

침투도랑 토양치환의 물순환 및 비점오염물질저감 효과 평가

전민수·최혜선·강희만*·김이형[†]

공주대학교 건설환경공학과
*한국도로공사 도로교통연구원

Assessment of Water and Pollutant Mass Balance by Soil Amendment on Infiltration Trench

Minsu Jeon·Hyeseon Choi·Heeman Kang*·Lee-hyung Kim[†]

Department of Civil Engineering, Kongju National University, Korea

[†]Deputy Research Director, Environment Research Division, Korea Expressway Corporation, Korea

(Received : 01 May 2020, Revised : 21 May 2020, Accepted : 21 May 2020)

요약

고속도로는 많은 자동차 운행대수와 함께 높은 주행속도 및 급격한 주행속도 변화구간(휴게소, 영업소 등)으로 인하여 비점 오염물질의 배출이 높은 지역에 해당한다. 국내 고속도로는 절토층 및 성토층에 조성됨으로써 적정 토양침투량 확보가 어려워 다양한 종류의 비점오염저감시설이 설치되지 못하고 있다. 본 연구는 토양치환 기법에 대한 연구를 통해 고속도로에 설치 가능한 시설의 종류를 확대하고 비용효율적 침투시설의 설계를 유도하기 위하여 수행되었다. 침투율이 낮은 원지반에 토양치환을 수행할 경우 시설 내 체류시간이 약 30% 지연되고, 시설 내 침투 및 저류율은 약 20% 증대하며, 비점오염물질 Total Suspended Solids (TSS), Chemical Oxygen Demand (COD), Biological Oxygen Demand(BOD), Total Nitrogen (TN) 및 Total Phosphorus(TP) 제거효율이 약 20% 증가하는 것으로 나타났다. 원지반 내 침투율이 낮은 곳에 토양치환을 수행할 경우 저류량, 체류시간 및 침투면적이 증가하여 침투율이 향상되는 것으로 나타났다. 원지반 토양의 침투능이 낮은 토양에 침투시설을 적용하기 위해서는 물환경보전법 시행규칙 별표17(비점오염저감시설의 설치기준)의 개선이 필요하며, 이 경우 토양 침투율이 시간당 13 mm 이하일 때 토양치환을 통해 법적 처리용량을 확보하도록 요구할 수 있다.

핵심용어 : 비점오염저감시설, 저영향개발, 침투도랑, 침투율, 토양치환

Abstract

Highways are characterized by high non-point pollutant emissions due to high traffic volumes and sections that cause abrupt change in driving speed (i.e. rest stations, ticketing office, etc.). Most highways in Korea were constructed with layers that do not allow adequate infiltration. Moreover, non-point pollution reduction facilities were not commonly installed on domestic highways. This study was conducted to evaluate a facility treating highway runoff and develop a cost-effective design for infiltration facilities by using soil amendment techniques. Performing soil amendment increased the hydraulic retention time (HRT) and infiltration rate in the facility by approximately 30% and 20%, respectively. The facility's efficiency of removing non-point pollutants (Total Suspended Solids (TSS), Chemical Oxygen Demand(COD), Biological Oxygen Demand(BOD), Total Nitrogen (TN) and Total Phosphorus, (TP) were also increased by 20%. Performing soil amendment on areas with low permeability can increase the infiltration rates by improving the storage volume capacity, HRT, and infiltration area. The application of infiltration facilities on areas with low permeability should comply with the guidelines presented in the Ministry of Environment's Standards for installation of non-point pollution reduction facilities. However, soil amendment may be necessary if the soil infiltration rate is less than 13 mm/hr.

Key words : Infiltration trench, Infiltration rate, Low Impact Development, Nonpoint pollutant treatment facility, Soil amendment

[†] To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil Engineering, Kongju National University, Korea
E-mail: leehyung@kongju.ac.kr

- Minsu Jeon Department of Civil Engineering, Kongju National University, Korea/Ph.D Student/(minsu91@kongju.ac.kr)
- Hyeseon Choi Department of Civil Engineering, Kongju National University, Korea/Dh.D Candidate/(hyeseon27@kongju.ac.kr)
- Heeman Kang Deputy Research Director, Environment Research Division, Korea Expressway Corporation, Korea/Research institute/(kheeman@ex.co.kr)
- Lee-hyung Kim Department of Civil Engineering, Kongju National University, Korea/Professor/(leehyung@kongju.ac.kr)

