

여재의 인 제거기능 회복을 위한 물리화학적 재사용 방안 비교

Comparisons of Regeneration Methods Using Physical and Chemical Treatment for Phosphate Removal Restoration of Filter Media

김지아¹ · 최이송² · 오종민^{2*} · 김원재³ · 박재로³

¹경희대학교 환경응용과학과, ²경희대학교 환경학 및 환경공학과, ³한국건설기술연구원 환경·플랜트연구소

Ji Ah Kim¹, I Song Choi², Jong Min Oh^{2*}, Won Jae Kim³ and Jae Roh Park³

¹Department of Applied Environmental Science, Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea

²Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea

³Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

Received 6 September 2016, revised 21 September 2016, accepted 26 September 2016, published online 30 September 2016

ABSTRACT: The purpose of this study is to find the regeneration method of filter media using physical and chemical treatment for restoration of phosphorus adsorption ability. The filtration material used in this study is called Adphos. In an experiment of heating treatment, re-used filter media is heated to a high temperature before the adsorption test. The results show that the PO_4^{3-} -P adsorption capacity is in the range of 0.0021 - 0.0030 mg/g and the removal efficiency is in the range of 26.1 - 39.4%. In the experiment of acid or basic treatment, re-used filter media is exposed to a different pH condition before the adsorption test. The results show that the PO_4^{3-} -P adsorption capacity is in the range of 0.0010 - 0.0066 mg/g and the removal efficiency is in the range of 15.8 - 87.1% after the acid treatments which have pH values of 1 - 5. However, after the basic treatments which have pH values of 8 - 11, the results show that the PO_4^{3-} -P adsorption capacity is in the range of 0.0018 - 0.0034 mg/g and the removal efficiency is in the range of 26.7 - 48.0%. In an experiment of chemical treatment using NaCl, re-used filter media was exposed to a different NaCl concentration before the adsorption test. The results show that the PO_4^{3-} -P adsorption capacity is in the range of 0.0036 - 0.0050 mg/g and the removal efficiency is in the range of 50.5 - 71.1%. In conclusion, chemical treatment using NaCl shows a high recovery probability of phosphorus adsorption ability of filter media.

KEYWORDS: Acid treatment, Adsorption, Adphos, Heating treatment, Filter media, Regeneration

요 약: 본 연구에서는 물리화학적 처리를 통하여 여재의 인 흡착능 회복을 위한 재생 방안을 연구하는 데 그 목적을 둔다. 실험에 사용한 여재는 Adphos이다. 열 처리 방법의 경우, 기 사용한 여재를 고온에 가열한 후 흡착실험을 수행한 결과, 재사용 여재의 PO_4^{3-} -P 흡착량은 0.0021 - 0.0030 mg/g, 제거효율은 26.1 - 39.4%의 범위로 나타났다. 산 또는 pH 조건을 조절하여 수행한 실험 결과, 산성을 띠는 pH 1 - pH 5 조건에 처리한 경우 재사용 여재의 PO_4^{3-} -P 흡착량은 0.0010 - 0.0066 mg/g, 제거효율은 15.8 - 87.1% 범위로 나타났다. 염기성을 띠는 pH 8 - pH 11 조건에 처리한 경우 재사용 여재의 PO_4^{3-} -P 흡착량은 0.0018 - 0.0034 mg/g, 제거효율은 26.7 - 48.0% 범위로 조사되었다. 0.1 M, 0.01 M, 0.001 M 농도의 NaCl에 처리한 경우 재사용 여재의 PO_4^{3-} -P 흡착량은 0.0036 - 0.0050 mg/g, 제거효율은 50.5 - 71.1%로 나타나 0.1 M NaCl을 이용한 약품처리법에서 재사용 여재의 인 흡착능 회복성이 높은 것으로 조사되었다.

핵심어: 산 처리, 흡착, Adphos, 열 처리, 여재, 재생

*Corresponding author: jmoh@khu.ac.kr, ORCID 0000-0002-1104-5867

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. 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.

