도시지역 초기 우수 오염물질 제거를 위한 스마트 필터 시스템 성능 평가 : Lab 규모 및 실규모 실험

Smart Filter System Performance for Removal of Contaminants from Urban Storm Water : Lab and Pilot Scale Tests

강애지¹ · 정설화² · 윤석민¹ · 오재일³ · 박노석^{1,*}
Ae-Ji Kang¹ · Seolhwa Jeong² · Sukmin Yoon¹ · Jeill Oh³ · No-Suk Park^{1,*}

¹경상대학교 토목공학과 및 공학연구원 · ²블루그린링크(주) · ³중앙대학교 사회기반시스템공학부
¹Department of Civil Engineering and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

²BlueGreenLink Co., Ltd. · ³Department of Civil Engineering, Chung-Ang University

(Received January 3, 2019; Revised January 11, 2019; Accepted January 15, 2019)

Abstract : Urban stormwater runoff contains high concentrated contaminants such as various particulate and heavy metals. Among BMPs (Best Management Practices), filtration system has been proposed to treat stormwater with multiple contaminants. This paper discusses laboratory and pilot scale smart filter system, those use hydrophobic fiber ball as media, for treating urban storm water in Korea. Unlike the existing systems, this smart filter system can be operated for long period (four months) without replacement of the filter media through the back washing. From the results of experiments, periodic backwash made it possible to recover head loss and filtration rate to the initial level repeatedly. The filter system proved effective for the simultaneous removal of turbid particle, TSS, BOD, COD and heavy metals (Cu, Mn, Zn).

Key Words : Urban Stormwater, Backwash, Smart Filter System, Fiber Ball Media

요약 : 도시 빗물 유출수에는 다양한 미립자 및 중금속과 같은 고농축 오염 물질이 포함되어 있다. BMPs (Best Management Practices) 중에서 여러 형태의 여과 시스템들이 초기우수 처리의 방안으로 이제까지 제안되었다. 본 논문에서는 도시 내 초기 우수를 처리하기 위해 소수성 광섬유를 여재로 충전한 깔럼을 대상으로 실험실 및 파일럿 규모의 스마트 필터 시스템을 구성하고 장기간 실험한 결과를 제시하였다. 기존의 시스템과는 달리 본 스마트 필터 시스템은 역세척을 통해 여재를 교체하지 않고 4개월 동안 운전할 수 있었다. 또한 운전 결과, 주기적인 자동 역세척은 수두 손실과 여과 속도를 초기 수준으로 회복할 수 있게 하였으며 본 연구에서 제안한 여과 시스템은 수질 측면에서 탁도 입자, TSS, BOD, COD 및 중금속(Cu, Mn, Zn)의 제거에도 효율이 입증되었다.

주제어 : 도시지역 초기 우수, 역세척, 스마트 필터 시스템, 섬유사 여재

1. 서론

도시지역에서 발생하는 오염원은 크게 점오염원(point source)과 비점오염원(non-point source)으로 구분된다. 점오염원은 가정하수, 공장 폐수와 같이 오염 배출원이 하나의 점으로 표현될 수 있는 오염원으로 오염물질의 이동 경로가 명확해 상대적으로 처리가 용이한 오염원이거나, 비점오염원은 강우 시 지표면의 오염물질이 빗물에 씻겨 유출되는 오염원으로 일정한 유출경로가 없기 때문에 처리가 매우 어렵다. 비점 오염원은 오염물질의 유출이 강우 시에만 집중되고, 오염원이 넓은 지역에 분산되어 있기 때문에 오염원으로서의 중요성이 간과되기 쉽다. 그러나 강우초기에 지표면의 오염물질이 유출되는 초기우수(first-flush) 유출수(runoff)는 오염물질의 유출농도가 높고, 특히 도시지역의 경우 중금속 등의 독성물질 함유가능성이 높아 이에 대한 적절한 제어방안이 지속적으로 요구되고 있다.¹⁻⁴⁾

