

생장기와 동절기의 인공습지 오수처리 성능

Wetland Performance for Wastewater Treatment in Growing and Winter Seasons

윤 춘 경* · 권 순 국** · 함 종 화*
Yoon, Chun Gyeong · Kwun, Soon Kuk · Ham, Jong Hwa

Abstract

Field experiment of constructed wetland for rural wastewater treatment was performed from July 1998 to April 1999 including winter to examine the seasonal effect on the wetland performance. The system worked without freezing even under -10°C of air temperature as long as wastewater was flowing. BOD removal rates varied in similar pattern as the air temperature, and winter performance was relatively lower than that in the growing season. However, removing performance during winter was still significant, and BOD removal rates were almost the same as in the growing season. SS removal rate was relatively less affected by temperature, but lower decay rate during the winter can result in accumulation of the SS in the system, which releases constituents in the next spring and can affect whole system performance. The winter removal rates of nutrients like T-N and T-P were decreased about half compared to the growing season and low temperature. To maintain stabilized wetland performance including winter time, supplying minimum heating for plants could be an alternative in field application. Experimental data was compared with NADB (North American Wetlands for Water Quality treatment database), and general performance of the system was within the reasonable range. The pollutant loading and effluent concentration of the experimental system were in high margin. Base on the experiment and database, the required effluent water quality could be achieved if loading rate adjusted as illustrated in the database.

I. 서 론

문명의 발달과 인구의 증가로 인하여 자연계의 물질순환이 토양-작물-인간-토양으로의 이동경로를 갖는 닫힌순환에서 토양-작물-인간-강-바다와

같은 열린순환으로 변화되었으며, 이러한 물질순환의 변화는 환경적인 측면뿐 아니라 공중보건이라는 측면에서도 문제시되고 있다.

우리 나라의 오폐수처리 대책은 대도시 위주로 추진되어 왔으며, 그동안 도외시 되었던 농촌의

* 건국대학교 농업생명과학대학
** 서울대학교 농업생명과학대학

키워드 : 인공습지, 오수처리, 동절기 온도영향, BOD, SS, 영양물질, 습지처리 database

소규모 마을은 주민의 생활수준향상과 수세화장설의 보급, 축산시설의 증가 등으로 오폐수발생량이 급격히 증가하고 있으나, 이에 대한 적절한 처리 대책이 확립되지 않아 농촌지역 수질오염 문제가 점점 악화되고 있는 실정이다.¹⁾

도시지역과 달리 농촌지역은 마을이 넓은 지역에 산재되어 있으므로 하수도 또는 파이프라인으로 오폐수를 한곳으로 차집하여 처리하는 종말처리장의 도입은 처리효율이나 에너지 이용 효율면에서 불합리하다는 특성을 가지고 있다.²⁾ 농촌지역의 오수처리시설은 도시형 시설과는 달리 소규모 분산형이라는 특징을 가지고 있으므로, 전문기술자의 상시점검이 어렵고, 마을 주민의 일상관리만으로 시설이 유지되어야 하는 경우가 많다. 또한, 농촌지역의 경우 농경지나 산림 등은 오염물질에 대해 풍부한 자연정화기능을 보유하고 있으므로 이를 적절히 활용하면 지역특성에 맞는 처리시설의 운영도 가능할 것이다.³⁾

하수의 자연정화처리란 토양, 식물, 또는 미생물과 같은 자연요소들의 자정능력을 이용하여 하수를 처리하는 방법을 가리킨다. 이러한 방법은 기존의 도시형 종합하수처리시설에 비해 에너지소모가 적고 유지관리가 용이하여 소요경비가 낮으며 슬러지 발생량이 적어서 2차오염의 우려가 적다. 이러한 방법들은 농촌지역의 소규모 마을이나 사용가능한 공간이 상대적으로 넓은 지역에 유리하며, 옛날부터 사용해오던 방법으로는 침출지, 안정지, 토양처리 등이 있다. 근래에 개발되고 있는 방법으로는 수생식물을 이용한 수증처리와 추수(抽水)식물을 이용한 습지처리 등이 있다. 습지처리는 자연습지의 자정능력에 대한 관찰, 수증처리와 토양 처리 등의 경험들이 혼합된 효과적인 방법이다.⁴⁾

습지는 토양과 식물, 그리고 미생물 등에 의한 오수정화가 효율적으로 이루어지는 처리시설이다. 습지처리는 일반적으로 불투수층 바닥에 토양, 골재, 또는 다른 재료를 넣어서 추수(抽水)식물을 지지할 수 있도록 하여 이 사이를 하수가 통과하게 하는데, 자유수면형(free water surface, FWS)과 지하흐름형(subsurface flow system, SFS)이 있

다. FWS에서는 수면이 대기에 노출되어 수면을 통한 재폭기가 중요한 산소공급원이며, SFS에서는 수면이 투수성 재료의 표면과 같거나 낮아서 토양의 공극이나 식물의 뿌리에 의해 산소가 공급된다. 습지에 생육하고 있는 대부분의 식물들은 보통의 육상식물과는 달리 통기 조직이 발달되어 뿌리 활동에 필요한 산소를 기공을 통해 흡수하고 있다. 이와 같이 뿌리 부분에 산소를 공급하므로 뿌리 부분은 호기성 상태가 유지되어 호기성 미생물들의 좋은 서식처가 된다. 여기에 서식하는 호기성 미생물들은 오수 중에 있는 영양물질을 흡수·분해하여 오수를 정화하게 되는 것이다. 습지에 유입된 오수중의 오염성분 가운데 입자가 큰 부유물질은 여과되고, 용해상태의 성분은 토양입자나 식물의 뿌리에 흡착되며, 영양물질들은 처리시설내에서 생육하는 식물에 의해 직접 흡수되고, 유기물은 토양이나 수증의 미생물 등에 의해 분해되는 정화과정을 거쳐 처리된다.^{3,4)}

