농촌유역 비점오염원처리를 위한 적정 인공습지 규모결정에 관한 연구

A Study of Design Conditions for Decision Area of Constructed Wetland to treat Nonpoint Source Pollution from Agricultural Area

장정렬*(농기공) · 박종민(농림부) · 권순국(서울대) · 윤경섭(농기공)

Jang, Jeong Ryeol · Park, Jong Min · Kwun, Soon Kuk · Yoon, Kyeong Sup

Abstract

Several studies on development of water quality treatment systems by wetlands are on going because of their benefits of low construction cost and high efficiency of waste water treatment. The objectives of this study were to review the necessary contents of survey and design factors for constructing constructed wetlands and to examine the required wetland area to treat non-point source pollution through case studies.

The measurement of water quality and quantity in precipitation period is needed to analyse the inflow characteristics of the non-point pollution and to determine the amount of design flow. The design inflow for constructing constructed wetland was determined to the total runoff from 30mm of daily rainfall in the AMC(Ⅲ) condition of the SCS method and is similar 70% of the annual mean runoff. The natural type wetland system with 0.1m of water depth and 5 hours of detention time was applied. From the results of the case studies, 70% of inflow could be treated and 1~3% of wetland area of the total basin is needed.

Ⅰ. 서 론

농촌지역은 비점오염(Nonpoint source)이 농업용 저수지 입장에서는 수질오염원으로 작용하며 강우시 유역에 쌓여있던 다량의 오염물질이 씻겨 내려와 평시에 비하여 수배에서 수십배의 수준으로 오염부하량이 증가되어 유입되는 특성을 가지고 있으며 질소와 인에 의한 저수지 부영양화(富榮養化) 문제 즉, 수화(水花)현상, 물고기 폐사 등과 같은 수질오염을 야기시킨다. 이러한 농촌지역의 비점오염에 대한 처리는 도시지역에서와 같이 에너지 다용형의 수질정화 기술을 적용하기에는 경제성, 효율성 측면에서 어려운 실정에 있으므로 농업 생태계가 가진 물질 순환기능을 유효하게 활용할 수 있고 지역특성에 맞는 자원순환형 수질정화시스템 개발에 관심이 커지고 있다. 이러한 수질정화시스템 중에서 습지를 이용한 수질정화는 비용이 적게 든다는 경제적인 장점과 방법 자체가 자연생태계의 일부분을 이용하고, 저수지 부영양화현상의 원인물질인 질소와 인등 영양물질에 대한 제거 효율이 효과적이기 때문에 이와 관련된 연구가 국내외에서 많이 진행되고 있다.

2000년도 한국농공학회 학술발표회 논문집(2000년 10월 14일)

습지를 이용한 수질정화는 하수처리장의 방류수나 생활하수처리 등과 같은 고농도 오염물질의 정화에 적용한 사례가 많으나 도시하수에 비하여 상대적으로 저농도이면서 대유량이라는 특징을 가진 농촌지역의 비점오염원 처리에 적용한 사례가 드물어 습지규모나 정화효과를 결정하는데 많은 어려움이 있는 실정이다. 본 연구에서는 농촌지역의 비점오염물질을 처리대상으로 하는 습지설계에 필요한 조사내용 및 설계인자를 현장조사를 통하여 결정하므로서 인공습지 조성계획 수립시 필요한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

Ⅱ. 국내외 인공습지 설계조건 및 처리효율

습지의 규모결정과 관련된 인자는 수리학적 부하율, BOD 부하량, 설계수심, 체류시간, RBS(Ratio of Basin to Storm)등 다양한 변수가 영향을 미친다. 습지에서의 오염물질 제거 능력은 수질농도를 기준으로 한 처리효율(Removal Efficiency)과 단위면적당 오염물질 제거량을 기준으로 하는 제거율(Removal Rate)을 들 수 있다. 인공습지시스템은 자유수면형과 지하흐름형으로 대별할 수 있으며 이들 형식은 지형조건, 오염물질 종류등에 따라 적용될 수 있다.

현재까지 북미등에서의 인공습지는 주로 2차 처리수준으로 처리한 후 방류되는 방류수를 고도처리수준으로 처리하는데 적용된 사례가 대부분이다. 북미에서 운영중인 인공습지시스템 중에서 본 연구에서 처리대상으로 하는 비점오염원인 하천수나 강우유출수를 대성으로 한 것은 정리하면 <Table-2>, <Table-3>과 같다.

