

반포화 순환 여과식 인공습지에 의한 도로 강우유출수의 실증처리 연구

박기수·김영철[†]

한서대학교 환경공학과

Demonstration Study of Half-Saturated Bio-filter Wetland with Recirculation Pump for Road Stormwater

Kisoo Park·Youngchul Kim[†]

Dept. of Environmental Engineering, Hanseo University, Seosan, Korea

(Received : 21 April 2017, Revised: 11 May 2017, Accepted: 15 June 2017)

요약

본 연구는 실증규모의 반포화 순환식 인공습지에서 도로 강우유출수를 처리하여 습지의 성능분석, LID 기능 및 다른 LID-BMP 시설과의 처리효율을 비교하였다. 강우시 모니터링을 바탕으로 연구대상 습지의 저감효율을 산정한 결과 TSS 저감효율은 평균 92%, COD, TN, TP는 각각 평균 63%, 36%, 75%로 분석되었으며 다른 시설과 직접적인 비교는 불가능하지만 SA/CA 비율에 따른 오염물질 저감효율을 분석한 결과 연구대상 시설의 SA/CA 비율이 낮았음에도 불구하고 유사한 수준의 효율을 보였다. 또한, 전체 강우유출수의 18%만을 처리하여 약 70%의 오염물질을 저감할 수 있는 시설의 성능을 보였다. 연구대상 습지(합성섬유 충전)와 동일한 형태로 제작되어 직접적인 비교가 가능했던 유기성 여재를 충전한 습지와 비교 결과 TSS, TP는 유사한 처리성능을 보였으며, COD는 유기성 여재에서 용출되는 유기물질의 영향으로 연구대상 습지에서 높은 효율을 보였으나 TN은 유기성 여재에서 자체 공급되는 유기탄소의 영향으로 유기성 여재를 충전한 습지에서 높은 효율을 나타내었다. 한편 초기 강우유출수 포착장치를 갖춘 본 연구대상 습지에서 그렇지 않은 침투도랑 습지의 성능을 비교분석한 결과 훨씬 안정적인 처리성능을 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 도로 강우유출수, 습지, 유기성 여재, 저감효율, 합성섬유, LID-BMP

Abstract

In this study, field-scale half-saturated bio-filter wetland equipped with recirculation system was operated with stormwater from the paved road, and its operational performance and functions of LID-BMP were analyzed and compared with other facilities. The reduction of TSS, COD, TN, and TP were 92%, 63%, 36%, and 75%, respectively. Comparison of the reduction efficiency were carried out with respect to ratio between surface and catchment areas(SA/CA). In addition, this LID-BMP facility can reduce about 70% of pollutant by treating only 18% of total rainfall runoff. The results show that LID used for this study gave similar efficiency although its ratio was smaller. In addition, comparison study was made between synthetic fiber as a filter media and organic media, which shows that there was not any significant difference between, TSS and TP reduction, but there were large difference in COD and TN removal due to the presence and absence of release of organic carbon. Meanwhile, wetland system in this study equipped with a first-flush capture gave a higher stability in terms of treatment performance.

Key words : Bio-filter wetland, LID-BMP, SA/CA, stormwater, synthetic fiber

1. 서론

최근 무분별한 개발행위로 도시화, 산업화가 진행됨에 따라 불투수면이 증가하고 있다. 이에 따라 강우시 유출되는 비점오염물질의 양이 증가하고 자연적인 물순환 시스템을 왜곡하여 수생태계에 악영향을 미치는 주된 원인으로 대두

되고 있다. 또한 침투유량의 증가로 홍수유발, 하천침식, 수로확장 등의 문제를 발생시키고 지하수의 감소로 하천의 건천화 및 지반침하의 원인이 되기 때문에 시급한 대책이 필요한 실정이다. 그러나 일부의 신도시지역을 제외한 대부분의 도심지역에서는 강우유출수의 처리 없이 수계로 직접 배출되는 실정이다(Choi et al., 2016).

도시지역에서 비점오염물질의 유출로 인한 수질 악화를 저감하기 위하여 환경부에서는 비점오염원 관리를 위하여 비점오염설치신고제, 수질오염총량 관리제도, 생태 면적률 제도, 사전재해영향성 검토 등의 법제를 마련하여 시행

[†] To whom correspondence should be addressed.
Dept. of Environmental Engineering, Hanseo University, Seosan, Korea
E-mail: ykim@hanseo.ac.kr

중에 있으며 국토교통부에서는 친수구역조성지침, 지속가능한 신도시 계획기준, 도시계획시설의 결정·구조 및 설치기준에 관한 규칙 등을 통하여 빗물관리의 중요성을 나타내고 있다. 최근에는 저영향 개발(Low Impact Development, LID)과 그린인프라(Green Infra, GI)를 통합하는 관리방안이 추진되고 있다(MOE, 2012).

일반적으로 LID는 원천적으로 토지이용을 환경적인 영향이 거의 없도록 계획하는 “LID 기법”과 관리대책으로서 “LID 기술”로 분류된다. LID 기법은 토지이용 계획을 수립할 시 환경에 영향이 최소화되도록 토지이용을 계획하는 기법으로 보존지역, 토지이용의 배치, 녹지와 수계의 연계 등이 포함된다(Cho et al., 2013). 또한 불투수면 감소를 통해 강우유출수의 표면유출을 줄이고, 토양침투를 증가시켜 물순환 개선, 오염물질저감을 동시에 달성하는 기법을 의미한다(Lee et al., 2014).

LID 기술은 LID 기법으로 토지이용을 구축하여도 환경적 영향이 미치기 때문에 이러한 영향을 최소화하기 위하여 조성하는 요소기술을 의미하며, 여기에는 침투, 여과, 식생 등의 기술이 있다(Jeon et al., 2016). LID 기술은 저류, 침투, 여과, 증발산 등의 기능을 구현할 수 있는 개별 기술 요소로 시설의 형태에 따라 습지형, 침투형, 식생형, 저류형, 여과형 등 5가지로 구분되며 LID 기술의 기능은 물순환, 비점오염저감, 조정, 경관적, 에너지 저감, 수자원 확보, 생태적 기능 등을 수행하는 기술이다(MOE, 2013).

그러나 다수의 연구자에 의해 비점오염원 저감에 대한 연구가 진행되어 왔으나 과거 국내에 적용된 비점오염저감 기술들은 국내의 환경여건을 고려하지 않고 외국의 기술을 그대로 모방하여 사용하고 있어 설계 및 시공 상의 오류, 경제성, 효율성, 운영상의 문제점이 제시되고 있다(Kang et al., 2014). 최근에는 이러한 문제점을 극복하기 위한 다양한 기술개발 및 매뉴얼, 가이드라인 등의 작성으로 국내여건을 고려한 설계가 이루어지고 있으나 아직까지도 해결해야 할 문제가 많은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존연구의 문제점 해결과 국내의 협소한 국토여건 및 기후여건에 적합하며 LID-BMP 시설의 기능을 충족시킬 수 있는 순환식 습지를 개발하여 불투수면으로부터 강우유출수 처리연구를 수행하였고 부수적으로 시설의 처리능력, 기술의 차별성 등을 다른 비점오염저감 목적의 LID시설과 비교/분석 하였다.

2. 연구방법

2.1 실증 반포화 순환식 습지

본 연구의 실증시설은 도심지역의 물순환 체계 구축을 위해 도로 강우유출수 처리목적으로 개발하였으며 Fig. 1에는 연구대상 시설의 초기 강우유출수 포착 모식도를 나타내었다.

Fig. 1-(a)와 같이 수질처리용량(WQ_v : Water Quality Volume)보다 적거나 같은 경우 유역에서 유출되는 강우유출수를 전량 포착 처리한다. 반면에 Fig. 1-(b)와 같이 WQ_v

보다 큰 경우에는 WQ_v 이후의 지속 강우유출수는 수계로 By-pass 시키는 원리로 시설을 설계하여 보다 효율적으로 강우유출수를 처리할 수 있도록 설계하였다.

실증시설은 충남 서산시 해미면 산수리 국도 40번 교량의 직하단으로 교량 강우유출수가 주변 산수저수지로 직방류되는 지점에 위치하고 있다(Fig. 2). 해당 교량(도로) 배수구역의 면적은 $500m^2$ 이며 100% 아스팔트 포장면으로 이루어져 있다.

