

ORIGINAL ARTICLE

## 강우시 인공습지를 이용한 유기물관리

이상팔 · 박제철\*

금오공과대학교 환경공학과

### Management of Organic Matters by Constructed Treatment Wetlands during Rainfall Events

Sang-Pal Lee, Je-Chul Park\*

Department of Environment Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea

#### Abstract

This study analyzed the changes in the concentrations of organic matters in constructed treatment wetlands, coming from discharge water from a sewage treatment plant and non-point pollutant sources during rainfall events. At the beginning of a rainfall event, a massive amount of particulate organic matter flowed in, and was removed from the sedimentation basin (S1, S2); dissolved organic matter was removed after passing through stepwise treatment processes in the wetland. During dry period in the wetland, the removal efficiency rate for COD and TOC was -21 and -7%, respectively; during the rainfall event, the removal efficiency rate for COD and TOC were 47 and 43%, respectively. The highly-concentrated organic matters that flowd in at the beginning of the rainfall event was stabilized by various structures in the wetland before water discharge. Cyanobacteria blooms annually at the confluence of the So-ok stream and Daecheong Lake. Therefore, it is expected that the wetland will contribute significantly to reducing cyanobacteria and improving water quality in the area.

**Key words** : Constructed wetland, Rainfall, Organic matter, Total organic carbon

#### 1. 서론

습지는 자연적 혹은 인공적, 영구적 혹은 일시적으로 토양이 물에 침수되거나 토양표면 또는 토양표면 근처에 물이 존재하는 지역으로 자연습지와 인공습지로 분류할 수 있다(Gerberg et al., 1986). 자연습지는 강 주변이나 냇가 등에 생성되어 홍수조절과 지하수를 제공하는 내륙습지와 해안을 따라 발달하여 바닷

물을 정화하고 태풍과 해일의 피해를 막아주며 다양한 생물의 서식지로 연안 어업활동의 근간이 되는 연안습지가 있다. 인공습지는 이러한 자연습지의 기능을 자연에 가깝게 복원하여 훼손된 생태계의 복원 뿐 아니라, 공원이나 생태교육장으로의 기능, 수질정화 기능, 생물다양성의 보존 등 여러 가지의 목적으로 이루어진다(Mitsch and Gosselink, 2000).

습지에서의 수질정화 기작은 크게 미생물의 대사

Received 26 January, 2017; Revised 13 February, 2017;

Accepted 14 February, 2017

\*Corresponding author: Je-Chul Park, Department of Environment Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea

Phone : +82-54-478-7633

E-mail : pjc1963@kumoh.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

활동과 식물에 의한 영양염류의 흡수와 같은 생물학적 기작과 물-식물-퇴적토-식물뿌리 사이에서 일어나는 침전, 흡착 그리고 응집과 같은 물리화학적 기작으로 나눌 수 있다. 이러한 기작들은 독립적 또는 복합적인 과정을 통해 일어난다(Reddy and DeBusk, 1987). 생물학적 기작의 주요 기능은 미생물에 의한 분해기능으로서 습지내의 유기물을 무기물로 변환시키고, 변환된 무기물은 식물이 흡수하여 처리하는 것이다. 그리고 습지의 식생은 유속을 감소시켜 부유물질을 침전시키기 때문에, 이들 입자에 흡착된 오염물질이 함께 침전된다. 수표면의 산소교환과 활발한 광합성 작용으로 증가된 산소는 유기물을 산화·분해시킬 수 있다(Mitsch and Grosselink, 2000).

최근 들어 인공습지는 자연습지가 가지고 있는 다양한 기능중 수질정화 기능을 생활하수, 축산폐수, 농업 및 광산폐수를 처리하는 목적으로 1960년대부터 미국과 유럽에서 이용되어 왔다(EPA, 2000). 국내에서는 1990년대부터 도입되어 현재는 하천주변에 비점오염저감 시설, 상수원의 수질개선을 위한 댐저수지 상류 인공습지로 확대 이용되고 있다. 자연생태계의 일부를 이용하는 인공습지는 야생동물과 다양한

식물이 서식할 수 있는 서식지로 이용되며, 건설비용, 운용비용 등을 절감할 수 있는 경제적인 장점이 있다(Bachand and Horne, 1999; Mitsch and Jørgensen, 2003; Hsu et al., 2011; Jou et al., 2012). 그러나 이러한 인공습지는 계절적 영향, 퇴적물의 재 용출, 고사한 식물체의 분해에 의한 영양물질 용출 등에 의해 처리효율이 낮아질 수 있다(Kadlec and Wallace, 2008).

