

## 자연형 도로 비점오염저감시설의 저감효율 및 적용성 연구

### A Study on Removal Efficiency and Applicability of Natural Type Road Non-point Pollutant Reduction Facilities

이 상 혁 Lee, Sang Hyuk | 정회원 · 한국건설기술연구원 도로교통연구실 수석연구원 (E-mail : sanghyuklee8612@gmail.com)  
조 혜 진 Cho, Hye Jin | 정회원 · 한국건설기술연구원 도로교통연구실 연구위원 · 교신저자 (E-mail : hjcho@kict.re.kr)  
김 이 형 Kim, Lee Hyung | 공주대학교 건설환경공학부 교수 (E-mail : leehyung@kongju.ac.kr)

#### ABSTRACT

**PURPOSES :** The purpose of this study is to assess removal efficiency of non-point pollutants and applicability for non-point pollutant reduction facilities by conducting the demonstration project operation.

**METHODS :** In order to analyze removal efficiency of non-point pollutants for facilities such as a grassed swale, a small constructed wetland, a free water surface wetland, a horizontal sub-surface flow wetland, and a sand filtration, the field data including specifications of facilities, rainfall, inflow and runoff rainfall effluent etc. was acquired after occurring rainfall events, and the acquired data was analyzed for removal efficiency rate to assess road non-point pollutants facilities using event mean concentration (EMC) and summation of load (SOL) methods.

**RESULTS :** The results of analyzing rainfall effluent, non-point pollutant sources showed that total suspended solid (TSS), chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chrome (Cr), zinc (Zn), and lead (Pb) can be removed through non-point pollutant reduction facilities by 60.3% ~ 100%. Especially removal efficiency of TSS, COD and BOD is relatively higher than removal efficiency of other non-point pollutant sources in all kind of non-point pollutant facilities.

**CONCLUSIONS :** Based on the result of this study, even though natural type of non-point pollutant reduction facilities for roads occupy small areas comparing with drainage basin areas, most of non-point pollutant sources would be removed through the facilities.

#### Keywords

*non-point pollutant facilities, non-point pollutants, event mean concentration, summation of loads*

Corresponding Author : Cho, Hye Jin, Research Fellow  
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283,  
Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea  
Tel : +82.31.910.0169 Fax : +82.31.910.0749  
E-mail : hjcho@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Sep. 23, 2014 Revised Oct. 8, 2014 Accepted Oct. 27, 2014

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

우리나라는 1970년대 이후 고도의 산업화가 진행되면서 개발위주의 성장으로 인한 수질오염의 심각성과 피해에 대하여 고민하지 못한 측면이 있다. 이런 이유로 수질

관리의 필요성이 부각되면서 현재까지 오염물질의 유출 경로가 명확하고 수집이 쉽고 계절에 따른 영향이 상대적으로 적은 점오염원(Point pollution source)에 대한 관리를 중심으로 수질오염저감정책이 시행되어져 왔다.

최근 들어 지속적인 수질관리에도 불구하고 수질개선

이 획기적으로 이루어지지 않은 원인은 비점오염원 (Non-point pollution source)을 큰 원인으로 지목하고 있다 (moon et al., 2014). 비점오염원은 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등 불특정장소에서 불특정하게 수질오염물질이 배출되는 배출원으로 정의할 수 있다 (Ministry of Environment, 2014). 환경부에서 비점오염원이 하천 및 소호 등 수계에 미치는 영향을 분석한 결과 4대강 수계의 비점오염원 기여율이 2006년 기준으로 약 22~40%를 차지하는 것으로 나타났으며, 향후 2020년에는 약 65%까지 높아질 것으로 예측하였다 (Choi et al., 2009; Gil and Jeon, 2011).

특히 국가경쟁력 강화를 위해 전 국토를 대상으로 한 도로건설 및 도로운영으로 인한 수질오염 악화는 심각한 수준에 도달하고 있다. 이에 정부는 2007년 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」을 개정하여 도로를 심각한 비점오염원으로 정의하고 비점오염저감시설의 설치를 의무화하였다.

하지만 도로는 선형의 구조로 되어 있으며 도로에 비점오염저감시설을 설치해야 하는 경우 도로주변의 부지 부족 및 추가적인 여유부지 확보가 어려운 점이 있어 비점오염저감시설의 도로적용에 어려움이 따르고 있는 것이 현실이다. 또한 환경부에서는 비점오염저감시설 중 시설부지소요가 상대적으로 많이 요구되는 자연형시설의 설치를 권장하고 있어 도로적용에 어려움이 많이 발생하고 있다 (Ministry of Environment, 2014).

이에 기존연구와 외국의 사례를 분석하여 도로에 적합한 자연형 비점오염저감시설을 파악하고 이를 실제 국도상에 설치, 운영 및 모니터링을 실시하고 비점오염저감시설의 오염물질 저감효율을 분석하여 자연형 비점오염저감시설의 도로 적용성을 분석하고자 한다.