Fig. 3에는 순환식 습지의 구조 및 제원을 나타내었다. 본 시설은 전처리 목적의 침강지와 섬유여재, 화분석 등의 여재를 충진한 여과형 습지가 후속처리공정으로 구성되어 있다.

시설 규모는 $10.2m^3$ 이며 침강지는 $3.0m^3$ (유효 저류량: $2.5m^3$)으로 Ball-type 초기강우 포착장치와 By-pass, 비상 By-pass, 퇴적물 채취구로 구성되어 있다.

습지의 제원은 $8.2m^3$ (유효 저류량: $2.5m^3$, 수위 약 50cm에 해당하는 수치)이다. 습지에는 강우유출수가 균등하게 유입(분포)될 수 있도록 스프링클러 유입방식을 채택하였고 수중펌프를 이용하여 재순환되도록 하였다.

본 시설의 유효 저류량 산정은 집수면적 $500m^2$ 에서 누적 강우유출고 5mm를 처리할 수 있도록 설계하였다(Kim et al., 2005).

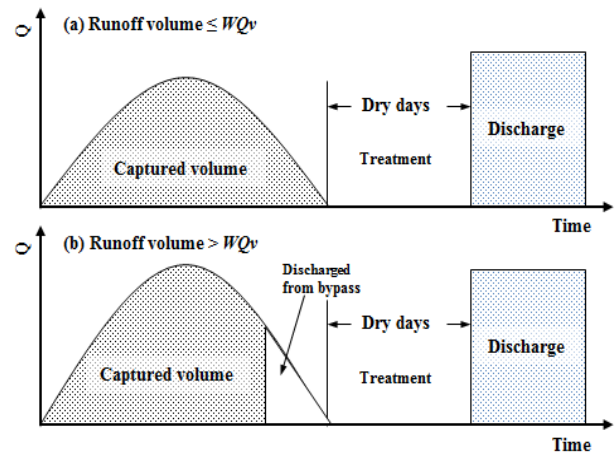


Fig. 1. Schematic diagram of functioning of a first-flush capture

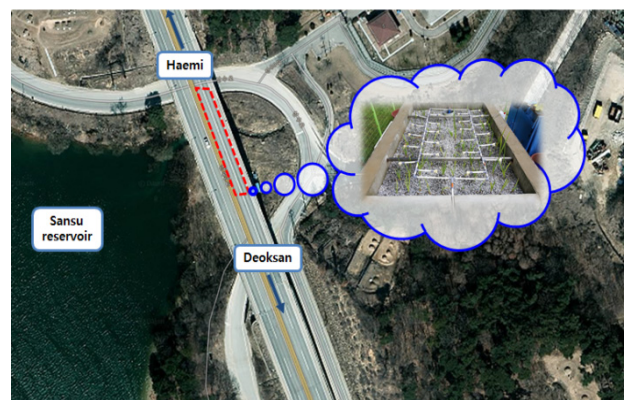


Fig. 2. Satellite images of the site location

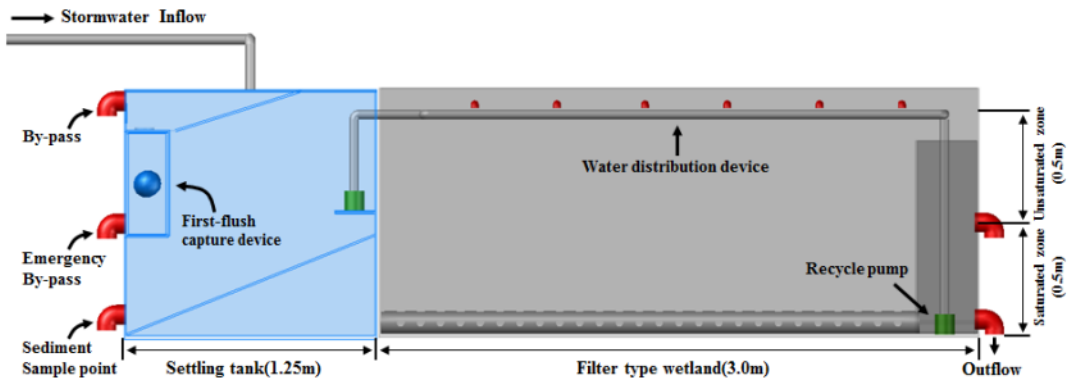


Fig. 3. Structure of half-saturation filtration type wetland with recirculation.

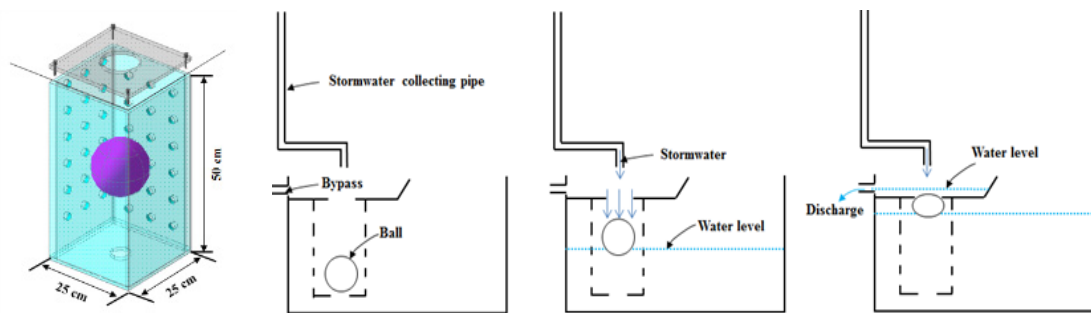


Fig. 4. Ball-type first-flush capture device.

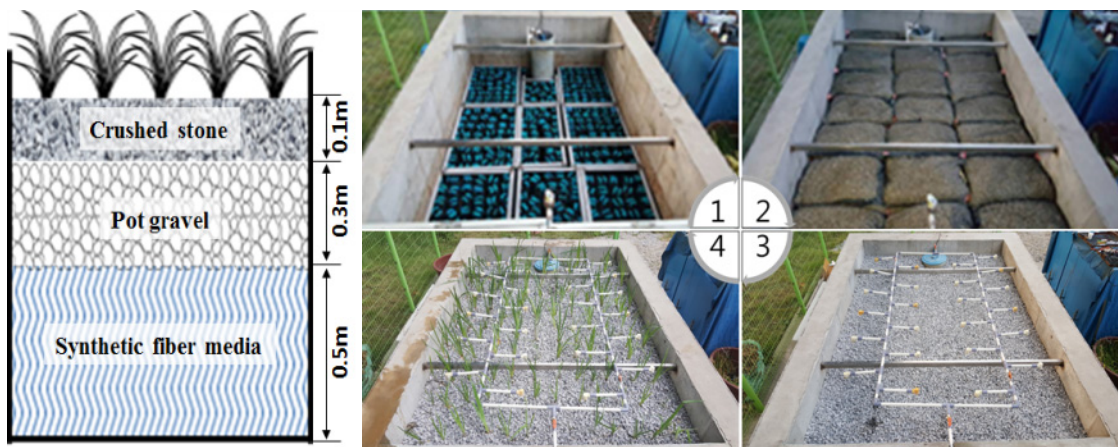


Fig. 5. Layer of wetland media, vegetation, and media lay-out.

침강지에는 집수구역에서 발생하는 초기 누적 강우유출고 5mm만을 포착할 수 있도록 고안된 볼(ball)을 이용한 포착장치를 개발하여 설치하였다(Fig. 4). Ball-type 포착장치는 강우유출수가 침강지로 유입되면 공이 침강지 수위 증가에 따라 함께 상승하여 상부의 구멍을 막아 더 이상 침강지로 강우유출수가 유입되지 않고 수계로 직방류(By-pass) 되는 구조를 갖고 있다.

Fig. 5에는 후속공정인 반포화 순환식 인공습지에 충전된 여재 및 식생을 도시하였다. 섬유여재는 넓은 표면적을 이용하여 미생물이 부착할 수 있는 영역을 증가시키고 섬유여재의 상부에는 화분석을 포설하였는데 여과기작에 의해 입자상 오염물질의 제거를 도모하도록 하였다.

2.2 강우유출수 모니터링

강우 유출수의 모니터링은 초기 강우유출수 포착장치에 의해 포집된 강우유출수를 수중교반기를 이용하여 혼합한 후 종합시료(EMC 농도를 대표하는)를 채취하는 방식으로 수행하였다. 본 연구의 특성상 초기 강우유출수만을 포착하여 처리하기 때문에 위와 같은 시료채취방법을 실시하였고 정확성을 검증하기 위해 종합채취 방법과 비교하였다.