<Table-2> Constructed Wetlands to purify River Water in America

System Name (State)	습지 형태	면적 (ha)	식생	No.Cell	Flow (㎥/d)	HRTs (cm/d)	TN In (mg/L)	TN Out (mg/L)	TP In (mg/L)	TP Out (mg/L)
Olentangy River Wetlands (OH)	CON	1.00	MAR	1	1000	3670	4.6	2.5	0.2	0.09
Des Plaines (IL)	CON	10.13	MAR	4	4,635	4.576	2.73	1.34	0.10	0.02

RIV: 하천수, CON-인공습지, MAR-정수식물

<Table-3> Constructed Wetland Systems to treat Stormwater in North America

Type	System Name	State	No.of Storm	Area (Acres)	Capacity (In./Acre)	Removal Efficiency(%)					
						SS	TP	TN	COD	Pb	Zn
Ponds-Wetland System	Lake Munson	FL	3	23393.0		92	64	11	28	55	59
	McCarrons	MN	21	608.0	>0.50	94	78	83	93	90	
	Lake Jackson	FL		2230.0	0.88	96	90	75			
	Highway Site	FL	13	41.6	>1.35	89	36	43		84	67
	Long Lake	ME	11	18.0	2.0	95	92				
Wetland System	EWA6	IL				98	97				
	McCarrons	MN	21	608.0	0.31	87	36	24	79	68	
	Queen Anne's	MD			0.50	65	39	23			
	Tampa Office Pond	FL	3-8	6.3	0.61	64	55				34
	Highway Site	FL	13	41.6	0.81	66	19	30	18	75	50
	Palm Beach PGA	FL		2340.0	2.00	50	62				

<Table-3>은 미국 중동부(mid-Atlantic)에서 운영하고 있는 강우 유출수를 정화하는 습지 및 연못-습지 시스템의 처리효율을 나타낸다. 평균 제거율은 SS 75%, TP 45%, TN 25%가 제거된다.

<Table-4>는 이들 북미지역 인공습지시스템 설계를 위한 대표적인 설계인자의 범위를 보여주고 있

으나, 체류시간 및 오염물질부하율등의 조건이 국내의 농업유역 비점오염원을 처리하기 위한 설계인자로는 적용하기에 무리가 있다고 판단된다.

<Table-4> General Design Criteria of Constructed Wetlands for Conventional Waste Water Treatment System and Effluent from Secondary Treatment

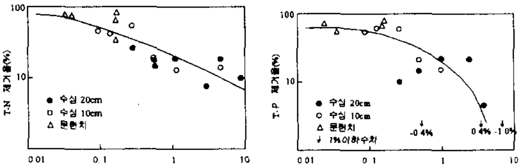
Design Factor	Unit	System Type	
		Free Water Surface System (FWS)	Subsurface Flow System (SFS)
Hydraulic Retention Time	day	4 ~ 15	4 ~ 15
Water Depth	m	0.09~0.06	0.30 ~ 0.8
BOD_5 Loading Rate	kg/ha·d	67	67
Hydraulic Loading rate	$m^3/m^2 \cdot d$	0.014 ~ 0.047	0.014 ~ 0.047
Specific Surface Area	$ha/(10^3 m^3/d)$	7~ 2	7 ~ 2

고광백 외 공역, 1993, 폐수처리공학, p962, 동화기술

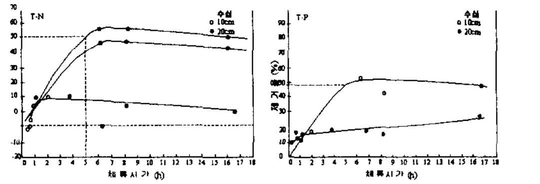
<Table-5> Design Conditions of Vegetation Purification System at San-O Stream in Japan

Design Flow	0.03 m^3/sec
Design Input Water Quality	T-N 3.200 mg/L, T-P 0.510 mg/L
Design Removal Efficiency	T-N 50%, T-P 50%
Actual Removal Efficiency	T-N 60%, T-P 10%
System Area	5,600m^2
System Length	165m
Vegetation Density	Reed(200 stem/m^2)

일본의 하천수를 처리대상으로 하여 실험한 경우를 살펴보면, 가스미가우라호(霞ヶ浦) 유입하천인 산오가와(山王川)의 하천수를 습지를 통해 처리하는 실험을 통해 호소 부영양화의 주 원인인 질소와 인의 제거효율을 수리학적부하량과 체류시간, 습지내 수심에 따라 실험한 결과, <Table-5>과 <Fig-1, 2>에서 보는 바와 같이 수심 10㎝, 체류시간 5시간일 때 질소와 인의 제거효율이 50%에 달한다고 보고하였다. 이때의 습지의 식물은 갈대였으며 자유수면형 시스템이었다.



