

최 중
연구보고서

담수호 수자원 보전을 위한
유역처리시스템 개발

Stream Water Treatment Pond-Wetland
and Constructed Wetland Systems
for Water Quality Improvement
of Estuarine Lakes

연구기관
전남대학교

농 림 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “담수호 수자원 보전을 위한 유역처리시스템 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2002년 11월 일

주관연구기관명 : 전남대학교

총괄연구책임자 : 양 홍 모

연 구 원 : 최 수 명

: 이 종 옥

: 윤 광 식

: 이 정 석

: 김 동 수

연 구 보 조 원 : 이 환 준

: 정 범 철

: 김 수 기

: 이 행 옥

: 조 은 정

: 정 양 운

: 곽 정 란

: 김 순 영

여 백

요 약 문

I. 제 목

담수호 수자원보전을 위한 유역처리 시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

수질악화로 인한 시화호 담수화 포기는 막대한 경제적, 환경적 손실을 가져와 담수호의 수질보전에 대한 국민적 관심이 고조되면서 조성이 완료된 담수호와 새만금 간척사업으로 조성될 담수호의 수질보전에 대한 우려가 높아지고 있다.

간척사업으로 조성된 담수호는 유입하천의 상류유역과 담수호 주변 개답지역에서 일어나는 각종 인간활동과 토지이용으로부터 배출되는 점원 및 비점원 오염물이 최종 유입되는 곳이다. 유역의 점오염원 부하량이 증가하고 있으나, 이를 처리할 시설 용량이 부족하여 많은 양의 점원오염물이 미처리 상태로 담수호로 유입되고 있으며, 유역의 농경지, 마을, 도시에서 강우유출수 함께 담수호로 유입되는 비점원 오염부하량도 점차 증가하는 추세이다. 따라서 담수호로 유입되는 비점원오염물과 미처리 점원오염물을 담수호 유입부나 담수호 주변에서 정화할 수 있는 기법에 대한 연구가 절실한 실정이다.

이들 오염물을 정화하는 기법으로 선진국에서는 유역처리 연못-습지 시스템과 인공습지 시스템을 활용하고 있으나 국내에서는 아직 제대로 활용되지 못하고 있다. 연못시스템은 태양에너지와 생태계의 작용에 의해 각종 오염물을 효율적으로 처리할 수 있는 기법으로 점원뿐만 아니라 비점원 오염을 처리할 수 있으며, 인공습지는 하천과 담수호의 부영양화를 야기하는 질소와 인을 효율적으로 처리할 수 있는 자연생태적 기법으로 수질정화이외에 다양한 친환경적 기능을 제공한다.

본 연구는 국내 기후 및 담수호 여건에 적합하고, 상류유역 및 담수호 주변 개답지역에서 담수호로 흘러드는 하천수에 함유되어 있는 비점원 및 미처리 점원 오염물을 자연생태적으로 처리할 수 있는 유역처리 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지 모델을 개발하며 설계인자 값을 도출하는데 기본 목적이 있다. 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지의 친환경적 활용방안과 연못습지 시스템 및 근자연형 인공습지에 활용 가능한 수질정화 정수식물을 도출해 내는 연구도 함께 수행하였다.

III. 연구개발 내용 및 범위

1차년도(2000)에는 문헌조사 및 해외답사를 통하여 외국의 연못시스템, 인공습지, 연못-습지 시스템의 사례를 분석하고 설계인자를 검토하였다. 부지확보의 용이성과 시스템 조성의 적합성을 고려하여 고흥지구 담수호로 유입되는 신양천 하류의 개답 포락지를 시스템 설치장소로 선정하였다. 시스템으로 유입될 신양천의 수질과 부지조건, 기타 설계인자 검토결과를 종합하여 유역처리 연못-습지 시스템을 설계하였으며, 모형실험을 한 후 시공하였다. 연못-습지 시스템의 셀1, 셀2, 셀3에는 자생 부들을 식재하였고, 셀4, 셀5, 셀6에는 자생 갈대를 식재하였다. 연못-습지 시스템의 초기 적용과 수질 상태를 조사·분석하였다.

2차년도(2001년)에는 근자연형 인공습지의 설계인자를 검토하고 부지조건에 적합하게 설계하였으며, 모형실험을 수행한 후 시공하였다. 근자연형 인공습지에 자생하는 부들을 채취하여 식재한 후 초기 적용 상황과 수질을 분석하였고, 1차년도에 시공한 연못-습지 시스템의 습지 셀에 갈대를 보완식재하였다. 연못-습지 시스템의 수질과 습지셀의 정수식물성장 상태를 조사·분석하였으며, 문헌조사 및 1차년도 해외답사결과를 기초로 인공습지의 친환경적 활용방안을 모색하였다.

3차년도(2002년)에는 시스템의 적응상태를 검토, 보완공을 수행하였고, 연못-습지 시스템의 처리수준과 연못반응, 연못바닥의 슬러지 분석, 습지셀 토양분석, 습지셀의 갈대 및 부들의 성장, 건중량, 성분 분석하였다. 근자연형 인공습지의 처리수준, 토양, 부들의 성장, 건중량, 성분 등을 분석하였고, 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지의 조사분석 내용을 종합하여 설계인자 및 설계인자 값을 도출한 후, 유역처리 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지의 표준 모델을 개발하였다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 실험 연못-습지 시스템

1) 처리수준

실험 연못-습지 시스템은 2개 연못과 6개의 습지 셀로 구성하였으며, 부들습지셀과 갈대습지셀은 각각 3개의 셀을 병렬로 연결하였다. 각 연못과 습지셀의 실제 운영 수면적은 각각 196㎡, 134㎡였다. 유입수의 흐름은 신양천 하천수 펌핑 → 1차연

못 → 2차연못 → 각 습지셀로 이어지며, 유입유량은 약 122m³/day이었고, 1차연못과 2차연못의 체류기간은 각각 약 1일이었다. 각 습지셀의 평균유입유량은 약 20m³/day로 체류시간은 약 1.5일이었으며, 수리학적부하율은 0.12m/day이었다.

<표 1>은 실험 연못-습지 시스템의 처리수준을 나타낸다. 연못-습지 시스템의 부들습지셀의 BOD, SS, TN, TP 처리율은 각각 56%, 63%, 58%, 59%, 갈대습지셀의 BOD, SS, TN, TP 처리율은 각각 58%, 65%, 57%, 57%였다. 또 1차연못에서 BOD, SS, TN, TP가 각각 24%, 29%, 20%, 23%, 2차연못에서 각각 13%, 19%, 14%, 15% 처리되어, 1차연못과 2차연못을 직렬로 구성한 연못시스템에서는 전체적으로 각각 34%, 43%, 31%, 35%가 처리되었는데, 1차연못의 처리율이 2차연못 보다 월등히 높게 나타나고 있다. 2차 연못의 처리수를 부들습지셀에서 BOD, SS, TN, TP가 각각 34%, 35%, 39%, 37%, 갈대습지 셀에서 BOD, SS, TN, TP가 각각 36%, 39%, 38%, 34%가 처리되었다.

<표 1> 실험 연못-습지 시스템의 처리율

	BOD (mg/l)	BOD 처리율 (%)		SS (mg/l)	SS 처리율 (%)		TN (mg/l)	TN 처리율 (%)		TP (mg/l)	TP 처리율 (%)	
		전체	부분		전체	부분		전체	부분		전체	부분
유입수	6.01	-	-	15.43	-	-	5.80	-	-	0.198	-	-
1차 연못	4.57	24	24	10.96	29	29	4.64	20	20	0.152	23	23
2차 연못	3.98	34	13	8.79	43	19	3.98	31	14	0.129	35	15
부들 습지셀	2.62	56	34	5.71	63	35	2.40	58	39	0.081	59	37
갈대 습지셀	2.54	58	36	5.40	65	39	2.47	57	38	0.085	57	34

2) 식물성장 및 N, P 함량

간척지에서 자생하는 부들(*Typha angustifloia*)과 갈대(*Phragmites commumis*)를 채취하여 뿌리부에서 약 35cm 높이를 절단한 후 30cm 간격으로 습지셀에 부들(셀1,

셀2, 셀3)과 갈대(셀4, 셀5, 셀6)를 식재하였다. 부들은 식재 2년 후인 2002년 5월, 7월, 10월에 초장이 각각 100.1cm, 157.4cm, 179.8cm로 성장하였으며, 1m²당 개체수는 각각 56.1개, 83.5개, 96.9개였으며, 갈대는 식재 2년 후인 2002년 5월, 7월, 10월에 초장이 각각 68.3cm, 112.1cm, 123.7cm로 성장하였으며, 1m²당 개체수는 각각 52.6개, 158.3개, 187.9로, 부들과 갈대의 성장이 양호하였다.

2002년 9월 부들과 갈대의 건중량과 N, P 함량을 분석하였다. 부들습지셀의 유입부와 유출부 건중량은 각각 2,686g/m², 1,795g/m², 각각 1,389g/m², 1,016g/m²으로, 부들이 갈대의 건중량 보다 다소 높게 나타났다. 습지 유입부 부들의 지상부와 지하부 N함량은 각각 20.35mg/g, 17.16mg/g, P함량은 각각 3.13mg/g, 2.48mg/g, 유출부 부들의 N함량은 각각 18.01mg/g, 16.48mg/g, P함량은 각각 2.68mg/g, 2.13mg/g이었다. 습지 유입부 갈대의 경우 지상부와 지하부 N함량은 각각 18.27mg/g, 15.20mg/g, P함량은 각각 2.64mg/g, 2.23mg/g이었으며, 유출부 N함량은 각각 15.77mg/g, 14.19mg/g, P함량은 각각 2.20mg/g, 2.05mg/g이었다.

3) 연못의 반응

1차연못과 2차연못의 운영을 시작하여 2년이 경과한 후 연못바닥을 조사한 결과 1차연못의 바닥에는 약 2cm 정도의 슬러지층이 형성되어 있었으며, 2차연못의 바닥에도 얇은 슬러지층이 형성되어 있었다. 수심별 DO조사결과 1차연못과 2차연못의 상층은 호기상태였고, 바닥층은 혐기상태를 보여 조건성연못의 특성을 나타냈다.

3. 실험 근자연형 인공습지 시스템

1) 처리수준

실험 근자연형 인공습지 시스템은 면적 약 1900m² 습지셀 1개로 구성하였는데, 약 120m³/day의 신양천 하천수가 유입되었으며, 체류시간은 약 3.5일, 수리학적부하율은 0.06m/day이었다. <표 2>는 실험 근자연형 인공습지의 처리수준을 나타내는 것으로 BOD, SS, TN, TP 처리율은 각각 56%, 61%, 57%, 60%이었다.

< 표 2 > 실험 근자연형 인공습지의 처리율

	BOD (mg/ℓ)	BOD 처리율 (%)	SS (mg/ℓ)	SS 처리율 (%)	TN (mg/ℓ)	TN 처리율 (%)	TP (mg/ℓ)	TP 처리율 (%)
유입수	6.14	-	14.71	-	5.78	-	2.05	-
유출수	2.70	56	5.74	61	2.49	57	0.820	60

2) 식물성장 및 N, P 함량

간척지에서 자생하는 부들(*Typha angustifloia*)을 채취하여 뿌리에서 약 35cm 높이를 절단한 후 30cm 간격으로 식재하였다. 식재 후 초장 35cm가 2001년 10월에는 127cm로 성장하였으며, 식재 1년 후인 2002년 5월, 7월, 10월의 평균초장은 각각 90.6cm, 139.4cm, 163.7cm였으며, 1m²당 개체수는 각각 46.1개, 57.9개, 75.1개로서 성장이 양호하였다.

2002년 9월 부들의 건중량과 N, P 함량을 분석하였다. 유입부, 중간부, 유출부 부들의 건중량은 각각 1,994g/m², 1,733g/m², 1,252g/m²으로서, 유입부의 부들성장이 유출부보다 양호하였다. 유입부, 중간부, 유출부의 지상부 N함량은 각각 18.40mg/g, 17.60mg/g, 16.35mg/g, P함량은 각각 3.04mg/g, 2.80mg/g, 2.72mg/g였으며, 지하부 N함량은 각각 15.64mg/g, 15.30mg/g, 15.06mg/g, P함량은 각각 2.28mg/g, 2.12mg/g, 20.3mg/g으로서, 유입부 부들의 N, P함량이 유출부보다 높았다.

3. 시스템 설계인자 추출 및 모델 제시

1) 연못-습지 시스템 모델

실험 연못-습지 시스템에 대한 지속적인 모니터링 결과를 기초로 담수호 수자원 보전에 활용할 수 있는 오염하천수 혹은 강우유출수 약 1,000m³/day를 정화할 수 있는 연못-습지 시스템의 모델과 설계인자를 제시하였다. 수질정화 연못-습지 시스템은 연못시스템과 인공습지의 장점을 결합한 모델로서 연못은 유입수의 부유물(SS)과 토사를 침전시키고 오염물질을 정화하는 기능을 하는 조건성 연못으로 설계한다. 습지는 연못의 방류수에 함유되어 있는 미처리 오염물질(BOD, SS, TN, TP)과 조류(algae)를 제거하는 역할을 한다.

(1) 연못-습지 시스템 모델 A

<표 3>은 연못-습지 시스템 모델 A의 설계인자로서 연못 2개를 직렬로 연결한 연못시스템과 습지셀 2개를 병렬로 연결한 인공습지로 구성된다.

유입수의 TN농도 $6.0\text{mg}/\ell$ 가 약 60%처리되는 모델로서 1차연못과 2차연못에서 TN이 약 33% 처리되어 2차연못의 방류수 TN농도는 약 $4.0\text{mg}/\ell$ 가 되고, 습지셀에서 $2.4\text{mg}/\ell$ 로 처리되어 습지셀의 TN 처리율은 40%가 된다.

연못은 수심 2.2m, 여유고 0.5m, 부유물침전 깊이 0.3m로 전체의 깊이는 3m이고, 수면적은 약 800m^2 이며, 1차연못과 2차연못의 체적은 각각 $1,000\text{m}^3$ 로 유입유량 $1,000\text{m}^3/\text{day}$ 이므로 체류시간은 약 1일이다. 1차연못의 유입부 바닥에 길이 4m, 폭 4m, 깊이 1m 정도의 Pit를 설치하고, 유입관의 끝을 연못바닥보다 위에 설치하여 유입수의 부유물이 일차적으로 Pit에 침전되도록 한다. 연못은 유입수의 단기이동을 완화할 수 있도록 수중유입과 표면유출 방식을 도입하고, 유입부와 유출부의 위치가 대각선에 위치하도록 하는데, 이로 인해 1차연못의 수중으로 유입수를 유입시켜 침전을 유도하고, 1차연못의 표면에서 2차연못의 수중으로 유입시킨 후 2차연못의 표면에서 각 습지셀로 흐르도록 한다. 연못제방 폭은 2.5 - 3m로 설계하여 차량의 이동이 가능하게 하고, 제방의 경사는 간척지 토질을 고려하여 1 : 3으로 설계한다.

각 습지셀 면적은 약 $3,330\text{m}^2$ 이며, 유출부에 수심을 0.3 - 0.6m로 조절할 수 있는 weir를 설치한다. 운영수심을 0.3m로 유지하여 공급률을 고려한 습지셀의 순체적은 750m^3 , 각 습지셀의 유입량을 $500\text{m}^3/\text{day}$ 로 체류시간은 1.5day이며, 수리학적 부하율은 $0.15\text{m}/\text{day}$ 가 된다. 습지셀 면적의 20 - 25%를 수심 1 - 1.2m의 개수부로 설계하여 이 개수부에서는 정수식물이 자라지 못하고, 유입수의 단기이동을 방지하며, 새(bird) 등의 서식처를 제공하고, 대기와 접촉을 통한 질산화를 촉진하여 질소제거에 기여하도록 설계한다. 또 습지셀에는 부들 혹은 갈대를 식재하고, 유입부와 유출부는 확산유입과 확산유출이 되도록 설계한다.

부지조건에 따라 유입수가 흐르는 방향으로 연못의 폭 : 길이의 비율은 1 : 2 - 1 : 4로, 습지셀은 1 : 2 - 1 : 4로 조성한다. 1차연못 및 2차연못에서 제거되는 TN양은 $2.0\text{kg}/\text{day}$, 연못수면 단위면적당 TN제거량은 $12.5\text{kg}/\text{ha}/\text{day}$ 로 예상된다. 습지셀 2개에서 제거되는 TN양은 $1.6\text{kg}/\text{day}$, 습지단위면적당 TN제거량은 $2.4\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 예상된다. 전체적으로 모델 A에서 제거되는 TN양은 $3.6\text{kg}/\text{day}$, 모델 A 전체면적을 고려한 단위면적당 TN제거량은 $4.35\text{kg}/\text{ha}/\text{day}$ 로 예상된다.

<표 3> 연못-습지 시스템 모델 A 설계인자(1)

항목	유입수 TN (mg/l)	유출수 (목표) TN (mg/l)	TN 처리 율 (%)	수표면 (m ²)	공극 률	수체적 (m ³)	유입 유량 (m ³ / 일)	체류 시간 (일)	TN 부하율 (kg/ha /day)	수리학 적부하 율 (m/day)
1차연못	6.0	-	-	20×40 (800)	-	1,000	1,000	1.0	-	-
2차연못	-	4.0	33	20×40 (800)	-	1,000	1,000	1.0	-	-
습지셀1	-	2.4	60	30×110 (3,330)	0.75	750	500	1.5	6.0	0.15
습지셀2	-	2.4	60	30×110 (3,330)	0.75	750	500	1.5	6.0	0.15

<표 3> 연못-습지 시스템 모델 A 설계인자(2)

항목	수심 (m)	여유고 (m)	침전 퇴적 (m)	뚝 높이 (m)	내경사	외경사
1차연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1 : 3	1 : 3
2차연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1 : 3	1 : 3
습지셀1	0.3 - 0.6	0.4	-	1.0	1 : 2	1 : 2
습지셀2	0.3 - 0.6	0.4	-	1.0	1 : 2	1 : 2

(2) 연못-습지 시스템 모델 B

연못 1개와 습지셀 2개로 구성되는데, 이는 실험 연못-습지 시스템의 2차연못은 1차연못보다 상대적으로 처리효율이 낮았다는 점을 고려할 때, 모델 B에서는 모델 A의 개념에서 2차연못이 생략된 모델이다. 유입수의 TN농도 6.0mg/l 가 연못에서 4.6mg/l 로 처리된 후 습지에 유입되어 3.0mg/l 로 처리되어 시스템의 전체 TN 처리율은 약 50%이다. 연못의 TN 처리율은 약 23%, 습지의 TN 처리율은 약 34%이다.

연못은 수심 2.2m, 여유고 0.5m, 부유물침전 깊이 0.3m로 전체의 깊이는 3m이며,

수면적은 약 800m², 체적은 1,000m³로 유입유량 1,000m³/day의 체류시간은 약 1일이다. 연못의 바닥에는 길이 4m, 폭 4m, 깊이 1m 정도의 Pit를 설치하는데, Pit의 기능과 역할은 모델 A에서 제시한 내용과 같다. 유입수가 연못의 수중으로 유입되어 침전을 유도하고, 연못의 표면에서 각 습지셀로 연못처리수가 유입된다.

각 습지셀 면적은 약 3,330m²이며, 유출부에 수심을 0.3 - 0.6m로 조절할 수 있는 weir를 설치한다. 운영수심을 0.3m로 유지하여 공극률을 고려한 습지셀의 순체적은 750m³이 된다. 각 습지셀의 유입량은 500m³/day로 체류시간은 1.5day이며, 수리학적 부하율은 0.15m/day가 된다. 그리고 습지셀 면적의 20 - 25%를 수심 1 - 1.2m의 개수부로 설계하는데 개수부 등 습지셀의 설계 개념은 모델 A에서 제시한 내용과 같다.

부지조건에 따라 유입수가 흐르는 방향으로 연못의 폭 : 길이의 비율은 1 : 2 - 1 : 4로, 습지셀 비율은 1 : 2 - 1 : 4로 조성한다. 연못에서 제거되는 TN양은 1.4kg/day, 연못수면의 단위면적당 TN제거량은 17.5kg/ha/day로 예상된다. 습지셀 2개에서 제거되는 TN양은 1.6kg/day, 습지단위면적당 TN제거량은 2.4kg/ha/day로 예상된다. 모델 B 전체에서 제거되는 TN양은 3.0kg/day, 모델 B 전체면적을 고려한 단위면적당 TN제거량은 4.02kg/ha/day로 예상된다.

2) 근자연형 인공습지 모델

실험 근자연형 인공습지의 모니터링 결과를 기초로 담수호 수자원 보전에 활용할 수 있는 하천수 혹은 강우유출수 약 1,000m³/day를 처리하는 근자연형 인공습지 모델과 설계인자를 제시하였다.

(1) 근자연형 인공습지 모델 A

근자연형 인공습지 모델 A는 습지셀 2개를 병렬로 구성하는데, <표 4>는 모델 A의 설계인자를 나타내고, 유입수의 TN농도 6.0mg/ℓ 가 2.5mg/ℓ 로 처리되어 TN 처리율은 약 60%이다. 각 습지셀은 면적이 약 7,770m²이고, 유출부에 수심을 0.3 - 0.6m로 조절할 수 있는 weir를 설치하며, 운영수심을 0.3m로 유지하여 공극률을 고려한 습지셀의 순체적은 1,750m³이 되므로 각 습지셀의 유입수의 양이 500m³/day임을 감안하면, 습지셀의 체류시간은 3.5일, 수리학적 부하율은 0.06m/day가 된다.

습지제방에 면한 습지바닥의 일부를 경사 1 : 4 ~ 1 : 15로 조성하여 자연습지와 유사한 모습으로 설계한다. 유입부에 습지면적의 약 5 - 10% 해당하는 개수부를 설

치하고, 중간부도 습지면적의 15 - 20%에 해당하는 개수부를 설치하는데, 수심 1 - 1.2m 개수부는 정수식물이 성장하지 못하고, 유입수의 단기이동을 방지하며, 새 (bird) 등의 서식처를 제공하고, 대기와 접촉을 통한 질산화를 촉진하여 질소제거에 기여하도록 설계한다. 유입부의 개수부는 토사와 부유물질을 침전시키는 기능을 하고 유입관의 끝은 개수부 바닥면에서 수직 약 0.9m 높이로 설치하여 유입수가 수면으로 떨어지면서 유입되도록 설계하여 폭기효과를 유도하며, 유입부와 유출부는 확산유입과 확산유출이 되도록 설계한다.

부지조건에 따라 유입수가 흐르는 방향으로 습지셀의 폭 : 길이의 비율이 1 : 2 - 1 : 4로 조절한다. 모델 A에서 제거되는 TN양은 3.6kg/day로 예측되며, 단위면적당 TN제거양은 2.31kg/m²/day로 예상된다.

< 표 4> 근자연형 인공습지 모델 A의 설계인자 (1)

유입수 TN (mg/ℓ)	유출수 (목표) TN (mg/ℓ)	TN 처리율 (%)	면적 (m ²)	수체적 (m ³)	유입 유량 (m ³ /day)	체류 시간 (day)	수리학적 부하율 (m/day)	TN 부하율 (kg/ha/day)
6.0	2.4	60	7,770	1,750	500	3.5	0.06	3.86

<표 4> 근자연형 인공습지 시스템 모델 A 설계인자(2)

수심 (m)	여유고 (m)	뚝높이 (m)	내경사	외경사	공극률
0.3	0.3	1.0	1 : 4 - 1 : 15	1 : 3	0.75

(2) 근자연형 인공습지 모델 B

모델 B는 인공습지 조성면적을 충분히 확보할 수 없는 경우 체류시간을 단축하여 조성하는 모델로 근자연형 인공습지 모델 A는 습지셀 2개를 병렬로 구성한다. 유입수의 TN농도 6.0mg/ℓ를 3.9mg/ℓ로 처리하여 TN 처리율은 약 35%를 목표로 하고 있다. 각 습지셀은 면적이 약 3,330m²이고 수심을 0.3 - 0.6m로 조절할 수 있도록

유출부에 weir를 설치하며, 평상시 운영수심은 0.3m로 조정한다. 공극률을 고려한 습지셀의 순체적은 750m³가 되고 각 습지셀의 유입수의 양은 500m³/day이며, 체류시간은 1.5일이어서, 수리학적 부하율은 0.15m/day이고, 개수부 등 습지셀의 설계개념은 모델 A와 같다.

모델 B에서 제거되는 TN양은 2.1kg/day, 모델 B 단위면적 당 TN제거량은 3.15kg/ha/day로 예상되는데, 단위면적당 TN제거량은 모델 B가 모델 A 보다 높으나, 모델 A의 처리수 TN농도는 2.4mg/l로 낮은 반면 모델 B의 처리수 TN농도는 3.9mg/l로 다소 높다.

4. 연못-습지 시스템 및 근자연형 인공습지 친환경적 활용

연못-습지 시스템의 연못은 물고기 및 야생동물의 서식처를 제공하고, 시민휴식 및 자연학습 공간을 제공할 수 있다. 연못-습지 시스템의 습지와 근자연형 인공습지 습지는 수질정화 이외에 야생동물의 서식처, 비오톱으로 활용이 가능하고, 조류(bird) 관찰, 시민휴식, 자연학습 공간을 제공할 수 있으며, 훼손된 습지를 복원하여 지역의 경관을 아름답게 조성할 수 있다. 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지는 다양한 친환경적 기능이 발휘되도록 설계가 가능하다.

5. 활용에 대한 건의

간척사업 지구에 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지를 조성하여 담수호로 유입되는 오염물질을 정화하고 담수호 수질을 보전하면서, 훼손된 습지를 복원하며 야생동물서식처를 제공할 수 있다. 개답지역의 농경지와 연못-습지 시스템 및 근자연형 인공습지를 생태단지(ecocomplex)의 개념으로 설계하여 시민휴식공간, 자연학습장, 관광지로 활용이 가능하다. 연못시스템의 처리수를 작물생산과 양어에 재활용하고, 연못과 습지는 야생동물 서식처, 낚시, 조류감상지로 활용이 가능하다. 담수호 수질을 보전하면서 친환경적 간척지 개발이 가능하도록 간척사업지구에 유역처리 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지를 적극 도입하도록 한다.

SUMMARY

The water quality of Estuarine lakes formed by tidal marsh reclamation projects has been gradually degraded due to the increased pollutant loads from their watersheds. The amount of untreated or partially treated point source pollutants discharged from towns, villages, and animal farms into them has been augmented. Considerable amount of pollutants from non-point sources, especially agricultural runoffs, has been loaded into them.

Pond-wetland treatment system and constructed treatment wetlands have been utilized to reduce these pollutants ecologically. They can be established adjacent to the down reach levees of the streams flowing into the lakes or the embankments of the reservoirs. This research aims at developing modules of pond-wetland system and constructed wetlands which can be used for abatement of those pollutants and applicable to the environment of estuarine lakes.

A pond-wetland system and a natural-shape constructed wetland system were set up near the Koheung Estuarine Lake formed by the Koheung tidal marsh reclamation project in order to identify the values of parameters required to design the systems. The former constructed in 2000 was composed of primary and secondary ponds in series and six wetland cells in parallel. Cattails (*Typha angustiflora*) were planted in three wetland cells and common reeds (*Phragmites australis*) in three other cells. The water depth of the two ponds was 2.2 m and that of wetland cells 0.3 m during system operation period. The surface area of each pond was approximately 196 m² and that of each wetland cell was about 134 m². The latter constructed in 2001 had only one cell and its acreage was about 1900 m². Cattails were planted in the wetlands. Two small open water areas were installed and some portions of its bottom surfaces adjacent to its levees had a variety of slope of 1 : 4 - 1 : 15.

Water pumped from the Sinyang Stream flowing into the Lake was funneled into primary pond whose effluent was discharged into secondary pond by gravity flow. Effluent from secondary pond was distributed into each wetland cell. The pumped water also flowed into the constructed wetland system.

Inflow and outflow of each treatment unit of the pond-wetland system were examined. SS, BOD₅, TN, and TP concentrations in the influent to primary pond, and those in the effluent from primary pond, secondary pond, and wetland cells were analyzed. Inflow and outflow of the constructed wetland system were also investigated. SS, BOD₅, TN, and TP concentrations in its influent and effluent were also analyzed.

About 122 m³/day of the Sinyang Stream water pumped into the primary pond and the constructed wetland system, respectively. About 20 m³/day of secondary pond effluent was funneled into each wetland cell of the pond-wetland system. The retention time of the two ponds was about one day and that of each wetland cell was 1.5 days. The residence time of the wetland system was about 3.5 days.

The concentrations of BOD₅, SS, TN and TP in influents to the primary pond and the wetland system averaged 6.01mg/ℓ, 15.43mg/ℓ, 5.8 mg/ℓ, and 0.2mg/ℓ, respectively. The removal efficiency of the pond-wetland system for BOD₅, SS, TN and TP was 58%, 65%, 57%, and 57%, respectively. The removal rates at primary pond for BOD₅, SS, TN and TP were 24%, 29%, 20%, and 23%, respectively. Those at secondary pond for BOD₅, SS, TN and TP were 13%, 19%, 14%, and 15%, respectively. The reduction rates measured at three cattail-planted wetland cells for BOD₅, SS, TN and TP were 34%, 35%, 39%, and 37%, respectively. Those measured at three reed-planted wetland cells for BOD₅, SS, TN and TP were 36%, 39%, 38%, and 34%, respectively. The removal rates of the constructed wetland system for BOD₅, SS, TN and TP were 56%, 61%, 57%, and 60%, respectively.

A module of pond-wetland system is proposed, which is composed of two ponds in series and two wetland cells in parallel. It can treat about 1000 m³/day of stream water and reduce TN concentrations of 6 mg/ℓ in influent into 2.5 mg/ℓ in the final effluent. It is expected that TN concentration of the effluent of secondary pond is 4.0 mg/ℓ. The water depth of each pond and each wetland cell during operation is 2.2 m and 0.3 m, respectively. The surface area of each pond is about 800 m² and that of each wetland cell is about 3330 m². The detention time of each pond is one day and that of each wetland cell is 1.5 days. The removal rate of TN in the two ponds can be expected to be 2.0kg/day and that in the two cells 1.5kg/day.

A module of natural-shape constructed wetland system is proposed, which is composed of two wetland cells. Some portions of its bottom surfaces have a variety of slope of 1:4 - 1:15. Two open water areas are installed; one in the inlet area of each cell and the other in the middle of each cell. The former amounts to 10 percentage of the acreage of the wetland cell and the latter amounts to 15 percentage of that. Each cell can treat about 500 m³/day of stream water and reduce TN concentrations of 6 mg/ℓ in influent into 2.5 mg/ℓ in effluent. The surface area of each cell is approximately 7770 m². The water depth of each cell is maintained to be 0.3 m during operation. The detention time of each cell is about 3.5 days. The removal rate of TN in the system can be expected to be 3.6kg/day.

여 백

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	33
1. Background of Research Needs	33
1) Technical Aspects	33
2) Economical and Industrial Aspects	34
3) Social and Cultural Aspects	35
2. Research Goals and Scopes	36
Chapter 2. Domestic and Foreign Technology	37
1. Domestic Technology	37
1) Trends	37
2) Case Studies	37
2. Foreign Technology	39
1) Trends	39
(1) Pond-Wetlands System	39
a) System Structure	39
b) Design	39
(2) Constructed Wetlands	40
a) Types	40
b) Advantages and Disadvantages of Each Type	42
c) Advantages of Constructed Wetlands	43
d) Design	43
e) Case Studies	43
(a) Point Source Treatment	43
(b) Stream Water Treatment	47
(c) Non Point Source Treatment	51
Chapter 3. Research Results	55
1. Treatment Mechanisms	55
1) Treatment Mechanisms of Pond	55
2) Treatment Mechanisms of Constructed Wetlands	57
2. Site Selection and Analysis	59
1) Location and Analysis of Site	59
2) Water Quality of System Influent and Target Treatment Level	61

3) Design Concepts of Treatment Systems	62
3. Pond-Wetland System	63
1) Analysis of Design Parameters	69
2) System Design	71
3) Model Experiment	72
4) System Construction	73
5) Treatment Level and Efficiency	79
(1) BOD Removal	81
(2) SS Removal	84
(3) TN Removal	85
(4) TP Removal	87
6) Pond Characteristics and Sludge Analysis	89
(1) DO, pH, Temperature	89
(2) Sludge Analysis	91
7) Plant Growth and Wetland Soil Analysis	93
(1) Plant Growth	93
(2) Dry Weights and N and P Contents	96
(3) Wetland Soil Analysis	100
4. Natural-Type Constructed Wetland	104
1) Analysis of Design Parameters	106
2) System Design	107
3) Model Experiments	107
4) System Construction	109
5) Treatment Level and Efficiency	111
(1) BOD Removal	112
(2) SS Removal	114
(3) TN Removal	115
(4) TP Removal	117
6) Plant Growth and Wetland Soil Analysis	118
(1) Plant Growth	118
(2) Dry Weights and N and P Contents	119
(3) Wetland Soil Analysis	122
5. Module Development	124
1) Pond-Wetland System Module	124
(1) Design Concepts of Module	124
a) Pond System	124
b) Wetland Cells	125

(2) Analysis of Module Design Parameters	125
(3) Proposed Modules	128
a) Module A	129
b) Module B	133
2) Natural-Type Constructed Wetland System Module	137
(1) Design Concepts of Module	137
(2) Analysis of Module Design Parameters	138
(3) Proposed Modules	139
a) Module A	139
b) Module B	144
6. Environment-friendly Uses of Constructed Wetlands	148
Chapter 4. Achievement of Research Goals and	
Contribution to Related Fields	151
1. Achievement of Research Goals	151
2. Contribution to Related Fields	153
Chapter 5. Use of Research Results	155
1. Utilization of Research Results	155
2. Application to Related Fields	158
3. Future Research	159
Chapter 6. Information on Foreign Technology During Research	161
Chapter 7. References	163

여 백

제 목 차 례

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 필요성	33
1. 기술적 측면	33
2. 경제·산업적 측면	34
3. 사회·문화적 측면	35
제 2 절 연구개발의 목적 및 범위	36

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발	37
1. 국내기술 현황	37
2. 국내 사례	37
가. 연못 시스템	37
나. 수질정화 인공습지	38
제 2 절 국외 기술개발	39
1. 국외 기술현황	39
가. 수질정화 연못시스템	39
1) 연못시스템 구성 및 장단점	39
2) 연못시스템 설계 추이	39
나. 수질정화 인공습지	40
1) 인공습지 유형	40
2) 인공습지 유형별 장단점	42
3) 인공습지의 장점	43
4) 인공습지 설계 추이	43
5) 수질정화 인공습지 활용 및 사례	43
가) 점오염원 수질정화 인공습지	43
(1) Arcata 연못-습지 시스템	43
(2) Hayward 습지 시스템	46
나) 하천수 정화 인공습지	47
(1) Des Plaines 인공습지	49
(2) Olentangy River Wetland	50

(3) 산노가와(山王川) 수질정화 습지	50
(4) 세네가와(清明川) 수질정화습지	50
(5) 와따라세(渡良瀬) 상수원 유수지 수질정화 갈대습지	51
다) 강우유출수 정화 인공습지	51
(1) 습지 시스템	51
(2) 연못-습지 시스템	51
(3) 연못-습지 결합 시스템	53

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연못 시스템 및 인공습지의 수질정화 기작	55
1. 연못 시스템의 수질정화 기작	55
2. 인공습지의 수질정화 기작	57
제 2 절 시스템 조성부지 및 현황	59
1. 시스템 조성부지 및 현황분석	59
2. 유입수 수질분석 및 목표수질	61
3. 유역처리 시스템 설계 개념	62
제 3 절 연못-습지 시스템	63
1. 설계인자 검토	69
2. 시스템 설계	71
3. 시스템 모형 실험	72
4. 시스템 시공	73
가. 토공, 배관공	73
나. 집수정 및 펌핑시설	75
다. 습지셀 식재공	76
라. 보완공	78
5. 시스템 처리수준 및 처리율	79
가. 처리수준	79
1) 수온 변화	80
2) pH 변화	81
3) BOD 제거	81
4) SS 제거	84
5) TN 제거	85
6) TP 제거	87
6. 연못의 반응 및 침전물 분석	89
가. 연못의 반응	89

나. 연못의 침전물 분석	91
7. 습지셀 식물성장 및 토양분석	93
가. 식물성장	93
나. 습지셀 식물 건조량 및 N, P 함량	96
1) 건조량	97
2) 식물체내 N, P 함량	98
다. 습지셀 바닥 토양성분 조사	100
제 4 절 근자연형 인공습지 시스템	104
1. 설계인자 검토	106
2. 시스템 설계	107
3. 시스템 모형 실험	107
4. 시스템 시공	109
가. 토공 및 배관공	109
나. 식생공	109
다. 보완공	110
5. 처리수준 및 처리율	111
가. 처리수준	111
1) 수온 변화	111
2) pH 변화	112
3) BOD 제거	112
4) SS 제거	114
5) TN 제거	115
6) TP 제거	117
6. 습지 셀 식물성장 및 토양분석	118
가. 식물성장	118
나. 식물 건조량 및 N, P 함량	119
1) 건조량	120
2) 식물체내 N, P 함량	121
다. 습지바닥 토양성분	122
제 5 절 모델 개발	124
1. 연못-습지 시스템 모델 개발	124
가. 모델의 개념	124
1) 연못의 기능	124
2) 습지의 기능	125
나. 연못-습지 시스템 모델 설계인자 검토	125
다. 연못-습지 시스템 모델	128
1) 연못-습지 시스템 시스템 모델 A (유입수 1,000m ³ /day)	129

2) 연못-습지 시스템 모델 B (유입수 1,000m ³ /day)	133
2. 근자연형 인공습지 모델 개발	137
가. 모델의 개념	137
나. 모델 설계인자 검토	138
다. 근자연형 인공습지 모델	139
1) 근자연형 인공습지 모델 A (유입수 1,000m ³ /day)	139
2) 근자연형 인공습지 모델 B (유입수 1,000m ³ /day)	144
제 6 절 인공습지의 친환경적 활용방안	148

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 목표 달성도	151
제 2 절 관련분야에의 기여도	153
1. 기술적 기여	153
2. 경제·산업적 기여	154

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 활용방안	155
제 2 절 활용계획	158
제 3 절 추가연구의 필요성	159

제 6 장 연구수행중 수집된 국외 기술

161

제 7 장 참고문헌

163

표 차례

<표 2-1> 면적부하율 모델 권장 연못시스템 구성	40
<표 2-2> 북미 수질정화 인공습지 시스템의 설계인자 및 처리효율	44
<표 2-3> 북미 자유수면 인공습지의 평균 처리효율	44
<표 2-4> 미국의 하천수 정화 인공습지 설계인자 및 처리효율	48
<표 2-5> 일본의 수질정화 습지의 설계인자 및 처리효율	48
<표 2-6> 강우 유출수 처리 인공습지 처리효율	52
<표 3-1> 유역 토지이용 현황	60
<표 3-2> 부지의 토양 분석결과	61
<표 3-3> 신양천 수질	61
<표 3-4> 신양천 강우유출수 수질	61
<표 3-5> 연못-습지 시스템의 구조	69
<표 3-6> 수질정화 인공습지 정수식물 수종	76
<표 3-7> 연못-습지 시스템 BOD 처리율	83
<표 3-8> 연못-습지 시스템 SS 처리율	84
<표 3-9> 연못-습지 시스템 TN 처리율	86
<표 3-10> 연못-습지 시스템 TP 처리율	88
<표 3-11> 근자연형 인공습지 구조	106
<표 3-12> 근자연형 인공습지 BOD 처리율	113
<표 3-13> 근자연형 인공습지 SS 처리율	115
<표 3-14> 근자연형 인공습지 TN 처리율	116
<표 3-15> 근자연형 인공습지 TP 처리율	117
<표 3-16> 실험 연못-습지 시스템의 처리율	127
<표 3-17> 실험 연못-습지 구조, 운영 유입유량 및 체류시간	127
<표 3-18> 연못-습지 시스템 모델 A 설계인자(1)	133
<표 3-19> 연못-습지 시스템 모델 A 설계인자(2)	133
<표 3-20> 연못-습지 시스템 모델 B 설계인자(1)	137
<표 3-21> 연못-습지 시스템 모델 B 설계인자(2)	137
<표 3-22> 실험 근자연형 인공습지의 처리율	138
<표 3-23> 실험 근자연형 인공습지의 설계인자, 운영 유입유량 및 체류시간	139
<표 3-24> 근자연형 인공습지 모델 A의 설계인자 (1)	141
<표 3-25> 근자연형 인공습지 시스템 모델 A 설계인자(2)	141
<표 3-26> 근자연형 인공습지 모델 B의 설계인자 (1)	148
<표 3-27> 근자연형 인공습지 시스템 모델 B 설계인자(2)	148
<표 4-1> 연구 목표 및 내용	151

그림차례

<그림 2-1>	자유수면습지 시스템	41
<그림 2-2>	여과습지 (수평흐름 방식) 시스템	41
<그림 2-3>	부유식물습지 시스템	42
<그림 2-4>	Arcata 하수처리 연못-습지 시스템	46
<그림 2-5>	Hayward 습지 개념도	47
<그림 2-6>	Des Plaines River 인공습지 시스템	49
<그림 2-7>	Olentangy River 습지시스템	51
<그림 2-8>	강우 유출수 처리 연못-습지 시스템	52
<그림 3-1>	조건성 연못의 수질정화 작용	56
<그림 3-2>	조건성 연못의 호기성산화와 광합성산소배출의 상호관계	57
<그림 3-3>	자유수면 인공습지의 정수식물, 수심, 잔재물, 토양층	57
<그림 3-4>	시스템 조성부지의 위치와 유역경계	59
<그림 3-5>	유역 토지이용현황 및 마을분포	60
<그림 3-6>	연못-습지 시스템의 월별 수온	80
<그림 3-7>	연못-습지 시스템의 월별 pH	81
<그림 3-8>	연못-습지 시스템 BOD5 처리수준	82
<그림 3-9>	유입수와 부들습지셀 유출수의 BOD 농도 누적확률	83
<그림 3-10>	유입수와 갈대습지셀 유출수의 BOD 농도 누적확률	83
<그림 3-11>	연못-습지 시스템 SS 처리수준	84
<그림 3-12>	연못-습지 시스템 TN 처리수준	86
<그림 3-13>	유입수와 부들습지셀 유출수의 TN 농도 누적확률	87
<그림 3-14>	유입수와 갈대습지셀 유출수의 TN 농도 누적확률	87
<그림 3-15>	연못-습지 시스템 TP 처리수준	88
<그림 3-16>	1차연못과 2차연못의 5월 평균 DO, 온도, pH	89
<그림 3-17>	1차연못과 2차연못의 8월 평균 DO, 온도, pH	90
<그림 3-18>	1차연못과 2차연못의 10월 평균 DO, 온도, pH	90
<그림 3-19>	1차연못과 2차연못 TN, NO ₃ -N의 평균함량	92
<그림 3-20>	1차연못과 2차연못의 유효인산과 총인산의 평균함량	93
<그림 3-21>	부들 평균 초장	94
<그림 3-22>	부들 평균 개체수	94
<그림 3-23>	갈대 평균초장	95
<그림 3-24>	갈대 평균 개체수	95
<그림 3-25>	부들의 건중량	97
<그림 3-26>	갈대 건중량	98

<그림 3-27> 부들의 N함량	98
<그림 3-28> 부들의 P함량	99
<그림 3-29> 갈대의 N함량	99
<그림 3-30> 갈대의 P함량	100
<그림 3-31> 각 습지셀에서의 샘플채취 위치	101
<그림 3-32> 부들습지셀의 TN, NO ₃ -N의 평균함량	102
<그림 3-33> 갈대습지셀의 TN, NO ₃ -N의 평균함량	102
<그림 3-34> 부들습지셀의 유효인산과 총인산의 평균함량	102
<그림 3-35> 갈대습지셀의 유효인산과 총인산의 평균함량	103
<그림 3-36> 근자연형 인공습지 월별 수온	111
<그림 3-37> 근자연형 인공습지 월별 pH	112
<그림 3-38> 근자연형 인공습지 BOD ₅ 처리수준	113
<그림 3-39> 유입수와 근자연형 인공습지 처리수의 BOD 농도 누적확률	114
<그림 3-40> 근자연형 인공습지 SS 처리수준	114
<그림 3-41> 근자연형 인공습지 TN 처리수준	116
<그림 3-42> 유입수와 근자연형 인공습지 처리수의 TN 농도 누적확률	116
<그림 3-43> 근자연형 인공습지 TP 처리수준	117
<그림 3-44> 년도별 평균 부들 신장	118
<그림 3-45> 년도별 평균 부들 개체수	119
<그림 3-46> 근자연형 인공습지 샘플채취 위치	120
<그림 3-47> 근자연형 인공습지 부들 건중량	120
<그림 3-48> 부들 식물체내 N함량	121
<그림 3-49> 부들 식물체내 P함량	121
<그림 3-50> 인공습지 토양 샘플채취 위치 개념도	122
<그림 3-51> 근자연형 인공습지 TN, NO ₃ -N의 평균함량	123
<그림 3-52> 근자연형 인공습지의 유효인산과 총인산의 평균함량	123
<그림 3-53> 연못-습지 시스템 모델 A 평면개념도	131
<그림 3-54> 연못-습지 시스템 모델 A 평면개념도	132
<그림 3-55> 연못-습지 시스템 모델 B 평면개념도	135
<그림 3-56> 연못-습지 시스템 모델 B 평면개념도	136
<그림 3-57> 근자연형 인공습지 모델 A 평면개념도	140
<그림 3-58> 근자연형 인공습지 모델 A 단면개념도(1)	142
<그림 3-59> 근자연형 인공습지 모델 A 단면개념도(2)	143
<그림 3-60> 근자연형 인공습지 모델 B 평면개념도	145
<그림 3-61> 근자연형 인공습지 모델 B 단면개념도(1)	146
<그림 3-62> 근자연형 인공습지 모델 B 단면개념도(2)	147
<그림 7-1> 직렬형 연못-습지 시스템	155

<그림 7-2>	병렬형 연못-습지 시스템	156
<그림 7-3>	직렬형 근자연형 인공습지	156
<그림 7-4>	병렬형 근자연형 인공습지	156

사진차례

<사진 2-1> 광주천 자유수면습지	38
<사진 2-2> 광주천 여과습지	39
<사진 2-3> Arcata 수질정화 연못	46
<사진 2-4> Arcata 연못의 새서식	46
<사진 2-5> 처리습지 모습	46
<사진 2-6> 마무리습지의 개수부 및 인공섬	46
<사진 2-7> Hayward 습지(2A)	47
<사진 2-8> Hayward 습지(3A)	47
<사진 2-9> Des Plaines 인공습지 인공습지 유입부	49
<사진 2-10> Des Plaines 눈으로 덮인 부분이 개수부	49
<사진 2-11> Olentangy 인공 습지의 부들	50
<사진 2-12> Olentangy 인공 부들습지 유입부 및 관찰 deck	50
<사진 3-1> 1:40 축적의 연못-습지 시스템 모형	72
<사진 3-2> 1차연못의 바닥으로 유입되어 이동해 가는 모습	72
<사진 3-3> 2차연못의 바닥으로 1차연못 유출수가 이동하는 모습	72
<사진 3-4> 습지 셀의 물의 이동 모습	72
<사진 3-5> 연못 토공	73
<사진 3-6> 습지셀 토공	73
<사진 3-7> 습지셀의 유입부	74
<사진 3-8> 습지셀의 유출부 Weir	74
<사진 3-9> 습지셀 유출부 구조	74
<사진 3-10> 습지셀 주변 배수로 토공	74
<사진 3-11> 집수정으로부터 유량분배탱크 배관공	74
<사진 3-12> 습지 배관공	74
<사진 3-13> 펌핑 시설	75
<사진 3-14> 펌프 자동조절 판	75
<사진 3-15> 집수정 시공	75
<사진 3-16> 유량분배 탱크	75
<사진 3-17> 1차연못 모습	75
<사진 3-18> 2차연못 모습	75
<사진 3-19> 개답지역의 자생 갈대	77
<사진 3-20> 개답지역의 자생 부들	77
<사진 3-21> 자생갈대 다발 묶음	77
<사진 3-22> 자생부들 다발 묶음	77

<사진 3-23> 습지 셀 식재	78
<사진 3-24> 식재 직후 습지 모습	78
<사진 3-25> 부들 식재 후 성장모습	78
<사진 3-26> 갈대 식재 후 성장모습	78
<사진 3-27> 집수정 보완공	79
<사진 3-28> 집수정 보완공	79
<사진 3-29> 펌프 교체공	79
<사진 3-30> 배수로 보완공	79
<사진 3-31> 1차연못의 여름 전경	91
<사진 3-32> 1차연못의 겨울 전경	91
<사진 3-33> 2차연못의 여름 전경	91
<사진 3-34> 2차연못의 겨울 전경	91
<사진 3-35> Coretaker로 연못 바닥 슬러지 채취	92
<사진 3-36> 연못바닥 슬러지 채취 Coretaker 모습	92
<사진 3-37> 부들습지 여름 전경	96
<사진 3-38> 부들습지 겨울 전경	96
<사진 3-39> 갈대습지 여름 전경	96
<사진 3-40> 갈대습지 겨울 전경	96
<사진 3-41> 1:40 축척의 인공습지 시스템 모형	108
<사진 3-42> 유입부 주변 개수부로 확산해 가는 모습	108
<사진 3-43> 인공습지 중앙부로 유입수가 확산 되어가는 모습	108
<사진 3-44> 인공습지 유출부로 유입수가 이동해 가는 모습	108
<사진 3-45> 인공습지 유출부로 유입수가 이동하는 모습	108
<사진 3-46> 인공습지 토공	109
<사진 3-47> 인공습지 토공 후 모습	109
<사진 3-48> 인공습지 유입부 시공	109
<사진 3-49> 인공습지 유출부 weir시공	109
<사진 3-50> 부들 채취	110
<사진 3-51> 인공습지 시스템 부들식재	110
<사진 3-52> 인공습지 시스템 부들식재 후 모습	110
<사진 3-53> 근자연형 인공습지 여름 전경	119
<사진 3-54> 근자연형 인공습지 겨울 전경	119
<사진 3-55> Olentangy 습지 관찰택	149
<사진 3-56> 와따라세 습지전망대	149
<사진 3-57> Arcata 습지 휴게공간	149
<사진 3-58> Hayward 습지 산책로	149

도면차례

<도면 3-1> 유역처리 연못-습지 및 근자연형 인공습지 시스템 개념도	62
<도면 3-2> 연못-습지 시스템 평면도	63
<도면 3-3> 연못-습지 시스템 단면도	64
<도면 3-4> 집수정 및 펌핑시설설계도	65
<도면 3-5> 습지 셀 분배박스 및 유출부 weir	66
<도면 3-6> 유입·유출부 평면도 및 단면도	67
<도면 3-7> 습지 셀 유입부 상세도	68
<도면 3-8> 유역처리 근자연형 인공습지 시스템 개념도	104
<도면 3-9> 인공습지 시스템 단면도	105

여 백

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 필요성

1. 기술적 측면

하구(estuary)에 조성된 간척지 담수호의 수질이 점점 악화되면서 이들로부터 공급되는 농업 및 공업 용수의 수질이 부적합한 상태에 이르고 있다. 간척지 담수호는 유입하천의 상류유역과 담수호 주변 개답지역에서 일어나는 각종 인간활동과 토지이용으로부터 배출되는 미처리 점원 오염물과 비점원 오염물이 최종 유입된다.

