

## 플랜터형 호안구조물을 설치한 저관리형 습지의 수질 제어 기작에 관한 연구

함은경·최윤의·김민·전진형<sup>†</sup>

고려대학교 대학원 환경생태공학과

## A Study on the Water Quality Management of Modular Revetment Structure installed Low-Maintenance Constructed Wetland

Eun Kyung Ham·Yun Eui Choi·Min Kim·Jinhyung Chon<sup>†</sup>

*Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University*

(Received: 26 February 2015, Revised: 06 March 2015, Accepted: 14 May 2015)

### 요약

습지 토양으로 인한 수질 악화를 저감할 수 있는 저관리형 습지 조성을 위한 기초연구로써 진행된 본 연구의 목적은 인공지반 위에 습지 조성 시 수체와 토양의 분리가 가능한 플랜터형 호안구조물이 설치된 습지의 수질 제어 기작을 연구하는 것이다. 실험구는 고무수조에 마사토를 채운 플랜터형 호안구조물을 적용하여 수체와 토양을 분리하였으며, 대조구는 고무수조에 마사토를 포설하여 수체에 직접 노출시켰다. 실험구와 대조구의 수질을 Kolmogorov-Smirnov Z 검정으로 분석한 결과, pH, BOD, SS, Chl-a, T-P, T-N에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타나 플랜터형 호안구조물 적용 여부에 따른 수질 제어의 효과 차이를 입증하였다. 환경정책기본법에 근거한 수질 분석결과 수온과 EC는 실험구와 대조구가 비슷한 양상으로 나타났으며, pH와 DO는 두 메조코즘이 같은 등급에 속하였다. BOD, SS, Chl-a, T-P는 실험구가 더 높은 등급을 상회하는 것으로 평가되었으며, T-N은 대조구가 더 낮은 수치를 나타냈지만 수질의 등급이 같은 것으로 나타나 미미한 차이임을 알 수 있었다. 본 연구는 습지 조성 방식에 있어 플랜터형 호안구조물을 활용해 토양과 수체를 분리하여 습지를 조성하면 문제시 되어 오던 사면 침식으로 인한 육화 및 건조화 현상과 영양염류로 인한 녹조나 부영양화 현상 등을 예방하고, 식생대를 제어할 수 있음을 시사하였고, 특히 플랜터형 호안구조물을 활용한 습지 조성 시 수질 제어 기작을 통해 습지의 심미적, 생태적, 사회적, 경제적 가치를 증진시킬 수 있는 것에 대해 증명하였다. 따라서 본 연구의 결과는 향후 효율적인 수질 유지가 가능하여 관리조방적인 인공습지를 계획하고 조성하는데 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 습지 구조체, 습지 토양, 메조코즘, 모니터링

### Abstract

This study is a basic research for low maintenance constructed wetlands which can prevent water quality deterioration due to wetland soils. The purpose of this study is to analyze water quality control mechanisms of constructed wetland on the artificial ground which installed the modular revetment structure(MRS), a device that separates water and soil. This study was then conducted with two different wetland mesocosms (a treatment plot and a control). These mesocosms were monitored to analyze effects of water quality control of the MRS. A treatment plot was built, and separated into soil and water, by filling the MRS with the decomposed granite soil in the mesocosm made of rubber material. A control plot was built where the decomposed granite soils were exposed to water by leaving the soil on the bottom of the mesocosm made of rubber material. Water quality was then analyzed by using Kolmogorov-Smirnov Z examination which then showed that pH, BOD, SS, Chl-a, T-P, T-N had statistically valid difference between a container with the MRS and one without it. According to the analysis of the water quality, the temperature and the EC level came out similarly and both mesocosm showed same level on pH and DO. A treatment plot had higher levels of BOD, SS Chl-a, and T-P. A control plot's T-N value was little lower than that of the treatment plot. This study suggests method of constructed wetlands using the MRS prevents problems occurring in wetland soils: aridity of wetlands by soil erosion, eutrophication, and algal blooms due to nutrients released from wetland soil. These functions of constructed wetland with the MRS increase aesthetic, ecologic, social, and economic value of the wetland. Outcomes of this research will later enable more proficient way of stabilizing water quality and provide data for planning low maintenance constructed wetlands.

Key words : Wetland structure, Soil of wetland, Mesocosm, Monitoring

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University  
E-mail: jchon@korea.ac.kr

## 1. 서 론

습지 토양은 다양한 생물군의 서식처이자 양분을 제공하는 공급원으로써 역할을 하고 오염물질을 흡착하는 기작을 통해 습지를 생태적으로 유지할 수 있게 하며(Lee et al., 2010), 탄소를 저장하고 생물서식처를 제공하는 등 생태계 유지에 긍정적 영향을 미치는 요소로써 주로 보고되어 왔다(Mitra et al., 2005). 그러나 다른 한편으로 습지의 육화 및 건조화 현상을 일으키고 영양염류 용출에 따른 수질 악화 등을 야기하는 요소로써 부각되고 있다. 호안이 안정되지 않은 인공습지는 홍수 시 범람과 빗물의 유입, 유수의 파랑 등의 요인으로 인해 습지의 사면이 침식(Tae, 2011)된다. 침식된 토양이 습지 바닥면에 퇴적되면서(Yi and Nam, 2008) 습지의 육화 및 건조화 현상이 나타난다(Lee, 2008; Wonju Regional Environmental Office, 2009; Yang, 2013). 특히 사면 침식에 의해 퇴적된 토양에서 용출되는 영양염류는 수질을 악화시켜 습지 전체 생태계의 종 다양성을 감소시키며 연쇄적인 문제를 발생시키는 것으로 나타난다(Kwon and Choi, 2009). 습지 토양은 수체와 직접 접촉하고 있어 수질에 영향을 미치는 주 요소로 작용하므로(Leong and Tanner, 1999) 관리가 필요하다.

습지 토양은 수체 내 물질들의 침하 및 점오염원, 비점오염원, 빗물 등 외부에서 유입되는 영양염류 축적으로 인해 유기질 토양이 된다(Lee et al., 2010). 또한 토양 내 영양염류는 미생물에 의한 분해, 확산, 부유 등의 기작을 통해 수질과 습지 생물에도 영향을 미친다(Yoon et al., 2007). 특히 여름철 수온이 상승하거나 혐기성 토양이 형성되면 인(P)이 용출되어(Lee and Kang, 1999; Park et al., 2000) 부영양화를 초래하고 녹조를 발생시킨다(Chen et al., 2009; Kim et al., 2007; Lee and Kang, 1999; Paerl et al., 2001; Park, 2013).

