

침투 및 저류 기능을 가진 물 순환 시설의 효과 평가

Performance Evaluation of Water Circulation Facilities with Infiltration and Retention Functions

홍정선¹ · 말라¹ · 김이호² · 이선하¹ · 김이형^{1*}

¹공주대학교 건설환경공학부, ²한국건설기술연구원

Jung Sun Hong¹, Marla C. Maniquiz-Redillas¹, Ree Ho Kim², Seon Ha Lee¹ and Lee-Hyung Kim^{1*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea

²Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

Received 1 December 2015, revised 4 December 2015, accepted 20 December 2015, published online 31 December 2015

ABSTRACT: In 2014, the city of Seoul revised the ordinance regarding water-cycle restoration in the Seoul Metropolitan areas by incorporating the 'Low Impact Development (LID)' policy. The new ordinance plan will utilize 630 mm or almost 45 to 50% of annual rainfall until 2050 by means of providing a rainwater management system consisting of infiltration, retention and vegetation. The LID is believed to be the key to achieving the target requirements, specifically in development projects. This research was performed to evaluate the stormwater runoff and pollutant reduction performance of three different LID facilities (water circulation facilities) including an infiltration inlet, bioretention swale, and permeable pavement constructed in Seoul City. Results show that among the water circulation facilities, the permeable pavement achieved the highest runoff reduction as it was able to entirely capture and infiltrate the runoff to the ground. However, in order to attain a long-term performance it is necessary to manage the accumulated sediment and trapped pollutants in the landscape areas through other water circulation techniques such as through soil erosion control. In terms of pollutant reduction capability, the infiltration inlet performed well since it was applied in highly polluted areas. The bioretention facility integrating the physico-chemical and biological mechanisms of soil, microorganisms and plants were able to also achieve a high runoff and pollutant reduction. The water circulation facilities provided not only benefits for water circulation but also various other benefits such as pollutant reduction, ecological restoration, and aesthetic functions.

KEYWORDS: Low Impact Development (LID), Nonpoint source pollution, Rainfall, Runoff reduction, Water circulation

요 약: 서울시는 2014년 기존의 서울시 물순환 조례에 저영향개발 (low impact development, LID)을 포함하는 조례개정을 통해 빗물관리의 토대를 마련하였다. 새롭게 개정된 조례에서는 2050년까지 연 강수량의 약 630 mm를 저류 및 침투시킬 것을 계획하고 있으며, 침투, 저류 및 식생을 활용하는 빗물관리시스템을 도입하여 관리하고자 한다. 저영향개발기법은 개발사업에서 생태, 물순환, 환경 등의 목표를 달성하고자 할 때 적용할 수 있는 중요한 기법이다. 본 연구에서는 서울시에 적합한 침투형 빗물받이, 생태저류형 배수로 및 투수성 포장 등의 다양한 물순환 시설 (LID)의 효과를 평가하기 위하여 수행되었다. 모니터링 결과 다른 시설에 비하여 투수성 포장에서 강우유출 저감효과가 가장 높게 나타났으나, 공극막힘현상을 줄이기 위한 방안이 설계에 반영되어야 하는 것으로 나타났다. 비점오염물질 유출저감의 경우 자동차 운행정도에 의한 오염물질 축적이 큰 영향을 끼친 침투형 빗물받이, 물리 및 생물학적 기작의 영향을 받은 생태저류형 배수로에서 높게 분석되었다. 다양한 목적으로의 저영향개발 기법 적용은 물순환 효과뿐만 아니라 환경오염저감, 생태복원, 심미적 효과 등의 다양한 효과를 보이는 것으로 나타났다.

