

## LID시설에서의 오염물질 및 탄소흡수능에 식생이 미치는 영향

홍진·김유현·길경익<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 건설시스템공학과

### Effects of Vegetation on Pollutants and Carbon Absorption Capacity in LID Facilities

Jin Hong·Yuhyeon Kim·Kyungik Gil<sup>†</sup>

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea

(Received : 6 May 2022, Revised : 17 May 2022, Accepted : 20 May 2022)

#### 요약

도시화로 인해 토양의 불투수면적이 증가함에 따라 도시의 물순환 체계가 악화되었다. 이러한 물 문제를 해결하기 위해 설치하는 저영향 개발(Low Impact Development, LID) 시설의 기존 가이드라인이나 선행 연구에서는 공학적 측면이 조정적 측면보다 중시되는 것이 실정이다. 본 연구에서는 식생체류지의 강우 유출과 오염물질 저감 능력에서 식생이 끼치는 영향과 식재의 경제적인 측면을 파악하여 오염물질 저감에 공학적으로 그리고 조경적으로 가장 적합한 식생체류지 설계 모델을 제시하고자 하였다. 모니터링 대상이 되는 전주 서곡 공원의 식생체류지 인공 강우 모니터링 결과와 식생의 강우 유출 및 오염물질 저감 성능에 관한 문헌 조사를 바탕으로 해당 지역 식생 종별 오염물질 및 탄소 저감 효율을 분석한 결과, 비용 대비 오염 저감 효율이 가장 좋은 식종은 부처꽃이며 탄소 저감에 탁월한 식생은 갯버들이었다. 하지만 이 두 가지 식생만으로 설계하고자 한다면 생물 다양성과 같은 부분에서 위험을 안고 갈 수밖에 없다. 다양한 식재를 고려할 시, 부처꽃과 같은 초본류는 고사 및 병해충에 의해 교체될 수 있기에 초기 식재 비용은 높지만 유지관리 측면에서 유리한 목본식물인 갯버들을 주변 환경과 여건에 따라 혼합 식재하는 방안도 필요하다. 본 연구에서 도출한 결론을 토대로 LID 시설 식생의 종별 오염 저감과 탄소저장량을 고려 시 참고자료가 될 수 있다.

핵심용어 : 강우 유출, 물순환, 식생체류지, 저영향 개발, 탄소 저장

#### Abstract

As the impermeable area of soil increases due to urbanization, the water circulation system of the city is deteriorating. The existing guidelines for low impact development (LID) facilities installed to solve these water problems or in previous studies, engineering aspects are more prominent than landscaping aspects. This study attempted to present an engineering and landscaping model for reducing pollutants by identifying the effects of vegetation on rainfall outflows and pollutant reduction in bioretention and the economic aspects of planting. Based on the results of artificial rainfall monitoring at Jeonju Seogok Park and the literature on vegetation rainfall runoff and pollutant reduction performance, the best vegetation for reducing pollution compared to cost was *Lythrum salicaria* L and *Salix gracilistyla* Miq. was the best vegetation for carbon storage. If you insist to design plants with only these two plantation, there is no choice but to take risks such as biodiversity. Herbaceous plants such as *Lythrum salicaria* L can be replaced by death of the plants or pests if considered planting various plants. The initial planting cost could expensive, but it is also necessary to mix and plant *Salix gracilistyla* Miq, which are woody plants that are advantageous in terms of maintenance, according to the surrounding environment and conditions. Based on the conclusions drawn in this study, it can be a reference material when considering the reduction of pollution by species and carbon storage of vegetation in LID facilities.

Key words : Rainfall runoff, Water cycle, Bioretention, LID, Carbon Storage

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea  
E-mail: [kgil@seoultech.ac.kr](mailto:kgil@seoultech.ac.kr)

• **Jin Hong** Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea / Master's course([jinh0615@daum.net](mailto:jinh0615@daum.net))  
• **Yuhyeon Kim** Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea / Undergraduate student([18100720@seoultech.ac.kr](mailto:18100720@seoultech.ac.kr))  
• **Kyungik Gil** Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea / Professor([kgil@seoultech.ac.kr](mailto:kgil@seoultech.ac.kr))

# 1. 서론

도시화와 산업화의 영향으로 각종 주거지와 건축물을 세우는 등 환경을 개발하면서 도시의 자연환경은 크게 변화하였고 도시를 흐르는 하천의 새로운 유출 양상을 불러일으키는 원인이 되었다(Moon et al., 2006). 임야와 수계를 제외한 국토의 22.4%가 빗물이 스며들지 못하는 불투수면적인 것으로 조사되었다(Choi and Cho., 2013). 불투수 면적의 증가로 인해 우수가 토양에 침투하지 못함으로 발생하는 문제점들은 비점오염물질 증가에 따른 수질오염, 도심 침수 발생빈도 증가, 갈수기 심화 등이 있으며 이로 인해 물순환 체계가 악화되고 있다(Carle et al., 2005; Roy et al., 2003; Wang et al., 2001).

