

# 인공습지를 이용한 수처리 효율 및 향후 연구제언

## Water Treatment Using Constructed Wetlands and Research Perspectives in Korea

강 호 정\* / 송 근 예\*\*

Ho Jeong Kang / Keun Yea Song

### :: Abstract ::

More than 1000 natural and constructed wetlands have been used to improve water quality. The general results showed that the highest removal efficiency was 84% for BOD and the lowest one was 48% for total nitrogen concentration. In addition, total phosphorus removal efficiency was 67%, and the removal efficiencies are related to inflow loading. Researches conducted in Korea have focused on input-output mass balance and uptake by aquatic plant. As such little information is available about complex processes regulating water quality and role of microbes. Therefore, to determine the optimal design for construct, and methods to operate constructed wetland, researches about complex mechanisms of contaminant removal and interdisciplinary researches are necessary.

**Keywords:** constructed wetland, aquatic plant uptake, water quality improvement, contaminant removal mechanism

### :: 요 지 ::

습지는 환경 생태적으로 다양한 기능을 가지고 있으며, 이 중 특히 수질정화기능에 초점을 두고 전 세계적으로 1000여개 이상의 습지가 수처리 및 수질개선에 이용되고 있다. 자연습지 및 인공습지를 이용한 수처리 과정에서 BOD, SS, N, P, 대장균과 중금속의 제거효율을 확인한 결과, BOD의 제거효율은 약 84%로 가장 높게 나타났으며, 질소의 제거효율은 48%로 가장 낮았다. 또한 인의 제거효율은 평균 67%이며 유입되는 인의 농도가 높을수록 인의 처리 효율이 떨어지는 것을 알 수 있었다. 국내 관련연구의 경우, 대부분 습지의 유입수와 유출수의 농도 변화 조사와 식물체내 영양염류 농도 조사가 주를 이루어 실질적으로 인공습지 내에서 영양염류가 제거되는 기작을 밝히는 연구 및 영양염류 제거에 관여하는 미생물에 관한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 수질정화에 최적의 인공습지 건설 및 운영이 가능하기 위해서는 복합적 영양염류 제

\* 정회원 · 이화여자대학교 · 환경학과 조교수 · 이학박사 E-mail: hjkang@ewha.ac.kr

\*\* 정회원 · 이화여자대학교 · 환경학과 박사과정 · 공학석사 · E-mail: gosoa98@empal.com

거기작의 규명 및 지질학적, 수리학적인 연구가 병행되어야 할 것이다.

**핵심용어:** 인공습지, 수생식물의 흡수, 수질정화기능, 오염물질 제거기작

---

## 1. 서론

습지는 전통적으로 필요 없는 버려진 땅으로 간주되었으나, 최근 20 여 년 간의 연구를 통하여 다양한 환경 생태적 중요성이 밝혀졌다 (Mitsch and Gosselink, 2000). 첫째, 습지는 여러 가지 생물물리화화학적 방법으로 수체로부터 오염물질을 분해 및 제거하여 비점오염원을 처리하는데 유용하게 이용될 수 있는 수질개선 능력을 가지고 있다. 둘째, 습지는 다양한 생물에게 서식환경을 제공한다. 습지에 있는 풍부한 플랑크톤과 유기성 물질은 수서곤충의 먹이가 되고, 어패류는 목재와 양서류 및 소형 포유동물의 먹이가 되어 먹이 그물을 이루면서 생물종 다양성이 보장되는 생태계가 형성된다. 셋째 습지는 중요한 수문학적 기능을 수행하는데 습지의 토양은 단위 부피 당 보유할 수 있는 물의 양이 많고 자연적으로 형성된 배수관개도가 치밀하고 조직적이어서 우기 또는 홍수 때에 과다한 수분이 습지 토양 속에 저장되었다가 건기에는 지속적으로 주위에 물을 공급해주는 역할을 담당한다. 또한 습지 토양은 표면 유출수를 효과적으로 흡수함으로써 토양 침식을 방지하는 역할도 담당하고 있다. 마지막으로 습지, 특히 이탄습지의 경우는 이산화탄소를 흡수하고 메탄을 발생시켜 전 지구적인 탄소 순환에서 중요한 역할을 담당하고 있다.