소규모 습지일수록 녹조가 발생하면 부유물질이 증가하여 수체의 탁도가 높아져 햇빛 투과율이 저하되고 산소 교환이 어려워짐에 따라 심각한 혐기성 토양이 형성된다. 이 상태가 지속되면 저하된 생육조건에서 고사한 수생식물군의 사체가 축적되고(Choi et al., 2010), 퇴적층의 유기물이 분해되면서 수체 내의 용존산소를 고갈시켜 습지 전체를 혐기성 상태로 만드는 피드백 현상으로 나타난다(Choi et al., 2009; Haam et al., 2012). 퇴적층이 쌓여 육화가 진행되면 육상 식물군 중 속성수종의 빠른 성장에 의한 토양의 수분 손실로 인해 건조화 현상도 가속화된다고(Yang, 2013).

위에 언급된 문제들에서 유추할 수 있듯이 잘못된 토양관리는 수질 악화를 초래할 수 있기 때문에(Choi and Ban, 2007; Jang, 2007; Park, 2012; Park et al., 2012) 습지 내 토양을 효율적으로 관리할 수 있는 방안 마련이 필요하다. 본 연구에서는 메조코즘 실험을 통해 수체 내에 토양을 직접 노출시키지 않은 실험구가 영양염류를 제거하고 부유물질에 대한 저감 효과를 밝혀낸 선행연구(Hijosá-Valsero et al., 2010; 2012)를 통해 수체와 토양을 분리하면 효율적인 수질관리가 가능하다는 점에 착안하였다. 이에 본 연구는 수체와 토양을 분리하는 습지조성기술을 개발하여 토

양으로부터 발생될 수 있는 습지의 문제점들을 최소화하고자 하였고, 수질 제어를 통한 유지·관리의 용이함을 도모하여 경제적인 이점을 강화할 수 있는 인공습지를 조성하는데 기여하고자 한다. 그러나 습지 토양은 저류하는 수체의 오염물질을 흡착하여 수질을 안정시킬 수 있는 요소로써 중요하게 인식되어 오고 있는 점에 따라 습지 내 토양을 제거하는 방식에 대한 긍정적 효과를 입증할 필요성이 있다. 이에 습지 수체에 긍정적·부정적 영향을 동시에 미치는 토양 존재 여부에 따른 수질을 분석할 필요성이 있다.

저관리형 습지 조성을 위한 기초연구로써 진행된 본 연구의 목적은 인공지반 위에 습지 조성 시 수체와 토양의 분리가 가능한 플랜터형 호안구조물이 설치된 습지의 수질 제어 기작을 연구하는 것이다. 이를 위해 수체와 토양을 분리하면서 식생 적용이 가능한 플랜터형 호안구조물을 제안하여 기능과 특징을 기술하였고, 플랜터형 호안구조물의 수질 제어 효과의 실효성을 분석하고자 실험실 조건에서 메조코즘을 설치하여 수질분석을 실시하였다. 본 연구는 소규모 인공습지 메조코즘에서 플랜터형 호안구조물 활용에 따른 수질 제어 효과에 대한 차이를 분석한 것으로, 향후 저관리형 인공습지 설계 및 개발에 기여할 수 있는 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실험설계

#### 2.1.1 플랜터형 호안구조물의 구조

인공지반 위에 습지 조성 시 수체와 토양의 분리가 가능한 플랜터형 호안구조물이 설치된 습지의 수질 제어 기작을 연구하기 위해 본 연구에서는 인공습지 사면의 토양 침식을 예방하고 토양으로부터 영양염류가 용출되는 현상을 최소화 할 수 있는 인공습지 설계 공법의 일환으로 수체와 토양이 분리된 습지 구현이 가능한 플랜터형 호안구조물을 제안하였다. 플랜터형 호안구조물의 규모는 가로 60 cm, 세로 60 cm, 높이 60 cm이며, 소재는 Geotextile과 Steel mesh로 구성되어 있다(Fig. 1). 섬유 조직인 Geotextile은 UV 처리된 폴리에틸렌 소재로써 토양 층진이 가능하도록 막을 형성하는 주요 구성재이고 흡습성이 있어 토양의 보수성을 확보하는 역할을 한다. Steel mesh는 플랜터형 호안구조물의 내구성을 향상시키며 설치를 용이하게 한다. 본 연구에서는 이 모듈을 활용하여 수질 제어 효과를 분석하기 위한 소규모 메조코즘을 조성하였다.

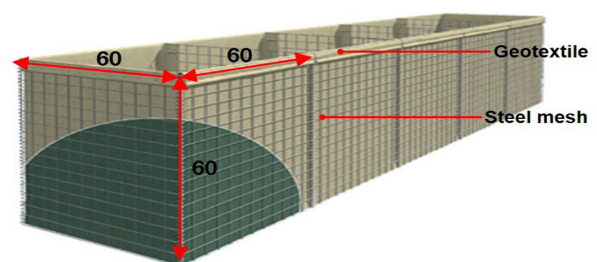


Fig. 1. Perspective view of the modular revetment structure (Unit is cm).

2.1.2 플랜터형 호안구조물의 특징

플랜터형 호안구조물을 활용해 습지 구조체를 형성하는 공법은 인공습지의 호안선을 안정적으로 보호하고, 토사와 우수 등을 통해 흘러 들어오는 오염원을 일부 차단하는 역할을 하여 육화 및 건조화 현상을 예방할 수 있다. 실제로 플랜터형 호안구조물은 습지 구조체로서 사면의 토양 침식으로 손상된 호안선을 재건하거나 수변 경계 안정화를 도모한 미국 뉴올리언즈와 뉴저지의 활용사례(<http://hesco-usa.com>) 및 호안선 보호에 대한 논의된 선행연구들을 통해 물리적 이용의 가능성을 입증할 수 있다(McCormack et al., 2012; Ravit and Rounds, 2015; Strokes et al., 2012). 또한 플랜터형 호안구조물은 물에 젖은 섬유 소재인 Geotextile로 구성되어 보습성과 보수력이 있어(Chae, 1996) 플랜터형 호안구조물 내에 토양을 충전하면 습한 토양을 유지하여 식생대의 역할을 함과 동시에, 토양층에 함유된 영양염류의 용출을 최소화 할 수 있다. 수체 내로 토양에 포함된 유기물 및 영양염류의 유출 가능성을 낮추는 것은 수질을 유지할 수 있는 방도가 될 것이다. 그러나 플랜터형 호안구조물의 수질 제어에 대한 실효성을 검증한 연구가 미비함에 따라 본 연구에서 인공지반 위에 습지 조성 시 수체와 토양의 분리가 가능한 플랜터형 호안구조물이 설치된 습지의 수질 제어 기작을 연구하였다.