이와 더불어 기후변화로 인해 강수량과 강수강도는 증가하는 반면 강수 시간은 감소하는 양상을 띠고 있다. 국립기상과학원 기후변화 보고서와 기상청 관측자료에 따르면 우리나라의 연 강수량과 강수강도는 지난 10년간 각각 16.3mm, 0.18mm/일 증가하였으며, 아열대 지방의 ‘스콜(Rain Squall)’과 같은 국지성 호우의 발생 빈도 1970년대 대비 1.6배가 늘어났다고 한다. 이러한 기후의 변화로 인해 도심 내의 오염물질이 축적되는 기간이 길어지고 강우량이 단기간 집중되어 하천 유입 오염부하의 증가 또한 대두되고 있다. 특히 도시 지역에서 발생한 강우 유출수는 도로와 같은 불투수면적의 초기세척효과로 인해 고농도의 입자상 물질, 유기물질과 중금속 등이 함유된 강우 유출수는 인근 수계로 유입되어 수질오염을 일으킬 수 있다(Kim et al., 2006; Lee et al., 2008). 이러한 도시 물 환경 문제를 해결하기 위해 저영향 개발(Low Impact Development, LID)시설을 설치하여 기반 시설이 자연의 물순환에 미치는 영향을 최소화하며, 도시 불투수면적으로 인한 비점오염 발생을 완화할 수 있다. 저영향 개발 시설(LID)의 최신 연구 동향은 미국환경보호청(United States Environmental Protection Agency, EPA)에서 개발한 SWMM 모델링 프로그램을 활용한 LID 시설의 강우 유출 저감 성능과 오염물질 저감 성능 예측 연구나 LID 시설 내 식생 종류별 영양염류 함량 변화로 식생의 오염 저감 성능 분석 연구 등 다양한 연구가 진행되고 있다(Lee and Gil., 2021; Lee et al., 2021). 이 중 주거단지와 공원, 도로 옆 화단 등 다양한 곳에 설치할 수 있으며 범용성이 높은 식생체류지는 선행 연구에서 다양한 강우강도에서 평균 유출 저감률을 약 85%, 오염물질 지표인 TSS 제거율은 95% 이상을 보일 정도로 유출과 오염 저감에 효과적이다(Lee and Gil., 2020).

LID 시설은 다양한 물리화학적 및 생물학적 기작으로 오염물질을 저감하지만 유입되는 오염물질의 다양성, 해당 지역에 적용가능한 토착식물군 문제와 여재의 다양성 등으로 인하여 비용 효율적 LID 기술의 설계는 쉽지 않다. 특히 식생은 함수량 변동이 심하며, 오염물질의 유입량이 많고 그 농도가 짙은 LID 시설의 특성을 고려하여 식재할 수 있는 식물 종을 엄선하여야 하므로 충분한 연구를 수행하여 데이터를 쌓은 후 설계요소에 도입하여야 한다(Hong and Kim., 2016).

그러나 기존 저영향 개발(LID) 시설의 가이드라인이나 선행 연구에서는 식재 권장 수목의 분류나 LID 시설 내 식재된 식

생의 오염물질 저감 성능 분석 연구가 있을 뿐 식생 종별 오염물질 저감 효율이나 지역 특성을 고려한 식재 권장 사항은 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 모니터링 대상지 내 식생체류지의 오염물질 저감 능력에서 식생이 끼치는 영향과 식재의 비용적 측면을 파악하여 식생체류지 설계 시 오염물질 저감에 공학적으로 가장 적합 모델을 제안하고자 한다.

# 2. 연구방법

## 2.1 식생체류지 설계 면적 및 용량

전주시 서곡동 내에는 총 4개소의 식생체류지가 설치되어 있으며 위치한 지점에 따라 시설의 용량과 면적을 달리 설계하였다. 식생체류지를 설치함으로써 토양에 의한 여과, 식생에 의한 흡착 등에 따라 강우유출량 저감과 오염물질 저감과 같은 다양한 효과가 예측된다. 이 LID시설이 위치한 곳은 대부분 공원 또는 경관녹지가 있는 공간으로 식재할 식생과 도심 내의 녹지 공간 확보를 꾀하는 동시에 생태계 형성이 가능하도록 경관을 조성하였다. Fig. 1은 모니터링 대상 식생체류지의 항공



Fig. 1. Sky View of Monitored Area.

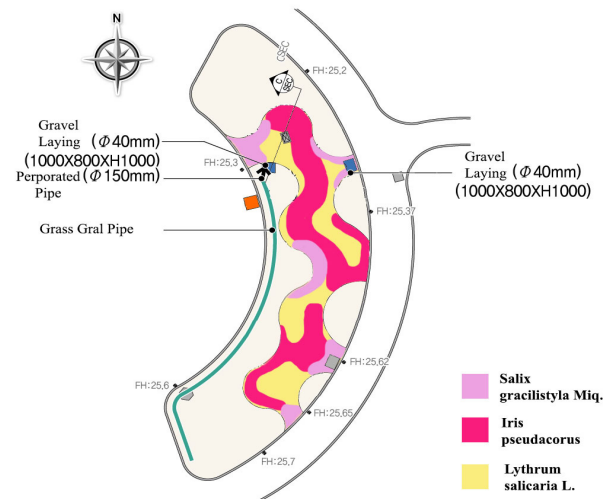


Fig. 2. Plantation arrangement in Jeonju Bioretention.

