

세라믹 여재를 활용한 상향류식 여과형 비점오염저감시설의 최적 운전 및 역세척 조건

Optimization of Operation and Backwashing Condition for an Upflow Stormwater Filtration System Utilizing Ceramic Media

황유훈 · 서영교 · 김효원 · 노건완* · 신현상 · 김도군**,[†]

Yuhoon Hwang · Younggyo Seo · Hyowon Kim · Kunwan Roh* · Hyunsang Shin · Dogun Kim**,[†]

서울과학기술대학교 환경공학과

*㈜ C&C · **경희대학교 사회기반시스템공학과

Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology

*C&C Inc. · **Department of Civil Engineering, Kyunghee University

(Received July 18, 2017; Revised August 3, 2017; Accepted August 16, 2017)

Abstract : Stormwater filtration is widely used for the urban runoff treatment. However, intensive maintenance and lack of information about the performance have resulted in an increased need of proper evaluation. In this study, the performance of an upflow stormwater runoff filtration system, consisting of a supporting unit and a filtration unit filled with a ceramic media, was investigated. The maximum head loss increase was about 3 cm under the suspended solid (SS) load of 30 kg/m² and the SS removal was more than 96%, when the filtration velocity was 20-40 m/h. The head loss and the porosity of the media can successfully be described by a power model. It was confirmed that the a significant amount of SS can effectively be removed at supporting unit, minimizing SS load to the filter media bed. Several backwashing strategies have been tested to establish the optimum condition. It was found that the stagnant water discharge is important to minimize the SS release immediately after backwashing. Also, the filter bed loaded with 400-450 kg/m² SS can almost completely be washed to reduce the head loss to the that of empty bed. The results in this study indicate that the upflow ceramic media filter is an excellent alternative to stormwater treatment, with high SS removal and long lifespan.

Key Words : Non-Point Source Pollution, Stormwater Runoff, Upflow Filtration System, Backwash

요약 : 도로변 등에 여과형 강우유출수 처리시설이 많이 이용되고 있으나, 유지관리의 최소화, 성능의 검증 및 최적 조건의 수립이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 강도가 우수하고 성형이 용이한 세라믹 여재를 사용하고, 하단 지지부와 상단의 여과조로 이루어진 상향류식 여과 시스템을 구성하고, SS 제거능과 역세척 조건을 검토하여, 최적 운전 조건을 설정하였다. 여과 선속도 20-40 m/h 조건에서 운전하였을 때, 총 고형물 부하 30 kg/m²에 이르는 조건에서도 최대 수두 손실 상승이 3 cm 내외이었으며, SS 처리 효율이 96% 이상으로, 안정적인 운전이 가능하였다. 운전 중의 손실수두와 여재층 공극률은 급수 모델에 의해 모사가 가능하였다. 특히, 하단 지지부에서 일정 입도 이상의 SS가 상당량 제거되어, 여과조에 부하를 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 최적의 역세척 조건을 설정하기 위하여 공기 및 수세척의 시간과 유량, 그리고 정체수 배출 공정의 유무에 따른 영향을 확인하였으며, 실험한 모든 조건에서 만족할 만한 손실수두의 회복을 달성할 수 있었다. 다만, 역세척 직후 SS의 배출을 최소화하기 위해서는 공기세척과 수세척 공정 사이에 정체수 배출 공정의 도입이 효과적인 것으로 파악되었다. 본 연구에서 설정한 역세척 조건을 적용하였을 때, SS 부하 400-450 kg/m²의 여재층이 성공적으로 세척될 수 있어, 장기운전이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

주제어 : 비점오염원, 강우유출수, 상향류 여과시설, 역세척

1. 서론

비점 오염원 관리에 관한 관심이 높아지면서, 환경부 등 관련기관에서는 강우유출수를 포함한 비점오염원 현황조사 및 저감방안의 수립에 노력하고 있다. 전국적으로 BOD 및 TP의 비점오염 배출부하량은 2012년 기준 전체 배출부하량의 각각 31.7 및 58.9%에 이르며, 2020년에는 각각 72.1% 및 68.6%로 급격하게 증가할 것으로 전망되고 있다.¹⁾ 이에, 국무총리실, 농림수산식품부, 지식경제부, 환경부, 국토해양부, 소방방재청, 농촌진흥청, 그리고 산림청 등 관계부처에서는 ‘제2차 비점오염원관리 종합대책’¹⁾을 수립하여 시행하고 있다. 강우유출수는 대표적인 비점오염원으로서, 발

생량이 불규칙하고, 많은 종류의 유해물질이 함유되어 있으며, 유량과 수질이 극단적으로 변동하므로, 이를 효율적으로 제어하기 위해서는 기존 정수 또는 하수처리 공정과는 상이한 방법으로 설계된 시설이 필요하다.²⁾

비점오염이 수계로 유입되는 것을 방지하기 위한 비점오염 저감시설에는 저류지, 식생수로, 침투도랑, 여과시설 등이 있으며, 가장 널리 이용되어 온 공정은 모래 등 입상 여과재를 이용하는 여과형 처리시설이다. 여과형 시설은 비점오염원 관리가 활성화된 미국, 유럽 등에서도 강우 유출수의 오염 부하량을 줄이고 하천 수질을 개선하기 위해 많이 이용되고 있다.^{3,4)} 입상 여과는 불투수성이 높고 비점오염 저감시설 설치를 위한 부지가 제한적일 때 가장 적합한 방

[†] Corresponding author E-mail: dogun.kim@khu.ac.kr Tel: 031-201-2968 Fax: 031-202-8106

법으로, 특히 고도로 도시화된 지역이나 도로 지역에서 가장 많이 이용된다.^{5,6)} 여과형 비점오염 저감시설은 여과, 흡착 및 미생물 대사 작용에 의해 강우 유출수 내 부유고형물, 총인, 중금속 등에 대해 우수한 제거효과를 나타내는 것으로 알려져 있다.⁷⁾

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.⁸⁻¹¹⁾

여과시설의 효율은 우수하나, 운전 중에 여재층에 고형물이 축적되어 폐색되고 손실수두가 증가하여 처리 유량이 감소하며, 집중강우 시에는 여재층 표면과 내부에 포획된 고형물이 재유출되어 유출수의 SS 농도가 증가하는 등의 문제점이 있다.^{12,13)} 여재층의 폐색은 동력을 이용한 역세척이 곤란할 때, 여재의 수명을 결정하는 중요한 인자라고 할 수 있다.³⁾ 이러한 문제점은 여재층 교체, 여재표면 청소 등 유지관리 비용의 상승을 초래할 수 있다.¹⁴⁾ 이에 따라, 하향류식 여과의 대안으로 상향류식 여과시설이 제안되고 있으나¹⁵⁾ 상향류식 여과시설 역시, 적합한 여재의 선정/개발, 적합한 시스템의 구성/개발 등이 요구되고 있는 상황이며 이에 운전 중 여재 막힘현상을 최소화하여 장기운전을 가능하게 하면서도 초기 우수처리 효율이 높은 비점오염처리 시설에 대한 필요성이 증가하고 있다.

손실수두의 증가는 처리하려는 SS의 양과 크기, 그리고 여재의 크기와 직접적으로 관계가 있다. 그러므로, 강우유출수의 유량과 수질 변동 패턴에 대한 연구와 함께, 여과시설의 수리적 거동에 관한 연구가 최근까지 계속되고 있다. Siriwardene 등은 자갈 여재(d_{10} 6.4 mm, d_{50} 10.5 mm, d_{90} 13 mm)와 하부 토양층(d_{10} 115 μ m, d_{50} 215 μ m, d_{90} 300 μ m)으로 구성된 1차원 여과실험을 수행하였다. 실험 결과, 운전 중에 여재층 상부 수위가 변화될 때에는 상부 수위가 일정할 때에 비해 여재의 폐색이 빠르게 진행되는데, 이는 여재층과 하부토양층 사이에 고형물이 더 많이 축적되기 때문이며, 여재층의 물리적 폐색은 주로 <6 μ m 입자에 의해 발생하는 것으로 나타났다.¹⁶⁾ 또한, 도로변 등에 설치되는 비점오염 저감시설의 경우 소형의 시설이 다수 설치되므로, 설치된 이후의 지속적인 모니터링 및 유지관리가 어려워 설치 후 성능의 저하가 나타나는 것으로 확인되고 있다. 따라서 유지관리의 최소화 및 여과 성능의 유지를 위해서는 실험실 규모에서 운전 조건의 최적화 및 폐색을 최소화 할 수 있는 역세척 조건을 확립할 필요가 있다.

