하천 수질정화를 위한 실험실 규모 다단식 토양여과 시스템에서 오염물질 제거에 미치는 운전인자의 영향

Effects of Operation Parameters on Pollutants Removal in a Lab-Scale Multi-Layered Soil Filtration System

원세연*·**·기동원***·윤민혁*·맹승규****·안규홍*·박준홍**·송경근*^{,†} Se-Yeon Won*·**·Dongwon Ki***·Min Hyeok Yoon*·Sung Kyu Maeng**** Kyu-Hong Ahn*·Joonhong Park**·Kyung-Guen Song*^{,†}

*한국과학기술연구원 물자원순환연구단 · **연세대학교 사회환경시스템공학부
아리조나주립대학교 토목환경공학과 · *세종대학교 건설환경공학과
*Center for Water Resource Cycler Research Center, Korea Institute of Science and Technology
**School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University
***Department of Civil, Environmental and Sustainable Engineering, Arizona State University
****Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University

(2011년 4월 15일 접수, 2012년 2월 24일 채택)

Abstract : In this study we investigated the effects of operational parameters of a multi-layered soil filtration (filter depth, filtration velocity, and continuous/intermittent operation) on removal of pollutants in river water. As filter depth increased removal of all the pollutants (COD, TP, TN, and NH₄-N) was increased because the increase in filter depth increased in contact time between media and pollutants. The removal of TP and NH₄-N more increased with the increase in filter depth, comparing to the biological COD removal which was performed only in the top layer, since the removal mechanism of TP and NH₄-N was physicochemical process occurring throughout the whole layers. However, the reduction in filtration velocity resulted in decrease of removal all the pollutants removal due to shorter retention time. Biological COD removal was more influenced with the reduction in filtration velocity (longer retention time), than the removal of TP and NH₄-N. Because biological process was occurred only in the top layer which has relatively shorter retention time, comparing with physicochemical process occurred throughout whole media. Therefore, it is desirable that the operation parameters be controlled toward increasing retention time, in order to achieve efficient pollutants removal. The change in operation mode (continuos vs. intermittent operations) did not provide significant effects on the pollutant treatment efficiency by the multi-layered soil filtration system. Our findings suggest that for stable long-term operation it should be considered keeping conditions for biological activity and accelerating clogging.

Key Words: Multi-Layered Soil Filtration, Polishing River, Pollutant Removal, Filter Depth, Filtration Velocity

요약: 본 연구에서는 하천의 수질오염물질을 처리하는 다단식 토양여과 시스템의 주요 운전인자인 여재 충전깊이, 선속도 및 연속 또는 간헐운전이 오염물질의 제거에 미치는 영향을 살펴보았다. 여재 충전깊이의 증가는 오염물질과 여재와의 접촉시간을 증가시켜 모든 항목의 제거효율을 증가시키는 역할을 하였다. 특히 물리화학적 제거에 기인하는 TP와 NH₄-N 항목의 제거효율이 상부의 생물학적 활성층에서의 제거에만 주로 기인하는 COD에 비하여 더 큰 증가를 보였다. 한편 선속도의 증가는 여재 내에서의 체류시간을 감소시키는 역할을 함에 따라 전반적인 제거효율의 저하를 가져왔으며, 특히 전체 여재층에 걸친 접촉시간에 영향을 받는 TP와 NH₄-N 항목에 비하여 표층부의 생물학적 제거에만 기인하는 COD의 경우는 상대적으로 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 오염물질의 효율적인 제거를 위해서는 체류시간을 증가시키는 방향으로 운전인자들을 조절하는 것이 중요할 것으로 판단된다. 연속운전과 간헐운전으로 운전방법을 달리하는 것은 모든 항목에서 큰 영향을 미치지는 않았으나, 안정적 운전을 위해서는 생물학적 조건의 유지와 막힘 현상의 가속화 등을 고려할 필요가 있다.