비점오염원은 그 발생원과 운반 과정이 다양하므로 관리

방법도 다양하며 점 오염원과 같이 간단하게 처리하기는 불가능하다. 따라서 초기우수를 처리하는 데 있어서 하나의 처리방법을 이용하여 제어하기 어려우므로 비점오염원에 대해서는 최적관리기술(Best Managements Practices, BMPs)의 측면에서의 접근 방법이 필요하다.^{5,6)} 앞서 많은 선행 연구자들은 오염물질이 함유된 초기 우수를 처리하는 방안으로 이온교환법, 전해법, 전기투석법, 침전 및 침강, 또한 역삼투막법 등을 제안하였으나,^{4,7)} 이러한 물리화학적 처리 방법들은 경제적 타당성을 가지지 못하거나,⁸⁾ 너무 복잡하여 운전이 어렵고, 처리 대상오염물질에 대해 한계를 가지는 것으로 평가되었다.^{6,9)} 또한 상기 언급된 방법의 경우 도시지역에서 발생하는 초기 우수를 처리하기 위해 공간적인 문제로 소요되는 시스템 내의 체류시간을 확보하기에 무리가 있다.¹⁰⁾ 그러므로 최근 Reddy 등¹¹⁾은 도시에서 발생하는 초기 우수에 포함된 오염물질 및 입자를 작은 공간 내에 설치할 수 있는 시스템으로 가장 효율적으로 처리할 수 있는 방법으로 여과(filtration)를 제안하였다. 그들은 여

* Corresponding author E-mail: nspark@gnu.ac.kr Tel: 055-772-1798 Fax: 055-772-1799

재로 모래, 자갈, 큰 자갈, 제올라이트(zeolite), 방해석(calsite), 쇳가루(iron filings), 활성탄(activated carbon), 퇴비(compost), 코코넛 껍질(coconut fiber), 톱밥(sawdust) 및 타이어 조각(tire crumbs) 등을 사용하여 도시에서 발생하는 초기 우수에 포함된 총부유물질(Total Suspended Solids), 영양염류(nutrients) 및 중금속의 제거 능력을 사전 평가하였으며, 연구 결과를 바탕으로 방해석, 제올라이트, 모래 및 쇳가루의 혼합 여재가 오염물질 및 중금속의 제거능이 높음을 실험실 규모의 실험을 통해 증명하였다.¹¹⁾ 또한 Seelsaen 등¹²⁾은 초기 우수에 포함된 중금속(구리, 아연)을 제거하는 데에 퇴비(compost)를 여재로 구성하여 실험을 수행한 결과, 각각 90% 이상 여재에 흡착됨을 보였다. 그러나 여과수에서 용존 유기물(Dissolved Organic Carbons, DOC)이 누출되는 현상이 나타났다. Kim 등¹³⁾은 전처리로 침전 공정을 설치하여 고속도로에서 발생하는 초기 우수 내 입자성 오염물질을 제거하고 상등수를 제올라이트 여재로 처리하는 시스템을 고안하여 중금속인 구리, 아연, 및 납의 제거 성능을 평가하는 연구를 수행하였다.

그런데 앞서 언급한 여재를 이용한 여과 시스템으로 초기 우수 내의 오염물질 및 입자를 제거하는 경우에 장기간 운전 전에 기인한 여재 막힘 현상(clogging)에 대한 적절한 대책 수립이 중요하다. 시스템을 성공적으로 운전하려면 도시 하천 및 호소 근처 공간적인 제약이 있어서 역세척이나 여재의 교환이 원활히 이루어져야 한다. 그러나 이제까지 선행 연구에서는 여재의 선정과 대상 원수에 포함된 오염물질 및 중금속의 제거율에만 초점이 맞추어져 있다. 여과 공정의 효율적인 운전 전에 반드시 필요한 기술은 주기적인 역세척을 통한 장기간 운전 전에 대한 안정성을 확보하는 것이다. 초기 우수 내의 오염물질 및 입자성 물질을 제거하는데 있어서 가장 많은 관심을 받고 있는 기술이 여재를 이용한 여과 공정임을 인식한 바, 여재 막힘 현상을 제어하지 못한다면 최적관리기술의 한 방법으로써의 기능을 상실할 수 있다. 이제까지 많은 연구가 실험실에서 여재의 여과 및 흡착 성능을 평가할 수밖에 없었던 제한 사항도 이러한 역세척이 문제가 되었기 때문이라 사료된다.