<Fig-2> Remova Efficiency According to Hydraulic Loading at Sano River Wetland in Japan



<Fig-1> Removal Efficiency according to Water Depth at San-O River Wetland in Japan

국내에서는 소규모 마을하수처리나 혹은 하수처리장의 방류수를 대상으로 한 수질정화습지의 연구가 수행된바 있으나(김등,1998, 심등 1998) 하천수 등 비점오염원을 대상으로 실험한 예는 거의 없는 실정이다(박등 2000, 황등 1999, 농업기반공사 1999). <Table-6>은 하천수를 직접정화하지는 않지만, 저수지물의 수질개선을 위해 연구중인 Bio-Park 인공습지시스템에서 1999년에 조사한 수질정화효과를 정리한 것으로 습지가 조성된지 얼마되지 않아 습지내 토양과 식물성장이 안정되지 않아 높은 정화효과를 나타내지 않으나 습지가 비교적 안정된 상태를 나타내는 '99.9월 이후의 조사결과를 보면 COD는 15.2%, T-N 12.8%, T-P 20.8%의 처리효율을 보이고 있다.

<Table-6> Water Purification Effect of Bio-Park Constructed Wetland Systems at Masan Reservoir

Item	Survey Condition	Flow (m^3/s)	HRTs (hr)	Input (mg/ℓ)	Pollutant Loading (kg/d)	Output (mg/ℓ)	Removal Efficiency (%)	Removal Rate (kg/d)
COD	Condition Ⅰ	0.042	2.9	11.8	40.1	11.3	4.0	1.4
	Condition Ⅱ	0.066	2.2	10.0	57.1	8.5	15.2	9.8
	Condition Ⅲ	0.052	2.6	11.0	48.7	10.1	9.0	5.1
T-N	Condition Ⅰ	0.042	2.9	2.194	7.5	1.850	15.2	0.7
	Condition Ⅱ	0.066	2.2	2.176	11.7	1.911	12.8	1.1
	Condition Ⅲ	0.052	2.6	2.186	9.4	1.877	14.1	0.9
T-P	Condition Ⅰ	0.042	2.9	0.180	0.724	0.146	19.6	0.126
	Condition Ⅱ	0.066	2.2	0.148	0.989	0.122	20.8	0.159
	Condition Ⅲ	0.052	2.6	0.166	0.842	0.135	20.1	0.140

Condition Ⅰ-Average to 8.29.'99, Condition Ⅱ-Average after Sep., Condition Ⅲ-Average Total Duration

Ⅲ. 재료 및 방법

농촌지역 비점오염원 처리를 위한 인공습지 조성 사례조사지는 전라북도 익산시 왕궁면 왕궁저수지, 전라남도 무안군 일로읍 감돈저수지, 경상북도 안동시 풍산읍 만운저수지이다.

습지조성을 위한 기초조사로서 도면 및 답사에 의한 유역조사, 저수지내용적 측량, 수문분석, 유입하천에 대한 평시 5회, 강우시 3회의 수질 및 유량조사를 하여 처리대상으로 하여야 할 비점오염원의 규모와 변동특성을 파악하고자 하였다. 수질분석항목은 수온, COD, T-N, T-P, pH, EC, SS등에 대하여 수질오염공정시험방법에 준하여 현장측정 및 실내분석실험을 시행하였다. 유량조사는 간이 수위표를 설치하여 유속계 및 부자를 이용한 유속을 측정하고 하천단면을 측량하여 유량을 산출하였다. 또한 감돈 저수지의 유입하천에는 압력식 자동수위계를 설치하여 연속적인 수위관측을 통하여 수위-유량곡선과 유량-수질관계를 도출할수 있도록 하였다.

Ⅳ. 조사결과

4.1 유역조사

각 저수지별 제원 <Table-7>, 토지이용현황<Table-8>, 수문학적 특성은 <Table-9>, 오염원 및 배출부하량 조사결과는<Table-11>과 같다.유역면적을 기준으로 한 단위면적당 화학적산소요구량(COD)의 오염배출부하량은 왕궁 22.4 kg/ha-yr, 감돈 82.1 kg/ha-yr, 만운 33.4 kg/ha-yr 수준으로 3개 저수지의 수질오염도와 비슷한 경향을 나타내었다.

