



섬유상 여재를 활용한 여과형 시설의 부유물질 제거 및 역세 효율 분석

Filtration Efficiency of Fiber Filter for Total Suspended Solid Removal and Backwash Effect

김종영* · 최윤식** · 김정호*** · 홍성훈**** · 정태인***** · 권순철*****

Kim, JongYeong*, Choi, Yunshik**, Kim, Jeongho***, Hong, Sunghoon****, Jeong, Taeln****, and Kwon, Soonchul*****

Abstract

A filtration system widely receives attention because of its excellent total suspended solid (TSS) removal efficiency. However, clogging leads to increasing head loss in a filtration system. Herein, we investigated the TSS removal efficiency of a fiber filter based on the filtration method and TSS properties to determine the performance of the filter in a lab-scale experiment. Furthermore, we found the TSS removal efficiency, head loss of the filter media, and recovery ratio of the head loss after backwashing in a pilot-scale experiment. The TSS removal efficiency was 60-80% in the lab-scale test and higher than 80% in the pilot-scale test, which met the designated standard. In addition, the low head loss (< 20 mm) and high recovery ratio of the head loss (100%) showed the excellent performance of the filtration system.

Key words : Filtration System, Clogging, TSS Removal Efficiency, Headloss

요 지

여과형 시설은 부유물질 제거에 탁월하여 많이 사용되고 있지만 폐색에 의한 손실수두 증가와 같은 문제를 내재하고 있다. 본 연구에서는 실험실규모의 실험을 통해 여과방식과 부하되는 부유물질 물성의 변화에 따른 섬유상 여재의 부유물질 제거효율을 파악하였으며 더 나아가 실증규모의 여과형시설에서 부유물질 제거효율, 여재부의 손실수두 및 역세척시 손실수두 환원율을 도출하였다. 실험실규모 실험에서 해당 여재의 부유물질 제거효율은 60 ~ 80%로 나타났으며 실증규모 실험에서는 환경부 매뉴얼 기준치 80% 이상의 조건을 충족하였다. 여재부 손실수두는 20 mm 미만이고 손실수두 환원율도 100%에 근접하며 우수한 성능을 나타냈다.

핵심용어 : 여과형 시설, 폐색, 부유물질 제거율, 손실수두

*정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정(E-mail: bellyoung121@naver.com)

Member, Master Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

**부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

Master Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

***부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

Master Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

****부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

*****딥클라우드(주) 대표

CEO, Deepcloud Corp

*****교신저자, 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 조교수(Tel: +82-51-510-7640, Fax: +82-51-513-9596, E-mail: sckwon@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

1. 서론

우리나라의 수계오염관리는 주로 점오염원에 대해 집중적으로 관리가 되어 왔으며 이로 인해 상대적으로 비점오염원에 의한 기여도가 높아지고 있는 추세다(Lee and Lee, 2009). 주로 도시의 도로 및 주거지역과 농촌의 논, 밭, 임야에서 강우유출수 형태로 발생하는 비점오염물질은 토사, 유기물질, 박테리아, 중금속을 포함하고 있으며 근원지와 발생빈도가 불분명하고 초기 세척효과로 인해 짧은 시간 내에 고농도로 유출되는 특성을 갖고 있어(Kim and Kang, 2004) 수생태계에 악영향을 미치고 있다(Kwon et al., 2017). 비점오염원은 근원지를 통제하기 어려우며 유출될 시 흐름을 예측하기 쉽지 않기 때문에 관리가 어렵다는 문제점이 있다(Kim et al., 2006). 이러한 비점오염원을 제어하기 위해 저영향개발이나 비점오염저감시설 설치를 통해 수생태계를 회복하려는 연구가 진행되고 있다(Qin et al., 2013).

비점오염저감시설은 ME (2016)의 ‘Management and Operation Manual of Nonpoint Pollutions Treatment Facility (이하 매뉴얼)’에 따라 크게 자연형시설과 장치형시설로 구분하고 있으며 장치형 시설에는 여과형(이하 여과형 시설), 와류형, 스크린형 시설 등이 포함된다. 그 중 여재를 사용하는 여과형 시설은 오염물질 제거효율이 탁월하며 상대적으로 관리 및 시공이 용이하여 비점오염원 관리가 활성화된 미국과 유럽에서도 많이 이용되고 있다(Hwang et al., 2017).

합리적인 수질관리를 위해 비점오염원에 포함된 다양한 오염물질을 제어할 필요가 있지만 특히 Adams and Papa (2000)에 따르면 유기물, 무기물을 수반하는 부유물질(Total Suspended Solid, TSS)은 최우선 관리대상으로 다루어지고 있다. 유출되는 TSS는 무강우일수, 유역특성 등에 따라 입자 크기와 같은 물리적 특성뿐만 아니라 흡착되어 있는 화학적 특성이 달라질 수 있다(Yang, 2006; Kang et al., 2010).

현재 매뉴얼에서는 장치형시설의 TSS 제거효율이 80% 이상이 되도록 규정하고 있으며, 타 오염물질에 대한 기준은 제시되어 있지 않다. 오염수 부하 후 여재부의 손실수두는 최대 10 cm 이내로 제한하고 있으며 역세척 수행 후 손실수두 환원정도를 판단하기 위해 최소 3-cycle 이상 여과실험을 수행하여 TSS 제거효율, 여재부의 손실수두 및 손실수두

환원을 조건을 만족하는지 평가하고 있다.

본 연구에서는 다량의 TSS를 포집할 수 있는 다공성 섬유상 여재를 lab-scale 컬럼 실험을 통해 부하되는 여과방식(상향류, 하향류), 유입 TSS 입자크기, 농도 및 누적 고형물 부하량을 고려하여 TSS 제거 성능을 평가하였다. 또한 동일한 여재가 충전된 pilot-scale 여과형 시설을 매뉴얼에 따라 3-cycle TSS 부하 및 역세척 실험을 수행하여 각 cycle의 TSS 제거효율 및 역세척에 따른 손실수두의 변화를 분석을 통해 본 시설의 실증 적용 가능성을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 실험에 사용된 여재

실험에 사용된 여재는 (주)젠폴에서 제작한 정육면체 형태의 여재로 물리적특성은 Table 1과 같다. 물보다 낮은 밀도 특성상 역세척시 하방에서 공급되는 공기에 의해 여재에 활발한 교반이 발생하게 되기 때문에 고형물 탈리에 유리할 것으로 판단된다. 다공성형태로 다량의 고형물을 여과할 수 있으며 투수계수는 3.59 cm/s로 여과형 시설 선속도 20 m/h의 6배 이상의 높은 투수속도로 폐색이 진행되어도 손실수두가 크지 않을 것으로 예상된다.