본 연구에서는 기계적 강도가 우수하며 균등한 크기로 성형이 가능한 세라믹 여재를 사용하였을 때의 비점오염 저감

시설의 처리 효율 및 최적 운전 조건을 검토하였다. 우리나라 비점오염 저감 시설 기준에 따른 실험실 규모 여과형 처리시설을 설계/제작 하였으며, 여과속도 변화에 따른 수두 손실 및 SS 제거 효율을 파악하여 최적 운전 조건을 제시함으로써 다양한 강우 강도에서의 적용성을 살펴보았다. 강우 유출수의 SS는, 특히 도로에서 발생하는 경우, 상당 부분 도로 퇴적물에 기인한다. 도로퇴적물은 매우 다양한 오염물에 고농도로 오염되어 있어 강우유출수의 SS 뿐만 아니라 유기물, 영양염류, 중금속 등의 원인이 된다.^{17,18)} 도로퇴적물의 총 TOC, VS, T-N, TKN, 그리고 T-P 함량은 각각 1-20%, 6-28%, 11-54%, 2,280-6,310 mg/kg, 2,080-13,200 mg/kg, 그리고 2,760-5,150 mg/kg으로 알려져 있으며,^{19,20)} 평균 Cu, Ni, Pb, Zn, Cd, 그리고 Cr 함량은 28.7-534, 23-708, 37.3-699, 0.9-4,024, 0.44-2,665, 4.3-324 mg/kg 으로 알려져 있다.²¹⁻²⁷⁾ 최근 연구에 의하면, 고속도로에서 도로퇴적물을 60% 정도 제거하면, 인공강우에 의한 강우유출수 오염물의 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 나타난 바 있다.²⁸⁾ 그러므로, 여과형 시설의 SS 제거율은 타 오염물 제거율의 지표로도 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 역세척 시간 및 유량, 그리고 역세척 공정의 변화에 따른 세척 효율을 확인하여 장기 운전이 가능한 최적 역세척 조건을 제시하였다.

2. 연구방법

2.1. 여재의 특성

Table 1에 본 연구에서 사용된 여재의 특성을 나타내었다. 본 연구에서 사용한 세라믹 소재의 여재는 혈암을 고온 소성하여 팽창 및 성형한 세라믹 재질로, 성상 분석 결과는 Table 1과 같다. 여재는 약 2.92 mm의 유효경을 가지며, 공극률 60.7%의 다공성 구조를 이루고 있다. 이러한 구조에 따라 수증의 오염물질이 침전/흡착되어 제거될 수 있을 것으로 기대되었다. 비중은 1.55로 일반적인 상태에서는 물에 가라앉아 여과 컬럼의 하단에 위치한다(SPS-KWWA F 101-0728 : 2009). 투수계수는 0.14 cm/s로 양호한 성능을 보여주었다(KS F 2322:2000).

Table 1. Characteristics of ceramic filter media

Item	Unit	Method	Results
Effective diameter	mm	SPS-KWWA F 101-0728:2009	2.92
Uniformity	-	SPS-KWWA F 101-0728:2009	1.30
Maximum diameter	mm	SPS-KWWA F 101-0728:2009	4.74
Minimum diameter	mm	SPS-KWWA F 101-0728:2009	2.38
Specific weight	-	SPS-KWWA F 101-0728:2009	1.55
Porosity	%	SPS-KWWA F 101-0728:2009	60.7
Permeability	cm/s	KS F 2322:2000	1.42×10^{-1}

2.2. 실험 장치

2.2.1. 실험 장치

여과를 위한 장치는 Fig. 1과 같이 구성하였으며, 원수 탱크, SS 현탁액 탱크, 유입 칼럼, 하부 지지층 칼럼, 여과 칼럼, 상부 배수 칼럼, 그리고 공기 역세척을 위한 공기압축기로 구성하였다. 원수 탱크에 보관된 청수는 유입 칼럼을 통하여 하부 지지층 칼럼으로 유입되며, 이 때, 고농도 SS 현탁액이 정량펌프를 이용하여 3-way 밸브를 통해 청수와 혼합된다. 이 때 혼합 유입수의 SS 농도는 168.4 ± 4.4 mg/L 이었다. 충분한 수두를 확보하고 유량 조절을 위하여 유입 컬럼을 사용하였다. 하부 지지층 칼럼에 유입된 혼합 원수는 여과 칼럼에 상향류로 유입되고 상부 배수 칼럼에서 유출된다. 하부 지지층 칼럼에서는 유입 원수의 선속도 20-40 m/h보다 높은 침강 속도를 가지는 입자들은 침전되어 제거됨으로써 상부 여과 칼럼의 부하를 경감시키는 역할을 수행한다. 여과 칼럼 길이는 총 90 cm로 여재는 60 cm만 충전하였다. 유입 칼럼, 하부 지지층 칼럼, 여과 칼럼, 그리고 상부 배수 칼럼은 폭 10 cm의 정사각형이다. 여과 칼럼에는 매 10 cm마다 piezometer를 설치하여 시료채취와 수두 측정이 가능하도록 하였다. 상부 배수 컬럼은 역세척 시 충분한 단차를 확보하기 위하여 높이 약 70 cm로 설계하였다.

2.2.2. 원수

본 연구에서는 비점오염시설로 유입될 수 있는 실제 오염물을 모사하기 위하여, 도로노면 청소차량에 의해 수거된

도로퇴적물을 청수와 혼합하여 유입수로 이용하였다. 도로퇴적물은 한국도로공사의 협조에 의해 수거 도로퇴적물을 얻었으며, 이 중, 체거름을 통하여, 200 μ m 이하의 도로퇴적물만을 분리하여 이용하였고 입도분석기(LS I3 320, Beckman Counter, USA)를 이용하여 입도분포를 분석하였다(Fig. 2). 분석 결과, 200 μ m 이하의 도로퇴적물의 평균 입경은 125.6 μ m, 유효입경(d_{10})은 13.2 μ m로 나타났으며, 균등계수(d_{60}/d_{10})는 10 이상인 10.15로 입도 분포가 양호한 것으로 평가되었다. 비점오염시설의 설계 및 평가의 기준이 되는 200 μ m 미만 시료의 분율은 84% 내외로 실제 시료를 충분히 모사할 수 있을 것으로 판단되었다.²⁹⁾

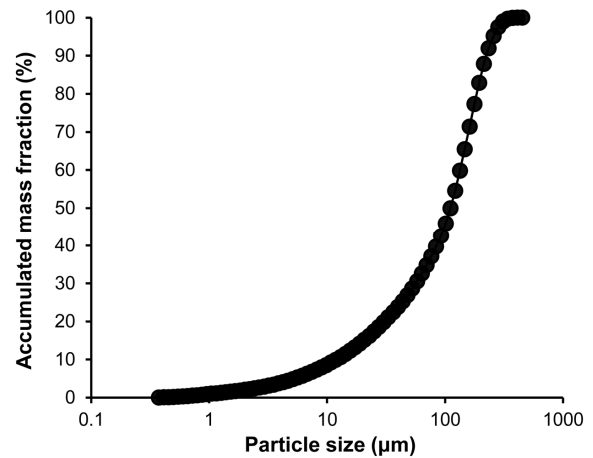


Fig. 2. Particle size distribution of suspended solid in influent.

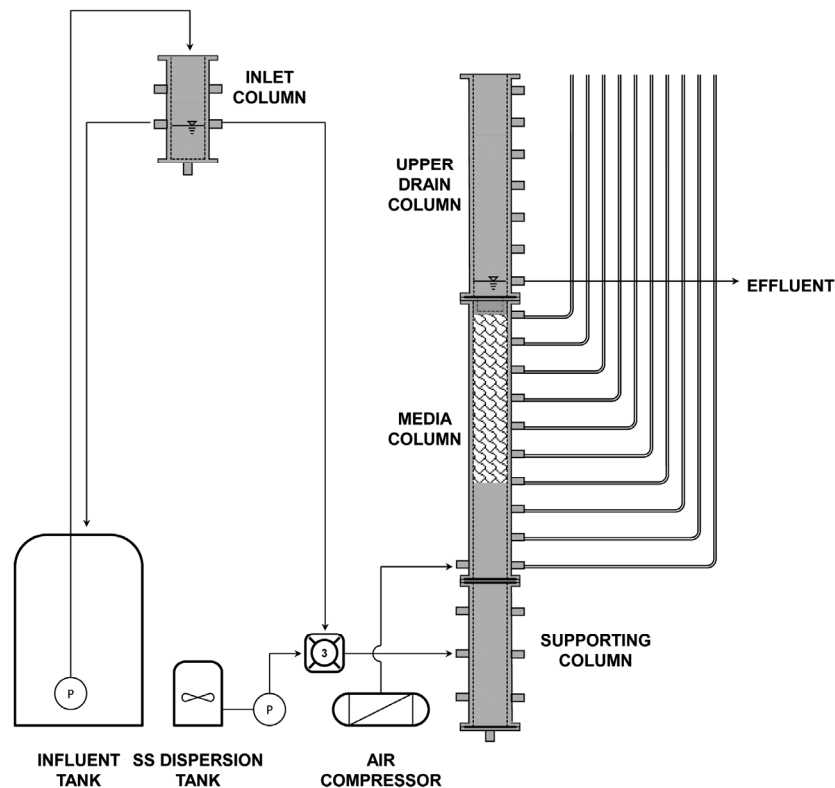


Fig. 1. Schematic of filtration test system.

