

다목적 여과저류지를 이용한 하천수의 조류와 인 제거방안 제안 A Proposition for the Removal of Algae and Phosphorus from River Water Using Multi-Purpose filtration pond

최홍규* · 정일화 · 배가람 · 박재영** · 이종진** · 김용운** · 정관수*** · 김승현[†]
Hong-Gyu Choi* · Il-Hwa Jeong · Gha-Ram Bae · Jae-Young Park**
Jong-Jin Lee** · Yong-Woon Kim** · Kwan-Sue Jung*** · Seung-Hyun Kim[†]

영남대학교 환경공학과 · *수자원기술 · **한국수자원공사 사업기획실 · ***충남대학교 토목공학과
Department of Environmental Engineering, Yeungnam University · *Water Resources Engineering Corporation
Business Research & Planning Dept., K-Water · *Department of Civil Engineering, Chungnam National University

(2013년 6월 6일 접수, 2013년 7월 8일 채택)

Abstract : In an effort to find a solution to the eutrophication of major Korean rivers, a method to utilize multi-purpose filtration pond was investigated. As literature showed that oyster shell is known to be the most adequate for the removal of dissolved phosphorus in Korean rivers, batch and column experiments were performed using oyster shell as an adsorbent in this study. The results of the batch experiment showed that the removal of dissolved phosphorus from river water through adsorption as a way of preventing algal growth was not practical. The results obtained from the column experiment, however, suggested that oyster shell may be utilized as an adsorbent under limited conditions. Based on the results of the experiments a methodology was proposed to remove algae from river water through the use of multi-purpose filtration pond. This method involves mechanically removing the accumulated algae cake from the surface of the artificial stream in the pond towards the condensing part located at the lower reach of the stream, where particles gather before the final removal. In addition, employment of oyster shell as an adsorbent in the condensing part allows prevention of phosphorus released from the dead algae re-entering the river water.

Key Words : Multi-Purpose Filtration Pond, Adsorption Isotherm, Column Experiment, Oyster Shell, Phosphorus Removal, Algae

요약 : 대하천의 조류문제로 인한 해결책을 찾기 위해 다목적 여과저류지를 활용하는 방안을 연구하였다. 문헌조사를 통해 용존 인의 흡착제거에 우리나라에서는 굴패각이 적합함을 알 수 있었고, 이를 흡착제로 활용한 등온흡착실험과 칼럼실험을 수행하였다. 등온흡착실험결과 흡착에 의해 하천수의 용존 인을 모두 제거하여 대하천에서의 조류발생을 방지하는 것은 어렵다는 것을 알 수 있었고, 칼럼실험결과 제한적인 조건에서는 굴패각을 흡착여재로 활용하는 방안이 가능함을 알 수 있었다. 실험결과를 근거로 이미 발생한 조류를 여과저류지를 이용하여 제거하는 방안을 제시하였으며, 인공하천의 하상표층에 형성된 슬러지 케익을 기계적으로 제거하여 하류의 농축부에 모아 최종제거하고 또한 농축부에서 흡착제로 굴패각을 사용함으로써 농축부의 사멸조류에 의한 인의 재방출을 억제하는 것이다.

주제어 : 다목적 여과저류지, 등온흡착실험, 칼럼실험, 굴패각, 인 제거, 조류

1. 서론

최근 하천수에 조류가 심하게 발생하여 하천환경뿐 아니라 식수의 안전성에 대한 불안감이 커지고 있는 실정이다(환경일보, 2012년 8월 21일). 하천수에서의 조류발생을 억제하기 위해서는 영양염류의 하천유입을 억제해야 하며, 이에 대한 대책으로는 인 처리시설의 보완설치와 방류수질 기준강화 그리고 농경지 등 비점오염원의 철저한 관리가 필요할 것이다(서울신문, 2012년 5월 4일). 그러나 이러한 대책만으로는 그 목표달성이 쉽지 않으며, 가능하다면 하천수를 직접 처리하여 하천에 이미 유입한 인을 제거함으로써 조류발생의 원인을 제거하거나 이것이 가능하지 않다면 차선책으로 하천에 이미 발생한 조류를 모두 제거하는 공정의 도입을 검토할 필요가 있을 것이다.

하천수의 직접처리를 위하여 현재 하수처리장에서 적용되

고 있는 고도처리기술 즉, 하이텍(High-tech)공법을 도입하는 것은 매우 어렵다 할 것이다. 하천수는 오염도가 낮고 유량은 매우 많기 때문이다. 또한, 설사 이러한 방식이 가능하다고 하더라도 여기에는 다량의 화학약품이나 에너지, 복잡한 공정이 필요하고 이를 관리할 전문인력도 필요한 단점이 있어 이를 대체할 수 있는 방안이 필요하다 할 것이다. 하이텍공법과 달리 안정화지, 습지, 토양처리 등의 보급기술(Low-tech)은 그 작동원리가 간단하여 건설 및 유지관리가 쉽고, 약품 및 에너지 소비가 적어 운영비용이 적게 들며, 안정적인 운전이 가능한 장점이 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 이러한 공법들은 산업혁명의 초기부터 20C 초반까지 널리 사용되었으며, 1970년대 이후에 그 장점이 재조명되어 다시 그 사용이 많아지고 있는 추세여서 하천수 직접처리에 이들 공법을 고려할 수도 있을 것이다. 그러나 이러한 보급 기술들은 처리효율이 낮거나 넓은 부지를 필요로 하는 경우

