세조류는 광합성 생물로서 이들의 생장은 빛, 수온, 이산화탄소, 영양염류 등에 의하여 영향을 받으며 (Ahn et al., 2015), 특히 폐쇄성 수역의 급격한 부영양화는 조류 성장의 제한 영양소인 인(P), 질소(N) 등 무기영양염류의 증가에 기인하는 것으로 알려져 있다 (Kim et al., 2007). 이는 하수처리장 방류수 또는 농경지 등으로부터 유출되는 비점오염원에 의해 야기되며, 일반적으로 담수 환경에서는 인(P)이 조류 성장의 제한인자로 작용하고, 해수 환경에서는 질소(N)가 제한인자로 기능하는 것으로 알려져 있다 (Kwon et al., 2006). 따라서 하천 등 공공수역에서 부영양화 및 녹조의 대발생을 효과적으로 방지하기 위해서는 인의 제거가 중요한 것으로 보고되고 있으며 (Lee et al., 2010), Schindler (1974) 등 여러 선행연구에서 해당 내용을 뒷받침하고 있다 (Schindler, 1974; Schindler, 1977; Schindler, 2012). 특히, 부영양화와 조류 성장에 영향을 미치는 용존성 인($PO_4\text{-P}$)의 부하를 저감하는 것이 필수적이라고 지적하고 있다 (Reynolds and Davies, 1974).

부영양화된 수역의 수질개선을 위한 기존의 방법들로는 1) 인공적인 폭기 등 물리적 방식을 사용하거나, 2) 응집제 및 살조제를 사용하거나, 3) 어류나 물벼룩을 활용한 생물학적 방식 등이 적용되어 왔으나 영향 반경이 크지 않거나, 응집부산물의 별도 처리가 필요하거나, 효율이 높지 않다는 점 등 여러 단점이 있는 것으로 보고되고 있다 (Byeon et al., 2016). 이를 극복하기 위한 새로운 시도의 일환으로, 본 연구에서는 하천부지 내에 인 제거기능을 갖는 여과수로를 조성하고자 하였다. 여과수로는 강우유출수, 경작지 유출수 또는 하천수 등 조류 대발생에 충분한 농도의 인을 함유하고 있는 원수로부터 조류 성장의 원인물질인 용존성 및 입자성 인을 동시에 제거하는 것을 목적으로 한다. 여과수로는 인 제거를 위해 인산이온이 칼슘이온(Ca^{2+})과 수산화이온(OH^-)이 공존하는 계에서 결정재와 접촉하여 하이드록시아파타이트(hydroxyapatite, HAP)의 형태로 결정재 표면에 석출되거나 후속공정에서 침전·여과되도록 하는 결정여과공법이 적용된다. 해당 공법은 기존 Chang의 연구에서 선행적으로 검토된 바 있으며 (Chang, 2017) 그 생성반응은 식 1과 같

다. 만약 해당 결정재가 Ca^{2+} 와 OH^- 를 지속적으로 용출하는 특성을 갖고 있다면 하나의 공정에서 HAP 생성 및 결정화, 여과가 동시에 이루어질 수 있다.



본 논문에서는 이러한 기능을 가진 신소재를 ‘인 제거 입상소재’로 명명하였으며, 해당 소재는 $CaCO_3 + CaO$ 의 혼합물이 주성분인 성형·소성재로서 HAP 생성에 필요한 Ca^{2+} 과 OH^- 의 용출이 장기적으로 이루어지며, 비표면적이 넓은 다공성의 소재로서 타 소재에 비해 공정의 구성 및 운영, 유지관리를 대폭 간소화할 수 있는 장점이 있다. 또한 이 소재를 결정재로 활용하는 결정여과공법(정석탈인법, 접촉탈인법)은 안정적인 인 제거효율을 기대할 수 있으며, 특히 응집제를 사용할 수 없는 하천 및 호소 등의 공공수역에서 효율적이고 지속적인 인 제거를 기대할 수 있는 것으로 보고되고 있다 (Chang et al., 2017).

본 연구에서는 인 제거 입상소재 접촉부와 석회석자갈 여과부를 순차적으로 적용하여, 용존성 인과 입자성 인을 동시에 제거할 수 있는 인 제거 기능이 특화된 여과수를 구축하고자 하였다. 이를 위해서 인 제거효율을 최적화하기 위한 단위공정별 체류시간을 칼럼테스트를 통해 실험적으로 결정하였다. 추가로 입자성 인의 제거효율을 제고하기 위한 칼럼테스트를 수행하였다. 또한, Visual MINTEQ 모의를 통해서 위 칼럼테스트에서의 용존성 및 입자성 인의 거동을 분석하였다. 이상의 결과를 바탕으로 인 제거 입상소재 접촉부와 석회석자갈 여과부를 연계하여 적용한 여과수로 테스트베드의 적정 설계인자를 도출하고 그 적용성을 검토하였다.

