

# 소규모 인공습지에서 습지형태에 따른 양이온 제거 효율의 변이

## Removal Efficiencies of Cations in Microcosm-scale Wetlands of Different types

강호정<sup>1\*</sup> · 송근예<sup>2</sup>

<sup>1</sup>정회원, 연세대학교 사회환경시스템 공학부 부교수

<sup>2</sup>University of Trent, 박사후연구원

Kang, Hojeong<sup>1\*</sup> and Song, Keunyea<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Member, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Associate Professor

<sup>2</sup>School of Biological Sciences, University of Trent, Postdoc Research Fellow

**ABSTRACT:** Constructed wetlands have widely been employed to improve water quality, but only a few studies have assessed removal efficiencies of cations in pond-type and marsh-type wetlands comparatively. This study conveys removal efficiencies of cations in those types of wetlands. High removal efficiencies of  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  were observed, which appeared to be related to plant uptake and soil absorption. In contrast, release of  $\text{Ca}^{2+}$  was distinctive in pond-type wetland of which mechanism is yet to be revealed.

**KEYWORDS:** Wetland, cation, water quality, marsh, pond

**요 약:** 습지를 건설하여 수질 개선의 목적으로 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있으나, 인공습지의 대표적인 형태인 연못형 (Pond-type)과 소택지형 (Marsh-type)에서 제거되는 양이온의 처리 효율을 비교한 연구는 많지 않다. 본 논문에서는 마이크로코즘 규모로 건설된 인공습지에서 제거되는 양이온들의 처리 효율을 습지 형태 및 이온 별로 비교하는 내용을 다루고 있다. 양이온 중  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  등은 높은 처리 효율을 보였고, 이는 습지의 식물에 의한 흡수, 토양 흡착 등에 기인한 것으로 보였다. 그러나 연못형 습지의 경우 오히려  $\text{Ca}^{2+}$ 의 방출이 관찰되었으나 그 정확한 기작은 파악할 수 없었다.

**키워드:** 습지, 양이온, 수질, 소택지, 연못

## 서 론

### 연구의 배경

습지란 육상과 물 생태계 사이에 존재하는 전이 지대로 여러 가지 기능을 이유로 연구와 보존의 대상이 되고 있다 (Mitsch and Gosselink, 2007). 습지의 주요한 기능으로는 영양물질의 제거를 통한 수질 향상,

홍수나 갈수기 때 유량을 조절하는 수문학적 완충 작용, 영양염과 여러 물질들의 순환, 어류와 야생동식물의 서식처 제공, 생태공간을 제공하는 심미적 기능 등이 있다. 특히 자연 상태의 습지가 가지고 있는 정화능력을 인위적으로 향상시켜 수질정화의 목적 등으로 이용하려는 습지를 인공습지 (Constructed wetland) 라고 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 습지의 바닥 기질과 경사 등을 조정하고 수리학적 특성을 제어

\*Corresponding author: hj\_kang@yonsei.ac.kr

하기도 하며, 수생식물을 포함한 다른 생물학적 요소를 관리하기도 한다. 인공습지는 다른 수처리 방법에 비해 다양한 오염부하에 대한 적응력이 높고 투입 에너지의 양이 적고, 유지관리가 용이하다는 장점이 있다. 또한 급속한 유량 변동을 견딜 수 있고 물의 재사용과 순환을 쉽게 한다는 점도, 경관과 친수공간의 가치를 가질 수 있는 자연친화적 수처리 방법이다.

온대 지방에 존재하는 여러 종류의 습지 중 대표적인 것은 연못형 (Pond-type)과 소택지형 (Marsh-type) 습지로 대별되며, 연못형의 경우 식재된 식물이 거의 없고, 수심이 깊은 특징을 가지고 있다. 이에 비해 소택지형 습지는 정수식물 (emergent plant)을 포함하고 있고 일반적으로 수심이 더 얇은 특성을 가지고 있다. 이 두 가지 습지는 식생 유무, 수심, 저토의 차이 등으로 인해 상이한 생지화학적 특성을 보이며 이를 통해 다양한 방법으로 영양염류의 제거를 일으킨다. 특히 수체의 부영양화를 일으키는 제한 영양물질로는 질소와 인을 들 수 있으며, 이러한 이유로 질산염 ( $\text{NO}_3^-$ )과 인산염 ( $\text{PO}_4^{3-}$ )에 대한 연구가 널리 진행되었다. 질산염의 경우에는 주로 탈질 (denitrification) 반응을 통해 제거되는 반면, 인산염의 경우에는 토양 흡착을 통한 반응이 주요한 제거 경로로 추정된다 (Song et al., 2007). 연못형과 소택지형의 습지의 경우 산화환원전위의 차이나 유기탄소의 공급량 등이 상이하여 이러한 습지를 연속적으로 배치하면, 질산화-탈질의 반응이 각각의 습지에서 일어나 질소 처리 효율이 높아질 수 있다고 알려져 있다 (EPA, 1998). 그러나 이에 비해 양이온들의 제거 효율과 기작에 대한 연구는 상대적으로 제한적으로 진행되었다. 양이온 농도 자체는 수체의 수질 악화에 직접적인 영향을 미치지 않으나 질산염과 같이 다른 음이온의 이동이나 인산염과의 침전 등에 관여하여 간접적인 수질 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Vymazal, 2007).