핵심어: 저영향개발 (LID), 비점오염원, 빗물, 유출저감, 물순환

*Corresponding author: leehyung@kongju.ac.kr

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

인구의 집중과 산업화는 세계적으로 도시화를 확대시키고 있다. UN 경제사회국의 ‘세계 인구 예상 2014년도 개정 보고서’에 따르면 2014년 현재 세계 인구의 약 50%가 도시지역에 살고 있으며, 2050년까지는 약 70%가 도시지역에 살 것으로 예상하고 있다 (UN DESA 2014). 이 보고서에서는 아시아와 아프리카의 도시화 비율을 2014년 기준으로 약 40-48% 수준으로 보고하고 있다. 하지만 아시아 지역의 경우 2020년까지 약 50%가 될 것으로 예측하고 있으며, 유럽이나 미국과는 달리 거대도시화 되고 있는 것이 특징이라고 보고하고 있다. 거대도시는 다양한 경제 사회 및 환경적 문제를 야기하고 있는데 여기에는 빈곤, 교통, 환경오염, 에너지, 인적 재난, 도시범죄 등이 포함된다. 특히 거대도시와 도시화는 건물, 주차장, 도로 등의 불투수면을 증가시켜 수문학적, 생태학적, 환경학적 문제를 야기한다 (Hewitt and Rashed 1992, Perdikaki and Mason 1999, Son et al. 2008). 일반적으로 자연적 지표면이 35-50%의 불투수율을 가진 도시화로 변화될 시에는 강우시 침투율이 약 50%에서 35%로 감소하며, 75-100%의 불투수율을 가진 도시로 변할시에는 침투율이 약 15%로 낮아지는 것으로 보고되고 있다 (NIER 2014). 이러한 불투수면의 증가는 녹지감소, 자연적 물순환 왜곡, 지하수위 저하, 비점오염물질 축적과 유출, 각종 대기오염의 침적, 도시 열섬효과 증가, 강우유출 증가로 인한 도시홍수 문제 등을 야기시키고 있다 (Dow and Dewalle 2000, Choi et al. 2013). 서울시의 경우 1960년대 이후 급격한 도시화가 진행되어 2015년 현재 약 48%가 불투수면으로 도심홍수, 지하수 문제, 비점오염 유출, 도시열섬 효과 등의 문제가 나타나고 있다. 따라서 서울시는 2014년 ‘서울특별시 물순환 회복 및 저영향개발 기본조례’를 전부 개정하여 빗물관리 기본계획 수립, 저영향개발 사전협의제 시행, 물순환 시민위원회 설치, 빗물관리시설 설치 의무대상 신설 및 빗물관리시설 설치 권고대상 확대 등을 포함시켰다. 본 조례에서는 빗물관리 기본계획을 수립하여 서울시 물순환 목표를 2050년까지 연 강수량의 약 630 mm를 저류 및 침투시켜 1960년대 수준으로 회복할 것을 계획하고 있다. 이러한 목표량 달

성을 위한 방안으로 중요하게 고려되는 주요 정책은 각종 개발사업의 인허가 전에 저영향개발계획에 대한 협의를 의무화 한다는 저영향개발 사전협의제이다. 저영향개발 (low impact development, LID)이란 개발로 인하여 발생 가능한 다양한 환경수리수문 및 생태학적 문제를 최소화시키기 위하여 도입된 개발방식으로서 (Kim et al. 2014, Moon et al. 2015), 미국, 독일, 영국 및 캐나다 등의 선진국에서는 이미 다양한 토지이용에 적용 및 운영되고 있다. 국내의 경우는 충북 청주시 오창 과학단지, 충남 K 대학교 교내 및 충남 천안시 43번 국도 등에 LID 설치를 통하여 물순환 구축 및 비점오염원 관리를 수행하고 있다. 환경부 및 국토교통부에서는 2013년 이후 LID를 주요 국가 정책으로 도입하여 현재 제도정비 및 지침 작성 등을 추진하고 있다. 서울시의 경우 서울시가 내포하고 있는 다양한 도시적 문제를 해결하기 위하여 2000년대 말 이후 지속적인 물순환 심포지엄을 토대로 LID 도입을 위한 과학적 근거를 인지하였으며 이를 바탕으로 LID 사전검토제를 도입하였다. LID 사전검토제에서는 각종 개발사업의 토지이용 계획 수립시 서울시가 할당할 빗물분담량 이상의 설치대책량을 산정하여 부지내 침투, 저류 및 이용시설을 설치하도록 유도하고 있다. 또한 도로, 주차장 등 공공 인프라의 빗물관리를 위하여 지속적으로 침투 시설을 포함하여 다양한 시설 설치를 유도하고 있다. 따라서 본 연구는 서울시의 급격한 불투수면의 증가에 따른 자연적인 물순환 회복을 위하여 도로 및 보도에 설치한 LID 시설의 침투, 저류를 통한 강우유출 저감 및 비점오염물질 저감 효과를 평가하기 위하여 수행되었으며, 이러한 연구결과는 시설의 확대보급을 위한 지침작성 및 기술개발 등에 활용할 예정이다.

