

연 재배지를 활용한 자유수면형 인공습지의 수질정화효율

한명자^{1†} · 서동철^{1†} · 강세원¹ · 이용철² · 방석배² · 채정현² · 김갑순³ · 박종환³ ·
장남익³ · 허종수⁴ · 조주식^{1*}

¹순천대학교 생물환경학과, ²한국수자원공사 주입댐관리단, ³국립환경과학원 영산강물환경연구소,
⁴경상대학교 응용생명과학부

Treatment of Pollutants in Free Water Surface Constructed Wetlands with Lotus (*Nelumbo nucifera*) Cultivation Pond

Myung Ja Han^{1†}, Dong Cheol Seo^{1†}, Se Won Kang¹, Yong Chol Lee², Seok Bae Bang², Jung Heon Chae²,
Jong Hwan Park³, Kap Soon Kim³, Nam Ik Chang³, Jong Soo Heo⁴, Ju Sik Cho^{1*}

¹Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 540-742, Korea

²Juamdam Office, Korea Water Resources Corporation, Suncheon 540-861, Korea

³Yeongsan River Environmental Research Center, Gwangju 500-480, Korea

⁴Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

Received May 6, 2010; Accepted November 2, 2010

In order to investigate the treatment efficiency of pollutants in free water surface constructed wetlands (FWS CWs) with lotus (*Nelumbo nucifera*) cultivation pond, the experiment was consisted of two sites (site I and II) in Lake Juam, Korea. The sites were configured a lotus cultivation pond (with fertilizer application) - a dropwort bed - a reed bed for site I, and a lotus cultivation pond (without fertilizer application) - a dropwort bed - a reed bed for site II. Removal rate of COD in site I and II were 13.3% and 26.0%, respectively. Removal rate of total nitrogen (TN) was 29.7% for site I, and 36.3% for site II. Removal rate of total phosphorus (TP) in site I and II were 36.0% and 36.5%, respectively. COD, TN and TP in effluent from site I (with fertilizer) was higher than that in site II (without fertilizer), showing that COD, TN and TP in effluent were strongly influenced by fertilizer addition. Therefore, in order to satisfy established water-quality standards, the amount of fertilizer used in lotus cultivation showed be evaluated.

Key words: dropwort, fertilizer, free water surface constructed wetlands (FWS CWs), lotus cultivation pond, reed

수질 오염을 유발하는 오염원은 크게 점오염원(Point pollutant source)과 비점오염원(Non-point pollutant source)으로 구분하고 있다[Korean Ministry of Environment, 2005]. 이들 중 비점오염원은 배출지점이 유역전체에 걸쳐있어 제어가 어렵고, 제어를 한다고 해도 일정한 처리효과를 얻기 위해서는 장시간이 소요되며, 강우량에 따라 유입량이 크게 변동되어 일정한 처리효율을 얻기가 힘든 문제점이 있다[Korean Ministry of Environment, 2005]. 이에 최근에 인공습지를 활용하여 비점오염원을 처리하는 방법이 대두되고 있다. 인공습지는 비점오염

원 내 무기염류, 질소 및 인 등의 오염물질을 효과적으로 처리할 수 있으며, 시설비용이 저렴하고, 간단하게 설치 유지할 수 있으며, 고급기술 인력을 요구하지 않아 유지관리비가 거의 소요되지 않고, 한번 설치로 반영구적으로 사용할 수 있으며, 농촌 주변 환경과 조화를 이룰 수 있는 장점을 가지고 있어 현재 국내·외에서 많은 연구자들이 점오염원 및 비점오염원 처리에 적용하고 있다[Kadlec and Knight, 1996; Yoon 등, 2000; Mitsch and Gosselink, 2000; Ham 등, 2004; Ham 등, 2005]. 농경지로부터 비점오염원의 유출은 주로 강우와 재배형태(작부체계, 시비, 물 관리 및 토양 관리 등)에 따라 다르고, 적용시기에 따라 유출 특성이 변화하게 된다. 일반적으로 논이나 밭과 같은 농경지로부터 비료, 농약 및 가축분뇨 등의 비점오염원들은 강우에 따라서 표면유출과 지하침투의 형태로 유출되며, 특히 논은 인위적인 배수에 따른 유출도 포함된다. 또한 우리나라는 시기적으로 강우가 여름철에 집중되어 있어 토양유실 면에서 아주 불리하여 비점오염원의 효율적 관리

[†]These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author
Phone: +82-61-750-3297; Fax: +82-61-752-8011
E-mail: chojs@suncheon.ac.kr

에 많은 어려움이 있다[Kwun, 1998]. 하지만 논은 홍수조절, 토양침식방지 및 수질정화기능 등과 같은 공익적 기능을 가지고 있어 단순히 오염원을 배출하는 발생원만으로는 볼 수 없다. 특히 지형적인 조건으로 보아 항상 받은 상류, 논은 하류에 위치하고 있으므로 유실된 밭의 비료성분과 토사를 논이 정화처리할 수 있으며, 이러한 지형특성에 의한 자연정화 기능을 증진시킬 필요가 있다[國松孝男 등, 1994].

현재 국내의 연과 관련한 대부분의 연구는 식용으로 사용하기 위한 영양학적인 측면에서 연구되어 왔으며, 환경적인 측면에서 연 재배지로부터의 오염물질 발생과 연의 수질정화능력에 대한 연구는 국내외적으로 거의 이루어지지 않은 실정이다.