<Table-7> Physical Characteristics of Investigation Reservoirs

Reservoir	WaterShed Area (ha)	Benefit Area (ha)	Full water Surface Area (ha)	Storage ($10^3 m^3$)	Length of Dike (m)	Height of Dike (m)	Completion year
Wang-Gung (Iksan City)	866	540	49.9	2,061	343	13	1931
Gam-Don (Muan City)	956	389	35.3	1,667	376	14	1945
Man-Un (AnDong City)	2,363	430	41.6	2,005	148	11	1959

<Table-8> Hydrological Characteristics of the Investigation Reservoirs

Resevoir	Water shed Area (ha)	Annual Rainfall (㎜)	Curve Number CNⅡ	Annual[1] Run-off (10^3㎥)	Annual Runoff ratio (%)	Hydraulic Retention Time (day)	Time of Concentration T_c (min)	Water[2] Use Ratio (%)
Wang-Gung	866	1,287	64	4,638	43.1	162	50.9	81.8
Gam-Don	956	1,114	86	6,084	55.2	100	60.7	44.5
Man-Un	2,363	1,031	74	9,923	39.5	74	68.5	42.6

1) Estimated by Modified-TANK Model (Kim, 1988)

2) Aunnal Mean Irrigation Yield / Annual Mean Inflow × 100 (%)

<Table-9> Pollutant Sources and Loads

Reservoir	People (capita)	Poultry(head)		Industry (each)	Land Use (ha)						Unit Pollutant Load (CODkg/ha · yr)
		Cattle	Pig		밭	논	임야	택지	기타	계	
Wang-Gung	520	149	-	-	16.8	194.4	606.3	9.6	58.3	886.0	22.4
Gam-Don	482	863	3,532	1	80.0	69.3	751.6	21.4	63.4	986.0	82.1
Man-Un	1,178	706	788	-	187	426.7	1,652.4	56.7	53.6	2,376.0	33.4

4.2 강우시 오염물질 유출특성

'99년 5월부터 10월 사이에 3개 저수지의 유입하천 5개 지점에 대하여 3회 수질조사한 결과 중에서 왕궁지의 유입하천인 학현천과 감돈지의 유입하천인 달산천에 대하여 조사한 결과를 요약하면 다음 <Table-11> 와 같다.

<Table-10> The Characteristics of NonPoint Pollution Run-Off During Rainfall Events on the Investigation Streams

Item		Wang-Gung (Hak-Hyeon stream)			Gam-Don (Dal-San Stream)		
		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Run-Off Characteristics	Rainfall(mm)	3.0	15.7	33.8	49.0	32.5	47.7
	Total Runoff Volume(㎥)	1,400	4,327	18,029	414,303	82,592	25,477
	Antecedent No Rainy Day(day)	9	1	2	-	7	18
	Ivestigation duration(hr)	1.4	7	5	24	10	10
COD Concentration (mg/L)	Max	28	13	31	68	21	12
	Min	5	4	7	2	2	1
	Average	16	8	20	23	10	6
	EMC Concentration*	20	9	19	28	11	6
	Before Rainfall	7	4	9	12	4	7
COD Pollutant Load (kg/hr)	Max	59	12	206	2,680	225	48
	Average	20	6	80	441	99	18
	Before Rainfall	2	1	7	36	16	5
T-P Pollutant Load (kg/hr)	Max	1.2	0.4	10.4	122	9.1	2.6
	Average	0.4	0.3	4.5	18	4.4	1.3
	Before Rainfall	0.1	0.1	0.7	0.7	1.6	0.3
T-N Pollutant Load (kg/hr)	Max	13	4	65	394	73	30
	Average	5	2	32	138	45	19
	Before Rainfall	1	1	6	13	24	6

*EMC Concentration = Total Amounts Of Pollutant Loads ÷ Total Run-off Volume

강우사상에 대한 평균농도(EMC, event mean concentration)는 비점오염물질의 유출을 평가하는데 적절한 인자(David R.Maidment, 1993)로서, 학현천과 달산천 모두 비슷한 경향

<Table-11> Pollutant Loading from 9.11 to 10.22.'99 at Dal-San Stream

Item	PS Load(kg) (%)	NPS Loads(kg) (%)	Total(kg) (%)	Remark
SS	876 (1.5)	57,265 (98.5)	58,141(100)	Rainfall during Measurement ; 361.2mm
COD	292 (2.2)	13,042 (97.8)	13,334(100)	
T-N	408 (5.1)	7,628 (94.9)	8,036 (100)	
T-P	37 (5.7)	610 (94.3)	647 (100)	

으로 강우직전의 수질에 비하여 COD의 EMC는 2~3배정도 증가하는 것으로 나타났다. 이와 반면에 총질소와 인의 EMC는 강우직전에 측정한 농도와 큰 차이를 보이지 않았다. 단위시간당 유입부하량은 COD의 경우 평균적으로 강우전에 비하여 3~12배, T-N은 2~10배, T-P 3~25배 정도 증가 되었으며 최대는 COD 5~300배, T-N 3~30배, T-P 3~170배 수준이었다. 강우시 조사결과로부터 수위-유량 과 유량-부하량 관계식을 도출하여 오염부하량을 추정하였다. 조사기간인 1999년 9.11~10.22 에 달산천에서 감돈지로 유입된 총오염물질 부하량을 산출한 결과 <Table-12>와 같으며, 약 40일 동안 조사대상 유역으로부터 유입되는 오염물질 부하량 중 90 %이상이 비점오염물질의 형태인 것으로 추정되었다. 따라서 농업용 저수지의 가장 중요한 오염원은 강우시 유출되는 비점오염물질이며 처리대상으로 하여야 할 주 대상이라고 볼 수 있다.

