여과형 비점오염시설의 역세척시 여재 구성별 수리학적특성 및 처리효율 분석

Analysis of Hydraulic Characteristics and Treatment Efficiency by Filter Media Composition During Backwashing of Filtration-Type Non-Point Pollution Facilities

박인건* · 이정민** · 김하룡***

Park, Ingun*, Lee, Jungmin**, and Kim, Hayong***

Abstract

In this study, the hydraulic characteristics and pollutant treatment efficiency during backwashing were analyzed through laboratory-scale hydraulic model experiments for filtration-type non-point pollution reduction facilities. The filter media used in the experiment were analyzed by calculating the change in head loss for single or complex arrangements of wood chips (WC), sand (SA), and bottom ash (BA). These are commonly used to improve the adsorption mechanism in non-point pollution reduction facilities, from which the pollutant treatment efficiency was derived. The SS treatment efficiency experiments for each filter media layer were conducted with SA+WC (WC 0.3 m in the upper layer, SA 0.3 m in the lower layer) and SA+BA (SA 0.3 m in the upper layer, BA 0.3 m in the lower layer), and the removal efficiency was greater than 80%, indicating good efficiency. In the case of SA+BA, analysis showed a high removal efficiency of 87.4% at a linear velocity of 20 m/hr.

Key words : Hydraulic Model Experiments, Nonpoint Pollutants Treatment Facility, Backwashing

요 지

본 연구에서는 비점오염저감 시설 중 여과형 시설에 대해 Lab Scale의 수리모형실험을 통해 역세척 시 수리학적 특성과 오염물질 처리효율을 분석하였다. 실험에 사용된 여재는 비점오염저감 시설에서 흡착 기작의 향상을 위해 보편적으로 적용되고 있는 우드칩, 모래, 바텀애쉬에 대하여 단일 여재 및 복합 여재에 대해 여재 배치별 손실수두 변화를 산정하여 수리학적특성을 분석하였으며 오염물질 처리효율을 도출하였다. 여재층 별 SS 처리효율은 우드칩(상층 0.3 m) + 모래(하층 0.3 m), 모래(상층 0.3 m) + 바텀애쉬(하층 0.3 m)로 진행하였으며, 제거효율이 80% 이상으로 양호한 효율이 나타났으며, 모래 + 바텀애쉬의 경우 선속도 20 m/hr에서 87.4%의 높은 제거 효율을 보이는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 수리모형실험, 비점오염저감 시설, 역세척

1. 서 론

비점오염원이라 함은 도시, 공사장과 같은 불특정 장소에서 불규칙하게 수질오염물질을 배출하는 배출원을 말한다.

강우유출수 등에 의한 다수의 비점오염원에 대한 광역적 수질오염이 갈수록 심화되고 있는 가운데 국내의 경우 불투수면 비율의 증가로 인하여 강우 초기에 오염물질이 다량 유출되는 초기유출(first flash)현상이 두드러지며, 특히 도시

*정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 건설기술연구실 연구원(E-mail: ingun@lh.or.kr)

Member, Researcher, Department of Construction Environment Research Land & Housing Institute

**정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 건설기술연구실 수석연구원(E-mail: andrew4502@lh.or.kr)

Member, Research Fellow, Department of Construction Environment Research Land & Housing Institute

***교신저자, 정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 건설기술연구실 책임연구원(Tel: +82-42-866-8407, Fax: +82-42-866-8431, E-mail: civilkhy@lh.or.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Research Fellow, Department of Construction Environment Research Land & Housing Institute