연은 다른 작물들에 비하여 많은 비료성분과 물을 필요로 하는 작물이기 때문에 연 재배시 많은 양의 비료와 퇴비가 사용된다. 따라서 이들 비료 성분들이 관개수에 포함되어 주변 하천으로 유입되어 수질에 영향을 미칠 수 있으므로 연 재배지 유출수의 오염물질 특성 변화를 세밀하게 조사해 볼 필요성이 있으며, 이러한 조사결과들은 향후 연 재배지로부터 배출되는 오염원 처리를 위한 기초자료와 자유수면형 습지구조를 위한 기반자료로 매우 중요한 의미를 가지게 될 것이다.

따라서 본 연구는 연 재배지를 활용한 자유수면형 습지에서 오염물질의 처리특성과 처리효율을 조사하기 위해 연 재배지(비료처리 유무)-미나리조-갈대조로 구성된 자유수면형 습지에서 오염물질(COD, SS, TN 및 TP)별 처리특성과 처리효율을 각각 조사하였다.

재료 및 방법

공시재료. 본 연구는 전남 보성군 복내리에 위치한 한국수자원공사 주암댐관리단에서 연 재배시험용으로 조성한 두 곳의 연 재배지를 활용한 자유수면형 인공습지를 대상으로 하였으며, 연 재배지에 유입된 관개용수는 주변의 일반 농업용 관개수를 사용하였으며, 연 재배기간 동안의 물 관리는 생육 전 기간 동안 지속적으로 일정량의 물이 유입되도록 하였다. 공시토양의 토성(미국농무부 분류기준)은 모래, 미사 및 점토가 각각 17.2, 52.4 및 30.4%로 미사질 식양토이었고, 기타 토양의 화학적인 특성과 유입 관개용수의 수질 특성은 각각 Table 1 및 2에서 보는 바와 같다. 본 시험에 사용된 연(NELNU: *Nelumbo mucifera* GAERTN), 미나리(OENJA: *Oenanthe javanica* DC) 및 갈대(PHRCO: *Phragmites communis* TRINUS) 등 3종은 Fig. 1과 같은 구성으로 이식하였다.

연 재배지를 활용한 자유수면형 인공습지의 특성 및 관리. 연 재배지를 활용한 자유수면형 인공습지(site I 및 II)의 구성 및 특성은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 1차 처리조인 연 재배조, 2차 처리조인 미나리조와 3차 처리조인 갈대조로 각각 구성되었다. 연 재배조, 미나리조 및 갈대조의 크기는 site I은 각각 약 342 m²(38 m×9 m), 306 m²(34 m×9 m) 및 216 m²(24 m×9 m)이고, site II는 각각 약 304 m²(38 m×8 m), 272 m²(34 m×8 m) 및 192 m²(24 m×8 m)이었다. 연 재배지의 퇴비 처리조건은 site I 및 II 모두 씨연근을 이식하기 전에 연 재배조에 110 kg/10a

Table 1. Chemical characteristics of agricultural water used

	pH	Turbidity (NTU)	DO	EC	COD	SS	TN	TP
					----- (mg/L) -----			
Average	6.85	13.20	7.20	0.10	7.25	11.50	2.32	0.09
SD	0.23	5.81	2.17	0.02	3.43	7.10	0.65	0.06

SD: Standard deviation.

Table 2. Chemical characteristics of soils used

Site	pH (1:5H ₂ O)	EC (dS/m)	O.M. (%)	TN (%)	TP (%)	K	Ca	Mg
						----- (mg/L) -----		
Site I	5.61	0.56	3.64	0.10	0.07	0.31	4.27	0.66
Site II	5.78	0.51	3.87	0.09	0.07	0.21	3.28	0.37

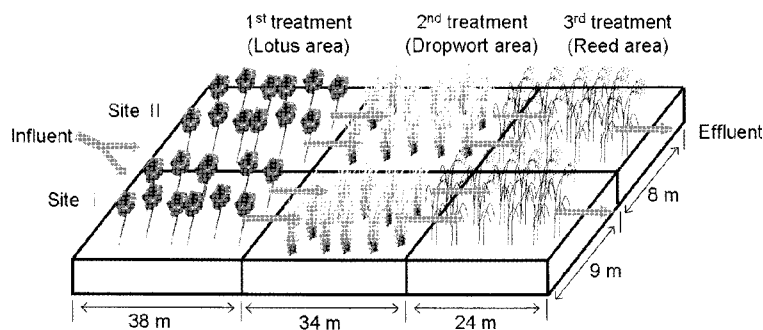


Fig. 1. Diagram of free water surface constructed wetlands with lotus cultivation pond.

의 퇴비를 각각 사용하였다. 그리고 연 재배지의 비료 처리조건은 site I의 경우는 비료처리구로서 원예특호 복합비료(N-P-K-Mg-B-S=11-11-11-3-0.2-11, 남해화학)를 연 재배조에 55 kg/10a 시비하였고, site II의 경우는 비료 무처리구로서 전혀 비료를 사용하지 않았다. 각 재배조의 식물체 이식은 연은 재식거리 가로 30 cm×세로 50 cm로 이식하였고, 미나리 및 갈대는 재식거리 가로 25 cm×세로 30 cm로 이식하였다. 자유수면형 인공습지에서 물의 흐름은 연 재배조로 유입된 관개용수는 연 재배조에서 1차 처리된 후 2차 처리조인 미나리조로 유입되게 하였고, 미나리조로 유입된 1차 처리수는 2차 미나리조를 거쳐 3차 처리조인 갈대조를 거쳐 최종 방류되게 하였다.

