

# 농업유역 비점원오염 저감을 위한 자유수면형 인공습지 설계인자 평가

Assessment of Free Water Surface Constructed Wetland Design Parameters for the Reduction of Agricultural Nonpoint Source Pollution

장정렬\* (농업기반공사)·권순국(서울대)·최선화(농업기반공사)

Jang, Jeong Ryeol\*·Kwun, Soon Kuk·Choi, Sun hwa

## Astract

The objective of this study is to evaluate design parameters of free water surface constructed wetland for the reduction of agricultural nonpoint source pollution. From literature review, the key design parameters were selected as influent concentration, influent water volume, hydraulic retention time and wetland system arrangement. The design value for each parameter was established after pilot study. Full-scale constructed wetland on the basis of the designed values was constructed to evaluate those reasonableness. The results of this study showed that the designed values for free water surface constructed wetland were appropriate for the reduction of agricultural nonpoint source pollution.

Key words : free water surface constructed wetland, agricultural nonpoint source pollution

## 1. 서 론

근래 농업용수 수질오염에 대한 우려와 관심이 높아지고 있다. 농업용수 수질오염원 중에서 비점원오염(nonpoint source pollution, NPSP)의 기여도가 증가하고 있는 추세이다. 근래 NPSP의 처리를 위해 생태공학적인 방법에 대한 관심이 높아지고 있으며 그 중에서 인공습지(constructed wetland, CW)가 구미를 비롯한 세계 여러 나라에서 많이 이용되고 있다. 습지는 영양염류의 제거 능력과 유량 및 수질의 변화에 대한 적응력이 높다는 장점과 함께 양생생물 서식처 제공, 경관개선, 홍수조절과 같은 간접적인 효과도 높고 유지관리비용과 설치비용이 상대적으로 적다는 장점 등 기존 기계적 처리방법이 가진 문제점의 대안으로 제시되고 있다(박병훈 등, 2000; Kadlec and Knight, 1996; Reed et al., 1995).

북미에서 운영되고 있는 인공습지는 주로 생활하수, 축산폐수, 산업폐수, 하수처리장 방류수 고도처리 등에 많이 이용되는 하수처리용 인공습지(constructed wastewater wetland, CWW)가 대부분이며, 근래에는 도시지역과 농업지역의 NPSP 처리에도 많이 이용되고 있다(Carleton et al., 2001; USEPA, 2001; 2003). NPSP의 유출은 기후조건 등 지리적 위치에 지배되고, 자연적인 인자에 크게 변화되기 때문에 유량 및 수질 조건이 일정하게 유지되는 CWW와는 달리 비점원오염처리습지(constructed stormwater wetland, CSW)의 설계인자에 대한 유익한 정보가 아직까지는 부족한 실정이다(Bingham, 1994).

최근 간척담수호의 수질보전을 위하여 수백 ha에 이르는 대규모 CSW 조성계획이 추진 중에 있다. 우리나라에서 대규모 CSW 조성은 시화갈대습지가 유일하며 또한 설계인자에 대한 연구가 부족한 상태이다. 따라서 적절하지 않은 인공습지 설계는 막대한 경제적 손실과 목표로 하는 오염물질 저감효과를 달성하지 못하여 수질관리에 실패를 초래할 수도 있다. 본 연구의 목적은 농업유역 비점오염물질 저감을 위한 자유수면형 인공습지의 주요 설계인자의 도출과 그 적정성을 평가하는데 있다.

Table 1 Description of the study areas

Objectives	Study area	Location	Study period
○ Study on the runoff characteristics of agricultural NPSP	○ Wanggung reservoir (WGS1, WGS2) ○ Manun reservoir (MUS1, MUS2)	○ Jeonbuk Iksan city ○ Kyeongbuk Andong city	○ 1999.5~1999.10 ○ 3 rainfall events at each area
○ Study on pollutants removal effects with differnt wetland system arrangements	○ Seokmun estuary freshwater reservoir(SMW1, SMW2, SMW3, SMW4)	○ Chungnam Dangjin gun	○ construction: 2000~2001 ○ monitoring: 2002.10~2003.12
○ Study on pollutants removal effects with varied HRTs	○ Masan reservoir (MSW)	○ Chungnam Asan city	○ construction: 1997~1999 ○ monitoring: 2003.4~2003.11
○ Application and evaluation of constructed wetland design parameters	○ Gamdon reservoir (GDW)	○ Jeonnam Muan gun	○ construction: 2001~2003 ○ monitoring: 2004.~2004.9

