



Development and experimental verification of vortex typed nonfilter nonpoint source pollution reduction device

Jang, Suk Hwan^a · Lee, Jae-Kyoung^{b*} · Lee, Hae-Kwang^c · Hwang, Sung-Gyu^d

^aProfessor, Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon, Korea

^bAssistant Professor, Innovation Center for Engineering Education, Daejin University, Pocheon, Korea

^cMaster's course Student, Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon, Korea

^dPresident, Innoblue industry, Gyeonggi-do, Korea

Paper number: 18-071

Received: 23 August 2018; Revised: 28 September 2018 / 15 March 2019; Accepted: 15 March 2019

Abstract

The objective of this study was to develop and verify an effective vortex typed nonfilter nonpoint source pollution reduction device. To verify this pollution reduction device, a total of twelve scenarios (three rainfall intensities×two states×two steps) of experiments were conducted using pollutants. First, simulated inflow (rainfall intensity 2.5 mm/hr: 0.00152 m³/s, rainfall intensity 3.395 mm/hr: 0.00206 m³/s, rainfall intensity 6.870 mm/hr: 0.00326 m³/s) was calculated. Second, pollutants (mixture of 25% of four particle sizes) were selected and injected. Third, pollutant removal efficiencies of this device at its initial state and operating states were measured. As a result of analysis based on rainfall intensity, the concentration of pollutants was decreased by the device at initial and operating states at all rainfall intensities. Its pollutant removal efficiency was more than 80%, the standard set by the Ministry of Environment. Its pollutant removal efficiency was gradually increased over time, reaching approximately 90%. Its pollutant removal efficiency was higher in its operating state than that in its initial state. Therefore, nonpoint source pollutants can be effectively removed by this vortex typed nonpoint source pollution reduction device developed in this study.

Keywords: Nonfilter, Nonpoint source pollutant, Pollution reduction, Experimental verification

와류형 미필터 비점오염저감장치의 개발과 실험적 검증

장석환^a · 이재경^{b*} · 이해광^c · 황성규^d

^a대진대학교 건설시스템공학과 교수, ^b대진대학교 공학교육혁신센터 조교수, ^c대진대학교 건설시스템공학과 석사과정, ^d이노블루산업(주) 대표이사

요 지

본 연구에서는 효율적인 와류형 미필터 비점오염저감장치를 개발하고 검증하였다. 저감장치의 검증을 위해 오염물질을 이용하여 총 12개 형태(3개 강우강도×2개 상태×2개 단계)의 실험을 진행하였다. 실험은 (1) 모의유입량 산정(강우강도 2.5 mm/hr: 0.00152 m³/s, 강우강도 3.395 mm/hr: 0.00206 m³/s, 강우강도 6.870 mm/hr: 0.00326 m³/s); (2) 오염물질 채취 및 투입(4개 입경 사이즈의 25%씩 혼합); (3) 오염물질 제거 효율 측정으로 구성하였고, 장치 초기상태와 운영상태로 구분하여 수행되었다. 강우강도별로 분석한 결과, 모든 강우강도에서 초기상태 및 운영상태 모두 오염물질 농도가 감소하였으며, 유입수 대비 유출수 오염물질 제거효율에서도 오염물질을 환경부 기준 80% 이상 제거하는 결과를 보였다. 특히 제거효율이 시간이 지남에 따라 서서히 증가하여 약 90%를 상회하였으며, 초기상태보다 운영상태에서 오염물질 제거효율이 더 높은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발한 와류형 미필터 비점오염저감장치로 효율적인 비점오염원을 제거할 수 있음을 증명하였다.

핵심용어: 미필터, 비점오염, 오염저감, 실험적 검증

*Corresponding Author. Tel: +82-31-539-2357
E-mail: myroom1@daejin.ac.kr (J.-K. Lee)

1. 서론

토지이용 상태에 따라 오염원이 광범위하게 분포하고 있는 비점오염원은 오염물질의 발생이 어느 특정 지점이 아닌 유역 전체에서 발생할 가능성이 높다. 또한 비점오염원의 유출은 대부분 강우시 발생하므로 발생원의 확인이 곤란하며, 이동경로도 명확하지 않기 때문에 관리가 매우 어렵다. 특히, 최근 도시화 및 산업화의 발달로 불투수면적이 증가함에 따라 건기에 축적된 토지, 도로, 농지, 산지 등 표면의 오염물질이 강우발생 시에 하천으로 유출되어 수질오염을 가중시키고 있다. 환경기초시설 등의 건설로 점오염원(point source pollutant)의 관리는 강화되었으나(Ministry of Environment, 2016), 앞서 언급한 바와 같이 불특정지역에서 불특정하게 발생하는 비점오염원의 특성상 체계적인 관리와 관련 행정적 지원이 매우 미흡한 실정이다. 기존 비점오염원의 분석에서는 SWMM (Storm Water Management Model)이나 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) 등의 수질모델을 이용한 모의를 통한 연구들(Kim, *et al.*, 2012; Jung, *et al.*, 2012; Shin, *et al.*, 2015)은 많으나 직접적으로 장치를 개발하고 모니터링하는 연구들은 아직 국내에서 연구가 미진한 분야다.

국내에서 많이 사용되고 있는 비점오염저감장치는 자연형 시설과 장치형 시설로 구분되어지며, 자연형 시설은 저류시설, 인공습지, 침투시설, 식생형 시설 등이다. 장치형 시설은 여과형 시설, 와류형 시설, 스크린형 시설, 침전처리형 시설, 생물학적 처리형 시설로 등이며, 이 중 독립된 비점오염저감 시설이 아닌 전·후처리 시설로만 인정되는 것도 있다(Choi and Lee, 2016). 또한 국내의 비점오염 관리 및 저감에 대한 연구를 살펴보면, Paul *et al.* (1991)은 흐름의 와류만을 사용하여 침전물을 제거하는 장치를 개발하여 연구하였으며, 연구결과 침전물을 효과적으로 제거하기 위해서는 장치의 크기가 유입부의 약 5배 이상 되어야하고, 장치가 유입부의 접선방향으로 설치되어야 가장 큰 처리효율을 나타낸다고 하였다. Keshavarzi *et al.* (2006)은 와류형 침전지의 효율성을 알아보기 위해 시계방향흐름조건과 시계반대방향흐름조건에 대해 침전물의 크기를 0.074~0.3 mm로 지정하여 호퍼를 통해 일정시간에 일정량을 장치에 투입시켰다. 이 결과, 시계방향보다 시계반대방향의 처리효율이 약 8% 증가하였다. Shin (2007)은 와류형 침전조의 성능평가에 대한 연구를 하였으며, 유입 유량과 유출부하량의 상관관계, 항목별 오염물질의 유량중평균농도 변화와 그에 따른 제거효율을 조사하여, 수질변화, 침전효과 등을 평가하였다. 결과로 와류형 침전조는 원형 와류조의 원심력과 중력에 의해 비점오염 물질을 저감시킬 수 있음을 확인하였다. Lee (2010)은 고속도로에서의 비점오

염저감시설 선정 및 적용에 대해 지역을 3개(집수면적이 넓은 지역, 좁은지역, 교량지역)로 구분하여 연구를 진행하였다. 이 결과 집수면적이 넓은지역은 자연형시설, 좁은지역은 침투도랑, 교량지역은 여과형시설 및 침투저류지 등을 선정하였으며, 부지면적에 따라 적정 저감시설을 선정하고 선정된 저감시설을 효율적으로 적용할 수 있도록 제시하였다. National Institute of Environmental Research (2013)에서는 비점오염저감시설의 적절한 강우강도를 제시하고자 비점오염저감시설 설계강우 및 설계유량 산정방법 연구를 실시하였다. 특히, 지역별 발생빈도를 활용하여 다각적으로 분석한 결과를 본 연구에 일부 적용하였다. Lee, *et al.* (2013)은 체류시간에 따른 와류형 비점오염저감시설의 효율변화에 대해 연구하였으며, Froude 상사법칙을 적용한 모형에 대해 침사부 깊이와, 내부직경, 유입각도 등을 임의로 바꿔 실제 유입되는 강우와 현장설치조건이 고려될 수 있도록 적용하여, 저감시설을 실제로 설치할 경우, 1분 30초의 체류시간을 유지할 수 있도록 실시 설계가 이루어져야 한다고 제시하였다. 또한 Ministry of Environment (2016)에서는 매뉴얼을 통해 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영에 관한 지침을 발표하고 있다. 기존 비점오염 저감장치를 활용한 연구들을 살펴보면, 장치형 시설에 집중되어 있으며 장치형에서도 와류형, 침전처리형, 여과형 등을 많이 적용하고 있다. 하지만 대부분의 시설들이 필터를 사용하여 비점오염을 저감하는 방법을 주로 이용하고 있으며, 필터를 사용함으로써 저감 효율성은 증가시키지만, 이로 인해 필터의 유지관리 및 필터교체에 따른 경제성 등과 같은 측면에서 매우 불리하다.

