

하천수정화 근자연형 인공습지의 초기 질소제거

양홍모

전남대학교 조경학과

(2002년 11월 6일 접수, 2002년 11월 29일 수리)

Preliminary Nitrogen Removal Rates in Close-to-Nature Constructed Stream Water Treatment Wetland

Hong-Mo Yang (Dept. of Landscape Architecture, College of Agriculture and Life Science, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea)

ABSTRACT : A 0.19 hectare stream water purification demonstration wetland was constructed and planted with cattails from April 2001 to May 2001. Some portions of its bottom surfaces adjacent to levees have a variety of slope of 1:4 ~ 1:15 and two small open water areas were installed in the wetland. These make its shape closer to a natural wetland. Nitrogen removal was a major objective of the wetland. Waters of Sinyang Stream flowing into Kohung Estuarine Lake located southern coastal region of Korean Peninsula were pumped and funneled into it. Volumes and water quality of inflow and outflow were analyzed from July 2001 through December 2001. Average inflow and outflow were 120 m³/d and 112 m³/d, respectively. Hydraulic retention time was about 3.1 days. Average nitrate and total nitrogen removal rate for the early stage of the wetlands were 85.8 mg/m²/day, 171.4 mg/m²/day respectively. Full establishment of cattails within a few years can develop litter-soil substrates and supply available carbon sources beneficial to the denitrification of nitrate. These can lead to increases of the nitrate retention rate. Short circuiting and dead zone areas which might be occurred due to the close-to-nature layout of the wetland were not observed during the monitoring period.

Key words: Nitrogen removal, wetland, water quality.

서론

인공습지(constructed wetlands)는 수질을 정화하기 위해 인위적으로 조성한 습지를 지칭한다. 인공습지를 수질정화인공습지(constructed treatment wetlands) 혹은 습지정화시스템(wetland treatment system)이라 부르기도 한다. 하수처리의 관점에서 인공습지는 2차처리 및 3차처리 공정의 주요한 과정을 수행하기 위해 활용되어 왔으며, 강우 유출수 및 하천수의 질소 및 인을 제거하기 위해 활용하고 있다.

인공습지를 수리학적 특성에 따라 자유수면습지(surface flow wetlands)와 여과습지(subsurface flow wetlands)로 대별한다¹⁾. 자유수면습지는 습지의 유입수가 대기과 접촉하며, 습지바닥에 정수식물을 식재하고 수심을 0.3~0.5 m 정도로 유지시킨다. 여과습지는 갈대상(reed bed)으로 부르기도 하며, 콘크리트 박스와 같은 구조물을 지하에 1~1.5 m 깊이로 설

치하고 자갈과 굵은 모래로 채운 후 정수식물을 표토에 심는다²⁾. 유입수는 여과습지의 표토층 아래로 흐른다. 자유수면습지는 북미에서 주로 활용되고 있으며, 여과습지는 유럽, 오스트레리아, 남아프리카에서 주로 사용되고 있다.

유역의 농업 및 산업 활동으로부터 발생하는 영양염류와 하수처리장의 방류수에 함유되어 있는 영양염류는 하천과 호수의 수질저하 및 부영양화를 야기하는 경우가 많다. 하구로 유입되는 오염된 하천수는 연안의 수질을 저하시켜 산소결핍현상(hypoxia)을 야기하는 원인이 되고 있다³⁾. 이런 영양염류를 줄이는 방법으로 인공습지가 전세계적으로 활용되고 있다⁴⁾.

습지에서 인제거는 질소제거보다 효율이 다소 낮은 것으로 알려져 있다. 습지에서 질소는 질소가스로 전환되어 대기중으로 이동이 가능하나, 인은 습지바닥에 침전된 후 용출될 가능성이 있기 때문이다. 습지의 질소제거에 중요한 두 가지 기작은 토양기질에서 일어나는 암모니아화-질산화-탈질화와 습지식물에 의한 질소흡수이다⁵⁾. 습지에서 제거되는 전체 질소량에서 습지식물 및 미생물에 의한 흡수와 암모니아로 전환되어 제거되는 질소량은 약 1~34% 정도이며, 탈질화에 의

*연락처:
Tel: +82-62-530-2101 Fax: +82-62-530-2109
E-mail: hmy@chonnam.ac.kr

해 제거되는 질소의 양은 60~75%이다⁶⁾. 따라서 습지의 기질에서 일어나는 질산태 질소(NO₃-N)의 탈질화가 질소제거에 중요한 역할을 한다⁷⁾.