지역에서 발생하는 비점오염물질은 고형물, 유기물, 영양염류 외에도 중금속과 Poly Aromatic Hydrocarbons (PAHs) 등의 독성물질을 포함하고 있어 수계를 오염시키는 주된 원인 중의 하나이다(Kang, 2005). 수질오염에 가장 영향을 미칠 것 같은 비점오염원은 농지에 남은 비료와 농약 39.1%, 공사현장 24.4%, 도로에 쌓인 오염물질 22.1% 순으로 조사되었다(Gyeonggi Research Institute, 2014). 이에 정부도 수질보전계획 수립 시 비점오염원 관리대책을 포함하도록 하고, 일정 규모 이상의 사업장에 대해서 비점오염원 관리를 의무화하여 연간 발생하는 SS 오염부하의 80% 이상을 처리기준으로 제시하였으며(Ministry of Environment, 2016) 2011년 이후부터는 전국적으로 비점오염원 저감사업을 추진하고 있다. 강우유출수는 대표적인 비점오염원으로서 발생량이 불규칙하고 많은 종류의 유해물질이 함유되어 있으며 유량과 수질이 극단적으로 변동하므로 이를 효율적으로 제어하기 위해서는 기존 정수 또는 하수처리 공정과는 상이한 방법으로 설계된 시설이 필요하다(Yi and Kim, 2014). 일반적으로 도로나 주차장에서 배출되는 강우유출수의 오염물질 농도는 TSS가 약 100 mg/L, 중금속인 Cu, Pb, Zn이 250 µg/L 이상의 농도를 보이고 있다. 또한 생물축적을 통해 생태계에 악영향을 주는 As, Cd, Hg과 같은 미량 유해물질도 함께 배출되는 것으로 보고되고 있다(Kim and Lee, 2009; Park et al., 2009). 여과형 시설의 SS 처리효율은 타오염물 처리효율의 지표로도 이용될 수 있을 것으로 판단되므로 역세척시 여과형 시설의 여재구성에 따른 수리학적 특성 및 처리효율에 대한 기준 제시가 필요하다. 그러나 기술개발에 앞선 제도의 도입으로 국내에 설치된 비점오염저감 시설은 낮은 오염물질 저감효율, 유지관리 등의 어려움이 있으며 세부 설계기준이 명확하지 않아 현장에서 적용하기에 어려운 실정이다. 또한 법률이 제정되고 매뉴얼에 따라 비점오염원의 설치와 운용이 이루어지면서 각 요소 기술들의 문제점이 대두되고 이를 개선하기 위한 방안들이 지속적으로 나왔지만 다양한 현장 여건을 충족하기에는 많은 애로점이 있다. 따라서 본 연구에서는 비점오염저감 시설 중 여과형 시설에 대해 Lab Scale의 수리모형실험을 통해 역세척 시 여재구성에 따른 수리학적 특성과 오염물질 처리효율을 분석하여 여과형 시설의 SS 처리효율이 높은 여재구성 기준을 제시하였다.

2. 연구동향

독일은 비점오염물질의 발생원과 비가 오면 시작되는 강우유출수와 함께 이동하는 비점오염물질의 저감과 관리에 초점을 맞추고 있으며(Gyeonggi Research Institute, 2014) 미국 환경청은 녹색빛물관리 기반시설 또는 저영향개발기법(Low Impact Development, LID)에 관한 지속적 연구개발(Research and Development, R&D)을 통해 비점오염원 및

물 순환 개선을 위한 가이드라인을 제시하고 있다(Gyeonggi Research Institute, 2014). 미국은 연방수질오염관리법을 개정하여 주요 비점오염원인 강우유출수를 규제를 하며, 그 중 도시, 건설, 농업지역 등의 강우유출수는 국가오염배출량 감소제도(National Pollutant Discharge Elimination System, NPDES)에 따라 허가받도록 규정하고 있다(Audit and Inspection Research Institute, 2013). 영국은 수자원법(Water Resources Act)에 질소취약지역을 지정 및 운영하여 비점오염원을 관리한다(Gyeonggi Research Institute, 2012). 미국 워싱턴주는 강우 처리 기술에 대한 인증 프로세스로 Technology Assessment Protocol Ecology (TAPE) 프로그램으로 검인증을 실시하며(Howie, 2011) 미국 캘리포니아주는 Technology Acceptance Reciprocity Partnership (TARP) 인증 프로세스를 통해 강우관리 기법을 검증하고 있다(TARP, 2003). 비점오염저감시설은 크게 장치형시설(여과형시설, 와류형시설, 스크린형시설 등)과 자연형시설(저류시설, 인공습지, 침투시설, 식생형시설 등)로 구분되며 여과형 설비가 결합된 장치형 시설의 경우 중금속과 같은 미세입자를 포함한 오염물질 제거에 유리한 반면 시간경과에 따라 수리적 부하가 가중되어 처리효율에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 최근 연구에 의하면 고속도로에서 도로퇴적물을 60% 정도 제거하면 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)가 SS는 78%, BOD는 32%, COD는 49%, T-N는 31%, T-P는 35%, Cu는 31%, 그리고 Fe는 77% 감소하는 것으로 분석된 결과가 있다(D.G. Kim et al., 2014). 여과형 시설의 성능에서 가장 중요한 인자는 여재의 특성으로 현재까지 관련 연구개발의 주안점은 여재의 종류 및 운전 조건의 최적화로써 다양한 여재를 이용하여 우수관리 및 수질관리에 적용한 연구 결과들이 보고되어 있다. 모래를 이용하는 방법이 가장 기본적이지만 이외에도 재활용 유리, 발포고분자 여재, 화분용 토양(Potting soil), 코코넛 섬유(Coconut coir), 퇴비, 상용 입상 여재, 정수 슬러지, geotextile (공극 크기 0.15~0.18 mm, 공극률 86~87%, 두께 2.3~3.2 mm) 등의 다양한 여재를 이용한 SS, 유기물, 영양염류 및 중금속 제거 관련 연구들도 수행되어오고 있다(Ahn et al., 2010; Franks et al., 2012; S. Kim et al., 2014; Lim et al., 2015). 여과시설의 효율은 우수하나 운전 중에 여재층에 고형물이 축적되어 폐색되고 손실수두가 증가하여 처리 유량이 감소하며 집중 강우 시에는 여재층 표면과 내부에 포획된 고형물이 재유출되어 유출수의 SS 농도가 증가하는 등의 문제점이 있다(Pratap et al., 2007; Rodgers et al., 2004). 여재층의 폐색은 동력을 이용한 역세척이 곤란할 때 여재의 수명을 결정하는 중요한 인자라고 할 수 있다(Siriwardene et al., 2007). 이러한 문제점은 여재층 교체, 여재표면 청소 등 유지관리 비용의 상승을 초래할 수 있다(Boller and Kavanaugh, 1995). 이에 따라, 하향류식 여과의 대안으로 상향류식 여과시설이 제안되고 있으나(Kang et al., 2016) 상향류식 여과시설 역시,