시료채취 및 분석방법. 수질시료 채취는 2007년 6월 23일부터 2007년 10월 21일까지 조사하였으며, 평상시는 월 2회 주기로 유입원수, 1차 처리조(연 재배조) 처리수, 2차 처리조(미나리 재배조) 처리수 및 3차 처리조(갈대 재배조) 처리수로 구분하여 채취하였으며, 강우시 예상 강우가 50 mm 이상일 경우를 대상으로 추가 조사하였다. 수질분석은 APHA의 Standard method에 준하여 실시하였다[APHA-AWWA-WEF, 2005]. pH는 초자전극법, EC는 EC meter(Orion, Model 160, Germany)로 분석하였으며, DO는 잉클리아자이드화나트륨 변법, COD는 산성 $KMnO_4$ 법, SS는 유리섬유여과법, TN은 자외선 흡광광도법, TP는 아스코르빈산 환원법으로 분석하였다. 토양시료 채취는 공시토양과 2007년 6월 23일(운전 60일 후), 2007년 8월 11일(운전 109일 후) 및 2007년 10월 21일(운전 182일 후)에 각 조내 토양을 채취하여 분석하였다. 분석용 토양시료는 각 조내 대표 3지점을 각각 깊이별로 표층(0~15 cm) 및 심층(15~25 cm)로 구분하여 분석하였다. 토양의 화학성분 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원의 토양 및 식물체분석법[RDA, 1998]에 준하여 pH는 초자전극법, EC는 EC meter(Orion, Model 160, Germany)로 분석하였으며, 유기물은 tyurin법으로 하였고, TN은 kjeldahl법으로 하였으며, TP는 분해 후 vanadatemolybdate법으로 하였고, K, Ca, Mg 및 Na 함량은 분해 후 atomic absorption spectrophotometer(AA-SCAN8)로 각각 분석하였다.

결과 및 고찰

자유수면형 인공습지의 시기별 수질변화. Site I 및 II에서 조사시기별 COD 변화는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. Site I 및 II에 유입된 COD 원수는 평균 7.3 mg/L로 농업용수 기준인 8 mg/L을 초과하지 않았으나, 6월 중순과 8월 초부터 9월말에 유입된 관개수 중 일부의 COD가 농업용수 기준을 초과하여 유입되었다. 비료와 퇴비를 사용한 site I의 COD는 1차 처리인 연 재배조 처리수의 경우 평균 7.4±3.1 mg/L이었고, 2차 처리인 미나리조 처리수의 경우 평균 6.0±2.2 mg/L이었으며, 3차 처리인 갈대조 처리수의 경우 평균 5.0±1.8 mg/L이었다. 또한 비료는 시비하지 않고 퇴비만 사용한 site II의 COD는 1차 처리수의 경우 평균 5.9±2.7 mg/L이었고, 2차 처리수의 경우 평균 4.9±2.1 mg/L이었으며, 3차 처리수의 경우 평균 4.3±1.8 mg/L이었다. Site I과 II의 조사시기별 전반적인 COD 변화 양상은 7월 중순경에 일시적으로 감소하였으나, 8월 중순부터 9월 중순

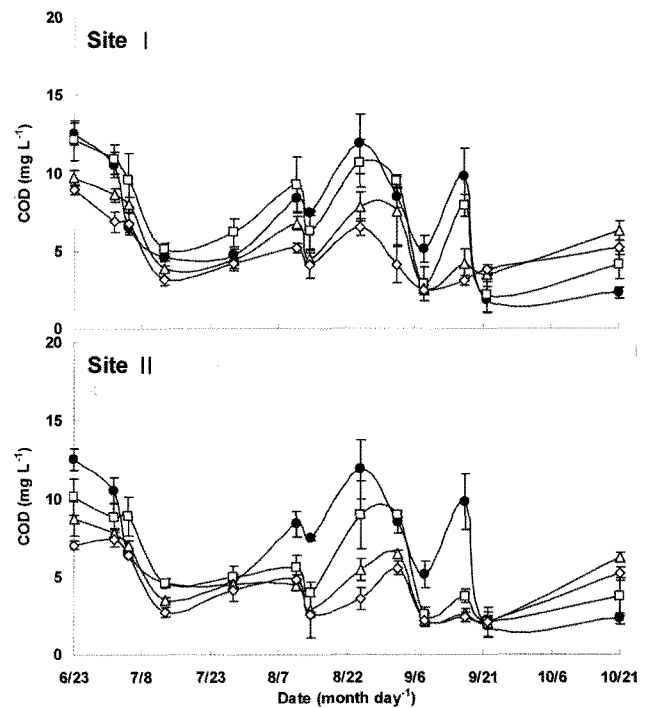


Fig. 2. Variation of COD in the water in the constructed wetlands. ●: Raw water, □: Treated water in lotus area, △: Treated water in dropwort area, ◇: Treated water in reed area.