건국대학교에서는 농촌지역의 오수처리에 적용가능성을 검토하기 위하여 인공습지 시작품을 제작하여 2년 6개월 동안 현장처리실험을 수행해오고 있다. 본 연구에서는 식물의 생장기와 동절기의 인공습지 처리성능을 비교하기 위하여, 고정된 수리부하율을 유지하고 현장처리 실험한 1998년 7월부터 1999년 4월까지의 결과를 분석하였다. 또한 이 결과들을 다른 지역의 인공습지 처리결과의 데이터베이스와 비교하면서 부하량의 적정성도 검토하고자 한다.

II. 재료 및 방법

실험에 사용된 오수처리시설은 건국대학교 농업생명과학대학 별관에서 나오는 오수를 이용하여 실시하였다. 정화조의 3단 처리조의 맨 끝 하류측 처리조에서 하수관거로 유출되기 직전에 양수하여 Fig. 1과 같이 처리시설의 저류조에 유입시킨 다음, 저류조 하단에 설치된 유출구를 통하여 자연유하시켰다. 저류조의 유출구를 나온 오수는 관로를 통하여 처리조에 유입되었으며, 유량은 저류조

Table 1. Analytical methods used for constituents

Constituents	Methods*	Remark
DO (dissolved oxygen)	SM 4500-O C	Azide Modification Method
BOD(biochemical oxygen demand)	SM 5210-B	5-day BOD test
COD(chemical oxygen demand)	SM 5220-B	K ₂ Cr ₂ O ₇ used
SS (suspended solids)	SM 2540-D	
T-N(total nitrogen)		
Organic nitrogen	SM 4500-N _{org} -C	
NH ₃ -N	SM 4500-NH ₃ -D	BÜCHI 435와 B-316
NO ₂ ⁻ -N	SM 4110-B	Dionex DX-100
NO ₃ ⁻ -N	SM 4110-B	Dionex DX-100
T-P (total phosphorus)	SM 4500-P E	HP8452A Spectrophotometer

*SM: Standard Methods.

의 유출구와 처리조의 유입구에 밸브를 설치하여 조절하였다.

처리조는 지하흐름형(SFS, subsurface flow system)으로서 모래를 채운 후 갈대를 심고, 한쪽에

서 오수를 유입시키면 갈대의 뿌리와 모래로 이루어진 처리조를 수평으로 통과하면서 흡착, 여과, 생분해 등의 자연처리가 이루어지는 시스템이다. 처리조는 Fig. 1과 같이 2m(폭)×9m(길이)×1m(높이)의 concrete box에 모래를 60cm 높이로 채운 후 갈대를 심었다. 0.5m씩의 유입부와 유출부의 자갈층을 제외하면 실제 처리에 사용되는 부분은 폭 2m×길이 8m×높이 0.6m에 채워진 모래층으로 표면적은 약 16m²이다.

유출수의 시료채취는 유입수를 채취한 후 이론적인 체류기간을 지나서 유출구에서 채취하여 유입수와 유출수사이의 농도를 비교함으로써 처리효과를 분석하였다. 수질분석방법은 Standard methods¹⁰⁾에 의해 실시하였는데 Table 1에 요약되어 있다.

III. 결과 및 고찰

1. 동절기와 성장기의 부하량과 제거율 비교

수리 부하율이 동일한 1998년 7월 이후의 자료와 동절기의 자료를 비교한 결과는 Table 2와 같다. 여기에서는 성장기는 3월부터 11월까지 그리고, 동절기는 12월부터 이듬해 2월까지로 구분하

