



자유수면형 인공습지에서 식물식재 유무가 처리효율에 미치는 영향

Effects of Plant on Pollutant Removal Rate n Surface-flow Constructed Wetlands

함중화*[†] · 김형중* · 김동환* · 홍대벽*

Ham, Jong Hwa · Kim, Hyung Joong · Kim, Dong Hwan · Hong, Dae Byuk

ABSTRACT

Three different types of wetlands (unplanted wetland, reed planted wetland, cattail planted wetland) were constructed at the mouth of Seokmoon reservoir with 910 m² each to examine the effects of wetland plant on pollutant removal rate in constructed wetland, and operated for 9 years (2002~2010). Water depth of the wetland was maintained at 0.3~0.5 m, flow rate was about 40~200 m³/day, and retention time was managed at about 1~5 days. There was no difference in removal rate of SS, TN, and TP between reed wetland and cattail wetland. Removal rate of SS and TN in planted wetland with reed and cattail were higher than unplanted wetland, whereas removal rate of TP in unplanted wetland was higher than planted wetland. The monthly variation of removal rate in planted wetlands was high compared with unplanted wetland. From the long term monitoring results, SS and TN removal rates of period3 (2008~2010) were higher than period1 (2002~2004) in planted wetland, whereas TP removal rate was decreased as time goes on. Overall, pollutant removal rate in constructed wetland was more influenced by existence of plants than by plant species. Although constructed wetland is operated long term period, SS, TN, and TP removal rate (SS 90 %, TN 60 %, TP 40 %) can be maintained high values.

Keywords: constructed wetland; wetland plant; removal rate

1. 서 론

비점오염원은 다양한 토지이용에서 발생하는 불특정 오염물질로서 관리 및 처리가 쉽지 않아 많은 하천, 호수 및 저수지의 수질악화에 큰 영향을 미치고 있다. 비점오염원 저감방법으로는 인공습지, 식생여과대, 저류지, 그리고 물리적 여과장치(여과조, 침투조, 유공포장) 등이 이용되고 있으며, 제거효과에 대한 과학적인 검증을 위한 다양한 연구가 이루어져 왔으며, 다양한 처리장치 및 기법들이 개발되어 상용화되었다. 생태학적으로 건강한 자연정화기법으로 인공습지에 의한 비점오염원 저감기법이 하나의 대안으로 대두되고 있다. 인공습지는 육상과 수생태계의 전이 지대에 나타나는 지형학적인 위치로써 생태계 내에서 활발하게 이루어지는 생물화학적 순환(bio-geochemical cycle) 기능을 통해 오염물질이 자연정화되어 수질개선에 효과적이다(Mitsch and Gosselink, 2000). 습지를 이용한 수질관리는 처리에 대한

비용이 적게 든다는 경제적인 장점이 있으며, 자연생태계의 일부분을 이용하고, 오염물질의 제거가 효과적이기 때문에 습지의 자연정화기능을 수질개선에 적용하는 연구가 국내·외에서 많이 진행되고 있다(Ham et al., 2004, 2005; Kadlec and Knight, 1996; Kim et al., 2008; Mitsch and Gosselink, 2000).

인공습지의 기본적인 처리과정은 침전, 여과, 흡착, 미생물의 분해, 질산화 및 탈질화로 이루어진다(Kadlec and Knight, 1996). 인공습지 내 수생식물은 수생식물을 지지하는 토양이라는 매질과 함께 식물과 미생물의 상호공생을 통한 물리·생물·화학적 반응을 통하여 영양염류를 식물체 내로 흡수하고, 식생의 통기조직을 통해 뿌리주변 즉 근권역에 산소를 전달하며, 수체 내 줄기나 잎은 유속을 감소시켜 여과와 침전을 도와줄 뿐만 아니라 미생물의 서식처를 제공하는 중요한 역할을 한다(Kadlec and Knight, 1996; KARICO, 2004; Mitsch and Gosselink, 2000).

인공습지에서 수생식물은 유속의 감소, 여과, 침전에 중요한 역할을 할 뿐만 아니라 고사한 식물체는 탈질화작용에 필요한 탄소원으로 작용하여 인공습지의 처리효율을 향상시키는 데 도움을 주지만, 과도한 식생의 생물량은 인공습지의 DO농도를 감소시켜 질소의 제거능력은 증가시키는 반면 인의 처리효율을 감소시키는 결과를 가져온다. 또한 습지 내 식물체를 제

* 한국농어촌공사 농어촌연구원

† Corresponding author Tel.: +82-31-400-1832

Fax: +82-31-400-1889

E-mail: jonghwah@hanmail.net

2011년 10월 10일 투고

2011년 11월 1일 심사완료

2011년 11월 2일 게재확정

거하지 않으면 생장기 동안 영양물질이 습지식물에 의해 흡수되어 저감되지만, 장기적으로 고사한 식물체가 분해되어 다시 영양물질을 용출시킬 수 있다 (Reed et al., 1995; Richardson, 1985).