Ⅴ. 사례지구 인공습지 규모 결정방법

5.1. 설계유량 결정

5.1.1 일강우 및 유출량 분석

점오염원은 강우 유출현상과 아주 밀접한 관계가 있기 때문에 처리대상 유량을 결정하기 위하여 강우와 유출현상을 분석하였다. 조사대상지구의 지배 기상관측소의 과거 30년간의 일강우량 분포를 분석하면 <Table-12>과 같다. 일 강우량 30㎜이하의 강우일수는 년 강우일수의 약 90%를 차지하였다. <Table-13>은 일 강우량 30mm를 기준으로 하여 저수지별 연간 유출량을 분석한 것이다. 일 강우량 30mm이하의 강우량이 년 강우량의 약 50%를 차지하는 것으로 나타났고 유출량은 일강우량 30㎜이하일 때의 유출량은 전체의 약 2/3를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 인공습지의 설계유량은 일강우량 분포율, 유출량, 오염물질 유입특성을 감안하여 일 강우량 30㎜일때의 유출량으로 결정하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

<Table-12> Frequency Analysis of Daily Rainfall ('69 ~ '98)

A Meteological Observatory \ One Day Rainfall (㎜)		≤10.0	≤20.0	≤30.0	≤40.0	≤50.0	≤60.0	≤70.0	≤80.0	≤90.0	≤100	100<	Total
Jeon-Ju	Days	80.2	16.2	7.4	4.7	2.6	1.7	0.9	0.6	0.3	0.3	0.8	115.7
	%	69.3	14.0	6.4	4.0	2.2	1.4	0.8	0.5	0.3	0.3	0.7	100.0
Mok-Po	Days	81.0	13.1	6.1	3.7	2.2	1.2	0.8	0.4	0.5	0.4	0.8	110.1
	%	73.6	11.9	5.6	3.3	2.0	1.1	0.7	0.3	0.5	0.4	0.8	100.0
Tae-Gu	Days	59.9	14.5	6.3	3.4	2.7	1.0	0.5	0.6	0.3	0.3	0.4	89.9
	%	66.6	16.1	7.0	3.7	3.0	1.1	0.6	0.7	0.4	0.3	0.5	100.0

강우에 의하 유출량의 추정 방법은 유역의 물리적 조건 및 강우량, 선행강우조건을 반영할 수 있는 방법으로 미농무성 토양보전국(Soil Conservation Service:SCS)의 유역유출량 추정방법(SCS Method)을 선정하였다. SCS방법은 토양을 배수상태에 따라서 A, B, C, D 4개의 수문토양군으로 분류하고 토지이용형태와 토양종류에 따라 CN 번호를 제시하였으며 여기서는 <Table-14>과 같이 적용하였다.

<Table-13> Selection of Cover Number in this Study

Hydrologic Soil Group[3] / Land Use Type	A	B	C	D
Paddy[1]	78	78	78	78
Upland[2]	63	74	82	85
Residential[2]	77	85	90	92
Forest[2]	56	75	86	91

1) 위성영상을 이용한 토지이용분류 및 유출곡선번호의 추정, 서울대학교 석사학위논문, pp29, 1998. 8

2) 박성우 등, 응용수문학 pp206, 1992, 향문사

3) 수문학적 토양군 분류 : 정정화 등 , 유출율 추정을 위한 토양수분의 분류, 1995, 한국농공학회 지 Vol 37, No 6.

5.2 설계유량 결정

조사대상지구의 SCS방법에 의한 습지규모 결정을 위한 설계유량은 30mm 강우시 AMC(Ⅲ) 조건에서 유역으로 부터의 직접유출량으로 결정하는 것이 유출량 및 수질변화, 유역대비 습지규모, 사업비 등의 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

AMC(Ⅲ)조건에서 SCS방법에 의한 강우량별 하천의 직접유출량은 일강우량 30mm 일때의 직접유출량은 왕궁지 학현천이 4,525 ㎥, 감돈지 달산천 58,754 ㎥, 만운지 만운천 24,304 ㎥ 이며 이 유량을 습지 설계유량으로 결정하여 적정성을 평가하여 보았다.