2.1.3 메조코즘 조성

본 연구를 수행하기 위해 경기도 과천시 소재한 공동 연구 기관 소유 비닐하우스에 메조코즘을 설치하였다. 메조코즘은 가로 135 cm, 세로 94 cm, 높이 52 cm, 부피 550L 고무수조에 플랜터형 호안구조물을 적용한 실험구 1개소와 플랜터형 호안구조물을 적용하지 않은 대조구 1개소를 제작하였다. 실험구는 플랜터형 호안구조물 내에 총 부피 144L, 무게 196,800g, 토심 30 cm 마사토를 포설하여 토양이 수체와 간접 노출되는 구조로 조성하였다(Fig. 2). 대조구는 고무수조 바닥면에 실험구와 같은 양의 마사토를 직접 포설하여 토양이 수체와 직접 노출되는 구조로 조성하였다(Fig. 3). 실험 재료로 사용한 마사토의 특성은 Table 1과 같으며, 유지수심은 40 cm로 설정하였다.

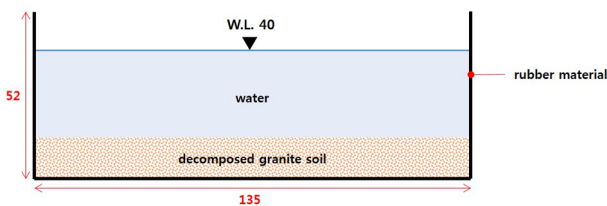


Fig. 2. The elevation of a treatment plot (Unit is cm).

Table 1. Physiochemical property of decomposed granite soil

pH	EC (ds/m)	TOC (mg/kg)	T-N (mg/kg)	T-P (mg/kg)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil Texture
6.6	0.35	0.02	40.00	144.00	86.11	6.77	7.12	Loamy sand

Table 2. Water quality of inflow

Temperature (°C)	pH	EC (µs/cm)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	SS (mg/L)	Chl-a (mg/m³)	T-P (mg/L)	T-N (mg/L)
8.9	6.36	2030.0	10.4	2.5	21.1	0.13	0.014	0.912

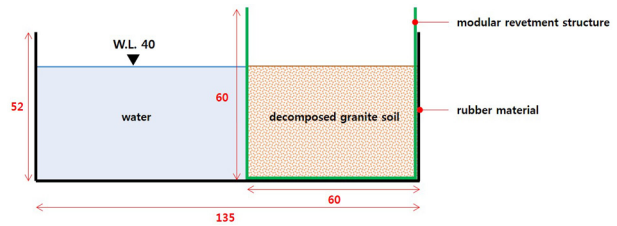


Fig. 3. The elevation of a control plot (Unit is cm).

2.2 분석방법

2.2.1 수질 모니터링 및 분석 방법

본 연구의 모니터링 시기는 메조코즘을 조성한 후, 일주일 이 지난 2014년 09월 18일부터 2014년 10월 22일까지 1주 간격으로 총 6번의 수질분석을 실시하였다. 실험구와 대조구 메조코즘에서 회당 각각 5L의 물을 채수하였고 채취한 시료는 냉장 보관하여 실험실로 운반하였다. 샘플의 채수와 1주일 간 자연 증발로 인해 줄어든 수체량을 채우기 위해 메조코즘 조성지에서 활용되는 농업용수를 유입시켜 수심 40 cm를 유지하였다. 유입수의 수질은 Table 2와 같다.

수질 모니터링에 사용된 검사 항목은 수온, pH, EC, DO, BOD, SS, Chl-a, T-P, T-N으로 총 9가지 이다. 수질항목은 수체의 환경요인의 변화양상 파악을 위해 수온, 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 용존산소농도(DO)를 분석하였으며, 오염 정도 확인을 위한 생물학적 산소 요구량(BOD), 탁도에 영향을 미치는 고형물질의 정도 파악을 위한 부유물질(SS)을 분석하였다. 또한 부영양화 정도 및 영양염류 농도 분석을 위해 엽록소-a(Chl-a), 총 인(T-P), 총 질소(T-N)를 분석하였다.

이 항목 중 수온은 현장 조사 하였으며, 나머지 항목은 실험실에서 3번 반복하여 분석하였다. pH는 먹는물수질공정시험기준에 의거하여 유리전극법으로 분석하였다. EC, DO, BOD, SS, Chl-a, T-P, T-N은 수질오염공정시험기준에 의거하여 분석하였다. EC는 측정기(PCSTestr 35)를 시료에 담가 측정하였으며, DO는 용존산소-적정법(Dissolved Oxygen-Titrimetric Method)에 따라 분석하였다. BOD는 시료를 20°C의 빛이 차단된 배양기에서 5일간 저장한 후, 호기성 미생물의 증식과 호흡작용에 의하여 소비되는 DO를 계산하여 분석하였다. SS는 미리 무게를 단 유리섬유여과지(GF/C)에 시료 통과 후 항량으로 건조하여

무게를 달아 여과 전·후의 유리섬유 여과지의 무게 차를 통해 계산하였으며, Chl-a는 아세톤 용액으로 여과시킨 여과지의 클로로필 색소를 추출하고, 추출액의 흡광도를 663, 645, 630 및 750 nm에서 측정하여 분석하였다. T-P는 과황산칼륨 분해 전처리 과정을 거친 후 총 인-자외선/가시선 분광법(Total Phosphorus-UV/Visible Spectrometry)으로 분석하였고, T-N은 알칼리성 과황산칼륨 분해 전처리 후 총 질소-자외선/가시선 분광법-산화법(Total Nitrogen-UV/Visible Spectrometry-Oxidation Method)으로 검사하였다.

### 2.2.2 수질 항목별 차이 및 변화양상 분석

실험구와 대조구의 수질 제어 효과 차이를 분석하기 위해 소표본 자료를 효율적으로 활용하여 두 집단의 동일성을 검정하기 위한 비모수적 방법인 Kolmogorov-Smirnov Z 검정(Hong and Kim, 2009; Lee and Choi, 2008)을 실시하였으며, SPSS 22.0 통계프로그램(SPSS Inc., 2013)을 활용하였다. Kolmogorov-Smirnov Z 검정 결과를 바탕으로 환경정책기본법 제12조 제2항의 수질 및 수생태계 분야 중 호소 및 하천의 생활환경 기준에 따라 실험구와 대조구의 수질 항목별 변화 양상을 분석하였다.