최근 국내에서도 하구에 조성된 담수호의 수질에 대한 관심이 증가하면서, 담수호 수질을 개선하기 위해 담수호로 유입되는 하천수를 정화하는 방안으로 인공습지 활용에 관심이 높아지고 있다. 본 연구는 담수호의 수질개선을 위해 담수호로 유입되는 하천수를 정화하는 인공습지 모델 개발을 위해 조성한 근자연형 자유수면 인공습지의 초기 질산태 질소와 총질소의 제거율을 조사분석하는데 목적이 있다.

재료 및 방법

근자연형 인공습지 구조

전라남도 고흥군에 위치하고 있는 고흥담수호 유입부의 신양천변 개답지역 상류부에 위치한 포락지 1.2 ha 일부에 2001년 근자연형 인공습지를 설계시공하였다. Fig. 1은 근자연형 인공습지의 개념도이다. 인공습지는 폭 20~35 m, 길이 90 m 규모이며, 습지면적은 약 1900 m²이다.

기존의 대부분 인공습지는 제방에 면한 습지바닥에 경사를 두지 않고 수평면으로 조성하여 왔다. 인공습지는 수질정화 이외에 다양한 친환경적 기능을 제공한다. 물고기 및 야생동물의 서식처를 제공할 수 있고, 비오톱(biotope)으로 활용이 가능하며, 조류(bird)관찰, 시민휴식, 자연학습 공간을 제공할 수 있으며, 훼손된 습지를 복원하여 지역의 경관을 아름답게 조성할 수 있다. 최근 선진국에서는 수질정화 인공습지를 조성할 때 자연습지와 유사한 모습으로 조성하여 인공습지의 친환경적 기능을 강조하고 있다. 본 근자연형 인공습지는 제방에 면한 습지바닥의 일부를 경사 1:4~1:15로 다양하게 조성하여 자연습지의 모습과 유사하게 설계하였다.

고흥담수호로 유입되는 신양천 하천수를 펌핑하여 유량분배탱크로 보낸 후 유량분배탱크에서 인공습지로 자연유하도록 설계하였다. 유입부에 개수부(open water)를 설치하여 유입수의 토사와 부유물질이 침전되도록 하였으며, 중앙에 개수부를 설치하여 유입수의 단기이동을 방지하고 대기와 수면과의 접촉을 촉진하여 질산화의 효율이 높아지도록 설계하였다. 유입부는 직경 30 cm 파이프를 개수부 지면으로부터 직각으로 0.9 m 높이로 설치하여 유입수가 인공습지의 수면으로 떨어지면서 유입되도록 설계하였다. 유출부는 weir를 설치하여 수심을 0.3~0.6 m로 조절이 가능하도록 설계하였다.

근자연형 인공습지 주변에서 자생하고 있는 부들(*Typha angustifolia*)을 채취하여 뿌리에서 약 35 cm 높이를 절단하여 30 cm 간격으로 2001년 5월에 식재하였다.

조사 및 분석 방법

습지에 식재한 부들의 활착을 유도하기 위해 2001년 6월 말까지 낮은 수심을 유지한 후 2001년 7월부터 습지의 수심이 약 0.3 m가 유지되도록 운영하였다. 2001년 7월부터 12월까지

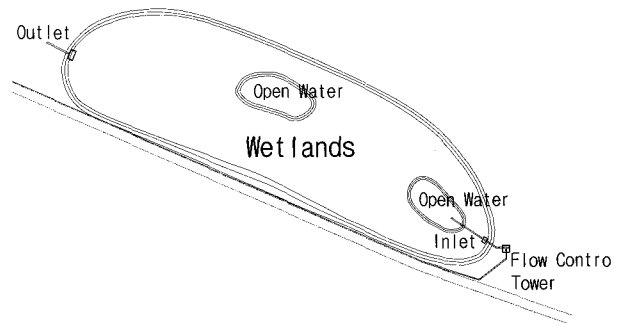


Fig 1. Schematic drawing of close-to-nature stream water treatment wetlands.