2. 기존 문헌 고찰

2.1 결정여과 칼럼테스트 기존연구 고찰

본 연구의 선행연구로서 참조할 만한 내용으로 Chang (2017)의 학위논문 내 ‘결정여과공정 모의 칼럼테스트’의 결과를 요약하면 다음과 같다. 직경 0.05 m, 높이 1.4 m, 부피 4.0 L의 원통형 칼럼 두 개를 직렬로 연결하여 총 충전고 2.8 m의 칼럼에 석회사를 충전하고 정량펌프를 이용하여 여과선속도 1.0 m/h부터 10.0 m/h으로 조건을 변경하며 상향류로 운전하였다. 이 실험에서 원수의 pH 범위는 6.7~7.2, T-P 농도의 범위는 1.0~1.9 mg/L, $PO_4\text{-P}$ 농도의 범위는 0.8~1.5 mg/L이



었다. 이 실험에서는 전처리 후의 pH를 페탈황석고 (CaO 26.4%)를 이용하여 10.0 또는 11.0으로 제어하였으며, Ca²⁺ 추가시 CaCl₂ 25% 약품을 사용하였다. 칼럼의 0.2 m마다 채수구를 두어 수질(pH, Ca²⁺, T-P 및 PO₄-P)의 변화를 관찰하였다.

이 실험결과에 따르면, 전처리를 거친 후 석회사 칼럼을 경유하는 과정에서 T-P와 PO₄-P의 제거율은 pH와 여과선속도 조건에 상관없이 95% 이상을 나타내었다. 충전고에 따른 T-P 제거효율을 분석한 결과, 선속도에 관계없이 0~0.4 m의 구간에서 제거효율의 증가가 가장 컸으며, 90% 이상의 제거효율을 달성하려면 충전고 2.0 m 이상이 필요한 것으로 나타났다. PO₄-P 또한 0~0.4 m 사이에서 높은 제거효율의 증가를 보였으며, 90% 이상의 제거효율을 달성하기 위해서는 1.2~1.5 m의 충전고가 필요한 것으로 나타났다. 최종 충전고 2.8 m 지점의 유출수에서 T-P의 제거효율은 96.4~96.8%, PO₄-P의 제거효율은 100.0%에 달하는 것으로 나타났다. 이 결과로부터 향후 본 테스트베드의 접촉부 및 여과부 도입에 있어서도 적절한 공상접촉시간(empty bed contact time, EBCT)을 확보하는 것이 높은 처리효율 달성에 결정적인 요소임을 확인하였다.

3. 연구방법

3.1 여과수로 기본 개념 도출

본 연구에 적용된 여과수로의 개념도는 Fig. 1과 같다. 경기도 용인시에 소재한 오산천 본류의 고수부지 내에 테스트베드를 구축하는 것을 목적으로 하여 기본 설계안을 도출하였으며, 오염된 하천수를 상류지점에서 취수하여 본 여과수로를 거친 후 하류지점으로 방류하는 형태를 갖도록 설계하였다. 유입부에는 오리피스형 수로를 조성하여 유입유량을 계측, 조절할 수 있도록 하였다. Fig. 2에 도시한 바와 같이 여과수로 테스트베드의 폭은 2 m, 길이는 총 20 m로 설계하였다. 전반부는 인 제거 입상소재 접촉부로 구성하고, 후반부는 석회석자갈 여과부로 구성하였다. 전반부와 후반부를 구분하고, 여과수로 전체의 수위를 조절하기 위한 웨어를 중앙부와 유출부에 각각 설치하도록 설계하였다.

테스트베드의 성공적인 구축 및 운영을 위해서는 주어진 현장의 여건을 고려하여 단위공정별 적정 체류시간,

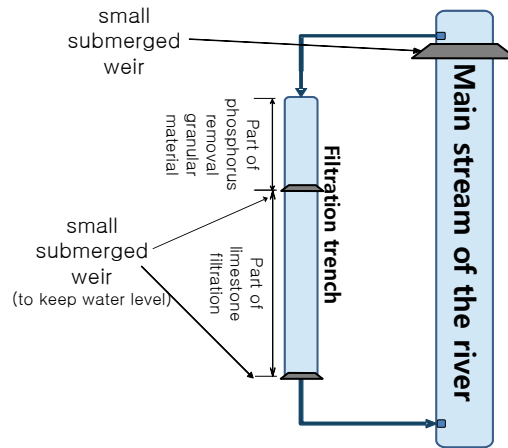


Fig. 1. Concepts of filtration trench.