유역의 생활하수, 축산폐수, 산업폐수 등 점원 오염부하량이 증가하고 있으나, 이들을 처리할 하·폐수 처리시설의 용량이 부족하여 많은 양의 오염물이 담수호로 유입되고 있는 실정이며, 유역의 농경지 및 마을과 도시에서 강우시 유출수(runoff)와 함께 담수호로 유입되는 비점원 오염부하량은 산업 및 영농 활동의 증가와 더불어 점차 증가하는 추세이다. 담수호 주변 개답지역에 조성된 농경지, 공업단지, 정주공간에서 발생하는 비점오염원과 미처리 점오염원 오염부하량도 담수호 수질에 영향을 미치게 된다.

담수호로 유입되는 비점원 오염물과 미처리 점원 오염물을 정화하는 기법으로 유역처리 연못-습지 시스템과 인공습지 시스템이 활용되고 있으나 국내에서는 활용이 되지 못하고 있다. 연못-습지 시스템은 연못시스템과 인공습지 시스템의 장점을 결합한 시스템이다. 연못시스템(treatment pond system)은 자연상태에서 태양에너지와 생태계의 작용에 의해 각종 하·폐수를 효율적이며 경제적으로 처리할 수 있는 기법으로 점원뿐 아니라 비점원 오염을 처리하기 위해 열대에서 한대에 걸쳐 전 세계적으로 이용되고 있다. 연못시스템은 BOD와 부유물(SS)을 제거할 뿐 아니라 영양염류인 질소와 인, 기생충알 및 병원균, 중금속을 동시에 제거하는 장점이 있다. 특히 조류(algae)의 성장으로 질소와 인의 제거가 용이하다. 연못시스템은 대부분 2 - 3개 셀(cell)의 연못을 직렬로 연결하여 구성한다. 담수호 유입부나 개답지역에 몇 개의 대형 연못으로 구성된 연못시스템을 만들어 수질이 나쁜 하천 유입수나 강우시 초기 유출수를 연못시스템으로 유입시켜 자연생태적으로 정화 및 침전시키면 유기물 및 영양염류의 제거가 가능하며, 연못바닥에 침전된 슬러지는 5 ~ 10년에 한번 제거해 주도록 설계가 가능하다. 따라서 담수호 바닥에 침전될 유기물의 상당량을 사전에 통제할 수 있는 좋은 방법이 된다.

담수호 유입수의 자연생태적 수질정화에는 인공습지(constructed wetlands)가 활용되고 있다. 인공습지는 수질을 정화하기 위해 조성한 습지이며, 인공습지를 수질정화인공습지(constructed treatment wetlands) 혹은 습지정화시스템(wetland treatment system)이라 부르기도 한다. 미국 등 선진국에서는 하천과 호수의 수질보전을 위해 인공습지를 많이 활용하고 있으나 국내에서는 최근에 활용이 시도되고 있다. 담수호의 수질보전을 위해 우리나라 기후조건과 환경에 적합한 인공습지의 모델 개발과 설계인자에 대한 연구가 시급한 실정이다. 인공습지는 BOD와 SS뿐만 아니라 담수호와 하천의 부영양화의 원인이 되는 질소와 인을 효율적으로 처리할 수 있는 장점이 있으며, 수질정화 이외에 다양한 친환경적 기능을 제공한다. 물고기 및 야생동물의 서식처를 제공할 수 있고, 비오톱(biotop)으로 활용이 가능하며, 조류(bird) 관찰, 시민휴식, 자연학습 공간을 제공할 수 있으며, 훼손된 습지를 복원하여 지역의 경관을 아름답게 조성할 수 있다. 최근 선진국에서는 수질정화 인공습지를 조성할 때 이런 친환경적 기능을 강조하고 있다.

2. 경제·산업적 측면

수질악화로 인한 시화호 담수화 포기는 막대한 경제적 손실이외에 인근해역 및 주변농지에도 피해가 가는 환경적 손실을 가져와 담수호의 수질악화에 대한 국민적 관심이 고조되고 있다. 방조제 공사가 진행중인 새만금 간척사업으로 조성될 새만금호의 수질에 대한 우려도 높아가고 있다. 새만금호의 수질개선을 위해 상류유역의 환경기초시설 확충, 담수호 주변에 저류지 및 인공습지 조성 등이 논의되고 있다.

담수호의 수자원보전은 상류유역에 점오염원 처리장 증설만으로는 불가능하며 상류유역과 담수호 주변 개답지역에서 담수호로 유입되는 최종 유입수에 함유되어 있는 비점원 및 미처리 점원 오염물을 처리할 수 있는 유역처리 시스템개발이 필요하다.

간척사업에 대한 최대 논란은 조성될 담수호의 수질유지가 가능할 것인가에 있다. 국내 법규상 담수호는 호소의 수질기준이 적용되어 농업용수로 사용하기 위해서는 호소수질 IV 등급인 TN 1ppm, TP 0.1ppm 이하를 유지하여야 한다. 하천상류의 상수원 및 저수지의 수질과 하천의 최하류에 조성된 담수호의 수질을 똑같은 기준으로 유지해야 하는 어려움이 있다. 연못시스템의 처리수에는 조류(algae)가 함유되어 있어 처리수를 유기농업 관수로 사용하여 조류를 비료 대신 사용하는 국가가 많다. 담수호로 유입되는 최종 유입수에 함유되어 있는 비점원 및 미처리 점원 오염물을 연못시스템에서 처리하여 연못시스템의 처리수를 개답지역의 논이나 밭에 관수하여

담수호로 유입될 질소와 인을 작물생산에 활용하는 방안도 필요하다.

3. 사회·문화적 측면

간척사업의 또 다른 논란은 갯벌(salt marsh) 훼손에 대한 우려에 있다. 갯벌이 가지고 있는 기능(functions)이 사회에 제공하는 화폐가치와 개별을 매립하여 사용할 경우 경제적 가치에 대한 비교논란이다. 생태학자인 Gosselink et al.(1974)는 미국의 하구저습지 가치를 생명유지(life-support)개념을 도입하여 하구습지의 각 기능을 화폐가치로 합산하기보다 국민총생산에 대한 에너지소비 비율을 이용하여 \$2,500 - \$4,000/acre/year로 계산한 후 5% 이자율을 적용하여 훼손되지 않은 갯벌의 사회적 가치가 \$50,000 - \$80,000/acre/year라 주장하였다. 그러나 이 수치는 미국의 Georgia, Louisiana주와 같은 아열대 하구습지의 가치를 일반화한 값으로, 우리나라와 같이 온대권 기후에 적용하기에는 불합리한 점이 있다.

갯벌이 보존되어야하는 주요 쟁점은 연안어족의 산란처와 야생동물의 서식처가 된다는 점이다. 갯벌이 전환되어 조성되는 개답지역에 연못시스템을 설치하여 갯벌의 일부를 연못시스템의 조류성장연못(managed algae pond)으로 대체시키면, 갯벌보다 2 - 4배 정도 높은 일차생산을 기대할 수 있으며, 거의 모든 일차생산물의 수확이 가능하다. 이런 생물공학(micro-algal biotechnology)은 생산성에 있어 갯벌보다 더 효율적일 수 있다. 이스라엘, 독일, 미국, 동남아시아에서는 연못시스템 처리수의 조류(algae)와 플랑크톤을 이용하여 양어를 하며, 동남아 일부 국가는 연안습지에 연못시스템을 설치하여 수질정화를 하면서 처리수의 조류를 새우양식에 이용하고 있다 (Yang, 1992).

개답지역에 연못-습지 시스템을 설치하여 유역으로부터 담수호로 유입되는 오염 물질을 정화하여 담수호 수질을 보전하면서, 훼손된 습지를 복원하고 야생동물서식처를 제공할 수 있다. 개답지역의 농경지와 연못-습지 시스템을 생태단지(ecocomplex)의 개념으로 설계하여 시민휴식공간, 자연학습장, 관광지로 활용이 가능하다. 시스템의 처리수를 작물생산과 양어에 재활용하고, 연못과 습지는 야생동물 서식처, 낚시, 조류감상지로 활용이 가능하다. 太陽熱-汚染物-藻類-作物-養魚-레크레이션 과정은 生態的 淨化-再活用-收穫을 지속적으로 수행할 수 있다. 이런 유역처리 개념은 생태계 측면에서 입력환경인 유역, 담수호, 출력환경인 배후도시 및 정주공간을 동시에 고려할 수 있어 담수호 수질을 보전하면서 친환경적 간척지 개발이 가능하다.

제 2 절 연구개발의 목적 및 범위

본 연구는 국내 기후 및 담수호 여건에 적합하고, 상류유역 및 담수호 주변 개답지역에서 담수호로 흘러드는 하천수에 함유되어 있는 비점원 및 머처리 점원 오염물을 자연생태적으로 처리할 수 있는 유역처리 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지 모델을 개발하고 설계인자 값을 도출하는데 일차적 목적이 있다. 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지의 친환경적 활용방안을 연구하고, 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지에 활용 가능한 수질정화 정수식물을 연구하였다.

문헌조사 및 해외답사를 통하여 외국의 연못시스템, 인공습지, 연못-습지 시스템의 사례를 분석하고 설계인자를 검토하였으며, 수질정화 인공습지에 활용되고 있는 정수식물 수종을 분석하였다. 유역처리 시스템의 부지확보와 시스템 구성에 적합한 장소를 선정하여, 시스템으로 유입될 하천의 수질과 부지 현황을 분석하였다. 유역처리 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지를 설계한 후 모형실험을 수행하여 현장에 시공하였다. 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지를 시공한 후 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지의 수질을 모니터링하고 처리수준분석을 분석하였다. 정수식물의 성장과 성분을 분석하였고, 연못의 반응과 연못바닥의 슬러지를 분석하였으며, 습지셀의 토양을 분석하였다. 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지의 조사분석 내용을 종합하여 설계인자 및 설계인자 값을 도출하였으며, 유역처리 연못-습지 시스템과 유역처리 근자연형 인공습지의 모델을 개발하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발

1. 국내기술 현황

국내에서 호소 및 담수호 수질정화를 위해 유역처리 연못-습지 시스템을 조성한 사례는 아직 없으며, 인공습지를 이용한 호소 및 담수호 수질정화 국내기술은 초보 단계이다. 담수호 수질개선을 위한 인공습지조성 시도는 시화호 상류 반월천과 동화천 인공습지조성 공사가 최초이다. 국내의 기후여건에서 수질정화 목적의 인공습지 설계인자들에 대한 실험연구가 거의 없는 상태에서 대형 인공습지를 조성한 경우이다. 최근 인공습지를 고수부지에 조성하여 하천수를 정화하는 연구들이 수행되고 있다. 환경부 G7과제인 국내여건에 맞는 자연형 하천 공법의 개발 연구에서 수질정화 인공습지가 양재천 고수부지에 조성하여 연구된 바 있다. 한국건설기술연구원 연구과제인 자연식생을 이용한 하천 및 하수정화기술 실용화 연구로 광주천 저수로를 흐르는 물을 자연유하시켜 정화하는 인공습지가 조성되어 모니터링 중에 있다. 논에서 유출되는 비점오염물의 정화를 실험할 수 있는 인공습지 시스템이 전남대학교 교내 농장부지에 조성되어 실험 중에 있다.

국내의 경우 연못시스템의 일부 과정을 수행하는 산화지가 기계식 처리 후 배출되는 공장폐수나 간이정화조 처리 후 유출되는 축산폐수를 처리하기 위해 이용되고 있으며, 체계적인 연못시스템은 최근에야 활용이 시도되고 있다. 연못시스템을 수질정화에 활용한 경우는 축산폐수를 처리 및 재활용하기 위해 전라남도 나주시 봉황면 전남대학교 사육장부지에 연못시스템을 설계시공하고 체계적으로 연구한 사례가 있다.

2. 국내 사례

가. 연못 시스템

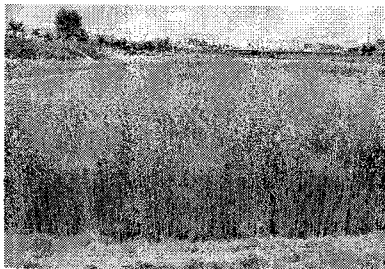
축산폐수 처리 및 재활용 연못시스템이 전라남도 나주시 봉황면 전남대학교 사육장부지에 설치되어 연구되었다. 이 연못시스템은 1차연못(조건성) - 2차연못(조건성)

- 3차연못(호기성, 마무리연못, 양어)으로 구성되어 있으며 1차연못 바다에 메탄발효를 촉진시키기 위해 Pit를 설치하였다. 처리수를 양어지에 관수하여 양어를 하거나, 3차연못에서 먹이공급 없이 양어를 할 수 있는 시스템이다. 연구결과 유입폐수의 평균 BOD₅는 398.7mg/ℓ 이었으며, 1차연못, 2차연못, 3차연못 처리수의 평균 BOD₅는 각각 49.1mg/ℓ, 27.9mg/ℓ, 19.8mg/ℓ로 1차연못, 2차연못, 3차연못에서 유입폐수 BOD₅의 88%, 93%, 95%가 제거되었다(양홍모, 1998). 개발된 축산폐수 처리 및 재활용 연못시스템은 한우나 젓소를 사육하는 중소규모의 축산농가에서 활용이 가능하다.

나. 수질정화 인공습지

서울특별시 양재천 고수부지에 하수처리장 방류수와 하천도랑으로 유입되는 하수 율류수를 정화하는 여과습지와 자유수면습지가 시공되어 수질모니터링이 수행된 바 있다. 하천제방 밖에 수질정화 인공습지를 조성할 부지의 확보가 어려운 경우, 하천 고수부지에 수질정화 인공습지를 조성하여 하천 유입 미처리 점원오염물을 정화하는 방안이 연구되었다. 자유수면습지의 초기 BOD₅, SS, TN, TP의 처리효율은 각각 43%, 33%, 31%, 51% 였으며, 여과습지의 초기 BOD₅, SS, TN, TP의 처리효율은 각각 70%, 73%, 53%, 72% 였다.

광주천 고수부지에 광주천 저수로를 흐르는 물을 정화하는 자유수면습지와 여과 습지 시스템이 조성되어 연구가 수행중에 있다. 고수부지에 수질정화 인공습지를 조성하여 하천수를 정화하는 기술을 개발하는 연구이다. 광주천 하천수가 수중보에서 자연유하로 각 시스템에 유입되어 정화된 후 광주천으로 재유입되고 있다. <사진 2-1>와 <사진 2-2>는 광주천 고수부지에 조성된 수질정화 자유수면습지와 여과습지의 모습이다.



<사진 2-1> 광주천 자유수면습지



<사진 2-2> 광주천 여과습지

제 2 절 국외 기술개발

1. 국외 기술현황

외국에서 이용되고 있는 친환경적 수질정화 시스템인 연못시스템, 인공습지, 연못-습지 시스템의 특성, 기술현황, 장단점을 살펴보기로 한다.

가. 수질정화 연못시스템

미국을 중심으로한 수질정화 연못시스템의 외국기술은 상당한 수준에 이르고 있다. 미국의 경우 연못시스템이 설치된 장소가 5,000개에 달한다(Middlebrooks, 1982).

1) 연못시스템 구성 및 장단점

효율적인 수질정화를 위해 여러 종류의 연못이 직렬형 혹은 병렬형으로 구성되어 활용되고 있다. 온대권에서는 조건성, 호기성 연못을 적절히 연결시켜 병렬형(series), 직렬형(parallel), 혹은 병렬과 직렬 혼합형으로 연못시스템을 설계하고 있으며, 병렬형 시스템은 유입수가 많을 경우 사용된다. 연못시스템의 장점은 BOD, SS뿐 아니라 질소, 인을 동시에 제거하는 장점이 있다. 2차처리수준의 기계적 활성오니처리법은 이들을 처리할 수 없어 과도한 비용이 소요되는 3차이상의 처리수준이 요구된다. 연못시스템은 운영비, 관리비가 적게 들며 축조된 독을 손쉽게 원상으로 회복시킬 수 있어 연못시스템 설치장소를 다른 용도의 토지이용으로 전용이 쉽다. 연못시스템의 단점은 상대적으로 다소 많은 부지면적을 필요로 하는데 있으나, 최근에는 소요면적을 줄이는 연구들이 진행중이다.

2) 연못시스템 설계 추이

연못시스템 설계기법들은 BOD₅ 부하량에 기초를 두고있다. 면적부하율모델(EPA, 1983a), Gloyna 모델(Gloyna, 1979), 완전혼합모델(Marias, 1970), 프러그유하모델(Middlebrooks et. al., 1982), Oswald 모델(Oswald, 1988b)등이 연못시스템 설계를 위해 개발되어 왔다. 온대권에서는 면적부하율모델, Oswald 모델을 응용하는 것이 바람직하다. 미국 환경처(EPA, 1983a)에서 개발한 면적부하율모델은 <표 1-1>과 같은 기준으로 연못시스템의 설계를 권장한다.

<표 2-1> 면적부하율 모델 권장 연못시스템 구성

겨울평균 기온	총체류기간 (일)	수심 (m)	평균 BOD ₅ 부하량 (kg/ha/day)	시스템구성	연못 수
0 - 15°C	40 - 60	1.2 - 1.8	22.4 - 44.8	직렬형	3 - 4+
0°C 이하	80 - 120	1.5 - 2.4	11.2 - 22.4	직렬형	3 - 4+

1차연못(조건성 연못)은 연못시스템에서 중요한 역할을 한다. 유기물이 바닥에 침전되어 슬러지층이 형성되고, 쌓인 슬러지가 메탄발효에 의해 완전히 없어지는 것이 이상적인 1차 조건성 연못이다. 수심 1.5 m 정도의 연못에서는 강한 바람이 불면 수직으로 물이 섞이게 되어 윗층의 용존산소가 바닥으로 침투하여 혐기성분해가 정지하는 결함이 있다(Yang, 1992).

1차 조건성 연못의 문제점인 넓은 소요면적을 축소하고 용존산소의 바닥침투를 차단하기 위한 방안에 대한 연구가 필요하며, 연못시스템의 처리효율을 개선하기 위해 유입수의 단기이동(short-circuiting)을 해소하는 방안에 관한 연구가 필요하다.

나. 수질정화 인공습지

1970년대 이후 미국을 중심으로 서구 선진국에서 인공습지(constructed wetland)를 이용하여 수질을 정화하는 기술을 개발해오고 있다. 이들 선진국에서는 인공습지를 점원 오염물처리뿐 아니라 비점원 오염물을 처리하는데 이용하고 있다.

1) 인공습지 유형

인공습지는 수리학적 특성에 따라 자유수면습지(surface flow wetlands), 여과습지(subsurface flow wetlands), 부유식물습지(floating aquatic plant wetlands)로 크게 분류한다(Corbitt and Bowen, 1994, EPA, 1988, 양홍모, 1999a).

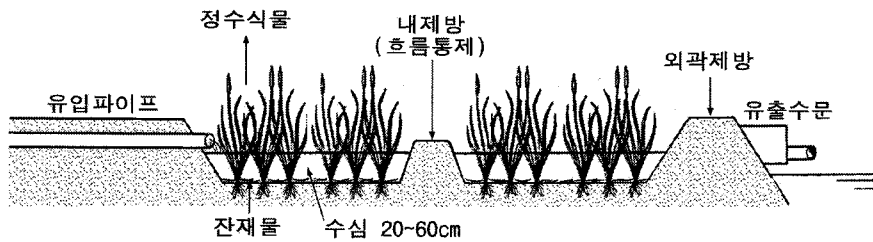
수질정화 인공습지 시스템은 유입유량과 BOD, TN, TP의 부하량에 따라 습지셀 1개를 활용하거나, 수개의 습지셀(cell)을 직렬 또는 병렬로 연결하여 구성한다.

<그림 2-1>은 자유수면습지 시스템 개념도이다. 자유수면습지 시스템은 유입수가 저류하는 장소(basin), 유입수의 침출을 막는 제방(berm), 정수식물이 자라는 수심 0.2 ~ 0.6 m의 식재구간(closed water)과 수심이 다소 깊어 정수식물이 자라지

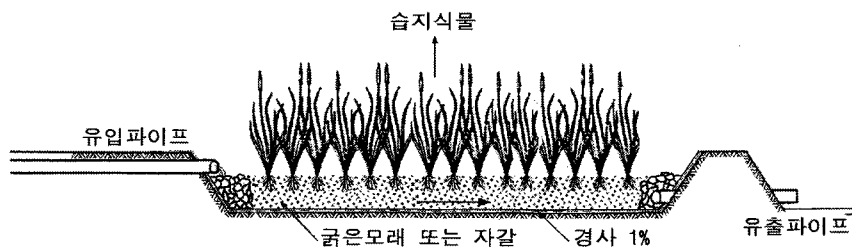
않는 1 ~ 1.2 m 개방구간(open water)으로 설계한다. 자유수면습지 시스템은 정수 식물에 형성된 미생물막에 의한 분해, 습지바닥에 형성된 토양-잔재물 층의 침전 및 흡착, 정수식물 뿌리주변에 형성된 근권에 의한 호기성분해, 토양의 혐기성분해, 정수식물의 흡수 등으로 오염물질이 정화된다.

<그림 2-2>는 여과습지 시스템의 개념도이다. 여과습지 시스템은 지면이 물에 잠기지 않으며 땅속에 0.6 ~ 1 m 깊이의 불투수 트렌치(trench)를 설치하여 자갈이나 굵은 모래를 넣어 자갈과 모래 사이로 유입수가 흐르면서 정화되거나, 표토에 심은 습지식물이 자갈이나 모래에 사이에 쌓이는 유기물을 흡수하여 제거하는 시스템이다. 여과습지는 유입수가 시스템 표면에서 아래로 수직으로 흐르는 유형(vertical flow)과 수평으로 흐르는 유형(horizontal flow)이 활용되고 있으며 수평흐름 방식을 일반적으로 많이 사용한다.

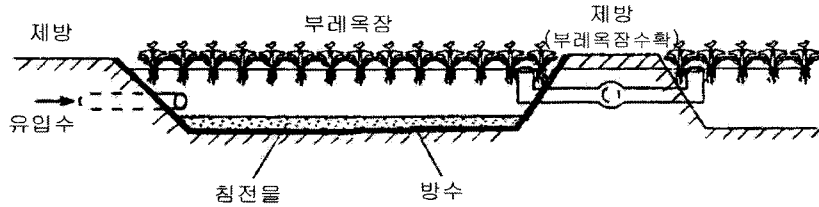
<그림 2-3>은 부유식물습지 시스템의 개념도로 부레옥잠(water hyacinths)이나 개구리밥(duckweed) 같은 부유식물을 이용하는 시스템이다. 부유식물이 영양염류를 흡수하여 정화하며 부유식물의 뿌리와 잎에 형성된 미생물막이 오염물질을 분해하는 역할을 한다.



<그림 2-1> 자유수면습지 시스템



<그림 2-2> 여과습지 (수평흐름 방식) 시스템



<그림 2-3> 부유식물습지 시스템

2) 인공습지 유형별 장단점

자유수면습지 시스템의 정수식물은 성장에 필요한 양분을 일차적으로 식재된 토양에서 흡수한다. 자유수면습지 시스템은 여과습지 시스템에 비해 조성비용이 저렴하고 수리조작이 용이하나 조성면적은 여과습지보다 다소 많이 필요로 한다. 자유수면습지 시스템은 개수부와 섬을 조성할 수 있어 여과습지보다 야생동물 서식처 제공, 시민휴식 및 자연학습 공간 제공이 용이하다. 북미에서는 생활하수 등 점오염원을 연못시스템에서 1차 혹은 2차처리 수준으로 정화한 후 자유수면습지에 유입시켜 처리하는 경우가 많으며, 최근에는 2차처리장 방류수, 오염하천수, 강우유출수를 정화하는데 자유수면습지를 활용하고 있다.

여과습지 시스템의 정수식물은 성장에 필요한 양분을 대부분 유입수에서 흡수하기 때문에 유입수 오염농도가 식물성장에 지장이 없을 정도여야 한다. 여과습지 시스템은 표면으로 유입수가 흐르지 않기 때문에 냄새와 해충발생률이 적으며, 사람에게 오염물 접촉의 기회가 적다. 여과습지는 자유수면습지에 비해 인공습지의 친환경적 기능이 상대적으로 떨어지며 시공비가 많이 든다. 유럽에서는 소규모 농촌마을의 생활하수나 축산폐수, 공장폐수를 정화하기 위해 여과습지를 이용하고 있다. 하·폐수를 여과습지에 직접 유입시키기보다 1차처리수준의 전처리과정을 거친 후 여과습지에 유입시켜 처리하고 있다.

부유식물습지 시스템은 국내와 같은 온대권에서는 겨울철에 부유식물이 죽기 때문에 활용기간이 한정되고 매년 부유식물을 시스템에 식재하여야 하는 단점이 있어 온대권에서는 거의 활용하지 않는다.

3) 인공습지의 장점

자연처리(natural treatment) 시스템인 인공습지는 수질정화 측면에서 기계식 처리(mechanical treatment) 시스템인 2차처리 활성슬러지법에 비교하여 운영과 관리가 용이하고, 전기 에너지가 거의 필요하지 않으며, 야생동물의 서식처를 제공하는 장점을 지니고 있다. 질소와 인은 2차처리 활성슬러지법에서는 제거가 거의 불가능하나 인공습지는 질소와 인을 동시에 제거하는 장점이 있다. 자유수면 인공습지는 TN을 2 - 3ppm로 정화하는데 활용한다. 인공습지를 조성할 경우 지역의 경관을 아름답게 개선할 수 있으며, 시민들의 자연학습장으로 이용이 가능하다.

4) 인공습지 설계 추이

수질정화 인공습지 설계의 핵심은 설계인자 선정과 설계인자 값의 결정이다. 수질정화 인공습지를 조성할 경우 설계인자로 유입수 및 유출수의 오염물질 농도(concentration level), 수리학적 체류시간(hydraulic detention time), 수리학적 부하율(hydraulic loading rate), BOD, TN 및 TP 부하율(loading rate), 수온(water temperature), 수심(water depth) 등이 일반적으로 사용된다.

우리나라와 같은 온대권에서 겨울철에 결빙되거나 겨울철 월평균 기온이 0°C 이하인 지역에 수질정화 인공습지를 조성할 경우는 조성할 부지의 기후조건과 유사한 지역에 조성되어 가동중인 인공습지의 설계인자 값을 비교 검토하여 설계하고 있다. 겨울철에 습지식물이 죽는 지역에서는 줄기가 수중에 서 있어 줄기 주변에 미생물막이 오래 지속되는 정수식물을 활용하고 있다. 유입수가 특정 지점으로 집중되는 점유입(point inflow)보다는 유입수가 넓은 면적으로 퍼지도록 하는 확산유입(disperse inflow)으로 설계하는 추세이다.

5) 수질정화 인공습지 활용 및 사례

가) 점오염원 수질정화 인공습지

<표 2-2>는 미국과 캐나다에서 운영하고 있는 수질정화 인공습지 시스템의 설계인자와 이들 시스템의 처리효율을 나타낸다(Kadlec and Knight, 1996). 이들 시스템은 국내 기후와 비슷한 위도에 조성되어 있으며, 자유수면 시스템으로, 부들, 고랭이 등의 정수식물을 활용하고 있다.

<표 2-3>은 미국과 캐나다에서 운영하는 70여개의 자유수면 인공습지 시스템들

의 평균 처리효율을 나타낸다. BOD₅, SS, TN, TP가 각각 74%, 70%, 53%, 57%가 제거된다

<표 2-2> 북미 수질정화 인공습지 시스템의 설계인자 및 처리효율

시스템 (주)	유입 수	습지 형태	면적 (ha)	식생	셀 (Cell) 수	유입 유량 (m ³ /d)	수리학 적 부하율 (cm/d)	BOD In (mg/L)	BOD Out (mg/L)	SS In (mg/L)	SS Out (mg/L)	TN In (mg/L)	TN Out (mg/L)	TP In (mg/L)	TP Out (mg/L)
Arcata (CA)	MUN	CON	15.18	MAR	6	8,781	5.786	53	3.3	54	3	40	3		
Cobalt (Ontario, Canada)	MUN	CON	0.09	MAR	1	17	1.828	20.7	4.6	36.2	28.0	6.98	3.38	1.68	0.77
Hayward (CA)	MUN	CON	28.3	MAR	2 (B2A, B2B)	16.3	12.904						1.8		
Houghton Lake (MI)	MUN	NAT	79	MAR	2	6,360	0.805	13.2		17.2				3.06	
Listowel (Ontario, Canada)	MUN	CON	0.1	MAR	1 (L4)	27	1.778	56.3	9.6	111.1	8.0	19.08	8.93	3.18	0.62
Vermontville (MI)	MUN	CON	4.60	MAR	4	380	0.826		3.3		4.2				0.25

MUN-도시하수, NAT-자연습지, CON-인공습지, MAR- 정수식물

<표 2-3> 북미 자유수면 인공습지의 평균 처리효율

	농도(mg/L)		
	유입수	처리수	처리율(%)
BOD ₅	30.3	8.0	74
SS	45.6	13.5	70
TN	9.03	4.27	53
TP	3.78	1.62	57

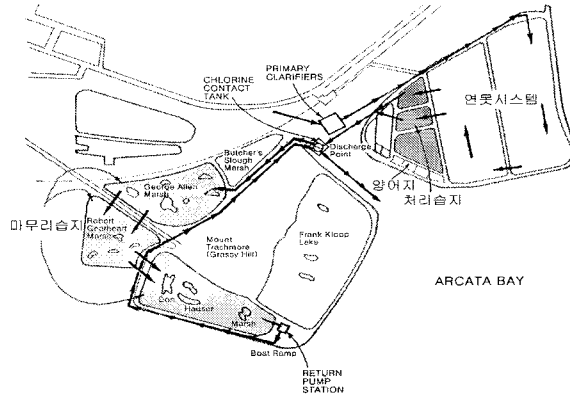
(1) Arcata 연못-습지 시스템

미국 캘리포니아주 Arcata만에 위치한 Arcata 연못-습지는 소도시(인구 약 19,000명)에서 배출되는 도시하수 2.9mgd/day(10,962m³/day)를 처리하여 하구의 수질을 보전하기 위해 조성된 시스템이다. <그림 2-4>는 Arcata 연못-습지의 하수처리 개념도이다. 유입수는 1차처리 침전조를 지나 연못시스템에서 2차처리수준 정도로 정화된 후 처리습지를 거쳐 마무리습지로 유입되어 정화된 후 하구로 방류된다. 연못시스템은 2개의 조건성연못을 직렬로 구성하였고, 처리습지는 3개의 인공습지를 병렬로 설계하였으며, 마무리습지(enhancement wetlands)는 3개의 습지를 직렬로 조성하였다. 처리습지는 개수부(open water)를 설치하지 않았고, 정수식물로 부들(cattail)과 고랭이(bulrush)가 자라고 있다. 마무리습지에는 개수부가 조성되어 있으며 인공섬을 조성하여 새들의 서식처를 제공하고 있다.

연못시스템과 처리습지에서 2차처리수준으로 처리된 후 마무리습지에서 BOD, SS, TN이 각각 3.3mg/l, 3mg/l, 3mg/l로 처리되고 있다. Arcata만은 캘리포니아주에서 생산하는 굴의 50%를 생산하는 곳으로 연못-습지 방류수가 굴생산에 영향을 미치지 않는다.

<사진 2-3>은 연못시스템의 연못의 모습이며, <사진 2-4>는 연못에 새들이 군무를 이루고 있는 모습이다. <사진 2-5>는 연못시스템의 방류수를 정화하는 처리습지의 전경이며, <사진 2-6>은 마무리습지의 개수부와 섬의 모습을 보여준다.

Arcata 연못-습지는 전체부지를 생태공원으로 조성하여, 습지안내 및 관리 사무소는 연못-습지 안내와 습지 자연학습공간으로 활용하고 있으며, 마무리습지와 연못의 제방 일부에는 시민들의 산책 및 휴식 공간으로 활용하고 있다. 양어지는 연못시스템의 처리수를 이용하여 연어치어를 길러 바다로 방류한 후 성어가 되어 돌아오면 수확하고 있다. Arcata 연못-습지는 야생동물서식처가 되면서 조류(새)감상 관광지, 시민휴식 공간, 자연학습 장소로 유명한 곳이며, 자연생태적 환경친화적으로 수질을 정화하는 도시하수 자연처리기법의 대표적인 사례이다.



<그림 2-4> Arcata 하수처리 연못-습지 시스템



<사진 2-3> Arcata 수질정화 연못



<사진 2-4> Arcata 연못의 새서식



<사진 2-5> 처리습지 모습

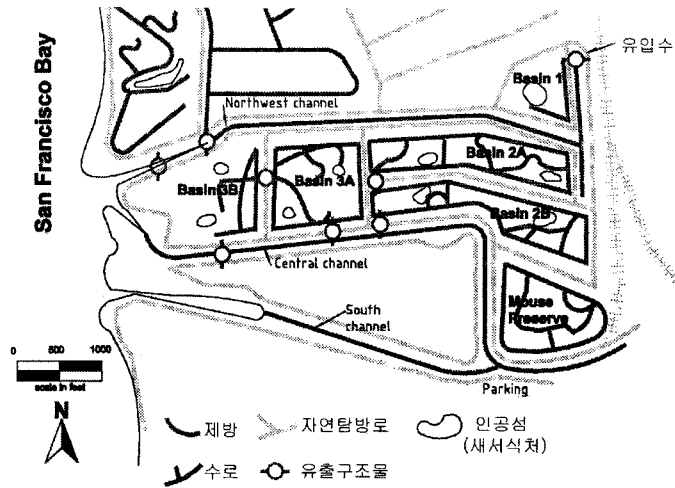


<사진 2-6> 마무리습지의
개수부 및 인공섬

(2) Hayward 습지 시스템

미국 California주 Hayward 습지는 San Francisco만의 수질오염 방지를 위해 상류의 도시 및 경공업 지역에서 배출되는 도시하수를 하수처리장에서 2차처리수준으로 처리후 방류수를 습지에 넣어 처리하고 있다. <그림 2-5>에서 습지 2A, 2B는 처

리장 방류수를 유입시키며, 습지 3A, 3B는 습지 2A, 2B의 방류수와 밀물 때 바닷물이 섞이도록 설계되어 있다. Hayward 습지는 수질정화 이외에 야생조류 서식처 제공 및 희귀조류 보호를 목적으로 조성되었다. 습지 2A, 2B에는 식물이 초본과 관목이 식재된 섬을 조성하고, 습지 3A, 3B에는 식생이 없는 섬을 조성하여 다양한 새들이 서식하도록 설계되어 있다. <사진 2-7>은 Hayward 습지 2A의 모습이며, <사진 2-8>은 습지 3A의 모습이다.



<그림 2-5> Hayward 습지 개념도



<사진 2-7> Hayward 습지(2A)



<사진 2-8> Hayward 습지(3A)

나) 하천수 정화 인공습지

<표 2-4>는 미국의 하천수정화 인공습지인 Olentangy River Wetland와 Des Plaines 시스템의 설계인자 및 처리효율을 나타낸다. 이들 인공습지는 하천수를 펌핑하여 인공습지에 유입시켜 정화한 후 하천으로 방류하며, 하천제방 밖의 부지에 조

성되어 있으나 홍수시 하천수가 인공습지로 범람한다.

<표 2-4> 미국의 하천수 정화 인공습지 설계인자 및 처리효율

시스템 (주)	면적 (ha)	셀 (Cell) 수	유입 유량 (m ³ /d)	수리 학적 부하율 (cm/d)	SS In (mg/l)	SS Out (mg/l)	TN In (mg/l)	TN Out (mg/l)	TP In (mg/l)	TP Out (mg/l)
Olentangy River Wetlands (OH)	2.00	2	2,000	3.670			4.5	2.5	0.2	0.09
Des Plaines (IL)	10.13	4	4,635	4.576	60.1	5.2	2.73	1.34	0.10	0.02

RIV-하천수, CON-인공습지, MAR-정수식물

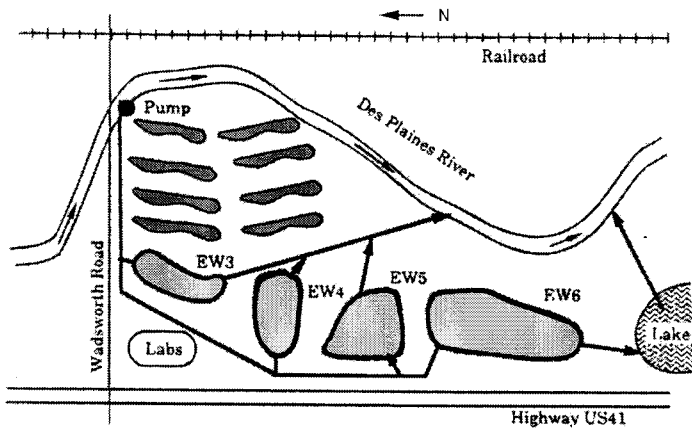
<표 2-5>는 일본의 하천수 및 호수 수질정화 인공습지의 설계인자 및 처리효율을 나타낸다. 渡良瀬 갈대습지는 호수제방 밖에 습지를 조성한 경우이며, 山王川植生靜化施設, 清明川植生靜化施設은 호수제방 안쪽 호안에 습지를 조성하여 하천수를 정화하는 인공습지이다.

<표 2-5> 일본의 수질정화 습지의 설계인자 및 처리효율

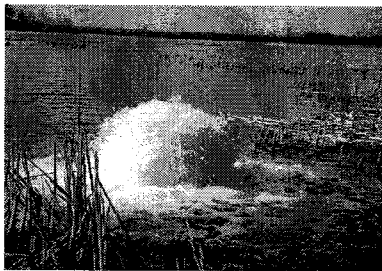
시스템	유입수	면적 (m ²)	식생	유입 수량 (m ³ /d)	체류 시간 (hr)	SS In (mg/l)	SS Out (mg/l)	TN In (mg/l)	TN Out (mg/l)	TN 처리 율 (%)	TP In (mg/l)	TP Out (mg/l)	TP 처리 율 (%)
山王川 植生 靜化施設	가스미 가우라 湖 流入 山王川	5,600	갈대, 줄	2,500	5			3.4	2.3	32	0.23	0.14	40
清明川 植生 靜化施設	가스미 가우라 湖 流入 山王川 清明川	38,000	갈대	18,240	5	21.3	15.4	2.82	2.35	17	0.185	0.147	21
渡良瀬 갈대습지	渡良瀬 유수지	200,000	갈대	216,000	4.5			1.24	0.90	27	0.097	0.091	6

(1) Des Plaines 인공습지

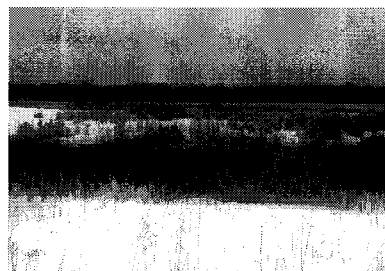
미국 일리노이주 Des Plaines 인공습지는 Des Plaines River 유량의 약 15%를 펌프하여 4개의 습지 셀에 유입시켜 처리한 후 다시 Des Plaines River로 유입시킨다 (사진 2-9 ~ 사진 2-10 참조). 수리학적 부하율 2 ~ 24inches/week, 체류기간이 1 ~ 3주를 유지한다. 유역의 농경지에서 강우 유출수에 의해 발생하는 오염물질 정화와 Catfish가 활동하는 시기에 Des Plaines River의 SS를 제거하기 위한 시스템이다.



<그림 2-6> Des Plaines River 인공습지 시스템



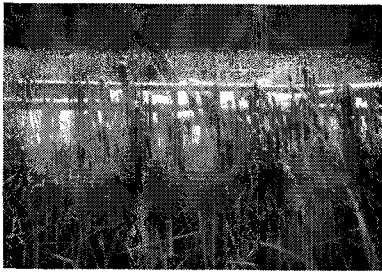
<사진 2-9> Des Plaines 인공습지
인공습지 유입부



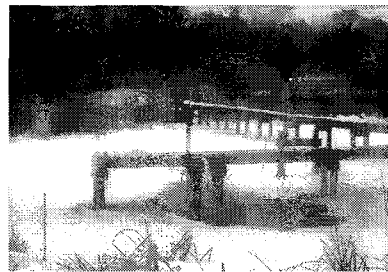
<사진 2-10> Des Plaines
눈으로 덮인 부분이 개수부

(2) Olentangy River Wetland

미국 오하이오주 Olentangy River Wetlands는 연중 24시간 Olentangy River의 하천수를 펌핑하여 인공습지에 유입시키고 있다(사진 2-11 ~ 사진 2-12 참조). 1997년에 두 개의 셀(각 1ha 면적)을 조성하였으며, 하천수 정화뿐 아니라 습지복원, 자연학습, 시민휴식공간제공의 기능을 수행하고 있다.



<사진 2-11> Olentangy 인공습지의 부들



<사진 2-12> Olentangy 인공 습지 유입부 및 관찰 deck

(3) 산노가와(山王川) 수질정화 습지

일본 가스미가우라로 유입되는 산노가와(山王川)의 물을 자연유하로 습지에 유입시켜 정화하고 있다. 습지면적은 5,600m², 1일 처리량은 약 2,520m³이며, 수심은 0.1~0.2m이다. 유입수 TN, TP는 각각 3.4mg/l, 0.23mg/l이며, 처리수 TN, TP는 각각 2.3mg/l, 0.14mg/l이다. TN, TP의 평균처리율은 각각 32%, 39%이다. 습지에는 정수식물인 갈대와 줄이 성장하고 있으며, 습지 셀에 개수부가 조성되어 있다.

(4) 세네가와(清明川) 수질정화습지

일본 가스미가우라로 유입되는 세네가와(清明川)의 물을 펌핑으로 습지에 유입시켜 정화하고 있다. 습지면적은 38,000m², 1일 처리량은 약 18,240m³이며, 수심은 0.1m를 유지하고 있다. 유입수 TN, TP는 각각 2.82mg/l, 0.185mg/l이며 처리수 TN, TP는 각각 2.35mg/l, 0.147mg/l이다. TN, TP의 평균처리율은 각각 17%, 21%이다. 습지에는 정수식물인 갈대가 성장하고 있다.

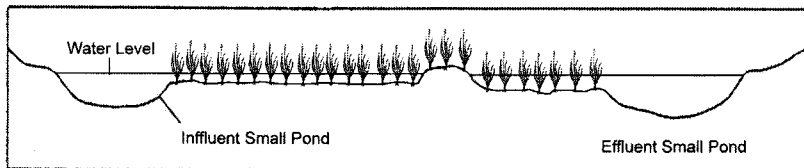
(5) 와따라세(渡良瀬) 상수원 유수지 수질정화 갈대습지

와따라세 유수지는 동경일원에 생활용수를 공급하는 상수원이다. 수질악화로 조류가 발생하여 유수지의 물을 갈대습지에서 정화하고 있다. 수질정화 갈대습지는 북쪽 호수변에 위치하고 있다. 남쪽호수의 물을 수위조절 Rubber 댐을 이용하여 수질정화 갈대습지 20ha에 유입시켜 처리한 후 처리수를 북쪽호수로 유입시키고 있다. 일일 처리량은 약 10,000m³이며, 습지의 수심을 20cm로 관리하고 있다. 유입수 TN, TP는 각각 1.24mg/l, 0.097mg/l이며 처리수 TN, TP는 각각 0.90mg/l, 0.091mg/l이다. TN, TP의 평균처리율은 각각 27%, 6%이다.