본 연구에서는 수생식물이 식재되지 않은 무식재구와 갈대와 부들이 식재된 갈대식재구, 부들식재구를 장기간 (9년) 운영한 결과를 바탕으로 수생식물 식재유무에 따른 인공습지 처리효율을 비교·분석하여, 인공습지 설계 및 운영의 기초자료로 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

인공습지를 이용한 비점오염원 저감을 목적으로 2001년에 충남 당진군의 석문담수호 유입부에 총 9개의 인공습지 시험포를 조성하였으며, 본 연구에서는 9개의 시험포 중 식재한 수생식물 종별 인공습지 처리효율을 분석하기 위해 조성한 1번 시험포를 대상으로 분석하였다. 1번 시험포는 Fig. 1과 같이 무식재구, 갈대식재구, 부들식재구로 구성되어 있으며, 각 처리구별 면적은 910 m^2 ($13 \text{ m} \times 70 \text{ m}$)이다. 인공습지 운영 전 입도분포 및 토양특성을 분석한 결과 조사지점에서 깊이 1 m까지 토성은 미사질양토 (silty loam)이었으며, OC, TN, TP는 각각 0.174 %, 403 mg/kg, 389 mg/kg이었다. 인공습지의 유입수는 석문담수호로 유입되는 당진천의 물을 양수하여 사용하였으며, 각 처리구별 유량 및 체류시간은 각각 $40 \text{ m}^3/\text{d} \sim 200 \text{ m}^3/\text{d}$ 와 1~5 일을 유지하였다. 인공습지는 2002년부터 2010년까지 총 9년간 3단계로 나뉘어 운영을 하였으며, 2002년과 2003년을 제외하고는 생장기 (4~11월)에만 인공습지를 운영하였다. 1단계 (2002~2004년)의 목적은 인공습지 조성방법, 초기 식생정착 및 처리효율 분석, 2단계 (2005~2007년)의 목적은 다양한 유입수 농도, 유량 및 체류시간에 따른 인공습지의 처리효율 분석, 3단계 (2008~2010년)의 목적은 인공습지를 장기간 운영하였을 경우의 처리효율 변화 분석이다.

2001년에 갈대식재구와 부들식재구에 갈대와 부들을 각각 식재하였으며, 식생조사 결과 식재 후 3년의 생장기를 거친 2004년도에 갈대식재구 및 부들식재구 모두 90 % 이상의 높은 식생피도를 유지하였다. 9년의 생장기를 거친 2010년도에 갈대식재구는 갈대 순군락을 유지하였으나, 부들식재구는 전체 면적의 30 %에 갈대가 유입되었으며, 무식재구는 전체면적의 12 % (갈대 6 %, 부들 6 %)에 갈대와 부들이 유입되었다.

처리구별 시간경과에 따른 토양특성 변화를 분석하기 위해 인공습지 운영 전, 1단계, 3단계에 현장 상황에 맞게 grab 샘플러와 core 샘플러를 이용하여 시료 채취 후 SSSA의 methods of soil analysis (1994) 방법으로 OC, TN, TP를 분석하였다.

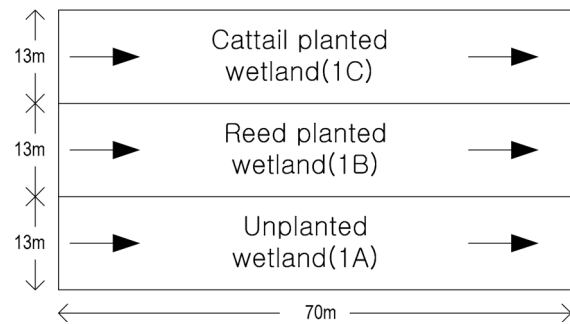


Fig. 1 Layout of constructed wetland

III. 결과 및 고찰

1. 처리구별 연평균 처리효율 분석

9년간의 실측자료 중 장기간 운영으로 습지가 안정되고 일정한 농도 및 유량이 적용된 최근 3년간 (2008~2010년) 1시험포에서 얻은 실측자료를 이용해 처리구별 연평균 처리효율을 분석하였으며, 그 결과는 Table 1 및 Fig. 2와 같다. 최근 3년간 (2008~2010년) 평균 유입유량은 무식재구에서 $131.4 \text{ m}^3/\text{d}$, 갈대식재구에서 $125.6 \text{ m}^3/\text{d}$, 부들식재구에서 $125.6 \text{ m}^3/\text{d}$ 이었으며, 평균 체류일수는 무식재구에서 2.1일, 갈대식재구에서 2.2일, 부들식재구에서 2.2일이었다.

무식재구 (1A)의 유출수 DO농도는 유입수에 비해 11.8 % 감소한 8.46 mg/L 의 농도를 나타낸 반면에, 수생식물이 식재된 갈대식재구 (1B)와 부들식재구 (1C)의 유출수 DO농도는 유입수에 비해 67.6 %, 64.0 % 감소한 3.11 mg/L 와 3.46 mg/L 의 농도를 나타냈다. 이는 갈대와 부들이 식재된 갈대식재구 (1B)와 부들식재구 (1C)에서 고사한 수생식물이 습지 내에서 분해되면서 수중의 산소를 많이 소모한 반면 갈대와 부들의 광합성에 의해 뿌리를 통해 수중으로 공급되는 산소의 양이 상대적으로 적었기 때문이라 판단된다.