플랜터형 호안구조물을 습지 구조체로써 활용하여 습지를 조성하게 될 경우 최심부 1 m 이하인 소택에 속하는 호소가 되므로 pH, DO, SS, Chl-a, T-P, T-N은 호소의 생활환경 기준을 근거로 분석하였다. BOD는 호소의 생활환경 기준에 명시되어 있지 않아 하천의 생활환경 기준을 근거로 분석하였다. BOD는 호소의 생활환경 기준에 포함된 COD를 대신한 것으로, 농업용수를 유입수로 사용하여 폐수나 오염수 등에서 발생하는 난분해성 물질 유입에 대한 우려가 없기 때문에 분석한 항목이며 생물서식처로써의 인공습지 조성을 염두에 두었기 때문에 선택한 항목이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 수질 차이 분석 결과

실험구와 대조구의 수질분석 결과를 Kolmogorov-Smirnov

Z 검정으로 분석한 결과 수온, EC, DO는 유의한 차이를 보이지 않았으나 pH, BOD, SS, Chl-a, T-P, T-N에서 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다( $p < 0.05$ )(Table 3).

### 3.2 수질 항목별 변화 양상

#### 3.2.1 환경요인 변화

수온의 경우 실험구와 대조구 모두 외부 온도에 영향을 받는 비닐하우스에 조성되어 계절적인 영향으로 인해 수온이 점차 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 4). pH는 실험구와 대조구가 모두 매우 좋음(6.5~8.5)에 속했지만, 실험구가 대조구보다 상대적으로 높은 것으로 분석되었으며(Fig. 5), DO 역시 실험구와 대조구가 모두 매우 좋음(7.5 이상)에 속하는 것으로 분석되었다(Fig. 6). EC는 실험구와 대조구 모두 비교적 높은 수치를 나타내지만(Fig. 7), 영양염류 등의 유기물과 철분 등이 많이 포함된 농업용수인 유입수(Table 2)보다 낮은 농도를 유지하고 있는 것을 확인할 수 있었다. EC는 수온에 따라 그 값을 달리하는 변동성을 지닌 항목(Park, 2003; Wilde et al., 1998)이기 때문에 낮은 온도를 띤 유입수의 전기전도도 값이 높게 나타난 것으로 사료되며 1주일 사이에 수온의 변화를 겪은 메조코즘 내에 수체는 유입수의 수치보다 낮은 상태로 유지 되었을 것으로 판단된다.

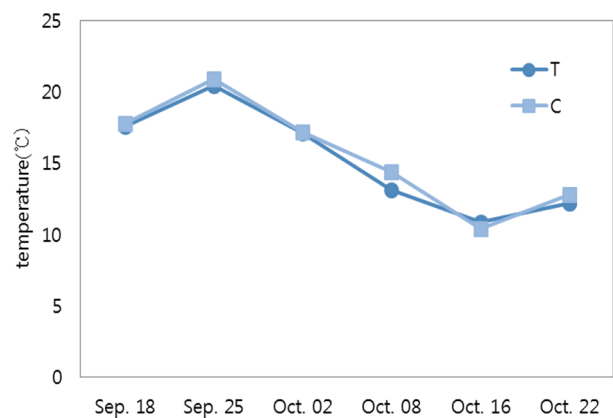


Fig. 4. Variations of Temperature (T: treatment, C: control).

Table 3. The results of Kolmogorov-Smirnov Z test between treatment and control.

	Most extreme differences			Kolmogorov-Smirnov Z	Asymp Sig. (2-tailed)
	Absolute	Positive	Negative		
Temperature	0.167	0.167	-0.167	0.500	0.964
pH	0.722	0.167	-0.722	2.167	0.000*
EC	0.333	0.333	-0.167	1.000	0.270
DO	0.222	0.167	-0.222	0.667	0.766
BOD	0.500	0.500	0.000	1.500	0.022*
SS	0.833	0.833	-0.056	2.500	0.000*
Chl-a	0.611	0.611	0.000	1.833	0.002*
T-P	0.833	0.833	0.000	2.500	0.000*
T-N	0.833	0.167	-0.833	2.500	0.000*

\* $P < 0.05$



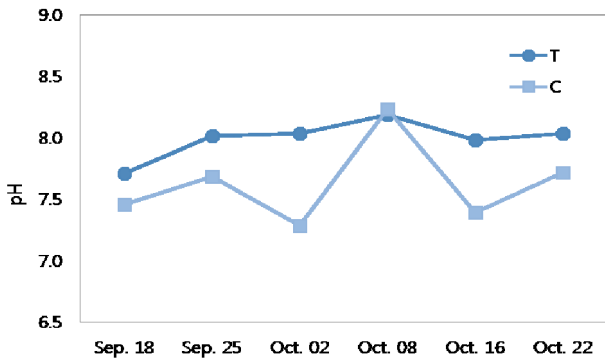


Fig. 5. Variations of pH (T: treatment, C: control).

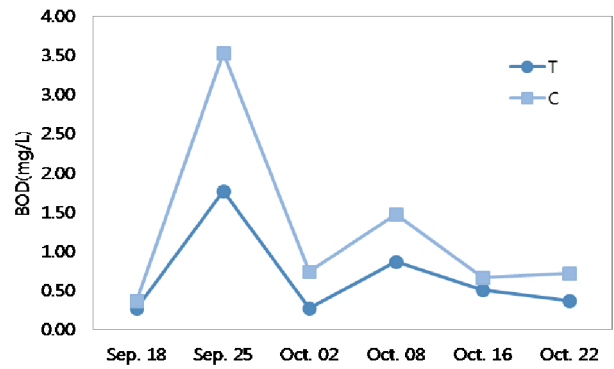


Fig. 8. Variations of Biochemical Oxygen Demand (T: treatment, C: control).

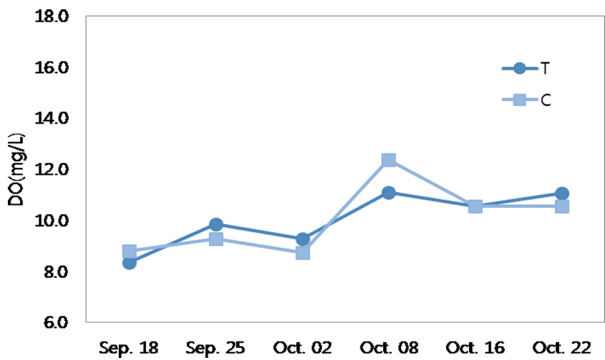


Fig. 6. Variations of Dissolved Oxygen (T: treatment, C: control).

