

# 고흥만 간척지 내 인공습지에 의한 농경배수 정화효율에 관한 연구

유 훈 선\* / 강 동 환\*\*\* / 권 병 혁\*\*\*

## Removal Efficiency of Pollutants in Agricultural Wastewater by Constructed Wetlands on Reclaimed Land in the Goheung Bay

Hun Sun Yu\* / Dong Hwan Kang\*\*\* / Byung Hyuk Kwon\*\*\*

**요약** : 본 연구지역은 전라남도에 위치한 고흥만 간척지 내 인공습지이며, 인공습지수와 주변 유입수의 수질특성을 파악하기 위해 2008년 3월 15일 및 2009년 1월 10일에 12개 지점에서 현장조사를 수행하였다. 수온, pH, DO, EC 및 salinity 항목은 현장측정 되었으며, 채수된 시료는 실내에서 TOC, Cl-, COD, TSS, T-P 및 T-N 성분을 분석하였다. 현장 관측된 5개 항목은 인공습지에 비해 유입지점들에서 높게 나타났으며, 이는 주변 농경작지에서 유입되는 오염물질에 의한 것이다. 인공습지수와 유입수 내 농도비는 TOC 성분은 1월에, Cl 성분은 3월에 더욱 높은 값을 보였다. COD 성분은 인공습지수에 대한 유입수의 농도비가 1.37배와 1.49배로서 유사하였다. 유입지점들에서 T-P와 T-N 성분의 평균값은 인공습지 내에서보다 3배 이상 높았으며, 인공습지의 자정능력에 의해 농도가 저감되었다. 본 연구지역의 인공습지에서는 유입수 내 Cl, T-P, T-N 성분의 정화효율이 높은 것으로 나타났다. Cl- 성분의 정화효율은 1차 관측 시 83%, 2차 관측 시 76% 이었으며, 이는 인공습지수에 의한 희석효과에 의한 것이다. T-P 성분의 정화효율은 67%(1차 관측)와 69%(2차 관측), T-N 성분은 100%(1차 관측)와 95%(2차 관측) 로서 매우 높았다. 본 연구에서 T-N의 정화효율이 비현실적으로 높은 것은 유입수의 양이 소량이어서 인공습지수 내에서는 질소 농도가 분석한계 이하로 나타났기 때문이다. 본 연구에서는 T-P 성분의 정화효율이 1월에, T-N 성분은 3월에 높게 나타나 생장기와 동절기의 영향에 의한 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 인공습지, 농업오염수, 수질, 정화효율

**Abstract** : This research was conducted at the constructed wetland in Goheung reclaimed land, and water quality components were measured at the 12 points in 15 March 2008 and 10 January 2009, respectively. Temperature, pH, DO, EC and salinity components were measured at the field, and TOC, Cl-, COD, TSS, T-P and TN components were analyzed laboratory. Concentrations of field measured components at inflow points were higher than in constructed wetland. TOC concentration ratio of inflow water to constructed wetland water was higher in January, and Cl concentration ratio of it was higher in March. And, COD concentration ratio of it were 1.37 for March and 1.49 for January, respectively. T-P and T-N concentration ratios of it at inflow points were higher 3 times than in constructed wetland. Constructed wetland attenuated concentration of contaminated components inflow to it. Removal efficiencies of Cl-, T-P and T-N components in inflow water were high at the constructed wetland. removal efficiencies of Cl component were 83% for 1st monitoring and 76% for 2nd monitoring, this removal efficiency be caused by dilution effect of constructed wetland. removal efficiencies of T-P component were 67% for 1st monitoring and 69% for 2nd monitoring, and they of T-N component were 100% for 1st monitoring and 95% for 2nd monitoring. Abnormal removal efficiency of T-N component is caused that nitrogen in inflow water was a little. Removal efficiency of T-P component was higher in January, and T-N component was higher in March. This is caused by environmental difference between growing season and winter.

**Keywords** : Constructed wetland, Agricultural wastewater, Water quality, Removal efficiency

+ Corresponding author : dhkang@pknu.ac.kr  
\* 비회원 · 동의과학대학 동의분석센터 팀장  
\*\* 정회원 · 부경대학교 지구과학연구소 전임연구원  
\*\*\* 정회원 · 부경대학교 환경대기과학과 교수

## 1. 서 론

습지시스템(wetland systems)에서는 유기물질, 무기물질 및 병원균 등이 물속 및 토양에서 저감되거나 제거된다. 습지시스템에서 오염물질의 저감은 퇴적(sedimentation), 여과(filtration), 화학적인 침전과 흡착, 미생물 작용 및 식물 흡수 등의 기작에 의해 발생한다(Watson et al., 1989). 습지시스템에서 오염물질의 농도를 저감하는 기작은 매우 복잡하여 완전한 이해가 되지 못하고 있으며, 최근에도 수많은 연구자들이 습지 내에서 발생하는 영양염류의 축적, 방출 및 제거 과정을 밝히기 위한 연구를 수행하고 있다(D'Angelo and Reddy, 1994a,b; Davido and Conway, 1989; Hsieh and coultas, 1989; Kadlec, 1989; Koch-Rose et al., 1994; Newman et al., 1997; Reddy et al., 1993; Reddy et al., 1998; Stengel and Schulz-Hock, 1989; Von Felde and Kunst, 1997).