1. 서론

최근 자연정화공법을 적용하기 위하여 여재 및 수생식물, 미생물 등을 결합한 융복합형 공법이 개발되고 있으며, 이들 여러 구성인자의 최적 조건을 규명하기 위한 연구가 활발하게 진행 중이다 (Seo 2005). 여재를 이용한 정화장치 및 시설 등은 현재 하수처리시설 및 하천 현장에서 다양하게 운영되고 있으며 지속적인 유지관리가 필요하다. 특히 여재를 이용한 정화시설의 경우 장기간 가동 시 지속적인 오염부하 유입으로 인해 여재가 포화에 다다르며 공극이 폐색된다. 이로 인해 투수속도의 저하, 처리량 감소가 야기되어 정화시설의 성능이 떨어지므로 여재의 처리효율을 제고하기 위한 효과적인 재사용 방안 마련이 요구된다 (Yun 1998, Jeong 1999).

널리 사용되고 있는 여재의 재생방법은 열에 의한 처리로 피흡착물을 고온에서 산화제거하는 방법이다. 그러나 고온에서 산화성 매체를 이용하기 때문에 여재의 손실이 발생하고, 피흡착물질을 제거하기 위하여 고온을 유지해야 하기 때문에 많은 에너지가 소요되며 유해한 대기오염물질을 배출할 우려가 있다 (Guymont et al. 1980, Kim and Oh 2000) 화학적 재생은 특별한 설비가 없이 현장 적용이 가능하며 적절한 과정을 통해 처리 용매에서 피흡착물을 회수 및 처리 용매의 재사용이 가능하다는 장점이 있다 (Cooney et al. 1983). 처리 용매의 pH 역시 목표 흡착물이 극성을 띠는 경우 산염기 반응을 유도 또는 저해하여 탈착에 영향을 주는 조건이다 (Grant and King 1990, Leng and Pinto 1996).

인의 제거는 흡착, 침전, 식물에 의한 흡수, 미생물에 의한 흡수 등의 기작에 의한 것으로 알려져 있는데 (Sundaravadivel and Vigneswaran 2001), 이러한 기작 중 가장 중요한 것은 흡착이다. 흡착이란 호기성의 산화적 환경상태에서 수체 내 인산염이온 (orthophosphate ion, PO_4^{3-})이 기질층의 Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+} 와 결합하여 침전물을 형성하며 제거되는 과정으로, 따라서 비결정형의 Fe, Al, Ca 함량은 인의 흡착용량에 주요한 영향을 미치는 인자로 보고되었다 (Brix et al. 2001, Pant et al. 2002).

본 연구의 대상 여재인 Adphos는 Red mud를 개량하여 제조된 여재로, 전체 구성의 70% 이상이 Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO 등의 성분으로 되어 있어 표적물질인 인의 흡착이 매우 용이한 특성이 있다. Red mud의 경우 흡착 특성 및 복원 방법은 기존 연구 사례에서 다양하게 보고되고

있으나 (Yim et al. 2011, Kang et al. 2015), Adphos의 인 흡착 및 복원에 관한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 Adphos를 적용한 여과형 시설을 현장에 가동하기에 앞서 lab scale로 여재의 흡착 실험을 실시하고, 물리화학적 처리에 따른 Adphos의 인 흡착능 변화를 관찰하고자 한다. 각 처리방법의 조건에 따른 흡착능의 회복 성과 및 Adphos의 손실율을 검토·비교함으로써 여재의 재사용 가능성을 연구하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 재료

실험에 사용한 여재는 국내에서 제조된 Adphos이다. Hematite, boehmite, gibbsite, quartz 등의 광물로 구성된 Red mud를 보완하여 pellet 형태로 가공한 여재이며 주요 성분은 Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 등이다 (Table 1). 여재는 체를 이용하여 직경 2.36 mm - 9.52 mm 범위의 입자를 실험에 사용하였고, 표면의 불순물 제거를 위하여 실험 전에 증류수로 세척 및 105°C에서 24시간 건조의 과정을 거쳤다.

2.2 실험방법

인산염 인 (PO_4^{3-} -P) 흡착실험은 1차, 2차로 나누어 수행하였다. 1차 흡착실험은 생산된 여재를 사용 상태로 만들기 위한 실험이며 1회 사용 후에 수행한 2차 흡착실험을 통하여 여재의 재사용 가능성을 검토하였다. 1차, 2차 흡착실험의 분석항목은 인산염 인 (PO_4^{3-} -P)이며 분석방법은 수질공정시험법에 따른 아스코르빈산 환원법을 적용하였다.