1. 서 론

2000년대 이후 경제발전과 국민의 삶의 질이 향상되면서 사회인프라에 대한 투자는 급속도로 확대되었다. 사회인프라 중에서 도로는 가장 중요한 기반시설로서 경제와 국민의 삶의 질 향상에 크게 영향을 끼치는 사회인프라에 해당한다. 국토교통부의 자료(MOLIT, 2019)에 의하면, 2018년도 기준으로 전국 도로 연장 총길이는 약 11만km에 해당하며, 그 중에서 약 96만km에 포장이 이루어져 포장률은 약 93.5%에 달한다. 또한 전국 자동차 대수는 2,360만대를 넘어서면서 고속도로를 포함하여 특별광역시도시 및 일부 지방도는 연중 자동차로 넘쳐나면서 유류, 중금속, 입자상물질, 유기물 등 각종 비점오염물질을 유출시키고 있다(Ra et al., 2011, Maniquiz-Redillas et al., 2019). 특히 도로는 차량의 이동 및 건설의 용이성을 위하여 하천을 횡단하거나 하천 종단을 따라 조성되면서 도로 기원 비점오염물질이 지속적으로 하천에 영향을 주고 있다. 도로 중에서 고속도로는 장거리 이동의 수단으로서 시간과 이용의 편리함으로 인하여 요금을 지불하는 도로임에도 불구하고 운전자 가장 선호하는 도로에 해당한다. 이러한 원인으로 고속도로는 지속적으로 건설이 확대되어 전국 모든 도시를 연결하고 있으며, 2018년 기준으로 고속도로 총 연장은 약 4,767km이며 고속국도 이용차량은 연간 약 17억대로 이용량이 매우 높다. 일반적으로 도로포장은 아스팔트나 콘크리트 등으로 건설되고 있으며, 차량 활동으로 인한 타이어, 엔진 및 부품의 마모 등으로 인하여 중금속, 유류, 유기물 등의 오염물질과 함께 다량의 입자상물질이 발생하고 있다(Choi et al., 2013). 그 중에서 고속도로는 높은 자동차의 운행대수와 함께 높은 주행속도뿐만 아니라 차량의 주행속도가 급격하게 변하는 휴게소 및 영업소 등으로 인하여 비점오염물질의 배출이 높은 지역에 해당한다(Lee et al., 2007, Alihan et al., 2018). 고속도로는 많은 차량의 운행으로 인하여 비점오염물질을 집중적으로 유출시키는 주요한 토지이용에 해당하기에 환경부는 물환경보전법 제53조의2에서 상수원 수질보호를 위하여 고속도로를 포함하여 기존 도로에 비점오염저감시설을 설치할 것을 요구하고 있다. 본 법에서 비점오염저감시설을 요구하는 도로는 상수원 보호구역, 상수원보호구역 이외 지역이라도 취수시설의 상하류 일정거리 이내 지역, 특별대책지역 및 4대강 수계법에 근거한 수변구역 이내 지역의 도로는 기존도로라고 할지라도 비점오염저감시설을 의무적으로 설치하여야 한다(Kang et al., 2009). 물환경보전법 제53조에서는 환경영향평가 대상사업으로 분류되는 신규 도로건설 사업은 의무적으로 비점오염저감시설을 설치하여 신고할 것을 명시하고 있다. 이러한 신규 도로건설사업이나 상수원에 영향을 주는 도로사업 이외에도 도로 확장사업의 경우 지자체가 수질오염총량제 개발할당량 확보를 위하여 비점오염저감시설을 삭감시설로 요구하는 경우가 늘어나고 있다. 이와 함께 고속도로

는 선형개천사업 등으로 인하여 터널과 교량이 다량 건설되면서 유출되는 비점오염물질의 관리를 더욱 어렵게 하고 있다. 특히 국내 고속도로는 절성토층으로 조성됨으로써 적정 토양침투량 확보의 어려움과 비점오염저감시설 설치를 위한 적정부지 확보의 어려움 등으로 다양한 종류의 비점오염저감시설 설치되고 있지 않다. 미국 및 독일 등의 선진국에서는 식생수로, 식생여과대, 인공습지, 침투도랑 등의 자연기반해법(Nature-based Solution, NBS)에 근거한 다양한 저영향개발기법(Low Impact Development, LID)이 적용되고 있으나 국내에서는 부지확보의 어려움과 적정 침투량 확보의 제한으로 장치형시설(여과형), 침투도랑, 식생수로가 주를 이루고 있으며, 인터체인지 내부에 생태습지 조성이 일부 이루어지고 있는 실정이다(Choi et al., 2019a; Hong et al., 2017; Jeon et al., 2018; MOE, 2013; Jeon et al., 2019). 국내 고속도로에 적용된 비점오염저감시설은 앞서 언급한 다양한 법적 근거로 조성되어 있으나 시설의 평가를 위한 모니터링 및 유지관리에 대한 법적 근거가 미약하여 유지관리가 미흡한 실정이다. 특히 법에서 모니터링과 유지관리 실적을 요구하지 않는 시설의 경우 시설설치 위치 문제와 함께 유지관리가 미흡하여 효율이 나타나지 않는 경우가 발생하고 있다. 따라서 본 연구는 고속도로에 설치된 다양한 시설 중에서 침투시설의 기능향상을 위한 방안을 마련하고자 수행되었다. 특히 국내 고속도로 비점오염저감시설 설계시 가장 문제가 되는 하부 토양침투능(13 mm/hr)이 확보되지 못할 경우 대응방안으로 토양치환기법 적용을 통해 법적 요구용량 확보를 통한 효율향상 가능성을 제시하고자 한다. 본 연구에서 적정 저류용량 확보를 위한 토양치환은 이미 선진국의 비점오염저감시설 설계시에는 중요하게 고려되고 있으나 국내 설계매뉴얼에서는 연구의 부족으로 인한 설계의 경직성으로 도입되어 있지 않다. 따라서 본 연구의 결과는 국내 비점오염저감시설 설계매뉴얼의 적정 저류용량 확보방안으로 고려될 수 있을 것이다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지역

본 연구를 위한 연구대상시설은 침투시설로 경부고속도로 복천안 I.C 인근에 설계된 모래여과시설이다. 본 시설은 고속도로 및 영업소에서 발생하는 입자상 물질, 유기물질 및 중금속 등의 비점오염물질을 침투와 여과 기작을 통하여 처리하고 있다. 그러나 시설의 노후화와 장기간의 방치로 인하여 시설 상단 내 여재의 막힘현상(clogging) 및 원지반의 낮은 침투율로 인하여 시설의 기능이 크게 상실되어 있다. 따라서 본 연구는 기존 설계와 개선된 시설의 비교분석을 위하여 및 비점오염물질 저감효율 향상을 위한 대안 제시를 위하여 수행되었다. 적정 저류량 확보 및 시설 효율 향상은 토양치환을 통한 저류량 확보를 통해 가능하며, 기존 설계와 개선된 시설의 비교분석을 위하여 Fig. 1

