도로변 및 LID 시설 식재 식물의 중금속 축적량 비교

이유경·최혜선·나쉬·김이형[†]

공주대학교 건설환경공학과

Comparison of heavy metal uptake of LID and roadside plants

YooKyung Lee Hyeseon Choi Nash Jett Reyes Leehyung Kim

Department of Civil and Environmnetal Engineering, Kongju National University, Korea (Received: 28 January 2021, Revised: 5 February 2021, Accepted: 5 February 2021)

요 약

도시 강우유출수에 함유된 중금속은 저감시설 내에 축적되면서 기능저하와 유지관리를 어렵게 하는 원인이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 자연적 물질순환과정을 가진 LID 시설이 널리 이용되고 있다. LID 시설로 유입된 중금속은 식물흡입을 통해 밖으로 배출된다. 그러나 식물별 중금속 흡수율이 규명되지 못하여 LID 설계시 식물 종 선정에 어려움을 주고 있다. 따라서 본 연구는 중금속 노출빈도가 다른 LID 시설 내부, 도로변 식물 및 조경공간 식물을 상호비교하여 식물에 의한 중금속 제거특성을 연구하였다. 차량 활동과 접촉빈도가 높은 LID 및 도로변에 식재된 식물류(초본류, 관목류, 교목류)의 체내 중금속 함량은 조경공간 식재 식물체보다 높게 나타났다. 중금속의 체내 축적은 주변환경(유입수 성상, 주변 대기오염 정도 등)의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 도시 강우유출수에 높은 농도로 함유된 Zn 제거에는 패랭이, 메타세콰이어, 영산홍, 쑥 등이 적정하며, Cu 제거에는 패랭이, 메타세콰이어, 쑥 및 은행나무가 적절한 것으로 평가되었다. Pb 제거에는 벚꽃나무, 메타세콰이어 및 조팝나무가 적정하며, As, Cr 및 Cd 제거에는 패랭이가 적정한 것으로 평가되었다. 식물별 중금속 흡입능력은 서로 다르게 나타났다. 이러한 특성은 다양한토지이용에서 발생하는 다양한 중금속 제거를 위한 식물 종 선정에 활용될 수 있다.

핵심용어 : 중금속, 저영향개발, 식물흡수, 식물 종, 영양물질

Abstract

Urban stormwater runoff contains heavy metals that accumulate in on-site treatment systems, thus resulting to facility deterioration and maintenance problems. In order to resolve these problems, low impact development (LID) technologies that promote natural materials circulation are widely used. LID facilities are capable of treating heavy metals in the runoff by means of plant uptake; however, the uptake or phytoremediation capabilities of plants have not been studied extensively, making it difficult to select the most suitable plant species for a certain LID design. This study investigated the vegetative components of an LID facility, roadside plants, and plants in landscape areas with different heavy metal exposure and frequency to determine the uptake capabilities of different plant species. The plants harvested inside the LID facilities and roadsides with high vehicular traffic exhibited greater heavy metal concentrations in their tissues as compared with the plants in landscape areas. Generally, the accumulation of heavy metals in the plant tissues were found to be influenced by the environmental characteristics (i.e. influent water quality, air pollution level, etc.). Dianthus, Metasequoia, Rhododendron lateritium, and Mugwort were found to be effective in removing Zn in the urban stormwater runoff. Additionally, Dianthus, Metasequoia, Mugwort, and Ginkgo Biloba exhibited excellent removal of Cu. Cherry Tree, Metasequoia, and mugwort efficiently removed Pb, whereas Dianthus was also found to be effective in treating As, Cr, and Cd in stormwater. Overall, different plant species showed varying heavy metal uptake capabilities. The results of this study can be used as an effective tool in selecting suitable plant species for removing heavy metals in the runoff from different land use types.

Key words: metals, low impact development, plant uptake, plant types, nutrients

Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Korea

E-mail: leehyung@kongju.ac.kr

- Yookyung Lee Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Korea/ MS Student/(asdf3518@naver.com)
- Hyeseon Choi Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Korea/PhD Candidate/(hyeseon27@kongju.ac.kr)
- Nash Jett Reyes Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Korea/PhD Student/(reyesnashjettdg@gmail.com)
- Leehyung Kim Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Korea/professor/(leehyung@kongju.ac.kr)

[†]To whom correspondence should be addressed.

1. 서 론

도시화는 자동차 및 에너지 사용 증가, 수질 및 대기오염, 물 부족과 도시홍수 유발, 생태계 파괴 등을 야기시킨다(Jeon et al., 2019). 도시지역의 모든 토지이용은 사람과 자동차의 활동 을 위한 공간, 즉 건물, 주차장 및 도로로 구성되어 있다. 이 중에서 주차장 및 도로는 강우시 빗물이 침투하지 못하는 불 투수율이 매우 높은 토지이용이며, 사람과 자동차의 활동으로 인하여 건기시 입자물질, 중금속, 유기물질, 유해화학물질 등 이 축적되는 공간이다(Kim et al., 2008, Maniquiz-Redillas et al., 2019). 강우유출수 중에서 높은 농도로 함유되어 있는 Pb와 Zn은 일반적으로 차량의 타이어, 자동차의 차체 및 엔진 파트에서 유출된다(Lee et al., 2007a, Lim et al., 2008). 또한 휘발유에 함유되어 있는 테트라메틸성 납(tetramethyl-lead)과 첨가되는 산도 Pb의 주요 유출 원인이다. Zn은 자동차 타이어 의 경화 과정시 사용되는 산화아연도 중요한 배출원으로 알려 져 있다(Bannerman et al., 1993, Hvitved-Jacobsen et al., 1994). Cd은 타이어 제조시 성분으로 들어가는 아연이 중요한 배출원인이며, Cu와 Cr은 대부분 브레이크에서 배출되는 것 으로 알려져 있다(Harrison et al., 1981, Lee et al., 2006).

