

하수슬러지를 이용한 Bio-block의 비점오염물질 제거 가능성 평가

한상무^a · 김도형^b · 정병곤^{c,†}

군산대학교 환경공학과

Evaluation of the Feasibility of Eliminating Non-point Source Pollution Using Waste Sewage Sludge Bio-blocks

Han Sang Moo^a · Kim Do Hyeong^b · Jeong Byung Gon^{c,†}

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

(Received 2 June 2021, Revised 3 August 2021, Accepted 31 August 2021)

Abstract

On the assessment results of the non-point source pollutant removability of bio-block using waste sewage sludge, at the reactor's initial operation stage, the removal efficiency of COD was slightly unstable. However, after the reactor was stabilized, the COD removal efficiency was higher in the reactor filled with bio-blocks compared to the reactor filled with broken stones. In terms of nitrogen and phosphorus, their removal efficiency was unstable at the initial stage of the reactor operation. This phenomenon was investigated through the bio-block elution experiments. Results indicated that nitrogen and phosphorus were eluted from the bio-blocks affecting their removal at the initial operation. Furthermore, based on elution tests conducted after the dry ashing of the waste sewage sludge, part of the nitrogen and phosphorus was eluted similar to the bio-block elution test results, although considerable amounts of nitrogen and phosphorus were reduced compared to the sludge cake. Prior to the use of the waste sewage sludge bio-blocks as a filter medium to remove non-point source pollutants, a stabilization period of 10 days was required. After the stabilization process, results showed similar characteristics as general aggregates. Moreover, to use the bio-block as a filter medium for the non-point pollutant removal, the filling ratio of 75% was the most suitable as it resulted in the highest nitrogen removal efficiency after the stabilization. The results of this study suggested that waste sewage sludge can be suitably recycled as a mixed raw material for the bio-blocks, with satisfactory application as a filter medium in artificial wetlands, stormwater runoff problems, stream water pollutants to eliminate non-point source pollutants.

Key words : Bio-block, Filling rate, Non-point source pollution, Remove efficiency, Waste sewage sludge

^a 박사과정(Ph.D. Student), 59hansm@hanmail.net, https://orcid.org/0000-0003-0924-4688

^b 연구원(Researcher), activekiller@kunsan.ac.kr, https://orcid.org/0000-0001-6283-026X

^{c,†} Corresponding author, 교수(Professor), bjeong@kunsan.ac.kr, https://orcid.org/0000-0003-1327-4089

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. Introduction

우리나라의 하수보급률은 2018년 기준 공공하수처리구역 인구보급률 기준으로 93.9%로 보고되고 있으며, 이에 따른 하수슬러지 발생량은 4,172,570톤/년이다(ME, 2019). 또한, 산업의 고도화 및 국민들의 생활수준이 향상되면서 하수 및 폐수 증가, 하수처리장증설 등의 이유로 하수슬러지의 양은 계속해서 증가할 것으로 예상된다(Kwon et al., 2020). 하수슬러지는 그 특성상 유기물 및 영양염류를 다량 함유하고 있다. 그리고 런던 협약으로 인해 2006년 해양오염방지법 시행규칙 개정을 통해 2012년부터 하수슬러지 처리방법중 하나인 해양투기 방법이 전면 금지됨에 따라 전량 육상처리를 실시하고 있다. 육상처리는 악취 민원, 높은 처리비용, 매립지 공간 확보 등의 문제점을 가지고 있으며, 이러한 문제점으로 인하여 슬러지 감량화가 대두되고 있는 실정이다(Shin et al., 2018). 슬러지의 안정적이고 지속적인 육상처리를 위해 재활용, 소각, 건조 등에 관한 연구가 많이 이루어지고 있는 바(Yoon, 2021) 그 중 하수슬러지 재활용 기술로는 하수슬러지를 이용한 투수블럭(Kim et al., 2015), 연료화(Rhee, 2009), 비료화(Kang et al., 2010; ME, 2010) 등 다양한 연구가 진행되고 있다.

