

오수처리용 인공습지내 토양의 이화학적 특성조사

윤춘경* · 권태영* · 우선호*

*건국대 농공학과

A Study on the Physical and Chemical Characteristics of the Constructed Wetland Soil for Sewage Treatment

Yoon, Chun-Gyeong* · Kwun, Tae-Young* · Woo, Sun-Ho**

Dept. of Agricultural Eng., Konkuk University

ABSTRACT

The soil from constructed wetland system for sewage treatment was analyzed to examine physical and chemical characteristics. Clogging and lowered permeability were the physical matters of concern, and nutrient and salt accumulation were the chemical matters of concern. However, the soil properties of the constructed wetland system after 3 year operation demonstrated no degradation and still the soil works almost same as the initial stage. Encouragingly, no sludge accumulation was observed inside the system. Therefore, it implies that the wetland sewage treatment system can work continuously as long as it is operated and managed properly not to cause excessive pollutant loading.

1. 서론

농촌지역이 생활양식의 변화와 주택개량 사업 등으로 인해 물 소비 형태가 도시지역과 유사해 지고 있으며, 그에 따른 오수발생량이 증가하고 있다. 그러나, 농촌지역은 도시와 달리 하수관거가 미비하고 오수처리시설의 보급 및 운영이 쉽지 않아 농촌마을로부터의 오수는 대부분 소하천 및 수계에 그대로 방류되고 있는 실정이며, 이는 수자원의 수질을 악화시키고 상수원 등에 악영향을 주어 공중보건에도 부정적으로 작용한다. 이러한 농촌오수를 효율적으로 처리하기 위해서는 농촌환경과 지역특성을 고려한 저기술적이며 경제적인 소규모 오수처리시설이 적합한데, 이를 위하여 최근에 자연정화방법을 이용한 처리시설 등이 관심을 받고 있다. 자연적인 처리방법에는 토양처리방법과 부

엽식물을 이용한 수중처리방법, 그리고 습지처리 방법 등이 있다.¹⁾ 이들 중 인공습지는 그 처리능력이 비교적 안정적이며, 적용이 용이하여 이미 외국에서는 생활오수의 처리에 적용한 사례들이 있으며 구체적인 설계방법까지 제시되었다.^{1),12),13)}

1996년부터 윤 등은 농촌지역에 적합한 오수처리시설의 개발을 위해 자연정화방법 중 인공습지를 이용한 오수처리시설의 시작품을 건국대학교 농업생명과학대학에 설치하여 수년간에 걸친 현장실험을 수행하여 그 연구 결과를 보고한바 있다.^{2,3,4)}

본 연구에서는 오수처리용 인공습지내 토양의 중 이화학적 특성변화를 분석하였다. 3년간에 걸친 처리시설 운영에 따른 토양성분 변화, 그리고 거리와 깊이별 처리시설내의 변화를 조사하고, 장기간 운영에 따라 예상되는 막힘현상

(clogging)등의 여부와, 그에 따르는 처리시설에 미치는 영향 등을 검토하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 오수처리시설 및 토양시료 채취 방법

본 연구에 사용된 오수처리시설에 관한 설명 및 오수와 처리수의 특성 및 처리효율 등 기타특성에 관한 내용은 이미 발표한 여러 문헌에 잘 나타나 있다.^{2,3,4)}

토양 시료의 채취는 오수 유입부와 유출부 부근의 토양으로 나누어 채취하였으며 또한 깊이별 특성을 파악하고자 오수처리시설의 깊이를 상·중·하로 나누어 토양시료를 채취하였다. <Fig 1>에서 나타난 것과 같이 유입부 자갈층에서 1m 떨어진 부분을 상중하로 나누어 A, B, C 지점에서 채취하였으며 같은 방법으로 유출부의 자갈층에서 유입부 쪽으로 1m 떨어진 지점인 D, E, F 부분에서 토양시료를 채취하였다. 채취한 토양을 1일 동안 자연건조 시킨 후 분석시료를 준비하였다.

