



Performance analysis for reduction facility of nonpoint source pollutant

Lee, Jong-Seok^{a*} · Kim, Chi-Gon^b

^aProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon, Korea

^bPh.D, Department of Civil Engineering, Hanbat National University, Daejeon, Korea

Paper number: 19-002

Received: 3 January 2019; Revised: 29 January 2019 / 1 February 2019; Accepted: 1 February 2019

Abstract

This study aims at development and application of a facility that is capable of reducing pollution in water quality by reducing nonpoint source pollutants (NPSP). NPSP originated from the initial rainfall caused not only large catchment of urban area pass a river but also small watershed pass a stream. For this purpose, the performance tests carried out with the field models from the facility based on the preceding study. And the tests induced reduction efficiency of biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (T-N) and suspended solid (SS), respectively. The average reduction efficiency obtained by time interval, and the result showed an excellent reduction performance. As a result, the facility satisfied reduction efficiency of NPSP of the proposed standard by the National Institute of Environmental Research, and thus it can be used in practical applications.

Keywords: Nonpoint source pollutants, River water quality, Reducing facility, Performance analysis, Practical application

비점오염원 저감장치의 성능분석

이종석^{a*} · 김치곤^b

^a한밭대학교 건설환경공학과 교수, ^b한밭대학교 토목공학과 공학박사

요지

본 연구는 도시·산업지역의 넓은 불투수 지역뿐만 아니라 좁은 지역의 도로·교량이 통과되는 하천유역에서 발생하는 비점오염원을 초기우수로부터 저감시킴으로써 하천수질의 오염을 줄일 수 있는 저감장치를 개발하여 실용화하고자 한다. 이를 위해 본 연구의 선행연구에서 취득한 자료를 기반으로 현장 성능시험용 저감장치를 개발하여 생화학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 총질소(T-N)와 부유물질(SS)의 저감효율에 대한 성능시험을 실시하였다. 성능분석 결과는 시간구간별 시험항목의 분석에서 그 성능이 우수한 것으로 확인되었다. 그 결과는 국립환경 과학원에서 제안한 비점오염 저감시설의 요구 저감효율을 충족시키는 것으로 나타나 실무활용이 가능할 것이다.

핵심용어: 비점오염원, 하천수질, 저감장치, 성능분석, 실무활용

1. 서론

우리나라는 최근 들어 하수처리장 등의 환경기초시설이 확충되면서 점오염원의 관리가 강화되었고, 이에 따라 수계로 배출되는 총 오염부하량은 지속적으로 감소되고 있으나, 토지이용 고도화에 따른 불투수면의 확대 등으로 비점오염

부하량은 계속적으로 증가되는 추세를 보이고 있다. 비점오염물질은 일정한 배출구를 갖고 있지 않으며 넓은 지역으로 분산되어 있어 오염원 흐름의 분산성과 지역의 방대성으로 집수하기 어렵다. 또한 도시화가 진행됨에 따라 자동차 증가와 더불어 도로·교량이 증가되면서 그로 인하여 도로·교량 표면에 쌓이게 된다. 이들 오염물질은 갈수기가 끝나고 강우가 발생하게 되면 씻김 현상으로 인해 그대로 하천으로 유입되어 수질을 오염시키는 주요 원인이 된다. 비점오염원은 주로 비가 올 때 지표면 유출수와 함께 유출되는 오염물질로 농지에

*Corresponding Author. Tel: +82-42-821-1111
E-mail: ljs96@hanbat.ac.kr (J.-S. Lee)

살포된 비료나 농약, 토양침전물, 축사유출물, 교통오염물질, 도시지역의 먼지와 쓰레기, 자연 동·식물의 잔여물, 지표면에 떨어진 대기오염물질 등을 말한다(Novotny and Olem, 1994). 수질오염원은 도시나 공장에서와 같이 지속적으로 발생하는 점오염원과 주로 비가 올 때 도시와 농촌지역에서 흘러나와 오염된 빗물 유출수와 같이 수시로 임의 장소에서 발생하는 비점오염원(nonpoint source pollutant)으로 구분할 수 있다. 물환경보전법 제2조 제2항(Ministry of Government Legislation, 2018)에 의하면 비점오염원이란 「도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등으로서 불특정 장소에서 불특정하게 수질오염물질을 배출하는 배출원을 말한다.」로 정의하고, National Institute of Environmental Research (2017)은 「비점오염원이라 함은 점오염원 이외의 오염원으로서 배출장소와 배출경로가 불분명할 뿐만 아니라 주로 강우에 의존하여 유출되는 오염원을 말한다.」로 정의한다. 비점오염원은 강우초기에는 고농도의 오염물질이 유출되고 이후 시간의 경과에 따라 농도가 낮아지는 유출특성 갖는다(Hewitt and Rashed, 1992; Sagat *et al.*, 1996; Kent *et al.*, 2000). 이는 유역 면적이 작고 불투수면의 비율이 크며 건기일수가 길수록 강우의 초기유출에 의한 하천의 수질오염 가능성은 높다(Hirshman and Kosco, 2008).

Jung (2010)은 비점오염원을 효율적으로 감소시키기 위한 정화장치를 유입구-유로가이드-1차 여과망-2, 3차 여과기-배수구로 구성된 연직형의 대·소용량으로 구분·개발하였다. 이 연구에서 소용량의 경우에는 BOD 3%, COD 21.8%, SS 88%, T-N 5%, 대용량의 경우에는 BOD 83%, COD 61%, SS 98.4%, T-N 23.1% 저감 효과를 얻었다. Kang (2011)은 유출 특성에 기초한 고속도로의 비점오염물질 저감기술 적용성 해석을 위해 모니터링과 현장실험 등을 통해 연구하였다. 강우량과 유출량 측정은 강우가 시작된 후 1~10분 단위 등으로 구분하여 측정하였고, 현장실험의 일부는 인공강우를 사용해 수행하였으며, BOD, COD, T-P, SS 외의 수질분석항목에 대해 분석한 결과는 강우가 시작되고 유출이 시작된 이후 초기 30분 이내 오염물질의 농도는 급격히 줄어들며 그 이후로는 완만한 경향을 나타내는 것으로 제시하였다. 특히, 침투도량 및 여과시설에 대한 현장 시험시공 결과에서 침투도량의 처리효율은 대부분의 시험항목에서 90% 내외로 비교적 높은 것으로 평가되었다. 여과시설은 TSS 42.5%, BOD 38%, T-N, T-P는 각각 55.6%, 51.6% 정도인 것으로 평가되었으며 유입되는 농도가 높을수록 저감효율이 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

2010년도 수질오염물질 배출 부하량은 하루에 BOD 1,640톤, T-P 97.8톤이며, 그 중 비점오염원은 BOD 1,119톤, T-P 57.6톤이다. 2020년의 비점오염원물 배출 부하량은 하루에

BOD 1,152톤, T-P 58.3톤으로 증가될 것으로 예측하며, 이는 도시가 대부분 불투수층으로 형성되어 강우강도가 증가하는 강우 패턴으로 변화됨에 따라 비점오염물의 유출 또한 증가될 것이다(Ministry of Environment, 2014). 이러한 현실을 고려한 보다 나은 수질보전을 위해서는 비점오염원을 저감시킬 수 있는 대책이 수립되어야 할 것이다. 특히 많은 비점오염원 중에서도 도로에서 배출되는 환경오염물질로 인해 국민의 삶에 미칠 수 있는 부정적 영향을 최소화하기 위하여 2015년 6월에 도로 비점오염저감시설 설치 및 관리 지침을 제정하여 운영하고 있다(Ministry of Environment, 2016).