이에 본 연구에서는 실험실 규모의 여재 평가와 이를 확장한 파일럿 규모의 스마트 여과 시스템을 현장에 직접 설치하여 여과와 역세척이 반복되는 장기간 운전 효율을 자세히 조사하였다. 연구 기간 동안 5번의 강우 사상이 발생하여 초기 우수의 오염물질 제거 효율을 측정하였으며, 주기적인 역세척으로 인한 수두 회복능력을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1. 여재

Reddy 등¹¹⁾은 초기 우수 오염물질 제거를 위한 여재 선정에 있어서 8가지의 조건을 제시하였다. 여재 선정 조건은 첫 번째 조성의 일관성(consistent in composition), 두 번째 만

Fig. 1. Fiber media used for this study (Media shape and SEM (Scanning Electron Microscope) image).

Table 1. Properties of fiber media used for this study

Property	Value, Unit
Source material	Polyethylene
Equivalent diameter	45~55 mm
Thickness of fiber	4.3~13.0 Denier
Specific gravity	1.68
Specific surface area	637~712 m ² /m ³
Compression recovery rate	98%

들기 쉽고 상용화된 여재(easily and/or commercially available), 세 번째 낮은 가격(low in cost), 네 번째 내구성(long lasting), 다섯 번째 투과성 확보(permeable), 여섯 번째 친환경성(environmentally benign), 일곱 번째 다루기 쉬운 것(easy to handle during construction), 마지막으로 여덟 번째 효율적인 오염물질 제거(effective for contaminant removal) 등이다. 상기와 같은 여재 선정 조건을 고려하여 본 연구에서는 PE (Polyethylene) 소재의 섬유여재를 선정하여 실험실 및 파일럿 규모의 실험을 수행하였다(Fig. 1). Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 소수성 섬유를 직경 45~55 mm 정도의 솜뭉치(cotton ball) 형상으로 성형하였으며 여재의 자세한 특징은 Table 1에 정리하였다.

2.2. 실험실 규모 여과 실험

여재 선정 후 최적 여과속도(filtration rate) 및 최적 압축률(compression ratio, %)을 도출하기 위해 실험실 규모의 테스트를 수행하였다(Fig. 2). 본 연구에서 “압축률”은 ‘(최초 여재 충전 높이-압축 시 충전 높이)/최초 여재 충전 높이’를 백분율(%)로 나타낸 설계 인자이다. 여재 컬럼에서 압축을 하지 않는 경우 초기 충전 높이는 80 cm이었으며, 여과 면적은 0.01 m²이었다. 상향류 여과 방식으로 구성된 본 실험실 규모 장치의 처리 용량은 여과 속도 40 m/hr 기준으로 1 m³/day로 구성하였다. 여재를 충전한 후 압축률을 40%까지 증가시키면서 다양한 여과속도를 대상으로 손실수두를 측정하였다. 여과 속도는 300~1,800 m/day 범위를 대상으로 압축률과 손실수두 상관관계를 조사하였다.

실험실 규모에 사용된 원수는 강우 시 하수처리장 유입수를 대상으로 실험하였으며, 최적 여과속도와 압축률을 도출하면서 유입수와 유출수의 총부유물질(TSS, Total Suspended Solids), 입도분포(Particle Size Distribution, PSD)를 측정하였다. 실험은 국내 우기인 2014년 7월에 수행하였다. 본 실험

Fig. 2. Two-dimensional lab-scale filter system.

험기간 동안 여과 실험에 사용된 평균 유입수질은 총부유물질이 117.3 ± 1.7 mg/L, 유입수의 평균 입도(D_{50})는 $7.31 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 총부유물질의 측정은 유입 및 유출수를 측정 한 후 기존 연구에서 사용한 standard method¹⁴⁾를 이용하여 측정하였고, 입도 분포의 측정은 입자계수기(Model PC 2440 PS, CHEMTRA, USA)를 사용하여 수행하였다.

여과속도는 정량 펌프 및 유량계를 통하여 조절이 가능하도록 하였으며, 여과 진행시 발생하는 수두 손실 및 유량은 데이터 로거(data logger)를 이용하여 자동으로 저장하도록 하였다.