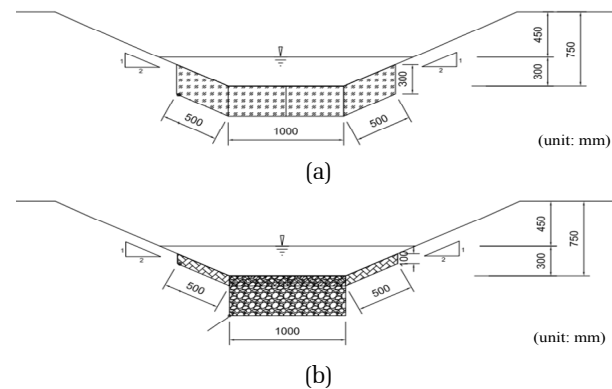


Fig. 2. Cross-sectional view of filtration trench: (a) Part of phosphorus removal granular material contact bed, (b) Part of limestone filtration bed.

목표 처리효율 등 핵심 설계인자를 도출해야 하며, 이를 실험적으로 결정하기 위한 테스트가 필수적이다. 본 연구에서는 칼럼테스트의 수행 결과를 통해 해당 여과수로의 설계인자를 도출하는 것을 목적으로 하였다.

3.2 여과수로 설계인자 도출을 위한 칼럼테스트

3.2.1 인 제거 입상소재와 석회석자갈을 조합한 칼럼테스트

본 시험은 인 제거 입상소재와 석회석자갈을 충전한 2단 연속 칼럼테스트의 형태로 수행하였으며, 그 모식도는 Fig 3과 같다. 칼럼의 총 부피는 4 L로, 인 제거 입상소재의 충전 부피는 1.33 L, 석회석자갈은 2.67 L이었으며, 전체의 공극률은 약 46%에相当하였다. 원수는 경기도 용인시 소재의 오산천 하천수에 액상 비료를 용해시켜 최종적으로 인 농도를 1~2 mg/L의 범위가 되도록 조절하여 사용하였다. 하천에서의 인의 경우 서론에서 서술하였던

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

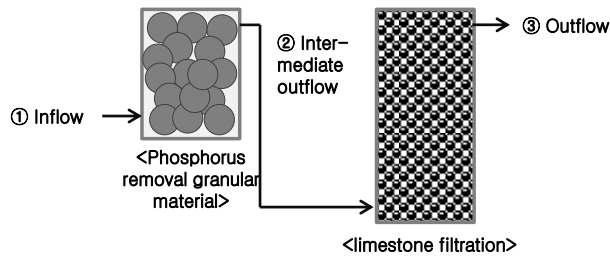


Fig. 3. Schematic diagram of column test using phosphorus removal granular material and limestone filter media.

바와 같이 하수처리장 방류수 또는 농경지 등으로부터 유출되는 비점오염원에 의해 야기되므로, 공공하수처리 시설의 방류수에 의해 영향을 받는 것으로 가정하였다. 공공하수처리시설에서는 하수처리 용량 및 지역에 따라 방류수질 기준을 달리 하고 있고(Korea Wastewater Information System, 2018), T-P의 경우 1일 하수처리용량이 500 m³ 이상일 때 4지역에서 2 mg/L 이하의 농도로 방류하는 것으로 제한하고 있다. 따라서, 2 mg/L 이하의 처리수가 강으로 방류될 때의 상황을 가정하여 제거효율을 분석하고자 하였다. 통수시간은 전체 칼럼부피에 대하여 EBCT 기준으로 각각 0.5, 1.0, 1.5 및 2.0 h이 되도록 조절하였다. 즉, 인 제거 입상소재 접촉부 및 석회석자갈 여과부의 EBCT를 각각 10 min / 20 min (total 0.5 h), 20 min / 40 min (total 1.0 h), 30 min / 60 min (total 1.5 h) 및 40 min / 80 min (total 2.0 h)로 조절하였다. 시료는 원수 유입 개시 후 2시간 이상 통수 후 채수하였다. 단계 별로 ① 원수, ② 인 제거 입상소재 칼럼 경유 직후의 중간유출수, ③ 석회석자갈 칼럼을 경유한 최종유출수를 각각 채수하였으며, 수질항목으로는 COD, T-N, T-P, PO₄-P(DR3900, HACH) 및 탁도(2100N Turbidimeter, HACH)를 분석하였다.