Kang and Lee (2016)는 SWMM을 이용하여 모래 여과 시설이 장치형 비점오염 저감 시설로 계획된 사업 부지 일부에 자연형 비점오염 저감 시설의 적용 가능성 여부 검토를 연구하였다. 해당 지역에 도입된 인공습지와 식생수로는 자연형 비점오염 저감 시설로 기존 장치형 비점오염 저감시설로 처리할 수 있는 비점오염의 93.6%를 저감시킬 수 있는 것으로 분석하였다. Yun *et al.* (2017)은 장치형 비점오염원 저감시설의 여재 교체 비용절감을 위한 여재 처리효율 안정성 확보 실험 연구에서 SS의 저감효율을 대상으로 분석하였다. 여재의 높이별 처리효율 평가와 회귀분석에 의한 여재층별 평가에 있어 최적의 여재층(60 cm), 설계 선속도(10~20 m/h) 범위를 설정하고 각 조건의 여재층 두께와 설계 선속도에 대한 역세척 처리효율의 회복율을 분석하였다. Yang *et al.* (2018)은 비점오염 저감시설 중 입상 여재를 대상으로 한 실험장치에 강우 유출수를 이용한 연구로부터 여과·역세척의 효율은 여과선속도 20.0 m/h 조건에서 평균 고품물 처리효율이 80.0% 이상인 것으로 제시하였다.

본 연구에서 선행연구는 Table 1과 같이 최적 여재 구성안을 결정하기 위해 4종류의 원통형·수평 저감장치를 개발하고, 현장 채취시료를 사용해 실내시험을 수행함으로써 침전·흡착·여과 공정별 여재의 구성안을 결정하였다(Kim *et al.*, 2014). 이 결과는 각 공정별 여재를 교환형 셀식 수조로 1,560L 크기의 상자형-연직 저감장치인 제1모형으로 제작하여 제1차 현장 성능시험에 적용하였다. 제2모형 저감장치는 현장 운반·이동의 편리성 등을 고려해 현장 거치에 용이하게 제1모형을 1/6.5 크기로 축소·제작하여 제2~4차 현장 성능 시험에 활용하였다(Lee, 2015; Lee *et al.*, 2016).

본 연구는 도시·산업지역의 비교적 넓은 불투수 지역뿐만 아니라 좁은 지역의 도로·교량이 통과되는 하천유역에서 발생하는 비점오염원을 초기우수로부터 저감시킴으로써 하천 수질의 오염을 줄일 수 있는 저감장치를 개발하여 실무 활용에 기여하고자 한다. 이를 위해 선행연구에서 도출한 공정별 여재를 셀식 수조-상자형으로 비점오염원 저감장치를 개

Table 1. Field tests for performance analysis

Division	Date	Location	Contents
Preceding study	1	2013.12.23. - Yuseong-gu Jangdae-dong - Jangmyeong bridge	- Object; Decision of composition ratio in optimal filter medium - Model; Small cylindrical model in 4 types
	2	2014.01.06. - Yuseong-gu Jangdae-dong - Jangdae bridge	- Dimension; Diameter 10 cm × length 30 cm - Capacity; 2.36 L (stainless steel)
The 1st	1	2015.05.14 - Yuseong-gu Jangdae-dong - Jangmyeong bridge	- Object; Field performance test - Model; The 1st model in box type
	2	2015.08.13 - Yuseong-gu Deokyeong-dong	- Dimension; Width 152.5 cm × depth 110 cm × length 93 cm
	3	2015.09.09 - Wangga bridge	- Capacity; 1560 L (transparent acrylic resin)
The 2nd	1	2015.10.05. - Yuseong-gu Deokyeong-dong - Wangga bridge	- Object; Field performance test - Model; The 2nd model in box type - Dimension; Width 50 cm × depth 60 cm × length 80 cm - Capacity; 240 L (stainless steel)
	2	2015.10.05. - Yuseong-gu Jangdae-dong - Jangmyeong bridge	
	3	2015.10.19. - Yuseong-gu Deokyeong-dong - Wangga bridge	
The 3rd	1	2017.06.21.	
	2	2017.08.08.	
	3	2017.09.15. - Yuseong-gu Deokyeong-dong - Wangga bridge	
The 4th	4	2017.11.03.	
	5	2017.10.10.	
	1	2018.06.25. - Yuseong-gu Deokyeong-dong	
	2	2017.06.25. - Wangga bridge	

발하고, 이 저감장치의 성능확보를 위해 제1, 2모형 저감장치를 이용하여 13회의 현장 성능시험을 수행하였다. 성능시험 평가는 각 성능시험별 오염시료 농도에 대한 채취 시간구간별 저감시료 농도 비의 백분율로 저감효율(reduction efficiency)을 정의하고, 각 시간구간별 조건에 따른 BOD, COD, T-N, SS 저감효율의 분석으로 이루어졌다.

필터와 추가로 배수홀을 만들어 집중호우에 대비할 수 있도록 저감장치를 구성해 시험하였다.

이 시험은 Fig. 1과 같이 대전시 유성구 장대동 장명교(2013년 12월 23일)와 장대교(2014년 1월 6일)를 대상으로 현장에

2. 이론과 시험

2.1 선행 연구

선행연구는 Table 1과 같이 지름 10 cm × 길이 30 cm인 원통형-수평 저감장치로 필터1에 스폰지 필터(폴리나젤) 20%, 여과사(2~5 mm) 20%, 활성탄 매트(카본필터) 5%, 8 × 30 메쉬 활성탄 20%, 세라믹 여재 30%, 백필터, 부직포 5%로 구성하였다. 필터2는 세라믹 여재의 비율을 필터1과 동일한 비율을 넣고 활성탄 매트의 비율을 높여 구성하였다. 활성탄을 주요성분으로 50%로 고정하여 필터3에는 스폰지 필터 20%, 여과사(2~5 mm) 20%, 활성탄 매트 7%, 백필터, 부직포 3%로 구성하여 필터1, 2에서 사용하던 세라믹 여재를 제외하여 구성하였다. 필터4는 필터1~3에서 사용하던 여과사를 제외시키고