호소의 수질을 개선하기 위해 인공습지를 이용하여 오염물질 제거에 관한 연구(Faulwetter et al., 2009; Hsueh et al., 2014), 인공습지 식생조성에 관한 연구(Greenway, 2007; Zhang et al., 2010), 퇴적물의 영향에 관한 연구(Horne and Goldman, 1994) 등의 많은 연구가 이루어져 왔다. 하지만 대부분 비강우시 조사와 인공습지의 효율을 높이기 위한 연구로써 강우시 발생하는 비점오염물질과 하수처리장 운영으로 인해 발생하는 오염물질의 특성과 처리에 대해서는 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 대청호 수질개선을 위해 옥천읍에 설치된 인공습지를 이용하여 비강우시 유입되는 하수처리장 방류수의 점오염원과 강우시 유입되는 비점오염원의 유기오염물질이 생태인공습지를 통과하면서



Fig. 1. Constructed wetlands in Okcheon.

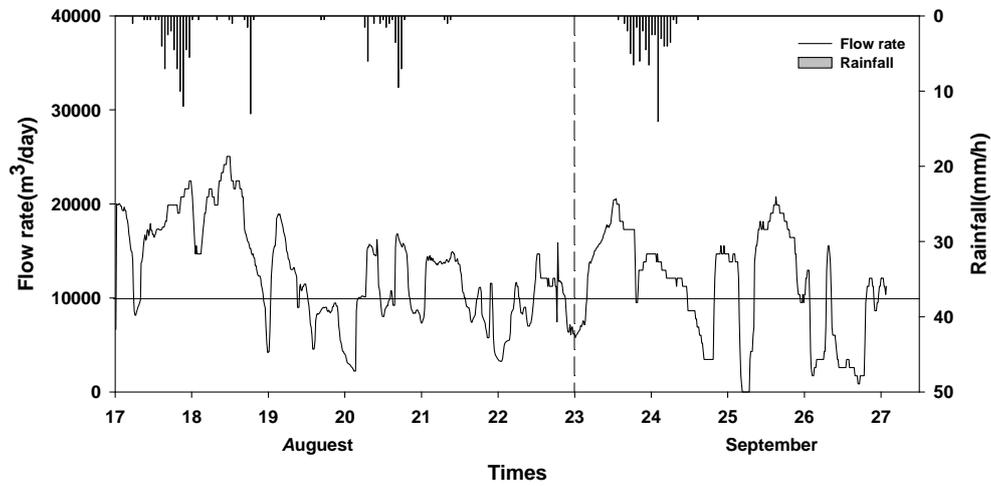


Fig. 2. Variations of flow rate in constructed wetlands during rainfall events.

어떤 변화를 하는지 모니터링 하였으며, 특히 강우시 유입되는 비점오염물질을 분석하여 수질정화용 인공 습지를 설계할 때 강우시 발생하는 비점오염물질 처리 효율을 높일 수 있는 방법을 제안하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사대상지의 개요

본 연구의 조사대상지는 충청북도 옥천군 군북면 지오리에 위치한 소옥천 생태습지로 옥천하수처리장 방류수 및 유역의 비점오염원을 관리하기 위하여 2011년에 준공되었다. 설계 유입 유량은 18,000 m<sup>3</sup>/day, 설계 수리학적 체류시간은 48 h, 시설면적은 34,500 m<sup>2</sup>로 설계되었으며 인공습지 구조는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 「유입부(IN) → 침강지 1(S1) → 침강지 2(S2) → 깊은 습지(P1) → 얇은 습지(P2) → 생태침강지(S3) → 방류부」로 구성되어 있다. 습지 조성 후 수생식물을 이용한 수질정화를 위하여 2013년에는 깊은 습지(부레옥잠, 물상추), 얇은 습지(갈대)에 식생을 식재하였으며, 2014년에는 깊은 습지(수련), 얇은 습지(갈대), 생태침강지(수련)에 식생을 식재하였다.

2.2. 조사방법

현장 수질조사는 비강우시와 강우시 유기물 항목

을 중심으로 조사하였으며, 조사기간은 2013년 4월에서 2014년 12월까지 정기적으로 모니터링을 하였다. 강우시 집중조사는 기상청의 일기예보를 통해 강우를 미리 예측하여 조사하였으며, 1차 조사기간은 2014년 8월 17일에서 2014년 8월 23일, 2차 조사기간은 2014년 9월 23일에서 2014년 9월 27일까지 조사하였다 (Fig. 2). 시료는 샘플링 후 4℃이하로 보관하여 실험실로 옮겨졌으며, 지점별로 채수한 시료의 COD<sub>Mn</sub> (Total-COD, Dissolved-COD)는 수질오염공정시험기준(MOE, 2011)에 준하여 분석하였다. TOC (Total Organic Carbon), DOC (Dissolved Organic Carbon)는 550℃에서 미리 태운 10 mL 유리병에 담은 후 2N HCl을 첨가하여(pH 2 이하로 맞추) Air-zero 가스로 포기시켜 CO<sub>2</sub>를 미리 제거한 후, 고온(680℃)에서 백금촉매가 내장된 Shimadzu TOC-VCPH로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. COD 유기물

수생태계에서의 유기물은 비생물학적 구성요소의 일부로서 생분해성 유기물(Labile organic matter)과 난분해성 유기물(Refractory organic matter)로 분류된다(Wetzel, 2001). 일반적으로 분해가 쉬운 유기물은 BOD 유기물로 측정되고 있고, 산화제로 분해되는