Table 1. Average hydraulic loading, nitrogen input, and nitrogen removal rate for the constructed wetlands from July through December 2001

| Parameters | Value |
|--|--------|
| Approximate area(ha) | 0.19 |
| Inflow(m ³ /d) | 120 |
| Inflow NO ₃ -N Concentration(mg/L) | 3.02 |
| Inflow NO ₃ -N Loading(mg NO ₃ -N/m ² /day) | 163.6 |
| Inflow TN Concentration(mg/L) | 5.77 |
| Inflow TN Loading(mg TN/m ² /day) | 364.4 |
| Outflow(m ³ /d) | 112 |
| Outflow NO ₃ -N Concentration(mg/L) | 1.78 |
| Outflow NO ₃ -N(mg NO ₃ -N/m ² /day) | 105.5 |
| NO ₃ -N Removal Rate(mg NO ₃ -N/m ² /day) | 85.8 |
| NO ₃ -N Removal by Mass(%) | 45 |
| Outflow TN Concentration(mg/L) | 3.26 |
| Outflow TN(mg TN/m ² /day) | 172.25 |
| TN Removal Rate(mg TN/m ² /day) | 171.4 |
| TN Removal by Mass(%) | 47 |

습지의 초기 처리수준을 분석하였다. 유입수와 유출수를 7~10일에 한번씩 샘플링하여 수질 오염공정시험방법을⁸⁾ 기준으로 TN, NO₃-N, NH₃-N 등을 분석하였다. 수온과 pH는 현장에서 Scott pH-Meter(CG 347)로 측정하였다. 인공습지의 유입량 및 유출량은 매월 1~2회 유입부와 유출부에서 1분 동안 흐르는 유입량과 유출량을 3회 받아서 평균 유입량 및 유출량을 산출하였다. 유입 및 유출수의 TN, NO₃-N의 농도, 유입량, 유출량, 습지면적을 기초로 습지의 초기 NO₃-N과 TN 제거율을 산출하였다.

결과 및 고찰

수질정화 인공습지의 질소제거는 상당히 효율적인 것으로

Table 2. Retention of Nitrate and Total Nitrogen in Free-Water Surface Wetlands in USA

| Influent Type and Location | Size, ha (Plants) | NO ₃ -N retention (mg /m ² /day) | Influent NO ₃ -N Concentration (mg/L) | NO ₃ -N Removal efficiency (%) | HLR (cm/d) | RT (day) | Remarks |
|----------------------------|------------------------|--|--|---|------------|----------|---|
| SW California | 0.13 | 2800 | 7.2 | 11 | 660 | 0.14 | Bachand and Horne (2000a) ²⁰⁾ |
| SW California | 0.025 (Typha) | 564 | 9.27 | | 68 | | Bachand and Horne ²¹⁾ (2000b) |
| SW California | 0.025 (Scirpus) | 260 | 9.27 | | 68 | | " |
| SW California | 0.025 (Mixed resident) | 835 | 9.27 | | 68 | | " |
| SW California | 170 | 523 | 3.1-10.9 | 79 | | 0.3-9.6 | Reilly et al. (2000) ²²⁾ |
| STE California | 9.9 | 360 | | 65 | | 9-14 | Satoris et al. (2000) ²³⁾ |
| SW Ohio | 1 | 183 | 4.6 (NO ₂ -N included) | 39 | 10.5 | 2.7 | Speiles and Mitsch ²⁴⁾ (2000) |
| STE Ohio | 3 | 361 | 12.3 (NO ₂ -N included) | 29 | 9.5 | 3.2 | " |
| SW Illinois | 2 | 104 | | | | 10-14 | Phipps and Crumpton ²⁵⁾ (1994) |

SW, Stream Water; STE, Secondary Treatment Effluent; HLR, Hydraulic Loading Rate; RT, Residence Time.