2.3. 실험 방법

2.3.1. 여재의 손실수두 측정

여과 시스템의 여재층 고유의 손실 수두를 측정하기 위하여 무부하 손실 수두 평가를 수행하였다. 청수만을 이용하여 여과 시스템을 운전하였으며, 여과 선속도가 20, 30, 그리고 40 m/h일 때 손실수두를 측정하였다. 각 조건별로 30 분 이상 운전하고 3회 이상 손실수두를 측정한 후, 산술평균 값을 여재의 무부하 손실수두로 하였다.

2.3.2. 고형물 부하에 따른 손실 수두 및 처리 효율 평가

준비된 고형물 (도로퇴적물)과 청수를 혼합하여 고농도 SS 용액을 제조한 후, 이를 교반하면서 여과조에 유입시키고 동시에 청수를 유입시켜, 여과 시스템 유입 SS 농도가 약 200 mg/L가 되도록 하였다. 선속도 20, 30, 그리고 40 m/h에서 각각 300분 간 운전하였으며, 정해진 시간에 따라 여재층의 수두를 측정하고, 유입수와 유출수 시료를 채취하여 SS 농도를 수질오염공정시험기준에 따라 분석하였다. SS 제거율은 다음 식 (1)에 의해 산정하였다.

$$R_t = 100 \times \frac{C_0' - C_t}{C_0'} \quad (1)$$

여기서, R_t 는 여과시간 t 에서의 SS 제거율(%), C_0' 는 여과시간 동안의 평균 유입수 SS 농도(mg/L), 그리고 C_t 는 여과시간 t 에서의 유출 SS 농도(mg/L)를 나타낸다. 또, 여과시간에 따른 누적 유입 SS 부하는 다음 식 (2)에 의해 산정하였다.

$$SS \text{ load} = \frac{Q \times C_0 \times t}{A} \quad (2)$$

여기서, Q 는 유입유량(m^3/h), C_0 는 유입 SS 농도(mg/L), 그리고 A 는 여재층의 면적(m^2)이다.

2.3.3. 역세척 효율 평가 및 최적 역세척 조건 설정

본 연구에서는 본 여과 시스템에 대해, 역세수 및 역세 공기 소모량을 최소화하면서 시설 운전 효율에는 영향을 미치지 않는 최적의 역세척 조건을 설정하고자, 다양한 조건에서 역세척 효율을 검토하였다(Table 2). 최적 역세척 효율을 선정하기 위하여 역세척 조건에서 변경할 수 있는 실험

Table 2. Conditions for backwashing strategies

Condition	Air backwashing			Water backwashing	
	Duration (min)	Flow velocity (m/h)	Drainage	Duration (min)	Flow velocity (m/h)
1	2	50	No	2	40
2	2	50	No	1	40
3	2	50	Yes	1	40
4	2	25	Yes	1	20

인자로 역세척 시간, 역세척 유량 및 공기세척과 수세척 간 정제수 배출 공정의 유무의 세 가지를 선정하였으며, 이들의 역세척 효율을 비교하기 위하여 총 네 가지 조합의 역세척 조건을 선정하여 운전을 실시하였다.

선정된 조합들은 Table 2와 같고, 역세척 효율 평가를 위한 성능 인자로는 역세 후 손실 수두의 회복 여부 및 재운전 시의 SS 유출 여부를 검토하였다. 여과 시스템의 조기 폐쇄를 유도하기 위하여 2.3.2에서 설정한 조건의 약 40 배에 이르는 고농도 SS 용액을 투입하였으며, 일정 시간 간격으로 손실수두를 모니터링 하였다. 손실 수두가 약 10 cm에 도달하게 되면 장치의 운전을 멈추고 역세척을 실시하였다. 역세척 실시 이후에는 SS(약 200 mg/L)를 재유입하여 초기 운전 시의 유입 고형물 제거 효율을 살펴보았다. 역세척은 공기세척, 정제수 배출, 수세척의 순으로 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 여재의 무부하 손실 수두

여재 고유의 손실 수두를 측정하기 위하여, 청수가 선속도 20, 30, 그리고 40 m/h로 유입될 때의 손실 수두를 측정하였으며, 10분 간격으로 4회 측정하여 산술평균값을 활용하였다(Fig. 3). 손실수두는 여재층 깊이가 증가함에 따라 점차 증가하여, 총 손실수두는 5 cm 이상까지 상승하였다. 유입 선속도 20, 30, 그리고 40 m/h에서, 여재층의 평균 총 손실수두는 각각 3.15 ± 0.30 , 4.85 ± 0.37 , 그리고 5.60 ± 0.71 cm로 나타났다. 유입 선속도가 20 m/h로 낮을 때에는 유입부와 근접한 여재 칼럼 하단 부분에서 주로 수두의 손실이 발생하였으며, 유입 선속도를 40 m/h로 증가시켰을 때에는 유출부에 근접하는 여재 칼럼 상단 부분에서 주로 수두 손실이 발생하였다. 이는 낮은 선속도에서는 여재가 비중에 의해 여재 칼럼 하단부에 침전되어 존재하나, 선속도가 증가함에 따라 여재가 여재 칼럼 상단부 쪽으로 이동하여

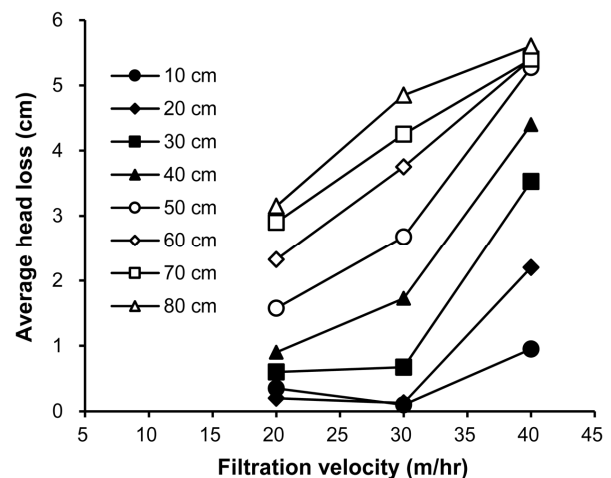


Fig. 3. Head loss caused by ceramic filter media with respect to filtration velocity.

존재하였기 때문에 생각된다. 유입 선속도가 30 m/h일 때에는 여재가 여재 칼럼의 전체에 비교적 균일하게 분포되어 손실수두가 여재 칼럼의 전체에 걸쳐 고르게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 사용된 세라믹 여재의 특성, 즉, 진비중은 높으나(1.55) 공극률이 높으므로(60.7%) (Table 1), 선속도가 일정 수준 이상일 때 부상이 가능하기 때문인 것으로 생각된다.

3.2. 여과선속도에 따른 손실 수두 및 SS 제거율

여과형 비점오염시설에 의한 비점오염 처리 효율 및 운전 에 따른 여과지의 폐색을 알아보기 위하여 여재별로 300 분간 운전을 실시하였다. 여과 선속도에 따른 손실수두 및 SS 제거율을 파악하기 위하여 여과 선속도를 20-40 m/h로 단계적으로 증가시켰으며, 이는 순간적으로 많은 오염물질이 유입될 때를 가정하여 설정하였다. 유입수의 SS 농도는 약 200 mg/L로 유입하였으며, 운전 기간 동안의 유입고형물 부하와 손실수두와의 관계로 아래 Fig. 4에 도시하였다. 운전 시간을 대상으로 하지 않고 유입 누적 고형물 부하에 대한 관계를 사용한 것은 유입 선속도가 다름으로 인하여 같은 시간이라도 누적 고형물 부하가 각 조건에 따라 달라지기

때문이다.

Fig. 4(a)에서와 같이, 운전 개시 직후의 손실 수두는 선속도가 20, 30, 그리고 40 m/h일 때, 각각 3.0 cm, 4.2 cm, 5.6 cm로 측정되었다. 운전을 시작하여 고형물이 주입됨에 따라 점차 손실 수두가 상승하는 경향을 보였으며, 300분 운전 후의 손실수두는 선속도 20, 30, 그리고 40 m/h에서 각각 5.3, 6.5, 그리고 7.9 cm로 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 손실수두의 변화는 크게 선속도 증가에 따른 여재의 손실 수두 증가와 누적 고형물 부하의 증가로 인한 영향으로 생각된다. 각 선속도에서 누적 고형물 증가에 따른 손실 수두 증가 경향을 추세를 통하여 분석한 결과, 같은 고형물 부하에서도 높은 선속도 조건에서 손실수두가 더욱 상승하는 경향을 파악할 수 있었다.