본 연구에서는 두 가지 형태로 구성된 소규모 인공 습지에서 일어나는 양이온의 제거 효율을 알아보고자 했다. 이를 위하여 소규모로 건설된, 즉 마이크로 크즘 수준의 인공습지에 인공 오염수를 투입하며 유출수와 유입수 사이의 양이온 농도 변화를 측정하여 처리 효율을 계산하였다.

## 본 론

### 재료 및 방법

본 연구에서는 연못형과 소택지형의 두 가지 소규모 습지를 건설하여 운용하였으며, 전자는  $2.8 \text{ m}^3$ , 후자는  $3.1 \text{ m}^3$ 의 용적으로 구성되었다. 반응기의 기본 형태는 역사다리꼴로 너비와 길이의 비는 약 1:2.5였다. 또한 EPA의 권고안에 따라 유입부와 유출구 부분 사이에 완만한 경사 ( $23^\circ$ )를 유지하였고, 습지의 수심을 조절하고 유출구에서의 유량을 균등하게 형성시키기 위해  $90^\circ$  elbow형 파이프를 설치하였다. 두 습지 모두 상부로부터 바닥을 향해 15 cm의 하천토양, 15 cm의 모래, 20 cm의 자갈층을 배치하였고, 평균 수심은 연못형은 10 cm, 소택지형은 60 cm를 유지하였다. 연못형 습지에는 따로 식재하지 않았으며 소택지형 습지에는 갈대 (Phragmites japonica)를 20주 식재하였다. 유입수는 소택지형의 습지와 연못형 습지를 순차적으로 거쳐 배출되었다. 본 실험에서는  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  10 mg/L (NH: 42.25 mg/L,  $\text{NO}_3^-$ : 7.75 mg/L)와  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1 mg/L ( $\text{PO}_4$ : 0.7 mg/L)농도의 인공 오염수를 유입수로 사용하였다.

인공습지 운용은 7월에서 11월에 걸쳐 수행했으며, 이 기간 동안 물시료는 1달에 2-3회에 걸쳐 유입수와 유출수를 채취하는 방법으로 총 12회에 걸쳐 수행했다. 양이온 농도는 필터한 시료를 이온 크로마토그래피 (Dionex-120)를 이용하여 측정하였다. 분석된 이온은  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  등이다. 유입수와 유출수 농도의 차이를 처음 유입수 농도로 나눈 후 100을 곱하여 제거 효율로 표시하였다. 따라서 유출되는 양이온 농도가 작을수록 효율은 커지며, 만일 유입되는 농도보다 유출되는 농도가 크다면 이 효율은 음의 값을 갖게 된다.

### 결과

Table 1 은 양이온 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ )이 유입수에서 두 종류 습지를 통과하는 동안 제거되는 효율을 구한 것이다. 먼저  $\text{Na}^+$ 의 평균 제거효율은 -2.8%로 거의 차이가 없었다. 이 이온은 생물학적 요구 정도가 낮은 이온으로 생물의 흡수나 생육과 무관하며 월별로 나타난 변화는 토양의 흡착이나 일반적

인 변이로 나타난 것으로 추정된다. 이에 비해  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$  이 두가지 이온의 경우 평균 제거율에 88%에 달하는 높은 값을 보여주었다. 암모니움 이온의 경우에는 식물과 미생물에 의한 흡수, 토양의 유기물 등에 흡착되는 것이 주요 제거 기작으로 알려져 있다. 이 밖에도 산소 공급이 충분한 국지적인 지역에서는 질산화 반응 (nitrification)을 통해 질산염으로 산화되면서 제거될 가능성도 포함하고 있다. 암모니움 이온은 수체에 존재하는 조류와 미생물의 제한 요소로 작용할 수 있기 때문에 이렇게 높은 처리 효율은 본 인공습지가 수질개선에 중요한 기여가 가능하다는 점을 암시한다.  $\text{K}^+$ 와  $\text{Mg}^{2+}$ 의 경우 갈대의 성장에 관련된 미량영양염류로 수생생물의 성장에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서 가장 특이할만한 점은  $\text{Ca}^{2+}$ 의 제거 효율로 평균값이 -339.2%로 오히려 습지에서 유출되고 있음을 알 수 있다.  $\text{Ca}^{2+}$ 이온의 경우 생물학적으로 필요한 이온이긴 하나 질소나 인과 같이 제한요소로 작용하는 경우는 그리 많지 않다. 그러나 이렇게 습지를 통해서 대량으로 유출되는 것은 기존의 연구 결과와 상충되는 내용으로 정확한 기작이 무엇인지는 알 수 없다. 몇 가지 가능성을 추정해 보자면, 첫째로는 소택지 형태의 습지에서 식물 성장으로 발생한 유기산으로 인해 습지 내에 축적되어 있던  $\text{Ca}^{2+}$ 이온이 용출되어 배출될 가능성이 있다. 두 번째로는 본 습