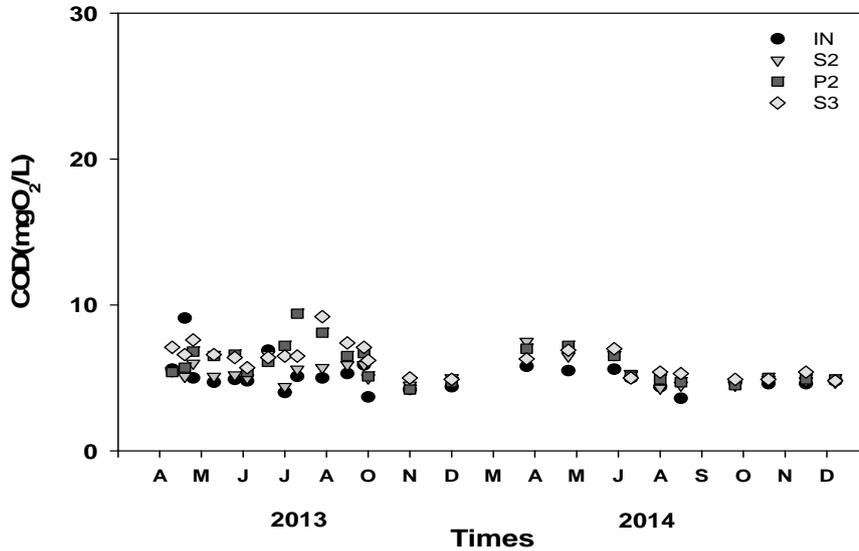


Fig. 3. Change of COD concentrations in constructed wetlands during dry period.

유기물은 COD 유기물, 고온연소에 의해 측정되는 유기물은 TOC 유기물로 정의하고 있다. 각각 유기물의 정량범위는 TOC>COD>BOD 순으로 높게 측정된다 (Thurman, 1985).

인공습지에서의 비강우시 COD 유기물 농도변화를 Fig. 3에 나타내었다. 비강우시 COD 농도는 유입수가 평균 5.3 mg/L, 방류수가 평균 6.2 mg/L로 습지를 통과하면서 약간 증가하는 경향을 보였으며, 인공습지에서의 COD 제거효율은 -21%로 나타났다. 이와 같이 비강우시 유입되고 있는 COD 유기물은 습지를 통과하면 제거되기 보다는 약간 증가하는 경향을 보이고 있었으며, 이러한 원인은 유입수량이 많지 않아 깊은 습지(P1), 얇은 습지(P2), 생태침강지(S3)를 통과하면서 체류시간이 길어져 조류가 성장하는 원인이 되었고, 성장한 조류는 습지내부에서 생성된 COD 유기물로 약 20% 정도 차지하는 것으로 나타났다. 인공습지에서 체류시간 증가에 의한 내부생성 COD 유기물에 대한 문제는 이전 연구에서도 지적된 바 있지만(Barber et al., 2001) 아직 널리 알려진 저감 기술은 없고, 수생식물을 식재하여 조류성장을 억제시키려는 기초연구가 수행되고 있는 초기단계라 할 수 있다 (Brix, 1997).

강우시 COD(Total-COD), DCOD(Dissolved COD) 유기물 농도변화는 Fig. 4와 같다. 유입수의 COD, DCOD 농도는 1차 강우시 4.8~21.5, 4.1~10.4 mg/L, 2차 강우시 4.3~21.9, 3.6~10.5 mg/L 범위를 나타냈다. 강우기간 동안 유입수의 COD, DCOD 평균농도가 각각 10.5, 5.8 mg/L(DCOD가 55%)였으며, 방류수의 COD, DCOD 평균농도는 각각 5.5, 4.7 mg/L(DCOD가 85%)로 나타났다. 강우시에는 비강우시와는 다르게 습지를 통과하면서 COD 농도가 약간 감소하는 경향을 보였으며, 제거효율은 COD가 47%, DCOD가 18% 정도로 입자성 COD 유기물(약 29%)이 많이 제거되는 것으로 나타났다. 강우시 초기 강우(flushing)에 의해 발생되는 비점오염물질의 형태는 용존성 보다는 입자성 오염물질이 대량 발생되고 있는 것으로 보고되고 있으며(Lee et al., 2010), 본 연구결과도 강우초기에 대량 유입된 입자성 COD 유기물은 침전지 역할을 하는 침강지(S1, S2)와 P1-P2-S3를 통과하면서 많은 양이 침전되어 크게 감소하는 것으로 나타났다.