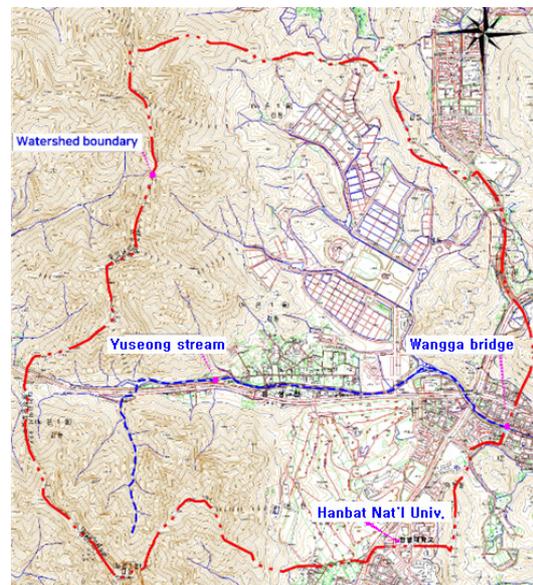


Fig. 1. Watershed in this study

서 오염시료를 채취하여 4종류의 필터를 통과시키는 실내시험을 통해 저감시료를 채취하였고, 시료분석은 공인 전문기관에 의뢰하여 시험항목별 저감효율을 얻었다(Kim *et al.*, 2014; Kim, 2018).

선행연구는 4종류의 필터로부터 BOD, COD, T-N의 저감효율 분석하는 것으로 수행되었고, 그 결과는 필터1의 저감효율이 BOD 68.5%, COD 56.4%, T-N 63.5%로 제일 좋은 결과를 보였으며, 이는 현장 성능시험용 저감장치 모형의 선행 수조 여재 구성에 사용되었다.

2.2 강우-유출

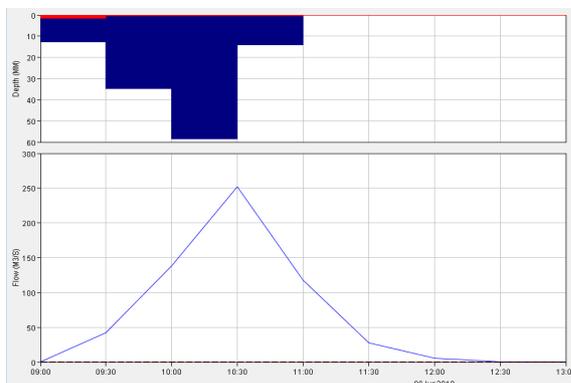
작은 유역면적을 갖는 도심지 경계부근의 중소 하천유역에 대한 강우-유출 실측자료는 상류구간을 통과하게 되는 흐름특성 상 수위-유량관측소의 설치 여건이 좋지 않다. 이와 같은 이유로 이 수로구간의 유량 실측자료는 비교적 그 자료수가 적다. 특히 비점오염원의 현장시험은 강우 중에 저감장치 설비를 이동 설치하는 어려움과 현장여건 등의 여러 사항을 고려할 때 많은 자료를 수집하는 것은 쉽지 않은 일이다. 이런 경우의 자료생성 방법에는 확정론적 접근방법, 확률론적 접근방법과 이들 두 방법의 중간적 역할의 추계학적 방법이 있다(Fiering and Jackson, 1971). 추계학적 방법은 수문자료의 특성을 이용하여 관측 수문자료의 짧은 기간을 자료의 동질성 가정 하에 비교적 긴 기간의 자료로 확장·발생시키는데 사용할 수 있다. 하천유량의 모의발생은 어떤 기간 동안에 관측된 자료계열이 장래에도 연속하여 발생된다는 가정 하에 유도된다. 자기회귀 발생방법은 관측유량 자료계열이 수문학적 지속성을 가질 경우에 유량자료를 모의 발생시키는 방법으로 하천유량계열의 모의발생에 널리 사용되고 있으며, Markov 모형이라고도 한다(Lee, 2018). 이 방법을 활용하여 유출량 자료를 확충하기 위한 강우량 자료 선정은 전국에 설치되어

있는 유량관측소에서 측정된 지점유량을 기초자료로 작성된 확률강우량도(IDF 곡선)(Ministry of Construction and Transportation, 2000)를 이용하였다. 본 연구에서 설계 확률강우량은 Fig. 1의 대상유역이 위치한 대전지역의 IDF 곡선으로부터 50년 빈도, 120분 지속기간의 120 mm로 결정하였다. 도달시간은 소유역의 유출해석에 중요한 상수로 강수로 인한 유수가 그 유역의 가장 먼 곳으로부터 유역 출구점까지 도달하는 데 소요되는 시간을 의미한다. 자연하천 유역과 도시하천 유역의 도달시간 산정공식은 Kerby 공식, Kraven 공식, Rziha 공식, Kirpich 공식과 SCS 평균유속 방법 등이 있다(Korea Water Resource Association, 2009; Lee, 2018). 본 연구의 도달시간은 유성천 상류구간인 유역면적 8.94 km²에 Kirpich (1940) 공식(Chow, 1964; Subramanya, 2013)을 적용하여 0.933 h으로 결정하였다. 이들 수문자료는 Fig. 2(a)의 HEC-HMS (U.S. Army Corps of Engineers, 2008a; 2008b; 2008c)에 의한 유역 내 강우-유출량 분석과 Fig. 2(b)의 저감장치 체류·통과에 따른 비점오염원-오염농도 관계분석을 위한 유입-유출 수문곡선을 유도하는데 사용하였다.

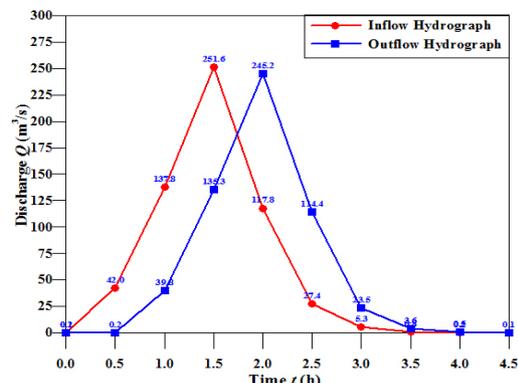
소유역의 강우-유출량 산정(Subramanya, 2013)은 강우지속시간이 유역의 도달시간과 같거나 클 때까지 강우가 계속되어 유역면적 내 평형상태에 이르게 될 때의 침투손실을 고려해 침투 유출량을 경험적 방법으로 구하는 Eq. (1)의 합리식을 사용하였다.

$$Q = \frac{1}{3.6} CIA = 0.2778 CIA \tag{1}$$

여기서 Q 는 침투 유출량(m³/s)이고, C 는 유출계수이며, I 는 홍수도달시간을 강우지속시간으로 하는 특정 발생빈도의 강우강도(mm/h)이다(Korea Water Resource Association, 2009; Lee, 2018).