까지는 강수량이 1일 평균 약 17.3 mm 이상으로 장마로 인한 다량의 강우에 의해 약간 높아지는 경향이었고, 장마가 끝난 9월 이후 다시 약간 낮아지는 경향을 보였다. 비료 시비 여부에 따른 COD 변화 양상은 비료를 시비한 site I이 비료를 시비하지 않은 site II에 비하여 전체적으로 높은 농도를 보였다. 처리조별 COD 변화를 조사한 결과 1차 연 재배조를 통과한 유출수의 COD는 유입원수의 COD와 별 차이가 없거나 오히려 약간 증가하는 경향을 보였는데, 이는 연 재배조내에 시비된 비료와 퇴비로부터의 용출과 재배조내에 고사되어 있는 생물체로부터 용출되어 나오는 유기물질들에 의한 것으로 생각된다. 연 재배조에서 유출된 유출수는 2차 처리인 미나리조와 3차 처리조인 갈대조를 통과하면서 COD 농도가 크게 감소되어 모두 농업용수 수질 기준인 8 mg/L 이하를 만족하였다[Korean Ministry of Environment, 2005].

Site I 및 II의 조사시기별 SS 함량 변화는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 site I 및 II에 유입된 SS 원수는 평균 11.5 mg/L로 농업용수 기준[Korean Ministry of Environment, 2000]인 15 mg/L을 초과하지 않았다. Site I의 SS 함량은 1차 처리인 연 재배조 처리수의 경우 평균 12.3±5.4 mg/L이었고, 2차 처리인 미나리조 처리수의 경우 평균 8.6±3.2 mg/L, 3차 처리인 갈대조 처리수의 경우 평균 6.0±2.7 mg/L이었다. Site II의 SS 함량은 1차, 2차 및 3차 처리수가 각각 10.1±4.4, 5.8±1.9 및 4.7±1.8 mg/L이었다. 조사시기별 SS 함량은 전반적으로 연의 생육 시기가 경과됨에 따라 미미하게 감소되는 경향이었고, 물의 흐름이 자연유하에 의해 흐르도록 만들어졌기 때문에 항상 고여 있는 site I 및 II에 비해 SS 함량의 증감이 심하지 않았다. 비료시비 여부에 따른 SS 함량은 비료를 시비한 site I에서 전

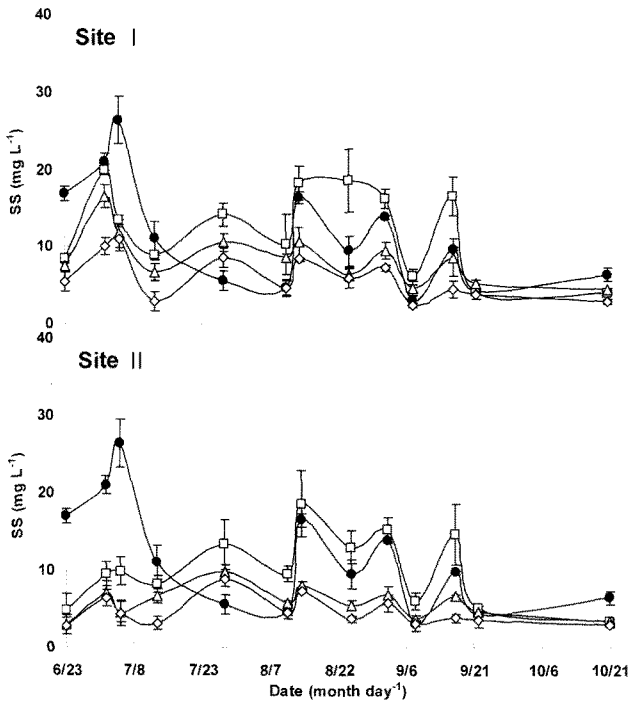


Fig. 3. Variation of SS in the water in the constructed wetlands. ●: Raw water, □: Treated water in lotus area, △: Treated water in dropwort area, ◇: Treated water in reed area.

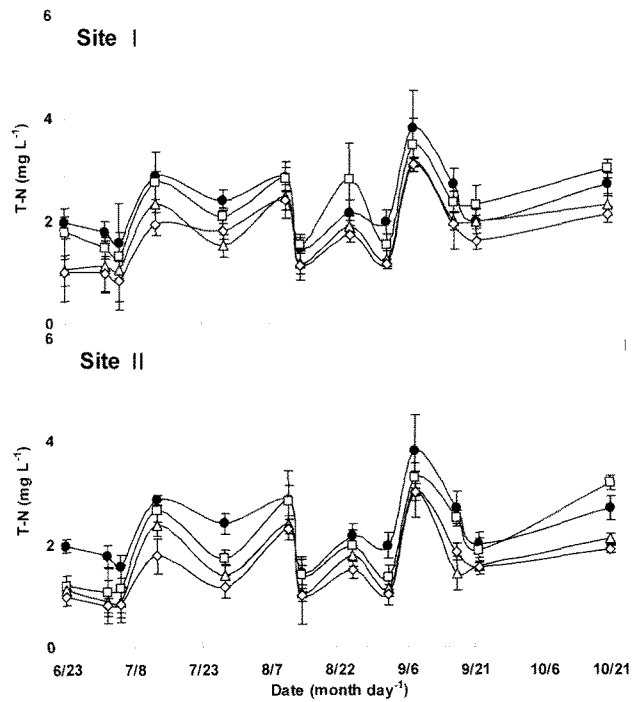


Fig. 4. Variation of TN in the water in the constructed wetlands. ●: Raw water, □: Treated water in lotus area, △: Treated water in dropwort area, ◇: Treated water in reed area.

체적으로 높은 농도를 보였으며, 연 재배조를 통과한 유출수 중 SS 함량은 미나리조와 갈대조를 통과하면서 약간 감소되었다.