2.3. 파일럿 규모 실험

본 연구에서 구성한 파일럿 규모의 smart 필터 시스템은 기존 연구와 차별성을 부여하기 위해 Fig. 3과 같은 단계별 운전 로직을 가지도록 설치하였다. 파일럿의 경우 간헐적인 강우 시 및 평상시 하수에 대해서 24시간 운영을 통해 시스템 및 여재의 장기 운영에 따른 오염 제거율 및 역세척에 의한 손실 수두 회복 능력을 평가하였다. 본 연구에서 상향류 여과방식을 선택한 이유는 부채(buoy)를 이용하여 초기 우수가 유입되는 경우 여재를 압축하여 공극을 최대한 감소 시키기 위함이다(Fig. 4). 또한 본 여과 시스템에 ‘smart 여과

Fig. 3. Conceptual diagram of pilot scale smart filter system for stormwater.

Fig. 4. Pilot scale filter system.

필터시스템'을 명명한 이유는 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 여과 중 실시간 손실 수두를 측정하여, 일정 손실 수두가 발생하면 자동으로 역세가 이루어지도록 운전 로직을 구성하여, 공기 세정 10분, 물 + 공기 세정 10분, 총 2회의 역세를 수행하도록 하였으며, 역세척이 완료되면 다시 여과공정이 수행되도록 설계 운전하였기 때문이다.

Fig. 4에서 도시한 파일럿 규모의 필터시스템의 설치 장소는 국내 D시 S강변이다. 여과속도는 20 m/hr 및 40 m/hr로 구분하여 정속 여과로 실험하였으며, 여재 두께는 30 cm, 여과 면적은 0.5 m²으로 구성하였다. 실험 기간 동안 5회의 강우 시 강우 강도를 측정하여 하수처리장 유입수 수질과의 상관성을 분석하였다. 총 5회의 강우 중 여과속도 40 m/hr 조건 4회, 여과속도 20 m/hr 조건 1회에 대해 강우 유입수 및 유출수에 대해 탁도, BOD, COD, 총부유물질(TSS) 및 중금속 농도(구리, 망간, 아연)를 측정하였다. 실험 기간 동

안 필터 시스템으로 유입된 초기 우수의 수질은 다음 Table 2와 같이 정리하였다.

2.4. 수질 분석

파일럿 규모의 여과 시스템에 유입수인 초기 우수와 처리수는 상기 언급한 수질 항목에 대해 standard method⁽¹⁴⁾에서 제시하고 있는 방법론에 의해 각각 수질 분석을 수행하였다. 중금속 농도 측정에 있어서는 원자흡착 분광 스펙트로미터(AAS, atomic adsorption spectrophotometer)를 사용하였다. 모든 샘플의 수질측정은 3중으로 측정하여 신뢰성을 검증하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 실험실 규모 여과 실험 결과

다음 Fig. 5는 상기 언급한 실험실 규모의 여과 실험 장치를 대상으로 강우 시 하수처리장 유입수 내 총부유물질(TSS) 제거효율을 도시한 것이다. 강우 시 초기 우수의 유입 총부유물질 117.3 ± 1.7 mg/L로 측정되었으며, 여과 실험 장치에서 처리한 처리수의 농도는 31.2 ± 8.2 mg/L로 73% 이상의 처리효율을 안정적으로 보였다. 본 실험은 충전 높이 80 cm를 기준으로 압축률 30% 조건에 실험한 결과이다. 강우 지속시간은 약 2시간 정도였으며, 하수처리장으로 유입되는 초기 우수를 모아서 여과 실험을 수행한 또 다른 결과로 유입수 및 유출수 내 포함된 입자의 크기 분포를 측정하여 Fig. 6에 제시하였다.

Table 2. Composition of contaminants in storm wastewater

Contaminant material	Concentration (min. - max.)
Turbidity (NTU)	150.2 - 1344.8
SS (Suspended Solids) (mg/L)	220.6 - 660.5
COD _{Mn} (mg/L)	80.3 - 175.5
BOD ₅ (mg/L)	77.6 - 320.0
D ₅₀ (μm)	7.05 - 7.88 for 1 st , 2 nd , 3 rd and 4 th rainfall
Copper (mg/L)	0.080 - 0.123
Manganese (mg/L)	0.107 - 0.153
Zinc (mg/L)	0.187 - 0.561

Fig. 5. TSS concentration of influent and effluent (Lab scale filter system).