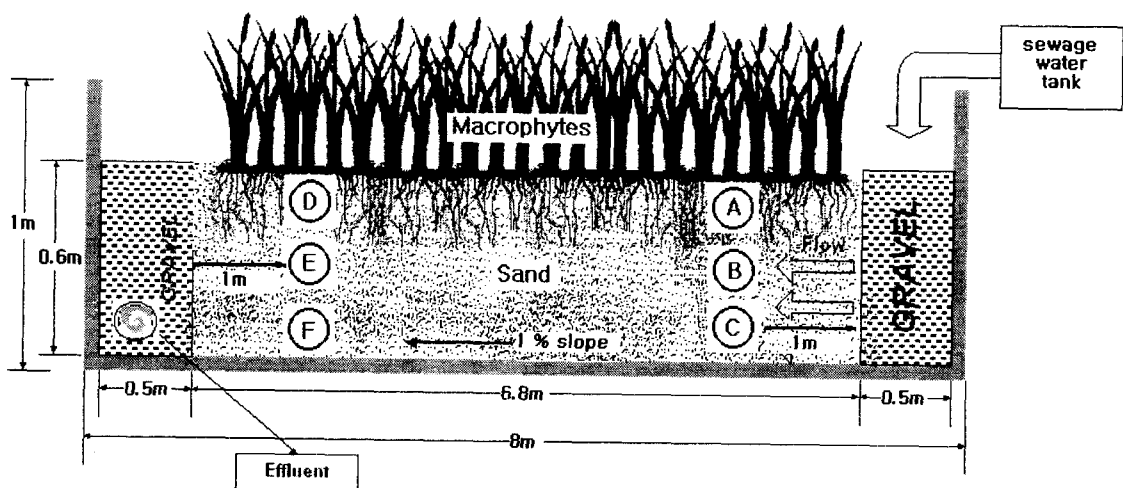
2. 토양 분석방법

토양 분석은 크게 물리적 특성과 이화학적 특성을 분석하였는데, 물리적 특성 실험은 비중, 투수계수, 그리고 입도 분포를 분석하였다. 비중은 KS F 2308 법⁶⁾에 의하여 105℃에서 24시간 건조시킨 시료를 일정한 취하여, 흡입자의 무게와 물의 무게를 비교하고, 측정 시 온도를 보정하여 온도 15℃의 물에 대한 흡입자의 비중을 구하였다. 투수계수는 KS F 2322 법⁶⁾에 의해 직경 10cm, 높이 12cm의 몰드에 시료를 자연상태의 건조단위 중량에 맞추어 채워서 완전히 포화시킨 후, 정수위 투수시험기에 의해 정수위 투수실험을 하여 투수계수를 구하였다. 실험 토양의 입도는 KS F 2302법⁶⁾에 의해 Sieve # 4, 16, 40, 60, 100, 200의 6개의 체를 굵은체로부터 가는체를 위로부터 포개어 놓고 흙을 넣어 흔든 다음, 각 체를 통과한 흙의 무게를 계산하여 흙 전체의 무게로 나누어, 반대수지에 가로축을 흙의 입경의 흙 전체에 대한 중량백분율로 표시하고 입도 분포곡선으로 나타내었다.

실험토양의 이화학적 성분분석은 pH, EC, 유기물함량(OM: Organic Matter), CEC, 총 인(T-P: Total phosphorus), 유효인산(Av.-P₂O₅: Available phosphorus), 총질소(T-N: Total Nitrogen), 등을 분석하였으며, 대략의 분석방법을 기술하면 다음과 같다.

토양중의 pH와 EC의 측정은 토양화학분석법⁵⁾에 따라 토양 시료 10g을 증류수 50ml를 첨가한 후, shaker 5분간 진탕 시킨 후 토양용액을 ORION사의 Model 550pH, EC Meter로 측정하였다. 토양 중 유기물함량(OM: Organic Matter)은 Walkley-Black법¹⁴⁾에 의하여 유기탄소 함량을 구하여 그 값에 환산계수 1.724를 곱하여 유기물의 % 함량을 구하였다. 토양의 양이온치환용량(CEC: Cation Exchange Capacity)은 pH가 7.0으로 조절된 Ammoniumacetate 용액 침출법⁵⁾으로 토양의 양이온 치환

실험토양의 이화학적 성분분석은 pH, EC, 유기물함량(OM: Organic Matter), CEC, 총 인(T-P: Total phosphorus), 유효인산(Av.-P₂O₅: Available phosphorus), 총질소(T-N: Total Nitrogen), 등을 분석하였으며, 대략의 분석방법을 기술하면 다음과 같다.



