

# 인공습지에서 오염물질 제거기작 및 국내외 연구동향

## Removal Mechanisms for Water Pollutant in Constructed Wetlands : Review Paper

고대현<sup>†</sup> · 정윤철\* · 서성철\*\*  
Dae-Hyun Ko<sup>†</sup> · Yun-Chul Chung · Seong-Cheol Seo

환경부 기획조정실, \*한국과학기술연구원 연구조정부, \*\*환경관리공단 수생태시설치  
Global Environmental Division, Ministry of Environment

\*Research Coordination Division, Korea Institute of Science and Technology

\*\*Aquatic Ecosystem Conservation Department, Environmental Management Corporation

(2009년 6월 11일 접수, 2010년 4월 15일 채택)

**ABSTRACT** : In these days, constructed wetlands are applied in Korea for various purposes ; post-treatment of effluent in wastewater treatment, management of stormwater and restoration of aquatic ecosystems. However, the removal mechanisms for water pollutant in constructed wetlands are not clearly understood because they are affected by climate, influent characteristics and local constraints.

Therefore, this paper is focused on the process that the pollutant, especially nitrogen and phosphorus, of the wetland is removed by. In this study, the main nitrogen removal is performed by nitrification/denitrification mechanism in the rhizosphere of constructed wetlands. And the majority of the phosphorus is removed by adsorption on the substrate of wetland. However the fate of phosphorus in wetlands can be diverse depending on the Oxidation Reduction Potential(ORP), adsorption/desorption, precipitation/dissolution, microbial effect, etc.

**Key Words** : Constructed wetland, Free water surface, Nitrogen, Phosphorus, Subsurface-flow, Removal mechanisms

**요약** : 최근 국내에서 인공습지는 하폐수처리장 방류수의 후처리, 비점오염원 관리, 생태하천 복원 등 다양한 용도로 적용되고 있다. 그러나 인공습지가 설치되는 지역의 기후, 유입수의 특성, 지역적 특성 등에 따라 매우 영향을 많이 받기 때문에 인공습지 내에서의 오염물질의 제거기작은 확실하게 이해되고 있지는 않다.

그러므로, 이 연구에서는 인공습지 내에서 질소, 인을 중심으로 한 오염물질의 제거기작을 중심으로 살펴보았다. 그 결과, 질소 제거의 주된 기작은 인공습지 내의 근권(rhizosphere)에서의 질산화/탈질에 의한 것으로 판단되며, 인 제거의 주된 기작은 인공습지내 여재 등의 기층(substrate)에서의 흡착에 의한 것으로 판단된다. 그러나, 인공습지내의 인의 거동은 산화/환원 전위(ORP), 흡착/탈착, 미생물의 작용 등에 따라 다양한 형태를 가질 수 있는 것으로 판단된다.

**주제어** : 인공습지, 자유수면, 질소, 인, 지하수면, 제거기작

## 1. 서론

우리나라의 수질정책은 주로 점오염원을 대상으로 도시지역에 하수처리장의 설치, 산업단지내 폐수종말처리장의 설치 등으로 4대강의 수질이 개선된 것은 긍정적으로 평가할 수 있다. 그러나, 이러한 점오염원에 대한 관리가 지속됨에도 불구하고 수질이 더 이상 개선되지 않은 것은 비도시지역에서 배출되는 생활하수, 가축분뇨, 비점오염원에 대한 투자 및 개선이 아직까지는 이루어지지 않고 있기 때문인 것으로 판단된다.

최근 소규모 하수처리사업과 마을하수도에 대한 관심이

고조되어 재래식 폐수처리공정을 변형한 공정을 주로 채용하고 있으나 이러한 공정들은 농촌 지역에서 운전 및 유지관리에 전문성이 필요한 등 문제가 많아 공정이 간단하고 유지관리 및 운전이 쉬운 새로운 개념의 공법개발이 필요하다<sup>1)</sup>.

특히, 농촌지역에서 가축의 배설물로 만들어져 토양에 살포되고 있는 퇴비의 경우 estradiol, estrone 및 estriol 등의 스테로이드계 에스트로젠(steroidal estrogen)으로 오염되어 최근 관심의 대상이 되고 있으며, 이러한 유해화학물질 이외에도 비료의 과다사용으로 인한 농촌생태계의 질소오염이 전 세계적으로 심각한 것으로 알려져 있다.<sup>2,3)</sup> 이러한 농촌오수를 효율적으로 처리하기 위해서는 농촌 환경과 지역

<sup>†</sup>Corresponding author : daehyunko@me.go.kr Tel : 02-735-2146 Fax : 02-735-2146

특성을 고려한 저기술적이며 경제적인 방법으로 최근에 자연정화방법을 이용한 처리시설 등이 관심을 받고 있다.<sup>4)</sup>

최근의 다양화된 환경오염문제를 해결하기 위해서는 산업, 사회, 환경 등의 여러 분야를 통합적으로 연계하는 접근법이 시도되고 있다.<sup>5)</sup> 이러한 통합적인 접근법의 하나로 기존 하·폐수처리에 생태학을 접목한 새로운 방법으로 생태기술 또는 생태공학이 도입되고 있다.<sup>6)</sup>

수질오염의 관리를 생태학적 차원에서 접근하려는 시도는 유럽을 중심으로 다양하게 전개되고 있는데 그 중 ECOSAN(ecological sanitation)이라는 생태학적 수질관리 시스템이 주목을 받고 있다. 지역적 필요에 부합한 생태적, 경제적으로 지속가능한 폐수관리시스템으로 물질흐름을 전체적 관점에서 조망하는 시스템을 말한다.<sup>7)</sup> 이러한 생태학적 수질관리에서 인공습지를 이용한 폐수처리는 분뇨와 분리된 생활하수를 처리하여 이를 다시 재이용할 수 있는 처리방법이다. 이외에 가축분뇨나 분뇨를 혐기성 처리하여 바이오가스를 에너지로 활용하고 이 처리수를 농업에 다시 환원하기 위한 처리방법으로 또한 인공습지가 사용되기도 한다.<sup>8)</sup>

이에 본 연구에서는 국내에서 활발히 적용되고 있는 인공습지에 대한 문헌연구를 통하여 기존에 불확실하게 추측되어온 인공습지 내 오염물질의 제거기작에 대한 보다 분명한 고찰을 하고자 한다.

## 2. 습지와 인공습지의 개념

### 2.1. 습지의 개념

습지는 식물의 성장기간 동안 물이 고여 있고, 특이한 토양조건, 물로 포화된 토양에 적응된 식물 등의 다른 생태계와 구별되는 특징을 가지고 있다. 그러나 습지를 정의내리기는 쉽지 않은데, 이는 습지가 수리적인 조건, 크기, 위치, 인간에 대한 영향에 있어 큰 다양성이 존재하기 때문이다. 습지는 주로 내륙지의 산림과 초원 같은 육지생태계와 깊은 호수나 해양과 같은 수생생태계의 중간에 존재한다. 이로 인해 이러한 육지생태계나 수생생태계와는 다른 특징을 나타내지만 이 두 생태계에 크게 의존하게 된다.<sup>9)</sup>

습지는 습지내부의 수리학, 토양 등의 물리화학적 환경, 동식물과 미생물로 구성된 생물환경에 기초하여 개념이 정립되어왔고 또한 정립되고 있다. 이러한 습지의 정의는 주로 미국과 캐나다를 중심으로 다양한 정의가 내려졌다. 이중 USEPA의 America's Wetland에서는 다음과 같은 정의를 내렸다.<sup>10)</sup>

Table 1. The four requirement of wetlands.<sup>12,13)</sup>

Requirements
○ Areas where the water table is at or near the surface or the land is covered by shallow water
○ Areas supporting predominantly hydrophytes (water-tolerant plant species)
○ Areas with predominantly undrained hydric soils
○ Areas with non-soil substrate such as rock or gravel that are saturated or covered by shallow water at some time during the growing season of plants

『습지는 연중 또는 식물의 성장기간을 포함하는 일정시기 동안 토양이 물에 침수되거나 토양표면 및 토양표면 근처에 물이 존재하는 지역을 말한다』

또한 람사협약의 경우 다음과 같은 습지의 정의를 채택하였다.<sup>11)</sup>

『자연적 혹은 인공적, 영구적 혹은 일시적으로, 정체되거나 흐르는 담수, 염수 혹은 해수에 의해 생성된 marsh, fen, peatland의 지역을 의미하며, 수심은 썰물시 6 m를 넘지 않는 지역이다』

습지에 대한 다양한 정의에서 Table 1과 같은 4가지 요소 중 적어도 하나 이상은 충족되어야 한다.<sup>12,13)</sup>

### 2.2. 인공습지의 형태

인공습지의 형태는 기준에 따라 여러 가지로 분류될 수 있으나 주로 기질위의 물의 깊이에 따라 자유수면 인공습지(free water surface constructed wetland)과 지하수면 인공습지(subsurface flow constructed wetland)로 나누어진다.