2.2 여재 평가를 위한 lab-scale 컬럼 실험

Pilot-scale 여과형 시설을 평가하기에 앞서 시설에 충전될 여재의 TSS 제거 효율을 파악하기 위해 lab-scale 컬럼 실험을 수행하였다. 유입시료는 매뉴얼 조건에 따라 입자크기 63 μm 이하 80% 및 63 ~ 200 μm 20% 구성비 조건을 충족 하도록 규사를 미분화한 D₅₀=35 μm인 시료 1(Fig. 1)과 D₅₀=130 μm인 시료 2(Fig. 2) 그리고 시료 1과 시료 2를 8:2 비율로 혼합한 시료 3을 사용하였다. 교반시스템은 10ton 규모의 교반조, 3-blade 교반장치 및 전자식 유량 및 교반 제어장치로 구성되어 있다(Fig. 3(a)). 교반조에 시료를 투입하여 300 rpm의 교반속도로 목표농도에 맞도록 제조하였으며 컬럼에 선속도 20 m/h의 유량으로 공급하였다. lab-scale 컬럼 시스템(Fig. 3(b))은 20 cm × 20 cm 정사각형 단면과 높이 55 cm 형상이며 내부에 여재를 다짐 없이 30 cm 높이로 충전 하였다. 실험조건은 Table 2와 같이 4가지 경우로 나누어 유입수의 여과방식(case1)을 고려한 실험,

Table 1. Properties of Fiber Filter

Item	Result	Method
material	polyester	-
shape	square (1.5 × 1.5 × 1.5 cm)	-
apparent density	33.2 kg/m ²	KS M 6672 : 2016
number of cells	16 EA / 15 mm	KS M 6579 : 2005
hydraulic conductivity	3.59 cm/s	KS K ISO 11058 : 2011

유입시료의 농도(case2)와 입경(case3)을 고려한 실험 그리고 누적 고행물 부하량(case4)을 고려한 장기 실험을 수행하였다. (1) case1은 유입수의 여과방식에 따른 여재의 TSS 제거효율을 평가하기 위해 시료 3을 사용하여 목표농도 300 mg/L의 유입수를 컬럼에 상향류 및 하향류 방식으로 각각 1시간씩 실험하였다. 상향류 실험은 하부를 통해 유입시켜 여재를 통과한 유출수를 여재부 상단 5 cm 높이에서 채수하였으며 하향류 실험은 여재의 상층부에 유입수를 분사하여 여재를 통과한 유출수를 하부에서 채수하였다. (2) case2는 유입시료의 입자크기에 따른 TSS 제거 효율을 평가하기 위해 시료 1, 시료 2 그리고 시료 3 총 3가지 경우에 대해 실험하였다. (3) case3은 농도에 따른 여재의 TSS 제거 효율을 평가하기 위해 목표농도 100, 200, 300 mg/L 3가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. (4) case4는 시설에 충전되는 여재는 다량의 입자상물질이 부하되어도 여과할 수 있는 능력이 있어야 한다. 따라서 시료 3을 사용하여 총 8시간의 장기 실험을 수행하였으며 누적 고행물 부하량에 따른 TSS 제거효율을 평가하였다. TSS 측정은 수질오염 공정실험기준(ME, 2017)에 따라 수행하였으며 누적 고행물 부하량(L)은 Eq. (1)과 같이 계산하였다.

$$L(kg/m^2) = \frac{Q \times C \times T}{A} \quad (1)$$

- Q: 유입유량 (m³/min)
- C: 유입농도 (mg/L)
- T: 지속시간 (min)
- A: 여재면적 (m²)

2.3 Pilot-scale 여과형 시설 실증 실험

Lab-scale 컬럼 실험은 유입수의 조건에 따른 단일 여재의 TSS 제거 성능 평가였다면 실증실험은 본 여재를 활용한 pilot-scale 여과형 시설(Fig. 3(c))을 매뉴얼(ME, 2016)에 따라 TSS 제거효율, 피에조 미터를 활용한 여재부의 손실수두 그리고 역세척시 부유물질 탈리에 따른 손실수두 환원능력 등을 고려하여 평가하였다. 유입입자는 시료 3을 사용하였고 이를 교반시스템에서 혼합하여 목표농도 200 ~ 300 mg/L로 유입수를 제조하였으며 시설에 유입수를 선속도 20 m/h로 공급하였다. 덩클라우드(주)의 여과형 시설은 전처리조, 스크린, 여재부로 설계 되어있으며 여재부의 하부에는 air blower가 그리고 상부에는 pump가 설치되어 있어 역세척시 수세척과 공세척이 가능하도록 설계되어있다.

Table 2. Experimental Conditions

Parameter	case1	case2	case3	case4
Flow direction	Upward Downward	Upward	Upward	Upward
Average concentration (mg/L)	283 295	326 310 283	105 213 284	289
Particle size (μm)	63~150	~63 63~150 150~	63~150	63~150
Flow rate (L/min)	13.3	13.3	13.3	13.3
Sampling time (min)	10	10	10	60
Run time (min)	60	60	60	480