나타나고 있다⁹⁾. 습지식물은 박테리아가 자랄 수 있는 기질을 제공하며, 뿌리로 이동한 산소는 토양으로 확산되어 뿌리주변에 호기층을 형성한다. 유기질소의 무기질화로 생성된 암모니아는 호기층에서 질산화작용으로 질산태질소로 전환되며, 질산태질소는 혐기층으로 확산되어 질소가스로 전환된 후 대기중으로 이동하게 된다¹⁰⁾. 습지식물의 질소흡수와 산소확산은 성장기에 높으며 비성장기에는 낮아지게 된다.

조사기간 평균 유입유량은 120 m³/d였으며 평균 유출량은 112 m³/d였다. 유입수와 유출수의 평균 NO₃-N 농도는 각각 3.02 mg/L, 1.78 mg/L이었다. 유입수의 NH₃-N와 NO₂-N 농도는 0.1 mg/L 이하로 거의 무시할 정도였다. 유입수와 유출수의 NO₃-N 부하율이 각각 163.6 mg/m²/day, 105.5 mg/m²/day로 인공습지의 NO₃-N 제거율은 85.8 mg/m²/day가 된다(Table 1). 유입수와 유출수의 평균 TN 농도는 각각 5.77 mg/L, 3.26 mg/L 이었으며, TN 제거율은 171.4 mg/m²/day를 나타냈다(Table 1).

북미수질정화습지 데이터베이스¹¹⁾ 중 약 115개의 습지가 질소정화를 위해 사용되고 있으며, 37개 습지에서 TN이 평균 513 mg N/m²/day 제거되었으며, 51개 습지에서 NO₃-N이

평균 125 mg N/m²/day가 제거되고 있다. 문헌조사에 의하면 습지의 NO₃-N 제거율은 6~4000 mg N/m²/day로 범위가 매우 넓다(Bachand and Horne, 2000a)¹²⁾.

Table 2는 미국에서 운영하고 있는 인공습지의 NO₃-N 제거율과 체류시간을 나타낸다. Table 2에서 NO₃-N 제거율은 104~2800 mg N/m²/day이다. 이들 인공습지는 조성 후 습지바닥에 습지식물이 죽어 잔재물토양(litter-soil) 기질층이 형성된 습지들이다. 본 연구습지의 NO₃-N 제거율 85.8 mg N/m²/day는 이들 습지보다 낮은 편이다. 본 연구습지의 조사기간이 습지조성 후 초기단계이고, 겨울철 일부 기간(11월 및 12월)이 포함되어 있는 점을 고려하면 NO₃-N 제거율이 양호한 편이라 사료된다.

탈질화는 탈질화 박테리아에 에너지를 제공하고 전자공여체(electron donor) 역할을 하는 유기물의 양에 의해 영향을 받는다¹³⁾. 자연습지에서는 습지식물이 죽어 바닥에 쌓여 형성된 침전 쇄설물이 탈질화의 유기물 공급원이 된다. 새로 조성하여 식재한 인공습지에서는 탄소공급원이 제한될 수 있다. 인공습지에 식재한 정수식물은 2~3회 성장기를 거쳐야 생태적으로 안정된 식생을 형성하게 된다. NO₃-N의 제거율이 1

4~30%인 인공습지에 유기물을 추가로 공급하면 $\text{NO}_3\text{-N}$ 제거율이 55~70%로 증가하는 연구보고도 있다¹⁴⁾. 본 연구습지의 부들이 2~3회 성장기를 거치면 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 TN 제거율이 높아질 것으로 사료된다.

수온은 탈질화에 영향을 미친다. 질소제거는 20~25°C에서 가장 효율적이며, 15°C 이하와 30°C 이상에서는 질산화 및 탈질화 박테리아의 활동이 낮아져 질소 제거율이 떨어진다. 온대권에서도 연중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 제거가 가능하며¹⁵⁾, 5°C이하에서도 탈질화가 일어난다는 연구가 있다¹⁶⁾. 조사기간 인공습지의 월별 평균 수온은 7월과 8월에 24~25°C, 9월과 10월에 24~21°C, 11월과 12월에는 11~8°C였다. 본 연구습지의 다소 낮은 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 TN 제거율은 11월과 12월의 낮은 수온에도 원인이 있는 것으로 사료된다.