Fig. 6. Particle size distribution of influent and effluent (Lab scale filter system).

유입수의 평균 입도(D_{50})는 $7.31 \mu\text{m}$ 는 이었으며, 유출수의 평균 입도(D_{50})는 $4.55 \mu\text{m}$ 로 나타났다. Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 $10 \mu\text{m}$ 이하의 미세 입자의 제거 효율은 약 90% 정도였다. $10 \mu\text{m}$ 이상 입자에 대해서는 94% 이상의 제거 효율이 나타났다. 유입수내 입자의 직경이 증가할수록 입자 개수가 감소하는 현상이 나타나고, 제거 효율 또한 증가하고 있다. 본 연구에서 선정한 여재의 경우 $5 \mu\text{m}$ 이하의 작은 미세 입자의 제거율도 약 86%가 나타나 적용가능성을

높이 평가할 수 있다.

당초 실험실 규모의 여과실험 수행 목적은 최적 여과속도 및 압축률을 도출하기 위함이었다. 강우시 모아 놓은 초기 우수를 대상으로 다양한 여과 속도에 따라서 발생하는 여과조 후단의 손실 수두를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7은 압축률과 손실수두와의 관계를 실험 결과로 나타낸 것이다. 환경부에서 제시하고 있는 비점오염 저감시설 지침에 의하면 초기 손실 수두 값은 100 mm 이하가 되도록 권장

Fig. 7. Head loss versus compression ratio (%).

Fig. 8. SS concentration versus compression ratio (%) versus porosity (%).

하고 있으며,¹⁵⁾ 이러한 기준을 만족할 수 있는 최적여과 속도와 압축률을 결정하여 설계에 반영하여야 한다. Fig. 7에서 이러한 조건을 만족하는 운전 조건은 여과속도 40 m/hr 이하, 그리고 그러한 조건에서 압축률은 30% 이하 정도임을 알 수 있다.

압축률이 증가하면 처리수의 수질이 좋아지는 것은 어렵지 않게 예상할 수 있다. 그러나 저항이 증감함에 따라 손실 수두가 증가되어 처리 시에 동력이 필요하거나 유입부에 높은 수두가 필요하게 된다. 이에 최적의 압축률을 도출하기 위해서 0%, 15%, 30% 조건에서 여재의 공극률과 SS

제거 효율과의 상관관계를 분석하기 위해 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

압축률 0% 조건에서 여과 컬럼 내에서의 공극률은 96%였으며, 처리수의 SS는 35 mg/L로 나타났으며, 압축률이 15% 및 30% 조건에서 공극률은 각각 93%, 91%, 처리수의 SS는 30 mg/L와 28 mg/L로 나타났다. 실험결과 압축률은 15%와 30% 조건에서 큰 차이가 없으나 압축 시 필요한 압축력은 약 2배 이상으로 소요되는 것으로 조사되어 파일럿 규모의 여과 실험시 운전에 있어서는 압축률을 15%로 선정하였다.

Fig. 9. The effects of backwash (filtration rate 40 m/hr and 20 m/hr).

3.2. 파일럿 규모 여과 실험 결과

Fig. 9는 실험방법에서 언급된 역세척 조건을 파일럿 여과 장치에 적용하여 여과-역세를 반복하면서 발생하는 손실수두를 시간에 따라 나타낸 것이다. 실험기간동안 발생한 5회의 강우 강도를 왼쪽부터 나타내었다. 왼쪽부터 4회의 강우 동안은 여과속도를 40 m/hr로 유지하였으며, 마지막 다섯 번째 강우 시에는 여과속도를 20 m/hr로 운전하였다. 첫 번째 강우 시 강우강도는 5.5 mm/hr, 두 번째 강우강도는 3.5 mm/hr, 세 번째와 네 번째 강우강도는 2.5 mm/hr이었으며, 마지막으로 다섯 번째 강우강도는 2.0 mm/hr로 계속되었다.