한편, 비점오염물질은 인간의 다양한 토지이용 과정에서 발생하며, 주로 강우시 우수에 포함되어 하천 등 다양한 수계로 유입된다. 이렇게 유입되는 비점오염물질 내에 포함된 유기물, 질소 및 인은 하천이나 호소로 유입시 수질악화로 이어지고 있으며(Drake et al., 2014; Liu et al., 2018; Zafra et al., 2017), 녹조 및 부영양화를 일으키는 주 원인물질로 작용하고 있다(Hallin and Pell, 1998). 이러한 문제점 등을 해결하기 위해 현재 비점오염물질 저감시설에 대한 연구가 많이 이루어지고 있는 실정이다. 일반적으로 비점오염의 저감은 비점오염저감 시설이나 장치를 설치하는 구조적인 방법과 LID나 GI 기법을 이용하여 비점오염물질이 저감되도록 토지이용을 계획하는 비구조적 방법으로 이루어져 있다(Jeon et al., 2018). 그 중 장치를 설치하는 구조적 방법으로는 여과형이나 인공습지를 이용하는 방법이 주를 이루고 있으며, 이 경우 여재의 흡착 특성이 장치의 효율에 매우 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 저감시설에 있어 적정 여재의 선정과 여과 속도, 여과 장치의 설계 등은 비점오염물질의 효율적 제어에 매우 중요한 인자이다. 일반적으로 질소와 인 제거를 위한 흡착 여재는 침투에 용이한 공구구조와 오염물질 제거를 위해 물리·화학적 흡착에 유리한 특성을 가진 쇄석, 모래, 활성탄, 제올라이트 등이 주로 이용되고 있다(Jung et al., 2002; Kim et al., 2018; Ryoo and Choi, 2012).

따라서 본 연구에서는 하수슬러지를 재활용하여 만든 여재(Bio-block)와 일반적으로 흡착 여재로 많이 이용되는 쇄석과의 유기물 및 영양염류 제거 특성을 비교해 Bio-block이 비점오염물질 제거 여재(Bio-block)로서 적용 가능한지 평가해보았다.

2. Materials and Methods

2.1 여재 및 유입수

본 연구에서 사용된 여재(Bio-block)의 제조방법은 Kim et al. (2015)에서 사용된 방법을 따랐다. 우선 하수슬러지와 황토 및 점토를 혼합(하수슬러지:황토:점토 혼합비 15:65:20)후 전기로(Thermolyne, 62700)의 운전은 최초 실온에서 500℃까지 온도를 올려 소성 후 1시간 동안 유지시킨 후 900±10℃까지 온도를 높인 후 전기로 내에서 상온까지 방랭을 실시하여 제조한 것을 사용하였다. 이렇게 제조된 Bio-block은 압축강도 1,600 N/cm², 흡수율 30.24%, 투수계수 16.8×10⁻⁴ cm/sec의 물성특성을 보였으며, 대조구로 사용된 쇄석은 유효입경 1.96 mm, 균등계수 1.61인 것을 사용하였다. 비점오염물질(유기물 및 영양염류) 제거 실험에 사용된 유입수 조성은 Kim (2006), Wee et al. (2008) 및 Kang (2009)이 수행한 연구 결과를 바탕으로 평균 농도를 산정하여 제조하였으며, 유기물(Carbon source)로 glucose를 이용하여 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand, COD) 약 38 mg/L가 되게 하였으며, 질소(Nitrogen) source로는 NH₄Cl을 이용하여 총질소(Total nitrogen, T-N) 기준으로 약 5.4 mg/L로 하였다. 인(Phosphate) source는 KH₂PO₄를 이용하여 총인(Total phosphorus, T-P) 기준으로 약 0.37 mg/L가 되게 조제하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서 이용된 실험실 규모 반응조는 내경 100 mm, 높이 250 mm로 제작하였으며, 반응조 총 용량은 약 2.0 L(유효용량 약 1.9 L)이었다. 반응조는 총 4개를 제작하였으며, 1개는 대조구로 쇄석만을 충전하였다. 나머지 3개는 Bio-block과 쇄석을 충전하였으며, 충전한 Bio-block의 개별 크기는 40×20×15 mm이다. 반응조 내 Bio-block의 충전율은 각각 25%, 50%, 75%이며, 유입수는 정량펌프를 이용하여 1.9 L/day(HRT 12hr)를 반응조 하부로부터 상향류 식으로 연속적으로 주입하였고 유출수를 이용하여 1Q(1.9 L/day)의 반송을 실시하였다(Fig. 1). 시료채취는 1일 간격으로 실시하였으며, 채수된 시료는 즉시 수소이온농도(Hydrogenion concentration, pH),