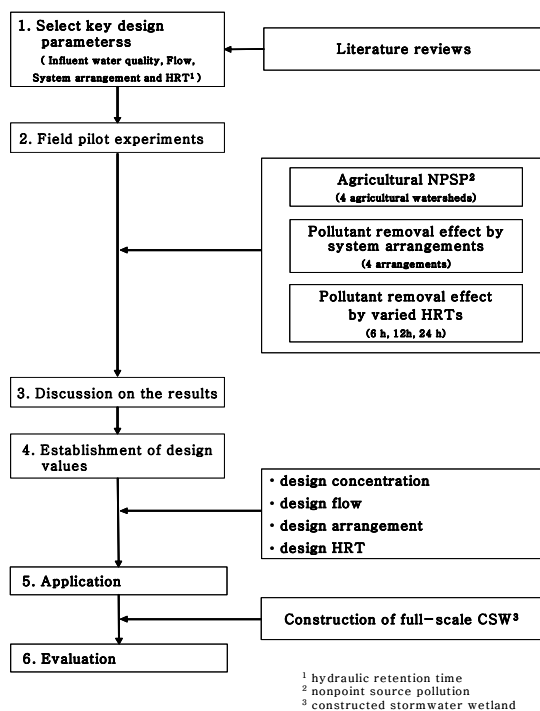


Fig. 1. The study procedure

## 2. 재료 및 방법

본 연구의 수행절차는 Fig. 1과 같이 먼저 문헌고찰을 통하여 농업유역 비점오염 저감을 위한 자유수면형 인공습지의 주요 설계인자를 추출하고, 실험을 통하여 추출된 설계인자의 우리나라 특성에 맞는 값을 설정한 후 실제로 현장에 적용하여 그 타당성을 평가하는 단계로 이루어져 있다. 실험 및 현장적용 지구의 위치는 Fig 2와 같고 연구 목적과 연구기간은 Table 1과 같다.

문헌고찰을 통하여 주요설계인자로서 유입수질, 처리유량, 습지 시스템배열 및 습지의 체류시간이 선정하였다. 설계수질 및 설계유량 설정 위해서는 4개의 농업 소유역에서 강우시 수질-유량 조사와 국내 선행연구 자료를 이용하였다. 인공습지 시스템배열은 대조구와 식생구(갈대, 애기부들), 개방수역과 식생구의 배열순서, 연못-습지배열에 대하여 오염물질 저감효과를 평가하여 설정하였다. 설계체류시간 설정을 위해서는 저농도 고유량이라는 비점원오염 유출특성을 고려하여 복미습지의 5~14일 보다 훨씬 짧은 6 h, 12 h, 24 h로 운전한 결과를 이용하여 설정하였다. 농업 소유역을

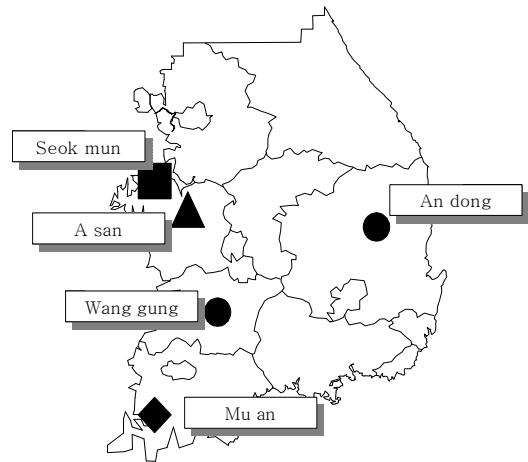


Fig. 2 The study sites; ●) study for the agricultural NPS pollution runoff characteristics, ■) study for the wetland system arrangements, ▲) study for the wetland hydraulic retention times, ◆) evaluation for the designed wetland parameters

선정하여 설정된 설계 값을 이용하여 인공습지를 조성하여 그 적정성을 평가하였다. 오염물질 저감효과 및 수질분석 항목은 COD, SS, T-N, T-P이며 분석방법은 수질오염공정시험법 및 Standard method에 준하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1 인공습지 설계인자 추출