다) 강우유출수 정화 인공습지

(1) 습지 시스템

강우유출수 정화 습지 시스템은 <그림 2-7>과 같은 구조로 유입부와 유출부에 소규모 연못이 있으며 시스템의 대부분은 습지로 조성된다. 일반적으로 시스템의 표면적은 연못이 20% 습지가 80%를 차지하며, 연못부분에 유출수의 40%가 저류되고 습지부분에 60%가 저류된다.

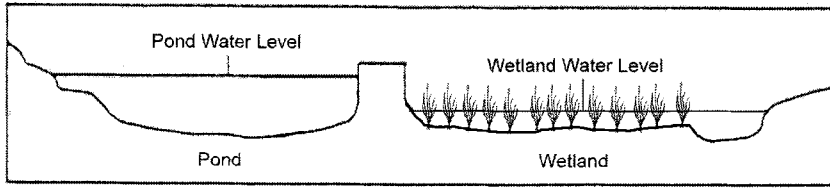


<그림 2-7> 강우 유출수 처리 인공습지

(2) 연못-습지 시스템

유출수 정화 연못-습지 시스템은 <그림 2-8>과 같이 유입부에 규모가 큰 저류연못과 유출부에 소규모 연못을 설계하며 나머지 부분은 습지로 조성한다. 일반적으로 시스템의 표면적은 연못이 45% 습지가 55%를 차지하며, 연못부분에 유출수의 70%가 저류되고 습지부분에 30%가 저류된다. 연못은 조건성 연못의 기능을 하며 조류

(algae)가 성장하면서 유입수의 질소와 인이 제거된다. 연못 처리수에 함유되어 있는 조류(algae)는 습지로 이동하여 습지바닥에 침전되어 제거된다.



<그림 2-8> 강우 유출수 처리 연못-습지 시스템

<표 2-6>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%, 유기탄소(Organic Carbon) 15%이며, 납과 아연이 각각 75%, 50%가 제거된다. 유기탄소는 BOD₅, Total Organic Carbon 혹은 Chemical Oxygen Demand을 포함한 제거율이다. 특히 연못-습지 시스템의 경우 다른 시스템에 비해 질소와 인의 제거율이 65%, 40%로 월등히 높다.

<표 2-6> 강우 유출수 처리 인공습지 처리효율

형태	시스템	주	유출강우 빈도	유역면적 (Acres)	처리용량 (In./Acre)	처리율(%)					
						SS	TP	TN	COD	Pb	Zn
연못-습지 시스템	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
습지시스템	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				

(3) 연못-습지 결합 시스템

연못시스템과 인공습지의 수질정화 장점을 결합한 시스템으로 몇 개의 연못과 습지셀을 직렬과 병렬로 연결하여 구성한다. <표 2-2>에서 Arcata, Houghton Lake, Vermontville은 연못-습지 결합 시스템의 사례이다. 선진국의 경우 하구수질을 개선하고 어류 및 야생동물 서식처를 제공하기 위해 하구지역 저습지에 연못-습지 시스템을 설치하여 유역에서 배출되어 하구로 유입되는 점원 및 비점원 오염을 처리하고 있다.

강우 유출수를 정화하는 인공습지의 경우 <표 2-6>에서 습지만으로 조성하는 것보다 습지 앞에 연못을 조성하여 연못-습지 결합시스템으로 조성하는 것이 수질정화 효율이 높다. 온대권에서 월평균 기온이 0°C 이하인 겨울철에 인공습지의 수질정화 효율이 다소 저하되어 최종처리수의 BOD와 TN을 목표수질에 맞추기 어려운 경우, 연못시스템과 습지 시스템의 장점을 활용한 연못-습지 시스템이 응용되고 있다.

여 백

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연못 시스템 및 인공습지의 수질정화 기작

1. 연못 시스템의 수질정화 기작

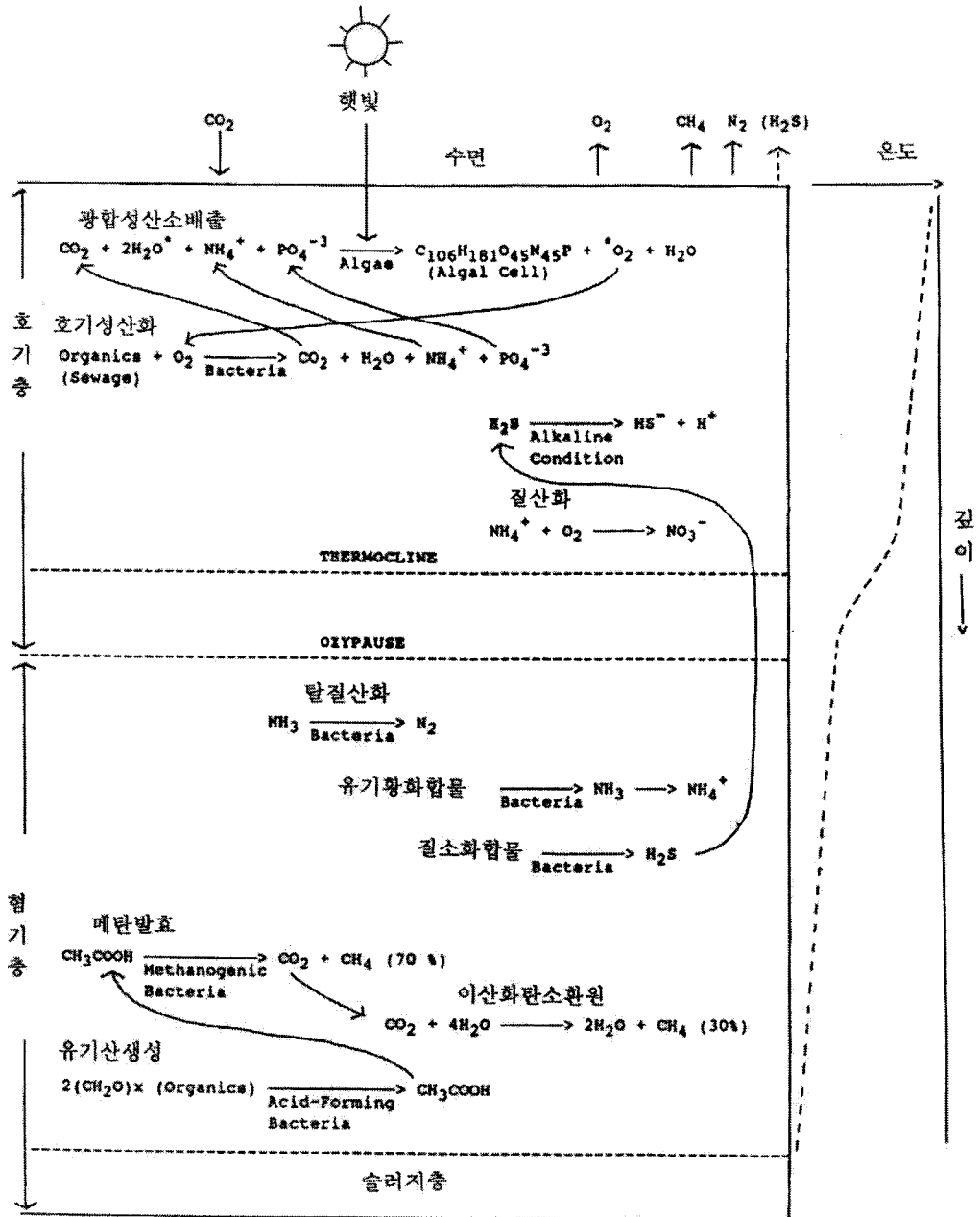
수질정화 연못의 종류는 유기물 부하가 과다하여 용존산소층이 없는 혐기성 연못(anaerobic pond)과, 유기물 부하가 낮아 전체에 용존산소가 존재하며 흔히 마무리연못(maturation or polishing pond)으로 이용되는 호기성 연못(aerobic pond), 그리고 호기성층과 혐기성층이 공존하는 조건성 연못(facultative pond)이 있다.

혐기성 연못이 유기물 부하량이 적어지면 조건성 연못으로, 호기성 연못이 유기물 부하량이 증가하면 조건성 연못으로 변하기 때문에, 조건성 연못이 일반적으로 많이 이용되고 있다. 온대권에서는 혐기성, 조건성, 호기성 연못을 적절히 연결시켜 병렬형(series), 직렬형(parallel), 혹은 병렬과 직렬 혼합형으로 연못시스템을 설계하고 있다.

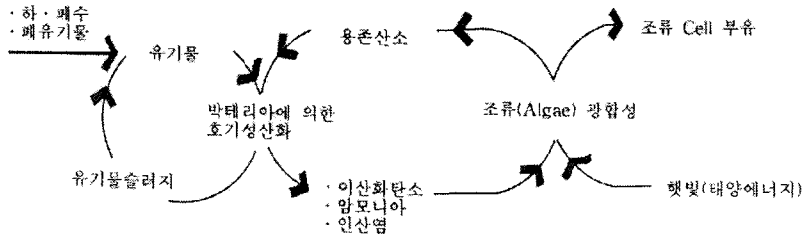
연못의 수질정화 기작은 수많은 생물학적, 화학적, 물리적 반응에 의해서 이루어진다. 1)침전(Sedimentation), 2)유기산생성(Acid Formation), 3)메탄발효(Methane Fermentation), 4)호기성산화(Aerobic Oxidation), 5)광합성산소배출(Photosynthetic Oxygenation), 6)황 및 질소 변형(Sulphur and Nitrogen Transformation), 7)영양소, 중금속, 기생충알 및 병원균 제거가 규명되어 왔다(EPA, 1983; Oswald, 1968; Oswald, 1988b; Parker, 1979). 이들 반응중 연못시스템을 설계 할때 이용하는 핵심 반응은 호기상태에서 일어나는 호기성산화와 광합성산소배출, 혐기상태에서 일어나는 유기산생성과 메탄발효이다.

본 연구에서 활용할 조건성 연못의 수질정화 중요 기작을 알아본다. <그림 3-1>은 호기성산화와 광합성산소배출의 상호공생관계를 보여준다. <그림 3-2>는 전형적인 조건성 연못의 단면을 보여준다. 수심 1.5 - 2.5m의 조건성 연못은 햇빛이 비치면 태양열로 인해 온난하고 밀도가 낮은 상층과, 차갑고 밀도가 높은 하층으로 구분된다. 상하층이 구분되면 수직으로 물의 이동이 없어 연못바닥에 고형물이 침전되고, 얇은 슬러지층이 형성된다. 하층은 혐기성 상태가 되어 혐기성 박테리아 활동으로 침전된 유기물이 분해되어 유기산이 생성된다. 이 유기산을 메탄박테리아가 메탄과 이산화탄소로 분해시킨다. 상층에서는 호기성 미생물에 의해 유기물이 이산화탄소, 물, 영양분으로 분해된다. 햇빛을 받으면 조류(algae)가 이산화탄소와 영양분을 흡수

하여 성장하면서 산소를 배출한다(Oswald, 1988b). 이때 상층은 용존산소가 포화상태에 이르게 된다.



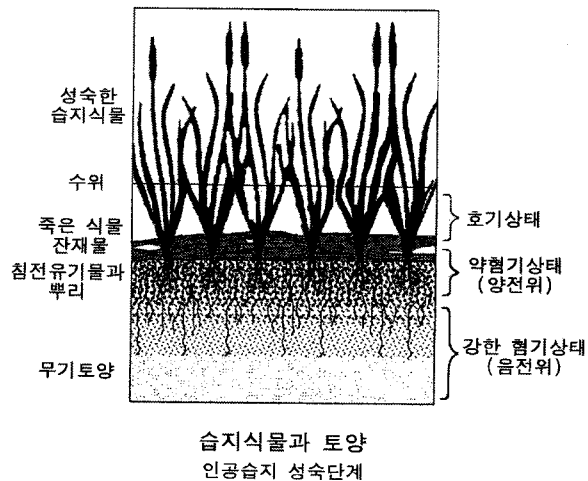
<그림 3-1> 조건성 연못의 수질정화 작용



<그림 3-2> 조건성 연못의 호기성산화와 광합성산소배출의 상호관계

2. 인공습지의 수질정화 기작

본 연구에서 활용하게 될 자유수면습지의 수질정화 기작을 알아본다. 습지의 생물·물리적 작용은 오염물의 제거에 중요하다. <그림 3-3>은 자유수면습지의 정수 식물, 물기둥(water column), 토양, 식물 잔재물, 표토층의 상호관계를 보여준다.



<그림 3-3> 자유수면 인공습지의 정수식물, 수심, 잔재물, 토양층

SS(부유물)는 주로 침전에 의해 제거된다. 유입수의 유기물이 바닥으로 침전되어 BOD가 낮아지며, 침전된 유기물은 바닥층의 미생물에 의하여 분해되거나 토양에 흡수되어 제거된다. 수중의 습지식물 줄기나 잎, 식물의 잔재물(litter)에 호기성 미생물

이 부착되어 형성된 얇은 미생물막(microbial film)과 유기물이 반응하여 BOD가 제거된다.

인공습지의 질소제거에서 중요한 기작인 암모니아화-질산화-탈질화는 미생물에 의해 이루어진다. 습지의 질소 제거량에서 탈질화에 의해서 제거되는 양이 약 60 ~ 70%이며, 습지식물의 흡수로 제거되는 질소의 양은 약 25% 정도이다. 탈질화가 질소제거에서 중요함을 알 수 있다. 죽은 습지식물이 바닥에 쌓여 유기 쇄설물이 되면 식물이 흡수하였던 질소가 습지로 다시 용출될 가능성이 있으나, 탈질화작용으로 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)가 질소가스로 전환되어 대기중으로 이동하면 이동하는 만큼 질소가 제거된다. 유입수의 유기태 질소(organic N)는 암모니아화(ammonification)와 질산화(nitrification)과정을 거쳐 질산태 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)로 전환되며, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 탈질화(denitrification)로 질소와 아산화질소로 전환되어 대기중으로 이동한다.

부들(cattail), 고랭이(bulrush), 갈대(reed) 등 정수식물은 통기조직이 발달하여 대기중의 산소를 잎과 줄기를 통하여 뿌리로 전달하고, 뿌리 주변의 토양에서 발생하는 질소와 아산화질소의 일부를 줄기와 잎을 통하여 대기중으로 이동시키는 역할을 한다. 산소가 뿌리에 도달하면 뿌리 주변에 호기성 근권이 형성되며, 뿌리 주변의 미생물에 의해 암모니아화와 질산화가 일어난다. 근권 밖은 산소의 공급이 원활하지 않아 혐기층이 형성되며, 혐기층에서는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 가 질소와 아산화질소로 전환되어 일부는 습지식물의 통기조직을 통하여 대기중으로 이동한다. 따라서 정수식물이 성장하는 기간에 질소 제거율이 높아지게 된다.

습지바닥에 쌓인 식물 잔재물(litter)은 유기쇄설물이 되어 탈질화에 필요한 탄소공급원 역할을 한다(Broadbent and Clark, 1965). 시공 후 초기 인공습지는 잔재물층이 형성되지 않아 탄소공급이 원활하지 못할 경우 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 제거율이 낮은 경향을 보인다. 대기와 수면의 접촉을 통한 인공습지의 질산화를 촉진하고 유입수의 단기이동을 방지하기 위해 정수식물이 성장하지 않는 개수부(open water)를 설치하는 경우가 있다.

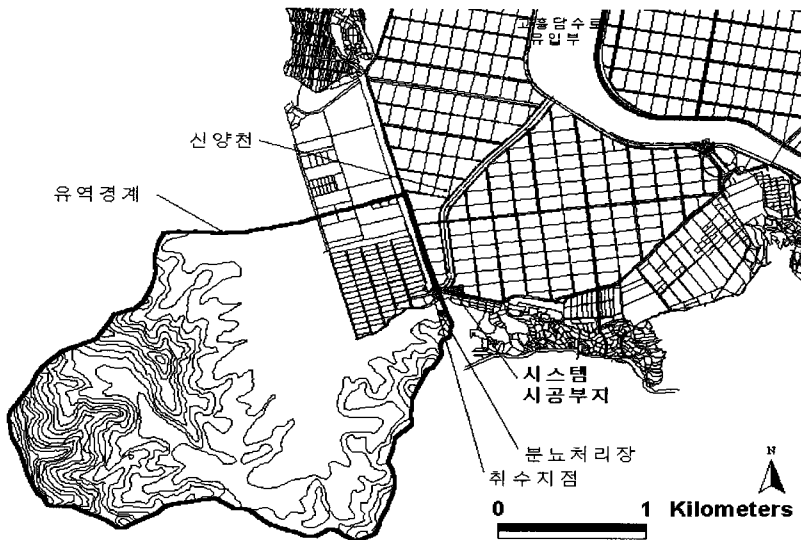
습지에서 인은 유기물에 물리적 흡착과, 이온과 결합하여 인산염(Ca-phosphate, Fe-phosphate, Al-phosphate)의 상태로 습지바닥에 침강되어 대부분 제거된다. 습지에서 인은 유기물의 침전과 죽은 습지식물의 잔재물이 침전되어 형성된 습지바닥의 침전-잔재물층(sediment-litter layer)에 95%이상이 존재한다(Faulkner and Richardsosn, 1989; Kadlec and Knight, 1996). 자유수면 습지의 개수부 등에서 성장하는 녹조에 의해서도 인의 일부가 제거되며, 정수식물이 흡수하는 인의 양은 매우 적다. 녹조에 의해 흡수된 인은 녹조가 죽어 습지바닥에 침전하면 습지바닥에 쌓이게 된다.

습지에서 중금속은 산화와 환원작용으로 침전되거나 식물과 토양에 의한 흡수로 제거된다.

제 2 절 시스템 조성부지 및 현황

1. 시스템 조성부지 및 현황분석

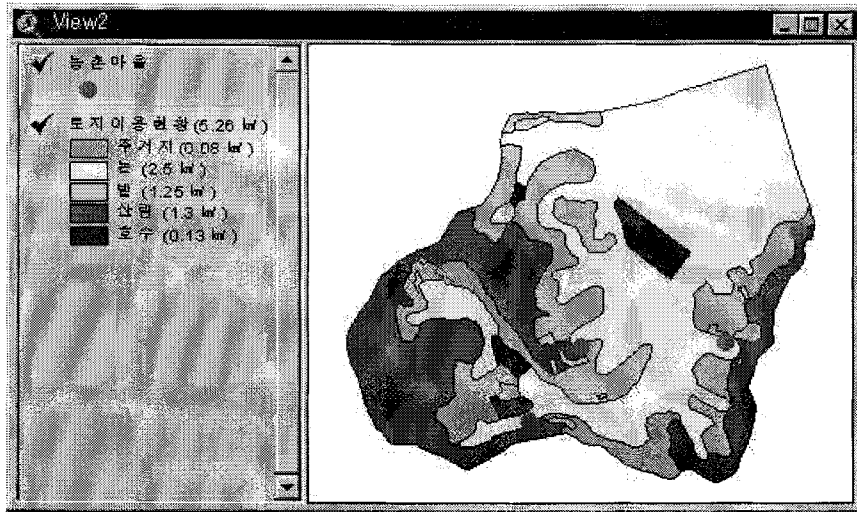
수질정화 유역처리 시스템인 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지를 조성할 부지로 고흥지구 담수호 유입부의 신양천변 개답지역 상류부에 위치한 포락지 1.2ha를 선정하였다. <그림 3-4>는 시스템 조성부지의 위치, 신양천 하천수를 펌핑할 지점을 기준으로 한 유역 경계와 신양천을 보여준다. 유역 내에는 분뇨처리장이 가동 중에 있다.



<그림 3-4> 시스템 조성부지의 위치와 유역경계

아래 <그림 3-5>는 지리정보체계(GIS)를 활용하여 유역현황을 데이터 베이스화한 화면이다. <표 3-1>은 유역의 토지이용 현황을 보여준다. 유역 면적은 5.26km²이며 경작지가 3.75km², 산림이 1.3km²이다. 유역내 5개 마을의 인구는 964명이다. 일반적

으로 유역에서 발생하는 비점오염물을 처리하기 위해서는 유역면적의 약 1 - 3%의 인공습지가 필요하다. 조성할 부지 1.2ha는 유역면적의 0.2%에 해당된다.



<그림 3-5> 유역 토지이용현황 및 마을분포

<표 3-1> 유역 토지이용 현황

단위 : km²

구분	주거지	논	밭	산림	저수지	합 계
면적(km ²)	0.08	2.5	1.25	1.3	0.13	5.26

유역처리 시스템이 조성될 부지의 토양을 분석한 결과는 <표 3-2>와 같다. 토양 분석은 토양화학분석법을 기준으로 하였으며, 전질소(Total-N)는 Kjeldahl법, 전인산(Total-P)은 Vanado-molybdate법, 치환성양이온은 AAS로 측정하였다. 토양 분석결과 전형적인 간척지 토양의 특성을 나타내고 있다.

<표 3-2> 부지의 토양 분석결과

pH	EC (us/cm)	CEC (cmol/kg)	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Na (mg/kg)	K (mg/kg)
8.20	192.4	8.40	326	131	634	665	1596	597

2. 유입수 수질분석 및 목표수질

유역처리 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지로 유입될 신양천 하천수의 수질은 평상시에 BOD₅ 3 - 8mg/l, TN 3 - 8mg/l, TP 0.15 - 0.26mg/l로 담수호 수질 기준인 TN 1mg/l, TP 0.1mg/l보다 다소 높다(표 3-3 참조). TN이 상대적으로 높게 나타나고 있다. 신양천 강우 유출수의 수질은 BOD₅ 8 - 21mg/l, TN 10 - 14mg/l, TP 0.5 - 0.8mg/l이다(표 3-4 참조).

유역처리 시스템으로 유입될 연평균 유입수의 TN 농도를 6mg/l로 설정하였으며, 유역처리 시스템 방류수의 목표 수질은 TN 2.5mg/l 이하, TP 0.1mg/l 이하로 설정하였다. 하천수를 정화하는 습지를 설계할 때는 일반적으로 TN을 기준으로 설계를 한다.

<표 3-3> 신양천 수질

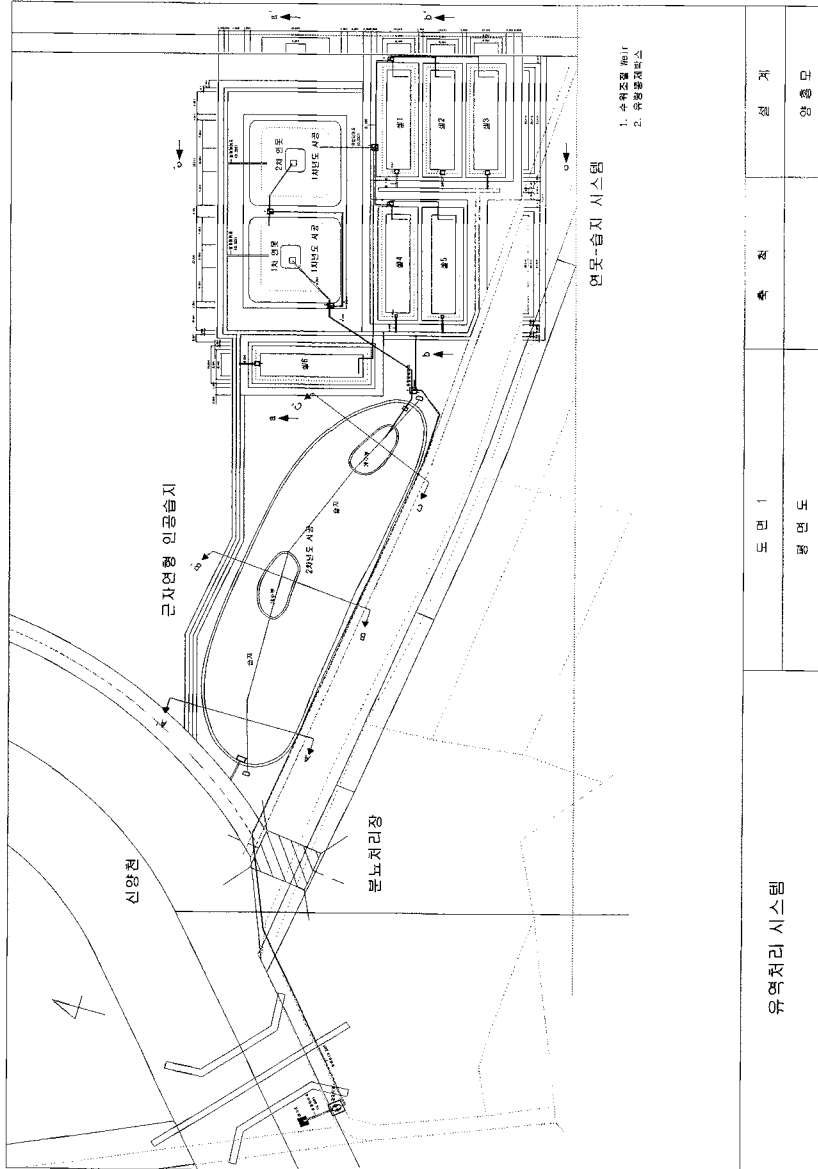
	BOD ₅ (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	TN (mg/l)	TP (mg/l)
2000. 4. 16	2.4	3.1	6.0	3.2	0.18
2000. 5. 29	3.1	9.5	11.2	7.0	0.26
2000. 6. 3	4.6	9.7	14.5	7.9	0.19
2000. 6. 15	7.8	9.0	17.5	5.3	0.15
2000. 7. 11	5.4	7.5	18.5	4.3	0.19

<표 3-4> 신양천 강우유출수 수질

	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	TN (mg/l)	TP (mg/l)
2000. 6. 26	21.4	18.2	42.0	14.0	0.80
2000. 6. 27	8.3	11.4	22.5	10.2	0.59

3. 유역처리 시스템 설계 개념

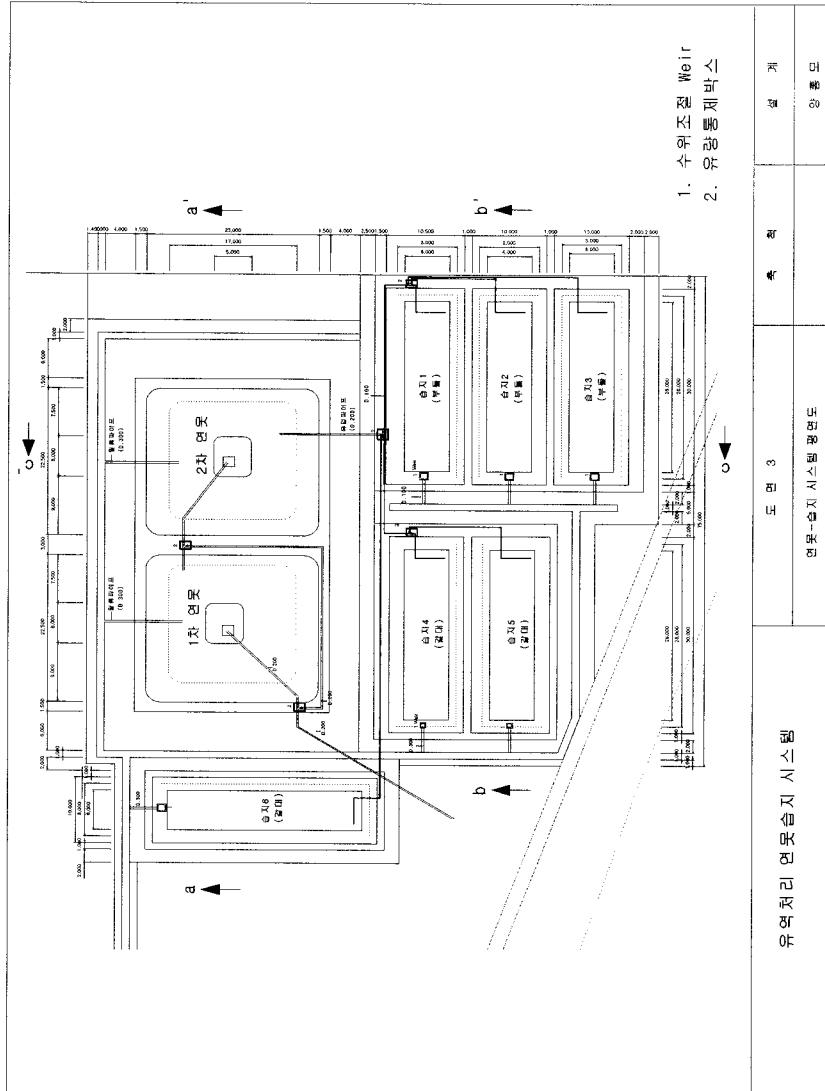
<도면 3-1>은 3년 동안 연구를 수행한 유역처리 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지의 개념을 나타내는 평면도이다. 연못-습지 시스템은 연못 2개와 습지셀 6개로 구성하였으며, 근자연형 인공습지 시스템은 습지셀 1개로 조성하였다.



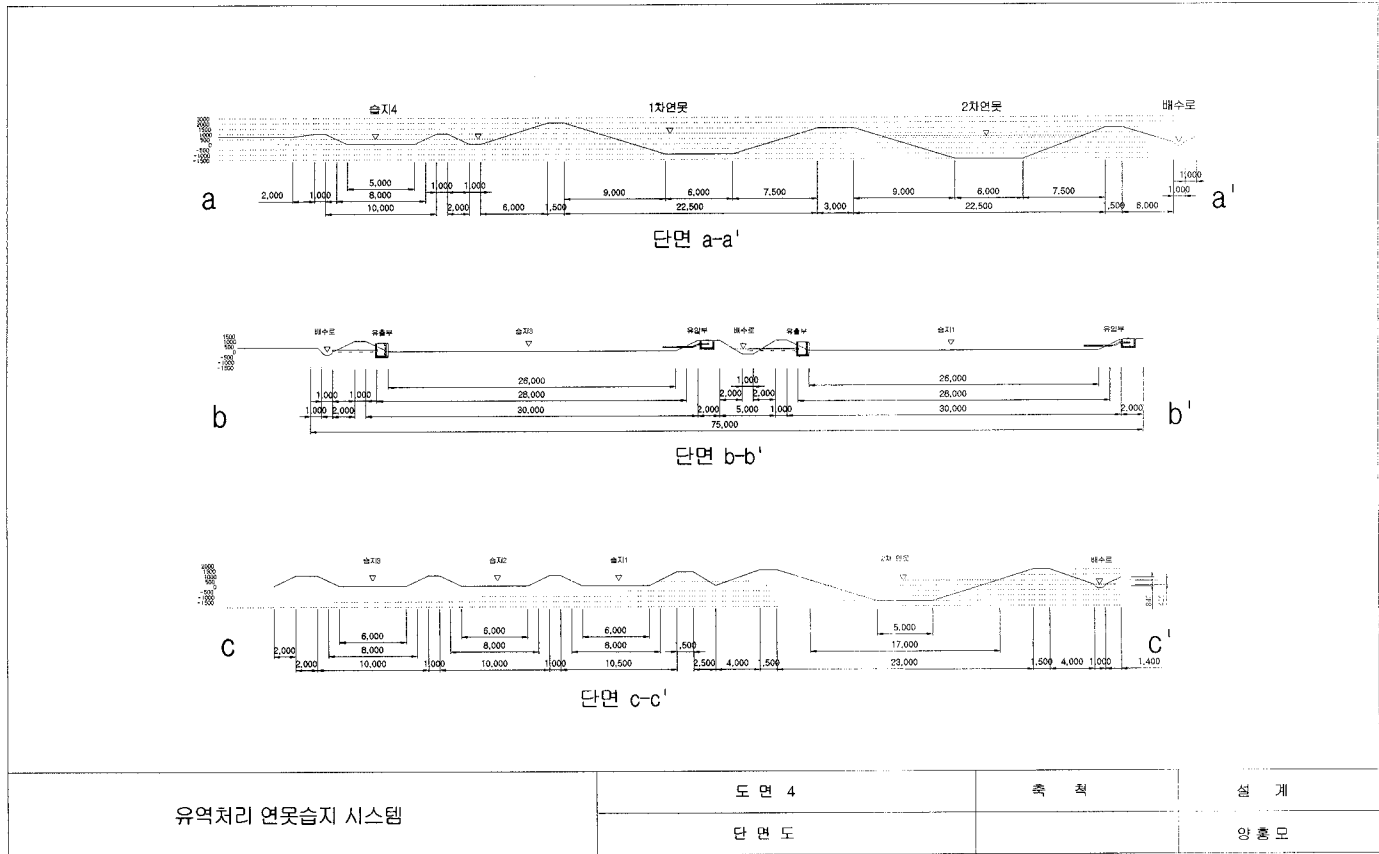
<그림 3-1> 유역처리 연못-습지 및 근자연형 인공습지 시스템 개념도

제 3 절 연못-습지 시스템

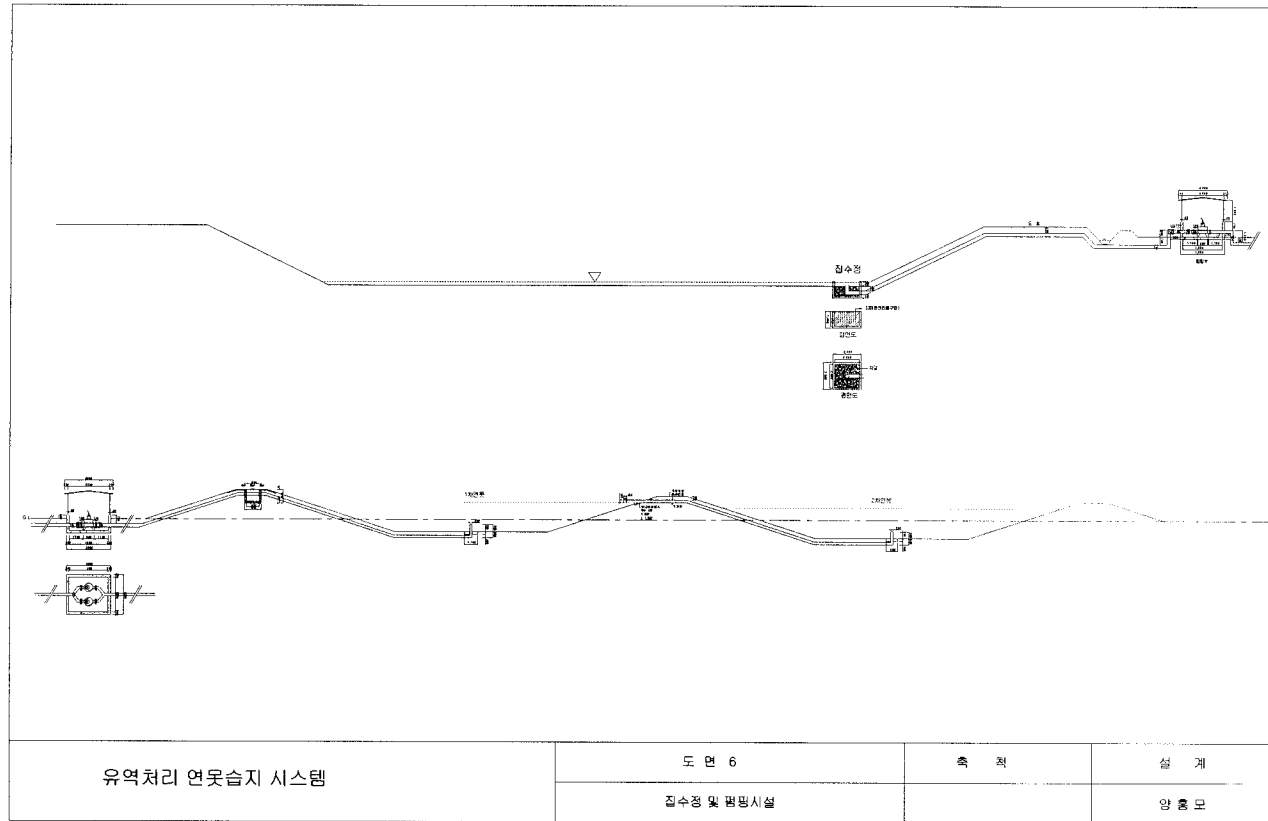
<도면 3-2>는 설계·시공한 연못-습지 시스템의 평면도이며, <도면 3-3>은 시스템 단면도이며, <도면 3-4>는 집수정 및 펌핑시설 설계도이다. <도면 3-5>, <도면 3-6>, <도면 3-7>은 습지셀의 유입부 및 유출부 평면도, 단면도, 상세도이다.



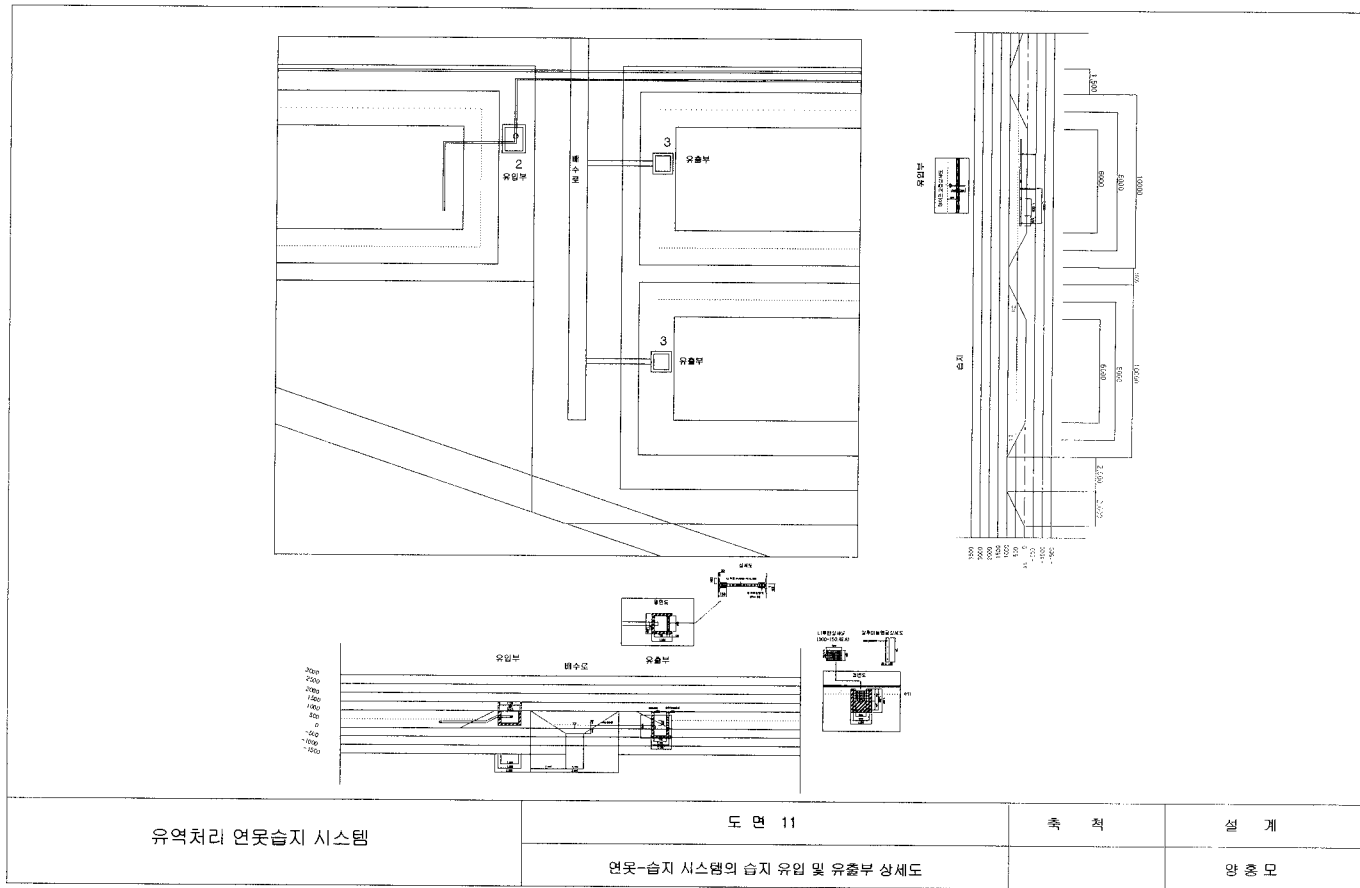
<그림 3-2> 연못-습지 시스템 평면도



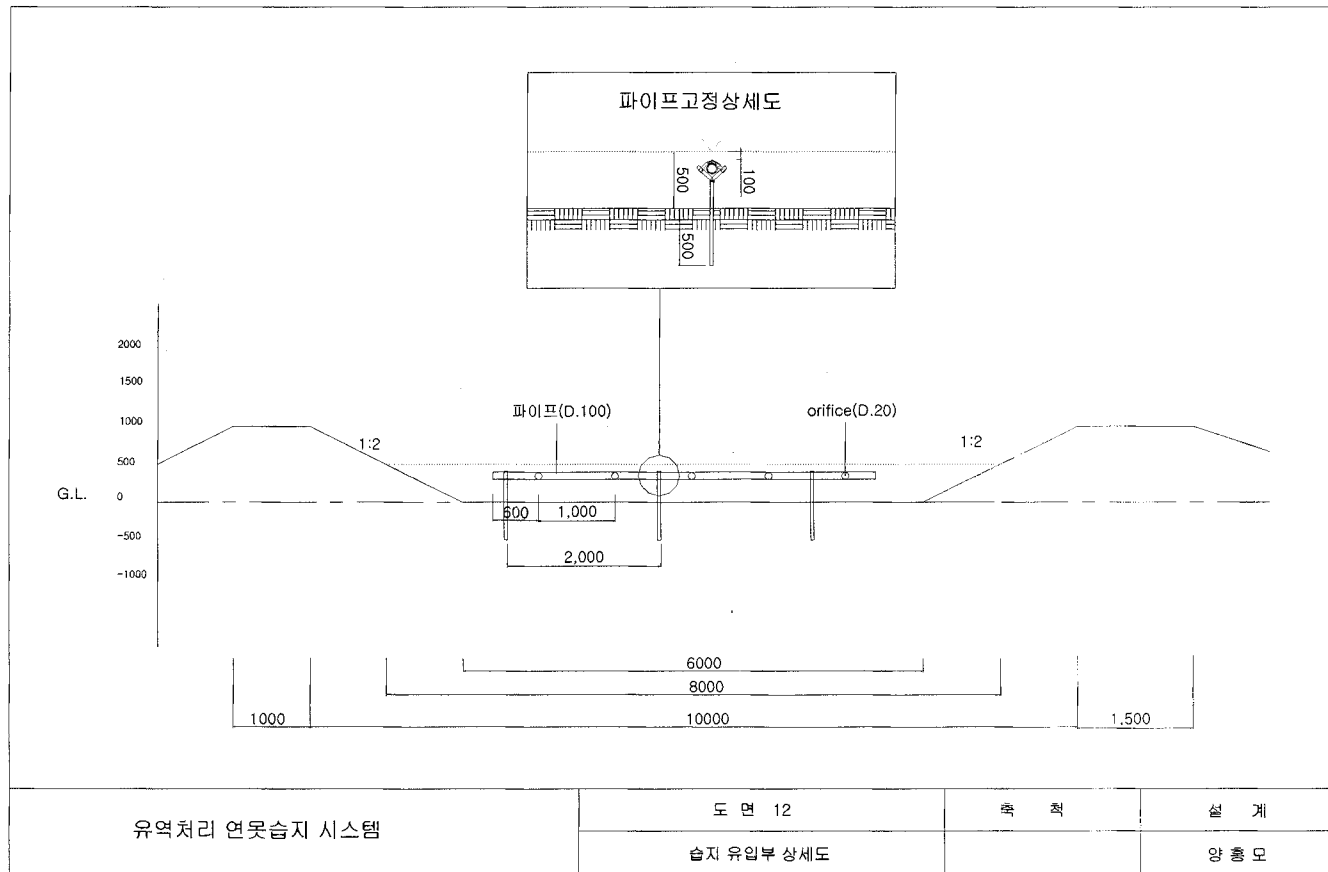
<그림 3-3> 연못-습지 시스템 단면도



<그림 3-4> 집수정 및 펌핑시설 설계도



<그림 3-6> 유입·유출부 평면도 및 단면도



<그림 3-7> 습지 셀 유입부 상세도

<표 3-5>은 연못-습지 시스템의 구성요소와 설계인자 및 구조를 보여준다.

<표 3-5> 연못-습지 시스템의 구조

	수 심 (m)	여유고 (m)	침전 퇴적 (m)	뜯 높이 (m)	내경사	외경사	수표면 (m ²)	수체적 (m ³)	체류 시간 (일)
1차 연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1 : 2.5	1 : 25	16×16	180	1-1.5
2차 연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1 : 2.5	1 : 25	16×16	180	1-1.5
습지셀 (1개)	0.3 - 0.4	0.3		1.0	1 : 2	1 : 25	6×26	50	1.5-2
총 6개 셀								50	1.5-2

1. 설계인자 검토

수질정화 연못의 설계인자는 수리학적 체류시간 (hydraulic detention time), 수심 (water depth), 수온, BOD 부하율 (loading rate) 등을 사용한다. 제 2 장 <표 2-1>의 면적부하율 모델을 기초로 연못의 설계인자를 검토한 후 설계인자 값을 선정하였다. 부지조건을 고려하여 각 연못의 수표면적이 약 16m × 16m가 되도록 설계하였으며, 여유고를 0.5m로 설계하였다. 수심은 평균 2.2m가 유지되도록 설계하였다. 강우유출수의 부유물 침전을 고려하여 연못 바닥에 0.3 m 여유깊이를 두었다. 연못의 평균설계 유입유량을 120 - 180m³/day로 설정하여 각 연못의 체류시간은 1 - 1.5일이 된다.

수질정화 인공습지 조성에서 중요한 설계인자는 수리학적 체류시간(hydraulic detention time), 수리학적 부하율 (hydraulic loading rate), 수온, 수심(water depth), BOD 혹은 TN 부하율 (loading rate) 등이다. 본 연못-습지 시스템처럼 저농도의 유입수를 정화 할 경우 인공습지의 설계인자 검토에서 TN 제거모형을 일반적으로 활용한다.

아래 식 (1)은 TN 제거를 위한 인공습지의 소요면적을 산출할 때 활용하는 공식이다. 식 (2)는 TN 정화에 영향을 미치는 여러 작용을 하나의 포괄적 작용(dump)으로 나타낸 식으로, K_T 는 TN 제거반응을 상수이며 온도에 영향을 받는다. 식 (3)은

인공습지의 체류시간을 산출하는 공식이며, 식 (4)는 수리학적 부하율을 산출하는 공식이다. 이들 공식은 습지를 설계할 때 소요면적과 체류시간을 예측하고 검토하기 위해 활용하는 공식이다.

$$As = (Q) \ln(Co/Ce) / (K_T)(y)(n) \text{ -----(1)}$$

$$K_T = 0.2187(1.048)^{(T-20)} \text{ -----(2)}$$

$$h = As(y)(n) / Q \text{ -----(3)}$$

$$q = Q / As \text{ -----(4)}$$

Ce = 유출수 TN (mg/ℓ), Co = 유입수 TN (mg/ℓ)

As = 인공습지 면적(m²), n = 시스템 공극율

h = 수리학적 체류시간(day), y = 수심(m)

Q = 평균 유입유량(m³/d), K_T = 반응율 상수

q = 수리학적 부하율 (m/day),

본 연구 연못-습지 시스템 설계에서 시스템 유입수의 평균 TN 농도를 6mg/ℓ로 설정하였다. 1차 및 2차 연못에서 TN 6mg/ℓ가 4mg/ℓ로 정화될 것으로 산정하였다. 각 습지셀은 2차연못처리수 TN 4mg/ℓ가 2.5mg/ℓ로 처리될 수 있는 인공습지를 검토하였다.