주제어: 다단식 토양여과, 하천정화, 오염물질제거, 충전깊이, 선속도

1. 서 론

수질규제의 강화와 하수처리장과 같은 환경기초시설의 꾸준한 확충으로 우리나라의 하천수질이 과거에 비하여 많이 개선되고 있다. 그러나 그동안 추진하여 온 점오염원 중심의 하천수질관리 만으로는 한계를 보이고 있어, 비점오염원에 대한 오염관리가 매우 중요한 문제로 대두되고 있다.^{1,2)}

이와 함께 하수처리구역 내에 위치하지 않는 지류에 의한 하천오염은 여전히 해결해야 하는 문제로 남아있다. 그러나 이러한 상황에도 불구하고 국민들의 하천수질에 대한 기대 수준은 하천 생태계를 고려하는 단계로까지 높아지고 있어, 이를 만족시킬 수 있는 하천의 수질정화기술에 대한 요구가 증대되고 있는 실정이다.

하천의 정화기술로서는 하천의 바닥이나 하안에 미생물이

[†] Corresponding author E-mail: kgsong@kist.re.kr Tel: 02-958-5842 Fax: 02-958-6854

부착할 수 있는 인공담체를 배치하거나, 하천수의 흐름을 막 고 오염된 하천수를 고수부지로 끌어내어 인공처리시설을 이용하여 처리 후 다시 하천으로 유입하는 방식이 주를 이루 었으나, 현재는 여러 가지 문제점으로 널리 적용되지는 못하 고 있으며, 대안으로서 인공습지, 하상여과, 토양여과와 같이 토양을 주요 정화재료로 활용하는 자연친화적인 수질정화 기술들이 주목 받고 있다.3~6) 이러한 자연친화적인 기술 중 에서 토양여과는 하천변에 잘 발달되어 있는 홍수터의 토양 층을 이용하여 하천수질을 정화하고자 하는 것으로서^{4,7,8)} 자 연적인 토양층을 이용할 뿐만 아니라 적극적으로 표층토양 을 치환하거나 적절한 자연친화적인 여재를 대체하여 사용 함으로써 처리효율과 처리속도를 증가시킬 수 있다.⁹⁾ 이러한 토양여과의 처리용량 증대 및 처리효율 개선을 목적으로 시 도하고 있는 방법이 다단식 토양여과 기술이다. 10~12) 다단식 토양여과란 혼합토양층과 투수층(permeable layer)이 연속적 으로 여러 단으로 구성되어 있는데, 혼합토양층은 토양과 다 양한 기능성 첨가물질들을 섞어서 벽돌모양으로 만들어져 구성되어 있는 층을 말한다. 또한 투수층은 토양층에 비해 입자크기가 훨씬 큰 여재로 구성되어 있는 층이다. 따라서 전통적인 토양층만을 이용한 정화방법으로 인해 발생될 수 있는 막힘현상이 유입수가 투수층과 혼합토양층에 분산하 여 흐르기 때문에 상기의 문제점들을 방지할 수 있고, 혼합 토양층을 통과하며 토양층 고유의 물리, 화학, 생물학적 처 리기작에 의한 제거가 동시에 가능하게 된다. 10) 하지만, 투 수층의 입자가 혼합토양층보다 현저하게 크기 때문에 유입 수가 혼합토양층으로 흡수되어 통과되기 보다는 투수층에 절 대적으로 집중될 것이고, 이로 인해 토양층을 통과하며 미 생물에 의한 유기물의 생물학적 분해와 질산화된 질산성질 소의 탈질현상 등의 분해 작용 등이 일반 토양을 사용할 때 보다 낮을 가능성이 있다. 이러한 점을 보다 구체적으로 알 아보기 위해 다단토양층 시스템에서의 물의 흐름에 대한 연

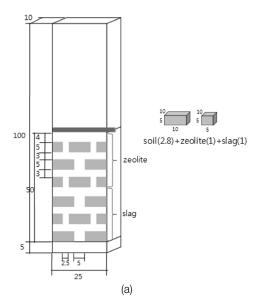
구가 진행되었는데,¹¹⁾ 이 연구에서 수리학적 부하율(Hydraulic Loading Rates, HLR)에 따른 각 층별 유출량에 대한 정량적 평가를 수행하였다. 수리학적 부하율, 즉 선속도가 클수록 토양층을 통과하는 유량보다 투수층을 통과하는 유량이 점점 커지는 것을 알 수 있었다.