인공습지(constructed wetlands)를 이용한 하수 및 폐수 처리의 효율성이 1980년대 중반부터 최근까지 많은 연구자들에 의해 보고되었으며, 생활하수의 처리(Cooper et al., 1997; Schreijer et al., 1997), 산성광산배수의 처리(Brodie et al., 1989; Howard et al., 1989; Kleinmann and Girts, 1987; Wenerick et al., 1989), 농업 오염수의 처리(DuBowry and Reaves, 1994; Rivera et al., 1997), 매립장 침출수의 처리(Dombush, 1989; Staubitz et al., 1989; Trautmann et al., 1989) 등의 처리효율에 대한 연구들이 수행되었다. 인공습지에 의한 정화기법은 전통적인 처리기법에 비해 저비용 효과와 운영 및 유지관리의 간편함으로 인해 비교적 소규모 지역에서 세계 여러 나라가 활용하고 있다(Kivaisi, 2001).

국내에서는 인공습지를 이용한 오염수의 처리 연구는 1990년대 후반부터 시작되었으며, 대부분이 농업지역에서 발생하는 오염물질(농약, 비료, 축산폐수 등)의 처리효율(남귀숙 외, 2004; 박재홍과 권수열, 2005; 최인욱과 권순국, 2002), 하

천수질 개선을 위한 인공습지 개발 효율(함종화 외, 2004; 함종화 외, 2005), 인공습지를 이용한 수처리 효율 및 향후 연구제언(강호정과 송근예, 2004) 등의 연구들이 수행되었다.

본 연구에서는 전라남도 고흥군 매립지에 위치한 인공습지의 수질과 주변 농경지에서 유입되는 오염수의 수질 특성을 현장관측과 실내분석을 통해 파악하였으며, 인공습지로 유입되는 오염물질의 농도에 대한 정화효율을 산정하였다.

## 2. 현장 개요

### 2.1. 연구대상 습지

본 연구가 수행된 지역은 전남 고흥군 두원면에 위치한 고흥만 간척지 내 인공습지로서(Fig. 1), 자유수면 시스템(free water system: FWS)이며 인공습지로 유입되는 오염물질은 주변 농경지에서 배출되고 있다. 고흥만 간척지는 1995년에 건설되었으며 그 면적은 3,100 ha 이고, 인공습지의 면적은 280 ha로서 인근 간척지에서의 농업활동은 2005년도부터 시작되었다(강동환 외, 2008). 본 연구에서는 인공습지 내 5개 지점과 주변 농경지 배출수가 유입되는 7개 지점에서 습지수의 현장측정 및 채수된 시료의 실내분석이 수행되었다. GH01에서 GH05지점까지는 인공습지 내 가장자리 지점이며, GH06에서 GH12 지점까지는 주변 농경작지에서 유입되는 오염물질(비료 및 농약 성분)에 의한 영향을 직접적으로 받고 있는 지점이다. GH01에서 GH05 지점들에서 측정된 수질은 습지의 전체적인 수질변동을 파악하고, GH06에서 GH12지점들(농경작 이용수 유입지점)에서의 수질은 습지로 유입되는 오염물을 판단할 수 있다. 현장측정 및 채수는 2008년 3월 15일(이후 “1차 관측”으로 표기)에 12개 지점에서, 2009년 1월 10일(이후 “2차 관측”으로 표기)에는 10개 지점(GH07과 GH11 지점의 유입수는 말라 있었음)에서 수행되었다. 수체의 흐름 방향은 주변 농경작지에서 배출된 지표수가 인공습지로 유입되고 있으며, 인공습지에서는 남쪽에서 북쪽

에 위치한 유출부(GH01 지점) 방향으로 흐름이 형성되어 있다. 인공습지의 저유량은 강수 시 직접 혹은 주변 지표수의 유입 등에 의해 결정되므로, 풍수기인 여름에는 습지수의 수위가 높고 갈수기인 겨울에는 그 수위가 낮게 형성된다.

## 2.2. 현장측정 및 실내분석

본 연구지역에서 현장측정 성분은 수소이온농도(pH), 용존산소(DO), 전기전도도(EC), 수온 및 염분도(salinity) 이다. pH 성분은 pH/ORP meter (pH-20N, ISTEK), DO 성분은 DO meter (DO-30N, ISTEK), 나머지 3개 성분은

EC meter (EC-40N, ISTEK)를 이용하여 측정하였다.

현장측정 지점에서 물 시료를 채수하여 총유기탄소량(TOC), 염소이온(Cl<sup>-</sup>), 총부유물질(TSS), 화학적산소요구량(COD), 총인(T-P) 및 총질소(T-N) 성분은 동의과학대학 동의분석센터에서 분석하였다. 분석시료의 개수는 1차 관측 시 12개이었으나, 2차 관측 시에는 GH07과 GH11 지점의 유입수가 존재하지 않아 시료가 10개로 줄었다. TOC 성분은 부경대학교 공동실험실습관에서 분석하였으며, 나머지 5개 성분은 동의과학대학 동의분석센터에서 분석하였다.