### 3.2. TOC 유기물

최근 들어 수계에서의 유기물오염은 BOD 유기물

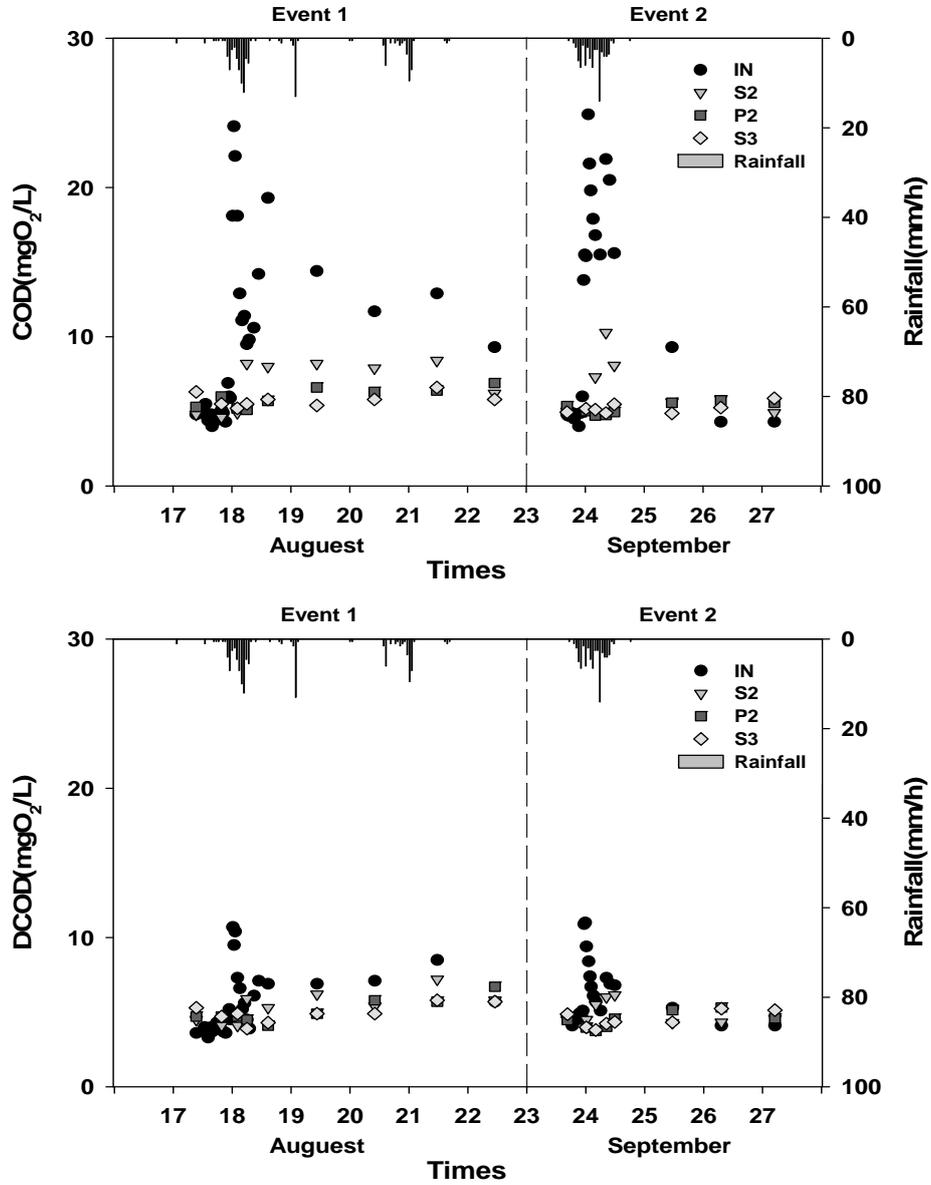


Fig. 4. Change of COD and DCOD concentrations in constructed wetlands during rainfall events.

(생분해성)은 감소하고, COD와 TOC 유기물(난분해성)은 증가하는 추세이다. 이렇게 증가추세에 있는 난분해성 유기물을 관리하기 위해 정부에서는 TOC 유기물 측정방법을 수질오염공정시험기준에 도입하였고, 유기물을 체계적으로 관리하기 위해 유기물오염

지표로 TOC 기준을 설정하였다(MOE, 2011).

각 단계별 소옥천 인공습지에서의 TOC, DOC 유기물 농도변화를 Fig. 5에 나타내었다. 비강우시 TOC, DOC 농도는 유입수가 평균 4.1, 3.5 mg/L, 방류수가 평균 4.3, 3.7 mg/L로 습지를 통과하면서 약간