지 건설에 사용된 토양이 이미  $\text{Ca}^{2+}$ 이온으로 과충전되어 습지 운용에 따라 혐기적인 조건이 조성되자 용출되어 배출될 가능성이 있다. 이러한 추정에 대한 보충 자료로 Table 2의 결과를 활용할 수 있다. Table 2는 소택지형과 연못형의 처리 효율을 나누어 표시한 것으로  $\text{Ca}^{2+}$ 이온의 처리 효율을 보면 음의 값 대부분이 소택지형 습지에서 유래함을 알 수 있다. 즉  $\text{Ca}^{2+}$ 유출의 주요 원인은 소택지형 습지이며 이는 여기 서식하는 달뿌리풀의 생육과 밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있고, 따라서 위의 가설 중 전자에 해당하는 기작이 주요할 것으로 추정할 수 있다. 특히 여름철과 초가을에 걸쳐  $\text{Ca}^{2+}$  배출이 더 크게 나타난다는 점 또한 이 가설을 뒷받침 한다. 습지 내에 식물이 존재하는 것이 모든 물질의 처리에 효과적이지 않다는 것은 산성배출수 처리 습지에서 이미 보고된 바 있다 (White et al., 2011).  $\text{Ca}^{2+}$ 은 식물과 미생물의 성장 뿐 아니라 습지 내에서 인산염과 흡착하여 토양 내에 안정화 시키고 이를 통해 수질을 개선하는 효과를 가지고 있다. 따라서 이 이온이 배출되는 것은 장기적으로 습지 내에서 인산염을 제거할 수 있는 가능성을 저해시키게 된다. 또한 수질과 관련해서는 물의 경도를 증대시키는 역할을 하게된다. 습지 식물의 어떤 유기산이 어떠한 경로로 이러한 반응을 일으키는 지에 대해 추후 연구가 필요하다고 사료된다.

Table 2의 다른 양이온의 제거 효율을 살펴보면

**Table 1.** Final and average efficiencies of cation removal

Removal efficiency	July	August	September	October	November	Average
$\text{Na}^+$	10.3	-1.8	-57.9	-59.7	33.2	-2.8
$\text{NH}_4^+$	82.3	92.1	94.8	91.6	97.4	88.5
$\text{K}^+$	85.5	85.2	88.8	94.9	100.0	88.4
$\text{Mg}^{2+}$	41.3	34.9	-24.2	94.2	77.1	39.6
$\text{Ca}^{2+}$	-419.6	-246.9	-612.2	26.1	-105.8	-339.2

**Table 2.** Removal efficiencies of cations in marsh-type and pond-type wetlands

Removal efficiency (%)		$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	
Wetland types	Marsh	Range	-100~100	0~120	50~120	-50~150	-800~50
		Removal efficiency (%)	-16.8	75.2	88.3	30.4	-395.3
	Pond	Range	-100~150	-50~100	-100~150	-50~100	-50~100
		Removal efficiency (%)	-14.4	37.8	-155.6	-3.9	0.44

모두 소택지 형태의 습지에서 연못형에 비해 높게 나타났다. 본 연구에서 살펴본 양이온의 경우 일반적인 토양 흡착 보다는 식물이 매개된 흡수 혹은 흡착이 주요한 반응으로 추정된다. 소택지형 습지의 식물은 직접적인 흡수 뿐 아니라 유기물의 공급이나 저토내 산소 공급 등의 방법으로 습지내의 지화학적 환경을 변화시키는 것으로 알려져 있어서 이러한 반응들을 통해서 양이온 제거 효율을 향상시킬 수 있을 것이다.

## 결 론

본 연구에서는 두 가지 형태의 인공습지에서 제거 되는 양이온의 제거 효율을 분석하였는데,  $\text{NH}_4^+$ 을 포함한 대부분의 양이온이 높은 효율로 제거되었고, 특히 식생이 존재하는 소택지형에서 처리 효율이 높게 나타났다. 그러나  $\text{Ca}^{2+}$ 은 예외적으로 오히려 배출되었으며 이는 식물의 유기산을 통한 반응으로 추정되나 정확한 기작 규명을 위해서는 향후 더 세밀한 조작 실험이 필요할 것으로 사료된다.

## References

- EPA [Environmental Protection Agency] (1998) *Constructed Wetland and Aquatic Plant System for Municipal Wastewater Treatment, 'Design Manual', EPA/625/1-88/022*, 4.
- Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G. (2007) *Wetlands*, John Wiley & Sons, New York, N.Y.
- Song, K. -Y., Zoh, K. -D. and Kang, H. (2007) "Release of phosphate in a wetland by changes in hydrological regime." *Sci. Tot. Environ.*, Vol. 380, pp. 13-18.
- White, R. A., Freeman, C. and Kang, H. (2011) "Plant-derived phenolic compounds impair the remediation of acid mine drainage using treatment wetlands." *Ecol. Eng.*, Vol. 37, pp. 172-175.
- Vymazal, J. (2007) "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands." *Sci. Tot. Environ.* Vol. 380, pp. 48-65.