Site I 및 II에서 조사시기별 TN 함량 변화(Fig. 4)를 조사한 결과 site I 및 II에 유입된 TN 원수는 평균 2.32 mg/L로 농업용수 기준[Korean Ministry of Environment, 2000]인 1 mg/L을 초과하여 유입되었는데, 이는 일반적인 농업용수 중 TN 함량보다 약간 높은 경향이었다. 전국 4대 수계(한강, 낙동강, 금강 및 영산강) 중 농업용수로 관리 사용되는 호소수 15개 지점에서 1999년 7월의 평균 TN 함량은 1.66 mg/L인 것으로 보고되었다[Korean Ministry of Environment, 2000].

Site I의 TN 함량은 1차 처리인 연 재배조 처리수의 경우 1.32~3.46 mg/L 범위로 평균 2.30 mg/L로 유입원수와 별 차이 없었고, 2차 처리인 미나리조 처리수의 경우 1.05~3.14 mg/L 범위로 평균 1.80 mg/L이었으며, 3차 처리인 갈대조 처리수의 경우 0.84~3.08 mg/L 범위로 평균 1.70 mg/L이었다. 또한 site II의 TN 함량은 1차 처리수의 경우 평균 2.00 mg/L로 유입원수에 비해 약간 감소하는 경향이었으며, 2차 처리수의 경우 평균 1.60 mg/L이었으며, 3차 처리수의 경우 평균 1.50 mg/L로 site I 및 II 모두 최종 방류수에서 농업용수 기준[Korean Ministry of Environment, 2000]인 1 mg/L을 초과하였다. 비록 유입된 질소 함량이 일반적인 농업용수에 비해 약간 높았지만 TN 함량 변화나 안정성 측면에서 본 시스템으로는 질소의 안정적인 처리가 불가능하였다. 일반적으로 수생식물을 이용한 습지나 인공습지에서 질소의 처리는 주로 생물화학적 탈질방법에 의존하며, 특히 생물화학적 탈질효율은 습지나 인공습지의 수평흐름조(혐기성조)가 수직흐름조(호기성조) 보다 높은 것으로 알려져 있다[Seo, 2005]. 따라서 본 연 재배지를 활용한 자유수면형 인

공습지에서 높은 TN 처리효율을 확보하기 위해서는 후속처리인 미나리조와 갈대조의 생물학적 탈질에 대한 적합성을 조사해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

Site I 및 II의 조사시기별 TN 함량 변화는 연 생육초기부터 다소 차이는 있으나 꾸준히 증가하는 경향이었으며, 장마기인 8월부터 9월경의 TN 함량은 장마철 다량의 강수에 의한 관개수 유입량의 증가로 TN 함량이 희석되어 다른 시기에 비해 약간 감소하였다. Site I 및 II의 처리단계별 TN 함량은 1차 연 재배조 처리수의 경우 유입원수에 비해 약간 낮았으며, TN 함량의 감소폭은 비료시비로 인해 site II가 site I에 비해 미미하게 높았다. 후속처리인 미나리조와 갈대조를 통과하면서 TN 함량은 1차 처리인 연 재배조 처리수에 비해 더욱 낮아지는 경향이었다. 國松孝男 등[1994]에 의하면 벼 재배시 이앙기 동안(15일간)의 TN의 유출량이 각각 관개기간(131일간) 동안의 총 부하량의 24%에 이르는 것으로 보고되었다.

Site I 및 II에서 조사시기별 TP 함량 변화(Fig. 5)를 조사한 결과 site I 및 II에 유입된 TP 원수는 평균 0.09 mg/L로 농업용수 기준[Korean Ministry of Environment, 2000]인 0.1 mg/L 이내 이었으나, 이는 일반적인 농업용수 중 TP 함량보다 약간 높은 경향이었다. 전국 4대 수계(한강, 낙동강, 금강 및 영산강) 중 농업용수로 관리 사용되는 호소수 15개 지점에서 1999년 7월의 평균 TP 함량은 0.03 mg/L인 것으로 보고되었다[Korean Ministry of Environment, 2000].

Site I의 TP 함량은 1차 연 재배조 처리수의 경우 0.03~0.21 mg/L 범위로 평균 0.10 mg/L이었고, 2차 미나리조 처리수의 경우 0.02~0.16 mg/L 범위로 평균 0.08 mg/L이었으며, 3차 갈대조 처리수의 경우 0.01~0.15 mg/L 범위로 평균 0.06 mg/L이었다.

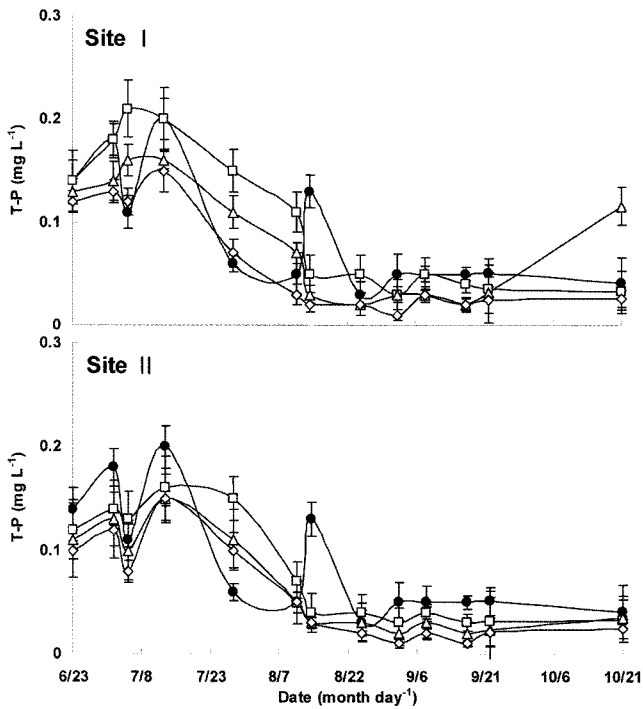


Fig. 5. Variation of TP in the water in the constructed wetlands. ●: Raw water, □: Treated water in lotus area, △: Treated water in dropwort area, ◇: Treated water in reed area.