습지는 조성목적이나 기능에 따라 수질개선폰용, 생태복원용, 관광용으로 크게 분류할 수 있다. 따라서 인공습지를 조성할 경우에는 조성목적에 따른 주 기능을 최대한 발휘하고 유지할 수 있도록 이들 습지 구성요소를 적절히 조절할 수 있는 설계기법이 필요하다. 자연습지를 오염물질처리에 적용하기 위해서는 여러 가지 공학적 문제점과 부딪히게 되며 이러한 공학적 문제점들 중에서 체류시간(HRT)과 수리부하율(HLR) 등과 같은 수리수문 현상이 가장 지배적일 수 있다(Hayes et al, 2000).

NPSP 대책 결정에서 가장 어려운 것은 처리해야할 NPSP의 규모추정에 있다(USDA, 1999; 이현동과 배철호, 2002). 따라서 CSW 설계를 위해서는 NPSP의 수질 및 유량의 추정이 중요한 것으로 판단된다. 유입수질은 CSW의 목표수질 설정에 이용되며 유입량은 CSW의 규모추정과 밀접한 관계가 있다. CW에서는 여러 가지 물리, 화학, 생물학적 복합작용에 의해 오염물질이 저감되는데 이러한 각 반응작용은 오염물질 저감에 필요한 최소한의 HRT를 요구하기 때문에 HRT의 설정은 저감하고자 하는 오염물질의 종류와 수준에 따라 달라질 수 있다(Hays et al., 2000). 또한 습지에서 식물이 오염물질 제거기작에 미치는 역할은 습지시스템의 배열설계에 따라 달라질 수 있다(Jenssen et al., 1994). 이상의 선행연구 결과를 고찰하여 볼 때, CSW의 설계에서 가장 중요한 인자는 설계유량, 설계수질, 체류시간 및 시스템배열로 판단된다.

#### 3.2 설계인자 설정

##### 3.2.1 설계수질

연구대상 4개의 농업 소유역에서 유량-수질 특성은 유역특성과 강우강도 등에 따라 차이는 있었으나, 다른 연구(김유리, 2003; 김성수 등, 2001; 신은성 등, 2001; 신창민, 2004; 유명진 등, 2000; 이은형과 서동일, 2003; 이현동 등, 2001)에서 나타난 농업유역 NPSP의 공통된 유출특성을 나타내었다. 본 연구의 4개 농업유역과 타 연구를 포함한 10개 농업유역에서 58회의 강우사상의 수질 조사자료(농업기반공사, 2002) 중에서 10~50 mmmm사이의 강우사상에 해당하는 유출수질을 강우사상평균농도(event mean concentration, EMC)로 특성화하였다. 설정된 EMC(n=34, p<0.05)는 각각 COD는 10.0±8.0 mg/L, T-N은 3.3±2.6 mg/L, T-P는 0.6±0.5 mg/L, SS는 51.5±69.7 mg/L이다. 따라서 이를 농업유역 비점오염저감을 위한 인공습지의 설계수질로 설정하였다.

##### 3.2.2 설계유량

CSW의 규모설정 방법으로 강우심법과 유역면적비법이 있다. 강우심법은 기준 강우량의 유출량을 처리대상 유량으로 정하는 방법이며 유역면적비법은 유역면적의 일정비율을 습지표면적으로 정하는 방법이다. 강우심법으로는 13 mm(Reed et al., 1995), 30 mm(장정렬 등, 2000), 2년빈도 일강우량(USEPA, 1986), 30 mm와 K-C\*(Kadlec, 1996) 반응모델을 이용한 방법(최인욱과 권순국, 2002), 90% 강우처리기준(환경부, 2003)등이 있다. 유역면적비법으로는 1~5%(환경부, 2003; MDE, 1987; Kadlec and Knight, 1996)가 권장되고 있다. 장정렬 등(2000)이 제안한 30 mm는 90% 강우유출수처리기준(환경부, 2003)과 유사한 개념으로서 우리나라 일강우량의 91%에 해당하며 본 연구의 10개 농업유역 51회 강우사상 조사에서 평균강우량 30.3 mm과도 같다. 따라서 농업유역 NPSP 저감을 위한 인공습지의 설계유량은 AMC(III) 조건에서 30 mm의 강우시 SCS법에 의한 유역의 직접유출량으로 추정하여도 무리는 없을 것으로 사료된다.