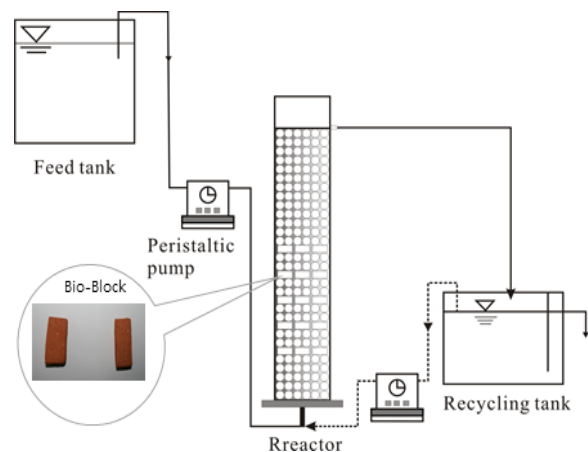


Fig. 1. Schematic diagram of experimental unit.

전기전도도(Electrical conductivity, EC)를 측정하였다. 그리고 증크롬산 COD (COD_{Cr}), T-N, T-P 실험방법은 수질오염공정시험방법(ME, 2017)에 준하여 실시하였다.

2.3 용출실험

여재로 사용된 Bio-block과 Bio-block 제조시 사용한 하수슬러지를 전처리 형태에 따른 슬러지 내 함유되어 있는 질소와 인을 측정하기 위하여 용출시험을 실시하였다. Bio-block은 순수에 넣어 진탕기(SK-760M, (주)제이오텍)를 이용하여 20℃, 200 rpm에서 12시간 진탕하였다. 그리고 하수슬러지 전처리 형태에 따른 용출실험은 탈수 슬러지(함수율 81%), 건조 슬러지(함수율 9.3%), 회화 슬러지를 이용하였으며, 여기서 회화슬러지를 조제하기 위한 전기로(Thermolyne, 62700)의 운전은 여재 제조시와 동일하다. 또한, 슬러지 전처리 형태에 따른 용출실험은 순수에 넣어 12시간 간격으로 연속 진탕하였으며, 진탕한 시료는 고액분리를 위해 원심분리기(CENTRIFUGE BR 4, JOUAN)를 이용하여 3000 rpm으로 20분간 원심분리 하였다. 고액분리된 상등액을 채취하여 membrane filter (0.45 μm)를 이용하여 여과한 후 총질소(T-N)와 총인(T-P)분석을 실시하였다.

3. Results and Discussion

3.1 Bio-block 충전율에 따른 제거효율

제조한 인조합성 강우유출수의 pH는 7.23이었으며, 운전기간(35day) 동안 Bio-block을 충전하지 않은 대조구(쇄석) 및 Bio-block을 각각 25%, 50%, 75%를 충전한 반응조 모두 pH는 큰 변화 없이 7.0~8.0 수준을 나타내었다. 그리고 인조합성 강우유출수의 EC는 평균 0.255 dS/m이었으며, 운전기간동안 대조구의 평균 EC는 0.290 dS/m, Bio-block을 각각 25%, 50% 및 75%를 충전한 반응조의 경우 각각 0.286, 0.283, 0.281 dS/m로 Bio-block의 충전율이 증가할수록 EC가 약간 감소하는 경향을 나타내었다.

COD 제거효율은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 반응조 운전 초기 약 85%의 제거효율을 보였다가 일시적으로 증가하는 모습을 보였으나 반응조 운전 18일까지 서서히 감소하는 경향을 보였다. 반응조 운전 18일 까지는 다소 불안정한 처리효율을 보였는데 이는 반응조가 안정화되지 않았기 때문인 것으로 보여지며, 반응조 내 여재로 사용된 Broken stone 및 Bio-block 표면에서 존재하는 용존성 유기물이 탈착되어 나오면서(Watson et al., 1989) COD 제거효율이 낮아진 것으로 판단된다. 하지만 반응조 운전 약 19일부터 제거효율은 서서히 증가하다가 이후 곧바로 안정된 값을 나타내었다. 대조구로 사용된 broken stone만을 충전한 반응조의 경우 Table 1에서 보는 바와 같이 평균 77.9%의 제거효율을 보였으며, Bio-block을 각각 25%, 50% 및 75% 충전한 반응조의 경우 각각 평균 78.2%, 78.4% 및 76.5%를 보여 Bio-block을 충전한 반응조가 쇄석만을 충전한 반응조에 비해 약간 높은 제거효율을 보였다. 그러나 제거효율의 차이가 크지 않고 Bio-block 충전율에 따른 제거효율의 차이 또한 미미한 것으로 나타났다.