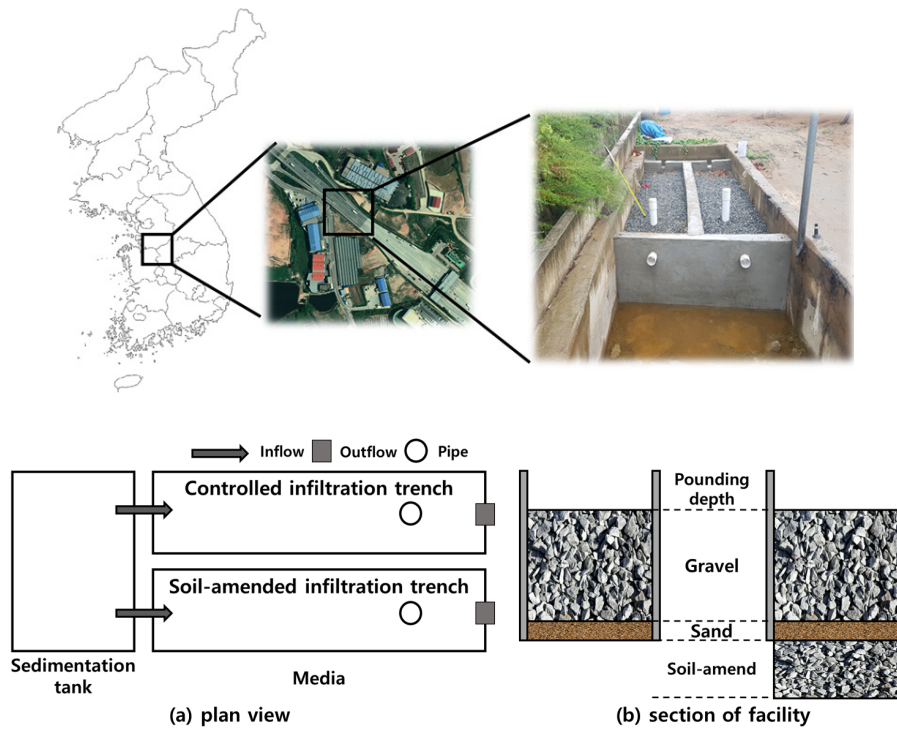


Fig. 1. Site location and schematic diagram of the infiltration facility

과 같이 두 개의 침투시설(기존 침투도랑과 토양치환 침투도랑)로 시설을 개선하여 실험이 수행되었다.

2.2 연구대상 시설 제원

침투도랑은 침강지(sedimentation tank)와 여재부(media tank)로 구성되어 있으며, 침강지와 여재부의 규모는 Table 1과 같다. 기존 침투도랑과 토양치환 침투도랑과의 성능비교는 유입수의 성상과 유량이 동일한 조건에서 수행되어야 하기에 침강지(전처리시설)에서 두 시설로 동시에 유입되는 구조로 조성하였다.

여재부의 여재는 하부에서부터 모래, 자갈 순으로 여재를 충전하였으며, 토양 유실 및 혼합을 방지하기 위해 여재층마다 토목필터섬유(Geotextile filter)를 적용하였다. 기존 침투도랑과 토양치환 침투도랑의 모니터링을 위하여 여재부 길이의 2/3 지점에 직경 10 cm의 유공관을 설치하여 수위변화를 측정할 수 있는 관측정을 설치하였다. 침투도랑

하부토양의 현장 침투율은 0.0009 mm/hr로 환경부 비점오염저감시설 매뉴얼(2018)에서 제시하는 침투시설의 13 mm/hr 보다 낮게 나타나 침투시설 설치위치로는 부적합한 곳으로 나타났다. 그러나 본 지역에 기존 침투시설이 설치되어 있기에 지속적 침투시설 유지를 위해서는 토양치환을 통해 충분한 저류용량 확보방안이 필요하다. 미국 및 유럽에서는 하부토양이 충분한 침투능을 가지지 못하더라도 토양치환 기법을 통해 침투시설 설치를 허용하고 있다. 따라서 본 침투도랑 설치 지역에서 법적 요구 처리용량에 부합하는 충분한 저류공간 확보를 위한 적정 토양치환 깊이를 산정하였다. 미국 USDA(US Department of Agriculture)에서 사용하는 식(1)을 이용하여 최대 토양치환 깊이를 산정한 결과 1.95m로 나타났다(USDA, 1999, Gurung, 2018, Minnesota, 2019). 미국 USDA에서 제시하는 토양치환 깊이는 지표면에서부터 침투도랑 바닥까지의 깊이를 의미한다. 그러나 시설의 지속적 운영으로 인한 막힘현상과 강한

Table 1. Catchment area and facility characteristics

Classification		Controlled infiltration trench	Soil amended infiltration trench
Catchment area (m ²)		2,300	
Sedimentation tank	Depth (m)	0.9	
	Width (m)	2.2	
	Length (m)	0.9	
Media	Depth (m)	0.95	0.95
	Width (m)	1	1
	Length (m)	4.5	4.5
	Ponding depth (m)	0.35	0.35
Soil amendment depth (m)		-	1

강우강도로 예상되는 큰 유입유량 발생 가능성을 고려하여 추가로 약 30 cm의 깊이를 저류공간으로 시설 용량 설계에 반영하였다.

$$D_{b(max)} = 1.5 \times D_f \quad \text{Eq. (1)}$$

여기서, $D_{b(max)}$ = Maximum depth of boreholes(m), D_f = Depth of foundation(m)