1차, 2차 흡착실험에 사용한 원수는 KH_2PO_4 (분자량 136.09, 순도 99.0%)를 증류수에 용해하여 제조하였으며 1차, 2차 실험 초기농도는 PO_4^{3-} -P 0.2 mg/L로 일괄 적용

Table 1. Chemical composition of filter media used in this study

Composition	Proportion (%)
Fe_2O_3	30.98
Al_2O_3	35.78
SiO_2	18.72
Cl	7.64
CaO	4.31

하되 제조 농도의 오차 범위는 ± 0.003 mg/L이다. 1차 흡착실험에 적용한 여재의 초기 무게는 10 g을 기준으로 하였고 입경 크기에 따른 무게의 오차 범위는 ± 0.005 g이다. 제조 원수를 사용한 흡착실험 결과, 흡착 전후에 검출된 PO_4^{3-} -P 농도 변화를 통하여 여재의 흡착량 및 제거효율을 계산하였다.

흡착실험을 위하여 대부분의 연구자들은 실험시간을 24시간으로 하고 있으나, 연구자에 따라서는 2-72시간까지 다르게 사용하여 결과를 비교하고 있다 (Jeon et al. 2010). 본 연구에서는 1차, 2차 흡착실험으로 제조 원수에 여재를 24시간을 침지하였다. 여재의 재사용 가능성을 위하여 1차 흡착실험을 마친 여재를 열 처리, 산 및 염기 처리, 약품 처리 3가지 조건으로 처리한 후 건조하여 2차 흡착실험을 수행하였다. Adphos의 재사용가능성은 흡착 실험에서의 PO_4^{3-} -P 흡착량 및 제거효율 변화를 통하여 관찰하였고, 재사용을 위한 여재의 처리조건 및 처리방법은 아래에 제시하였다.

각각의 처리 과정 이후 Adphos의 중량 감소에 따른 손실율을 검토하였고, 각 처리 조건별 흡착능 회복성의 차이를 조사하기 위하여 아무 처리를 하지 않은 여재의 흡착실험을 수행하여 바탕실험으로 하였다.

2.2.1 열 처리

사용 후 여재의 열 처리를 위해 적용한 온도 조건은 100°C, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C이며 강열에 사용한 기구는 규격 500 × 450 × 600 mm의 electric muffle furnace (제조사 성원과학)이다. 처리 시간은 목표 온도 도달 후 각각 3시간이며 가열 종료 후 데시케이터에 방냉하였다.

2.2.2 산 및 염기 처리

사용 후 여재의 산 및 염기 처리를 위해 pH 1 - pH 5, pH 8 - pH 11의 처리용액에 24시간 침지하였다. 처리용액의 pH는 산성을 띠는 pH 1 - pH 5 용액의 경우 HCl (분자량 36.45, 순도 35.0 - 37.0%)를, 염기성을 띠는 pH 8 - pH 11 용액의 경우 NaOH (분자량 40.00, 순도 98.0% 이상)를 첨가하여 조절하였다.

2.2.3 약품 처리

사용 후 여재의 약품 처리에는 NaCl (분자량 58.43, 순도 99.0%)을 증류수에 용해하여 여재를 24시간 침지하였다. 각각의 처리 농도는 0.1 M, 0.01 M, 0.001 M을 적용하였으며 해당 Mole 농도는 mg/L로 변환 시 각각 5,844 mg/L, 584.4 mg/L, 58.44 mg/L이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열 처리 후 재사용

1차 흡착실험 결과 Adphos의 PO_4^{3-} -P 흡착량은 0.0033 - 38 mg/g, 제거효율은 51.4 - 58.6% 범위로 나타났다. 다음 각 항에 각 처리 조건에 따른 실험군의 2차 흡착 실험 결과를 제시하였다.

각각의 온도 조건에서 처리한 여재로 흡착실험을 수행한 결과는 Fig. 1과 같다. 고온 조건에 처리한 여재를 대상으로 흡착능의 회복성을 관찰한 결과, 흡착량은 0.0021 - 0.0030 mg/g, 제거효율은 26.1 - 39.4%, 손실율 11.5 - 23.2%의 범위 내에서 변동하였고, 실온 (25°C)에 방치한 여재에 비하여 열 처리 후 여재의 PO_4^{3-} -P 흡착능이 전반적으로 낮아진 것으로 조사되었다.