부지 조건상 습지 1개 셀의 바닥면적을 6 × 26 = 156m²로 설계하였다. 수질정화 인공습지의 설계에서 적용하는 수심 0.3 m를 적용하여 습지 1개당 처리할 수 있는 유입유량을 검토하였다. 공식 (1)에서 Ce = 2.5mg/ℓ, Co = 4mg/ℓ, n = 0.75, y = 0.3m, K_T = 0.2187(겨울철 3개월을 제외한 고흥지구의 연간 평균수온 20°C)을 적용하면, 습지셀 1개의 면적 156 m²에서 처리할 수 있는 유입수는 약 16.3m³/day가 되며, 유입수의 체류시간은 2.1days이고, 수리학적 부하율은 약 10.3cm/day가 된다. 설계 TN 부하율은 약 4.1kg/ha/day가 된다. 북미에서 운영중인 점오염원이나 오염하천수를 정화하는 자유수면습지 시스템은 일반적으로 수심 0.15 - 0.45m, 수리학적 부하율 1.5 - 6.5cm/day이다. 습지셀의 수리학적 부하율 10.3cm/day는 북미의 평균 수리학적 부하율보다 다소 크다.

고흥지구보다 연평균기온이 낮은 지역에서 운영중인 하천수를 정화하는 Olentangy River Wetlands의 경우 1ha(10,000m²)에서 1,000m³/day를 처리하고 있다. 유입수의 TN 농도 4.5mg/ℓ가 2.5mg/ℓ로 처리되고 있으며, 체류시간이 1.8 - 2days이고, 수리학적부하율이 10cm/day이다.

수질정화에 적합한 식생선택과 유입수 단기이동을 방지하면 습지셀 1개에서 약 20 - 25m³/day를 처리할 수 있을 것으로 사료된다. 습지셀에서 유입수의 단기이동을 방지하기 위해 점유입보다는 확산유입으로 설계하였다.

인공습지에서 인은 대부분 습지내에 축적되어 제거된다. Olentangy River Wetlands의 경우 TN이 2.5mg/l로 처리되면서 TP는 0.09mg/l로 처리되고 있다. 본 연구의 습지에서 TN이 2.5mg/l 이하로 처리되면 TP는 0.1 mg/l 이하로 처리될 것으로 예측된다.

2. 시스템 설계

연못-습지 시스템의 연못은 미국환경처(EPA)에서 권장하는 면적부하율 모델과 Oswald 모델을 응용하여 설계하였다. 연못-습지 시스템은 2개의 연못과 6개의 습지셀로 구성하였다. 신양천 하천수를 집수정에서 펌핑하여 유량분배탱크로 보낸 후, 유량분배탱크에서 1차연못으로 자연유하된 후, 2차연못을 거쳐 각 습지셀로 유입되도록 설계하였다(도면 3-1 참조). 연못-습지 시스템은 수질개선을 위해 담수호와 저수지의 유입부에 조성하는 저류지와 습지의 결합모델을 연구하기 위한 시스템으로 연못은 오염물의 침전과 정화가 동시에 이루어지도록 연못시스템 개념으로 설계하였으며, 습지셀은 2차연못에서 처리되지 못한 BOD, SS, TN, TP를 처리하며, 2차연못의 방류수에 함유되어 있는 조류(algae)를 제거하는 기능을 한다.

연못-습지 시스템의 유입수의 흐름은 집수정 → 펌핑시설 → 유량분배탱크 → 1차연못 → 2차연못 → 각 습지셀 → 각 습지셀 방류의 순서로 이동한다. 유량분배탱크로부터 1차연못 → 2차연못 → 각 습지셀은 자연유하로 흐르며 각 습지셀로 유입되는 유량은 벨브로 조절된다. 연못은 안전성을 고려하여 연못에 울타리를 설계하였으며, 폭우시 연못제방을 보호하기 위해 제방상단으로부터 0.3m 아래에 월류파이프를 설계하였다.

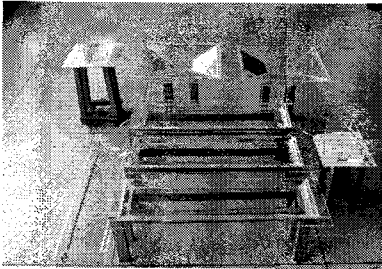
연못-습지 시스템 모형실험(1 : 40 스케일 모형실험 참조)의 유체흐름 실험결과 연못 유입수의 단기이동방지를 완화할 수 있는 방안으로 수중유입과 표면유출을 도입하였으며, 연못의 유입부와 유출부의 위치가 대각선에 위치하도록 설계하였다. 1차연못의 수중으로 유입수를 유입시켜 침전을 유도하고, 1차연못의 유출수를 1차연못의 표면에서 2차연못의 수중으로 유입시킨 후 2차연못의 표면에서 2차연못의 처리수가 각 습지셀로 유입되도록 설계하였다.

습지셀은 유출부에 weir를 설치하여 수심을 0.3 - 0.6m로 조절이 가능하도록 설계하였다. 여름철과 겨울철에 수질정화에 필요한 적정수심을 유지할 수 있고, 장기적

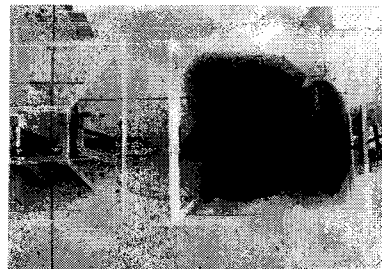
으로 습지식물의 잔재물(litter)이 쌓이면 수심을 조절하여 사용할 수 있도록 설계하였다.

3. 시스템 모형 실험

연못-습지 시스템 모형실험을 수행하였다. <사진 3-1>은 연못-습지 시스템을 1 : 40 축적으로 만든 모형을 보여준다. <사진 3-1>에서 상단에 1차연못과 2차연못이 있고, 하단에 습지셀이 있다. <사진 3-2>, <사진 3-3>은 1차연못 및 2차연못의 수리모형실험을 보여주며, <사진 3-4>는 습지셀의 수리모형실험을 보여준다.



<사진 3-1> 1:40 축적의 연못-습지 시스템 모형



<사진 3-2> 1차연못의 바닥으로 물이 유입되어 1차연못의 좌측하단의 유출 pipe로 물이 이동해 가는 모습



<사진 3-3> 2차연못의 바닥으로 1차연못 유출수가 유입되어 2차연못 좌측상단 유출 Pipe로 물이 이동해 가는 모습



<사진 3-4> 습지 셀의 물의 이동 모습. 각 셀의 유출부에 1개 유출구조를 설치할 경우 유출구조 좌우로 소규모 dead zone이 생긴다.

모형실험 결과, 연못시스템의 유입수 단기이동을 완화하기 위해서는 수중유입과

표면유출이 적합하며, 연못의 유입부와 유출부가 대각선상에 위치하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 유입수가 1차연못의 수중으로 유입되어 1차연못의 표면에서 2차연못의 수중으로 유입된 후 2차연못의 표면에서 2차연못의 처리수가 각 습지 셀로 유입되도록 설계에 반영하였다. 습지 셀의 유입부와 유출부가 점유입과 점유출로 설계할 경우 유입수가 정체되는 구간(dead zone)이 발생할 가능성이 있어 유입부는 확산유입이 되도록 설계하였으며, 유출부의 weir는 정체구간이 완화되도록 설계하였다.

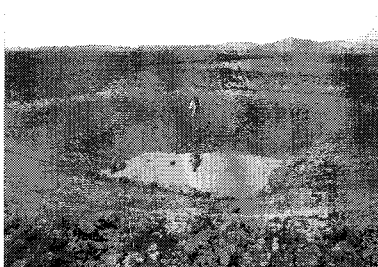
4. 시스템 시공

1차년도(2000년)에 연못-습지 시스템의 1차 연못, 2차 연못, 습지 셀1, 셀2, 셀3을 시공하였으며, 습지 셀4, 셀5, 셀6의 토공은 연구비 지원상 2차년도(2001년)에 시공할 계획이었으나, 연못제방에 인접하여 시공해야 하므로 진흙으로 형성된 제방이 붕괴될 우려가 있어 셀4, 셀5, 셀6의 토공을 1차년도에 선 시공을 하였다.

가. 토공, 배관공

1차연못의 유입유량보다 많은 양이 펌핑될 경우는 유량분배탱크에서 우회(bypass)되도록 시공하였다. 2000년 4월 중순부터 토공을 시작하였다. 간척 진흙토양에 연못을 시공하여 제방의 무게로 제방측면 2곳에서 heaving현상이 발생하여 각목을 박아 방지하였다. 시공부지가 진흙 토질로 비가 오면 작업이 어려워 배관에 다소 시일이 걸리는 어려움이 있었다. 토공과 배관공을 마친 후 4주간 신양천 물을 펌핑하여 배관통수 실험과 습지셀의 염분 농도를 완화한 후 7월 하순에 습지 셀1, 셀2, 셀3에는 부들을 식재하였고, 습지 셀4, 셀5, 셀6에는 갈대를 식재하였다.

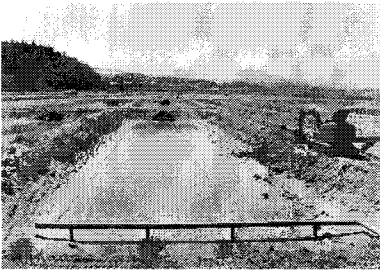
아래 사진들은 연못-습지 시스템의 시공모습을 보여준다.



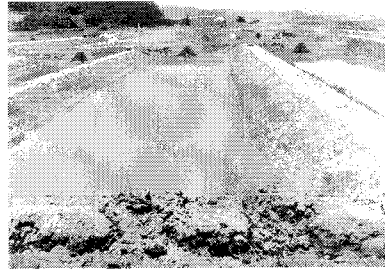
<사진 3-5> 연못 토공



<사진 3-6> 습지셀 토공



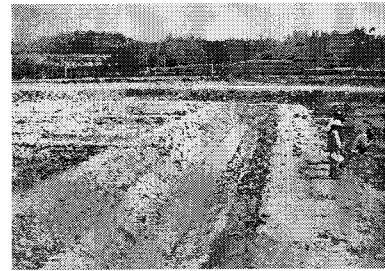
<사진 3-7> 습지셀의 유입부



<사진 3-8> 습지셀의 유출부 Weir



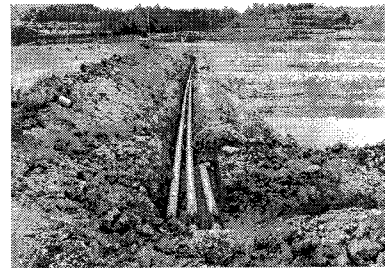
<사진 3-9> 습지셀 유출부 구조



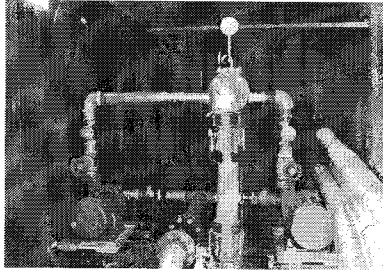
<사진 3-10> 습지셀 주변 배수로
토공



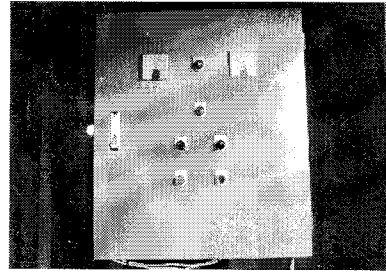
<사진 3-11> 집수정으로부터
유량분배탱크 배관공



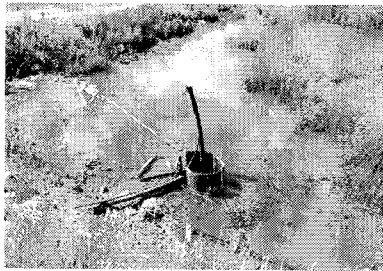
<사진 3-12> 습지 배관공



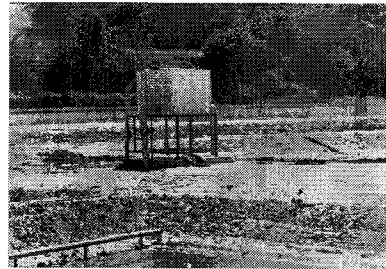
<사진 3-13> 펌핑 시설



<사진 3-14> 펌프 자동조절 판



<사진 3-15> 집수정 시공



<사진 3-16> 유량분배 탱크



<사진 3-17> 1차연못 모습



<사진 3-18> 2차연못 모습

나. 집수정 및 펌핑시설

펌핑시설은 4마력 펌프 2대를 설치하였으며 각 펌프는 200톤/일을 펌핑할 수 있다. 펌핑시간은 자동으로 조절할 수 있으며, 펌프 2대를 교대로 사용하거나 한 대는 예비로 활용할 수 있도록 하여 상시운영이 가능하도록 설치하였다.

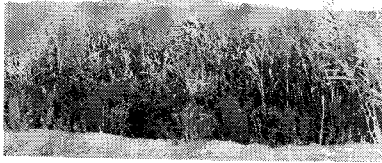
다. 습지셀 식재공

<표 3-6>은 수질정화 인공습지를 조성할 때 일반적으로 이용하는 정수식물 수종의 특성을 나타낸다. 북미에서는 수질정화 인공습지에 부들(cattail), 고랭이(bulrush)를 가장 많이 이용하고 있다. 북미에서 수질정화 인공습지에 갈대(reed)를 다소 선호하지 않는 이유는 갈대가 조성된 지역에는 다른 수종이 자라기 어려워 종의 다양성이 떨어지기 때문이다.

<표 3-6> 수질정화 인공습지 정수식물 수종

식 종	특 성	비 고
갈대 (reed, <i>Phragmites</i> spp.)	심근성, pH: 2-8, 성장 빠름 염도: < 45 ppt 항상수심 1m 성장가능 새 등지조성 적합 낮은 야생동물 먹이 공급	자유수면 및 여과습지에 많이 활용 겨울철 수중 줄기 남음 뿌리 산소공급을 높음 교란지역 침입 단일군락 형성
부들 (cattail, <i>Typha</i> spp.)	천근성, pH: 4-10, 성장 빠름 광엽부들: <1 ppt 협엽부들: 15 ppt 까지 성장 항상수심 0.3m 성장, 건조에 견딤 새 등지조성 적합 씨앗 및 지하경 야생동물 먹이	자유수면 인공습지에 많이 활용 겨울철 수중 줄기 남음 교란지역 침입 단일군락 형성
고랭이(bulrush, <i>Scirpus</i> spp.)	천근성, pH: 6.5-8.5, 성장률: 중간 줄기가 딱딱한 고랭이: 동물의 피해가 적음. 염도 < 5 ppt 항상수심 0.3m, 건조에 다소 견딤 씨앗과 지하경 동물먹이	자유수면 및 여과습지에 많이 활용

연못-습지 시스템 조성부지 주변의 개답지역과 환배수로에는 갈대와 부들이 자생하고 있다. 습지셀에서 갈대와 부들의 수질정화 효율의 차이를 조사하기 위해 습지셀1, 셀2, 셀3에는 부들을 식재하였으며, 습지 셀4, 셀5, 셀6에는 갈대를 식재하였다. <사진 3-19>와 <사진 3-20>은 개답지역에 자생하고 있는 갈대와 부들의 모습이다. 개답지역에 자생하고 있는 부들은 협엽부들(*Typha angustiflora*, narrow leaf cattail)로 염분이 0-15ppt에서 성장이 가능한 수종이다.



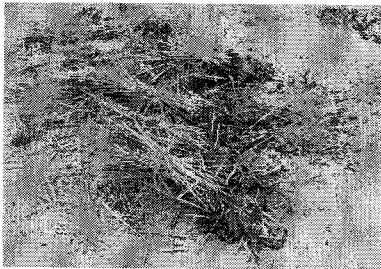
<사진 3-19> 개답지역의 자생 갈대



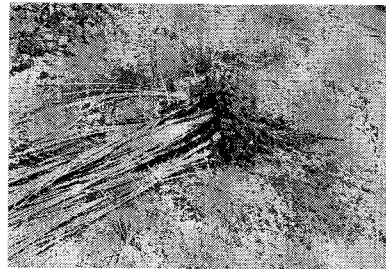
<사진3-20> 개답지역의 자생 부들

연못-습지 시스템 조성부지 근처에서 자생하고 있는 갈대와 부들을 영양번식기관이 손상되지 않도록 굴삭기로 채취하였다. 채취한 식물체를 뿌리로부터 30cm - 40cm부위에서 절단한 후 갈대는 2~3본씩, 부들은 1~2본씩 30cm간격으로 이식하였다. 1차년도에 시공한 연못-습지 시스템의 습지 셀1, 셀2, 셀3에는 부들을 심었으며, 2차년도에 시공할 예정인 습지 셀4 셀5, 셀6에는 갈대를 선 시공하였다. 갈대와 부들이 생태적으로 적응하여 수질정화의 기능을 발휘하기 위해서는 2년의 성장기가 필요하기 때문에 가능한 범위에서 갈대를 선 시공을 하였다. 갈대와 부들의 2차 성장기인 2차년도에 보강식재를 하였다.

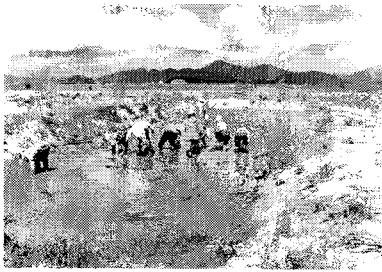
<사진 3-21>과 <사진 3-22>는 굴삭기로 캐낸 갈대와 부들을 풀라서 다발로 묶은 모습이다. <사진 3-23>은 습지 셀에 부들을 심는 모습이며, <사진 3-24>는 부들을 심은 후의 셀 모습이다. <사진 3-25>와 <사진 3-26>은 부들과 갈대의 식재후 약 1.5개월이 지난 후의 모습으로 절단한 부위가 성장한 모습과 새줄기가 성장하고 있는 모습을 보여준다.



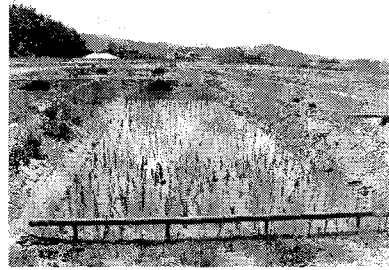
<사진 3-21> 자생갈대 다발 묶음



<사진 3-22> 자생부들 다발 묶음



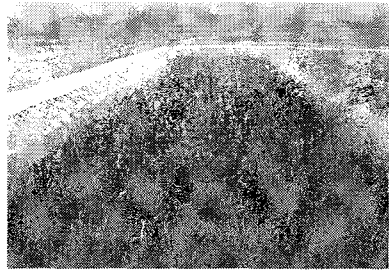
<사진 3-23> 습지 셀 식재



<사진 3-24> 식재 직후 습지 모습



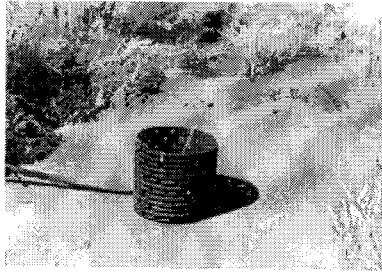
<사진 3-25> 부들 식재 후 성장모습



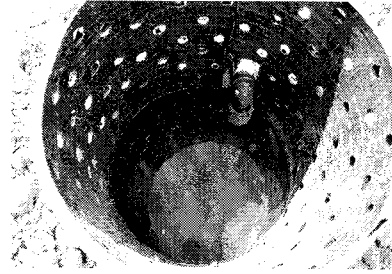
<사진 3-26> 갈대 식재 후 성장모습

라. 보완공

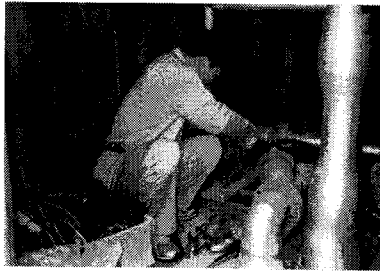
아래 사진들은 연못-습지 시스템 보완공 사진들이다. 2차년도에 연못-습지 시스템의 배수로에 강우로 간척지 개답지역의 토사가 유입되어 배수가 원활하지 않은 부분은 퇴적토사를 제거하였다. 3차년도에 신양천 물을 펌핑하는 집수정 주변과 집수정 유입부 PVC 관의 입구에 이물질이 끼어 펌핑에 지장을 주는 경우가 발생하여 집수정 보완공을 실시하였다. 2000년 1차 시스템 시공 후부터 펌핑모터의 장기간 가동으로 인하여 모터의 펌핑기능이 다소 저하되는 현상이 발생하여 3차년도 초에 임펠라를 교체하였으나, 펌핑모터의 임펠라 교체 4개월 후에 모터의 기능이 다시 저하되어 모터 2개를 교체하였다. 2차년도에 연못-습지 시스템 습지셀의 제방 위에 간척지 토양의 높은 염도(salinity)로 지피식물의 성장이 원활하지 않았다. 강우시 셀 제방의 토사가 습지셀로 유입되는 것을 완화하기 위해 부직포로 제방 상단부를 덮었다.



<사진 3-27> 집수정 보완공



<사진 3-28> 집수정 보완공



<사진 3-29> 펌프 교체공



<사진 3-30> 배수로 보완공

5. 시스템 처리수준 및 처리율

가. 처리수준

연못-습지 시스템의 처리수준을 알아보기 위해 1차연못, 2차연못, 각 습지셀의 수질조사를 2000년 8월부터 시작하였다. 갈대 셀의 수질분석은 2001년 7월부터 수행하였다. 수질분석을 위한 샘플링은 7일 - 10일에 한번 4ℓ 무균채수병에 채수하여 BOD₅, SS, TN, TP 등을 분석하였다. 수온은 현장에서 Scott pH-Meter(CG 347)로 측정하였으며, 기타 분석항목은 수질 오염공정시험방법(환경부, 2000)을 기준으로 SS는 유리섬유지법, BOD₅는 윙클러-아지드화나트륨변법, TN은 흡광광도법, TP는 흡광광도법(아스코르빈산 환원법)을 사용하여 분석하였다.

<그림 3-6>은 연못-습지 시스템의 유입수, 그리고 1차연못, 2차연못, 부들습지셀(셀1, 셀2, 셀3), 갈대습지셀(셀4, 셀5, 셀6) 유출수의 수온을 나타낸다. <그림 3-7>은 연못-습지 시스템의 유입수, 1차연못, 2차연못, 부들습지셀, 갈대습지셀 유출수의 월

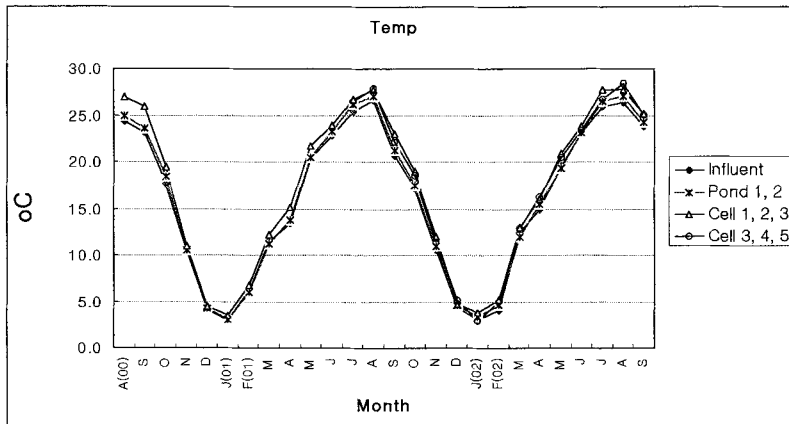
별 평균 pH 변화를 보여준다. 월별평균 수온과 pH는 부들습지셀의 경우 부들이 식재된 셀1, 셀2, 셀3 유출수의 수온과 pH 농도를 평균한 값이며, 갈대습지셀의 경우 갈대가 식재된 셀4, 셀5, 셀6 수온과 pH 농도를 평균한 값이다.

<그림 3-8>, <그림 3-11>, <그림 3-12>, <그림 3-15>는 연못-습지 시스템의 유입수와 1차연못, 2차연못, 부들셀(셀1, 셀2, 셀3), 갈대셀(셀4, 셀5, 셀6) 유출수의 월별평균 BOD₅, SS, TN, TP 농도를 나타낸다. 습지셀의 월별평균 BOD₅, SS, TN, TP 농도는 부들셀의 경우 부들이 식재된 셀1, 셀2, 셀3 유출수의 농도를 평균한 값이며, 갈대셀의 경우 갈대가 식재된 셀4, 셀5, 셀6 유출수의 농도를 평균한 값이다.

1) 수온 변화

<그림 3-6>에서 조사기간 중 최고수온은 8월에 27°C 였으며, 최저수온은 1월에 3°C를 나타냈다. 2001 - 2002년 여름철 평균 수온은 25.5°C였고, 겨울철 평균수온은 6.1°C였다.

유입수, 연못 유출수, 습지셀 유출수의 수온조사결과, 유입수의 수온이 가장 낮았으며, 연못의 평균수온은 유입수에 비해 0.1 - 1.0°C정도 높아지고, 습지셀은 2차연못 방류수 수온보다 약 0.2 - 1.1°C 높은 것으로 조사되었다. 습지셀 수온이 높은 이유는 습지수심이 평균 0.3m로 태양열에 의한 습지 수온상승에 원인이 있는 것으로 생각된다.

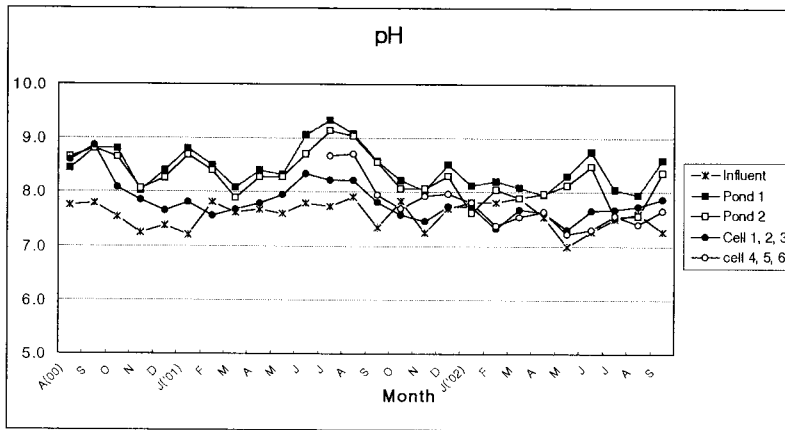


<그림 3-6> 연못-습지 시스템의 월별 수온

2) pH 변화

<그림 3-7>에서 조사기간동안 신양천 유입수, 1차연못, 2차연못, 부들습지셀, 갈대습지셀의 평균 pH는 각각 7.57, 8.44, 8.29, 7.84, 7.76으로 조사되었다. 여름철의 1차연못과 2차연못의 pH는 각각 8.66, 8.45이며, 겨울철의 1차연못과 2차연못의 pH는 각각 8.32, 8.17이었다. 여름철 pH가 겨울철 보다 높다. 여름철 연못의 pH가 유입수 보다 증가하는 이유는 연못에 조류(algae)가 성장하기 때문이다. 조류가 성장하면 pH가 증가하게 된다. 1차연못의 여름철 pH가 2차연못의 여름철 pH보다 다소 높다.

여름철의 부들셀과 갈대셀의 pH는 각각 8.06, 7.93이며, 겨울철 부들셀과 갈대셀의 pH는 각각 7.71, 7.90이다. 여름철 pH가 겨울철 보다 높다. 이는 습지셀 일부에서 여름철에 조류가 발생하는데 원인이 있는 것으로 사료된다.



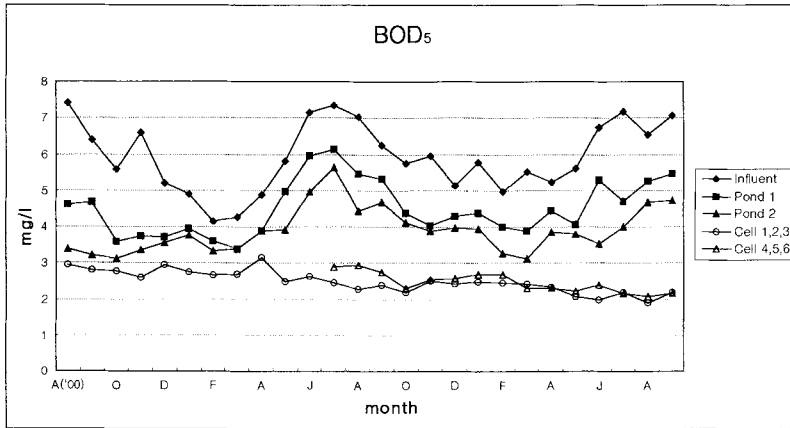
<그림 3-7> 연못-습지 시스템의 월별 pH

3) BOD 제거

<그림 3-8>는 연못-습지 시스템의 BOD₅ 처리수준을 보여주며, <표 3-7>은 BOD₅ 처리수준과 처리율을 보여준다. 조사기간 유입수의 평균 BOD₅ 농도는 6.01mg/l 이었다. 1차연못에서 유입수의 BOD₅가 평균 4.57mg/l 로 처리되어 24%의 처리율을 보였으며, 2차연못에서 평균 3.98mg/l 로 정화되어 34%의 처리율을 보이고 있다. 부들습지셀 처리수의 평균 BOD₅는 2.62mg/l 로 평균 56%의 처리효율을 보였고, 갈대습지셀 처리수의 평균 BOD₅는 2.54mg/l 로 평균 58%의 처리효율을 보였다.

2차연못의 BOD₅ 평균 제거율은 약 13% 정도로 1차연못과 습지셀에 비해 상대적

으로 낮은 수준을 보였다.



<그림 3-8> 연못-습지 시스템 BOD₅ 처리수준

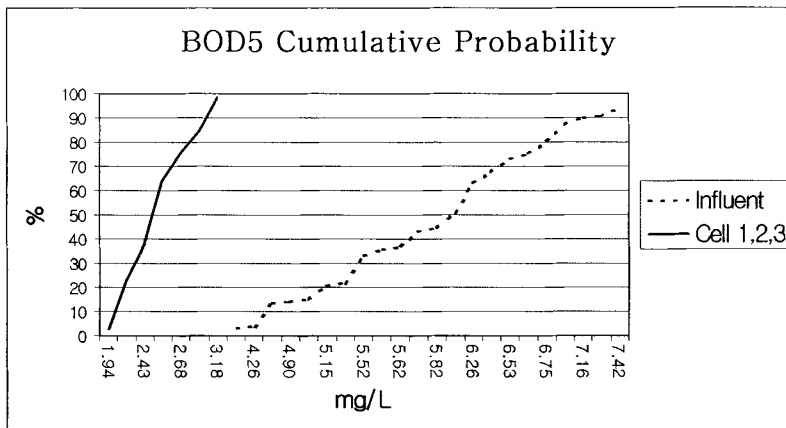
<표 3-7> 연못-습지 시스템 BOD₅ 처리율

	BOD ₅ (mg/l)	BOD ₅ 처리율 (%)	
		전체	부분
유입수	6.01	-	-
1차연못	4.57	24	24
2차연못	3.98	34	13
부들습지셀	2.62	56	34
갈대습지셀	2.54	58	36

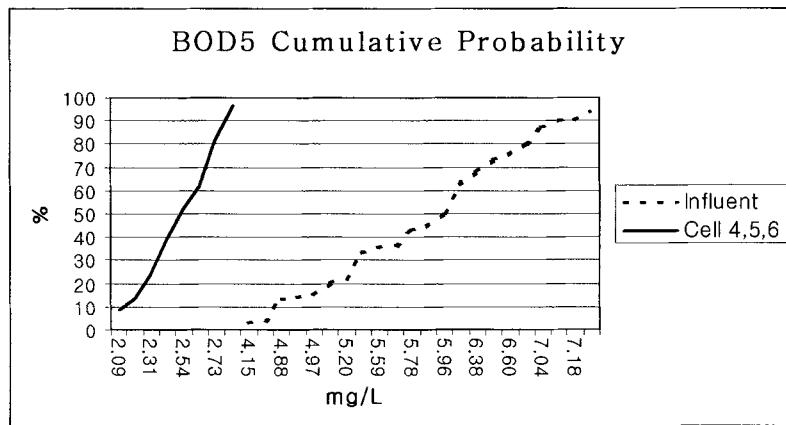
2002년 습지셀의 부들 및 갈대가 식재 후 2번의 겨울을 지나 2회의 성장기를 거치면서 수질정화에 어느 정도 적합한 조건에 이르렀다. 2002년 5월부터 2002년 9월 사이 부들 및 갈대가 자라고 있을 때 연못-습지 시스템의 처리효율을 부들셀의 경우 68%, 갈대셀의 경우 67%를 보여 양호한 수준을 보였다. 몇 회의 성장기를 더 거쳐 부들과 갈대가 생태적으로 안정되고, 습지바닥의 토양-잔재물 층이 수질정화에 양호한 조건에 도달하면 부들셀 및 갈대셀의 BOD₅ 처리효율이 높아질 것으로 생각된다.

연못바닥에 유기물이 침전되면 얇은 슬러지층이 형성되며, 연못하층은 혐기성 상태가 되어 혐기성 박테리아 활동으로 침전된 유기물이 분해되며 유기산이 생성된다. 이 유기산을 메탄박테리아가 메탄과 이산화탄소로 분해시켜 유기물이 제거된다. 연

못바닥의 슬러지층 형성에는 최소 1년 이상이 소요되며, 슬러지층이 형성된 연못이 슬러지층이 형성되지 못한 연못보다 BOD₅처리율이 높다(Parker, 1979). 2001년 8월 Coretaker로 1차연못과 2차연못의 바닥을 채취해본 결과, 1차연못은 슬러지층이 아주 얇게 형성중이었으며 2차연못은 슬러지층이 거의 형성되지 않은 상태였다. 2002년 10월 1차연못과 2차연못의 바닥을 채취해본 결과 1차연못에는 슬러지층이 형성되어 있었으며, 2차연못에도 얇은 슬러지 층이 형성되어 있었다. 연못바닥에 슬러지층이 발달하면 연못의 BOD₅ 제거율이 다소 높아질 것으로 예상된다.



<그림 3-9> 유입수와 부들습지셀 유출수의 BOD₅ 농도 누적확률



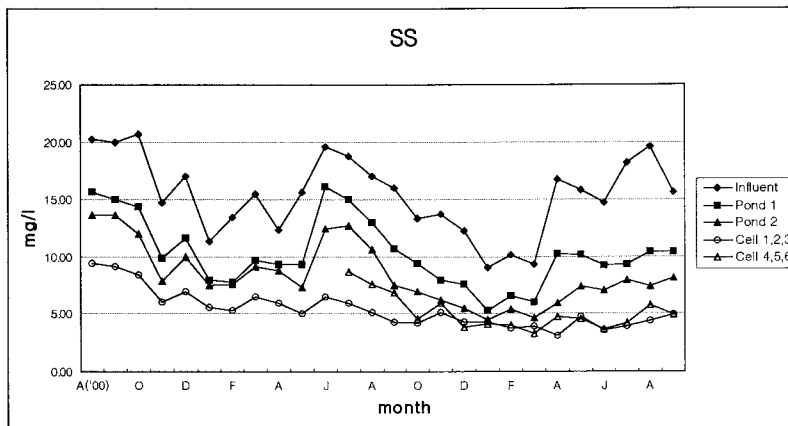
<그림 3-10> 유입수와 갈대습지셀 유출수의 BOD₅ 농도 누적확률

<그림 3-9>은 유입수와 부들습지셀(셀1, 셀2, 셀3) 유출수의 BOD₅ 농도에 대한 누적확률을 보여주며, <그림 3-10>는 유입수와 갈대습지셀(셀4, 셀5, 셀6) 유출수의

BOD₅ 농도에 대한 누적확률을 나타낸다. 조사기간동안 유입수의 BOD₅ 농도는 4.15 - 7.42 mg/ℓ의 범위였다. 부들습지셀 유출수와 갈대습지셀 유출수의 BOD₅ 농도는 각각 1.94 - 3.18 mg/ℓ과 2.09 - 2.78 mg/ℓ의 범위였다.

4) SS 제거

<그림 3-11>는 연못-습지 시스템의 SS 처리수준을 보여주며, <표 3-8>은 SS 처리수준과 처리율을 보여준다. 유입수의 평균 SS 농도는 15.43mg/ℓ을 보였다. 1차 연못에서 유입수의 SS가 10.96mg/ℓ로 처리되어 29%의 처리효율을 보였으며, 2차 연못에서 평균 8.79mg/ℓ로 낮아져 43%의 처리율을 보이고 있다. 부들 습지셀 처리수의 평균 SS는 5.71mg/ℓ로 평균 63%의 처리효율을 보였고, 갈대 습지셀 처리수의 평균 SS는 5.40mg/ℓ로 평균 65%의 처리효율을 보였다.



<그림 3-11> 연못-습지 시스템 SS 처리수준

<표 3-8> 연못-습지 시스템 SS 처리율

	SS (mg/ℓ)	SS 처리율 (%)	
		전체	부분
유입수	15.43	-	-
1차연못	10.96	29	29
2차연못	8.79	43	19
부들습지셀	5.71	63	35
갈대습지셀	5.40	65	39

연못에서 SS는 주로 침전에 의해 제거되며, 습지에서도 SS는 주로 침전에 의해 제거된다. 2차연못 보다는 1차연못에서 유입수의 SS가 상당부분 처리되고 있다. 습지셀의 SS 처리율은 약 37% 정도를 보였다. 습지셀 사면이 안정되면 SS 처리효율이 다소 높아질 것으로 예상된다.

5) TN 제거

<그림 3-12>는 연못-습지 시스템의 TN 처리수준을 보여주며, <표 3-9>은 TN 처리수준과 처리율을 보여준다. 유입수의 평균TN 농도는 5.80mg/l 이었다. 1차연못에서 유입수의 TN이 평균 4.64mg/l 로 처리되어 20%의 처리율을 보였으며, 2차연못에서 평균 3.98mg/l 로 정화되어 31%의 처리율을 보이고 있다. 부들셀 처리수의 평균 TN 농도는 2.41mg/l 로 평균58%의 처리효율을 보였고, 갈대셀 처리수의 평균 TN 농도는 2.47mg/l 로 평균 57%의 처리효율을 보였다.

2차연못의 평균TN 처리율은 14%이었으며, 부들셀의 평균TN 처리율은 39%를 보였고, 갈대셀의 평균TN 처리율은 38%을 나타냈다. 2차연못의 TN 제거율은 1차연못과 습지셀에 비해 상대적으로 낮은 수준을 보였다. 2002년 습지셀의 부들 및 갈대가 식재 후 2번의 겨울을 지나 2회의 성장기를 거치면서 수질정화에 어느 정도 적합한 조건에 이르렀다. 2002년 5월부터 2002년 9월 사이 부들 및 갈대가 자라고 있을 때 연못-습지 시스템의 처리효율은 부들셀의 경우 69%, 갈대셀의 경우 66%를 보여 비교적 양호한 수준을 보였다.

연못에서 TN은 조류성장에 의해 주로 제거되며, 일부는 미생물에 의한 질산화(nitrification)와 탈질화(denitrification) 과정에서 질소로 전환되어 대기중으로 이동하여 제거된다(EPA, 1983; Oswald, 1988).

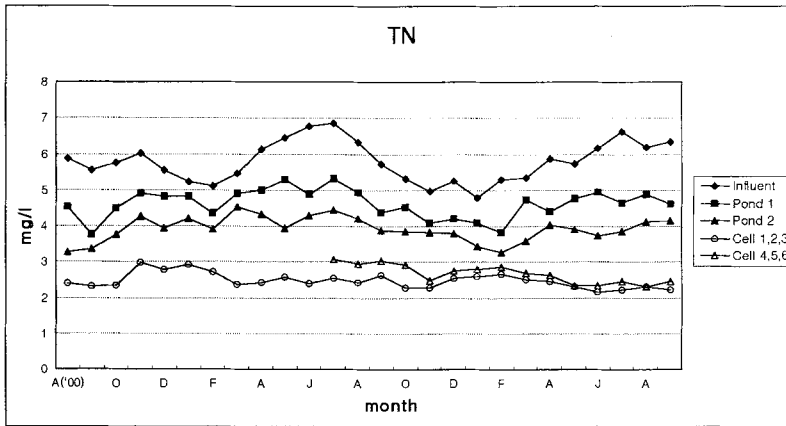
탈질화는 유기물의 공급이 필요하다. 습지식물이 죽어 습지바닥에 쌓인 잔재물은 유기쇄설물이 되어 탈질화에 필요한 탄소공급원이 된다. 새로 조성한 인공습지는 잔재물토양(litter-soil)층이 형성되지 못하여 질소의 제거율이 낮은 경향을 보인다. 인공습지를 시공한 후 초기단계에 유기물(벗짚 등)을 추가로 공급하면 TN 제거율이 증가하는 경향을 보인다.

<그림 3-12>에서 부들셀의 TN 처리율이 갈대보다 약간 높게 나타났다. 이는 부들셀 바닥의 토양-잔재물층 형성이 갈대셀 바닥의 토양-잔재물 층보다 다소 빠르게 형성되고 부들의 근권 발달이 갈대보다 빠르는데 원인이 있는 것으로 생각된다.

<그림 3-6>에서 겨울철의 습지 수온은 매우 낮으며, <그림 3-12>에서 습지셀의 겨울철 TN 처리효율은 낮은 경향을 보이고 있다. 겨울철 습지수온의 저하로 습지내

미생물의 질산화와 탈질화 활동 저하(Kadlec and Knight, 1996)에 원인이 있는 것으로 사료된다. 부들 및 갈대 습지셀의 연간 평균 TN 처리율이 다소 낮은 원인으로 겨울철 수온저하로 인한 TN 처리율 감소에 원인이 있는 것으로 사료된다. 몇 회의 성장기를 더 거쳐 부들과 갈대가 생태적으로 안정되어 근권이 발달하고, 습지바닥의 토양-잔재물 층이 수질정화에 양호한 조건에 도달하면 부들셀 및 갈대셀의 TN 처리효율이 높아질 것으로 생각된다.

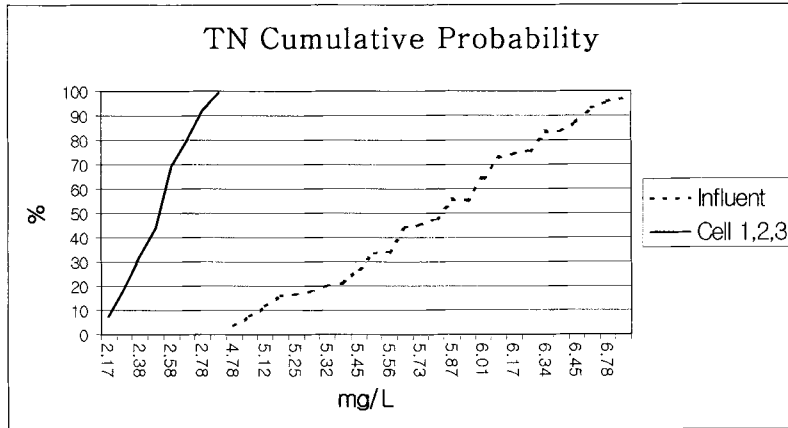
<그림 3-13>는 유입수와 부들습지셀(셀1, 셀2, 셀3) 유출수의 TN 농도에 대한 누적확률을 보여주며, <그림 3-14>는 유입수와 갈대습지셀(셀4, 셀5, 셀6) 유출수의 TN 농도에 대한 누적확률을 나타낸다. 조사기간동안 유입수의 TN 농도는 4.78 - 6.85 mg/l 의 범위에서 조사되었다. 부들습지셀 유출수와 갈대습지셀 유출수의 TN 농도는 각각 2.17 - 2.98 mg/l 과 2.31 - 3.07 mg/l 의 범위를 나타냈다.



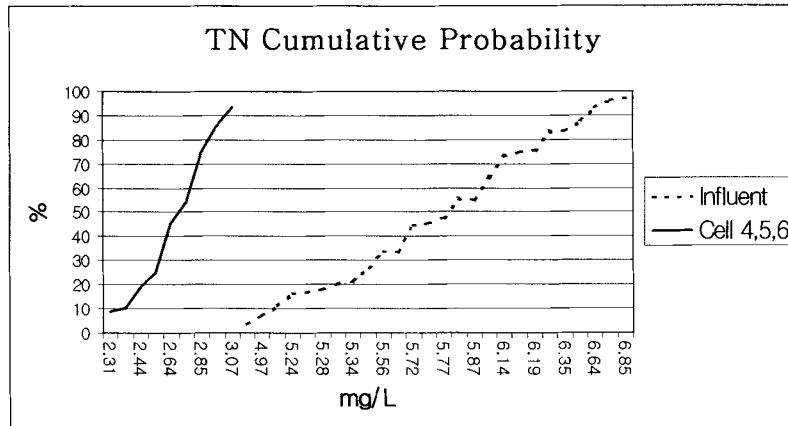
<그림 3-12> 연못-습지 시스템 TN 처리수준

<표 3-9> 연못-습지 시스템 TN 처리율

	TN (mg/l)	TN 처리율 (%)	
		전체	부분
유입수	5.80	-	-
1차연못	4.64	20	20
2차연못	3.98	31	14
부들습지셀	2.41	58	39
갈대습지셀	2.47	57	38



<그림 3-13> 유입수와 부들습지셀 유출수의 TN 농도 누적확률

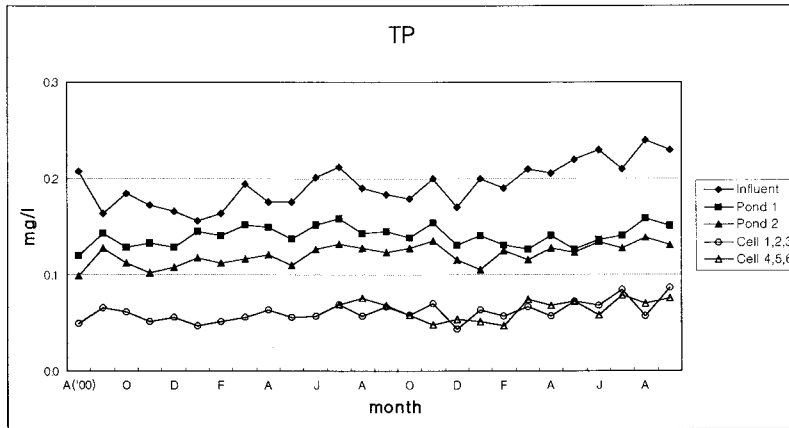


<그림 3-14> 유입수와 갈대습지셀 유출수의 TN 농도 누적확률

6) TP 제거

<그림 3-15>는 연못-습지 시스템의 TP 처리수준을 보여주며, <표 3-10>은 TP 처리수준과 처리율을 보여준다. 유입수의 평균TP 농도는 0.198mg/l 이었다. 1차연못에서 유입수의 TP가 평균 0.152mg/l 로 처리되어 23%의 처리율을 보였으며, 2차연못에서 평균 0.129mg/l 로 정화되어 35%의 처리율을 보이고 있다. 부들셀 처리수의 평균 TP 농도는 0.081mg/l 로 평균 59%의 처리효율을 보였고, 갈대셀 처리수의 평균 TP 농도는 0.085mg/l 로 평균 57%의 처리효율을 보였다. 2차연못의 평균TP 처리

율은 15%이었으며, 부들셀의 평균TP 처리율은 37%를 보였고, 갈대셀의 평균TN 처리율은 34%을 나타냈다.