(a) Runoff hydrograph in area



(b) Outflow hydrograph in facility

Fig. 2. Routing curves in basin and system

2.3 비점원오염 유출

강우 시 유역에서 발생하는 수문곡선과 오염물질 농도곡선은 여러 형태로 나타난다(Novotny and Olem, 1994). 유역 출구지점에 발생될 수 있는 오염물질 농도곡선의 형태는 전형적인 수문곡선과 가장 유사한 형태로 변화하는 농도곡선과 이 곡선의 첨두점이 수문곡선의 첨두점 보다 앞서 나타나는 초기유출효과의 영향을 나타내는 형태가 있다. 또한 평상 시 기저유량의 농도보다 강우 유출수의 농도가 낮은 경우에 발생하는 농도곡선이 유량증가에 따라 농도가 희석되어 나타내는 형태, 유량변화와 관계없이 농도가 불규칙하게 유출되는 형태가 있다. 특정유역에 강우가 내리게 되면 유역 출구지점의 수문곡선변화는 유역의 면적, 형상, 기울기, 방향성, 토지이용 상태, 토양의 종류, 토양의 침투능, 하도특성에 따라 다양하게 변화하게 된다. 이와 함께 시간적인 농도분포를 보여주는 오염물질 농도곡선 역시 수문곡선에 영향을 미치는 인자들에 따라 그 형태가 결정되며, 일반적으로 비점원 오염물질의 유출경향은 점원오염의 유출과는 매우 다른 양상을 나타낸다. 도시지역은 개발에 따라 불투수층 면적 비율이 높아 강우의 도달시간이 짧고, 유출률이 커서 강우초기에 유량과 오염물질이 다량 유출되는 현상이 있다. 대부분의 도로는 아스팔트, 콘크리트와 같은 불투수성 포장재로 포설되어 있어 적은 양의 강우에도 초기유출이 크게 발생·유출되기 때문에 오염물질 농도 또한 높다.

2.4 시험항목과 농도

본 연구는 비점오염원 저감장치의 저감효율 분석을 위해 BOD, COD, T-N과 SS를 대상으로 수질오염 공정시험기준 (Ministry of Environment, 2014)을 적용하였다.

BOD는 시료를 20°C에서 5일간 저장하여 두었을 때 시료 중의 호기성 미생물의 증식과 호흡작용에 의하여 소비되는 용존산소의 양으로부터 측정한다. 이는 식중(호기성 미생물을 첨가)하지 않은 시료와 식중희석수를 사용한 시료의 농도는 Eq. (2)와 같이 구한다.

$$BOD = (D_1 - D_2) \times P^* \quad (2)$$

여기서 D_1 은 15분간 방치된 후의 희석(조제)한 시료의 DO (mg/L)이고, D_2 는 5일간 배양한 다음의 희석(조제)한 시료의 DO (mg/L)이며, P^* 는 희석시료 중 시료의 희석배수(희석시료량/시료량)이다.

COD는 적정법-산성 과망간산칼륨법(COD_{Mn})을 측정하기 위하여 시료를 황산성으로 하여 과망간산칼륨 일정과량을

넣고 30분간 수욕 상에서 가열반응 시킨 다음 소비된 과망간산칼륨량으로부터 이에 상응하는 산소의 양을 측정한다. 사용한 시료의 양과 소비된 과망간산칼륨용액으로부터 Eq. (3)과 같이 구한다.

$$COD = B_C - A_C \times f_C \times \frac{1000}{V} \times 0.2 \quad (3)$$

여기서 A_C 는 바탕시험 적정에 소비된 과망간산칼륨용액이고, B_C 는 시료의 적정에 소비된 과망간산칼륨용액의 양 (mL)이며, f_C 는 과망간산칼륨용액 농도계수, V 는 전처리에 사용한 시료의 양(mL)이다.

T-N은 자외선·가시선 분광법-산화법을 적용해 시료 중 모든 질소화합물을 알칼리성 과황산칼륨을 사용하여 120°C 부근에서 유기물과 함께 분해하여 질산이온으로 산화시킨 후 산성상태로 하여 흡광도를 220 nm에서 측정하여 총질소를 정량한다. 미리 작성한 절대검정곡선으로부터 질소의 양을 구하여 Eq. (4)로 시료 중의 총 질소 농도를 산출한다.

$$T-N = A_T \times \frac{60}{25} \times \frac{1000}{V} \quad (4)$$

여기서 A_T 는 검정곡선으로부터 구한 질소의 양(mg)이고, V 는 전처리에 사용한 시료량(mL)이다.

SS는 미리 무게를 단 유리섬유여과지를 여과장치에 부착하여 일정량의 시료를 여과시킨 다음 함량으로 건조하여 무게를 달아 여과 전후의 유리섬유 여과지의 무게차를 산출한다. 여과 전후의 유리섬유여지 무게의 차를 구하여 Eq. (5)와 같이 부유물질의 양으로 한다.

$$SS = (B_S - A_S) \times \frac{1000}{V} \quad (5)$$

여기서 A_S 는 시료 여과 전의 유리섬유여지 무게(mg)이고, B_S 는 시료 여과 후의 유리섬유여지 무게(mg)이며, V 는 전처리에 사용한 시료의 양(mL)이다.

본 연구에서 비점오염원 저감장치의 성능시험 평가는 시험항목인 BOD, COD, T-N과 SS의 저감효율을 각 성능시험별(초기) 오염시료의 농도에 대한 채취 시간구간별 저감시료 농도비의 백분율(%)로 Eq. (6)과 같이 정의하여 수행하였다.

$$E_R = \frac{C_{rst}}{C_{ics}} \times 100 \quad (6)$$

여기서 E_R 은 저감효율(reduction efficiency)(%)이고, C_{ics} 는 (초기) 오염시료의 농도(concentration of initial contamination sample)(mL/L)이며, C_{rst} 는 채취 시간구간별 저감시료의 농도(reduced sample concentration by time interval)(mL/L)이다.

2.5 시험방법

선행연구에서 얻은 최적 여재 구성안을 적용해 제1모형으로 개발한 저감장치는 폭 152.5 cm × 깊이 110 cm × 길이 93 cm, 두께 15 mm인 투명 재질의 강화아크릴로 제작하였다. 이 저감장치는 침전, 흡착, 여과 공정으로 구성하였고, 오염수의 유입은 상부에서 2 cm 아래의 지점에 발생되며, 유출은 94.8 cm 떨어진 지점에서 발생한다. 오염수가 유입되면 침전조의 부유물질 차단막에 의하여 부유물질이 가라앉고 필터유도관을 통해 흡착필터로 유입되어 여과가 이루어지고 스크린과 박스형 필터박스를 지나 정화되어 배출된다. 집중 호우 시 역류되

는 것을 방지하기 위해 월류홀을 만들어 원활한 배수기능을 유지할 수 있도록 하였다. 제1모형을 이용한 제1차 현장 성능 시험은 Fig. 1의 유역을 대상으로 Table 1과 같이 대전시 유성구 장대동 장명교와 덕명동 왕가교에서 시료를 채취·분석으로 수행하였다.