본 연구의 목적은 다단의 토양층을 이용하여 수질오염물질을 처리하는 다단식 토양여과 시스템에서 오염물질의 제거에 미치는 중요한 운전인자들의 영향을 살펴봄으로서 다단식 토양여과의 설계 및 운전에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치 및 유입원수

본 연구에서 이용한 실험실 규모의 다단식 토양여과 시스 템은 Fig. 1에 보는 바와 같다. 아크릴 재질의 가로 25 cm, 세로 10 cm, 높이 105 cm의 직사각형 반응조를 사용하였으 며, 여재의 전체 충전 깊이는 실험조건에 따라 50 cm와 100 cm가 되도록 하였으며, 입경이 큰 여재로 이루어진 투수층 과 입경이 작은 토양여재로 이루어진 혼합토양블럭층을 5 cm 높이로 교대로 쌓아서 여재층을 형성하였다. 충전되는 혼합 토양블록은 토양, 제올라이트, 슬래그가 2.8:1:1의 비율 로 혼합한 토양을 사용하였으며, 크기는 가로 10 cm, 세로 10 cm, 높이 5 cm가 되도록 성형하여 벽돌쌓기 형태로 투수 층 사이에 교대로 배치되도록 하였으며 반응조 끝단에 위치 하는 혼합토양블록은 가로 5 cm, 세로 10 cm, 높이 5 cm가 되도록 하였다. 혼합토양블록 사이의 투수층은 상부의 3개 층은 제올라이트로, 하부의 3개 층은 슬래그를 여재로 충전 하였다. 투수층의 두께는 최상층부는 4 cm로 하였으며 그 아래로는 3 cm 두께가 되도록 하였다. 투수층에 사용된 제



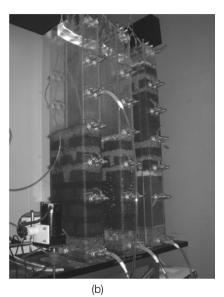


Fig. 1. Scheme of the multi-layered soil filtration systems with soil mixed blocks (unit of length: centimeter) (a) and picture of the experimental setup (b).

Table 1. Concentration and chemical composition of the synthetic river water

Constituents	Value (mg/L)		
COD	14		
TN	15		
NH ₄ -N	10		
TP	2		
CH₃COONa	11.72		
NH ₄ Cl	11.46		
NaNO ₃	30,39		
KH ₂ PO ₄	2,20		
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.90		
$MnSO_4 \cdot H_2O$	0.05		
FeSO4 · 7H ₂ O	0.15		
CaCl ₂	1.15		
KCI	0.48		
CuSO ₄	0.21		
CoSO ₄	0.24		
$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 7H_2O$	0.23		

올라이트와 슬래그는 2~5 mm 크기의 입경을 갖도록 선별하여 사용하였다. 원수의 흐름은 상부에서 하부로 흐르는 하향류로 운전하였으며, 여재층 상부에 유입수 분배관을 설치하여 유입원수가 여재 전체에 잘 분포하여 흐르도록 하였다. 원수의 유입은 정량이송펌프(peristaltic pump)를 이용하여 일정 유량으로 유입하여 일정 선속도가 유지되도록 하였으며, 각 반응조의 선속도는 단위시간당 유출되는 유량을 측정하여 확인하였다.