자유수면 인공습지는 불투수성으로 이루어진 수로 또는 연못으로 구성된다. 이 습지에서의 식물은 다양한 목적으로 사용된다. 줄기, 수층내의 잎, 잔류물들은 부착성 미생물의 성장을 위한 여재로서 작용한다. 또한 수표면 위의 수생식물의 잎은 수표면에 그늘을 만들어 조류의 성장을 억제한다. 수체내의 줄기에서 나오는 제한된 양의 산소는 부착성 미생물의 성장을 촉진시킨다. 지하수면 인공습지는 rock reed filters, microbial rock plant filters, vegetated submerged beds, tule beds, hydrobotanical systems 등 여러 가지 이름으로 불려진다. 지하수면 인공습지는 자유수면 인공습지에 비하여 필요한 부지면적이 작고, 냄새나 모기 등의 해충 문제가 없는 장점이 있지만 자갈 여재로 인한 비용이 증가하고 여재의 폐색등의 단점도 있다.<sup>14)</sup>

다양한 형태의 인공습지는 Table 2와 같이 다양한 종류의 폐수에 비교적 잘 적용될 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이

**Table 2.** Application of constructed wetlands<sup>14)</sup>

Objective	Constituent removed
Acid mine drainage	Metals and acidity
Advanced treatment	Nitrogen and phosphorus
Advanced treatment	Heavy metals and refractory organics
Combined secondary and advanced treatment	Organic matter, TSS, pathogens, nitrogen and phosphorus
Habitat development	Enhanced environmental resources
Irrigation return water	Nitrogen and phosphorus
Landfill leachate	Organic matter
Reclamation and water reuse	Organic matter, TSS and pathogens to restrictive standard
Secondary treatment	Organic matter, TSS and pathogens
Septage treatment	Organic matter, TSS, pathogens, nitrogen and phosphorus
Stormwater treatment	Organic matter, TSS, pathogens, nitrogen, phosphorus and heavy metals and refractory organics

와 관련된 많은 연구들이 진행되고 있다. 과거에는 주로 폐수의 2차처리나 2차처리된 폐수를 영양염류를 제거하기 위한 고도처리 방법으로 사용하는데 한정되었으나 최근 산성 광산폐수나 침출수 및 강우유출수의 처리에도 활용되고 있으며, 이 외에 동식물의 서식처를 제공하기 위해서도 사용되고 있다.<sup>15)</sup> 또한 산업폐수의 경우 역삼투막법(RO: Reverse Osmosis)과 인공습지를 결합하여 산업폐수 처리 후 방류수의 독성을 감소시키는 공정이 연구되고 있다.<sup>16)</sup>

특히 인공습지는 농촌지역의 가축분뇨를 처리할 경우 비용 효과적인 처리방법으로 알려져 있다.<sup>17)</sup> 인공습지는 유입되

는 폐수의 종류와 제거되어야 하는 오염물질의 종류, 양, 처리수준에 따라 매우 다양하게 설계되어진다. 이러한 인공습지는 기존의 폐수처리시스템에 비하여 **Table 3**과 같은 장점과 한계점이 있다.<sup>12)</sup>

이러한 장점 이외에 인공습지는 재래식 폐수처리 시스템에 비하여 경제적인 것으로 알려져 있다. 이는 부지비용을 계산하지 않았을 경우 초기 시설비용은 11%정도 낮고, 운전비용은 56%가 낮아지게 된다. 또한 부지비용을 계산에 넣는 다 하더라도 전체 비용은 13%정도 감소함을 알 수 있다.<sup>9)</sup>

인공습지는 일반적으로 이산화탄소를 흡수하여 지구의 온난화를 감소시키는 것으로 알려져 있으나, photothermal technique을 이용하여 인공습지를 모니터링한 결과,<sup>18)</sup> 인공습지를 통한 대기 중으로의 메탄 및 암모니아의 방출이 확인되어 인공습지가 대기 중의 온실기체의 발생원과 소멸원으로 작용하기 때문에 지구온난화에 어떤 영향을 미치는 지에 대한 보다 정량적이고 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 2.3. 인공습지의 구성요소

인공습지는 주로 수리학, 식물이 뿌리내리는 토양, 자갈 등의 기질, 습지내에 성장하는 습지식물로 구성된다. 이러한 구성요소들은 서로 독립적으로 존재하는 것이 아니고 서로 영향을 주고받으며 생태적 유기관계를 형성한다.

#### 2.3.1. 수리학

수리학적 상황은 폐수처리에 사용되는 모든 습지에 주된

**Table 3.** Advantages and disadvantages of constructed wetlands<sup>12)</sup>

Advantages	Disadvantages
○ They operate on ambient solar energy and require low external energy input	○ They require large land area for the same level of treatment by conventional systems making them unsuitable for centralised treatment for sources that generate large quantities of wastewater, such as large cities
○ They achieve high levels of treatment with little or no maintenance, making them especially appropriate in locations where no infrastructure support exists	○ They require long period, typically two or three growing seasons, for the vegetation before optimal treatment efficiencies are achieved
○ They are relatively tolerant to shock hydraulic and pollutant loads that ensures the reliability of treated wastewater quality	○ The process dynamics of the CTW systems are yet to be clearly understood leading to imprecise design and operating criteria
○ Unlike the conventional treatment systems, no specific design life period is generally prescribed for CTWs and as such they tend to have increased treatment capacity over time, by setting up feedback loops that result in selfrepairing systems	○ These systems typically lie outdoor and spread over large area, their performance is susceptible to storm, wind, and floods
○ Wetland vegetation generate oxygen and consume carbon dioxide, thereby help improving air quality and fight global warming	○ There are possibilities of problems due to mosquitoes and other pests and insects that may use these systems as their breeding ground
○ Wetland vegetation provide indirect benefits such as green space, wildlife habitats, and recreational and educational areas	○ Steep topography and high water table may also limit the adoption of these systems for wastewater treatment

조절인자이다. 자유수면 인공습지는 물의 하향이동을 막기 위해 점토 물질을 이용하여 차수막을 구성하며, 수심은 주로 0.1-1.0 m 정도로 유지한다. 지하수면 인공습지는 주로 식물의 뿌리를 지지하는 여재로 토양이나 자갈이 사용된다. 지하수면 인공습지에서 폐수는 토양/자갈로 형성된 기질을 통과하여 흐르고 토양은 물로 완전히 포화되지는 않는다. 즉 토양이나 기질표면에 수표면이 나타나지 않는다. 이로 인해 모기 등의 해충이 감소하며 단회로가 감소한다.<sup>19)</sup>

### 2.3.2. 기질

폐수처리에 이용되는 자유수면 인공습지는 주로 기질로 자연적인 토양을 사용하고, 지하수면 인공습지는 자갈이나 암석을 사용한다. 이러한 여재는 물리적으로는 인공습지내의 식물을 지탱하고 습지내에서 일어나는 처리공정의 종합적인 연결점으로서 작용한다. 또한 기질은 습지내의 모든 생물적, 무생물적 구성요소의 주된 저장소로서 역할을 수행한다. 모래와 자갈로 구성된 기질은 부착 미생물의 성장에 필요한 표면을 제공하고 부유물질의 여과와 침전을 촉진시킨다.

지하수면 인공습지의 운전에서 주로 발생하는 문제점은 폐색이다. 폐색은 폐수의 범람을 유발시켜 기질층의 침적을 유도하며 식물의 성장을 억제한다. 고흡수에 의한 간극의 폐쇄는 기질 내에 유효 용적을 감소시켜 유속을 증가시킨다.

**Table 4.** Comparison of the behavior of sand, gravel, and rock filters operated at various suspended solids loading rates<sup>14)</sup>

Material	Typical particle size, mm	Nominal TSS loading rate, g/m <sup>2</sup> ·d	Performance
Sand	0.17	5	Clogging in > 5 years
		10	Clogging in 50 days
	0.40	30	Clogging in < 10 days
		10	Clogging in > 0.5 years
		30	Clogging in 35 days
		70	Clogging in 10 days
0.68	20	Clogging in > 0.5 years	
	40	Clogging in 50 days	
	80	Clogging in 20 days	
	5-10(inlet)	40	Infiltration for 3+ years
Gravel	5-10(w/g)	200	Clogging in 3 months
	40(inlet)	18	Infiltration for 3+ years
	40(inlet-primary)	80-160	Infiltration for 1+ year
	9-25	13-464	Clogging in 11 months
Rock	10-50	113-629	Infiltration for 17+ months, but poor TSS removal
	63-127	102	Infiltration for 14+ months, but poor TSS removal

이로 인해 HRT(hydraulic retention times)가 감소하고 단회로를 유발시킨다.<sup>12)</sup> 이러한 폐색은 Table 4와 같이 주로 기질로 사용되는 여재와 TSS의 부하율과 관련되어 나타난다.

### 2.3.3. 습지식생

자유수면 인공습지와 지하수면 인공습지에 사용되는 주된 정수수생식물은 부들(*Typha* spp.), 갈대(*Phragmites* sp.), bulrush(*Scirpus* spp.) 등이 있다. 이러한 수생식물 대부분은 여러 지역에서 서식한다. 겨울철에는 식물의 지상부는 죽고 동면기의 뿌리와 뿌리줄기는 다가올 봄철의 성장을 위한 에너지를 제공한다. 이러한 습지식생은 단일종을 식종하는 것보다 여러 종을 식종하는 것이 병충해에 강한 것으로 보고되고 있다.<sup>20)</sup> 이러한 습지식생의 Table 5와 같은 역할을 수행한다.<sup>21,22)</sup>

인공습지내에서의 습지식물의 역할은 Table 5에 나타난 바와 같이 다양한 역할을 담당하면서 오염물질의 제거에 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 습지식물은 오염물질을 직접적으로 제거하기도 하지만 이러한 역할보다는 주변의 미생물에게 산소를 공급하여 생물학적인 제거를 촉진시키거나, 주변의 무생물적 환경을 변화시켜 물리화학적 제거를 촉진시키는 역할이 더욱 클 것으로 생각된다.