<Fig 1> Schematic diagram of the constructed wetland system and sampling locations.

능력을 구하였다. 토양 중 총질소(T-N: Total Nitrogen) 함량은 Kjeldahl법⁵⁾에 의하여 독일 B CHI 사의 Digestion 435로 분해하고, B-316 Distillation Unit로 증류한 다음 0.1N H₂SO₄로 적정하여 구하였다. 총인(T-P: Total phosphorus) 함량은 Perchloric Acid Digestion Method¹⁴⁾ 토양중 유기물 등과 결합된 인까지 HClO₄로 Hotplate에서 분해한 후 Ammonium paramolybdate-vanadate 시약으로 발색하여 미국 HP사의 HP 8452A UV Spectrophotometer로 흡광도를 분석하였다.

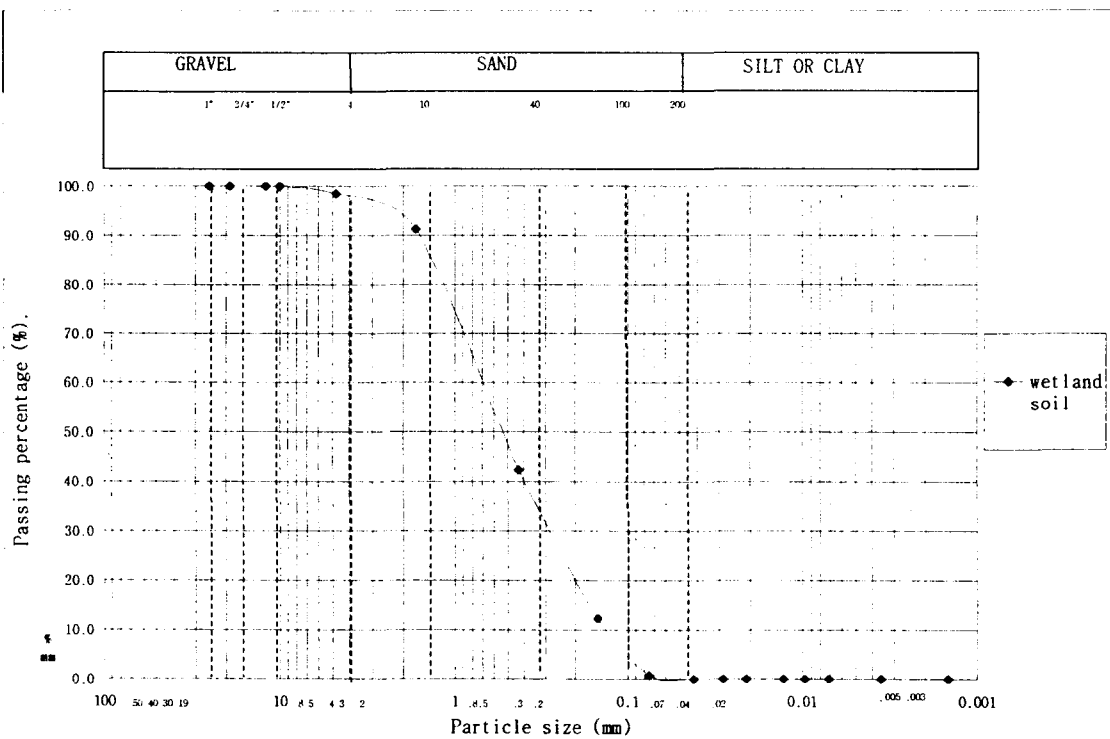
유효인산(Av.-P₂O₅: Available phosphorus)은 Bray Extraction Method⁵⁾에 따라 Bray NO.1 침출액으로 진탕 침출 한 토양용액을 발색시켜 HP 8452A UV Spectrophotometer로 정량 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

인공습지에 의한 오수정화처리시설의 토양의 변화와 장기간의 운영의 영향을 살펴보기 위하여, 3년간 오수처리 실험을 수행한 1999년 6월 현재 처리시설내의 토양에 대한 각각의 위치 및 깊이에 따른 분석을 하였다.