체류시간은 인공습지의 중요한 설계인자이자 운영인자이다. 낮은 탈질화는 긴 체류시간으로 보상할 수 있다. 처리수의 목표 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 설정되어 있지 않는 경우 습지에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 제거량이 많아지도록 체류시간을 조정하여 운영하게 된다. Table 2에서 인공습지 체류시간은 0.13~14일이다. 본 인공습지의 체류시간 3.1일은 낮은 범위에 속한다. 인공습지의 적정 체류시간으로 5~14일을 제시하고 있다¹⁷⁾. 습지의 pH도 탈질화에 영향을 미친다. 탈질화는 pH 6.0 이하와 pH 8.0 이상에서 낮아지며 pH 7.0~7.5에서 가장 높다¹⁸⁾. 본 연구기간의 인공습지 pH는 6.8~8.4로 탈질화에 지장이 없는 범위로 사료된다. 인공습지의 pH가 9월에 8.4로 다소 높게 나타났는데 녹조가 습지 일부에서 자라는데 원인이 있는 것으로 사료된다. 수중에 녹조가 자라면 pH가 높아지게 된다¹⁹⁾.

요 약

근자연형 인공습지에 식재한 부들이 거의 죽지 않고 활착하였으며, 7월부터 새줄기가 일부 나오기 시작하였다. 부들의 활착과 성장은 양호한 편이었다. 개수부에는 부들의 새줄기가 나오지 않았다. 조사기간 인공습지의 평균 $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 평균 TN 제거율은 각각 85.8 mg/m²/day, 171.4 mg/m²/day를 나타냈다. 북미에서 운영중인 인공습지의 평균 $\text{NO}_3\text{-N}$ 제거율 125 mg N/m²/day와 평균 TN 제거율 513 mg N/m²/day 보다는 다소 낮다. 이들 북미습지는 조성 후 수년이 지나 습지의 기질층이 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 TN 제거에 양호한 조건을 갖춘 습지들이다. 본 연구 인공습지의 조사기간이 조성 후 초기이고, 조사기간에 겨울철 일부 기간이 포함되어 있는 점을 고려하면 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 TN 제거율이 양호한 편이라 사료된다. 본 연구습지의 부들이 2~3년 후 개수부 이외의 습지를 완전히 덮고, 부들의 잔재물이 습지바닥에 쌓여 탈질화에 필요한 탄소공급원의 역할을 하면 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 TN 제거율이 높아질 것으로 사료된다.

기존의 인공습지는 수질정화 측면을 강조하여 일정한 수심유지와 유입수의 단기이동 방지를 위해 습지바닥을 수평으로 균일하게 조성하여 왔다. 최근 들어 인공습지 설계에서 친