COD의 경우 3개 처리구 모두 연평균 유입수보다 유출수의 COD농도가 높게 나타났다. 유입수의 COD 농도가 습지의 배경농도보다 낮을 때 유출수의 COD농도가 유입수보다 낮게 나타날 수 있으며 (Kadlec and Knight, 1996), 연구대상 습지에서 현재 보다 더 높은 농도(약 10 mg/L)로 유입될 경우 COD에 대해서도 양의 처리효율을 얻을 수 있을 것으로 생각된다. Kadlec and Knight (1996)가 20개 습지에 대해 조사한 결과에 의하면 평균 BOD의 배경농도는 6.2 mg/L 인 것으로 보고되었다. Fig. 2는 최근 3년간 처리구별 처리효율을 box plot으로 나타낸 그림으로, 무식재구의 COD 처리효율은 변화폭이 적은 반면에, 갈대식재구 및 부들식재구의 처리효율은 변화폭이 크게 나타났다. 일원배치 분산분석에 의한 동일집단군 분석결과 95 %

Table 1 Concentration and removal rate of constructed wetland during last 3 years (2008~2010)

		unplanted wetland (1A)	reed planted wetland (1B)	cattail planted wetland (1C)
area (m ²)		910	910	910
flow rate (m ³ /day)		131.4	125.6	125.6
hydraulic loading rate (cm/day)		14.4	13.8	13.8
hydraulic retention time (day)		2.1	2.2	2.2
DO	influent (mg/L)	9.59	9.59	9.59
	effluent (mg/L)	8.46	3.11	3.46
	removal rate (%)	-11.8	-67.6	-64.0
COD	influent (mg/L)	8.50	8.50	8.50
	effluent (mg/L)	8.93	8.61	9.39
	removal rate (%)	-5.0	-1.3	-10.5
SS	influent (mg/L)	25.30	25.30	25.30
	effluent (mg/L)	8.17	2.63	2.67
	removal rate (%)	67.7	89.6	89.5
TN	influent (mg/L)	3.249	3.249	3.249
	effluent (mg/L)	1.957	1.094	1.254
	removal rate (%)	39.8	66.3	61.4
NH ₄ -N	influent (mg/L)	0.262	0.262	0.262
	effluent (mg/L)	0.229	0.268	0.234
	removal rate (%)	12.6	-2.3	10.7
NO ₂ -N	influent (mg/L)	0.151	0.151	0.151
	effluent (mg/L)	0.153	0.116	0.066
	removal rate (%)	-1.3	23.2	56.3
NO ₃ -N	influent (mg/L)	2.504	2.504	2.504
	effluent (mg/L)	1.239	0.525	0.583
	removal rate (%)	50.5	79.0	76.7
TP	influent (mg/L)	0.211	0.211	0.211
	effluent (mg/L)	0.099	0.123	0.125
	removal rate (%)	53.0	42.0	40.6
PO ₄ -P	influent (mg/L)	0.144	0.144	0.144
	effluent (mg/L)	0.052	0.092	0.095
	removal rate (%)	63.9	36.1	34.0
Chl-a	influent (mg/m ³)	32.4	32.4	32.4
	effluent (mg/m ³)	15.7	5.8	7.0
	removal rate (%)	51.5	82.1	78.4

유의수준 하에서 3개 처리구 모두 a집단으로 분류되어 (Fig. 2), 인공습지 조성에 이용된 식물종별 COD의 처리효율은 차이가 없는 것으로 나타났다.

부유물질 (SS)의 처리효율은 갈대식재구 (1B)와 부들식재구 (1C)에서 89.6 %, 89.5 %의 매우 높은 처리효율을 나타냈으며, 무식재구에서도 67.7 %의 높은 처리효율을 나타냈다. 일원

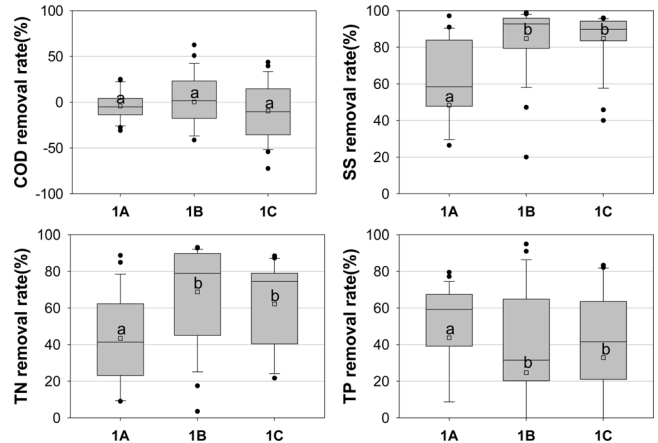


Fig. 2 Removal rate of constructed wetland during last 3 years (2008~2010)