이러한 습지의 다양한 기능 중 특히 수질정화기능에 대한 이용방안이 유럽과 미국에서 이용되어 왔다. 습지식물을 하수처리에 이용한 과학적인 연구는 1952년 독일의 Seidel에

의해 최초로 수행된 것으로 알려져 있다. 미국에서는 1970년대 초에 Grant와 Patrick이 펜실베이니아의 Tinicum Marsh에서 습지 식물에 의한 수중의 영양염류 제거능에 관한 실험이 있던 후 많은 사람들이 수질정화의 방법으로 수생식물을 활용하는 방안에 대하여 관심을 갖게 되었다. 현재는 전 세계적으로 약 1000여개 이상의 습지가 수처리 및 수질개선에 이용되고 있다.

습지를 이용한 수처리는 크게 자연습지를 이용하는 방식과 인공습지를 이용하는 방식으로 나눌 수 있다. 자연습지를 이용하는 방법은 담수, 늪, 소택지, 이탄습지 등을 이용하여 수처리를 하는 방식으로 EPA (1998)에 따르면 2차 방류수를 받는 자연습지의 오염물질 제거효율은 BOD는 70~96%, 부유물질은 60~90%, 질소는 40~90%정도이며 인은 계절에 따라 다르게 나타난다고 보고하였다. 인공습지는 인위적으로 만들어진 습지를 말하며, 일반적으로 소규모 정수 처리에 적용되고, 식물과 매체를 이용하는 수처리 시스템으로써 주요 구성 인자는 습지 식물과 매체 그리고 미생물이다. 매체는 돌, 자갈, 토양 또는 이들을 조합해서 사용할 수 있는데 직접적으로는 여과, 침전, 흡착작용을 통하여 오염물질을 처리하며, 동시에 식물생장에 필요한 매체와 뿌리에 부착된 미생물을 지지하는 역할을 함으로써 간접적으로 정화작용에 기여한다. 인공습지 시스템은 크게 3가지로 분류할 수 있는데 자유수면 시스템(Free Water Surface: FWS), 지표면하 흐름(Subsurface Flow: SF) 그리고 수직유수습지(Vertical Flow

Wetland)로 나눌 수 있다. FWS방식은 배수를 표면수로 유입시키고 토양과 수생식물과 접촉하는 과정에서 침전과 생물막에 의한 분해를 통해 수질을 정화시키고 표면부터 처리수를 배출시키는 방식이다. 이에 반해 SF방식은 배수를 수생식물의 근권으로 유입시키고 토양과 뿌리 부분에서 여과와 흡착 등의 물리화학적 과정을 거쳐 근권의 미생물 분해에 의해 배수를 정화하고 하부로부터 처리수를 유출시키는 방식이다. 마지막으로, 위의 FWS방식과 SF 방식을 차례로 결합한 것이 바로 세 번째 VFW 방식이다 (Conley et al., 1991).

인공습지에서 처리할 수 있는 물질로는 BOD (생물화학적 산소요구량), SS (부유고형물), N (질소), P (인) 및 대장균과 중금속 등이 널리 알려져 있다. 이 중 BOD의 침강성 유기물은 침강, 여과 등의 기작을 통해 습지에서 신속히 제거되며 용존유기물은 물속의 식물잔재에 부착된 미생물과 부유미생물의 성장에 의해 제거된다. 위 반응에 필요한 산소의 주요 공급원은 식물의 잎으로부터 뿌리층으로의 산소 전달을 통해 이루어진다. SS는 습지 내 토양에 의해 여과되는 과정과 침전을 통해 제거되며, 질소는 근권 주위의 호기성 조건에서 질산화 과정을 거친 후 토양의 혐기성 조건에서 탈질화를 거쳐 대기 중으로 제거된다. 또한 식물이 흡수 가능한 형태인 암모니아성 질소와 질산성 질소는 식물의 뿌리를 통해 흡수 제거되며, 암모니아의 휘발을 통해서도 질소가 제거된다. 인의 제거는 흡착과 침전에 의해 주로 제거되며 수생식물이나 조류와 세균에 의한 흡수도 중요할 수 있다. 대장균의 제거는 토양에의 흡착 그리고 토양에 이미 형성되어 있는 미생물군집과의 경쟁에서

뒤쳐져 사멸하는 것, 미소동물에 의한 섭식, 자외선에 의한 사멸 등으로 제거되며 (Green et al., 1997), 중금속의 제거는 식물의 중금속에 대한 저항성 및 섭취를 통하여 제거되거나 토양에 흡착되어 제거되는 것으로 알려졌다 (Mungur et al., 1997).