먼저 물리적인 특성을 알아보고자 처리시설의 토양에 대한 입도 분석 결과를(Fig 2)에 나타내었는데, 이러한 입도 분포는 전형적인 일반모래와 유사하였으며 장기간 운영에 따른 입도 분포상의 큰 변화는 나타나지 않았다. 또한 비중 실험을 실시하여 2.63의 결과를 얻었는데, 이 값은 일반적인 모래의 비중 값과 거의 같았다.⁷⁾ 또한 인공습지 처리방법은 광의로서는 자연정화방법 중 토양처리방법중의 한가지로 분류할 수 있으므로¹⁾, 장기간에 걸친 오수 유입으로 예상되는 막힘현상을 알아보기 위해 투수성 시험을 실시하였다. 그 결과 유입부쪽은 3.47×10^{-2} (cm/sec)와 유출부쪽은 3.82×10^{-2} (cm/sec)의 결과를 얻었다. 이 결과는 전형적인 모래의 투수계수에 근사한 값으로서⁸⁾, 투수성이 용이하여 막힘현상 및 오수의 유출입에 문제가 없을 것으로 판단되며, 또한 운영 초기의 상태가 크게 변하지 않고 유지됨을 알 수 있었다.

처리시설의 일반적인 이화학적 특성을 분석하기 위해 거리와 깊이별로 시료를 채취하였다. 그런데, 특이할 만한 사실은 시료 채취 당시에는 채취한 토양시료가 검은 회색을 띠고 있었으므로 막힘현상(clogging)이 진행된 결과라 추정하였는데, 시료의 분석을 위해 1일간 자연건조를 시킨 후



<Fig 2> Particle size distribution curve of wetland soils

토양의 색깔이 전형적인 모래의 색으로 완전히 변환되는 사실을 발견하였다. 이유는 모래 입자를 에워싼 미생물들이 외부로부터 오수공급이 중단된 상태로 노출되면서 소멸하였고, 모래주위의 유기물도 분해되었기 때문으로 생각된다. 처리방법 및 처리장에 따라 차이는 있겠으나 전국에 산재한 하수처리장의 하수오니의 성분을 조사한 결과를 살펴보면 유기탄소 함량이 14.0~30.1%의 범위이고 총질소 함량 또한 2.3~6.0%의 범위를 가지고 있다¹⁰⁾. 이 사실을 보더라도 일반적 하수오니는 많은 유기물을 가지고 있으며 질소성분 및 성분이 매우 복잡하고 다양하여, 자연건조로는 탈수 건조에 많은 시간을 필요로 하며 건조 후에도 대부분 잘 분해되지 않은 채 여전히 검은색 점성물질의 특성을 가지고 있다. 하지만 인공습지의 토양과 함께 존재하던 검은 오니같은 물질은 일반적인 오니와는 차이가 있어 자연 상태에서 짧은 시간 안에 쉽게 분해되었다. 이는 일반적인 오수처리시설의 문제점의 하나인 오니의 발생 및 처리를 생각할 때 고무된 사실이라 할 수 있을 것이다. 다시 말하면 인공습지에 의한 오수처리는 오니발생 문제가 없으며, 그에 따른 오니 처리에 필요한 노력 및 비용을 우려하지 않아도 된다는 것을 의미한다. 이런 사실은 (Table 1)의 인공습지 처리시설토양의 이화학적 분석에서 거리 및 깊이에 따른 OM 변화가 크지 않음에서도 확인 할 수 있다. 표에서 시료채취 지점에 관한 설명은 (Fig 1)에 나타나 있다.