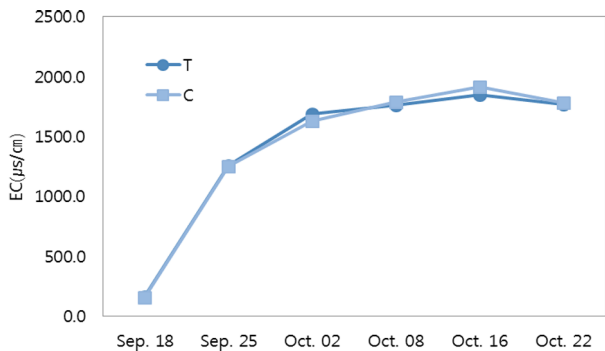


Fig. 7. Variations of Electric Conductivity (T: treatment, C: control).

### 3.2.2 생물학적 산소 요구량(BOD) 변화

수질의 오염 정도를 파악하고자 분석된 BOD 결과, 실험구는 하천의 생활환경기준에서 분류한 등급에 의하면 매우좋음(1 이하)부터 좋음(2 이하)을 유지하였으며, 대조구는 매우좋음(1 이하)부터 보통(5 이하)을 상회하는 것으로 나타나 실험구의 오염 정도가 더 낮은 것으로 평가되었다( $p < 0.05$ )(Fig. 8). 실험 2주차의 급격한 BOD수치 증가는 수온 상승 및 Chl-a 감소 등에 의한 복합적 원인으로부터 수체 내 유기물이 증가했기 때문인 것으로 해석된다(Shin et al., 1996). 그러나 실험구가 대조구에 비해 증가폭이 작으며, 실험 3주차 이후로 수질이 안정화되는 것을 확인할 수 있었다. 생물학적 산소 요구량은 박테리아가 유기물을 분해하는데 필요로 하는 산소의 양이므로 (Kim, 2014), 실험구에서 대조구 보다 낮은 수치를 나타낸 것은 수체 내에 유기물의 양이 낮은 것으로 해석할 수 있다.

### 3.2.3 부유물질(SS) 변화

물이 혼탁해 지는 정도를 파악하고자 SS를 분석한 결과, 실험구는 호소의 생활환경보전 기준에서 보통(15 이하)에 해당하는 안정적인 수치를 나타내고 있는 것으로 나타난 반면, 대조구는 마지막에 채수된 샘플을 제외한 결과에서 23.6~211.7mg/L이상의 높은 수치를 기록하여 나쁨(쓰레기 등이 떠 있지 않을 것) 등급으로 분석되었다(Fig. 9).

이는 토양이 플랜터형 호안구조물에 의해 수체와 분리된 실험구보다 토양이 수체에 직접 노출된 대조구에서 토양의 미세 입자들이 수체의 파동에 영향을 받아 부유하였기 때문에 판단된다. 그러나 토양이 플랜터형 호안구조물 내에 담긴 실험구의 경우 위와 같은 현상에 큰 영향을 받지 않았을 것으로 예상된다.

SS는 수체의 탁도를 결정짓는 주요 인자이다. 탁도가 높을수록 빛 투과율이 낮아지고 수생식물의 광합성 속도가 줄어들게 되어, 용존산소량(DO) 감소 및 혐기성 환경이 조성되므로 습지의 수질이 악화될 수 있다(Haam et al., 2012). 그러나 탁도에 대한 제어가 가능하다는 것은 인공 습지의 수질이 우수하게 관리되고 있음을 의미하며, 이는 이용자의 높은 시각적·후각적 만족을 유도하여(Lee and Lee, 2015), 습지의 심미적 기능을 상승시킨다.

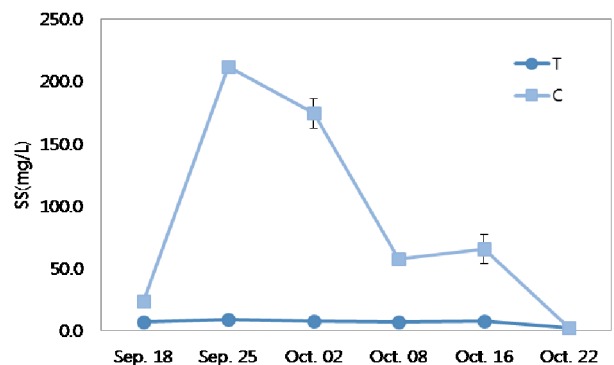


Fig. 9. Variations of Suspended Solid (T: treatment, C: control).

### 3.2.4 엽록소-a(Chl-a) 변화

부영양화의 정도를 파악하기 위해 Chl-a를 분석한 결과, 실험구의 경우 호소의 생활환경보전 기준에서 분류한 등급

에서 매우 좋음(5 이하)을 충족하는 것으로 평가되었다. 반면 대조구는 약 2~28mg/m<sup>3</sup>까지의 수치를 기록하여 약간 나쁨(35 이하)까지 평가되기도 하였다. 4mg/m<sup>3</sup> 미만을 빈 영양상태, 4~10mg/m<sup>3</sup>을 중영양상태, 10mg/m<sup>3</sup> 초과를 부영양상태로 판단하는 선행연구(NAS, 1972)에 미루어보아, 실험구는 지속적으로 빈영양상태로 나타났지만, 대조구는 약 2~28mg/m<sup>3</sup>까지의 수치를 기록하며 빈영양상태부터 부영양상태까지 나타나 불안정한 상태를 보였다(Fig. 10). 플랜터형 호안구조물 설치로 수체와 토양이 분리된 실험구는 대조구에 비해 상대적으로 토양 및 공기와 맞닿는 수체의 면적이 적다. 이에 토양과 공기로부터 영향을 덜 받은 결과로 Chl-a 수치가 안정화 된 것으로 보인다(Choi and Kang, 1998; Yoon et al., 2007). 또한 대조구에서 2주차 결과 값이 높게 나타난 것은 당시 수온이 20°C 이상으로 올라 조류의 발생이 나타났을 것(Kim et al., 2007; Park et al., 2011; Shin and Cho, 2000)으로 사료되며, 이 후 계절에 영향을 따라 수온이 10.4±17.1°C로 계속 낮아졌기 때문에 조류발생은 점차 감소한 것으로 판단된다. 식물플랑크톤의 성장으로 부영양화 및 녹조현상이 유발될 수 있으므로, 실험구의 Chl-a 농도가 낮고 안정적이게 조사된 것은 수질 오염 위험이 낮으며 수체의 투명도가 높게 유지될 수 있는 것이라 할 수 있다.