3.2.2 입자성 인의 침강특성 파악을 위한 칼럼테스트

칼럼테스트로 인해 PO₄-P는 식 1의 반응에 의해 HAP의 형태로 결정화 및 입자화된다. 따라서 일부는 결정화되어 인 제거 입상소재와 석회석자갈 여재에 부착성장하고, 일부는 입자성 인의 형태로 전환되어 부유하다가 침전·여과 등의 기작에 의해 추가로 제거된다. 한편 조류는 인을 섭취할 때 용존성 인(대부분 PO₄-P)의 형태로 이용하기 때문에 (Reynolds and Davies, 1974), 입자성 인의 경우에는 수계 내에서 재이온화 되어야 조류의 성장에 직접 활용될 수 있다. 따라서 입자성 인의 경우에는 조류의

생장에 직접 영향을 미치지 않는으나 T-P 제거효율을 제고할 필요가 있을 경우에는 적극적으로 제거할 필요가 있다.

본 연구에서는 인 제거 입상소재를 경유하면서 생성된 입자성 인의 침전에 의한 제거 기작을 더욱 상세히 파악하기 위한 침강시험을 진행하였다. 이를 위하여 상부가 열려있는 총 4 L의 원통형 칼럼에 인 제거 입상소재를 통수한 전처리수를 충전한 다음 최대 24시간동안 정지한 상태에서, 상층, 중층 및 하층에서 일정시간마다 채수하여 시간에 따른 침강특성을 분석하였다(Fig. 4). 상층, 중층 및 하층은 각각 수표면으로부터 10 cm 이내 구간, 60 cm 해당 구간, 100 cm 해당 구간으로 정의하였으며 구간오차는 ± 5 cm로 하였다. 수질항목은 T-P, PO₄-P 및 탁도를 분석하였다.

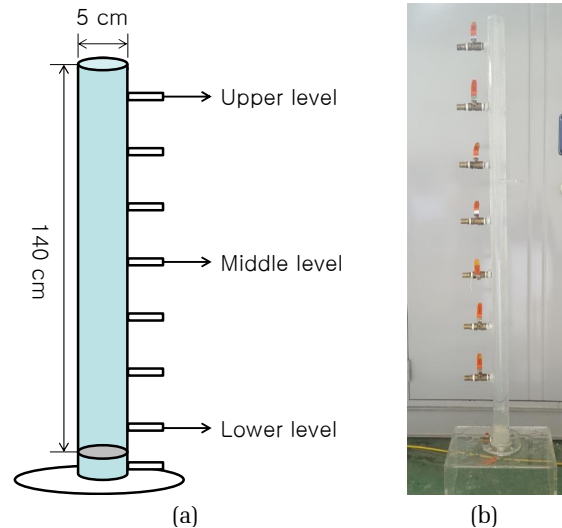


Fig. 4. Column test for sedimentation of particulate phosphorus: (a) Schematic diagram, (b) Feature.

3.3 용존성 인 및 입자성 인의 거동 파악을 위한 화학평형 프로그램(Visual MINTEQ) 모의

본 연구는 앞서 진행된 칼럼테스트를 통해 인의 성상이 어떻게 변화하는지를 화학평형 프로그램을 사용하여 검증하기 위하여 수행되었다. 본 연구에 사용된 Visual MINTEQ는 2000년에 미국 EPA 모델 MINTEQA2를 Windows 기반의 사용자 인터페이스로 보완·변경하여 재출시된 프로그램으로, 수용액의 평형조성을 계산하는데 이용되는 평형분화 모델이 적용되어 용존물질, 흡착된 물질, 고상 다매체의 물질수지 등을 계산하는 데 유용하다(Visual



MINTEQ 3.1 user guide, 2018). 해당 프로그램을 이용하여 각 테스트 이후 인의 평형상태에 관하여 고찰하였다. 구동 조건은 Table 1 및 2와 같다. 모의시 입력농도로는 일반적인 하천에서의 각 이온의 농도를 적용하였으며, 인 제거 입상 소재의 특성을 반영하여 Ca^{2+} 및 OH^- 이온이 충분히 용출된 상태를 가정하였다. 또한 입력된 이온들이 형성할 수 있는 고형물은 모두 침전물을 형성할 수 있다고 가정하였다. 특정 항목을 개별적으로 일정단위씩 변화시키면서 분석하는 sweep 모드로 구동하였으며, 해당 모의에서는 pH를 1부터 14까지 0.1 단위로 조절하여 상세히 모의하였다.