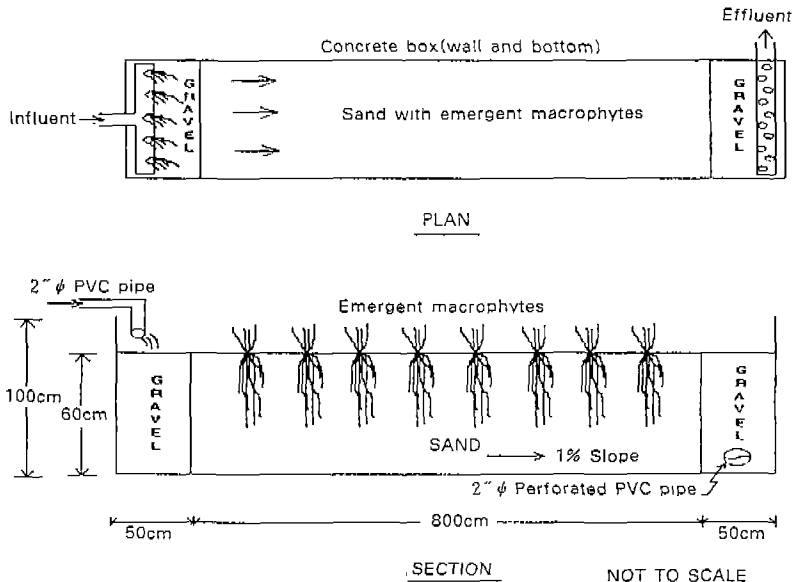


Fig. 1. Schematic plan and section of the constructed wetland system

Table 2. Comparison of performances in growing season and winter

Component		Values	Growing season	Winter
Hydraulic loading(cm/day)			6.25	6.25
Hydraulic retention time(days)			3.50	3.50
BOD	Loading rate(kg/ha/day)		93.29	136.50
	Avg. removal Rate(%)		77.7	50.9
	Amount removed (kg/ha/day)		72.49	69.48
SS	Loading rate(kg/ha/day)		46.43	52.86
	Avg. removal rate(%)		72.7	62.8
	Amount removed (kg/ha/day)		33.75	33.20
T-P	Loading rate(kg/ha/day)		8.44	9.87
	Avg. removal rate(%)		48.0	20.6
	Amount removed (kg/ha/day)		4.05	2.03
T-N	Loading rate(kg/ha/day)		77.41	92.50
	Avg. removal rate(%)		19.2	11.0
	Amount removed (kg/ha/day)		14.86	10.18

었다. 동절기에는 갈대의 생장이 멈추고 미생물의 활동이 저조해서 처리가 거의 이루어지지 않을 거라는 예상과는 달리 표에서와 같이 상당량의 제거율을 나타내었다.

BOD에 있어서 유입수의 BOD부하가 93.29kg/ha/day에서 136.50kg/ha/day로 동절기에 약 1.5배 높았으며, 제거율은 77.7%에서 50.9%로 동절기에 상대적으로 저조하였다. 그러나, 총 제거량으로 환산해 보면 생장기의 72.49kg/ha/day와 동절기의 69.48kg/ha/day 사이에는 큰 차이가 없으며, 이는 갈대의 고사와 미생물의 활동 저하를 고려한다면 상당히 높은 수치이다. 동절기 처리의 대부분은 모래에 의한 여과와 제한적인 미생물 분해에 의해 일어난다. 그러므로 동절기에는 BOD부하를 감소시키거나 수리부하율을 줄여서 체류기간을 연장시킨다면 원하는 정도의 유출수 수질유지가 가능할

것으로 판단된다. 또한 습지에 유입되기 전에 저류지를 이용하여 SS를 침전시키는 전처리가 이루어진다면 전체적인 처리효율을 증진시킬 수 있으며, 겨울동안에도 오수처리에 지속적으로 적용될 수 있을 것이다. 특히 겨울동안에는 생활하수의 발생량이 상대적으로 낮을 수 있다는 점을 고려하면, 인공습지의 지속적 운영도 가능할 것으로 생각된다.

SS에 있어서는 유입수의 SS부하가 46.43kg/ha/day에서 52.86kg/ha/day로 동절기에 증가하였는데 제거율은 72.7%와 62.8%로 동절기에 약간 감소하였다. 그러나, 총제거량으로 환산해 보면 생장기에는 33.75kg/ha/day이고 동절기에는 33.20kg/ha/day로 변화가 거의 없어서, SS의 제거는 모래에 의한 여과가 주요과정으로서 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 여과된 오염물질들이 분해되는 양보다 많아지면, 동절기동안 처리조에 누적되어 분해에 분해되면서 생장기가 시작되어도 상당기간 처리수의 농도가 높을 수 있다.

T-P는 부하가 8.44kg/ha/day에서 9.87kg/ha/day로 동절기에 약간 증가하였지만 제거율은 48.0%에서 20.6%로 절반이상 감소하였다. 이는 T-P의 주된 처리기능은 식물에 의한 흡수, 토양층의 여과 및 흡착, 미생물에 의한 분해인데, 갈대의 고사로 식물에 의한 흡수는 기대할 수 없으며, 온도의 저하로 미생물에 의한 분해도 저조하였기 때문으로 추정되며, 20.6%의 제거율은 거의 대부분 SS의 제거로 인한 입자성 인의 제거 결과로 판단된다. 처리조내에 누적되어있던 인은 포화상태를 초과할 경우에 역으로 인을 방출하여 전체적인 인의 제거율이 저조해지는 결과를 초래할 수 있다.

T-N은 부하가 77.41kg/ha/day에서 92.50kg/ha/day로 동절기에 부하가 증가하였고, 제거율은 생장기에도 19.2%로 낮았으나 동절기에는 11.0%로 더욱 감소하였다. 동절기 동안에 유기질소의 제거율은 57.6%로 높았는데, 대부분 고형성분 유기질소의 여과에 의해 이루어졌다고 생각되며, 이들은 생장기가 시작되어도 상당기간 용출되어 전체적인 제거율을 저하시킬 수 있다.