배치 분산분석에 의한 동일집단군 분석결과 95 % 유의수준 하에서 수생식물이 식재된 갈대식재구 (1B)와 부들식재구 (1C) 사이에는 유의한 차가 나타나지 않은 반면에, 식재되지 않은 무식재구 (1A)와 갈대와 부들이 식재된 갈대식재구 (1B) 및 부들식재구 (1C) 사이에는 유의한 차이가 나타났다. 또한 최근 3년간 부유물질의 처리효율 변화폭은 수생식물이 식재된 갈대식재구 (1B)와 부들식재구 (1C)에서 적은 반면에, 수생식물이 식재되지 않은 무식재구에서 크게 나타났다 (Fig. 2).

TN의 경우 갈대식재구 (1B)와 부들식재구 (1C)에서 최근 3년간 평균 수질정화효율이 각각 66.3 %와 61.4 %로 매우 높게 나타났으며, 식재 식물종에 따른 유의적 차이는 나타나지 않았다 (Fig. 2). 반면에 무식재구에서 TN의 처리효율은 39.8 %로 상대적으로 낮은 값을 나타냈다. 이는 수생식물이 식재된 처리구 (1B, 1C)에서 입자상물질의 침전에 유리한 환경이 조성되어 갈대와 부들이 식재된 처리구에서 무식재구보다 유기질소가 더 많이 제거되었고, 고사한 수생식물의 분해에 의해 탈질화에 유리한 환경 (낮은 DO농도, 높은 탄소공급)이 조성되어 질산성질소가 더 많이 탈질화되었기 때문이라 생각된다. 실제 최근 3년간 무식재구, 갈대식재구, 부들식재구의 질산성질소 처리효율은 각각 50.5 %, 79.0 %, 76.7 %로 상대적으로 수생식물이 식재된 습지에서 질산성질소의 처리효율이 더 높게 나타났다. 또한 유입수의 질산성질소 구성비가 77 %였던 것이 습지를 통과하면서 감소하여 무식재구, 갈대식재구, 부들식재구의 질산성질소 구성비가 각각 52 %, 20 %, 28%로 수생식물이 식재된 식재구가 무식재구보다 더 낮은 질산성질소 구성비를 나타냈다.

TP의 수질정화효율은 무식재구에서 53.0 %로 가장 높게 나타났으며, 갈대식재구와 부들식재구에서 각각 42.0 %, 40.6 %의 처리효율을 나타냈다. SS, TN과 달리 TP의 수질정화효율은

수생식물이 식재되지 않은 무식재구가 더 높게 나타났다. 이는 무식재구에서 고사한 생물량이 적고 DO농도가 높아 고사한 수생식물이 분해되면서 용출된 인의 양이 갈대와 부들이 식재된 처리구보다 적었고, 우점하고 있는 개구리밥과 부착조류에 의해 많은 인이 흡수된 후 바다에 퇴적되었기 때문이라 판단된다. 무식재구, 갈대식재구, 부들식재구에서 최근 3년간 퇴적물의 평균 TP는 각각 486 mg/kg, 382 mg/kg, 403 mg/kg으로 무식재구의 퇴적물 TP가 수생식물이 식재된 식재구보다 높게 나타났다. 무식재구, 갈대식재구, 부들식재구의 PO₄-P 처리효율은 각각 63.9 %, 36.1 %, 34.0 %로 무식재구의 처리효율이 훨씬 높게 나타났으며, 유출수의 PO₄-P 구성비는 각각 53 %, 75 %, 76 %로 무식재구에서 낮게 나타났다. 한편 갈대식재구와 부들식재구 사이의 TP와 PO₄-P의 수질정화효율은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

Chl-a의 처리효율은 무식재구에서 51.5 %를 나타낸 반면, 갈대식재구와 부들식재구에서 82.1 %와 78.4 %를 나타내었다. 무식재구, 갈대식재구, 부들식재구의 유출수 Chl-a는 각각 15.7 mg/m³, 5.8 mg/m³, 7.0 mg/m³로 수생식물이 식재된 갈대식재구와 부들식재구에서 무식재구보다 낮은 농도를 나타내었다. 이는 수생식물이 식재된 처리구에서 갈대와 부들에 의해 식물플랑크톤 생장에 필수적인 빛이 차단되었기 때문으로 판단된다.

1번 시험포를 장기간 (9년) 운영한 결과 인공습지를 장기간 운영하더라도 높은 SS, TN, TP의 처리효율을 유지할 수 있었

으며, SS, TN, TP의 처리효율은 식물중에 따른 유의적 차이는 없었으나, 식재여부에 따른 유의적 차이가 있었다. SS와 TN은 갈대와 부들 같은 수생식물을 식재한 처리구에서 더 높은 처리효율 나타낸 반면, TP는 수생식물을 식재하지 않은 무식재구에서 더 높은 처리효율을 나타냈다. 그러므로 SS, TN, TP에 대해 모두 높은 처리효율을 얻기 위해 갈대와 부들이 식재된 식재구와 수생식물이 식재되지 않은 무식재구를 조합하여 인공습지를 조성할 것을 추천한다.