**Table 5.** The major roles of macrophytes in constructed treatment wetlands<sup>22)</sup>

Macrophyte property	Role in treatment process
Aerial plant tissues	○ Light attenuation → reduced growth of phytoplankton
	○ Influence on microclimate → insulation during winter
	○ Reduced wind velocity → reduced risk of resuspension
	○ Aesthetic pleasing appearance of system
	○ Storage of nutrients
Plant tissue in water	○ Filtering effect → filter out large debris
	○ Reduce current velocity → increase rate of sedimentation, reduces risk of resuspension
	○ Provide surface area for attached biofilms
Roots and rhizomes in the sediment	○ Excretion of photosynthetic oxygen → increases aerobic degradation
	○ Uptake of nutrients
	○ Stabilizing the sediment surface → less erosion
	○ Prevents the medium from clogging in vertical flow systems
	○ Release of oxygen increase degradation( and nitrification)
	○ Uptake of nutrients
	○ Release of antibiotics

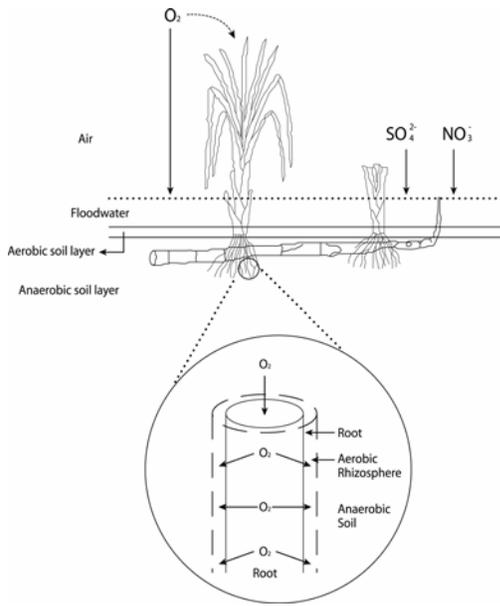


Fig. 1. aerobic soil-floodwater interface and root-soil-water interface in wetlands.<sup>19)</sup>

이러한 습지식물의 역할 중 가장 중요한 역할이 근권 내부로의 산소전달이다. 특히 지하수면 인공습지의 경우, 산소를 전달받을 수 있는 경로가 이러한 습지식물의 뿌리를 통한 산소의 전달 이외에는 제한적이기 때문에 더욱 중요하다. 습지식물의 경우 Fig. 1와 같이 대기 중의 산소를 줄기와 잎을 통하여 흡수하여 뿌리를 통하여 근권에 산소를 전달한다. 이러한 산소의 이송 및 확산은 많은 습지식물을 혐기성 토양조건에서도 적응하여 살아갈 수 있게 하는 요인이다. 뿌리조직의 호흡에 사용되지 않은 산소는 뿌리 근처의 토양으로 배출되어 그 지역을 호기성 상태로 유지한다. 이러한 근권의 잉여 산소는 황화물과 환원된 상태의 철, 망간 등을 산화시키며, 용해성 유기물질을 호기성 산화시키고, 암모니아성 질소를 질산화시킨다.

특히 습지식물은 인공습지에서 DO의 증가를 유발하고 분변성 대장균, Enterococcus, Salmonella, Shigella, Yersinia와 coliphage의 제거율을 높이는 것으로 보고되었다.<sup>23)</sup>

### 3. 인공습지내 오염물질의 제거 기작과 효율

인공습지에 유입된 폐수는 물리적, 화학적, 생물학적 과정을 통하여 형태가 변환되거나 분해된다. 즉 습지식물이 오염물질을 직접 섭취하거나, 식물이나 기질로 사용된 여재에 서식하는 미생물이 오염물질을 분해한다. 또한 인공습지를 통한 유속의 감소로 인해 고형물이 침전이 일어나고 여과로 인한 고형물의 제거된다. 토양이나 여재는 질소나 인 등의 영양염류를 흡착하고 병원균은 습지내에서 자연적으로 사멸되거나 자외선에 의해 죽거나 식물이 배출하는 항생물질에 의해 사멸된다. 그러나 이러한 항생물질에 의한 병원균의 사멸 효과는 미약할 것으로 생각된다. 인공습지내에서 오염물질의 제거는 Table 6에서 나타난 바와 같이 자유수면 인공습지와 지하수면 인공습지에 따라 약간 다르며, 오염물질의 종류에 따라서 제거 기작이 다르다. 이러한 인공습지의 오염물질 제거 기작은 아직까지는 명확히 규명되어지지 않았으며, 앞으로 이에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 3.1. 부유물질의 제거기작

지하수면 인공습지에서 부유물질의 제거는 대부분 기질층에 의한 여과작용에 의해 이루어지며, 이러한 여과작용은 부유물질이 기질층의 공극사이에서 물의 흐름이 정체된 지역에 침전되거나, 기질층에 흡착되어 이루어진다. 그러나 이러

Table 6. Principal removal and transformation mechanisms in constructed wetlands for the constituents of concern in wastewater.<sup>14)</sup>

Constituent	Free water system	Subsurface flow
Biodegradable organics	Bioconversion by aerobic, facultative, and anaerobic bacteria on plant and debris surfaces of soluble BOD, adsorption, filtration and sedimentation of particulate BOD	Bioconversion by facultative and anaerobic bacteria on plant and debris surfaces
Suspended solids	Sedimentation, filtration	Filtration, sedimentation
Nitrogen	Nitrification/denitrification, plant uptake, volatilization	Nitrification/denitrification, plant uptake, volatilization
Phosphorus	Sedimentation, plant uptake	Filtration, sedimentation, plant uptake
Heavy metals	Adsorption of plant and debris surfaces, sedimentation	Adsorption of plant roots and debris surfaces, sedimentation
Trace organics	Volatilization, adsorption, biodegradation	Adsorption, biodegradation
Pathogens	Natural decay, predation, UV irradiation, sedimentation, excretion of antibiotics from roots of plants	Natural decay, predation, sedimentation, excretion of antibiotics from roots of plants

한 부유물질의 제거작용과는 반대로 습지식물의 근권에서 뿌리 및 미생물의 사멸 등으로 인해 부유물질이 생성되기도 한다.<sup>24)</sup>

Manios의<sup>25)</sup> 연구에서 인공습지에 습지식물의 식재여부는 부유물질의 제거에 있어서 별다른 차이를 나타내지 않는다고 보고하고 있으나, 이는 지역의 강우 형태와 기후조건 등에 따라 다를 수 있으며, 기질층 위에 토양의 피복여부에 따라 달라진다. 일반적으로 인공습지의 부유물질은 습지 유입부 근처의 약 12~20%의 면적에서 대부분이 제거되는 것으로 알려져 있다.<sup>26)</sup>

### 3.2. 유기물 제거 기작

인공습지 내부로 유입되는 유기물은 입자상 유기물 (particulate organic carbon: POC)과 용존성 유기물 (soluble organic carbon, SOC)로 대별된다. 이 중 POC는 침전, 여과, biofilm에의 흡착, 응집/침전 등의 물리적인 작용에 의해 습지내에 저장되어 이후 가수분해를 통해 SOC로 전환되면서 생물학적 분해 및 변환과정을 겪게 된다. 이러한 습지내에서의 탄소의 변환과정을 Fig. 2에 나타난 바와 같이 질소의 변환 및 순환과정과 황의 변환 및 순환과정과 서로 연관되어 변환되고 순환된다. 즉 탈질과정에서 유기탄소가 무기탄소로 변환되거나 황산염 환원과정에서 유기탄소가 무기탄소로 변환되는 등의 과정을 통하여 각 원소의 순환은 다른 원소의 순환과 맞물려 순환하게 된다.

지하수면 인공습지에서 유기물의 제거는 입자상 유기물의 경우, 기질층에 흡착되거나 여과작용에 의해 제거되고 용존성 유기물은 기질층의 여재에서 성장하는 biofilm형태의 부착성 미생물이나 여재 사이에 존재하는 부유성 미생물에 의해 생물학적 과정을 거치며 분해된다.<sup>26)</sup> 그러나 지하수면 인

소의 전달이 습지식물에만 의존하기 때문에 매우 제한적이 공습지의 경우, 기질층 내부의 미생물의 전자수용체로서 산다. 즉 대기 중의 산소를 습지식물이 흡수하여 뿌리를 통하여 근권으로 전달하는 기작에만 의존하기 때문에 대부분의 지하수면 인공습지는 혐기성 상태로 존재하게 된다. Baptista 등은<sup>27)</sup> 지하수면 인공습지에 존재하는 미생물을 조사한 결과, SRB(Sulphate Reducing Bacteria)와 methanogens이 존재하며, 이들이 습지내의 대부분의 용존성 유기물의 제거에 주된 역할을 한다고 보고하였다.