2.3 습지의 운전

강우활동이 시작되면 초기강우 유출수 2.5m³이 침강지에 포착되고 침강지에서 24시간 침전 후 습지와 연결된 펌프

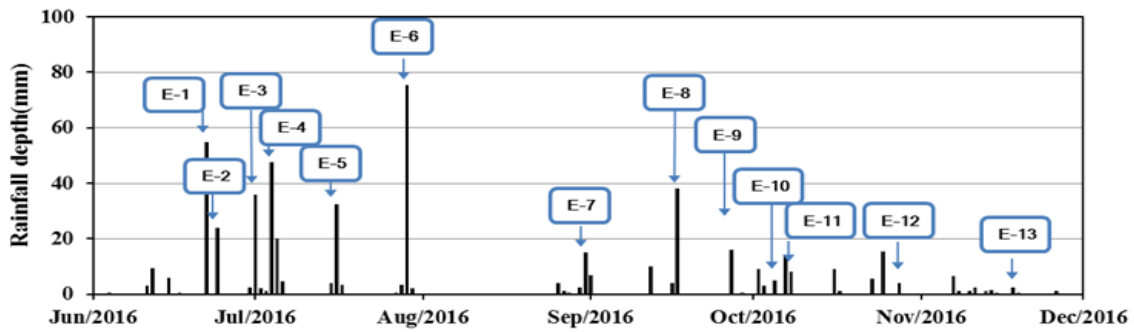


Fig. 6. Distribution of monitoring event in this study.

Table 1. Summary of the monitoring events

Rainfall event	Rainfall depth (mm)	ADDs* (days)	Captured volume (m ³)	By-passed volume (m ³)
E1	55.0	4	2.5	25.0
E2	24.0	2	2.5	9.5
E3	36.0	6	2.5	15.5
E4	47.5	3	2.5	21.3
E5	32.5	10	2.4	13.9
E6	75.5	12	2.5	35.3
E7	8.0	32	1.6	2.4
E8	38.0	5	2.4	16.6
E9	16.0	10	2.5	5.5
E10	12.0	5	2.5	3.5
E11	22.0	4	2.3	8.7
E12	19.5	2	2.3	7.4
E13	11.0	10	2.3	3.2

* ADDs: Antecedent dry days

장치를 이용하여 약 20분간 침강 처리수를 유입시켰다. 유입된 강우유출수는 습지 내부의 재순환 펌프를 이용하여 일일 4회씩(오전 3시, 9시, 오후 3시, 9시)재순환 하였다. 시료 채취는 1, 3, 5일(무강우 일수 NDD: Number of Dry day)을 주기로 수행하였고 시료채취는 재순환이 실시 되는 시점인 오후 3시에 수행하였다.

2.4 수질분석

강우시 채취한 시료의 수질분석항목은 수온, pH, EC, DO, 탁도, TSS, 유기물질, 영양염류, 중금속 및 입도분포에 대하여 분석하였다.

수온, pH, EC, DO, 탁도는 현장 측정항목으로 YSI 63, YSI 30, YSI 5000, Hach 2100Q 모델을 이용하여 측정하였고 그 외의 유기물질 및 영양소 항목은 *Standard Methods* (American Public Health Association (APHA), 2012)와 수질오염 공정시험법(Ministry of Environment (MOE), 2008)에 의거하여 분석하였다.

2.5 모니터링 강우특성

Fig. 6에는 연구대상 시설이 위치한 서산시 해미면의

2016년 일별 강우분포를 나타내었다. 연구기간동안 총 13회의 모니터링을 수행하였고 모니터링 대상 강우 깊이는 8.0-75.5mm 이었고 선행건기일수는 2-32일로 조사되었다(Table 1).

3. 결과 및 고찰

3.1 강우유출수의 특성

Fig. 7에는 강우시 모니터링 결과를 도시하였다. 모든 오염물질 항목에서 일반적인 불투수면에서 발생하는 현상과 마찬가지로 강우초기 높은 오염물질이 유출되는 초기강우 유출 효과가 발생하였다.

Fig. 8에는 강우유출수의 시간에 따른 연속채취 및 종합 시료 결과를 비교하여 나타내었다. 전반적으로 종합채취 시료의 오염물질 농도가 침강지에 남아있던 미량의 퇴적물로 인해 높은 수준을 보였으나 TSS는 50mg/L, COD는 90mg/L, TN은 4mg/L, TP는 0.2mg/L 수준으로 유사한 결과가 나타났다.

Fig. 9에는 총 13회의 강우사상에 대한 모니터링 결과를 요약하여 제시하였다. TSS 농도범위는 25 ~ 368mg/L, S.D.는

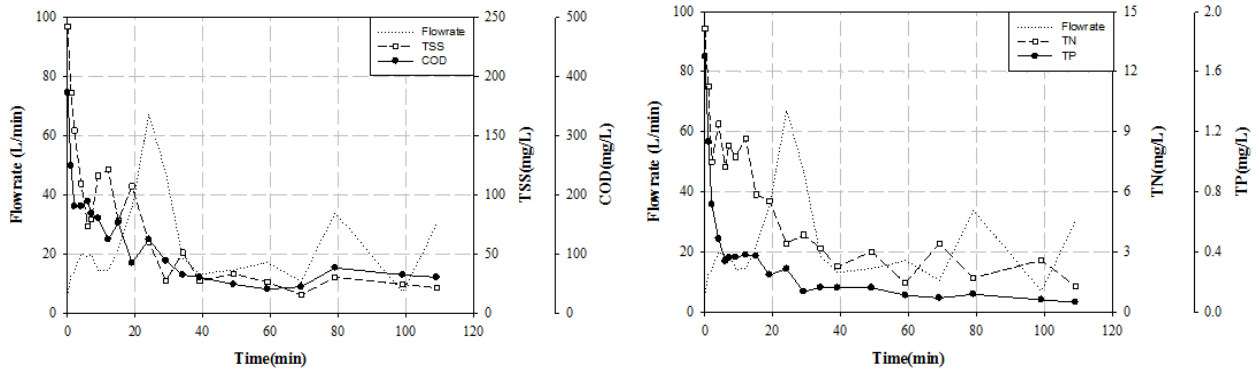


Fig. 7. Pollutograph of the rainfall monitoring.

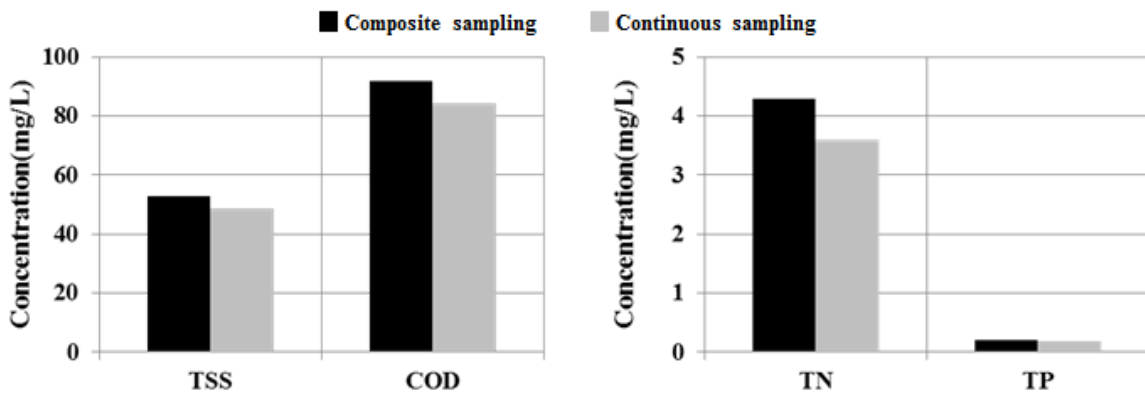


Fig. 8. Comparison of discrete continuous samples and composite sample EMC concentrations.

Table 2. Result of T-test between rainfall characteristic and pollutant

		TSS	COD	TN	TP
Rainfall depth	Correlation coefficient	0.498	-0.045	0.356	0.366
	Significant probability	0.084	0.885	0.232	0.219
	N	13	13	13	13
ADDs	Correlation coefficient	0.018	0.673	0.089	0.180
	Significant probability	0.953	0.012	0.772	0.557
	N	13	13	13	13

135±117mg/L이었다. COD는 40 ~ 196mg/L (평균± S.D. 94±51mg/L)로 분석되었다.