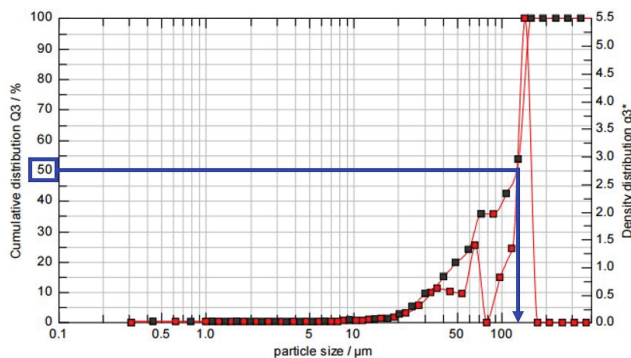


Fig. 1. Particle Size Distribution of Particle 1

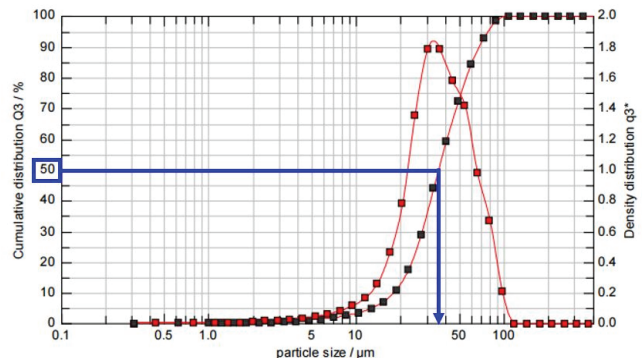


Fig. 2. Particle Size Distribution of Particle 2

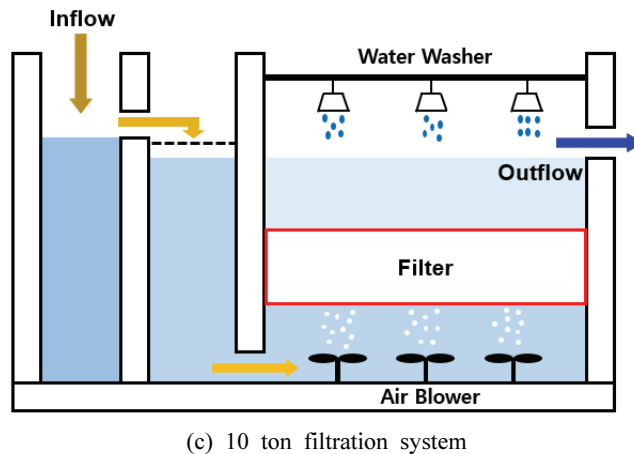
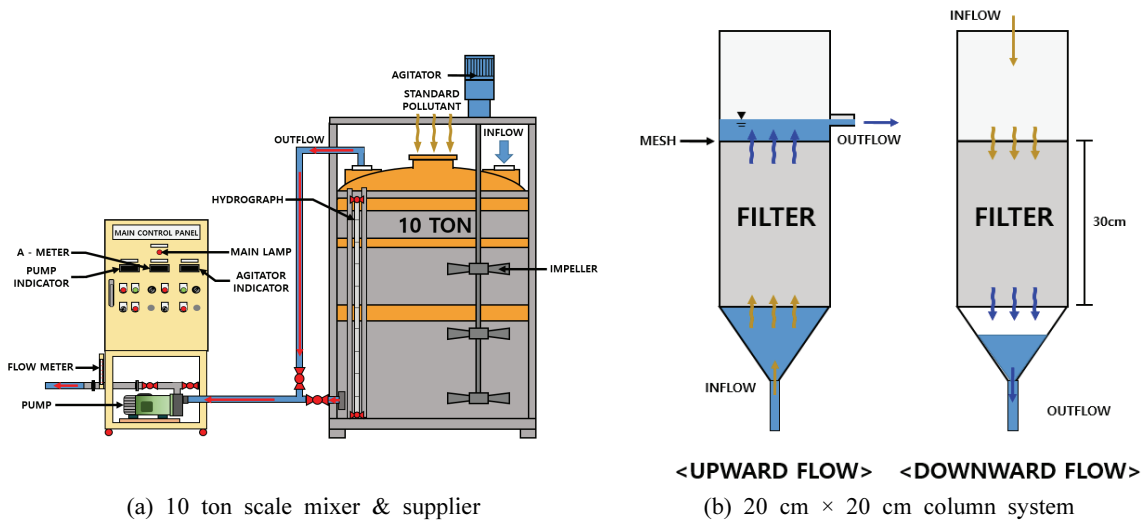


Fig. 3. Scheme of Mixer & Supplier, Column System and Filtration System

3. 실험 결과

3.1 Lab-scale 컬럼 실험을 통한 TSS 제거효율 평가

3.1절에서는 단일 여재의 TSS 제거 성능평가를 위해 여과 방식, 농도 그리고 입경 조건을 변경하여 실험하였으며 8시간 장기 실험을 수행하였다.

3.1.1 유입수 여과방식에 따른 TSS 제거효율 평가

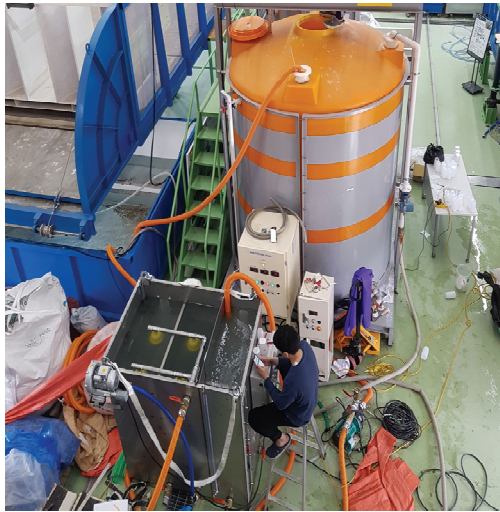
일반적으로 비점오염저감시설에서 하향류 방식은 TSS 제거효율이 높으나 여재의 폐색이 빠르게 일어나는 단점이 있으며 상향류 방식은 TSS 제거효율은 낮으나 폐색현상이 적은 특성이 있다고 보고된다(Lee et al., 2015).

3.1.1에서는 여과방식을 달리하여 본 여재의 TSS 제거효율을 비교하였으며 결과는 Figs. 5, 6과 같다. 상향류의 경우 TSS 평균농도는 283 mg/L으로 목표농도에 근접하였으며 TSS 제거효율은 53 ~ 73%로 단일 여재만으로는 기준치 80%에는 미달하였으며 전처리조 또는 추가적인 복합여재

시스템이 병행되어야 할 것으로 사료된다.