실험에 사용한 유입원수는 Table 1에 제시된 바와 같이 실험실에서 유기물과 질소, 인 및 미량영양원소를 첨가하여 인공적으로 하천수를 제조하여 사용하였다. 실험에 사용된 유입원수의 농도는 물환경정보시스템 자동수질측정망의 1992~2009년 자료로부터 경안천 및 중랑천 수질을 기준으로 하였으며, 연간 측정 농도 중 가장 높은 농도의 평균 농도를 기준으로 COD 14 mg/L, TP 2 mg/L, TN 15 mg/L, NH₄-N 10 mg/L의 농도로 설정하였다.

2.2. 실험방법

본 연구에서는 다단식 토양여과 시스템의 영향인자 중 중 요한 인자인 선속도와 충전깊이 그리고 연속 및 간헐운전의 변화가 오염물질의 제거에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위하여 본 연구에서는 운전조건을 Table 2와 같이 변화시키 며 실험을 진행하였다.

유입수 및 유출수는 각각의 컬럼에 대하여 하루에 한번 샘플링하여 분석을 수행하였다. DO는 DO meter (YSI, USA)를 이용하여 측정하였으며, COD, T-N, T-P, NO₃-N, PO₄-P, NH₄-N의 분석은 Standard methods¹²⁾에 준하여 실시하였다. 또한 선속도 변화에 따른 체류시간의 측정은 NaCl을 tracer로 이용하여 전기전도도의 변화를 모니터링하여 추정하였다.¹³⁾

Table 2. Operation conditions for each run

Run No.	Bed depth (cm)	Line velocity (m/day)	Operation mode	
R1	100	10	Continuous	
R2	50	10	Continuous	
R3	50	10	Continuous	
R4	50	5	Continuous	
R5	50	5	Continuous	
R6	50	5	Intermittent (Run 18 h: Idle 6 h)	

3. 결과 및 고찰

3.1. 충전깊이의 영향

다단식 토양여과 시스템의 운전에 있어서 다양한 운전인자가 오염물질의 제거에 영향을 줄 것으로 예상된다. 그러한 운전인자 중 하나인 여재 충전깊이의 영향을 살펴보기 위하여 충전깊이가 50 cm (Run-1)와 100 cm (Run-2)로 서로 다른 충전깊이를 갖는 토양여과 시스템을 운전하며 오염물질들의 제거효율을 비교하여 보았다. Fig. 2에서 보듯이 충전 깊이가 50 cm에서 100 cm로 증가하였을 때 COD를 비롯한모든 오염물질의 제거효율이 증가하는 것으로 나타났다.이는 충전깊이를 증가시킴으로서 모든 항목의 제거효율을 향상시킬 수 있음을 보여주는 것이다. 그러나 각 항목별 제거효율의 증가 정도를 살펴보면 다소 다른 양상을 볼 수 있다.

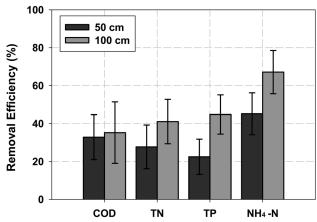


Fig. 2. Comparison of removal efficiency of COD, TN, TP and NH₄-N between 50 and 100 cm of filter depth, Each Y-axis error bar represents one standard deviation.

Table 3. Removed concentration of COD, TN, TP and NH₄-N for 50 and 100 cm depth

Items	Removed concentration (mg/L)			C/A (0/)
iterns	50 cm (A)	100 cm (B)	B - A (C)	- C/A (%)
COD	4.20	4.58	0.38	9.0
TN	4.31	6.43	2.12	49.3
TP	0.42	0.84	0.41	97.4
NH_4-N	2,28	3.41	1,13	49.6