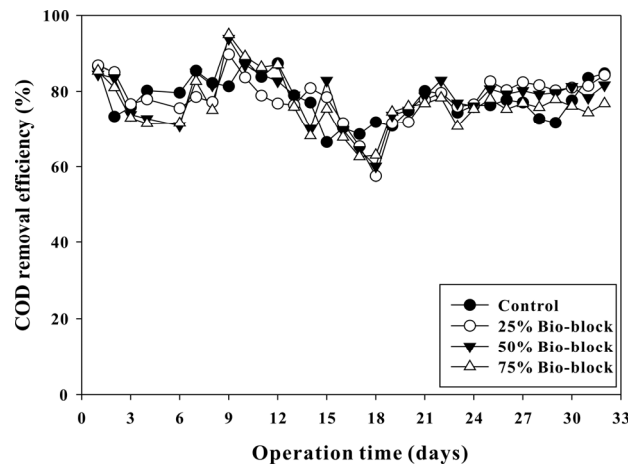


Fig. 2. Changes in COD removal efficiency according to bio-block filling ratio.

Table 1. Changes in COD removal efficiency according to bio-block filling ratio (Unit : %)

	Influent (mg/L)	Control	25% Bio-block	50% Bio-block	75% Bio-block
Max.	46.0	88.1	89.7	93.9	94.9
Min.	32.7	66.5	57.5	60.1	62.6
Average	37.5	77.9	78.2	78.4	76.5
S.D.	3.6	5.7	6.2	6.8	7.0

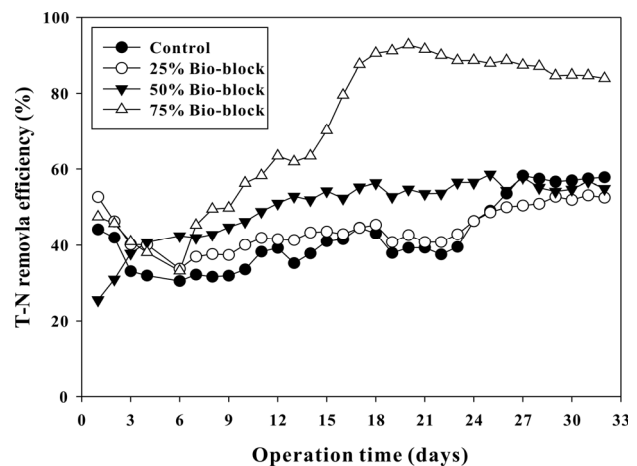


Fig. 3. Changes in T-N removal efficiency according to bio-block filling ratio.

T-N 제거효율은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 Bio-block 충전율에 따라 다소 다르기는 하나 초기 약 1주일 동안은 제거효율에 있어 상당한 변동을 보여주었으며, 대조구로서 쇄석만을 충전한 반응조에서도 동일한 현상을 보이는 것으로 나타났다. 이는 여재의 표면 등에 잔존하고 있던 오염물질의 영향인 것으로 예상되며, 여재 및 Bio-block에 의해 질소가 흡착 제거될 경우 일반적으로 반응조 운전 초기에 높은 제거효율을 보이다가 서서히 감소하여 파과점에 도달하는 것이 일반적인 흡착 메커니즘이나 본 반응조 내에서 질소의 제거는 미생물에 의한

Table 2. Changes in T-N removal efficiency according to bio-block filling ratio (Unit : %)

	Influent (mg/L)	Control	25% Bio-block	50% Bio-block	75% Bio-block
Max.	7.9	58.2	53.1	58.6	92.8
Min.	7.0	31.6	36.9	42.0	45.3
Average	7.3	43.8	44.7	52.8	77.2
S.D.	0.2	9.1	5.1	4.4	15.5

Table 3. Changes in T-P removal efficiency according to bio-block filling ratio (Unit : %)

	Influent (mg/L)	Control	25% Bio-block	50% Bio-block	75% Bio-block
Max.	0.40	40.7	41.1	23.9	27.1
Min.	0.33	23.0	11.7	3.9	5.6
Average	0.37	33.1	26.4	16.1	18.2
S.D.	0.02	5.0	10.0	5.9	5.8