환경적인 측면이 강조되는 추세이다. 본 근자연형 인공습지는 제방에 면한 습지바닥의 일부에 완만한 경사를 두고 습지의 광의 모습을 타원형으로 조성하여 자연습지의 모습과 가급적 유사한 모습으로 조성하였다. 초기 조사분석결과 질소정화가 정상적으로 이루어지고 있어, 습지일부에 완만한 경사를 도입하여 자연습지와 유사한 모습으로 수질정화 인공습지의 조성이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 양홍모 (1999) 수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적처리 인공습지 및 연못-습지 시스템, 한국수자원학회지, 32(5), 111-123.
2. 양홍모(2001) 담수호 수자원보전을 위한 수질정화 연못-습지 시스템의 초기처리수준, 한국환경복원녹화기술학회지, 4(4), 64-71.
3. Mitsch, W. J., Horne, Alex J., Nairn, R. W., C (2000), Nitrogen and phosphorus retention in wetlands-ecological approaches to solving excess nutrient problems, *Ecol. Eng.* 14, 1-7.
4. Kadlec, R. and Knight, R., C (1996) Treatment Wetlands. CRC Press, Boca Raton, FL. Kessler, E., Jansson, M., eds. 1994. Wetlands and lakes as nitrogen traps, *Special Issue of Ambio* 23, 319-386.
5. Brodrick, S. J., Cullen, P. and Maher, W. (1987) Denitrification in a natural wetland receiving secondary treated effluent, *Water Res.* 65, 432-439.
6. Stengel, E., Carduck, W. and Jepsen, C., (1987) Evidence for denitrification in artificial wetlands. In: Reddy, K. R. and Smith, W. H. Editors, 1987, Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery Magnolia Publishing, Orlando, FL, p.543-550.
7. Brix, H. and Schierup, H. (1989) The use of aquatic macrophytes in water-pollution control, *Ambio* 18, 100-107.
8. 환경부(2000) 수질오염공정시험방법.
9. Phipps, R. G. and Crumpton, W. G. (1994) Factors affecting nitrogen loss in experimental wetlands with different hydrologic loads, *Ecol. Eng.* 3, 399-408.
10. Seitzinger, S. P. (1988) Denitrification in freshwater and coastal marine systems: ecological and geochemical significance, *Limnol. Oceanogr.* 33, 702-724.
11. CH2MHill (1998) North American Treatment Wetland Data-base, Version 2 Draft. Prepared for the United States Environmental Protection Agency (EPA) Environment Technology Initiative (ETI).
12. Bachand, P. A. M. and Horne, A. J. (2000a) Denitrification in constructed free-water surface wetlands. I.

- Very high nitrate removal rates in a macrocosm study, *Ecol. Eng.* 14, 9-15.
13. Broadbent, F. E. and Clark, F. E. (1965) Denitrification, *Agronomy* 10, 344.
 14. Zhu, T. and Sikora, F. J. (1994) Ammonium and nitrate removal in vegetated and unvegetated gravel bed microcosm wetlands, In: Proc. 4th Int. Conf. on Wetland Systems for Water Pollution Control. Guangzhou, China, p.355-366.
 15. Phipps, R. G., Crumpton, W. G., (1994) Factors affecting nitro-genloss in experimental wetlands with different hydrologicloads, *Ecol. Eng.* 3, 399-408.
 16. Brodrick, S. J., Cullen, P. and Maher, W., (1988) Denitrification in a natural wetland receiving secondary treated effluent, *Water Res.* 22, 431-439.
 17. Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G. (1993) *Wetlands*, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold (now J. Wiley & Sons), New York.
 18. US Environmental Protection Agency (1975) *Process Design Manual for Nitrogen Control*. October 1975.
 19. Yang, H. M. (1992) *Ecological design of estuarine environment for a sustainable urban ecosystem*, PhD Dissertation, University of California Berkeley.
 20. Bachand, P. A. M. and Horne, A. J. (2000a) Denitrification in con-structed free-water surface wetlands, I. Very high nitrate removal rates in a macrocosm study, *Ecol. Eng.* 14, 9-15.
 21. Bachand, P. A. M. and Horne, A. J. (2000b) Denitrification in con-structed free-water surface wetlands, II. Effects of vegetation and temperature, *Ecol. Eng.* 14, 17-32.
 22. Reilly, J. F., Horne, A. J. and Miller, C. D. (2000) Nitrate removal from a drinking water supply with large free-surface constructed wetlands prior to ground-water recharge, *Ecol. Eng.* 14, 33-47.
 23. Satoris, J. J., Thullen, J. S., Barber, L. B. and Salas, D. E. (2000) Investigation of nitrogen transformations in a southern California constructed wastewater treatment wetland, *Ecol. Eng.* 14, 33-48.
 24. Spieles, D. J. and Mitsch, W. J. (2000) The effects of season and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in constructed wetlands: A comparison of low and high nutrient riverine systems, *Ecol. Eng.* 14, 77-91.
 25. Phipps, R. G. and Crumpton, W. G. (1994) Factors affecting nitro-genloss in experimental wetlands with different hydrologicloads, *Ecol. Eng.* 3, 399-408.
-