

인공습지 형태에 따른 비점오염저감효율 분석

Analysis for Removal Efficiency of Non-point Pollution Sources by Constructed Wetlands

이상혁¹ · 김이형² · 조혜진^{3*}

¹한국건설기술연구원 도로교통연구실 수석연구원

²정회원, 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

³정회원, 한국건설기술연구원 도로교통연구실 연구위원

Lee, Sang Hyuk¹, Kim, Lee Hyung² and Cho, Hye Jin^{3*}

¹Highway & Transportation Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Senior Researcher

²Member, Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University, Professor

³Member, Highway & Transportation Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Research Fellow

ABSTRACT: Studies of non-point pollutant treatment facilities have widely been conducted for a decade, but natural non-point pollutant treatment facilities implemented on roads have not been carried out for the removal efficiency of non-point pollution sources. This study analyzed the removal efficiency of non-point pollution sources from constructed wetlands using monitoring and event mean concentration method. As a result of this study, removal efficiency of general non-point pollution sources as TSS, COD, BOD is relatively good, but removal efficiency of TN, TP, Cr, Zn, Pb is very small or nothing.

KEYWORDS: Non-point pollutant treatment facility, Constructed wetland, Removal efficiency of non-point pollution source, Monitoring, Event mean concentration

요 약: 비점오염저감시설에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 도로에 자연형 비점오염저감시설 설치시 비점오염저감효율에 대한 연구는 없는 실정이다. 본 연구에서는 도로에 설치된 여러 종류의 인공습지에 대한 비점오염 저감효율을 모니터링과 유량가중 평균농도법을 이용하여 분석하였다. 분석결과, 인공습지는 일반적인 오염물질인 TSS, COD, BOD, TN, TP에 대한 저감효율은 비교적 우수한 것으로 나타났으며 중금속인 Cr, Zn, Pb의 제거효율은 낮거나 거의 없는 것으로 나타났다.

키워드: 비점오염저감시설, 인공습지, 비점오염 저감효율, 모니터링, 유량가중 평균농도

서 론

하천이나 호소 등을 직접 통과하거나 이러한 수계 주위를 우회하는 도로에서 운행 중인 차량으로부터 발생하는 배기가스, 제동장치와 타이어에서 발생하

는 오염물질, 각종 오일 그리고 적재된 화물의 낙하물 등으로 인하여 하천이나 호소 등의 수생태계 환경이 위협을 받고 있다. 따라서 정부는 2007년 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」을 개정하여 도로를 비점오염원으로 지정하고 비점오염저감시설의 설치

*Corresponding author: hjcho@kict.re.kr

© 2014 Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering

를 의무화하였다. 또한 환경부는 비점오염저감시설의 설치, 유지보수 및 저감효율 등을 감안하여 비점오염저감시설 중 장치형 시설보다 자연형 시설의 설치를 유도하고 있다 (Ministry of Environment, 2014). 하지만 지금까지 다양한 형태의 비점오염저감시설의 비점오염 저감효율에 대한 연구가 이루어져왔지만 자연형 비점오염저감시설에 대한 저감효율과 설치타당성에 대한 연구가 많이 시행되지 못하였다.

자연형 비점오염저감시설의 경우 설치부지면적이 장치형 시설에 비해 많이 필요하고 특정장소에서는 설치의 제약이 따른다. 특히 도로의 경우, 선형구조로 구성되어 있고 비점오염저감시설을 설치해야하는 도로주변의 여유부지가 부족하며 공용중인 도로의 경우 추가적인 여유부지 확보가 어려운 점이 있어 비점오염저감시설의 도로 설치가 쉽지 않은 것이 현실이다. 그러나 자연형 시설의 경우 오염물질의 저감효율이 높고 주변환경과 어우러져 우수한 경관성을 조성하는데 유리한 장점이 있다 (Lee et al., 2011). 특히, 자연형 시설 중 인공습지 (Constructed Wetland)는 침전, 여과, 흡착 등의 습지가 가지고 있는 자연적인 정화능력을 인공적으로 향상시켜 오염물질을 제거하고 자연친화적인 비점오염저감시설로 여유부지 확보가 쉬운 장소에서 많이 설치되고 있다 (Moon et al., 2014).