사진으로 전주 서곡지구 경관녹지 지역에 위치한 LID 시설로써 인근 공원과 이어져 있다. 해당 식생체류지의 설계 집수면적은 약 1,950m<sup>2</sup>이며 대상지의 주요 유입 오염물질은 공원 내 인도와 불투수면적에 축적된 부유물질과 유기물질, 영양염류, 중금속 및 오일류 등이 있다. 식생체류지의 구조는 식생토층과 자갈층 순서대로 적층되어 있으며 자갈층 구간에 유공관이 설치되어 있다. Fig. 2는 전주 식생체류지 내 식재 설계도로 보다 자세한 시설 구조와 시설 내 식생들의 분포도를 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯 해당 식생체류지의 주요 식생은 갯버들(*Salix gracilistyla* Miq.), 노랑꽃창포(*Iris pseudacorus*), 부처꽃(*Lythrum. salicaria* L.)가 있으며, 기타 식생으로는 옥잠화, 물레나물, 노루오줌 등의 식생들이 식재되어 있다.

### 2.2 식생체류지 모니터링 방법

식생체류지를 대상으로 하는 모니터링은 총 12회 진행되었으며, 강우는 인공 강우를 사용하여 모니터링을 진행하였다. 시료 채취 개수는 유입·유출수를 전부 취수할 수 있었던 1~3, 9회차 모니터링을 제외하고 각각 12개의 시료를 채취하였으며 1회차 모니터링은 24회, 2회차 모니터링은 31회, 3회차 모니터링은 36회, 9회차 모니터링은 유입과 유출 각각 12번 취수

하여 총 24개의 시료를 채취하였다. 설계상 식생체류지의 총 집수면적은 1,950m<sup>2</sup>로 설계되었으나, 집수면적 대부분이 투수 블록이 배치되어 있었다. 해당 면적에 내린 강우는 바로 침투 및 침하가 일어나 우수의 초기세척효과로 인한 오염 유입이 이루어지기 어려워 실 강우로는 식생체류지의 오염 저감을 측정하는 데 한계가 있었다. 따라서 강우 모니터링 시 물에 준설토를 혼합한 인공 강우를 사용하여 유입 오염을 가하였으며 결과 계산 시 집수면적은 실질 식생체류지만의 시설면적인 106m<sup>2</sup>로 설정하였다. 식생체류지의 시설 특성상 유입관이 있지 않기 때문에 유입수 모니터링은 불가하였으며, 유입 부하량과 유입 EMC 등 원래라면 초기세척효과로 인해 발생해야 할 유입 오염은 인공 강우의 유입량과 오염물 농도로 계산하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 식생체류지 모니터링 결과

전주시에 설계한 식생 체류지의 총 12회 모니터링 결과와 물수지 분석 결과를 Table 1와 2에 기재하였다. 12회 모니터링 동안 강우량은 3.7~87.1mm, 강우강도는 4.1~32.9mm/hr

Table 1. Rainfall characteristics of Bio Retention-1

Event	Antecedent dry days (day)	Accumulated rainfall (mm)	Rainfall duration (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	Times to peak flow (hr)
1	6	87.1	2.65	32.9	2
2	4	42.5	3.98	10.7	3.5
3	7	63.8	4.22	15.1	3.1
4	-	3.7	-	4.1	-
5	-	5.6	-	6.1	-
6	-	12.5	-	13.6	-
7	-	20.9	-	22.8	-
8	-	28	-	30.6	-
9	0	14.7	1.34	11	0.6
10	9	60.8	6.1	10	5.7
11	15	70	5.8	12	5.4
12	3	42.5	11	3.86	6

Table 2. Rainfall characteristics of Bio Retention-2

Event	Runoff duration time (hr)	Influent volume (m <sup>3</sup> )	Storage capacity (m <sup>3</sup> )	Effluent volume (m <sup>3</sup> )	Effluent reduction efficiency (%)
1	1.1	19.1	16	3.1	83.6
2	1.8	9.3	8.2	1.1	88.3
3	2	14	11.8	2.2	84.1
4	-	0.4	0.4	0	100
5	-	0.6	0.6	0	100
6	-	1.3	1.3	0	100
7	-	2.2	2.2	0	100
8	-	2.97	2.27	0.7	76.4
9	0.3	3.23	0.81	2.42	21
10	5.7	6.45	5.96	0.49	92.4
11	4.7	7.42	6.95	0.47	93.7
12	6	4.51	2.87	1.64	63.6

까지 넓은 범위에 분포했다. 전주시에 설치한 식생 체류지의 설계 강우량은 30mm이며 모니터링 강우량의 평균값은 35.8mm로 설계 강우량에 비해 1.2배가량 큰 값을 보였다. 선행 건기 일수는 0~18일 사이로 형성되어 있다. 침투 유출량 발생 시간은 최소 0.8 hr 최대 6.0 hr, 유출 지연 시간은 최소 0.3 hr 최대 6.0 hr 사이를 보였다. 침투 유출 저감률은 59.20~71.50%로 넓은 범위에 걸쳐 분포하였고 선행 건기 일수가 0일인 9번 모니터링 값이 가장 낮은 -59.20%를 보였다. 우수 유출 저감률은 21 ~ 93.7% 사이에 분포했고, 평균은 83.60%, 중간값은 88.30%이다. 12번의 모니터링 중 강우량이 40mm 이상인 강우 사상에서는 거의 80% 이상의 강우 유출 저감률을 보였다. 또한 강우강도가 10mm 이상이었던 강우 사상에서는 9회차를 제외한 모든 모니터링 회차에서 강우 유출 저감률 70% 이상을 보였다. 선행 건기 일수가 길수록 침투 유출량 발생 시간과 유출 지연 시간이 길어졌으며, 우수 유출 저감률 또한 높아지는 것을 확인했다. 9회차 모니터링은 선행 건기 일수가 0일로, 연달아 발생한 강우 사상으로 인해 식생 체류지가 이미 우수로 포화하여 침투 유출량 발생 시간과 유출 지연 시간 모두 가장 짧았으며 침투 유출 저감률과 우수 유출 저감률 또한 낮았던 것으로 파악된다. 또한 12회차 모니터링의 경우 이전 모니터링에 비해 유출 저감률이 감소한 것을 확인할 수 있었는데 이는 모니터링 기간 중 식생체류지 상부의 식재 교체 공사 이후 토양 조건의 변화에 의한 것이라 판단된다.