따라서 본 연구에서는 비점오염 저감장치 개발 및 실험에 초점을 맞추어 필터 사용으로 인한 단점을 보완하면서 초기우수처리를 할 수 있는 비점오염저감 장치를 개발하고자 하며, 이에 따른 연구목적은 다음과 같다. 첫 번째로, 필터를 사용하지 않는 장치형 시설을 제작하여 물리적인 자연 순환기능을 최대한 유지하고 공학적 원리에 따른 저감장치를 제안하고자 한다. 두 번째로, 필터가 없는 비점오염저감장치를 이용하여 오염물질을 이용한 실험을 수행하여 부유물질(Suspended Solid, SS)에 대한 장치의 제거효율을 분석하고자 한다.

2. 비점오염저감장치의 개발

2.1 비점오염저감장치 기준

2.1.1 저감장치 규모결정

비점오염저감시설의 규모결정은 일반적으로 Ministry of Environment (2016)에서 제시하는 매뉴얼에 따라 진행된다.

이에 따른 내용을 살펴보면, 대상구역의 적정 강우사상에 대한 수문곡선(hydrograph)과 오염곡선(pollutograph)을 이용하여 강우초기에 평시 수계의 수질보다 악화되었다가 다시 강우유출수 수질이 건기 유출수 수질로 회복하는 시점까지의 유량으로 규모를 설정하게 된다. 또한 강우유출수를 초기에 저류하여 처리하는 시설은 수질처리용량(WQv, m^3)을 활용하여 규모를 결정할 수 있으나 강우유출수를 연속하여 처리하는 시설인 장치형 시설과 자연형 시설은 수질처리용량($WQF, m^3/h$)으로 규모를 결정하게 된다. 일반적인 수질처리용량의 산정을 위한 강우강도는 최근 10년 이상의 시강우자료를 활용하여 연간 누적발생빈도 80%에 해당하는 강우강도를 선택하게 되며, 이를 이용하여 수질처리용량을 다음과 같이 산정하게 된다.

$$WQv = CIA \times 10^{-3} \quad (1)$$

여기서, WQv 는 수질처리용량(m^3/s), C 는 무차원 유출계수, I 는 도달시간을 지속시간으로 하는 강우강도(mm/hr), A 는 구역의 면적(km^2)이다. 비점오염원설치신고제도에 의해 설계하는 경우에는 $2.5 mm/h$ 를 권고하고 있다. 처리대상구역의 유출계수가 매우 낮거나 면적이 매우 큰 경우 해당지역 강우자료로부터 기준강우강도를 산정하고 유출계수를 적용할 수 있다.

2.1.2 비점오염 제거효율 기준

비점오염저감시설은 총부유물질 연간 제거효율 기준을 80% 이상을 목표로 하여 설계하는 것이 바람직하며(Ministry of Environment, 2006), 이에 미치지 못할 경우 여러 시설을 조합하여 TSS (Total Suspended Solid)의 연간 제거효율이 80% 이상 되도록 구성한다. 시설별 저감효율은 국내외 자료들을 참고로 고려되어야 하며, 정기적인 모니터링을 통해 수질자

료 및 저감효율을 파악하여야 한다(Ministry of Environment, 2006). 참고적으로 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 부유물질(SS), 총 질소량(T-N), 총 인의 량(T-P) 등은 저감시설 형태나 종류별로 차이가 있다.

2.2 미필터 와류형 비점오염저감장치

본 연구에서 개발한 미필터 와류형 비점오염저감장치는 3단(단계)으로 구성된 장치이며, 이 장치는 아래 Fig. 1(a)와 같이 유입부와 유출부는 0.03의 경사를 가지고 있어 수두차에 의해 유수가 이동하도록 구성되었다. Figs. 1(b) and (c)은 수리학적 상사법칙을 이용하여 1/3로 축소된 이 장치의 측면과 평면의 실제 모형이며, 모형 크기는 $1.80 m \times 1.80 m \times 1.90 m$ (가로×세로×높이)이다.

미필터 와류형 비점오염저감장치의 간략한 비점오염원 저감방법을 살펴보면, 1단계에서는 큰 부유물질을 제거하는데 초점이 맞춰져있으며, 비중을 이용하여 1.0보다 크면 부유물이 가라앉고, 비중이 1.0보다 작은 부유물은 상부에 떠올라서 1차적으로 비점오염을 저감시킨 후, 2단계와 3단계에서는 원심력과 비중을 이용하여 2차적으로 비점오염을 저감시키고 유출하게 된다. 특히, 각 단계별 작동단계는 1차로 원심력을 이용하여 유입수에서 오염물질(부유물질)을 분리하는 단계와 2차에서 중력을 이용하여 오염물질을 침전시키는 단계로 구성된다(Fig. 2 참조). 상세히 살펴보면, 1차 단계에서 강우의 발생으로 오염수가 유입부로 유입되면 깔때기 형태인 유입부의 줄어드는 반경으로 인해 원심력이 형성되고, 원심력이 형성됨으로 오염물질과 오염물질을 둘러싼 유입수 간의 밀도차를 이용하여 오염물질을 제거한다. 특히, 침전과정을 1차 단계의 원심력을 이용하여 가속화 하였다. 2차 단계는 오염물질이 있는 현탁액을 가만히 두면 밀집한 오염물질은 중력의 영향으로 서서히 가라앉게 되는 침전과정이며, 장치에 유입된 강우는 2차적으로 밀도차로 인해 가벼운 물질은 부상하고,

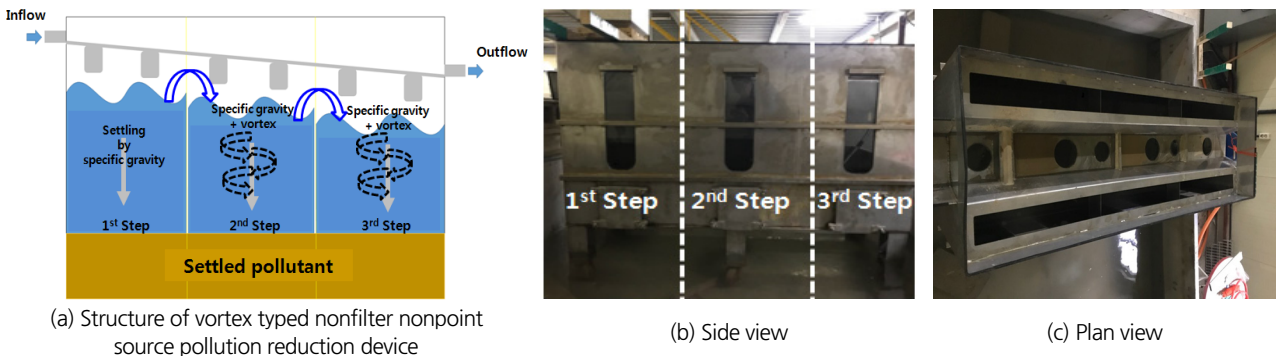


Fig. 1. Concept of the vortex typed nonfilter nonpoint source pollution reduction device