따라서 본 연구에서는 도로에 설치된 소규모 인공습지, 자유흐름형 인공습지, 수평지하흐름형 인공습지에 대한 모니터링을 실시하고 모니터링 결과를 활용하여 강우시 비점오염물질의 유량가중 평균농도 (EMC: Event Mean Concentration)을 산정하여 각 인공습지의 비점오염 저감효율을 분석하였다.

연구방법

연구대상 인공습지

본 연구에서는 도로적용이 가능한 인공습지 중 소규모 인공습지 (Small Constructed Wetland), 자유흐름형 인공습지 (Free Water Surface Wetland) 그리고 수평지하흐름형 인공습지 (Horizontal Sub-Surface Flow Wetland)를 실제 국도43호선 천안구간에 각각 도로와 교량하부에 설치하여 운영 및 모니터링을 실

시하였다. 설치지점의 세부위치는 강우유출수가 하천으로 방류되는 지점이 아닌 비점오염원 발생지점을 기준으로 계획하여 외부유출수와 혼합을 방지하였다. 연구대상 인공습지의 위치와 특성은 Table 1과 같다.

소규모 인공습지의 경우 초기우수는 초기우수 유도덕, 유립수로, 협잡물거름망, 전처리시설을 거쳐 시설로 유입되며, 집수정 및 유출관을 거쳐 기존 집수정으로 유출되도록 계획하였다. 소규모 인공습지는 설치지점의 경사도 및 유입·유출계획 등을 고려하여 설계하였고, 전처리부, 습지부, 유출부로 나누어 계획하였으며 소규모 인공습지의 상세도는 Fig. 2

Table 1. Characteristics of study area and facilities

Characteristics of Study Area				
- Route Name: National Highway Route 43 (Yeongi-Goseong)				
- Location: Yuchon-ri Jeonui-nyeon Sejong ~ Galmae-ri Baebang eup Asan				
- AADT: 45,785 vehicles/day (base year: 2011)				
Characteristics of Facilities				
- Reducing Non-point Pollution resources by Removal Ability, Precipitation, Absorption of Plants				
- Implementing Facilities on Parks and Greenbelt				
- Low Maintenance Costs and High Landscape				
Characteristics of Implemented Non-point Pollutant Treatment Facilities				
	Basin area (m ²)	Design Rainfall (mm)	Design Capacity (m ³)	Facility Dimension (W*L*H. m)
①	950	5.3	4.8	2.80×8.60×1.55
②	3,200	5.3	16.1	5.20×23.1×1.71
③	3,600	5.3	18.1	6.30×15.7×1.65

- ① Small Constructed Wetland
- ② Free Water Surface Wetland
- ③ Horizontal Sub-Surface Flow Wetland



① Small Constructed Wetland ② Free Water Surface Wetland ③ Horizontal Sub-Surface Flow Wetland