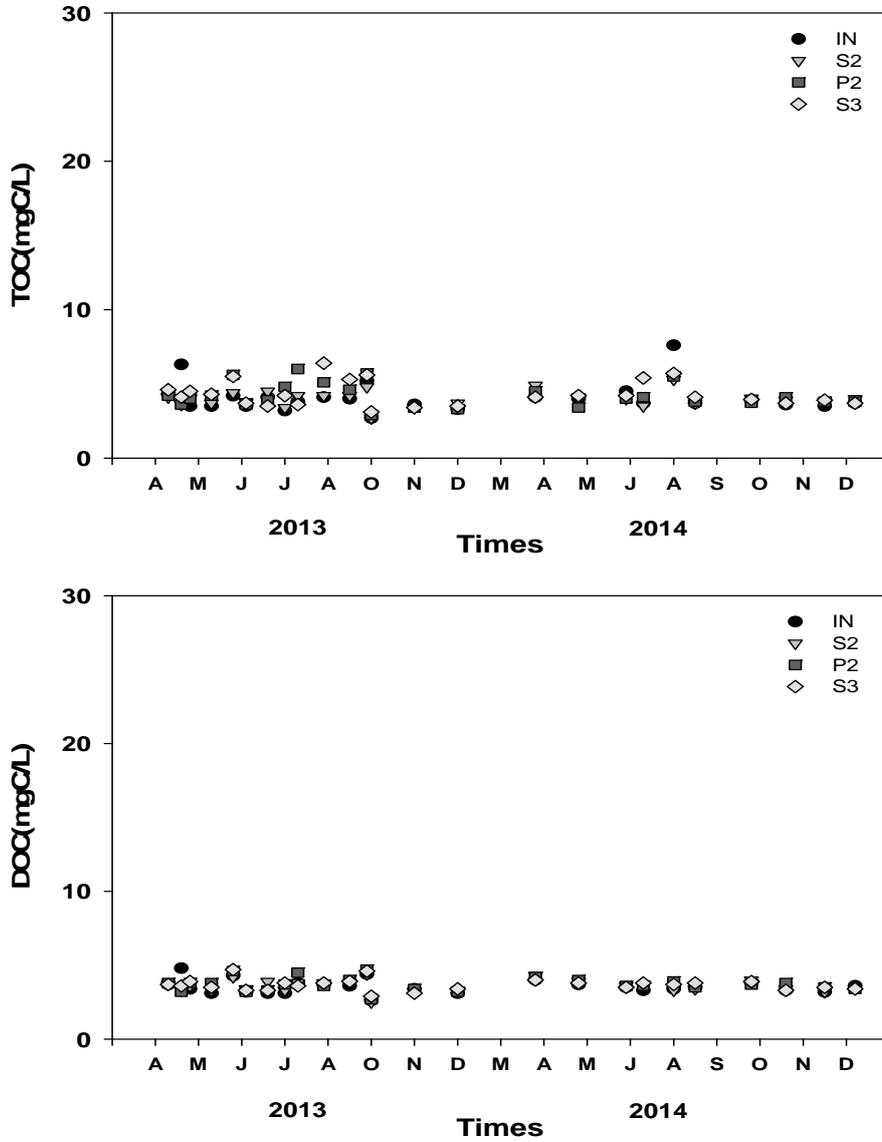


Fig. 5. Change of TOC and DOC concentrations in constructed wetland during dry period.

증가하는 경향을 보였으며, 인공습지에서의 TOC, DOC 제거효율은 -7, -4%로 나타났다. 이와 같이 비강우시에는 COD 유기물과 같이 습지내부에서 생성된 TOC 유기물의 영향으로 습지를 통과하면 제거되기 보다는 약간 증가하는 경향을 보이고 있었다. 비강우시 습지에서의 TOC 유기물 분포특성을 보면 입자성 보다는 용존성 형태(POC/DOC비 1.5:8.5)로 주로 존

재하는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 국내 기존 연구와 유사한 결과라 할 수 있다(Seong and Park, 2012).

강우시 TOC, DOC 유기물 농도변화는 Fig. 6과 같다. 유입수의 TOC, DOC 농도는 1차 강우시 3.7~10.2, 3.0~7.2 mg/L, 2차 강우시 3.7~26.2, 3.6~10.7 mg/L 범위를 나타냈다. 강우기간 동안 유입수의