Table 2의 여재로 구성된 Fig. 3의 현장 성능시험용 제2모형은 시험목적·장소, 시험장비·방법, 공간과 비용 제약 등의 효율을 고려해 제1모형의 저감장치(Kim *et al.*, 2014)를 1/6.5로 축소시킨 것이다. 이 모형은 Figs. 3(a) and (c)와 같이 폭 50 cm × 깊이 60 cm × 길이 80 cm의 스테인리스 재질로 제작하였고, 공정별 흐름도는 Fig. 3(b)와 같이 오염수의 유입은 상부에서 1.5 cm 아래의 지점에 발생되고, 유출은 57 cm 떨어진 지점에서 발생되도록 설계하였다. Figs. 3(d) and (e)의 각 공정별 수조의 여재구성은 Table 2와 같고, 제2모형을 이용한 제2~4차 현장 성능시험은 대전시 유성구 덕명동 왕가교와 장대동 장명교에서 수행하였다.

Table 2. Filter medium of test models

Filter medium	Adsorption tank (circular filter)		Filtration tank (box filter)	
	Specification (sheet)	Percentage (%)	Specification (sheet, liter)	Percentage (%)
Nonwoven fabrics	3sheets	75	2sheets	-
Activated carbon (4 × 8)	-	-	6 L	50
Carbon filter	-	-	1sheet	-
Bag filter	1sheet	25	-	-
Activated carbon (8 × 30)	-	-	6 L	50

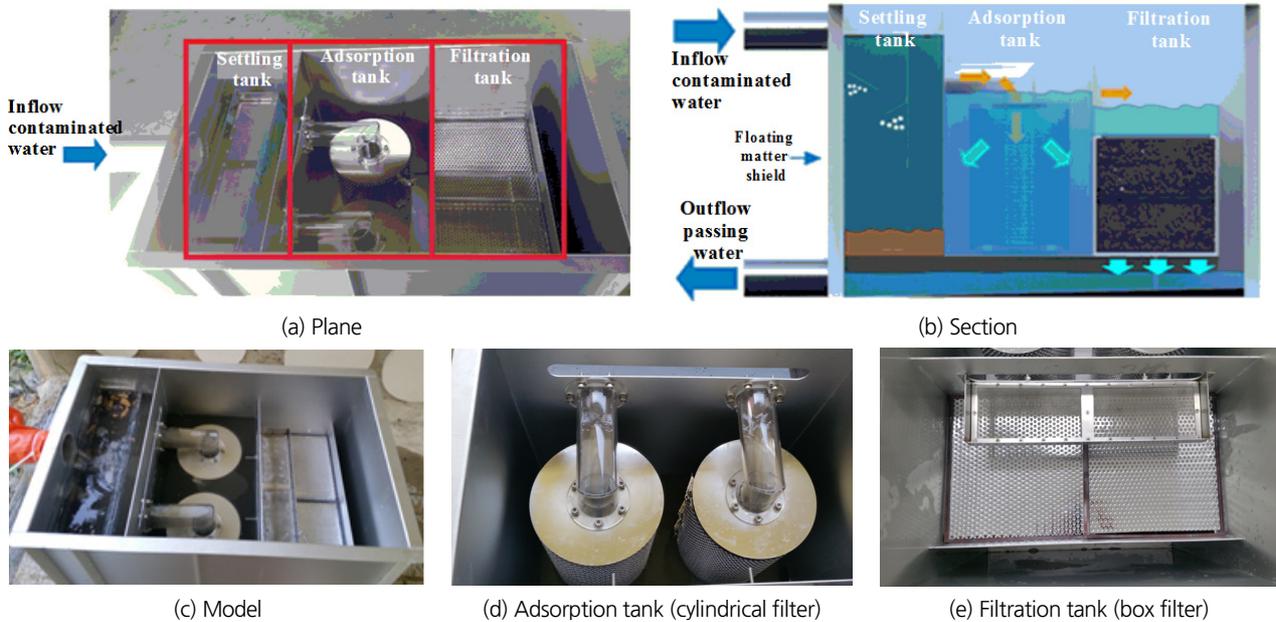


Fig. 3. Field test model for performance analysis

제2모형에 의한 제2차-1, 3 성능시험은 2015년 10월 5일, 10월 19일 대전시 유성구 덕명동 왕가교, 제2차-2 성능시험은 2015년 10월 6일 대전시 유성구 장대동 장명교에서 수행하였다. 강우는 인공 살수로 대체하여 배수관에 호스로 연결시켜 현장에서 유입되는 실제와 가장 가까운 방식으로 제2차 성능 시험을 진행하였다. 제3차 성능시험은 2017년 6월 21일, 8월 8일, 9월 15일, 11월 3일, 11월 10일 총 5회에 걸쳐 대전시 유성 구 덕명동 왕가교에서 진행하였다. 제1~3차 성능시험은 각 시험별로 유역 내 강우 시 유출에 의한 쓸림 현상으로 비점오염 원과 혼합되어 저감장치 유입구로 흘러 들어가기 전의 오염된 유입수를 오염시료로 맨 먼저 채취하였다. 그 후 오염된 유입수는 저감장치를 통과하면서 일정시간을 체류하게 되어 낮아진 오염농도를 갖고 유출구를 빠져 나올 때의 저감된 유출수를 저 감시료로 0분, 1분, 2분, 4분, 6분, 8분 간격으로 채취하여 7개 의 시료를 얻었다. 제4차 성능시험은 2018년 6월 25일 왕가교 에서 제1실험으로 저감장치 유입 직전의 오염시료를 0분, 1분, 2분, 4분, 6분, 8분, 10분, 15분, 20분 간격으로 채취하여 9개의 시료를 얻었다. 또한 제2실험은 저감장치의 체류·통과시간 경과 후에 유출되는 저감시료를 각각 0분, 1분, 2분, 4분, 6분, 8분, 10분, 15분, 20분 간격으로 채취하여 9개의 시료를 얻었다. 제4차 성능시험의 자료는 저감장치의 저감효율 분석은 물 론 유입·유출수문곡선 유도·분석에도 사용되었다. 오염시료 와 저감시료의 시간구간별 BOD, COD, T-N, SS의 저감효율 분석결과는 유량·농도 관계곡선의 유도에 활용되었다.

3. 결과와 분석

강우시간 경과에 대한 오염시료의 강우-유출과 저감장치 통과 후 저감시료의 비점오염원 저감효율 관계분석은 2장에서 기술한 수문특성과 분석방법을 이용해 유입·유출수문곡 선의 유도에 활용하였다. 그리고 현장 성능시험의 결과 분석 은 제1모형을 사용하여 제1차 시험 3회와 제2모형에 의한 제2 ~4차 시험 10회를 합한 총 13회에 대해 이루어졌다.

3.1 유출과 저감효율

Fig. 4는 제2모형에 의한 비점오염원 저감장치의 제4차 성 능시험 결과이다. 이는 강우지속기간에 대한 관측 시간구간 별 유입하는 오염시료와 저감장치를 체류·통과 후 출구점을 유출하는 저감시료의 BOD, COD, T-N, SS에 대한 저감효율 관계곡선이다.