도시된 손실수두 값은 clean bed 상태의 초기수두를 뺀 값으로써 역세척이 완료된 후 초기수두 값(0 cm)을 거의 회복하는 것으로 나타났다.

그런데 여과속도가 40 m/hr로 운전한 경우에는 여과 지속 시간이 약 2시간으로 나타나 여과속도 20 m/hr로 운전하는 경우 약 5시간보다 짧은 것을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 제안하고자 하는 여과 시스템은 이제까지 기존 연구에서 제안하였던 여재를 이용한 여과 방법과의 차별성을 여재의 교환 없이 주기적인 역세척을 수행함으로써 지속적으로 운전이 가능하다는 것이다. 이에 본 파일럿 규모를 대상으로 4개월간의 실험 결과로부터 역세척의 수반으로 충분한 손실수두의 회복을 입증하였다. 여재 구성 섬유사를 소수성으로 만든 것도 부착된 오염물질을 여재로부터 역세척으로 탈리시키는 데에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다.

Fig. 10은 역세척 조건을 파일럿 여과 장치에 적용하여 여과-역세를 반복하면서 연속적으로 탁도를 측정된 결과를 시

Fig. 10. Turbidities of influent and effluent (Pilot scale filter system, filtration rate 40 m/hr and 20 m/hr).

간에 따라 나타난 것이다. 5회의 강우기간을 제외한 우수가 유입되지 않는 동안 연속운전을 위해서 하수를 유입시켜 운전한 결과를 나타난 것이다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 강우 시 초기우수에 포함된 탁질 물질의 농도가 상대적으로 높으며 최고 1344.8 NTU를 기록하였다. 다섯 차례 강우 시 탁도 평균 제거율은 각각 89.1%, 84.2%, 89.3%, 83.2% 그리고 마지막 다섯 번째 강우 시에는 84.8%로 나타났다. 실험기간 동안 처리수의 탁도는 50 NTU 이하로 안정적인 처리 수질을 보였다. 일반적으로 여과 공정은 지속적인 여과로 인한 여재 막힘 현상(clogging)과 충분하지 못한 역세척으로 탁질 제거효율이 시간이 지남에 따라 감소한다. 그러나 본 연구에서 제안하고자 하는 여과 시스템을 4개월 정도 운전한 결과 강우강도의 변화에 상관없이 80% 이상의 일정한 탁도 평균 제거율을 보였다.

3.3. 오염물질 제거 효율

다음 Fig. 11~15는 파일럿 여과 시스템을 대상으로 다섯 차례 강우 시 유입수 및 유출수 내의 BOD, COD, 총부유물질(TSS), 구리, 망간, 아연 등의 중금속 농도와 제거율을 도시한 것이다. 총 다섯 차례 강우 시 파일럿 여과 시스템을 대상으로 오염물질 제거 효율을 조사한 결과 BOD의 경우

Fig. 11. Concentrations of influent and effluent (1st Rainfall, Filtration rate 40 m/hr).

Fig. 12. Concentrations of influent and effluent (2nd Rainfall, Filtration rate 40 m/hr).

Fig. 13. Concentrations of influent and effluent (3rd Rainfall, Filtration rate 40 m/hr).

Fig. 14. Concentrations of influent and effluent (4th Rainfall, Filtration rate 40 m/hr).

Fig. 15. Concentrations of influent and effluent (5th Rainfall, Filtration rate 20 m/hr).

유입수는 77.6 ~ 320.0 mg/L의 범위를 가지며, 처리수는 21.3 ~ 45.5 mg/L로 측정되었다. COD의 경우 유입수는 80.3 ~ 175.5 mg/L, 처리수는 17.3 ~ 34.3 mg/L로 측정되었다. TSS의 경우에는 유입수는 224.8 ~ 660.5 mg/L, 처리수는 14.8 ~ 28.7 mg/L로 측정되었다. 측정된 중금속 중에서 구리의 경우 유입수는 0.093 ~ 0.123 mg/L, 처리수는 0.027 ~ 0.051 mg/L로 측정되었으며, 제거율은 49 ~ 72%의 범위를 나타냈다. 망간의 경우 유입수는 0.107 ~ 0.153 mg/L, 처리수는