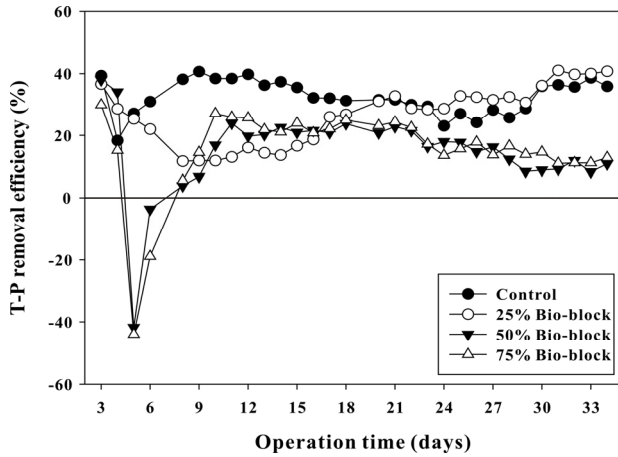


Fig. 4. Changes in T-P removal efficiency according to bio-block filling ratio.

Table 4. Bio-block elution test results

	T-N(mg/kg)	T-P(mg/kg)
Bio-block	6.58	1.52

Table 4에 나타난 바와 같이 T-N이 약 6.58 mg/kg, T-P가 약 1.52 mg/kg 용출되는 것으로 나타났다. Bio-block 제조시 소성과정을 거치면서 슬러지 내에 존재하는 인 및 질소가 감소되고 Bio-block 내에 고정화되어 용출되지 않을 것이라 예상하였으나 실제로는 Bio-block으로부터 질소와 인이 용출되어 반응조 운전 초기 유기물 및 영양염류 제거효율에 있어서 다소 불안정한 경향을 나타냈던 것으로 판단된다.

질산화 및 탈질에 의해 제거되는 것이 주 제거 기작(Gersberg et al. 1983; Kim et al., 2006; Reddy et al., 1989)이어서 여재에 의한 질소의 흡착 제거는 큰 의미가 없는 것으로 판단된다.

초기 start-up 단계에서 제거효율은 Control, 25%, 50% 및 75% Bio-block을 충전한 반응조에서 각각 약 32.1%, 36.9%, 42.0% 및 45.3%를 나타내어 충전비율에 따른 차이는 크지 않았다. 정상상태에서 반응조의 T-N 평균 제거효율은 Control, 25%, 50% 및 75% Bio-block을 충전한 반응조에서 각각 43.8%, 44.7%, 52.8% 및 77.2%로 나타나 75%를 Bio-block으로 충전한 반응조에서 가장 높은 제거효율을 보이는 것을 알 수 있었다(Table 2). 질소 제거를 위해 여재(모래, 제올라이트, 굴껍질)를 이용하여 T-N 처리시 T-N 제거효율이 71.5~80.2%를 보인다고 보고되고 있는데(Seo, 2014) 본 Bio-block을 75% 충전한 반응조에서 다른 여재들과 유사한 제거효율을 보이는 것으로 나타났다.

T-P 제거효율은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 Bio-block을 각각 50%, 75% 충전한 반응조의 경우 반응조 운전초기 start-up 기간 중 유출수의 T-P 농도가 증가하여 유입수내 T-P 농도보다 높게 나타나는 현상을 볼 수 있었다. 이러한 현상은 운전기간 내 상당기간 지속되었으며, 이는 무기성 인이 반응조 내 충전한 여재 등에서 용출될 가능성이 있다고 보고한 Yang (2002)의 결과와 일치한다.

이처럼 반응조 운전초기에 유기물 및 영양염류 제거효율에 있어서 다소 불안정한 결과를 보였는데 이를 확인하기 위하여 Bio-block의 질소 및 인 용출실험을 실시하여 본 결과

3.2 하수슬러지 전처리 형태에 따른 질소 및 인 농도변화

소성과정을 거친 Bio-block 내에서 질소와 인이 고정화되지 않고 용출됨에 따라 하수슬러지 전처리 형태에 따른 질소 및 인 농도 변화를 확인하여 보았다. 그 결과 Fig. 5에 나타난 바와 같이 인의 경우 탈수 슬러지, 건조 슬러지 및 회화 슬러지에서 각각 2,184 mg/kg, 3,180 mg/kg 및 221 mg/kg이 용출되는 것으로 나타났다. 회화시킨 슬러지는 탈수 슬러지에 비해 89.9% 감소한 것으로 나타나 슬러지를 회화시킴으로서 슬러지 내 함유되어 있는 인의 농도를 상당량 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 질소는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 탈수 슬러지, 건조 슬러지 및 회화 슬러지 각각 13,312 mg/kg, 11,846 mg/kg 및 923 mg/kg으로 나타났으며, 회화시킨 슬러지의 경우 탈수 슬러지에 비해 T-N 농도가 93.0% 감소한 것으로 나타나 슬러지를 회화시킴으로서 대부분의 질소도 제거할 수 있을 것으로 나타났다.