## 1.2. 연구의 범위 및 내용

본 연구에서는 도로에 적용 가능한 비점오염저감시설 중 6개의 자연형시설을 선정하고 실제 국도43호선 소정~배방구간에 설치하여 운영 및 모니터링을 실시하였다. 모니터링은 2013년 7월에 강우사상이 발생하였을 때 시행하였으며, 모니터링은 강우량, 강우강도, 강우시간, 선행건기일수, 비점오염저감시설로 유입되는 강우유출수, 비점오염저감시설로부터 유출되는 강우유출수 등을 포함하여 시행하였다.

모니터링 결과와 시료를 분석하여 도로에 설치된 비점오염저감시설의 오염물질 저감효율을 파악하고 자연

형 비점오염저감시설의 도로 적용성을 알아본다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 연구대상 비점오염저감시설

연구대상 비점오염저감시설은 비점오염저감시설의 설치가 예정되어있으면서 비점오염저감시설 중 자연형 시설의 설치가 가능하고, 저감시설의 효과검증이 용이한 구간을 대상으로 설치하였다. 설치구간은 세종시 전의면 유천리에서 아산시 배방면 갈매리를 연결하는 4차로 신설구간 중 국도43호선 소정~배방공사구간으로 교량을 포함하고 있는 구간이다.

연구대상 비점오염저감시설의 종류는 도로의 선형특성과 여유부지 확보의 어려움을 감안하여 자연형시설 중 대규모 부지를 필요로 하지 않고 오염물질에 대한 저감효율이 높으며 주변환경과 어우러져 우수한 경관성을 조성하는데 유리한 시설로 선정하였다. 비점오염저감시설 중 식생수로, 소규모 인공습지, 자유흐름형 인공습지, 수평지하흐름형 인공습지, 빗물정원 그리고 모래여과시설로 총 6종류를 선정하였다.

연구대상 비점오염저감시설의 위치와 특성은 Table 1과 같으며 설치현황은 Fig. 1과 같다.

Table 1. Characteristics of Study Area and Facilities

Characteristics of Study Area				
- Route Name: National Highway Route 43 (Yeongi-Goseong)				
- Location: Yuchon-ri Jeonui-myeon Sejong~Galmae-ri Baebang eup Asan				
- AADT: 45,785 vehicles/day (base year: 2011)				
Characteristics of Implemented Non-point Pollutant Treatment Facilities				
	Basin area(m <sup>2</sup> )	Design Rainfall(mm)	Design Capacity(m <sup>3</sup> )	Facility Dimension (W×L×H. m)
①	1,020	5.3	10.8	2.90×19.6×1.85
②	950	5.3	4.8	2.80×8.60×1.55
③	3,200	5.3	16.1	5.20×23.1×1.71
④	3,600	5.3	18.1	6.30×15.7×1.65
⑤	2,340	5.3	11.8	2.60×26.20×1.55
⑥	1,620	5.3	8.2	2.65×31.25×1.65

- ① Grassed Swale
- ② Small Constructed Wetland
- ③ Free Water Surface Wetland
- ④ Horizontal Sub-Surface Flow Wetland
- ⑤ Rain Retention Garden
- ⑥ Sand Filtration



Fig. 1 Implemented Non-point Pollutant Facilities in Study Area

## 2.2. 모니터링 및 수질분석방법

본 연구에서는 비점오염저감시설에 대한 모니터링을 통해 각 연구대상 비점오염저감시설의 강우유출 저감능력과 비점오염저감효율 등을 분석하였다. 모니터링 시 선행건기일수는 강우유출수의 오염농도에 영향을 미치는 중요한 요인으로 선행건기일수가 길어질수록 강우유출수의 오염농도가 높아질 가능성이 많아진다. 따라서 모니터링은 일정 선행건기일수 이상 확보할 수 있는 강우를 대상으로 시행하였다.

모니터링은 각 시설별 현장여건을 고려하여 2013년 7월에 동일한 날짜에 시설별로 2~5회, 총 23회를 실시하였다. 비점오염저감시설의 모니터링 시 시설의 유입과 유출부의 유량측정과 시료채취를 시행하는데 유량측정은 유량측정기를 이용하여 강우시 3~4회 시행하며, 시료채취는 Grab Sampling방법을 이용하여 시행하는데 1회 강우 시 유량측정지점에서 7~8회 측정하였다. 시료채취 시 강우초기 1시간은 유출직전, 5분, 10분, 15

분, 30분, 60분에 총 6회에 걸쳐 채취를 시행하였고 강우중기에서 강우 종료 시까지 적정 시간간격으로 1~2회 시행하였다.