Fig. 4(a)는 제4차-1의 성능시험을 통해 소유역에서 유도 된 유입수문곡선과 비점오염원의 저감효율 성능시험 결과로

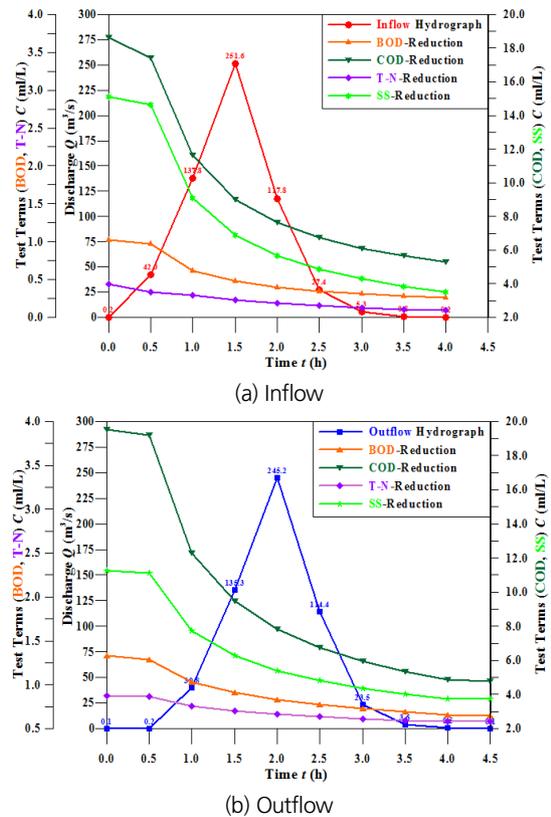


Fig. 4. Concentration curves and hydrographs in duration

BOD 저감효율은 평균 60.6%, COD는 평균 73.6%, T-N은 평 균 29.4%, SS는 평균 74.0%로 나타났다. Fig. 4(b)는 제4차-2 의 성능시험에서 유도된 유출수문곡선과 저감효율 관계곡선 으로 BOD 저감효율은 평균 39.0%, COD는 평균 67.3%, T-N 는 평균 9.5%, SS는 평균 55.2%의 저감효율을 보였다.

본 연구에서 COD와 SS는 오염물질 농도곡선의 첨두점이 수문곡선의 첨두점 보다 앞서 나타나는 형태이고, BOD와 T-N 은 평상시 기저유량의 농도보다 강우 유출 시 낮은 농도 발생 으로 유량 증가와 더불어 농도가 희석되는 형태를 나타냈다.

3.2 성능분석

Fig. 5(a)의 결보기 농도는 2015년 8월 13일 대전시 유성구 덕명동 왕가교에서 시료를 채취하여 제1차-1의 성능시험을 수행하였고, Fig. 5(b)의 결보기 농도는 2015년 10월 5일에 대 전시 유성구 장대동 장명교에서 시료를 채취하여 제2차-1의 성능시험을 수행하였다. Fig. 5(c)의 결보기 농도는 2017년 8 월 8일 대전시 유성구 덕명동 왕가교에서 제3차-2의 성능시 험을 수행하였고, Fig. 5(d)의 결보기 농도는 유입수가 시험장 치를 통과·체류 후의 유출량을 분석하는 제4차-1의 성능시험 을 2018년 6월 25일에 유성구 덕명동 왕가교에서 진행하였으

며, 이는 유입·유출수문곡선을 유도하기 위하여 0~8분의 시험시간을 20분까지 확장하여 성능시험을 진행하였다. 결과 농도는 저감장치를 통과한 시간을 기준으로 원수에서 8분 시료로 갈수록 혼탁의 정도가 확연히 차이가 나는 것을 확인할 수 있는데, 0~1분 사이의 시료가 검게 보이는 것은 여재로 충전되는 활성탄의 세척 정도에 의해 나타나는 현상으로 보인다.

Fig. 6은 현장 성능시험용 제2모형의 저감장치를 이용한 제2차 성능시험 3회의 결과이고, Fig. 7은 제3차 현장 성능시험 5회 중 일부의 시험결과이며, Fig. 8은 제4차 현장 성능시험 2회의 시험결과를 제시한 것이다.

3.3 종합 분석

Fig. 6(a) 제2차-1의 현장 성능시험의 결과에서 시간구간 증가에 따른 BOD의 저감효율은 87.5~38.2%로 평균 58.6%, COD는 76.4~9.8%로 평균 35.8%, T-N은 77.8~16.7%로 평균 45.1%, SS는 94.8~62.0%로 평균 75.2%의 저감효율을 보였다. Fig. 6(b) 제2차-2의 현장 성능시험 결과에서 시간구간 증가에 따른 BOD의 저감효율은 87.8~22.9%로 평균 54.3%, COD는 90.5~18.5%로 평균 57.1%, T-N은 87.5~9.1%로 평균 35.2%, SS는 93.7~21.4%로 평균 49.7%의 저감효율을 보였다. Fig. 6(c)의 제2차-3 현장 성능시험 결과에