Table 1. Possible solid species in MINTEQ simulation

Species name
Anhydrite (CaSO_4)
Calcite (CaCO_3)
hydroxyapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$)
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
CaHPO_4
$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$
$\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Table 2. Components and concentration of input data for Visual MINTEQ

Components	Concentration (mg/L)
OH^-	100.0
Ca^{2+}	50.0
CO_3^{2-}	50.0
SO_4^{2-}	7.0
Cl^-	3.0
Mg^{2+}	2.5
Na^+	3.5
K^+	2.0
$\text{P}(\text{PO}_4)$	2.0

4. 결과 및 고찰

4.1 인 제거 입상소재와 석회석자갈을 조합한 칼럼테스트 결과

인 제거 입상소재와 석회석자갈을 조합한 칼럼테스트 결과에 대해 분석한 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 해당 실험은 각 EBCT별로 1회씩 수행되었다. 인 제거 입상소재 접촉부는 EBCT 20 min 이상(총 EBCT 1.0 h 이상)의

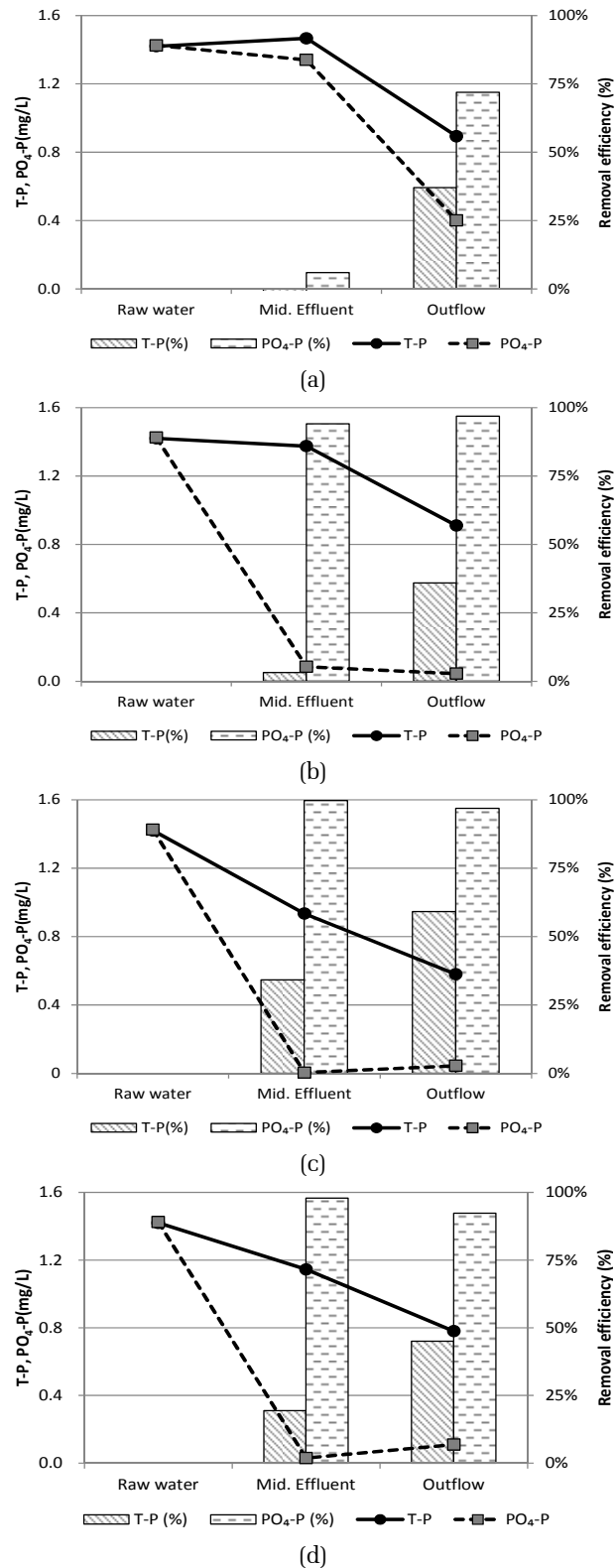


Fig. 5. Phosphorus concentration and removal efficiency according to total EBCT: (a) 0.5 h, (b) 1.0 h, (c) 1.5 h, and (d) 2.0 h.