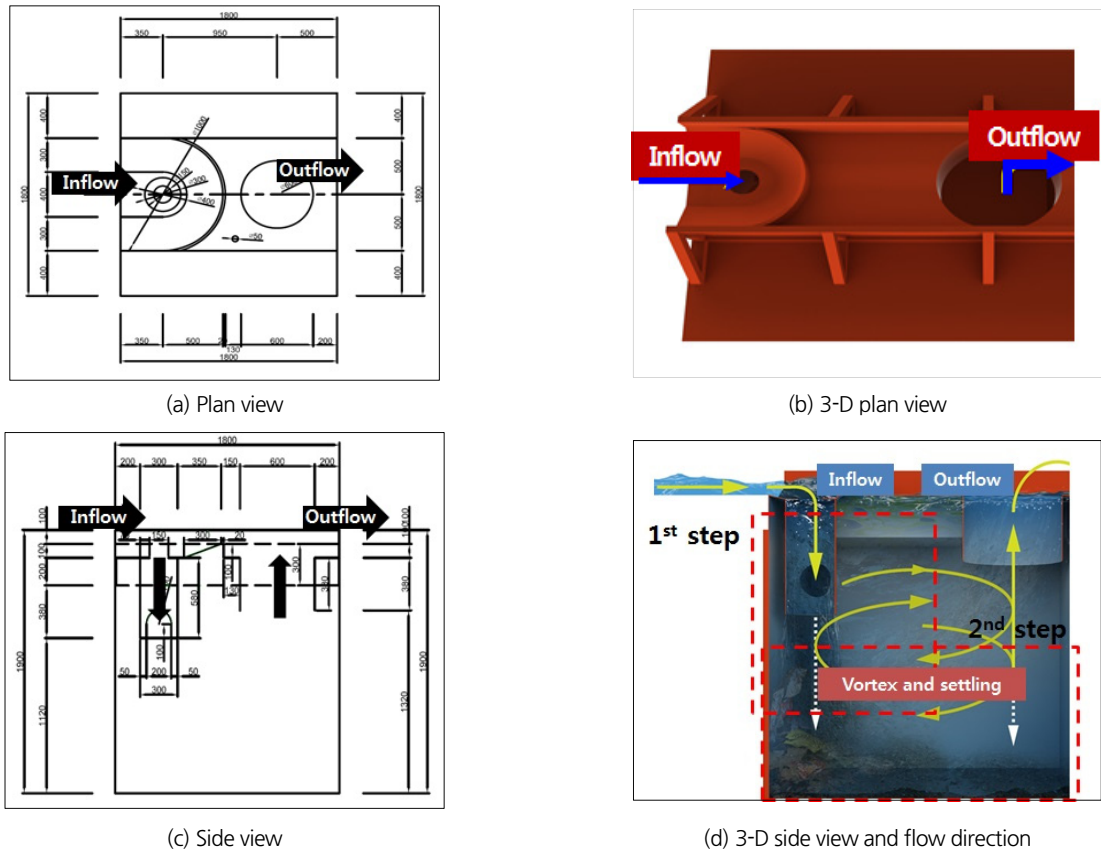


Fig. 2. Operation principle in the first step of the vortex typed nonfilter nonpoint source pollution reduction device

무거운 물질은 침전되어 강우에 포함된 오염물질을 제거할 수 있는 장치이다.

본 연구에서 개발된 와류형 비점오염저감장치의 장점은 첫째, 수두 차에 의해 물의 흐름을 유도하였고 제한된 공간에서 처리할 수 있는 오염수의 흐름을 길게 하여 체류시간을 확보하였다. 둘째, 기존 저감장치와 달리 오염물질 제거를 위한 필터를 이용하지 않아, 별도의 관리가 필요없기 때문에 유지 관리 측면에서도 유리하다.

3. 실험을 통한 비점오염저감장치 검증

3.1 실험개요

본 연구 장치인 와류형 비점오염저감장치의 검증을 위해 기존 관련 실험결과들과 환경부 매뉴얼을 참조하였다(Ministry of Environment, 2016). 검증실험에서는 크게 3단계이며, 1 단계에서는 모의유입량 산정으로 강우강도와 임의의 면적을 선정하여 유량을 산정하였다. 2단계에서는 오염물질 채취 및 투입으로 오염물질 투입을 위해서는 도로에서 가장 흔히 볼

수 있는 모래를 채취하여 입도분석 후 실험을 진행하였다. 마지막으로 오염물질 제거효율 측정이며, 오염물질 측정방법으로 수질공정시험법 중 유리섬유여과방법을 통해 유입 시 유입수의 농도와 장치에서 유출 직후 5분 간격으로 유출수를 채취하여 유입수 대비 유출수의 오염물질 제거효율을 도출하였다. Fig. 3은 비점오염 저감장치의 검증을 위한 실험방법의 전체적인 흐름도이다. 각 단계별 검증실험을 위한 상세한 내용은 다음과 같다.

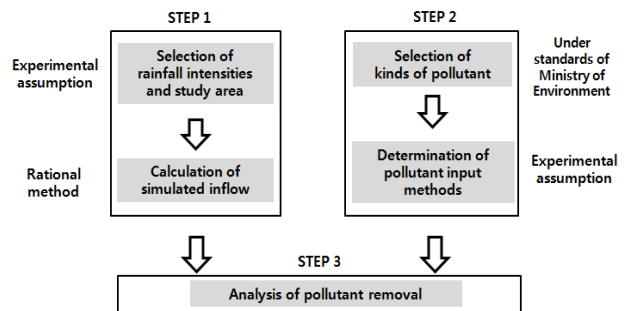


Fig. 3. Flowchart of experimental verification of the reduction device

3.1.1 1단계: 합리식에 의한 모의유량 산정

합리식은 5 km² 이하 소규모 유역의 설계홍수량 또는 포장된 작은 도시 유역에 가장 널리 사용되는 공식으로서, 집중시간(도달시간)을 강우 지속시간으로 하는 특정 발생빈도에 최대강우강도에 유역의 물리적 상태를 나타내는 유출계수와 유역면적을 곱하여 첨두유량을 산정하는 방법으로 계산방법이 간단하기 때문에 도시수문해석에 널리 사용되고 있다. 미국에서도 수질처리유량(Water Quality Flow, WQF)을 합리식을 통해 도출한다(Ministry of Environment, 2016). 합리식의 기본 가정 및 식은 다음과 같다.

- ① 강우강도는 집중시간(혹은 도달시간) 내 변하지 않고 일정
- ② 유출계수는 강우 지속시간 동안 일정
- ③ 유출계수는 각각 다른 발생확률을 가지는 강우-유출 상상에 관계없이 동일
- ④ 유출계수는 어떤 유역에 내리는 모든 강우에 대하여 동일
- ⑤ 첨두유량의 재현기간은 일정한 강우강도의 재현기간과 동일

$$Q = \frac{1}{3.6} CIA = 0.2778 CIA \quad (2)$$

여기서, Q는 최대우수유출량(m³/s), C는 무차원 유출계수, I는 도달시간을 지속시간으로 하는 강우강도(mm/hr), A는 유역의 면적(km²)이다.