하향류의 경우 유입수의 TSS 평균농도는 295 mg/L로 만족스러운 결과이나 유출수의 TSS 제거효율은 7% 이하로 여과작용을 하지 못한 것으로 나타났다. 또한 제거효율이 음의 값을 나타내기도 하였는데 이는 시스템 내부에 축적되어 있던 TSS가 유압을 견디지 못하고 일시적으로 유출된 것으로 보인다. 상향류와 달리 하향류 실험은 공극이 크고 투수계수가 높은 섬유상 여재일 때, 상향류 방식과 동일한 유량조건에서 포화상태를 유지하기 어려우며 컬럼 내부에 일정 수위가 형성되지 않아 특정 유로에만 흐름이 발생하였다. 일정 단면적이 형성되지 않는 흐름에서는 선속도 개념 적용이 불가능하고 빠른 흐름으로 인한 contact time의 감소로 여과효과가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

따라서, 이러한 수위가 형성되기 위한 후처리조가 있지 않은 단일 컬럼체에서는 하향류 여과방식으로는 실험 수행이 어렵다고 판단되어 이후 실험은 상향류 조건을 적용하여 실험하였으며 이는 pilot-scale 여과형 시설 실험에도 동일하게 적용된 여과방식이다.



(a) 10 ton scale mixer & supplier



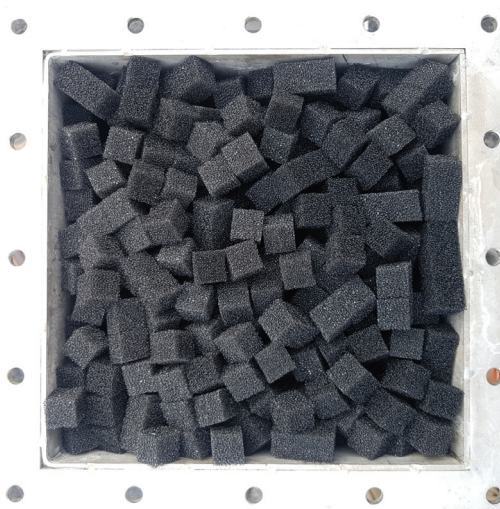
(b) control panel of mixer



(c) 20 cm × 20 cm column system



(d) 10 ton filtration system



(e) fiber filter before experiment



(f) fiber filter after experiment

Fig. 4. Scheme of Mixer & Supplier, Column System and Filtration System

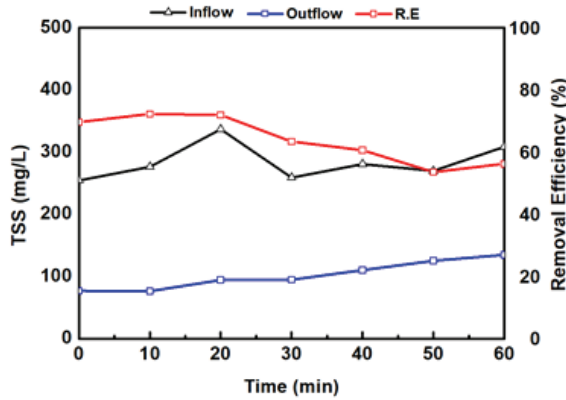


Fig. 5. TSS Removal Efficiency (upward flow)

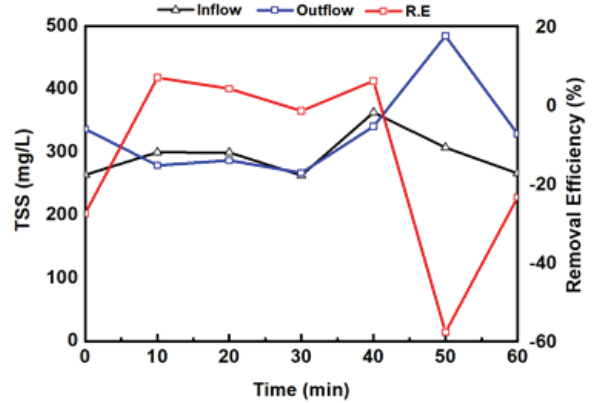


Fig. 6. TSS Removal Efficiency (downward flow)

3.1.2 유입입자 크기에 따른 TSS 제거효율 평가

여재를 사용하는 여과형 시설의 경우 유입입자 크기는 여재의 물리적 특성과 큰 상관관계가 있다(Lee et al., 2018). 실험 결과는 Figs. 7부터 9와 같다. 유입입자의 중앙입경이 작은 경우(35 μ m, 시료 1) 유입농도 326 mg/L에서 TSS 제거효율은 시간에 따라 약소하게 지속적으로 감소하는 반면 입자의 중앙입경이 상대적으로 큰 경우(130 μ m, 시료 2)에는 유입농도 310 mg/L에서 TSS 제거효율이 약소하게 증가하는

경향이 나타났다. 이는 입자의 크기가 작은 경우 공극이 폐색됨에 따라 공극의 크기가 줄어들었을 때도 여과되지 못할 확률이 더 높으며 여재간의 간극으로 유출될 확률이 높다고 판단된다. 반면 입자가 큰 경우 여재의 공극 내에서 여과될 확률이 높으며 공극이 폐색되면서 여과작용이 더 뚜렷해진다고 판단된다. 두 시료를 혼합(시료 3)한 경우에는 유입 TSS 평균농도 283 mg/L에서 TSS 제거효율 53 ~ 73%로 나타났으며 약 20분은 제거효율이 상승하다가 이후에는

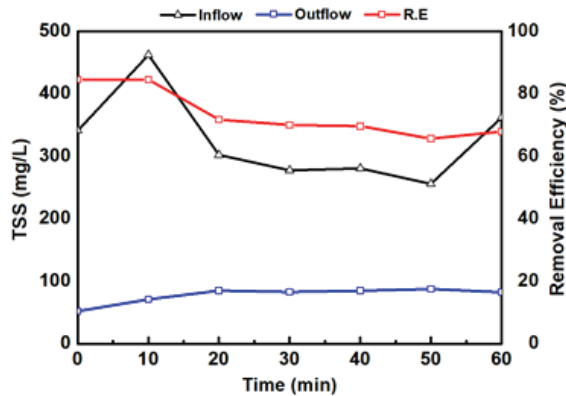


Fig. 7. TSS Removal Efficiency (particle 1)