2. 연구 방법

2.1 모니터링 지점 현황

물순환 시설의 유출저감과 비점오염물질 배출저감 효과를 파악하기 위하여 종로구 효자배수분구의 침투형 빗물받이와 도봉구 새동네의 생태저류 배수로 및 투수성 포장을 선정하여 모니터링을 수행하였다 (Fig. 1). 침투형 빗물받이의 유역면적은 180 m², 생태저류형 배수로는 164 m², 투수성 포장은 602 m²

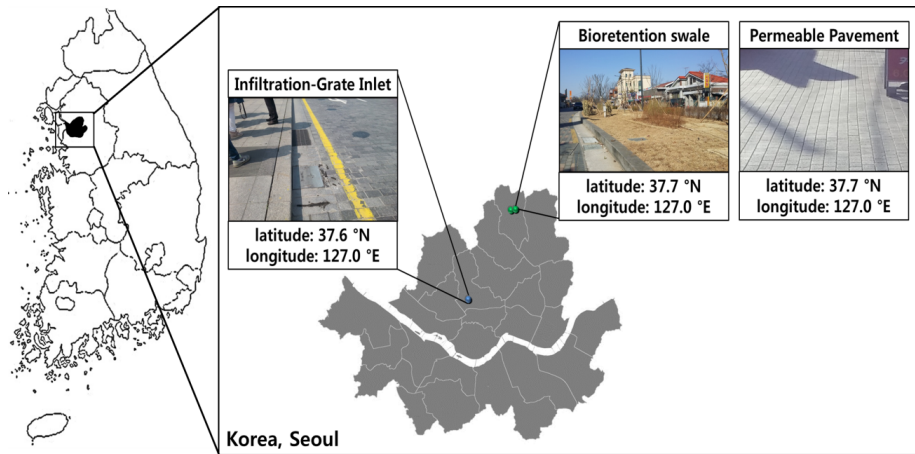


Fig. 1. Location of three water circulation facilities - infiltration grate inlet, bioretention swale and permeable pavement in Seoul.

Table 1. Characteristics of water circulation facilities of the study.

Facility type	Catchment area (m ²)	Surface area (m ²)	Capacity (m ³)	Imperviousness types	Land use
Infiltration-grate inlet	180	0.21	0.2	Asphalt	Road
Bioretention swale	164	14.7	22.1	Permeable block	Road and pavement
Permeable pavement	602	602	187.0	Porous pavement	Road and pavement

이다 (Table 1). 침투형 빗물받이 시설은 빗물받이와 침투받이로 구성되어 있으며, 일정 유량 이상의 강우 발생시 빗물받이에서 초과되는 유량이 침투받이로 유입되어 침투 및 저류되도록 설계되었다. 생태저류형 배수로는 식생이 식재된 시설로써 식생과 토양의 흡착 및 여과, 침투 및 저류 기작을 활용하여 강우유출수내 오염물질 및 유출량을 저감시키는 기법이며, 집수면적 토지는 100% 불투수층이 아닌 약간의 투수성이 적용된 포장도로 인근에 조성되었다.