본 실험 장치는 비점오염저감시설 중 장치형 시설에 해당하여 환경부 규모설계기준인 수질처리유량을 적용하여 모의 시나리오를 설정하였으며, 수질처리유량은 합리식을 적용하여 산정하도록 제시되어 있다. 이를 위해서는 면적과 강우강도의 정보가 필요한데, 면적에 대한 정확한 기준이 없고 합리식을 통해 유량을 산정하여 장치에 유입시키는 기존 연구결과가 없어, 유역면적은 본 실험장치가 설치될 예비후보지의 면적과 유사한 0.002 km²로 임의로 가정하였다. 다음으로 강우강도 선정을 살펴보면, Ministry of Environment (2016)에서 장치형 시설의 수질처리유량을 적용할 경우 권고하는 강우강도와 유출계수의 곱인 2.5 mm/hr를 제시하고 있다. 또한 National Institute of Environmental Research (2013)의 연구에서는 서울지점 강우유출수 80% 처리 설계유량 산정과정에서의 기준강우강도로 산정된 6.87 mm/hr, 서울지점 강우강도 발생빈도를 통한 설계유량 산정과정에서 산정된 3.395 mm/hr를 강우강도로 제시하였다. 이에 따라 본 연구에서는 두 결과를 반영하여 실험에 적용할 강우강도로 2.5 mm/hr, 3.395 mm/hr, 6.870 mm/hr를 선정하였으며, 본 연구에서 사용한 비점오염저감장치는 앞서 언급한 바와 같이 원형 규모의 1/3 축소모형

Table 1. Selection of rainfall intensities for experimental verification

Rainfall intensity (mm/hr)	Area (km ²)	Inflow rate (m ³ /s)	Inflow rate (L/s)
2.5	0.002	0.0014	1.39
3.395		0.0019	1.89
6.870		0.0038	3.82

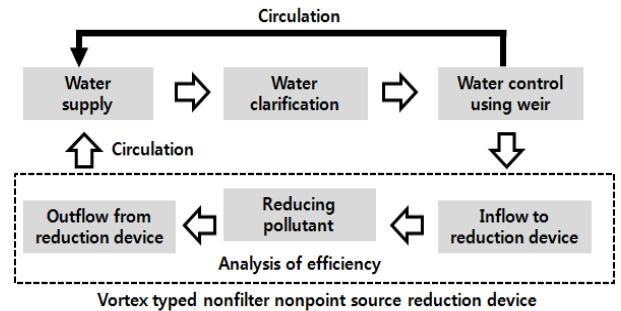
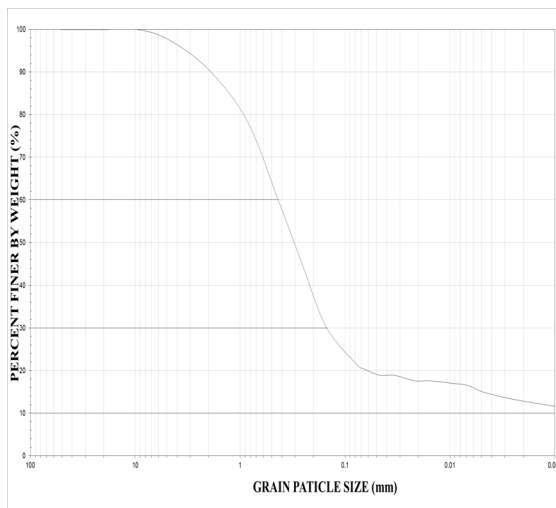


Fig. 4. Flowchart of water supply and circulation system

이므로 상사법칙을 이용하여 모형 유량을 환산하였고, 최종적으로 합리식을 통해 각 강우강도별 유량을 산정한 결과, 강우강도 2.5 mm/hr를 이용하여 산정한 유량은 0.0014 m³/s, 3.395 mm/hr와 6.870 mm/hr를 이용한 유량은 각각 0.0019 m³/s, 0.0031 m³/s로 산정되었다(Table 1 참조). 하지만 실질적으로 실험에 있어서 펌프를 이용하여 유량을 공급하기 때문에 실험에 사용된 최종 유량은 강우강도 2.5 mm/hr에서는 0.00152 m³/s, 3.395 mm/hr에서는 0.00206 m³/s, 6.870 mm/hr에서는 0.00326 m³/s이 적용되었다. 이와 더불어 본 연구에서는 유량 조절이 가능하고, 유입수와 유출수 등 유수의 순환이 지속적으로 가능하도록 계획하였으며, Fig. 4는 순환시스템의 모식도를 나타내며, 본 모형실험에 사용된 유량공급 장치는 총 180 L/min의 유량을 모형장치에 보낼 수 있다.

3.1.2 2단계 : 부유물질 채취 및 투입 방법 선정

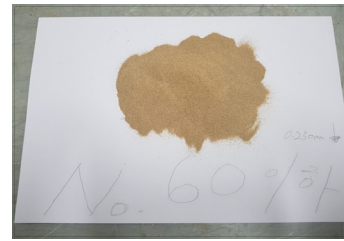
오염물질로 사용하기 위해 실질적으로 현장을 잘 나타낼 수 있도록 실제 도로에서 가장 흔히 볼 수 있는 흙을 이용하였으며, 이를 채취하여 체가름 시험을 통해 얻은 입도분포곡선은 Fig. 5(a)와 같다. 실험용 흙의 비중은 2.66이며, 통일분류법상 실트질 모래인 SM임을 확인하였다. 또한, 환경부 기준(Ministry of Environment, 2016)에 고시된 오염물질의 농도 150 ppm (mg/L) 이상과 2 mm 이하의 입경 사이를 만족하기 위하여 체가름 시험을 통해 채취한 흙을 4개 입경 사이즈 (No. 20: 0.85~2.0 mm, No.40: 0.425~0.85 mm, No.60: 0.425~0.85 mm, No.60 이하)로 분류하여 각각 25%씩 혼합하여 사용하였다(Figs. 5(b) and (c) 참조).



(a) Size distribution curve of pollutant



(b) No.40 (0.425~0.85 mm)



(c) less than No.60 (0.250~0.025 mm)

Fig. 5. Description of the pollutant selection



(a) Sheer plan



(b) Plane figure

Fig. 6. Sheer plan and plane figure of stainless hopper

오염물질을 일정시간에 일정한 양을 지속적으로 투입하기 위하여 Fig. 6과 같이 스테인리스로 호퍼를 제작하였으며, 투입되는 오염물질의 양은 호퍼 유출부의 크기를 조절하여 비점 오염 저감장치에 유입하도록 하였다. 호퍼의 작은 유출부에서 나오는 양은 초당 4.034 g으로 비교적 적은 강우강도인 2.5 mm/hr, 3.395 mm/hr의 실험에 대해 사용하였고, 큰 유출부에서 나오는 양은 초당 11.00 g으로 극대 강우강도 6.870 mm/hr의 실험에 대해 사용하였다.

3.1.3 3단계 : 오염물질 제거효율 측정

오염물질 측정을 위해 두 가지 가정사항에서 실험을 진행하였으며, 첫 번째 가정사항은 장치가 설치된 직후로서 장치에 유수가 존재하지 않는 초기상태이고, 두 번째는 장치가 설

치된 후, 장치가 운영 중으로서 유수가 일정량으로 유입되고 있는 운영상태이다. 첫 번째 가정사항인 초기상태의 경우, 유량 조건별로 유수가 장치로 유입되었다가 유출되는 체류시간 만큼 오염물질을 장치에 투입시킨 후, 유출되는 시점으로부터 5분 간격으로 유출수를 채취하여 SS측정을 수행하였다. 두 번째 가정사항인 운영상태의 경우, 물이 채워져 있기에 장치 체류시간 만큼 오염물질을 투입시킨 후, 5분 간격으로 유출수를 채취하여 SS측정을 수행하였다. 채취한 유입수와 유출수에 대해 걸보기비중과 오염물질의 농도를 측정하기 위해 수질공정시험법 중 유리여과시험방법을 이용하여 유입수 대비 유출수의 제거효율에 대해 실험하였다. Fig. 7(a)는 장치 초기상태로 장치에 물이 채워져 있지 않은 상태며, Fig. 7(b)는 장치 운영상태로 이미 장치에 물이 채워져 있는 상태이다.