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

조건에서 PO₄-P를 90% 이상 제거하였으며, EBCT 30 min 이상(총 EBCT 1.5 h 이상)의 조건에서부터 T-P의 제거에도 기여하였다. 석회석자갈 여과부에서는 EBCT에 관계없이 인 제거 입상소재 접촉부를 경유한 전처리수의 T-P 제거에 추가로 기여하였다. 총 EBCT 0.5~2 h의 범위에서 T-P 제거효율은 35.9~59.2%, PO₄-P의 제거효율은 71.9~96.8%로 분석되었다. T-P의 경우 총 EBCT를 1.5 h 이상으로 설정했을 때 45% 이상의 제거효율을 나타내었다. PO₄-P의 경우 총 EBCT를 1 h 이상으로 설정했을 때 90% 이상의 우수한 제거효율을 보여주었다.

본 칼럼테스트를 통해서 ① PO₄-P의 제거는 인 제거 입상소재 접촉부의 EBCT를 20 min 이상으로 설정하면 90% 이상을 달성할 수 있는 것으로 나타났으며, ② T-P의 경우 총 EBCT 2 h 이내의 조건에서 최대 60%의 제거효율을 갖는 것으로 분석되어, 향후 제거효율을 제고하고자 할 때 추가적인 방안을 마련해야 할 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 현장 테스트베드 적용시 본 여과수로의 총 EBCT는 1.5시간 이상으로 적용하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

4.2 입자성 인의 침강특성 파악을 위한 칼럼테스트 결과

입자성 인의 침강특성을 파악하기 위한 침강테스트 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6 (a)는 침강시간에 따른 T-P 농도 및 제거효율에 관한 결과로서, 인 제거 입상소재를 통수한 전처리수를 정치하였을 때 입자성 인의 침강을 통해 T-P 농도가 시간이 경과할수록 감소하는 것으로 나타났다. PO₄-P의 경우(Fig. 6 (b)), 전처리 과정에서 95% 이상 제거된 것으로 나타나 침강에 따른 추가적인 제거효과는 크지 않음을 확인하였다. Fig. 6 (c)에서는 T-P 농도와 탁도의 상관관계를 검토하였으며, 결정계수(R²) 0.96으로 매우 높은 상관성을 갖는 것으로 나타나 ① 해당 부유물질은 T-P를 포함한 입자성 물질일 개연성이 높은 것으로 나타났고, ② 이 입자성 물질은 침강(침전), 여과 등의 공정에 의해 추가적인 제거를 기대할 수 있는 것으로 확인되었다. 중층 이상의 수심에서 T-P는 12시간 이상 정치시 80% 이상, 24시간 이상 정치시에는 90% 이상이 제거되는 것으로 분석되어 향후 현장 테스트베드 구축 과정에서 침강(침전) 및 여과를 통해 처리효율을 제고할 수 있는 가능성이 시사되었다.

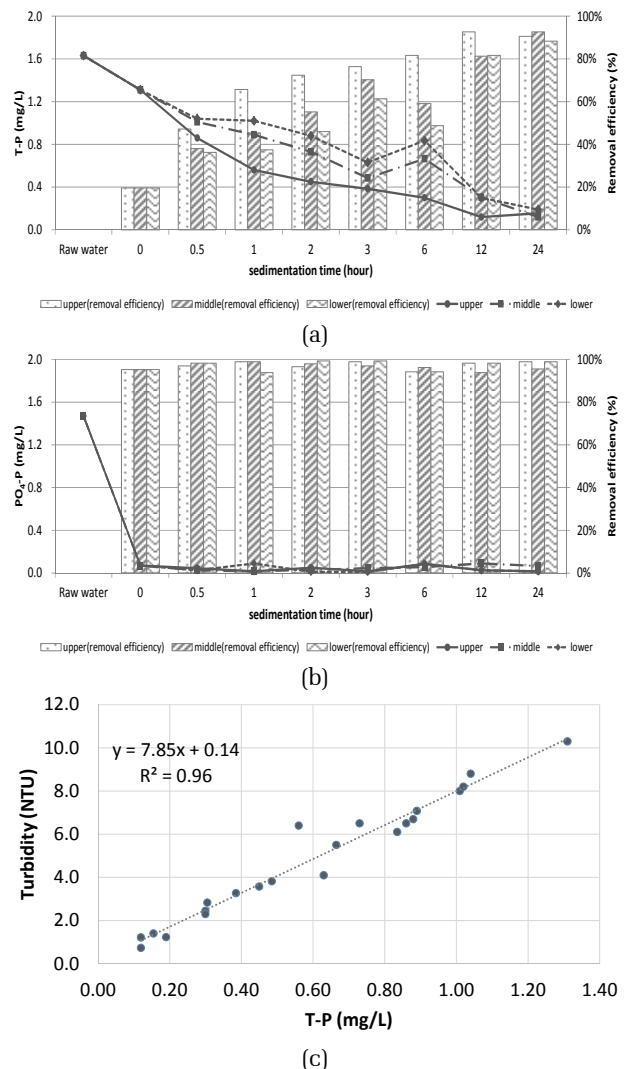


Fig. 6. Results of sedimentation test: (a) Concentration and removal efficiency of T-P, (b) Concentration and removal efficiency of PO₄-P, and (c) Correlation between T-P and turbidity.