<그림 3-15> 연못-습지 시스템 TP 처리수준

<표 3-10> 연못-습지 시스템 TP 처리율

	TP (mg/ l)	TP 처리율 (%)	
		전체	부분
유입수	0.198	-	-
1차연못	0.152	23	23
2차연못	0.129	35	15
부들습지셀	0.081	59	37
갈대습지셀	0.085	57	34

연못에서 인(P)은 조류성장으로 제거되거나 인산염으로 전환되어 침강 (precipitation)에 의해 제거된다. 수심 2 m의 조건성 연못의 상층은 호기성 미생물에 의해 유기물이 이산화탄소, 물, 영양염류(N, P)로 분해되며, 햇빛을 받으면 녹조 (algae)가 이산화탄소와 영양염류를 흡수하여 성장하면서 질소와 인이 제거된다 (Oswald, et al., 1994; Green, et al., 1995). 조건성-호기성 연못으로 구성된 연못시스템에서는 조건성 연못의 처리수에 함유되어 있는 녹조가 호기성 연못으로 유입되면 녹조의 상당부분이 죽어 연못바닥으로 침전되어 질소와 인이 제거된다.

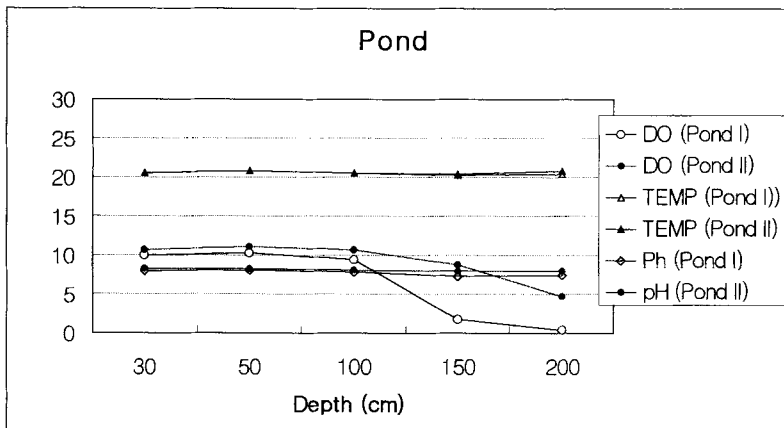
습지에서 인은 인산염의 상태로 침강하여 제거되며(Faulker and Richardson, 1989; Yang, 2001), 습지식물에 의해 일부는 흡수된다(Greenway and Woolley, 1999). 인은 습지식물의 잔재물이 침전되어 형성된 습지바닥의 잔재물층에 흡착(adsorption)되어 95% 이상이 존재한다. 습지셀의 잔재물층이 발달하면 인의 제거 효율이 다소 증가할 것으로 예상된다.

6. 연못의 반응 및 침전물 분석

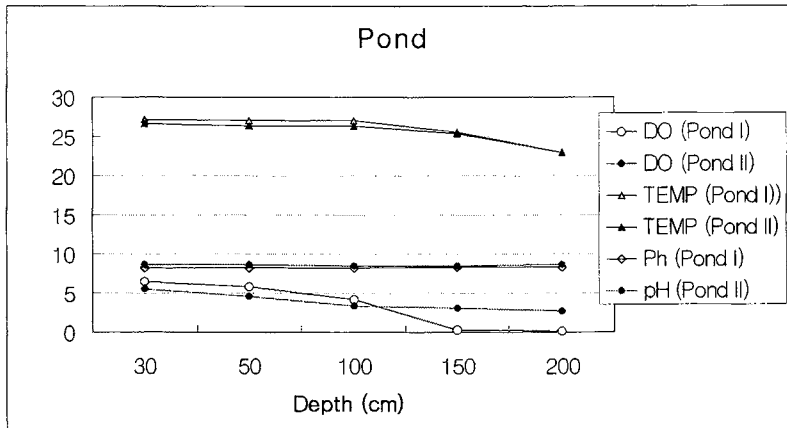
가. 연못의 반응

2002년 1차연못과 2차연못의 수심별 DO, pH, 온도를 측정하여 연못의 반응을 분석하였다. 2002년 5월, 8월, 10월에 조사하였고, 측정시간은 오후 1시 - 3시 사이이다. DO는 YSI 5905를 사용하여 측정하였고, pH와 온도는 HORIBA U-10을 사용하였으며, 각 연못의 3지점을 측정하여 평균하였다.

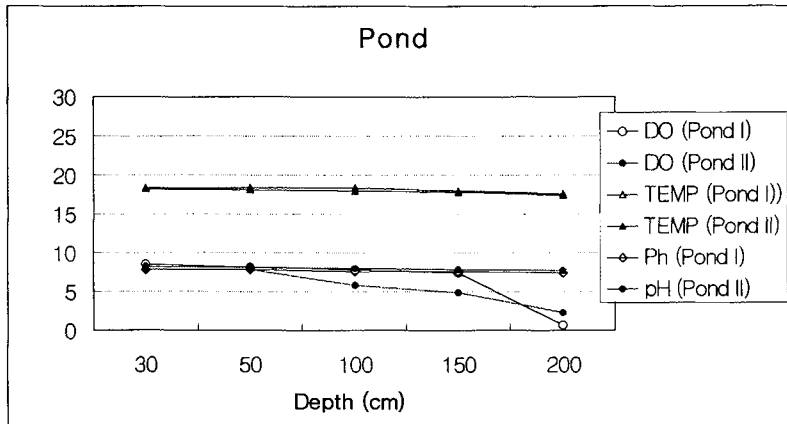
<그림 3-16>, <그림 3-17>, <그림 3-18>는 각각 5월, 8월, 10월의 1차연못 및 2차연못 수심별 평균 DO, 온도, pH의 추이를 보여준다.



<그림 3-16> 1차연못과 2차연못의 5월 평균 DO, 온도, pH



<그림 3-17> 1차연못과 2차연못의 8월 평균 DO, 온도, pH



<그림 3-18> 1차연못과 2차연못의 10월 평균 DO, 온도, pH

2002년에 수행한 수심별 1차연못과 2차연못의 DO, 온도, pH 조사에 따르면, 수온이 높은 8월에 연못 표층과 바닥층의 수온이 가장 현저한 차이(평균 2°C)를 보였고, 5월과 10월에는 8월에 비해 상대적으로 수온차(0.22°C - 0.82°C)가 작았다. pH는 1차연못이 2차연못보다 더 높게 조사되었다. 이는 1차연못의 조류(algae) 발생이 더 많았기 때문으로 생각된다. 조류가 발생하면 pH가 증가한다.

1차연못의 바닥은 혐기성을 유지하고 있다. 유입수의 유기물이 침전되어 슬러지층이 형성되었음을 알 수 있었다. 연못바닥의 혐기층은 수질정화에 중요한 역할을 한다. 침전된 유기물이 혐기 상태에서 유기산으로 전환되면 메탄박테리아에 의해 메

탄과 이산화탄소로 분해된다. 유기물의 탄소가 메탄으로 전환되어 대기중으로 이동되면서 수질이 정화된다. 2차연못의 바닥은 1차연못의 바닥보다 슬러지층이 발달이 느려 완전한 혐기상태를 유지하지 못하고 있다.

<사진 3-31>과 <사진 3-32>는 각각 1차연못의 여름 전경과 겨울 전경을 보여주며, <사진 3-33>과 <사진 3-34>는 각각 2차연못의 여름 전경과 겨울 전경을 보여준다.



<사진 3-31> 1차연못의 여름 전경



<사진 3-32> 1차연못의 겨울 전경



<사진 3-33> 2차연못의 여름 전경



<사진 3-34> 2차연못의 겨울 전경

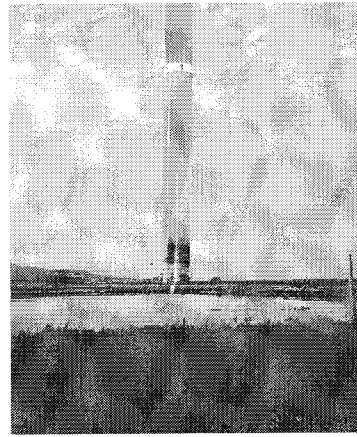
나. 연못의 침전물 분석

2002년 10월 연못바닥의 퇴적물을 분석하였다. 1차연못과 2차연못의 바닥 깊이 약 6cm를 Coretaker를 사용하여 채취하였다. 각 연못에서 3군데씩 샘플링하였다. 조사지점 3군데의 성분은 평균값으로 나타내었다.

샘플은 건조기에서 건조시킨 후, 성분을 분석하였다. <사진 3-35>과 <사진 3-36>은 연못 바닥의 퇴적물(sludge)을 채취하는 사진과 Coretaker의 샘플사진이다.



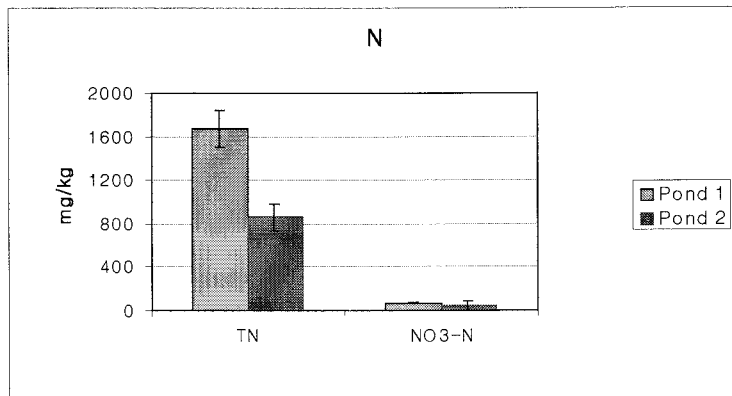
<사진 3-35> Coretaker로 연못 바닥 슬러지 채취



<사진 3-36> 연못바닥 슬러지 채취 Coretaker 모습

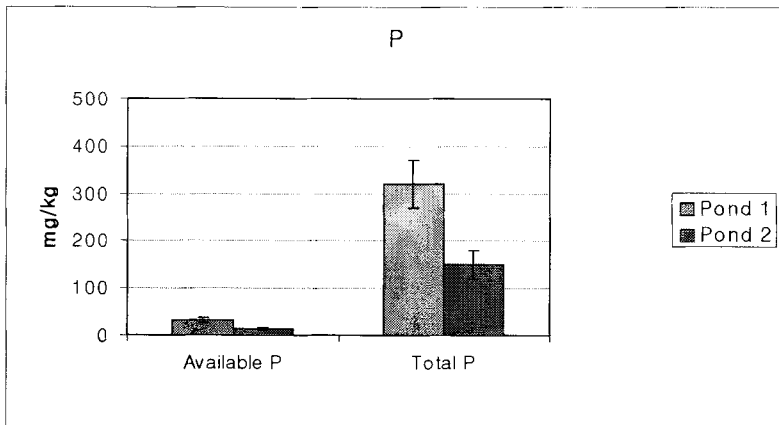
<그림 3-19>은 1차연못(pond 1), 2차연못(pond 2)의 총질소와 질산태질소의 평균 함량을 보여준다. 1차연못, 2차연못의 평균 총질소 함량은 각각 1,670mg/kg, 860 mg/kg로 조사되었고, 평균 질산태질소($\text{NO}_3\text{-N}$)의 함량은 각각 68.49mg/kg, 42.01 mg/kg으로 조사되었다.

1차연못의 총질소 평균 함량이 2차연못 보다 높게 나타났다. 신양천 유입수가 1차연못으로 유입된 후 1차연못의 처리수가 2차연못으로 유입되기 때문에 1차연못의 바닥에 유기물과 부유물의 침전량이 상대적으로 많아 1차연못의 총질소, 질산태질소 함량이 높은 것으로 생각된다. 유입수의 부유물 상당량이 1차연못에서 침전되는 것으로 사료된다.



<그림 3-19> 1차연못과 2차연못 TN, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 평균함량

<그림 3-20>은 1차연못, 2차연못의 유효인산(available P)과 총인산(Total P) 평균 함량을 보여준다. 1차연못, 2차연못의 평균 유효인산 함량은 각각 31.25 mg/kg, 14.03mg/kg으로 조사되었고, 평균 총인산함량은 각각 320mg/kg, 150mg/kg을 나타냈다. 1차연못 바닥의 유효인산과 총인산이 2차연못보다 높게 나타났다. 유입수의 부유물 및 고형인산이 1차연못에서 더 많이 침전되는데 원인이 있는 것으로 사료된다.



<그림 3-20> 1차연못과 2차연못의 유효인산과 총인산의 평균함량

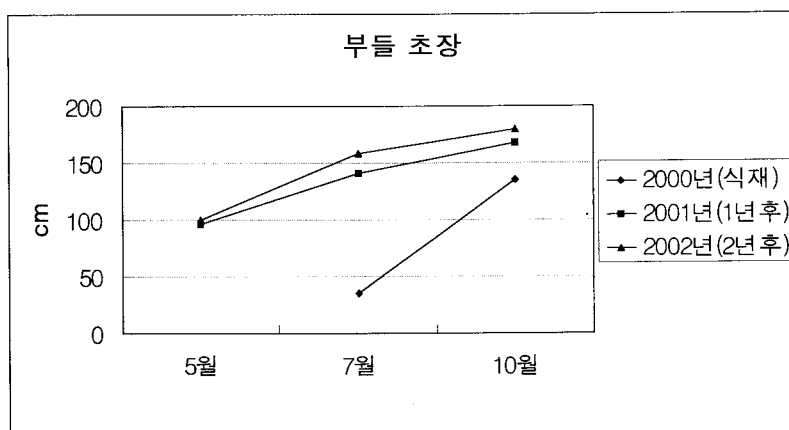
7. 습지셀 식물성장 및 토양분석

가. 식물성장

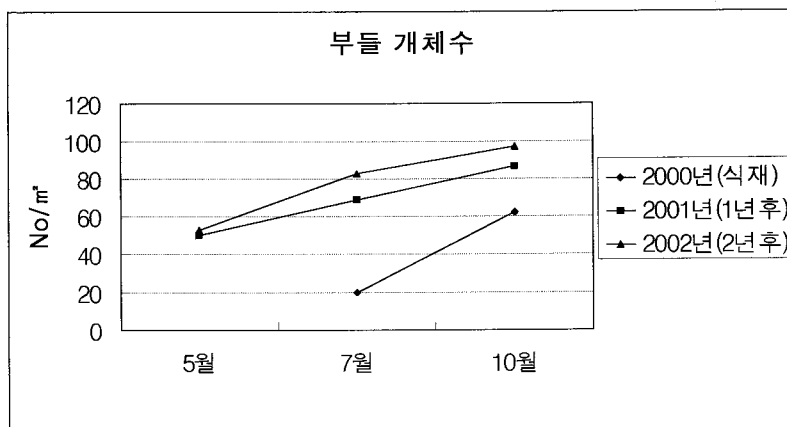
1차년도(2000년)에 시스템 주변에서 자생하는 부들(*Typha angustifolia*)과 갈대(*Phragmites communis*)을 채취하여 뿌리에서 약 35cm 높이를 절단한 후 30cm 간격으로 습지 셀1, 셀2, 셀3에는 부들을 식재하였고, 습지 셀4, 셀5, 셀6에는 갈대를 식재하였다. 부들과 갈대의 성장조사는 1m × 1m 격자틀을 이용하여 발생 본수와 초장(草長)을 측정하였다. 각 습지 셀의 유입부와 유출부에서 각각 2군데씩 조사하여 부들 습지셀과 갈대 습지셀의 샘플수는 각각 12개가 된다. 초장은 격자틀내의 10개 체를 조사하여 평균초장으로 나타냈고, 발생 본수는 격자틀 내의 모든 줄기를 조사하여 평균값으로 나타내었다.

<그림 3-21>과 <그림 3-22>은 부들습지셀(셀1, 셀2, 셀3)에서 자라는 부들의 초

장과 개체수의 변화를 보여준다. 2000년 식재직 후 평균초장 35cm가 10월에는 135cm로 성장하였고, 식재 직후 20개이던 개체수는 10월에 62개로 증가하였다. 1차년도(2000년)에 식재한 부들의 줄기와 새로 나온 줄기는 겨울에 모두 죽었으며, 2001년 4월 초순부터 새줄기가 나오기 시작하였다. 2차년도인 2001년 5월 초순, 7월 초순, 10월 중순의 부들 평균초장은 각각 96.5cm, 141.4cm, 167.9cm이었으며, 1㎡당 개체수는 각각 50.2개, 69.6개, 86.9개였다. 2002년 5월 초순, 7월 초순, 10월 중순의 평균초장은 각각 100.1cm, 157.4cm, 179.8cm이었으며, 1㎡당 개체수는 각각 56.1개, 83.5개, 96.9개였다. 부들의 연차별 생육을 보면, 3차년도(2002년)의 생육이 2차년도(2001년)의 생육보다 다소 양호하였다. 전반적으로 부들의 성장이 양호하였다.

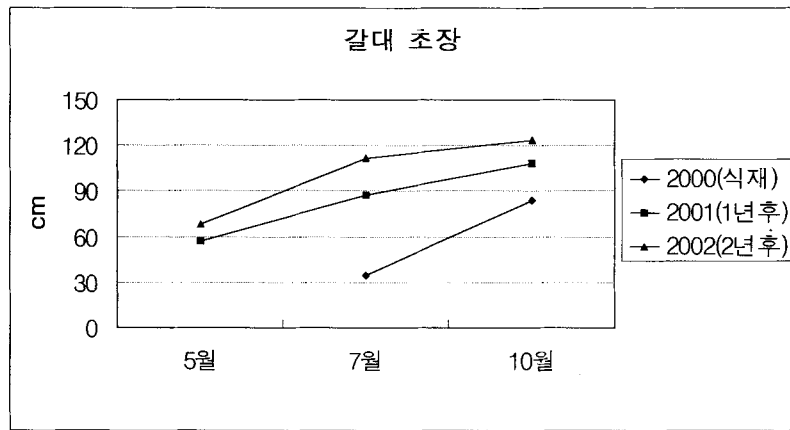


<그림 3-21>부들 평균 초장

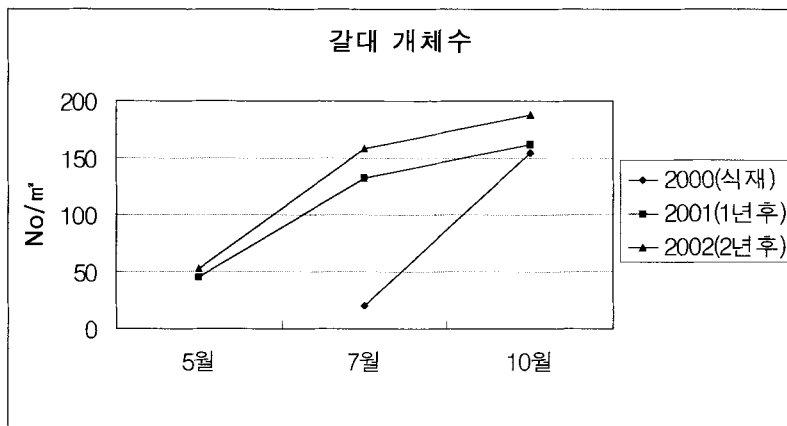


<그림 3-22>부들 평균 개체수

<그림 3-23>과 <그림 3-24>는 갈대습지셀(셀4, 셀5, 셀6)에서 성장하는 갈대의 생육변화를 보여준다. 식재 당해년도(2000년) 10월 중순 갈대 평균 초장은 84.1cm였고, 평균 개체수는 154.7개로 조사되었다. 이듬해 2001년 5월 초순, 7월 초순, 10월 중순의 갈대 평균초장은 각각 56.6cm, 87.3cm, 108.5cm였으며, 1㎡당 개체수는 각각 45.7개, 132.5개, 162.3개였다. 2000년 식재한 갈대의 줄기와 새로 나온 줄기는 겨울철에 죽고, 이듬해인 2001년 4월 초순부터 새줄기가 나오기 시작하였다. 2002년의 갈대 성장은 2001년에 비해 향상되었다. 3차년도(2002년) 5월 초순, 7월 초순, 10월 중순의 갈대 평균초장은 각각 68.3cm, 112.1cm, 123.7cm였으며, 1㎡당 개체수는 각각 52.6개, 158.3개, 187.9개로 조사되었다. 습지셀의 갈대 성장이 양호하였다.



<그림 3-23>갈대 평균초장



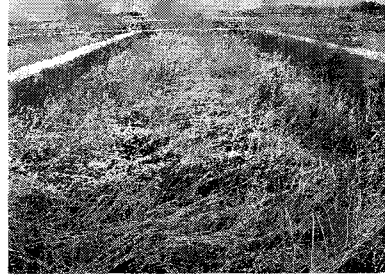
<그림 3-24> 갈대 평균 개체수

<사진 3-37>은 여름철의 부들 습지셀 전경이고, <사진 3-38>는 겨울철 부들 습지셀의 전경을 보여준다.

<사진 3-39>는 여름철 갈대 습지셀의 전경이며, <사진 3-40>은 겨울철 갈대 습지셀의 전경이다.



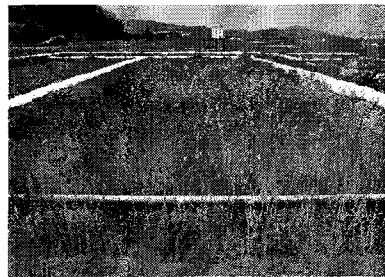
<사진 3-37> 부들습지 여름 전경



<사진 3-38> 부들습지 겨울 전경



<사진 3-39> 갈대습지 여름 전경



<사진 3-40> 갈대습지 겨울 전경

본 연못-습지 시스템의 부들과 갈대의 초기성장은 양호하였으며, 부들과 갈대 성장률을 비교하면 부들이 갈대보다 다소 높게 조사되었다.

나. 습지셀 식물 건중량 및 N, P 함량

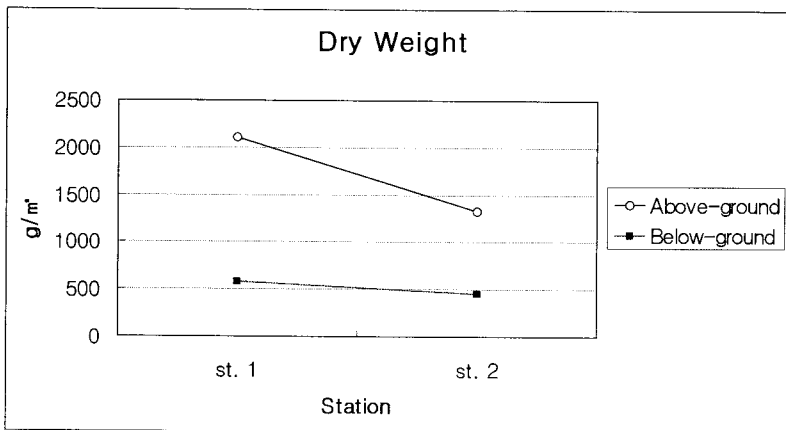
2002년 9월 부들습지셀(셀1, 셀2, 셀3)과 갈대습지셀(셀4, 셀5, 셀6)의 식물체 건중량 및 식물체내의 N, P 함량을 분석하기 위해 각 습지셀의 유입부 2군데와 유출부 2군데에서 0.5m × 0.5m내에 있는 부들 및 갈대의 지상부와 지하부를 모두 채취하였다. 부들셀 3개와 갈대셀 3개의 유입부 및 유출부의 샘플수는 각각 6개이며, 건중량 및 식물체 N, P 함량은 6개 샘플의 평균으로 나타냈다.

채취한 식물체는 건조기로 건조한 후 지상부와 지하부로 분류하여 건중량을 측정하였고, 식물체의 N, P함량을 분석하였다.

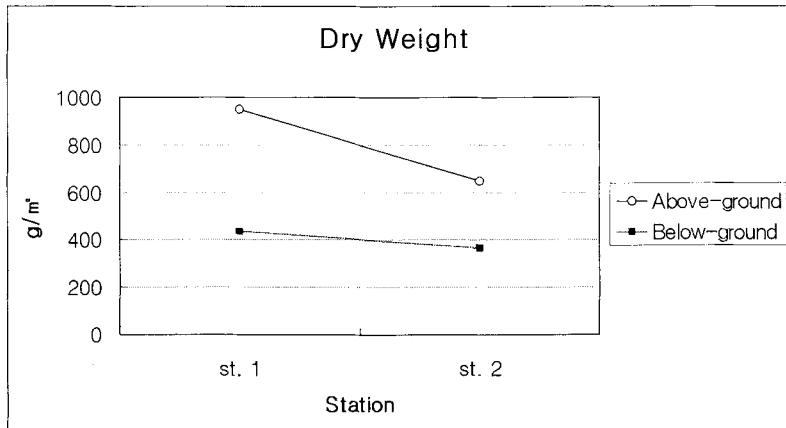
1) 건중량

<그림 3-25>와 <그림 3-26>는 습지셀 유입부(st. 1)와 유출부(st. 2)에서 성장하는 부들과 갈대의 지상부(above-ground)와 지하부(below-ground) 건중량을 나타낸다. 부들습지셀의 유입부와 유출부의 지상부 평균건중량은 각각 2,107g/m², 1,332g/m²이었으며, 지하부 평균건중량은 각각 579g/m², 463g/m²였다. 갈대습지셀의 유입부와 유출부의 지상부 평균건중량은 각각 953g/m², 649g/m²이며, 지하부 평균건중량은 각각 436g/m², 367g/m²였다. 유입부의 부들과 갈대의 건중량이 유출부보다 높다. 유입부의 정수식물 성장이 유출부보다 양호함을 알 수 있다. 이는 유입수에 함유된 영양염류가 유입부에 상대적으로 많이 침전되어 유입부 부들과 갈대의 질소·인 흡수량이 상대적으로 높는데 원인이 있는 것으로 생각된다.

부들습지셀의 유입부에서 자라는 부들의 지상 및 지하 건중량을 합한 총평균건중량은 2,686g/m²이었으며, 유출부의 지상 및 지하 건중량을 합한 부들 총평균건중량은 1,795g/m²이었다. 갈대습지셀의 유입부에서 자라는 갈대의 지상 및 지하 건중량을 합한 총평균건중량은 1,389g/m²이었으며, 유출부에서 자라는 갈대의 지상 및 지하 건중량을 합한 총평균건중량은 1,016g/m²이었다. 부들의 총평균건중량이 갈대의 총평균건중량 보다 다소 높게 나타났다.



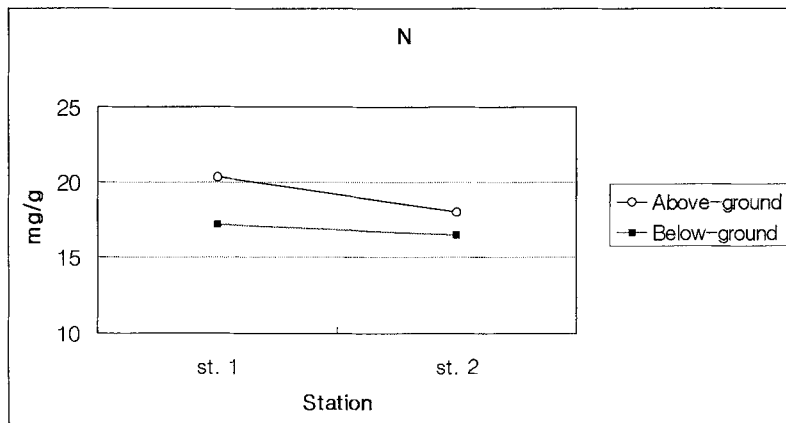
<그림 3-25> 부들의 건중량



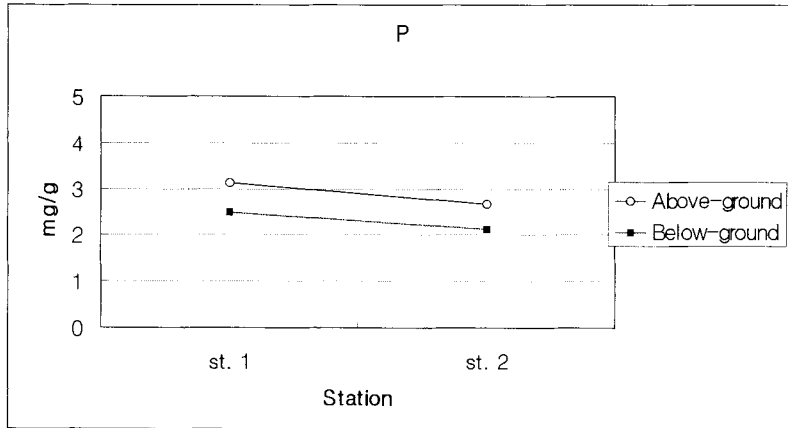
<그림 3-26> 갈대 건중량

2) 식물체내 N, P 함량

<그림 3-27>과 <그림 3-28>은 부들습지셀(셀1, 셀2, 셀3)의 유입부(st. 1)와 유출부(st. 2)에서 자라는 부들의 지상부(above-ground)와 지하부(below-ground)의 N과 P 함량을 나타낸다. 유입부에서 자라는 부들의 지상부와 지하부 평균 N함량은 각각 20.35mg/g, 17.16mg/g로 나타났으며, 유출부에서 자라는 부들의 지상부와 지하부 평균 N함량은 각각 18.01mg/g, 16.48mg/g이었다. 유입부에서 자라는 부들의 지상부와 지하부 평균 P함량은 각각 3.13mg/g, 2.48mg/g이었으며, 유출부에서 자라는 부들의 지상부와 지하부 평균 P함량은 각각 2.68mg/g, 2.13mg/g이었다.



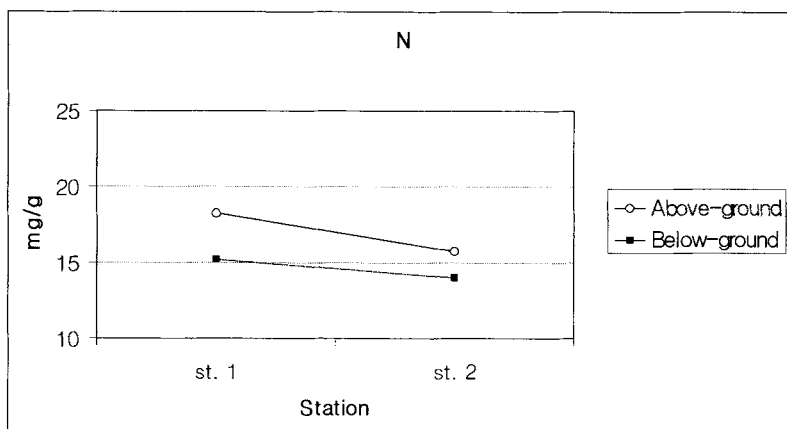
<그림 3-27> 부들의 N함량



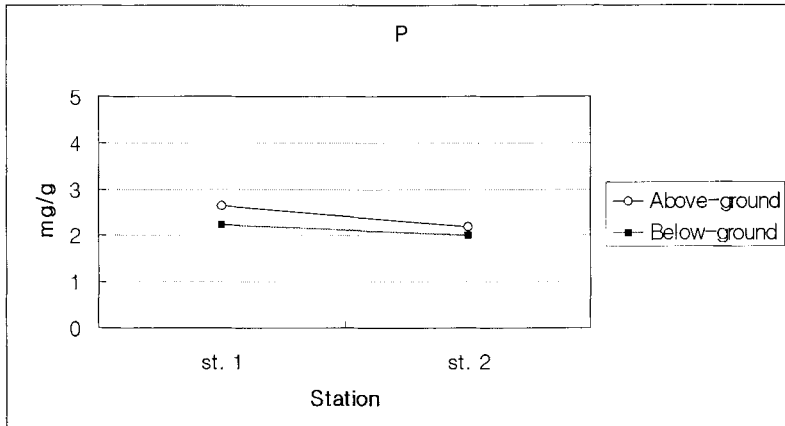
<그림 3-28> 부들의 P함량

<그림 3-29>와 <그림 3-30>은 갈대습지셀의 유입부(st. 1)와 유출부(st. 2)에서 자라는 갈대의 지상부(above-ground)와 지하부(below-ground)의 N과 P 함량을 나타낸다.

유입부에서 자라는 갈대의 지상부와 지하부 평균 N함량은 각각 18.27mg/g, 15.20mg/g로 나타났으며, 유출부에서 자라는 갈대의 지상부와 지하부 평균 N함량은 각각 15.77mg/g, 14.19mg/g이었다. 유입부에서 자라는 갈대의 지상부와 지하부 평균 P함량은 각각 2.64mg/g, 2.23mg/g이었으며, 유출부에서 자라는 갈대의 지상부와 지하부 평균 P함량은 각각 2.20mg/g, 2.05mg/g이었다.



<그림 3-29> 갈대의 N함량



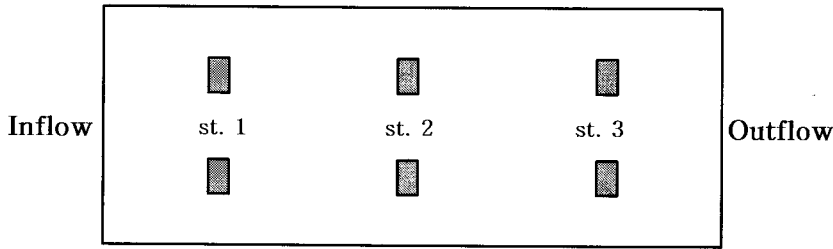
<그림 3-30> 갈대의 P함량

부들의 식물체내 N, P함량이 갈대보다 다소 높게 나타났다. 지상부의 N, P함량은 지하부 보다 많았다. 습지식물의 N, P함량은 성장기에는 지상부의 N, P함량이 높고, 비성장기에는 지하부의 N, P함량이 높아지기 때문이다.

습지 식물체내 N, P함량분석 결과, 유입부의 식물체내 N, P함량이 유출부의 식물체내 N, P함량보다 많이 검출되었다. 유입수에 함유된 N와 P가 유입부에 상대적으로 많이 침전되어 유입부쪽에서 성장하는 식물에 흡수되는 양이 많은 것으로 생각된다.

다. 습지셀 바닥 토양성분 조사

2002년 9월에 부들습지셀(셀1, 셀2, 셀3)과 갈대습지셀(셀4, 셀5, 셀6)의 바닥의 침전물-토양 성분을 분석하기 위해 각 습지셀 유입부, 중간부, 유출부의 습지바닥에서 2군데씩 샘플링하였다. 따라서 부들셀 3개와 갈대셀 3개의 유입부, 중간부, 유출부의 샘플 수는 각각 6개이며, 6개 샘플의 평균으로 나타났다. <그림 3-31>은 습지셀의 샘플 위치를 보여주는 개념도이다. <st. 1>은 습지셀 유입부이고, <st. 2>는 중간부, <st. 3>은 유출부를 나타낸다. 샘플링은 직경 10cm의 플라스틱 통을 사용하여 5cm 깊이를 채취하였고, 샘플은 건조기에서 건조시킨 후, 성분을 분석하였다.



<그림 3-31> 각 습지셀에서의 샘플채취 위치

<그림 3-32>는 부들습지셀 침전물-토양층의 총질소, 질산태질소의 평균함량을 보여준다. 부들습지 셀의 유입부, 중간부, 유출부의 평균총질소 함량은 각각 1,833mg/kg, 1,321mg/kg, 1,033mg/kg로 조사되었고, 평균 질산태질소의 함량은 각각 91.64mg/kg, 73.56mg/kg, 52.73mg/kg으로 조사되었다.

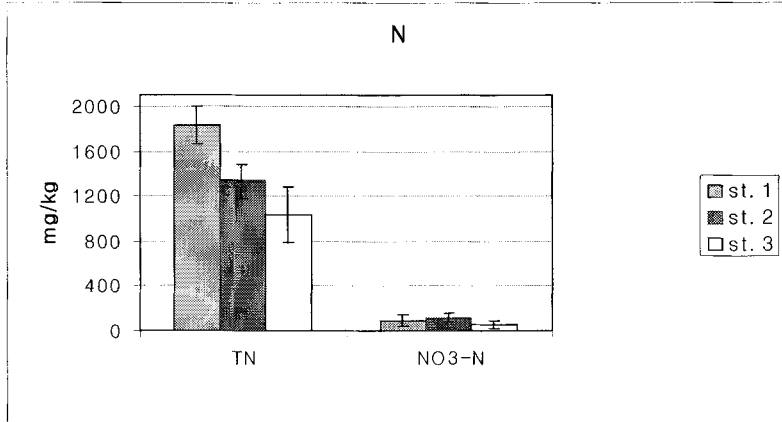
<그림 3-33>은 갈대습지셀 침전물-토양층의 총질소와 질산태질소의 평균 함량을 보여준다. 갈대습지 셀의 유입부, 중간부, 유출부의 평균 총질소 함량은 각각 1,488mg/kg, 1,023mg/kg, 744mg/kg로 조사되었고, 평균 질산태질소의 함량은 각각 57.07mg/kg, 63.92mg/kg, 38.81mg/kg으로 조사되었다.

부들습지셀과 갈대습지셀의 총질소 및 질산태질소의 함량이 많은 순서는 유입부, 중간부, 유출부 순으로 조사되었고, 함량에 상당한 차이를 보였다.

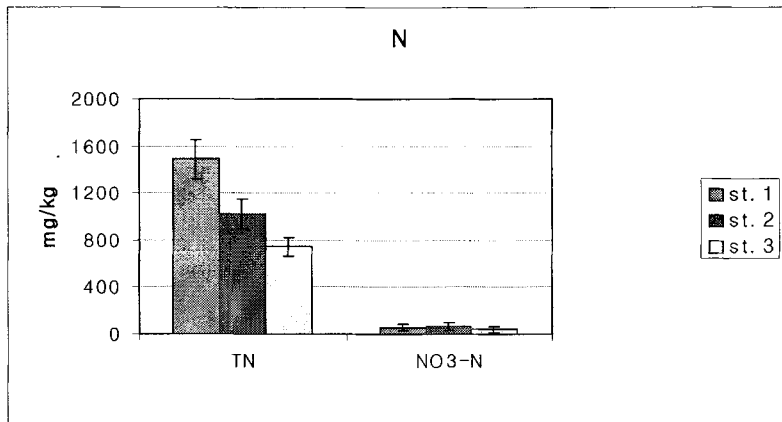
부들습지셀의 총질소와 질산태질소 함량이 갈대습지셀보다 높게 나타났다. 부들습지셀에서 부들잔재물 퇴적이 갈대습지셀의 잔재물퇴적보다 많은데 원인이 있는 것으로 생각된다. 부들습지셀의 경우 질산화로 인해 침전물-토양층의 질산태질소 함량이 갈대습지셀 보다 다소 높게 나타났다고 사료된다.

<그림 3-34>는 부들습지셀 침전물-토양층의 유효인산(available phosphorous)과 총인산(total phosphorous)의 평균 함량을 보여준다. 부들습지셀의 유입부, 중간부, 유출부의 평균 유효인산 함량은 각각 25.22mg/kg, 25.51mg/kg, 23.86mg/kg로 조사되었고, 평균 총인산함량은 각각 68.33mg/kg, 53.33mg/kg, 48.25mg/kg를 나타냈다.

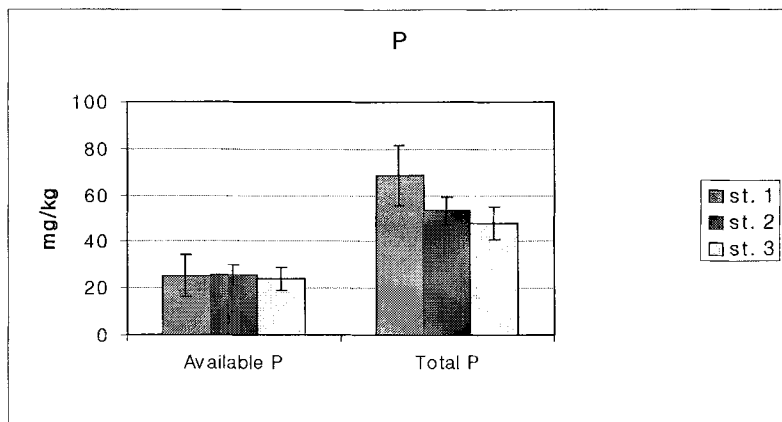
<그림 3-35>는 갈대습지셀 침전물-토양층의 유효인산과 총인산의 평균 함량을 보여준다. 갈대습지셀 침전물-토양층의 유입부, 중간부, 유출부 평균 유효인산 함량은 각각 24.90mg/kg, 25.82mg/kg, 23.32mg/kg로 조사되었고, 평균 총인산 함량은 각각 53.96 mg/kg, 49.14mg/kg, 43.21mg/kg를 나타냈다.



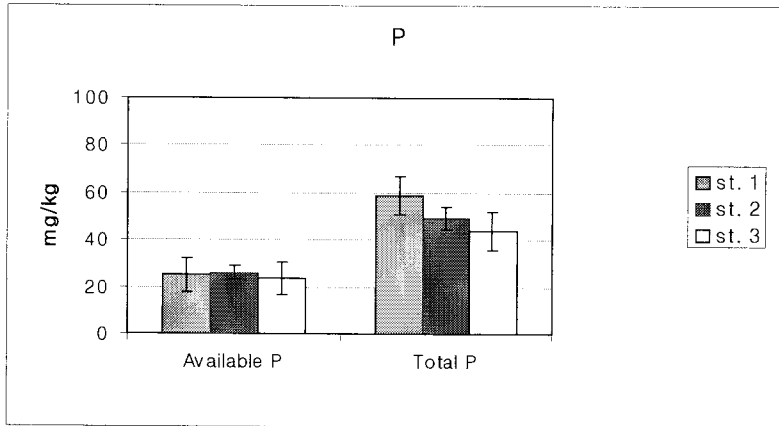
<그림 3-32> 부들습지셀의 TN, NO₃-N의 평균함량



<그림 3-33> 갈대습지셀의 TN, NO₃-N의 평균함량



<그림 3-34> 부들습지셀의 유효인산과 총인산의 평균함량

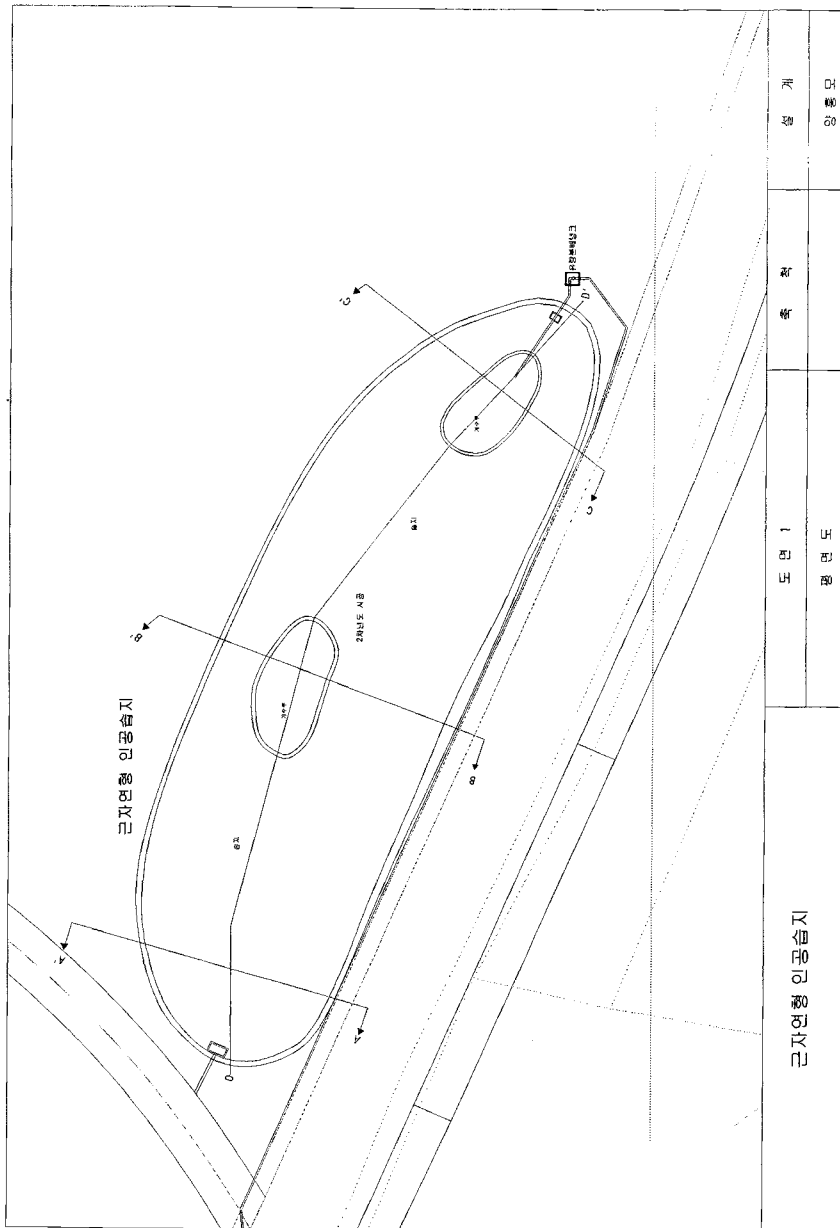


<그림 3-35> 갈대습지셀의 유효인산과 총인산의 평균함량

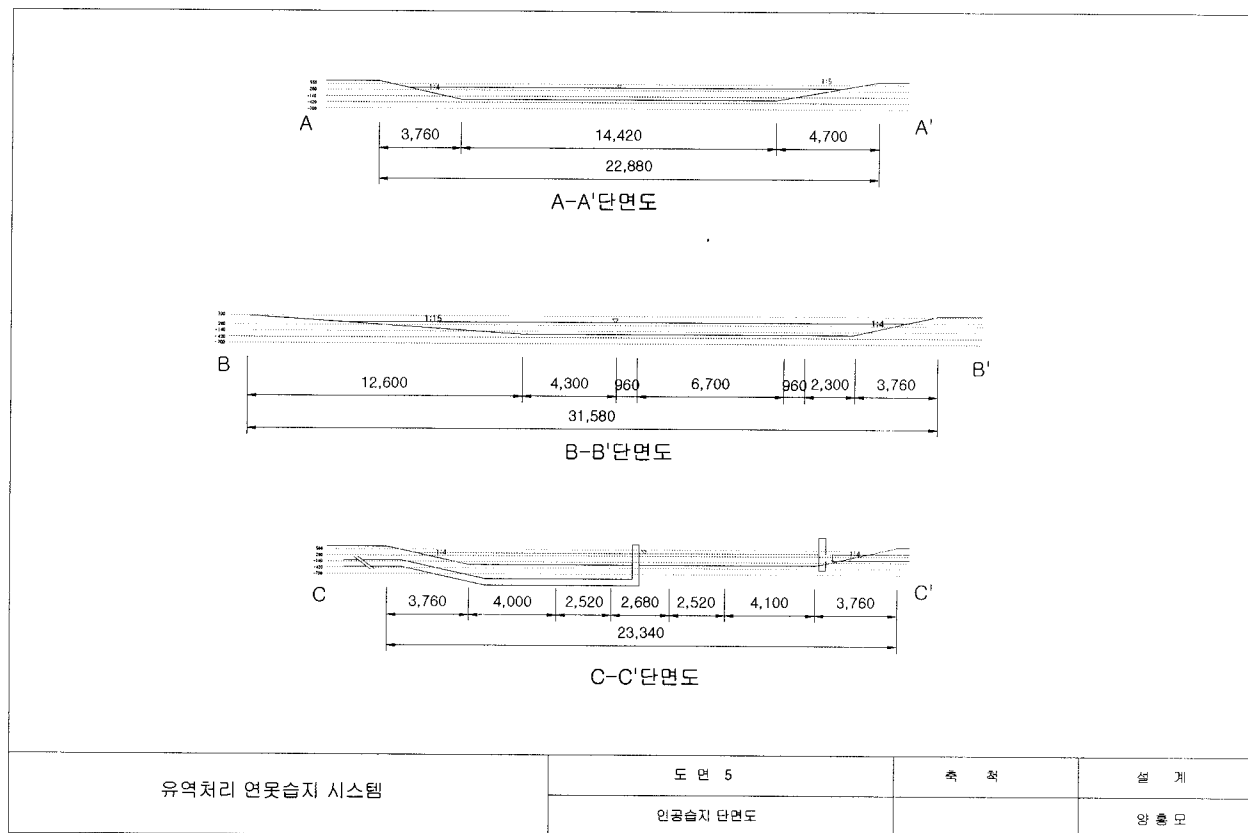
부들습지셀의 유효인산 함량과 갈대습지셀의 유효인산 함량은 비슷한 수준이나, 부들습지셀의 총인산 함량은 갈대습지셀의 총인산 함량보다 다소 많았다. 부들습지셀과 갈대습지셀 모두 유입부, 중간부, 유출부의 유효인산 함량은 거의 비슷한 수준을 보이고 있으나, 총인 함량은 유입부, 중간부, 유출부간에 차이가 있다. 총함량이 많은 순서는 유입부, 중간부, 유출부 순으로 나타났다.