국내에서는 부레옥잠을 이용한 돈사폐수의 처리(이병헌과 이남희, 1994), 생이가래를 이용한 영양염류 제거에 관한 연구(안윤주와 공동수, 1995), 수처리를 위한 모의 습지의 실험적 연구(안창우, 1994), 인공습지에 의한 농공단지 폐수처리 연구(윤춘경 등, 1999a), 갈대를 이용한 Reed-Bed의 생활하수 정화능력 연구(심우섭과 한인섭, 1998), 군부대 오수처리 효율성 향상을 위한 인공습지의 이용방안 연구(김도선, 1993) 등이 진행되었고, 현재는 시화호 인공습지와 같은 대규모 생태공원이나 지방자치단체를 중심으로 진행되는 소규모 농촌 수처리에 활용이 시작되는 단계이다.

본 논문에서는 최근 들어 자연정화시스템으로 주목받기 시작한 국내의 인공습지 조성에 대한 사례를 검토하고 그 효율성에 대한 평가와 함께 향후 국내에 적합한 인공습지 조성에 대한 연구의 보완점들을 논의하고자 한다.

## 2. 국내 인공습지 연구 사례

본 논문에서는 학술지에 게재된 인공습지를 이용한 수처리에 관한 논문 14편을 중심으로 현재까지 진행된 인공습지를 이용한 수처리에 관한 연구들을 검토 분석하였다. 이중 수생식물을 이용한 연구 논문은 총 7편이었으며, 그 다음으로 인공습지의 시작품을 이용하여 전체

표 1. 본 논문에서 고려한 연구내용

연구제목	참고문헌
부레옥잠을 이용한 유기물질의 제거 결과 및 생장에 미치는 주요인	이종식 등 (1985)
부레옥잠의 영양염류 및 중금속 제거 결과	이종식 등 (1985)
인공습지를 이용한 군부대 오수정화 효율성	김도선 (1993)
부레옥잠을 이용한 돈사폐수의 처리	이병현, 이남희 (1994)
생이 가래를 이용한 수질오염물질 제거방안 연구	안윤주, 공동수 (1993)
수처리를 위한 모의 습지의 실험적 연구	안창우 (1994)
인공습지를 이용한 자연정화 오수처리 시설에서 영양물질의 변화와 대장균군의 행동	윤춘경 등 (1997a)
인공습지에 의한 농공단지 폐수처리	윤춘경 등 (1999a)
울산지역에서 자생하는 갈대, 부들, 갈풀을 이용한 Reed-bed의 생활하수 정화능력 연구	심우섭, 한인섭 (1998)
농촌지역 수질개선을 위한 인공습지 실험시설의 3년 간 실험결과 검토	윤춘경 등(1997b)
오수처리용 인공습지 내 토양의 이화학적 특성조사	윤춘경 등(1999b)
미나리를 식재한 습지에서의 질소제거에 관한 연구	정정권, 강종훈 (1999)
수초·골재 하수처리 기술개발	정동양 (2001)
인공습지 하수처리장에서 수초 및 골재의 특성	장병일 (2001)

오염물질 제거 효율을 조사한 논문들이 4편, 수초·골재를 이용한 하수처리 기술에 관한 내용이 2편 그리고 인공습지 내 토양의 이화학적 특성을 조사한 연구가 1편 있었다. 대부분의 연구는 습지를 통과한 하수의 유입수와 유출수의 농도 변화를 조사한 것과 식물체내 영양염류 농도를 조사하여 식물의 흡수능을 조사한 것 등이 주를 이루었다 (표 1).

이 인공습지 13 곳 중 실외형의 중소규모에서 제작된 것은 총 6곳이며, 실험실에서 제작된 인공습지는 총 7곳임을 알 수 있다. 인공습지의 형태로는 자유수면형 인공습지(FWS: Flow water surface system)가 6곳, 지표면하 흐름형 인공습지(SF: Subsurface flow system)가 6곳, 복합지표면하 흐름형(CSF: Combined subsurface flow system)이 1곳이 있었다. 인공습지의 크기는 실외형의 경우 평균 12.2m<sup>2</sup>의 중소규모가 2곳이 있었으며, 150~900m<sup>2</sup>의 대규모 인공습지가 4곳이 있었다. 실내형의 경우는 0.018~0.864m<sup>2</sup> 정도였고 평균 0.22m<sup>2</sup>의 소규모 크기였다. 이 인

공습지 중 수생식물의 오염물질 제거능을 조사하기 위한 연구에서는 부레옥잠과 미나리, 생이가래, 갈대, 부들, 갈풀 등을 대상으로 실험하였으며, 이들 실험 모두는 실험실에서 진행된 모형형태의 실험이었다. 또한 부레옥잠과 미나리, 생이가래를 이용한 실험은 자유흐름형(FWS)의 시스템이었고, 갈대, 부들, 갈풀의 제거능에 관한 실험은 지표면하 흐름형 방식(SF)이었다. 이에 반해 실외에서 진행된 대규모 인공습지 연구는 김도선의 “인공습지를 이용한 군부대 오수정화 효율성”에 관한 연구에서 진행되었던 FWS, CSF 형태 2곳을 제외하고는 모두 지표면하 흐름형 방식(SF: Subsurface flow system)이었다.