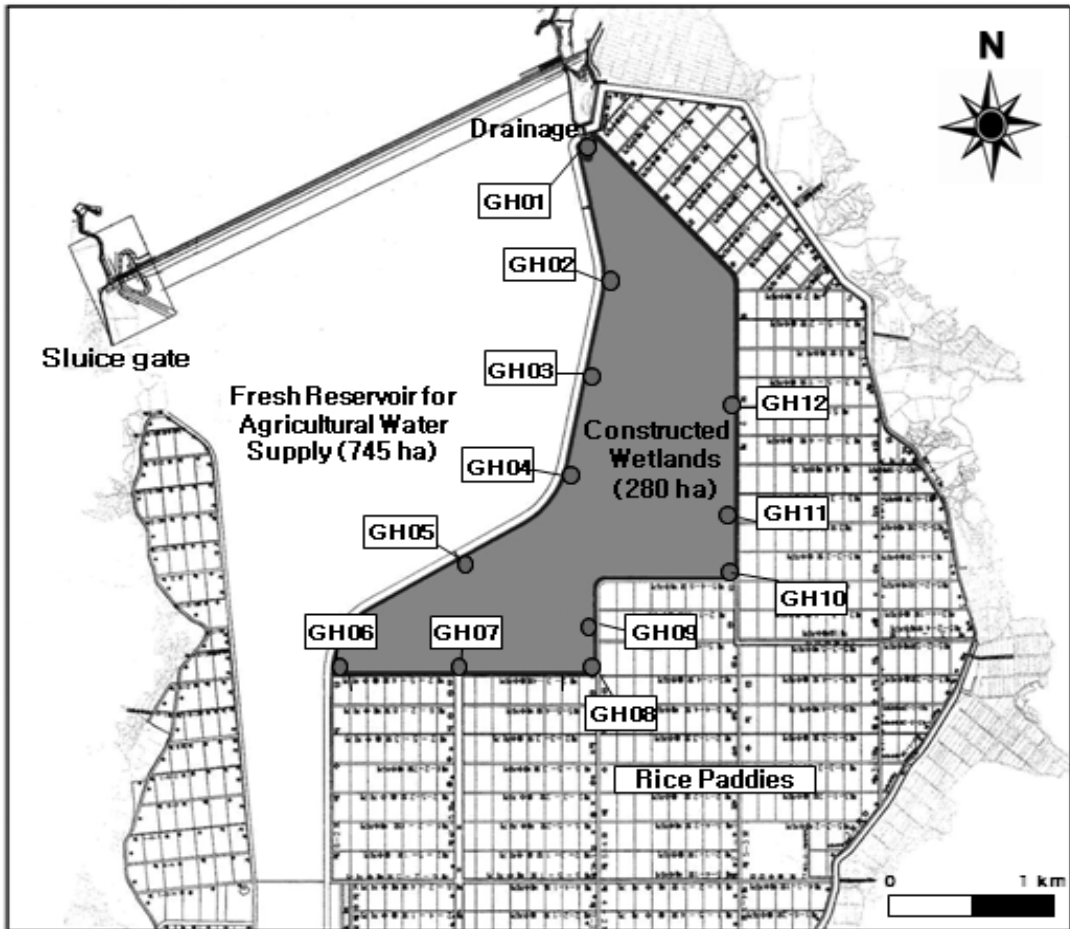


Fig. 1. Water sampling points of the constructed wetlands established along the freshwater reservoir in Goheung Bay. GH01: effluent, GH02~GH05: in wetlands, GH08~GH12: influent from rice paddies.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 현장수질 측정

고흥만 인공습지에서 1차 및 2차 관측 시 현장 측정된 수질성분들이 Table 1에 정리되어 있다. 인공습지 내 5개 지점(GH01~05)의 평균수온은 14.7℃(1차 관측)와 2.4℃(2차 관측) 이었으며, 주변 농경작지에서 유입되는 지점(GH06~12)에서는 18.19℃(1차 관측)와 3.30℃(2차 관측) 이었다. 계절적인 영향으로 인해 1차 관측 시의 수온이 높게 나타났으며, 인공습지 외부에서 유입되는 지점들이 습지 내부에 비해 평균적으로 3.5℃와 0.9℃ 정도 높았다.

인공습지 내 평균 pH는 8.35와 8.28 이었으며, 유입지점에서는 8.78과 8.53으로 나타났다. 측정 시기별 변화는 1차 관측 시에 약간 높게 나타난 것은 식물 플랑크톤의 활동이 겨울에 비해 온도가 높은 늦봄에 왕성하기 때문이며, 식물 플랑크톤의 광합성 작용으로 인해 수중의 HCO<sub>3</sub>와 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 등이 소모되고 pH가 상승하게 된 것이다(함중화 외, 2004). 인공습지에서보다는 유입수의 pH 값이 평균적으로 높았으며, 특히 GH09 지점에서는 10.49와 9.14로서 매우 높았다. 현장 측정시에 GH09 지점에서 녹조류가 다량 서식하고 있었으며, 이로 인한 광합성 작용으로 인해 pH 값이 높게 나타난 것으로 판단된다.