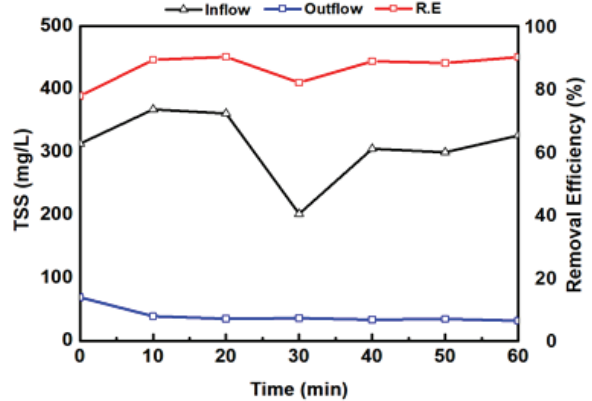


Fig. 8. TSS Removal Efficiency (particle 2)

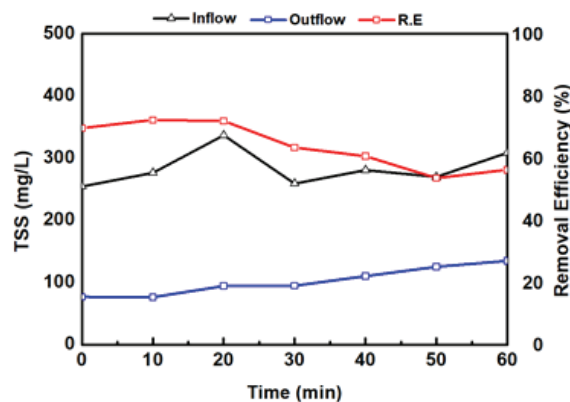


Fig. 9. TSS Removal Efficiency (mixed particle)

감소하는 경향이 나타났다. 여재의 공극이 폐색됨에 따라 처리효율이 단기적으로 상승하였지만 이후 하락하는 경향으로 보아 앞선 2가지 경우의 결과가 복합적인 양상으로 나타나는 것으로 판단된다. 대부분의 경우에서 TSS 제거효율은 80% 미만이었으나 유입입자 크기에 상관없이 60% 이상의 결과가 나타나는 것으로 보아 다양한 입자크기 조건에서도 본 여재의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

3.1.3 유입시료의 농도에 따른 TSS 제거효율 평가

비점오염물질은 무강우일수가 길수록 유출수의 농도가 높아진다(Kang et al., 2019). 우리나라 강우는 여름철에 집중되어 있어 연중 무강우일수 편차가 크며 따라서 유출되는 비점오염물질의 농도 편차도 크기 때문에 비점오염저감 시설은 어떠한 농도 조건일 때도 TSS를 제거할 수 있어야 한다.

본 절에서는 동일한 입경조건(시료 3)에서 농도에 따른 TSS 제거효율을 평가하였다. 매뉴얼에서는 유입수의 농도를 150 ~ 350 mg/L로 규정하고 있지만 경향성을 파악하기 위해 편의상 목표농도 100, 200, 300 mg/L 3가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 결과는 Figs. 10부터 12와 같다. TSS 평균농도가 각각 105, 213, 284 mg/L인 유입수가 유입된

경우에는 TSS 제거효율은 57 ~ 84, 62 ~ 79, 53 ~ 72%로 나타났다. 저농도 조건(105 mg/L)에서 TSS 제거효율이 약소하게 높게 나타났으나 농도별로 큰 차이는 나타나지 않았다. 대부분의 경우에서 TSS 제거효율은 80% 미만이었으나 농도 조건의 변화에도 60% 이상의 결과가 나타나는 것으로 보아 다양한 농도조건에서도 본 여재의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

3.1.4 누적 고형물 부하량에 따른 TSS 제거효율 평가

고형물 부하에 따른 TSS 제거효율 실험 결과는 Fig. 13과 같다. 초반 약 1시간 경과 후 누적 고형물 부하량 약 6 kg/m²까지는 TSS 제거효율이 약상승 하였으며 누적 고형물 부하량이 약 19 kg/m²이 되는 3시간 경과 시점까지는 효율이 유지 되었다. 이후 누적 고형물 부하량이 약 24 kg/m²이 되는 4시간 이후부터는 급격히 하락하여 효율이 약 43%까지 저하되었으며 최종 46 kg/m²이 부하되는 8시간째에는 22%로 여재의 기능을 상실하였다. 초반 약 1시간 동안은 여재의 공극이 폐색되면서 작아진 공극에 의해 여과작용이 더 활발하게 작용하여 TSS 제거효율이 상승하는 것으로 보인다. 4시간 이후부터는 공극의 입자 수용능력이 한계에 이르러 유입수 내의 입자가 여과되지 못하고 그대로 유출되는 것

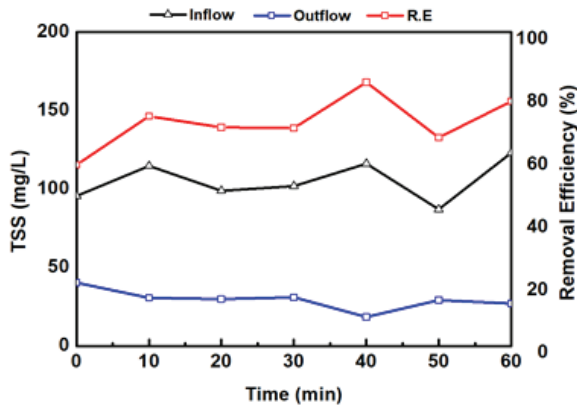


Fig. 10. TSS Removal Efficiency (100 mg/L)