##### 3.2.3 습지배열

인공습지 배열기법 연구결과는 조사 시기에 따라 변동은 있으나, 식생구와 대조구의 뚜렷한 오염물질 제거효율의 차이는 없었으며, 개방수역-식생구역의 위치배열이 식생구-개방수역 위치배열보다 오염물질 제거효율이 높았고, 연못-습지 시스템배열의 오염물질 제거효율이 조사항목 모두 90% 이상으로 가장 높게 나타났다(Table 2). 습지단독 보다는 연못-습지배열의 오염물질 저감효과가 높은 것은 타 연구결과와도 일치하였다(Martin, 1988; USEPA, 1999). 따라서 연못-습지배열을 CSW의 설계배열로 설정하였다.

Table 2 Summary of pollutants removal characteristics in the pond-wetland system arrangement

Constituents	SMRR (kg/ha/d)	Eff. <sup>1</sup> (%)
COD	30.92±41.21	89
SS	53.32±60.16	94
T-N	27.71±30.53	96
T-P	1.79±1.73	97

note) <sup>1</sup> ROL efficiency(Matine, 1988)

### 3.2.4 체류시간

본 연구에서는 농업구역의 비점원오염 처리를 위해서 HRT를 복미 인공습지에서는 권장하는 5~14일 보다 훨씬 짧은 6h, 12h, 24h를 적용하였다. HRT를 1h, 3h으로 운영한 조건에서 농도저감효율은 HRT가 증가하면서 일부항목의 일부식물에서 높아지는 것으로 나타났으나 모든 식물, 모든 항목에서 증가하지는 않았다(남귀숙, 2003). 그러나, 이러한 경향은 본 연구에서 HRT를 연장함으로써 많이 완화되어진 것을 관찰할 수 있었다. 본 연구에서 HRT를 6h, 12h, 24h의 조건별로 운전한 결과, 농도는 HRT가 증가할수록 감소하는 경향이었으나 일정한 값 즉, 배경농도 이하로 낮아지지는 않았다. 오염물질 제거속도 즉, 단위면적당제거량(specific mass removal rate, SMRR)은 HRT가 증가할수록 뚜렷하게 감소하였다. 이는 짧은 HRT에서 더 많은 양의 오염물질을 저감할 수 있다는 의미로서 무리하게 농도를 낮추기 보다는 제거되는 오염물질량이 많은 것이 폐쇄성 수역에서는 유리하다(박병훈 등, 2000; 2001; 장정렬 등 2005; 함종화 등, 2004). 그러므로 농업구역 NPSP 저감을 위한 CSW의 HRT는 6h으로 설정하여도 무리는 없을 것으로 사료된다.

Table 3 Summary of pollutant removal characteristics with HRT 6h, 12 and 24h

Content	HRT 6 h		HRT 12 h		HRT 24 h	
	Eff.(%)	SMRR(kg/ha/d)	Eff.(%)	SMRR(kg/ha/d)	Eff.(%)	SMRR(kg/ha/d)
SS	74.4	273	77.1	140	80.1	72
COD	20.2	32	18.1	14	28.0	10
T-N	22.3	0.584	31.2	0.420	40.4	0.268
T-P	29.7	0.083	36.7	0.049	42.2	0.028

## 3.3 설계인자 평가

### 3.3.1 수질

설계수질에 대한 평가결과, EMC 농도는 COD는 6~28 mg/L, SS는 25~155 mg/L, T-N 5~9 mg/L, T-P는 0.5~1.0 mg/L로서 조사 시기에 따라 변화가 있었지만, 설정된 설계수질 범위를 크게 벗어나지는 않았고 유출특성도 선행연구 결과와 큰 차이가 없었다. Table 4는 설계강우량 30 mm와 유사한 32.5 mm의 강우가 내린 2차 현장조사시 실측한 EMC와 설계수질을 비교한 것이다. 유역의 여러 가지 물리적 인자와 토지이용상태, 강우강도 등의 조건을 고려한다면 실측수질과 설계수질이 큰 차이가 없는 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서 제안한 인공습지 설계수질은 농업구역 비점오

염저감을 위한 인공습지에 적용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.