4.3 인의 거동 파악을 위한 화학평형 프로그램(Visual MINTEQ) 모의 결과

Visual MINTEQ 프로그램의 구동 결과는 Fig. 7과 같다. H₃PO₄는 삼양성자산(triprotic acid)으로 pH가 높아질수록 H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻ 및 PO₄³⁻의 형태로 존재하는 비율이 순차적으로 증가하게 된다. 이 모의 결과에 따르면 pH 7 이상의 조건에서 PO₄³⁻ 형태로 존재하는 인산이온은 Ca²⁺ 및 OH⁻가 공존하는 경우에 모두 HAP으로 전환되는 것으로 나타났다. 따라서 선행으로 진행된 인 제거 입상소재와 석회석자갈을 조합한 칼럼

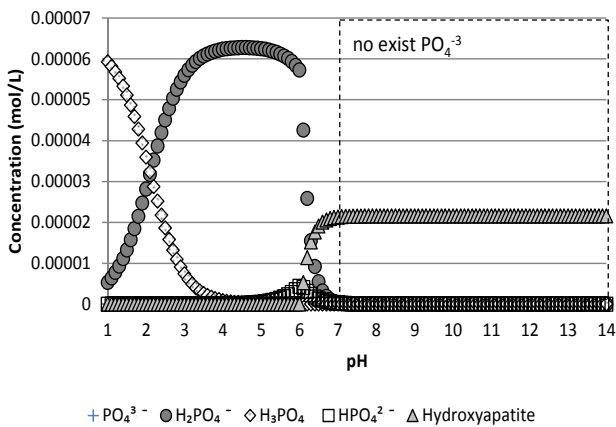


Fig. 7. Results of Visual MINTEQ simulation according to pH.

테스트에서 생성된 입자성 인의 경우 높은 확률로 HAP의 형태로 존재하게 된다. 이렇게 형성된 HAP은 조류의 섭식에 즉시 활용가능한 형태가 아니기 때문에 조류의 생장과는 큰 연관이 없을 것으로 판단된다 (Reynolds and Davies, 1974). 따라서 본 연구에서 개발된 여과수로에서 전반부인 인 제거 입상소재 접촉부를 경유하는 것만으로도 대부분의 용존성 인이 제거 가능하여 수체의 부영양화를 방지할 수 있는 유효한 방안이 될 것으로 시사되었다. 한편, 추가적으로 T-P의 제거효율을 높이하고자 할 때에도 제거대상 물질이 HAP 형태의 입자성 인이라는 사실에 입각하여 공정 최적화를 도모할 필요가 있을 것이다.

5. 결론

인 제거 입상소재와 석회석자갈을 순차적으로 적용한 인 제거 기능이 특화된 여과수로 테스트베드를 구축하기 위하여 적정 체류시간 및 인 제거효율의 제고 방안을 모색하였다. 이를 위해서 1) 결정여과 칼럼테스트에 대한 기존연구를 고찰하고, 2) 인 제거 입상소재와 석회석자갈을 조합한 칼럼테스트, 3) 입자성 인의 침강특성을 파악하기 위한 칼럼테스트 및 4) 화학평형 프로그램(Visual MINTEQ)을 활용하여 인의 성상 변화에 대해 모의하였다. 본 연구의 주요한 결과는 다음과 같다.

1) 결정여과 칼럼테스트에 대한 기존연구를 고찰한 결과, 전처리를 거친 후 석회사 칼럼을 통과함으로써 T-P와 PO₄-P의 제거율은 pH와 여과선속도 조건에 상관없이 95% 이상의 제거효율을 나타내었다. 또한 초

기 구간에서 가장 높은 제거효율의 증가가 관찰되었으며, 90% 이상의 제거효율을 달성하기 위해 T-P의 경우에는 충전고 2.0 m 이상(선속도 1 m/h 기준: EBCT 2 h 상당), PO₄-P의 경우에는 충전고 1.5 m 이상(선속도 1 m/h 기준: EBCT 1.5 h 상당)이 필요한 것으로 분석되었다.