<Table-14> Analysis of Rainfall and Runoff on the Basis of 30mm One Day Rainfall

Reservoir	One day Rainfall (㎜)		Annual Run-Off (1000㎥)			
	30㎜ less than	30㎜ more than	30㎜ less than	30㎜ more than	Base Flow	Total
Wang-Gung	647.5	639.8	1,608,185	1,513,250	1,516,694	4,638,129
Gam-Don	551.1	562.5	2,194,527	1,963,756	1,925,607	6,083,891
Man-Un	540.4	490.3	3,433,664	2,833,362	3,655,798	9,922,824

*Annual Runoff was estimated by Modified-TANK Model (1988, Kim)

습지 설계유량의 적정성 평가는 수정탱크모형(김현영,1988)을 이용한 조사대상 하천의 1969년 1월 1일 부터 1999년 12월 31일까지 유출량을 모의하여 평가하여 보았다. 년평균적으로 설계유량 초과일수는 왕궁지 학현천 75일, 감돈지 달산천 9일, 만운지 만운천 25일 이었으며 초과유출량은 년평균 유출량의 각각 56%, 22%, 27%를 차지하는 것으로 나타났다. 또한 유입량에 대한 용수이용율(년평균 필요수량/년평균 유입량)은 왕궁지 82%, 감돈지가 45%, 만운지가 43%를 나타내었다.

<Table-15> A Comparison of Observed and Design Flow

Item	Wang-Gung	Gam-Don	Man-Un
Antecedent Rainfall	16.4mm (before 2 days)	20mm (before 7days)	32mm (before one days)
Rainfall(mm)	33.8	32.5	28
Observation Time(hrs)	4.2	9.8	24
Mean Flow(㎥/s)	1.061	2.367	0.576
Peak(㎥/s)	2.12	3.380	3.762
Total runoff volume(㎥)	18,029	82,592	49,766
Design Flow(㎥/day)	12,792	58,754	24,304

이상에서와 같이 습지설계유량의 결정은 유출량 및 관개용수 이용율을 고려하여야 할 것으로 보인다. 따라서, 습지 설계유량은 AMC(Ⅲ) 조건에서 일 강우량 30㎜일 때 유역의 직접 유출량으로 정하되, 유출량 분석 및 물수지분석을 통하여 연평균적으로 습지설계에 의한 처리 수량과 연평균 유출량의 비가 70%를 유지하도록 하는 것이 적정할 것으로 생각된다. 또한 설계유량은 사업비뿐만 아니라 필요 습지부지의 확보가 곤란할 경우가 발생할 수도 있기 때문에 사업지구의 지형 및 주변 토지이용여건, 주민의 호응도 등의 조건을 충분히 고려하여

야 할 것이다.

<Table-15>는 강우시 수질조사에서 측정한 유량자료로부터 설계유량 결정조건과 비슷한 강우량 30mm 부근 일 때의 실관측 유량과 계획처리 유량을 비교한 것이며 평균유량은 설계유량의 2~21배, 첨두유량은 5~41배를 나타내고 총유출량은 1.4~2배 정도였다.

5.2 인공습지 규모결정

5.2.1 규모결정 설계조건 설정

앞의 II절의 국내외 인공습지의 설계조건 및 처리효과를 검토한 결과, 농촌지역 비점오염의 처리를 위한 인공습지 설계조건으로는 일본의 산오가와 하천수 수질정화습지의 연구결과를 이용하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 이는 북미의 경우 체류시간이 수일이상 소요되고 설계수심도 깊으며 수리학적부하량등의 조건을 볼 때 저농도 이면서 대유량이라는 특성을 가진 강우유출수 처리시는 과대한 습지면적이 소요될 것으로 판단되기 때문이다.

<Table-16> A Comparision of Constructed Wetland Systems with High and Low Concentration

Item		COD	T-N	T-P	비 고
North America Wetland Systems	removal efficiency(%)	58	69	52	Free Water Surface System
	removal rate(g/m² · d)	0.73	0.26	0.043	
	Hydraulic Loading(cm/d)	2.7			
Vegetation Purification System at Masan Reservoir in Korea	removal efficiency(%)	15.2	14.1	20.1	〃
	removal rate(g/m² · d)	3.7	0.34	0.05	
	Hydraulic Loading(cm/d)	168			