비점오염원의 오염물질 발생특징은 토지이용별로 차이가 난다. 도시지역과 산업지역의 경우 강우유출수에 부유물질농도가 높고 논이나 밭의 경우 농약과 비료사용으로 인한 질소와 인의 농도가 높으며 도로의 경우 차량연료연소와 차량부속물로부터 발생하는 중금속의 농도가 높은 것으로 나타난다(Choi et al., 2009; Choi et al., 2010; Gil and Jeon, 2011; Lee et al., 2011; Moon et al., 2014). 따라서 본 연구에서는 시료채취를 통해 총부유물질(TSS: Total Suspended Solids), 화학적 산소요구량(COD<sub>cr</sub>: Chemical Oxygen Demand), 생화학적 산소요구량(BOD<sub>5</sub>: Biochemical Oxygen Demand), 총 질소(TN: Total Nitrogen), 총 인(TP: Total Phosphorus), 그리고 크롬(Cr), 아연(Zn), 납(Pb)과 같은 중금속류를 대상으로 수질오염공정시험법에 의거하여 분석하였다. 항목별 분석방법을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Analysis Methods for Non-point Pollutants

Classification	Method of Analysis
TSS	Method of Glass Microfibre Filter
BOD <sub>5</sub>	5-days BOD Test (Standard Method)
COD <sub>cr</sub>	Dichromate Method
TN	Ultraviolet Absorption Photometry
TP	Ascorbic Acid Method
Heavy Metals (Cr, Zn, Pb)	Instrumental Analysis

## 2.3. 저감시설 효율 분석방법

본 연구에서는 비점오염저감시설의 오염저감효율을 평가하기 위하여 각 비점오염물질별 오염농도를 산정하고 이를 바탕으로 비점오염저감시설의 오염물질 저감효율을 분석하였다.

비점오염원의 농도산정은 단순한 산술평균으로 추정하는 경우 강우유출량을 고려하지 않아 실제 농도와 큰 농도차이를 보일 수 있기 때문에 모니터링 시료의 농도와 유출물을 고려한 유량가중평균농도(EMC: Event Mean Concentration)로 산정하였다 (Choi et al., 2009; Choi et al., 2010; Kim et al., 2006; TRB, 2006). EMC의 일반식은 Eq. (1)과 같다.

$$EMC(mg/L) = \frac{\sum_{t=0}^T C(t) \times q_{run}(t)}{\sum_{t=0}^T q_{run}(t)} \quad (1)$$

여기서,  $C(t)$  : 시간  $t$ 에서의 오염물질의 유입 또는 유출농도

$q(t)$  : 시간  $t$ 에서 단위 시간당 시설내로 유입되거나 유출되는 유량

$T$  : 강우 종료시간

비점오염저감시설에서 유출되는 오염물질과 유출수의 직접적인 산정이 매우 어렵고 특히 저감시설 중 침투시설의 경우 유출수가 토양으로 침투되기 때문에 유출계수를 산정하여 유출량을 분석하였다. 유출계수는 강우사상별 집수구역에서 실측한 강우유출수량을 집수면적으로 나눈 유출고(Depth of Runoff)와 강우량과의 선형회귀분석을 통해 산정된 기울기를 이용한다.

$$Depth\ of\ Run\ off(mm) = \frac{\sum_{t=0}^T q_{run}(t)}{CA} \times 100 \quad (2)$$

여기서,  $CA$  : 집수지역면적(Catchment area,  $m^2$ )

비점오염저감시설의 오염물질 저감효율을 분석하기 위하여 오염물질 부하량, 즉 오염물질의 총량을 산정한다. 오염물질 부하량을 산정하는 방법은 여러 가지가 있지만 부하량 합산법(SOL: Summation of Loads)을 이용하여 산정하였다. 부하량 합산법은 집수면적이 좁은 지역과 교량지역에서 비점오염저감시설 오염물질 저감효율을 산정하는데 주로 이용되고 있는 방법이다 (Kang et al., 2011; Lee et al., 2011; Moon et al., 2014).

$$Removal\ Efficiency(\%) = \frac{\sum_{t=1}^{t=T} C_i(t)q_i(t) - \sum_{t=1}^{t=T} C_0(t)q_0(t)}{\sum_{t=1}^{t=T} C_i(t)q_i(t)} \quad (3)$$

여기서, Removal Efficiency : 오염물질 제거효율

$C_i(t)$  : 시간  $t$ 에서 오염물질의 유입농도

$q_i(t)$  : 시간  $t$ 에서 단위시간당 시설내로 유입되는 유량

$C_0(t)$  : 시간  $t$ 에서 오염물질의 유출농도

$q_0(t)$  : 시간  $t$ 에서 단위시간당 시설 밖으로 유출되는 유량

### 3. 도로 비점오염저감시설의 효율분석

연구대상지역의 각 비점오염저감시설별로 3~5회, 총 23회의 강우사상에 대한 모니터링을 실시하였다. 건기 일수는 약 0.9일~4.3일, 강우량은 약 1.0mm~60.0mm, 강우지속시간은 약 0.8hr~12.5hr이었다. 강우사상에 대한 상세한 정보는 Table 3에 나타내었다.

각 도로 비점오염저감시설별 총 강우유입량은 식생수로 약 0.1 $m^3$ ~15.5 $m^3$ , 소규모 인공습지는 약 0.1 $m^3$ ~24.9 $m^3$ , 자유흐름형 인공습지는 약 3.8 $m^3$ ~78.8 $m^3$ , 수평지하흐름형 인공습지는 약 0.4 $m^3$ ~67.2 $m^3$ , 빗물정원은 약 0.7 $m^3$ ~4.5 $m^3$ , 그리고 모래여과시설은 약 0.1 $m^3$ ~14.7 $m^3$ 로 나타났다.