2. 동절기와 성장기의 수질과 제거율

Table 3와 Table 4에서 오수의 온도는 대기온도의 영향을 받아서 성장기에는 18~19°C이었다. 그런데, 주목할 것은 동절기의 수온이 7~9°C이었다는 점이며, 이것은 습지 내부의 온도가 7~9°C를 유지하고 있음을 의미하는 것으로서, 이 정도의 온도면 저조하지만 미생물 활동이 이루어 질 수 있는 온도라는 점이다. 유입관 및 펌프의 동결을 방지하기 위해 보온 덮개를 한 것 이외에는 처리조에 다른 추가적인 보온시설이 갖추어지지 않은 상태이었다. 본 실험의 경우 1999년 1월 중순경 펌프의 이상으로 오수 유입이 중단돼 유입관이 며칠간 동결한 경우를 제외하고는 유입관이 동결하지 않고 계속적으로 오수가 유입되었다. 동절기에 낮은 온도가 일정기간 지속되더라도 습지로 유입

Table 3. Summary of the wetland performance in winter

Constituents		Mini-mum	Maxi-mum	Ave- rage	Avg. Removal Rate (%)
Temp. (°C)	Influent	3	15	9	-
	Effluent	2	11	7	
pH	Influent	7.6	9.0	8.4	-
	Effluent	7.4	8.1	7.6	
DO (mg/L)	Influent	0.0	3.0	1.3	-
	Effluent	0	3.4	1.8	
BOD (mg/L)	Influent	102.0	345.0	191.1	50.9
	Effluent	44.0	188.6	94.7	
COD (mg/L)	Influent	145.0	416.7	271.9	44.5
	Effluent	67.4	274.6	141.7	
SS (mg/L)	Influent	23	146	74	62.8
	Effluent	2	47	26	
T-P (mg/L)	Influent	6.20	31.19	13.82	20.6
	Effluent	5.96	22.41	10.60	
T-N (mg/L)	Influent	53.61	198.85	129.50	11.0
	Effluent	53.20	152.13	110.17	

Table 4. Summary of the wetland performance in growing season

Constituents		Mini-mum	Maxi-mum	Ave- rage	Avg. Removal Rate (%)
Temp. (°C)	Influent	7	29	19	-
	Effluent	7	27	18	
pH	Influent	7.3	8.9	8.0	-
	Effluent	6.7	7.7	7.2	
DO (mg/L)	Influent	0.0	2.7	0.3	-
	Effluent	0.0	4.1	2.1	
BOD (mg/L)	Influent	31.7	267.3	130.6	77.7
	Effluent	6.0	104.0	31.9	
COD (mg/L)	Influent	52.8	423.0	221.7	71.6
	Effluent	9.8	170.0	60.4	
SS (mg/L)	Influent	32	143	65	72.7
	Effluent	0	53	18	
T-P (mg/L)	Influent	6.05	20.67	11.82	48.0
	Effluent	0.80	16.59	6.00	
T-N (mg/L)	Influent	20.01	201.45	108.37	19.2
	Effluent	27.44	180.11	84.94	

되는 관에 오수가 흐르는 한 오수관은 동결하지 않았고 지속적인 습지운영이 가능하였다.

또한 표면에 얼음층이 형성되면 내부에는 일종의 보온작용을 하지만, NH₃-N의 휘발을 제한하기 때문에 얼음층이 형성된 이후에는 얼음층 상부의 갈대를 잘라주어 갈대의 통기조직을 통한 가스의 교환이 이루어지도록 관리하는 것이 유리할 것이다.⁵⁾

pH의 경우는 성장기의 평균 유출수의 pH가 평균 7.2이고 반면에 동절기 동안의 평균 유출수의 pH가 7.6으로서 큰 변화는 없었으며, 모두 유입수보다 약간 낮아져 중성에 가깝게 변화하였다.

DO의 경우는 유출수 DO가 성장기에 평균 2.1mg/L인 반면에 동절기에는 평균 1.3mg/L으로서 상대

적으로 낮았다. 이는 동절기에는 갈대의 호흡작용으로 인한 뿌리 주위에 산소공급이 중단되었기 때문으로 생각된다. 그래도 유출수가 호기성을 유지할 수 있었던 원인은 온도가 낮아서 대기중의 산소가 보다 쉽게 물속에 녹아져 들어갈 수 있고, 산소를 소모하는 미생물들의 활동이 저조하여 유출수에서 평균 1.3mg/L 정도의 DO를 유지할 수 있었다고 생각된다.³⁾

유입수의 평균 BOD농도는 성장기에 130.6mg/L인 반면에 동절기에는 191.1mg/L로 약 1.5배 정도 높았다. 이는 동절기에 물의 사용이 줄어들어 잡배수에 의한 오수의 희석작용이 감소하여 전반적인 오수의 농도가 성장기에 비해 높았던 것으로 생각된다. 유출수의 평균 BOD농도는 성장기에 31.9mg/L를 나타낸 반면에 동절기에는 94.7mg/L로 높은 농도를 나타내었다. 그러나, 동절기 유입수의 농도가 더 높다는 것을 고려하면 동절기 BOD의 제거율 50.9%는 아직도 상당한 수치이다. 비록 동절기 제거율이 50.9%로 비교적 높게 나왔으나 유출수의 농도가 94.7mg/L로 높아서, 이는 방류수 수질기준인 20mg/L를 크게 초과하므로 수계로 방류하기에는 어렵다. 따라서 추가처리를 하거나, 저류지에 동절기 동안 저류시키거나, 또는 주변 농경지등에 살포하는 등 보완대책 수립이 필요하다.