전체적으로 하수슬러지를 혼합하여 제조한 Bio-block을 영양염류 제거를 위한 골재 대용으로 적용하는 경우 슬러지 내에 잔존해 있는 인 및 질소가 영향을 미칠 가능성이 있을 것으로 판단되어 회화시킨 슬러지의 인 및 질소 용출특성을 12시간 간격으로 11일간 실시하였다. 그 결과 Fig. 8에 나타난 바와 같이 T-P의 경우 용출 시험 기간에 총 321.4 mg/kg이 용출되었으며, 2.5일에 약 50%, 8.5일에 90%의 인이 용출된 것으로 나타났다. T-N의 경우는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 용출시험 기간에 총 108.4 mg/kg이 용출되었으며, 4일에 약 50%, 9일에 약 92%의 질소가 용출된 것으로 나타났다. 회화시킨 슬러지의 기간별 용출특성 결과를 Bio-block 충전율에 따른 질소 인 제거효율 실험 결과와 비교하여 본 결과 하수

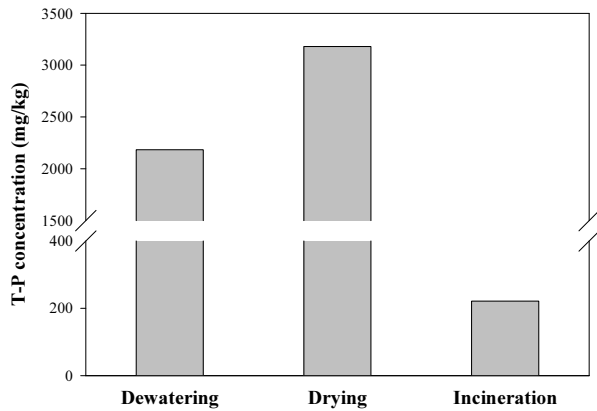


Fig. 5. The eluted T-P concentration according to the sludge pretreatment type.

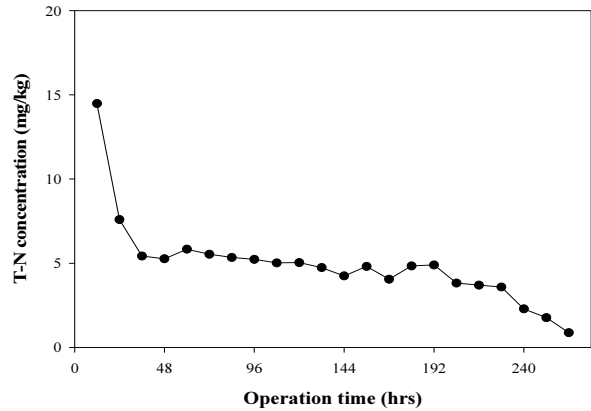


Fig. 7. Changes in the eluted T-N concentration based on the operation time.

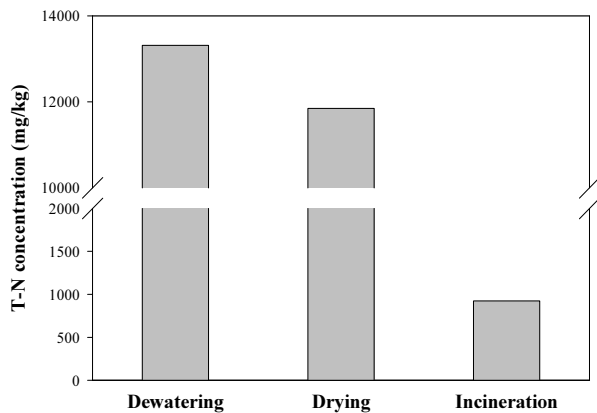


Fig. 6. The eluted T-N concentration according to the sludge pretreatment type.

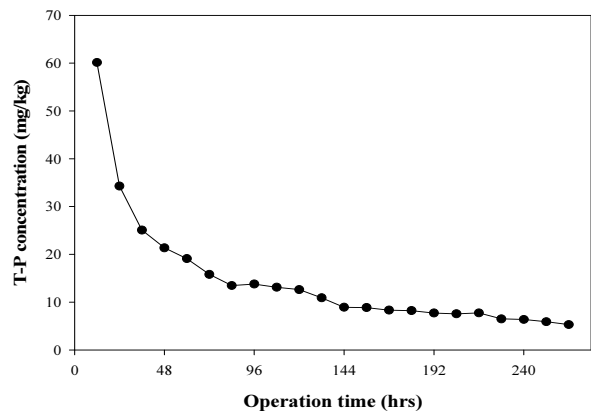


Fig. 8. Changes in the eluted T-P concentration based on the operation time.