2.2 모니터링 및 분석 방법

연구 대상시설의 유량측정은 현장에 설치된 압력식 수위계와 초음파 유량계를 이용하여 측정되었다. 또한 3개의 대상시설에 대한 비점오염물질 유출저감 산정을 위하여 수질시료를 침투형 빗물받이와 생태저류형 배수로에서는 시설의 유입부에서 채취하였고, 투수성 포장에서는 투수포장을 통과해서 맨홀로 유입되는 유출수를 채취하였다. 수질은 강우초기에 고농도의 오염물질이 유출되는 초기강우현상을 고려하여 0, 5, 10, 15, 30, 60분, 이후 1시간 간격으로

채취하였다 (Kim and Kang 2004). 채취된 수질시료는 환경부의 수질오염공정시험법에 준하여 입자상 물질, 유기물, 영양물질 및 중금속을 분석하였다. 물순환 시설에서의 강우유출수 저감량은 측정된 유량 자료를 토대로 Eq. 1, 2를 이용하여 산정하였으며, 오염물질 유출저감량은 측정된 수질자료와 유량자료를 이용하여 부하량을 산정한 이후 Eq. 3, 4를 이용하여 비점오염물질 저감량을 분석하였다.

$$RRc = RSR / (LIDc \cdot UR) \tag{Eq. 1}$$

$$RRv = RSR / (LIDv \cdot UR) \tag{Eq. 2}$$

$$RNPC = RNP / (LIDc \cdot UR) \tag{Eq. 3}$$

$$RNPv = RNP / (LIDv \cdot UR) \tag{Eq. 4}$$

여기서, RRc는 단위면적 및 단위강우량당 강우유출저감량 (cm³ m⁻² mm⁻¹)을 의미하며, RRv는 단위용적 및 단위강우량당 강우유출저감량 (cm³ m⁻³ mm⁻¹), RNPC는 단위면적 및 단위강우량당 비점오염저감량

($\text{mg m}^{-2} \text{mm}^{-1}$), RNP_v 는 단위용적 및 단위강우량당 비점오염저감량 ($\text{mg m}^{-3} \text{mm}^{-1}$)을 의미한다. 또한, LID_c 는 단위유역면적 (m^2)을, LID_v 는 단위용적 (m^3), UR 은 단위강우량 (mm), RSR 은 강우유출 저감량 (cm^3), RNP 는 비점오염물질 저감량 (mg)을 의미한다.

3. 결과

3.1 모니터링 결과

2014년 10월부터 2015년 11월까지 총 6회에 걸쳐 LID 시설을 모니터링한 결과 선행건기일수 (antecedent dry days, ADD)는 4.0 - 5.5 days, 강우량은 8.4 - 15.2 mm, 강우지속시간은 4.9 - 7.4 hr의 범위로 나타났다 (Table 2). 침투형 빗물받이의 경우 25 mm 이하 강우에서는 낮은 유량으로 인하여 빗물받이 유입수의 전량이 우수관으로 유출되어 침투받이로 유입되지 않는 것으로 나타났다. 이러한 특징으로 볼 때 침투형 빗물받이는 큰 강우사상에서 우수관거의 배수능력 확보를 위한 물순환 회복 기능으로 효과가 있는 것으로 판단된다. 생태저류형 배수로의 집수면적은 100% 불투수층이 아닌 약간의 투수성이 적용된 포장도로이기에 최소 5 mm 이상의 강우 발생 시 시설내 유입이 가능한 것으로 나타났으며, 투수성 포장은 33 mm 이하의 강우 발생 시 전량 침투 및 저류되는 것으로 나타났다.