적합한 여재의 선정/개발, 적합한 시스템의 구성/개발 등이 요구되고 있는 상황이며 이에 운전 중 여재 막힘현상을 최소화하여 장기운전이 가능하면서 초기 우수처리 효율이 높은 비점오염처리 시설에 대한 필요성이 증가하고 있다. 손실수두의 증가는 처리하려는 SS의 양과 크기 그리고 여재의 크기와 직접적으로 관계가 있어 이에 대한 강우유출수의 유량과 수질 변동 패턴에 대한 연구와 함께 여과시설의 수리적 거동에 관한 연구가 최근까지 계속되고 있다. 따라서 본 연구에서는 여과형 시설의 역세척시 여재구성에 따른 수리학적 특성 및 처리효율을 수리모형실험을 통해 분석하여 역세척 및 SS 처리효율이 높은 여재구성 기준을 제시하였다.

3. 연구방법

3.1 여재의 특성

일반적으로 도로나 주차장에서 배출되는 강우유출수의 오염물질 농도는 TSS가 약 100 mg/L, 중금속인 Cu, Pb, Zn이 250 ug/L 이상의 농도를 보이는 것으로 보고되고 있다 (Kim and Lee, 2009; Park et al., 2009). 국내에서 조성되는 대부분의 비점오염저감 시설들은 강우유출수의 유출특성을 고려하지 않고 목표로 하는 저류량과 침투량만으로 설계하고 있어 성능이 낮다(Lee et al., 2016). 또한 유입수의 성상도 여재 선정에 영향을 미침에도 불구하고 유입수의 성상 분석이나 여재 평가를 거치지 않고 설계, 시공되어 유지관리에 애로 사항으로 나타나고 있다(MOE, 2014). 본 연구에서는

여재의 환경적 효율평가를 위하여 여재별 특성실험을 수행하였다(Table 1). 실험에 사용된 여재는 비점오염저감 시설에서 흡착 기작의 향상을 위해 보편적으로 적용되고 있는 우드칩(WC), 모래(SA), 바텀애쉬(BA)로 선정하였다. WC의 입경분포는 2.0~4.7 mm의 범위를 보이며, SA는 0.5~1.0 mm, BA는 1.0~5.0 mm의 범위로 조사 되었다. 압축이 없는 상태에서 측정된 여재별 투수계수는 WC가 1.86 cm/sec, SA는 0.35 cm/sec, BA는 1.35 cm/sec로 WC의 공극률이 가장 큰 만큼 투수계수도 가장 큰 것으로 나타났다. 여재 특성 실험을 통해 실험을 통해 매뉴얼에서 권장하는 입상여재의 적정 투수속도 기준인 여과선속도(20 m/hr 이하)의 2배 이상, 입경 2~6 mm정도, 균등계수 2 이하를 충족하는지 확인하였으며 Table 2가 여재 특성 실험 결과이다.

여재의 TSS 저감효율 평가 실험은 7개의 다른 구성비의 컬럼을 이용하여 수행되었다. 선정된 단일 여재의 효율평가는 Case 1부터 3번까지이며 여기에는 SA, BA, WC를 100% 적용하였다. 단일 여재의 TSS 저감효율 분석은 여재층 높이를 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm까지 변화를 주어 여재층 높이에 따른 제거효율을 분석하였다. Case 4부터 7까지는 여재의 복층평가를 위한 실험으로 Case 4는 아래층에 BA를 적용한 이후 위층에 SA를 충전하였다. Case 5는 아래층 SA, 위층 BA Case 6은 아래층 WC, 위층 SA, Case 7은 아래층 SA, 위층 WC를 충전한 구조로 여재층의 변화에 따른 처리효율을 분석하였다. 분석항목은 TSS, BOD, COD, T-N, T-P 총 5가지 항목으