2) 인 제거 입상소재와 석회사를 조합한 칼럼테스트에서, T-P 제거효율은 총 EBCT 기준으로 1.5시간일 때 60%, PO₄-P는 인 제거 입상소재 접촉부의 EBCT 20 min 이상일 때 90% 이상으로 나타났다. 테스트베드 적용시 인 제거효율을 제고하기 위한 총 EBCT는 1.5시간 이상이 적절할 것으로 사료된다.

3) 입자성 인의 침강특성을 파악하기 위한 칼럼테스트 결과, 인 제거 입상소재를 통과한 전처리수의 12시간 정치시 T-P의 80% 이상, 24시간 정치시 90% 이상이 제거되는 것으로 나타났다. 따라서, 현장 테스트베드 적용시 침강 효과를 배가하기 위해 사수율을 줄이거나 체류시간 증가 등을 통해서 T-P 처리효율을 추가로 제고할 수 있는 가능성이 확인되었다.

4) Visual MINTEQ 프로그램 구동을 통해서 pH 7 이상, Ca²⁺가 충분한 농도로 공존하는 조건에서 모든 인산이온이 hydroxyapatite(HAP)의 형태로 전환되는 것으로 모의되었다. 따라서, 위에서 수행된 칼럼테스트에서 입자성 인은 높은 확률로 HAP의 형태로 존재하며, 조류의 생장과는 큰 연관이 없을 것으로 예측된다. 추가적으로 T-P의 제거 효율을 높이하고자 할 때에는 인의 형태가 HAP이라는 사실을 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 물관리연구개발사업 “하천구조체를 활용한 하천 내 녹조관리 기술 개발”의 연구비지원(과제번호 18AWMP-B098632)에 의해 수행되었습니다.

References

Ahn, C.Y., Lee, C.S., Choi J.W., Lee S.H., and Oh, H.M. (2015). Global occurrence of harmful cyanobacterial blooms and N, P-limitation strategy for bloom control, Korean J. Environ. Biol., 33(1), 1-6.

- Byeon, N.D., Kim, G.Y., Lee I.J., Lee, S.R.M., Park, J.R., Hwang, T.M. and Joo, J.C. (2016). Investigation and evaluation of algae removal technologies applied in domestic rivers and lakes, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 38(7), 387-394.
- 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.
- Chang, H.Y., Park, N.R., Jang, J.Y., Ahn, K.H., Lim, H.M. and Kim, W.J. (2017). Elution characteristics of lime-based granular alkaline material and applicability of phosphorus crystallization processes, *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, 31(6), 577-586.
- D.W. Schindler (1974). Eutrophication and recovery in experimental lakes: Implications for lake management, *Science*, 184(4139), 897-899.
- D.W. Schindler (1977). Evolution of phosphorus limitation in lakes, *Science*, 195(4275), 260-262.
- D.W. Schindler (2012). The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes, *Proc. Biol. Sci.*, 279, 4322-4333.
- Kim, B.C., Sa, S.H., Kim, M.S., Lee, Y.Y. 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, E.J., Nam S.H., Koo, J.W., Lee S.R.M., Ahn, C.H., Park, J.R., Park J.I., and Hwang, T.M. (2017). Applicability of unmanned aerial vehicle for chlorophyll-a map in river, *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, 31(3), 197-204.
- Kim, H.S. and Hwang, S.J. (2004). Analysis of eutrophication based on chlorophyll-a, Depth and Limnological characteristics in Korean reservoirs, *Korean J. Limnol.*, 37(2), 213-226.
- Korea wastewater Information System, <https://www.hasudoinfo.or.kr/knowledge/envWaterQuality.do> (December 5, 2018).
- Kwon, Y.H., Seo, J.K., Park, S.W. and Yang, S.Y. (2006). Evaluation of diatom growth potential in midstream and downstream Nakdong river, *Algae*, 21(2), 229-234.
- Lim, Y.S., Song, W.S., Cho, J.S., Lee, H.J. and Heo, J.S. (2000). The effect of algae on coagulation and filtration of water treatment process, *Korean J. Environ. Agric.*, 19(1), 13-19.
- Reynolds, C.S. and Davies, P.S. (1974). Sources and bioavailability of phosphorus fractions in freshwaters: a British perspective, *Biol. Rev.*, 76, 17-64.
- Visual MINTEQ a brief tutorial, <https://docplayer.net/36482927-Visual-minteq-a-brief-tutorial.html> (October 4, 2018).