Fig. 5. Bulk concentration in field performance test

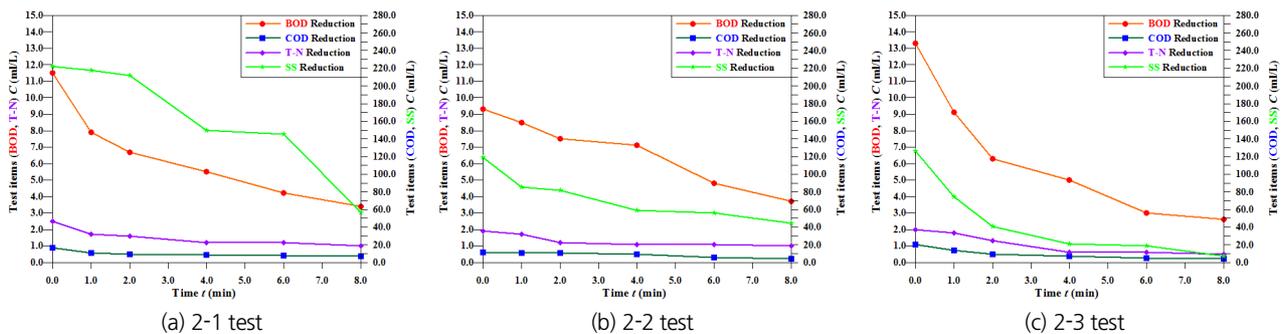


Fig. 6. Field performance tests in the 2nd

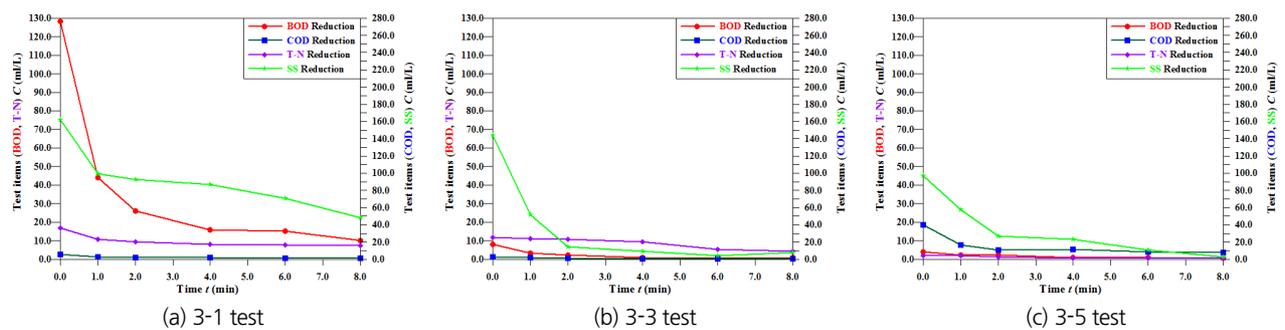


Fig. 7. Field performance tests in the 3rd

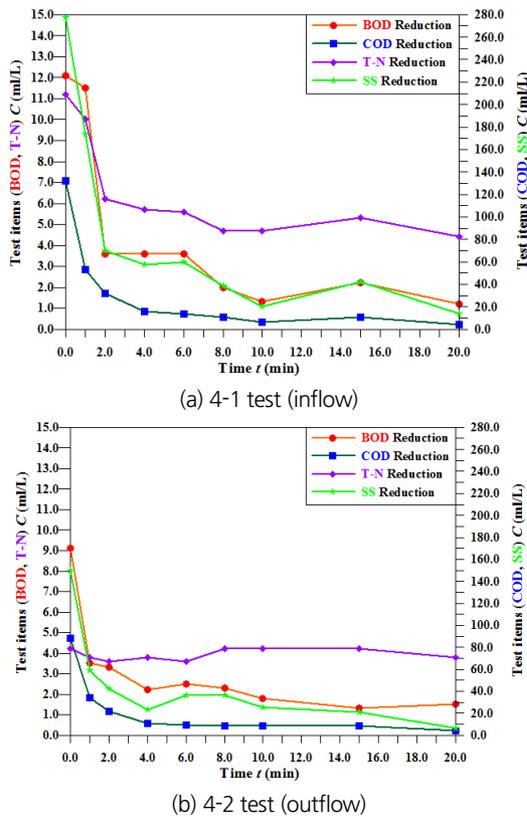


Fig. 8. Field performance tests in the 4th

서 시간구간 증가에 따른 BOD의 저감효율은 90.4~13.3%로 평균 60.4%, COD는 89.5~16.7%로 평균 59.3%, T-N은 91.7~16.7%로 평균 55.6%, SS는 99.1~63.2%로 평균 82.8%를 보였다.

Fig. 7(a)의 제3차-1 성능시험 결과에서 시간구간 증가에 따른 BOD의 저감효율은 96.6~33.3%로 평균 58.0%, COD는 98.7~57.6%로 평균 66.0%, T-N은 93.5~26.7%로 평균 50.7%, SS는 95.9~31.9%로 평균 53.7%의 저감효율을 보였다. 또한 Fig. 7(b)의 제3차-3 성능시험 결과에서 시간구간 증가에 따른 BOD의 저감효율은 97.4~47.0%로 평균 64.9%, COD는 86.0~31.2%로 평균 59.9%, T-N은 84.9~15.8%로 평균 34.6%, SS는 89.5~24.1%로 평균 66.5%를 보였고, Fig. 7(c)의 제3차-5 성능시험 결과에서 시간구간 증가에 따른 BOD의 저감효율은 90.1~35.0%로 평균 60.6%, COD는 97.0~58.2%로 평균 73.6%, T-N은 60.7~16.9%로 평균 29.4%, SS는 95.1~57.0%로 평균 74.0%를 보였다.

Fig. 8(a)의 제4차-1(유입) 성능시험 결과에서 시간구간 증가에 따른 BOD 저감효율은 90.1~35.0%, COD는 97.0~58.2%, T-N은 60.7~16.9%, SS는 95.1~57.0%를 나타냈고, Fig. 8(b)의 제4차-2(유출) 성능시험에서 시간구간 증가에 따른

BOD 저감효율은 83.5~16.30%, COD는 95.7~67.3%, T-N은 9.5~9.5%, SS는 95.9~34.2%의 저감효율을 나타냈다.

이상에서와 같이 제2차-1~3의 현장 성능시험, 제3차-1~5의 현장 성능시험, 제4차-1(유입)~2(유출)의 현장 성능시험 결과를 종합해 보면, 저감효율은 저감장치의 통과 직후인 0~2분 사이에 큰 것으로 나타났고 이후부터 시간 경과에 따라 작아지는 것으로 나타났다. 그러므로 현장 성능시험 결과는 도로나 교량 등에 강우가 발생하여 유출이 시작될 경우, 본 연구에서 개발된 비점오염원 저감장치를 통과 한 직후인 0~2분 사이에 60~80%의 저감효율이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 9는 이들 결과로부터 오염수의 저감장치 통과시간 t 를 함수로 하는 각 시험항목별 평균 저감효율 BOD_{eff} , COD_{eff} , $T-N_{eff}$, SS_{eff} 에 관한 Eqs. (7a)~(7d)의 관계식을 유도하였다.

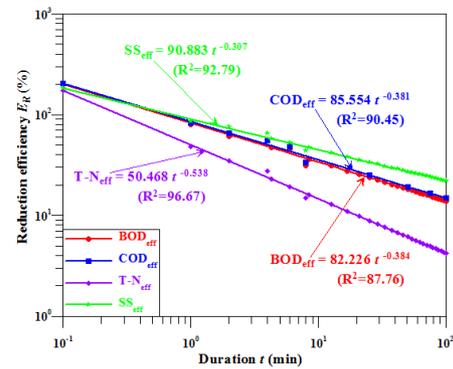


Fig. 9. Regress equations for the facility performance as a function duration time

$$BOD_{eff} = 82.226 t^{-0.384} (R^2=87.76) \quad (7a)$$

$$COD_{eff} = 85.554 t^{-0.381} (R^2=90.45) \quad (7b)$$

$$T-N_{eff} = 50.468 t^{-0.538} (R^2=96.67) \quad (7c)$$

$$SS_{eff} = 90.883 t^{-0.307} (R^2=92.79) \quad (7d)$$

제2차-1~3 성능시험의 평균 저감효율은 BOD의 경우 57.8%를 보였으며 COD 50.7%, T-N 45.3%, SS 69.2%의 저감효율을 보였다. 제3차 현장 성능시험으로 총 5회 실시한 시험 결과의 평균 저감효율은 BOD의 경우 58.8%를 보였으며, COD는 56.5%, T-N은 34.1%, SS는 66.3%를 보였다. 유입·유출 수문곡선의 도출과 병행 실시한 제4차 성능시험의 평균 저감효율은 BOD의 경우 44.0%를 보였으며 COD는 63.3%, T-N은 14.3%, SS는 58.1%를 나타냈다. 이들 제2~4차 성능시험을 종합한 전체 평균 저감효율은 BOD 51.9%, COD 52.9%,