또한 site II의 TP 함량은 1차, 2차 및 3차 처리수가 각각 평균 0.08, 0.06 및 0.06 mg/L로 site I 및 II 모두 최종 방류수에서 농업용수 기준[Korean Ministry of Environment, 2000]인 0.1 mg/L 이하를 만족하였다.

Site I 및 II에서 조사시기별 TP 함량 변화는 연 생육초기부터 다소 차이는 있으나 꾸준히 증가하는 경향이였다. 하지만 장마기인 8월부터 9월경의 TP 함량은 TN과 비슷한 경향으로 다량의 강우로 인해 TP 함량이 희석되어 다른 시기에 비해 오히려 약간 감소하였다. Site I의 처리단계별 TP 함량은 1차 연 재배조 처리수의 경우 비료시비로 인해 유입원수와 다소 차이는 있었으나, 전반적으로 약간 높거나 별 차이 없었고, 후속처리인 2차 미나리조와 3차 갈대조 처리수의 TP 함량은 처리단계가 증가할수록 점점 감소하는 경향이였다. Site II의 처리단계별 TP 함량도 site I과 거의 유사한 경향이였으나, 그 감소폭은 site I에 비해 약간 높았다. 이는 site II의 경우 비료를 시비하지 않아 1차 연 재배조내 토양으로부터의 TP 방출량이 상대적으로 적었기 때문으로 판단된다. 벼 재배시 이앙기 동안(15일간)의 TP의 유출량이 각각 관개기간(131일간) 동안의 총 부하량의 22%에 이르는 것으로 보고되었다[國松孝男 등, 1994].

인공습지의 수처리효율. 조사시기별 COD 처리효율(Fig. 6)은 site I의 경우 1차 처리인 연 재배조가 -9.0%, 2차 처리인 미나리조가 -0.6% 및 3차 처리인 갈대조가 13.3%로 1차 처리인 연 재배조에서는 퇴비와 비료가 함께 사용되어 수생식물과 미생물에 의한 COD 처리에도 불구하고 비료와 퇴비 사용에 의해 방출되는 COD성 물질들이 상대적으로 더 높아 유입수보다 방류수의 COD 농도가 더 높았으나 후속 처리조인 미나리조와 갈대조를 통과하면서 COD 처리효율이 약간 증가되었다. 비료를

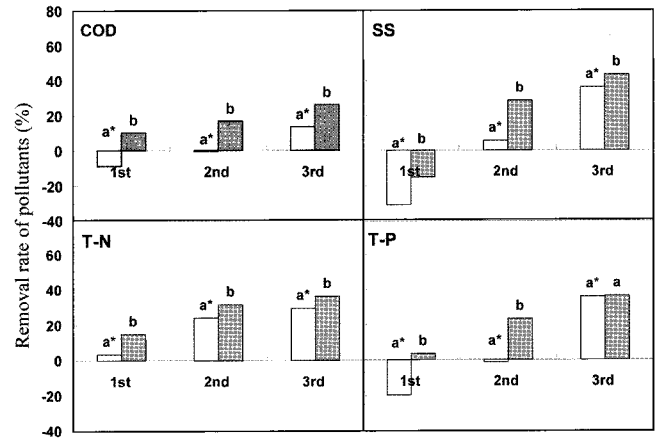


Fig. 6. Removal rate of COD, SS, TN and TP in effluent in constructed wetlands. □: Site I, ▨: Site II. * Means within a column followed by same letter are not significantly according to Duncan's multiple range test at $p=0.05$.

시비하지 않은 site II의 COD 처리효율은 1차 처리인 연 재배조가 10.2%이었고, 2차 처리인 미나리조가 16.8%이였으며, 3차 처리인 갈대조가 26.0%로 처리단계가 증가할수록 꾸준히 증가하는 경향이였다. 또한 site I 및 II에서 처리단계별 비료시비에 따른 COD처리효율은 통계적으로 유의성($p<0.05$) 있는 차이가 있었으며, COD 처리 경향은 1차 처리인 연 재배조의 경우 외부로부터 유입되는 COD성 물질들, 기후 및 강우량 등의 여러 환경인자에 의해 처리효율의 편차가 상당히 심하였으나, 후속처리로 갈수록 COD 처리효율의 편차가 점점 줄어들면서 안정적으로 처리되는 경향이였다.