슬러지를 이용한 Bio-block의 비점오염물질(유기물 및 영양염류) 제거 여재로 사용시 운전기간 약 10일 정도의 안정화 기간이 필요하며, 일정기간 안정화 과정을 거치고 나면 하수슬러지를 이용한 Bio-block이 일반적인 골재와 유사한 특성을 보임에 따라 비점오염물질(유기물 및 영양염류) 제거 여재로 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다. 그리고 Bio-block 충전율에 따른 유기물 및 영양염류 제거효율을 최종적으로 평가해 본 결과 유기물 및 인의 경우 충전율에 따른 제거효율 차이는 미미하였으나 질소 제거에 있어서 다소 높은 제거효율을 나타내었던 충전율 75% 정도가 가장 적합할 것으로 판단된다. 또한, 하수슬러지가 Bio-block 제조시 혼합원료로 충분히 재활용 가능한 것으로 나타났으며, 이렇게 제조된 Bio-block은 강우시 비점오염원들에 의해서 영향을 받는 강우 유출수(run-off), 오염된 하천수 및 인공습지공정 등에서 유기물 및 영양염류 제거를 위한 여재로 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

4. Conclusion

하수슬러지를 이용한 Bio-block의 유기물 및 영양염류 제

거 가능성 평가를 실시하여 본 결과 COD는 반응조 운전초기에 제거효율이 다소 불안정 하였으나 반응조 안정화 이후 COD 제거효율은 선택한 충전율 반응조보다 Bio-block을 충전한 반응조에서 높은 효율을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 질소 및 인의 경우에도 반응조 운전 초기에 제거효율이 다소 불안정한 결과를 나타내었는데 이를 Bio-block 용출실험을 통해 확인해 본 결과 Bio-block에서 질소와 인이 용출되어 운전초기에 질소와 인 제거에 있어서 다소 영향을 끼쳤던 것으로 나타났다. 또한, 하수슬러지를 회화시켜 용출실험을 실시하여 본 결과 탈수슬러지에 비해 질소와 인은 상당량 저감되었으나 질소와 인이 일부 용출되어 나오는 것으로 확인 되었다. 그리고 회화시킨 슬러지의 기간별 용출특성 실험 결과와 Bio-block 충전율에 따른 질소 인 제거효율 실험결과를 비교하여 본 결과 하수슬러지를 이용한 Bio-block을 비점오염물질 제거 여재로 사용시 운전기간 약 10일 정도의 안정화 기간이 필요하며, 일정기간 안정화 과정을 거치고 나면 일반적인 골재와 유사한 특성을 보이는 것으로 확인되었다. Bio-block을 비점오염물질(유기물 및 영양염류) 제거 여재로 사용시 충전율은 질소제거에 있어서 다소 높은 제거효율을 나타내었던 75%가 가장 적합할 것으로 판단된다.

따라서 하수슬러지가 Bio-block 제조시 혼합원료로 충분히

재활용 가능한 것으로 나타났으며, 이렇게 제조된 Bio-block은 강우시 비점오염원들에 의해서 영향을 받는 강우 유출수(run-off), 오염된 하천수 및 인공습지공정 등에서 유기물 및 영양염류 제거를 위한 여재로 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