3.2 강우유출수 저감 효과 산정

일반적으로 비점오염원에서 배출되는 강우유출수의 유량측정을 위한 수위계 및 유량계는 오물유입으로 인한 오작동과 적은 강우에서의 측정 불가 등으로 인하여 측정이 쉽지 않다. 본 연구에서도 압력식 수위계와 초음파 유량계를 설치하여 유량을 산정하고자 하였으나, 모니터링을 수행한 6번의 강우사상 중

에서 수위 및 유량이 측정된 경우는 3회에 불과하여 이를 토대로 유출수 저감효과를 산정하였다. 침투형 빗물받이의 단위면적당 강우유출저감량은 평균 $29 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{mm}^{-1}$, 생태저류형 배수로는 $2,915 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{mm}^{-1}$, 투수성 포장은 $17,037 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ 으로 나타나 투수성 포장이 가장 큰 유출저감능력을 보였다 (Fig. 2). 시설의 단위 용적당 강우유출 저감량도 투수성 포장에서 $0.058 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-3} \text{mm}^{-1}$ 로 가장 높게 산정되었다 (Fig. 3).

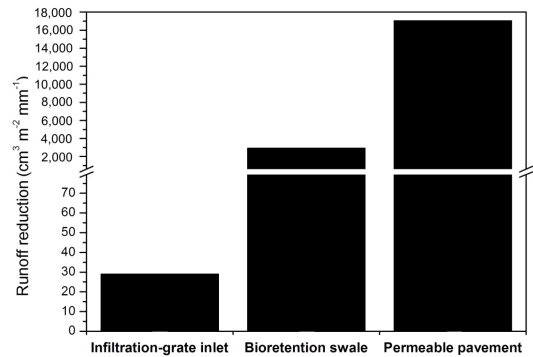


Fig. 2. Reduction of stormwater runoff through water circulation facilities with respect to catchment area of water circulation facilities and unit rainfall.

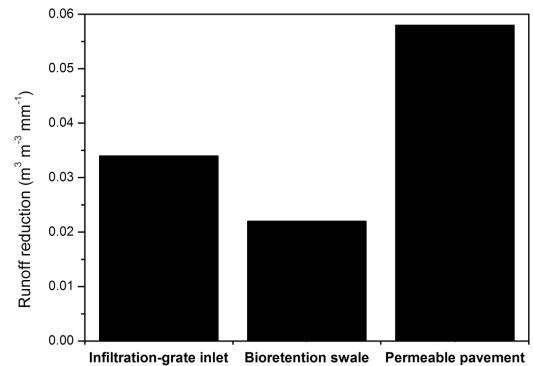


Fig. 3. Reduction of stormwater runoff through water circulation facilities with respect to volume of water circulation facilities and unit rainfall.

Table 2. Rainfall and runoff characteristics at water circulation facilities (Mean±SD).

Facility type	ADD* (day)	Total rainfall (mm)	Total rainfall duration (hr)	Total runoff duration (hr)	Time before runoff starts (hr)
Infiltration-grate inlet	5.5±4.6	8.4±10.3	4.9±2.1	4.7±2.3	0.73±0.96
Bioretention swale	4.0±4.3	15.2±14.3	7.3±3.0	6.7±2.7	1.25±0.82
Permeable pavement	4.0±4.3	15.2±13.9	7.4±4.6	7.1±4.7	1.06±0.44

* Antecedent dry days.