이상의 결과로 볼 때 비료를 시비한 site I의 경우 COD의 안정적인 처리를 위해서는 2차 및 3차 처리조가 모두 필요하였으나, 비료를 시비하지 않은 site II의 경우 2차 처리만으로도 site I과 비슷한 COD 처리효율을 보였다. 본 연구에서는 미나리조와 갈대조의 조성시 통기성, 물의 흐름 및 지하부의 여재 등 일반적인 식물을 이용한 수처리 시스템의 주요 영향인자를 고려하지 않고 자연 습지상태(자유수면형 인공습지)로 조성하였으므로 전반적인 수처리효율은 계획적으로 조성된 수처리 시스템에 비하여 낮았지만 현행 연 재배지에서 연의 생산성 향상을 위해 퇴비나 비료를 시용하더라도 수생식물을 이용한 습지를 통해 2차 및 3차 처리를 한다면 연 재배를 통한 농가소득 향상과 COD 개선효과를 동시에 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

Site I 및 II의 시기별 SS의 처리효율(Fig. 6)을 조사한 결과 site I의 SS 처리효율은 1차, 2차 및 3차 처리조가 각각 -30.8, 5.6 및 36.2%였다. 1차 처리인 연 재배조에서는 전반적으로 방류농도가 유입수보다 처리효율이 (-)값이 나왔다. 하지만 2차 처리인 미나리조에서 SS 처리효율은 약간 높아졌으며, 특히 3차 처리인 갈대조에서는 처리효율이 급격히 증가하였다. Site II의 SS 처리효율은 1차 처리인 연 재배조가 -15.3%이었고, 2차 처리인 미나리조가 28.6%이였으며, 3차 처리인 갈대조가 43.0%로 site I에 비해 약간 높은 경향이였다.

Site I의 TN 처리효율(Fig. 6)은 1차 연 재배조가 3.1%이였

고, 2차 처리인 미나리조가 24.1%이었으며, 3차 처리인 갈대조가 29.7%로 1차 처리인 연 재배조에서는 TN 처리효율이 아주 낮았다. 하지만 후속처리인 2차 미나리조와 3차 갈대조에서는 처리단계가 증가함에 따라 TN 처리효율이 점점 증가하는 경향이 있었다. 또한 TN 처리효율 면에서 보면 2차 미나리조에서 대부분의 TN이 처리됨을 알 수 있었다. Site II의 TN 처리효율은 1차, 2차 및 3차 처리조각 각각 14.8, 31.5 및 36.3%로 처리단계가 증가할수록 꾸준히 증가하는 경향으로 전반적으로 site II가 site I에 비해 약간 높은 처리효율을 보였다.

Site I 및 II에서 3차 처리조인 갈대조에서 TN 처리효율은 연 재배조와 미나리조에 비해 약간 낮았는데, 이는 갈대조의 면적이 연 재배조와 미나리조에 비해 작고, 수위도 낮아 탈질효율이 상대적으로 감소하기 때문으로 판단된다. 그리고 site I 및 II에서 처리단계별 비료시비에 따른 TN처리효율은 통계적으로 유의성($p<0.05$) 있는 차이가 있었으며, TN 처리 경향은 1차 처리인 연 재배조의 경우 외부로부터 유입되는 TN 함량, 기후 및 강수량 등의 여러 환경인자에 의해 처리효율의 편차가 상당히 심하였으나, 후속처리로 갈수록 TN 처리효율의 편차가 점점 줄어들면서 안정적으로 처리되는 경향이 있었다. Eom 등[1993]에 의하면 논이 수질 중 질소를 정화하는 효과는 52.1~66.1%에 해당된다고 보고하였으나, 이들 결과는 작물, 강우와 재배형태(작부체계, 시비, 물 관리 및 토양 관리 등) 및 적용시기에 따라 달라질 수 있으므로 연 재배지를 대상으로 한 본 연구에서 질소 처리효율과 직접적인 비교는 불가능하다. 연 재배조 내 식물체에 의한 TN 제거량은 비료를 처리한 처리구와 비료를 처리하지 않은 처리구가 각각 61.1 및 49.3 g/m²로 비료처리구에서 연에 높은 질소흡수량을 보였고, 두 연재배조 모두에서 연의 양분흡수에 의한 질소정화 기능이 있는 것으로 판단된다.

조사시기별 TP의 처리효율(Fig. 6)은 site I의 경우 1차, 2차 및 3차 처리조가 각각 -19.2, -1.2 및 36.0%로 1차 처리인 연 재배조와 2차 처리인 미나리조에서의 TP 처리효율은 아주 낮았다. 이는 site I의 연 재배조에는 퇴비와 비료가 사용되어 수생식물 및 미생물에 의한 TP 처리에도 불구하고, 이들 비료나 퇴비에 의해 방출되는 TP 함량이 높기 때문으로 판단된다. Site I에서 처리되는 대부분의 TP는 처리효율로만 보았을 경우 3차 처리조인 갈대조에서 처리됨을 알 수 있었다.

Site II의 TP 처리효율은 1차 연 재배조가 3.4%이었고, 2차 미나리조가 23.3%이었으며, 3차 갈대조가 36.5%로 처리단계가 증가할수록 꾸준히 증가하는 경향으로 전반적으로 TP의 처리는 2차 미나리조 및 3차 갈대조에서 대부분 이루어 졌다. Site I 및 II에서 TP 처리 경향도 다른 오염물질(COD 및 TN)과 유사한 경향이었고, 1차 및 2차 처리단계에서는 비료시비에 따른 TP처리효율은 통계적으로 유의성($p<0.05$) 있는 차이가 있었으나, 최종방류수인 3차 처리수에서는 비료시비에 따른 유의성이 없었다. Eom 등[1993]에 의하면 논이 수질 중 인을 정화하는 효과는 26.7~64.9%에 해당된다고 보고하였으나, 이들 결과는 작물, 강우와 재배형태(작부체계, 시비, 물 관리 및 토양 관리 등) 및 적용시기에 따라 달라질 수 있으므로 연 재배지를 대상으로 한 본 연구에서 인 처리효율과 직접적인 비교는 불가능하다. 연재배조 내 식물체에 의한 TP 제거량은 비료를 처리한 처

리구와 비료를 처리하지 않은 처리구가 각각 16.4 및 11.2 g/m²로 비료처리구에서 연에 높은 인흡수량을 보였고, 두 연재배조 모두에서 연의 양분흡수에 의한 인 정화 기능이 있는 것으로 판단된다.