인공습지 처리시설내의 거리별, 깊이별 토양의 pH와 전

기전도도(Electric Conductivity)의 변화를 살펴보면 (Fig 3)과 같다. pH의 경우는 유입부 표토층인 A는 7.09로서 중성인데, 유출부 표토층인 D 지점의 토양에서는 pH가 6.05로 약산성을 나타내었는데, 이것은 이곳의 미생물 및 식생의 활발한 활동의 결과로 판단된다.

반면에, 토양이 깊어질수록 pH가 증가해 주로 오수에 잠겨 있는 B, C E, F는 pH가 약간 높았다. 이는 오수의 특성이 염기성을 나타내고 있었으므로 오수의 영향을 받은 것으로 생각된다. 전기전도도는 토양내에 간접적으로 염분의 축적 정도를 알 수 있는 것인데, 실험결과 유입부와 유출부 부근 모두 표토층인 A, D만이 다른 지점에 비해 상대적으로 약간 높으나 대부분 우려할 수준은 아닌 것으로 판단된다.

양이온 치환능력(Cation Exchange Capacity)은 실험에 사용된 것이 초기에는 굵은 강모래를 사용하여 0에 가까운 값이었으나, 유입부의 깊이에 따라 미세한 증가를 나타냈다. 일반적으로 CEC는 입자의 미세함과 pH가 염기성일 때 증가하는 것으로 알려져 있는데⁹⁾, 3년간에 오수 유입으로 모래의 입자를 초기보다는 미립분이 증가하였고, 유입부가 유출부 보다 염기성을 나타낸 영향으로 볼 수 있다. 유기물 함량인 OM(Organic Matter)은 상층인 A, D가 상대적으로 높은 결과를 나타냈다. 이는 본 처리 시설이 비록 초기에는 같은 모래로 채워졌지만, 시간이 지날수록 식생들과 함께 일반 토양의 특성을 나타내고 있는 것으로 보이며, 오수의

<Table 1> Soil characteristics of the wetland system

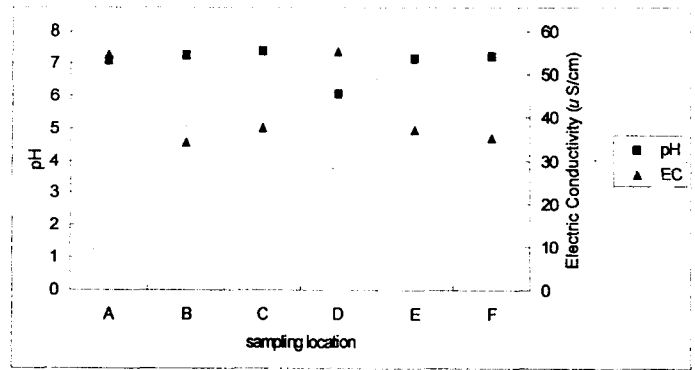
	Sampling Location					
	A	B	C	D	E	F
pH (1:5)	7.09	7.25	7.39	6.05	7.15	7.22
EC(μ s/cm)	54.40	34.30	37.60	55.20	37.20	35.30
CEC(cmol(+)/kg)	1.50	2.25	2.00	1.50	1.50	1.50
T-N(mg/kg)	84.1	42.3	14.6	168.2	28.4	14.2
T-P(mg/kg)	156.38	215.94	115.91	164.30	106.27	130.89
Av.P ₂ O ₅ (mg/kg)	21.63	32.50	28.48	41.84	34.62	25.96
OM(%)	0.17	0.08	0.12	0.18	0.17	0.06

유입량이 많을때는 오수가 지표 위를 지나 지하로 침투하므로 오수중의 입자들이 지표부근에 여과되어 축적되며 유기물 함량에 영향을 준 것으로 보인다. 그러나, 그 양이 우려할 수준은 아니며 오히려 식생과 미생물에 적당한 영향을 공급하므로 식생의 성장에는 좋은 영향을 줄 것으로 판단된다.