용존산소(DO)는 수중에 녹아있는 산소의 양으로서 수중생물의 생육과 밀접하고 하천 또는 호소의 자정능력을 판단하는 주요 인자이다. 인공습지 내에서 측정된 용존산소의 평균은 1차 관측 시 9.66 mg/L, 2차 관측 시에는 10.98 mg/L로서 호기성 상태를 보였다. 인공습지 내 용존산소의 농도가 1월에 높게 나타난 것은 기온의 저하로 산소를 소모하는 미생물의 활동이 감소되고, 또한 산소의 수중 용존포화농도가 높아졌기 때문으로 판단된다(함중화 외, 2004). GH06~12 지점에서 측정된 용존산소의 평균은 1차 관측 시 13.65 mg/L, 2차 관측 시에는 11.04 mg/L로서 인공습

지 내에서보다 높은 값을 보였다. 이는 유입지점에는 조류가 번성하고 있었으며, 이로 인해 식물 플랑크톤의 광합성이 활발하여 수중의 산소량이 증가하였을 것으로 판단된다. 또한, 상대적으로 기온이 높았던 3월에는 1월에 비해 조류가 더욱 번성하여 용존산소량이 상대적으로 높았다.

전기전도도(EC)는 물속에 녹아있는 이온의 양과 각 이온의 전기를 운반하는 속도에 지배되고, 물속의 용존이온량을 간접적으로 비교하는데 이용된다(전세진 외, 2008). 인공습지 내 전기전도도의 평균은 1차 관측 시 1561 uS/cm, 2차 관측 시에는 2636 uS/cm 이었으며, 유입지점들에서는 1차 관측 시 6665 uS/cm, 2차 관측 시에 8903 uS/cm로 나타났다. 1차 관측 시에 비해 2차 관측 시의 인공습지 수위가 하강하고 유입지점들의 유량이 감소하여 용존이온이나 고용물질의 상대적인 밀도가 증가하였기 때문에 전기전도도가 높게 나타난 것으로 사료된다.

본 연구지역은 고흥만 간척지로서 이전에는 갯벌 지역이었기에 인공습지 저면과 농경작을 위해 매립한 복토층 아래 토양은 염분이 축적되어 있을 것으로 판단되어, 측정지점별 염분도를 관측하였다. 인공습지 내에서의 평균적인 염분도는 1차 관측 시 1.0 ppt, 2차 관측 시에는 1.6 ppt 이었으며, 유입지점들에서는 1차 관측 시 4.0 ppt, 2차 관측 시에 5.2 ppt로 나타났다. 유입지점들에서의 염분도가 인공습지 내에서 보다 3배 이상 높게 나타났으며, 이는 농경작지 하부 토양층에서 축적되어 있던 염분들이 지속적으로 용출되고 있기 때문인 것으로 판단된다.

인공습지와 유입지점들에서 2회 관측된 측정지점별 현장수질의 변동그래프에 의하면, 5개 성분 에 대한 인공습지와 유입지점들의 수질변동 차이를 확연하게 알 수 있다(Fig. 2). 인공습지 내 5개 지점에서 측정된 성분값들은 관측 시기별로도 거의 유사하거나 상대적으로 적은 변화를 보였으나, 유입지점들에서 측정된 7개 지점의 수질성분 값들은 관측 시기에 따른 변화가 크게 나타났다.

Table 1. Field measurement results in constructed wetlands

Components	Measured Date	GH01	GH02	GH03	GH04	GH05	Avg. (Inflow water)	
Temp. (oC)	15 Mar 2008	13.5	15.0	14.3	14.4	16.3	14.7	
	10 Jan 2009	1.3	2.9	2.5	2.8	2.5	2.4	
pH	15 Mar 2008	8.22	8.30	8.41	8.43	8.37	8.35	
	10 Jan 2009	8.13	8.39	8.35	8.32	8.20	8.28	
DO (mg/L)	15 Mar 2008	8.70	10.07	9.60	10.00	9.94	9.66	
	10 Jan 2009	10.68	11.47	11.07	11.03	10.66	10.98	
EC (uS/cm)	15 Mar 2008	1557	1554	1556	1555	1583	1561	
	10 Jan 2009	2750	2610	2620	2650	2550	2636	
Salinity (ppt)	15 Mar 2008	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
	10 Jan 2009	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	
Component	GH06	GH07	GH08	GH09	GH10	GH11	GH12	Avg. (Wetland water)
Temp. (oC)	18.7	17.9	17.4	22.0	16.3	14.8	20.2	18.2
	2.2	-	4.9	2.8	2.8	-	3.8	3.3
pH	8.06	8.67	8.51	10.49	9.29	8.44	7.98	8.78
	8.84	-	8.15	9.14	8.35	-	8.18	8.53
DO (mg/L)	10.04	11.85	12.18	20.70	15.38	12.48	12.95	13.65
	12.28	-	11.47	11.36	11.19	-	8.92	11.04
EC (uS/cm)	8390	1643	5320	1222	4120	5860	20100	6665
	8110	-	18030	797	14400	-	3180	8903
Salinity (ppt)	4.9	1.1	3.1	0.8	2.4	3.4	12.2	4.0
	4.7	-	10.8	0.0	8.6	-	1.9	5.2

### 3.2. 수질분석 결과

고흥만 인공습지에서 1차 및 2차 관측 시 현장에서 채수된 시료의 수질분석 결과들이 Table 2에 정리되어 있다. TOC, Cl-, COD, TSS, T-P 및 T-N 등이 분석되었다.