[†] Corresponding author E-mail: kimsh@yu.ac.kr Tel: 053-810-2548 Fax: 053-810-4624

가 많아 국토가 좁은 우리나라에서는 그 도입이 쉽지 않은 실정이다.^{2,3)}

하상계수가 큰 경우 하천의 범람으로 인한 피해를 막기 위해서 또는 유역의 오염물질이 하천으로 직접 유입하는 것을 방지하기 위한 방안으로 일본과 미국 등에서는 천변저류지가 운영되고 있고, 이들 설비는 홍수시 이외에는 생태습지 공원이나 운동장 등으로 활용되고 있다.⁴⁾ 우리나라에서도 최근 이러한 저류지의 필요성이 논의되고 있으며, 하천별 유역종합치수계획상에는 30여개소의 천변저류지가 계획된 바 있고, 4대강 살리기 마스터플랜에는 다양한 치수대책의 일환으로 천변저류지 그리고 이와 유사한 개념인 홍수조절지 등이 계획되어 있다.⁴⁾ 4대강살리기 마스터플랜에서 계획중인 이들 설비는 5~6개소이지만 필요시 이러한 기능으로 전환이 가능한 생태습지까지 포함하면 40여 개소에 이른다. 이러한 설비의 평상시 용도는 외국에서와 같이 생태습지공원 또는 재생에너지단지 등으로 활용할 계획이다.⁵⁾ 홍수시 천변저류지의 본래 기능을 손상하지 않으면서 평상시에 이러한 저류지를 활용하여 보급기술 중 오염제거효율이 좋은 공법을 선정 및 적용한다면 하천수질의 개선에 유용할 것으로 판단되어 손 등은 다목적 천변여과저류지를 제안한 바 있다.⁶⁾

손 등이 다목적 천변여과저류지에 제안한 수처리 기술은 하상여과공법이다. 그들은 여과저류지 내부에 격벽을 적절히 설치하여 수 km에 달하는 긴 인공하천을 조성하고, 인공하천의 바닥 약 3 m 깊이를 투수성이 좋은 모래로 치환한 후 여기에서 하상여과를 적용하는 방안을 제시하였다. 자연하천의 하상여과에서 하상 단위면적당 처리율은 약 $4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ 에 이르므로 1 km^2 의 면적에서 하루 약 400만 m^3 의 거대 처리용량을 기대할 수 있어 이 설비 몇 개를 설치하면 대하천의 하천수를 전량 처리할 수도 있을 것으로 기대된다. 하상여과는 최근에 개발되었지만 이에 대한 상당한 연구결과가 보고된 바 있고, 울산광역시 태화강 등에 실규모로 설치되어 성공적으로 운영되고 있어서 이의 효능은 충분히 검증되었다고 할 것이다.⁷⁻¹²⁾ 하상여과가 적용된 다목적 천변여과저류지의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다.

다목적 천변여과저류지에서의 하상여과는 그 여과깊이가 3 m 정도로 얇고 여재도 모래질 토양이어서 이와 유사한 공법인 토양대수층처리와 마찬가지로 주로 탁도와 BOD 물질의 제거에 효능이 좋을 것으로 판단된다.¹³⁻¹⁵⁾ 조류와 입상 인은 BOD와 탁도물질에 포함되므로 이들 오염물질들은 모래여과에 의해서 쉽게 제거될 수 있다.¹⁶⁾ 그러나 용존 인은 모래여과에서 쉽게 제거되지 않으므로 이의 효율적 제거를 위해서는 인의 흡착에 적합한 여재를 선택하여 적당한 위치에 적정두께로 설치하여 적절한 방안으로 운영할 필요가 있으며, 그 설치두께와 입경의 적정치 그리고 여재의 기대수명 등 여러 설계 및 운영요소의 결정과 이들에 바탕한 최적의 운영방안도출이 필요하다.

본 연구에서는 문헌조사를 통해 용존 인을 흡착제거하기에 적절한 여재를 선정하고, 이 여재에 대해 등온흡착실험과 칼럼실험을 수행함으로써 그 흡착특성을 파악하여 다목적 천변여과저류지에서 인 제거를 위한 기초자료로 활용하고자 한다. 또한, 실험결과를 토대로 여과저류지에서 조류 및 인 제거를 위한 적정운영방안도 제시하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 여재선정

하폐수에서 인을 제거하기 위한 노력은 1980년대 후반부터 세계적으로 널리 이루어져 왔으며 인공습지(Constructed Wetland System)를 후처리공정으로 이용하는 방식이 많이 사용되었다.¹⁷⁾ 이러한 시도에서 하폐수에 포함된 인을 제거하는 흡착물질로 다양한 여재가 시험되었으며, 이 중에서 몇몇을 예로 들면 제올라이트, 혈암, 석회석 등의 광물질, 플라이애쉬, 제강슬래그 등 산업부산물, 그리고 폐각 등이고 특히 제강슬래그의 인 흡착특성이 뛰어나다고 한다.¹⁷⁻²³⁾ 제강슬래그는 인 이외에도 중금속을 포함한 다른 독성물질에 대한 흡착능이 뛰어나기도 하고(Westholm) 우리나라에서 다량으로 산출되므로 본 연구의 인 흡착재로 고려할 수 있을 것이다.²¹⁾ 그러나 이는 높은 농도의 중금속을 함유할 수 있