Table 4 Comparison of the designed and observed concentrations for CSW

Cons. (mg/L)	COD	SS	T-N	T-P
Designed	14	67	4.3	0.8
Observed	11	54	5.0	0.5

### 3.3.2 설계유량

설계유량은 평가지구에서 30 mm 강우시 SCS법에 의해 AMC(III) 조건에서 직접유출량은 약 4.7 ha·m로 추정되었으며, 실측유출량은 Table 5와 같이 32.5 mm에서 8.3 ha·m로서 추정치와 실측치 사이에 차이가 있었다. 이는 현장조건의 차이(상류 저수지 방류유무)가 반영된 것으로 평가지구에서 설계유량과 실측유량의 비교를 통한 적정성은 직접 비교하기가 곤란하나 30 mm 강우기준의 적용이 무리는 아닌 것으로 판단된다.

Table 5 Runoff volumes of the study area during rainfall event

Contents	1st	2nd	3rd
Rainfall	49.0 mm	32.5 mm	47.7 mm
Rainfall duration	24.0 h	9.8 h	9.5 h
mean discharge (ha·m/h)	1.5	0.9	0.3
peak discharge (ha·m/h)	3.9	1.2	0.4
total volume (ha·m)	41.4	8.3	2.6

### 3.3.3 설계배열

Table 6은 설계인자 평가지구(GDW)와 설정연구 지구(SMW)에서 연못-습지 배열의 오염물질 제거효과를 정리한 것이다. SMW는 HRT는 유량조정으로 약 4일로 일정하나 GDW는 자연상태로 운전되어 5h~ 수십일로 변화가 있어 설계배열의 적정성에 대한 직접비교는 어려울 수 있다. 비교 결과, 두 지구에서 유입수의 농도는 다소 차이가 있으나 유출수의 농도는 뚜렷한 차이가 없고 또한 배경농도도 비슷하였다. 이러한 경향은 SS가 더욱 뚜렷하다. SMRR은 COD와 T-P는 두 지구의 결과가 비슷한 수준으로 사료되고, T-N의 SMRR은 GDW가 SMW에 비하여 낮았는데 이는 T-N의 저감효과는 체류시간과 반비례 관계가 있기 때문으로 사료된다. SS의 SMRR은 GDW가 SMW에 비하여 10배이상 높다. 이는 GDW에서 강우시 SS의 저감효과가 매우 높음을 보여준다. 오염물질

Table 6 Summary of pollutant removal characteristics by pond-wetland arrangement in GDW

Site	Const.	Concentration(mg/L)			Mass(kg/ha/d)		Eff. (%)
		influent	effluent	C <sup>*1</sup>	SMLR	SMRR	
Gamdon P-W	COD	7.3±8.5	7.0±3.2	4.0	63.80±143.21	26.58±127.67	77
	SS	57.5±174.5	8.1±5.2	3.0	830.69±2,699.51	757.28±2,638.46	97
	T-N	5.24±0.96	2.13±1.81	0.6	38.03±47.82	14.26±16.45	34
	T-P	0.27±0.49	0.09±0.09	0.03	3.11±7.84	2.39±7.49	92
Seokmun P-W	COD	10.4±10.0	6.9±2.1	4.0	39.58±41.75	31.49±41.24	89
	SS	16.1±14.7	9.1±7.2	1.3	40.85±60.78	49.76±58.66	89
	T-N	6.86±4.90	2.36±1.33	0.6	29.93±30.62	27.26±30.74	96
	T-P	0.49±0.44	0.13±0.08	0.02	1.10±1.86	1.74±1.86	97

<sup>1</sup> background concentration

제거효율은 GDW가 COD 77%, SS 97%, T-N 34%, T-P 92%로서 SMW와 비교하여 T-N을 제외한 항목은 큰 차이가 없다. GDW의 T-N의 RE가 34%로 다소 낮게 나타났는데, 이는 언급한 바와 같이 짧은 HRT로 인해 T-N의 저감효과가 낮게 나타난 것이 원인으로 사료된다.