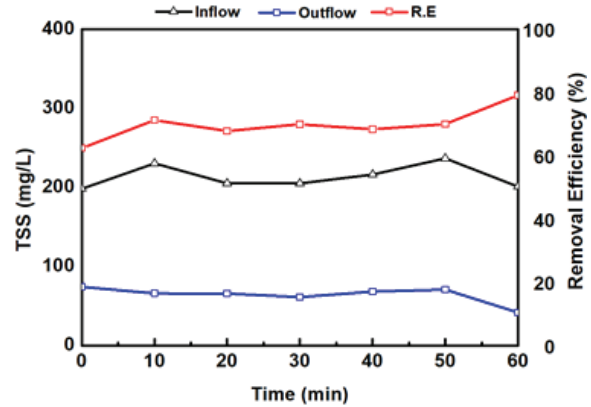


Fig. 11. TSS Removal Efficiency (200 mg/L)

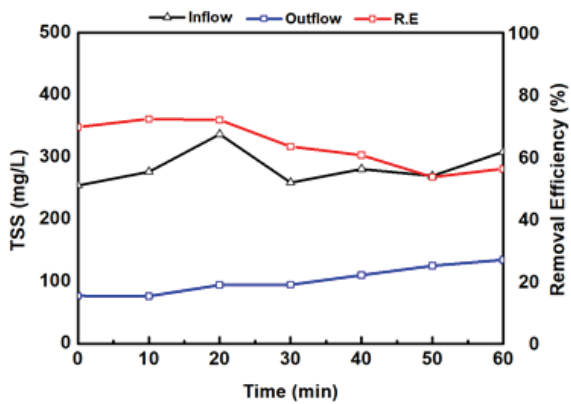


Fig. 12. TSS Removal Efficiency (300 mg/L)

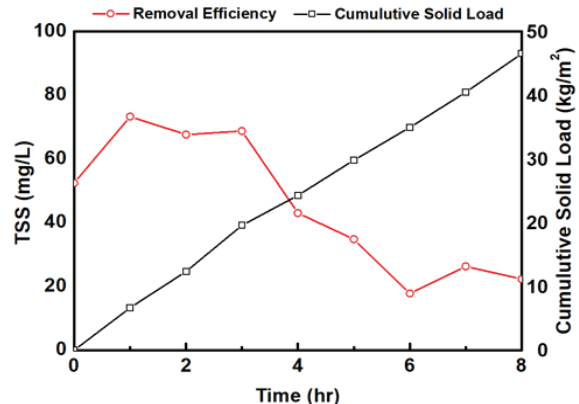


Fig. 13. TSS Removal Efficiency by Solid Load

로 보인다. 공극이 많은 여재 특성상 다량의 고형물을 여과할 수 있는 것으로 판단되며 19 kg/m²의 입자가 부하되기 전에 역세척을 수행하여 입자상 물질 탈리를 통해 공극 회복이 필요할 것으로 보인다. 또한 단일 여재의 TSS 제거효율은 80% 미만으로 나타났으나 장기실험 결과 19 kg/m²의 다량의 입자가 유입되어도 제거효율이 크게 저하되지 않는 것으로 보아 많은 양의 고형물이 부하되는 조건에도 해당 여재의 탁월한 TSS 제거효율을 확인하였다.

3.2 Pilot-scale 여과형 시설 TSS 제거효율 평가

앞선 3.1절에서는 다양한 변수를 고려한 lab-scale 컬럼 실험을 통해 시설에 충전될 섬유상 여재의 적용 가능성에 대해 평가하였다. 약 60 ~ 80% TSS 제거효율을 보였으며 단일 여재만으로는 기준치 80%에 못 미치지만 여과형 시설의 전처리조, 스크린, 여과방식 등의 조건을 고려했을 때 잠재적인 적용 가능성을 가진다고 판단되어 본 여재를 pilot-scale 여과형 시설에 적용해 보았다.

3.2.1 누적 고형물 부하량에 따른 TSS 제거효율 평가

해당 여재가 충전된 여과형 시설의 TSS 제거효율, 손실수두 및 손실수두 환원율을 평가하기 위해 매뉴얼에 따라 실험을 수행하였다. Figs. 14(A)부터 14(c)와 같이 각 cycle마다 2시간씩 실험을 수행하였으며 유입수 부하 후에 역세척을 수행하였다. 19 ton/h의 유량으로 유입수 평균농도 335, 266, 257 mg/L로 유입되었으며 TSS 제거 효율은 각각 77 ~ 90, 78 ~ 92, 77 ~ 93%로 나타났다. 3.1절의 단일 여재의 성능을 평가 할 수 있는 컬럼 실험과 달리 전처리조 및 스크린이 갖춰진 여과형 시설에서 TSS 제거효율이 확연히 높게 나타났으며 각 2시간 cycle에서 TSS 제거 효율의 기능 저하 없이 안정적으로 나타났다. 매뉴얼의 유입수 농도, 선속도 조건에서 평균 80% 이상의 TSS 처리 효율을 충분히 만족하였다. Fig. 13(d)에서는 각 cycle별로 누적 고형물 부하량에 따른 TSS 제거효율을 나타냈으며 각 cycle마다 총 12.36, 9.71, 9.40 kg/m²의 고형물이 부하되었으며 각각 평균 82.68, 85.74, 83.39%의 TSS 제거 효율을 나타냈다. 3-cycle 동안 총 약 31 kg/m²의 고형물이 부하 되었을 때 TSS 제거 효율이 안정적으로 80% 이상 유지되는 반면 컬럼 실험에서는 같은 부하량일 때 약 20% 제거 효율을 보였다. 이는 여과형 시설에서 역세척 운전시 여재의 공극에서 고형물 탈리가 충분히 이루어져 여재의 기능을 회복한 것으로 판단된다.