TN은 4.3 ~ 16.9mg/L (평균± S.D. 8.9±3.8mg/L)로 분석되었으며 NH₄-N과 NO₃-N은 각각 0.2 ~ 5.1mg/L (평균± S.D. 1.0±1.4mg/L), 0.2 ~ 2.1mg/L (평균± S.D. 1.0±0.6mg/L)로 나타났다. TP와 PO₄-P는 각각 0.13 ~ 0.90mg/L (평균± S.D. 0.33±0.22mg/L), 0.01 ~ 0.11mg/L (평균± S.D. 0.04±0.03mg/L)로 분석되었다.

각각의 강우사상별 오염물질 농도는 큰 폭의 차이를 보였으며 강우량, 강우강도, 선행건기일수 등 도로에 퇴적물의 퇴적 및 이동에 영향을 주는 다양한 인자의 영향으로 생각된다.

대부분의 비점오염 저감시설의 경우 기후적 요건(강우량, 선행건기일수 등)에 영향을 받아 저감효율이 극심한 차이를 나타낸다(Park et al., 2016). Jung et al. (2008)에 의하

면 TSS, TN, TP 등의 오염물질에 영향을 주는 인자는 강우량으로 분석되었으며 COD는 선행건기일수의 영향을 받는다고 보고하고 있다.

Table 2에는 강우유출수 농도에 영향을 줄 수 있는 강우량과 선행건기일수를 오염물질과의 T-test를 통해 유의성을 검토하였다. COD의 경우 강우 깊이와 R² = -0.045, 선행건기일수와 R² = 0.673 (P < 0.05)의 유의성을 보여 선행건기일수의 영향을 받는 것으로 분석되었다.

TSS의 경우 강우 깊이, 선행건기일수와 P<0.05의 유의성을 보이지는 않았으나 강우량에서 R² = 0.498 (P = 0.084)로 강우량의 영향을 받는 것으로 나타났다. TN과 TP의 경우도 TSS의 경우와 마찬가지로 강우량에서 각각 R²=0.356 (P = 0.232), R² = 0.366 (P = 0.219)로 선행건기일수 보다 강우량과 유의한 결과를 보였다.

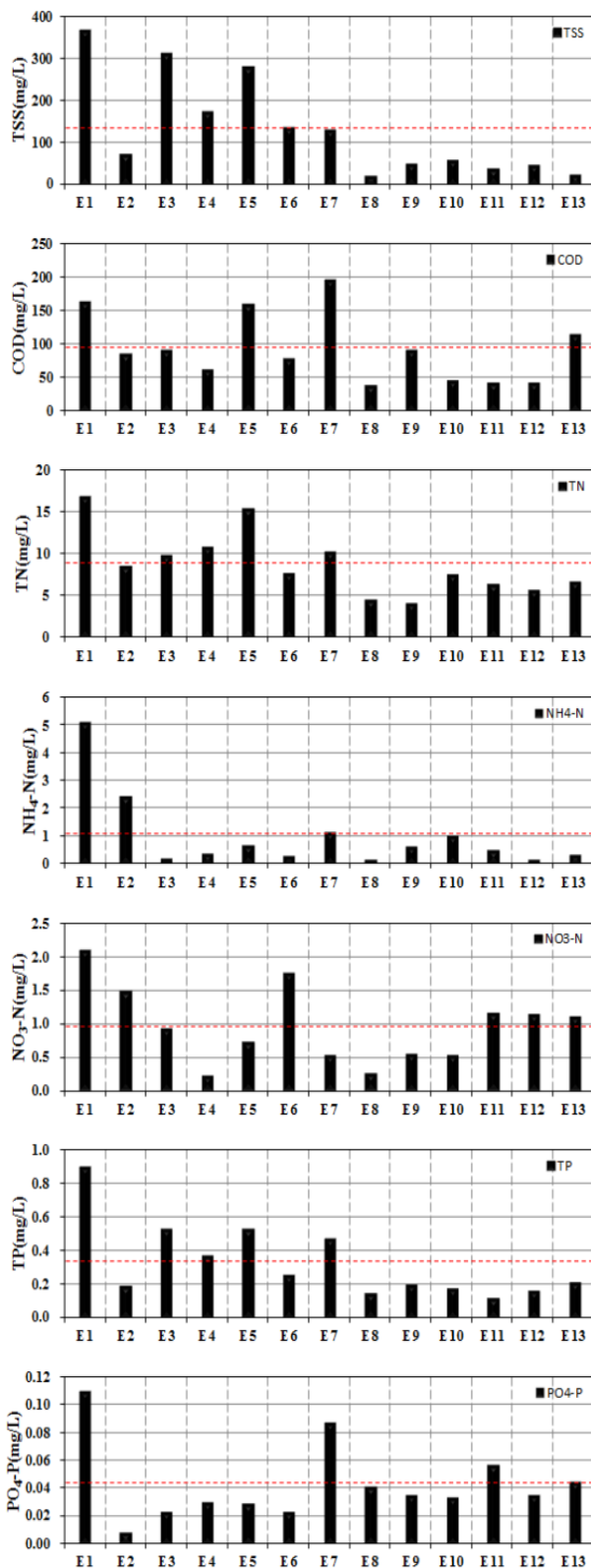


Fig. 9. Pollutant concentration of stormwater in the road (base on EMC)

이 결과는 Jung et al. (2008)의 결과와 일치하는 결과로서 본 연구에서도 TSS, TN, TP의 경우 강우량에 영향을 받으며 COD의 경우 선행건기일수의 영향을 받는 것으로 나타났다.

3.2 습지의 강우유출수 처리성능 분석

Fig. 10에는 13회의 강우사상 모니터링에서 발생된 강우 유출수의 유출경로를 분석하여 제시하였다. 13회의 모니터링에서 발생된 강우유출수의 총량은 176m³이었고 이 중 초기 강우유출수 31m³(18%)을 처리하고 지속 강우유출수 145m³(82%)는 수계로 직접방류(By-pass) 되었다.

Niu (2016)의 연구 및 Cheng et al. (2016)의 컴퓨터 시뮬레이션 연구에 의하면 초기 강우 유출수(누적강우유출고 5mm 이하)에 69%의 입자상 물질이 함유하고 있다고 보고 하였다. 강우량, 강우강도, 선행건기일수 등 강우인자에 따라 입자상 물질의 배출량이 상이하지만 본 연구는 단 18%의 강우유출수 처리만으로 약 70%에 가까운 입자상 물질을 포집/처리할 수 있는 기술로 도시지역에 소규모 인공습지를 설치할 경우 매우 효과적인 기술로 판단된다.

Table 3에는 강우유출수 모니터링 결과를 바탕으로 연구대상 시설의 저감효율을 제시하였다. TSS 저감효율은 71 ~ 99%로 평균 92%의 효율을 보였으며. COD, TN, TP는 각각 27 ~ 99% (평균 63%), 13 ~ 59% (평균 36%), 41 ~ 99% (평균 75%)로 분석되었다. 또한 표준편차의 경우에는 TSS ±8.5%,

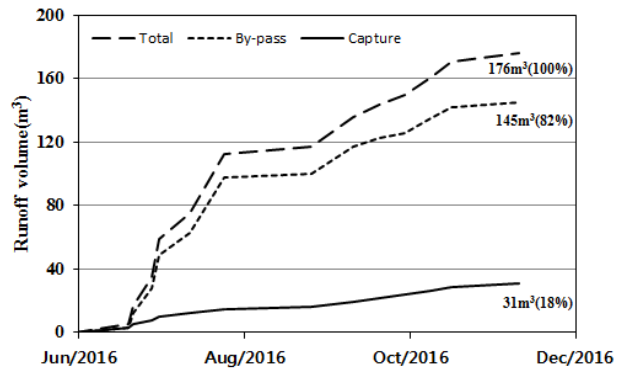


Fig. 10. Cumulative captured and by-pass runoff volume.