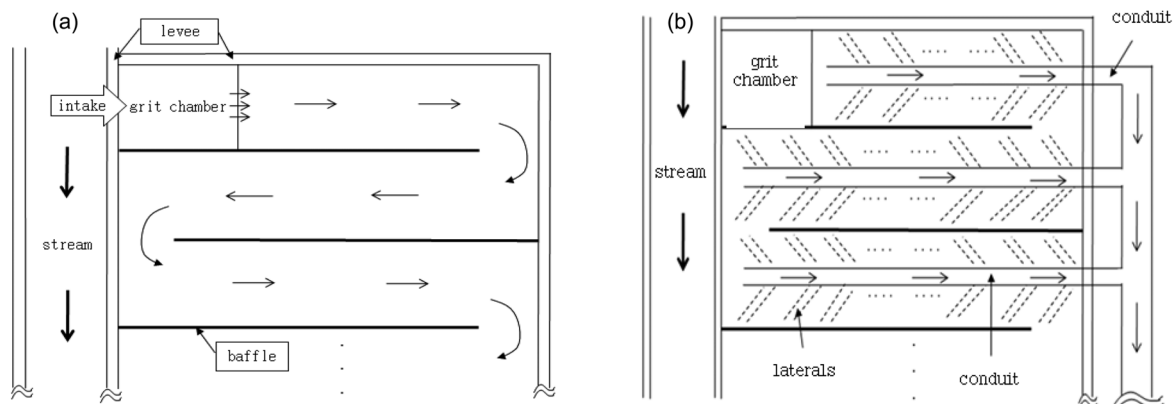


Fig. 1. Schematic plan view of multi-purpose filtration pond : (a) baffle deployment and (b) lateral deployment.

으므로 토양에 살포할 수 없는 약점을 가지고 있다.²⁴⁾ 다목적 천변여과저류지에서 사용된 흡착재는 포화된 후 수거하여 처분해야 하며, 이때 중금속을 함유하는 재료는 농경지 살포 등의 처분을 제한하기 때문에 그 장점에도 불구하고 본 연구에서는 이를 채택하지 않았다. 더욱이 제강슬래그는 여과수의 알칼리도를 크게 높이는 것으로 알려져 있어 다목적 여과저류지를 이용하여 하천수질 개선시 하천생태계에 영향을 줄 우려가 있으므로 본 연구에서 제외하였다.^{19,20)}

인 흡착재의 효율은 흡착재의 칼슘함량에 크게 영향을 받는다고 한다.^{18,23)} 그런데 패각은 칼슘함량이 높아서 인 흡착능력도 크다고 하며, 특히 굴 패각은 MgO, Al₂O₃, Na₂O, P₂O₅, SiO₂ 등의 함량은 중량비로 1% 미만으로 매우 낮는데 비해 CaCO₃함량은 96%에 달하여 인 흡착능력이 크다고 한다.^{25,26)} 또한, 우리나라에서는 매년 많은 양의 굴 패각이 생산되고 있으며, 이를 토양개량제로 활용할 수 있는 가능성도 있어서 본 연구에서는 굴 패각을 여재로 사용하였다.^{27,28)} 이외의 다른 물질들은 대량조달의 가능성, 경제성 그리고 사용 후 처분 등을 고려할 때 굴패각만큼 효과적이지 못한 것으로 판단되어 연구에서 제외하였다.

2.2. 실험장치 및 방법

실험은 두 가지를 수행하였다. 하나는 등온흡착실험이고 나머지는 칼럼실험이었다. 굴 패각을 흡착재로 하여 용존 인에 대한 등온흡착실험과 칼럼실험은 Park과 Polprasert에 의해 이미 수행된 바 있다.²⁶⁾ 그러나 그들은 이 재료를 하폐수 처리용 인공습지의 저장물질로 사용하기 위하여 등온흡착실험에서는 인 농도가 1~320 mg/L에 이르렀고 칼럼실험에서도 유입수의 농도가 30 mg/L에 이를 정도로 높았다. 따라서 그들의 연구결과는 본 연구의 목표인 하천수질개선용 다목적 천변여과저류지에서의 인 제거에 직접 활용될 수 없다고 보았으며, 이는 실내실험과 현장조건의 차이가 잘못된 결론

으로 이끌 수 있기 때문이다.²⁰⁾ 따라서 본 연구에서는 Park과 Polprasert의 연구를 참고로 하여 유사한 방법론을 적용하되, 인의 농도는 다목적 천변여과저류지를 통해 우리나라 하천의 조류와 인을 제거하기에 적당한 범위로 하였다.²⁶⁾

본 실험에 사용된 굴 패각은 경남 사천시 주문리에서 얻었으며, 유기물을 제거하기 위하여 550℃로 가열처리하였다. 이후 분쇄하여 0.6~1.0 mm(세립), 1.0~1.4 mm(중립), 그리고 1.4~1.7 mm(조립)의 3종류로 분류하였다. 등온흡착실험은 증류수에 희석하여 제조한 KH₂PO₄용액을 6개의 200 mL들이 플라스크에 100 mL씩 넣고 그 농도가 각각 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 mg-P/L씩 되도록 하였다. 여기에 세립시료를 각각 1 g씩 넣고 밀폐하여 회전식 혼합기에서 7 rpm으로 24시간 연속해서 교반시켰다. 이후 상등액을 거름종이(0.45 μm Whatman GF/C)에 통과시킨 여과액의 인 농도를 측정하였고, 이 측정치와 원래의 농도와의 차이를 여재에 흡착한 것으로 보았다.²⁶⁾ 실험은 모두 3중으로 수행하였고 그 평균값을 결과로 채택하였으며, 동일한 실험을 중립과 조립시료에 대해서도 수행하였다.