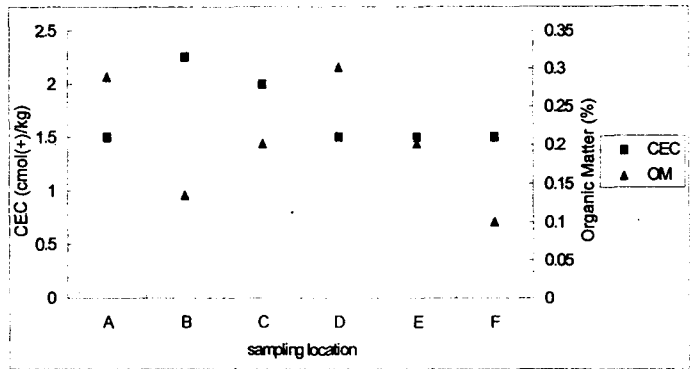
<Fig 5>는 토양 중 총인(T-P : Total phosphorus)과 유효인산(Av. P_2O_5 : Available phosphorus) 그리고 총질소(T-N : Total Nitrogen)의 함량을 나타내었는데, 문헌상의 인공습지에 의한 처리시설은 일반적으로 BOD나 SS의 처리율은 상당히 높은 편이나 영양물질의 처리에는 상대적으로 낮은 편이라 장기간에 걸친 운영 중에는 토양내부에 다수의 영양물질의 축적을 예상했으나, 실험 결과 일반적인 토양과 비교할 때 큰 차이가 없었으며 오히려 낮게 나타났다. 총인의 함량은 유입부가 유출부보다 높게 나타났으며, 오수 중의 대부분의 인은 유입부의 토양입자에 흡착된 것으로 보인다. 하지만 그 양이 그리 높지 않아 유출수에 배출될 가능성은 적다고 볼 수 있다. 유출수 중 토양에서 용해되어 배출되는 인의 형태는 유효인의 형태로 배출된다. 유효인의 처리시설 토양내에 존재하는 함량은 각 지점에서 일반적인 토양보다 낮은 함량을 나타냈으며, 유효인은 식생의 양분으로도 이용되므로 식생이 활발하게 성장할 경우에는 유효인은 더욱 효과적으로 제거 될 것이다. 총질소 또한 일반적 토양의 수준보다 낮은 함량을 나타냈고, 이 결과로 볼 때 처리시설내 토양에는 오수의 유입으로 인한 영양물질의 축적 등의 현상은 발생하지 않았던 것으로 판단된다.

이상의 결과들을 종합해 보면 3년간에 걸친 오수처리로 처리시설내에 막힘현상이나 영양물질의 축적 등의 문제점은 없는 것으로 나타났다. 투수성 및 입도 등 물리적인 특성도 변화가 거의 없었으며, 이화학적 성분 변화 결과로 볼 때 초기의 모래에서 점차 식생에 적합한 토양 환경으로 적응해 가는 것으로 나타났다. 대표적인 토양처리방식인 모래여과(Sand filter)와 비교할 때 모래여과 시설이 주기적인 세척 등이 필요한 반면¹⁵⁾, 위의 결과에서 보듯이 인공습지 시설은 세척 없이 장기적인 운영이 가능할 것으로 판단된다.

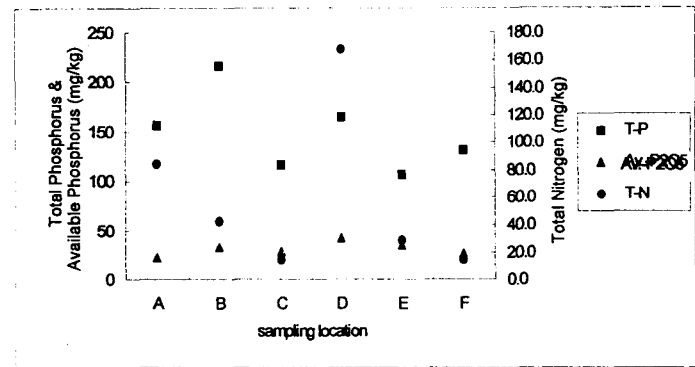
인공습지 처리 시설은 식생의 생장이 오수의 처리율에 크게 영향을 미치므로 적정량의 오수유입과 처리시설내 토양 환경의 모니터링을 통하여 무리 없이 인공습지처리시설을 운영한다면 물질평형이 이루어지면서 장기간 안정적으로 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서, 앞으로 최적