Table 3. Reduction efficiency of the this study (based on EMC)

Event	TSS(%)	COD(%)	TN(%)	TP(%)
E1	94.1	61.0	50.2	99.6
E2	80.1	59.1	13.3	41.2
E3	71.3	69.6	15.1	77.7
E4	97.9	68.8	48.5	88.5
E5	99.4	92.5	59.0	94.2
E6	99.3	95.0	39.3	89.4
E7	98.5	61.2	42.8	85.0
E8	88.0	40.0	14.8	55.1
E9	98.1	39.1	41.9	41.0
E10	98.4	83.3	35.5	50.5
E11	93.6	54.5	57.0	82.3
E12	93.7	27.3	32.0	90.0
E13	88.6	65.5	19.6	73.9
Mean	92.4	62.8	36.1	74.5
St.dev	8.5	20.1	16.1	20.5

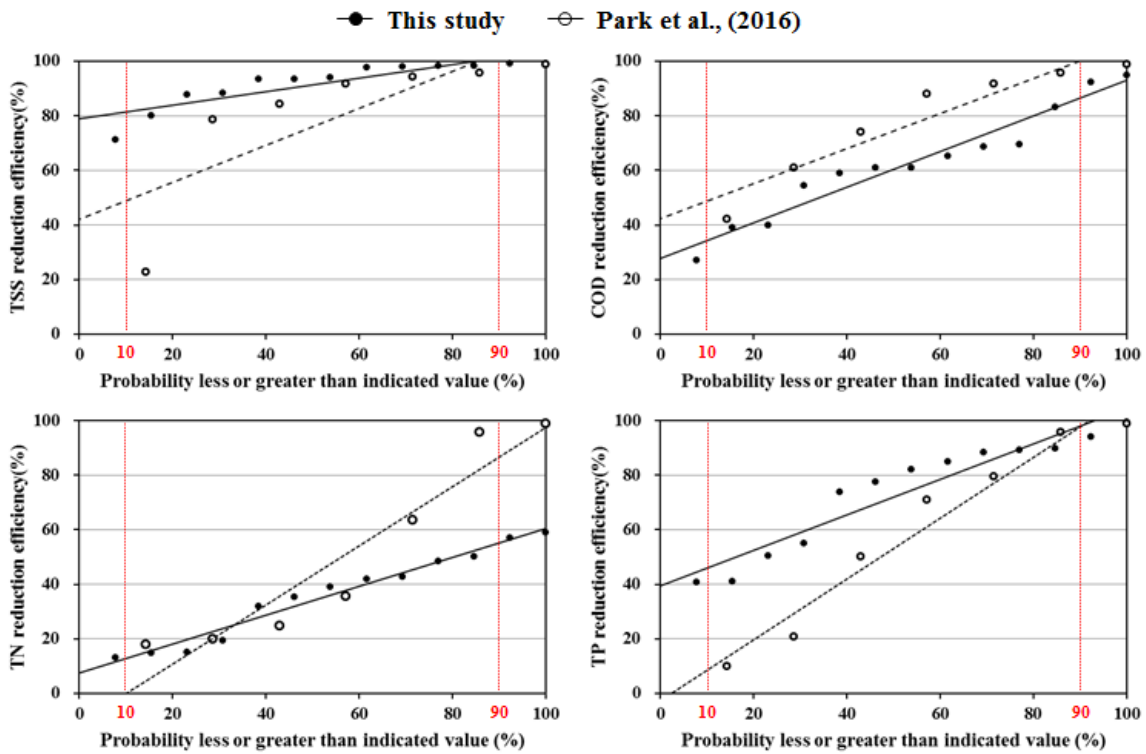


Fig. 11. Cumulative probability distribution of reduction efficiency.

Table 4. Overall treatment performance and stability of reduction efficiency

Parameter	P_{10}		P_{50}		P_{90}		P_{90}/P_{10}	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
TSS(%)	81.4	49.0	91.4	76.2	100.0	100.0	1.2	2.0
COD(%)	34.2	48.6	60.3	74.4	86.5	100.0	2.5	2.1
TN(%)	12.4	0.5	33.5	46.3	54.7	92.0	4.4	169.1
TP(%)	45.9	8.4	72.0	53.0	98.1	97.7	2.1	11.6

1* This study; Wetland; 2* Park et al., (2016): Infiltration trench

COD $\pm 20\%$, $\pm TN 16\%$, TP $\pm 20\%$ 로 비교적 안정적으로 처리가 이루어졌다.

본 시설의 경우 기존의 LID 시설과는 다르게 침투 기능을 배제한 시설이나 TSS, COD, TP 등의 오염물질 저감능력이 우수하였다. 그러나 TN의 저감효율이 저조하였는데 그 이유는 탈질에 필요한 외부탄소원이 부족하고 포화대의 DO 농도(평균= 8.1mg/L)가 높았기 때문으로 판단된다.

Fig. 11과 Table 4에는 비점오염저감시설의 성능 및 처리 안정도를 분석하기 위해 본 연구와 Park et al. (2016)이 수행한 도로 강우유출수 처리를 위한 침투도랑의 모니터링 저감효율을 바탕으로 확률 곡선 및 분포 값을 비교하였다.

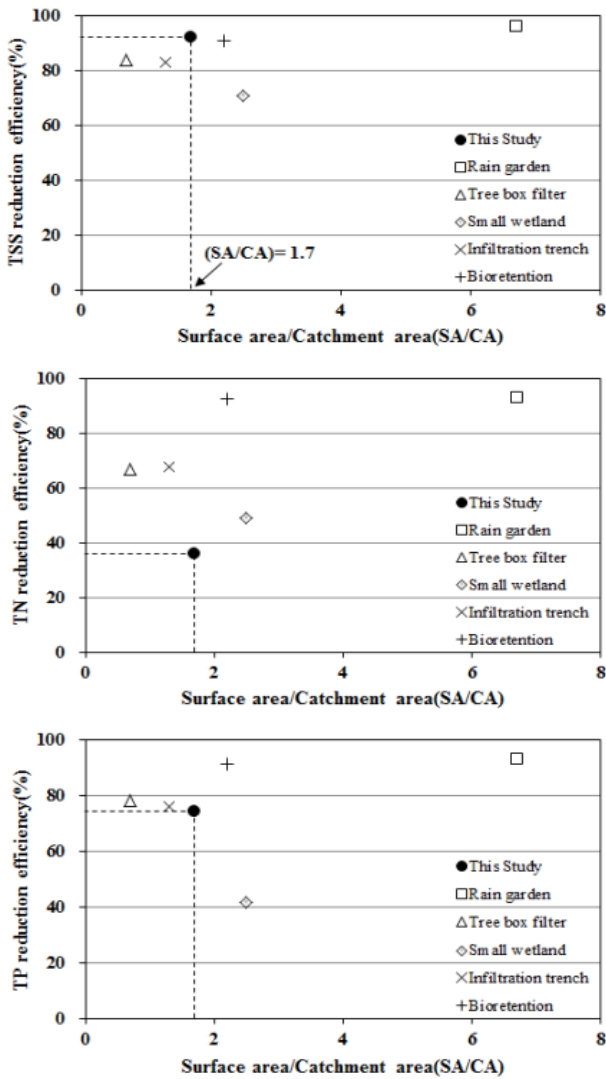
중간 값(median)에 해당하는 P_{50} 의 경우 본 연구에서 TSS, COD, TN, TP가 각각 91, 60, 34, 72%로 나타났으며 침투도랑에서는 TSS, COD, TN, TP가 각각 76, 74, 46, 53%로 산출되어 TSS, TP의 저감효율은 본 연구대상 습지에서 우수하였고 COD, TN은 침투도랑에서 우수하였다.

그러나 처리안정도(stability)의 척도인 P_{90}/P_{10} 을 살펴보면 COD는 유사한 수준을 보였으나 TSS, TN, TP에서 습

지의 성능이 월등하게 안정적인 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 초기 강우유출수 포착장치의 작동으로 일정하고 안정적인 처리가 이루어졌기 때문이다.

Fig. 12에는 비점오염 저감목적 LID 시설의 집수면적 대비 시설면적의 비율(SA: Surface Area/CA: Catchment Area)과 TSS, TN, TP의 저감효율 관계를 도시하였다. 비교대상 시설은 기존의 KICT(2013)과 MOE(2014)에 연구 결과인 빗물정원(Rain Garden), 나무여과상자 (Tree Box Filter), 소규모 인공습지 (Small Wetland), 침투도랑 (Infiltration trench), 식생체류지(Bioretention) 등과 비교하였다. 비교대상 시설의 SA/CA 범위는 0.7 ~ 6.7로 조사되었고 본 연구시설의 SA/CA는 1.7이었다.