100 - 600°C 범위에서는 열 처리 온도의 증가에 따라 재사용 시의 제거효율이 미미하게 증가세를 보였으나 800°C의 고온에 가열한 여재의 경우 흡착량 0.0021 mg/g, 제거효율 26.1%, 손실율 23.2%로 나타나 600°C에 가열한 여재에 비하여 흡착량 및 제거효율이 크게 저하된 반면 손실율은 약 4.6% 증가한 것으로 나타났다. 이는 800°C의 고온 조건에 노출됨에 따라 여재의 표면 및 미세 기공이 산화되어 수산화기가 분해되고 인산염이온의 흡착

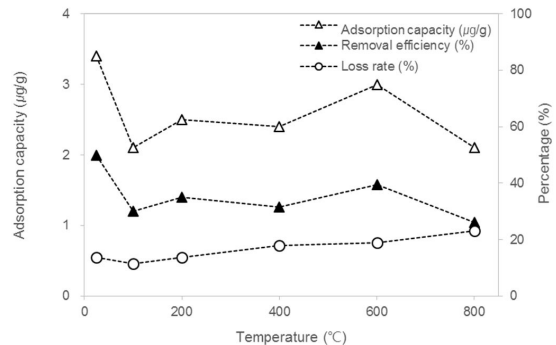


Fig. 1. Regeneration of the filter media, Adphos after heating treatment.

이와 같은 결과로 미루어볼 때 열에 의한 가열방법으로는 Adphos의 흡착능이 회복되지 않는 것으로 나타나 여재의 재사용을 위한 처리방법으로는 적절치 않은 것으로 판단된다.

3.2 산 및 염기 처리 후 재사용

각각의 pH 조건에서 처리한 여재로 흡착실험을 수행한 결과는 Fig. 2와 같다. HCl 용액에 24시간 침지 후 재사용한 실험군의 경우 흡착량은 0.0010 - 0.0066 mg/g, 제거효율은 15.8 - 87.1%, 손실율은 10.2 - 22.9% 내에서 변동하였다 (Fig. 2). 예외적으로 높은 수치가 나타난 pH 1 조건을 제외한 pH 2 - 5 조건의 실험 결과는 흡착량이 0.0010 - 0.0028 mg/g, 제거효율이 15.8 - 54.2%, 손실율이 10.2 - 15.5% 범위였다.

pH 1 조건에서 처리한 여재의 경우 2차 흡착실험에서 PO₄³⁻-P 흡착량이 0.0066 mg/g, 제거효율이 87.1%로 크게 상승하는 결과를 얻었는데 이는 강한 산성에 의해 여재가 파괴되어 입자의 표면적이 증가함에 따라 흡착능이 향상된 결과로 해석된다.

강산성 용액에 침지한 여재의 경우 재사용 시 중량을 측정할 결과, 최초 무게 10.006 g의 여재를 1차 흡착실험에 사용한 뒤 pH 1 용액에 침지하고 24시간이 경과된 후 여재의 무게는 7.962 g으로 처리대비 손실율은 약 20%에 달했으며, 이를 재료로 2차 흡착실험을 수행한 결과 여재의 최종 무게는 7.717 g, 최종 손실율은 22.9%로 나타났다. 산 처리에 사용한 HCl 용액을 분석한 결과 여재의 파쇄로 인하여 처리 용액의 SS량이 35.0 mg/L까지 증가하였고 PO₄³⁻-P의 용출량은 0.678 mg/L까지 검출되었다 (Fig. 3).