2. 월별 처리효율 변화

9년간의 실측자료 중 습지가 안정된 최근 3년간 (2008~2010년)의 자료를 이용해 월별 처리구별 처리효율을 분석하였으며 그 결과는 Fig. 3과 같다. COD의 처리효율을 보면 무식재구와 갈대식재구는 4월에 가장 낮은 처리효율을 나타내었으며, 9월부터는 양의 처리효율을 나타냈다. 반면에 부들식재구는 8월까지 지속적으로 처리효율이 감소하다가 9월부터 양의 처리효율을 나타냈다. SS처리효율은 수생식물이 식재된 갈대식재구와 부들식재구에서 식물이 자라기 시작하는 4월을 제외하고 전체적으로 90 % 이상의 높은 처리효율을 나타냈다. 무식재구에서는 5~7월까지 80 % 이상의 처리효율을 나타내다가 8월부터 감소하기 시작하여 9월에 34 %로 제일 낮은 값을 나타내었다.

TN은 4~6월에 비교적 낮은 처리효율을 나타내다가 7~11

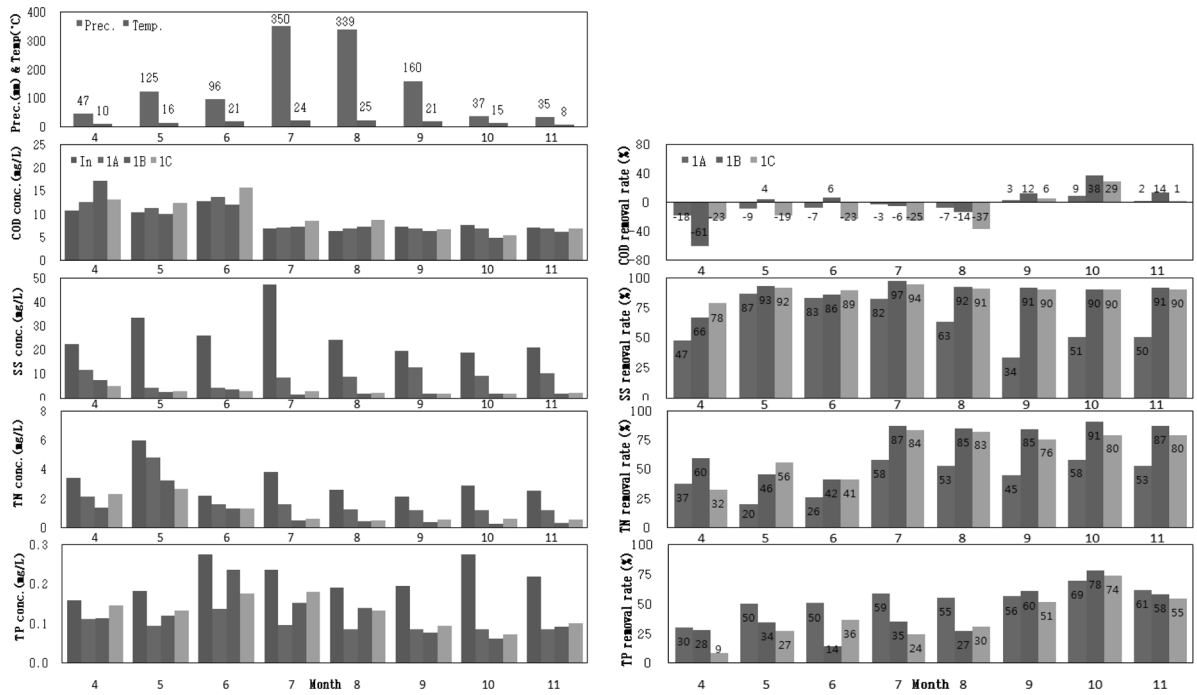


Fig. 3 Monthly average concentration and removal rate during last 3 years (2008~2010)

월 동안은 지속적으로 높은 처리효율을 나타냈다. 특히 수생식물이 식재된 갈대식재구와 부들식재구에서 7~11월 동안 평균 80 % 이상의 매우 높은 처리효율을 나타내었으며, 무식재구에서도 50 % 이상의 처리효율을 나타내었다. 갈대식재구와 부들식재구에서 7월부터 처리효율이 높게 나타난 원인은 6월까지 유출수의 평균 DO가 3.7 mg/L를 유지하다가 7월부터 DO농도가 1.7 mg/L로 크게 감소하여 본 연구대상 습지의 주된 질소 제거 기작인 탈질화에 유리한 환경이 조성되었기 때문이라 생각된다.