Vymazal and Masa은<sup>28)</sup> 지하수면 인공습지의 유출부를 고정하지 않고 유동하게 하여 수위를 변동시키는 실험을 하였다. 이처럼 수위 변동을 통하여 기질층에 산소를 공급함으로써 인하여 BOD의 경우 53%, COD의 경우 30% 정도의 제거 효율 향상이 있었다고 보고하였다.

Quanrud 등은<sup>29)</sup> 지하수면 인공습지의 처리수 중의 유기물 변환에 대한 연구를 통하여 처리수의 유기물 중 유입수에 기원한 aliphatic carbon은 인공습지를 거치는 동안 감소한다고 보고하였다. 또한 Barber은<sup>30)</sup> 폐수가 인공습지를 거치는 과정에서 유기물이 aromatic carbon의 양이 증가하고 oxygenate된다는 결과를 보고하였다. 이러한 보고를 통하여 인공습지에서 폐수 중의 aliphatic carbon의 양은 감소하고 습지 내부에서 자생적으로 발생하는 aromatic carbon의 양은 증가하여 처리수 중의 생분해도가 유입수에 비하여 매우 낮아질 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 습지의 처리를 통하여 유기물의 생분해도가 낮아지기 때문에 유기물 처리에 있어서 한계점이 있을 수 있음을 알 수 있고, 습지처리를 거친 처리수의 대부분은 aromatic carbon의 함량이 높은 humic substance가 대부분임을 추정할 수 있다.

인공습지내에서의 유기물의 생물학적 분해는 인공습지의 상태에 따라서 또는 인공습지내의 위치, 근권에서의 거리 등 여러 가지 요인에 따라서 다음과 같이 호기성 분해, 통성 혐기성 분해, 혐기성 분해과정을 통하여 분해된다.<sup>12,19)</sup>

#### 3.2.1. 호기성 분해

호기성 종속영양 미생물에 의한 생분해는 다음과 같은 반응을 통하여 이루어진다.



인공습지내에서의 이러한 호기성 반응은 전자전달체인 유기물보다는 전자수용체인 산소의 양에 따라 대개 제한을 받는다. 자유수면 인공습지의 경우, 산소는 확산, 조류의 광합

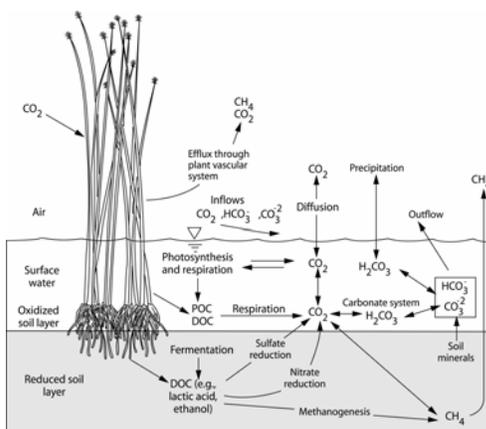


Fig. 2. Carbon transformations in wetlands.<sup>9)</sup>

성 등에 의해 공급되지만 지하수면 인공습지의 경우, 습지식물이 대기 중의 산소를 줄기나 잎을 통하여 흡수하여 뿌리로 전달하는 기작에 의해서만 주로 공급된다. 이러한 정수식물에 의한 산소의 전달량은 5~40 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> · d로 보고되고 있다.

### 3.2.2. 통성 혐기성 분해

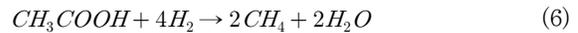
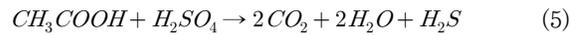
산소가 없는 경우, 미생물 군집은 통성 혐기성 반응을 하게 되며, 유기물의 산화에 전자수용체로서 질산염을 사용한다. 질산이 존재하지 않을 경우, 망간이나 철화합물이 사용된다.

### 3.2.3. 혐기성 분해

산소, 질산, 망간 및 철화합물이 없을 경우, 혐기성 미생물들은 황산염과 이산화탄소를 전자수용체로 하여 유기물을 산화한다. 이러한 혐기성 분해반응은 유기산 생성반응과 메탄 및 수소생성반응 두 가지 단계로 나뉘어 지는데 먼저 다음과 같은 반응을 통하여 유기산 및 알코올을 생성한다.



이와 같이 생성된 발효산물은 다시 혐기성 미생물에 의해 황화수소나 메탄 등으로 변환되어 제거된다.



유기물의 혐기성분해는 자유수면 인공습지와 지하수면 인공습지 모두에서 가장 중요한 BOD 제거 기작으로 여겨지고 있다. 유기퇴적물, 침전물, 식물 줄기 등의 높은 표면적은 혐기성 미생물의 분해율을 높이는 역할을 한다. 지하수면 습지에 사용되는 자갈은 비교적 적은 표면적(80~150 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)을 갖지만, 뿌리의 표면적과 공극사이에 존재하는 입자가 미생물 개체를 유지시켜 BOD 제거율을 높이는 것으로 알려져 있다.

### 3.3. 질소 제거 기작

습지내에서의 질소의 제거는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 질산화/탈질, 암모니아 탈기, 습지식물에의 흡수 등의 과정을 통해 무기질소로 변환시켜 습지의 수체에는 비교적 낮은 농도의 무기질소 농도를 유지할 수 있게 된다. 퇴적된 식물 사멸체의 분해 또는 토양내의 유기물질의 분해를 통해 용존 유기질소의 대부분은 다시 수체 내로 유입된다. 이러한 용존 유기질소의 대부분이 분해에 저항력을 가지고 있어서 유출수의 질소는 유기질소 형태가 무기질소 형태에 비하여 높다. 미생물의 활동성에 따라 이러한 유기질소는 암모니아성 질소로 전환되어 다시 무기질소 형태로 전환된다.

질산화는 암모니아성 질소를 질산성 질소로 전환하는 생물학적 산화과정으로 다음과 같이 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*에 의한 두 단계의 과정이다.

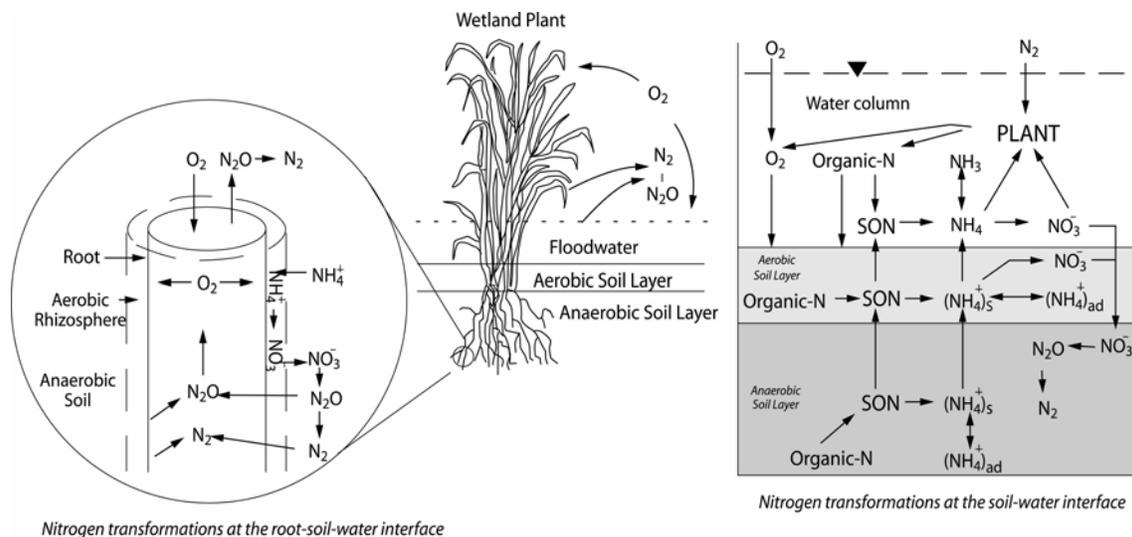
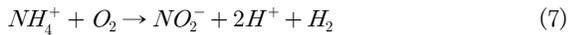
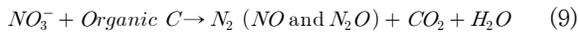


Fig. 3. Nitrogen transformation in wetlands.<sup>19)</sup>



질산화 반응이 일어나기 위해서는 유입수의 BOD가 20 mg/L이하여야 하며, 이 외에 DO 및 온도, pH가 영향을 준다.

질산화를 통해 생성된 질산이온은 혐기성 상태에서 다음과 같은 탈질반응을 통하여 환원된다. 이때 유기물질은 탄소원으로 사용된다.



이 반응은 *Pseudomonas* sp., *Aeromonas* sp., *Vibrio*과 같은 통성 혐기성 미생물에 의하여 일어나며, 침전물, 산소 결핍상태의 수층 내에서 혹은 근권의 무산소상태의 부근에서 일어난다.