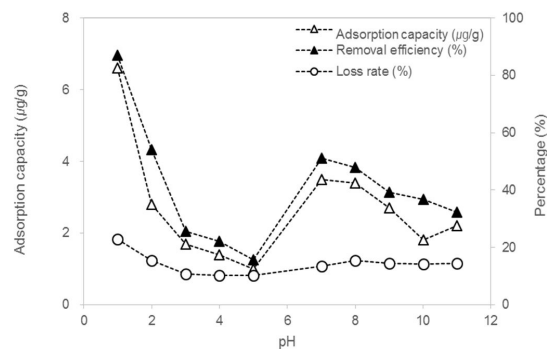


Fig. 2. Regeneration of the filter media, Adphos, after acid and basic treatment.

pH 1-2 범위의 강산성 용액에 의한 처리는 여재의 손실율이 최대 22.9%까지 치솟아 Adphos 전체 사용량의 약 1/5의 손실이 발생하는 단점으로 인해 재사용 방안으로 채택은 불가능하다고 판단된다. HCl 첨가량이 비교적 적은 pH 3 - 5 범위의 조건에서 처리한 여재의 실험은 손실율 면에서 증류수에 실험한 것과 비슷한 수치를 나타냈으나, 이 경우 재사용 여재의 PO₄³⁻-P 제거효율이 큰 폭으로 저하되어 HCl 첨가를 통한 산 처리방법은 Adphos의 재사용을 위한 방안으로 적절치 않다 판단된다.

NaOH 용액에 24시간 침지를 거친 후 재사용한 실험군의 경우 흡착량은 0.0018 - 0.0034 mg/g 범위에서 변동하였고 제거효율은 26.7 - 48.0% 범위에서 변동하였으며 2차 흡착에 따른 최종 손실율은 14.1 - 15.4% 범위 내에서 조사되었다 (Fig. 2). 염기처리 방법은 흡착량 및 제거효율의 회복성이 우수하지 않은 것으로 나타났으며 이는 ligand exchange에 따른 Adphos의 흡착특성으로 사료된다. 여재의 표면에서 일어나는 ligand exchange는 수산화이온(OH⁻)이 방출되고 인산염 이온이 흡착되는 기작이다 (Li et al. 2006). 그러나 여재를 높은 pH 환경에 노출시킨 경우 외부에 수산화이온의 농도가 높아 여재로부터 처리용매로 수산화이온의 방출이 원활하게 일어나지 않으며, 따라서 ligand exchange가 활발하게 이루어지지 않은 것으로 사료된다 (You et al. 2014, Kang et al. 2015).

염기 처리과정에 사용한 용매의 PO₄³⁻-P 검출량을 측정할 결과 높은 pH 조건에서 여재의 PO₄³⁻-P 용출이 거의 일어나지 않은 현상이 관찰되었고 (Fig. 3), 이에 따라 2차 흡착실험에서의 흡착량 및 제거효율이 저조한 것으로 분석된다.

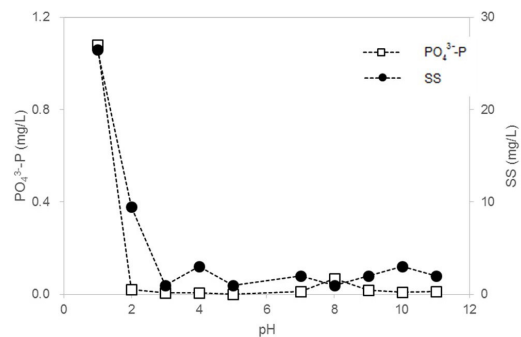


Fig. 3. Analysis of released PO₄³⁻-P and suspended solids (SS) from the filter media, Adphos, to the solvent used acid and basic treatment.

결과적으로 Adphos의 재사용을 위한 방안으로 염기 처리를 선택할 시 pH 8 전후의 약염기 처리 조건에서 흡착능의 회복성이 유효할 것으로 판단되나, pH 10 이상의 강염기 조건에서 처리할 경우 흡착능이 거의 회복되지 않을 것으로 사료된다.

3.3 약품 처리 후 재사용

각각의 농도 조건에서 처리한 여재로 흡착실험을 수행한 결과는 Fig. 4와 같다. NaCl 용액에 처리한 실험군의 흡착량은 0.0036 - 0.0050 mg/g, 제거효율은 50.5 - 71.1%, 손실율은 15.6 - 15.7% 범위로 조사되었다. 타 물리화학적 처리방법보다 흡착능 면에서 회복성이 월등한 것으로 관찰되었으며, 특히 0.1 M 농도의 NaCl 용액에서 24시간 처리한 실험군의 경우 0.0050 mg/g, 71.1%의 우수한 흡착량과 제거효율을 얻었다. 고농도의 NaCl에 처리할수록 흡착능의 회복성이 좋은 결과를 나타냈으나 손실율의 경우 NaCl의 처리 농도에 따른 규칙성은 미약하였다.