COD의 농도도 BOD와 유사한 경향을 보이는데, 유출수의 평균농도가 성장기에는 60.4mg/L의 농도를 나타내는 반면에 동절기에는 141.7mg/L의 농도로 매우 높았다. BOD/COD의 비율을 전체 유기물 중 분해성 유기물이 차지하는 비율이라면, 성장기에는 55%인 반면에 동절기에는 67%로 높은 수치를 나타내었다.³⁾ 이는 동절기에 온도 저하로 미생물의 활동이 저하되어, 분해성 유기물의 감소량이 저하되어 유출수에 상대적으로 많은 분해성유기물이 잔류하였기 때문으로 판단된다.

SS의 유출수 평균농도는 성장기에 18mg/L이던 것이 동절기에는 26mg/L으로 다소 높아졌지만, 동절기 유입수의 SS농도가 성장기의 것보다 높다는 것을 고려한다면 처리율이 크게 낮아진 것은

아니다. SS의 제거율을 보면 72.7%이던 것이 동절기에는 62.8%로 약간 감소하였으며, 이것은 SS 제거율이 BOD와 COD 등에 비하여 온도에 영향을 상대적으로 적게 받음을 의미한다.

T-P의 경우 유출수의 평균농도가 6.00mg/L이던 것이 동절기에는 10.66mg/L으로 증가하였으며, 제거율은 48.0%였던 것이 20.6%로 크게 감소하였다. 이는 식물에 의한 흡수와 미생물에 의한 분해가 거의 이루어지지 않았고, 모래층에 의한 여과 및 흡착에 의한 제거가 대부분이었던 것으로 판단된다.

T-N의 경우도 T-P와 마찬가지로 유출수의 평균농도가 84.94mg/L이었던 것이 동절기에는 110.17mg/L로 크게 증가하였다. 제거율면에서 T-P보다 T-N이 낮은 이유는 T-N중 80% 이상을 NH₃-N이 차지하였는데, 모래의 여과효과로는 NH₃-N을 제대로 제거하지는 못하고 유기질소를 주로 제거하기 때문이다. 실제로 표에서는 나타나 있지 않지만 동절기에 있어서 유기질소만의 제거율을 본다면 57.6%로 상당히 높은 수치를 나타내었다.

3. 온도와 제거율

유출수의 수온은 대기의 온도와 밀접한 관계가 있다. Fig. 2에서 보듯이 대기의 온도와 수온은 동절기를 제외하고는 거의 일치한다. 하지만 동절기에는 기온이 영하로 떨어지더라도 유출수의 수온은 7~9°C를 유지하였는데, 이유는 유입되는 오수의 온도가 지하로 흐르면서 기온의 영향을 덜 받으며 인공습지 표면의 얼음층이 일종의 보온작용을 하기 때문에 수온이 영상으로 일정 온도를 유지하는 것으로 생각된다. 따라서 동절기에 대기의 온도가 낮아서 갈대의 성장에 의한 제거율은 기대할 수 없으나, 처리조내의 여과와 성장기에 비하여 상대적으로 낮지만 미생물에 의한 오염물질 제거는 어느 정도는 기대할 수 있다. 이는 인공습지에 추가적인 보온시설이 이루어지지 않은 상태의 결과로서, 만약 최소한의 보온시설이 갖추어

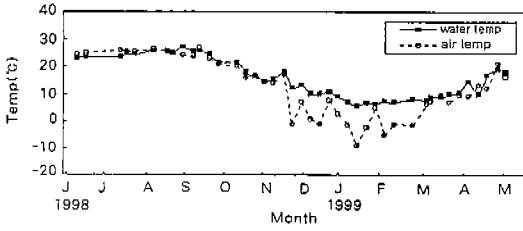


Fig. 2. Temperatures of the wetland system

갈대 성장을 유지한다면 활발한 미생물의 활동이 지속되어 안정적인 처리를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

BOD와 COD의 제거율은 대체적으로 대기온도 변화와 유사한 형태를 나타내었는데, 온도가 감소함에 따라 제거율도 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 온도 감소로 인한 갈대의 동사(凍死)와 미생물 활동의 저하 때문으로 판단된다. 특히, 1998년 11월 중순까지는 온도가 다소 감소하더라도 높은 제거율을 나타냈는데, 11월 중순경 온도가 갑자기 낮아지면서 제거율이 크게 감소하기 시작하였다. 이것은 1998년 11월 중순에 온도가 영하로 떨어짐으로 인하여 갈대가 모두 동사(凍死)하여 갈대의 기능이 불가능했기 때문이다. Fig. 2에서 11월 중순에 온도가 영하로 떨어졌을때, 유출수의 온도가 약 5°C정도 저하되었음을 알 수 있다. 그러므로 제거를 저하는 인공습지내의 온도저하로 인한 미생물활동저하와 갈대의 동사(凍死)로 인한 인공습지내의 산소 공급 부족이 원인으로 생각된다. 실제 1998년 11월 중순의 유출수 DO를 보면, 2.5mg/L이상의 농도를 나타내다가 온도가 저하된 후부터 약 1.3mg/L의 현저히 낮은 농도를 나타내었다.

1998년 6~7월 사이에 온도는 높은 반면 처리율이 낮았던 이유는 전년도 동절기를 지나면서 고사한 식물들이 봄이 되어도 살아나지 않아서, 기다리다가 6월에 다시 갈대를 이식하여 처리조가 안정되기 이전이었기 때문이다. 1998~1999년도의 동절기에는 오수가 계속 유입되면서 처리시스템이 지속적으로 가동되었으며, 1999년 봄에는 갈대들이 활발하게 자라기 시작하였고 온도와 처리율 사

이에 유사한 형태를 나타내었다.