T-N 31.8%, SS 65.3%로 전체적으로 약 31.8~65.3%의 저감 효율을 보이는 것으로 나타났다. 이 결과에서 저감장치의 비점오염원 저감효율은 제2~4차 성능시험 평균 시간구간별 분석에서 저감장치 통과 후 0~2분 사이의 BOD 78.4%, COD 78.1%, T-N 50.4%, SS 85.0%로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발된 저감장치는 National Institute of Environmental Research (2017)에서 제시한 비점오염 저감시설 중 여과형 저감시설로 BOD 50%, T-N 46%이상의 저감효율에 대한 일정 기준을 충족시키므로 실무에 활용할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구는 도시·산업지역의 비교적 넓은 불투수 지역뿐만 아니라 좁은 지역의 도로·교량이 통과되는 하천유역에서 발생하는 비점오염원을 초기우수로부터 저감시킴으로써 하천수질의 오염을 줄일 수 있는 저감장치를 개발·실용화하기 위해 현장 성능시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 개발한 비점오염원 저감장치의 총 현장 성능 시험 자료에 대한 각 시간구간별 평균치 분석결과는 저감장치 통과 후 1분 이내에 BOD 78.4%, COD 78.1%, T-N 50.4%, SS 85.0%로 저감되는 것으로 나타났다. 이는 국립환경과학원에서 제시한 비점오염 저감시설의 여과형 저감효율 부분의 조건을 충족시키는 것으로 실무에 활용할 수 있을 것이다.
- 2) 비점오염원 저감장치의 제2~4차 현장 성능시험에서 저감장치를 통과하는 각 시간 구간별 시험항목 BOD, COD, T-N, SS의 저감효율은 회귀분석을 이용하여 오염수의 저감장치 통과시간을 함수로 하는 Eq. (7)의 관계식을 유도하였다.
- 3) 비점오염원 저감장치의 현장 성능시험용 모형 제작을 위한 선행연구는 여러 조건의 여재 구성안을 갖는 시험용 필터의 저감효율 평가로부터 최적의 여재 구성안을 결정하여 BOD 68.5%, COD 56.4%, T-N 63.5%의 저감효율을 얻었으며, 이 결과를 기초로 하는 여재를 구성하여 현장 성능시험에 활용하였다.

References

Chow, V. T. (1964). *Handbook of applied hydrology*, McGraw-Hill, New York, NY.

- Fiering, M. B., and Jackson, B. R. (1971). "Synthetic streamflows." *Water Resources Monograph*, No.1, American Geophysical Clarion, New York.
- Hewitt, C. N., and Rashed, M. B. (1992). "Removal rates of selected pollutants in the runoff waters from a major rural highway." *Water Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 311-319.
- Hirshman, D. J., and Kosco, J. (2008). *Managing stormwater in your community: A guide for building an effective post-construction program*, Center for Watershed Protection and Tetra Tech, Inc., EPA Publication.
- Jung, C. U. (2010). *Development and of efficiency analysis non-point pollutant reduction devices on paved highway bridge*. Master Thesis, Hanbat National University, pp. 37-41.
- Kang, H. M. (2011). *Applicability analysis of best management practices for freeway stormwater runoff*, Ph. D. dissertation, Hanyang University, pp. 193-196.
- Kang, T. U., and Lee, S. J. (2016). "A simulation method for reduction facilities of natural type for non-point pollution by the SWMM." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 2, pp.123-131.
- Kent, D. B., Douglas, J. S., and Kimberlee K. A. (2000). "Nutrients discharged to the Mississippi River from Eastern Iowa Watersheds, 1996-1997." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 36, No. 1, pp. 161-173.
- Kim, C. G. (2018). *Development of reduction facility NPSP by field performance test*, Ph D. dissertation, Hanbat National University, pp. 79-119.
- Kim, C. G., Park, C. S., Kim, K. T, Lee, H. W., Kim, S. C., and Lee, J. S. (2014). "Small device for reduction of non-point pollution in road bridge." *Proceedings 2014 Congress of The Korea Contents Association*, Korea, pp. 131-132.
- Kirpich, Z. P. (1940), "Time of concentration of small agricultural watersheds." *Civil Engineering*, Vol. 10, No. 6, pp. 362-368.
- Korea Water Resource Association. (2009). *River design criteria and explanation*.
- Lee, J. S. (2015). *Development for middle device of reducing non-point source pollutant in footbridge bridge*, Report of Small and Medium Business Administration (SMBA) in General Project, pp. 1-15.
- Lee, J. S. (2018). *Hydrology*, 3rd ed., CIR Publication, Korea, pp. 414-423.
- Lee, J. S., Kim, C. G., You, E. G., Lee, H. W., and Kim, S. C. (2016). Reducing device of non-point source pollution in footbridge of bridges, *Proceedings 2016 Congress of KCAC*, pp. 411-412.
- Ministry of Environment. (2014). *Water pollution process test standard*.
- Ministry of Environment. (2016). *Manual for non-point sources reduction facility of construction, management and operation*.
- Ministry of Construction and Transportation. (2000). *Report of development and research for water resources management in 1999*, Vol. 1, Plotting of Frequency Rainfall Hyetograph.
- Ministry of Government Legislation (2018). *Water environment conservation Act* (Act No. 14532, Jan. 17, 2017).

- National Institute of Environmental Research. (2017). *Guideline for non-point sources management in total maximum daily loads (TMDL)*.
- Novotny, V., and Olem, H. (1994). *Water quality prevention, identification, and management of diffuse pollution*. Van Nostrand Reinhold, NY, pp. 446-498.
- Sagat, A., Chebbo, G., and Bertrand-Krajewski, J. L. (1996), "The first flush in sewer system." *Water Science and Technology, Journal of the International Association on Water Pollution Research*, Vol. 33, No. 9, pp. 101-108.
- Subramanya, K. (2013). *Engineering hydrology*, 4ed., McGraw Hill Education (India) Private Limited.
- U.S. Army Corps of Engineers (2008a). HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System), *Application Guide (Ver. 3.4)*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- U.S. Army Corps of Engineers (2008b). HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System), *Technical Reference Manual (Ver. 3.4)*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- U.S. Army Corps of Engineers (2008c). HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System), *User's Manual (Ver. 3.4)*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- Yang, S. H., Lee, M. J., Gwon, E. M., and Lee, J. H. (2018). "A study on efficient backwashing of nonpoint pollutant filtration facilities." *J. of the Korean Society of Urban Environment*, Vol. 18, No. 1, pp. 127-139.
- Yun, S. L., Lee, Y. J., Ahn, J. H, Choi, W. S., Lee, J. W., Oh, H. C., and Kim, S. K. (2017). "Evaluation of filtration and backwash efficiency of non-point source pollution reduction facility." *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 39, No. 12, pp. 664-671.