TOC 성분은 인공습지 내에서 보다 7개 유입지

점에서 1차 관측 시 1.14배, 2차 관측 시에는 2.76배 높게 나타나 주변 농경작지에서 배출되는 유기물질이 인공습지로 유입되고 있음을 알 수 있었다. Cl- 성분도 유입지점에서의 농도가 1차 관측 시 6배, 2차 관측 시에는 4배 정도 높게 나타났으며, 이는 간척사업 시 매립된 토양의 하부에 축적된 염소이온 성분이 계속해서 용출되기 때문이다.

인공습지 내에 비해 유입지점들에서의 COD 값이 1차 관측 시 1.37배, 2차 관측 시에는 1.49배 정도 높게 나타났다. 이는 주변 농경작지에서 배출된 오염물질들이 인공습지로 유입되고 있음을 의미하지만, 오염물질의 정도는 심각한 수준은 아닌 것으로 판단된다. TSS는 인공습지와 유입지점

들에서 2차 관측 시에 높게 나타났으며, 공간적인 차이는 크게 나타나지 않았다. 1차 관측 시 GH05와 GH07 지점, 2차 관측 시에는 GH05, GH06 및 GH08 지점들에서 50 mg/L 이상으로서 호소수 수질기준(15 mg/L 이하)을 3배 이상 초과하였다.

Table 2. Chemical components in water samples of constructed wetland and inflow points (unit : mg/L)

Component	Sampled Date	GH01	GH02	GH03	GH04	GH05	Avg.
TOC	15 Mar 2008	3.5	3.35	3.73	3.64	9.48	4.74
	10 Jan 2009	10.25	6.45	10.03	14.22	9.61	10.11
Cl-	15 Mar 2008	370	350	340	350	350	352.00
	10 Jan 2009	994	919	852	951	727	888.60
COD	15 Mar 2008	3.98	4.62	3.84	4.10	6.50	4.61
	10 Jan 2009	3.04	3.52	2.72	2.56	4.80	3.33
TSS	15 Mar 2008	11	4	11	17	116	31.80
	10 Jan 2009	21	39	16	33	62	34.28
T-P	15 Mar 2008	N.D.	1.49	0.52	0.45	3.35	1.16
	10 Jan 2009	0.10	0.15	0.03	0.04	1.90	0.44
T-N	15 Mar 2008	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.00
	10 Jan 2009	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.25	0.45

Component	GH06	GH07	GH08	GH09	GH10	GH11	GH12	Avg.
TOC	3.78	5.77	4.14	6.15	9.15	4.69	4.15	5.40
	41.86	-	36.89	-	18.10	-	14.93	27.94
Cl-	1950	370	1750	290	1100	1500	7800	2108.57
	2,623	-	6,678	348	5290	-	3568	3701.40
COD	8.60	4.19	6.00	4.70	6.80	9.20	4.80	6.33
	5.92	-	6.40	4.48	4.32	-	3.68	4.96
TSS	4	53	1	1	14	9	7	12.71
	50	-	85	8	30	-	18	38.26
T-P	15.09	1.49	1.97	1.47	2.17	1.30	1.19	3.53
	0.73	-	1.48	1.78	1.60	-	1.50	1.42
T-N	N.D.	N.D.	N.D.	4.26	0.16	0.29	N.D.	0.67
	14.32	-	8.70	5.62	7.30	-	10.39	9.27

호소의 부영양화는 탄소, 질소, 인 등과 같은 영양물질에 의해 발생하며, 탄소원은 수중의  $\text{HCO}_3^-$ 와  $\text{CO}_3^{2-}$ 에 의해 공급되므로 부영양화의 주요소는 질소와 인이다. 본 연구지역에서는 농경작지에서의 시비와 농약 사용, 생활하수 등의 인간 활동에 의해 질소와 인이 인공습지로 유입되고 있다. 인공습지에서 측정된 T-P 성분의 평균값은 1차 관측 시 1.16 mg/L, 2차 관측 시에는 0.44 mg/L로 나타났으며, 유입지점들에서는 1차 관측 시 3.53 mg/L, 2차 관측 시에는 1.42 mg/L 이었다. 인공습지 내 T-N 성분의 평균값은 1차 관측 시 0.00 mg/L로서 분석한계 이하의 농도를 보였으며, 2차 관측 시에는 0.45 mg/L로 나타났으며, 유입지점들에서는 1차 관측 시 0.67 mg/L, 2차 관측 시에는 9.27 mg/L 이었다. 유입지점들에서 T-P와 T-N 성분의 평균값이 인공습지 내에서보다 3배 이상 높게 나타났으며, 이는 주변 농경작지에서의 시비와 농약에서 유래된 질소와 인 성분이 인공습지로 유입되고 있음을 의미한다. 또한 유입된 질소와 인 성분은 인공습지의 정화능력에 의해 농도저감이 발생하고 있는 것으로 판단된다. 질소 성분은 2차 관측 시에, 인 성분은 1차 관측 시에 상대적으로 높게 나타났다.

인공습지(GH01~05)와 유입지점들(GH06~12)에서 관측된 6개 성분들이 인공습지 내에서보다는 유입지점들에서의 시간적인 변화 폭이 크게 나타났으며, 유입지점들에서 T-P의 변화폭이 가장 적게 나타났다.