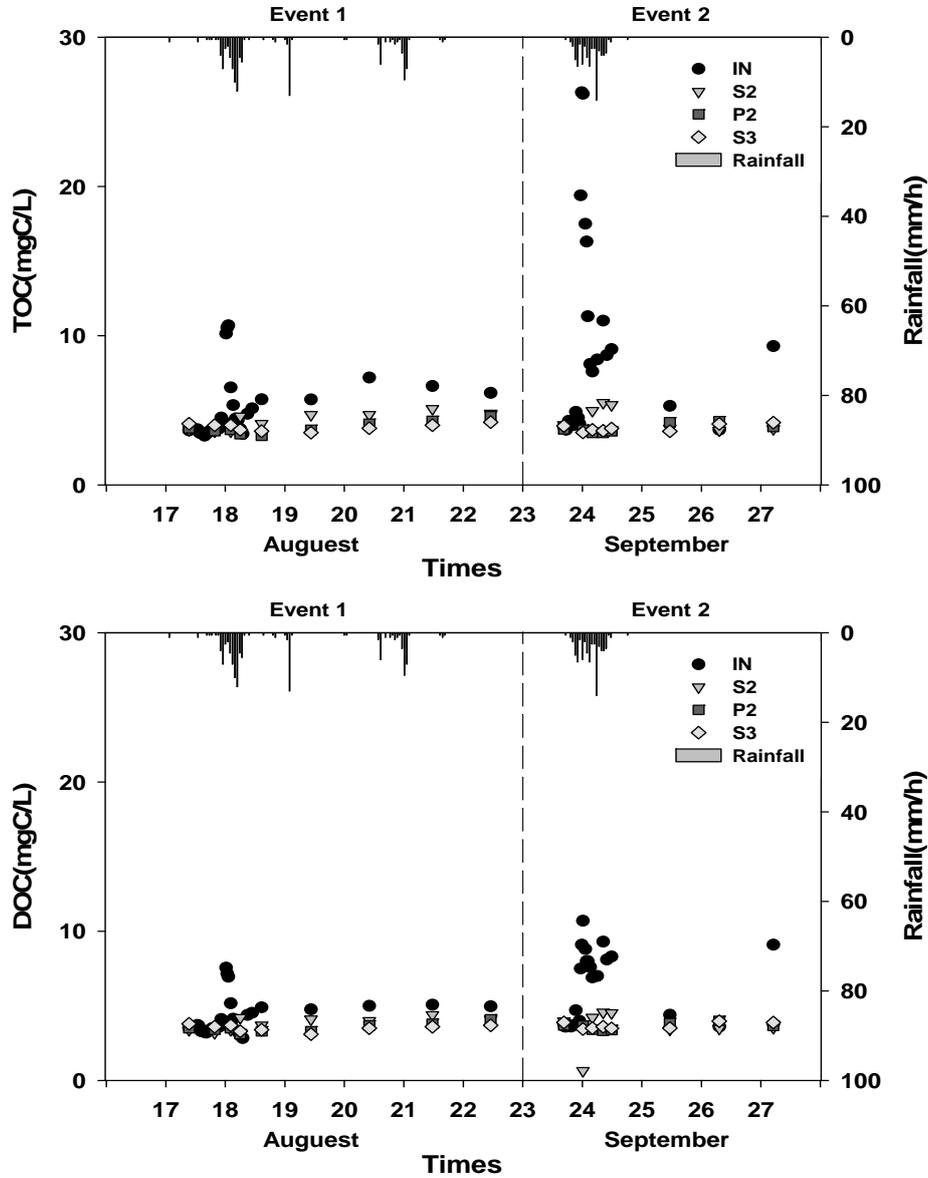


Fig. 6. Change of TOC and DOC concentrations in constructed wetlands during rainfall events.

TOC, DOC 평균농도가 6.7, 5.0 mg/L 였으며, 방류수는 3.8, 3.6 mg/L로(DCOD가 85%)로 나타났다. 제거 효율은 TOC가 43%, DCOD가 28% 정도로 COD 유기물과는 약간 다르게 입자성 TOC 유기물(약 15%)이 적게 제거되는 것으로 나타났다. 그러나 강우초기에 대량 유입된 TOC 유기물의 대부분은 POC

(Particulate Organic Carbon)로 관측되었으며, COD 유기물과 마찬가지로 강우초기에 대량 유입된 입자성 TOC 유기물은 침전지 역할을 하는 침강지(S1, S2)와 P1-P2-S3를 통과하면서 많은 양이 침전되어 크게 감소하는 것으로 나타났다.

생태인공습지에서의 TOC와 COD 유기물 농도

변화를 보면, 비강우시에는 <유입-침강지-얕은(얇은) 습지-방류> 구간을 통과하는 동안 입자성보다는 용존성 형태의 변화가 약간 큰 경향을 보였고, 이와 반대로 강우시에 발생하는 비점오염물질 기원의 유기물은 대부분 입자성 이었고, 유입된 입자성 유기물은 습지를 통과하면서 크게 감소하는 농도변화를 보였다. 습지 유기물의 특성을 보면 총 유기물(TOC)중 비교적 분해가 쉬운 유기물(COD 유기물)이 약 54%를 차지하고 있었으며, 특히 강우 초기에 유입된 유기물에는 30~45%가 COD 유기물이 차지하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 인공습지를 이용하여 유기물을 관리하기 위해서는 평상시보다는 강우시 대량으로 유입되는 입자성 유기물과 난분해성 유기물을 효율적으로 처리할 수 있는 생태습지 조성이 필요할 것으로 판단되었다.

### 3.3. 비점오염물질 관리를 위한 생태인공습지 설계 방안

인공습지는 국내외에서 하폐수처리, 비점오염원 관리, 수생태계 복원 등 다양한 분야에서 활용되고는 있으나 각 오염물질의 세부 제거기작에 대해서는 명확히 알려지지 않고 있다. 인공습지는 토양, 물, 생물 등 생태계 구성요소를 기본으로 각각의 구성요소가 유기적인 상호작용을 통해 물질순환, 에너지 흐름 등의 기능을 수반하고 있다(Sundaravadeivel and Vigneswaran, 2001). 본 연구대상지의 인공습지는 <침강지-얕은습지-얇은습지-생태침강지> 구조로 배열되었으며, 저수용량이 33,052 m<sup>3</sup>, 체류시간은 68 시간으로 나타났다. 습지식물과 물의 접촉을 최대화시키고 물의 원활한 흐름을 유도하기 위해 인공습지를 설계할 때 중/횡 비를 최소 2:1로 권장하고 있으나(MOE, 2008), 침강지 S1, 얇은 습지(P2), 생태침강지(S3)는 1:1.1, 1:1.7, 1:1.3으로 권장기준보다 작았으며, 침강지 S2와 깊은 습지(P1)는 1:2.3, 1:2.6으로 조사되었다. 또한 인공습지 설계시 개방수역(수생식물이 식재되어 있지 않고 수심을 1.0 m 이상으로 유지하고 있는 구간)을 습지 전체 면적의 20%로 설계하는 것을 권장하고 있으나, 본 연구대상의 인공습지는 개방수역이 전체면적의 약 50% 이상으로 과도하게 조성되어 있었다(MOE, 2008).