칼럼실험을 위한 장치는 내경 5 cm, 길이 50 cm인 아크릴통 3개를 병렬하여 연직으로 세워서 사용하였으며, 각 칼럼은 굴패각을 분쇄하여 만든 세립, 중립, 그리고 조립의 여재로 각각 채웠다. 이들 분쇄된 굴패각의 겉보기 밀도와 진밀도를 Blake법으로 구했으며, 이로부터 간극률을 구하여 Table 1에 나타내었다.^{29,30)} 모든 칼럼에는 10 cm 간격

Table 1. Some physical characteristics of the oyster shell grains employed in the column experiment

Grain size	Porosity (-)	Bulk density (g/cm ³)	Particle density (g/cm ³)
Fine	0.60	0.57	1.98
Medium	0.62	0.55	2.05
Coarse	0.64	0.53	1.91

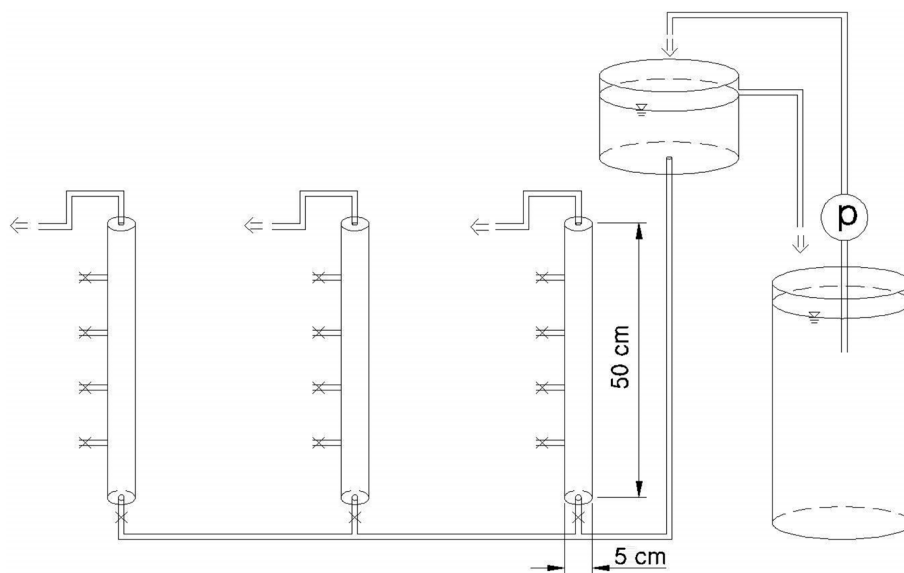


Fig. 2. Schematics of the column experiment.

으로 샘플채취구를 4개씩 설치하여 여과거리 10~50 cm에서 10 cm 간격으로 인 농도를 파악할 수 있도록 하였다. 칼럼의 물 흐름은 상향류였으며, 통과유량은 칼럼하단에 설치된 밸브와 유출구의 높이로 조정하였다. 실험에서는 수돗물을 원수로 사용했으며 잔류염소를 제거하기 위하여 24시간 동안 폭기시킨 후 유입수로 사용하였다. 실험초기 3일간은 칼럼의 안정화를 위해 이 유입수만을 흘려 보냈으며, 안정화 이후 유입수에 KH_2PO_4 를 주입하여 인 농도를 2 mg-P/L로 유지하였고, 모든 칼럼에서 약 1.36 mL/min의 유량으로 통과시켰다. 이 유량은 $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ 즉, 여과저류지 바닥면적 1 m^2 에서 하루 1 m^3 의 처리용량에 해당된다. 통과유량은 시료 채취시 항상 관측하였으며, 관측시마다 약간씩 변해서 조정이 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 통과한 여과수의 공상체적(EBV, Empty Bed Volume)을 시간경과의 기준으로 삼았으며, 1 EBV는 12시간에 해당되었다. 실험장치의 개요도는 Fig. 2에 나타내었다. 인이 함유된 시료를 연속적으로 칼럼에 통과시키면서 112일 동안 4~12일 간격으로 모든 시료 채취구에서 시료를 채취하여 인 농도를 분석하였다. 또한, 유입수와 여과수 시료의 pH도 측정하였다. 각 칼럼의 밸브를 모두 연 상태에서 유입구와 유출구의 수두차, 통과유량과 칼럼 단면적을 Darcy의 법칙에 대입하여 투수계수도 측정하였다. 인 농도 측정은 HS-3100 Water Analyzer(휴마스사, 대한민국)로 분석하였고, pH는 692 pH/Ion meter(Metrohm 사, 스위스)로 측정하였으며, 유량은 매스실린더와 초시계로 측정하였다. 실험은 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 조절된 환경에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