도시지역은 주거지역, 상업지역, 공공지역, 산업지역 등 다양한 토지이용으로 구성되어 있다(Kim et al., 2005, Choi et al., 2017). 도시지역의 모든 토지이용은 사람을 위한 공간이기에 접근성을 위하여 불투수면적의 약 50%가 교통 관련 공간(도로, 주차장, 휴게소 등)으로 구성되어 있다(Lee et al., 2007b). 이러한 교통 관련 공간은 자체적 불투수면적률이 거의 100%에 해당하기에 강우시 높은 유출률로 인하여 오염물질의 배출이 매우 높다(Driscoll et al., 1990, Reyes et al., 2020). 교통 관련 토지이용에서 배출되는 대기 및 수질 오염물질은 강우시 비점오염원 형태로 유출되어 수질악화를 유발시키며 수생태계를 훼손시킨다(Hong et al., 2018, Lee et al., 2009). 이러한 비점오염물질을 함유하는 도시 강우유출수 처리를 위하여 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기술이 적용되고 있다(Choi et al., 2016, Gurung et al., 2018).

LID 시설은 토양, 여재, 식물 및 미생물 등이 주요 구성 요소이다(Gurung et al., 2018, Geronimo et al., 2019). 이 중식물은 근권 활동으로 인해 토양 내 중금속을 식물의 뿌리로흡수시키는 역할을 한다(Hong et al., 2017, Geronimo et al., 2019). 뿌리에서의 중금속 흡수는 중금속의 종류, 뿌리 흡수능력, 식생별 성장 특성에 의해 근권 영역 또는 뿌리 표면 전체에서 이루어진다(Hasanuzzaman, 2018). 중금속이 식물에 미치는 영향은 농도차이, 중금속 형태, 노출 기간, 식물의 대상기관, 식물 연령 등에 따라 매개 변수가 다차원적이기에 규명하기가 어렵다(Hong et al., 2017). 중금속은 식생 성장률에 영향을 미치며, 엽록소, 식물고사, 뿌리 성장 억제, 식물 성장저해, 기공 작용 변화, 수분감소, 양이온유출, 막 기능변화, 광합성 억제, 대사 변화 등 여러 주요 활동 변화를 유발한다. 그러나 식물은 다양한 과정을 통해 광범위한 오염물질을 제거, 분해, 대사 또는 고정할 수 있는 유전적 능력을 가지고 있다

(Maniquiz-Redillas et al., 2019). 일반적으로 식물을 이용한 중금속 제거 방법은 네 가지로 분류된다. 식물 추출 (Phytoextraction)은 식물로 유입된 오염물질을 지상의 식물 조직으로 이동 및 집중시키는 기작을 의미하며, 식물 안정화 (Phytostabilization) 기법은 뿌리에 의한 흡수 및 축적, 흡착 또는 뿌리 영역 내의 침전을 통해 토양 내 중금속을 제거하는 기법이다. 식물 분해(Phytodegradation)는 식물에 의해 흡수된 오염물질을 식물에 의해 합성된 일부 화합물(효소)의 도움으 로 더 미세하거나 독성물질이 감소된 분자로 분해된 다음 지 상부로 이동하여 오염물질을 제거하는 기법이며, 근질분해 (Rhizofiltration)는 근권에서의 미생물 활동에 의한 토양의 오 염 물질 분해 작용을 의미한다(Hasanuzzaman, 2018). 식물은 이러한 복잡한 기작을 통하여 오염물질을 흡입, 이동 및 제거 하기에 전체적 저감기작을 규명하기는 어렵다(Choi et al., 2018a, Lee et al., 2018, Choi et al., 2019). 이러한 이유로 그동안 LID에 적용되는 식물 종 선정시 오염물질 제거기작을 고려하는 기술적 가이드라인 설정에 어려움이 있었다(Choi et al., 2018b). 따라서 본 연구는 LID를 포함하여 다양한 공간에 존재하는 식물의 식물체 내 중금속 함유량을 월별, 식물별 비 교함으로써 중금속 제거에 효과적인 식물 종 선정을 위한 기 초자료 확보를 위하여 수행되었다.

2. 연구방법

2.1 모니터링 지점

식물체 내 중금속 함량을 조사하기 위한 모니터링 지점은 강우유출수가 다양한 중금속 농도에 노출되어 있는 천안 1번 국도와 공주대학교(천안캠퍼스) 내 설치된 LID 시설로 선정하였다(Fig. 1). 국도 도로변에 식재된 벚꽃나무(Prunus sect. Cerasus, PSC), 은행나무(Ginkgo biloba, GB)와 LID 시설 내식재된 패랭이(Dianthus chinensis, DC), 쑥(Artemisia princeps, AP), 조팝나무(Spiraea prunifolia, SP), 영산홍(Rhododendron indicum, RI) 및 메타세콰이어(Metasequoia glyptostroboides, MG)를 실험대상으로 선정하였다. 도로변 및 LID 시설 내 식재된 식물과의 비교를 위해 동일한 식생이식재된 조경공간을 대조군으로 선정하였으며, 식물의 위치별, 부위별로 나누어 중금속 분석을 수행하였다.