본 실험을 통하여 얻어진 최대의 손실 수두는 유입 선속도 40 m/h에서 누적 고형물 부하가 30.8 kg/m²일 때 7.9 cm로 측정되었다. 이는 비점오염처리시설 설계 기준 누적 고형물부하 9 kg/m²까지는 모든 유입 선속도의 경우에도 초기값 대비 1.0 cm 내의 손실 수두의 상승을 보여 폐색을 유도할 만큼의 고형물의 축적은 일어나지 않을 것으로 예측되었으며, 이에 따라 세라믹여재를 통한 비점오염의 장기

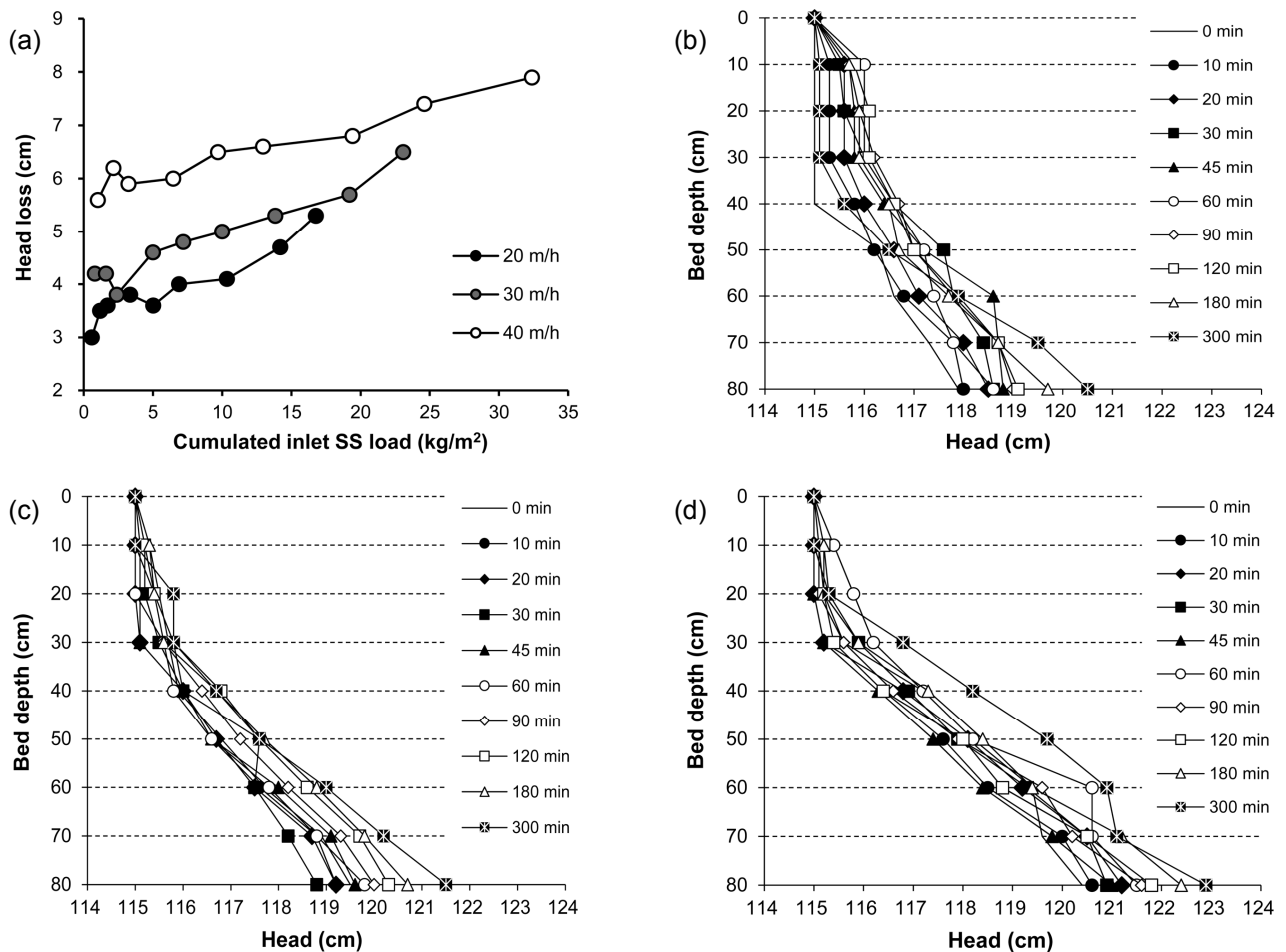


Fig. 4. (a) Head loss during operation of filtration system with respect to cumulative SS load and hydraulic head with respect to bed depth at filtration velocity of (b) 20 m/h, (c) 30 m/h, and (d) 40 m/h.

Table 3. Average suspended solid concentration and removal efficiency at each stages

Filtration velocity (m/h)	SS (mg/L)			Removal (%)		
	Influent	Supporting column effluent	Media column effluent	Supporting column	Media column	Total
20	167.7	31.0	3.94	81.5	87.3	97.6
30	166.7	33.9	4.00	79.6	88.2	97.6
40	170.8	35.2	4.01	79.4	88.6	97.7

적 처리가 가능할 것으로 사료된다.

여재층 깊이에 따른 수두 변화를 Fig. 4(b)~(d)와 같이 나타내었을 때, 대부분의 수두 손실은 여과층 하부 50 cm 이내에서 발생하는 것으로 나타났으며 상부 30 cm는 수두 손실이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 무부하 손실수두 측정의 결과와 마찬가지로 물보다 높은 비중으로 인해 여과지 하부에 여과층이 형성되는 것과 관련이 있으며, 여과층 내에서 손실 수두가 형성됨을 보여준다. 다만, 여과 선속도가 빨라짐에 따라 상부에서의 수두 손실도 관찰되었으며, 이는 높은 여과 선속도에 따른 여재층의 팽창과 관련이 있다.

여과시간에 따른 유입/유출 SS 농도를 Table 3에 제시하였다. 유입 SS 농도는 168.4 ± 4.3 mg/L의 농도로 안정적으로 유지되었으며, 유입 선속도 20, 30, 40 m/h 각각의 경우, 유출 SS의 농도는 3.9, 4.0, 4.0 mg/L으로 측정되어, 유입 선속도가 증가함에 따라 유출되는 SS 농도의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 이를 제거효율로 환산하였을 시에는 모든 경우에 97.7% 내외로써 높은 처리 효율을 나타내었으며, 유입 선속도에 따라 유의할 만한 차이를 나타내지 않았다.

본 연구에서 특별히 착안한 점은 비점오염 처리 시설에서 침전지 역할을 하는 하부 지지층 칼럼의 역할이었다. Table 3과 Fig. 5에는 유입 선속도 20 m/h일 경우, 하부 지지층 칼럼을 통과하여 여재 칼럼으로 유입되는 유입수의 SS를 측정된 결과 및 계산된 처리 효율을 도시하였다. 그 결과 처

리 효율은 81.5%로 측정되어 상당량의 유입 고형물이 하부 지지층 칼럼에서 침전 및 제거됨을 확인하였다. 특히, 유입 선속도가 증가함에 따라 처리 효율이 일부 감소하는 것은 침강속도와 유체의 이동 속도와의 관계에 의한 것으로 판단된다. 측정된 모든 경우에 있어서 처리 효율은 75% 이상으로 하부 지지층 칼럼 단독으로도 상당한 처리 효율을 나타내었다.