등온흡착실험의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 실험된 농도 범위에서는 액체상과 고체상 사이에서 대략 선형분배를 나타내고 있었으며, 이는 Park과 Polprasert의 연구결과와도 부합한다.²⁶⁾ 또한, 세립질일수록 굴패각의 인 흡착능력이 컸으며, 이는 입자가 작을수록 비표면적이 크기 때문으로 판단되었다. 선형등온흡착은

$$S = K_d C \quad (1)$$

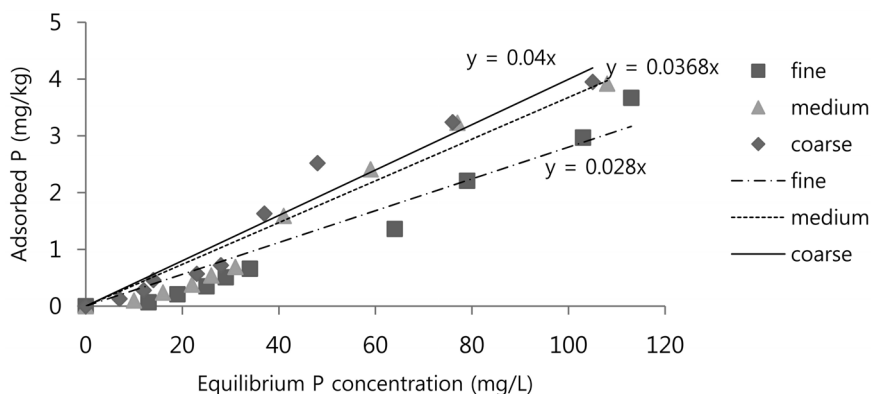


Fig. 3. Adsorbed P vs. equilibrium P concentrations by oyster shell grains according to the grain size.

로 표현될 수 있으며, 여기서 S 는 고체상 농도(mg/kg), K_d 는 두 상 사이의 분배계수(mL/g), 그리고 C 는 액체상 농도(mg/L)를 나타낸다.³¹⁾ 본 연구에서 조립, 중립, 그리고 세립질 패각의 분배계수는 각각 24.5 mL/g, 26.6 mL/g, 34.8 mL/g이었다. 이들 값들은 Park과 Polprasert의 연구결과인 140~230 mL/g에 비해 작으며, 이는 본 연구에서의 농도범위가 이들과 크게 달랐기 때문으로 판단되었다.²⁶⁾ 본 연구에서 인의 범위를 낮게 정한 것은 우리나라 하천수의 인 농도의 최대치가 0.2(낙동강본류)-0.6(금호강) mg/L 정도이므로 이 조건에서 인을 제거하는 방안을 강구하기 위함이었다(<http://water.nier.go.kr>).

본 연구에 사용된 중립~세립질 굴패각의 분배계수가 30 mL/g 정도이므로 하천수를 굴패각에 접촉시켜 흡착에 의해 인을 제거하는 방안을 적용한다면 패각 1 kg에 흡착하여 처리할 수 있는 인의 양은 하천수 30 L에 포함된 양에 불과하다. 따라서 Table 1에 제시된 굴패각의 물리적 특성을 고려하면 여과깊이 3 m인 여과저류지의 여재를 모두 굴패각으로 치환하여 인을 처리하더라도 바닥면적 1 m^2 당 하천수 처리용량은 약 50 m^3 에 불과하며, $4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ 의 처리율을 적용하는 경우 흡착평형에 도달하는 시간이 짧다면 12일의 운영으로 흡착처리능력이 포화된다. 따라서 여과저류지 하상의 전체면적과 전체깊이에 여재로 굴패각을 충전하더라도 조류발생의 원인물질인 인을 흡착을 통해 대하천에서 선제적으로 제거하는 것은 매우 어려움을 알 수 있다.

칼럼의 투수계수는 세립, 중립, 그리고 조립에 대해서 각각 31.7 m/day, 183.0 m/day, 그리고 198.5 m/day로 세립은 낙동강 중류의 하천모래와 유사하였으나 중립과 조립은 낙동강 상류의 하천모래와 비교해도 큰 편이었다. 칼럼실험 결과 각 입경별로 시간경과에 따른 액체상의 인 농도분포 곡선의 변화는 Fig. 4에, 그리고 시간경과에 따른 유출수의 인 농도변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에서 시간경과에 따라 상류로부터 흡착용량이 점차 포화되고, 이에 따라 Fig. 5에서 유출수의 인 농도가 점차 증가함을 알 수 있었다. 세립과 중립에 비해 조립칼럼에서의 인 이동속도가 훨씬 빨랐고, 그 원인은 분명하지 않지만 예상과 달리 세립칼럼에서 이동속도가 중립에 비해 좀 더 빨라 중립질 칼럼의 인 제