0.019 ~ 0.05 mg/L로 측정되어 제거율은 56 ~ 88%로 나타났다. 아연의 경우 유입수는 0.389 ~ 0.543 mg/L, 처리수는 0.074 ~ 0.103 mg/L로 측정되어 제거율은 77 ~ 87%로 나타났다. 상당히 흥미로운 사실은 5회의 강우 중에서 첫 번째 강우 강도가 가장 크기지만 유입수의 수질은 네 번째와 다섯 번째 강우 시 유입수의 오염물질 농도가 상대적으로 높다. 그 원인은 네 번째와 다섯 번째 강우 이전의 건기 (antecedent dry days)가 상대적으로 길기 때문에 도시 노면에 축적된 오염물질의 양이 많아서 초기 우수의 오염물질의 농도가 높았다.¹³⁾ Kim 등¹³⁾은 6번의 강우를 대상으로 제올라이트 여재를 이용하여 고속도로 노면에서 발생하는 초기 우수 내 오염물질 제거 능력을 평가하였는데 총부유물질 (TSS)의 경우 62.5%, 구리의 경우 73.7%, 아연의 경우 67.3%의 제거율을 보였다. 본 파일럿 여과 시스템은 우선 여재가 상이하고, 역세척을 도입하여 지속적인 운전이 가능하게 하였으며 고속도로가 아닌 도시에서 발생하는 초기 우수를 대상으로 실험한 경우 총부유물질은 86%, 구리는 61.1%, 아연은 84.7%의 제거율을 보였다.

앞서 언급한 바와 같이, 첫 번째부터 네 번째 강우 시에는 파일럿 여과 시스템 여과 속도를 40 m/hr로 유지하였고, 마지막 다섯 번째 강우 시에는 여과속도를 20 m/hr로 유지하였다. 실험실 규모의 여과 실험 결과로부터 선정된 여재를 대상으로 만족스러운 처리효율을 얻기 위해서는 여과 속도를 40 m/hr 이하로 결정하였다. 이에 여과속도를 절반으로 감소시킴에 따라 제거 효율이 증가하였는데 BOD의 경우 약 5%, COD의 경우 7%, 총부유물질(TSS)의 경우 3%, 구리의 경우 17%, 망간의 경우 9%, 아연의 경우 4% 정도 처리 효율이 증가하였다. 결론적으로 여과 속도의 조정이 처리수의 수질을 개선하는데 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 실험실 규모의 실험 수행과 파일럿 규모의 스마트 여과 시스템을 현장에 직접 설치하여 여과와 역세척이 반복되는 장기간 운전 효율을 평가하였다. 연구 기간 동안 5번의 강우 사상이 발생하여 초기 우수의 오염물질 제거 효율을 측정하였으며, 주기적인 역세척으로 인한 수두 회복능력을 평가하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 본 연구에서 선정한 Polyethylene 소재의 소수성 흡착제 여재를 충전재로 실험실 규모의 여과 실험을 수행한 결과, 손실 수두 값을 100 mm 이하로 유지하기 위해서는 여과속도 960 m/day 이하, 그리고 압축률은 30% 이하로 구성하여야 한다. 이에 실험실 규모 실험결과로 얻은 여과 속도 (960 m/day 이하)와 압축률(15%)은 이후 파일럿 규모의 여과 시스템을 구성하는데 근간이 되었다.

2) 파일럿 규모를 대상으로 4개월 간, 다섯 번의 강우를

대상으로 실험한 결과로부터 주기적인 역세척의 수행으로 인해 만족스럽게 손실 수두가 회복됨을 보였다. 또한 다섯 차례 강우 시 탁도 평균 제거율은 각각 89.1%, 84.2%, 89.3%, 83.2% 그리고 마지막 다섯 번째 강우 시에는 84.8%로 나타났다. 실험기간 동안 처리수의 탁도는 50 NTU 이하로 안정적인 처리 수질을 보였다. 본 연구에서 제안하고자 하는 여과 시스템을 4개월 정도 운전한 결과 강우강도의 변화에 상관없이 80% 이상의 일정한 탁도 제거율을 보였다.