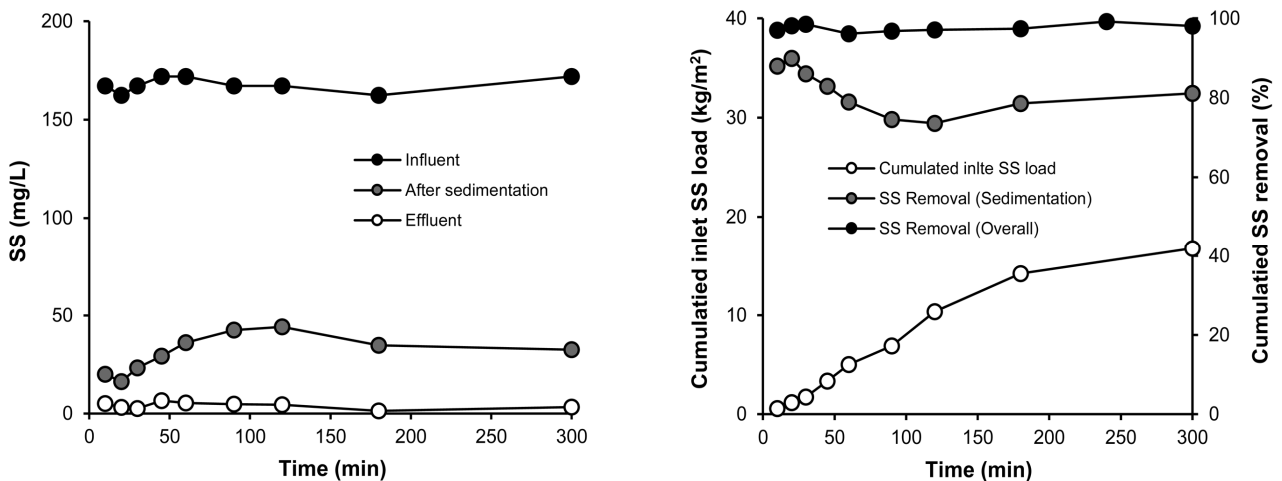
하부 지지층 칼럼의 제거효율을 제외한 여과층의 단독 SS 제거율은 유입 선속도 20, 30, 그리고 40 m/h에서 각각 $87.3 \pm 6.8\%$, $88.2 \pm 7.0\%$, 그리고 $88.6 \pm 3.3\%$ 로써, 단독 공정으로써도 80% 이상의 SS 제거율을 나타내었다. 특히, 여재 칼럼의 효율 변화는 유입 선속도와 거의 무관한 경향을 보여, 공정 조건의 변화에 관계없이 우수한 성능을 나타낼 것으로 판단되었다. 침전과 여과의 두 공정의 결합시에는 97% 이상의 높은 부유 고형물 제거 효율을 나타내었다.

3.3. 여재층 포획 고형물 부하에 따른 여재층 수리적 거동 해석

여재층의 수리적 거동에 미치는 고형물 부하의 영향을 검토하기 위하여, Urbonas³⁰⁾가 제안하고 Clark³¹⁾에 의해 검증되어 사용되고 있는 급수 모델을 이용하였다(식 (3)).^{30,31)}

$$v = r \left(\frac{m}{A} \right)^{-x} \quad (3)$$

여기서, v 는 유속(m/h), r 는 경험적 흐름 상수, x 는 경험적 지수, 그리고 m/A 는 단위 여과 면적당 SS 부하(kg/m^2)이다. 이 모델은 여재 표면의 고형물 부하가 여재를 통과하는 흐름의 속도에 직접적 영향이 있음을 가정한다. 식 (3)은 Darcy-Weisbach 식(식 (4))을 이용하여 식 (5)와 같이 손실수두의 함수로 표현할 수 있으며, 이에 의해 식 (6)을 유도하고, r 은 r' 과 정비례관계의 새로운 상수 r' 로 변형하였다(식 (7)). 식 (7)은 식 (8)과 같이 선형 형태로 변환하여, 실험결과를 적용하고, 상수 r' 와 x 를 구하였다.

**Fig. 5.** SS removal each stage with respect to (a) time and (b) influent SS load (20 m/h).

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

$$\left(\frac{2gDh_L}{fL} \right)^{0.5} = r' \left(\frac{m}{A} \right)^{-x} \quad (5)$$

$$h_L^{0.5} = r' \left(\frac{m}{A} \right)^{-x} \quad (6)$$

$$r' = r \left(\frac{fL}{2gD} \right)^{0.5} \quad (7)$$

$$\ln(h_L) = 2\ln(r') - 2x\ln\left(\frac{m}{A}\right) \quad (8)$$

여기서, f 는 마찰계수(0.11615, $Re/64$, Re 551, 부드러운 표면), L 는 여재층 길이(m), g 는 중력가속도(9.81 cm/sec^2), D 는 정사각형 파이프의 한 변의 길이(m)이며, 모두 상수이다. 본 실험에서, 여과선속도가 20-40 m/h일 때, 식 (4)의 Reynolds (Re) 수는 551-1100으로 층류이며, 여재 칼럼의 표면이 부드러우므로, f 는 다음 식 (9)을 이용하여 0.11615로 산정하여 이용하였다.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (9)$$

Table 4에 모델 적용결과를, 그리고 Fig. 6에 여과선속도와 산정된 상수 r' 와 x 의 상관관계를 나타내었다. 총 운전시간(300분)의 손실수두를 이용하여 분석하였을 때, 여과선속도 20-40 m/h에서의 상관계수(r^2)는 0.817-0.806으로, 급수 모델이 본 여과시스템의 손실수두의 거동을 비교적 잘 표현할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 초기 손실수두 감소 이후에 손실수두가 계속 증가하는 운전기간의 손실수두만을 대상으로 분석하였을 때에는, 여과속도 20, 30, 그리고 40 m/h에서 r^2 가 각각 0.886, 0.924, 그리고 0.896으로, 증가하였다. 이는 이 운전기간에 여재가 모두 여재 칼럼 하부에 위치하고 더 이상 이동하지 않는 안정적 여재층을 유지하였기 때문에, 공극이 있는 고정된 여재층의 손실수두를 해석하는 급수 모델³¹⁾에 더 적합한 상황이었기 때문으로 생각된다. 한편, 선속도와 r' 은, 운전기간에 관계없이, 매

Table 4. Power model Parameters for the stormwater runoff filtration system in this study

Filtration velocity (m/r)	Period (min)	r	x	r^2
20	0-300	6.450	0.05456	0.817
	90-300	6.005	0.01163	0.886
30	0-300	7.431	0.05347	0.790
	30-300	7.293	0.08407	0.924
40	0-300	8.731	0.03558	0.806
	30-300	8.654	0.05146	0.896

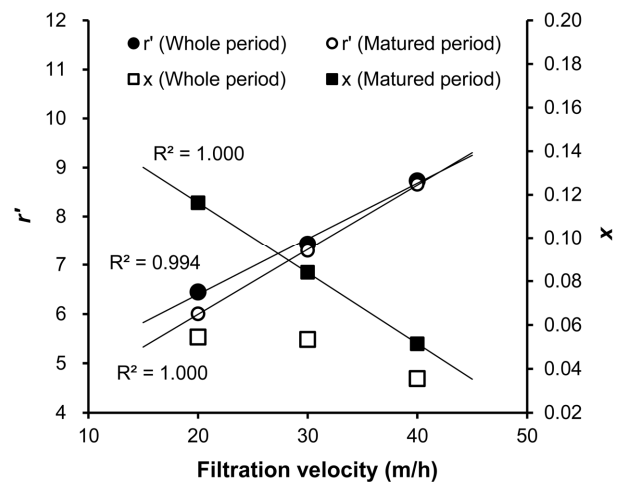


Fig. 6. Correlations between the constants of power model and filtration velocity.

우 높은 선형의 상관관계를 가지는 것으로 나타났으며, 선속도와 x 는 여재가 고정층을 이루는 기간에서 매우 높은 선형의 상관관계를 나타내었다(Fig. 6).

이 결과는 여재층에 포획된 고형물 부하를 이용하여 손실수두를 예측하는 급수 모델이 본 연구의 상향류식 여과 시스템에서도 성공적으로 적용될 수 있음을 의미한다. 여재층에서의 손실수두 해석에는 여재층의 공극율과 여재의 크기를 이용하는 Hazen 식과 Kozeny-Carmen 식 등이 주로 이용되어 왔으나,³²⁾ 최근 투수층에 포획된 고형물의 부하를 이용하여 손실수두를 예측하는 모델이 제안되고 있다. Wu³³⁾은 고형물 축적량, 고형물 크기, 그리고 여재의 크기와 여재층 투수성의 상관관계에 관한 모델을 제안한 바 있으며, Wu³⁴⁾은 이를 바탕으로, 하저(riverbed) 침투 유량과 하상 퇴적물 양의 관계에 관한 모델을 제시한 바 있다.³⁴⁾ 본 연구결과는 축적된 고형물 부하를 이용하여, 여재층의 특성(공극률 등)과 관계없이, 상향류식 여과 시스템이 손실수두의 거동 해석이 가능함을 나타내고 있다.