강우가 시작된 후 연구대상 시험시설로 유입되는 강우유출수의 농도를 시간단위로 측정하였다. TSS, COD, BOD, TN, TP의 경우 강우사상이 시작 5분 후의 농도가 가장 높은 것으로 나타났으며 강우사상 시작 직후 농도, 강우사상 시작 2시간 후, 4시간 후의 순으로 농도가 높은 것으로 나타났다. 하지만, 중금속인 Cr, Zn, Pb의 경우 강우사상이 시작 직후의 농도가 가장 높고 시간이 지나면서 점점 농도가 낮아지다가 약 2시간 이후부터 농도가 다시 높아지는 것으로 나타났다.

#### 3.1. EMC 분석 결과

일반적으로 강우사상이 발생하였을 때 도로의 오염물질이 포함되어있는 강우유출수가 초기에 비점오염저감시설로 유입되기 때문에 강우 시 발생하는 총 부하량이 각 비점오염물질의 농도나 침투시 부하량보다 더욱 중요하다. 이러한 특성을 잘 반영하여 비점오염물질의 유출특성을 평가하는 방법으로 EMC를 많이 사용하고 있다 (Moon et al., 2014; Choi et al., 2009).

EMC 분석결과, 모니터링 기간 중 각 비점오염저감시설로 유입된 강우유출수 내 비점오염물질의 농도값은 식생수로에서 TSS는 약 4.9~153.4mg/L, COD는 약 11.2~194.7mg/L, BOD는 약 2.6~13.4mg/L, TN의 경우 약 1.2~14.3mg/L, TP는 약 0.1~1.6mg/L이었으며, 중금속의 경우 Cr이 약 0.2~0.3mg/L, Zn가 0.3~0.4mg/L, Pb는 5차례의 모니터링에서 약 0.2mg/L

Table 3. Summary of Monitored Rainfall Events in the Study Area

Facilities	No. of Event	Event Date	Advanced Dry Days (day)	Total Rainfall (mm)	Rainfall Duration Time (hr)	Rainfall Intensity (mm/hr)	Total Inflow (m <sup>3</sup> )
① Grassed Swale	1	07. 02. 2013	4.3	5.0	0.8	6.3	0.1
	2	07. 04. 2013	0.9	8.0	5.3	1.5	2.1
	3	07. 07. 2013	1.8	1.0	0.4	2.5	0.1
	4	07. 17. 2013	2.3	56.5	7.2	7.8	15.5
	5	07. 28. 2013	4.2	15.0	6.0	2.5	2.5
② Small Constructed Wetland	1	07. 02. 2013	4.3	5.0	0.8	6.3	0.1
	2	07. 04. 2013	0.9	8.0	5.5	1.5	4.1
	3	07. 07. 2013	1.8	1.0	0.4	2.5	0.3
	4	07. 17. 2013	2.3	60.0	8.2	7.3	24.9
③ Free Water Surface Wetland	1	07. 02. 2013	4.3	5.0	12.5	0.4	3.8
	2	07. 04. 2013	0.9	8.0	3.6	2.2	3.9
④ Horizontal Sub- Surface Flow Wetland	1	07. 02. 2013	4.3	5.0	12.5	0.4	0.4
	2	07. 04. 2013	0.9	8.0	3.5	2.3	3.5
	3	07. 07. 2013	1.8	1.0	2.1	0.5	1.2
	4	07. 17. 2013	2.3	56.5	7.2	7.8	67.2
⑤ Rain Retention Garden	1	07. 02. 2013	4.3	5.0	0.8	6.3	0.7
	2	07. 04. 2013	0.9	8.0	5.5	1.5	4.5
	3	07. 07. 2013	1.8	1.0	2.1	0.5	1.2
	4	07. 28. 2013	4.2	15.0	5.5	2.7	3.6
⑥ Sand Filtration	1	07. 02. 2013	4.3	5.0	12.5	0.4	0.7
	2	07. 04. 2013	0.9	8.0	5.5	1.5	5.1
	3	07. 07. 2013	1.8	1.0	2.1	0.5	0.1
	4	07. 17. 2013	2.3	59.0	7.8	7.6	14.7

의 범위로 나타났다.

소규모 인공습지의 경우 TSS는 약 6.6~34.3mg/L, COD는 약 12.6~116.9mg/L, BOD는 약 2.6~14.5mg/L, TN의 경우 약 1.3~8.8mg/L, TP는 약 0.1~0.4mg/L이었으며, 중금속의 경우 Cr이 약 0.2~0.3mg/L, Zn가 0.3~0.5mg/L, Pb는 0.1~0.2mg/L의 범위로 나타났다.