염기 처리방법에서 pH 조절을 위해 사용한 NaOH의 첨가량을 M 농도로 환산 시 0.0001 - 0.0006 M 범위에 머물렀으나 약품 처리법에 사용한 NaCl의 경우 0.001 - 0.1 M 농도의 범위를 적용했으므로 염기 처리 조건에 비하여 약품 처리 조건의 실험이 고농도 조건에서 진행되었다고 판단할 수 있다. 또한 NaOH 용액을 이용한 처리방법과 달리 NaCl 처리에서는 높은 pH 조건에 의한 수산화이온(OH⁻)의 방출이 저해되지 않고 처리용액으로부터 양이온 Na⁺의 이동이 원활하게 일어나 여재의 양이온 교환용량을 상승시킨 것으로 추정된다 (Sun and Kim 1996).

실험 결과, 약품 처리가 염기 처리보다 Adphos의 흡

착능 회복성이 높았으나 NaCl을 고농도로 처리한 영향을 배제할 수 없으며, Lab scale 실험이 아닌 실제 현장의 여재의 재사용 방안으로 적용 시 막대한 양의 NaCl이 필요할 것이라는 단점도 함께 지적된다.

4. 결론

본 연구에서는 PO₄³⁻-P 흡착능 재생을 위하여 열 처리, 산 및 염기 처리, 약품 처리 등의 물리화학적 방법을 통하여 Adphos 여재의 재사용 방안을 연구하였다. 1차 흡착실험 후 여재에 다양한 처리조건을 수행하였고 2차 흡착실험을 수행하여 1차, 2차 흡착실험의 제거능 변화 및 여재의 중량 감소에 따른 손실율을 비교하였다. 이 비교 결과를 토대로 Adphos의 재사용 가능성을 검토하였고, 재사용이 가능하다면 PO₄³⁻-P 제거효율의 회복성이 우수하며 여재의 손실율을 줄이는 처리 조건이 무엇인지 선별하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 고열 조건에서 가열한 후 수행한 Adphos의 2차 흡착실험의 경우 Adphos의 흡착능이 회복되지 않는 것으로 나타나 재사용을 위한 처리방법으로는 적절치 않은 것으로 판단된다.
- 2) 산성 용액에 침지 후 수행한 2차 흡착실험의 경우 여재의 입자 크기의 감소로 인한 표면적 증가로 제거효율이 일부 향상된 바 있다. 그러나 강산성 처리에 의한 여재의 파괴 및 분해로 인하여 손실율이 크게 나타나므로 이 처리방법은 재사용 방안으로는 실효성이 낮다고 판단된다.
- 3) 염기성 용액에 침지 후 수행한 2차 흡착실험의 경우 흡착량 및 제거효율 면에서 증류수에 침지하여 실험한 결과와 주목할 만한 큰 차이를 나타내지 않았다.
- 4) 고농도의 NaCl 수용액에 침지 후 수행한 2차 흡착실험의 경우 Adphos의 흡착능 회복성이 우수하였으나 실제 현장의 여재의 재사용 방안으로 적용 시 다량의 NaCl이 필요할 것이라는 경제적 단점도 함께 지적된다.

고온 처리, 산성 및 염기성 처리, 약품 처리의 방안 중 NaCl를 사용한 화학적 처리법이 재사용 방안으로써 효용성이 높았으며, 상기 처리법을 기초로 하여 단점을 보완하는 방안을 강구 또는 별도의 재사용 방안에 대해 추가적인

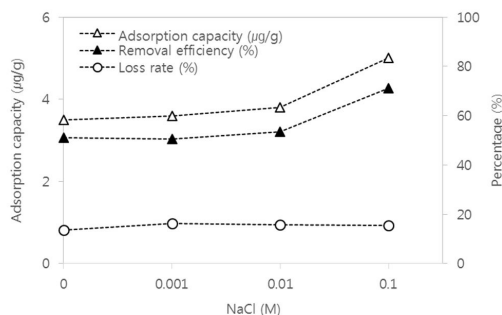


Fig. 4. Regeneration of the filter media, Adphos, after chemical treatment using NaCl.