Table 1. Physical Characteristics of Filter Media

Division	WC	SA	BA
Picture
Range of size (mm)	2.00~4.76	0.50~1.00	1.0~5.0
Coefficient of Permeability (cm/sec)	1.86	0.35	1.53
Void Ratio (%)	76.5	36.3	50.0

Table 2. Characteristics Test Result of Filter Media

Division	Main Ingredient	Other Ingredients	Range of Size (mm)	Uniformity Coefficient	Void Ratio (%)	Coefficient of Permeability (m/hr)
SA	Sio2 70%	Na2O 13.3% CaO 10%	2.0~6.0	1.2	35~40	40.0
BA	Sio2 55%	Al2O3 22.5% Fe2O3 10%	5.0~6.0	1.8	45~55	55.5
WC	H2O, Organic matter 95%	K2O 1% CaO 2% MgO 1%	2.0~5.0	1.6	70~80	67.0

Table 3. Filter Media Types and Analysis Items by Case

Division	Media Layer	Media Layer Height	Test Items	Test Methods
Case1	SA	5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm	TSS	Filtration Basis Weight Method
Case2	BA			
Case3	WC			
Case4	SA (up) + BA (down)	SA (30 cm) + BA (30 cm)	TSS	(A) Filtration Basis Weight Method
			BOD	(B) Diaphragm Electrode Process
Case5	BA (up) + SA (down)	BA (30 cm) + SA (30 cm)	COD	(C) KMnO ₄
Case6	SA (up) + WC (down)	SA (30 cm) + WC (30 cm)	T-N	(D) UV Spectrophotometer
Case7	WC (up) + SA (down)	WC (30 cm) + SA (30 cm)	T-P	(E) Ascorbic Acid

Table 4. Backwashing Experimental Ccondition

Division	Experimental Cconditions
1	Performed so that it is possible to derive the loss head relational expression for each solid load
2	Backwashing is performed until recovery of head loss is confirmed, and the backwashing cycle is derived through repeated experiments
3	Carry out until the proper amount of air washing and water washing can be derived
4	Present the capacity, injection structure, specifications, etc. of the diffuser and backwash pump
5	In order to induce rapid occlusion of the media layer, the influent SS concentration can be higher than 150-350 mg/L
6	The linear velocity of the inflow water can be set to 20 m/hr or more to induce rapid clogging of the filter media layer
7	Check whether SS removal efficiency is maintained over 80%

로 Table 3에 Case별 여재종류 및 분석항목을 정리하였다. 복층 구조에서 여재의 높이를 30 cm로 설정한 이유는 단일여재 실험에서(Case1~3) 여재 높이에 따른 처리효율 실험결과 여재의 높이가 30 cm 이상부터 처리효율이 양호하다는 실험 결과를 반영한 결과이며 유기물 및 중금속의 오염물질 제거 효율이 높은 것으로 보고되고 있기 때문이다(Moon et al., 2015). 실험에 사용된 유입수는 고속국도에서 건기시 수거된 노면퇴적물을 이용하여 제조하였다. 실험은 컬럼으로 유입된 유입수가 여재를 통과하여 유출되는 시간을 기준으로 2시간 동안 수행되었으며, 15분 간격으로 수질 시료채취와 유량을 측정하였다.

3.2 역세척 실험조건

강우 종료 후 48시간 내 역세척을 실시해야 하나 소량의 강우에는 역세척 생략이 가능하다. 다만, 누적강우량이 10 mm를 초과하면 역세척을 진행하여야 한다. 또한 공기세척은 50 m³/m² · hr, 수세척은 40 m³/m² · hr 내외여야 하며 지속시간은 1~5분 역세척을 진행해야 한다(MOE, 2016). 본 연구에서는 이를 준용하여 역세척 실험 조건을 계획하여 실험을 수행하였다. Table 4는 역세척 실험 조건을 표로 정리한 것이다.

이러한 조건을 기반으로 본 연구에서는 사용된 여재를 이용한 하향류식 비점오염원 장치는 아크릴로 제작하였으

며 반응조의 규격은 W : 0.6 m × D : 0.6 m × H : 0.7 m, 여재층의 높이는 0.6 m로 하였다. (여과단면적 : 0.36 m²) 여과장치는 역세척시 공기와 역세수의 균등한 분포를 위해 상부에 0.1 m의 여유를 두었다. 유입원수는 조대 협잡물이 반응기내로 유입되지 않도록 스크린 한 후 사용하였으며, 침전을 막기 위해 교반기를 설치한 원수 저류조를 거쳐 수중 펌프를 이용하여 반응기하부로 유입되도록 하였다. 유입 SS농도는 150~350 mg/L로, 여과선속도는 20~40 m/hr로 변화시켰으며, 고형물부하(4~9 kg/m²), 역세척주기 및 손실수두 등 설계요소에 대하여 검토하였다. 수두발생이 74 mm 초과 시 공기세척 + 수세척을 이용한 역세를 실시하고 역세 후 재가동하여 초기 발생수두변화를 측정하였다. 역세수는 청수를 사용하였으며 유입원수는 건설 공사장에서 배출되는 토양을 채집하여 조대입자를 제거한 후 수돗물에 혼합하여 적정농도로 만들어 Lab-Scale 실험에 이용하였다. 비점오염저감시설의 효율평가를 위하여 20분 간격으로 유입수, 유출수를 채취하여 SS농도를 수질오염공정시험기준에 따라 분석하였다.