또한, 1998년 7월과 8월달의 BOD와 COD를 보면 BOD의 제거율보다 COD의 제거율이 현저히 낮음을 알 수 있다. 이것은 활발한 갈대의 성장과 그로 인한 처리조내의 호기성 상태가 유지되어 활발한 미생물 활동이 이루어져, 분해가 가능한 BOD는 제거율이 회복된 반면에, 난분해성 유기물을 포함하는 COD는 상대적으로 제거율 회복이 BOD에 비하여 지연되고 있음을 알 수 있다.

SS의 제거율도 대체적으로 1998년 6월과 7월을 제외하고는 대체적으로 대기온도변화와 유사한 형태를 나타내었다. 1998년 6월과 7월에 SS의 제거율이 낮은 이유는 1998년 6월에 갈대를 재이식하는 과정에서 처리조내 모래층이 교란되었고 안정이 덜 된 상태이었기 때문으로 생각된다. SS제거는 모래에 의한 여과 작용이 주요 공정이나, 여과된 오염물질의 생분해는 온도에 영향을 받기 때문에, 전체적으로는 SS의 제거도 온도에 어느 정도 영향을 받는 것으로 나타났다.

T-N의 제거율은 평균 20%정도의 일정한 제거율을 나타내었고, 1999년 3~4월에는 평균 10%의 낮은 제거율을 나타내기도 하였으며, 유출수의 농

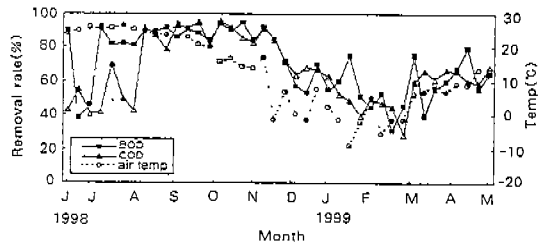


Fig. 3. BOD and COD removal rates of the wetland system

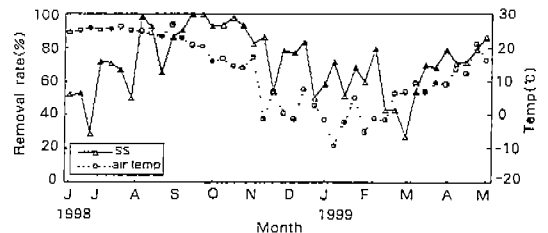


Fig. 4. SS removal rates of the wetland system

도가 유입수의 농도보다 높은 경우도 발생하였다. 3~4월에 제거율이 낮은 이유는 동절기 동안 모래에 의해 여과된 SS내에 함유하고 있던 유기질소가 제대로 분해되지 못하고 누적되어 있다가 3~4월에 활발히 분해가 시작되면서 용해된 성분이 용출되었기 때문에 유출수의 농도가 유입수의 농도보다 높았던 것으로 판단된다. Fig. 5에서 나타나듯이, 1999년 3월에 날씨가 갑자기 따뜻해졌으며, 이에 따라 모래속에 누적되어 있던 유기질소 성분이 분해되어 유출수에 함유되어서 단순히 유입수 수질을 기준으로한 제거율로 환산하면 상당히 낮은 제거율을 나타냈다. 그러나, 시간이 경과함에 따라 제거율이 점차 회복되어 4월 중순부터는 제거율이 거의 평균수준으로 회복되었다. T-N 제거율의 변화형태로 온도변화와 유사하였으나, 제거율의 변동폭이 온도 변화폭보다는 작았다.

T-P의 제거율은 1998년 11월 중순까지는 평균 72%로 높았으나, 이후에 급격한 온도저하로 인해 제거율이 평균 20%로 크게 떨어졌다. 그리고, T-N에서와 같이 1999년 3월이 되면서 유출수의 농도가 유입수의 농도보다 높은 결과가 나왔는데, 같은 이유로 동절기 동안 모래에 의해 여과된 SS내의 유기인이 3~4월에 분해되면서 용출되었기 때문으로 판단된다. 하지만, T-P의 제거율도 시간이 경과함에 따라 다시 상승하였으나, 4월까지 실험결과에 의하면 아직 완전한 제거율 회복은 이루어지지 않았다. 이것은 T-N과 달리 T-P는 토양에의 흡착성이 커서 장기간에 걸쳐 누적된 인성분이 T-N보다 용출이 오랫동안 일어났기 때문으로 생각된다. 만약 처리조내 모래층에 인의 축적이 포화상태를 초과하였다면 유입하는 인과 유출하

는 인 사이에 물질이동관계에 따라 제거율 회복이 제대로 이루어지지 못할 수도 있을 것이다.

4. 처리조의 부하량 검토

본 연구에서 운영한 인공습지의 처리성능을 북미 지역 습지의 처리성능 자료모음인 Wastewater treatment system database⁹⁾와 비교하여 검토하였다. 이 database는 북미 전역에 걸쳐 있는 습지처리시설에 대한 위치, 종류, 규모, 유입, 유출수의 농도, 수위, 및 식물종까지 다양한 1,293개의 자료를 포함한 것이다. 이중 유입수의 부하량과 유출수의 농도를 이용하여, 본 연구의 처리시설 부하량과 유출수의 농도가 어느 범위에 있는지를 확인하고, 실험에 사용한 오염 부하량의 적정성 여부를 검토하였다.