제 4 절 근자연형 인공습지 시스템

<도면 3-8>는 근자연형 인공습지 시스템 평면도이며, <도면 3-9>는 단면도 이다.



<그림 3-8> 유역처리 근자연형 인공습지 시스템 평면도



<그림 3-9> 인공습지 시스템 단면도

<표 3-11>는 근자연형 인공습지의 설계인자 및 구조를 보여준다.

<표 3-11> 근자연형 인공습지 구조

	수 심 (m)	여유고 (m)	뚝높이 (m)	내경사	외경사	공극율	수표면 (m ²)	체류 시간 (일)
근자연형 인공습지	0.3	0.3	1.0	1 : 4 - 1 : 15	1:3	0.75	1,930	3.5-4.0

1. 설계인자 검토

인공습지를 조성할 경우 중요한 설계인자로 수리학적 체류시간 (hydraulic detention time), 수리학적 부하율 (hydraulic loading rate), 수심 (water depth), BOD₅ 혹은 TN 부하율 (loading rate) 등을 사용한다. 인공습지의 설계에서 인공습지의 소요면적을 결정하는 오염원은 일반적으로 TN이 된다.

연못-습지 시스템의 설계인자 검토에서 활용한 식(1), 식(2), 식(3), 식(4)의 공식 (제 3 장 설계인자 검토 참조)을 이용하여 근자연형 인공습지 설계인자를 검토하였다. 유입수 TN 농도를 6mg/l로 설정하였으며, 처리수 목표수질 TN은 2.5mg/l로 산정하였다.

<도면 3-8>에서 근자연형 인공습지 시스템의 습지 면적은 약 1,930m²이다. 공식 (1)에서 $C_e = 2.5\text{mg/l}$, $C_o = 6\text{mg/l}$, $n = 0.75$, $y = 0.3\text{m}$, $K_T = 0.2187$ 을 적용하면 처리할 수 있는 유입수는 108m³/day이며, 체류시간은 4.0day가 되고, 수리학적 부하율은 5.6cm/day가 된다. 체류시간이 다소 길게 계산되었다. 설계 TN 부하량은 약 3.41kg/ha/day가 된다.

고흥지구보다 평균기온이 다소 낮은 지역에서 운영중인 하천수를 정화하는 Olentangy River Wetlands의 경우 1ha (10,000m²)에서 1,000m³/day를 처리하고 있다. 유입수의 연평균 TN 4.5mg/l가 2.5mg/l로 처리되며, 체류시간이 1.8 - 2day, 수리학적부하율이 10cm/day이다.

유입수의 단기이동방지와 개수부의 추가적 질산화를 고려하면 근자연형 인공습지에서 약 120 - 125 m³/day를 처리할 수 있을 것으로 생각된다. 이 경우 체류시간 약 3.5 days가 되며 수리학적 부하율은 6.1cm/day가 된다. Olentangy River Wetlands의 경우 유입수의 TN이 2.5 mg/l로 처리되면 유입수의 TP는 0.09mg/l로 처리되고 있다. 본 연구의 습지에서 TN이 2.5mg/l로 처리되면 TP는 0.1mg/l 이하로 처리

될 것으로 예측된다.

2. 시스템 설계

근자연형 인공습지 시스템은 담수호 개답지역의 하단부나 담수호 유입부에 습지만을 조성하여 수질을 정화하는 모델을 연구하기 위한 시스템이다. 신양천 하천수를 집수정에서 펌핑하여 유량분배탱크로 보낸 후 유량분배탱크에서 인공습지로 자연유하되도록 설계하였다. 근자연형 인공습지는 폭 25 - 35m, 길이 90m로 습지면적이 1,930㎡된다. 제방에 면한 습지바닥의 일부를 경사를 1 : 4 - 1 : 15로 다양하게 설계하여 자연습지의 모습과 유사하게 설계하였다.

시스템은 유입부에 정수식물이 성장하지 않는 개수부(open water)를 설치하여 토사와 부유물이 침전되도록 하였다. 시스템 중앙에도 개수부를 설치하여 유입수의 단기이동을 방지하고 대기와 수면과의 접촉을 촉진하여 질산화의 효율이 높아지도록 설계하였다. 유입부는 직경 30cm 파이프를 개수부 바닥면에서 수직 0.9m 높이로 설치하여 유입수가 인공습지의 수면으로 떨어지면서 유입되도록 설계하여 폭기효과를 유도하였다. 유출부는 weir를 설치하여 수심을 0.3 - 0.6m로 조절이 가능하도록 설계하였다.

3. 시스템 모형 실험

<사진 3-41>은 근자연형 인공습지를 1 : 40 축적으로 만든 모형이며 하단 유입부의 개수부, 중앙의 개수부, 중앙좌측의 1 : 15 완경사, 중앙우측 1 : 4 경사, 상단의 유출부를 보여준다. <사진 3-42>은 유입수가 개수부로 확산되어 가는 모습을 보여준다. 유입수가 개수부에 머무르다가 이동하여 유입수에 함유된 토사와 부유물질의 일부가 개수부에 침전될 것으로 예측된다. 유입파이프 끝을 수면으로부터 약 60cm 높이로 설계하여 유입수가 확산되어 수면으로 떨어지도록 설계하였다. <사진 3-43>은 인공습지의 중앙부로 유입수가 확산이동하는 모습을 보여주며, <사진 3-44>은 유입수가 인공습지 중앙부의 습지부와 개수부를 지나는 모습을 보여준다. 유입수가 좌측보다 우측이 약간 먼저 이동하는 현상은 중앙 좌측의 완만한 경사에서 유입수가 머무르는 시간이 다소 긴 것에 원인이 있는 것으로 사료된다. <사진 3-45>는 유입수가 유출부로 이동하는 모습을 보여준다.

모형 실험결과 유입수의 단기이동현상은 발생하지 않았다. 유입부의 개수부는 토사 및 부유물질의 침전을 유도하는데 적합할 것으로 사료되며, 중앙부의 개수부도

유입수의 단기이동을 완화하는 기능을 할 수 있도록 설계에 반영하였다. 유출부의 위치를 조정하여 <사진 3-44>에서 우측의 유입수가 다소 빠르게 이동하는 현상이 완화되도록 설계하였다.



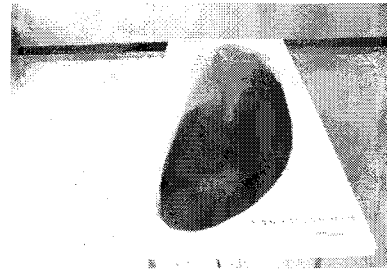
<사진 3-41> 1:40 축적의 인공습지 시스템 모형(하단: 유입파이프와 유입부 개수부, 중앙: 개수부와 경사 1:15, 1:4의 모습, 상단: 유출부)



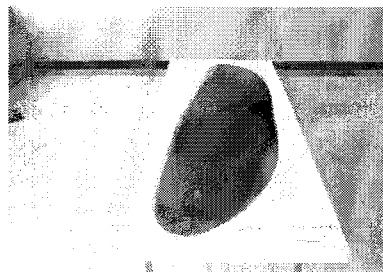
<사진 3-42> 유입파이프로 유입된 유입수가 유입부 주변 개수부로 확산해 가는 모습



<사진 3-43> 인공습지 중앙부로 유입수가 확산 되어가는 모습



<사진 3-44> 인공습지 유출부로 유입수가 이동해 가는 모습



<사진 3-45> 인공습지 유출부로 유입수가 이동하는 모습

4. 시스템 시공

가. 토공 및 배관공

아래 사진들은 근자연형 인공습지의 시공 현장 사진들이다. 2001년 4월 중순부터 근자연형 인공습지 시스템의 토공을 시작하여 6월 말 토공과 식생공을 완료하였다. 연구비 예산상 3차년도에 실시할 근자연형 인공습지 시스템의 식재공은 인공습지의 연구를 원활히 수행하기 위해 2차년도에 선 시공하였다.



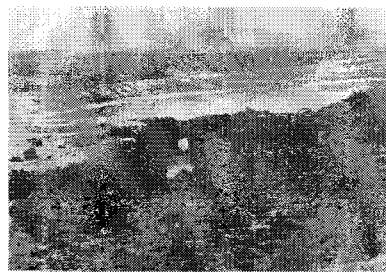
<사진 3-46> 인공습지 토공



<사진 3-47> 인공습지 토공 후 모습



<사진 3-48> 인공습지 유입부 시공



<사진 3-49> 인공습지 유출부 weir시공

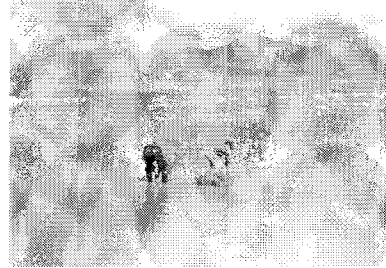
나. 식생공

1차년도(2000년) 실험결과 갈대보다 부들의 활착과 성장이 좋아 근자연형 인공습지 시스템에는 부들을 식재수종으로 선정하였다. 시스템 주변 개답지에서 자라는 부

들을 채취하여 뿌리로부터 약 35cm 높이를 절단하여 약 30cm 간격으로 식재하였다. <사진 3-50>은 자생 부들을 채취하는 모습이며, <사진 3-51>은 근자연형 인공습지에 부들을 식재하는 모습이다. <사진 3-52>는 부들을 식재한 직후의 모습이며 유입부의 개수부가 보인다.



<사진 3-50> 부들 채취



<사진 3-51> 인공습지 시스템
부들식재



<사진 3-52> 인공습지 시스템
부들식재 후 모습

다. 보완공

3차년도(2002년)에 근자연형 인공습지의 처리수가 신양천으로 방류되는 수로의 바닥에 강우로 간척지 개답지의 토사가 유입되어 처리수가 신양천으로 원활하게 배수되지 않아 근자연형 주변의 배수로 보완공을 실시하였다. 부들의 2차 성장기인 3차년도에 부들을 보강 식재를 하였다.

5. 처리수준 및 처리율

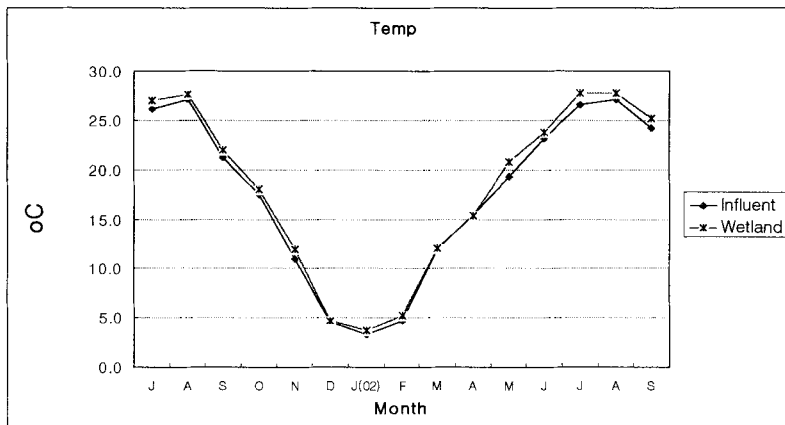
가. 처리수준

근자연형 인공습지 시스템의 수질조사는 2001년 7월부터 시작하였다. 수질분석을 위한 샘플링은 7월 - 10월에 한번 실시하였다. 수질조사기간 근자연형 인공습지에 약 120m³/day의 신양천 하천수가 유입되었으며, 근자연형인공습지의 체류시간은 약 3.5일이 된다.

<그림 3-38>, <그림 3-40>, <그림 3-41>, <그림 3-43>은 근자연형 인공습지의 유입수와 유출수의 월별평균 SS, BOD₅, TN, TP 농도를 나타낸다.

1) 수온 변화

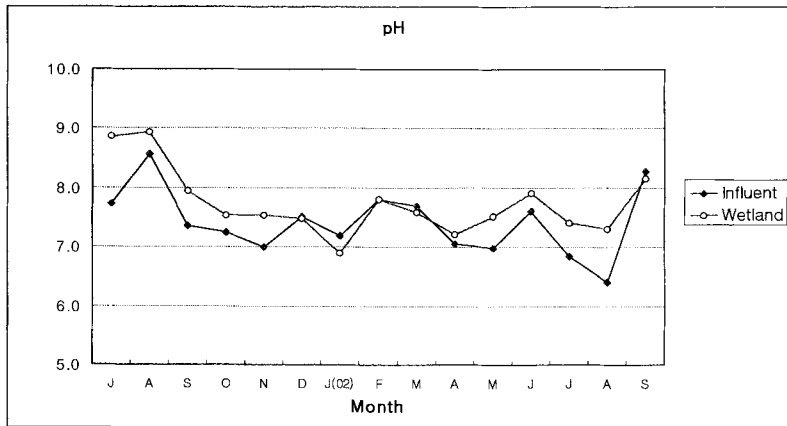
<그림 3-36>은 근자연형 인공습지의 유입수와 유출수의 월평균 수온을 나타낸다. 조사기간 중 최고수온은 8월에 27 °C였고, 최저수온은 1월에 3 °C를 나타냈다. 여름철 평균 수온은 26.4 °C였고 겨울철 평균수온은 6.8 °C였다. 조사기간 유출수의 평균 수온은 유입수의 수온보다 0.1 - 1.4 °C가 높았다. 습지의 수심이 평균 0.3m로 태양열에 의한 습지 수온상승에 원인이 있는 것으로 생각된다.



<그림 3-36> 근자연형 인공습지 월별 수온

2) pH 변화

<그림 3-37>은 근자연형 인공습지의 유입수와 유출수의 월별평균 pH를 나타낸다. 근자연형 인공습지의 유입수와 유출수의 평균 pH는 각각 7.4, 7.8로 조사되었다. <그림 3-37>에서 인공습지 유출수의 여름철(6, 7, 8월)의 pH는 8.1이고, 겨울철(11월, 12월, 1월)의 pH는 7.3으로, 여름철 pH가 겨울철 보다 높다. 이는 인공습지의 개수부와 부들이 자라는 일부지역에서 여름철에 조류(algae)가 발생하는데 원인이 있는 것으로 사료된다. 근자연형 인공습지의 시공 당해연도의 여름철 pH가 높게 나타났다. 식재한 부들이 활착단계로 부들에 의한 그늘이 충분히 제공되지 못하여 습지 내부로 햇빛이 도달하여 수심이 얇은 습지에 조류가 발생하여 나타난 일시적 현상으로 생각된다.



<그림 3-37> 근자연형 인공습지 월별 pH

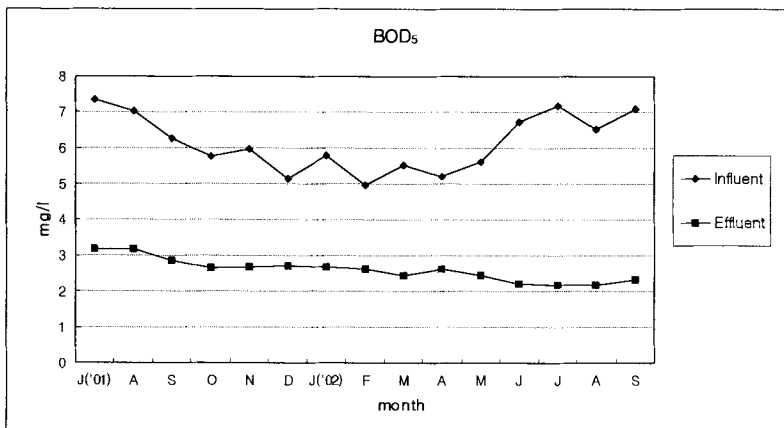
3) BOD 제거

<그림 3-38>은 근자연형 인공습지의 월별평균 BOD₅ 농도를 보여주며, <표 3-12>는 근자연형 인공습지의 BOD₅ 처리수준과 처리율을 나타낸다. 조사기간 유입수의 평균 BOD₅ 농도는 6.14mg/l 이었으며, 유출수의 평균 BOD₅ 농도는 2.70mg/l 로 평균 56%의 처리율을 보였다.

근자연형 인공습지의 BOD₅ 처리율이 연못-습지 시스템의 부들흡지셀(셀1, 셀2, 셀3) BOD₅ 처리율보다는 약간 낮게 나타났다. 이는 근자연형 인공습지에 식재한 부

들이 2001년 겨울철을 지나 2002년 봄부터 성장기 1회를 거쳐 충분히 자라지 못하여 수질정화에 적합한 생태에 이르지 못한데 원인이 있는 것으로 생각된다. 연못-습지 시스템의 부들은 성장기 2회를 거쳐 수질정화에 어느 정도 적합한 조건에 이른 상태였다.

2002년 5월부터 2002년 9월 사이 부들이 자라고 있을 때 BOD₅ 처리효율은 65%를 보여 양호한 편이었다. 습지에서 BOD₅는 주로 수중의 습지식물 줄기나 잎, 습지바닥의 잔재물에 호기성 미생물이 부착되어 형성된 얇은 미생물막(microbial film)과 유기물이 반응하여 제거된다. 부들이 충분히 성장하고, 습지바닥의 토양-잔재물 층이 수질정화에 양호한 조건에 도달하면 BOD₅ 처리효율이 다소 높아질 것으로 생각된다.

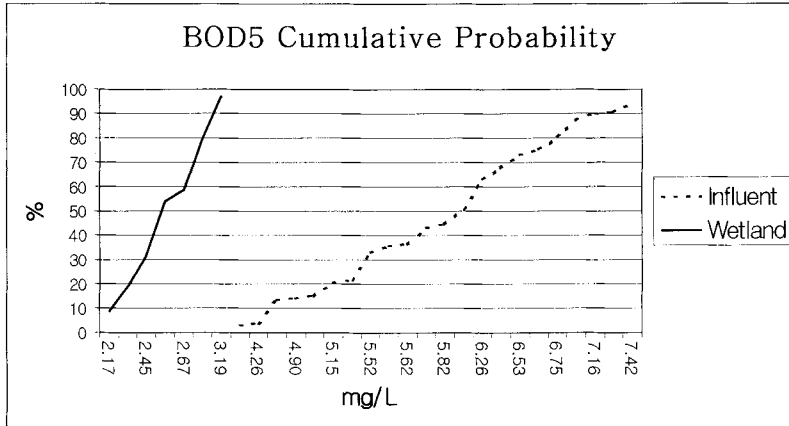


<그림 3-38> 근자연형 인공습지 BOD₅ 처리수준

<표 3-12> 근자연형 인공습지 BOD₅ 처리율

	BOD ₅ (mg/l)	BOD ₅ 처리율 (%)
유입수	6.14	-
유출수	2.70	56

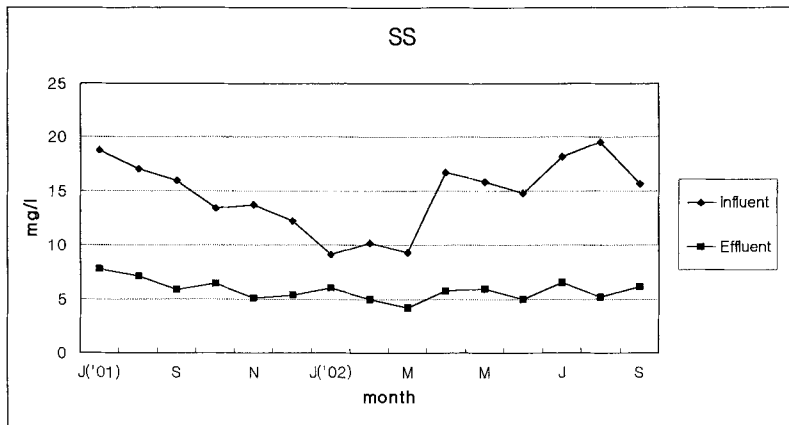
<그림 3-39>는 유입수와 근자연형 인공습지 처리수의 BOD₅ 농도에 대한 누적확률을 보여준다. 조사기간동안 유입수의 BOD₅ 농도는 4.15 - 7.42 mg/l의 범위를 나타냈다. 근자연형 인공습지 유출수의 BOD₅ 농도는 각각 2.17-3.19 mg/l의 범위를 나타냈다.



<그림 3-39> 유입수와 근자연형 인공습지 처리수의 BOD₅ 농도 누적확률

4) SS 제거

<그림 3-40>은 근자연형 인공습지의 월별평균 SS 농도를 보여주며, <표 3-13>는 근자연형 인공습지의 SS 처리수준과 처리율을 보여준다. 조사기간 유입수의 평균 SS 농도는 14.71mg/l 이었으며, 유출수의 평균 SS 농도는 5.74mg/l 로 평균 61%의 처리율을 보였다. 겨울철의 유입수 SS농도는 여름철의 유입수 SS 농도보다 낮다. 여름철의 SS 제거율이 겨울철 보다 다소 높게 나타났다. 이는 유입수 SS농도가 높고 인공습지에 부들이 자라 수중의 부들 줄기와 잎에 의한 저항으로 부유물의 침전이 높아진데 원인이 있는 것으로 생각된다. 강우시에는 인공습지의 제방에서 빗물과 함께 진흙이 유입되어 SS 처리율이 다소 낮은 경향을 보였다.



<그림 3-40> 근자연형 인공습지 SS 처리수준

<표 3-13> 근자연형 인공습지 SS 처리율

	SS (mg/ℓ)	SS 처리율 (%)
유입수	14.71	-
유출수	5.74	61

5) TN 제거

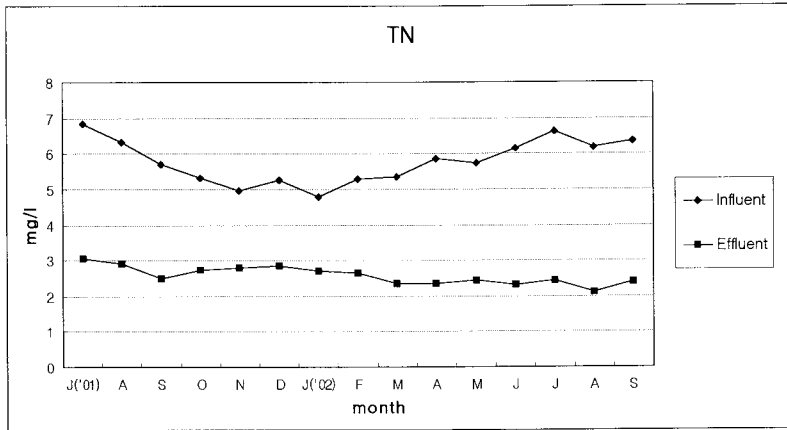
<그림 3-41>은 근자연형 인공습지의 월별평균 TN 농도를 보여주며, <표 3-14>는 근자연형 인공습지의 TN 처리수준과 처리율을 보여준다. 조사기간 유입수의 평균 TN 농도는 5.78mg/ℓ 이었으며, 유출수의 평균 TN 농도는 2.43mg/ℓ 로 평균 57%의 처리율을 보였다.

근자연형 인공습지의 TN 처리율이 연못-습지 시스템의 부들셀 TN 처리율보다는 약간 낮게 나타났다. 이는 근자연형 인공습지에 식재한 부들이 2001년 겨울철을 지나 2002년 봄부터 성장기 1회를 거쳐 부들이 충분히 자라지 못하여 TN제거에 중요한 근권의 발달이 늦고, 습지바닥의 토양-잔재물층이 충분히 형성되지 못한데 원인이 있는 것으로 생각된다. 연못-습지 시스템의 부들은 성장기 2회를 거쳐 수질정화에 어느 정도 적합한 상태였다.

<그림 3-41>에서 습지셀의 겨울철 TN 처리수준이 낮은 경향을 보이고 있다. 이는 겨울철 습지수온의 저하로 습지내 미생물의 질산화와 탈질화 활동 저하에 원인이 있는 것으로 사료된다. <그림 3-36>에서 근자연형 인공습지의 방류수 수온은 겨울철에 낮은 분포를 보이고 있다. 근자연형 인공습지의 연간 평균 TN 처리율이 낮은 원인도 겨울철 수온저하로 인한 TN 처리율 감소에 원인이 있는 것으로 사료된다.

2002년 5월부터 2002년 9월 사이 부들이 자라고 있을 때 TN 처리효율은 62%를 보여 비교적 양호한 편이었다.

근자연형 인공습지의 부들이 성장하여 근권이 발달하고, 습지바닥에 잔재물이 쌓여 탈질화에 필요한 탄소공급원 역할을 하면 TN 제거율이 높아질 것으로 생각된다.

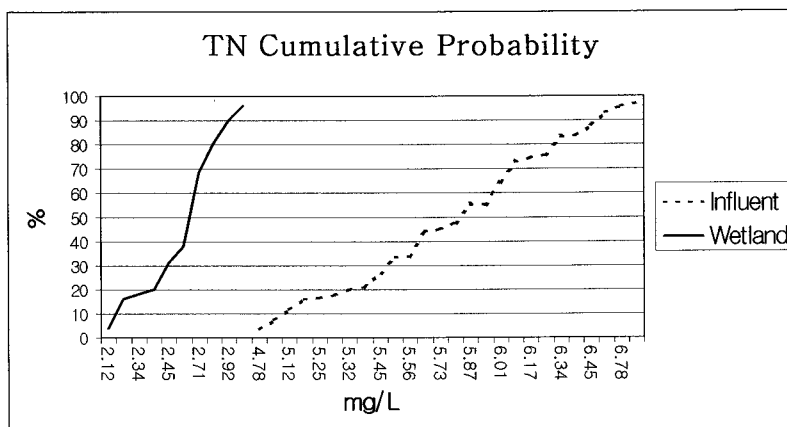


<그림 3-41> 근자연형 인공습지 TN 처리수준

<표 3-14> 근자연형 인공습지 TN 처리율

	TN (mg/l)	TN 처리율 (%)
유입수	5.78	-
유출수	2.43	57

<그림 3-42>는 유입수와 근자연형 인공습지 처리수의 TN 농도에 대한 누적확률을 보여준다. 조사기간동안 유입수의 TN 농도는 4.78 - 6.85mg/l의 범위를 나타냈다. 근자연형 인공습지 유출수의 TN 농도는 2.17 - 3.05mg/l의 범위를 나타냈다.

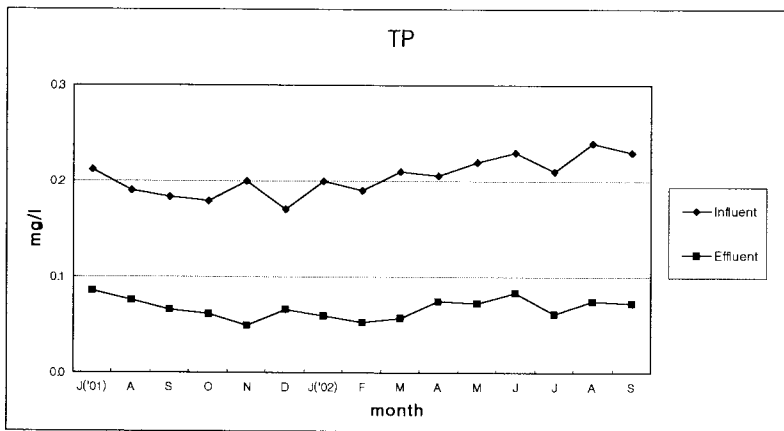


<그림 3-42> 유입수와 근자연형 인공습지 처리수의 TN 농도 누적확률

6) TP 제거

<그림 3-43>은 근자연형 인공습지의 월별평균 TP 농도를 보여주며, <표 3-15>은 근자연형 인공습지의 TP 처리수준과 처리율을 보여준다. 조사기간 유입수의 평균 TP 농도는 2.05mg/l 이었으며, 유출수의 평균 TP 농도는 0.820mg/l로 평균 60%의 처리율을 보였다.

<그림 3-43>에서 겨울철의 TP 처리수준이 다소 높게 나타나고 있다. 이는 겨울철에 강우가 적어 습지내부의 교란이 상대적으로 적어 인의 침강이 유리한 조건인데 원인이 있는 것으로 생각된다.



<그림 3-43> 근자연형 인공습지 TP 처리수준

<표 3-15> 근자연형 인공습지 TP 처리율

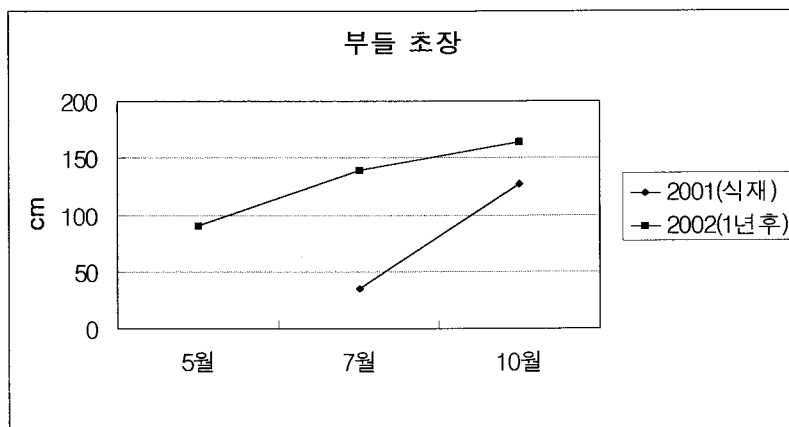
	TP (mg/l)	TP 처리율 (%)
유입수	2.05	-
유출수	0.820	60

6. 식물성장 및 토양분석

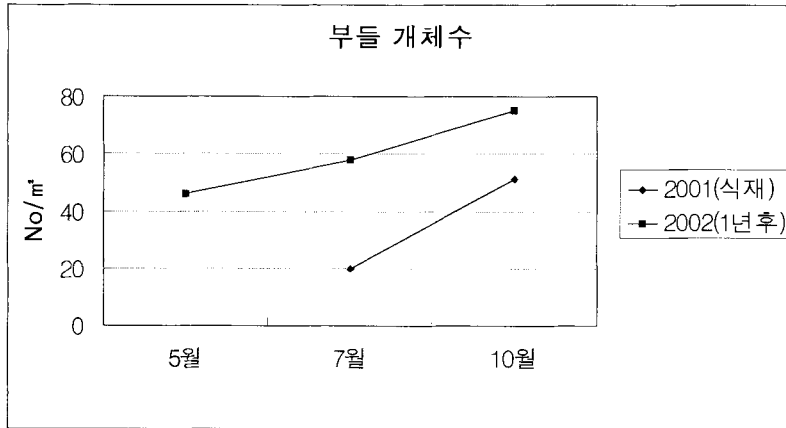
가. 식물성장

2차년도(2001년)에 시스템 주변에서 자생하는 부들(*Typha angustifolia*)을 채취하여 뿌리에서 약 35cm 높이를 절단하여 30cm 간격으로 식재하였다. 근자연형 인공습지의 식물성장 조사는 1m × 1m 격자틀을 이용하여 발생 본수와 초장(草長)을 측정하였다. 초장과 본수의 조사는 근자연형 인공습지의 유입부, 중앙부, 유출부에서 각각 3군데씩 조사하여 총 9개 지점을 조사하였다. 초장은 1m × 1m 격자틀 내에 10개체를 측정하여 평균초장으로 나타냈고, 본수는 격자틀 내의 줄기를 모두 조사하여 평균값으로 나타내었다.

<그림 3-44>, <그림 3-45>는 부들의 초장과 개체수의 변화를 보여준다. 2001년 식재 직후 평균 초장 35cm가 2001년 10월에는 127cm로 성장하였으며, 평균 개체수는 식재 직후 20개에서 2001년 10월에는 51.4개로 증가하였다. 식재 때의 줄기와 새로 나온 줄기는 2001년 겨울에 죽고, 이듬해인 2002년 4월 초순부터 다시 새줄기가 나오기 시작하였다. 2차년도인 2002년 5월 초순, 7월 초순, 10월 중순의 평균초장은 각각 90.6cm, 139.4cm, 163.7cm로 조사되었으며, 1㎡당 개체수는 각각 46.1개, 57.9개, 75.1개였다. 성장조사결과 부들의 초기성장이 양호하였고, 식재후 이듬해에 높은 상대 성장률을 보였다. <사진 3-53>는 2002년 여름의 근자연형 인공습지의 부들 성장 모습을 보여준다. <사진 3-54>는 근자연형 인공습지의 겨울 전경이다.



<그림 3-44> 년도별 평균 부들 신장



<그림 3-45> 년도별 평균 부들 개체수



<사진 3-53> 근자연형 인공습지
여름 전경

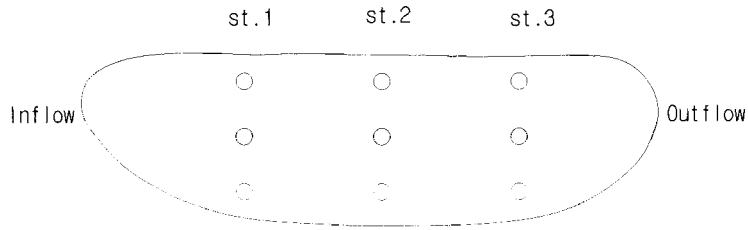


<사진 3-54> 근자연형 인공습지
겨울 전경

나. 식물 건중량 및 N, P 함량

2002년 9월 근자연형 인공습지의 식물체 건중량 및 식물체내 N, P 함량을 분석하기 위해 근자연형 인공습지의 유입부, 중간부, 유출부에서 각각 3지점씩 0.5m × 0.5m내에 있는 부들의 지상부와 지하부를 모두 채취하였다. <그림 3-46>은 샘플채취 위치를 나타낸다. <st. 1>은 유입부이고, <st. 2>는 중간부, <st. 3>은 유출부이다. 건중량 및 식물체 N, P 함량은 유입부, 중간부, 유출부에서 채취한 샘플 3개의 평균값으로 나타났다.

채취한 식물체는 건조기로 건조한 후, 지상부와 지하부로 분류하여 건중량을 측정하였고, 식물체내 N, P함량을 분석하였다.

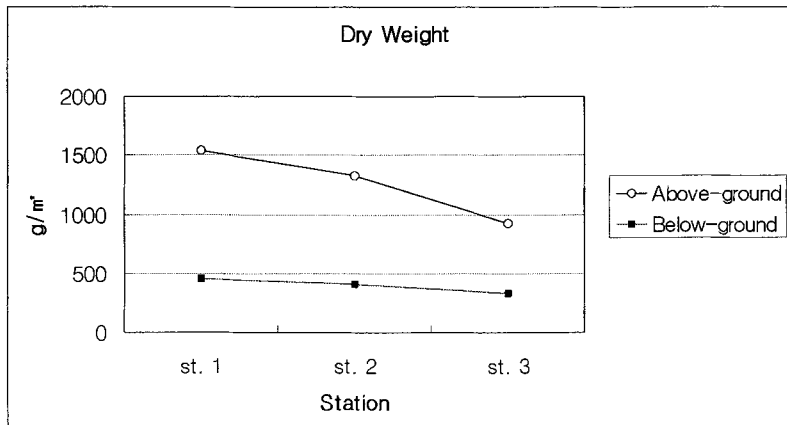


<그림 3-46> 근자연형 인공습지 샘플채취 위치

1) 건중량

<그림 3-47>은 근자연형 인공습지에서 성장하고 있는 부들의 지상부(above-ground)와 지하부(below-ground) 건중량을 나타낸다. 근자연형 인공습지의 유입부, 중간부, 유출부에서 자라는 부들의 지상부 평균건중량은 각각 1,537g/m², 1,323g/m², 926g/m²이었으며, 지하부 평균건중량은 각각 457g/m², 410g/m², 326g/m²으로 조사되었다.

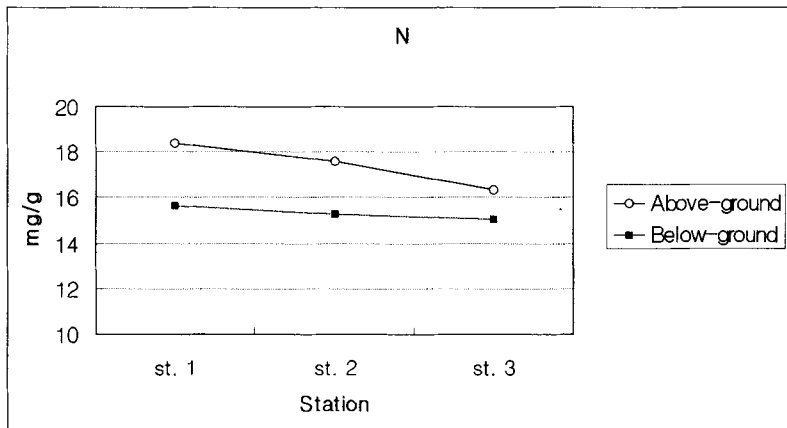
근자연형 인공습지의 유입부, 중간부, 유출부에서 채취한 부들의 지상부와 지하부를 합한 총평균건중량은 각각 1,994g/m², 1,733g/m², 1,252g/m² 이었다. 지상부 및 지하부 건중량이 많은 순서는 유입부, 중간부, 유출부 순이다. 유입부의 부들성장이 유출부 보다 양호함을 알 수 있다. 이는 유입수에 함유된 영양염류가 유입부쪽에 상대적으로 많이 침전되어 유입부쪽에서 성장하는 부들에 흡수하는 양분이 많은데 원인이 있는 것으로 사료된다.



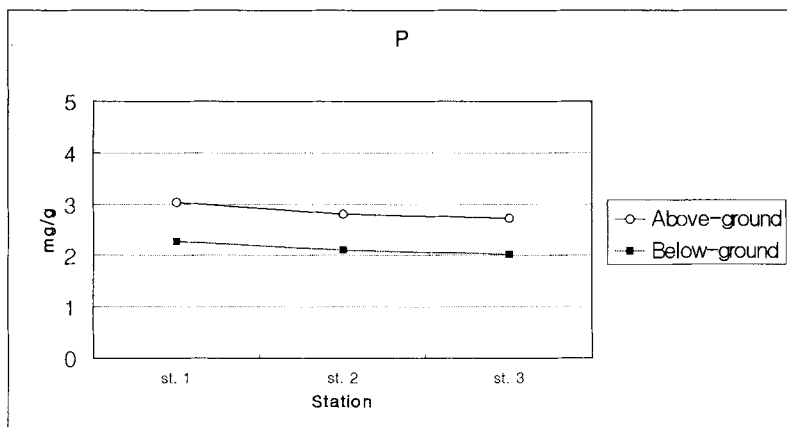
<그림 3-47> 근자연형 인공습지 부들 건중량

2) 식물체내 N, P 함량

<그림 3-48>과 <그림 3-49>은 근자연형 인공습지에서 상장하는 부들의 지상부(above-ground)와 지하부(below-ground)의 N과 P 함량을 나타낸다. 유입부, 중간부, 유출부에서 자라는 부들의 지상부 평균 N함량은 각각 18.40mg/g, 17.60mg/g, 16.35mg/g이었고, 지하부 평균 N함량은 각각 15.64mg/g, 15.30mg/g, 15.06mg/g이었다. 유입부, 중간부, 유출부에서 자라는 부들의 지상부 P함량은 각각 3.04mg/g, 2.80mg/g, 2.72mg/g 이며, 지하부 P함량은 각각 2.28mg/g, 2.12mg/g, 2.03mg/g로 조사되었다.



<그림 3-48> 부들 식물체내 N함량



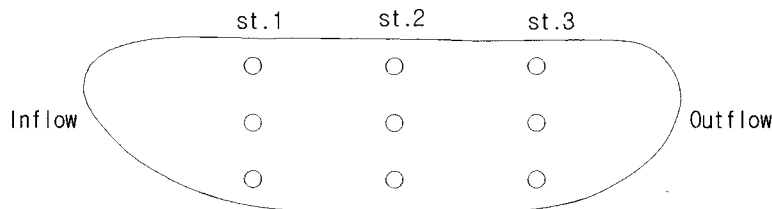
<그림 3-49> 부들 식물체내 P함량

유입부에서 자라는 부들의 N, P함량이 유출부에서 자라는 부들 보다 많이 검출되었다. 이는 유입수에 함유된 N와 P가 유입부 식물들로부터 흡수되어 유출부로 갈수록 수층의 N과 P의 양이 줄어들고 있음을 나타낸다. 부들의 N, P함량은 지상부가 지하부보다 높다. 습지식물의 N, P함량은 성장기에는 지상부의 N, P함량이 많고, 비성장기에는 지하부의 N, P함량이 많아지기 때문이다.

다. 습지바닥 토양성분

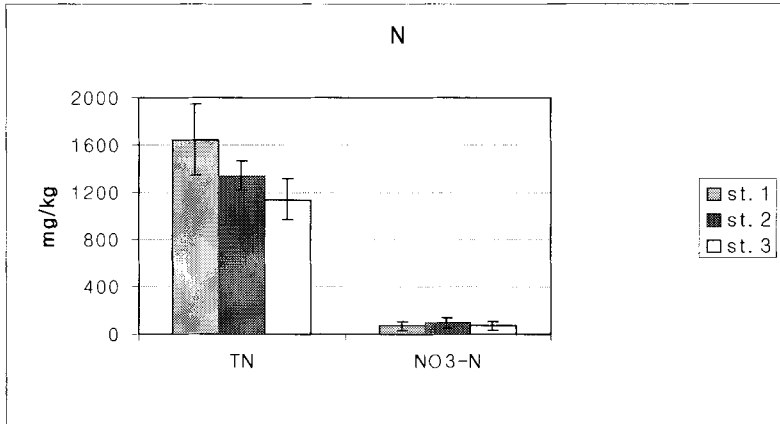
2002년 9월 말에 근자연형 인공습지의 바닥의 침전물-토양 성분을 분석하기 위해 유입부, 중간부, 유출부의 습지바닥에서 각각 3군데씩 샘플링하였다. 샘플링은 직경 10cm 플라스틱 통을 사용하여 5cm 깊이를 채취하였다. 유입부, 중간부, 유출부의 3개 샘플의 성분을 평균하여 나타냈다.

<그림 3-50>은 근자연형 인공습지에서 습지바닥 샘플의 위치를 보여준다. <st. 1>은 유입부이고, <st. 2>는 중간부, <st. 3>은 유출부를 나타낸다. 샘플 토양은 건조기에서 건조시킨 후, 성분을 분석하였다.



<그림 3-50> 인공습지 토양 샘플채취 위치 개념도

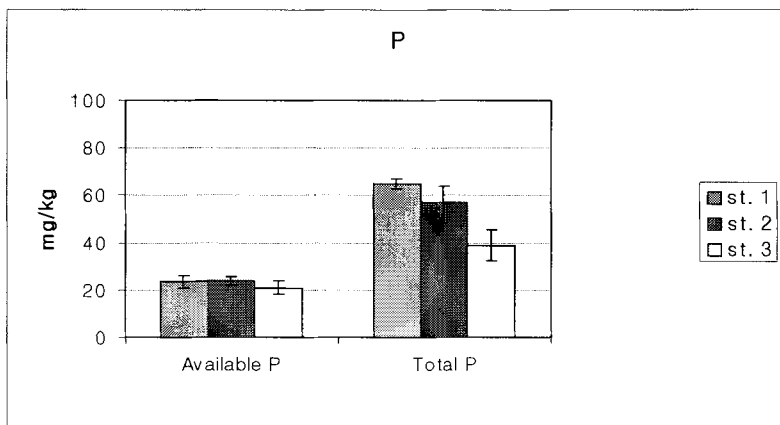
<그림 3-51>은 근자연형 인공습지의 유입부, 중간부, 유출부의 총질소와 질산태 질소의 평균함량을 보여준다. 근자연형 인공습지의 유입부, 중간부, 유출부의 평균 총질소 함량은 각각 1,645mg/kg, 1,342mg/kg, 1,140mg/kg로 조사되었고, 평균 질산태 질소의 함량은 각각 68.49mg/kg, 95.88mg/kg, 68.49mg/kg으로 조사되었다.



<그림 3-51> 근자연형 인공습지 TN, NO₃-N의 평균함량

평균 총질소함량은 유입부가 높고 유출부로 갈수록 낮아진다. 유입부의 부들이 유출부보다 생육이 양호하여 유입부의 부들 잔재물 퇴적량이 유출부보다 상대적으로 많고, 유입수에 함유된 질소가 유입부에 더 많이 침전된 것으로 사료된다. 질산성질소의 함량은 낮은 수준이며 유입부, 중간부, 유출부간의 함량 차이가 거의 없다.

<그림 3-52>는 근자연형 인공습지의 유입부, 중간부, 유출부의 유효인산(available phosphorous)과 총인산((total phosphorous)의 평균 함량을 보여준다. 유입부, 중간부, 유출부의 평균 유효인산 함량은 각각 23.56mg/kg, 23.93mg/kg, 21.18mg/kg로 조사되었고, 평균 총인산 함량은 각각 65.06mg/kg, 57.21mg/kg, 39.72mg/kg를 나타냈다.



<그림 3-52> 근자연형 인공습지의 유효인산과 총인산의 평균함량

총인산 함량은 유입부가 높고 유출부로 갈수록 낮아진다. 유입수에 함유된 총인산이 유입부에서 상당부분 침전되고 있음을 알 수 있다. 유효인산의 함량은 유입부, 중간부, 유출부에 차이가 거의 없다.

제 5 절 모델 개발

1. 연못-습지 시스템 모델 개발

가. 모델의 개념

수질정화 연못-습지 시스템은 연못시스템의 장점과 인공습지의 장점을 결합한 모델이다. 북미에서는 1차처리수준으로 처리된 생활하수를 연못시스템에서 2차처리수준으로 정화한 후 연못시스템의 방류수를 인공습지에 유입시켜 3차처리수준으로 정화하는 연못-습지 시스템을 활용하고 있다. 북미에서 활용하는 연못-습지 시스템은 유입수의 BOD와 TN이 고농도인 하수를 처리하는 시스템이다. 본 연구를 통하여 개발한 연못-습지 시스템은 BOD, TN이 저농도인 오염하천수나 강우유출수를 정화하는 연못-습지 시스템이다.

연못-습지 시스템 모델의 흐름은 유입수가 연못시스템으로 유입된 후 연못시스템의 처리수가 인공습지로 유입된다. 하천으로부터 오염하천수 혹은 강우유출수를 펌핑하여 연못-습지 시스템으로 유입시킬 수 있으며, 자연유하로 오염하천수 혹은 강우유출수가 연못-습지 시스템에 유입될 수 있다. 자연유하의 경우 유입수에 함유되어 있는 직경이 큰 고형물 혹은 부유물(floating materials)은 연못시스템에 유입되기 전 여과장치(screen chamber)를 통하여 제거한다. 연못으로 유입된 부유물은 바람에 의해 제방 한쪽으로 모이면 제거할 수 있는 부유물 제거 램프(scum ramp)를 연못제방에 설치한다.