질소제거는 또한 습지식물의 흡수에 의해서도 일어날 수 있다. 이러한 영양염류의 식물에의 흡수속도는 식물의 성장속도와 습지식물의 조직 내의 영양염류의 농도에 따라 제한된다. 이처럼 습지에서의 식생은 질소를 식물 조직 내에 저장하고 질산화/탈질에 필요한 근권 내의 적합한 환경을 조성하는 두 가지 중요한 역할을 수행한다.<sup>12,19)</sup> 최근 인공습지에서 질소제거효율을 높이기 위해 송풍기로 Cell 내부에 산소를 공급하여 질산화율을 높이고 질산화된 질산성 질소를 Sulfur/limestone 칼럼으로 탈질하는 공정을 활용한 연구가 보고되었다.<sup>31)</sup>

습지에서의 질소 제거는 주로 세 가지 과정을 통하여 이루어진다. 즉 유기질이 ammonification과정을 통하여 암모니아성 질소로 변환된 후 질산화 미생물에 의해 질산성 질소로 질산화된 후 질산화 미생물에 의해 질산성 질소로 질산화된 후 탈질 미생물에 의해 질소가스로 변환되는 미생물에 의한 질소제거과정과 식물에 의한 질소의 흡수, 암모니아의 휘발 등의 과정을 통하여 이루어진다.<sup>32)</sup> 이러한 과정 중 어떤 과정이 질소 제거의 주된 기작인지 여부는 인공습지의 형태, 유입 폐수의 형태 등 여러 인자에 의해 달라질 수 있지만, 주로 질산화/탈질을 통한 미생물에 의한 제거가 주된 기작이라고 보고되고 있다<sup>26)</sup>. Mander 등의<sup>33)</sup> 연구에서 질산화/탈질에 의한 질소제거는 인공습지에서의 질소제거의 42.9%를 차지한다는 결과를 나타내었다.

습지의 질산화/탈질에 의한 질소제거에 있어서 질산화가 제한요소로 작용하기도 하고<sup>34)</sup>, 용존성 유기물질이 부족하

여 탈질현상이 제한요소로 작용한 결과도 보고되고 있다<sup>35)</sup>. 이러한 차이는 질산화를 위한 산소의 가용성 여부에서 기인한다고 판단된다. 즉 질산화를 위한 충분한 산소가 존재하는 인공습지의 경우, 유기물 부족에 의한 탈질현상이 제한요소로 작용하고, 반대로 충분한 산소가 공급되지 못할 경우 산소를 차지하기 위한 질산화 미생물과 종속영양생물간의 경쟁에서 종속영양생물이 우위를 차지하기 때문에 질산화가 제한요소로 작용한다. Tanner and Kadlec은<sup>36)</sup> 지하수면 인공습지의 질산화/탈질을 통한 질소제거에서 식물을 통한 산소의 전달과 습지 표면을 통한 대기 중의 산소확산만으로는 충분한 산소공급이 불가능하며, 다른 산소공급 방법이 필요함을 보고하였다.

Gerke 등은<sup>37)</sup> 인공습지의 질소제거에 관한 실험과 모델링을 통해 여름에는 질산화를 증가시키는 것이 질소의 제거효율을 높일 수 있고, 겨울의 경우 질산화와 탈질 모두 증가시켜야만 질소의 제거효율을 높일 수 있다고 보고하고 있다. 또한 Kayser 등은<sup>38)</sup> ORP가 지하수면 인공습지의 질산화에 대한 지표로 사용될 수 있다고 보고하였다.

지하수면 인공습지의 산소공급을 위하여 다른 연구에서는 수위차를 조절하는 방안을 수행하여 처리효율의 향상을 나타낸 결과도 있다.<sup>28)</sup> 이러한 수위를 변동시킴으로 인하여 수위가 낮아진 상태에서 지하수면 인공습지 내부로 공기 중의 산소가 유입되어 기질층이 호기성 상태로 유지되어 질산화를 위한 산소의 공급이 일반적인 지하수면 인공습지에 비해 원활하다고 할 수 있다. 그러나 이러한 수위차를 조절하는 지하수면 인공습지의 질소제거효율에 대해서는 논란이 존재한다. Hunter 등은<sup>39)</sup> 이러한 수위변동이 습지식물에 스트레스로 작용하여 습지식물의 성장을 억제하고, 습지식물에 의한 기질층으로의 산소전달을 방해하는 역할을 하여 오히려 질소제거효율을 감소시킨다고 한 반면, Tanner은<sup>40)</sup> 이러한 수위변동이 기질층 내의 ORP를 변동시켜 유기물 및 질소제거의 향상을 유도한다는 연구결과를 발표하였다. 즉 이러한 수위변동이 기질층의 산소공급에 도움을 줄 수 있으나 습지식물에는 부정적인 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

### 3.4. 인 제거 기작

습지내에서의 인의 제거는 Fig. 4와 같이 습지식물에 의한 흡수, 미생물의 고정화에 의한 유기퇴적층의 형성, 수체 내에서의 침전물의 형성, 토양 내에 침전 등을 통하여 제거된다. 인의 경우 습지내의 구성물질로 존재하기 때문에 습지내에서의 완전한 제거는 습지식물을 제거하거나 침전층의 준

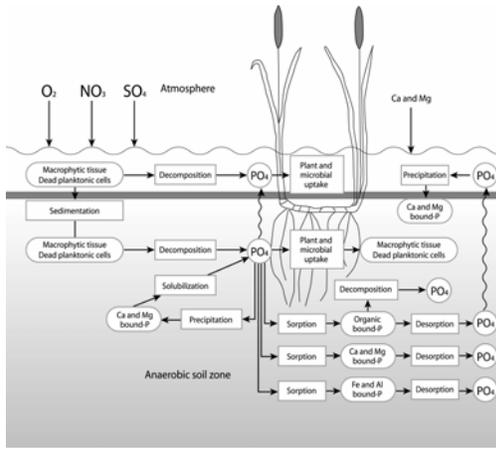


Fig. 4. Phosphorus transformation in wetlands.<sup>19)</sup>

설을 통해서만 이루어진다. 즉 습지내에서의 인의 제거는 Table 7과 같이 흡착, 침전, 식물 흡수, 미생물에 의한 흡수 등의 기작에 의한 것으로 판단되고 있다.<sup>12)</sup>

인공습지의 인 제거에 있어서 가장 중요한 기작은 흡착인 것으로 알려져 있다. 즉, 인공습지내의 정인산이온(orthophosphate ion:  $PO_4^{3-}$ )은 호기성의 산화적 환경상태에서  $Fe^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ 와 결합하여 침전물을 형성하며 제거된다. 이와 반대로 혐기성의 환원적 환경상태가 되면 결합되어 있던 인산침전물이 용해되며 무기인이 방출된다.<sup>13)</sup> 즉 유입수의 인을 제거하기 위해서는 호기성의 산화적 환경상태를 인공습지의 유출부에 유지하는 것이 중요함을 알 수 있다.

지하수면 인공습지에서의 인의 제거는 식물에 의한 인의 흡수와 기질층에 흡착 또는 침전되는 과정을 통해 이루어진다. 이러한 식물에 의한 제거와 기질층의 흡착에 의한 제거 중 어떤 과정이 주된 제거과정인지에 대해서는 아직까지 논란 중에 있다. Headley<sup>41)</sup> 습지식물인 갈대를 통한 인의 섭취가 운전초기 1년 동안의 인의 제거 중 75% 이상을 차지하며, 이 중 갈대의 rhizome에의 축적이 큰 역할을 하는 것으로 보고하였다. 또한 Kim and Geary<sup>42)</sup> 연구에서도 식물에 흡수되는 인 중 대부분은 뿌리부분에 저장되며, 습지식물의 줄기나 잎 등의 지상부에 흡수되는 양은 적어 지상부를 제거하는 것은 인의 제거에 큰 영향을 주지 않는다고 하였다.

또한 Luderitz and Gerlach<sup>43)</sup> 습지의 인의 제거에서 습지식물의 흡수에 의한 인의 제거는 상당히 제한적이고 습지식물은 인의 흡수를 통한 역할보다는 습지내의 미생물을 통한 인의 변환에 더 큰 역할을 수행하여, 습지에서 식물을 제거할 경우 인 제거율이 50% 이상 감소한다고 보고하였다.

지내의 토양에서 미생물 군집은 주로 인에 의해 제한되는 점을 감안하면<sup>44)</sup> 습지에서의 인의 제거에 있어서 습지내의 미생물의 역할은 추후 심도 있는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Browning and Greenway<sup>45)</sup> 지하수면 인공습지에서 식물에 의한 인의 제거는 전체 인제거의 약 3%정도만을 담당하고 있다고 밝혔다. 결과적으로 대부분의 지하수면 인공습지에서의 인의 제거는 기질층에 흡착되거나 침전에 의해 제거되는 것으로 알려져 있다. 이러한 기질층의 흡착을 통한 제거가 습지내에서의 인의 제거에 큰 역할을 하기 때문에 기질층으로 인의 흡착능력이 우수한 기질을 선정하여 기질층으로 활용하는 경우가 많다. 이러한 기질층으로 우수한 인의 흡착에 우수한 결과를 나타내는 것으로 Calcite<sup>46)</sup>, light-weight expanded clay<sup>47)</sup>, light-weight expanded shale<sup>48)</sup>, 제강슬래그<sup>49)</sup>, 석회암<sup>50)</sup> 등이 제안되고 있다. 이러한 기질층의 주된 성분으로는 Al, Ca, Fe 등이 포함되어 있는데, 이러한 성분 중 Al과 Ca가 Fe보다 주된 인의 흡착에 중요한 인자라고 판단된다. Pant<sup>51)</sup> 주로 비결정형의 Fe와 Al이 주로 토양에서 인의 흡착에 관여하고, 이 중 Al 산화물이 토양내의 인의 흡착과 인의 평형을 주로 결정하는 인자라고 보고하였다. 또한 Brix<sup>52)</sup> 인의 흡착용량에 가장 큰 영향을 주는 인자는 Ca 함량이라고 보고하였다.