본 연구대상 인공습지의 조성목적은 옥천하수처리

장 처리수를 대청호로 방류시키기 전에 습지를 이용하여 오염물질을 재처리할 목적으로 설계되었으며, 강우시 발생하는 비점오염물질 저감을 위한 습지설계 요소들을 고려했다고는 볼 수 없다. 본 연구의 유기물 조사결과를 보면, 평상시 인공습지로 유입되는(옥천하수처리장 처리수) 유기물은 약 80% 이상이 용존형태로 나타났으며, 강우시에는 입자성 유기물이 약 25~50%(비강우시 약 20% 이하)로 비강우시보다는 약간 증가하는 경향을 보이고 있었다. 이와 같이 평상시 용존성 유기물 농도가 높게 유입되는 습지에서 유기물을 저감시키기 위해서는 수심이 깊은 개방수역보다는 수생식물이 식재되어 있는 얇은 습지가 효율적이라 할 수 있다. 그러나 본 인공습지는 개방수역을 과도하게 넓은 면적으로 설계하여 용존성 유기물을 저감시키기 보다는 유수의 흐름을 정체시켜 오히려 체류시간을 증가시키고, 이렇게 유수 흐름이 정체되면서 식물플랑크톤이 크게 증식하여 내부에서 유기물이 생성되는 원인이 되고 있다고 볼 수 있다.

강우시 유입되는 입자형태의 유기물은 용존형태와는 달리 개방수역이 넓고 침강시간이 길어질수록 처리하기에는 효율적이라 할 수 있다. 본 연구대상의 인공습지는 개방수역이 넓어 입자형태로 유입된 유기물이 수심 1~1.5 m, 체류시간 38 h, 면적 13,280 m<sup>2</sup>, 중형비 1:1~1:2.6 구간에서 대부분 제거가 되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구대상의 습지는 강우시 유기물을 저감하기 위한 습지설계로는 비교적 효과가 있을 것으로 평가되었으나 평상시에는 유기물관리가 어려운 구조적인 문제점을 내포하고 있었다.

유기물관리를 목적으로 인공습지를 조성할 때, 비강우시에는 용존형태의 유기물 농도에 초점을 맞추어 개방수역은 전체면적의 20% 이내로 조절하고, 수심이 0~0.3 m의 얇은 습지의 면적을 50% 이상으로 구성하여 물가에는 정수식물(emergent macrophytes)을 식재하고 유수의 흐름이 있는 곳에는 부유식물(free-floating macrophytes)을 식재하여 식물플랑크톤이 증식할 수 없도록 차광하고, 잘 발달된 뿌리를 통해 유기물을 저감시킬 수 있도록 한다. 강우시에는 강우초기 입자형태의 유기물이 대량 유입되므로 초기유수를 처리할 수 있도록 유량조절시스템을 설치하고, 강우초기에 인공습지로 유입된 입자형태의 유기물은

초기강우만을 처리할 수 있는 수심 1.0 m 이상의 유량 조절 침강지를 따로 설치하여 처리하고 평상시에는 일반 침강지를 통과하도록 설계하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 하수처리장 방류수를 재처리하여 대청호의 수질개선을 목적으로 설치된 소옥천 생태인공습지를 대상으로 비강우시와 강우시 동안에 습지에서 유기물오염도를 평가하였고, 이 결과를 기초하여 점오염원과 비점오염원에서 발생하여 인공습지로 유입되는 유기물질을 효율적으로 저감시킬 수 있는 설계방안을 제시하고자 하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

비강우시 생태인공습지에서의 유기물의 변화 특성은 COD, TOC는 용존형태로 유입되며, 습지를 통과하면 제거되기 보다는 약간 증가하는 경향을 보이고 있었으며, 이러한 원인은 유입수량이 많지 않아 깊은 습지(P1), 얕은 습지(P2), 생태침강지(S3)를 통과하면서 체류시간이 길어져 조류의 성장을 초래하였고, 성장한 조류는 습지내부에서 유기물 농도를 증가시키는 것으로 나타났다.