Table 3은 충전깊이 50 cm와 100 cm 깊이의 토양여과층 을 통과하며 제거된 오염물질의 농도를 나타내고 있다. COD 의 경우는 50 cm의 충전깊이에서 제거된 농도가 4.2 mg/L 이었으나 충전깊이가 100 cm로 50 cm가 더 늘었음에도 불 구하고 제거된 농도가 4.58 mg/L로 0.38 mg/L만이 증가하 여 9%의 증가율을 나타내었다. 이러한 결과는 상부 첫 번째 여재층을 통과하면서 70~80%의 COD가 제거되었으며, 이 후 4개의 여재층을 통해서는 나머지 10~20%의 COD 제거율 증가만을 얻어 대부분의 COD 제거가 상부여재층에서 이루 어졌다는 Sato 등¹¹⁾의 실험결과와도 일치하는 것이다. 이에 반하여 TP의 경우는 50 cm의 충전깊이에서 제거된 농도가 0.42 mg/L이었으나 충전깊이가 100 cm로 증가함에 따라 0.84 mg/L로 97.4%가 증가한 것으로 나타나 거의 2배의 제 거효율 증가를 나타내었다. 이는 인의 제거기작은 주로 여 재층에 존재하는 금속수화물 성분과 인의 화학적 결합에 의 하여 제거되는 화학적 흡착에 의하여 이루어지기 때문으로 보인다.¹¹⁾ 한편 TN과 NH₄-N은 증가량이 모두 49% 정도를 보여 TP에 비하여는 작지만 COD에 비해서는 높은 증가율 을 보여주었다. 이러한 오염물질간의 충전깊이에 따른 제거 효율 변화는 오염물질의 제거 기작과 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 생물학적 제거가 큰 부분을 차지하는 COD의 경우는 활발한 미생물의 성장으로 미생물 케익이 잘 발달하여 생물학적 활성이 높은 상부 50 cm의 여재층을 통 과하면서 제거 가능한 유기물들이 대부분 제거되고 이후에 제거되는 량은 상대적으로 매우 적어짐에 따라 충전 깊이가 증가하여도 제거효율이 큰 영향을 받지 않는 것으로 보인 다. 6 이는 토양층을 이용하는 하상여과에서도 볼 수 있는 일반적인 경향이다. ^{14,15)} 이에 반하여 화학적 흡착에 전적으 로 의존하는 TP의 경우는 충전 깊이가 증가함에 따라 증가 된 충전깊이 만큼 여과수의 투수길이가 길어져 여재와의 접 촉시간(contact time)이 길어지고 접촉면적도 넓어져 더 많 은 양이 흡착되어 TP제거효율이 거의 선형적으로 증가되는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 충전깊이를 증가시키지는 않았지만 혼합토양블럭의 크기를 줄이고 개수를 늘임으로써 흡착표면적을 증가시켜 접촉시간을 늘인 경우 TP의 제거율 이 향상되었다는 Chen 등¹⁶⁾의 연구결과에서도 확인할 수 있 다. 한편, T-N과 NH₄-N의 경우는 암모니아의 이온교환과 생 물학적 질산화 그리고 탈질에 의한 질산성 질소의 제거 등, 생물학적 제거기작과 화학적 제거기작이 복합적으로 일어나 는 복잡한 질소의 거동으로 인하여 COD 및 TP와는 다소 다른 제거양상을 나타내는 것으로 판단된다.

3.2. 선속도의 영향

앞에서 살펴 본 영향인자인 충전깊이 외에도 다단식 토양여과 시스템의 오염물질 제거에 영향을 미치는 중요한 영향인자의 하나는 선속도이다. 따라서 본 절에서는 중요한 영향인자의 하나인 선속도가 오염물질의 제거에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 3에서 보듯이 여과속도가 빠른 선속도 10 m/d (Run-4)인 경우에 비

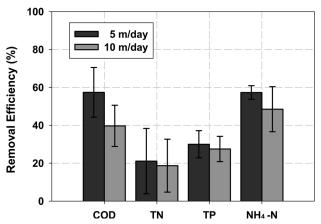


Fig. 3. Comparison of removal efficiency of COD, TN, TP and NH₄-N between 5 and 10 m/day of filtration velocity. Each Y-axis error bar represents one standard deviation.