<Table-17>은 미국 북부에 있는 습지의 정화효율과 국내의 충남 아산시 마산저수지 Bio-Park습지시스템에서 측정한 정화효율을 비교한 것이다. 여기서 미국 북부 습지 자료는 자유수면형 습지중 유량자료가 있는 습지 33개소를 추출하여 조사한 값의 평균치이며, 충남 아산시 마산저수지 Bio-Park시스템 자료는 '99년 총 18회에 걸쳐 정화되는 정도를 측정한 평균 값이다. 북미에서와 같이 수리학적 부하량이 낮을 경우에는 제거량은 적지만 처리효율이 높으며, 마산저수지와 같이 수리학적 부하량을 높게하면 처리효율은 낮지만 제거량이 비교적 높게 나타나고 있다. 우리나라 저수지에 유입되는 물의 수질은 도시하수에 비하여 저농도이며, 저수지 주변에서 습지조성에 필요한 토지자원이 부족한 점을 감안할 때 수리학적 부하량을 다소 높게하는 것이 유리할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 산오가와 하천수 수질정화습지조건과 같은 체류시간 5시간, 설계수심 10cm인 자유수면형 습지로 계획하였다.

5.2.2 습지소요 면적추정

<Table-18>은 체류시간 5시간, 설계수심 10cm를 설계인자로 하였을 때 3개 사례지구의 계획처리 수량에 필요한 습지 소요면적을 추정한 결과이다. 3개 사례지구에 대하여 이러한 습지조건으로 연평균 유출량의 약70% 정도를 정화하는데 필요한 습지 소요면적은 유역면적 대비 약 1~3% 정도이며, 이 때의 수리학적 부하율은 마산지의 168cm/d보다 훨씬 낮은 48cm/d에 불과하므로 저수지 수질개선에 효과가 클 것으로 생각된다. 습지소요 면적은 아래 식 (3)을 이용하여 산정하였다.

$$A = \frac{Q \cdot t/24}{h \cdot n} \text{ ------------------(3)}$$

여기서. A: 습지소요면적(m²), Q: 설계유량(m³/d), t:체류시간(hr), h: 설계수심(m), n: 습지간극률(여기서는 0.7 적용)

북미의 경우에 강우유출수 처리하는 인공습지의 경우 수리학적부하율은 18cm/sec 이하가 되도록 하

<Table-19> Estimations of Required Wetland Surface Areas according to Design Factors on the Investigation Reservoirs

Item	Wang-Gung	Gam-Don	Man-Un
Desing Flow(m^3/d)	12,792	58,754	24,304
Desing Water Depth(m)	0.1	0.1	0.1
Hydraulic Retention Time(hr)	5	5	5
Required Wetland Surface Area(m^2)[1]	33,300	153,000	63,300
Hydraulic Loading rate ($m^3/m^2 \cdot d$)	0.480	0.480	0.480
COD Loading Rate ($kg/m^2 \cdot d$)[1]	243	646	170
Ratio of Watershed Area vs. Wetland Area	1.3%	3%	1.4%

1) 습지표면적 중 식물이 차지하는 비율은 30%로 함
2) COD 부하율은 강우시 수질조사의 EMC 농도를 적용

며 유역면적의 1~5%에 해당하는 인공습지면적을 조성하도록 권장하고 있다. Floroda 주의 경우 초기강우 25mm를 처리하도록 권장하고 있다(Jones,1996)

5.3 자유수면형 인공습지 설계인자 제안 및 이에 대한 고찰

이상에서 농촌지역 비점오염원처리를 위한 자유수면형 안공습지의 설계인자를 정리하면 <Table-20>과 같다.

<Table-18> Suggested Design Factors of Constructed Wetland to treat Agricultural Non-point Sources Pollution in this Study

	Hydraulic Factors					Soil and Vegetation Factors		
System Type	HRTs	Water Depth	Hydraulic Loading Rate	Flow Length	Bed Slope	Planting Density	Soil	Removal Rate ($g/m^2 \cdot d$)
Free Water Surface System	5 hr	summer 0.1 m winter 0.3 m Deep Zone 1.0~1.5m	$0.5m^3/m^2 \cdot d$ below	30m Above	5% below	2 Stem/m^2	Soli Texture: SL, Top soil depth: > 20Cm> CEC:> 4.4-10.3meq/100g Hydraulic conductivity:< 5mm/hr	COD:3.7 TN:0.34 TP:0.05

이중에서 자유수면시스템에서는 설계수심이 중요하다고 판단되며 만일 수심이 0.1m 이상이 되면 토양과 물접촉면에 혐기상태가 생성될 수도 있다. 또한 자유수면시스템에서 겨울철에는 표면에 얼음이 형성되므로 낮은 온도에서 필요한 체류시간이 증가해야 되므로 운전깊이도 깊어야 하며 0.3m 정도를 유지해야 할 것으로 사료되어 습지 시스템에서는 수심을 변화시킬 수 있는 유출구조를 갖도록 설계하여야 한다. 유하거리는 탈질에는 유하거리가 30m 이상이 필요하다고 한다. 또한 적절한 Deep Zone을 배치하여 습지의 정화효과를 향상시킬 수 있도록 하여야 하고 습지내부를 완전건조시킬 수 있는 배수시설도 갖추면 좋을 것으로 판단된다. 토양은 반드시 개량할 필요성이 없으며, 표토심은 최소 20cm이상을 유지해야 할 것이다. 인공습지에 식재할 식물종의 선정도 중요한데 향후 유지관리측면을 고려하고 수질정화효과측면을 볼 때 경제성이 있는 유용식물을 최대한 많이 식재할 필요성이 있으며 미나리가 적당한 식재종으로 사료된다.