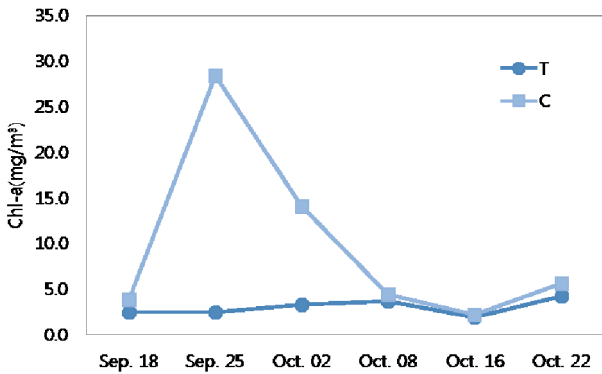


Fig. 10. Variations of Chlorophyll-a (T: treatment, C: control).

3.2.5 총 인(T-P) 및 총 질소(T-N) 변화

수체의 부영양화 정도를 평가하기 위해 Chl-a 외에도 조류 성장에 관련된 영양염류에 대한 평가는 필수적이다(Park et al., 2000). T-P를 분석한 결과, 실험구의 경우 호소의 생활환경보전 기준에서 매우 좋음(0.01 이하)부터 약간 좋음(0.03 이하)까지 충족하는 것으로 평가되었다. 반면 대조구는 0.03~1.17mg/L로 분석되어 약간 좋음(0.03 이하)부터 나쁨(1.5 이하) 등급에 미치는 결과를 나타냈다(Fig. 11). 이와 같은 결과는 실험구의 경우 플랜터형 호안구조물의 섬유 소재인 Geotextile에 의해 토양으로부터 영양염류가 용출되는 현상이 제한적으로 나타났을 것으로 사료되며, 인(P)이 제어되는 기작은 인공습지의 수질 제어를 하는데 효과적으로 작용할 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안한 플랜터형 호안구조물의 Geotextile은 UV 처리된 소재로 외부 공간에

서 오랜 기간 훼손되지 않고 유지될 수 있음에 따라 이러한 기작의 유효 기간이 길게 이어질 것으로 예상된다.

T-N의 경우, 실험구와 대조구가 모두 약간 나쁨(1.0 이하)에 속하는 것으로 분석되었다. T-N항목에서는 실험구가 상대적으로 더 높은 수치를 나타냈지만 큰 차이를 보이지 않고 같은 기준 등급을 나타내었다(Fig. 12). 대조구의 습지 내 토양에 있는 미생물이 대사과정을 통해 수체 내 질소성분을 NH<sub>3</sub> 또는 N<sub>2</sub>로 기체화시키는 속도에 영향을 주었기 때문에 사료된다(Cho and Chung, 2007). 그러나 실험구와 대조구 T-N은 같은 등급으로 분류될 수 있는 수준의 미미한 차이인 것으로 나타났다.

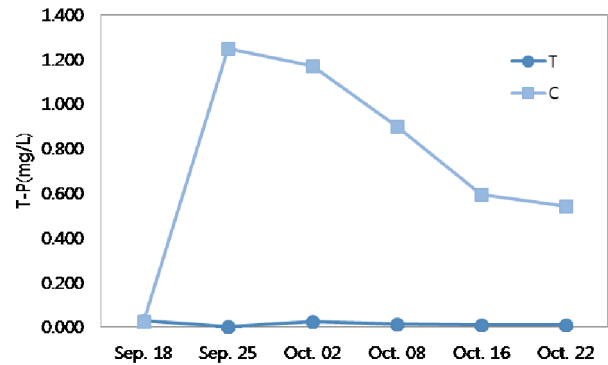


Fig. 11. Variations of Total Phosphorus (T: treatment, C: control).

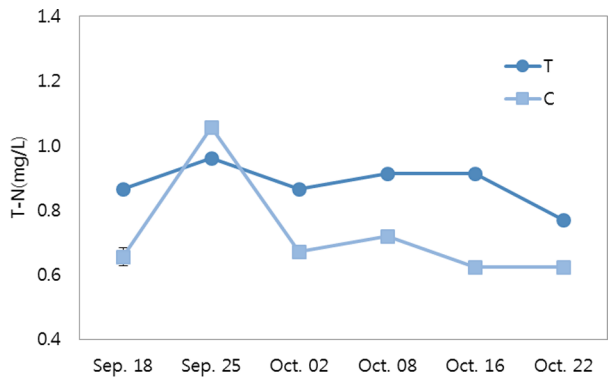


Fig. 12. Variations of Total Nitrogen (T: treatment, C: control).

4. 결론

본 연구는 습지 토양으로부터 발생될 수 있는 문제점들을 최소화하기 위해 수체와 토양이 분리된 습지 구현 방식을 제안하고, 수질 유지 효과를 검증하고자 인공지반 위에 수체와 토양을 분리시킬 수 있는 플랜터형 호안구조물이 설치된 습지의 수질 제어 기작을 연구하였다. 마사토가 포설된 플랜터형 호안구조물을 적용하여 토양과 수체를 분리한 실험구와 플랜터형 호안구조물 없이 마사토를 메조코즘 내부에 직접 포설한 대조구의 수질 제어 효과 차이의 통계적 유의성을 확인하기 위해 비모수 검정 방법을 활용하였다. Kolmogorov-Smirnov Z 검정으로 분석한 결과, 환경요인

인 pH, 오염정도를 나타내는 BOD, 탁도에 영향을 미치는 SS, 그리고 부영양화와 녹조현상의 원인이 되는 Chl-a 및 T-P, T-N의 항목에서 유의한 차이가 있는 것으로 나타나 ( $p < 0.05$ ) 실험구가 대조구에 비해 수질 제어 효과가 우수하다는 것을 입증하였다.

수체의 투명도를 깨끗하게 유지할 수 있는 것과 오염도가 낮게 유지될 수 있는 것은 인공습지의 친수 기능과 경관 가치 및 미적 가치, 휴양의 가치를 상승시키는데 작용할 것이다. 또한 영양염류 중 인(P)이 제어되는 기작은 인공습지의 부영양화 및 녹조현상을 예방하여 인공습지가 가지는 심미적, 생태적, 사회적, 경제적 가치를 증진시킬 것이며 일부 독성을 가진 녹조류에 의한 사람들의 보건의 문제 등 조류 발생으로 인한 악영향을 최소화 할 수 있는 역할을 할 것이다.