3.3 손실수두 실험

여과형 비점오염저감시설의 역세척시 수리학적 특성 분석을 위하여 무부하시 실험장비에 대한 손실수두, 여재부의 손실수두, 여재의 고형물부하에 따른 손실수두 변화를 측정

하였다. 무부하시 시설 및 여재부의 손실수두는 청수로 실험을 수행하였으며 30분 이상 운전, 3회 측정된 값을 산술평균하였다. 선속도 변화에 따른 손실수두 변화 산정식은 Eq. (1)과 같으며 Eq. (1)에서 마찰손실계수는 Eq. (2)를 이용하여 산정하였다.

$$h_L = f \times L/d \times V^2/2g \quad (1)$$

여기서, h_L = 손실수두, f = 마찰손실계수, L = 관길이 (0.6 m), d = 관경(0.4 m), V = 유속(m/sec), g = 중력가속도 (9.8 m/sec²)이다.

$$f = (124.5 \times n^2)/(d^{1/3}) \quad (2)$$

여기서, f = 마찰손실계수(결과값 : 0.0676), n = 조도계수 (75 mm 이하 관 : 0.02), d = 관경(0.4 m)이다.

여재의 고형물부하에 따른 손실수두 변화 산정식은 Eq. (3)과 같다.

$$h_L = K \times V^2/2g \quad (3)$$

여기서, h_L = 손실수두, K = 손실수두계수(급축소 : 0.5, 급확대 : 1), V = 유속(m/sec), g = 중력가속도(9.8 m²/sec)이다.

4. 연구결과 및 고찰

4.1 여재 배치에 따른 오염물질 농도변화

4.1.1 여재층 심도별 효율 분석(Case1~Case3)

실제 비점오염 저감시설을 설계, 시공할 때 주로 사용되는 여재인 우드칩(WC), 모래(SA), 바텀애쉬(BA)의 여재층 심도에 따른 TSS 제거효율을 분석하였다. 실험결과 WC, SA, BA 모두 실험시작 심도 5 cm에서부터 TSS 처리효율 30% 이상인 것으로 분석되었다. WC는 심도 10 cm에서 30 cm까지 TSS 제거효율이 37%에서 80%까지 급격하게 증가하고 심도가 30 cm가 넘어가면 제거효율이 거의 증가하지 않는 것으로 분석되어 WC의 경우 심도 30 cm 이상일 때 TSS 제거 효율이 좋은 것으로 분석되었다. Fig. 1은 WC의 심도별 TSS 제거효율이다. SA는 심도 10 cm에서 20 cm까지 TSS 제거효율이 37%에서 80%까지 급격하게 증가하고 심도가 20 cm가 넘어가면 제거효율이 거의 증가하지 않는 것으로 분석되어 SA는 심도 20 cm 이상일 때 TSS 제거 효율이 좋은 것으로 분석되었다. Fig. 2는 SA의 심도별 TSS 제거효율이다.

BA는 심도 10 cm에서 30 cm까지 TSS 제거효율이 40%에서 85%까지 급격하게 증가하고 심도가 30 cm가 넘어가면 제거효율이 거의 증가하지 않는 것으로 분석되어 BA는

Fig. 1. TSS Removal Efficiency by Depth of WC

Fig. 2. TSS Removal Efficiency by Depth of SA

Fig. 3. TSS Removal Efficiency by Depth of BA

심도 30 cm 이상일 때 TSS 제거 효율이 좋은 것으로 분석되었다. Fig. 3은 BA의 심도별 TSS 제거효율이다. Fig. 4는 복합여재층 중 처리효율이 가장 좋은 BA (down) + SA (up)의 각각 여재의 심도변화 따른 TSS 제거효율을 분석한 결과이다. 복합여재층의 BA, SA의 높이를 각각 30 cm로 하였을 때 제거효율이 92.8%로 가장 높으며 BA, SA의 높이를 각각 20 cm로 하였을 때는 제거효율이 83.4%로 가장 낮은 것으로 분석되었다. BA (20 cm) + SA (30 cm)일 때 처리효율이 87.3%로 BA (30 cm) + SA (20 cm)일 때 처리효율 85.7%보다 높게 분석된 것은 각 여재의 심도별 제거효율 분석 결과 BA의 경우 심도 30 cm일 때 SA의 경우 심도 20 cm 이상일

Fig. 4. TSS Removal Efficiency by Depth of BA (up) and SA (down)

Fig. 5. Treatment Efficiency by Filter Media Layer

때 제거효율이 가장 높은 분석결과가 반영된 결과로 판단된다.