식물이 식재된 LID 시설은 나무여과상자(TF), 빗물정원(RG), 식생체류지(BI), 침투화분(IP)을 대상으로 하였다. Table 1은 LID 시설별 크기 및 설치년도, 특징 등을 나타낸 것이다. 나무여과상 자와 식생체류지는 도로 강우유출수를 처리하는 시설로 저장용 량은 각각 0.71m^3 , 2.32m^3 이며, 빗물정원과 침투화분은 건물 옥상 빗물유출수를 처리하는 시설로 저장용량은 6.26m^3 , 0.98m^3 이다.

2.2 모니터링 및 분석 방법

토양은 각각의 식생이 식재된 시설에서 2020년 3월부터 분기 별로 3회 채취했으며, 채취 시 토양의 표면을 깨끗이 치운 후

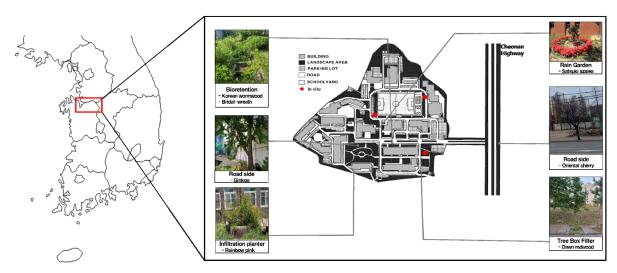


Fig. 1. Location of each LID facilities and plants.

Table 1. Design of low impact development(LID) facility

	LID facilities			
	Tree Box Filter (Parking Lot)	Rain Garden (Roof)	Bioretention (Parking Lot)	Infiltration planter (Roof)
Year constructed	2010	2011	2013	2013
Vegetation	Dawn redwood	Satsuki azalea	Korean wormwood, Bridal–wreath	Rainbow pink
Media	Sand, Gravel, Woodchip	Sand, Soil, Gravel	Sand, Soil, Bottom Ash, Woodchip	Sand, Soil, Gravel
Dimension (LxWxH),m	1.5×1×1.3	3.7×1.5	3×1.3×1.2	2×2.5
Storage volume, m ³	0.71	6.26	2.32	0.98
Catchment area, m ²	379	161	139	81
SA/CA, (%)	0.3	6.9	2.4	2.1
SV/TV, (%)	36.6	38.3	48	40.0
Storm event (N)	32	39	15	22
Runoff rate before LID(m³/min)	1.2±1.58	1.1±1.6	4.0±3.9	0.6±0.6
Runoff rate after LID(m³/min)	0.8±1.1	0.1±0.3	0.1±0.2	0.1±0.2

SA/CA=ratio of facility surface area to catchment area; SV/TV=ratio of storage volume to total volume;

10cm이하의 흙을 채취하였다. 채취 후 풍건하여 시료의 전처리 및 화학적 분석을 위해 체가름 시험을 진행하였으며 시료는 토양 표준분석법(RDA, 2012) 기준을 바탕으로 pH, TP, TN, 중금속 (Zn, Cr, Cu, As, Cd, Pb) 등의 물리·화학적 분석 수행하였다. 식물 모니터링은 월별 수행되었으며, 채취된 식물은 우선 생체 중량(fresh weight)을 측정하였다. 이후 식생을 지상부와 지하부로 분리하여 50℃의 열풍건조기에 넣어 더이상 건조무게가 변하지 않을 때까지 건조 시킨 후 건조중량(dry weight)을 측정하였다. 건조된 식생은 분쇄하여 영양물질 및 중금속 분석을 수행하였다. 중금속은 유도결합플라즈마 원자방출 분광기(ICP-AES)를 사용하여 토양 및 식물체 분석법(RDA, 2000) 기준을 바탕으로 여섯 가지 원소(Zn, Cu, Cr, As, Cd, Pb)를 분석하였다. 식물체의 수분변화는 수분스트레스 상태를 알 수 있는 지표로 토양

내 수분의 양이 적어지면 식생은 물에 대한 스트레스를 받게 되며 성장에 영향을 미친다(Choi et al., 2018). 따라서, 식물체 내의 수분스트레스 정도를 평가하기 위하여 식생의 건물률을 산정하였다. 건물률은 건조중량(dry weight)을 생체중량(fresh weight)로 나누어 계산하였다(Choi, 2017).