Table 3에서는 식생체류지 모니터링에서 이벤트별 유입·

유출 오염 농도를 정리하였다. 본 모니터링 결과를 통해서 유입 오염 부하가 일정 수준 있어야 오염 저감 효율이 향상하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

### 3.2 식생체류지 오염제거 성능에 미치는 식생효과

갯버들, 노랑꽃창포 그리고 부처꽃을 대상으로 한 선행 논문들에 따르면 실험에 사용한 식생들마다 각기 다른 일정한 제거율을 나타내고 있다. 식생들의 TN과 TP의 제거율을 확인하고자 다른 농도의 용액들로 관수를 하였고 용액들의 농도가 높을수록 제거율이 더욱 높게 나타났다. Fig. 3과 4는 식생 체류지의 오염물질 저감 정도와 강우강도의 모니터링 결과를 그래프로 정리한 것이다.

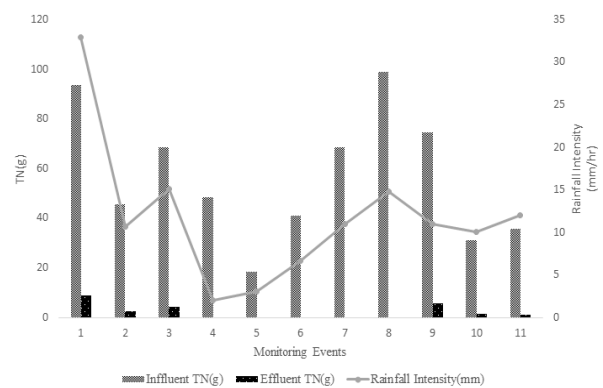


Fig. 3. Comparison between influent and effluent TN.

Table 3. Concentration of inflow and outflow pollutant of monitoring

Event	Influent /effluent	Rainfall (mm)	Rainfall intensity (mm/hr)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
1	Influent	87.1	32.9	3.21	0.347
	Effluent			2.75	0.14
2	Influent	42.5	10.7	6.58	0.712
	Effluent			2.36	0.07
3	Influent	63.8	15.1	4.38	0.474
	Effluent			1.96	0.15
4	Influent	1.8	2.0	2.39	0.059
	Effluent			Not occurred	Not occurred
5	Influent	2.7	3.0	2.38	0.064
	Effluent			Not occurred	Not occurred
6	Influent	6	6.6	2.36	0.058
	Effluent			Not occurred	Not occurred
7	Influent	10.1	11.0	2.36	0.057
	Effluent			Not occurred	Not occurred
8	Influent	13.6	14.8	2.54	0.055
	Effluent			Not occurred	Not occurred
9	Influent	14.7	11.0	2.57	0.051
	Effluent			2.4	0.1
10	Influent	60.8	10.0	3.34	0.6
	Effluent			2.69	0.18
11	Influent	70	12.0	2.9	0.52
	Effluent			2.32	0.03
12	Influent	42.5	3.85	4.78	0.860
	Effluent			3.64	0.140

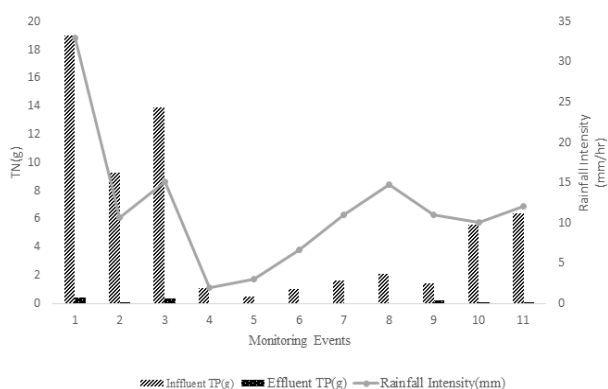


Fig. 4. Comparison between influent and effluent TP.

식생의 오염 제거 효과는 선행 연구의 실험 진행 시간이 식생 별로 각각 달랐으므로 단위를 통일하여 %/h로 기재하였다. 식생체류지 오염제거 성능에 미치는 식생별 효과는 다음 3.2.1과 3.2.2, 3.2.3절에 정리하였다.