2.3 연구시설 모니터링 및 분석방법

토양치환에 따른 침투율 효율 평가를 위해 기존 침투도랑의 시설과 토양치환을 수행한 침투도랑 시설의 모니터링을 수행하였다. 모니터링은 법적 설계용량인 5 mm 이상의 강우사상에 대해 수행하였으며, 유량 측정 및 수질 채수는 유입 및 유출부에서 수행하였다(Choe et al., 2015). 유입수는 대조군과 실험군에서의 유입부에서 측정 및 채수하였으며, 유출부는 대조군 및 실험군 상단에 조성되어 있는 유출부를 통해 측정 및 수질 채수를 수행하였다. 유량측정 및 수질시료 채수는 다음 Table 2와 같이 수행하였다. 수질 분석은 수질오염공정시험법에 따라 입자상물질(Total suspended solids, TSS), 유기물질(Biochemical oxygen demand, BOD), 총질소(Total Nitrogen, TN), 총인(Total Phosphorus, TP) 및 중금속(Heavy metal)을 분석하였다(APHA et al. 1992). 또한 토양치환에 따른 침투율 효율 평가를 위해 시설저류 발생 및 소산될 때까지 관측정을 통해 매 5분마다 측정하였다. 토양치환 효과 평가는 두 시설의 농도와 부하량 비교, 저감효율 및 물수지 비교를 통하여 수행되었다. 그 중에서 물순환이 고려되는 시

설의 처리효율 산정은 저류용량에 크게 영향을 받기에 모니터링으로 획득한 유량 및 농도 자료를 이용하여 산정한 EMC 값을 부하량으로 변환하여 산정하였다(Choi et al., 2019b; Jeon et al., 2018).

3. 결과 및 고찰

3.1 물수지분석

토양치환이 수행되지 않은 기존시설과 토양치환이 수행된 시설의 침투율 및 저류율 비교를 위하여 강우시 모니터링을 수행하였다(Table 3). 두 시설 비교분석을 위한 강우자료, 유입 및 유출수에 대한 수질과 유량 자료는 2018년에 수행된 총 5회의 모니터링 결과를 이용하였으며, 시설의 침투 및 저류능력을 평가하기 위해 물수지 분석을 수행하였다(Fig. 2). 기존 침투도랑과 토양치환 침투도랑으로 유입되는 강우사상의 강우량 범위는 3.4~81.3 mm(평균 28.0 mm), 강우지속시간은 1.6~33.2 hr(평균 13.6 hr), 강우강도는 1.35~3.22 mm/hr(평균 2.16 mm/hr), 선행무강우일수(antecedent dry days, ADD)는 3~9 days(평균 5days)로 나타났다. 침투도랑의 유출지연 효과는 강우시 체류시간(hydraulic retention time, HRT)으로 평가할 수 있으며, 홍수지연 효과는 침투유출량의 감소로 평가할 수 있다. 토양치환 침투도랑의 수리학적 체류시간은 0.68~13.75 hr(평균 7.28 hr)으로 기존 침투도랑의 수리학적 체류시간(0.2~10.13 hr, 평균 4.65 hr)에 비해 평균 약 3시간 정도 유출지연 효과가 향상되는 것으로 나타났다. 이와 같이 기존 침투도랑도 강우시 유출지연 효과가 높게 나타나지만 토양치환을 적용할 경우 유출지연효과가 크게 향상되기에

Table 2. Monitoring method and analyses procedure

Rainfall	>5 mm
Monitoring and sampling points	Inflow and outflow ports
ADD	>3 days
Flow measurement interval	5 min
Water level measurement	Measured at 5-minute intervals until the water is fully infiltrated
Water sampling interval	0, 5, 10, 15, 30, 60-minute interval for the first hour. Succeeding samples were collected at an hourly interval
Water quality parameter	Total suspended solids (TSS), Biochemical oxygen demand (BOD), Nutrients (TN, TP), Heavy metals

Table 3. Event table for monitored event

Event	Rain fall (mm)	Average rainfall intensity (mm/hr)	Rainfall duration (hr)	ADD (days)	Peak flow for outflow (m ³ /sec)			HRT (hr)		
					Control (A)	Amended (B)	(A)-(B) (m ³ /sec)	Control (C)	Amended (D)	(D)-(C) (hr)
E1	7.0	1.35	3.4	3	0.011	0.004	0.007	0.20	0.68	0.48
E2	3.4	2.40	5.2	7	0.001	No outflow	0.001	2.50	No outflow	-
E3	30.3	3.22	1.6	3	0.018	0.009	0.009	2.10	3.10	1.00
E4	81.3	2.45	24.5	4	0.002	0.001	0.001	8.33	13.25	4.92
E5	18.2	1.42	33.2	9	0.002	0.001	0.001	10.13	13.75	3.62
Average	28.0	2.16	13.6	5	0.007	0.004	0.003	4.65	7.28	2.63

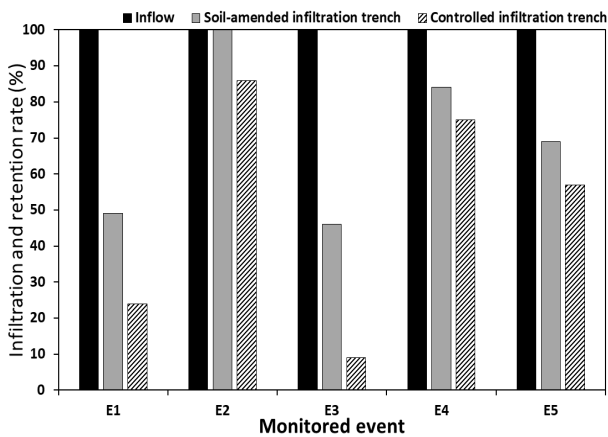


Fig. 2. Changes of water retention and infiltration

향후 침투도랑 설계시 토양치환이 중요하게 고려되어야 한다. 토양치환이 유출지연 효과와 함께 침투유출 저감에도 크게 기여하는 것으로 나타났다. 기존 침투도랑의 침투유량이 0.001~0.018 m³/sec(평균 0.007 m³/sec)로 산정되었으나, 토양치환 침투도랑의 침투유량은 0.001~0.009 m³/sec(평균 0.004 m³/sec)로 크게 감소하는 것으로 나타났다. 기존 침투도랑 여재부 용량 대비 토양치환 침투도랑 용량은 55%(상부 담수심은 산정에서 제외함) 늘어났으나, 모니터