4.1.2 복층여재 효율 분석(Case4~Case7)

여재의 복층 구조에 따른 오염물질 제거효율을 분석하기 위하여 SA (up) + BA (down), BA (up) + SA (down), SA (up) + WC (down), WC (up) + SA (down) 총 4가지 Case에 대해 총 60 cm의 여재심도에 대해 TSS, BOD, COD, T-N, T-P 총 5가지 항목에 대한 처리효율을 분석하였다. Table 5와 Fig. 5는 복층여재의 처리효율 분석 결과로서 Test Methods는 Table 3에 기술한 바와 같이 A는 여과평량법, B는 격막전극법, C는 산성 100 °C KMnO₄법, D는 자외선 흡광광도법, E는 아스코르빈산 환원법이다.

4가지 Case에 대한 오염물질 제거효율 실험결과 Case4 [SA (up) + BA (down)]는 TSS는 93.9%, BOD는 69.2%, COD는 49.6%, T-N은 55.3%, T-P는 62.5% 처리효율을 보였으며 Case7 [WC (up) + SA (down)]은 TSS는 85.2%, BOD는 58.5%, COD는 43.3%, T-N은 46.6%, T-P는 55.6% 처리효율을 보였다. 전체적으로 Case4 [SA (up) + BA (down)], Case5 [BA (up) + SA (down)], Case6 [SA (up) + WC (down)], Case7 [WC (up) + SA (down)] 순서로 처리효율이 우수한 것으로 분석되었다.

Table 5. Result of Analysis of Treatment Efficiency of Multi-Layer Media

Case	Test Items	Unit	Test Result		Test methods	Coefficient of Permeability (m/hr)
			Influent	Runoff		
Case4	TSS	mg/L	202.7	12.2	A	93.9
	BOD		14.6	4.5	B	69.2
	COD		28.8	14.5	C	49.6
	T-N		3.8	1.7	D	55.3
	T-P		0.8	0.3	E	62.5
Case5	TSS	mg/L	187.4	20.6	A	89.0
	BOD		23.6	9.4	B	60.2
	COD		31.2	17.1	C	45.2
	T-N		5.4	2.7	D	50.0
	T-P		0.9	0.4	E	55.6
Case6	TSS	mg/L	185.2	24.1	A	86.9
	BOD		20.9	8.8	B	57.8
	COD		29.4	17.1	C	41.8
	T-N		5.2	2.7	D	48.1
	T-P		1.0	0.4	E	60.0
Case7	TSS	mg/L	182.6	27.0	A	85.2
	BOD		22.9	9.5	B	58.5
	COD		31.4	17.8	C	43.3
	T-N		5.8	3.1	D	46.6
	T-P		0.9	0.4	E	55.6

4.2 손실수두 실험 결과

여재의 청수 유입조건(무부하조건)에서 시설과 여재의 손실수두는 여과선속도 변화에 따라 선형적 증가추이를 보였다. 시설에서는 선속도 20.0 m/hr에서는 0.19 cm의 손실수두가 발생하고 선속도 35.0 m/hr에서는 0.69 cm의 손실수두가 발생하였다. 여재부는 선속도 15.0 m/hr에서는 1.16 cm의 손실수두가 발생되었고 선속도 35.0 m/hr에서는 6.34 cm의 손실수두가 발생하였다. 손실수두 실험결과 시설은 선속도 20.0 m/hr 이상에서 여재부는 선속도 15.0 m/hr 이상에서 손실수두가 급증하는 것으로 측정되었다. Table 6과 Fig. 6에 각 선속도별 손실수두 변화결과를 나타내었다.

4.3 여재층 및 선속도 변화에 따른 SS 제거효율 분석

여재의 여과선속도를 20 m/hr로 일정하게 유지하고 SA + WC [상층에 WC 0.3 m, 하층에 SA 0.3 m]를 충전한 것과 SA + BA [상층에 SA 0.3 m, 하층에 BA 0.3 m]를 충전한 여재에 대해 SS 제거효율을 분석한 결과 SA + WC 여재의 경우 SS 제거효율은 85.2%정도를 나타내었으며 SA + BA 여재는 SS 제거효율이 87.4% 이상인 것으로 측정되어 SA + BA를 혼합하는 것이 처리효율이 더 좋은 것으로 분석되었다. Table 7과 Fig. 7에 여재층 변화에 따른 SS 제거효율 결과를 나타내었다. 실험결과 환경부의 「비점오염 저감시설의 설치 및 관리 운영 매뉴얼」에서 제시된 선속도