3.3 비점오염원 저감 효과 산정

모니터링을 통해 획득한 수질자료 및 유량 자료를 이용하여 비점오염물질 저감효과를 산정하였다. 단위면적 및 단위강우량당 비점오염저감량 분석 결과 Pb를 제외한 모든 오염물질 항목에서 생태저류형 배수로에서 가장 높게 나타났으며, 침투형 빗물받이에서 가장 낮은 것으로 조사되었다 (Table 3). 반면 평균 단위용적 및 단위강우량당 총부유물질 (TSS)과 화학적산소요구량 (COD)의 저감량은 침투형 빗물받이에서 7,515 mg m⁻³ mm⁻¹ 및 4,971 mg m⁻³ mm⁻¹로 가장 높았으며, 총질소 (TN)와 총인 (TP)은 생태저류형 배수로에서 487 mg m⁻³ mm⁻¹, 8.9 mg m⁻³ mm⁻¹로 높게 나타났다 (Table 4). 생태저류형 배수로에서 오염물질 저감효과가 크게 나타났는데 이는 식물과 미생물에 의한 오염물질의 흡입과 분해, 토양에 의한 여과와 흡착기작 등에 의한 효과로 평가된다.

3.4 유지관리 방안 도출

물순환 시설은 지속적인 유지관리를 통하여 지속적인 침투유출 저감, 침투유출 발생시간 지연, 자연적인 물순환 구축, 비점오염 저감 등의 효과 도출이 가능하기에 시설 별 유지관리 방안 수립이 중요하다. 침투형 빗물받이 시설은 토사에 의한 공극 막힘현상

을 방지하기 위해 토사유입 관리, 유입수로 및 유입부의 협잡물 수거 및 제거, 시설에 차집된 강우유출수의 침투 유지, 침전물 제거 등의 유지관리 활동이 필요하다. 침투형 빗물받이와 같이 투수성 포장은 함몰, 침하, 막힘 현상, 토사의 퇴적 등의 발생여부를 정기적으로 점검하고 필요시 보수보강이 진행되어야 하며, 투수성 포장의 표면에 축적된 낙엽, 쓰레기, 협잡물 등을 주기적으로 청소를 통해 제거하여야 한다. 식생이 식재된 생태저류형 배수로의 경우 식생이 안정화되는 동안에 강우유출수를 우회시켜야 하며, 동절기에는 고사체를 제거해주어야 한다. 또한 시설 주변에 식생이 과다 번성할 경우 풀베기 작업 등의 식생관리, 퇴적물이 시설 계획고의 25% 초과 시 토사 제거, 정기적인 침강지 퇴적물 준설 등의 관리가 필요하다.

4. 결론

도시화는 불투수면을 증가시켜 녹지감소, 자연적 물순환 왜곡, 지하수위 저하, 비점오염물질 축적과 유출, 각종 대기오염의 침적, 도시 열섬효과 증가, 강우유출 증가로 인한 도시홍수 문제 등을 야기시키고 있다. 이러한 도시화의 문제를 해결하기 위하여 한국을 비롯하여 선진국에서는 개발사업의 초기에 저영향개발기법을 도입하여 물순환을 구축하고자 다양한

Table 3. Reduction of nonpoint pollutants by water circulation facilities with respect to the water circulation facilities catchment area and unit rainfall.

Facility type	Reduction amount (mg m ⁻² mm ⁻¹)*								
	TSS	COD	TN	TP	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
Infiltration-grate inlet	7	5	0.22	0.01	0.097	0.006	0.011	0.001	0.003
Bioretention swale	213	71	65.59	1.19	16.644	0.206	0.262	1.880	0.454
Permeable pavement	58	25	16.04	0.34	3.125	0.058	0.086	0.352	0.697

* TSS, total suspended solid; COD, chemical oxygen demand; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus.

Table 4. Reduction of nonpoint pollutants by water circulation facilities with respect to water circulation facilities volume and unit rainfall.

Facility type	Reduction amount (mg m ⁻³ mm ⁻¹)*								
	TSS	COD	TN	TP	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
Infiltration-grate inlet	7,515	4,971	92	8.0	34.5	6.9	4.0	0.5	1.9
Bioretention swale	1,585	524	487	8.9	123.6	1.5	2.0	14.0	3.4
Permeable pavement	197	84	55	1.2	10.7	0.2	0.3	1.2	2.4

* TSS, total suspended solid; COD, chemical oxygen demand; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus.