초 록

연재배지를 활용한 자유수면형 습지에서 오염물질별 처리특성과 처리효율을 조사하기 위하여 site I은 연 재배지조(비료처리)-미나리조-갈대조로 구성하였고, site II는 연 재배지조(무비료)-미나리조-갈대조로 구성하였다. 연재배지를 활용한 자유수면형 습지에서 최종방류수 중의COD 처리효율은 site I(비료시비) 및 II(무비료)가 각각 13.3% 및 26.0%이었다. 자유수면형습지에서 최종방류수 중의 TN 처리효율은 site I 및 II가 각각 29.7% 및 36.3%이었으며, TP 처리효율은 site I 및 II가 각각 36.0% 및 36.5%이었다. 비료를 시비한 site I에서 COD, TN 및 TP 함량은 전반적으로 비료를 시비하지 않은 site II에 비해 높아 비료시비가 방류수 수질에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 연재배지를 활용한 자유수면형 습지에서 방류수 수질기준을 만족하기 위해서는 연재배지에 사용된 퇴비의 시비량을 우선적으로 고려해야 할 것이다.

Key words: dropwort, fertilizer, free water surface constructed wetlands (FWS CWs), lotus cultivation pond, reed.

감사의 글

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임[NRF-2010-359-F00003]. 본 연구는 한국수자원공사 주암댐관리단 주암호환경연구소와 영산강·섬진강 수계관리기금의 지원을 받아 수행한 연구결과 의 일부임.

참고문헌

- APHA, AWWA, WCF. (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater, 17th Edition. American Public Health Association, Washington, DC.
- Brock TD and Madigan MT (1991) Biology of Microorganisms (6th ed), Prentice-Hall.
- Eom KC, Yun SH, Hwang SW, Yun SG and Kim DS (1993) Public Benefit from Paddy Soil. *Korea J. Soil Science & Fertilizer*, **26(4)**, 313-334.
- Greenway M and Woolley A (1999) Constructed wetlands in Queensland: performance efficiency and nutrient bioaccumulation. *Ecol. Eng.*, **12**, 39-55.
- Gerrites RG (1993) Prediction of travel times of phosphate in soils at a disposal site for wastewater. *Water Res.*, **27**, 263-267.
- Ham JH, Yoon CG, Koo WS, Kim HC and Shin HB (2004) Analysis of Field Experimental Data for Water Quality Improvement of Tributary Stream to Estuarine Reservoir Using Constructed Wetland System. *Kor. J. Agric. Engineers*. **46(5)**,

- 141-153.
- Ham JH, Yoon CG, Koo WS, Kim HC and Shin HB (2005) Analysis of Stream Water Quality Improvement Using Surface-flow Wetland. *Kor. J. Agric. Engineers.* **47**(1), 79-91.
- Jung JC and Jung YR (1994) Environmental microbiology, Freedom academy, Korea.
- Kadlec R and Knight R (1996) Treatment Wetlands, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Korean Ministry of Environment (2005) Environmental White Book of 2005. Ministry of Environment Republic. Seoul, Korea.
- Korean Ministry of Environment (2002) Environmental White Book of 2002. Ministry of Environment Republic. Seoul, Korea.
- Korean Ministry of Environment (2000) Environmental White Book of 2000. Ministry of Environment Republic, Seoul, Korea.
- Kwun SG (1998) Management improvement and perspective on nonpoint sources of water pollution in Korea. *Kor. J. Environ. Engineers.* **20**(11), 1497-1510.
- Mistech, WJ and Gosselink JG (2000) Wetlands, 3rd ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Newbold DJ, Elwood JW, O'Neil RV and Sheldon AL (1983) Phosphorus dynamic in a woodland stream ecosite: a study of nutrient spiraling. *Ecology*, **64**, 1249-1263.
- RDA (Rural Development Administration, Korea, 1998. Methods of Soil Chemical Analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon.
- Reddy KR, Kadlec RH, Flaig E and Gale PM (1999) Phosphorus retention in streams and wetlands: a review, *Crit Rev. Environ Sci. Technol.*, **29**, 83-146.
- Seo DC (2005) Development of treatment process of biological nitrogen and phosphorus in sewage treatment plant by natural purification system. Doctor Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
- Seo DC, Park WY, Lim JS, Park CH, Lee HJ, Kim HC, Lee SW, Lee DJ, Cho JS and Heo JS (2008) A Study on the improvement of treatment efficiency for nitrogen and phosphorus by improved sewage treatment process in constructed wetland by natural purification method. *Kor. J. Environ. Agric.* **27**(1), 27-34.
- Tanner CC, Sukias JPS and Upsdell MP (1998) Relationships between loading rates and pollutant removal during maturation of gravel-bed constructed wetlands. *J Environ. Qual.* **27**, 448-458.
- 國松孝男, 羅榮 and 武田育 (1994) 非作付其間の田からの汚染物質と無機イオソの表面流出, 農-論集, **170**, 45-54.
- Yoon CG, Kwun SK, Ham JH and Noh JK (2000) Study on the performance of constructed wetland system for sewage treatment. *Kor. J. Agric. Engineers.* **42**(4), 96-105.