하여 모든 항목에서 제거효율이 다소 감소하는 결과를 보여주고 있다. 이는 토양여과에서 수리학적 부하량이 증가할수록 즉, 선속도가 증가할수록 BOD의 제거율이 감소하였다는 Masunaga 등¹⁷⁾의 결과와도 일치하는 것이다. 특히 흡착으로 대별되는 인의 제거에 있어서도 선속도의 감소가 여재와의 접촉시간을 감소시켜 인의 처리농도를 상승시킨다는 Chi등¹⁸⁾의 결과에서와 같이 선속도, 즉 여과속도의 차이가 여재 내에서의 체류시간의 차이를 유발하며, 이러한 체류시간의 감소가 제거효율의 전반적인 감소현상으로 나타나는 것으로 판단된다.

이러한 추론은 Fig. 4에서 보듯이 NaCl을 tracer로 이용하여 전기전도도의 변화를 통하여 추정한 실제 체류시간이 선속도가 5 m/d에서 10 m/d로 증가함에 따라 1.4시간으로 0.6시간으로 거의 1/2 이하로 감소하는 것으로 나타나고 있어선속도의 증가가 체류시간의 감소를 유발하는 것을 알 수 있다. 이는 불포화 흐름조건에서 수리학적 부하율 즉 선속도가 증가함에 따라 함수율이 증가하였으며, 이로부터 수리학적 부하율과 체류시간은 반비례의 관계에 있다는 Sato 등¹¹⁾의 연구결과와도 일치한다. 따라서 이러한 선속도의 차이가체류시간의 차이를 유발하며 이에 따라 제거효율의 변화를 초래하는 것으로 판단된다.

한편 각 선속도의 증가에 따른 항목별 변화양상을 살펴보면, TN, T-P, NH4-N의 경우에 비하여 COD의 감소 정도가상대적으로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 앞에서도 살펴보았던 COD의 생물학적인 제거특성에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 전체 여재층에 걸친 접촉시간에 영향을받는 흡착을 주 제거기작으로 갖는 T-P, NH4-N의 경우와는 달리 앞 절에서 언급한 바와 같이 여재의 표층부에서 대부분의 제거가 이루어지는 COD의 경우는 선속도의 증가로 체류시간이 감소하는 경우 실제 생물학적인 활성이 높은 표층부에서의 체류시간은 더욱 짧아져 상대적으로 더 큰 영향을받기 때문으로 판단된다.

한편 T-N의 경우에는 선속도가 증가하여도 제거효율이 거의 변화가 없는 것으로 나타나고 있는데, 이는 생물학적으

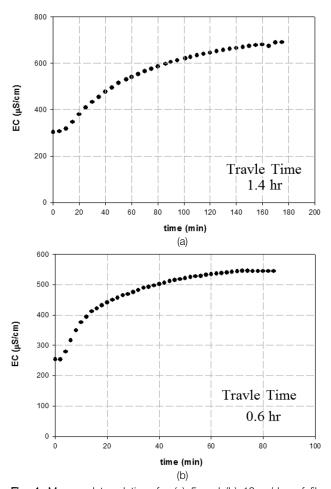


Fig. 4. Measured travel time for (a) 5 and (b) 10 m/day of filtration velocity.

로 일어나는 질산화에 의한 영향으로 판단된다. 즉 토양층 으로 이온교환에 의하여 제거된 암모니아성 질소 성분의 일 부가 토양 내에 존재하는 질산화 미생물들의 활동에 의하 여 질산화가 진행되어 질산성질소로 변환되어 수중으로 용 출되어 처리수의 질산성질소의 농도를 높이기 때문에 낮은 선속도조건에서의 암모니아성 질소의 제거가 다소 증가함 에도 불구하고 질산화에 의하여 증가된 질산성질소로 인하 여 TN의 제거효율은 변화가 없었던 것으로 보여진다. 이는 유입수의 평균 DO 농도가 7.5 mg/L로 동일하게 유입되었 으나 유출수의 평균 DO 농도는 선속도 5 m/d인 경우에는 1.3 mg/L, 선속도가 10 m/d로 증가한 경우에는 2.3 mg/L로 약 1 mg/L의 차이를 보이고 있는 점에서도 추론할 수 있 다. 즉 선속도가 감소하면 체류시간이 증가하고 그에 따라 미생물에 의한 질산화가 증가하면서 산소 소모량이 증가하 게 되어 유출수의 DO 농도가 낮은 값을 보이는 것으로 판 단된다.