### 3.3. 인공습지에 의한 정화효율

주변 경작지로부터 인공습지로 유입되는 유입수에 함유된 TOC, Cl-, COD, TSS, T-P, T-N와 인공습지의 수중에 함유된 TOC, Cl-, COD, TSS, T-P, T-N 성분의 농도를 이용하여 인공습지의 정화효율을 비교 분석하였다(Table 3). 정화효율은 유입수의 농도(GH06~12)과 인공습지의 농도(GH01~05)의 차이를 유입수의 농도로 나누어 백분율로 산정하였다(Matamoros et al., 2008). 인

공습지에 의한 주변 유입오염물질의 정화효율은 Cl-, T-P 및 T-N 성분에서 높게 나타났으며, TSS 성분은 농경작에 의한 영향보다는 바람에 의한 파랑으로 습지 바닥 퇴적물의 재부유와 낚시 등에 의한 영향이 높은 것으로 나타났다. 인공습지에 의한 TOC 성분의 저감율은 1차 관측에 비해 2차 관측 시에 5배 이상 높았으며, 이는 2차 관측 시 유입수 내 유기오염물질의 농도가 높아 정화효율이 높게 나타난 것으로 판단된다.

본 연구에서 T-P 및 T-N 성분의 인공습지에 의한 정화효율이 높은 것은 유입수 내 이들 성분의 농도가 낮고 유입량이 적었기 때문에, 인공습지에 고인 다량의 물에 의한 희석(dilution) 효과가 크게 작용한 것으로 판단된다. 유입수 내 평균 농도가 2,100 mg/L와 3,700 mg/L 정도이었던 Cl- 성분에 대한 인공습지의 정화효율 또한 희석에 의한 효과가 컸었던 것으로 판단된다. 함중화 등(2004)에 의하면 인공습지에 의한 유입하천수 내 T-P와 T-N의 정화효율은 각각 52~60%와 39~49%의 범위로 나타났다. 본 연구에서 인공습지로 유입되는 T-P와 T-N 성분의 농도가 높음에도 불구하고 정화효율이 높은 것은 유입수의 양이 소량이고 인공습지의 수량이 풍부하였기 때문이다. 인공습지에 의한 주변 유입수 내 오염물질의 정화효율을 성장기(3월~11월)와 동절기(12월~2월)로 구분하여 관측한 함중화 등(2005)의 연구에 의하면, 인공습지에 의한 정화효율은 성장기와 동절기에 T-P 성분은 48%와 53%, T-N 성분은 54%와 33% 정도인 것으로 보고되었다. 본 연구에서도 T-P 성분의 정화효율이 3월에 비해 1월에, T-N 성분은 3월에 약간 높게 나타나 함중화 등(2005)의 연구결과와 동일한 경향을 보였다. 습지로 유입된 질소의 제거는 질산화와 탈질화를 통해 이루어지며(Seitzinger, 1988), 이와 관련된 미생물은 온도의 영향을 받기 때문에 동절기에 비해 성장기의 정화효율이 높아지는 것이다(Brodrick et al., 1988). 습지에서 수생식물 그 자체는 수처리에 있어서 큰 기여를 하지 않고 수처리 능력을 향상시키기 위한 환경을 개선하는 역

할을 하는 것으로 보고되었으며(Tchobanoglous, 1987), 또한 습지식물이 직접적으로 흡수하는 인의 양은 매우 적은 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서 인공습지에 의한 T-P 성분의 정화효율이 높은 것은 다량의 인공습지에 의한 인 성분 농도의 희석효과에 의한 것으로 판단된다.

Table 3. Removal efficiency of chemical components by constructed wetland (unit : %)

Component	15 Mar 2008	10 Jan 2009
TOC	12	64
Cl-	83	76
COD	27	33
TSS	-150	10
T-P	67	69
T-N	100	95

## 5. 결 론

본 연구에서는 전라남도 고흥만 간척지 내 인공습지수와 주변 유입수의 수질특성을 현장관측과 실내분석을 통해 파악하였으며, 그 결과를 이용하여 인공습지에 의한 유입수 내 오염물질에 대한 정화효율을 분석하였다.

1. 고흥만 간척지 내 인공습지에서 2008년 3월 15일과 2009년 1월 10일 현장 관측된 수질 성분들은 수온, pH, DO, EC 및 염분도 이었다. 수온은 계절적인 영향성이 뚜렷하게 나타났다. 인공습지수와 유입수에서는 계절적 영향에 의해 평균 3.5℃와 0.9℃의 차이를 보였다. 유입수의 pH 값이 인공습지수에 비해 높게 나타났으며, 이는 유입지점에 다량 서식하고 있는 녹조류에 의한 광합성으로 인해 pH 값이 높아진 것으로 판단된다. 유입수의 평균 용존산소량이 인공습지 내에서 보다 높았으며, 유입지점에는 조류가 번성하

여 식물 플랑크톤의 광합성으로 인한 수중의 산소량이 증가하였기 때문이다. 인공습지 내에 비해 유입수의 평균 전기전도도가 4배 정도 높았으며, 이는 인공습지 주변 농경작지에서 침출되어 나오는 오염물질에 의한 것으로 판단된다. 유입수 내 염분도가 인공습지 내에 비해 평균 3배 이상 높게 나타났으며, 이는 본 연구지역 내 농경작지 매립토층 하부에 축적되어 있던 염분들이 용출되고 있기 때문이다.