건물률(DM;drymatter, %) =
$$\frac{$$
건물중(Dryweight)}{생체중(freshweight)} × 100

3. 결과 및 고찰

3.1 모니터링 토양의 화학적 특성

식물의 성장은 오염물질 제거효율과 직접적인 관계가 있으

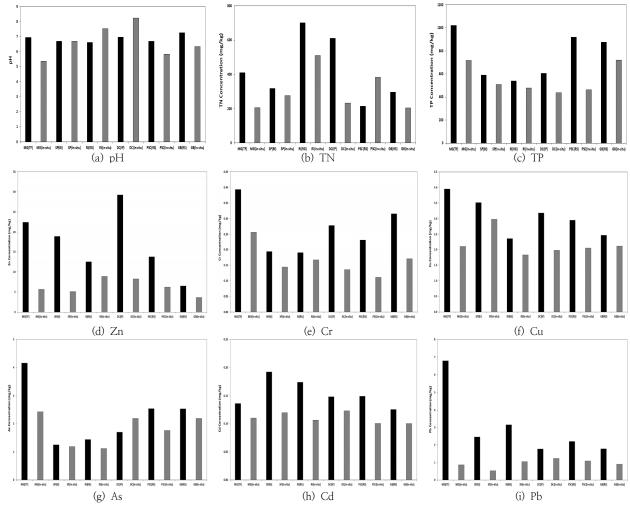


Fig. 2. Pollutant concentration in soil.

며, 성장을 하기 위한 토양 내 함수량, 양분량, 토양 구조 및 토양 입자 등 다양한 조건들이 필요하다. Fig. 2는 식물이 적 용된 토양의 오염물질 농도를 나타낸 결과이다. LID 시설과 대조군의 pH는 6.8~7.8 범위로 나타났다. 토양 내 TN 농도 는 RG(702.6mg/kg) > IP(611.6mg/kg) > TF(410.5mg/kg) > BI(319.2mg/kg) > RS(296.8mg/kg) 순으로 나타났으며, TP 농 도는 TF(1019.3mg/kg) > RS(920.9mg/kg) > IP(605.9mg/kg) 〉 BI(592.3mg/kg) 〉 RG(540.8mg/kg) 순으로 분석되었다. LID 시설 및 도로변 토양 TN 농도는 대조군 토양보다 약 1.9 배 높게 나타났으며, TP 농도는 1.3 배 높게 나타났다. 이는 대 조군에 비해 LID 시설 내 식재된 식물의 높은 밀집도에 의하여 강우유출수 저류량이 높아지면서 토양 내 질소 및 인의 양도 높 아졌기 때문이다(Kim, 2012). 토양 내 중금속 중에서 As 농도 (평균±표준편차)는 TF(2.9±0.8mg/kg) > RS(2.3±0.4mg/kg) > $BI(2.1\pm1.1mg/kg) > IP(1.9\pm0.4mg/kg) > RG(1.3\pm0.3mg/kg)$ 의 순으로 분석되었다. Cd 농도는 BI(0.16±0.04mg/kg) > $RG(0.14\pm0.05mg/kg) > IP(0.13\pm0.03mg/kg) > RS(0.12\pm0.03mg/kg)$ 〉 TF(0.12±0.02mg/kg)의 순서로 분석되었다. Pb은 TF(3.8±3.5mg/kg) \rangle RG(2.1±1.3mg/kg) \rangle BI(1.5±1.2mg/kg) \rangle RS(1.5±0.6mg/kg) 〉 IP(1.5±0.4mg/kg) 순으로 평가되었다. 도로변 및 LID 시

설 내 토양의 As, Cd, 및 Pb는 대조군 토양에 비해 유사하거나 높은 농도를 보였다. 특히 TF 토양의 Pb 농도는 대조군의 Pb와 약 7.9배 차이를 보였는데, 이는 작물 뿌리의 유기산, 구연산 배출이 토양으로의 납 흡수를 증가시키기 때문이다.

3.2 식재위치별 식물체 내 영양염류 및 중금속 함량

Fig. 3~4는 중금속의 노출 정도가 서로 다른 위치별 식물체 내 영양염류와 중금속 농도를 통계 분석한 것이다. TN의 경우 영산홍과 메타세콰이어를 제외하고 모두 LID 시설 및 도로변 식물이 조경공간에 비하여 높게 나타났다. TP는 패랭이를 제외하고 모든 식물에서 조경공간에 비하여 LID 및 도로변 식물에서 높게 나타났다. 중금속 중에서 Zn, Cu Cr은 LID 시설 및 도로변에 식재된 식물에서 조경공간에 식재된 식물보다 높은 함량을 보였으며, 그 차이가 약 1.2~2.7배 크게 나타났다. 즉, LID시설 및 도로변 식재 식물이 성장과정에 Zn, Cu Cr의 흡수량이 높은 것으로 평가되었다. As, Cd, Pb의 경우 서식 토양환경에 다소 영향을 받는 패랭이를 제외하고는 모두 LID 및 도로 식재 식물에서의 함량이 높았다.

식물종류별 식물체 내 중금속을 비교한 결과 양분에 해당하는 Cu, Zn에 대한 흡수량은 매우 높게 나타났으며, Cr과 As의 흡수량은

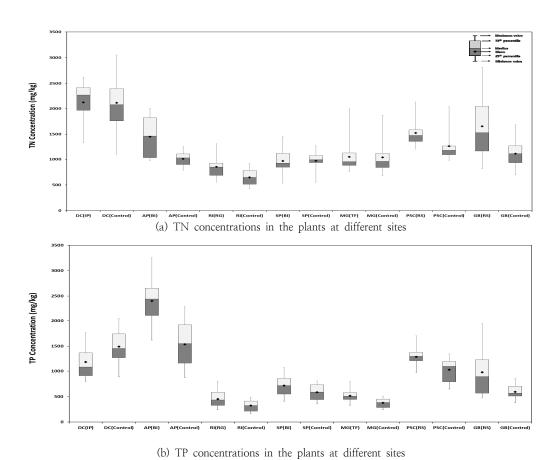


Fig. 3. Statistical summary of nutrient concentrations in the plants at different sites.