1) 연못의 기능

연못-습지 시스템의 연못은 유입수에 함유되어 있는 부유고형물(SS)과 토사를 침전시키는 기능과 오염물질을 정화하는 기능을 한다. 연못은 유입수의 BOD, SS,

TN, TP의 일부를 제거하는 역할을 하도록 조건성 연못(facultative pond)으로 설계한다. 조건성 연못은 오염물질의 유입이 적어지면 호기성 마무리 연못(polishing pond)의 역할을 하게 된다. 연못의 수질정화 과정에서 발생한 조류(algae)는 연못바닥으로 침전하여 제거되거나 연못의 방류수에 함유되게 된다. 방류수에 함유된 조류는 인공습지에서 제거된다.

2) 습지의 기능

인공습지는 연못에서 처리되지 못하고 연못의 방류수에 함유되어 있는 오염물질(BOD, SS, TN, TP)과 방류수에 함유되어 있는 조류(algae)를 제거하는 역할을 한다. 오염하천수나 강우유출수를 정화하는 경우 연못시스템에서 처리된 방류수는 오염물질이 상대적으로 저농도여서 인공습지는 주로 TN, TP를 제거하는 역할을 하며, 인공습지 설계에서 TN제거 모형을 활용한다.

나. 연못-습지 시스템 모델 설계인자 검토

본 연구에서 설계·시공하여 모니터링한 연못-습지 시스템은 2개의 연못과 6개의 습지 셀로 구성하였다. 부들습지셀과 갈대습지셀은 각각 3개의 습지셀을 병렬로 연결하였다.

<표 3-16>은 본 연구에서 설계·시공하여 수질을 분석한 연못-습지 시스템의 처리수준을 나타낸다. 연못-습지 시스템의 부들습지셀까지의 BOD₅, SS, TN, TP 처리율은 각각 56%, 63%, 58%, 59%였으며, 갈대습지셀까지의 BOD₅, SS, TN, TP 처리율은 각각 58%, 65%, 57%, 57%였다.

1차연못에서 BOD₅, SS, TN, TP가 각각 24%, 29%, 20%, 23%가 처리되었으며, 2차연못에서 각각 13%, 19%, 14%, 15% 처리되어, 1차연못과 2차연못을 직렬로 구성한 연못시스템에서 BOD₅, SS, TN, TP 각각 34%, 43%, 31%, 35%가 처리되었다. 1차연못의 BOD₅, SS, TN, TP 처리율이 2차연못 보다 월등히 높다.

부들습지셀에서 BOD₅, SS, TN, TP가 각각 34%, 35%, 39%, 37%가 처리되었으며, 갈대습지 셀에서 BOD₅, SS, TN, TP가 각각 36%, 39%, 38%, 34%가 처리되었다.

<표 3-17>은 본 연구에서 설계·시공한 연못-습지 시스템을 구성하는 연못과 습지셀의 모니터링을 통하여 추출한 설계인자 및 설계인자 값이다. 연못-습지 시스템의 모니터링 기간 평균 유입유량은 약 122m³/day이었으며, 1차연못과 2차연못의 체

류기간은 각각 약 1일이었다. 모니터링 기간 습지셀의 평균유입유량은 약 20m³/day로 습지셀의 체류시간은 약 1.5일이었으며, 수리학적 부하율은 0.12m/day이었다.

아래 식 (1)은 TN 제거를 위한 인공습지의 소요면적을 산출할 때 활용하는 공식이다. 식 (2)는 TN 정화에 영향을 미치는 여러 작용을 하나의 포괄적 작용(dump)으로 나타낸 식으로, K_T는 TN 제거 반응을 상수이며 온도에 영향을 받는다. 식 (3)은 인공습지의 체류시간을 산출하는 공식이며, 식 (4)는 수리학적 부하율을 산출하는 공식이다. 이들 공식은 습지를 설계할 때 소요면적과 체류시간을 예측하고 검토하기 위해 활용하는 공식이다.

$$A_s = (Q) \ln(C_o/C_e) / (K_T)(y)(n) \text{ -----(1)}$$

$$K_T = 0.2187(1.048)^{(T-20)} \text{ -----(2)}$$

$$h = A_s(y)(n) / Q \text{ -----(3)}$$

$$q = Q / A_s \text{ -----(4)}$$

C_e = 유출수 TN (mg/ℓ), C_o = 유입수 TN (mg/ℓ)

A_s = 인공습지 면적(m²), n = 시스템 공극율

h = 수리학적 체류시간(day), y = 수심(m)

Q = 평균 유입유량(m³/d), K_T = 반응율 상수

q = 수리학적 부하율 (m/day),

본 연구 연못-습지 시스템 모니터링 기간 부들습지셀과 갈대습지셀의 유입수 TN 평균농도는 3.98mg/ℓ 이었으며, 부들습지셀과 갈대습지셀의 처리수 평균TN 농도는 각각 2.41mg/ℓ, 2.47mg/ℓ 이었다.

운영기간의 습지셀 면적 135m², 수심 0.3, 공극률 0.75를 공식 (1)에 적용하여 부들습지셀과 갈대습지셀의 TN 반응율 상수 K_T를 구하면 각각 0.3330, 0.31411이 된다. 실험 연못-습지 시스템의 습지셀을 설계할 때 소요면적 산출에서 사용하였던 K_T 값 0.2187보다 다소 높은 수치이다. 이는 공식(2)가 본 연구 습지셀 보다 유입수의 TN농도가 높고 기온이 온난한 북미지역에 조성된 인공습지의 TN처리수준을 기초로 작성된 데 원인이 있는 것으로 생각된다. 부들습지셀과 갈대습지셀의 TN 부하율은 약 5.89kg/ha/day였다.

<표 3-16> 실험 연못-습지 시스템의 처리율

	BOD (mg/l)	BOD ₅ 처리율 (%)		SS (mg/l)	SS 처리율 (%)		TN (mg/l)	TN 처리율 (%)		TP (mg/l)	TP 처리율 (%)	
		전체	부분		전체	부분		전체	부분		전체	부분
유입수	6.01	-	-	15.43	-	-	5.80	-	-	0.198	-	-
1차 연못	4.57	24	24	10.96	29	29	4.64	20	20	0.152	23	23
2차 연못	3.98	34	13	8.79	43	19	3.98	31	14	0.129	35	15
부들 습지셀	2.62	56	34	5.71	63	35	2.40	58	39	0.081	59	37
갈대 습지셀	2.54	58	36	5.40	65	39	2.47	57	38	0.085	57	34

<표 3-17> 실험 연못-습지 구조, 운영 유입유량 및 체류시간

	수심 (m)	여유 고 (m)	침전 퇴적 (m)	뚝 높이 (m)	내경 사	외경 사	수표 면 (m ²)	유입 유량 (m ³ /일)	체류 시간 (일)	BOD 부하율 (kg/ha/ day)	수리학 적부하 율 (m/day)
1차연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1 : 2.5	1 : 2.5	14× 14	122	1.0	37.4	
2차연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1 : 2.5	1 : 2.5	14× 14	121	1.0	-	
습지셀 (1개)	0.3 - 0.4	0.3	-	1.0	1 : 2	1 : 2	5.5× 24.5 (135)	20	1.5	-	0.12

다. 연못-습지 시스템 모델

1차연못과 2차연못의 운영을 시작하여 2년이 경과한 후 연못바닥을 조사한 결과 1차연못의 바닥에는 약 2cm 정도의 슬러지층이 형성되어 있었으며, 2차연못의 바닥에도 얇은 슬러지층이 형성되어 있었다. 수심별 DO조사에서 1차연못과 2차연못의 상층은 호기상태였고, 바닥층은 혐기상태를 보여 조건성연못의 특성을 나타냈다.

수질정화 연못을 설계할 때 고려하는 중요한 인자는 수심, 체류시간, 단위면적당 오염부하율이다. 조건성연못은 수심이 2.0 - 2.4m일 때 수질정화에 최적으로 알려져 있으며, 미국 EPA에서도 수심 2.0 - 2.4m를 권장하고 있다. 수심이 너무 얇으면 바람에 의해 연못바닥의 침전물이 부상하여 방류수의 수질이 나빠질 수 있으며, 수심이 너무 깊으면 연못바닥의 수온이 내려가 연못바닥에서 일어나는 수질정화에 중요한 기작인 메탄발효의 효율이 떨어지기 때문이다. 국내의 축산폐수정화 연못시스템 연구에서도 연못수심의 설계인자 값으로 2.4m를 제시하고 있다(양홍모, 1995).

연못-습지 시스템 모니터링결과 하천수를 정화하는 연못시스템의 전체 체류시간은 약 2일이 적정수준으로 나타났다. 일반적으로 수질분석에서 SS는 1.2 μ m의 여지를 통과하지 못한 고형물을 기준으로 분석한다. Stokes' Law를 적용한 연구에서 부유물 1.0 μ m - 100 μ m의 침전율은 평균 약 0.3m/day 정도이다(EPA, 1999). 실험 연못-습지 시스템의 1차연못 설계에서 유입파이프의 끝을 연못바닥에서 0.8m 높이에 설치하였다. 침전율 0.3m/day의 경우 수심 0.8m에서 부유물이 바닥으로 침전하는데는 약 2.7일이 소요된다. 연못-습지 시스템을 구성하는 연못시스템의 체류시간을 2일 정도로 산정하는 것은 적절하다고 사료된다.

실험 연못-습지 시스템의 1차연못의 평균 BOD₅ 면적부하율은 약 2.74kg/ha/day 이었다. 제 2 장 제 2 절의 <표 2-1>에서 겨울철 평균 기온이 0 - 15 °C인 경우 수질정화 연못시스템의 BOD₅ 면적부하율로 22.4 - 44.8 kg/ha/day를 권장하고 있다. 실험 1차연못의 BOD₅ 면적부하율은 37.4kg/ha/day로 적정수준이며, 연못에 과부하가 일어나지 않는 부하율이다. 겨울철 BOD₅ 면적부하율 11.2 - 22.4kg/ha/day는 생활하수 등을 2차처리수준으로 정화하는 연못시스템의 부하율로, 연못이 조건성을 유지하면서 H₂S 냄새가 발생하지 않고 수질정화기능이 저하되는 것을 방지하기 위해 제시된 수치이다.

실험 연못-습지 시스템에서 유입수의 TN이 1차연못과 2차연못으로 구성된 연못 시스템에서 약 31% 정도가 처리되었으며, 연못시스템 처리수의 TN은 습지셀에서 약 39%가 처리되어, 전체적으로 유입수의 TN이 60% 정도 제거되었다. 습지셀의 체류시간은 약 1.5일로 연못-습지 시스템 전체의 체류시간은 약 3.5일이었다.

연못-습지 시스템의 현장 설계·시공 및 수질모니터링 자료를 기초로 담수호 수 자원 보전에 활용할 수 있는 하천수 혹은 강우유출수 약 1,000m³/day를 처리하는 연못-습지 시스템의 모델과 설계인자를 제시한다.

1) 연못-습지 시스템 시스템 모델 A (유입수 1,000m³/day)

<그림 3-53>은 연못-습지 시스템 모델 A의 평면개념도이며, <그림 3-54>는 연못-습지 시스템 모델 A의 단면개념도를 보여준다. <표 3-18>과 <표 3-19>는 연못-습지 시스템 모델 A의 설계인자를 나타낸다.

연못-습지 시스템 모델 A는 연못 2개를 직렬로 연결한 연못시스템과 습지셀 2개를 병렬로 연결한 인공습지로 구성된다. 유입수의 TN농도가 6.0mg/l이며, 최종 처리수의 TN농도 2.4mg/l를 유지할 수 있는 모델로 시스템전체의 TN 처리율은 약 60%로 산정하였다. 1차연못과 2차연못에서 유입수의 TN이 약 33% 처리되어, 2차연못의 방류수 TN농도는 약 4.0mg/l가 될 것으로 예측된다. 2차연못 방류수가 습지셀로 유입된 후 TN이 2.4mg/l로 처리되어 습지셀의 TN 처리율은 40%로 예측된다.

연못의 설계인자는 수심 2.2m, 여유고 0.5m, 부유물침전 깊이 0.3m로 연못의 전체의 깊이는 3m이다. 연못의 수면적은 약 800m²(폭 25m × 길이 32m)이며, 유입수가 흐르는 방향으로 폭 : 길이의 비율이 1 : 1.3이다. 1차연못과 2차연못의 체적은 각각 1,000m³로 유입유량 1,000m³/day의 체류시간은 약 1일이다. 연못의 침출양 및 증발양은 강수량과 거의 같은 것으로 가정하였다. 연못제방 폭은 2.5 - 3m로 설계하여 차량의 이동이 가능하게 하고, 제방의 경사는 간척지를 고려하여 1 : 3으로 설정하였다.

<그림 3-54>의 단면도 B-B'처럼 1차연못과 2차연못은 유입수의 단기이동을 완화할 수 있도록 수중유입과 표면유출 개념을 도입하고, 유입부와 유출부의 위치가 대각선에 위치하도록 한다. 1차연못의 수중으로 유입수를 유입시켜 침전을 유도하고, 1차연못의 방류수는 1차연못의 표면에서 2차연못의 수중으로 유입시킨 후 2차연못의 표면에서 2차연못의 처리수가 각 습지셀로 유입된다.

연못시스템에서 이상적인 수질정화는 유기물의 탄소가 메탄발효에 의해 메탄으로 변형되어 유기물의 양이 줄어드는 것이다. 메탄발효는 혐기성상태가 유지되어야 한다. 본 연구 실험 연못-습지 시스템의 1차연못의 바닥은 DO조사 결과 혐기성을 유지하였다. <그림 3-54>처럼 1차연못의 유입부 바닥에 길이 4m, 폭 4m, 깊이 1m 정도의 Pit를 설치한다. 유입관의 끝은 연못바닥보다 위에 설치하여 유입수의 부유물이 일차적으로 Pit에 침전되도록 한다. Pit에는 유입수의 유기물 입자가 쌓여 혐기성

상태가 된다. 강한 바람에 의해서 용존산소가 많은 연못상층의 물이 제방에 부딪쳐 연못바닥으로 이동하여도 Pit내부로는 용존산소의 침투가 차단되어 Pit의 메탄발효가 보호되도록 설계한다. 유입수의 고형물질 침전으로 Pit가 덮이면 연못바닥에 고형물질이 침전되기 시작한다. Pit에 침전물이 쌓일 경우 10 - 15년에 한번 인위적으로 제거한다.

각 습지셀의 유입수의 양을 500m³/day로 산정한다. 습지셀은 폭 약 32m 길이 약 104m로 면적이 약 3,330m²이며, 폭 : 길이의 비율은 1 : 3.2 이다. 유출부에 수심을 0.3 - 0.6m로 조절할 수 있는 weir를 설치하며, 평상시 운영수심은 0.3m로 조정한다. 공급률을 0.75로 산정하면 습지셀의 순체적은 750m³이 된다. 습지셀의 체류시간은 1.5day이고, 수리학적 부하율은 0.15m/day가 된다.

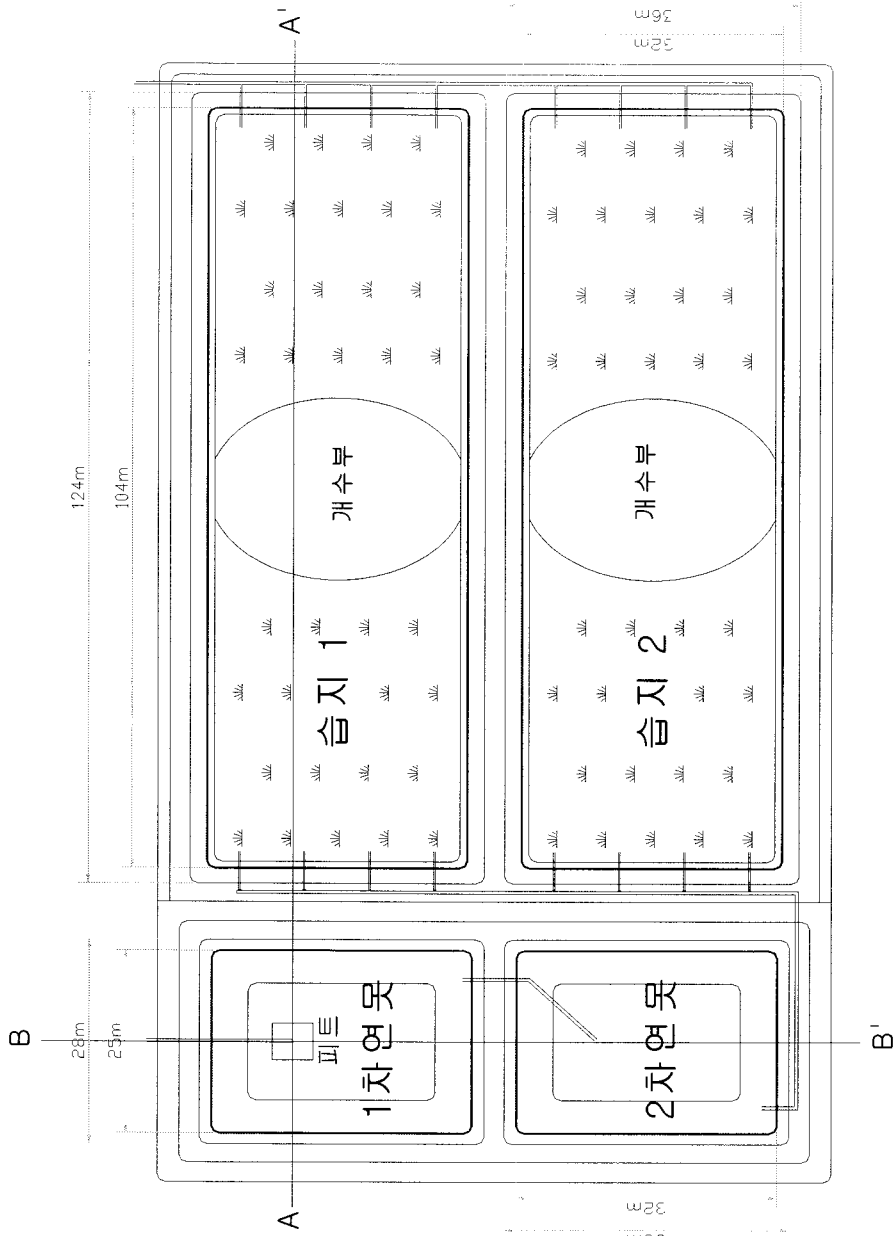
각 습지셀은 장축을 기준으로 약 35m 간격의 3개 Zone으로 나누어 유입수가 흐르는 방향으로 Zone1과 Zone3에는 정수식물을 식재하고, Zone2에는 습지셀 면적의 20 - 25%에 달하는 약 660 - 830m²의 개수부를 설치한다. 정수식물은 부들(cattails) 혹은 갈대(reeds)를 식재한다. 개수부는 정수식물이 자라지 못하고 침수식물과 부유식물이 자랄 수 있도록 수심 1 - 1.2m를 유지하도록 설계한다. 개수부는 유입수의 단기이동을 방지하고 새(bird) 등의 서식처를 제공하며, 대기와 접촉을 통한 산소의 공급으로 수중의 질산화를 촉진하여 질소제거에 기여하도록 설계한다. 습지의 유입부와 유출부는 확산유입과 확산유출이 되도록 설계한다. 습지셀은 다음 절에서 설명할 근자연형 인공습지 모델A 처럼 습지제방에 면한 일부 습지 바닥의 경사를 1 : 3 - 1 : 15로 조성할 수 있다.

부지조건에 따라 연못의 폭 : 길이의 비율은 1 : 2 - 1 : 4로 조절할 수 있으며, 습지셀의 폭 : 길이의 비율도 1 : 2 - 1 : 4로 조절할 수 있다. 연못과 습지셀의 배치모습이 달라질 수 있으나, <표 3-19>의 주요 설계인자의 값들은 적용하도록 한다.

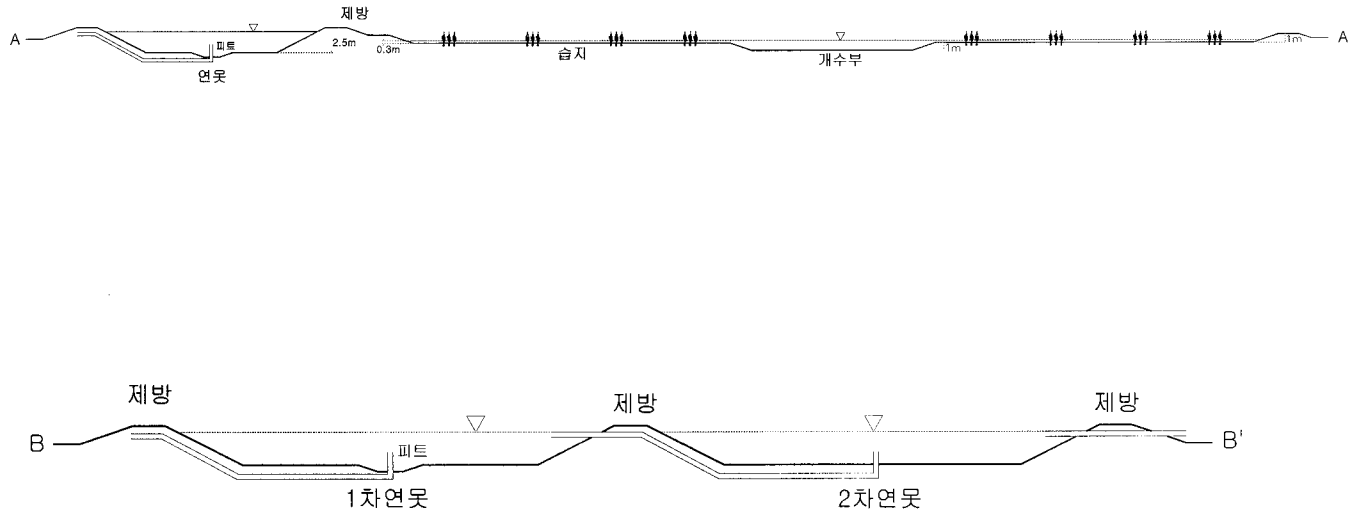
연못-습지 시스템 모델 A를 구성하는 1차연못 및 2차연못에서 제거되는 TN양은 2.0 kg/day로 예측되며, 연못수면 단위면적당 TN제거량은 12.5kg/ha/day로 예상된다. 습지셀 2개에서 제거되는 TN양은 1.6kg/day예측되며, 습지단위면적당 TN제거량은 2.4kg/m²/day로 예상된다. 모델 A 전체에서 제거되는 TN양은 3.6kg/day로 산출되며, 모델 A 전체면적을 고려한 단위면적당 TN제거량은 4.35kg/ha/day로 예상된다. 유입수의 TN 6.0mg/l 가 2.4mg/l 로 처리되면, TP는 0.1mg/l 이하로 처리될 것으로 예측된다.

간척지 담수호의 수질보전을 위해 저류지(detention pond)를 담수호 유입부나 주변에 조성하는 방안이 검토되고 있다. 기존에 활용하고 있는 1개의 셀(cell)개념으로

저류지를 조성하는 방법보다 2 - 3개의 셀로 구성된 연못시스템으로 조성할 경우 수질정화 효율을 높일 수 있고 저류량의 통제도 용이한 장점이 있다.



<그림 3-53> 연못-습지 시스템 모델 A 평면개념도



<그림 3-54> 연못-습지 시스템 모델 A 단면개념도

<표 3-18> 연못-습지 시스템 모델 A 설계인자(1)

	유입수 TN (mg/ℓ)	유출수 (목표) TN (mg/ℓ)	TN 처리 율 (%)	수표면 (m ²)	공극률	수체적 (m ³)	유입 유량 (m ³ / 일)	체류 시간 (일)	TN 부하율 (kg/ha /day)	수리학 적부하 율 (m/day)
1차연못	6.0			20×40 (800)		1,000	1,000	1.0	-	
2차연못		4.0	33	20×40 (800)		1,000	1,000	1.0	-	
습지셀1		2.4	60	30×110 (3,300)	0.75	750	500	1.5	6.0	0.15
습지셀2		2.4	60	30×110 (3,300)	0.75	750	500	1.5	6.0	0.15

<표 3-19> 연못-습지 시스템 모델 A 설계인자(2)

	수심 (m)	여유고 (m)	침전 퇴적 (m)	뚝 높이 (m)	내경사	외경사
1차연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1 : 3	1 : 3
2차연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1 : 3	1 : 3
습지셀1	0.3 - 06	0.4	-	1.0	1 : 2	1 : 2
습지셀2	0.3 - 06	0.4	-	1.0	1 : 2	1 : 2

2) 연못-습지 시스템 모델 B (유입수 1,000m³/day)

<그림 3-55>은 연못-습지 시스템 모델 B의 평면개념도이며, <그림 3-56>은 연못-습지 시스템 모델 B의 단면개념도이다. <표 3-20>과 <표 3-21>은 연못-습지 시스템 모델 B의 설계인자를 나타낸다.

<표 3-20>에서 1차연못과 2차연못으로 구성된 연못시스템의 처리율 실험 결과 1차연못과 2차연못의 TN처리율은 각각 21%, 13%로 2차연못의 처리수준이 낮다. 유입수의 무기 및 유기 고형물질의 상당부분이 1차연못에서 침전에 의해 제거되기 때

문이다. 연못-습지 시스템 모델 B는 연못-습지 시스템 모델 A에서 처리율이 상대적으로 낮을 것으로 예측되는 2차연못을 설치하지 않고 1차연못 1개만 활용하는 모델이다.

연못-습지 시스템 모델 B의 유입유량은 $1,000\text{m}^3/\text{day}$ 이다. 유입수의 TN농도 $6.0\text{mg}/\ell$ 가 연못에서 $4.6\text{mg}/\ell$ 로 처리된 후 습지에 유입되어 $3.0\text{mg}/\ell$ 로 처리될 수 있는 모델로 전체 시스템의 TN 처리율은 약 50%이다. 연못의 TN 처리율은 약 23%로 예상되며, 습지의 TN 처리율은 약 34%로 예측된다.

연못의 설계인자는 수심 2.2m, 여유고 0.5m, 부유물침전 깊이 0.3m로 연못의 전체의 깊이는 3m이다. 연못의 수면은 폭 16m, 길이 50m로, 유입수가 흐르는 방향으로 폭 : 길이의 비율이 1 : 3이다. 연못의 체적은 $1,000\text{m}^3$ 로 유입유량 $1,000\text{m}^3/\text{day}$ 의 체류시간은 약 1일이다. 연못의 침출량 및 증발량은 강수량과 거의 같은 것으로 가정하였다. 연못제방 폭은 2.5 - 3 m이며 제방의 경사는 간척지를 고려하여 1 : 3으로 설정하였다.

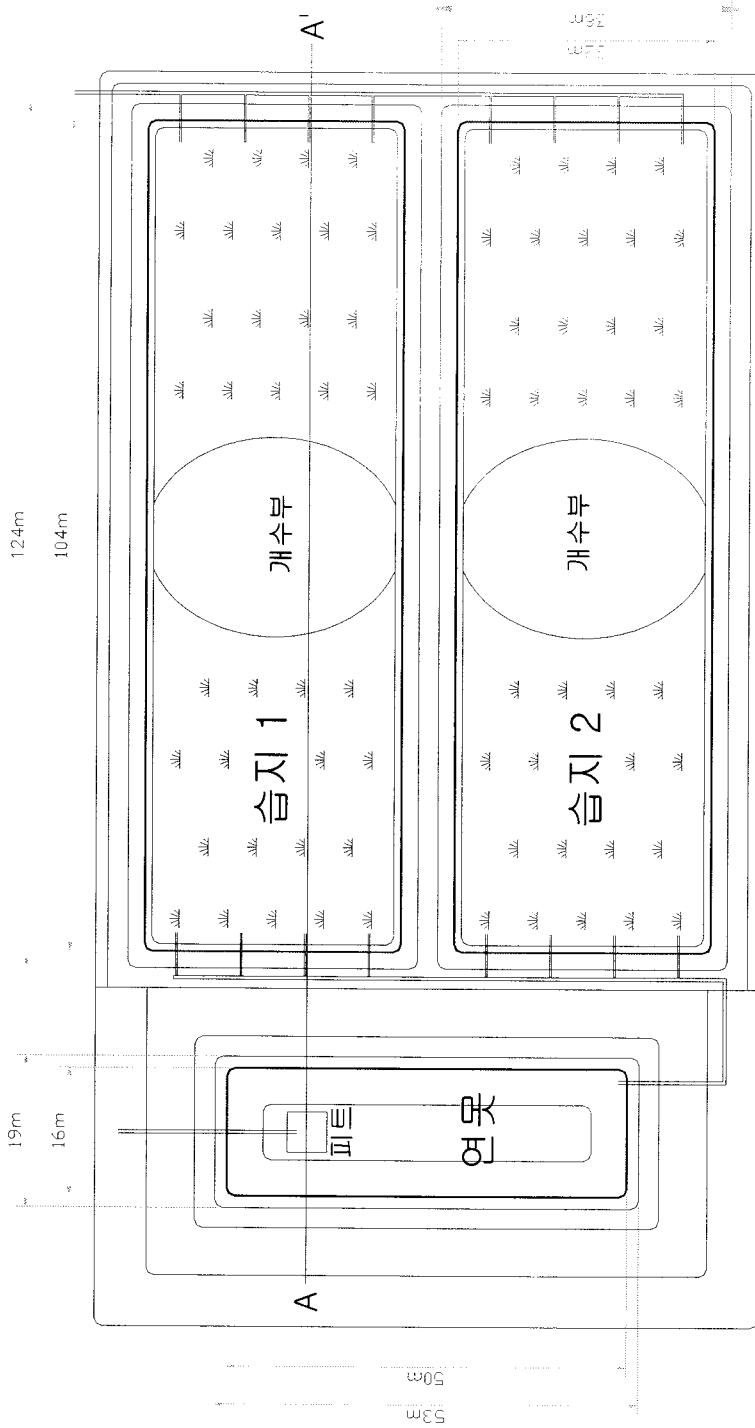
<그림 3-56>처럼 연못은 유입수의 단기이동을 완화할 수 있도록 수중유입과 표면유출 개념을 도입하고, 연못의 유입부와 유출부의 위치가 대각선에 위치하도록 한다. 연못의 수중으로 유입수를 유입시켜 침전을 유도하고, 연못의 방류수는 연못의 표면에서 각 습지셀로 유입된다. <그림 3-56>처럼 연못의 바닥에는 길이 4m, 폭 4m, 깊이 1m 정도의 Pit를 설치한다. Pit의 기능과 역할은 연못-습지 시스템 모델 A에서 제시한 Pit와 같다.

습지셀은 폭 33m 길이 100m로 폭 : 길이의 비율이 1 : 3 이며, 수심을 0.3 - 0.6m로 조절할 수 있도록 유출부에 weir를 설치하고, 평상시 운영수심은 0.3m로 조정한다. 공극률을 0.75로 산정하면 습지셀의 순체적은 750m^3 가 된다. 각 습지셀의 유입수의 양은 $500\text{m}^3/\text{day}$ 로 산정하며, 습지셀의 체류시간은 1.5day이고, 수리학적 부하율은 $0.15\text{m}/\text{day}$ 가 된다.

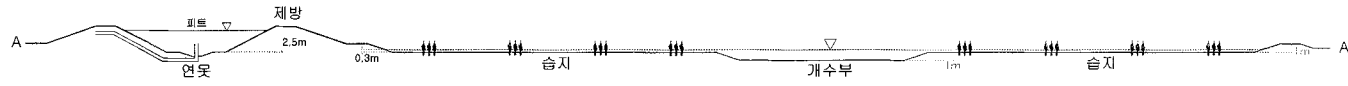
습지셀의 설계 개념은 연못-습지 시스템 모델 A에서 제시한 내용과 같다. 부지조건에 따라 연못의 폭 : 길이의 비율은 1 : 2 - 1 : 4로 조절할 수 있으며, 습지셀의 폭 : 길이의 비율도 1 : 2 - 1 : 4로 조절할 수 있다. 연못과 습지셀의 배치모습은 달라질 수 있으나 <표 3-21>의 주요 설계인자의 값들은 고려해야한다.

연못에서 제거되는 TN양은 $1.4\text{kg}/\text{day}$ 로 예측되며, 연못수면의 단위면적당 TN제거량은 $17.5\text{kg}/\text{ha}/\text{day}$ 로 예상된다. 습지셀 2개에서 제거되는 TN양은 $1.6\text{kg}/\text{day}$ 로 예측되며, 습지단위면적당 TN제거량은 $2.4\text{kg}/\text{ha}/\text{day}$ 로 예상된다. 모델 B 전체에서 제거되는 TN양은 $3.0\text{kg}/\text{day}$ 로 산출되며, 모델 B 전체면적을 고려한 단위면적당 TN제거량은 $4.02\text{kg}/\text{ha}/\text{day}$ 로 예상된다. 유입수의 TN $6.0\text{mg}/\ell$ 가 $3.0\text{mg}/\ell$ 로 처리되면, TP

는 약 0.1mg/l 로 처리될 것으로 예측된다.



<그림 3-55> 연못-습지 시스템 모델 B 평면개념도



<그림 3-56> 연못-습지 시스템 모델 B 단면개념도

<표 3-20> 연못-습지 시스템 모델 B 설계인자(1)

	유입수 TN (mg/ℓ)	유출수 (목표) TN (mg/ℓ)	TN 처리율 (%)	수표면 (m ²)	공극률	수체적 (m ³)	유입 유량 (m ³ /일)	체류 시간 (일)	TN 부하율 (kg/ha /day)	수리학적 부하율 (m/day)
연못	6.0	4.6		16×50 (800)		2,000	1,000	1.0	-	-
습지셀1		3.0		30×110 (3,330)	0.75	750	500	1.5	6.9	0.15
습지셀2		3.0	60	30×110 (3,330)	0.75	750	500	1.5	6.9	0.15

<표 3-21> 연못-습지 시스템 모델 B 설계인자(2)

	수심 (m)	여유고 (m)	침전 퇴적 (m)	뚝 높이 (m)	내경사	외경사	공극률
연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1 : 3	1 : 3	
습지셀1	0.3 - 0.6	0.4	-	1.0	1 : 2	1 : 2	0.75
습지셀2	0.3 - 0.6	0.4	-	1.0	1 : 2	1 : 2	0.75

2. 근자연형 인공습지 모델 개발

가. 모델의 개념

하천수를 정화하는 근자연형 인공습지는 유입수의 BOD₅, SS, TN, TP가 상대적으로 저농도이며 유입수의 TN과 TP제거가 조성의 일차적 목적이 된다.

기존 인공습지는 공학적이 측면이 강조되어 단위 면적당 습지의 체적을 최대한 높이는 방향으로 설계하여 습지 바닥면을 평탄하게 조성하였다. 최근 인공습지 조성에서 수질정화 기능뿐만 아니라 다양한 친환경적 기능이 강조되고 있다. 인공습지는 물고기 및 야생동물의 서식처를 제공할 수 있고, 바이오톱으로 활용이 가능하며, 조류

(bird)관찰, 시민휴식, 자연학습 공간을 제공할 수 있으며, 훼손된 습지를 복원하여 지역의 경관을 아름답게 조성할 수 있다. 선진국에서는 인공습지를 조성할 때 자연 습지와 유사한 모습으로 조성하여 인공습지의 친환경적 기능을 강조하고 있다.

근자연형 인공습지 모델은 제방에 면한 습지바닥의 일부를 경사 1 : 4 ~ 1 : 15 로 조성하고 유입부와 습지중간에 1.2m 수심의 개수부(open water)를 설치하여 자연 습지의 모습과 유사하게 조성하는 모델이다.

나. 모델 설계인자 검토

<표 3-22>는 본 연구에서 설계·시공하여 모니터링한 근자연형 인공습지의 처리수준을 나타낸다. 근자연형 인공습지의 BOD₅, SS, TN, TP 처리율은 각각 56%, 61%, 57%, 60%이었다.

<표 3-22> 실험 근자연형 인공습지의 처리율

	BOD ₅ (mg/ℓ)	BOD ₅ 처리율 (%)	SS (mg/ℓ)	SS 처리율 (%)	TN (mg/ℓ)	TN 처리율 (%)	TP (mg/ℓ)	TP 처리율 (%)
유입수	6.14	-	14.71	-	5.78	-	2.05	-
유출수	2.70	56	5.74	61	2.49	57	0.820	60

<표 3-23>은 근자연형 인공습지의 모니터링을 통해 추출한 설계인자 및 설계인자 값이다. 모니터링 기간의 평균 유입유량은 약 120m³/day이었으며, 습지면적은 1,900m²이었다. 체류시간은 약 3.5일이었고, 수리학적부하율은 약 0.06m/day였다. 유입수와 유출수의 평균 TN 농도는 각각 5.78mg/ℓ, 2.49mg/ℓ로 근자연형 인공습지의 평균 TN 처리율은 57%이었다. 운영기간의 TN 부하율은 약 3.65kg/ha/day였다.

앞 절의 연못-습지 시스템 모델 개발에서 인공습지 부분의 설계인자 검토에서 활용한 식(1), 식 (2), 식 (3), 식 (4)를 활용하여 실험 근자연형 인공습지의 TN 반응율 상수 K_T를 검토하여 본다. 실험 근자연형 인공습지의 유입수 평균TN 농도는 5.78mg/ℓ, 처리수 평균TN 농도는 2.49 mg/ℓ였다. 운영기간의 습지면적 1900m², 수심 0.3m, 공극률 0.75를 적용하여 근자연형 인공습지의 TN 반응율 상수 K_T 구하면 0.2364가 된다. 실험 근자연형 인공습지를 설계할 때 소요면적 산출에서 적용하였던

K_T 값 0.2187보다 다소 높은 수치이다. 이는 공식(2)가 본 연구 습지셀 보다 유입수의 TN농도가 높고 기온이 온난한 북미지역에 조성된 인공습지의 TN처리수준을 기초로 작성된 데 원인이 있는 것으로 생각된다.

<표 3-23> 실험 근자연형 인공습지의 설계인자, 운영 유입유량 및 체류시간

수심 (m)	여유고 (m)	뚝높이 (m)	내경사	외경사	공극률	수표면 (m ²)	유입유량 (m ³ /day)	체류시간 (day)	수리학적 부하율 (m/day)	TN 부하율 (kg/ha/day)
0.3	0.3	1.0	1 : 4 - 1 : 15	1 : 3	0.75	1,900	120	3.5	0.06	3.65

다. 근자연형 인공습지 모델

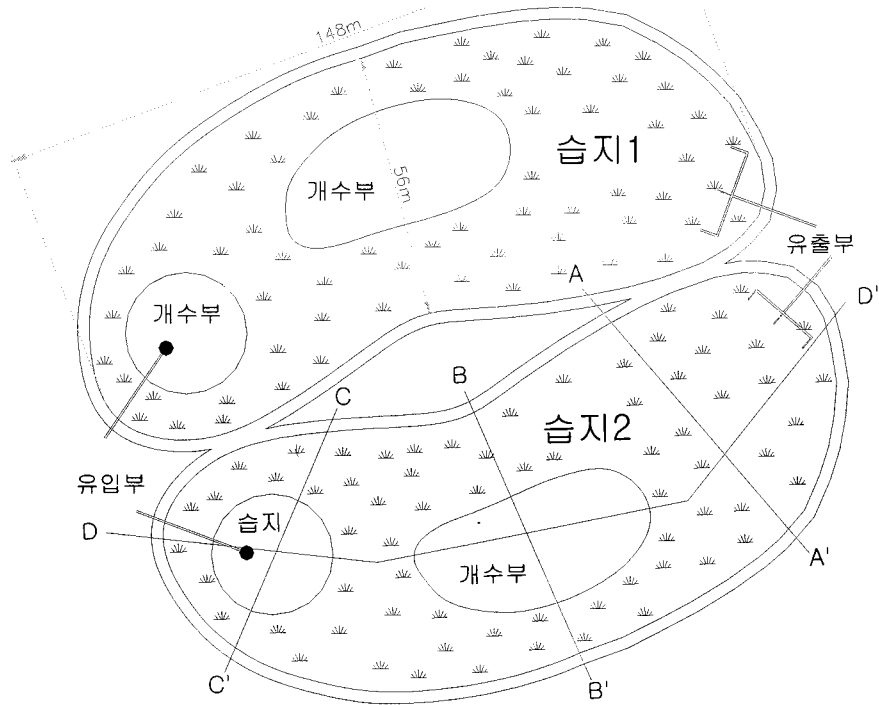
근자연형 인공습지의 현장 설계·시공 및 수질모니터링 자료를 기초로 담수호 수자원 보전에 활용할 수 있는 하천수 혹은 강우유출수 약 1,000m³/day를 처리하는 근자연형 인공습지 모델과 설계인자를 제시한다.

1) 근자연형 인공습지 모델 A (유입수 1,000m³/day)

<그림 3-57>은 근자연형 인공습지 모델 A의 평면개념도이며, <그림 3-58>은 근자연형 인공습지 모델 A의 단면개념도이다. <표 3-24>는 근자연형 인공습지 모델 A의 설계인자를 나타낸다.

<그림 3-57>에서처럼 근자연형 인공습지 모델 A는 습지셀 2개를 병렬로 연결한 시스템이다. 유입수의 TN농도를 6.0mg/ℓ로 산정하며 최종 처리수의 농도를 2.5mg/ℓ로 처리할 수 있는 모델로 TN 처리율은 약 60%를 달성할 수 있다.

각 습지셀은 폭 약 50m 길이 약 150m로 면적이 약 7,770m²이며, 폭 : 길이의 비율이 1 : 3이다. 수심을 0.3 - 0.6m로 조절할 수 있도록 유출부에 weir를 설치하고, 평상시 운영수심은 0.3m로 조정한다. 공극률을 0.75로 산정하면 습지셀의 순체적은 1,750m³이 된다. 습지셀의 유입수의 양은 500m³/day이며, 습지셀의 체류시간은 3.5day이고, 수리학적 부하율은 0.06m/day가 된다.



<그림 3-57> 근자연형 인공습지 모델 A 평면개념도

습지제방에 면한 습지바닥의 일부를 경사 1 : 4 ~ 1 : 15로 조성하여 자연습지와 유사한 모습으로 설계한다. 습지셀은 약 50m 간격의 3개 Zone으로 나누어 유입수가 흐르는 방향으로 Zone1의 유입부에는 습지면적의 약 5 - 10%에 해당하는 개수부를 설치하고, Zone2의 중간에는 습지면적의 15 - 20 %에 해당하는 개수부를 설치한다. Zone3과 Zone1 및 Zone2의 개수부를 제외한 부분에 정수식물을 식재한다. 정수식물은 부들(cattails) 혹은 갈대(reeds)를 식재한다. 유입부의 개수부는 토사와 부유물질을 침전시키는 기능을 하며, 중앙의 개수부는 유입수의 단기이동을 방지하는 역할을 한다. 개수부는 정수식물이 자라지 않고 침수식물과 부유식물이 자랄 수 있는 곳으로 수심을 1 - 1.2m를 유지하도록 설계한다. 개수부는 새(bird) 등의 서식처를 제공하며, 대기와 접촉을 통한 산소의 공급으로 수중의 질산화를 촉진하여 질소제거에 기여하도록 설계한다. 유입관의 끝은 개수부 바닥면에서 수직 약 0.9m 높이로 설치하여 유입수가 수면으로 떨어지면서 유입되도록 설계하여 폭기효과를 유도한다. 유

입부에 설치한 개수부에 침전물이 쌓이면 10 - 15년에 한번 인위적으로 제거한다. 유입부와 유출부는 확산유입과 확산유출이 되도록 설계한다.

부지조건에 따라 습지셀의 폭:길이의 비율은 1 : 2 - 1 : 4로 조절할 수 있다. 근자연형 인공습지의 배치모습은 달라질 수 있으나, <표 3-25>의 중요 설계인자의 값들을 적용하도록 한다.

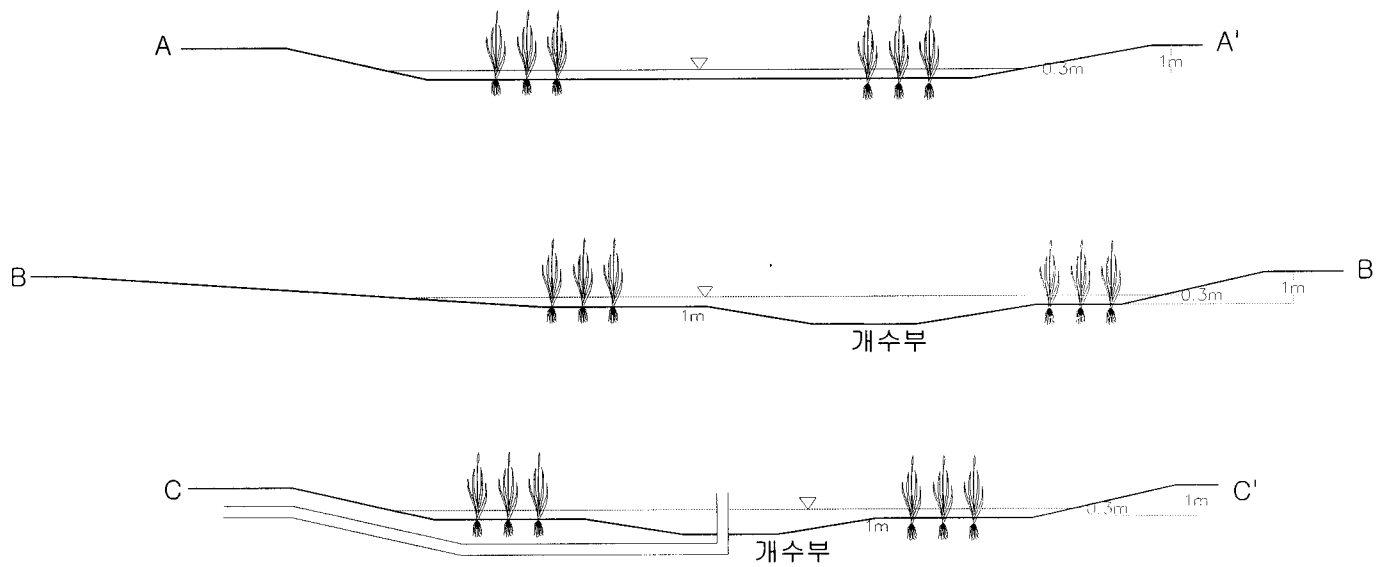
근자연형 인공습지 모델 A에서 제거되는 TN양은 3.6kg/day로 예측되며, 단위면적 당 TN제거량은 2.31kg/m²/day로 예상된다. 유입수의 TN 6.0mg/l가 2.4mg/l로 처리되면, TP는 0.1mg/l 이하로 처리될 것으로 예측된다.