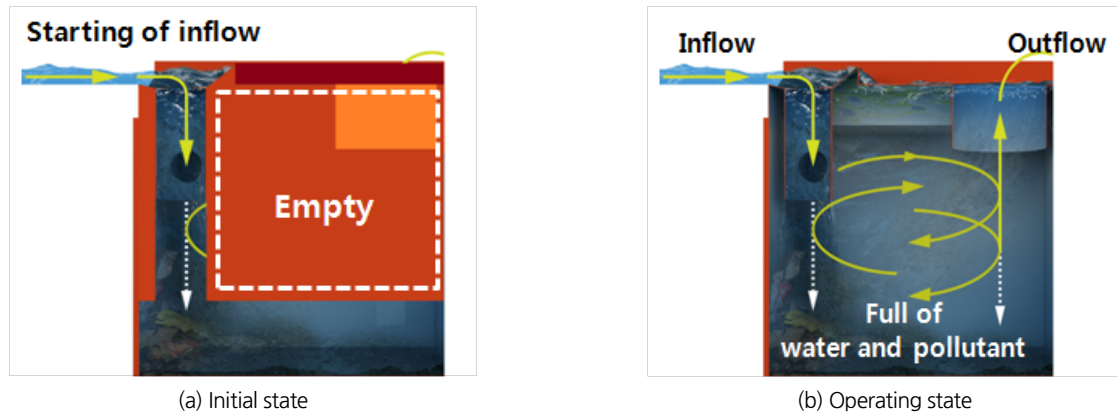


Fig. 7. Assumption of pollution device states

3.2 검증을 위한 실험결과 분석

본 연구에서는 강우강도별로 본 장치의 1단계와 2단계의 유출수를 채취하여 오염물질 제거효율을 검증하였으며, 3단계의 경우에는 장치 내에 필터설치 구조가 포함되어 본 연구의 목적과 맞지 않기에 제외하였다. 강우강도별 실험결과는 다음과 같다.

3.2.1 강우강도 2.5 mm/hr 적용한 검증결과

우선 장치의 1단계 제거효율에 대해 살펴보면, 비교적 작은 강우강도인 2.5 mm/hr에 대해 시료주입의 양은 4.034 g/s로 실험한 결과는 Table 2(a) 및 Fig. 8(a)와 같다. 장치 초기상태에서의 오염물질 농도(Ini_con)는 유입시 904.8 mg/L에서 시작하여 출구지점 유출 후 0분에서 156.8 mg/L에서 시간이 지남에 따라 최종적으로 110 mg/L까지 낮아지는 것으로 나타났으며, 유입수 대비 유출수 오염물질 제거효율(Ini_eff)은 최소 82.7%에서 최대 87.8%로 나타났다. 운영상태에서의 오염물질 농도(On_con)는 유입시 919.2 mg/L였으나 출구지점 유출 후 0분에서 124.4 mg/L에서 시작하여 최종적으로 64.4 mg/L까지 낮아졌으며, 유입수 대비 유출수 오염물질 제거효율(On_eff)은 최소 85.3%, 최대 93.0%로 나타났다. 시간이 지날수록 효율은 증가하였으며, 15~20분경 운영상태에서 처리효율이 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 실험자의 시료채취과정에서의 오차발생으로 판단하였으며, 장치 초기상태와 운영상태 모두 유출 후 제거효율이 80%이상으로 환경부 기준에 만족하는 것으로 나타났다. 특히 강우 유입과 유출이 지속됨에 따라 제거 효율은 증가하여 장치 초기상태의 경우 87%, 운영상태의 경우 90%를 상회하는 것으로 나타났다.

다음으로 장치의 2단계 제거효율에 대한 결과는 Table 2(b) 및 Fig. 8(b)와 같다. Ini_eff는 최소 89.0%, 최대 91.8%로 나타났으며, On_eff는 최소 88.7%, 최대 91.9%로 나타났다. 장치 초기상태와 운영상태 모두 유출 후 제거효율이 80%이상

로 환경부 기준에 만족하며, 시간이 지남에 따라 효율은 증가하여 장치 초기상태의 경우 91%, 운영상태의 경우 91%를 웃도는 경향을 보였다. Ini_con과 On_con은 유입시 각각 1422 mg/L과 1194.8 mg/L에서 시작하여 출구지점 유출 후 최종적으로 129.6 mg/L와 92.2 mg/L로 감소하였다.

3.2.2 강우강도 3.395 mm/hr 적용한 검증결과

저감장치의 1단계 제거효율에 대해 살펴보면, 강우강도인 3.395 mm/hr에 대해 시료주입의 양은 2.5 mm/hr과 동일한 4.034 g/s로 실험한 결과는 Table 3(a) 및 Fig. 9(a)와 같다. Ini_con는 출구지점 유출 후 0분에서 210.0 mg/L에서 최종적으로 112.4 mg/L까지 낮아졌으며, Ini_eff는 최소 80.3%에서 최대 89.5%로 나타났다. On_con은 출구지점 유출 후 0분에서 139.6 mg/L에서 시작하여 최종적으로 70.0 mg/L까지 낮아졌으며, On_eff는 최소 85.1%, 최대 94.3%로 나타났다. 시간이 지날수록 초기상태에서의 제거효율은 약 90%, 운영상태에서는 효율이 90% 이상으로 매우 높게 나타났으며, 이는 장치 초기상태와 운영상태 모두 유출 후 제거효율이 80%이상으로 환경부 기준에 만족하는 것으로 나타났다.

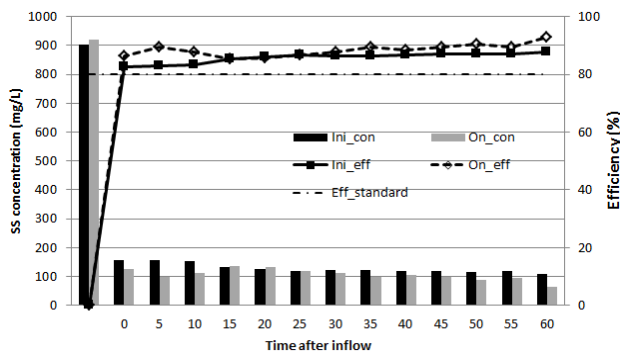
다음으로 장치의 2단계 제거효율에 대한 결과는 Table 3(b) 및 Fig. 9(b)와 같다. Ini_eff는 최소 89.5%, 최대 93.3%로 나타나 시간이 지날수록 조금씩 효율이 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라 Ini_con도 171.6 mg/L(출구지점 유출 후 0분)에서 110.0 mg/L(60분 경과)로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 On_eff는 최소 88.7%, 최대 93.3%로 나타났다. Ini_con도 162.0 mg/L(출구지점 유출 후 0분)에서 103.2 mg/L(60분 경과)로 점차 감소하는 것으로 나타났다. 강우강도 3.395 mm/hr의 조건하에서도 장치 초기상태와 운영상태 모두 유출 후 제거효율 매우 비슷한 경향을 나타냈으며, 80% 이상으로 환경부 기준에 만족하였다.