시설별 오염물질의 저감효율을 살펴보면 TSS의 경우 71 ~ 96% 수준을 보였고, TN, TP는 각각 49 ~ 93%, 42 ~ 93%의 범위로 조사되었다. 본 연구시설의 경우 다른 시설에 비하여 SA/CA가 1.7%로 작았지만 TSS 저감효율이 92%로 우수하였고 TP의 경우에도 75%로 비교적 높은 수준의 저감효율이 나타났다. 그러나 TN의 경우 다른 LID시설에



KICT, 2013: Tree box filter, Infiltration trench
 MOE, 2014: Rain garden, Small wetland, Bioretention

Fig. 12. Comparison of pollutant reduction efficiency with other LID-BMP facilities

비하여 낮은 효율을 보였는데 그 이유는 다른 시설의 경우 대부분 침투기작으로 높은 유출저감 능력을 가지고 있어 모든 오염물질의 저감효율에 큰 영향을 미친 반면 본 연구 시설은 침투기작을 배제한 처리시설이었기 때문에 상대적으로 저감효율이 낮은 것으로 판단된다. 또한 본 시설은 2016년 설치된 시설로 다른 비교대상시설에 비하여 시설의 성숙도(식생의 활착 및 여재의 성숙도)가 낮기 때문으로 생각된다.

3.3 습지충진 여재에 따른 성능분석

본 절에서는 습지충진 여재에 따른 처리성능을 분석하기 위해 본 연구와 기존의 Niu(2016)에 의해 수행된 여재의 충진 단면도를 Fig. 13에 제시하였다. Fig. 13-(a)에는 섬유여재와 화분석 여재를 Fig. 13-(b)에는 유기성 여재인 우드칩과 화분석을 여재로 충진하였다.

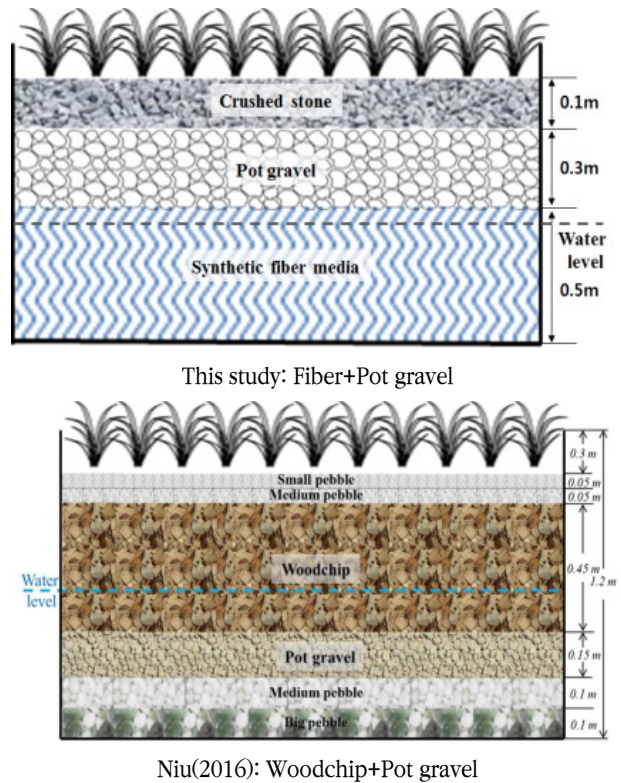


Fig. 13. Media layer of the synthetic fiber filled wetland and woodchip wetland

Table 5. Comparison of the storage capacity between different media wetland

	This study	Niu (2016)
Media	Synthetic fiber + Pot gravel	Woodchip + Pot gravel
Water depth	45cm	45cm
Media porosity	90%	50%
Storage capacity	2.5m ³	1.3m ³

Table 5에는 두 습지의 수질처리용량을 제시하였다. 침강지의 경우 비교대상 습지 모두 2.5m³을 저류할 수 있는 능력이 있으나 습지의 처리용량은 약 1.9배가량의 차이를 보였다. 그 이유는 본 연구가 포화대-불포화대가 공존하는 반포화 습지 시스템으로 내부 충전 여재의 공극에 따라 저류능력이 달라지기 때문이다. Table 4의 자료를 바탕으로 동일한 양의 강우유출수를 처리할 경우 합성섬유여재를 충전한 습지보다 우드칩 충전 습지의 규모가 약 1.8배가 크게 설계되어야 함을 의미한다.

Fig. 14에는 인공습지의 재순환 영향을 파악하기 위해 NDD(Number of Dry Days)에 따른 오염물질 농도를 제시하였다. TSS와 TP의 경우에는 우드칩을 충전한 습지에서 유입수의 오염물질 농도가 소폭 높게 나타났으나 NDD의 증가에 따라 오염물질이 감소하는 경향을 보였다. 그러나 유기물질(COD)의 경우에는 섬유여재를 충전한 습지에서는 NDD의 증가에 따라 오염물질 농도가 감소하였고 우드칩을 충전한 습지에서는 오염물질 농도가 오히려 증가하는

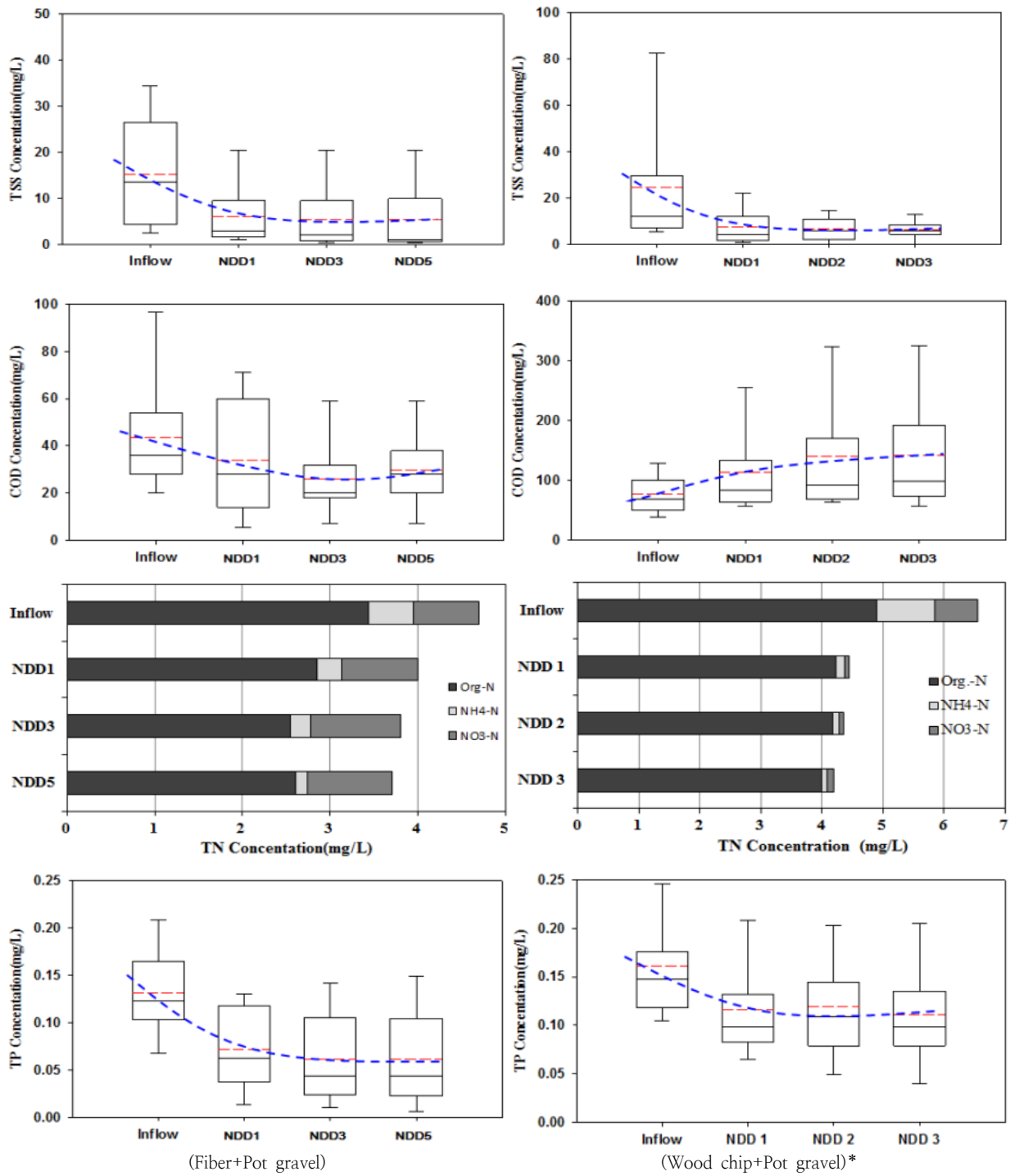


Fig. 14. Change of pollutant concentration with respect to NDD.