<표 3-24> 근자연형 인공습지 모델 A의 설계인자 (1)

유입수 TN (mg/l)	유출수 (목표) TN (mg/l)	TN 처리율 (%)	면적 (m ²)	수체적 (m ³)	유입 유량 (m ³ /day)	체류 시간 (day)	수리학적 부하율 (m/day)	TN 부하율 (kg/ha/day)
6.0	2.4	60	7,770	1,750	500	3.5	0.06	3.86

<표 3-25> 근자연형 인공습지 시스템 모델 A 설계인자(2)

수심 (m)	여유고 (m)	뚝높이 (m)	내경사	외경사	공극률
0.3	0.3	1.0	1 : 4 - 1 : 15	1 : 3	0.75



<그림 3-58> 근자연형 인공습지 모델 A 단면개념도(1)



<그림 3-59> 근자연형 인공습지 모델 A 단면개념도(2)

2) 근자연형 인공습지 모델 B (유입수 1,000m³/day)

<그림 3-60>은 근자연형 인공습지 모델 B의 평면개념도이며, <그림 3-61>은 근자연형 인공습지 모델 B의 단면개념도이다. <표 3-26>은 근자연형 인공습지 모델 B의 설계인자를 나타낸다.

연못-습지 시스템 모델개발을 위해 설계·시공하여 모니터링한 부들습지셀과 갈대습지셀의 연구조사에서 유입수의 체류시간이 1.5일 정도이면 습지셀에서 유입수의 TN이 약 38%가 처리되었다(표 3-26 참조). 연못-습지 시스템의 부들습지셀과 갈대습지셀의 유입수는 2차연못의 처리수로 유입수의 TN농도가 3.98mg/ℓ로 상대적으로 낮다. 유입수의 TN 농도가 6.0mg/ℓ 인 근자연형 인공습지 모델 B에서 체류시간 1.5 일이면 TN처리율은 38%보다는 낮을 것으로 예상된다. 조사분석한 연못-습지 시스템의 부들셀과 갈대셀은 시공후 초기 상태에서 모니터링한 TN처리율로 정수식물이 성장하고 습지바닥에 토양-잔재물 층이 형성되면 TN처리율이 다소 증가 할 것으로 예측된다. 습지에 개수부를 도입하면 질산화를 촉진하여 TN처리율이 다소 증가할 것으로 예측되어 체류시간 1.5일에서 TN처리율 35%는 달성할 수 있을 것으로 사료된다.

근자연형 인공습지 시스템 모델 B는 인공습지 조성면적을 충분히 확보할 수 없는 경우 체류시간을 단축하여 조성하는 모델로, 체류시간을 1.5일로 설정하여 유입수의 TN을 약 35%로 처리하는 모델이다. 습지제방에 면한 습지바닥의 일부를 경사 1 : 4 ~ 1 : 15로 조성하여 자연습지와 유사한 모습으로 설계한다.

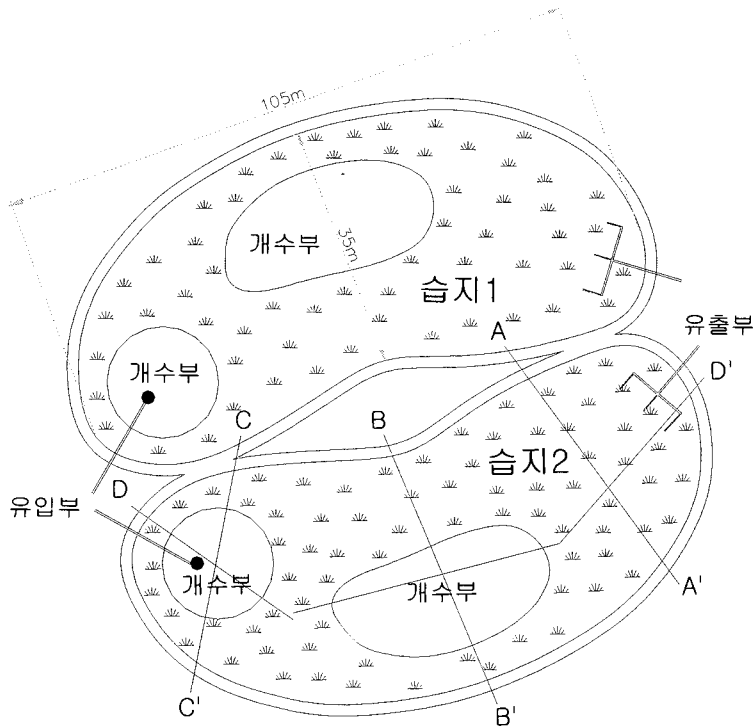
각 습지셀은 폭 약 33m 길이 약 100m로 면적이 약 3,330m²이며, 폭 : 길이의 비율이 1 : 3이다. 수심을 0.3 - 0.6m로 조절할 수 있도록 유출부에 weir를 설치하고, 평상시 운영수심은 0.3m로 조정한다. 공극률을 0.75로 산정하면 습지셀의 순체적은 750m³이 된다. 습지셀의 유입수의 양은 500m³/day이며, 습지셀의 체류시간은 1.5day 이고, 수리학적 부하율은 0.15m/day가 된다.

습지셀은 장축을 기준으로 약 33m 간격의 3개 Zone으로 나누어 유입수가 흐르는 방향으로 Zone1의 유입부에는 습지면적의 약 5 - 10%에 해당하는 개수부를 설치하고 Zone2의 중간에는 습지면적의 15 - 20 %에 해당하는 개수부를 설치한다. Zone3과 Zone1 및 Zone2의 개수부를 제외한 부분에 정수식물을 식재한다. 개수부의 설계 개념은 근자연형 인공습지 A 모델과 같다. 정수식물은 부들(cattails) 혹은 갈대(reeds)를 식재한다. 유입관의 끝은 개수부 바닥면에서 수직 약 0.9m 높이로 설치하여 유입수가 수면으로 떨어지면서 유입되도록 설계하여 폭기효과를 유도한다. 유입부에 설치한 개수부에 침전물이 쌓이면 10 - 15년에 한번 인위적으로 제거한다. 유

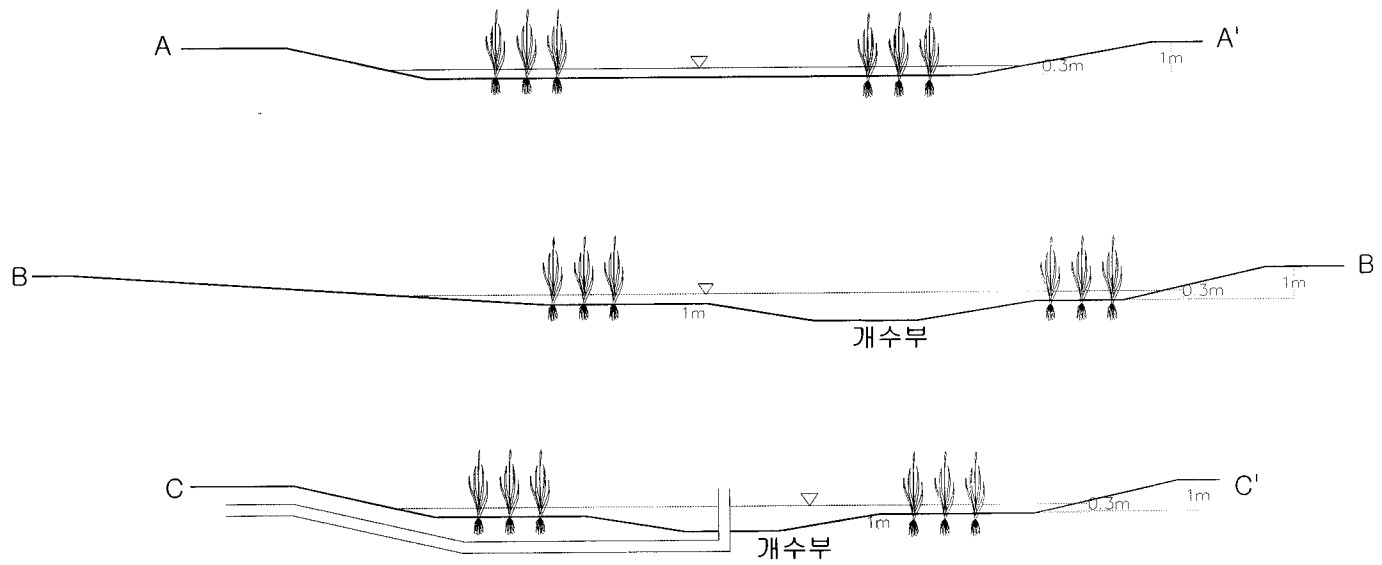
입부와 유출부는 확산유입과 확산유출이 되도록 설계한다.

부지조건에 따라 습지셀의 폭:길이의 비율은 1 : 2 - 1 : 4로 조절할 수 있다. 습지의 배치모습은 달라질 수 있으나, <표 3-26>의 중요 설계인자의 값들을 적용하도록 한다.

근자연형 인공습지 모델 B에서 제거되는 TN양은 2.1kg/day로 예측되며, 모델 B 단위면적 당 TN제거량은 3.15kg/ha/day로 예상된다. 단위면적당 TN제거량은 모델 B가 모델 A 보다 높으나, 모델 A의 처리수 TN농도는 2.4mg/l로 낮은 반면 모델 B의 처리수 TN농도는 3.9mg/l로 다소 높다. 유입수의 TN 6.0mg/l가 3.9mg/l로 처리되면, TP는 0.12mg/l 정도로 처리될 것으로 예측된다.



<그림 3-60> 근자연형 인공습지 모델 B 평면 개념도



<그림 3-61> 근자연형 인공습지 모델 B 단면개념도(1)



<그림 3-62> 근자연형 인공습지 모델 B 단면개념도(2)

<표 3-26> 근자연형 인공습지 모델 B의 설계인자 (1)

유입수 TN (mg/ℓ)	유출수 (목표) TN (mg/ℓ)	TN 처리율 (%)	면적 (m ²)	수체적 (m ³)	유입 유량 (m ³ /day)	체류 시간 (day)	수리학적 부하율 (m/day)	TN 부하율 (kg/ha/day)
6.0	3.9	35	3,330	750	500	1.5	0.15	9.00

<표 3-27> 근자연형 인공습지 시스템 모델 B 설계인자 (2)

수심 (m)	여유고 (m)	뚝높이 (m)	내경사	외경사	공극률
0.3	0.3	1.0	1 : 4 - 1 : 15	1:3	0.75

제 6 절 인공습지의 친환경적 활용방안

선진국에서는 2차 처리수준으로 점오염원을 처리하는 하수처리장이나 연못시스템의 방류수를 재처리하는 습지, 오염 하천수 및 호수의 물을 정화하는 습지를 조성할 때 수질정화 기능이외에 다양한 친환경적 기능을 고려하여 설계하고 있다. 습지 제방과 뚝에 산책로와 휴게공간을 조성하여 시민들이 산책과 휴식을 할 수 있도록 하며, 야생동물 보호 공간 및 서식처를 제공할 수 있도록 설계하고 있다. 습지 내부에 관찰 뚝(deck)을 설치하여 학술조사는 물론 시민들이 습지 관찰 및 자연학습을 할 수 있도록 조성하고 있다.

미국 Olentangy River Wetlands는 습지주변에 산책로, 습지관찰 뚝, 습지전망대가 설치되어 있어, 시민들이 산책하고 습지를 관찰할 수 있도록 조성되어 있다(사진 3-46). 미국 Des Plain Wetlands는 다양한 산책로가 조성되어 있다.

일본 와따라세 갈대습지는 상수원 유수지의 물을 정화하는 시스템으로 산책로와 관찰뚝, 전망대를 조성하여 시민들이 습지를 관찰할 수 있도록 설계되어 있다(사진 3-56).

미국 Arcata Wetlands는 Arcata 도시의 생활하수를 처리하는 연못-습지 시스템으로 산책로 및 휴게공간이 설치되어 있고, 습지 학습관이 조성되어 있으며, 습지에 섬과 개수부를 조성하여 새들의 서식공간을 제공하고 있다(사진 3-57). Arcata 시스템은 야생동물 서식처가 되면서 조류(bird)감상 관광지로 유명한 곳이며, 생태적 환경친화적으로 수질을 정화하는 대표적인 사례이다. 미국 Hayward Wetlands는 도시 하수처리장의 방류수를 정화하는 시스템으로 희귀 조류를 보호하는 장소이며, 습지 주변에는 산책로가 조성되어 있다(사진 3-58).

수질정화 인공습지의 이런 친환경적 기능들은 수질정화 습지를 생태공원의 개념으로 조성할 수 있어 습지의 사회적 가치를 높이는 역할을 하고있다.



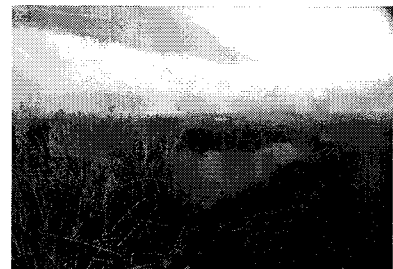
<사진 3-55> Olentangy 습지 관찰택



<사진 3-56> 와따라세 습지전망대



<사진 3-57> Arcata 습지 휴게공간



<사진 3-58> Hayward 습지 산책로

본 연구를 통하여 제시한 연못-습지 시스템의 연못과 습지, 그리고 근자연형 인공습지는 친환경적 기능을 고려하여 설계가 가능하다. 특히 근자연형 인공습지는 인공습지 자체가 자연습지의 모습과 유사하여 친환경적 기능을 쉽게 접목시킬 수 있는 장점을 가진 모델이다.

여 백

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 목표 달성도

<표 4-1>은 본 연구의 주요 목표 및 내용을 보여준다.

<표 4-1> 연구 목표 및 내용

연구개발 목표	연구개발 내용
○ 시스템 설계	<ul style="list-style-type: none"> · 문헌조사, 해외 연못·인공습지 시스템 조사 · 부지 선정 및 환경 조사 · 유입수 성상 분석 · 연못, 습지 설계인자 검토 · 연못-습지 시스템 설계 및 모형실험 · 근자연형 인공습지 시스템 설계인자 검토 · 근자연형 인공습지 설계 및 모형실험 · 수질정화 습지의 친환경적 활용방안
○ 시스템 시공, 시스템 반응조사 수질 분석	<ul style="list-style-type: none"> · 연못-습지 시스템 시공 · 근자연형 인공습지 시공 · 연못-습지 시스템 처리수준 조사분석 연못의 반응 분석 · 근자연형 인공습지 처리수준 조사분석 · 습지 토양 분석
○ 습지 식재설계 및 관리	<ul style="list-style-type: none"> · 정수식물 선정 · 정수식물 배식설계 및 식생공 · 정수식물 성장 조사: 초장, 분수 · 정수식물 건중량 및 성분 분석
○ 시스템 모델개발	<ul style="list-style-type: none"> · 유역처리 연못-습지 시스템 모델개발 · 근자연형 인공습지 모델개발 · 연못-습지 시스템 설계 인자 추출 · 근자연형 인공습지 설계인자 추출

1차년도(2000)의 연구개발목표는 1) 문헌조사 및 해외 연못, 인공습지의 시스템 조사, 2) 연못-습지 시스템 설계 및 시공, 3) 연못-습지 시스템의 적응 및 수질분석, 4) 습지셀의 배식설계, 식생공, 식재관리로 대별된다. 문헌조사를 통하여 외국의 연못 시스템, 인공습지, 연못-습지 시스템의 사례를 분석하고 설계인자를 검토하였으며, 우리나라와 비슷한 기후권에서 운영중인 수질정화 연못-습지 및 인공습지의 시스템의 현지답사를 통하여 설계인자, 처리수준을 검토하였다. 유역처리 시스템의 부지 확보와 시스템 구성에 적합한 장소로 고흥지구 담수호로 유입되는 신양천 하류의 개답 포락지를 선정하였다. 시스템으로 유입될 신양천의 평상시 수질과 강우 유출수의 수질을 분석하고, 부지의 자연 및 인문 환경을 분석하였다. 부지조건, 유입수 수질, 설계인자 검토를 종합하여 유역처리 연못-습지 시스템 설계한 후 모형실험을 수행하였다. 연못-습지 시스템의 1차연못, 2차연못, 습지셀 6개의 토공과 배관공을 완료하고, 집수정, 펌핑시설, 유량분배 탱크를 시공하였다. 문헌조사 결과 수질정화 인공습지에 활용되고 있는 정수식물 수종으로 부들과 갈대가 가장 많이 활용되고 있음을 확인하였다. 시스템 조성부지 주변과 담수호 개답지역에 자생하고 있는 정수식물을 조사한 결과 갈대와 부들이 우점종이었다. 습지 셀의 식재 수종으로 자생 부들과 갈대를 선정하였으며, 습지 셀1, 셀2, 셀3에는 자생 부들을 채취하여 식재하였으며, 습지 셀4, 셀5, 셀6에는 갈대를 식재하였고, 연못과 습지 셀의 초기 적응과 수질을 분석하였다. 1차년도의 연구목표 달성이 양호하였다.

2차년도(2001년)의 연구개발목표는 1) 근자연형 인공습지 설계 및 시공 2) 근자연형 인공습지의 배식설계, 식생공, 식재관리, 3) 근자연형 인공습지의 초기 적응 및 수질 분석, 4) 1차년도 시공 연못-습지 시스템의 수질분석, 5) 인공습지의 친환경적 활용방안으로 대별된다. 근자연형 인공습지의 설계인자를 검토하고 부지조건에 적합하게 설계하였으며, 모형실험을 수행하였다. 1차년도에 조성한 연못-습지 시스템의 부지에 근자연형 인공습지를 시공하였다. 근자연형 인공습지에는 자생 부들을 채취하여 식재한 후 초기 적응과 수질을 분석하였다. 1차년도에 시공한 연못-습지 시스템의 연못과 부들 습지셀의 적응, 식물성장, 수질을 분석하였다. 문헌조사를 통하여 인공습지의 친환경적 활용방안을 연구하였다. 2차년도의 연구목표 달성이 양호하였다.

3차년도(2002년)의 연구개발 목표는 1) 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지의 처리수준 분석 및 종합, 2) 연못-습지 시스템 및 근자연형 인공습지의 적응 및 식물 성장 분석, 3) 국내여건에 적합한 유역처리 연못-습지 시스템 및 근자연형 인공습지 시스템 모델개발 및 설계인자 추출로 대별된다. 1차년도 및 2차년도 시공한 시스템의 적응을 검토한 후 보완공을 수행하였다. 연못-습지 시스템의 처리수준과 연못반1

응, 연못바닥의 슬러지 분석, 습지셀 토양분석, 습지셀의 갈대와 부들의 성장, 건중량, 성분을 분석하였다. 근자연형 인공습지의 처리수준, 토양분석, 부들의 성장, 건중량, 성분을 분석하였다.

연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지의 조사분석 내용을 종합하여 설계인자 및 설계인자 값을 도출하였으며, 유역처리 연못-습지 시스템과 유역처리 근자연형 인공습지의 모델을 개발하였다. 3차년도의 연구목표 달성이 양호하였다. 본 연구의 목표 달성도는 전반적으로 양호한 수준이라고 사료된다.

제 2 절 관련분야에의 기여도

개발된 유역처리 연못-습지 시스템 모델과 근자연형 인공습지 모델은 다음과 같은 관련분야 기여도가 예상된다.

1. 기술적 기여

- 유역처리 연못-습지 시스템 및 근자연형 인공습지 모델은 담수호 수질을 개선하여 담수호 수자원관리에 기여한다.
- 유역처리 연못-습지 시스템 및 근자연형 인공습지 모델은 국내 하천 및 호소의 수질을 효율적이고 경제적으로 개선 및 보전하는데 기여한다.
- 국내 기후조건과 환경여건에 적합한 연못-습지 시스템, 연못시스템, 인공습지의 설계인자와 설계인자 값을 제공한다.
- 담수호 바닥에 침전되어 슬러지층을 형성할 유기물을 연못-습지 시스템의 연못 및 근자연형 인공습지의 개수부에 침전시켜 담수호 슬러지층 형성을 차단할 수 있다.
- 연못-습지 시스템 모델과 근자연형 인공습지 모델은 직렬형 및 병렬형으로 연결하여 사용할 수가 있어 소규모에서 대규모 담수호 수질개선에 응용할 수가 있다.
- 연못-습지 시스템 모델의 연못시스템은 하·폐수 처리 연못시스템의 처리효율을 높일 수 있는 기술을 제공한다.
- 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지 조성기술은 습지생태계의 복원에 활용이 가능하다.

- 국내의 담수호 주변에서 성장이 가능한 정수식물 식종 선발에 기여한다.

2. 경제 · 산업적 기여

- 연못-습지 시스템 모델과 근자연형 인공습지 모델은 수질을 자연생태적으로 처리하고 유역의 환경오염을 감소시킬 수 있어 경제적 이익을 가져온다.
- 담수호 수자원보전에 기여하여 간척사업의 친환경적 지속적 추진을 가능하게 한다.
- 담수호 생태계의 복원에 기여하여 담수호 환경유지관리비가 절감된다.
- 하천 및 호소 생태계의 복원에 기여하여 하천 및 호소 환경유지관리비가 절감된다.
- 연못-습지 시스템 모델과 근자연형 인공습지 모델은 국내 생태계의 기반연구에 기여한다.
- 연못-습지 시스템 모델과 근자연형 인공습지 모델 기술은 선진 관련기술의 도입에 드는 비용을 절감할 수 있으며, 온대권 국가에 수출이 가능하다.
- 연못-습지 시스템 모델과 근자연형 인공습지 모델은 다양한 친환경적 기능을 제공할 수 있어 수질정화 연못시스템과 인공습지의 사회적, 환경적 가치를 높일 수 있다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 활용방안

1. 담수호 유역 식생정화 처리기법 제공

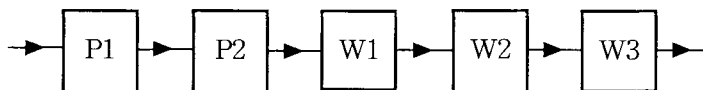
담수호 유역처리 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지 모델은 유역으로부터 담수호로 유입되는 점원뿐 아니라 비점원 오염을 자연생태적으로 정화하는 기술을 제공한다.

2. 연못시스템 및 인공습지 설계 및 시공방법 보급

수질정화 연못시스템과 근자연형 인공습지 설계 및 시공방법을 보급할 수 있다. 유입수의 성상과 지형조건에 따라 연못의 수를 증가시켜 연못시스템만으로 모델의 활용이 가능하며, 습지 셀 수를 증가시켜 인공습지만으로 모델 활용이 가능하다.

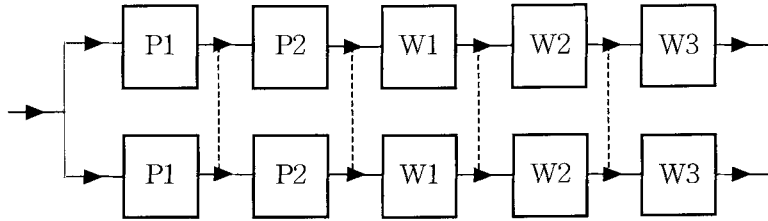
3. 중소규모 및 대형 담수호 수자원보전에 이용

유입수가 적은 중소규모 담수호는 <그림 7-1>, <그림 7-3>처럼 연못습지 시스템과 근자연형 인공습지 모델을 직렬로 사용하고, 유입수가 많은 대형 담수호의 경우 <그림 7-2>, <그림 7-4>처럼 모델을 병렬로 활용할 수 있다. 경우에 따라 연못과 습지의 크기를 확장하여 사용할 수 있다.



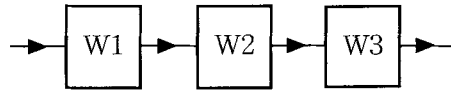
P1 : 1차연못 P2 : 2차연못
W1 : 1차습지 W2 : 2차습지 W3 : 3차습지

<그림 7-1> 직렬형 연못-습지 시스템



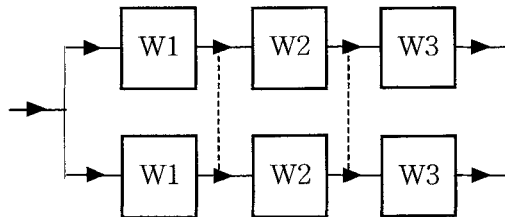
P1 : 1차연못 P2 : 2차연못
 W1 : 1차습지 W2 : 2차습지 W3 : 3차습지

<그림 7-2> 병렬형 연못-습지 시스템



W1 : 1차습지 W2 : 2차습지 W3 : 3차습지

<그림 7-3> 직렬형 근자연형 인공습지



W1 : 1차습지 W2 : 2차습지 W3 : 3차습지

<그림 7-4> 병렬형 근자연형 인공습지

4. 농업용 저수지 및 상수원 수질보전에 응용

유역처리 연못-습지 시스템 및 근자연형 인공습지 모델은 간척 담수호의 수질뿐 아니라 하천 상류에 조성된 상수원이나 농업용수공급 저수지의 수질을 생태적으로 개선하는데 응용할 수 있다.

5. 간척 개답지 유기농업 관수 및 양어 농가 소득증대

1차 및 2차 연못의 처리수를 개답지의 논과 밭에 관수하여 조류(algae)의 퇴비화를 통한 작물생산으로 농가소득을 증대할 수 있으며, 처리수를 양어에 재활용하여 농가소득을 높일 수 있다.

6. 친환경적 간척사업에 활용

담수호 유입 오염물을 자연 생태적으로 처리하여 처리수를 작물생산과 양어에 재활용할 수 있고, 연못-습지 시스템과 근자연형 인공습지는 야생동물 서식처, 낚시, 조류감상지로 활용하면 시민휴식공간 및 자연학습장으로 활용이 가능하다. 개답지역의 농경지와 연못-습지 시스템 및 근자연형 인공습지를 생태단지(ecocomplex)의 개념으로 설계하여 관광농업으로 활용이 가능하다. 간척지사업의 친환경적 접근과 최근의 환경 개발 및 보전에서 중심적 접근방법인 지속가능한 개발(sustainable development)의 개념에도 부합된다.

7. 농촌지역 및 소도읍 하수처리에 이용

본 연구를 통해 개발될 연못-습지 시스템 모델은 우리나라 농촌 혹은 소도시 하수를 처리 및 재활용하는데 이용할 수 있다. 특히 건설 및 운영에 과도한 비용이 들고, 영양염류(질소와 인), 병원균의 제거에 어려움이 수반되는 전통적인 활성오니처리장을 설치할 수 없는 농촌지역 인구 2만이하의 소도읍이나 소규모마을의 생활하수, 축산폐수 처리에 연못-습지 시스템은 적절한 기법이 될 수 있다.

제 2 절 활용계획

유역처리 연못-습지 시스템 모델과 근자연형 인공습지 모델에 관련된 특허와 신기술을 2003년에 신청할 예정이다. 연구를 통하여 얻은 기술경험과 신기술과 특허출원을 바탕으로 아래와 같은 연못-습지 시스템 모델과 근자연형 인공습지 모델 활용계획을 추진할 예정이다.

년도	활용주체	활용대상	활용방안	기술개발 및 보급
2004-2007	국가기관 (환경부, 수자원공사, 농업기반공사, 지자체 등)	- 연못-습지 시스템 모델, - 근자연형 인공습지 모델	- 담수호 및 호소 수질개선을 위한 인공습지 및 연못시스템 조성	- 담수호 및 호소 수질개선에 활용 보급 - 수질개선 저류지의 연못시스템 기법도입
	민간환경기업	- 수질정화 인공습지 설계인자 - 수질정화 연못시스템 설계인자	- 국내기후 여건에 적합한 인공습지 및 연못시스템 설계	- 인공습지 및 연못시스템 설계기술 보급
2008-2011	국가기관 (환경부, 수자원공사, 농업기반공사, 지자체 등)	- 연못-습지 시스템 모델, - 근자연형 인공습지모델	- 간척지 수질정화 인공습지의 친환경적 활용 - 인공습지를 활용한 호소 및 하천 식생 생태계 복원	- 수질정화 인공습지 친환경적 활용 보급 - 수변식생 생태계복원
	민간환경기업	- 수질정화 인공습지 개수부 설계 - 저온에서 수질정화 가능 습지식물	- 인공습지의 질소제거 질산화 촉진 - 인공습지의 정화효율 증대 - 인공습지를 활용한 호소 및 하천 식생 생태계 복원	- 인공습지 개수부 설계기술 개발 및 보급 - 인공습지 정화효율 개선 기술 - 수질정화 인공습지의 생태계복원 기술개발

제 3 절 추가연구의 필요성

국내 기후 및 담수호 여건에 적합한 연못-습지 시스템 모델과 근자연형 인공습지 시스템 모델을 응용하여 담수호 주변에 조성될 저류지를 2 - 3개의 셀로 구성된 연못시스템으로 조성하여 효율적인 저류 및 수질정화를 할 수 있는 방안의 후속 연구가 필요하다. 담수호 호안 제외지에 조성되는 수질정화 호안인공습지의 모델개발에 대한 추가 연구가 필요하며, 간척개답지에 조성되는 수질정화 인공습지의 친환경적 설계모델에 관한 후속 연구가 필요하다. 담수호 유입부의 수중에 저류지를 설치하여 담수호 유입수의 오염물질을 침전시켜 정화하는 수중 저류지 시스템의 모델개발에 관한 연구가 필요하다. 농촌마을의 생활하수와 축산폐수를 3차고도처리 수준으로 정화할 수 있는 연못-습지 시스템의 모델 연구가 필요하다.

여 백

제 6 장 연구수행중 수집된 국외 기술

연구수행중 수집한 자세한 내용은 제 2장 제 2절에 기술하였다. 1970년대 이후 미국을 중심으로 서구 선진국에서 인공습지를 이용하여 수질을 정화하는 기술을 개발해오고 있다. 북미(미국, 캐나다)에서는 1차처리된 점오염원을 2차처리수준으로 정화하기 위해서 자유수면습지를 활용하여왔으며, 근래에는 자유수면습지를 활용하여 2차처리장 방류수를 3차처리수준으로 처리하면서 친환경적 기능을 강조하여 설계하는 추세이다. 최근에는 하천수나 강우유출수를 정화하기 위해 자유수면습지를 활용하고 있다. 유럽에서는 1차처리된 점오염원을 2차처리수준으로 정화하기 위해 여과습지를 주로 활용하고 있다. 강우유출수와 같은 저농도의 유입수를 여과습지를 활용하여 정화하는 기술을 연구하고 있는 추세이다. 미국에서는 미시시피강 하구의 산소결핍현상(hypoxia)을 해소하기 위해 강우시 유역에서 발생하는 비점원 오염물 특히 질소와 인을 정화하기 위해 미시시피강 유역의 3%에 달하는 면적을 수질정화 습지로 조성하는 방안이 논의되고 있다.

인공습지 설계시 수질정화 이외에 인공습지의 비오뎀제공, 휴식공간활용, 자연학습장 제공 등 다양한 친환경적 기능을 고려하여 설계하고 있다.

미국 EPA는 1993년 미국과 캐나다에서 운영하고 있는 약 203개 수질정화 인공습지의 설계 및 운영자료를 기초로 북미수질정화습지데이터베이스(North American Treatment Wetland Database, NDBA)를 작성하였다. 이중 약 40개 자유수면습지의 설계 및 처리수준을 토대로 1999년 기술평가데이터베이스(Technology Assessment Database, TADB)가 작성되었다. 인공습지 설계 모형과 설계인자 값은 NDBA와 TADB를 기초로 작성된 것이 대부분이다.

선진국의 수질정화 인공습지의 최근 연구동향은 1) 적합한 설계인자 및 설계인자 값의 규명, 2) 유입수의 단기이동 방지와 질산화의 효율을 높이기 위한 개수부 조성, 3) 인공습지의 친환경적 활용으로 대별할 수 있다. 자유수면 인공습지의 개수부의 적정위치와 규모의 선정에 대한 연구와 인공습지의 질소제거에서 중요한 질산성질소의 정화기작에 관한 연구가 활발하다. 인공습지의 설계에 있어 생태공학(ecological engineering)의 개념을 접목하려는 연구들이 수행되고 있다. 생태공학은 인간사회와 자연환경이 공존하는 환경을 창조하는데 있어, 인간이 투여하는 에너지를 최소화하고 자연이 제공하는 서비스와 에너지를 최대한 활용하는 접근을 강조하며, 생태, 설계, 공학을 동시에 고려한다. 수질정화 인공습지를 조성하는데 있어 인간의 노력을 최소화하면서, 자연습지의 수질정화 기능을 최대한 활용하고 자연의 힘에 의해 인공

습지가 생태적으로 적응하는 설계기법에 대한 연구가 진행중이다.

미국을 중심으로한 수질정화 연못시스템의 기술은 상당한 수준에 이르고 있다. 연못시스템의 수질정화는 수많은 생물학적, 화학적, 물리적 반응에 의해서 이루어진다. 이들 반응 중 연못시스템을 설계할 때 활용하는 핵심반응은 호기상태에서 일어나는 호기성산화와 광합성산소배출, 혐기상태에서 일어나는 유기산생성과 메탄발효이며 이들에 관한 연구들이 수행되고 있다. 수질정화 연못시스템의 소요면적을 줄이고 정화효율을 높이기 위해 1차연못의 바닥에 Pit를 설치하는 기술이 연구되고 있으며, 유입수가 연못내에서 단기이동하는 현상을 방지하기 위한 기술에 관심이 높아지고 있다.

제 7 장 참고문헌

1. Adey, W.H., Luckett, C., Jensen, K., 1993, Phosphorus removal from natural waters using controlled algal production. *Rest. Ecol.* 1: 29~39.
2. Allen, G.H. and Gearheart, R.A., 1978, *Arcata Integrated Wastewater Treatment, Reclamation, and Salmon Ranching Project*, Presented at the 1978 Winter Meeting, American Society of Agricultural Engineering, St. Joseph, Michigan.
3. Bachand, P.A.M, Horne, A.J., 2000, Denitrification in constructed free-water surface wetlands. I. Very high nitrate removal rates in a macrocosm study. *Ecol. Eng.*, 14, 9-15.
4. Bartlett, M.S., Brown, L.C., Hanes, N.B. and Nickerson, N.H., 1979, Denitrification in freshwater wetland soil. *J. Environ. Qual.* 8, 460-464.
5. Bingham, D.R., 1994, Wetlands for stormwater treatment, Kent, D.M.(ed.), *Applied Wetlands science and technology*, Publishers Lewis, pp. 244-262.
6. Brix, H. and Schierup, H., 1989, The use of aquatic macrophytes in water pollution control. *Ambio* 18, pp. 100-107.
7. Broadbent, F.E. and Clark, F.E., 1965, Denitrification. *Agronomy* 10,p. 344.
8. Brodrick, S.J., Cullen, P. and Maher, W., 1988, Denitrification in a natural wetland receiving secondary treated effluent. *Water Res.* 22: 431~439
9. Broome, S.W., 1990, Creation and restoration of tidal wetlands of the Southeastern. United States. pp. 37-72 in Kusler, J.A. and Kentula, M.E. (eds.) *Wetland Creation and Restoration: the Status of the Science*. Island Press, Washington, D.C.
10. Chabrek, R.H., 1990, Creation, restoration, and enhancement of marshes of the north central Gulf Coast. pp. 125-142 in Kusler, J.A. and Kentula, M.E. (eds.) *Wetland Creation and Restoration: the Status of the Science*. Island Press, Washington, D.C.
11. CH2MHill, 1998, North American Treatment Wetland Database, Version 2 Draft. Prepared for the United States Environmental Protection Agency (EPA) Environment Technology Initiative (ETI).
12. Cooke, J.G., 1994, Nutrient transformations in a natural wetland receiving

- sewage effluent and the implications for waste treatment. *Water Sci. Technol.* 29, 209-217.
13. Corbitt, R.A. and Bowen P.T., 1994, Constructed wetlands for wastewater treatment, Kent, D.M.(ed.), *Applied Wetlands science and technology*, Publishers Lewis, pp. 221-241.
 14. Costello, C.J., 1991, Wetlands treatment of dairy animal wastes in Irish drumlin landscape. pp. 702-709 In *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Ed. D.A. Hammer. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan.
 15. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1983a, *Design Manual: Municipal Wastewater Stabilization Ponds*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-625/1-83-015, Washington, D.C. pp.2-7.
 16. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1983b, *Freshwater Wetlands for wastewater management, environmental impact statement, phase 1 report*. EPA 904/9-83-107, Region 4. Atlanta, Georgia.
 17. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1988, *Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment*. EPA/625/1-88/022, Cincinnati Ohio. P. 241.
 18. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1989, *Nonpoint Sources Agenda for the future*.
 19. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1990, *Water Quality Standards for Wetlands-National Guidance*, Washington, DC.
 20. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1999, *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio.
 21. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1999, *Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment*, Office of water.
 22. Erwin, K.L., 1991, *An evaluation of wetland mitigation in the South Florida Water Management District*. Report to the South Florida Water Management District, Contract No. C89-0082-A1.
 23. Faulker, S. P. and C. J. Richardson., 1989, Physical and Chemical Characteristics of Freshwater Wetland Soils in Hammer, D.A. (ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*,

- Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan. 41-72.
24. Gloyna, E.F. and L.F., Tischler, 1979, Design of Waste Stabilization Pond Systems, *Progress in Water Technology*, II(4/5):47-70
 25. Gosselink, J.G., Odum, G.E., and Pope, R.M., 1974, *The Value of the Tidal Marsh*, Center for Wetland Resource, Louisiana State University. Baton Rough.
 26. Gover, N., 1993, Constructed wetlands operate despite winter chill, *Small Flows* 7: 1~5.
 27. Green F. B., L. Bernstone, T. J. Lundquist, R. B. Tresan, and W. J. Oswald. 1995, Methane Fermentation, Submerged Gas Collection, and The Fate of Carbon in Advanced Integrated Wastewater Pond Systems, *Wat. Sci. Tech.*, 31(12):55-65.
 28. Hammer, R., 1986, Near Coastal Waters: Towards a New Consensus, in *Estuary and Coastal Management: Tools of the Trade*, McDonald, K.L. (ed.), Proceedings of Tenth National Conference, The Coastal Society, Bethesda, Maryland.
 29. Hammer, D.A., Kadlec, R.H., 1983, Design principles for wetland treatment systems, US EPA, Project Summary EPA-600:52-83-026. US Government Printing Office, Washington, DC.
 30. Hammer, D.A., (ed.), 1989, *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*. Lewis Puvlishers, Inc., Chelsea, Michigan.
 31. Hochheimer, J., Yates, C. and Cavacas, A., 1991, *Constructed Wetlands as Nonpoint Source Control Practice*. Draft Report prepared for U.S.EPA.
 32. Howard-Williams, C., 1985, Cycling and retention of nitrogen and phosphorus in wetlands: a theoretical and applied perspective. *Freshwater Biol.* 15: 391~431.
 33. Jackson, J., 1989, Man-made wetlands for wastewater treatment: Two case studies. pp. 574-580 In *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Hammer, D. A. (ed.), Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Midhigan.
 34. Kadlec, R.H. Jr., 1989, Wetlands for treatment of municipal wastewater. In: Majumdar, S.K., Brooks, R.P., Brenner, F.J., Tiner, R.W. Jr. (Eds.), *Wetlands Ecology and Conservation: Emphasis in Pennsylvania*. The Pennsylvania Academy of Science, PA, pp. 300~314.
 35. Kadlec, R.H., Knight, R., 1996, *Treatment Wetlands*. CRC Press, Boca Raton,

- FL. Ku, W.C., DiGiano, F.A., Feng, T.H., 1978. Factors affecting phosphate adsorption equilibria in lake sediments. *Water Res.* 12, 1069- 1074.
36. Kadlec, R., Knight, R., C., 1996, *Treatment Wetlands*. CRC Press, Boca Raton, FL. Kessler, E., Jansson, M., eds. 1994. Wetlands and lakes as nitrogen traps. Special Issue of *Ambio* 23, 319-386.
37. Kent, D.M., 1994, Monitoring of wetlands, Kent, D.M.(ed.), *Applied Wetlands science and technology*, Publishers Lewis, pp. 167-191.
38. Kent, D.M., R.J, Reimold, J. Kely and C. Tammi., 1992, *Coupling wetlands structure and function: Developing a condition index for wetlands monitoring*. pp. 559-570 In *Ecological Indicators Volume 1*. McKenzie, D.H., D.E. Hyatt and V. Janet McDonald (Eds.) Elsevier Science Publishers Ltd., Essex, England.
39. Lewis, R.L., 1994, Enhancement, restoration and creation of coastal wetlands, Kent Technology Publishers Lewis, pp 193-219.
40. Lewis, R.R., · 1990, Wetlands restoration/creation/enhancement terminology: suggestions for standardization. pp. 417-422 in Kusler, J.A. and M.E Kentula (eds.) *Wetland Creation and Restoration : the Status of the Science*. Island Press, Washington, D.C.
41. Luise, D., 1995, *A handbook of constructed wetlands*, Washington, D.C.
42. Mann, R.A., 1990, Phosphorus removal by constructed wetlands: substratum adsorption. In: Cooper, P.F., Findlater, B.C. Jr. (Eds.), *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*. Pergamon Press, Oxford, pp. 97~105.
43. Marais, G.V.R., 1970, *Dynamic Behavior of Oxidation Ponds*, in *Proceeding of 2nd International Symposium for Waste Treatment Lagoons*, Kansas City, Missouri, pp.15-46 .
44. Middlebrooks, E.J., et al., 1982, *Wastewater Stabilization Lagoon Design, Performance and Upgrading*, Macmillan Publishing Co., New York, pp. 1-12.
45. Mitsch, W.J., Gosselink, J.G., 2000, *Wetlands*, 3rd ed. Jone Wiley & Sons, New York.
46. Mitsch, W.J., Horne, Alex J., Nairn, R.W.C., 2000, Nitrogen and phosphorus retention in wetlands-ecological approaches to solving excess nutrient problems, *Ecol. Eng.* 14, 1-7.
47. Nichols, D.S., 1983, Capacity of natural wetlands to remove nutrients from

- wastewater. J. Water Poll. Control Fed. 55: 495~504.
48. Oswald, W.J., 1968, Advances in Anaerobic Pond System Designs in *Advances in Water Quality Improvement*, E.F. Gloyna and W.W. Jr. Eckenfelder, Eds., University of Texas Press, Austin. 409-426 pp.
 49. Oswald, W.J., 1988a, *A Syllabus on Waste Pond Fundamentals*, University of California, Berkeley, Spring 1988, BEHS 259, pp.66-68.
 50. Oswald, W.J., 1988b, Micro-Algae and Waste Water Treatment, in *Micro-Algal Biotechnology*, M.A. Borowitzka and L.J. Borowitzka, Eds., Cambridge University Press, 357-414 pp.
 51. Oswald, W. J., F. B. Green, T. J. Lundquist. 1994. Performance of Methane Fermentation Pits in Advanced Integrated Wastewater Pond Systems, *Wat. Sci. Tech.*, 30(12):287-295.
 52. Parker, C.D., 1979, *Biological Mechanism in Lagoons*, Progress in Water Technology, II(4/5): 71-85 pp.
 53. Phipps, R.G. and Crumpton, W.G., 1994, Factors affecting nitrogen loss in experimental wetlands with different hydrologic loads. *Ecol. Eng.* 3, 399-408.
 54. Richardson, C.J., 1985, Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands. *Science* 228: 1424~1426.
 55. Richardson, C.J., Craft, C.B., 1993, Efficient phosphorus retention in wetlands: Fact or fiction? In: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 271~282
 56. Reilly, J.F., Horne, A.J. and Miller, C.D., 2000, Nitrate removal from a drinking water supply with large free-surface constructed wetlands prior to groundwater recharge. *Ecol. Eng.* 14, 33-47.
 57. Richardson, C.J., 1985, Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands. *Science* 228:1424~1426.
 58. Satoris, J.J., Thullen, J.S., Barber, L.B., Salas, D.E., 2000, Investigation of nitrogen transformations in a southern California constructed wastewater treatment wetland, *Ecol. Eng.* 14, 33-48.
 59. Seitzinger, S.P., 1988, Denitrification in freshwater and coastal marine systems: ecological and geochemical significance. *Limnol. Oceanogr.* 33, pp. 702-724.
 60. Shisler, J.K., 1990, Creation and restoration of coastal wetlands of the Northeastern United States. pp. 143-170 in *Wetland Creation and Restoration: the Status of the Science*. Kusler, J.A. and Kentula, M.E, (eds.) Island Press,

Washington, D.C.

61. Shuval, H., 1988, Rationale for Engelberg Guidelines, *IRCWD (International Reference Center for Waste Disposal) News*, 24/25: 18-19.
62. Spiels, D.J. and Mitsch, W.J., 2000, The effects of seasons and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in constructed wetlands: a comparison of low- and high-nutrient riverine systems, *Eco. Eng.* 14: 77~91.
63. Stengel, E., Carduck, W. and Jebsen, C., 1987, Evidence for denitrification in artificial wetlands. In: Reddy, K.R. and Smith, W.H. Editors, 1987. *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery* Magnolia Publishing, Orlando, FL, 543-550.
64. Tchobanoglous, G. & Burton, F.L., 1991, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, McGraw-Hill, New York.
65. Watson, J.T. and Hobson, J.A., 1988, Hydraulic design considerations and control structures for constructed wetlands for wastewater treatment. In: Hammer, D.A. Editor, 1988. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial, and Agricultural* Lewis, Chelsea, MI, 379-392.
66. WHO. 1987. *Wastewater Stabilization Ponds: Principles of Planning & Practice*, Regional Office for the Eastern Mediterranean Alexandria, WHO EMRO Technical Publication No. 10, World Health Organization.
67. Wu, X., Mitsch, W.J., 1998, Spatial and temporal patterns of algae in newly constructed freshwater wetlands. *Wetlands* 18: 9~20.
69. Yang, H., 1992, *Ecological Design of Estuarine Environment for a Sustainable Urban Ecosystem*, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley. pp. 103-167.
70. Yang, L., H. T. Chang and M. L. Huang. 2001. Nutrient removal in gravel- and soil-based wetland microcosms with and without vegetation, *Ecological Engineering*, 18:91- 105.
71. Zentner, J., 1994, Enhancement, restoration and creation of freshwater wetlands, in *Applied Wetlands science and technology*, Kent, D.M.(ed.), Publishers Lewis, pp. 127-166.
72. Zhu, T. and F.J. Sikora., 1994, Ammonium and nitrate removal in vegetated and unvegetated gravel bed microcosm wetlands. In: Proc. 4th Int. Conf. on Wetland Systems for Water Pollution Control. Guangzhou, China, 355-366.
73. 양홍모, 1995a, 하수처리 및 재활용 연못시스템의 국내응용, 대한상하수도학회지,

- 9(2): 108-117.
74. 양홍모, 1995b, 하구환경의 생태적 설계, 한국조경학회지, 23(2): 167-181.
75. 양홍모, 1997, 축산폐수처리 및 재활용 연못시스템 개발, 농림부.
76. 양홍모, 1998, 생태적 축산폐수 처리 및 재활용 연못시스템의 폐수처리기준, 한국환경농학회지, 19(1): 70-75.
77. 양홍모, 1999a, 수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리 인공습지 및 연못-습지 시스템, 한국수자원학회지32(5):111-123
78. 양홍모, 1999b, 농촌지역 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리 및 재활용 연못시스템과 인공습지, 21세기 친환경지역농업 개발시스템에 관한 심포지엄, 한국농업시스템학회
79. 환경부, 2000, 수질오염공정시험방법.
80. 양홍모, 2001, 담수호 수자원보전을 위한 수질정화 연못-습지 시스템의 초기처리수준. 한국환경복원녹화학회지 13: 64~71.
81. 양홍모, 2002, 담수호 수자원보전을 위한 수질정화 연못-습지 시스템의 초기처리 수준. 한국환경복원녹화학회지 13, 64-71.
82. 환경부. 2000. 수질오염공정시험방법.
83. 河川環境管理財團, 2000, 植生淨化施設の現狀と事例, 河川環境總合研究所, Tokoy, Japan.