자유흐름형 인공습지의 경우 TSS 약 42.6~81.9 mg/L, COD 약 75.4~108.3mg/L, BOD 약 12.7~13.8mg/L, TN 약 2.5~3.9mg/L, TP 약 0.4~0.6 mg/L이었으며, Cr와 Zn의 경우 각각 0.2 mg/L와 0.3 mg/L이었고 Pb는 0.1~0.2mg/L의 범위로 유입된 것으로 나타났다.

수평지하흐름형 인공습지의 경우 TSS 약 9.5~82.1 mg/L, COD 약 17.4~280.3mg/L, BOD 약 3.0~14.5mg/L, TN 약 1.3~3.0mg/L, TP 약 0.1~3.7mg/L이었으며, Cr은 약 0.2~0.3mg/L, Zn 약 0.2~0.4mg/L, Pb 약 0.1~0.2 mg/L의 범위로 유입된 것으로 나타났다.

그리고 빗물정원의 경우 각 비점오염물질별 유입농도는 TSS 약 4.2~35.9mg/L, COD 약 27.0~73.3 mg/L, BOD 약 2.4~9.0mg/L, TN 약 2.8~7.0mg/L, TP는 4 번의 모니터링에서 모두 약 0.3mg/L이었으며, Cr은 약 0.1~0.2mg/L, Zn 약 0.1~0.4mg/L, Pb 약 0.1~0.2mg/L의 범위로 나타났다.

또한 모래여과시설의 경우 TSS 약 12.8~30.6 mg/L, COD 약 21.8~180.0 mg/L, BOD 약 1.9~17.8mg/L, TN 약 1.~9.5 mg/L, TP 약 0.1~0.8 mg/L이었으며, 중금속인 Cr은 약 0.2~0.3mg/L, Zn 약 0.3~0.4mg/L, Pb 약 0.1~0.2mg/L의 범위로 유입된 것으로 나타났다.

각 비점오염저감시설로부터 유출된 강우유출수의 경우 모니터링 기간 중 유출수가 발생하지 않은 식생수와 빗물정원을 제외하고 소규모 인공습지의 경우 TSS는 약 6.0mg/L, COD는 약 12.5mg/L, BOD는 약 2.8 mg/L, TN의 경우 약 1.0mg/L, TP는 약 0.1mg/L, Cr은 0.3mg/L, Zn와 Pb는 각각 0.3mg/L와 0.2

mg/L로 나타났다.

자유흐름형 인공습지의 경우 모니터링 기간 중 2차례의 유출수가 발생하였으며 TSS는 평균 8.9mg/L, COD 14.8mg/L, BOD 3.5mg/L, TN 1.7mg/L, TP 0.1mg/L, Cr은 0.1mg/L, Zn와 Pb는 각각 0.2mg/L와 0.1mg/L로 분석되었다.

수평지하흐름형 인공습지의 경우 모니터링 기간 중 3차례의 유출수가 발생하였으며 TSS는 평균 4.1mg/L, COD 11.5mg/L, BOD 2.2mg/L, TN 1.3mg/L, TP 0.1mg/L, Cr은 0.2mg/L, Zn와 Pb는 각각 0.2mg/L로 분석되었다.

마지막으로 모래여과시설의 경우 모니터링 기간 중 1차례의 유출수가 발생하였으며 TSS는 약 45.3mg/L, COD는 약 14.7mg/L, BOD는 약 3.8mg/L, TN의 경우 약 1.6mg/L, TP는 약 0.2mg/L, Cr은 0.2mg/L, Zn와 Pb는 각각 0.3mg/L와 0.2mg/L로 나타났다.

유입 및 유출된 강우유출수의 EMC를 비교분석해보

면 일반적으로 제거가 용이한 TSS, COD, BOD 등은 비교적 높은 제거효율을 보였으나, 그에 반해 TN, TP 및 중금속 등은 다소 낮은 제거효율을 나타내었다.

Table 4는 각 도로 비점오염저감시설의 강우유입 및 유출수의 EMC 분석결과를 나타내었다.

### 3.2. 오염물질 부하량 산정

오염물질 부하량 산정은 모니터링 된 강우사상별 도로 비점오염저감시설로 유입된 유입부하량 (유입된 오염물질 총량)과 저감시설로부터 유출된 유출부하량 (유출된 오염물질 총량)을 각각 산정한 후 비점오염저감시설의 오염물질 처리면적 내 강우사상의 총 유입부하량과 총 유출부하량을 합산하여 비점오염물질의 저감효율을 산정하는 방식을 사용하였다 (Moon et al., 2014).

앞에서 산정한 EMC값을 부하량 합산법(SOL)을 이용하여 유입 및 유출부하량을 산정하였으며 그 결과는 Table 5와 같다.