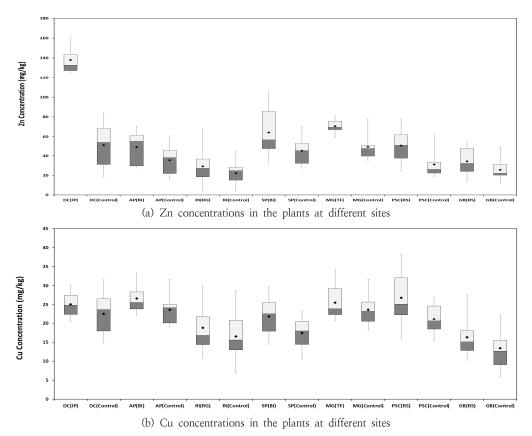


Fig. 4. Statistical summary of heavy metal(Zn, Cu, Cr, As, Cd, Pb) concentrations in the plants at different sites.

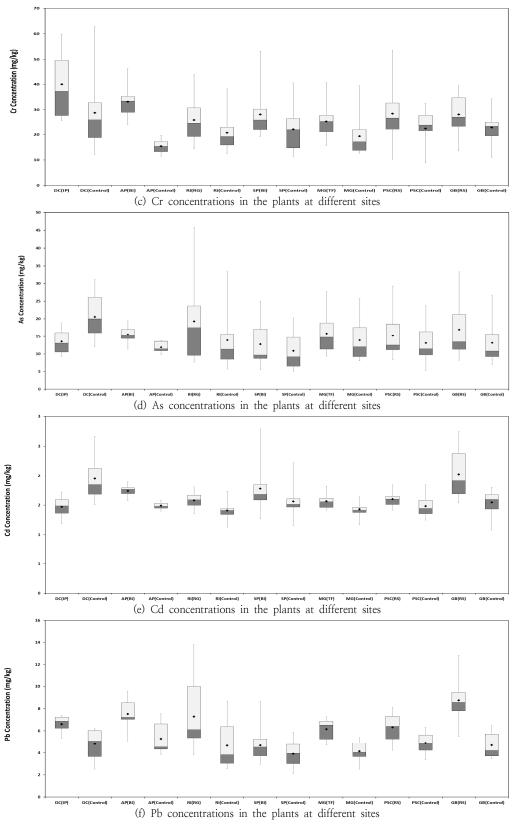


Fig. 4. Statistical summary of heavy metal(Zn, Cu, Cr, As, Cd, Pb) concentrations in the plants at different sites(Continued).

다소 높게 나타났으며, Cd, Pb에 대해서는 식물별 선택적 흡수 량을 보였다. 독성물질에 해당하는 Cd과 Pb의 제거에는 은행나무가 가장 적절한 것으로 나타났다. 초본류(패랭이, 쑥)의 경우

Cr 제거에 매우 효율적으로 나타났다. As 제거에는 영산홍과 은행나무가 적절한 수종으로 평가되었으며, Cu와 Zn 제거에는 벚꽃나무와 조팝나무가 적절한 수종으로 평가되었다.

3,3 식물 식재 토양과 식물체 내 중금속 농도 범위 비교

식물은 광합성을 하는 과정에 근권 토양으로부터 양분을 흡수하여 생체량을 증가시킨다. 강우유출수에 함유된 질소, 인및 중금속 등의 물질은 LID에 유입되면서 토양에 축적되고 식물에 의하여 흡수되는 물질순환 과정을 겪는다. 식물이 가진물질순환 기작은 LID에 축적된 영양염류와 중금속을 배출시키는 역할을 수행하기에 중요한 설계인자이다.

Fig. 5는 토양 내 영양염류(TN, TP)와 식물체 내 중금속과의 농도분포를 비교한 것이다. 토양의 TN 농도분포는 200~700mg/kg의 범위를 보였으며, TP의 범위는 450~1,100mg/kg의 범위로나타났다. 일반적으로 식물체 내에서는 TN 함량이 TP보다 높은 농도분포를 보이나, 토양에서는 TN이 TP보다 다소 낮은 농도분포를 보였다. 토양 내 TN은 토양미생물의 분해과정에 일부는대기로 전환되며, 일부는 식물에 의하여 흡수되면서 그 양이 조절된다. 그러나 TP와 중금속은 식물에 의한 흡수량을 제외하고는 모두 토양에 축적된다. 토양 내 TN이 증가할수록 식물체 내 Zn과 Cu는 증가하는 것으로 나타났으며, 나머지 중금속 함량은또한 다소 증가되는 경향을 보이나 큰 차이는 보이지 않는 것으

로 평가되었다.