TP의 월별 처리효율은 3개의 처리구 모두 10월에 가장 높은 처리효율 (69 %, 78 %, 74 %)을 나타냈으며, 4월에 가장 낮은 처리효율 (30 %, 28 %, 9 %)을 나타냈다. 수생식물이 식재된 갈대식재구와 부들식재구에서 4~8월까지 30 % 이하의 낮은 처리효율을 나타낸 반면, 9월 이후에는 60 % 이상의 TP 처리효율을 나타내었다. COD와 TP의 월별 처리효율이 갈대와 부들이 식재된 식재구에서 9월부터 처리효율이 증가한 원인은 고사한 갈대와 부들이 8월까지 미생물에 의해 분해가 쉬운 조직이 분해되면서 유기물 및 영양물질을 수체로 용출시킨 반면에, 9월 이후에는 상대적으로 분해가 어려운 조직이 남고, 수온이 감소되면서 고사한 식생의 분해량이 적어졌기 때문으로 판단된다. 수생식물이 식재되지 않은 무식재구에서는 4월을 제외하고 모두 50 % 이상의 처리효율을 나타내었다.

월별 처리효율변화를 분석한 결과 COD, SS, TN, TP의 처리효율은 식물종에 따른 차이는 적었던 반면, 식물 식재여부에 따른 차이가 크게 나타났다. 수생식물이 식재된 인공습지의 경우 대부분의 수질항목에서 월별 처리효율의 변화가 크게 나타났으며, SS는 5월 이후, TN은 7월 이후, TP는 9월 이후부터 높은 처리효율을 나타냈다. 주로 처리하고자 하는 수질항목을 기준으로 월별 유입유량 및 관리방법을 다르게 적용할 경우 Table 1에 나타난 연평균 처리효율보다 높은 처리효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

3. 시간 경과에 따른 처리효율 변화

시간 경과에 따른 처리구별 처리효율을 분석하기 위해 습지 운영조건이 다른 2단계를 제외하고 1단계와 3단계의 처리효율을 비교·분석하였다. 각 단계별 처리구별 처리효율은 Table 2와 같다.

COD의 처리효율은 시간이 경과하면서 전체적으로 처리효율이 개선되었지만 여전히 3단계에서 음의 처리효율을 나타냈다. 1단계보다 3단계의 처리효율이 일부 상승한 원인은 평균 유입수의 COD농도가 1단계 (5.8 mg/L)보다 3단계 (8.5 mg/L)에서 더 높게 나타났기 때문이라 생각된다. SS의 처리효율은 시

Table 2 Average removal rate of constructed wetland in each period

		unplanted wetland (1A)	reed planted wetland (1B)	cattail planted wetland (1C)
COD (%)	period1 ('02~'04)	-17.3	-19.2	-21.2
	period3 ('08~'10)	-5.0	-1.3	-10.5
SS (%)	period1 ('02~'04)	41.6	59.6	73.7
	period3 ('08~'10)	67.7	89.6	89.5
TN (%)	period1 ('02~'04)	43.4	52.0	48.2
	period3 ('08~'10)	39.8	66.3	61.4
TP (%)	period1 ('02~'04)	53.3	56.5	49.6
	period3 ('08~'10)	53.0	42.0	40.6

간이 경과하면서 전체적으로 1단계보다 3단계에서 높은 처리효율을 나타냈으며, 수생식물이 식재된 갈대식재구 및 부들식재구에서 약 90 %의 처리효율을 나타냈다. 부유물질 제거는 습지의 식생에 의한 스크린 효과에서 기인한다고 판단되며, 습지 운영기간이 길어지고 식물피도가 일정한 수준에 이르면 지속적으로 높은 처리효율을 나타내는 것으로 나타났다.

TN 처리효율은 수생식물이 식재되지 않은 무식재구 (1A)에서 시간이 경과함에 따라 처리효율이 소폭 감소한 반면, 수생식물이 식재된 갈대식재구와 부들식재구에서 시간이 경과함에 따라 처리효율이 증가하여 3단계에서 평균 60 % 이상의 높은 TN 처리효율을 나타냈다. 이는 시간이 경과함에 따라 식생피도가 증가하여 입자상으로 존재하는 유기질소의 처리효율이 증가하고, 더 많은 수생식물 고사체가 쌓이고, 분해되면서 질산성질소의 탈질화에 유리한 환경을 조성되었기 때문이라 판단된다. TP의 처리효율은 수생식물이 식재되지 않은 무식재구 처리구의 경우 시간이 경과하더라도 처리효율에는 큰 차이를 나타내지 않는 반면, 수생식물이 식재된 갈대식재구와 부들식재구에서 시간이 경과함에 따라 TP의 처리효율이 다소 감소하였지만 여전히 TP의 평균 처리효율이 40 % 이상으로 높은 처리효율을 나타내었다. 이는 시간이 경과함에 따라 바닥에 퇴적된 입자성인과 고사한 수생식물의 분해에 의해 용존성인이 용출되어 TP의 처리효율이 감소된 것으로 판단되며, 이러한 현상은 여러 인공습지에서 일반적으로 나타나는 현상이다 (Mitsch and Gosselink, 2000). 무식재구에서 영양물질의 처리효율은 시간이 경과함에 따라 수생식물을 식재한 처리구보다 상대적으로 작은 변화폭을 나타내었다.