링 물수지 분석결과 토양치환 침투도랑의 저류용량은 기존 발생 강우로 인한 저류량으로 인하여 평균 20% 정도 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 연구결과로 볼 때 토양치환은 침투도랑에 충분한 저류공간을 제공함으로써 침투도랑 설계기준에서 요구하는 최소한의 저류공간 확보가 가능한 것으로 나타났다. 특히 하부토양 침투율(13 mm/hr)을 만족하지 않는 토양이라도 토양치환을 통해 충분한 저류공간을 확보한다면 줄어드는 침투량을 저류량으로 충분히 대체 가능하기에 이러한 토양에도 침투도랑 시설의 적용이 가능할 것으로 평가된다.

3.2 침투도랑의 오염물질 저감효율

토양치환은 충분한 저류공간을 제공함으로써 유입된 비점오염물질의 유출저감에 크게 기여한다. Fig. 3은 침강지 유입수와 기존 침투도랑 및 토양치환 침투도랑 유출수의 평균 EMCs를 보여주고 있다. 모니터링을 통해 산정된 침강지 유입수 EMCs는 TSS 35.3 mg/L, BOD 9.73 mg/L, COD 50.4 mg/L, TN 2.94 mg/L 및 TP 0.41 mg/L로 나타났다. 토양치환 침투도랑 유출수의 TSS 농도는 59.9 mg/L으로 기존 침투도랑의 TSS 농도 87.1 mg/L에 비해 약 33% 낮은 것으로 나타났다. 그러나 영양염류 물질인 TN, TP의 농도는 두 시설 모두 유사한 농도를 나타내었다.