Table 2. Experimental verification results for rainfall intensity 2.5 mm/hr

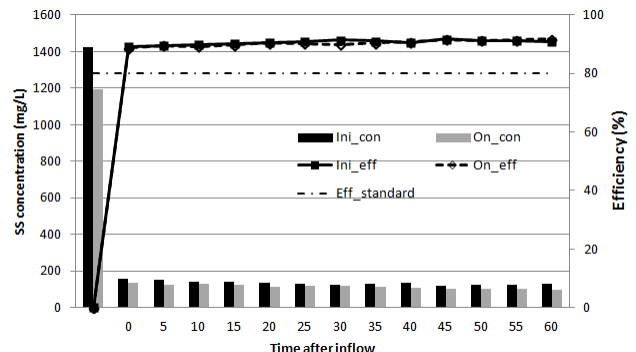
(a) 1st Step result

(b) 2nd Step result

		State (Inflow rate: 1.52 L/s, Pollutant rate 4.034 g/s)				State (Inflow rate: 1.52 L/s, Pollutant rate 4.034 g/s)			
		Pollutant weight (mg)	Concentration (mg/L)	Removal efficiency (%)	Pollutant weight (mg)	Concentration (mg/L)	Removal efficiency (%)		
Initial	Inflow	-	226.2	904.8	-	-	-		
	Device runoff	0 min	39.2	156.8	82.7	355.5	1422	-	
		5 min	38.7	154.8	82.9	39	156	89.0	
		10 min	38.1	152.4	83.2	37.5	150	89.5	
		15 min	32.9	131.6	85.5	35.7	142.8	90.0	
		20 min	31.8	127.2	85.9	35.1	140.4	90.1	
		25 min	29.8	119.2	86.8	33.9	135.6	90.5	
		30 min	30.7	122.8	86.4	32.1	128.4	91.0	
		35 min	30.4	121.6	86.6	30.6	122.4	91.4	
		40 min	29.8	119.2	86.8	31.9	127.6	91.0	
		45 min	29.3	117.2	87.1	33.8	135.2	90.5	
		50 min	28.9	115.6	87.2	29.3	117.2	91.8	
		55 min	29.4	117.6	87.0	30.9	123.6	91.3	
		60 min	27.5	110	87.8	31.5	126	91.1	
Operating	Inflow	-	229.8	919.2	-	-	-		
	Device runoff	0 min	31.1	124.4	86.5	298.7	1194.8	-	
		5 min	24.5	98	89.3	33.8	135.2	88.7	
		10 min	27.9	111.6	87.9	31.4	125.6	89.5	
		15 min	33.7	134.8	85.3	32.2	128.8	89.2	
		20 min	32.7	130.8	85.8	30.9	123.6	89.7	
		25 min	30.1	120.4	86.9	28.7	114.8	90.4	
		30 min	28.2	112.8	87.7	29.3	117.2	90.2	
		35 min	24.5	98	89.3	30.1	120.4	89.9	
		40 min	26.6	106.4	88.4	28.5	114	90.5	
		45 min	24.2	96.8	89.5	27.6	110.4	90.8	
		50 min	21.9	87.6	90.5	25.1	100.4	91.6	
		55 min	24	96	89.6	25.8	103.2	91.4	
		60 min	16.1	64.4	93.0	25.4	101.6	91.5	



(a) 1st Step result



(b) 2nd Step result

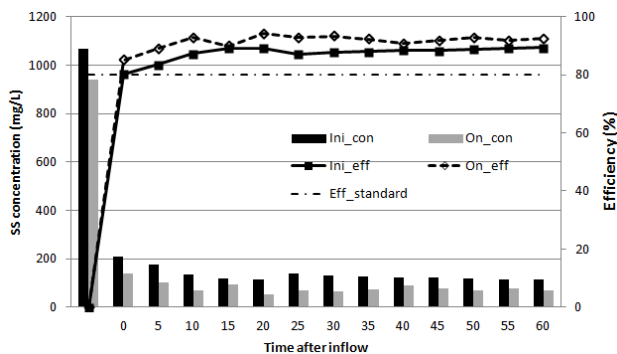
Fig. 8. Comparison of SS concentration and efficiency results for rainfall intensity 2.5 mm/hr

Table 3. Experimental verification results for rainfall intensity 3.395 mm/hr

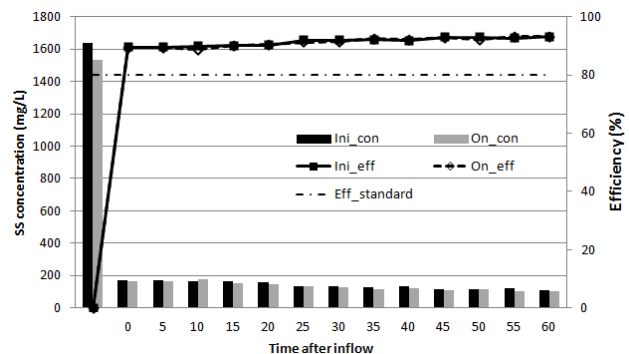
(a) 1st Step result

(b) 2nd Step result

		State (Inflow rate: 2.060 L/s, Pollutant rate 4.034 g/s)			Pollutant weight (mg)	Concentration (mg/L)	Removal efficiency (%)			State (Inflow rate: 2.060 L/s, Pollutant rate 4.034 g/s)			Pollutant weight (mg)	Concentration (mg/L)	Removal efficiency (%)
Initial	Device runoff	Inflow	-	266.5	1066	-	Initial	Device runoff	Inflow	-	409.2	1636.8	-		
		0 min	52.5	210	80.3	0 min			42.9	171.6	89.5				
		5 min	43.7	174.8	83.6	5 min			42.5	170	89.6				
		10 min	33.7	134.8	87.4	10 min			41.5	166	89.9				
		15 min	29	116	89.1	15 min			40.8	163.2	90.0				
		20 min	28.7	114.8	89.2	20 min			39.6	158.4	90.3				
		25 min	34.4	137.6	87.1	25 min			33.1	132.4	91.9				
		30 min	32.2	128.8	87.9	30 min			32.8	131.2	92.0				
		35 min	31.8	127.2	88.1	35 min			31.9	127.6	92.2				
		40 min	30.7	122.8	88.5	40 min			33.7	134.8	91.8				
		45 min	30.9	123.6	88.4	45 min			28.7	114.8	93.0				
		50 min	29.7	118.8	88.9	50 min			28.9	115.6	92.9				
		55 min	28.5	114	89.3	55 min			30.1	120.4	92.6				
		60 min	28.1	112.4	89.5	60 min			27.5	110	93.3				
Operating	Device runoff	Inflow	-	234.9	939.6	-	Operating	Device runoff	Inflow	-	384.1	1536.4	-		
		0 min	34.9	139.6	85.1	0 min			40.5	162	89.5				
		5 min	25.8	103.2	89.0	5 min			40.8	163.2	89.4				
		10 min	16.8	67.2	92.9	10 min			43.5	174	88.7				
		15 min	23.7	94.8	89.9	15 min			37.5	150	90.2				
		20 min	13.3	53.2	94.3	20 min			36.7	146.8	90.5				
		25 min	16.6	66.4	92.9	25 min			33.2	132.8	91.4				
		30 min	15.6	62.4	93.4	30 min			32.6	130.4	91.5				
		35 min	18.1	72.4	92.3	35 min			28.6	114.4	92.6				
		40 min	21.8	87.2	90.7	40 min			29.9	119.6	92.2				
		45 min	19.4	77.6	91.7	45 min			27.3	109.2	92.9				
		50 min	16.7	66.8	92.9	50 min			29.4	117.6	92.4				
		55 min	19.2	76.8	91.8	55 min			25.3	101.2	93.4				
		60 min	17.5	70	92.6	60 min			25.8	103.2	93.3				



(a) 1st Step result



(b) 2nd Step result

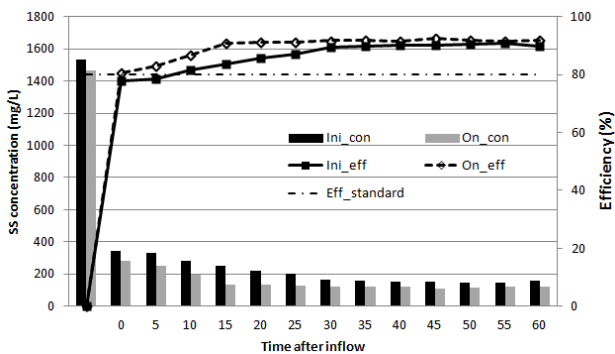
Fig. 9. Comparison of SS concentration and efficiency results for rainfall intensity 3.395 mm/hr