Table 6. Variation of Head Loss According to Linear Velocity Under the No Solids Loading

Linear velocity (m/hr)	0	5	10	15	20	25	30	35
Facility Head loss (cm)	0.00	0.02	0.05	0.09	0.19	0.31	0.48	0.69
Filter Media Head loss (cm)	0.00	0.13	0.52	1.16	2.07	3.23	4.66	6.34

Fig. 6. Variation of Head Loss According to Linear Velocity Under the No Solids Loading

Table 7. SS Removal Efficiency Results According to Filter Media Layer Change

The number of times	Filter Media Layer	
	SA + BA	SA + WC
1	84.9%	86.3%
2	86.0%	88.2%
3	85.4%	87.2%
4	84.2%	88.7%
5	85.6%	86.6%
Average	85.2%	87.4%

20 m/hr 이하일 때 SS제거효율이 80.0% 이상으로 기준을 만족하는 것으로 결과값이 도출되었다.

SA + WC [상층에 WC 0.3 m, 하층에 SA 0.3 m]를 충전한 것과 SA + BA [상층에 SA 0.3 m, 하층에 BA 0.3 m]를 충전한 여재에 유입원수농도를 150~350 mg/L 범위, 여과선속도를 5 m/hr~30 m/hr로 변화시켜 120 min동안 여과실험을

수행하여 선속도 변화에 따른 SS 제거효율을 분석하였다. 그 결과 Table 8과 Fig. 8에 나타난 바와 같이 여과선속도가 증가할수록 제거효율이 감소하는 경향을 나타내었으며, 여과선속도 5 m/hr에서는 평균 부유물질 제거효율이 SA + WC의 경우 약 89%이며, SA + BA의 경우 약93%인 것으로 측정되었다.

Fig. 7. SS Removal Efficiency Results According to Filter Media Layer Change

Table 8. SS Removal Efficiency Results According to Linear Velocity Change

The number of times	Filter Media Layer	
	SA + BA	SA + WC
5 m/hr	88.3%	93.8%
10 m/hr	86.7%	90.3%
20 m/hr	85.2%	87.4%
30 m/hr	74.3%	79.6%

Fig. 8. SS Removal Efficiency Results According to Linear Velocity Change

5. 결 론

본 연구에서는 비점오염저감 시설 중 여과형 시설에 대해 Lab Scale의 수리모형실험을 통해 역세척 시 수리학적 특성과 오염물질 처리효율을 분석하였다. 여재의 매뉴얼 상 권장 특성 기준인 투수속도 40 m/hr 이상, 입경 2~6 mm, 균등계수 2 이하의 기준에 충족하는 여재로 바텀애쉬, 모래, 우드칩을 선정하였으며 3가지의 여재를 혼합 하여 SA (up) + BA (down), BA (up) + SA (down), SA (up) + WC (down), WC (up) + SA (down) 총 4가지 여재층으로 TSS, BOD, COD, T-N, T-P의 처리효율 및 손실수두 변화를 분석하였다. 본 연구에서 다양한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 실험 결과 모든 여재층에서 기준 이상의 처리효율을 나타내었으며, 특히 여과형 시설에서 가장 중요한 TSS 제거효율이 SA + BA [상층에 SA 0.3 m, 하층에 BA 0.3 m]로 구성된 여재에서 가장 우수한 효율이 나타났으며, 우드칩이 포함된 여재층의 경우 효율이 떨어지는 것으로 분석되었다.
- 2) 무부하 시 시설 및 여재부의 손실수두 청수 실험결과 무부하 시 시설 손실수두의 경우, 선속도 35 m/hr에서 0.69 cm로 선속도 증가에 따른 손실수두의 증가가 확인되었으며, 시설 손실수두 20 cm 이하의 기준에 충족함을 확인하였다. 무부하 시 여재부의 손실수두의 경우 선속도 35 m/hr에서 6.34 cm로 여재부 손실수두 10 cm 이하의 기준에 충족함을 확인하였다.
- 3) 여재층 별 SS 처리효율은 SA + WC [상층에 WC 0.3 m, 하층에 SA 0.3 m], SA + BA [상층에 SA 0.3 m, 하층에 BA 0.3 m]로 진행하였으며, 제거효율이 80% 이상으로 양호한 효율이 나타났으며, SA + BA의 경우 선속도 20 m/hr에서 87.4%의 높은 제거 효율을 보이는 것으로 분석되었다.
- 4) 본 연구의 여재구성 및 역세척 조건하에서 손실수두 회복과 SS 제거효율(80% 이상)을 확보할 수 있어 반복적인 운전이 가능하며 역세척 수행까지 1회 운전에서 최고 93% 부유고형물 처리가 가능하여 장기운전이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습다(2019002950003).