표 2에서와 같이 인공습지를 이용한 항목별 처리율을 분석한 평균값을 살펴보면, BOD가 84%로 가장 좋은 처리율을 보이고 있으며, 그 다음으로는 SS 78%, COD 74%, 총인 67%, 총 질소는 48%로 가장 낮은 처리율을 보이고 있다. 이 처리 효율은 유럽이나 북미에서 보고된 값들과 유사한 경향을 보이

**표 2. 국내외 인공습지의 수처리 효율의 평균값**  
(국명 뒤의 숫자는 계산에 사용된 인공습지의 개수)

	국내 (14)	유럽 (268)	덴마크 (71)	미국 (84)
BOD	84	79	80	73
COD	75	70	66	ND
SS	78	ND	40	69
TN	49	40	32	64
TP	67	47	74	55

고 있다. 또한 인의 처리 경우에는 그림 1에 나타난 바와 같이 유입되는 인의 농도가 높을수록 인의 처리 효율이 떨어지고 있음을 알 수 있다.

### 3. 결론 및 연구제언

현재 우리나라 인공습지에 대한 연구의 성과물은 풍족한 편이 아니며, 아직은 기초적인 자료를 수집하는 단계라고 할 수 있다. 앞으로 국내에서 진행되어야 할 연구를 제안하면 다음과 같다.

우선, 초기 수생식물을 이용한 수처리의 자연정화 효과를 분석하는 단계에서 시작된 우리나라 인공습지에 대한 연구는 주로 현재까지 수생식물이 영양염류를 흡수하는 정량을 분석하는 실험과 오수의 유입과 유출의

농도를 비교 분석하는 단계의 실험이 대부분을 차지하고 있다. 그러나 실질적으로 인공습지 내에서 영양염류가 제거되는 기작을 밝히는 연구 및 그 기작에 따른 영양염류의 제거 정도를 측정한 연구는 미흡하다. 가령 습지에서 질소 제거는 수생식물의 근권 내에서 질산화 과정을 거친 후 토양의 혐기적 조건에서 탈질화를 통해 제거되는 기작과 암모니아성 질소가 대기 중으로 휘발되는 과정을 통해 제거되는데 이에 대한 정량적인 실험을 인공습지에 내에서 진행한 연구는 아직 없다. 또한 인의 경우도 호기적 조건 속에서 토양에 흡착되어 제거되거나 식물의 뿌리를 통한 흡수를 통해 제거되는데 이에 대한 정량적인 측정 역시 미비하다.

둘째, 습지에서 오염물이 제거되는데 관여하는 토양내 미생물에 대한 연구가 미흡하다.

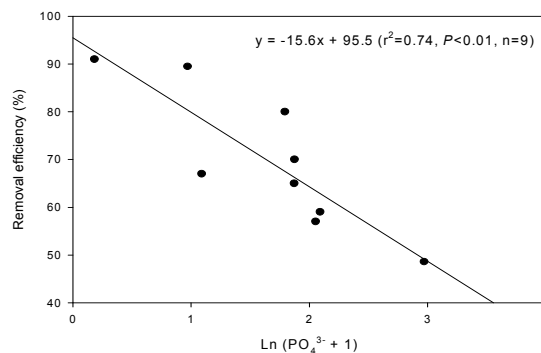


그림 1. 국내 습지에서 조사된 유입수의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 농도와 처리효율과의 관계

습지 내에서는 다양한 환경 (혐기성-호기성, 빈영양-부영양 등)이 공존하므로 육상토양과는 다른 매우 다양한 미생물 군집이 존재하며 이들이 다양한 기능을 발휘한다. 기존의 미생물학적인 방법 뿐 아니라, 최신의 분자생물학적인 방법을 통한 저토 미생물의 연구가 시급하다.