Table 4. EMCs of Rainfall Events in the Study Area

Facilities	No. of Event	TSS		COD <sub>cr</sub>		BOD		TN		TP		Cr		Zn		Pb	
		In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
①	1	14.9	0.0	46.2	0.0	13.4	0.0	4.9	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0
	2	12.0	0.0	26.6	0.0	2.6	0.0	2.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0
	3	153.4	0.0	194.7	0.0	9.6	0.0	14.3	0.0	1.6	0.0	0.3	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0
	4	4.9	0.0	11.2	0.0	3.4	0.0	1.2	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0
	5	10.2	0.0	50.2	0.0	4.6	0.0	4.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0
②	1	19.1	0.0	43.8	0.0	14.5	0.0	5.1	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0
	2	14.1	0.0	30.2	0.0	2.6	0.0	3.6	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0
	3	34.3	0.0	116.9	0.0	9.6	0.0	8.8	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.5	0.0	0.2	0.0
	4	6.6	6.0	12.6	12.5	3.0	2.8	1.3	1.0	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
③	1	42.6	15.7	75.4	20.9	13.8	7.3	3.9	2.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1
	2	81.9	11.1	108.3	23.5	12.7	3.1	2.5	2.7	0.6	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2
④	1	37.6	0.0	38.9	0.0	14.5	0.0	8.5	0.0	1.6	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0
	2	14.4	3.1	74.6	19.6	11.3	3.2	3.0	1.9	0.4	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2
	3	82.1	6.8	280.3	7.4	12.4	2.1	15.9	3.0	3.7	0.1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2
	4	9.5	6.3	17.4	19.1	3.0	3.3	1.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
⑤	1	35.9	0.0	35.2	0.0	9.0	0.0	3.4	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0
	2	5.4	0.0	27.0	0.0	2.4	0.0	2.8	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
	3	9.9	0.0	73.3	0.0	5.9	0.0	7.0	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0
	4	4.2	0.0	43.7	0.0	4.5	0.0	4.2	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0
⑥	1	58.6	0.0	180.0	0.0	17.8	0.0	6.4	0.0	0.8	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0
	2	12.8	0.0	21.8	0.0	1.9	0.0	1.6	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0
	3	30.6	0.0	99.2	0.0	9.0	0.0	9.5	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0
	4	15.5	45.3	32.1	14.7	4.9	3.8	1.8	1.6	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2

Table 5. Results of SOL Estimate

Facilities	Parameters	TSS	COD <sub>cr</sub>	BOD	TN	TP	Cr	Zn	Pb
①	Inflow	137.4	371.2	71.5	34.1	1.5	4.7	5.9	3.5
	Runoff	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	# of Reduction	137.4	371.2	71.5	34.1	1.5	4.7	5.9	3.5
②	Inflow	235.8	479.0	90.8	49.2	1.9	7.3	7.9	5.1
	Runoff	39.2	80.7	17.9	6.3	0.3	1.6	1.7	1.1
	# of Reduction	196.6	398.3	72.9	42.9	1.6	5.7	6.3	4.0
③	Inflow	483.3	711.4	101.9	24.6	4.0	1.6	2.1	1.2
	Runoff	38.1	61.0	15.2	6.8	0.5	0.5	0.6	0.4
	# of Reduction	445.2	650.4	86.7	17.8	3.5	1.1	1.5	0.8
④	Inflow	804.9	1,787.3	259.8	118.3	11.7	15.6	17.7	12.8
	Runoff	54.6	169.1	29.2	3.2	1.0	1.9	2.0	1.4
	# of Reduction	750.3	1,618.2	230.6	115.1	10.7	13.7	15.7	11.4
⑤	Inflow	74.7	387.9	39.6	38.1	2.7	1.6	2.2	1.5
	Runoff	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	# of Reduction	74.7	387.9	39.6	38.1	2.7	1.6	2.2	1.5
⑥	Inflow	337.0	719.2	94.3	40.4	3.2	4.9	7.1	4.1
	Runoff	133.8	43.3	11.3	4.8	0.6	0.7	0.7	0.5
	# of Reduction	203.2	675.9	83.0	35.6	2.6	4.2	6.4	3.6

각 연구대상 비점오염저감시설별 오염물질 부하량을 분석해보면 소규모 인공습지의 경우 TSS의 저감량은 약 196.6g이었으며 COD의 경우 398.3g, BOD 72.9g, TN 42.9g, TP 1.6g, Cr 5.7g, Zn 6.3g 그리고 Pb의 저감량은 약 4.0g인 것으로 분석되었다.

자유흐름형 인공습지의 경우 TSS 445.2g, COD 650.4g, BOD 86.7g, TN 17.8g, TP 3.5g, Cr 1.1g, Zn 1.5g 그리고 Pb는 약 0.80g 저감되는 것으로 분석되었다.

수평지하흐름형 인공습지의 경우 TSS 750.3g, COD 1,618.2g, BOD 230.6g, TN 115.1g, TP 10.7g, Cr 13.7g, Zn 15.7g 그리고 Pb는 약 11.4g이 저감되는 것으로 분석되었다.

모래여과시설의 경우 TSS의 저감량은 약 203.2g, COD 675.9g, BOD 83.0g, TN 35.6g, TP 2.6g, Cr 4.2g, Zn 6.4g 그리고 Pb의 저감량은 약 3.6g인 것으로 분석되었다.

반면 식생수로와 빗물정원의 경우 모니터링 기간 중 도로 비점오염저감시설로부터 유출되는 강우유출수가 발생하지 않아 비점오염물질이 전량 저감시설에 의해 저감된 것으로 분석되었다.