인공습지에서의 이러한 흡착을 통한 인의 제거에는 포화용량이 존재하고 이러한 포화용량을 초과하여 유입되는 인은 제거되지 않을 뿐만 아니라, 인공습지내의 인이 탈착되어 처리수에서의 인의 농도를 오히려 높이기도 한다. 그러므로 단기간의 인의 제거는 기질층내의 흡착현상으로 해결할 수 있지만, 장기간에 걸친 인의 제거는 이러한 흡착현상 이외에 인공습지 내부에서 불용성의 인 침전물을 형성할 수 있는 방법이 강구되어야 한다.<sup>53)</sup> Rustige<sup>54)</sup> 인공습지에서 인의 흡착에 의한 제거보다 침전과 비반응성인(Non-Reactive Phosphorus; NRP)의 미생물학적 가수분해 및 섭취가 습지내의 인의 제거에 주된 요소라고 보고하였다. 이러한 처리수로 배출되는 인 중 일부는 방류되는 수계에서 다시 반응성인인  $PO_4^{3-}$ 로 변환되기도 하지만 고분자의 DOP(Dissolved Organic Phosphorus)는 mono- 또는 diester phosphatase enzyme에 의해 가수분해되지 않아 비교적 안정된 상태로 방류수계에 존재한다.<sup>55)</sup>

인공습지내 산화환원 상태는 습지내 인제거에 많은 영향을 주는 것으로 판단된다. WERF<sup>13)</sup> 혐기성의 환원적 환경상태에서는 결합되어 있던 인산침전물이 용해되고 무기인이 방출된다고 보고하였다. 이러한 산화환원상태와 습지내의

인의 제거에 관한 연구 중 Gruneberg and Kern은<sup>56)</sup> 호기성 상태에서는 Ca 화합물이 인과 불안정한 흡착상태를 통하여 습지내의 인을 제거하고, 혐기성 상태에서는 비결정형의 수산화철이 생성되어 인의 흡착이 이루어진다는 연구결과를 발표하였고, Lund은<sup>57)</sup> 무산소 상태는 인의 방출을 유도하지 않는다고 보고하였다. 이러한 연구결과를 통해 인공습지에서 산화환원상태와 인의 제거는 인의 흡착 및 탈착, 침전 및 용해 등의 화학적 관계와 미생물의 인의 흡수 및 방출, 식물의 역할 등에 의해 영향을 받으며, 추후 이러한 습지내에서의 ORP 상태에 따른 거동과 형태 변화에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.5. 병원균 제거

활성슬러지 공정이나 살수여상 공정과 같은 재래식 폐수처리공정에서의 병원균의 제거는 그다지 효과적이지 않다. 이에 비해 인공습지는 폐수내의 병원균 제거에 매우 효과적인 것으로 보고되고 있다. 인공습지에서의 병원균 제거는 Table 8과 같은 기작에 의해 이루어지는 것으로 알려져 있다.<sup>12)</sup>

### 3.6. 중금속 제거

매우 많은 종류의 습지식물들이 고농도의 중금속에 적응하여 성장할 수 있는데, 이는 뿌리근처에서 생성되는 iron plaque가 식물을 고농도의 중금속으로부터 보호하기 때문인 것으로 추측되고 있다. 이로 인해 인공습지가 중금속 제거 공정으로 설계되거나 지어지고 있다. 이러한 중금속 제거에 대한 세 가지 주된 기작은 Table 9와 같다.<sup>12)</sup>

**Table 8.** Pathogen removal mechanisms in constructed wetlands<sup>12)</sup>

Pathogen removal mechanisms	
○ Natural die-off	○ Unfavorable water chemistry
○ Sedimentation	○ Temperature effect
○ Filtration	○ Predation by other organisms
○ Ultraviolet radiation	

**Table 9.** Heavy metals removal mechanisms in constructed wetlands<sup>12)</sup>

Heavy metals removal mechanisms
○ Binding to soils, sediments and particulate matter
○ Precipitation as insoluble salts
○ Uptake by bacteria, algae, and plants

## 4. 국내의 인공습지에 관한 연구동향

국내의 인공습지에 관한 연구는 1990년대에 들어와서 활발히 진행되기 시작하였다. 국내의 연구는 주로 인공습지를 구성하는 수리학, 물리화학적 환경, 생물에 대한 전체적이고 생태적인 연관관계를 관찰하기 보다는 주로 습지식물의 역할 및 폐수처리와의 영향에 대한 연구가 주된 것이었다. 또한 그 대상은 주로 농촌지역에서의 오 폐수처리를 위한 것이 대부분이었다. 이로 인해 인공습지 및 습지의 다양한 용도와 생태적인 연관성에 대한 이해는 부족했던 것으로 생각된다.

갈대를 습지식물로 이용한 지하수면 인공습지에 대한 5년 이상의 지속적인 연구가 수행되었는데, 모래를 여재로 한 인공습지는 BOD와 SS의 제거는 70%정도의 제거율을 보였으나 질소, 인의 영양염류의 제거는 상대적으로 낮은 제거율을 보이는 것으로 보고되었다.<sup>4)</sup> 또한 동절기의 운전에도 지하수면 인공습지는 제거 효율은 저하되지만 습지의 운영에는 지장이 없는 것으로 보고되었다.<sup>58)</sup> 그러나 이러한 지하수면 인공습지를 이용한 농촌지역 오폐수의 처리에 대한 실험<sup>59~62)</sup>은 오염물 부하량이 다른 연구에 비해 상대적으로 매우 높아 오염물의 제거율이 낮아지는 결과를 나타내었다.

국내의 자유수면 인공습지에 대한 실험은 고수부지를 인공습지로 조성하여 수질을 정화하거나,<sup>63)</sup> 인공습지와 연못시스템을 연계하여 오수나 하천수를 처리하여 담수호나 간척지의 수질을 관리하는 수단의 하나로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다.<sup>63~65)</sup>

인공습지의 설계 및 처리수의 수질예측을 위한 모델에 관한 연구가 활발히 진행되었으나,<sup>66~68)</sup> 국내의 인공습지에 대한 실험결과 및 연구에 대한 자료가 부족하여 외국의 자료를 활용해야만 하는 어려움이 존재하는 것으로 판단된다. 윤춘경은<sup>69)</sup> 갈대를 식재한 지하수면 인공습지의 연구결과를 바탕으로 처리수의 수질 추정식에 대한 연구를 수행하였는데 인공습지의 처리효율을 갈대의 성장도와 관련지어 수질추정식을 추정하였다. 이 결과를 통해 처리효율은 갈대의 성장도와 매우 높은 상관성을 나타냄을 알 수 있었고, 이는 갈대의 성장이 인공습지의 환경을 폐수의 처리에 긍정적인 영향을 주는 것으로 판단된다.

이외에 인공습지에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 다양한 분야에서 습지시스템에 대한 접근이 이루어지고 있다. 인공습지를 이용하여 농공단지의 폐수를 처리하거나,<sup>70)</sup> 습지식생으로 미나리를 이용하는 등의 접근이 시도되었다.<sup>71)</sup> 윤춘경은<sup>72)</sup> 인공습지를 이용하여 오수를 처리한 후 처리수의 관개용수로의 타당성을 검토하였다. 그 결과 비의 수

확량 감소나 토양의 질적 저하는 없었으며, 오히려 긍정적인 효과를 나타내어 보조 관개용수로의 사용이 타당함을 보고하였다.

또한 자연습지 내에서 습지식물의 지상부 제거가 습지에 미치는 영향을 고찰하기 위한 연구가 있었다.<sup>73)</sup> 이 연구를 통해 습지식물의 지상부 제거가 영양염류의 제거를 통하여 수질정화의 효과를 증대하는 것으로 추정하였는데, 이는 기존의 연구결과<sup>19)</sup>와는 약간 상반되는 결과로 지상부 제거의 시기가 수질정화 효과에 영향을 미치는 것으로 인해 이러한 차이가 생기는 것으로 판단된다. 이외에 농촌배수처리용 자연습지 내에서의 식물, 곤충 등의 생물상에 대한 연구<sup>74)</sup>와 인공습지의 조성 후 생물다양성이 변동에 대하여 비교적 다양한 생물종을 중심으로 한 평가가 이루어졌다.<sup>75)</sup>

## 5. 종합적인 정리

인공습지는 국내외에서 다양한 분야에 적용되고 있다. 하폐수 처리를 비롯하여, 비점오염원 관리, 수생태계 복원 등 많은 분야에서 적용되고 있지만, 그 세부적인 제거기작은 명확히 밝혀지지 않았다. 이로 인해 설계 및 유지관리에 있어 여러 시행착오를 겪고 있는 것 또한 사실이다.