토양에서 TP가 증가할수록 식물체 내 Zn와 Cu는 증가하다가 감소하여 일정 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 나머지 중금속 함량은 TN와 유사하게 다소 증가되거나 일정 수준을 유지하는 등 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이러한 경향으로 볼 때 LID 시설의 토양 내 영양염류의 증가는 식물의 성장을 촉진하여 식물의 생체량이 증가하면서 토양의 중금속 제거에 기여하는 것으로 평가되었다. 그러나 토양내 양분량이 증가하더라도 식물은 적정 수준의 양분을 흡수하기에 식물체 내 중금속 함량도 일정 수준 이상으로 증가하지 않는다. 따라서, LID 설계시 식물의 성장을 위한 적정 양분량은 필요하겠지만, 과도한 양분은 토양내 양분함량을 증가시킬 수 있기에 유입수 내 양분관리가 필요하다.

3.4 토양과 식물별 영양염류 및 중금속 함량 통계분석

Fig. 6은 토양 및 식물별 영양염류(TN, TP)와 중금속 농도를 통계분석한 것이다. 토양의 TP를 제외한 모든 항목(TN, 6 가지 중금속)에서 식물체 내 함량이 토양에 비하여 높게 나타

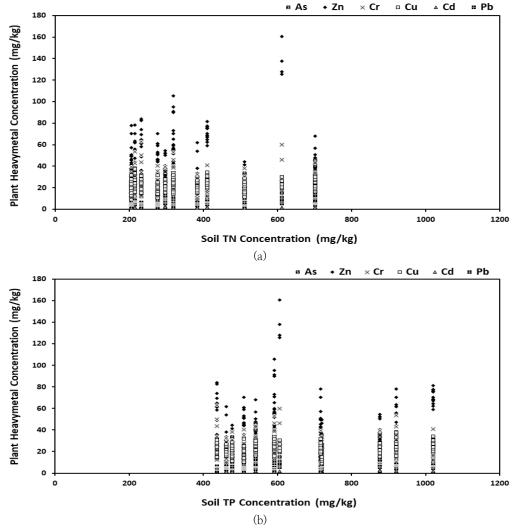


Fig. 5. Relationship between plant heavy metals concentration and soil nutrient concentrations.

났다. 즉, 식물은 자연계의 물질순환 과정에서 토양환경과 외부환경을 연결하는 중요한 역할을 수행한다는 것을 의미한다. 이러한 식물 기능을 LID에 반영할 시 시설 내부에 축적된 영양염류와 중금속을 외부로 배출시킬 수 있다. 식물의 물질순환

은 수질정화 뿐만 아니라 시설의 내부 막힘현상을 줄여 유지 관리 최소화에 기여한다. 그러나 총 인(TP)은 영산홍과 메타 세콰이어에서 식물체 내 함량보다 토양 내 축적량이 높게 나 타났는데, 그 이유는 타 식물에 비하여 성장과정에 인의 흡수

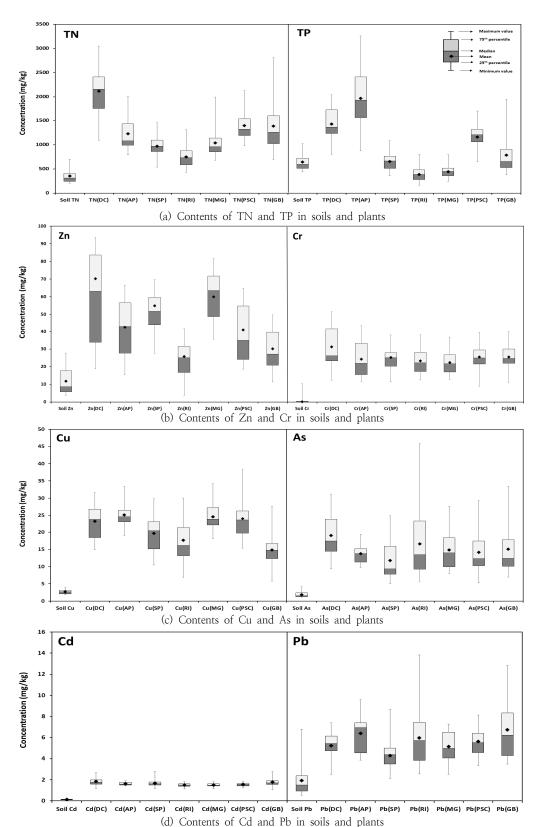


Fig. 6. Statistical summary of heavy metals and nutrients concentrations in soils and plants.

량이 상대적으로 낮기 때문이다. 식물체 내 TN 함량은 패랭이〉은행나무〉벚꽃나무〉쑥〉메타세콰이어〉조팝나무〉영산홍 순으로 나타났다. 식물체 내 TP 함량은 쑥〉패랭이〉벚꽃나무〉은 행나무〉조팝나무〉메타세콰이어〉영산홍 순으로 나타났다. 패랭이는 Pb을 제외한 모든 중금속에서 다른 관목류, 교목류보다 높은 농도를 보였다. 즉, 패랭이는 중금속에 내성이 강하다는 것을 의미하며, 높은 중금속이 함유된 비점오염물질이 유입되는 LID시설에 적합한 식생으로 판단된다. 그러나 패랭이의성장을 적정하게 유지하기 위해서는 서식환경 설계가 중요하다.