연구를 수행하는 것이 바람직하다고 판단된다.

더불어 여재의 재사용보다는 여재의 교체를 통하여 정화성능을 유지하는 것도 하나의 대안으로 판단 판단되며, 여재의 교체 시 전량 교체 또는 손실율에 따른 부분 교체의 주기 및 적절한 교체량을 측정하고 경제성 측면에서 여재의 재사용 방안과 교체 방안을 비교·평가하는 연구 또한 추후 과제로 제안하는 바이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업, 자연과 인간이 공존하는 생태하천 조성기술개발 (15CCTI-B063263-04) 연구단의 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- Brix, H., Arias, C.A. and Del Bubba, M. 2001. Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands. *Water Science Technology* 44(11-12): 47-54.
- Cooney, D.O., Nagerl, A. and Hines, A.L. 1983. Solvent regeneration of activated carbon. *Water Research* 17: 403-410.
- Grant, T.M. and King, C.J. 1990. Mechanism of irreversible adsorption of phenolic compounds by activated carbons. *Industrial Engineering Chemical Research* 29: 264-271.
- Guymont, F.J., McGurire, M.J. and Suffet, I.H. 1980. The effect of capital and operation costs on GAC adsorption system design. *Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI* 2: 531-545
- Jeon, K.J., Yoo, K.S., Lee, C.H. and Ahn B.S. 2010. Regeneration of zeolite 5A in the adsorption process for isoprene purification. *Clean Technology* 16(4): 272-276. (in Korean)
- Jeong, D.Y. 1999. Development of an environmentally friendly sewage disposal model for agricultural and fishing village areas. *Journal of Korea Society of Environmental Restoration Technology* 2(1): 10-20. (in Korean)
- Kang, K., Nyakunga, E., Kim, Y.K. and Park, S.J. 2015. Influence of acid and heat treatment on the removal of fluoride by red mud. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 37(4): 210-217. (in Korean)
- Kim, S.D. and Oh, Y.J. 2000. Effect of initial adsorbed amount, temperature, and pH on the desorption of phenol from activated carbon by organic solvents. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 22(11): 1985-1994 (in Korean)
- Leng, C.C. and Pinto, N.G. 1996. An investigation of the mechanisms of chemical regeneration of activated carbon. *Industrial Engineering Chemical Research* 35: 2024-2031.
- Li, Y., Liu, C., Luan, Z., Peng, X., Zhu, C., Chen, Z., Zhang, Z., Fan, J. and Jia, Z. 2006. Phosphate removal from aqueous solutions using raw and activated red mud and fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 137: 374-383.
- Pant, H.K., Reddy, K.R. and Spechler, R.M. 2002. Phosphorus retention in soils from a prospective constructed wetland site: environmental implications. *Soil Science* 167(9): 607-615.
- Seo, D.C. 2005. Development of Treatment Process of Biological Nitrogen and Phosphorus in Sewage Treatment Plant by Natural Purification System. Doctor Thesis, Gyeongsang National University, Jinju, Korea. (in Korean)
- Sun, Y.S. and Kim, P.K. 1996. Adsorption characteristics of Cu (II) in the presence of surfactants on natural zeolites treated chemically and thermally. *Journal of Korean Industrial & Engineering Chemistry* 7(5): 849-860. (in Korean)
- Sundaravadivel, M. and Vigneswaran, S. 2001. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 31(4): 351-409.
- Wang, S., Boyhoo, Y., Choueib, A. and Zhu, Z.H. 2005. Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud. *Water Research* 39: 129-138.
- Yim, S.B., Kim, J.G. and Song, H.C. 2011. Removal characteristics of Cd and Pb by adsorption on red mud. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society* 12(7): 39-47. (in Korean)
- You, H.N., Kam, S.K. and Lee, M.G. 2014. Preparation of PVS-Al(OH)₃ beads immobilized Al(OH)₃ with PVC and their adsorption characteristics for fluoride ions from aqueous solution. *Journal of Environmental Science International* 23(5): 887-893. (in Korean)
- Yun, S.M. 1998. The Analysis of Self-Cleansing Power through the Sewage Disposal Model of Water Plants and Aggregate. Master Thesis, Korea National University, Seoul, Korea. (in Korean)