### 3.2.1 갯버들(*Salix gracilistyla M.*)

Seo 외 연구진들이 진행한 연구에서 갯버들의 오염물 제거율을 확인하고자 유입량을 달리 관수하여 각 유입량에서 제거되는 암모니아성 질소, 질산성 질소 그리고 인산염의 농도를 확인하고자 하였다. Table 4는 선행 연구에서 갯버들의 오염물 제거율을 정리한 표이다. 입수 내 NH<sub>4</sub>-N 농도는 최소 0.31에서 최대 23.37mg/L의 농도로 실험하였다. 이 중에서 유입수 농도가 가장 높았던 23.37mg/L에서 제거율이 15.527%/h로 가장 높았다. 갯버들의 NO<sub>3</sub>-N 제거율을 측정하기 위한 유입수 내의 NO<sub>3</sub>-N의 농도가 최소 1.442 최대

Table 4. NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, TN removal rate related to inflow concentration in *Salix gracilistyla M.*

	Inflow Concentration (mg/L)	Removal Rate (%/h)
NH <sub>4</sub> -N	0.31	0.346
	0.95	0.457
	2.81	1.395
	7.74	3.576
	23.37	15.527
NO <sub>3</sub> -N	1.442	0.179
	4.28	0.153
	12.659	9.89
	34.234	25.161
PO <sub>4</sub> -P	110.425	77.721
	0.332	0.179
	1.127	0.153
	3.695	1.211
TN	8.758	3.349
	26.818	10.305
	1.752	0.525
	5.23	0.61
	15.469	11.285
	41.974	28.737
	133.795	93.248

110.425mg/L 농도의 각기 다른 용액을 이용하여 실험하였다. 이 중 NO<sub>3</sub>-N의 가장 높은 제거율은 유입수 내의 농도가 110.425mg/L일 때, 77.721%/h 경우였다. PO<sub>4</sub>-P가 함유된 용액을 갯버들로 관수, 유입 농도의 최소 0.332g/L에서 최대 26.818mg/L로 유입수의 농도가 높을수록 제거율은 10.305%/h로 높은 제거율을 보여줬다. 이를 바탕으로 NH<sub>4</sub>-N와 NO<sub>3</sub>-N의 농도와 제거율을 계산하여 유입 농도와 갯버들이 가진 TN 제거율을 산정하였다. TN에 대한 제거율 또한 유입수의 농도가 높을수록 제거율이 높았음을 알 수 있다 (Seo et al, 2005).

### 3.2.2 노랑꽃창포(*Iris pseudacorus L.*)

Seo 외 연구진과 Yang은 노랑꽃창포의 오염 저감 성능을 확인하기 위해 농도가 다른 시료로 실험을 진행하였다. Table 5는 선행 연구 결과 중 노랑꽃창포의 오염물질 평균 제거율을 정리한 표이다. 노랑꽃창포의 TN 저감 성능은 계절의 영향이 컸으며, 여름에 가장 높은 제거율을 보였다. 노랑꽃창포의 평균 TN 제거율은 12.83%/h로 나타났다. 노랑꽃창포의 TP 저감 실험은 유입수의 농도를 각각 다르게 하여 오염 저감 성능을 확인하였다. TP 제거율은 유입 오염물질 농도별로 다르지만, 평균 16.27%/h의 TP 제거율을 보여주었다(Seo et al., 2004.; Yang, 2011).

Table 5. Average removal rate of TN and TP in *Iris pseudacorus L.*

TN		TP	
Concentration (mg/L)	Removal efficiency (%/h)	Concentration (mg/L)	Removal efficiency (%/h)
1.12	12.83	0.41~1.74	16.27

### 3.2.3 부처꽃(*L. salicaria*)

Kulun 외 연구진들은 부처꽃의 제거효율을 측정하기 위해, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 그리고 H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>의 용액에서 용액별 농도에 차이를 두고 반응조에서 실험하였다. 연구에 사용한 유입수는 임의로 농도를 조정한 합성 폐수이며, Table 6은 선행 연구 결과의 부처꽃 오염물질 평균 제거율을 정리한 표이다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 실험 용액에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도가 올라감에 따라 제거율도 함께 증가하였으나 미흡한 정도에서 그쳤다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 용액의 경우, 오염물 제거율은 NO<sub>3</sub>와 크게 차이가 나지 않으나 제거된 양으로 따졌을 경우 13.3mg의 차이를 볼 수 있었다. PO<sub>4</sub>의 제거율 실험 결과값 21.18%/h이라는 제거율을 보임으로 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 보다 많은 제거율을 보이는 것처럼 보이나 처리 전의 오염량이 미비하기에 많은 오염물을 제거했다고 볼 수 없음을 알 수 있었다(Kulun et al, 2021).

Fig. 5는 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3절에서 구한 각각 식생의 오염물질 저감 효율을 정리한 그래프이다. 이를 통해 시간당 TN 저감 효율은 세 식생 모두 비등하나 TP 저감 효율에 있어서는 부처꽃(*Lythrum salicaria L.*)의 오염 저감 효율이 가장 뛰어난다고 볼 수 있었다.

Table 6. The concentration and removal efficiency of  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3$  and  $\text{PO}_4$  by *L. salicaria*

	Before Removal	After Removal	Amount of Removal (mg)	Removal Rate (%/h)
$\text{NH}_4^+$	1000	423.3	576.7	14.42
$\text{NO}_3$	1000	410	590	14.75
$\text{PO}_4$	0.1	0.0153	0.0847	21.18