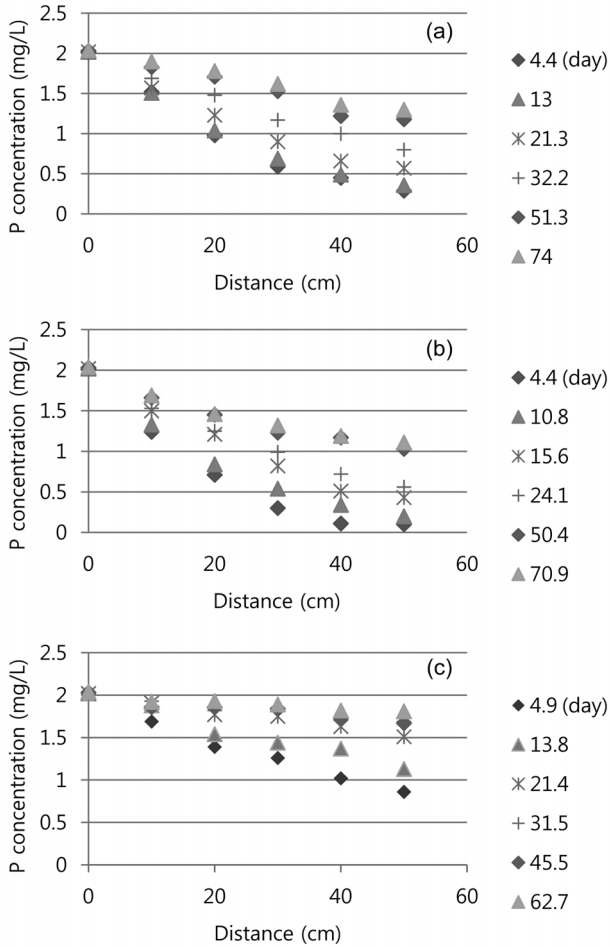


Fig. 4. Results of column experiment for the media of: (a) fine, (b) medium and (c) coarse grains.

거효율이 가장 좋은 것을 알 수 있었다. Fig. 5에서 중립질 굴패각을 채운 칼럼의 유입수 인 농도가 유출수에서 절반으로 줄어드는데 걸리는 시간은 약 50일이었다. 50일 이후에는 유출수의 인 농도가 유입수의 절반 이상으로 높아지므로 이때를 굴패각의 교체시점으로 보면, 운전기간인 50일 동안

칼럼에서 흡착에 의해 제거된 인의 양은 145.4 mg이었다. 이 기간 동안 유입된 인의 양은 196.4 mg이므로 인의 제거효율은 74.1%로 볼 수 있다. 이 제거효율은 칼럼실험의 통과유량이 $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ 로 낮고 유입수의 인 농도가 2 mg/L로 다소 높은 경우에 대한 것으로 보통의 여과저류지 운영조건과는 다르며, 이 정도의 제거율을 얻기 위해서는 여과저류지의 특성을 잘 활용하여 적절한 운영방식을 적용해야 할 것이다.

하천수에서 조류의 원인물질인 용존 인을 제거하여 조류발생의 가능성을 원천적으로 없애는 것은 어려우며, 제한적 조건에서이지만 하천수의 용존 인을 상당히 높은 제거효율로 제거할 수 있음을 실험을 통해서 알 수 있었다. 본 연구에서는 차선택으로, 이미 발생한 조류를 효율적으로 제거하기 위해 여과저류지를 활용하는 방안을 제안하고자 한다. 복류수 설비가 입자상 인과 조류를 포함하는 부유물질을 잘 제거하고, 그 제거기작은 먼저 이들 오염물이 하상표층에 남겨져서 축적되는 것이므로, 같은 원리가 적용되는 여과저류지에서 이러한 특성을 활용하면 입자상 인과 조류를 어렵지 않게 제거할 수 있을 것으로 판단된다.¹⁶⁾ 조류가 번성하는 경우 하천수의 pH가 높아 용존 인보다는 입자상 인이 더 쉬운 존재형태여서 모래여과에 의한 인의 제거가 더욱 유리하다고 할 수 있다.³²⁾ 조류가 발생한 하천수가 여과저류지에 유입하면 여과에 의해 조류가 제거되어 하상표층에 슬러지 케익이 형성된다.¹⁶⁾ 과다한 슬러지 케익은 여과저류지의 효능을 저하시키므로 적당한 시간간격으로 갈퀴 등을 이용한 교란에 의해 슬러지 케익을 다시 부유시켜 유수에 의해 하류로 이송하며, 인공하천의 최하류 일정부분을 농축부로 활용하여 여기에서 여과에 의해 부유물질을 다시 여재표층에 슬러지 케익으로 농축시킨다. 농축부에서 슬러지 케익이 충분히 농축되면 이 부분을 건조시켜 농축된 슬러지 케익 즉, 고체상 인을 건조박편으로 변화시켜 기계적으로 제거하거나 또는 농축조 바닥을 다시 교란시켜 형성된 고농축 슬러지를 그대로 회수하여 탈수설

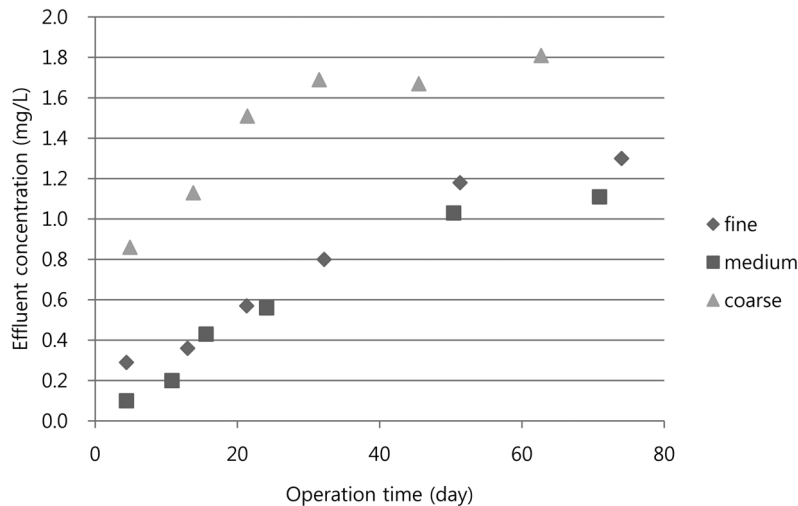


Fig. 5. P concentration of the column effluents according to the operation time.