정책과 제도를 도입하고 있다. 본 연구는 서울시가 조성한 3개의 물순환 시설에 대한 모니터링 결과를 통한 효과평가 결과이며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 강우시 물순환 시설의 유출저감 효과는 매우 높은 것으로 나타났으며 모든 표면에서 유입되는 투수성 포장이 다른 침투시설에 비해 높게 나타났다. 그러나 지속적인 효과유지를 위해서는 토사유입으로 인한 공극의 막힘현상 등을 관리하여야 하며, 자동차의 운행시에는 부등침하 고려 등의 안정성 확보가 필요한 것으로 나타났다.
- 2) 비점오염물질 유출저감은 침투형 빗물받이가 가장 높은 저감효과를 보였는데 그 이유는 본 시설이 적용된 도로의 자동차 운행이 매우 높아 비점오염물질 유출이 매우 높기 때문이다. 따라서 시설별 비점오염물질 유출저감효과에 대한 직접적 비교는 바람직하지 않고 대조구 설치를 통한 효과평가가 필요한 것으로 나타났다.
- 3) 물순환 시설의 선정시 강우유출수의 유출저감이나 비점오염물질의 유출저감 중에서 어떠한 목적으로 설치할 것인지에 따라 시설 종류의 고려가 필요하다. 비점오염물질의 유출량이 낮지만 강우 유출 저감이 필요할 시에는 투수성포장이, 오염물질 저감 시에는 생태형 배수로가 적절한 것으로 조사되었다.
- 4) 비점오염물질의 발생량은 자동차의 운행이 높은 도로에서 매우 높게 나타났다. 이는 향후 물순환 시설 선정 시 자동차 운행 기여도가 설계인자로서 중요하게 고려되어야 할 것으로 평가된다.

감사의 글

본 연구는 서울시의 지원으로 연구가 수행되었으며 연구비 지원에 대해 감사드립니다.

References

- Choi, J., Kim, S., Lee, S., Nam, G., Cho, H. and Kim, L.-H. 2013. Development hybrid filter system for applicable on various rainfall. *Journal of Wetlands Research* 15: 535-541. (in Korean)
- Dow, C.L. and Dewalle, D.R. 2000. Trends in evaporation and Bowen ratio on urbanizing watersheds in Eastern United States. *Water Resources Research* 36: 1835-1843.
- Hewitt, C.N. and Rashed, M.B. 1992. Removal rates of selected pollutants in the runoff waters from a major rural highway. *Water Research* 26: 311-319.
- Kim, C., Choi, J., Lee, J.M., Cho, H. and Kim, L.-H. 2014. Characteristics of stormwater runoff with respect to pavement types. *Journal of Wetlands Research* 16: 423-429. (in Korean)
- Kim, L.H. and Kang, J.H. 2004. Determination of event mean concentrations and pollutant loadings in highway storm runoff. *Journal of Korean Society on Water Quality* 20: 631-640. (in Korean)
- Moon, S., Hong, J., Choi, J., Yu, G. and Kim, L.H. 2015. Evaluation on the adsorption and desorption capabilities of filter media applied to the nonpoint source pollutant management facilities. *Journal of Wetlands Research* 17: 228-236. (in Korean)
- NIER. 2014. A Research on Control Targets and Strategies for Impervious Surface Management. National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea. (in Korean)
- Perdikaki, K. and Mason, C.F. 1999. Impact of road run-off on receiving streams in eastern England. *Water Research* 33: 1627-1633.
- Son, H.G., Lee, E.J., Lee, S.Y. and Kim, L.H. 2008. Determination of nonpoint pollutant unit loads in toll-gate of highway. *Journal of Wetlands Research* 10: 69-75. (in Korean)
- UN DESA. 2014. World Urbanization Prospects, the 2014 revision. United Nations Department of Economic and Social Affairs, New York, USA.