3) 다섯 차례 강우를 포함하여 파일럿 여과 시스템을 4개월 간 운전한 결과, BOD는 85%, COD는 81.6%, 총부유물질은 86%, 구리는 61.1%, 망간은 72%, 아연은 84.7%의 평균 제거율을 보였다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 ‘환경정책기반공공기술개발사업(사업명 : 최첨단 환경감시 장비 및 통합 관리체계 기법 개발 연구)’ 및 LH공사 ‘비점오염 처리용 섬유여재 개선 및 여과형 비점오염 처리기술 최적화’ 과제를 통한 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

1. Tafuri, A. N. and Field, R., "Treatability aspects of urban storm-water stressors," *Front. Environ. Sci. Eng.*, **6**(5), 631~637(2012).
2. Hatt, B. E., Fletcher, T. D. and Deletic, A., "Hydraulic and pollutant removal performance of fine media stormwater filtration system," *Environ. Sci. Technol.*, **42**(7), 2535~2541 (2008).
3. Clark, S. E. and Pitt, R., "Targeting treatment technologies to address specific stormwater pollutants and numeric discharge limits," *Water Res.*, **46**(20), 6715~6730(2012).
4. Kus, B., Johir, M., Kandasamy, J., Vigneswaran, S., Shon, H. Y., Sleight, R. and Moddy, G., "Performance of granular medium filtration and membrane filtration in treating stormwater for harvesting and reuse," *Deslin. Water Treat.*, **45**(1-3), 120~127(2012).
5. Foulquier, A., Mermilod-Blonding, F., Malard, F. and Gilbert, J., "Response of sediment biofilm to increased dissolved organic carbon supply in groundwater artificially recharged with stormwater," *J. Soil Sediments*, **11**(2), 382~393(2011).
6. Sample, D. J., Grizzard, T. J., Sansalone, J., Davis, A. P., Roseen, R. M. and Walker, J., "Assessing performance of manufactured treatment devices for the removal of phosphorous from urban stormwater," *J. Environ. Manage.*, **113**, 279~291(2012).
7. Walker, D. J. and Hurl, S., "The reduction of heavy metals in a stormwater wetland," *Ecol. Eng.*, **18**(4), 407~414(2002).

8. Lloyd, S. D., Wong, T. H. and Porter, B., "The planning and construction of a urban stormwater management scheme," *Water Sci. Technol.*, **45**(7), 1~10(2002).
9. Wium-Andersen, T., Nielsen, A. H., Hvitved-Jacobsen, T., Kristensen, N. K., Brix, H., Arias, C. and Vollertsen, J., "Sorption media for stormwater treatment-A laboratory evaluation of five low cost media for their ability to remove metal and phosphorous from artificial stormwater," *Water Environ. Res.*, **84**(7), 605~616(2012).
10. Dierkes, C., Gobel, P., Lohmann, M. and Coldewey, W. G., "Development and investigation of a pollution control pit for treatment of stormwater from metal roofs and traffic areas," *Water Sci. Technol.*, **54**(6-7), 291~298(2006).
11. Reddy, K. R., Xie, T. and Dastgheibi, S., "Mixed-media filter system for removal of multiple contaminants from urban storm water : large-scale laboratory testing," *J. Hazard. Toxic Radioact. Wastes*, **18**(3), 04014011(2014).
12. Seelsaen, N., McLaughlan, R., Moore, S. and Ball, J. E., "Pollutant removal efficiency of alternative filtration media in stormwater treatment," *Water Sci. Technol.*, **54**(6-7), 299~305(2006).
13. Kim, L. H., Kang, H. M. and Bae, W., "Treatment of particulates and metals from highway stormwater runoff using zeolite filtration," *Deslin. Water Treat.*, **19**(1-3), 97~104(2010).
14. American Public Health Association (APHA), American WaterWorks Association (AWWA), and Water Environment Federation (WEF), Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd ed., American Public Health Association, Washington, DC, (2006).
15. Ministry of Environment (MOE), The strategy of Water Control in Four Major Rivers in Korea, Ministry of Environment (MOE), Korea, (2004).