Fig. 1. Non-point pollutant facilities in study area

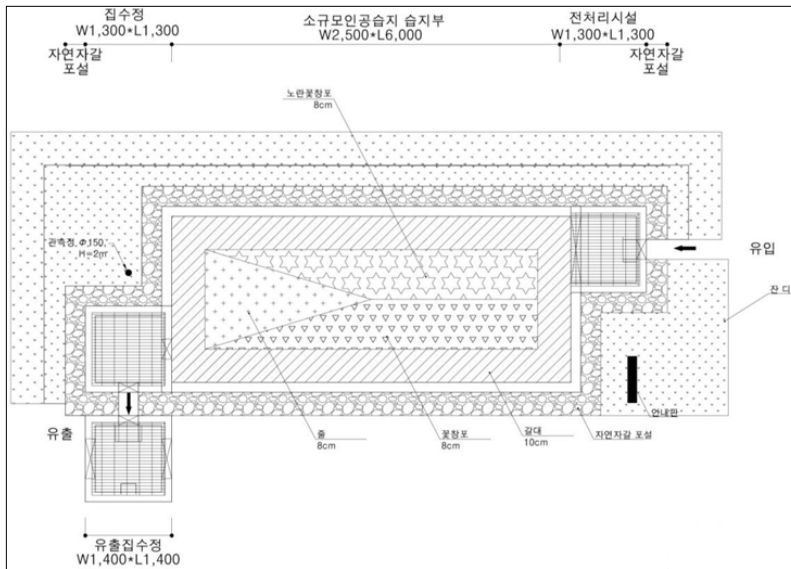


Fig. 2. Detail plan of small constructed wetland

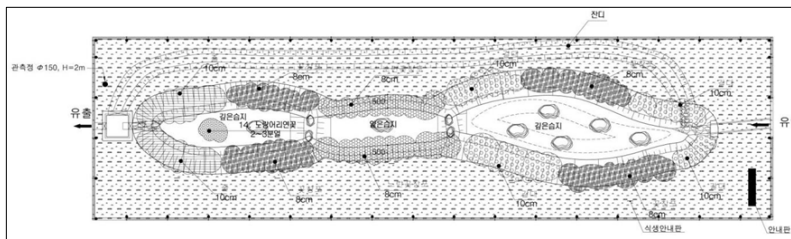


Fig. 3. Detail plan of free water surface wetland

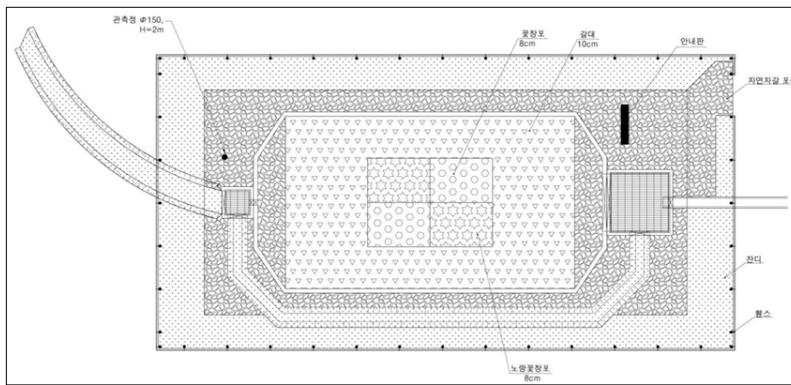


Fig. 4. Detail plan of horizontal sub-surface flow wetland

과 같다.

자유흐름형 인공습지와 수평지하흐름형 인공습지는 교량 하부의 고수부지에 설치하여 교량에서 발생하는 비점오염원을 제거하도록 계획하였다. 초기우수는 유입수로, 협잡물거름망, 전처리시설을 거쳐 각

시설로 유입되며, 집수정 및 유출수로에 의해 기존 배수로와 연결하여 유출되도록 계획하였다. 자유흐름형 인공습지의 상세도는 Fig. 3와 Fig. 4과 같다. 연구대상 인공습지의 식재는 자연환경 및 지형여건 등을 감안하여 식재식물의 종류 및 수종을 선정하

였으며, 침수에 안정적으로 활착 및 성장이 가능한 수종을 도입하였다. 또한, 차량 내 운전자의 시야를 확보할 수 있는 수중도입을 고려하였으며 주변에서 쉽게 구할 수 있는 수종으로 선정하였다. 인공습지에 설치된 식재는 각 시설의 특성에 부합하도록 노랑꽃창포, 꽃창포, 갈대, 줄, 노랑어리연꽃 등을 적용하였다.

모니터링 및 오염저감효율분석 방법

모니터링은 각 시설의 유입과 유출부의 우수유량 측정과 차집된 우수를 채취하였는데 유량측정은 유량측정기를 사용하여 강우시 3~4회 시행하였으며, 우수채취는 Grab Sampling 방법을 이용하여 1회 강우시 유량측정 지점에서 7~8회 시행하였다. 모니터링은 각 시설별 현장여건을 고려하여 2013년 7월에 동일한 날짜에 시설별로 2~4회를 실시하여 분석에 활용하였다.