각 연구대상 비점오염저감시설별 오염물질 저감량을 비교해보면 TSS의 경우 수평지하흐름형 인공습지가 가

장 많은 양이 저감되는 것으로 나타났으며 다음으로는 자유흐름형 인공습지, 모래여과시설의 순으로 분석되었다. COD의 경우 TSS와 같이 수평지하흐름형 인공습지가 가장 많은 오염물질 저감량을 나타내었으며 다음으로는 모래여과시설, 자유흐름형 인공습지, 소규모 인공습지 순으로 분석되었다. TN, TP 그리고 중금속의 경우 수평지하흐름형 인공습지가 가장 많은 양을 저감하는 것으로 분석되었다.

또한 연구대상 비점오염저감시설의 객관적인 도로 비점오염물질 저감효율을 분석하기 위하여 오염물질 부하량 저감율을 산정하였는데 결과는 Fig. 2와 같다.

본 연구의 연구대상인 6종류의 도로 비점오염저감시설의 비점오염물질 저감효율은 매우 우수한 것으로 분석되었다. TSS의 경우 식생수로와 빗물정원은 모니터링 기간 중 비점오염저감시설로부터 유출수가 발생하지 않아 오염물질 저감효율이 100%인 것으로 분석되었으며 나머지 시설의 경우 저감효율이 약 60.3~93.2%로 높게 나타났다. 또한, COD, BOD, TN 그리고 TP의 경우 TSS의 저감효율과 비슷한 결과를 나타내었다. 하지만 중금속인 Cr, Zn 그리고 Pb의 저감효율이 자유흐름형 인공습지와 수평지하흐름형 인공습지에서 다소 떨어지는 것으로 분석되었다. 이는 다른 시설의 경우 저류, 여과, 식생 등 여러 가지의 비점오염저감처리를 거치는 반면 위의 2개 시

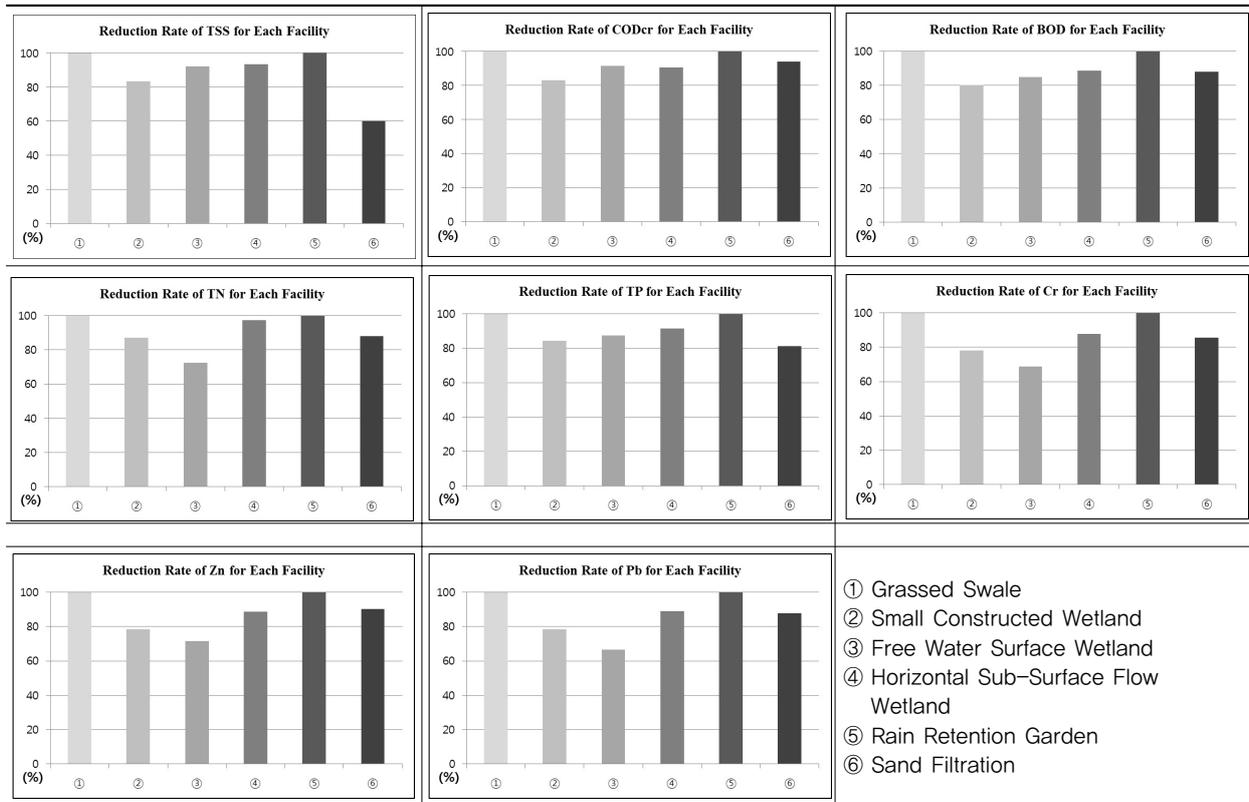


Fig. 2 Reduction Rate of Non-point Pollutants by Facilities

설은 저류와 식생만을 이용하여 비점오염물질을 처리하고 있어 저감효율이 떨어지는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 자연형 비점오염저감시설의 도로 비점오염물질에 대한 저감효율과 도로 적용성을 분석하기 위해 실제 국도상에 자연형 비점오염저감시설인 식생수로, 소규모 인공습지, 자유흐름형 인공습지, 수평지하흐름형 인공습지, 빗물정원 및 모래여과시설을 설치하고 강우 시 오염물질 저감정도를 모니터링하였다.