이러한 결과를 종합해볼 때 선속도의 변화는 토양여과에서 체류시간을 변화시켜 생물학적 기작뿐만 아니라 흡착 및 이온교환과 같은 물리화학적 제거기작에도 영향을 미치며따라서 오염물질의 효율적 제거를 위해서는 운전인자로서여재 내에서의 체류시간의 제어가 중요할 것으로 판단된다.

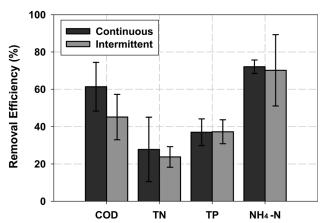


Fig. 5. Comparison of removal efficiency of COD, TN, TP and NH₄-N between continuous and intermittent operation. Each Y-axis error bar represents one standard deviation.

3.3. 연속 및 간헐운전의 영향

다단식 토양여과 시스템의 운전에 있어서 연속적인 운전 을 하는 경우 지속적인 유기물의 공급은 토양여과층에서의 미생물의 활동을 활성화시켜 생물학적 clogging 현상을 유 발할 수 있을 뿐만 아니라 미생물 활동의 활성화로 산소공 급 등에 영향을 미쳐서 오염물질의 제거에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 연속운전과 간헐운전으로 운전방법을 달리하 였을 때의 오염물질의 제거 특성을 살펴보았다. Fig. 4에서 보듯이 운전방법, 즉 연속운전과 간헐운전의 경우 COD를 제외한 모든 항목에서 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. COD 의 경우 연속운전이 간헐 운전에 비하여 제거효율이 다소 높은 값을 보이고 있으나 그 영향은 크지 않은 것으로 보이 며, 이는 연속운전에 따라 지속적인 생물학적 조건이 일정 하게 유지되어 보다 효과적으로 생물학적 기작이 일어나기 때문으로 판단된다. 특히 연속운전의 경우에는 1.5개월 연 속운전이후 점차적인 막힘현상의 발생으로 투과유량의 감 소현상을 관찰할 수 있었으나 간헐운전의 경우에는 동일한 기간 동안 막힘현상을 발견할 수 없어 막힘현상의 방지를 위해서는 간헐운전이 연속운전에 비하여 보다 유리할 것으 로 판단된다.

4. 결 론

다단식 토양여과 시스템 운전에 미치는 중요한 영향인자 로서 충전깊이, 선속도, 연속 및 간헐운전의 영향을 비교 평 가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 여재의 충전깊이 증가는 수질 항목에 관계없이 모든 항목의 제거효율을 향상시키는 것으로 나타났으나, 항목별로는 COD 보다는 TP와 NH₄-N 항목의 제거효율 증가가 상대적으로 크게 나타나, 여재 충전깊이의 증가가 오염물질과 여재와의 접촉시간을 증가시키는 역할을 하게 되어 주로 생물학적인 활성이 높은 상부층에서 제거가 주로 이루어지는 생

물학적 제거 보다는 접촉시간에 비례하는 물리화학적인 제 거에 더 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

- 2) 선속도의 증가는 체류시간을 감소시켜 전반적인 제거 효율을 저하시키는 역할을 하였으며, 특히 전체 여재층에 걸친 접촉시간에 영향을 받는 물리화학적인 기작이 중요한 TP와 NH₄-N에 비하여 여재의 표층부에서 대부분의 제거가 이루어지는 생물학적인 제거에 주로 기인하는 COD의 경우는 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다.
- 3) 연속운전과 간혈운전으로 운전방법을 달리하는 것은 모든 항목에서 큰 영향을 미치지는 않았으며, COD의 경우는 지속적인 생물학적 조건이 일정하게 유지될 수 있는 연속운전이 간혈 운전에 비하여 다소 유리한 것으로 보이나 안정적인 운전을 위해서는 막힘 현상의 가속화 등을 고려할 필요가 있다.