Fig. 6에서 Fig. 9까지 그림에서 작은 점으로 표시된 것은 database상의 자료를 나타내고, 원형과 사각형 표시는 각각 동절기와 성장기에 실험한 자료의 평균값을 나타낸다.

처리성능을 동절기와 성장기로 구분하여 비교하였는데, BOD의 경우는 동절기뿐만 아니라 성장기에도 부하량과 그에 따른 유출수의 농도가 모두 높았으며 database의 상한선에 거의 근접하였다. 성장기의 유출수 농도는 31.9mg/L로 database상의 자료와 비교할 때 높은 편에 속하였고, 동절기의 경우는 이보다 훨씬 높은 94.7mg/L로서 database자료 중 이보다 높은 농도가 있기는 하나 거의 극한값에 가까웠다. 이와 같이 유출수 농도가 높은 이유는 우선 Fig. 6에서 알 수 있듯이 부하량이 높았으며, 시스템 자체는 예측 가능한 범위의 성능을 나타내고 있다. 따라서 전체적으로 부하량을 감소시킨다면 원하는 수질을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

SS의 경우는 Fig. 7에서와 같이 동절기, 성장기 모두 적정범위에 위치하고 있다. 이 database는 북미 대륙의 전체 습지처리시설에 관한 자료이기 때문에 SFS와 FWS의 자료가 혼합되어 있어서 SFS가 아닌 FWS의 경우는 본 처리시설보다 유

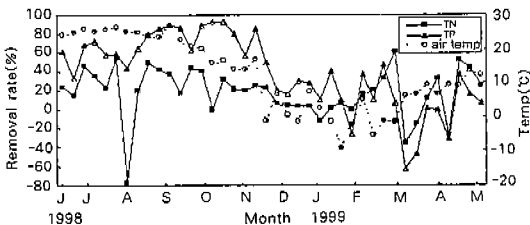


Fig. 5. T-N and T-P removal rates of the wetland system

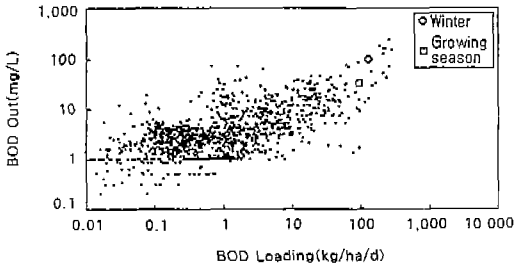


Fig. 6. Scatterplot of BOD performance of wetland data (NADB, 1994)^{7,9)}

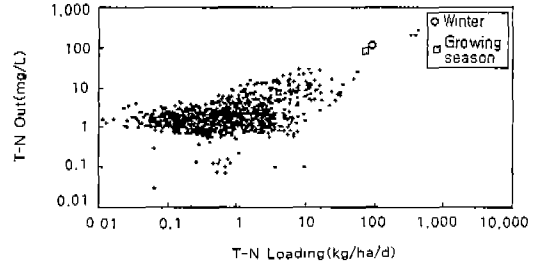


Fig. 8. Scatterplot of T-N performance of wetland data (NADB, 1994)^{7,9)}

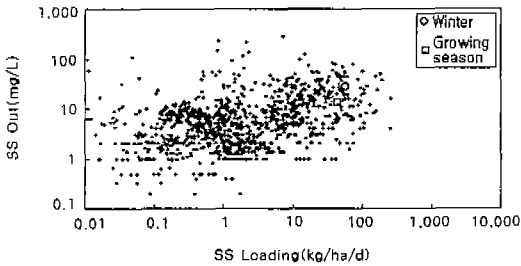


Fig. 7. Scatterplot of SS performance of wetland data (NADB, 1994)^{7,9)}

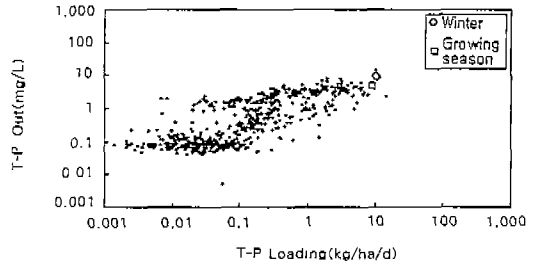


Fig. 9. Scatterplot of T-P performance of wetland data (NADB, 1994)^{7,9)}

출수의 농도가 약간 높게 나타낼 것으로 생각된다. 만약 BOD 유출수 농도를 위해 오염부하량을 낮춘다면 그에 따라 SS의 유출수도 낮아져서 습지처리에서 SS는 거의 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

T-N의 경우는 Fig. 8에서와 같이 동절기, 생장기 모두 부하량과 유출수 농도가 database 자료와 비교할 때 거의 한계치를 나타내었다. 물론 이보다 더 높은 결과치가 존재하기는 하지만 본 연구의 실험조건이 일반적인 습지의 처리범위를 벗어났음을 알 수 있다. 이것은 본 처리시설로 유입되는 오수는 다른 생활잡배수가 거의 섞이지 않은 고농도이기 때문에 매우 높은 부하량을 나타내었고, 이렇게 유입부하량이 크기 때문에 유출수의 농도도 높음을 알 수 있다. 하지만, 이를 일반 생활하수에 적용할 경우에는 유입수의 농도가 낮아져 상대적으로 낮은 부하량을 나타내어, 그에 따른 유출수의 농도도 낮아질 것으로 판단된다. Database에 나타난 다른 습지처리시설의 운영결과

에 의하면 T-N 유출수의 농도도 유입부하량이 적정범위에 있다면 10mg/L 이하로 유지하는 것은 어렵지 않을 것으로 판단된다.