식물의 체내 중금속 함량의 상호비교는 LID에 적정한 식물체 선정에 활용가능하다. 도시 강우유출수에 높은 농도로 함유된 Zn은 패랭이, 조팝나무, 메타세콰이어가 높은 흡수량을 보였으며, Cu는 메타세콰이어 및 벚꽃나무가 높은 것으로 평가되었다. 도시 강우유출수에는 자동차의 활동으로 Pb의 유출이 높은데 도로에서 배출되는 Pb의 제거를 위해서는 쑥 및 은행나무가 비교적 적정하나 조팝나무를 제외하고 타 식물과의 농도는 큰 차이를 보이지 않았다. As, Cr 및 Cd 제거에는 패랭이가 적정한 것으로 평가되었으며, 타 식물은 비슷한 제거량을 보였다. 이러한 식물별 특성은 다양한 토지이용에서 발생하는 다양한 종류의 비점오염물질 제거에 효율적으로 활용될 수 있다.

4. 결 론

도시 강우유출수 처리에 적용되는 LID 중에서 여과형 및 침투형 시설은 강우유출수에 포함된 비점오염물질, 특히 중금속의 여재층 축적을 유발시켜 시설의 지속가능성(기능성, 유지관리 용이성 등)을 떨어뜨린다. 본 연구는 중금속 노출빈도가 다른 LID 시설 내부, 도로변 식물 및 조경공간 식물을 상호비교하여 식물에 의한 중금속 제거특성을 연구하고자 수행되었으며, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 차량활동과 접촉빈도가 높은 LID 및 도로변에 식재된 초 본류, 관목류, 교목류의 체내 중금속 함량은 조경공간의 동일 식물체보다 높게 나타났다. 중금속의 식물 체내 축적은 유입수 성상, 주변 대기오염 정도 등의 영향을 크게 받는 것으로 평가 되었다.
- 2) 도시 강우유출수에 높은 농도로 함유된 Cu와 Zn 제거에는 벚꽃나무와 조팝나무가 적절한 것으로 평가되었다. 초본류 (패랭이, 쑥)의 경우 Cr 제거에 매우 효율적으로 나타났다. 독성물질에 해당하는 Cd과 Pb의 제거에는 은행나무가 적정하며, As 제거에는 영산홍과 은행나무 적정한 것으로 평가되었다.
- 3) 토양 내 TN이 증가할수록 식물체 내 Zn과 Cu는 증가하는 것으로 나타났으며, TP가 증가할수록 식물체 내 Zn와 Cu는 증가하다가 감소하여 일정 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 즉, 토양내 양분량이 증가하더라도 식물은 적정 수준의 양분을 흡수하기에 식물체 내 중금속 함량도 일정 수준 이상으로 증가하지 않는다.
- 4) 패랭이는 Pb을 제외한 모든 중금속에서 다른 관목류, 교 목류보다 높은 농도를 보였다. 즉, 패랭이는 중금속에 내성이 강하다는 것을 의미하며, 높은 중금속이 함유된 비점오염물질

- 이 유입되는 LID시설에 적합한 식생으로 판단된다.
- 5) 다양한 토지이용(산업단지, 도로지역, 상업지역, 주거지역, 축산지역 등)의 차이는 서로 다른 종류의 오염물질을 배출하기에 처리에 적정한 식물 종 선정은 오염물질 제거효율을 높일 수 있다.

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (NRF–2018R1D1A3B07050936)

References

- Bannerman, R.T., Owens, D. W., Dobbs, R. B. (1993). Source of pollution in Wisconsin stormwater, *Water Sci. Tech.*, 28, 241–259. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.1993. 0426
- Choi, H. (2017). Impact Assessment of Plant Growth and Pollution Removal Ability of LID Plants against Deicing Agents(CaCl2), Thesis of Master of Sciences in Kongju National University.
- Choi, H. S., Hong, J. S., Geronimo, F. K. F., & Kim, L. H. (2018 b). Implications of CaCl2 application to plants in LID facilities, *Water Sci. Tech.*, 78(5), 1045–1053. DOI: 10.2166/wst.2018.364
- Choi, H., Hong, J., Geronimo, F. K. F., & Kim, L. H. (2019). Assessment of environmental impacts of LID technologies on vegetation, *Membrane Water Treatment*, 10(1), 39–44. DOI: 10.12989/mwt,2019.10.1.039
- Choi, H., Hong, J., Lee, S., & Kim, L. H. (2016). Assessment of Salt Resistance and Performances of LID Applicable Plants, *J. of Wetlands Research*, 18(2), 201–207. DOI: 10.17663/JWR,2016.18.2.201
- Choi, J., Geronimo, F. K. F., Park, B., Hong, J., & Kim, L. (2018 a). Formulation of design guidelines for the cost-effectiveness of constructed wetlands in improving water quality, *Desalination and Water Treatment*, 101, 108–115. DOI: 10.5004/dwt.2018.21817
- Choi, J., Maniquiz–Redillas, M. C., Hong, J., & Kim, L. (2017). Development of a hybrid constructed wetland system for treating stormwater runoff from road, *Desalination and Water Treatment*, 63, 397–403. DOI: 10.5004/dwt. 2017.11443
- Driscoll, E., Shelley, P., and Strecker, E. (1990). Pollutant loadings and impacts from highway stormwater runoff.
- Geronimo, F. K. F., Maniquiz-Redillas, M. C., Hong, J., & Kim, L. H. (2019). Evaluation on the suspended solids and heavy metals removal mechanisms in bioretention