오염저감 효율분석 항목의 경우 도로의 이용특성을 고려하여 총부유물질 (TSS), 화학적 산소요구량 (COD), 생화학적 산소요구량 (BOD), 총질소 (TN), 총인 (TP), 그리고 중금속류인 크롬 (Cr), 아연 (Zn), 납 (Pb)로 8개 항목을 수질오염공정시험법에 의거하여 분석하였다 (Choi et al., 2009; Choi et al., 2010; Gil and Jeon, 2011; Lee et al., 2011; Moon et al., 2014).

비점오염저감시설의 오염저감효율을 분석하기 위

해 각 오염물질항목별 오염농도를 산정하고 그 결과를 이용하여 비점오염저감시설의 오염저감효율을 분석하였다. 비점오염물질항목의 오염농도산정을 단순한 산술평균으로 추정하는 경우 강우유출량을 고려하지 않아 실제 농도와 큰 농도차가 발생할 수 있으므로 오염농도와 유출을 고려한 유량가중평균농도 (EMC: Event Mean Concentration)법을 이용하여 산정하였다 (Choi et al., 2009; Choi et al., 2010; Kim et al., 2006; TRB, 2006).

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

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

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

T 는 강우 종료시간

분석결과 및 고찰

모니터링 결과

모니터링은 각 시설별로 2~4회 총 10회가 시행되었으며, 각 시설별 건기일수는 0.9~4.3일, 총 강우량

Table 2. Summary of monitored rainfall events

Facilities	No. of Event	Event Date	Advanced Dry Days (day)	Total Rainfall (mm)	Rainfall Duration Time (hr)	Rainfall Intensity (mm/hr)	Total Inflow (m ³)
①	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
②	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
③	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

① Small Constructed Wetland, ② Free Water Surface Wetland, ③ Horizontal Sub-Surface Flow Wetland

은 1.0~60.0mm, 강우지속시간은 0.4 ~12.5시간이었으며, 평균 강우강도는 0.4~7.8 mm/hr의 범위로 나타났다며 모니터링에 대한 자세한 정보는 Table 2와 같다.

각 인공습지 시설로의 총 강우유입량은 소규모 인공습지의 경우 약 0.1 m³~24.9 m³, 자유흐름형 인공습지는 약 3.8 m³~78.8 m³ 그리고 수평지하흐름형 인공습지는 약 0.4 m³~67.2 m³로 나타났다. 각 시설별로 유입된 오염물질의 농도를 시간단위로 측정하여 분석해보면 TSS, COD, BOD, TN, TP의 경우 강우가 시작 후 5분에서 오염농도가 가장 높은 것으로 분석되었으며 다음으로 강우시작 직전, 강우시작 후 2시간, 강우시작 후 4시간 순으로 오염농도가 높은 것으로 나타났다. 하지만 중금속류인 Cr, Zn, Pb의 경우 다른 오염물질과 달리 강우시작 직후의 농도가 가장 높은 것으로 나타났으며 시간이 지날수록 농도가 낮아지다가 강우시작 후 2시간부터 농도가 다시 높아지는 것으로 나타났다.

인공습지의 비점오염물질 저감효율 분석

강우가 발생하였을 때 도로상의 비점오염물질이 강우유출수와 함께 인공습지 시설로 유입되기 때문에 강우 시 발생하는 총 부하량이 중요하다. 이러한 특성을 고려하여 비점오염물질의 유출특성을 분석하는 방법으로 유량가중평균농도 (EMC)를 많이 사용하고 있다 (Moon et al., 2014; Choi et al., 2009).