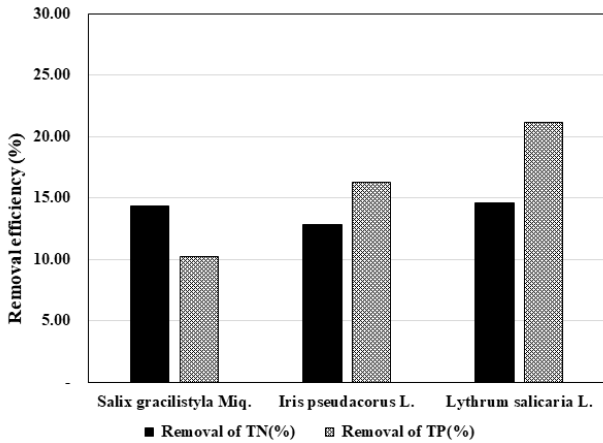


Fig. 5. Removal rate by Vegetation Type

3.3 식재비용에 따른 식생효과

Fig. 6은 선행 연구에서 각 식생들의 TN, TP 제거율과 식생들 1m<sup>2</sup>를 식재 시 필요한 비용들을 산정하여 만들어진 그래프로 오염물을 가장 경제적으로 제거할 수 있는 식생을 찾고자

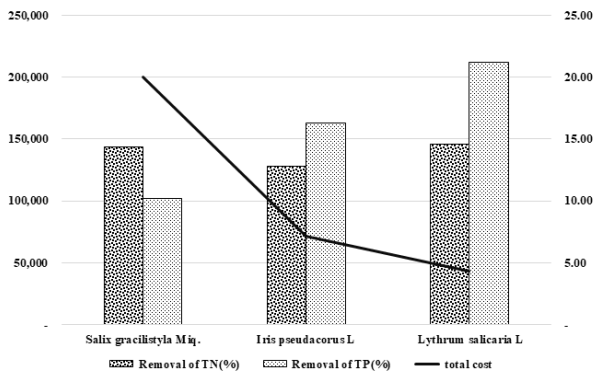


Fig. 6. Planting cost by vegetation type.

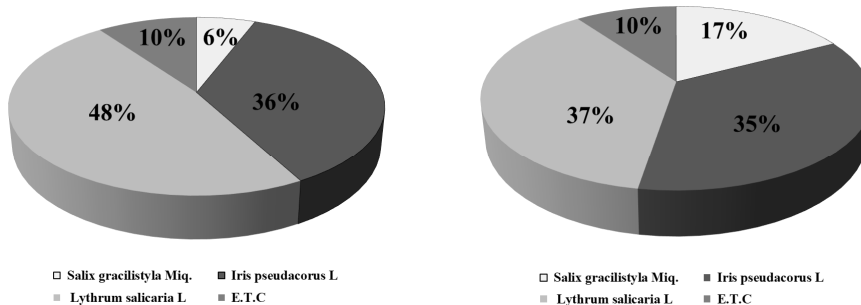


Fig. 7. Estimated planting ratio in modeling Bioretention via TN and TP removal efficiency.

하였다. 식재 시 요구되는 비용을 산정하기 위해 식생의 비용에 포함된 노무비는 2020년도 조달청에서 참고하였고 식재비의 경우 일부 식생의 가격은 조달청과 한 식생 사이트에서 참고하였다. 갯버들의 TN, TP 제거율은 34.36%/h와 21.41%/h였으며 노랑꽃창포는 30.72%/h와 34.14%/h, 부처꽃은 34.91%/h와 44.45%/h였다. 1m\*1m의 면적을 한 식생으로만 조성한다고 가정하였을 때 필요한 비용은 갯버들의 경우 200,136원, 노랑꽃창포는 71,496원이 소요되었으며, 부처꽃을 식재할 경우 1m<sup>2</sup>를 조성하기 위해 42,936원이 소요되었다. Fig. 6을 통해 가격 대비 효율이 가장 좋은 식생은 부처꽃임을 알 수 있었다(조달청,2020)(라펜트, 2018조경내역서) (xplant, 2022).

식생체류지의 TN, TP 제거 효율을 보다 명확하게 파악하기 위해서 선행 건기 일수와 인공강우의 유입량이 적어 유출이 되지 않았던 데이터를 제외하고 가장 유출저감률이 높은 Event 11번 데이터를 대표로 선정하였다. 해당 데이터의 유출 지연시간인 4.7 hr과 문헌 조사 결과를 토대로 식생에 의한 오염물질 저감 시 기여도를 분석한 결과, 식생 별 TN과 TP 저감 시 기여도는 Fig. 7과 같았다. TN의 경우에는 부처꽃이 가장 높은 48.0%로 기여도를 보였으며 TP는 부처꽃과 노랑꽃창포가 37.4%와 35.3%로 비슷한 기여도를 보였다. Fig. 6에서 나타난 식생체류지에서의 각 식생이 미치는 영향을 바탕으로 적용할 경우, 가장 제거율이 좋은 식생은 부처꽃으로 가장 경제적일뿐만 아니라 오염물 제거하는 측면에서 고려해도 가장 효율이 높다고 판단된다. Fig. 7에서 가장 눈에 띄는 차이점은 갯버들과 부처꽃이 있다. TP의 조성비율은 제거율이 낮은 점과 비례하여 4개의 항목 중 가장 낮은 부분을 차지한다. 노랑꽃창포의 경우 식생별 TN과 TP 제거율 중에서 중간값을 지니고 있기에 조성 시에 기여도에 변화가 적은 편이다.