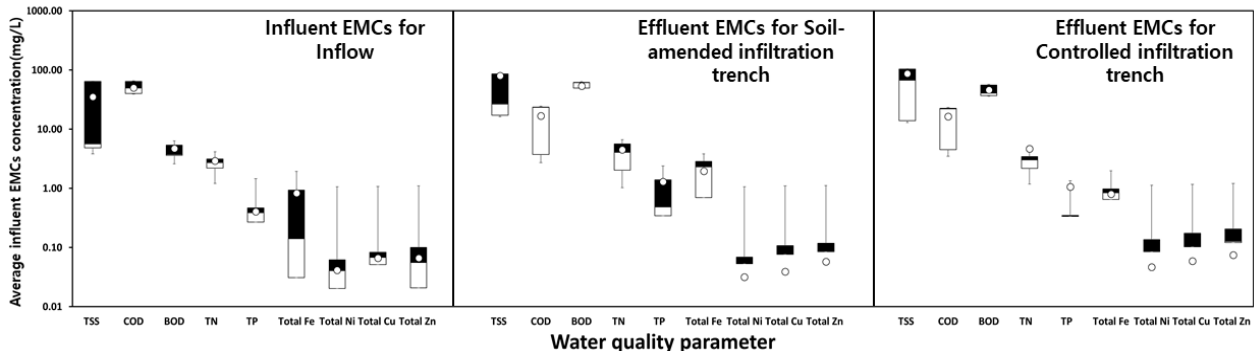


Fig. 3. Statistics of influent and effluent pollutant EMCs

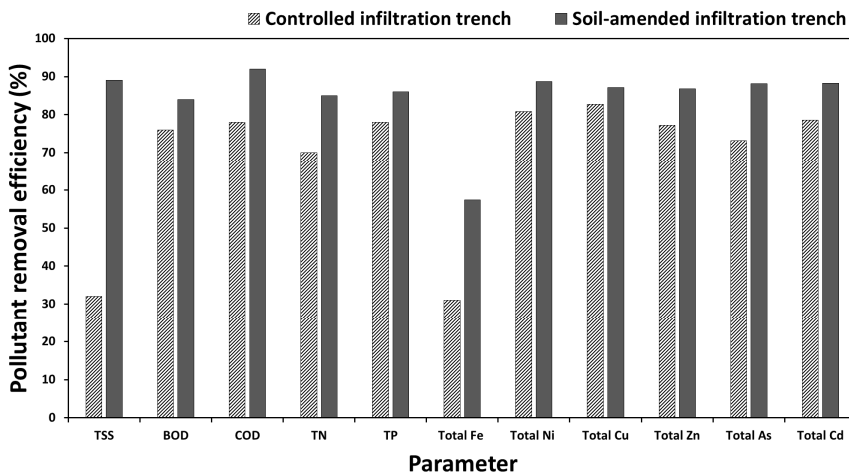


Fig. 4. Analysis of pollutant removal efficiency

TSS를 제외한 타 오염물질 항목에서 두 시설이 유사한 농도를 나타내는 이유는 시설에 적용된 여재가 모래와 자갈 층이기 때문에 저류로 인한 오염물질 저감능력이 주요 기작이기 때문이다(Jeon, 2018; Lee, 2010). 침강지 유입 농도 대비 두 개의 침투도랑 유출수의 농도가 높게 나타났는데 그 이유는 침강지의 규모가 매우 커 많은 입자상물질이 제거된 이후 침투도랑으로 유입되면서 침투도랑 내부에 축적되어 있던 기존 입자상 물질 및 침투도랑 상부에 축적되어 있던 토사, 나뭇잎, 퇴적물 등의 물질을 배출시켰기 때문이다(Geronimo et al., 2019). 본 연구는 토양치환을 통한 저류공간 확보와 저류량 확대에 의한 오염물질 저감을 주요 목적으로 연구를 수행하면서 모래(15%)와 자갈(85%)을 활용하였기 때문에 침강지 유입수에 비해 침투도랑 유출수의 농도가 높게 나타났다. 그러나 향후 침투도랑 설계 시 모래의 비율을 높이거나 다공성 여재를 사용할 경우에는 오염물질 유출 농도가 크게 감소할 것으로 평가된다. 유량이 거의 일정한 상태를 보이는 점오염원과 달리 강우에 의해 유출량이 크게 변하는 비점오염물질의 저감효율은 부하량으로 산정된다. Fig. 4는 기존 침투도랑과 토양치환 침투도랑의 오염물질 저감효율을 비교한 것이다. 유입수에 비해 두 개의 침투도랑에서 배출되는 오염물질의 농도가 다소 높게 나왔음에도 불구하고 부하량으로 산정한 오염물질의 저감효율은 높게 나타났다. 토양치환이 수행된 침투도랑에서 입자상 물질, 유기물질, 영양염류 및 중금속 전 항목에서 기존 침투도랑에 비해 제거효율이 증가하는 것으로 나타나 토양치환이 비점오염물질 저감에 기여하는 것으로

평가되었다. 특히 토양치환 침투도랑은 충분한 저류공간 확보로 늘어난 저류용량에 기인하여 TSS 저감효율은 87%로 기존 침투도랑의 TSS 저감효율 32%에 비해 약 50% 이상 크게 향상되었다.

3.3 침투도랑의 침투율변화

원지반의 토양치환으로 인한 침투율 변화량은 시설 내 조성된 지하수 관측공 내부 수위변화를 측정하여 산정하였다. Fig. 5는 시간에 따른 침투율 변화를 나타낸 것으로 강우 종료 후 침투율이 일정해질 때까지 측정된 값을 이용하였다. 침투도랑 내부 지하수 관측공에서 관측된 저류수 발생 시간을 산정한 결과 토양치환 침투도랑 내 저류수 발생은 침투도랑 유입 후 평균 42 ± 20 min에 발생하여 기존침투도랑의 평균 15 ± 10 min 보다 평균 약 27 min 증가한 것으로 나타났다. 토양치환이 시설하부에 충분한 저류공간을 제공함으로써 원지반으로 침투가능한 시간을 증가시켜 강우강도가 낮은 강우사상에 대해서는 물순환 효과가 크게 증가하였다는 것을 의미한다. 토양치환 한 침투도랑 시설 내 저류수가 완전 소산되는데 소요된 시간은 평균 70 ± 28 hr로 기존침투도랑의 129 ± 38 hr 보다 약 59 hr 감소하는 것으로 나타나 비점오염저감시설의 저류수 배제기준에 적절한 것으로 평가되었다. 향후 토양치환을 침투시설에 적용할 경우 저류용량 뿐만 아니라 침투 가능한 면적을 증가시킬 경우 소산시간이 크게 단축되고 침투율이 크게 향상되면서 물순환 및 수질오염물질 저감능력 향상에 크게 기여할 것으로 평가된다.