### 3.3.4 체류시간

Table 7은 평가지구(GDW)와 설정지구(MSW)에서 설계체류시간 6h와 비슷한 조건에서 오염물질 제거효과를 정리한 것이다. GDW는 MSW와 같이 양수기에 의한 일정한 유량조건이 아닌 강우시 조사로서 조사시기가 유량 상승기나 하강기나 따라 비슷한 HRT 조건에서도 차이가 있지만 평균적으로 보았을 때, SMRR은 MSW 보다는 모든 항목에서 높음을 알 수 있다. 이는 GDW는 강우시 조사가 주로 적용되어 MSW와 비교하여 유입수질이 서로 다른 것이 영향을 마쳤을 것으로 사료된다. GDW의 평균 RE는 COD -8%, SS 39%, T-N 42%, T-P 42%이며, MSW의 평균 RE는 COD 20%, SS 74%, T-N 22%, T-P 30%로서 GDW의 COD와 SS는 MSW 보다 낮고 T-N과 T-P는 약간 높은 수준으로 나타났다.

Table 7 Pollutants removal efficiency with varied HRTs in GDW

Site	No.	COD		SS		T-N		T-P		HRT (hour)
		SMRR <sup>1</sup> (kg/ha/d)	Eff <sup>2</sup> (%)	SMRR (kg/ha/d)	Eff (%)	SMRR (kg/ha/d)	Eff (%)	SMRR (kg/ha/d)	Eff (%)	
GDW	1	-42	-41	147	34	43	28	0.9	23	5
	2	-37	-65	-23	-14	36	38	0.9	40	7
	3	449	85	9,537	97	37	61	27.3	95	7
	4	-13	-23	70	39	32	39	0.2	11	7
	avg.	72	-8	2,433	39	30	42	5.9	42	7
MSW designed	32	20	273	74	6	22	0.8	30	6	

nOte) <sup>1</sup> specific mass removal rate, <sup>2</sup> (1- SMRR/SMLR)×100

본 연구에서 목적하는 설계조건과 유사한 조건에서의 관측자료를 정리하면 Table 8과 같다. 이는 Table 6의 3번 자료로서 유량 상승기 자료이다. 이때의 유입수질은 COD 34.4 mg/L, SS 638.0 mg/L, T-N 3.95 mg/L, T-P 1.88 mg/L로서 설계수질 보다 훨씬 높은 농도로 유입되었으나, 유출수질은 COD 5.2 mg/L, SS 17.5 mg/L, T-N 1.54 mg/L, T-P 0.10 mg/L로 평시의 유출수질 정도로 크게 낮아진 것을 알 수 있다. 단위면적당 유입부하량(SMLR)도 평시에 비하여 수집에서 수백배로 높아졌으나 SMRR도 비례하여 높아져 오염물질 저감효율은 모두 60% 이상을 나타내어 초기 강우시 인공습지에서 오염물질을 효과적으로 저감시키는 것을 알 수 있다. 또한 인공습지가 수질 및 유량의 충격부하에도 그 대응성이 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 설계HRT 6h에서도 강우시 유출되는 농업유역 NPS 오염물질을 효과적으로 저감시킬 수 있는 것으로 판단된다.

Table 8 Summary of observed value like as the designed value in GDW

Constituents		COD	SS	T-N	T-P	Remark
Concentration (mg/L)	inluent	10.0±8.0	51.5±69.7	3.3±2.6	0.6±0.5	
	designed	34.4	638.0	3.95	1.88	
	observed	5.2	17.5	1.54	0.10	
Mass (kg/ha/s)	SMLR	529	9,806	61	29	
	SMRR	449	9,537	37	27	
Efficiency (%)		85	97	61	95	

## IV. 결론

본 연구에서는 농업유역 비점원오염 저감을 위한 자유수면형 인공습지의 설계인자를 설정하고 그 적정성을 평가하였다. 문헌고찰을 통하여 설계인자를 설정하고 현장실험에 의하여 각 인자의 값을 설정한 후 현장 적용성을 평가한 결과, 본 연구의 결과가 앞으로 농업유역 비점원오염 저감을 위한 인공습지의 계획 및 설계에 유익한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구는 인공습지 조성 초기단계의 자료로서 앞으로 장기적인 모니터링을 통한 평가가 필요하다.