Fig. 6. Dry flake of algae formed from sludge cake on the surface of filter sand.

비로 처리할 수도 있을 것이다. Fig. 6에 모래여과지 표면에서 여과에 의해 농축된 조류 슬러지 케이크가 건조박편화 한 모습을 나타내었다. 한편, 농축부에서 슬러지 케이크가 충분히 농축되는데 상당한 시간이 필요할 것이어서 그 동안에 슬러지 케이크 중 일부의 조류가 사멸하고, 그 결과 상당히 높은 농도의 용존 인이 방출되어 여재를 통과해서 하천으로 다시 유출될 염려가 있다. 본 연구의 칼럼실험은 이때 방출되는 인을 흡착에 의해 제거하기 위한 방안으로 고려된 것이다. 본 연구의 칼럼실험에서는 유출수의 인 농도가 50일만에 유입수의 절반에 달했지만, 실규모 설비에서 농축부의 부하율을 더 낮게 운영한다면 굴패각의 교체시간이 더 길어져서 1년 중 조류가 번성하는 동안 적용이 가능하여 그 실용성이 상당히 클 것으로 판단되었다. 특히, 4대강사업에서 설치한 보는 상류와 하류 사이의 흐름을 차단할 수 있으므로 조류가 발생한 상류의 하천수를 여과저류지로 유입시켜 여기서 오염을 제거한 후 하류보로 방류한다면 인을 포함한 대부분의 오염물이 제거된 깨끗한 여과수를 하류로 방류할 수 있을 것으로 기대된다. 더욱이 이 과정에서 보의 낙차를 이용하므로 무동력 운영이 가능한 이점도 있다. 한편, 칼럼실험에서 유입수의 pH는 7.5였고 유출수에서는 7.7~7.8이어서 약간의 차이가 있으나, 모래여재를 통과한 대부분의 여과수의 pH는 원수와 거의 같아서 슬러지 농축부에서의 pH변화가 전체 하천수질에 주는 영향은 크지 않을 것으로 판단되었다. 또한, 본 연구의 칼럼실험결과는 유량이 작고 높은 농도의 인을 함유하는 소하천에서 고수부지의 일부를 굴패각으로 치환하여 하천수의 용존 인을 제거하는데도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

다목적 천변여과저류지를 활용하여 하천수의 조류문제에 대한 해결책을 찾기 위해 굴패각을 흡착재로 활용한 등온흡

착실험과 칼럼실험을 수행하였다. 등온흡착실험결과 흡착에 의해 대하천에서 용존 인을 제거함으로써 조류의 원인물질을 제거하는 것은 어렵다는 것을 알 수 있었고, 칼럼실험 결과로부터 제한적인 조건에서는 굴패각을 흡착여재로 활용하는 방안이 가능함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 이미 발생한 조류를 여과저류지를 이용하여 제거하는 방안으로, 인공하상의 표층에 형성된 슬러지 케이크를 하류의 농축부에 모아 건조박편화하여 회수하거나 고농도 슬러지로 회수하여 탈수장치로 최종제거하되, 농축부 하상에 흡착재로 굴패각층을 설치함으로써 농축부의 사멸조류로부터 방출되는 용존 인을 흡착제거하는 방안을 제안한다.

KSEE

참고문헌

1. Kim, S. H., Jung, J. B., Hah, H. S. and Prasher, S. O., "Tertiary treatment of municipal wastewater using unsaturated sandy soil," *Kor. Soc. Environ. Agric.*, **22**, 111~117(2003).
2. Viswanathan, M. N., Senafy, M. N., Rashid, T., Al-Awadi, E. and Al-Fahad, K., "Improvement of tertiary wastewater quality by soil aquifer treatment," *Water Sci. Technol.*, **40**, 159~163(1999).
3. Spyridakis, D. E. and Welch, E. B., "Treatment processes and environmental impacts of waste effluent disposal on land," in Sanks, R. L. and Asano, T. Eds., "Land treatment and disposal of municipal and industrial wastewater," Ann Arbor Science, Michigan(1976).
4. Oh, K. C., "Considerations in the planning of detention pond: case study," *Water Future*, **40**(4), 20~26(2007).
5. Office of National River Restoration, "Master plan for 4 major rivers restoration project," Ministry of Land, Transport and Marine Affairs (Republic of Korea)(2009).
6. Sohn, D. H., Park, J. Y. and Kim, S. H., "A study on the design of artificial stream for riverbed filtration in multi-purpose filtration pond," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **33**(7), 536~543(2011).
7. Kim, S. H., "Comparison of riverbank and riverbed filtrations in Korea," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **29**(10), 1154~1162(2007).
8. Kim, S. H. and Jung, J. S., "Water quality improvement through riverbed filtration in Kumho river," *Environ. Res. (Environmental Research Institute, Yeungnam University)*, **18**(2), 73~86(1999).
9. Sung, C. D., Ahn, K. H., Lee, Y. H., Kong, I. C. and Kim, S. H., "A study on the water quality improvement through riverbed filtration-model development and parameter determination," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **25**(4), 486~494(2003a).
10. Sung, C. D., Ahn, K. H., Lee, Y. H., Kong, I. C. and Kim, S. H., "A study on the water quality improvement through riverbed filtration-model analysis and model verification," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **25**(5), 580~587(2003b).
11. Kim, S. H., Sohn, D. B. and Ahn, K. H., "A study on the