유량가중 평균농도를 분석한 결과, 모니터링 기간 중 각 인공습지 시설로 유입된 강우유출수 내 비점오염물질의 농도는 소규모 인공습지에서 TSS는 약 6.6~34.3 mg/L, COD는 약 12.6~116.9 mg/L, BOD는 약 2.6~14.5 mg/L, TN의 경우 약 1.3~8.8 mg/L, TP는 약 0.1~0.4 mg/L이었으며, 중금속의 경우 Cr이 약 0.2~0.3 mg/L, Zn가 0.3~0.5 mg/L, Pb는 0.1~0.2 mg/L의 범위로 나타났다.

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

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

또한, 각 인공습지 시설로부터 유출된 강우유출수에 대한 유량가중 평균농도를 분석하였는데, 시설로부터 유출된 강우유출수가 없는 경우는 강우량의 많지 않아 비점오염저감시설로 유입된 모든 강우유출수를 다 처리한 것으로 판단된다.

각 시설로부터 유출된 강우유출수가 발생한 경우를 분석해보면, 소규모 인공습지의 경우 TSS는 약

Table 3. Results of EMC estimation

Facilities	No. of Event	TSS		COD		BOD		TN		TP		Cr		Zn		Pb	
		In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
①	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
②	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
③	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

① Small Constructed Wetland, ② Free Water Surface Wetland, ③ Horizontal Sub-Surface Flow Wetland

6.0 mg/L, COD는 약 12.5 mg/L, BOD는 약 2.8 mg/L, TN의 경우 약 1.0 mg/L, TP는 약 0.1 mg/L, Cr은 0.3 mg/L, Zn와 Pb는 각각 0.3 mg/L와 0.2 mg/L로 나타났다.

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

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

유입과 유출된 강우유출수에 대한 유량가중평균 농도를 비교분석해보면 일반적으로 제거가 용이하다고 알려진 TSS, COD, BOD 등은 비교적 높은 제거효율을 보였으며, 이에 반해 TN, TP 및 중금속의 경우 다른 오염물질제거효율보다 낮은 것으로 나타났다.

결 론

본 연구는 비점오염저감시설 중 연구대상 지역에 설치된 소규모 인공습지, 자유흐름형 인공습지 그리고 수평지하흐름형 인공습지를 대상으로 강우발생 시 모니터링을 실시하였고, 강우시 발생하는 비점오염물질에 대한 유출특성과 도로지역에 설치된 인공습지의 비점오염저감효율을 분석하기 위한 유량가중평균농도 (EMC)를 산정하여 분석하였다.

모니터링은 각 시설별로 2~4회 총 10회가 시행되었으며, 모니터링으로부터 채취된 시료로부터 비점오염물질인 TSS, COD, BOD, TN, TP, Cr, Zn, Pb에 대하여 유량가중평균농도 (EMC)를 산정하여 비점오염저감시설인 소규모 인공습지, 자유흐름형 인공습지 그리고 수평지하흐름형 인공습지의 비점오염저감효율을 분석하였다. 분석결과, 비점오염저감시설로부터 강우유출수가 유출되지 않은 경우 비점오염원이 전부 시설로부터 제거된 것으로 판단되며 시설로부터 강우유출수가 유출되었을 경우 저감시설별

오염물질제거효율은 TSS는 약 10~92 %, COD는 약 1~97 %, BOD는 7~83 %, TN은 23~81 %, TP은 0~97 %, Zn은 0~33 %로 나타났으며, Cr과 Pb의 제거효율은 없는 것으로 분석되었다. 시설별 오염물질별 오염저감효율의 차이가 발생하는 것은 지역의 강우량, 강우강도 그리고 강우유출수의 시설내 저류시간 등으로 인한 차이로 판단된다.

연구결과를 살펴보면 인공습지의 경우 TSS, COD, BOD, TN, TP에 대한 저감효율은 매우 우수한 것으로 나타났지만, 중금속인 Cr, Zn, Pb의 저감효율은 낮은 것으로 분석되었다. 이를 보완하기 위하여 저감시설내에 여재층에 대한 연구가 지속적으로 필요하며 다른 자연형 비점오염저감시설에 대한 도로적용성에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부의 ‘비점오염저감시설 설계 지침 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.
- 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.
- 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., Jung, 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.