사사

본 연구는 환경부 Eco-STAR project(수생태복원사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

- 1. 환경부, "자연형 하천수질 정화기술 개발,"(2004).
- 신창민, 최지용, 박철휘, "도시지역에서의 토지이용별 비점오염물질 유출특성," 대한환경공학회지, 26(7), 729~735 (2004).
- 3. Uhl, M. and Dittmer, U., "Constructed wetlands for CSO treatment: an overview of practice and research in Germany," *Water Sci. Technol.*, **51**(9), 23~30(2005).
- Chung, J.-B., Kim, S.-H., Jeong, B.-R. and Lee, Y.-D., "Removal of organic matter and nitrogen from river water in a model floodplain," *J. Environ. Qual.*, 33, 1017~1023(2004).
- 5. 손대희, 정윤철, 신정훈, 정진영, 안대희, "다단토양층을 이용한 하수처리에 관한 연구," 한국물환경학회지, **20**(3), 215~222(2004).
- 6. 안규홍, 손동빈, 김승현, "하상여과 모형에서 유기물과 질소

- 의 제거," 대한환경공학회지, 27(5), 525~534(2005).
- 김호석, 김승현, "홍수터여과에서 원수공급체계의 설계요소에 대한 실험연구," 대한환경공학회지, 31(11), 957~964 (2009).
- 하현수, 김상태, 김승현, 정종배, 정병룡, 이영득, 엄진석, 지승환, "홍수터 여과 모형을 이용한 하천수중의 유기물과 질소 제거," 한국응용생명화학회지, 45(2), 84~91(2002).
- 9. 기동원, 조강우, 원세연, 송경근, 안규홍, "하천수질정화용 토양여과의 여과용량 증대와 수질 개선을 위한 친환경 여재 특성비교," 상하수도학회지, **24**(4), 453~462(2010).
- Chen, X., Luo, A. C., Sato, K., Wakatsuki, T. and Masunaga, T., "An introduction of a multi-soil-layering system: a novel green technology for wastewater treatment in rural areas," Water and Environ. J., 23(4), 255~262(2009)
- Sato, K., Masunaga, T. and Wakatsuki, T., "Water Movement Characteristics in a Multi-Soil-Layering System," Soil Science and Plant Nutrition, 51(1), 75~82(2005)
- APHA, AWWA and WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th. Ed., APHA, Washington, D.C.(1998)
- 13. Bunsri, T., Sivakumar, M. and Hagare, D., "Numerical modelling of tracer transport in unsaturated porous media," *J. of Applied Fluid Mechanics*, **1**(1), 62~70(2008).
- 14. 김승현, 정종배, 하현수, Prasher, O. S., "불포화 사질토양을 이용한 도시하수의 3차처리," 한국환경농학회지, 22(2), 111~ 117(2003).
- Kim, S. H. and Corapcioglu, M. Y., "A kinetic approach to modeling mobile bacteria facilitated groundwater contaminant transport," *Water Resour. Res.*, 32, 321~331(1996).
- Chen, X., Sato, K., Wakatsuki, T. and Masunaga, T., "Effect of structural difference on wastewater treatment efficiency in multi-soil-layering systems: Relationship between soil mixture block size and removal efficiency of selected containinants," Soil Sci. and Plant Nutrition, 53, 206~214(2007).
- Masunaga, T., Sato, K., Wakatsuki, T., Zennami, T., Fujii, S. and Wakatsuki, T., "Direct treatment of polluted river water by the multi-soil-layering method," *J. Water and Environ. Technol.*, 1(1), 97~104(2003).
- 18. Chi, N., Dong, B. and Liao Y., "Advanced phosphate removal by adsorption onto activated alum pocelain in simulation water," *Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE)*, 4th International Conference on, 1~4, (2010).