전체적으로 수생식물이 식재된 인공습지를 9년 동안 운영한 결과 SS와 TN의 처리효율은 습지조성 초기 (1단계)보다 후기 (3단계)에 더 높은 처리효율을 나타냈다.

4. 시간 경과에 따른 토양 특성 변화

시간 경과에 따른 처리구별 토양의 특성 변화를 분석하기 위

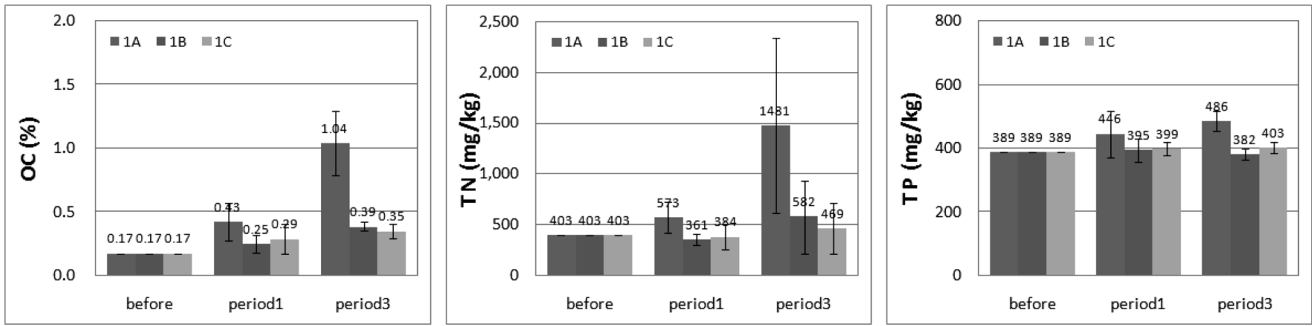


Fig. 4 Average OC, TN, and TP concentration of wetland topsoil in each period

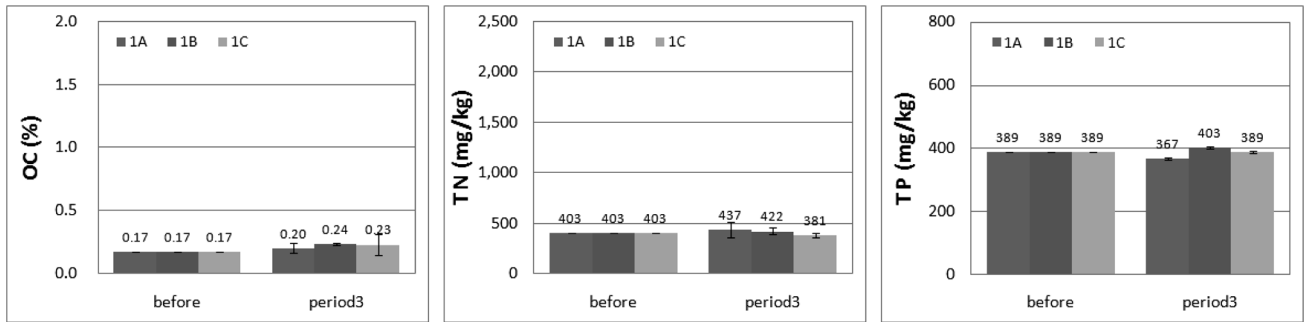


Fig. 4 Average OC, TN, and TP concentration of wetland subsoil in each period

해 인공습지 운영 전, 1단계, 3단계의 토양 특성을 비교·분석하였다 (Fig. 4). 인공습지 운영 전 3개 처리구 모두 동일한 농도 (OC 0.174 %, TN 403 mg/kg, TP 389 mg/kg)를 나타내었으나, 시간이 경과하면서 전체적으로 무식재구의 변화폭이 갈대와 부들식재구보다 훨씬 크게 나타났다. 이는 무식재구의 경우 우점하고 있던 개구리밥과 부착조류가 고사 직후 작은 입자상 유기물질로 분해되어 바닥에 퇴적되는 반면, 갈대와 부들 식재구의 경우 고사한 갈대와 부들이 장기간 여러 분해과정을 거치면서 일부는 용출되고 일부만이 작은 입자상 유기물형태로 바닥에 퇴적되었기 때문이라 생각된다. 또한 시간이 경과함에 따라 OC가 가장 큰 증가폭을 나타냈으며, 그 다음으로 TN, TP순으로 나타났다. 수생식물의 평균 탄소, 질소, 인의 함량은 각각 41 %, 2.26 %, 0.25 % (Kadlec and Knight, 1996)로 이는 인공습지 운영 전 토양의 OC, TN, TP 농도보다 각각 236배, 56배, 6배 높은 수치이다. 그러므로 고사한 수생식물이 분해되어 퇴적된 표토의 OC 증가폭이 TN과 TP보다 크게 나타난 것으로 생각된다.