References

Ahn, T.W., Choi, I.S., and Oh, J.M. (2010). Evaluation of

- the water purification efficiency of waste LCD glass media by using foaming technology. *J. Korean Soc. Water Wastewater*, Vol. 24, No. 4, pp. 369-375.
- Audit and Inspection Research Institute. (2013). *Analysis of the management status of non-point pollution sources for water quality improvement*. p. 23.
- Boller, M.A., and Kavanaugh, M.C. (1995). Particle characteristics and headloss increase in granular media filtration. *Water Res.*, Vol. 29, No. 4, pp. 1139-1149.
- Franks, C., Davis, A.P., and Aydilek, A.H. (2012). Geosynthetic filters for water quality improvement of urban storm water runoff. *J. Environ. Eng.-ASCE*, Vol. 138, No. 10, pp. 1018-1028.
- Gyeonggi Research Institute. (2012). *A study on the treatment of nonpoint pollutants in Gyeonggi-do*. p. 29.
- Gyeonggi Research Institute. (2014). *A new task in water quality management, management of non-point pollution sources*. p.7.
- Howie, P.E. (2011). *Technical guidance manual for evaluation stormwater treatment technologies*. Technology Assessment Protocol-Ecology (TAPE) (Publication 11-10-061).
- Kang, S., Kim, S., Lee, S., and Lee, T. (2016). An upflow-type filtration device using expanded polypropylene media (EPM) to treat first flush of rainwater. *Water Environ. Res.*, Vol. 88, No. 3, pp. 195-200.
- Kang, S.W. (2005). Surface characteristics of the engineered media for filtration and adsorption in urban runoff. *Proceedings of Korean Society of Environmental Engineers Congress 2005*, pp. 819-824.
- Kim, D.G., Jeong, K., and Ko, S.O. (2014). Removal of road deposited sediments by sweeping and its contribution to highway runoff quality in Korea. *Environ. Technol.*, Vol. 35, pp. 2546-2555.
- Kim, L.H., and Lee, S. (2009). Characteristics of metal pollutants and EMCs in a parking lot and a bridge during storms. *J. of Korean Society on Water Quality*, Vol. 21, No. 4, pp. 385-392.
- Kim, S., Oh, H., and Ahn, J. (2014). Road runoff treatment using pilot scale-NPS treatment plant filling up expended polypropylene media. *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 36, No. 10, pp. 711-718.
- Lee, S., Choi, J., Hong, J., Choi, H., and Kim, L. (2016). Cost-effective assessment of filter media for treating stormwater runoff in LID facilities. *J. of Wetlands Research*, Vol. 18, No. 2, pp. 194-200.
- Lim, H.S., Lim, W., Hu, J.Y., Ziegler, A., and Ong, S.L.

- (2015). Comparison of filter media materials for heavy metal removal from urban stormwater runoff using biofiltration systems. *J. Environ. Manage.*, Vol. 147, pp. 24-33.
- Ministry of Environment (MOE). (2014). *Manual for the BMPs installation, management and maintenanse*. Ministry of Environment, Korea.
- Ministry of Environment (MOE). (2016). *Installation and management operation manual of non-point pollution reduction facilities*. p.35.
- Moon, S., Hong, J., Choi, J., Yu, G., and Kim, L.H. (2015). Evaluation on the adsorption and desorption capabilities of filter media applied to the nonpoint source pollutant management facilities. *J. of Wetland Research*, Vol. 17, No. 3, pp. 228-236.
- Park, H.M., Kim, Y.J., and Ko, S.O. (2009). Characteristics of particle size distribution and heavy metal concentration in pavement road runoff. *Int. J. of Highway Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 141-149.
- Pratap, M.R., Khambahmettu, U., Clark, S.E., and Pitt, R. (2007). Stormwater polishing: Upflow vs. downflow filters. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2007*, Tmp, Florid, United States (2007).
- Rodgers, M., Mulqueen, J., and Healy, M.G. (2004). Surface clogging in an intermittent stratified sand filter. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 68, pp. 1827-1832.
- Siriwardene, N.R., Deletic, A., and Fletcher, T.D. (2007). Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study. *Water Res.*, Vol. 41, pp. 1433-1440.
- The Technology Acceptance Reciprocity Partnership (TARP). (2003). *Protocol for stormwater best management practice demonstrations*. Annapolis: Maryland Department of Environmental Protection.
- Yi, S.J., and Kim, Y.I. (2014). Improvement on management of non-point source pollution for reasonable implementation of TMDL - Focusing on selection of non-point source pollution management region and management of non-point source pollutant. *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 36, No. 10, pp. 719-723.

Received	October 25, 2021
Revised	October 25, 2021
Accepted	November 5, 2021