3.4. 여재층의 누적 고형물 제거율과 손실수두 상관관계 분석

일반적으로, 여재층의 공극률이 낮거나, 또는 고형물이 포획되어 여재층의 공극률이 감소할수록 고형물의 제거량은 증가한다. 정상상태에서 여재층의 공극률과 고형물 제거율은 식 (10)으로 표현될 수 있으며,³⁵⁾ 이를 이용하여, 본 연구에서 얻은 손실수두와 여재층에서 포획된 고형물의 상관관계를 검토하였다.

$$\frac{C}{C_0} = \exp \left[- \frac{3}{2} \frac{(1-\epsilon)}{D_C} \alpha_s \eta L \right] \quad (10)$$

여기서, C 는 여재층 유출수의 SS 농도(mg/L), C_0 는 여재층 유입수의 SS 농도(mg/L), L 는 여재층 깊이(m), ϵ 는 여재층 공극률, D_C 는 포획되는 입자의 입경, α_s 는 점착 계수, η 는

단일 포집자 충돌 계수를 의미한다. 식 (10)에서, 여재층의 특성, SS의 특성, 그리고 여재층 깊이가 일정하면, D_C , a_s , n , 그리고 L 은 하나의 상수 X 로 표현할 수 있다(식 (11)).¹¹⁾

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left[-\frac{3}{2}X(1-\epsilon)\right] \quad (11)$$

본 연구에서는 여재층에 포획된 SS의 양과 손실수두의 상관관계를 검토하기 위하여, C 는 여재층 유출수의 누적 SS 부하(kg/m^2 , C_L)로 C_0 는 여재층 유입수의 누적 SS 부하(kg/m^2 , $C_{L,0}$)로 하여, 식 (11)을 다음 식 (12)과 식 (13)으로 수정하여 이용하였다.

$$\frac{C_L}{C_{L,0}} = \exp\left[-\frac{3}{2}X(1-\epsilon)\right] \quad (12)$$

$$\ln\left(\frac{C_L}{C_{L,0}}\right) = -\frac{3}{2}X(1-\epsilon) \quad (13)$$

식 (13)에 의하면, 여재층의 공극률(ϵ)과 $\ln(C_L/C_{L,0})$ 는 선형의 상관관계를 가지므로, $\ln(C_L/C_{L,0})$ 과 여재층 손실수두의 상관관계에 의해, 본 여과 시스템의 공극률과 손실수두의 상관관계를 검토하였다.

선속도 20, 30, 그리고 40 m/h에서, $\ln(C_L/C_{L,0})$ 와 손실수두의 선형관계 상관계수(r^2)는 각각 0.898, 0.901, 그리고 0.206이었으며, Pearson 상관계수는 각각 -0.94755, -0.9491, 그리고 0.4538이었다(Fig. 7). 이 결과는 선속도 20 및 30 m/h에서 본 연구에서 사용된 여재의 공극률과 손실수두가 높은 음의 상관관계를 가짐을 나타낸다. 선속도 40 m/h에서 상관관계가 낮은 것은, 운전의 초기에 높은 선속도에 의해, 여재의 유동이 발생하여 공극률이 계속 변화하였기 때문으로 생각된다. 선속도가 40 m/h일 때, 여재가 고형물을 포획하고 비중이 증가하여 모든 여재가 여재층 칼럼 하부에 존

재하는 운전시간 60-300분에서는, $\ln(C_L/C_{L,0})$ 와 손실수두의 r^2 와 Pearson 상관계수가 각각 0.951과 -0.9751로, 매우 높은 상관관계를 나타내었다. 본 결과는 여재의 손실수두가 본 연구의 여과시스템의 공극률 추정에도 유용하게 이용될 수 있음을 나타낸다.

3.5. 최적 역세척 조건 도출

본 연구에서 사용한 세라믹 여재를 활용한 여과 시스템의 장기 운전을 위해서는 역세척 조건을 최적화 하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 최적의 역세척 조건을 도출하기 위하여 역세척 유량, 역세척 시간 및 정체수 공정의 유무에 따른 영향을 살펴보았다. 역세척 효율의 평가는 손실 수두의 회복 및 재운전 시의 SS 유출 여부를 평가 인자로 하여 진행하였다. 재운전 시의 SS 유출 여부를 살펴본 것은 역세척 시의 공기와 물의 흐름의 방향에 따른 문제를 해결하고자 함이었다. 기본적으로 시설은 상하류로 운전하여 여재의 하단부의 오염도가 높다. 역세척 시 공기 주입으로 인하여 여재의 공극에 쌓여있던 고형물이 탈락하게 되고, 일부는 공기의 흐름에 따라 상단으로 이동한다. 이후 수세척에 의하여 물은 하향류로 이동하게 되고 시설 내 모든 정체수는 하단에서 배출된다. 이와 같이 공기와 물의 방향이 반대이기 때문에 일부의 고형물은 상단부에 정체될 수 있고 이는 초기 운전 시 배출될 수 있기 때문에 이를 최소화 하는 것이 필요하다고 판단되어 본 연구에서 집중적으로 모니터링하였다.

여기에서 공기와 물의 흐름을 반대로 한 이유는 시설의 설치 및 운영에 따른 문제점을 해결하기 위함이다. 공기와 물의 흐름이 같을 경우에는 역세척 후 배출수의 배출구가 비점오염처리 후 처리수의 배출구와 동일하게 되어, 이를 제어하는 장치 및 시스템이 필요한 단점이 있고, 이러한 단점을 해결하기 위하여 공기와 물의 흐름을 반대로 설정하였다. 또한, 공기와 물을 동시에 반대방향으로 주입할 시에는 배출되는 공기의 압력으로 인하여 물의 주입이 불가능한 바, 단계적으로 공기를 주입한 후 물을 주입하여 배출하는 형태로 역세척 공정을 설계하였다.

3.4.1. 손실수두 회복

상기에 언급한 바와 같이 역세척 조건을 설정하는 데 있어 가장 중요한 것은 역세척 이후 손실 수두가 얼마만큼 회복되는 지에 대한 평가이다. 운전 최초의 수두 손실을 H_0 라 할 때, 역세척 이후 손실 수두가 H_0 일 때, 회복율을 100%라고 할 수 있으며 가장 바람직한 역세척 조건이 될 것이다. 본 연구에서는 기본적으로 설정하였던 공기세척 2분(50 m/h) + 수세척 2분(40 m/h) + 정체수 배출 없음 조건(역세척 조건 1)에서 세척 시간 및 유량을 감소시키고, 정체수 배출 공정을 단계적으로 추가하면서 이에 따르는 손실 수두의 회복 여부에 대하여 평가하였다(Fig. 8).

세라믹 여재의 초기 손실 수두는 3.8 cm이었고, 기본 조건(역세척 - 1)으로 역세척을 수행하였을 때에는 손실 수두

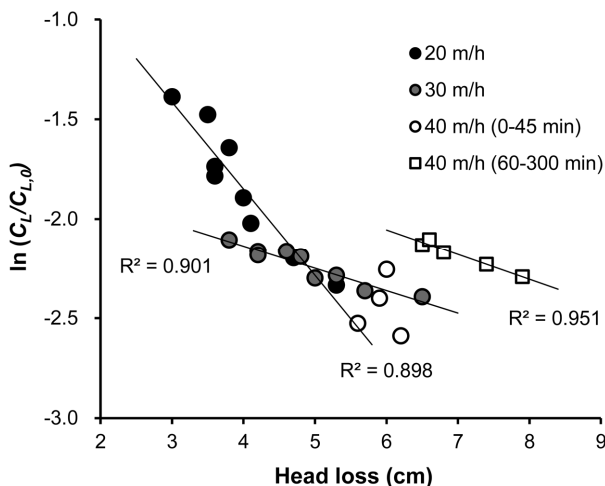


Fig. 7. The correlation between $\ln(C_L/C_{L,0})$ and the head loss of media column.

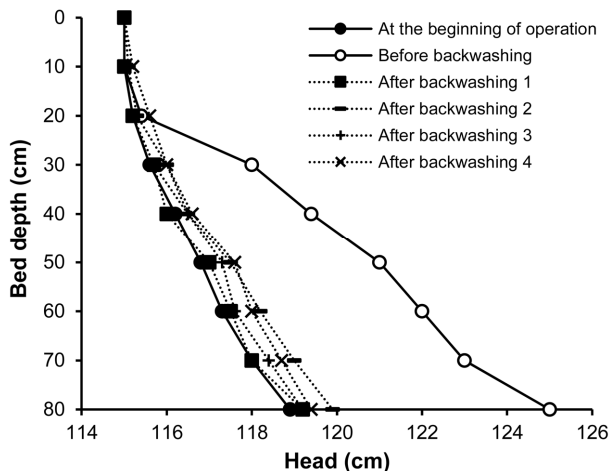


Fig. 8. Recovery of head loss by different backwashing strategies.