T-P역시 T-N과 마찬가지로 부하량과 유출수의 농도가 한계치에 이르는 높은 수치를 나타내었으며, 처리시설 면적을 늘리거나 부하량을 감소시켜서 일반적인 범위의 부하량을 유지한다면 T-P도 T-N의 경우와 같이 바라는 유출수의 농도를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

현장실험을 3년째 계속하고 있는 인공습지 우수처리시설에서, 6.25cm/day로 수리부하율을 고정하고 생장기와 동절기의 처리성능을 비교 분석하였으며, 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 대기온도가 약 -10°C 이하까지 내려가는 동절기에도 대기온도에 노출되어 보온시설이 전혀 없는 습지에서, 평균 9°C의 유입수가 지속적으로 유

입될 때 유출수는 동결되지 않았고 평균 7°C 정도를 유지하여 미생물의 활동을 어느 정도 기대할 수 있었다.

2. BOD 제거율은 온도변화와 유사한 형태로 변화하였으며, 평균 제거율이 성장기의 77.7%에서 동절기에 50.9%로 저하되기는 하였으나, 총제거량으로 환산하면 72.95kg/ha/day에서 69.5kg/ha/day로 크게 차이가 없이 동절기에도 처리효과가 뚜렷히 나타났다. 그러나, 동절기 유출수의 농도가 방류수 수질기준을 초과하기 때문에 이에 대한 보완조치가 필요하다.

3. SS는 평균 제거율이 성장기의 72.7%에서 동절기에 62.8%로 다소 떨어졌으나 총제거량에서는 변화가 없었으며, 다른 항목에 비하여 온도의 영향을 상대적으로 덜 받았다. 유출수 농도도 안정적이어서 방류수 수질기준을 크게 초과하지 않았다. 그러나, 주로 여과에 의하여 처리조내에 잔류한 SS성분 중에 분해가능한 물질들이 동절기동안 분해속도가 느려서 누적되었다가, 봄에 온도가 올라가면 분해가 활발해지면서 일부가 용출되어 다른 항목의 처리효율에 영향을 주기도 하였다.

4. T-P 제거율도 온도변화와 유사한 형태를 나타내었으며, 평균 제거율이 성장기의 48.0%에서 동절기의 20.6%로서 절반이하로 급감하였다. T-N의 경우도 평균 제거율이 성장기에 19.2%에서 동절기에 11.0%로서 약 절반으로 감소하였다. 이와 같이 영양물질들의 제거율이 동절기에 현저히 감소하는 것은 식물생장이 멈추어 식물들의 처리기능이 배제되었기 때문으로 판단된다. 처리율을 유지하기 위해서는 식물생장에 필요한 최소한의 보온시설의 설치도 동절기 인공습지의 안정적 처리를 위한 대안이 될 수 있다고 생각한다.

5. 현장 실험한 자료를 북미지역 wetland database와 비교하였는데, 본 실험에서 유입시킨 부하량이 database의 상한치에 가까울 정도로 높았으며 처리효율은 예측 가능한 범위에 있었다. 따라서, 부하량을 조정하면 원하는 유출수 수질을 유지하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 농림부의 첨단농업기술개발사업과 제인 "농촌하천유역의 종합적 수질관리 시스템 개발"의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 김형중, 1997, 자연정화방법을 이용한 농촌지역의 소규모 오폐수처리 시스템, 박사학위논문, 건국대학교 농공학과대학원.
2. 권태영, 1999, 농촌오수 처리수의 농업용수로의 재이용 가능성에 관한 연구, 석사학위논문, 건국대학교 농공학과대학원.
3. 윤춘경, 권순국, 권태영, 1998, 인공습지의 농촌지역 오수정화시설에 적용가능성 연구, 한국농공학회지, 40(3), pp. 83-93.
4. 권순국, 김복영, 김진수, 김태철, 윤춘경, 정재춘, 홍성구, 1998, 지역환경공학, 향문사.
5. 과학기술정책관리연구소, 1997, 인공습지를 이용한 군부대 오수정화처리에 관한 연구.
6. U. S. EPA, 1988, Design Manual : Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment, EPA/625/1-88/022, Cincinnati, OH.
7. Robert H. Kadlec, Robert L. Knight, 1996, Treatment wetlands, Lewis Publishers.
8. WPCF(Water Pollution Control Federation), 1990, Natural Systems for wastewater Treatment, Manual of Practice FD-16, Alexandria, VA
9. NADB(North American Wetlands for Water Quality Treatment Database), 1994. Electronic database created by R Knight, R. Ruble, R. Kadlec, and S. Reed for the U. S. Environmental Protection Agency. Copies available from Don Brown, U.S. EPA, (513) 569-7630.
10. APHA, 1995, Standard Methods for the examination of water and wastewater, 19th Edition, American Public Health Association.