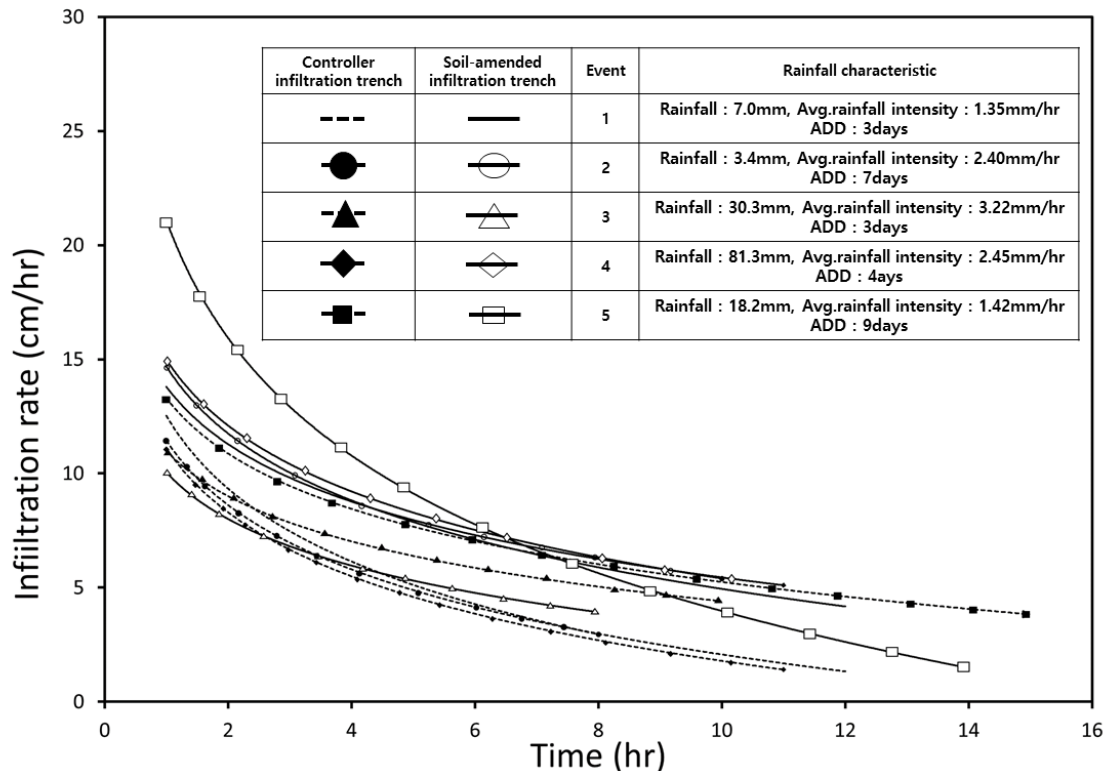


Fig. 5. Changes in infiltration rate over time

3.4 원지반 침투율이 낮은 지역의 침투도랑 설계기법 개선제안

고속도로를 포함하는 많은 도로와 도시는 하천과 농지에 인접하거나 성토층에 위치하기에 원지반 토양의 침투능에 비해 실질적 침투능은 매우 낮은 편이다. 일반적으로 낮은 침투능을 가진 지역에는 침투시설 설치를 배제할 것으로 권고하고 있으나 이 경우 적용 가능한 시설의 제한으로 적정 물순환 기능이 결핍된 개발을 어렵게 한다. 비점오염저감시설 또는 물순환시설은 침투시설, 식생시설, 여과시설 등으로 분류되나 자연기반해법으로 분류되는 식생시설도 침투기능을 중요시 하기에 적정 침투능 미확보시 시설배제는 자연기반시설의 설치를 어렵게 한다. 본 연구는 시설하부 침투율이 13 mm/hr를 만족하지 못할 경우 침투시설을 배제하라는 비점오염저감시설 설치 매뉴얼이 현재 적용 가능한 적정기술로 극복가능하다는 것을 보여주기 위하여 수행되었다. 토양치환은 적정 침투능을 가지지 못한 토양에 적합한 기법으로 선진국에서는 다양하게 이용되고 있다. 그러나 우리나라는 경직된 기준으로 인하여 다양한 시설 설치를 어렵게 하고 있으며 제한된 기술의 적용이 늘어나고 있는 실정이다. 침투율이 낮은 원지반에 토양치환(저류공간 약 55% 증가)을 수행할 경우 시설 내 체류시간 약 36% 지연, 침투유출량 약 40% 감소, 시설 내 침투 및 저류율 약 20% 증대, TSS, COD, BOD, TN 및 TP의 오염물질 제거 효율이 약 24% 증가되는 것으로 분석되었다(모니터링 강우사상은 강우량 7.0~81.3 mm, 강우지속시간은 1.6~33.2 hr, 강우강도는 1.35~3.22 mm/hr, ADD 3~9 days). 이는 침투율이 낮은 원지반의 토양치환을 통해 시설 내 저류공간 및 침투면적을 증대시켜 물순환 및 오염물질 저감 효율을 크게 개선시킨다는 것을 의미한다. 우리나라의 비점오염저감시설 및 물순환시설은 『물환경보전법 시행규칙 별표17』의 비점오염저감시설의 설치기준과 비점오염저감시설 설치 및 관리운영 매뉴얼(환경부, 2018)에 근거하여 설계된다. 『물환경 보전법 시행규칙 별표 17』의 침투시설 설치기준에서는 '침투시설 하층 토양의 침투율은 시간당 13밀리미터 이상이어야 하며, 동절기에 동결로 기능이 저하되지 아니하는 지역에 설치된다'로 명시되어 있다. 하지만 자동차전용도로, 산업도로 및 고속도로는 대부분 산지, 평야 및 수변 근처에 조성되어 있어 하부 침투율이 설계기준보다 낮아 적절한 시설이 조성되지 못하고 있다. 유럽 및 미국 등의 선진국에서는 하부 토양치환을 통해 충분한 저류공간 확보시 침투시설을 적용할 것을 허용하고 있으며, 본 연구를 통해 토양치환이 물순환 및 비점오염물질 저감에 크게 기여하는 것으로 나타났기에 물환경보전법 시행규칙 별표 17의 개선이 필요하다. 따라서 물환경보전법 시행규칙 별표17(비점오염저감시설의 설치기준)의 침투시설의 현 기준을 '침투시설 하층 토양의 침투율은 시간당 13밀리미터 이상이어야 하며, 동절기에 동결로 기능이 저하되지 아니하는 지역에 설치한다. 단, 침투율이 시간당 13 mm 이

하가 나오는 경우 토양치환을 통해 누적유출고 5 mm 이상을 충분히 저류할 수 있는 저류공간 확보시 설치 가능하다'로 개선함이 타당하다.

4. 결 론

본 연구는 비점오염저감시설의 침투형시설 설치기준 중 원지반의 침투율을 만족하기 위한 설계기법으로 토양치환을 통한 침투율 개선방안을 제안하기 위해 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 토양치환은 침투도랑에 충분한 저류공간을 제공함으로써 침투도랑 설계기준에서 요구하는 최소한의 저류공간 확보가 가능한 것으로 나타났다. 특히 하부토양 침투율(13 mm/hr)을 만족하지 않는 토양이라도 토양치환을 통해 충분한 저류공간을 확보한다면 줄어드는 침투량을 저류량으로 충분히 대체 가능하여 침투도랑 시설의 적용이 가능할 것으로 평가되었다.
- 2) 토양치환은 시설 내부에 충분한 저류공간을 제공하여 모래와 자갈을 여재로 활용하였음에도 불구하고 유입 비점오염물질 저감효율이 높게 나타났다. 침투도랑 및 침투시설 설계시 모래, 자갈 뿐만 아니라 다공성 여재를 사용할 경우 오염물질 저감에 크게 기여할 것으로 평가되었다.
- 3) 침투시설에 토양치환을 적용할 시 충분한 저류용량 확보뿐만 아니라 침투 가능한 면적을 증가시킬 경우 소산시간이 크게 단축되고 침투율이 크게 향상되어 물순환 및 수질오염물질 저감효율에 기여하는 것으로 나타났다. 즉, 충분한 저류공간 확보와 함께 가용 침투면적을 설계시 고려하여야 한다는 것을 의미한다.
- 4) 원지반 토양의 침투능이 낮은 토양에 침투시설을 적용하기 위해서는 물환경보전법 시행규칙 별표17(비점오염저감시설의 설치기준)의 개선이 필요하며, 이 경우 토양 침투율이 시간당 13 mm 이하일 때 토양치환을 통해 법적 처리용량을 확보하도록 요구할 수 있다.