가 4.2 cm로 회복율이 93.5%로 나타났다. 수세척의 시간을 1/2로 한 역세척 - 2 조건에서는 손실수두가 4.9 cm로 회복율이 82.3%로 감소하였다. 동일한 조건에서 정체수의 배출을 수행하였을 때에는 기본 조건(역세척 - 1)과 같이 회복율이 95.1%로 회복되었으며, 여기에서 공기와 물의 유량을 1/2로 한 조건(역세척 - 4)에서는 손실수두가 4.3 cm로 91.9%의 회복율을 보였다. 이 결과 값은 공기와 물의 유량이 2배였던 조건(역세척 - 3)과 비교하여 손실 수두가 0.1 cm의 차이를 보여 측정 오차 이내로 판단된다.

위의 결과를 종합하면, 정체수의 배출이 없을 시에는 수세척 시간을 2분 이상(40 m/h 조건)을 유지하여야 여재 내부의 고형물을 적절히 제거할 수 있으나 정체수의 배출을 수행하면 1분 이내의 수세척으로도 충분한 역세척을 수행할 수 있으며, 공기와 물의 유량을 1/2로 감소시켰을 경우에도 성능의 큰 변화는 없어 경제성을 고려하였을 때에는 조건 4(유량 1/2)를 최적 조건으로 설정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

3.4.2. 초기 SS 유출 제어

본 연구에서 손실 수두의 회복과 더불어 살펴본 사항은 역세척 직후 비점오염처리 운전을 실시할 경우에 유출되는 SS의 정도이다. 역세척으로 여재 내부의 고형물이 완전히 제거되지 않았을 경우에는 상향류의 유입수 흐름과 함께 고형물이 유출되어 유입 SS 농도인 200 mg/L 보다 높게 유출될 가능성이 있고, 이는 처리 공정의 효율을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 이와 같은 현상의 정도를 파악하고, 초기 SS 유출을 제어할 수 있는 역세척 공정을 선정하고자 4가지의 조건을 시험하였고, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

기본 역세척 조건(역세척 - 1)로 세척한 경우, 초기 SS농도는 37.0 mg/L로 낮았으나, 3분 후 최대 163.5 mg/L로 상승하였고, 이후 감소하였다. 수세척의 시간을 1/2로 설정한 경우(역세척 - 2)에는 그 농도가 더욱 증가하여 초기 125.3 mg/L가 유출된 후 3분 후 최대 292.9 mg/L가 유출되고 점차

Table 5. Backwashing performance in terms of controlling effluent SS concentration

Backwashing strategy	Drainage	Recovery of initial head loss (%)	Maximum SS in backwashing effluent (mg/L)	Average SS removal (%)
1	No	93.5	163.5	95.3
2	No	82.3	292.9	91.0
3	Yes	93.5	92.8	99.1
4	Yes	91.9	343.9	98.5

감소하였으나, 감소하는 폭도 기본 조건(역세척 - 1)에 비하여 적었다.

정체수의 배출을 고려한 역세척 - 3 조건의 경우에는 초기 92.8 mg/L에서 빠르게 감소하는 경향을 보여 5분 이후에는 10 mg/L 이하의 유출 SS값을 보였으며, 역세척 유량을 1/2로 감소시킨 역세척 - 4 조건에서는 초기 농도가 343.9 mg/L로 다소 높게 유출되었으나 빠르게 감소하여 약 5분 이후에는 10 mg/L 이하의 유출 SS값을 보였다.

그래프의 면적을 이용하여 60분 운전 기간 내 총 유출 SS를 산정하였으며, 유입 SS를 고려하여 운전 기간 평균 처리 효율을 도출하여 Table 5에 나타내었다. 모든 경우에 있어서 91% 이상의 높은 처리 효율을 보였으나, 정체수의 배출을 추가한 조건 3과 4의 경우에는 각각 99.1% 및 98.5%의 높은 제거 효율을 보였다. 따라서 세라믹 여재를 사용하였을 경우, 본 연구에서 시험한 어떠한 경우에도 SS의 제어 부분에 있어서는 만족하는 결과를 나타내었으며, 장기 운전을 고려하였을 때 정체수의 배출을 추가한 조건 3, 4를 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

이와 같은 결과를 종합하였을 때, 역세 후 SS의 유출에 따른 처리 효율의 저감은 기준치를 초과할 정도로 크지 않음을 확인할 수 있었다. 다만, 정체수의 배출이 고려되지 않은 경우에는 침전조에 축적된 SS가 유출될 가능성이 크며 이에 따른 처리 효율의 저감이 10분 이상 일어날 수 있어 정체수의 배출을 고려하는 것이 장기적인 측면에서 바람직

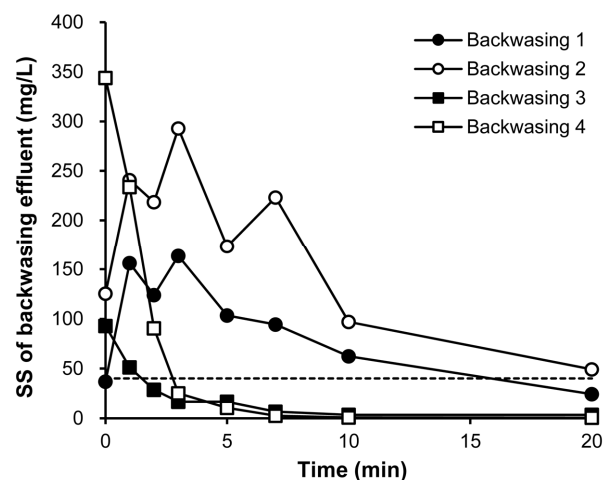


Fig. 9. Effluent SS concentration in initial phase of operation after different backwashing strategies.

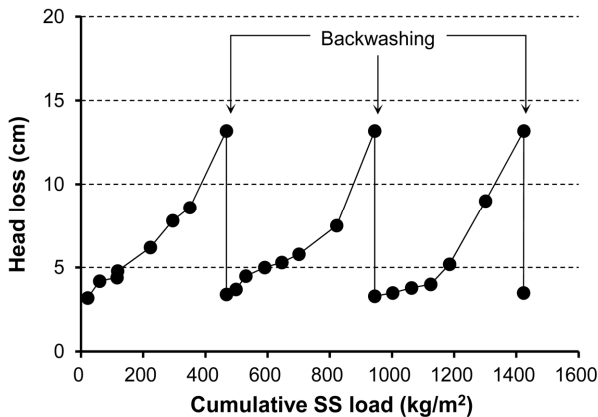


Fig. 10. Variation of head loss with respect to cumulative SS load (backwashing strategy 4).

함을 확인할 수 있었다. 정체수의 배출이 고려되었을 때에는 SS의 유출을 제어하기가 용이하였으며, 유량을 1/2로 감소시킨 극단의 경우에도 약 98.5% 이상의 높은 평균 처리 효율을 보여 안정적인 운전이 가능할 것으로 판단된다. 특히 본 역세척 조건 실험의 경우에는 여재의 폐색을 위하여 m^2 당 400 kg 이상의 SS를 유입하는 극단적인 조건을 설정하였음에도 기준을 만족하는 결과가 도출되어, 실제 운전시에는 더 나은 성능을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4.3. 최적 역세척 조건의 검증을 위한 연속 실험

앞에서 설정된 최적 역세척 조건(조건-4)이 반복적인 역세척 운전에서도 사용될 수 있음을 검증하기 위하여, 3회 반복 운전/역세척을 실시하였고 이때의 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 3회의 반복 운전/역세척을 수행하였을 때, 역세척 후 손실 수두가 초기 값과 거의 유사하게 저감되는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 3회의 반복 운전에도 손실 수두가 상승하는 경향은 크게 관찰되지 않았다. 1회의 폐색시까지 운전할 수 있는 누적 SS 부하는 약 $400\text{--}450 \text{ kg/m}^2$ 으로 큰 변화를 보이지 않았으며, 이로 미루어 볼 때 본 연구에서 설정한 최적 역세척 공정을 이용한 장기 운전이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 세라믹 여재를 활용한 상향류식 여과 시스템의 비점오염원 처리 효율 평가 및 최적 운전 조건 설정을 진행하였다. 하단 침전조와 상단의 여과조로 이루어진 상향류 여과 시스템을 투과 선속도 $20\text{--}40 \text{ m/h}$ 조건에서 운전하였을 경우, 총 고형물의 양이 30 kg/m^2 에 이르는 조건에서도 최대 수두 손실이 3 cm 내외에 그쳐 안정적인 운전이 가능하였다. 동일 실험에서 96% 이상의 부유고형물이 여과 시스템을 통하여 제거되어 효율적인 강우유출수 처리가 가능함을 보여주었다. 특히, 여재층 하단에서 약 80%의 SS가 제거되어 일정 입도 이상의 부유고형물이 여재층

에 부하를 가하지 않고 효과적으로 제거될 수 있음을 확인하였다.