References

- Drake, J., Bradford, A., and Seters, T. V. (2014). Stormwater quality of spring-summer-fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement, *Journal of Environmental Management*, 139, 69-79.
- Gersberg, R. M., Elkins, B. V., and Goldman, C. R. (1983). Nitrogen removal in artificial wetlands, *Water Research*, 17(9), 1009-1014.
- Hallin, S. and Pell, M. (1998). Metabolic properties of denitrifying bacteria adapting to methanol and ethanol in activated sludge, *Water Research*, 32(1), 13-18.
- Jeon, J. C., Jung, J. H., Kim, Y. S., and Kim, L. H. (2018). A review of research trend related to NPS and suggestion for research direction in the future, *Journal of Wetland Research*, 20(1), 80-93. [Korean Literature]
- Jung, J. Y., Lee, S. W., Kim, K. H., Lim, J. H., and Lee, J. K. (2002). Removal of N,P in seawater by zeolite, *Theories and Application of Chemical Engineering*, 8(2), 3773-3776. [Korean Literature]
- Kang, C. G., Lee, S. Y., Gorme, J. B., Lee, J. U., and Kim, L. H. (2009). Determination of EMC and washoff characteristics of stormwater runoff from broad-leaved forest areas, *Journal of Environmental Science International*, 25(7), 1007-1016. [Korean Literature]
- Kang, H., Shin, K. S., Jeong, J. H., and Frank, S. (2010). Application of electron beam for accelerating composting of sewage sludge, *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association*, 18(2), 62-70. [Korean Literature]
- Kim, J. D., Han, S. M., and Jeong, B. G. (2015). Manufacturing water permeable block using loess, clay and waste sewage sludge, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(5), 476-481. [Korean Literature]
- Kim, S. J., Choi, Y. S., and Bae, W. K. (2006). Application of hybrid constructed wetland system for stream water quality improvement, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 22(2), 209-214. [Korean Literature]
- Kim, S. T. (2006). *Management of storm runoff for reducing nonpoint pollution in urban area*, Master's Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea.
- Kim, T. Y., Kwon, Y. J., Kang, C. H., Kim, J. Y., Shin, H. S., Kwon, S. C., and Cha, S. M., (2018). The investigation of adsorption properties of filter media for removal efficiency of nitrogen, phosphorus using experimental and density functional theory, *Journal of Wetlands Research*, 20(3), 263-271. [Korean Literature]
- Kwon, G. W., Park, H. O., Lee, K. H., Kim, M. J., Lee, W. W., and Ryu, D. S. (2020). A study on the land improvement effect of sewage sludge and sewage sludge dry fuel mixture, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 28(3), 45-49. [Korean Literature]
- Liu, A., Ma, Y., Gunawardena, J. M. A., Egodawatta, P., Ayoko, G. A., and Goonetilleke, A. (2018). Heavy metals transport pathways: The importance of atmospheric pollution contributing to stormwater pollution, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 164, 696-703.
- Ministry of Environment (ME). (2010). *Research on optimum treatment technology for sewage sludge*, Ministry of Environment.
- Ministry of Environment (ME). (2017). *Law for the preservation of water quality*, Ministry of Environment.
- Ministry of Environment (ME). (2019). *Sewer statistics in 2018*, Ministry of Environment.
- Reddy, K. R., Patrick, W. H. Jr., and Lindau, C. W. (1989). Nitrification-denitrification at the plant root-sediment interface in wetlands, *Limnology and Oceanography*, 34(6), 1004-1013.
- Rhee, S. W. (2009). An energy characteristics of carbonization residue produced from sewage sludge cake, *The Korean Institute of Chemical Engineers*, 47(2), 230-236. [Korean Literature]
- Ryoo, K. S. and Choi, J. H. (2012). A comparative study on adsorption characteristics of total nitrogen and phosphorous in water using various adsorbents, *Journal of Korean Chemical Society*, 56(6), 700-705. [Korean Literature]
- Seo, J. Y. (2014). Sewage treatment using a double media reed constructed wetland, *Journal of Wetlands Research*, 16(4), 379-388. [Korean Literature]
- Shin, D. C., Yang, E. J., Lee, Y. K., and Park, C. H. (2018). A study on sludge reduction in sewage using microbial catalysts, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 40(2), 91-96. [Korean Literature]
- Watson, J. T., Reed, S. C., Kadlec, R. H., Knight, R. L., and Whitehouse, A. E. (1989). *Performance expectations and loading rates for constructed wetlands*, In: Hammer, D.A. (ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*, Municipal, Industrial and Agricultural, 319-358.
- Wee, S. K., Kim, L. H., Jung, Y. J., and Gil, K. I. (2008). Washoff characteristics and correlation of nonpoint pollutants in a bridge storm runoff, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(3), 378-382. [Korean Literature]
- Yang, H. M. (2002). Preliminary nitrogen removal rates in close-to-nature constructed stream water treatment wetland, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 21(4), 269-273. [Korean Literature]
- Yoon, S. P. (2021). Reviews on the phosphorus recovery from incinerated sewage sludge ash, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 29(1), 5-17. [Korean Literature]
- Zafra, C., Temprano, J., and Suarez, J. (2017). A simplified method for determining potential heavy metal loads washed-off by stormwater runoff from road-deposited sediment, *Science of the Total Environment*, 601-602, 260-270.