감사의 글

This project was funded by the Korea Expressway Corporation. The authors are grateful for their support.

References

- Alihan, J, Flores, P.E, Geronimo, F.K., Kim, L.H. (2018). *Evaluation of a small HSSF constructed wetland in treating parking lot stormwater runoff using SWMM, Desalination and Water Treatment*, 101, pp.123-129.
- APHA, 1990. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. American Public Health

- Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington DC. *Stand. Methods*. <https://doi.org/ISBN9780875532356>
- Choi H.S, Geronimo F,K, Hong J,S, Kim, L,H. (2019a) *Assessment of the influence of urban stormwater runoff on the growth of Spiraea prunifolia var. simpliciflora. Desalination and Water Treatment*, 158,(2019) pp.225-232
- Choi H,S, Hong J,S, Jeon M,S, Geronimo F,K, Kim, L,H. (2019b) *Assessment of Water Circulation and Hydro-characteristics with LID techniques in urbanized areas, J. of Wetlands Research*, 21(3), pp. 191-198 [Korean literature] [Korean Literature]
- Choe B.Y, Jo D,J, Lee J,H, Kim S,D. (2015) *Design of Water Quality Capture Volume for Infiltration Trench. J. Korean Soc. Hazard Mitig.* 15(4), pp.317-323 [Korean Literature]
- Choi J,Y, Kim S,S, Lee S,Y, Nam G,S, Cho H,J, Kim L,H. (2013) *Development Hybrid Filter System for Applicable on Various Rainfall, Journal of Wetlands Research*, 15(4), pp.535-541 [Korean Literature]
- Geronimo F.K,F, Maniquiz-Redilla M.C, Hong J,S, Kim L,H, (2019) *Nutrient concentration in sediments accumulated in pre-treatment basins of urban LID technologies. WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY*. 79(5) pp.1000-1006
- Gurung S.B. (2018) *Assessment of mechanism and formulation of design criteria for LID system treating urban stormwater runoff, (Master's thesis), Kongju National University* [Korean Literature]
- Hong J,S, Kim L,H, (2014) *Assessment of Performances of Low Impact Development (LID) Facilities with Vegetation, Ecology and Resilient Infrastructure*, 3(2), pp.100-109 [Korean Literature]
- Jeon M.S. (2018) *Evaluation on the applicability and performance of natural media(Cockle shell, Walnut shell and Ginkgo shell) for LID technologies, (Master's thesis), Kongju National University* [Korean Literature]
- Jeon M,S, Hong J,S, Geronimo F,K, Choi H,S, Kim L,H. (2019) *Assessment of cockle shells, walnut shells, and ginkgo shells as filter media for low impact development technologies. Desalination and Water Treatment*, 158(2019), pp.11-19
- Jeon, J.C, Jung, J., Kim, Y., and Kim, L,H (2018). *A Review of Research Trend Related to NPS and Suggestion for Research Direction in the Future, J. of Wetlands Research*, 20(1), pp.80-93. [Korean literature]
- Kang H,M, Kim N,Y, Kang H,J, (2009) *고속도로 비점오염물질 저감을 위한 여과형 시설의 현장 적용성 평가, Geoenvironmental Engineering*, 10(1), pp.7-15 [Korean Literature]
- Lee H.Y. (2010). *Biosorption of Heavy Metals from Wastewater(Master's thesis), Kangwon University graduate school.* [Korean Literature]
- Lee E,J, Son H,G, Kang H,M, Kim L,H, (2007) *Characteristics of Non-point Pollutant from Highway Toll Gate Landuse, International Journal of Highway Engineering*, 9(4) pp.185-192 [Korean Literature]
- Minnesota Pollution Control Agency. (2019, September 09). *Minnesota Stormwater Manual. Retrieved April 28, 2020, from Minnesota Stormwater Manual: https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Guidance_for_amending_soils_with_rapid_or_high_infiltration_rates*
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, (2019), http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1207
- Ministry of Environment (MOE). (2013). *Guideline of low impact development technique element.* [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2018). *Manual of installation and management of nonpoint pollutant treatment facility.* [Korean Literature]
- Maniquiz-Redilla M.C, Geronimo F.K,F, Kim L,H, (2019) *Analysis on the fractionation of heavy metals in a tree box filter treating urban runoff. Desalination and Water Treatment* 158 pp.114-120
- Ra K.T., Kim K.T., Kim J.K., Bang J.H., Lee J.M., Kim S.K., Kim E.S., Yun M.S., Cho S.R. (2011) *Study on the Characteristics and Non-point Source Pollution Loads in Stormwater Runoff of Shihwa Lake. Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 14(1) pp.40-50 [Korean Literature]
- USDA, (1999) *Infiltration Through Disturbed Urban Soils and Compost- Amended Soil Effects on Runoff Quality and Quantity*