다음으로는 실외형 연구 규모와 실내형 연구 규모간의 상이점이다. 물론, 실외형 중소규모 인공습지와 실내 모형 인공습지 모두 BOD에서 가장 높은 처리율을 나타내고 있으나, TN, TP는 가장 낮은 처리율을 나타내었고, 특히 TN은 각 습지별로 처리율의 편차가 가장 크게 나타났다. 그리고 전반적으로 실내 모형 인공습지가 실외형 중소규모 인공습지보다 처리율이 높게 나타났다. 이는 실내형 조건이 실외형 조건보다 통제 요인이 상대적으로 적기 때문에 처리율이 높아지는 것으로 생각된다. 따라서 인공습지 실험에 있어 실내형 인공습지 연구를 함에 있어서 외부 환경조건에 가까운 형태로 실험을 진행하는 것이 필요하며, 실험실 규모에서 실행한 결과를 대규모 습지에 외삽할 때는 신중을 기해야 할 것이다.

마지막으로 습지에 대한 연구에서 각 연구지에 대한 정보가 부족하다는 점이다. 일반적인 식생이나 체류시간에 관한 내용 뿐 아니라 토질, 지하수의 거동, 범람의 빈도등과 같은 지질학적, 수리학적인 연구가 병행되어야 최적의 인공습지 건설과 운영이 가능할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 “차세대 핵심환경기술

개발사업 (Eco-technopia 21 project)" 으로 지원받은 과제입니다.

## 참고문헌

1. 김도선, 인공습지를 이용한 군부대 오수 정화 효율성, 자연보존, 제105권, pp. 29-34, 1993.
2. 심우섭, 한인섭, 울산지역에서 자생하는 갈대, 부들, 갈풀을 이용한 Reed-Bed의 생활하수 정화능력 연구, 한국환경과학회지, 제7권, 제2호, pp. 117-121, 1998.
3. 안윤주, 공동수, 생이가래를 이용한 영양물질의 제거방안 연구, 환경공학회지, 제17권, 제6호, pp. 193-603, 1995.
4. 안창우, 수처리를 위한 모의 습지의 실험적 연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위 논문 1994.
5. 윤춘경, 권숙국, 김형중, 인공습지를 이용한 자연정화 오수처리시설에서 영양물질의 변화와 대장균군의 행동, 한국환경농학회지, 제16권, 제3호, pp. 249-253, 1997a.
6. 윤춘경, 임용호, 김형중, 인공습지에 의한 농공단지 폐수처리, 한국환경농학회지, 제16권, 제2호, pp. 170-174, 1997b.
7. 윤춘경, 권숙국, 우선호, 권태영, 농촌지역 수질개선을 위한 인공습지실험시설의 3년간 실험결과 검토, 한국물환경학회지, 제15권, 제4호, pp. 581-589, 1999a.
8. 윤춘경, 권태영, 우선호, 오수처리용 인공습지내 토양의 이화학적 특성조사, 농촌계획, 제5권, 제2호, pp. 24-29, 1999b.
9. 이종식, 이규승, 변종영, 김문규, 수생식물을 이용한 수질오염원 제거에 관한 연구: 제2보 부레옥잠의 영양염류 및 중금속 제거, 한국잡초학회지, 제5권, 제2호, pp. 149-154, 1985.
10. 이병현, 이남희, 부레옥잠을 이용한 돈사폐수의 처리, J. of Korea Society of Water and Waste Water Treatment Technology, 제2권, 제2호, pp. 29-38, 1994.
11. 장병일, 경상대학원 농화학과 석사학위 논문 2001.

12. 정동양, 수초·골재 하수처리 기술개발, G-7 환경기술 연구개발사업 성과 세미나 발표집, 2001.
13. 정정권, 강종훈, 미나리를 식재한 습지에서 질소제거에 관한 연구, 대한환경공학회지, 제21권, 제12호, pp. 2313-2320, 1999.
14. Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G., Wetlands, John Wiley & Sons, 2000.
15. EPA, Constructed Wetland and Aquatic Plant System for Municipal Wastewater Treatment, 「Design Manual」, EPA/625/1-88/022, 4, 1998.
16. Conely, L. M., Dick, R. I. and Lion, L. W., An assesment of the root zone method of waste water treatment, Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 63, pp. 239-247, 1991.
17. Green, M. B., Griffin, P., Seabridge, J. K. and Dhobie, D. Removal of bacteria in subsurface flow wetland, Water Science and Technology, Vol. 35, pp. 109-116, 1997.
18. Mungur, A. S., Shutes, R. B. E., Revitt, D. M. and House, M. A. An assesment of metal removal by a laboratory scale wetland, Water Science and Technology, Vol. 35, pp. 125-133, 1997.