3.2.2 역세척 후 손실수두 환원율 평가

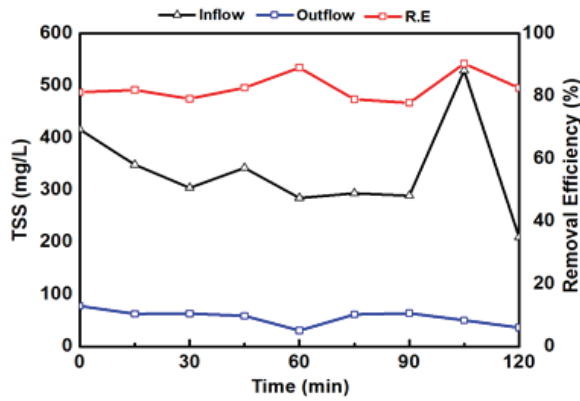
여과형 시설의 안정적인 운전과 장기적인 유지관리를 위해서 역세척 효율은 중요한 설계인자이다. Fig. 14(e)는 고형물 부하시 손실수두와 역세척 운전 후 손실수두 환원율 나타낸 것이다. 매뉴얼은 고형물이 4 ~ 6 kg/m²의 150%

내에서 부하 되었을 때 손실수두는 10 cm 이내여야 한다고 규정하고 있다. 다공성이며 투수능이 큰 여재 특성상 손실수두가 작은 것이 특징이며 실제 모든 경우에서 20 mm 미만으로 매뉴얼 기준치(<10 cm)에 매우 충족한다. 세 번의 고형물 부하 실험 수행에서 최종 손실수두는 15 mm → 17 mm → 19 mm로 증가되는 경향이 있었지만 역세척 수행시 손실수두 환원율은 100%에 근접하였으며 이는 공극 내 충분한 고형물 탈리가 이루어졌으며 여재의 재배치를 통해 여재의 기능이 회복되었다고 볼 수 있다. 따라서 본 여재를 사용한 여과형 시설은 역세척을 통해 장기적인 시설 유지관리가 가능할 것으로 사료된다.

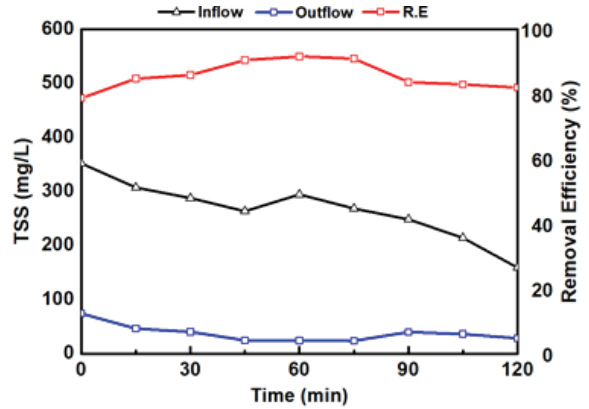
4. 결론

본 연구에서는 섬유상 여재를 활용하여 컬럼실험을 수행하였으며 유입입자의 다양한 조건(여과방식, 입자크기, 농도, 누적 고형물 부하량)을 고려하여 TSS 제거효율을 분석하였다. 또한 해당 여재가 충전된 여과형 시설을 매뉴얼에 따라 TSS 제거효율, 여재부의 손실수두, 역세를 통한 손실수두 환원율을 평가하여 해당 시설의 현장적용 가능성을 검토하였으며 주요 분석결과는 다음과 같다.

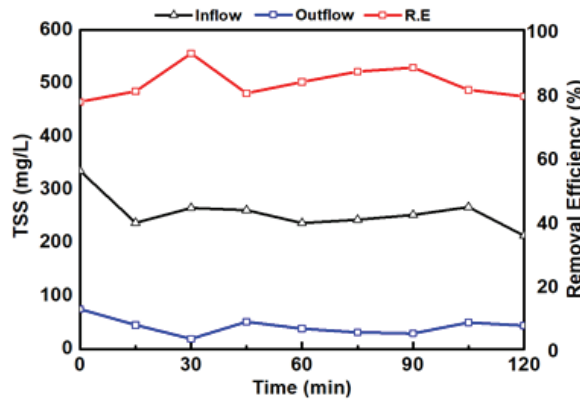
- (1) Lab-scale 컬럼 실험결과 상향류 여과방식일 때 유입수 TSS 평균농도는 283 mg/L에서 TSS 제거효율은 53 ~ 73%로 나타났다. 하향류 여과방식은 투수능이 높고 밀도가 낮은 여재 특성상 컬럼 내부에 포화상태를 유지하기 어려우며 일정 수위가 형성되지 않아 안정적인 TSS 처리가 힘들다고 판단되어 이후 실험은 상향류 여과방식으로 진행하였다.
- (2) 유입수 내의 입자상 물질의 크기가 D₅₀=35 μm인 경우 TSS 제거효율은 65 ~ 85%로 나타났으며 시간이 지남에 따라 약소하게 감소하였으며 D₅₀=130 μm인 경우 TSS 제거효율은 77 ~ 91%로 시간이 지남에 따라 약소하게 상승하였다. 입자가 작은 경우 여과될 확률이 낮으며 폐색이 진행되어도 여재의 간극 사이로 유출될 확률이 높으며 입자가 큰 경우 여과 확률이 높으며 폐색이 진행될수록 공극이 줄어들어 여과확률이 높아지는 것으로 판단된다. 두 시료가 혼합된 경우에는 TSS 제거효율이 53 ~ 72%로 시간이 지남에 따라 일정한 경향이 없으며 앞선 두 결과의 복합적인 양상으로 나타나는 것으로 판단된다.
- (3) 유입수 TSS 평균농도 105, 213, 284 mg/L가 유입된 경우에 TSS 제거효율은 57 ~ 84, 62 ~ 79, 53 ~ 72%로 나타났다. 저농도일 때(105 mg/L) TSS 제거효율이 약소하게 높은 것으로 보이나 농도별로 큰 차이는 없다고 판단되며 전체적으로 평균 60% 이상의 제거 효율을 나타냈다.