토양깊이별 토양특성변화를 분석하기 위해 3단계에서 20~40 cm 깊이의 심토를 추가로 채취하여 토양분석을 실시하였으며, 그 결과를 습지 운영 전 토양분석 결과와 비교·분석하였다 (Fig. 5). 표토와 달리 심토는 시간 경과에 따른 농도변화가 크

지 않았는데, 이는 침투를 통해 표토층으로부터 심토층으로 이동된 탄소, 질소, 인의 양이 적었기 때문이라 판단된다. 인공습지 운영 전 토양은 인공습지 조성공사로 인해 표토와 심토가 동일한 농도를 나타내었으나, 시간이 경과함에 따라 표토의 농도는 크게 증가한 반면, 심토의 농도는 크게 변하지 않아 표토와 심토의 농도차가 발생하였다. 특히 OC가 표토와 심토의 농도차가 크게 나타났고, TP는 상대적으로 농도차가 작게 나타났다.

습지 운영 9년차인 2010년 4월에 습지가 건조된 상태에서 시험포별 퇴적물의 깊이를 조사한 결과 무식재구는 평균 3.5 cm를 나타냈다. 갈대식재구와 부들식재구는 퇴적물, 분해가 진행 중인 식물고사체가 섞여있어 정확한 퇴적물의 깊이를 조사하는 것이 불가능하였으며, 식물고사체가 쌓인 높이는 각각 27 cm와 25 cm로 나타났다. 상층부는 최근에 고사하여 쌓인 식물체이며, 하층으로 내려갈수록 습지 운영 초기에 고사한 식물체로 분해가 많이 진행되어 입자 크기가 상대적으로 작은 상태로 존재하였다. 무식재구에서는 퇴적물과 물과의 상호작용은 물과 접촉하고 있는 퇴적물 상부에서만 이루어졌으며, 갈대식재구와 부들식재구에서는 식물고사체 사이로 물이 흐르면서 물과의 접촉 면적이 훨씬 넓었다. 따라서 무식재구보다 갈대식재구와 부들식재구에서 퇴적물 및 고사한 식물체가 수질에 미치는 영향이 훨씬 크게 나타날 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 무식재구, 갈대식재구, 부들식재구를 장기간 운영한 결과를 바탕으로 수생식물 식재여부 및 식물종별 처리 효율을 비교분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SS, TN, TP의 처리효율은 식물종에 따른 유의적 차이는 없었으나, 식재여부에 따른 유의적 차이가 있었다. SS와 TN은 갈대와 부들 같은 수생식물을 식재한 처리구에서 더 높은 처리 효율 나타낸 반면, TP는 수생식물을 식재하지 않은 무식재구에서 더 높은 처리효율을 나타냈다.

2. 수생식물이 식재된 인공습지의 경우 대부분의 수질항목에서 월별 처리효율의 변화가 크게 나타났으며, SS는 5월 이후, TN은 7월 이후, TP는 9월 이후 높은 처리효율을 나타냈다.

3. 수생식물이 식재된 인공습지를 9년 동안 운영한 결과 SS와 TN의 처리효율은 습지조성 초기 (1~3년차)보다 후기 (6~9년차)에 더 높은 처리효율을 나타냈으며, TP는 시간이 경과함에 따라 처리효율이 감소하였으나 후기에도 여전히 40 % 정도의 처리효율을 유지하고 있었다.

4. 이상의 연구로부터 SS, TN, TP에 대해 모두 높은 처리효율을 얻기 위해서는 갈대와 부들이 식재된 식재구와 수생식물이 식재되지 않은 무식재구를 조합하여 인공습지를 조성할 필요가 있다.

REFERENCES

1. Ham, J. H., C. G. Yoon, H. C. Kim, W. S. Koo, and H. B. Shin. (2005) The effect of plant coverage on the constructed wetlands performance and development and management of macrophyte communities, *Korean J. Limnol.*, 38(3): 393-402 (in Korean).

2. Ham, J. H., C. G. Yoon, W. S. Koo, H. C. Kim, and H. B. Shin. (2004) Analysis of field experimental data for water quality improvement of tributary stream to estuarine reservoir using constructed wetland system, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 46(5): 141-153 (in Korean).

3. Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996) *Treatment Wetlands*, Lewis publisher, New York, pp. 415-442.

4. KARICO. (2004) Design and management manual of constructed wetland for agricultural water quality improvement (in Korean).

5. Kim, H. C., C. G. Yoon, H. Y. Um, H. J. Kim, and J. H. Ham. (2008) Analysis of treatment efficiency according to open-water in constructed wetland, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 24(6): 709-717 (in Korean).

6. Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G. (2000) *Wetlands*, New York, NY: John Wiley & Sons.

7. Reed, S. C., Crites, R. W. and Middlebrooks, E. J. (1995) *Natural Systems for Waste Management*(2nd ed.), McGraw-Hill, New York, pp. 173-284.

8. Richardson, C. J. (1985) Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetland, *Science*, 228: 1424-1428.

9. SSSA. (1994) *Methods of soil analysis*, Soil Science Society of America, Madison.