Table 4. Experimental verification results for rainfall intensity 6.870 mm/hr

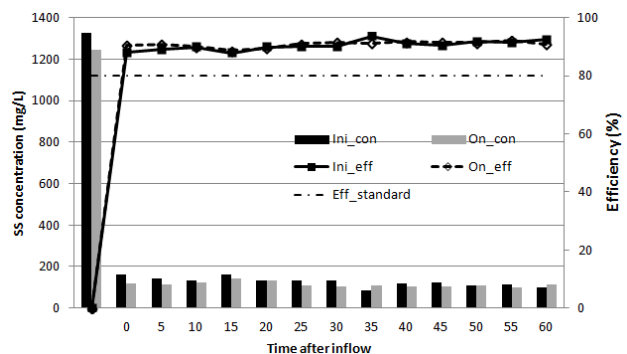
(a) 1st Step result

(b) 2nd Step result

		State (Inflow rate: 3.26 L/s, Pollutant rate 11.0 g/s)				State (Inflow rate: 3.26 L/s, Pollutant rate 11.0 g/s)			
		Pollutant weight (mg)	Concentration (mg/L)	Removal efficiency (%)	Pollutant weight (mg)	Concentration (mg/L)	Removal efficiency (%)		
Initial	Inflow	-	383.9	1535.6	-	-	332.2	1328.8	-
	Device runoff	0 min	85.6	342.4	77.7	0 min	39.8	159.2	88.0
		5 min	82.7	330.8	78.5	5 min	36.1	144.4	89.1
		10 min	70.9	283.6	81.5	10 min	33.4	133.6	90.0
		15 min	63.2	252.8	83.5	15 min	40.1	160.4	87.9
		20 min	54.7	218.8	85.8	20 min	33.4	133.6	90.0
		25 min	49.8	199.2	87.0	25 min	33	132	90.1
		30 min	40.9	163.6	89.4	30 min	33	132	90.1
		35 min	38.9	155.6	89.9	35 min	21	84	93.7
		40 min	37.4	149.6	90.3	40 min	29.3	117.2	91.2
		45 min	38.1	152.4	90.1	45 min	31.3	125.2	90.6
		50 min	36.6	146.4	90.5	50 min	27.1	108.4	91.8
		55 min	35.7	142.8	90.7	55 min	28	112	91.6
		60 min	39.1	156.4	89.8	60 min	24.8	99.2	92.5
Operating	Inflow	-	366.9	1467.6	-	-	310.8	1243.2	-
	Device runoff	0 min	71.1	284.4	80.6	0 min	29.5	118	90.5
		5 min	62.1	248.4	83.1	5 min	28.1	112.4	91.0
		10 min	48.1	192.4	86.9	10 min	30.9	123.6	90.1
		15 min	33.9	135.6	90.8	15 min	35.1	140.4	88.7
		20 min	32.7	130.8	91.1	20 min	32.7	130.8	89.5
		25 min	31.8	127.2	91.3	25 min	27.7	110.8	91.1
		30 min	30.4	121.6	91.7	30 min	26.1	104.4	91.6
		35 min	29.6	118.4	91.9	35 min	26.9	107.6	91.3
		40 min	30.5	122	91.7	40 min	25.7	102.8	91.7
		45 min	27.8	111.2	92.4	45 min	25.8	103.2	91.7
		50 min	29.4	117.6	92.0	50 min	26.6	106.4	91.4
		55 min	30.7	122.8	91.6	55 min	24.3	97.2	92.2
		60 min	30.3	121.2	91.7	60 min	28.1	112.4	91.0



(a) 1st Step result



(b) 2nd Step result

Fig. 10. Comparison of SS concentration and efficiency results for rainfall intensity 6.870 mm/hr

3.2.3 강우강도 6.870 mm/hr 적용한 검증결과

우선 저감장치의 1단계 제거효율에 대해 살펴보면, 강우강도인 6.870 mm/hr에 대해 11.0 g/s로 실험한 결과는 Table 4(a) 및 Fig. 10(a)와 같다. Ini_con은 출구지점 유출 후 0분에서 342.4 mg/L에서 최종적으로 156.4 mg/L까지 낮아졌으며, Ini_eff는 최소 77.7%에서 최대 90.7%로 나타났다. 또한, On_con은 출구지점 유출 후 0분에서 284.4 mg/L에서 시작하여 최종적으로 121.2 mg/L까지 낮아졌으며, On_eff는 최소 80.6%, 최대 92.4%로 나타났다. 초기상태에서는 출구지점 유출 후 5분이 경과할 때까지 기준 80%이하였으나 시간이 지날수록 제거효율이 점차 증가하였으며, 운영상태에서도 강우강도 2.5 mm/hr와 3.395 mm/hr보다 낮은 제거효율이었으나 점차 증가하는 경향을 보였다.

다음으로 장치의 2단계 제거효율에 대한 결과는 Table 4(b) 및 Fig. 10(b)와 같다. Ini_eff는 최소 88.0%, 최대 93.7%로 나타나 시간에 따라 제거효율이 90% 전후로 나타났다. 이에 따라 Ini_con도 159.2 mg/L(출구지점 유출 후 0분)에서 99.2 mg/L(60분 경과)로 전체적으로는 감소하는 경향을 나타냈으나 중간에 다소 변동이 발생하였다. 또한 On_eff는 최소 88.7%, 최대 92.2%로 나타났다. Ini_con도 118.0 mg/L(출구지점 유출 후 0분)에서 112.4 mg/L(60분 경과)로 최종적으로는 감소하였으나 1단계와 마찬가지로 다소 변동이 크게 발생하였다. 강우강도 6.870 mm/hr의 조건하에서도 장치 초기상태와 운영상태 모두 유출 후 제거효율 매우 비슷한 경향을 나타냈으며, 80% 이상으로 환경부 기준에 만족하였다.

3.3 실험결과 분석에 대한 고찰

본 연구에서 제안한 와류형 미필터 비점오염저감장치의 검증을 위해 총 12개 형태(3개 강우강도×2개 상태×2개 단계)의 실험을 진행하였고, 이에 대하여 분석하였다. 장치의 1단계에서는 모든 강우강도에서 출구지점 유출 후 10분까지 환경부 기준인 제거효율 80%를 만족하였으며, 이후 시간이 경과하면서 변동폭은 다소 있으나 제거효율이 지속적으로 증가하여 90% 근처까지 향상되는 것으로 나타났다. 특히, 큰 강우가 발생하는 가정상태인 강우강도 6.870 mm/hr에서는 출구지점 유출 후 10분까지도 제거효율이 77%~78%로서 환경부 기준을 만족하기 못하는 결과를 나타냈으나(초기상태 경우), 시간이 경과하면서 제거효율이 90%~91%까지 상승하였다. 또한 강우강도가 증가할수록 장치내 강우의 흐름이 빨라지면서 제거효율이 빠르면 15분~20분의 시간이 경과하면 제거효율이 90%를 상회하는 현상이 나타났다. 비점오염저감장치의 2단계에서는 1단계에서 어느 정도 오염물질을 거르고

다시 한 번 오염물질을 저감시키는 단계이므로 모든 강우강도에서 출구지점 유출 직후(0분~5분)부터 88%~90%에 가까운 제거효율을 나타냈다.

특히, 오염물질저감장치에서 검증기준으로 가장 중요한 오염물질 제거효율에 대해서 살펴보면, Fig. 11은 초기상태와 운영상태를 기준으로 실험결과를 정리하여 도식화한 box-plot 그래프이다. 초기상태에서의 제거효율은 처음에 약 77%에서 90%정도로 분포하고 있으며, 출구지점 유출 후 시간이 경과할수록 제거효율이 상승하면서 오염물질 평균제거효율이 85%에서 90% 정도까지 증가하였다. 시간이 15분 흐른 후 제거효율변동폭이 5%~6%로 많이 줄어들어 수렴하는 것으로 나타나 제거효율성이 집중되는 것으로 나타났다. 이에 따라 초기상태에서의 제거효율이 대부분의 조건하에서 평균적으로 약 90% 정도임을 확인하였다. 다음으로 운영상태에서는 제거효율이 초기상태보다는 조금 높은 약 80%에서 91% 정