- systems, *Membrane Water Treatment*, 10(1), 91–97. <u>DOI:</u> 10.12989/mwt,2019.10.1.091
- Gurung, S. B., Geronimo, F. K., Hong, J. S., Kim, L. H. (2018). Application of indices to evaluate LID facilities for sediment and heavy metal removal, *Chemosphere*, 206, pp. 693–700. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.05.077
- Harrison, R. M., Laxen, D. P., & Wilson, S. J. (1981). Chemical associations of lead, cadmium, copper, and zinc in street dusts and roadside soils, *Environmental Science & Technology*, 15(11), 1378–1383. DOI: https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es00093a013
- Hasanuzzaman, M. (2018). Plant Responses and Adaptation to Metals/Metalloid Toxicity, Bangladesh.
- Hong, J., Geronimo, F. K., Choi, H., & Kim, L. H. (2018). Impacts of nonpoint source pollutants on microbial community in rain gardens, *Chemosphere*, 209, 20–27. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.06.062
- Hong, J., Maniquiz-Redillas, M. C., Choi, J., & Kim, L. (2017). Assessment of bioretention pilot-scale systems for urban stormwater management, *Desalination and Water Treatment*, 63, 412–417. DOI: 10.5004/dwt.2017.11444
- Hvitved-Jacobsen, T., Johansen, N. B., & Yousef, Y. A. (1994). Treatment systems for urban and highway run-off in Denmark, *Science of the Total Environment*, 146, 499–506. DOI: 10.1016/0048-9697(94)90275-5
- Jeon, J., Choi, H., Shin, D., & Kim, L. H. (2019). Installation and operation of automatic nonpoint pollutant source measurement system for cost–effective monitoring, *Membrane Water Treatment*, 10(1), 99–104. <u>DOI:</u> 10.12989/mwt.2019.10.1.099
- Kim, C. M., Lee, S. Y., Lee, E. J., & Kim, L. H. (2008). Determination of heavy metal unit load from transportation landuses during a storm, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 8(6), 155–160. DOI: http://www.j-kosham.or.kr/upload/pdf/10144287.pdf
- Kim, C. S., & Sung, K. J. (2012). Changes in Concentrations of Nutrients and Heavy Metals of Plants and Soils in Rain Garden Systems used for Non-point Source Pollution Management, J. of Soil and Groundwater Environment, 17(4), 27–35. DOI: 10.7857/JSGE.2012.17.4.027
- Kim, L. H., Kayhanian, M., Lau, S. L., & Stenstrom, M. K. (2005). A new modeling approach for estimating first flush metal mass loading, *Water Science and Tech.*, 51(3–4), 159–167. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2005.0587
 Lee, E. J., Ko, S. O., Kang, H. M., Lee, J. K., Lim, K. H.,

- Lee, B. S., & Kim, L. H. (2006). Washoff characteristics of metal pollutants in highways, *J. of Korean Society on Water Environment*, 22(1), 128–133. DOI: https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200610103435065.pdf
- Lee, S., Maniquiz–Redillas, M. C., & Kim, L. (2018). Assessment of aeration pond operation in a constructed wetland receiving high nitrogen content wastewater from livestock area, *Desalination and Water Treatment*, 101, 101–107. DOI: 10.5004/dwt.2018.21816
- Lee, S., Lee, E., Kim, C., Son, H., Maniquiz, M. C., Son, Y., & Kim, L. H. (2007 a). Characteristics of wash-off metal pollutants from highway toll-gate area, *J. of Korean Society on Water Environment*, 23(6), 945–950. DOI: https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO20071010 3451784.pdf
- Lee, S., Lee, E. J., Son, H., Kim, C., Maniquiz, M. C., Son, Y., & Kim, L. H. (2007 b). Sediment characteristics in parking lot ditch. *J. of Wetlands Research*, 9(3), 43–49. DOI: https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO20 0724578159810.pdf
- Lee S. Y., Maniquiz, M. C., Choi, J. Y., & Kim, L. H. (2009). Determination of EMCs for Rainfall Ranges from Transportation Landuses. *J. of Wetlands Researh*, 11(2), 67–76. DOI: https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200929535567512.pdf
- Lim, J. H., Kang, H. M., Kim, L. H., & Ko, S. O. (2008). Removal of heavy metals by sawdust adsorption: equilibrium and kinetic studies. Environmental Engineering Research, 13(2), 79–84. DOI: 10.4491/eer.2008.13.2.079
- Maniquiz-Redillas, M. C., Geronimo, F. K. F., & Kim, L. H. (2019). Analysis on the fractionation of heavy metals in a tree box filter treating urban runoff. Desalination and Water Treatment, 158, 114–120. <u>DOI: 10.5004/dwt.2019.24022</u>
- RDA(Rural Development Administration)(2000). Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.
- RDA(Rural Development Administration)(2012). Korean feeding standard for Hanwoo. 3rd Edition. National Institute of Animal Science. Wanju, Korea.
- Reyes, N. J., Geronimo, F. K., & Kim, L. H. (2020). Evaluation of the factors influencing the treatment performance of a livestock constructed wetland. Ecological Engineering, 149, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.105811