- reduction of hydraulic conductivity in a model system of riverbed filtration," *Kor. Soc. Civil Eng.*, **25**(4B), 301~308 (2005).
12. Ahn, K. H., Sohn, D. B. and Kim, S. H., "Removal of organic matter and nitrogen in a model system of riverbed filtration," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **27**(5), 525~534(2005).
 13. Kanarek, A. and Michail, M., "Groundwater recharge with municipal effluent: DAN region reclamation project, Israel," *Water Sci. Technol.*, **34**, 227~233(1996).
 14. Pescod, M. B., "Wastewater treatment and use in agriculture-FAO irrigation and drainage paper 47," FAO, Rome(1992).
 15. Bouwer, H., Rice, R. C., Lance, J. C. and Gilbert, R. G., "Rapid-infiltration research at Flushing Meadows Project, Arizona," *J. WPCF*, **52**(10), 2457~2470(1980).
 16. Baik, M. Y., "A study on purifying efficiency and water quality analysis for infiltrated water as filtered distance-focusing on Purification Plant at Goryeong, Gyeongbuk," Master's Thesis, Graduate School of Environmental Study, Yeungnam University, Republic of Korea(2012).
 17. Drizo, A., Cummings, J., Weber, D., Twohig, E., Druschel, G. and Bourke, B., "New evidence for rejuvenation of phosphorus retention capacity in EAF steel slag," *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 6191~6197(2008).
 18. Seo, D. S., Cho, J. S., Lee, H. J. and Heo, J. S., "Phosphorus retention capacity of filter media for estimation the longevity of constructed wetland," *Water Res.*, **39**, 2445~2457 (2005).
 19. Johansson, L. and Gustafsson, J. P., "Phosphate removal using blast furnace slags and opoka-mechanisms," *Water Res.*, **34**, 259~265(2000).
 20. Drizo, A., Comeau, Y., Forget, C. and Chapuis, R. P., "Phosphorus saturation potential: A parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems," *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 4642~4648(2002).
 21. Westholm, L. J., "Substrates for phosphorus Removal-Potential benefits for on-site wastewater treatment," *Water Res.*, **40**, 23~26(2006).
 22. Valero, M. A., Johnson, M., Mather, T. and Mara, D. D., "Enhanced phosphorus removal in a waste stabilization pond system with blast furnace slag filters," *II Int. Conference Smallwat07*, pp. 11~15 Nov. 2007, Seville(Spain).
 23. Cucarella, V. and Renman, G. "Phosphorus sorption capacity of filter materials used for on-site wastewater treatment determined in batch experiments-A comparative study," *J. Environ. Qual.*, **38**, 381~392(2009).
 24. Ballantine, D. and Tanner, C. C., "Substrate and filter materials to enhance phosphorus removal in constructed wetlands treating diffuse farm runoff: a review," *New Zealand J. Agric. Res.*, **53**(1), 71~95(2010).
 25. Roseth, R., "Shell sand: A new filter medium for constructed wetlands and wastewater treatment," *J. Environ. Sci. Health, Part A*, **35**(8), 1335~1355(2000).
 26. Park, W. H. and Polprasert, C., "Roles of oyster shells in an integrated constructed wetland system designed for P removal," *Ecol. Eng.*, **34**, 50~56(2008).
 27. Yoon, G. L., Kim, B. T., Kim, B. O. and Han, S. H., "Chemical-mechanical characteristics of crushed oyster-shell," *Waste Manage.*, **23**, 825~834(1993).
 28. Lee, C. H., Lee, D. K., Muhammad, A. A. and Kim, P. J., "Effects of oyster shell on soil chemical and biological properties and cabbage productivity as a liming materials," *Waste Manage.*, **28**, 2702~2708(2008).
 29. Blake, G. R., "Bulk density," in Black, C. A., Evans, D. D. Ensminger, L. E. White, J. L. and Clark, F. E. (Eds.), "Methods of soil analysis part 1-physical and mineralogical properties." *Am. Soc. Agronomy, Inc.*, Madison, WI, pp. 374~390(1965a).
 30. Blake, G. R., "Particle density," in Black, C. A., Evans, D. D., Ensminger, L. E., White, J. L. and Clark, F. E. (Eds.), "Methods of soil analysis part 1-physical and mineralogical properties," *Am. Soc. Agronomy, Inc.*, Madison, WI, pp. 371~373(1965b).
 31. Domenico, P. A. and Schwartz, F. W., "Physical and Chemical Hydrogeology," John Wiley & Sons, Inc., New York (1990).
 32. Stumm, W. and Morgan, J. J., "Aquatic Chemistry-An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters," 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., U.S.A.(1981).