인공습지는 적용되는 유입수의 특성, 지역적 특성, 기후, 적용목적 등이 매우 다양하여 제거기작을 파악하는데 어려움이 있지만, 국내외 연구결과를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 지하수면 인공습지는 습지식물에 의해서만 산소를 공급받기 때문에 대부분 혐기성 상태로 존재하며, 이로 인해 SRB와 methanogens가 용존성 유기물의 제거에 주된 역할을 수행한다.

(2) 인공습지에서는 폐수 중의 aliphatic carbon의 양은 감소하고 습지 내부에서 자생적으로 발생하는 aromatic carbon의 함량이 높은 humic substance가 증가한다. 이는 인공습지 처리를 통해 처리수의 생분해도가 낮아질 수 있음을 나타낸다.

(3) 인공습지에서의 주된 질소제거 기작은 질산화/탈질로 판단되며, 인공습지에서 산소공급 상태에 따라 질소제거의 제한요소가 달라진다. 즉, 인공습지내 산소공급이 충분한 경우 유기물 부족으로 인한 탈질이 제한요소가 되며, 인공습지내 산소공급이 부족할 경우 질산화가 질소제거의 제한요소가 된다.

(4) 인공습지내 질산화율을 높이기 위하여 습지내 수위조절을 통한 산소공급 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 습지내 수위조절에 의한 영향은 습지식생에 영향을 주어 질소제거효율이 감소한다는 연구가 있는 반면, 습지내 ORP를 변동시켜 유기물과 질소제거효율을 높인다는 상반된 연구결과가 존재한다.

(5) 인공습지내 습지식물에 의한 인의 흡수는 크지 않으며, 흡수된 인도 대부분 뿌리부분에 저장되어 있기 때문에 지상부를 제거하는 것은 인의 제거에 거의 영향을 미치지 못한다.

(6) 인공습지내 인의 제거는 주로 기질층내 흡착, 침전 등에 의해 제거되며, 기질층 흡착에 있어 주로 Ca와 Al이 주된 인자로 작용한다. 그러나, 습지내 인의 거동은 산화환원상태, 인의 흡착, 탈착, 침전, 용해 등의 화학적 관계, 미생물 및 식물의 역할 등을 종합적으로 판단하여 파악하여야 한다.

인공습지는 생활하수의 처리에서부터 시작하여, 하수처리장 방류수의 처리에 많이 적용되어 왔으며, 수생태계 복원이라는 측면에서도 많이 적용되어 왔다. 향후, 이러한 분야뿐만 아니라, 가축분뇨, 산업폐수의 처리 등 다양한 용도로 적용될 전망이다. 또한, 비점오염원의 관리라는 측면에서도 향후 적용가능성이 높을 것으로 판단된다. 그러나 비점오염저감시설로서의 인공습지는 미국에서도 새로운 형태의 인공습지가 개발되고 있듯이 국내에서도 국내 실정에 적합한 인공습지의 개발이 시급한 실정이다.

**KSEE**

## 참고문헌

1. 김용호, 하수처리시설 설치 운영 개선방안, 2001년 제2차 물관리 정책토론회 발표자료, 국무총리 수질개선 기획단, (2001).
2. Hanselman, T. A., Graetz, D. A. and Wilkie, A. C., "Manure-borne estrogens as potential environmental contaminants: a review, *Environ. Sci. Technol.*," **37**(24), 5471-5478(2003).
3. Nosengo, N. "Fertilized to death, *Nature*," **425**, 894-895(2003).
4. 김민희, 윤춘경, 인공습지 실험시설의 5년간 결과 및 고찰, 한국농공학회 학술발표회, 2000년 10월 14일, 649-654(2000).
5. Mihelcic, J. R., Crittenden, J. C., Small, M. J., Shonnard, D. R., Hokanson, D. R., Zhang, Q., Chen, H., Sorby, S. A., James, V. U., Sutherland, J. W. and Schnoor, J. L., "Sustainability science and engineering: the emergence of a new metadiscipline," *Environ. Sci. Technol.*, **37**(23), 5314-5324(2003).

6. 안태석, 21세기를 위한 새로운 환경기술 : 생태기술(2002).
7. Werner, C., Mang, H. P., and Schlick, J., ECOSAN - introduction of closed-loop approaches in wastewater management and sanitation a new supra-regional GTZ-project, *In Proceedings of the 5th specialized conference on small water and wastewater treatment systems*, Istanbul, Turkey, 24-26, September 2002, 1085-1090(2002).
8. Cronk, J. K., "Constructed wetland to treat wastewater from dairy and swine operations; a review." *Agric. Ecosystems and Environ.*, **58**, 97-114(1996).
9. Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G., *Wetlands*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, New York(2000).
10. U. S. EPA, America's Wetland - Our Vital Link Between Land and Water, United States Environmental Protection Agency, In <http://www.epa.gov/OWOW/wetlands/vital/toc.html>(2008).
11. Ramsar Convention (2006) Strategic Framework and guidelines for the future development of the List of Wetlands of International Importance of the Convention on Wetlands (Ramsar, Iran, 1971) Third edition, as adopted by Resolution VII.11 (COP7, 1999) and amended by Resolutions VII.13, VIII.11 and VIII.33 (COP8, 2002), and IX.1 Annexes A and B (COP9, 2005)
12. Sundaravadeivel M. and Vigneswaran S. Constructed Wetlands for wastewater Treatment, *Cri. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **31**(4), 351-409(2001).
13. WERF, *Research Needs for Nutrient Removal from Wastewater*, Project 92-WNR-1, Water Environment Research Foundation, Alexandria, VA(1994).
14. Crites, R. W., and Tchobanoglous, G., *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill, New York(1998).
15. U. S. EPA, *Guiding principles for constructed treatment wetlands: providing for water quality and wildlife habitat*, EPA 843-B-00-003, Office of Wetlands, Oceans and Watersheds, Washington, DC(2000).
16. Murray-Gulde, C., Heatley, J. E., Karanfil, T., Rodgers, J. H. and Myers, J. E., "Performance of a hybrid reverse osmosis-constructed wetland treatment system for brackish oil field produced water," *Water Res.*, **37**, 705-713(2003).
17. Mantovi, P., Marmiroli, M., Maestri, E., Tagliavini, S., Piccinini, S. and Marmiroli, N., "Application of a horizontal subsurface flow constructed wetland on treatment of dairy parlor wastewater," *Biores. Technol.*, **88**, 85-94(2003).
18. Gatts, E. N., Faria, R. T., Vargas, H., Lannes, L. S., Aragon, G. T. and Ovalle, A. R. C., "On the use of photothermal techniques for monitoring constructed wetlands." *Rev. sci. Instrum.*, **71**(1), 510-512(2003).
19. WEF, *Biological and Chemical Systems for Nutrient Removal*, Water Environment Federation, Alexandria, VA(1998).
20. Steinmann, C. R., Weinhart, S. and Melzer, A., "A combined system of lagoon and constructed wetland for an effective wastewater treatment," *Water Res.*, **37**, 2035-2042.
21. Rittmann, B. E. and McCarty, P. L., *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*, McGraw-Hill, New York(2001).
22. Brix, H., "Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?," *Water Sci. Technol.*, **35**(5), 11-17(1997).
23. Hench, K. R., Bissonnette, G. K., Sexstone, A. J., Coleman, J. G., Garbutt, K. and Skousen, J. G., "Fate of physical, chemical and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands," *Water Res.*, **37**(4), 921-927(2003).
24. Kadlec, R. H. and Knight, R. L., (1996) *Treatment wetlands*, Lewis Publishers, New York(1996).
25. Manios, T., Stentiford, E. I. and Millner, P., "Removal of total suspended solids from wastewater in constructed horizontal flow subsurface wetlands," *J. Environ. Sci. Health; Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, **A38**(6), 1073-1085(2003).
26. Watson, J. T., Reed, S. C., Kadlec, R. H., Knight, R. L. and Whitehouse, A. E., Performance expectations and loading rates for constructed wetlands, In *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment; Municipal, Industrial and Agricultural*, Hammer, D. H., Ed.; Lewis Publishers, (1989).
27. Baptista, J. D. C., Donnelly, T., Rayne, D. and Davenport, R. J., "Microbial mechanisms of carbon removal in subsurface flow wetlands," *Water Sci. Technol.*, **48**(5), 127-134(2003).
28. Vymazal, J. and Masa, M., "Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level," *Water Sci. Technol.*, **48**(5), 143-148(2003).
29. Quanrud, D. M., Karpiscak, M. M., Lansley, K. E. and Arnold, R. G., "Transformation of effluent organic matter during subsurface wetland treatment in the Sonoran Desert," *Chemosphere*, **54**, 777-788(2004).
30. Barber, L. B., Leenheer, J. A., Noyes, T. I. and Stiles, E. A., "Nature and transformation of dissolved organic matter in treatment wetlands," *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 4805-4816 (2001).