강우초기에 대량 발생한 입자성 유기물은 인공습지로 유입되어 침전지 역할을 하는 침강지(S1, S2)와 깊은 습지(P1)를 통과하면서 많은 양이 침전되어 감소하였고, 강우시 TOC와 COD의 제거효율은 각각 43, 47% 정도로 나타났다. 침강지에서 대부분 침전되어 제거되는 것으로 나타났으며, 수생식물이 식재된 생태수로를 통과하면서 용존성 오염물질의 농도가 크게 감소되는 것으로 나타났다.

강우시 유기물관리를 위한 인공습지의 설계는 강우초기 입자형태의 유기물이 대량 유입되므로 초기우수를 처리할 수 있도록 유입부에 유량조절시스템을 설치하고, 강우초기에 인공습지로 유입된 입자형태의 유기물은 초기강우만을 처리할 수 있는 비점오염물질 저감시설인 침강지를 따로 설치하여 처리하고 평상시에는 규모가 작은 일반 침강지를 통과할 수 있도록 설계하여 효율적인 유기물관리가 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문임(2014-104-099).

#### REFERENCES

- Bachand, P. A. M., Horne, A. J., 1999, Denitrification in constructed free-water surface wetlands : II. Effects of vegetation and temperature, *Ecol. Eng.*, 14, 17-32.
- Barber, L. B., Leenheer, J. A., Noyes, T. I., Stiles, E. A., 2001, Nature and transformation of dissolved organic matter in treatment wetlands, *Environ. Sci. Technol.*, 35, 4805-4816.
- Brix, H., 1997, Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?, *Water Sci. Technol.*, 35(5), 11-17.
- EPA, 2000, Design manual : Constructed wetlands treatment of municipal wastewater, EPA 625/R-99/010, Cincinnati, Ohio, 12-20.
- Faulwetter, J. L., Gagnon, V., Sundberg, C., Chazarenc, F., Burr, M. D., Brisson, J., Camper, A. K., Stein, O. R., 2009, Microbial processes influencing performance of treatment wetlands : A Review, *Ecol. Eng.*, 35, 987-1004.
- Gerberg, R. M., Elkins, B. V., Lyon, S. R., Goldman, C. R., 1986, Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetland, *Water Res.*, 20(3), 363-368.
- Greenway, M., The role of macrophytes in nutrient removal using constructed wetlands, In: Singh, S. N., Tripathi, R. D. (Eds.), 2007, *Environmental bioremediation technologies*, Springer, Berlin, Heidelberg, 331-351.
- Hsu, C. B., Hsieh, H. L., Yang, L., Wu, S. H., Chang, J. S., Hsiao, S. C., Su, H. C., Yeh, C. H., Ho, Y. S., Lin, H. J., 2011, Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment, *Ecol. Eng.*, 37, 1533-1545.
- Hsueh, M. L., Yang, L., Hsieh, L. Y., Lin, H. J., 2014, Nitrogen removal along the treatment cells of a free-water surface constructed wetland in subtropical Taiwan, *Ecol. Eng.*, 73, 579-587.
- Horne, A. J., Goldman, C. R., 1994, *Limnology*, McGraw-Hill, Inc., New York, 115-132.
- Jou, C. J., Lee, C. L., Fu, Y. T. V., Kao, C. M., 2012, Simulation of a long narrow type constructed wetland using the stream model QUAL2K, *Sustain. Environ.*

- Res., 22(4), 255-260.
- Kadlec, R. H., Wallace, S. D., 2008, Treatment wetlands, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL., 20-185.
- Lee, G. J., Seong, J. U., Park, J. H., Joe, G. S., Park, J. C., 2010, Runoff characteristics of nonpoint pollutants sources in urban area, J. Environ. Sci. Int., 19(7), 819-827.
- Mitsch, W. J., Gosselink, J. G., 2000, Wetlands, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 15-125.
- Mitsch, W. J., Jørgensen, S. E., 2003, Ecological engineering and ecosystem restoration, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ., 256-285.
- Ministry of Environment (MOE), 2008, <http://www.me.go.kr>
- Ministry of Environment (MOE), 2011, <http://www.me.go.kr>
- Reddy, K. R., DeBusk, T. A., 1987, State-of-the-art utilization of aquatic plants in water pollution control, Water Sci. Technol., 19(10), 61-79.
- Seong, J. U., Park, J. C., 2012, Effects of sewage effluent on organic matters of Nakdong River : Comparison of daily loading, Korean J. Ecol. Environ., 45(2), 210-217.
- Sundaravadivel, M., Vigneswaran, S., 2001, Constructed wetlands for wastewater treatment, Cri. Rev. Environ. Sci. Technol., 31(4), 351-409.
- Thurman, E. M., 1985, Organic geochemistry of natural water, Kluwer Academic Publishers, 25-185.
- Wetzel, R. G., 2001, Limnology : Lake and river ecosystems 3rd edition, Academic Press, 731-780.
- Zhang, C. B., Wang, J., Liu, W. L., Zhu, S. X., Ge, H. L., Chang, S. X., Chang, J., Ge, Y., 2010, Effects of plant diversity on microbial biomass and community metabolic profiles in a full-scale constructed wetland, Ecol. Eng., 36, 62-68.