특히 구조상 토양을 담은 플랜터형 호안구조물은 구조물 내부에 충전된 토양에서 서식 가능한 식물종에 대한 과다 증식을 제어하여 적절한 식생대 및 개방수면의 유지를 지속시킬 수 있다. 식생대 제어가 중요한 이유는 습지 바닥면 토양에서 생육하던 식물이 고사하여 다시 퇴적되고 분해되면서 수체 내의 용존산소를 고갈시켜 습지를 혐기성 상태로 만드는 현상(Haam et al., 2012)과 같은 문제를 예방할 수 있기 때문이다. 제어된 식생대를 형성하는 것은 수질 관리 목적으로도 유용할 뿐만 아니라 안정된 생육 조건에서 식물이 활착할 수 있게 하여, 호안선을 보호하는 물리적 역할 및 다양한 수생태계 생물군의 서식처로서 수생태계와 육상 생태계를 연결하는 생태적 역할을 수행할 수 있게 할 것이다.

본 연구에서 활용한 플랜터형 호안구조물은 해외 선진 사례에서 보여지듯 실제 실무에서 활용되고 있는 기술군으로써 현장 적용에 무리가 없을 것으로 판단되며, 설치가 간편하고 용이하다는 점에서 시공 상의 편의성을 제공할 수 있을 것이다. 그러나 본 연구에서 설계한 메조코즘의 방식과 같이 습지 바닥면의 토양이 제거되는 습지 조성 방식은 방수층이 확보된 지반에서 조성이 가능하다는 일부 적용상의 한계점이 있다. 하지만 이러한 맥락에서 도심 내 건물의 옥상이나 콘크리트 상부 등 인공지반에 습지 조성 시 구조체로써 활용이 가능할 것으로 사료된다. 또한 플랜터형 호안구조물을 개별적으로 활용할 시 사면침식으로 훼손된 자연습지나 하천의 호안 복원 시에 이용이 가능할 것이다. 이에 본 연구는 향후 습지 계획 및 설계 단계에서 대상지를 지속 가능한 공간으로 조성할 수 있는 방향으로 설정하는데 기여할 수 있는 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

그러나 모니터링이 단기간에 마무리되어 장기적인 추이를 보지 못한 것은 본 연구의 한계이며 향후 연구에서 장기 모니터링을 통해 플랜터형 호안구조물에 대한 심도 있고 구체적인 자료를 마련해야 할 것이다. 특히 생물학적 산소 요구량 항목의 경우 본 연구에서 진행된 모니터링으로 안정화 되었다고 단정하기 어려운 부분이 있으므로 실질적으로 해당 항목의 안정화를 확인하기 위해서는 장기적인 모

니터링을 통해서 분석해야 할 것이다. 게다가 본 연구에서 실시된 메조코즘의 규모에 미루어 볼 때, 실제 플랜터형 호안구조물을 활용해 조성한 인공습지가 관리조방적인 형태를 띌 수 있는지에 대한 짐작이 어렵기 때문에 향후 같은 방식으로 여러 가지 규모의 인공습지를 조성하고 수질 모니터링을 실시하여 실효성에 대한 검증과 현실성에 대한 판단을 할 필요가 있다. 이어 기존 해외의 선행연구들에서 입증되어 왔듯이, 플랜터형 호안구조물을 활용한 습지 조성 시 사면 토양 침식 방지 및 수변경계 안정화를 도모할 수 있음을 국내 실정에 맞게 실험 설계하여 물리적인 기능성에 대한 근거도 마련되어야 할 필요가 있다. 또한 플랜터형 호안구조물의 구성 소재에 대한 기능적 측면과 관련된 실험들이 보완되어야 하며, 식생의 생육기반체로서 역할을 하는 플랜터형 호안구조물의 식물 생육 경과를 함께 검증하지 못한 점은 향후 연구에서 진행되어야 한다. 식생 플랜트 모듈에 식물을 식재한 실험 진행에 있어 식물에 따른 수질 제어 효과를 동시에 분석해 볼 필요가 있으며 이를 바탕으로 수질 제어의 효율성을 증가시킬 수 있는 적절한 식물에 대한 연구가 이어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업 (과제명: 습지 생태계 조성 및 자연생태회복기술 개발, 과제번호: 416-111-010)”의 지원을 받아 수행하였습니다. 이에 감사의 글을 전합니다.

## References

- Chen, S, Chen, X, Peng, Y and Peng, K (2009). A mathematical model of the effect of nitrogen and phosphorus on the growth of blue-green algae population, *Applied Mathematical Modelling*, 33(2), pp. 1097-1106.
- Chae, SJ (1996). *Study of the textile material for the use of engineering work and construction*, Masters's Thesis, Ewha Womans University, Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Cho, YC and Chung, SW (2007). Sediment release rate of nutrients from Namyang reservoir, *J. of Korean society of Environmental Engineering*, 29(12), pp. 1345-1352. [Korean Literature]
- Choi, DH, Choi, KS, Kim, DS, Kim, SW, Hwang, IS, Lee, MK, Kang, H and Kim, ES (2009). Distribution of Pollutant Content within Surface Sediment and Evaluation of Its Removal Efficiency in the Sihwa Constructed Wetland, *Environmental engineering research*, 31(9), pp. 755-764. [Korean Literature]
- Choi, DH and Kang, H (1998). Effect of Aeration on Water Quality, *J. of Korean Society on Water Quality*, 14(1), pp. 47-56. [Korean Literature]