식생체류지의 표토는 30cm가량으로 아래는 자갈층과 유공관으로 이루어져 있다. Lee 외 연구진은 논 토양의 심도별 영양물질을 분석하여 토양의 영양물질 흡착 성능을 실험하였다. TN은 표토 20cm를 기준으로 약 14.62%의 저감 효율을 보이며, TP는 표토 20cm를 기준으로 약 25.74%의 저감 효율을 보였다. 해당 연구의 결과는 어느 정도 저류 효과를 지닌 논 토양의 영양염류 저류 효율을 보이는 것으로 표토 아래에는 자갈을 배치하여 배수가 잘되도록 설계된 식생체류지와는 투수계수의 큰 차이가 있다. 또한 이 결과는 식생을 포함한 결과이므로 실제 토양에 의한 영양염류 흡착 정도는 이보다 낮을

것으로 추정된다. 따라서 식생체류지의 오염물질 제거 기작 중 토양에 의한 제거 기작은 그 영향이 작을 것으로 가정하였다 (Lee et al, 2008).

### 3.4 설치비용 및 탄소중립을 통한 이익

통상적으로 물순환 체계를 개선하기 위해 식생은 식재하지만 식생을 통해 얻을 수 있는 환경적 이익은 이뿐만이 아니다. 농촌진흥청에서 진행한 연구 결과에 따르면 나무 1그루의 연간 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)흡수량은 나무의 크기에 따라 약 5.9kg~14.1kg 정도로 알려졌지만, 지피식물은 초지를 통틀어 탄소저장량을 추정하고 있어 식물별 탄소 흡수량 정보는 부족한 실정이다[국립산림과학원, 2019]. 모니터링한 식생체류지에 위치한 세 가지 식생들을 식생별로 1m<sup>2</sup> 당 군식을 했을 경우의 이산화탄소 흡수량으로 산정하였으며 이를 바탕으로 누적 이산화탄소량과 누적된 이산화탄소의 가치 비용을 산정하여 Fig. 8에 정리하였다. 이후 식생체류지에 사용되는 유지관리 비용과 함께 상쇄되는 비용의 정도와 탄소 중립이 되는 시점을 알아내고자 하였다. 식생체류지 내 식재된 식생들이 연간 저장하는 탄소의 양은 갯버들이 112.63kg/yr, 농촌진흥청의 연구에 따르면 노랑꽃창포와 부처꽃의 연간 탄소 저장량이 각각 2.5kg/yr, 2kg/yr였다. 식생체류지의 초기설치비용은 약 1,736만 원으로 매년 유지비용으로 약 840만 원 가량이 사용된다. 식생체류지의 설치 및 유지비용이 매년 200만 원씩 절감한다면 식생체류지를 설치한 지 8년이 되는 해에 탄소 중립 시점이 나타나 그 지점을 넘는 순간 탄소 저장량으로 인한 이익을 볼 수 있음을 확인할 수 있다.

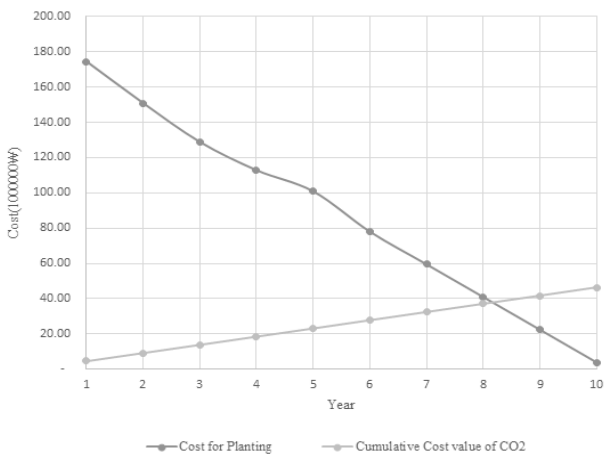


Fig. 8. Reducing Cost of BioRetention and Carbon Dioxide Value Cost in Graph.

## 4. 결 론

물 순환 체계의 복구를 위해 전주시에 설치된 식생체류지 내 식생들과 관련된 선행 논문들을 연구하였다. 앞선 선행 연구를 통해 식생별 TN과 TP의 제거율을 1m<sup>2</sup>로 산정하여 세 식생 중 비용 대비 오염물 제거에 가장 효과적인 식생은 부처꽃임을

알 수 있었다. 갯버들의 경우 식재 비용이 가장 높았지만 부처꽃보다 비용 대비 덜 효율적임을 알 수 있다.

서울시와 관련된 선행 논문에 명시된 관목의 탄소 저장량 및 흡수량 산정식을 이용하여 갯버들의 이산화탄소 저장량을 산정하였고 노랑꽃창포와 부처꽃의 이산화탄소 저장량은 위에서 언급하였듯 농촌진흥청 보도자료에서 차용하였다. 세 가지 식생의 이산화탄소 저장량을 측정하여 각 식생이 어떤 비율로 식재되어 있을 때 가장 효율적인지 알고자 하였으며 각 식생별 식생체류지에서 미치는 영향은 TN의 경우 부처꽃이 가장 높게 나왔으며 노랑꽃창포가 그다음이었다. TP 제거율에 영향을 가장 많이 주는 식생으로는 부처꽃과 노랑꽃창포로 비슷한 제거율을 보였다. 이산화탄소 저장량은 갯버들, 노랑꽃창포 그리고 부처꽃의 순서로 112.63kg/yr, 2.5kg/yr, 2kg/yr의 탄소를 저장, 이를 통해 가치 비용으로 환산하여 식생체류지에 투자된 식재 비용과 이후 들어갈 유지관리 비용에서 이후 발생할 탄소 가치비용을 통한 탄소연한 시점을 알고자 하였다. 식생체류지를 설계한 이후 8년 후의 시점에서 탄소중립이 발생하면서 이후 탄소를 저장함으로 생기는 비용은 이익이라고 볼 수 있다.