2. 인공습지수 비해 유입수 내 TOC 성분의 평균 농도가 1차 관측 시 1.14배, 2차 관측 시에는 2.76배 높았으며, 이는 주변 농경작지의 유기물질이 인공습지로 유입되고 있음을 의미한다. 간척사업 시 매립된 토양 하부에 존재하는 염소이온으로 인해 유입수 내 염소이온 농도가 1차 관측 시 6배, 2차 관측 시에는 4배 정도 높게 나타났다. 유입수 내 COD 성분이 인공습지에 비해 1차 관측 시 1.37배, 2차 관측 시에는 1.49배 정도 높게 나타났다. 인공습지수와 유입수 내 TSS 농도는 2차 관측 시에 높게 나타났으며, 공간적인 차이는 크게 나타나지 않았다. 유입수 내 T-P와 T-N 성분의 평균값이 인공습지수에 비해 3배 이상 높았으며, 이는 주변 농경작지에서 시비와 농약에서 기원된 질소와 인 성분이 인공습지로 유입되었기 때문이다. 모든 성분들의 농도가 인공습지수에서 낮은 것은 유입수 내 오염물질들이 인공습지에 의해 저감되고 있음을 의미한다.
3. 인공습지로 유입되는 주변 오염물질에 대한 인공습지의 정화효율을 TOC, Cl-, COD, TSS, T-P, T-N 성분의 평균농도 비율로서 분석하였다. 인공습지에 의한 TOC 성분의 농도저감율은 유입수 내 유기오염물질이 고농도이었던 2차 관측 시에 매우 높았으며, 고농도 소량의 오염물질이 다량의 인공습지수에 의해 희석되어 정화효율이 높게 나타났다. 본 연구에서 T-P, T-N, Cl- 성분의 인



공습지에 의한 정화효율이 높은 것은 소량의 고농도 오염물질이 인공습지에 고인 다량의 물에 의해 희석되었기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 T-P 성분의 정화효율이 3월에 비해 1월에, T-N 성분은 3월에 약간 높게 나타났으나, 기존의 연구들에 비해 정화효율이 상대적으로 매우 높아 생장기와 동절기에 의한 정화효율 특성이 뚜렷하게 나타나진 않았다.

### 감사의 글

본 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-2101)의 지원으로 수행되었으며, 지원기관에 감사드립니다. 그리고, 본 논문의 심사애 수고를 아끼지 않으신 심사위원님들에게도 감사드립니다.

### 참고 문헌

강동환, 김성수, 권병혁, 김일규, 2008, 고흥만 인공습지의 토양유기탄소와 이산화탄소 변동 관측, 수산해양교육연구, 20(1), 58-67.

강호정, 송근예, 2004, 인공습지를 이용한 수처리 효율 및 향후 연구제언, 한국습지학회지, 6(2), 57-63.

나규환, 오종민, 이장훈, 최한영, 황응주, 2007, 수질오염학, 신광문화사, 269p.

남귀숙, 배요섭, 김형중, 이상준, 이광식, 2004, 농업용 저수지 수질개선을 위한 지하흐름 갈대 인공습지의 적용, 한국습지학회지, 6(4), 59-69.

박재홍, 권수열, 2005, 인공습지에 의한 축산폐수의 처리시 계절적 영향, 한국습지학회지, 7(3), 33-39.

양재삼, 2000, 갯벌, 어떻게 할 것인가?, 첨단환경기술, 9, pp. 2-10.

전세진, 송재준, 유근우, 이용석, 장봉기, 정종태, 한동준, 허우명, 2008, 수질오염개론, 신광문화

사, 258p.

최인욱, 권순국, 2002, 농촌유역의 비점원 오염 수질관리를 위한 인공습지 설계모형, 한국농공학회지, 44(5), 96-105.

함중화, 윤춘경, 구원석, 김형철, 신현범, 2004, 인공습지를 이용한 하구담수호 유입하천수 수질개선 현장실험결과 분석, 한국농공학회논문집, 46(5), 141-153.

함중화, 2005, 자유수면형 인공습지에 의한 저농도 고유량의 하천수질개선 효과 분석, 한국농공학회논문집, 47(1), 79-91.

Park, S. U., and I. H. Yoon, 1987, Diurnal and seasonal variations of radiative fluxes on inclined surface, J. Korean Meteor. Soc., 23(3), 40-53.

Brodick, S. J., Cullen, P. and Maher, W., 1988, Denitrification in a natural wetland receiving secondary treated effluent, Water Res., 22(4), 431-439.

Brodie, G.A., Hammer, D.A., Tomljanovich, D.A., 1989, Treatment of acid drainage with constructed wetland at Tennessee valley authority 950 coal mine. In: Hammer, D.A. (Ed.), Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Lewis, Chelsea, pp. 211-219.

Cooper, P., Smith, M., Maynard, H., 1997. The design and performance of a nitrifying vertical-low reed bed treatment system. Wat. Sci. Tech. 35, 215-221.

D'Angelo, E.M., Reddy, K.R., 1994a. Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hypereutrophic lake water: Distribution of dissolved nutrients in the soil and water column. J. Environ. Qual. 23, 928-936.