V. 결 론

농업지역에서의 비점오염원 처리를 위한 인공습지조성시 필요한 조사내용과 설계인자, 적용방법에 대하여 살펴보았으며, 사례지구를 통하여 인공습지 조성에 필요한 면적을 검토하였다. 본연구에서는 인공습지 조성을 위한 처리 유량은 일강우량 30mm일 때 SCS 방법에 의한 AMC(Ⅲ) 조건에서 유역으로부터의 직접유출량으로 하되, 유역의 조건과 관개용수 이용율을 고려하여 연평균 처리수량이 연평균 유출

량의 70%를 차지하는 유량을 설계유량으로 하는 것이 적정수준으로 판단되었다. 습지형태는 국내외 연구결과를 검토한 결과 우리나라 저수지에 유입되는 물의 수질은 도시하수에 비하여 저농도이며, 습지조성에 필요한 토지자원이 부족한 점을 감안할 때 설계수심 0.1m, 체류시간 5시간인 자연수면형 습지시스템이 적정할 것으로 사료되었으며, 이러한 조건을 이용하여 3개 사례지구에 적용해 보았다. 3개 사례지구에 대하여 적용한 결과 연평균 유출량의 약 70%에 해당하는 수량을 처리하는데 필요한 습지면적은 유역면적의 1~3% 정도가 소요되었다.

참 고 문 헌

1. 구남서, 1999, 친환경적 요소를 고려한 간척농지 조성방안 -고흥지구 인공습지 설계사례를 중심으로-, 농공기술, No63, pp. 98~111
2. 김현규, 199.2 인공습지 조성을 위한 수생식물의 식재기반조성에 관한 연구, 서울대학교 조경학석사학위논문 pp, 54-5.
3. 김현영, 1988. 2, 관개용저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생, 서울대학교 농학박사학위 논문.
4. 김형중,윤춘경, 1997.10, 오염부하량 및 유하거리가 인공습지에 의한 폐수처리효율에 미치는 영향, 한국농공학회지 Vol39 No5., pp97-109
5. 농림부 · 농어촌진흥공사, 1999.12, 수생식물을 이용한 수질개선 기법연구
6. 농림부 · 농어촌진흥공사, 1999.12, '99 농업용수 수질개선 시험사업보고서(III)
7. 농림부 · 농어촌진흥공사, 1999.12, '99 농업용수 수질조사 보고서
8. 농림부 · 농어촌진흥공사, 1999.12, 왕궁 · 감돈 · 만운지구 농업용수 수질개선사업 기본계획(안)
9. 농어촌진흥공사 · 농어촌연구원, 1999.11, 왕궁 · 감돈 · 만운지구 유입하천 · 호소 퇴적물 조사 및 강우시 수질조사.
10. 박성우,권순국,서승덕,안병기,최예환, 1992.12, 응용수문학, 향문사
11. 박병흔,장정렬,이광식,권순국, 2000.7, 저수지수질개선을 위한 식생정화시스템, 한국농공학회지 Vol42 No4, pp87-95
12. 박희성, 1998.12, 위성영상을 이용한 토지이용 분류 및 유출곡선번호의 추정, 서울대학교 공학석사학위 논문.
13. 양홍모, 1999.9, 수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오여물의 자연생태적 친환경적 처리 인공습지 및 연못-습지 시스템, 한국수자원학회지 Vol32No5, pp111-123
14. 이창석,홍선기,조현제,오종민, 1999.8.20, 자연환경 복원의 기술, 동화기술, pp.183~203
15. 정정화,장승표,김호일,정연태,허기술,박호, 1995.12, 유출율 추정을 위한 토양의 분류, 한국농공학회지 vol 37. No6, pp. 12~33
16. 황순진, 공동수, 1999. 습지의 인 sink 기능에 영향을 미치는 생물학적 요인들, 한국육수학회지, 32(2): 79~91
17. 社團法人 リバーフロント 整備 センター, 平成6年4月, 水質淨化對策に關する資料
18. David R. Maidment, 1993, Handbook of hydrology, McHraw-Hill Inc.