LID 시설의 설치 목적 중 하나는 생물 다양성 증진이기에 오염물질 저감 효율과 비용만으로 적은 식생들로만 이루어진 식생체류지를 설계함은 생물 다양성을 고려하지 못한 방법이다. 그러므로 오염물 저감 효율이 좋은 식생들로 식재하는 것이 바람직하다.

위의 모니터링한 식생체류지를 통해 유출수의 농도가 높아질수록 제거율 또한 높아짐을 확인할 수 있었으며, 따라서 대상지에 식재한 식생들을 통한 오염물 제거를 꾀하고자 하였다. 식생체류지에 식재한 식생들의 제거율을 통해 1m<sup>2</sup>당 제거되는 TN과 TP를 통해 더 경제적이고 효율적인 식생체류지를 제안하고자 하였다.

## References

Kim YS.(2008). *Evaluation of the Water Purification Capacity in Iris pseudacorus and Acorus calamu*. Journal of Horticultural Science and Technology. 26(2). pp. 172-176. [Korean Literature]

Kim LH, Ko SO, Lee BS, and Kim SG. (2006). *Estimation of Pollutant EMCs and Loadings in Highway Runoff*. Journal of Korean Society of Civil Engineerings B, 26(2B). pp. 225-231. [Korean Literature]

Moon YI, Yoon SK, Kim JS, and Ahn JH. (2006). *A Study on the Change of Runoff Characteristics due to the Urbanization*. Journal of Korea Water Resources Association. pp. 730-734. [Korean Literature]

Seo BS, Choi SM, Park WJ, and Park CH. (2004). *Growth Characteristics and Removal Effect of Nitrogen and Phosphoric Acid of Iris pseudoacorus at Waterway Soils of Mangyeong River*. Journal of The Korea Society of Environmental Restoration Technology. 7(5). pp. 57-65.



- [Korean Literature]
- Seo BS, Choi SM, and Park CM. (2005). *Growth Characteristics and Removal Effect of Nitrogen and Phosphorus of Salix gracilistyla Grown in Waterway Soils*. Journal of Society of Forest Science. 94(1). pp. 1-5. [Korean Literature]
- Lee EJ, Seoung CH, and Park SW. (2008). *Korea Water Resources Association*. Journal of Korea Water Resources Association. pp. 800-804. [Korean Literature]
- Lee JW and Gil KI. (2021). *Introduction plan of future integrated water circulation management system using LID facility model verification*. Journal of Wetlands Research, 23(1), pp. 67-73. doi <https://doi.org/10.17663/JWR.2021.23.1.67>. [Korean Literature]
- Lee YK, Choi HS, Jeon MS and Kim LH. (2021). *Change of dry matter and nutrients contents in plant bodies of LID and roadside*. Journal of Wetlands Research, 23(1), pp. 35-43. doi <https://doi.org/10.17663/JWR.2021.23.1.35>. [Korean Literature]
- Lee JH, Seo GT, Lee CS, Shin CK and Yoon YS. (2008). *A Study on the Characteristics by Non-point Pollution Load in Road Surface of Urban Area*. Journal of Environmental Engineering Research. pp. 953-956. [Korean Literature]
- Yang HM. (2011). *Comparison of Seasonal Nitrogen Removal by Free-Water Surface Wetlands Planted with Iris pseudacorus L.* Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology. 14(1), 121-132. doi <https://doi.org/10.13087/kosert.2011.14.1.121>. [Korean Literature]
- Choi JY and Cho SH. (2013). *A study on the nationwide water impermeable area ratio and improvement plan*. [Korean Literature]
- Hong JS and Kim LH. (2016). *Assessment of Performances of Low Impact Development (LID) Facilities with Vegetation*. 3(2). pp. 100-109. doi <http://dx.doi.org/10.17820/eri.2016.3.2.100>. [Korean Literature]
- Carle, MV Halpin, P.N. Stow, C.A. (2005). *Patterns of watershed urbanization and impacts on water quality*. doi <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03764.x>
- Lee JW, Gil KI (2020). *Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal for restoring wetland function at artificial rainfall*. Ecological engineering. 150(1). doi <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105823>
- Kunlun W, Qian H, Yumin W, Hui Y, Changhong S, and Guizhong L.(2021). *Uptake Kinetics of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> by Typha orientalis, Acorus calamus L., Lythrum salicaria L., Sagittaria trifolia L. and Alisma plantago-aquatica Linn*. MDPI, 13, pp. 434. doi [10.3390/su13010434](https://doi.org/10.3390/su13010434)
- Roy, A.H, Rosemond, A.D, Paul, M.J, Leigh, D.S, Wallace, J.B. (2003). *Stream macroinvertebrate efficiency response to catchment urbanisation(Georgia, USA)*. Freshwater Biology 48.
- Wang, L., Lyons, J., Kanehl, P., Bannerman, R.T. (2001). *Impacts of urbanization on stream habitat and fish across multiple scales*. Environmental Management. 28. pp. 255-266
- Kim, GJ., Han SW. (2021). *"Small but strong" Garden plants effect on carbon-reducing-200m<sup>2</sup> Green roof, carbon-reduces 600kg yearly ... mint, chrysanthemum and more are effective*. RURAL DEVELOPMENT ADMINISTRATION