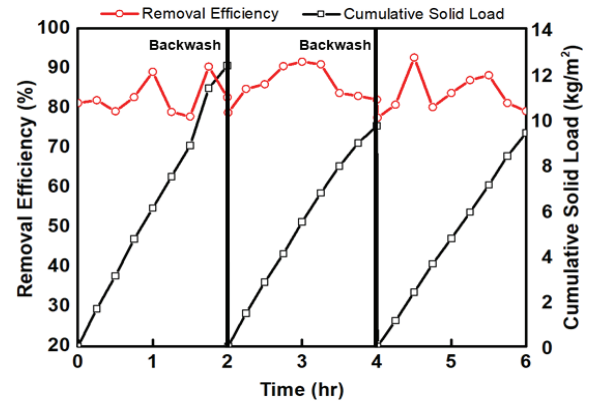
(a) TSS removal efficiency (cycle 1)



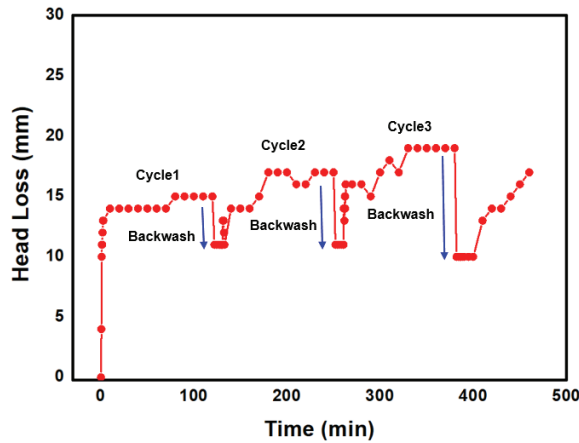
(b) TSS removal efficiency (cycle 2)



(c) TSS removal efficiency (cycle 3)



(d) TSS removal efficiency by solid load at each cycle



(e) Headloss recovery after backwash at each cycle

Fig. 14. TSS Removal Efficiency at Pilot-scale Application

(4) 누적 고형물 부하량 약 6 kg/m^2 까지는 TSS 제거효율이 약상승 하였으며 누적 고형물 부하량이 약 19 kg/m^2 이 되는 3시간 경과 시점까지는 효율이 유지되었다. 이후 누적 고형물 부하량이 약 24 kg/m^2 이 되는 4시간 이후부터는 급격히 하락하여 효율이 약 43%까지 저하되었으며 최종 46 kg/m^2 이 부하되는

8시간째에는 22%로 여재의 기능을 상실하였다. 해당 여재는 공극이 많아 다량의 고형물을 여과할 수 있는 것으로 판단된다.

(5) 해당 여재를 충전한 pilot-scale 여과형 시설의 평균 TSS 제거 효율은 82 ~ 85%로 나타났으며 단일 여재 컬럼 실험보다 전처리조 및 스크린이 포함된 여과형

시설에서 더 높은 효율을 나타내었으며 매뉴얼에서 제시하는 TSS 제거효율 80% 이상의 조건을 충분히 만족하였다. 또한 여재부의 손실수두는 20 mm 미만으로 기준치 10 cm 이내였으며 역세척 운전시 100%에 근접하는 손실수두 환원율을 나타내는 것으로 보아 장기적인 시설 유지가 가능할 것으로 판단된다.

- (6) 섬유여재가 충전된 여과형 시설의 평균 TSS 제거 효율은 82 ~ 85%, 손실수두는 20 mm 미만, 손실수두 환원율은 100%에 근접하였다. Kim et al. (2017)은 점토를 가공한 입자상 여재를 사용하여 여과형 시설에 적용하였으며 평균 TSS 저감효율 83.4%, 손실수두는 3 ~ 4 cm, 환원율은 92 ~ 95%로 보고하였다. 본 실험에 사용된 섬유상 여재는 입자상 여재 대비 비슷한 TSS 제거 효율 능력을 가지나 낮은 손실수두와 뛰어난 손실수두 환원율을 가진 것으로 보이면서 매립하여 시공하는 여과형 시설의 특성상 장기적 유지관리에 큰 이점을 가진다고 판단된다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A2C2008733).

References

- Adams, B.J., and Papa, F. (2000). *Urban stormwater management planing with analytical probabilistic models*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Hwang, Y., Seo, Y., Kim, H., Roh, K., Shin, H., and Kim, D. (2017). Optimization of operation and backwashing condition for an upflow stormwater filtration system utilizing ceramic media. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 39, No. 8, pp. 478-488.
- Kang, K., Kim, J., Jeon, H., and Byun, I. (2019). Evaluation of the efficiency of a combination media filter in the removal of nonpoint source pollution. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 1, pp. 351-359.
- Kang, M., Choi, B., and Yu, J. (2010). Loading characteristics of non-point source pollutants by rainfall: Case study with cherry tree plot. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 20, No. 4, pp. 401-407.
- Kim, L., and Kang, J. (2004). Characteristics of first flush in highway storm runoff. *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 20, No. 6, pp. 641-646.
- Kim, S., Kim, Y., Kang, S., Yun, S., and Kim, S. (2006). Runoff characteristics of non-point sources on the stormwater. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 28, No. 1, pp. 104-110.
- Kim, T., Lee, J., Lee, D., Shin, H., Kim, H., and Kwon, S. (2017). Verification of the filter media applied to filter type facility considering the treatment efficiency factor. *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 33, No. 5, pp. 572-579.
- Kwon, H., Shin, S., Kim, G., Kim, Y., Shin, D., and Im, T. (2017). The calculation of NPS load per unit area in paddy fields to the Nakdong River basin. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 3, pp. 409-419.
- Lee, B., Kim, L., and Goo, B. (2018). Clogging characteristics of stormwater infiltration system according to filter media conditions. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 3, pp. 391-398.
- Lee, H., and Lee, S. (2009). Runoff characteristics of stormwater in small city urban area. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 31, No. 3, pp. 193-202.
- Lee, J., Yang, S., and Bang, K. (2015). The performance of pollutant removal using nonpoint treatment filtration device and analysis of the filter backwashing effect. *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 31, No. 5, pp. 523-532.
- Ministry of Environment (ME). (2016). *Installation, management and operation manual of nonpoint pollutions treatment facility*. Ministry of Environment, Korea.
- Ministry of Environment (ME). (2017). *Standard of water pollution process test*. Ministry of Environment, Korea.
- Qin, H., Li, Z., and Fu, G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, Vol. 129, pp. 577-585.
- Yang, H. (2006). Runoff characteristics of non-point source pollutants in storm event: Case study on the upstream and downstream of Kokseong River, Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 41, No. 4, pp. 418-434.

Received	June 17, 2019
Revised	June 18, 2019
Accepted	June 24, 2019