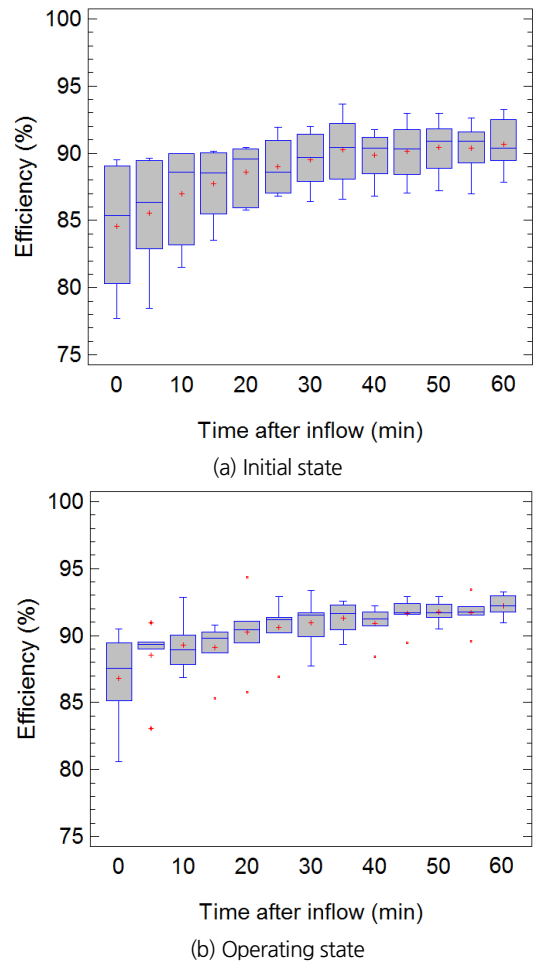


Fig. 11. Comparison of the pollutant removal efficiency

도로 분포하고 있으며, 이는 초기상태에 초기 유수가 오염물질을 많이 포함하기 때문이거나 운영상태에서는 유입수에 의해 오염물질이 희석되기 때문으로 판단된다. 제거효율은 초기상태와 비슷한 경향으로 출구지점 유출 직후인 0분을 제외하고 제거효율이 85%~90% 이상으로 향상되었다. 또한 점차 실험결과들의 제거효율 범위가 9%에서 최종적으로 약 2% 정도로 줄었으며, 그 수렴정도가 초기상태보다 더 범위가 좁은 것으로 나타났다. 이에 따라 운영상태에서의 제거효율이 대부분의 조건하에 초기상태보다 2%~3% 정도 높은 92%~93% 정도임을 확인하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 새로운 필터를 사용하지 않는 와류형 비점 오염저감장치를 개발하고 실험을 통하여 오염물질 저감효율을 알아보고자 하였다. 본 연구에서 수행한 연구내용을 살펴보면, 첫 번째로 3단계로 구성된 미필터 와류형 비점오염저감장치를 개발하였다. 1단계에서는 큰 부유물질을 제거하는데 초점이 맞춰져있으며, 2단계와 3단계에서는 원심력과 비중을 이용하여 2차적으로 비점오염을 저감시키고 유출하게 된다. 이 장치의 우수한 점은 수두 차에 의해 유수가 흐르게 되며, 이 흐름의 체류시간을 길게 하여 오염물질의 침전시간을 확보하였다. 또한 오염물질 제거를 위한 필터를 이용하지 않아 유지관리 측면에서 유리하다.

두 번째로 개발한 저감장치의 검증을 위해 오염물질을 이용하여 총 12개 형태(3개 강우강도×2개 상태×2개 단계)의 실험을 진행하였다. 실험은 (1) 모의유입량 산정(강우강도 2.5 mm/hr: 0.00152 m³/s, 강우강도 3.395 mm/hr: 0.00206 m³/s, 강우강도 6.870 mm/hr: 0.00326 m³/s); (2) 오염물질 채취 및 투입(4개 입경 사이즈의 25%씩 혼합); (3) 오염물질 제거효율 측정으로 구성하였고, 장치 초기상태와 운영상태로 구분하여 수행되었다. 실험결과를 살펴보면, 강우강도 2.5 mm/hr에서는 오염물질 제거효율은 1단계 초기상태 최대 87.8%, 운영상태 최대 93.0% 및 2단계 초기상태와 운영상태는 각각 최대 91.8%와 91.9%를 나타냈다. 또한 초기상태와 운영상태 모두 오염물질 농도가 시간이 경과함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 강우강도 3.395 mm/hr와 6.870 mm/hr에서도 시간이 지날수록 초기상태에서의 제거효율은 약 90%, 운영상태에서는 효율이 90% 이상으로 매우 높게 나타났으며, 이는 장치 초기상태와 운영상태 모두 유출 후 제거효율이 80%이상으로 환경부 기준에 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 초기상태

에서 출구지점 유출 후 5분이 경과할 때까지 제거효율이 80% 이하였으며, 오염물질농도가 전체적으로 감소하는 경향이었으나 다소 변동이 발생하였다. 정리하면, 모든 실험 조건에서 오염물질 제거효율 80%이상을 만족함을 보였으며, 장치의 초기상태 보다 운영상태인 경우 효율은 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 유입수 대비 유출수 오염물질 제거효율이 시간이 지남에 따라 서서히 증가하여 약 90%를 상회하는 것을 볼 수 있었다.

따라서 본 연구에서 제안한 와류형 미필터 비점오염저감 장치의 효율성은 매우 우수한 것으로 나타났으며, 특히 필터를 사용하지 않는 장점으로 인해 기존 필터를 사용하여 비점오염물질을 제거하는 장치보다 유지관리 및 경제성 등이 뛰어난 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서는 단순히 오염물질에 대한 제거효율 분석만 진행하였으며, 시설전체와 부유물질의 손실수두 시험 등에 대한 충분한 실험이 이루어지지 못하였다. 또한 Ministry of Environment(2016)에서 제시한 비점오염저감장치의 목적에 따른 모니터링 조사항목인 질소, 인 등 영양염류에 대한 모니터링도 현실적 운영여건 상 진행하지 못하였다. 이에 따라 향후 영양염류의 모니터링 및 저감 시설의 손실수두에 대한 추가실험 및 보완이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 대진대학교 학술연구지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, J. S., and Lee, J. M. (2016). "Standards of non-point source pollutant and trend of technology." *Water for Future*, Vol. 46, No. 6, pp. 83-88.
- Jung, C. G., Paar, J. Y., Kim, S. H., and Kim, S. J. (2012). "A study on the reduction of non-point source pollution loads from small agricultural watershed by applying surface covering scenario using HSPF model." *Proceeding of Korean Water Resources Association*, p. 103.
- Keshavarzi, A. R., and Gheisi, A. R. (2006). "Trap efficiency of vortex settling chamber for exclusion of fine suspended sediment particles in irrigation canals." *Irrigation and Drain*, Vol. 55, No. 4, pp. 419-434.
- Kim, D.-I., Kim, K.-M., Han, K.-Y., and Park, T.-W. (2012). "Non-point source quantitative analysis using watershed model in

- Nakdong River.” *Proceeding of Korean Water Resources Association*, p. 782.
- Lee, H. S., Choi, G. W., and Kim, N. G. (2013). “The analysis of characteristic of efficiency in the diffusion pollution improvement facilities with vortex type according to detention time.” *Crisisonomy*, Vol. 9, No. 3, pp. 127-136.
- Lee, Y. B. (2010). *A Study on the selection and application of pollution mitigation facility for highway runoff*. Doctoral Thesis, Kwangwoon University.
- Ministry of Environment (2006). *Manual for the nonpoint source pollution management*. Ministry of Environment.
- Ministry of Environment (2016). *Manual for installation, management, and operation of the nonpoint source pollution facility*. Ministry of Environment.
- National Institute of Environmental Research (2013). *Research for the design rainfall and runoff estimation method*. No. 20130617940-00.
- Paul, T. C., Sayal, S. K., Sakhujia, V. S., and Dhillon, G. S. (1991). “Vortex-settling basin design considerations.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 2, pp. 172-189.
- Shin, D. B. (2007). *A Study on optimization of the non-point pollution source reduction facility for the performance assessment of spiral-precipitation tank*. Master’s Thesis, The University of Suwon.
- Shin, H. S., Kim, M. E., Kim, J. M., and Jang, J. K. (2015). “Analysis on load of non-point source from sewage treatment districts in Nakong River.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 48, No. 6, pp. 695-709.