경향을 나타내었다. 그 이유는 Chen et al. (2012); Niu et al. (2013)의 연구결과와 마찬가지로 우드칩에서 용출되는 유기물질의 영향으로 판단된다.

질소(TN)의 경우 섬유여재를 충전한 본 연구에서 질산화의 척도인 TKN의 감소는 NDD의 증가에 따라 21%(NDD1), 30%(NDD3), 31%(NDD5)로 질산화는 적절하게 이루어졌으나 탈질은 척도인 TN의 감소는 미미한 수준이었다. 그러나 우드칩을 충전한 습지에서는 TN과 TKN이

감소하는 경향을 보였다. 그 이유는 내부에 충전된 우드칩에 산소전달이 원활하게 진행되어 질산화 반응이 활발하게 일어났고 우드칩 자체에서 용출되는 유기탄소가 습지내부의 탄소원으로 작용하여 탈질반응이 일어났기 때문이다.

3.4 인공습지의 식생성장 및 물질수지

Fig. 15에는 습지 상부에 식재된 창포의 줄기 수, 키, 생체량 등의 분석 결과를 제시하였다. 식생의 줄기 수, 키, 생

체량은 모두 이식을 시작한 6월 중순에서 8월 중순까지 식생의 과정에서 증가하였다가 이후 기온저감으로 성장이 둔화되는 시점에서부터 일정한 수준을 유지하였다.

Fig. 15(b)와 Fig. 15(c)에는 식생 성장 모델(Logistic model)을 이용하여 모니터링 값과 모델 산출값을 비교하였다. 상관분석결과 $P < 0.01$ 수준의 유의한 결과를 보였다. 또한 식생의 길이 및 생체량 성장률 상수는 0.06/day로 나타났다.

일반적인 비점오염저감 목적의 LID 시설은 강우활동으로 인해 시설에 저류된 강우유출수를 침투기작을 통해 저감시킨다. 그러나 본 연구대상 습지는 침투가 불가능한 지반에도 설치가 가능하도록 고안된 시설로 저류된 강우유출수를 재순환을 통하여 처리 후 방류하였다.

Fig. 16에는 강우활동이 없었던 비강우시 습지의 처리과정을 도시하였다. 습지에 설치된 재순환 펌프를 사용하여 하루 4회의 재순환을 통해 30일간 약 0.45m^3 (15L/day)이 증발산을 통해 저감되었다.

습지에서의 순환은 빗물을 재이용하여 식물의 성장을 도모하고 이로 인해 빗물 저감목적 정화시설의 경관성을 향상시키는 역할을 수행하였으며 또한 습지식생의 증식은 영양소 제거를 향상시키는 것으로 판단된다.

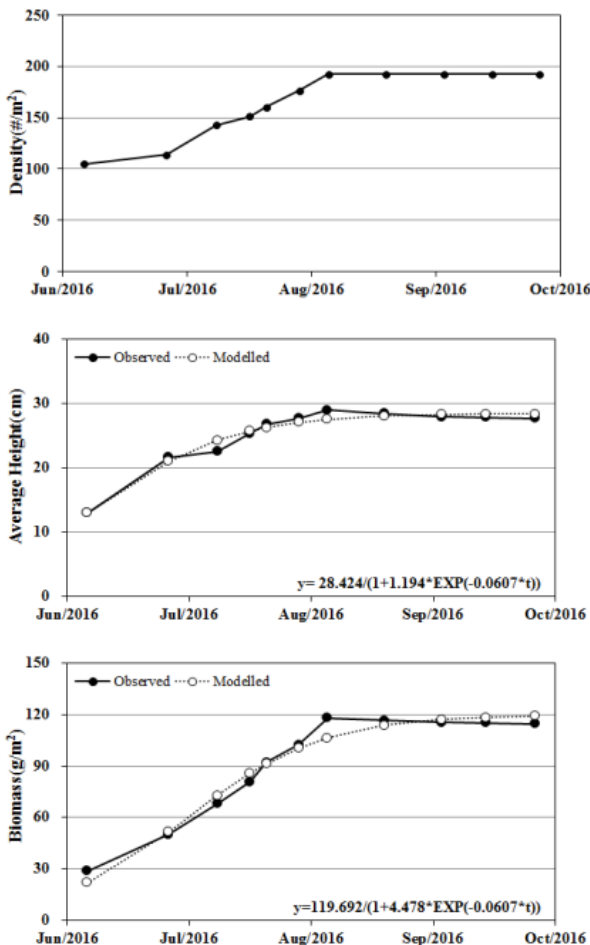


Fig. 15. Plant growth during the studied period.

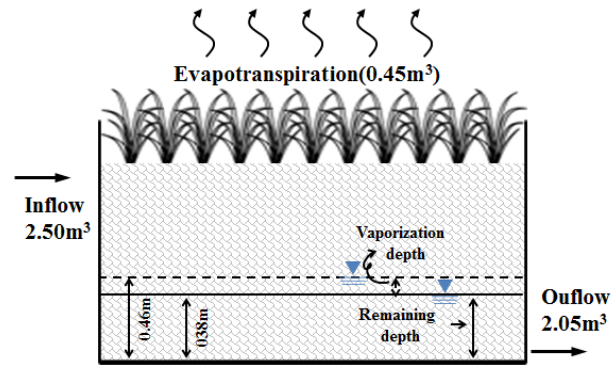


Fig. 16. Schematic diagram of the treatment in wetlands during dry days (For 30days).

Fig. 17에는 연구대상 인공습지의 물질수지 분석 결과를 제시하였다. 6개월 동안 총 13회의 강우사상에서 TSS는 4.4kg이 유입되었고 침강지에서 3.9kg이 제거되었으며 습지에서 0.1kg이 제거되어 최종 유출량은 0.4kg이었다. COD의 경우에는 3.1kg이 유입되었고 침강지에서 1.7kg이 제거되었으며 습지에서 0.4kg이 제거되어 1.0kg이 유출되었다.

TN은 291g이 유입되었고 침강지에서 106g이 제거되었으며 습지에서 16g이 제거되어 최종 유출량은 169g이었다. TP의 경우에는 10.9g이 유입되었고 침강지에서 6.6g이 제거되었으며 습지에서 2.3g이 제거되어 최종적으로 2.0g이 유출된 것으로 산출되었다.

Table 6에는 연구대상 습지와 Niu (2016)가 연구한 습지의 처리유량 및 오염물질의 저감량을 제시하였다. 본 연구대상 습지에서는 176m^3 중 31m^3 을 처리하여 약 18%의 초기강우유출수를 포집/처리하였고 Niu (2016)의 연구에서는 151m^3 중 36m^3 (24%)을 처리하였다. 강우량, 강우강도 등의 강우인자에 따라 포착량에 차이가 나타난 것으로 판단된다.

오염물질 저감량을 살펴보면 TSS의 경우 본 연구대상 습지에서 91%가 저감되었고 Niu(2016)의 연구에서는 약 68%가 저감되었다. 앞서 언급하였듯이 강우인자에 따라 유입되는 오염물질의 양이 다르기 때문에 인공습지 상호간의 성능평가는 불가능하나 저감효율 측면에서는 합성섬유를 충전한 본 연구에서 우수한 효율을 보였다.

COD의 경우에는 본 연구대상 습지에서 70%가 제거되었고 Niu(2016)의 연구에서는 15%의 제거효율을 보였다. COD의 경우에는 유입 오염물질의 양이 적었음에도 불구하고 합성섬유를 충전한 본 연구대상 습지에서 저감량 및 저감효율이 우수하였다. 그 이유는 앞서 언급하였듯이 우드칩에서 용출되는 유기물질에 의해 습지내부에서 오히려 COD의 양이 증가하였기 때문으로 판단된다.