여재층에 포획된 고형물의 양과 여재층의 손실수두의 관계는 급수 모델에 의해 표현될 수 있었다. 여과 선속도가 $20\text{--}40 \text{ m/h}$ 이고 여재가 유동하지 않고 안정화되었을 때, 급수모델의 상수들이 선속도와 높은 선형의 상관관계를 나타내었으며(r^2 0.886-0.924), 여재층의 누적고형물 제거율 및 공극률과 손실수두의 관계 역시 높은 상관관계를 나타내어(r^2 0.898-0.951), 향후 본 여과시스템의 성능과 수명 예측이 가능할 것으로 판단된다.

최적의 역세척 조건을 설정하기 위하여 공기 및 수세척 시간과 유량, 그리고 정체수 배출 공정의 유무에 따른 영향을 확인하였으며, 실험한 모든 조건에서 만족할 만한 손실수두의 회복(> 82%)과 부유고형물 제거효율(> 91%)을 확보할 수 있었다. 다만, 역세척 직후의 부유고형물의 배출을 최소화하기 위해서는 공기세척과 수세척 공정 사이에 정체수 배출 공정의 도입이 효과적인 것으로 파악되었다. 본 연구에서 설정한 역세척 조건을 적용하였을 경우에 반복적인 운전이 가능함을 확인하였으며, 역세척을 수행하기까지의 1회 운전에서 약 $400\text{--}450 \text{ kg/m}^2$ 의 부유고형물 처리가 가능하여 장기운전이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

본 시스템의 우수한 효율은 세라믹 여재와 상향류식 시스템의 적용에 의한 것으로, 하단 침전조를 이용해 여과 시스템의 전체적인 부하를 경감시켰으며, 기계적인 특성 및 입도 분포가 양호한 세라믹 여재를 사용함으로써 역세척이 용이하였다. 특히 상향류식으로 운전함으로써 역세척 후 역입도 구성에 대한 문제도 해결함으로써 비점오염원 처리에 용이한 구조임을 확인하였다.

Acknowledgement

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

KSEE

References

1. Korea Office of Prime Minister; Korea Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries; Korea Ministry of Knowledge Economy; Korea Ministry of Environment; Korea Ministry of Land, Korea Transport and Maritime Affairs; Korea National Emergency Management Agency; Korea Rural Development Administration; Korea Forest Service (2012). Comprehensive Measures for Non-point Source Pollution Management in the Four Major Rivers.
2. Yi, S.-J. and Kim, Y.-I., "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.*, **36**(10), 719~723 (2014).
3. Siriwardene, N. R., Deletic, A. and Fletcher, T. D., “Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from laboratory study,” *Water Res.*, **41**, 1433~1440(2007).
4. Choi, W. S., Song, C. S. and Kim, S. K., “A study on the headloss of filter media for treatment of road runoff,” *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **22**(6), 697~704(2008).
5. USEPA, “Storm Water Technology Fact Sheet: Sand Filters, EP 832-F-99-007,”(1999).
6. Ballard, B. W. and Kellgher, R., “The SUDS Manul. Construction Industry Research & Information Association (CIRIA),” (2007).
7. Hsieh, C. and Davis, P., “Evaluation and optimization of bio-retention media for treatment of urban storm water runoff,” *J. Environ. Eng.*, **131**(11), 1521~1531(2005).
8. Ahn, T.-W., Choi, I.-S. and Oh, J.-M., “Evaluation of the water purification efficiency of waste LCD glass media by using foaming technology,” *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **24**(4), 369~375(2010).
9. Kim, S., Oh, H. and Ahn, J., “Road runoff treatment using pilot scale-NPS treatment plant filling up expended polypropylene media,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(10), 711~718 (2014).
10. Lim, H. S., Lim, W., Hu, J. Y., Ziegler, A. and Ong, S. L., “Comparison of filter media materials for heavy metal removal from urban stormwater runoff using biofiltration systems,” *J. Environ. Manage.*, **147**, 24~33(2015).
11. Franks, C., Davis, A. P. and Aydilek, A. H., “Geosynthetic filters for water quality improvement of urban storm water runoff,” *J. Environ. Eng.-ASCE*, **138**(10), 1018~1028(2012).
12. Rodgers, M., Mulqueen, J. and Healy, M. G., “Surface clogging in an intermittent stratified sand filter,” *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, **68**, 1827~1832(2004).
13. Pratap, M. R., Khambahmettu, U., Clark, S. E. and Pitt, R., “Stormwater polishing: Upflow vs. downflow filters” in Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2007, Tmp, Florida, United States(2007).
14. Boller, M. A. and Kavanaugh, M. C., “Particle Characteristics and Headloss Increase in Granular Media Filtration,” *Water Res.*, **29**(4), 1139~1149(1995).
15. Kang, S., Kim, S., Lee, S. and Lee, T., “An Upflow-Type Filtration Device Using Expanded Polypropylene Media (EPM) to Treat First Flush of Rainwater,” *Water Environ. Res.*, **88** (3), 195~200(2016).
16. Siriwardene, N. R., Deletic, A. and Fletcher, T. D., “Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study,” *Water Res.*, **41**, 1433~1440(2007).
17. Hengren, L., Goonetilleke, A. and Ayoko, G. A., “Analysis of heavy metals in road-deposited sediments,” *Anal. Chim. Acta.*, **571**, 270~278(2006).
18. Brydon, J., Oh, I., Wilson, J., Hall, K. and Schreier, H., “Evaluation of Mitigation Methods to Manage Contaminant Transfer in Urban Watersheds,” *Water. Qual. Res. J. Can.*, **44**, 1~15(2009).
19. Bian, B. and Zhu, W., “Particle size distribution and pollutants in road-deposited sediments in different areas of Zhenjiang, China,” *Environ. Geochem. Hlth.*, **31**, 511~520(2009).
20. Seattle Public Utilities and Herrera Consultants, “Seattle Street Sweeping Pilot Study - Monitoring Report,”(2009).
21. Lee, C. S.-L., Li, X., Shi, W., Cheung, S. C.-N. and Thornton, I., “Metal contamination in urban, suburban and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics,” *Sci. Total. Environ.*, **356**, 45~61(2006).
22. Kartal, S., Aydin, Z. and Tokalioglu, S., “Fractionation of metals in street sediment samples by using the BCR sequential extraction procedure and multivariate statistical elucidation of the data,” *J. Hazard. Mater.*, **132**(1), 80~89(2006).
23. Zhang, M. and Wang, H., “Concentrations and chemical forms of potentially toxic metals in road-deposited sediments from different zones of Hangzhou, China,” *J. Environ. Sci.*, **21**, 625~631(2009).
24. Shi, G., Chen, Z., Xu, S., Zhang, J., Wang, L., Bi, C. and Teng, J., “Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China,” *Environ. Pollut.*, **156** (2), 251~260(2008).
25. Tanner, P. A., Ma, H. and Yu, P. K. N., “Fingerprinting metals in urban street dust of Beijing, Shanghai, and Hong Kong,” *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 7111~7117(2008).
26. Wei, B. and Yang, L., “A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China,” *Microchem. J.*, **94**(2), 99~107(2010).
27. Hu, X., Zhang, Y., Luo, J., Wang, T. and Lian, H., “Total concentrations and fractionation of heavy metals in road-deposited sediments collected from different land use zones in a large city (Nanjing), China,” *Chem. Spec. Bioavailab.*, **23**(1), 46~52(2011).
28. Kim, D.-G., Jeong, K. and Ko, S.-O., “Removal of road deposited sediments by sweeping and its contribution to highway runoff quality in Korea,” *Environ. Technol.*, **35**, 2546~2555(2014).
29. Korea Ministry of Environment, “Manual for installation and management of non-point pollution reduction facilities,”(2014).
30. Urbonas, B. R., “Design of sand filter for stormwater quality enhancement,” *Water Environ. Res.*, **71**(1), 102~113(1999).
31. Clark, S. E. and Pitt, R., “Solids removal in storm-water filters modeled using power equation,” *J. Environ. Eng.*, **135** (9), 896~899(2009).
32. Indraratna, B., Nguyen, V. T. and Rujikiatkamjorn, C., “Hydraulic conductivity of saturated granular soils determined using constriction-based technique,” *Can. Geotech. J.*, **49**, 607~613(2012).
33. Wu, F.-C., “Stochastic modeling of sediment intrusion into gravel beds,” PhD thesis, University of California, Berkeley (1993).
34. Wu, F.-C. and Hung, H.-T., “Hydraulic resistance induced by deposition of sediment in porous medium,” *J. Hydraul. Eng.*, **126**(7), 547~551(2000).
35. American Water Works Association (AWWA), “Water quality and treatment,” 5th Ed., McGraw-Hill, New York(1999).