- Choi, DH, Kang, H and Choi, KS (2010). Case study on the improvement of pollutant removal efficiency in Sihwa constructed wetland, *J. of Korean Wetlands Society*, 12(2), pp. 25–33. [Korean Literature]
- Choi, JY and Ban, WJ (2007). *Improving Artificial Wetlands for Nonpoint Source Pollution Control*, KEI 2007 WO-06, Korea Environment Institute. [Korean Literature]
- Haam, JH, Kim, HJ, Kim, DH and Kim MO (2012). Maintaining aerobic condition in constructed wetland for methane gas emission control, *Proceeding of the 2012 Conference of the Korean Society of Environmental Agriculture*, The Korean Society of Environmental Agriculture, Muju, Korea, pp. 325–325. [Korean Literature]
- HESCO. <http://hesco-usa.com/>
- Hijosa-Valsero, M, Sidrach-Cardona, R and Bécáres, E (2012). Comparison of interannual removal variation of various constructed wetland types, *Science of the Total Environment*, 430(-), pp. 174–183.
- Hijosa-Valsero, M, Sidrach-Cardona, R, Martín-Villacorta, J and Bécáres, E (2010). Optimization of performance assessment and design characteristics in constructed wetlands for the removal of organic matter, *Chemosphere*, 81(5), pp. 651–657.
- Hong, JS and Kim, JH (2009) Nonparametric homogeneity tests of two distributions for credit rating model validation, *J. of the Korean data & information science society*, 20(2), pp. 261–272. [Korean Literature]
- Jang, YS. (GwangJudream) (2007). [http://www.gjdream.com/v2/news/view.html?uid=374282&news\\_type=201&page=387&paper\\_day=0&code\\_M=2&list\\_type=201](http://www.gjdream.com/v2/news/view.html?uid=374282&news_type=201&page=387&paper_day=0&code_M=2&list_type=201)
- Kim, HS, Hwang, SJ and Kong, DS (2007). Cyanobacterial development and succession and affecting factors in a eutrophic reservoir, *Korean J. of Ecology and Environment*, 40(1), pp. 121–129. [Korean Literature]
- Kim, JT (2014). Lowess and outlier analysis of biological oxygen demand on Nakdong main stream river, *J. of the Korean data & information science society*, 25(2), pp. 119–130. [Korean Literature]
- Kwon, YH and Choi, HG (2009). *The Impact of Climate Change on the Ecosystem: The Case of Wetland Plants*, 2009–07, Korea Environment Institute. [Korean Literature]
- Lee, CH and Choi, SW (2008) Normality tests using nonparametric rank measures for small sample, *J. of the Korea safety management & science*, 10(3), pp. 237–273. [Korean Literature]
- Lee, GH. (NEWSIS) (2008). <http://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LSD&mid=sec&sid1=102&oid=003&aid=0002281414>
- Lee, JY and Kang, SH (1999). Prediction of phosphorus transport from sediment: prediction of phosphorus transport from sediment and development of phosphorus control technology, *J. of Korean Society of Water and Wastewater*, 13(2), pp. 89–94. [Korean Literature]
- Lee, JY, Kang, DS and S, KJ (2010). Assessment of the wetland soil development in constructed wetlands using the soil properties of a reference wetland, *J. of Korean Wetlands Society*, 12(1), pp. 1–14. [Korean Literature]
- Lee, LH and Lee, YD (2015). The impact of water quality in the visual and olfactory satisfaction of tourists, *Ocean and Coastal Management*, 105, pp. 92–99. [Korean Literature]
- Leong, LS and Tanner, PA (1999). Comparison of Methods for Determination of Organic Carbon in Marine Sediment, *Marine Pollution Bulletin*, 38(10), pp. 875–879.
- McCormack, SM, VanDyke, C, Suazo, A, and Kreis, D (2012). Temporary Flood Barriers. Mitra S, Wassmann R and Vlek, PLG (2005). An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock, *Current Science*, 88(1), pp. 25–35.
- NAS, N (1972). *Water Quality Criteria*, National Academy Press, Washington DC, USA.
- Paerl, HW, Fulton, RS, Moisaner, PH and Dyble, J (2001). Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria, *The Scientific World Journal*, 1(-), pp. 76–113.
- Park, HJ (2013). *Study on harmful cyanobacteria and off-flavor production in Lake Paldang*, Masters's Thesis, Konkuk University, Seoul, Korea.
- Park, HJ, Kwon, OB and Ahn, TS (2000). Water Quality Improvement by Artificial Floating Island, *Environmental research*, 4(1), pp. 90–97. [Korean Literature]
- Park, JG. (2003) Characteristics of pH, Electric Conductivity and Water Temperature of Groundwater in Yongnup, Daeam-san, *J. of the Korean Geographical Society*, 38(1), pp. 1–15. [Korean Literature]
- Park, HK, Kim, HB, Lee, JJ, Lee, JA, Lee, HJ, Park, JH, Seo, JK, Youn, SJ and Moon, JS (2011). Investigation of Criterion on Harmful Algae Alert System using Correlation between Cell Numbers and Cellular Microcystins Content of Korean Toxic Cyanobacteria, *J. of Korean Society on Water Quality*, 27(4), pp. 491–498. [Korean Literature]
- Park, KS (Kihoilbo) (2012). <http://www.kihoilbo.co.kr/news/articleView.html?idxno=457764>
- Park, KS, Cheng, J and Kim, YC (2012). Sediments and design considerations in the forebay of stormwater wetland, *J. of Wetlands Research*, 14(2), pp. 223–235. [Korean Literature]
- Ravit, B, Weis, JS, and Rounds, D (2015). Environmental review and case studies: Is Urban Marsh Sustainability Compatible with the Clean Water Act?, *Environmental Practice*, 17(01), pp. 46–56.
- Shin, JK and Cho, KJ (2000). The Impact on Water Quality from Blue-Green Algae Microcystis of Natural Phytoplankton



- by Algal Assay, *J. of the Korean Environmental Sciences Society*, 9(3), pp. 267–273. [Korean Literature]
- Shin, SK, Park, CK, and Lee, SW (1996). The Relationship between Chlorophyll-a and BOD in the Nakdong River, *Korean Society of Water Environment*, 12(4), pp.369–375. [Korean Literature]
- Stokes, S, Wunderink, S, Lowe, M, and Gereffi, G (2012). Restoring gulf oyster reefs.
- Tae, DH (2011). *Determination of settling and erosional parameters of cohesive sediments from inner Sihwa Lake*, Masters's Thesis, Chonbuk national University, Jeonju, Korea. [Korean Literature]
- Wilde, F. D., Radtke, D. B., Gibs, J., Iwatsubo, R. T (1998). *National field manual for the collection of water-quality data*, US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations.
- Wonju Regional Environmental Office (2009). *A summary report of arid prevention project enforcement result of Yongnup located at Daeam-san*, Wonju Regional Environmental Office. [Korean Literature]
- Yang, HG (2013). *A study on Arid Prevention Management Method of Ungok Wetland Preservation Areas*, Jeonju Regional Environmental Office. [Korean Literature]
- Yi, GC and Nam, JC (2008). Management program and ecological characteristics of forest wetlands located at Sinbul Mountain, *J. of Korean Wetlands Society*, 10(2), pp. 1–14. [Korean Literature]
- Yoon, MH, Hyun, JT, Huh, NS, Kwon, SH and Cho, DC (2007). A study on release characteristics of lake sediments under oxic and anoxic conditions, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 29(9), pp. 1003–1012. [Korean Literature]