TN의 경우 본 연구대상 습지에서 42%가 감소하였고 Niu(2016)의 연구에서는 62%가 저감되었다. COD와 반대로 우드칩을 충전한 습지에서 유입 오염물질량이 적었음에도 불구하고 저감량 및 저감효율이 높았다. TP의 경우 2개의

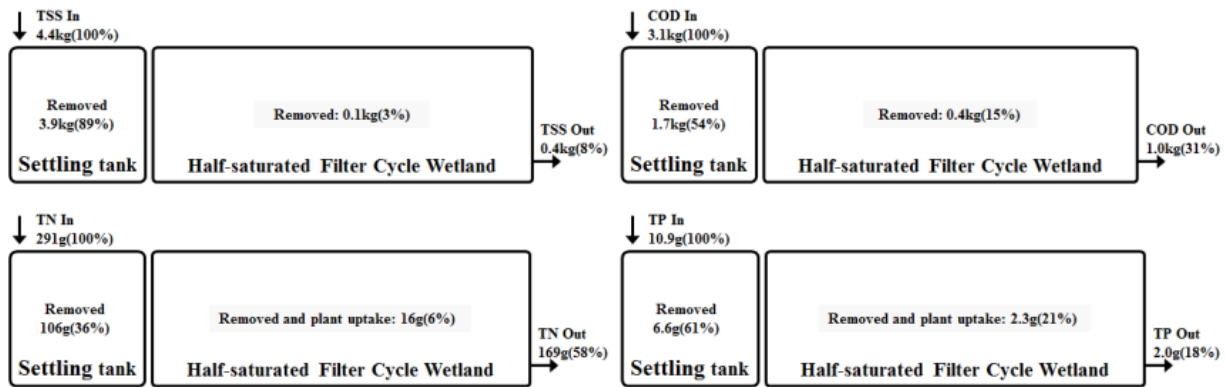


Fig. 17. Mass balance of this study

Table 6. Comparison of treated volume and pollutant mass of wetland using different media

	This study(fiber)		Niu (2016) (woodchip)	
	Input	Reduction	Input	Reduction
Treated volume(m ³)	176	31(treated)	151	36(treated)
TSS (kg)	4.4	4.0	8.7	5.9
COD (kg)	3.1	2.2	5.9	0.9
TN (g)	291	122	277	173
TP (g)	10.9	8.9	23.6	21.0

연구대상 습지에서 각각 81%와 89%가 제거되었다. TSS와 마찬가지로 강우인자에 영향을 받아 오염물질 유입량이 상이한 것으로 판단되며 저감효율 측면에서는 우드칩을 충전한 습지에서 우수하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 실증규모의 반포화 순환식 인공습지의 처리 특성 및 성능을 분석하고 다른 LID-BMP와 비교 평가하였다. 본 연구대상 습지와 침투도랑의 처리성(performance)과 처리안정도(treatment stability)를 분석한 결과 초기 강우 유출수 포착장치의 구비로 인하여 습지로 유입되는 오염물질의 농도가 높았음에도 불구하고 일정한 유량의 유입으로 처리성능 및 안정도가 크게 향상된 것으로 나타났다. 따라서 초기강우 유출수의 포착은 안정적인 처리뿐 만 아니라 경제적인 설계 및 유지관리에 기여할 것으로 사료된다.

또한 연구대상 습지와 다른 침투형 LID 시설의 집수면적 대비 시설면적의 비율(SA/CA)과 오염물질 저감효율 관계를 비교한 결과 연구대상 습지에서 SA/CA이 작았지만 TSS, TP은 비교적 높은 수준의 저감효율을 보였다. TN의 경우 다른 LID 시설에 비하여 낮은 효율을 보였다. 따라서 질소의 저감을 주 목적으로 설치될 LID 시설의 경우에는 시설 내부에 탄소원을 공급할 수 있는 여재인 우드칩을 추가적으로 충전하여 운전할 경우 질소저감에도 우수한 효율을 보일 것으로 생각된다. 본 연구시설은 침투기작을 배제한 저류형 시설로 공극폐색으로 인한 여재교체 필요성이

상대적으로 적기 때문에 빗물의 재이용 및 경관성이 강조 되는 지역에 적합한 공법으로 판단된다.

습지 내부 충전된 여재(합성섬유여재와 우드칩)에 따른 성능분석결과 수질처리용량(water quality volume) 측면에서는 공극율이 큰 합성섬유 여재가 약 2배 정도의 많은 강우유출수를 저류하고 처리할 수 있으므로 경제적인 측면에서 유리하다. 그러나 질소제거가 필요한 지역에서는 여재 자체에서 탄소원의 공급이 이루어지는 유기성 여재의 적용이 타당하다.

본 연구대상 습지는 강우활동이 적은 건기에도 습지에 설치된 재순환 펌프를 이용해 식생의 원활한 성장을 도모할 수 있고 동시에 도시경관을 향상시키면서 식생증식 및 여과 및 생물학적 기작을 통하여 오염물질을 추가적으로 제거할 수 있다는 측면에서 장점을 갖는다. 그러나 펌프시설의 운영에 따른 전력비 및 전력원의 확보가 필요하다는 단점을 가지고 있음을 밝혀둔다.

사 사

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2016년도 산학협력 기술개발사업 (No. C0395354)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다

References

American Public Health Association (APHA). (2012). *Standard*

- methods for the examination of water and wastewater*, APHA, Washington, DC
- Chen Y., Guerra H., Min K., Kim Y. (2012). Operation of the vertical subsurface flow and partly submersed stormwater wetland with an intermittent recycle, *Desalination and Water Treatment*, 38, pp. 378–388.
- Cheng J., Yuan Q., Kim Y. (2016). Evaluation of a First-flush Capture and Detention Tank Receiving Runoff from an Asphalt-paved Road, *IWA Regional Conference on Diffuse Pollution and Catchment Management*, Ireland, 23rd – 27th Oct., pp. 72–92.
- Cho S., Kang M., Kwon H., Lee J., Kim S. (2013). Evaluation of the Effectiveness of Low Impact Development Practices in an Urban Area: Non-point Pollutant Removal Measures using EPA-SWMM, *J. of Korean Society on Water Environment*, 29(4), pp. 466–475. [Korean Literature]
- Choi H., Hong J., Lee S., Kim L. (2016). Assessment of Salt Resistance and Performances of LID Applicable Plants, *J. of Korea Wetlands Research*, 18(2), pp. 201–207. [Korean Literature]
- Jeon J., Seo S., Park C. (2016). The Effect of Connected Bioretention on Reduction of Surface Runoff in LID Design, *J. of Korean Society on Water Environment*, 32(6), pp. 562–569. [Korean Literature]
- Jung S., Park I., Ha S. (2008). Identifying dominant parameters of storm-sewer-overflows in separate sewer system, *J. of Korea Wetlands Research*, 10(2), pp. 75–85. [Korean Literature]
- Kang M., Rhew D., Choi J. (2014). Policies and Research Trends on Non-point Source Pollution Management in Korea, *Environmental policy*, (22)4, pp. 141–167. [Korean Literature]
- Kim LH, Lee BS, Kwon SY. (2005). Optimum Capacity of Retention Basin for Treating Nonpoint Pollutants and Its Removal Efficiency in Industrial Complex Areas, *J. of Korea Wetlands Research*, 7(3), pp. 75–85. [Korean Literature]
- Korea Institute of Construction Technology (KICT). (2013). *Monitoring of Road Nonpoint Source Pollution Reduction Facility Demonstration Project*, Korea Institute of Construction Technology, Korea [Korean Literature]
- Lee J., Lee Y., Choi J. (2014). Analysis of Water Cycle Effect according to Application of LID Techniques, *J. of Korea Wetlands Research*, 6(3), pp. 411–421. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2008). *Certified Analytical Methods of Water Quality*. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2012). *The 2nd Phase NPS Management Measures*, Ministry of Environment, Korea. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2013). *Guidelines for Low Impact Development(LID) Technology elements*, Korea. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2014). *Manual for the BMPs Installation, Management and Maintenance*, Ministry of Environment, Korea. [Korean Literature]
- Niu S., Guerra H., Chen Y., Park K., Kim Y. (2013). Performance of a vertical subsurface flow (VSF) wetland treatment system using woodchips to treat livestock stormwater, *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15, pp. 1553–1561.
- Niu S. (2016). *Vertical and Innovative LID-Wetland Treating Stormwater from Paved Road*, Doctor's Thesis, Hanseo University, Seosan, Korea.
- Park K., Kang H., Kim Y. (2016). Evaluation of the Performance of Woodchip-filled Infiltration Trench Treating Stormwater from Highway, *J. of Korea Wetlands Research*, 18(2), pp. 183–193. [Korean Literature]