31. Bezbaruah, A. N. and Zhang, T. C., "Performance of a constructed wetland with a sulfur/limestone denitrification section for wastewater nitrogen removal," *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 1690-1697(2003)..
32. Brix, H., Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance, In *Constructed wetlands for Water Quality Improvement*, Moshiri, G. A., Ed.; Lewis Publishers(1993).
33. Mander, U., Kuusemets, V., Lohmus, K., Mairing, T., Teiter, S. and Augustin, J., "Nitrous oxide, dinitrogen and methane emission in a subsurface flow constructed wetland," *Water Sci. Technol.*, **48**(5), 135-142(2003).
34. Hsieh, Y. and Coultas, C. L. Nitrogen removal from freshwater wetland: nitrification-denitrification coupling potential, In *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment; Municipal, Industrial and Agricultural*, Hammer, D. H., Ed.; Lewis Publishers(1989).
35. Bayley, M. L., Davison, L. and Headley, T. R., "Nitrogen removal from domestic effluent using subsurface flow constructed wetlands: influence of depth, hydraulic residence time and pre-nitrification," *Water Sci. Technol.*, **48**(5), 175-182(2003).
36. Tanner, C. C. and Kadlec, R. H., "Oxygen flux implications of observed nitrogen removal rates in subsurface-flow treatment wetlands," *Water Sci. Technol.*, **48**(5), 191-198(2003).
37. Gerke, S., Baker, L. and Xu, Y., "Nitrogen transformation in a wetland receiving lagoon effluent: sequential model and implications for water reuse," *Water Res.*, **35**(16), 3857-3866 (2001).
38. Kayser, K., Kunst, S., Fehr, G. and Voermanek, H., "Controlling a combined lagoon/reed bed system using the oxidation-reduction potential (ORP)," *Water Sci. Technol.*, **48**(5), 167-174 (2003).
39. Hunter, R. G., Combs, D. L. and George, D. B., "Nitrogen, phosphorus, and organic carbon removal in simulated wetland treatment systems," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **41**, 274-281(2001).
40. Tanner, C. C., D'Eugenio, J., McBride, G. B., Sukias, J. P. S. and Thompson, K., "Effect of water level fluctuation on nitrogen removal from constructed wetland mesocosms," *Ecological Engineering*, **12**, 67-92(1999).
41. Headley, T. R., Huett, D. O. and Davison, L., "Seasonal variation in phosphorus removal processes within reed beds - mass balance investigations," *Water Sci. Technol.*, **48**(5), 59-66(2003).
42. Kim, S. Y. and Geary, P. M., "The impact of biomass harvesting on phosphorus uptake by wetland plants," *Water Sci. Technol.*, **44**(11-12), 61-67(2001).
43. Luderitz, V. and Gerlach, F., "Phosphorus removal in different constructed wetlands," *Acta Biotechnologica*, **22**(1-2), 91-99 (2002).
44. Sundareswar, P. V., Morris, J. T., Koepfler, E. K. and Fornwalt, B., "Phosphorus limitation of coastal ecosystem processes," *Sci.*, **299**, 563-565(2003).
45. Browning, K. and Greenway, M., "Nutrient removal and plant biomass in a subsurface flow constructed wetland in Brisbane, Australia," *Water Sci. Technol.*, **48**(5), 183-189(2003).
46. Molle, P., Lienard, A., Grasmick, A. and Iwema, A., "Phosphorus retention in subsurface constructed wetlands: investigations focused on calcareous materials and their chemical reactions," *Water Sci. Technol.*, **48**(5), 75-83(2003).
47. Zhu, T., Maehlum, T., Jenssen, P. D. and Krogstad, T., "Phosphorus sorption characteristics of a light-weight aggregate," *Water Sci. Technol.*, **48**(5), 93-100(2003).
48. Forbes, M. G., Dickson, K. R., Golden, T. D., Hudak, P. and Doyle, R. D., "Dissolved phosphorus retention of light-weight expanded shale and masonry sand used in subsurface flow treatment wetlands," *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 892-898(2004).
49. Drizo, A., Comeau, Y., Forget, C. and Chapuis, R. P., "Phosphorus saturation potential: a parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems," *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 4642-4648(2002).
50. Comeau, Y., Brisson, J., Reville, J. P., Forget, C. and Drizo, A., "Phosphorus removal from trout farm effluents by constructed wetlands," *Water Sci. Technol.*, **44**(11-12), 55-60(2001).
51. Pant, H. K., Reddy, K. R. and Spechler, R. M., "Phosphorus retention in soils from a prospective constructed wetland site: environmental implications," *Soil Sci.*, **167**(9), 607-615(2002).
52. Brix, H., Arias, C. A. and Del Bubba, M., "Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands," *Water Sci. Technol.*, **44**(11-12), 47-54(2001).
53. Del Bubba, M., Arias, C. A. and Brix, H., "Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds as measured by Langmuir isotherm," *Water Res.*, **37**, 3390-3400(2003).

54. Rustige, H., Tomac, I. and Honer, G., "Investigations on phosphorus retention in subsurface flow constructed wetlands," *Water Sci. Technol.*, **48**(5), 67-74(2003).
55. Llewelyn, J. M., Landing, W. M., Marshall, A. G. and Copper, W. T., "Electrospray ionization Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry of dissolved organic phosphorus species in a treatment wetland after selective isolation and concentration," *Anal. Chem.*, **74**, 600-606(2002).
56. Gruneberg, B. and Kern, J., Phosphorus retention capacity of iron-ore and blast furnace slag in subsurface flow constructed wetlands," *Water Sci. Technol.*, **44**(11-12), 69-75(2001).
57. Lund, M. A., Lavery, P. S. and Froend, R. F., "Removing filterable reactive phosphorus from highly coloured stormwater using constructed wetlands," *Water Sci. Technol.*, **44**(11-12), 85-92(2001).
58. 윤춘경, 권순국, 함중화, 노재경, "인공습지 오수처리시설의 처리 성능에 관한 연구," 한국농공학회지, **42**(4), 96-105(2000b),
59. 윤춘경, 권순국, 함중화, 생장기와 동절기의 인공습지 오수처리 성능, 한국농공학회지, **41**(4), 37-46(1999).
60. 윤춘경, 권순국, 권태영, "인공습지의 농촌지역 오수정화시설에 적용가능성 연구," 한국농공학회지, **40**(3), 83-93(1998).
61. 윤춘경, 권순국, 김형중, "인공습지에 의한 농촌오수처리에 관한 연구," 한국농공학회지, **39**(4), 55-63(1997a).
62. 윤춘경, 권순국, 김형중, "인공습지를 이용한 자연정화 오수처리 시설에서 영양물질의 변화와 대장균군의 행동," 한국환경농학회지, **16**(3), 249-254(1997b).
63. 양홍모, 최수명, 윤광식, 간척지 연못-습지 시스템의 질소 인 초기 처리수준 및 식물성장, 한국농공학회 학술발표 논문집, 2001년 10월 12일(2001).
64. 김민희, 윤춘경, 함중화, 인공습지와 연못시스템을 이용한 오수 처리, 한국농공학회 학술발표회, 2001년 10월 12일(2001).
65. 양홍모, 최수명, 윤광식, 담수호 수자원보전을 위한 유역처리 연못-습지 시스템, 한국농공학회 학술발표회, 2000년 10월 14일, pp.557-562(2000).
66. 윤춘경, 함중화, "습지-저류지에 의한 하구 담수호 수질개선효과 예측," 한국농공학회지, **42**(5), 94-102(2000).
67. 장정렬, 박종민, 권순국, 윤경섭, 농촌유역 비점오염원처리를 위한 적정 인공습지 규모결정에 관한 연구, 한국농공학회 학술발표회, 2000년 10월 14일, pp.490-499(2000).
68. 최인옥, 권순국, 농촌유역의 수질관리를 위한 인공습지 설계모형 개발, 한국농공학회 학술발표회, 2001년 10월 12일(2001).
69. 윤춘경, 권순국, 전지홍, 생활오수 처리를 위한 인공습지의 처리 수 수질 추정식에 관한 연구, 한국물환경학회지, **16**(4), 491-499(2000a).
70. 윤춘경, 임용호, 김형중, "인공습지에 의한 농공단지 폐수처리," 한국환경농학회지, **16**(2), 170-174(1997c).
71. 안창우, 이도원, 이상일, 김정옥, 습지에서 미나리와 미꾸라지를 이용한 수질정화 가능성, 94년도 한국물환경학회 학술연구발표회 요지집, pp.122-127(1994).
72. 윤춘경, 함중화, 우선호, 김민희, "인공습지 오수처리수를 이용한 벼재배 실험," 한국농공학회지, **43**(2), 94-104(2001).
73. 정연숙, 오현경, 노찬호, 황길순, "습지식물의 지상부 제거가 생산력과 영양염류 제거량에 미치는 효과," 환경생물학회지, **17**(4), 459-465(1999).
74. 김범철, 전만식, 정근, 정연숙, 황길순, "농촌배수처리용 습지의 생물상 및 유기물 제거율," 환경생물학회지, **17**(4), 407-414(1999).
75. 김귀곤, 조동길, 인공습지 조성후 생물다양성 증진 효과에 관한 연구: 서울공고 생태연못을 중심으로, 한국조경학회지, **27**(3), 1-17(1999).