모니터링을 통해 채취된 강우유출수에 대해 유량가중평균농도(EMC)와 부하량 합산법(SOL)을 산정하여 각 비점오염저감시설별 비점오염물질 저감효율을 분석하였다. 분석결과, 모니터링 기간 중 도로 비점오염저감시설로부터 유출되는 강우유출수가 발생하지 않은 식생수로와 빗물정원의 경우 비점오염물질을 전량 저감시킨 것으로 분석되었다. 나머지 비점오염저감시설의 저감효율은 TSS 약 60.3~93.2%, COD 약 83.2~94.0%, BOD 약 80.3~88.8%, TN 약 72.4~97.3%, TP 약 81.3~91.5%, Cr 약 68.8~87.8%, Zn 약 71.4~

90.1% 그리고 Pb는 약 66.7~89.1% 인 것으로 분석되어 도로 비점오염물질의 저감효율이 매우 우수한 것으로 분석되었다.

본 연구에서 도입된 6개의 자연형 비점오염저감시설의 시설면적 대비 배수유역면적의 비는 시설에 따라 약 2.5~5.6%로 나타났다. 이는 비점오염물질이 포함된 강우유출수를 처리하는데 소규모의 자연형 비점오염저감시설을 설치하더라도 도로 비점오염저감에 상당한 효과가 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 분석대상구간을 국도로 한정하여 연구가 시행되어 고속도로와 시·군도에 대한 특성이 반영되지 못하였고 토지이용현황에 따른 도로 비점오염물질에 대한 저감효율을 반영하지 않았다는 한계가 있다. 따라서 향후에는 도로분류와 토지이용 전반에 걸친 비점오염저감시설의 저감효율을 분석해야 할 것으로 판단된다. 또한, 자연형 비점오염저감시설과 장치형 비점오염저감시설에 대한 저감효율, 설치비용 및 유지보수비용에 대한 생애주기비용분석(Life Cycle Cost Analysis)을 이용한 경제성 분석이 이루어지면 도로에 적합하고 경제성 있는 도로 비점오염저감시설을 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부의 '도로 비점오염저감시설 설계지침 제정 연구'를 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

- Choi, J. Y., Lee, S. Y., and Kim, L. H., 2009, Wash-off Characteristics of NPS Pollutants from Forest Landuse, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol 9, No 4. 129-134.
- Choi, J. Y., Lee, S. Y., Maniquiz, M. C., Kang, C. G., Lee, J. Y., Kang H. M., and Kim, L. H., 2010. Evaluation and Design of Infiltration and Filtration BMP Facility, *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol 19, No 5. 475-481.
- Choi, D. G., Park, M. J., Kang, M. J., and Kim, S. D., 2014, Improvement of the Empirical Formula for Estimating Stormwater Capture Ratio of WQF Treatment BMPs, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol 14, No 2. 337-343.
- Gil, K. I., and Jeon, H. S., 2011, Reduced Loads Characteristics Comparison Between Permeable Pavement and Non-point Pollutants Treatment Facility, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol 11, No 2. 193-198.
- Kang, M. J., Lee, S. J., Moon, S. J., and Choi, J. W., 2011, Review of Pollutant Removal Effectiveness of Treatment Control BMPs for the Korean TMDL Management, the Proceeding of Korea Water Resources Association, 2011 Conference of Korean Water Resources Association.
- Kim, L. H., Ko, S. O., Lee, B. S., and Kim, S. G., 2006, Estimation of Pollutant EMCs and Loadings in Highway Runoff, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol 26, No 2. 225-231.
- Lee, Y. B., Choi, S. I., Hung, H. G., Bae, S. D., and Jung, S. K., 2011. Effective Application Method for Pollution Mitigation Facility of Highway Runoff, *Journal of Korean Society of Soil Science and Fertilizer*, Vol 44, No 6. 1264-1271.
- Ministry of Environment, 2014, The Manual for Installation and Management of Non-point Source Control Facilities, Ministry of Environment.
- Moon, J. H., Lee, I. K., Kim, J. T., and Chang, S. W., 2014, Assessment of Efficiency for Constructed Wetlands to Reduced Non-point Source Pollution, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol 14, No 1. 333-339.
- Transportation Research Board (TRB), 2006, Evaluation of Best Management Practices for Highway Runoff Control, National Cooperative Highway Research Program Report 565.