D'Angelo, E.M., Reddy, K.R., 1994b. Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hypereutrophic lake water: Role of inorganic electron acceptors in nutrient

- release. *J. Environ. Qual.* 23, 937-943.
- Davido, R.L., Conway, T.E., 1989. Nitrification and denitrification at Iselin marsh: pond-meadow facility. In: Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for wastewater Treatment*. Lewis, Chelsea, pp. 477-483.
- Dombush, JX, 1989. Natural renovation of leachate-degraded groundwater in excavated ponds at a refuse landfill." In: Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Chelsea, Lewis, pp. 743-752.
- DuBowry, P.L, Reaves, R.P., 1994. Constructed wetlands for animal waste management. In: *Proceedings of a workshop*, 4-6 April. Purdue University, West Lafayette IN.
- Howard, E.A., Emerick, L.C., Wildeman, T.R., 1989. Design and construction of a research site for passive mine drainage treatment in Idaho Springs, Colorado. In: Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Lewis, Chelsea, pp. 761-764.
- Hsieh, Y.P., Coultas, C.L., 1989. Nitrogen removal from freshwater wetlands: nitrification-denitrification coupling potential. In: Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Lewis, Chelsea, pp. 493-507.
- Kadlec, R.H, 1989. Decomposition in wastewater wetlands. In: Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Lewis, Chelsea, pp. 459-468.
- Kivaisi, A. K., 2001, The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review, *Ecological Engineering*, 16, 545-560.
- Kleinmann, R.L.P., Girts, M.A., 1987. Acid mine water treatment: an over view of an emergent technology. In: Reddy, K.R., Smith, W.H. (Eds.), *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery*. Magnolia, Orlando, pp. 255-261.
- Koch-Rose, M.S., Reddy, K.R., Chanton, L.P., 1994. Factors controlling seasonal nutrient profiles in subtropical peatland of the Florida Everglades. *J. Environ. Qual.* 23, 526-533.
- Matamoros, V., Garcia, J. and Bayona, J. M., 2008, Organic micropollutant removal in a full-scale surface flow constructed wetland fed with secondary effluent, *Water Research*, 42, 653-660.
- Newman, S., Reddy, K.R., DeBusk, W.X., Wang, Y., Shili, G., Fisher, M.M., 1997. Spatial distribution of soil nutrients in northern Everglades marsh., *Water conservation area 1. Soil Sci. Soc. Am. L.* 62, 1275-1283.
- Reddy, K.R., Delaune, R.D., DeBusk, W.X., Koch, M.S., 1993. Long-term nutrient accumulation rates in the Everglades. *Soil Sci. Soc. Am. L* 57, 1147-1155.
- Reddy, R.K, Wang, Y., Debusk, W.X., Fisher, M.M., Newman, S., 1998. Forms of soil phosphorus in selected hydrologic units of the Florida Everglades. *Soil Sci. Am. J.* 62, 1134-1147.
- Rivera, R, Warren, A., Curds, C.R., Robles, E., Gutierrez, A., Gallegos, E., Caldeffin, A., 1997. The application of the root zone method for the treatment and reuse of highstrength abattoir waste in Mexico. *Wat. Sci. Tech.* 35, 271-278.
- Schreijer, M., Xampf, R., Toet, S., Verhoeven, J., 1997. The use of constructed wetlands to upgrade treated sewage effluents before

- discharge to natural surface water in Texel island, The Netherlands: pilot study. *Wat. Sci. Tech.* 35, 231-237.
- Seitzinger, S. P., 1988, Denitrification in freshwater and coastal marine systems: ecological and geochemical significance, *Limnol. Oceanogr.*, 33, 702-704.
- Staubitz, W.W., Surface, L.M., Steenhuis, T.S., Peverly, J.H., Lavine, M.J., Weeks, N.C., Sanford, W.E., Kopka, R.J., 1989. Potential use of constructed wetlands to treat landfill leachate." In: Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Lewis, Chelsea, pp. 735-742.
- Stengel, E., Schulz-Hock, R., 1989. Denitrification in artificial wetlands. In: Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Lewis, Chelsea, pp. 484-492.
- Tchobanoglous, G., 1987, Aquatic plant system for waste-water treatment engineering considerations, 27-48, In *Aquatic plants for water treatment and resource recovery* (Reddy, K. R. and Smith, W. H.), Magonlia Publishing Inc., Orlando, Florida.
- Trautmann, N.M., Martin Jr, J.H., Porter, K.S., Hawk Jr., K.C., 1989. Use of artificial wetlands for treatment of municipal solid waste landfill leachate. In: Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Lewis, Chelsea, pp. 245-251.
- Von Felde, K., Kunst, S., 1997. N- and COD-removal in vertical flow systems. *Wat. Sci. Tech.* 35, 79-85.
- Watson, J.T., Sherwood, S. C., Kadlec, R.H., Knight, R.L., Whitehouse, A.E., 1989. Performance expectations and loading rates for constructed wetlands. In: Hammer, D.A.(Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Lewis, Chelsea, pp. 319-351.
- Wenerick Jr, S.E., Webster, H.J., Stark, L.R., DeVea, E., 1989. Tolerance of three wetland plant species to acid mine drainage: A greenhouse study. In: Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Lewis, Chelsea, pp. 801-807.
- 논문접수일 : 09년 09월 15일
  - 심사의뢰일 : 09년 09월 16일
  - 심사완료일 : 09년 12월 07일