<Fig 3> pH and EC of the wetland soil



<Fig 4> CEC and OM of the wetland soil



<Fig 5> Phosphorus and nitrogen concentration in the wetland soil

부하량과 식생관리기법 등에 관한 기준에 연구가 지속적으로 보완된다면 인공습지시설은 농촌지역의 오수처리시설로서 적용이 가능할 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 약 3년간 운영해온 인공습지에 의한 오수 정화처리시설의 토양에 대한 각각의 위치 및 깊이에 따른 물리적 이화학적 분석을 통해 토양특성 변화와 장기간의 운영에 따른 영향을 살펴보았다.

1. 비중, 입도, 그리고 투수성 등 물리적 특성은 일반적인 모래의 특성을 유지하였으며, 막힘현상 등은 나타나지 않았다.
2. 시료 채취 당시에는 시설내의 토양이 검은 회색을 띠고 있었으나, 1일간의 자연 건조 후 토양의 색깔이 전형적인 모래의 색으로 돌아온 것으로 보아 일반적인 하수오니와는 다른 특성을 나타냈으며, 대부분 쉽게 분해되는 미생물 및 유기물로 판단되며, 향후 미생물의 동정에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.
3. pH의 경우, 표토층 부분은 중성이나 약산성을 나타내 습지가 오수의 염기성을 상당히 완충시키는 것으로 보이며, 이것은 미생물 및 식생의 활발한 활동의 결과로

판단된다. 반면 토양이 깊어질수록 pH가 증가해 주로 오수에 잠겨 있는 심토층의 pH가 약간 높았다. 전기전도도는 대부분 낮은 값을 보였으며, 이는 토양내 염분의 축적우려가 없음을 알 수 있다.

4. 초기의 순수한 모래에서 수년간의 식생과 오수의 유입 등으로 양이온치환능력, 유기물 함량, 질소, 인 등의 함량이 소량 증가하였으나, 이것은 일반적인 토양환경 조건으로 변화된 것으로 보이며, 이는 식생의 활발한 성장과 미생물의 활발한 증식에 도움을 줄 것으로 기대된다.
5. 시설내의 영양물질의 축적현상은 거의 없었으며, 적절히 운영한다면 오수처리용 인공습지에 지장이 없을 것으로 판단된다.

이상과 같이 3년간의 현장실험 결과에 의하면 인공습지 오수처리시설은 운영기간이 길어져도 토양내 막힘현상이나 입도 변화등이 나타나지 않았고, 영양물질이나 염류 축적 등 화학적인 특성의 악화도 나타나지 않았다. 따라서 인공습지는 적절히 관리하고 운영한다면 농촌 지역에 오수처리시설로서 장기간 사용할 수 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. 권순국 외 6인, 1998, 지역환경공학, 향문사
2. 윤춘경, 권순국, 김형중, 1997, 인공습지를 이용한 자연정화 오수처리시설에서 영양물질의 변화와 대장균군의 행동, 한국환경농학회지, 16(3), pp. 249-254.
3. 윤춘경, 권순국, 김형중, 1997, 인공습지에 의한 농촌오수처리에 관한 연구, 한국농공학회지, 39(4), pp. 55-63
4. 윤춘경, 권순국, 권태영, 1998, 인공습지의 농촌지역 오수정화시설에 적용가능성 연구, 한국농공학회지, 40(3), pp. 83-93
5. 농업기술연구소, 1988, 토양화학분석법
6. 임병조, 김영수, 1992, 토질시험법, 형설출판사(4판)
7. 문한영, 김성수, 1996, 최신토목재료학, 구미서관
8. 권무남외 6명, 1994, 토질역학, 건국대학교출판부
9. 조성진외 13인, 1989, 토양학, 향문사(5판)
10. 박미현, 이승현, 류순호, 김계훈, 1998, 하수오니의 화학적조성과 토양중 질소 무기화, 한국토양비료학회지, 31(2), 189~196.
11. U.S. EPA, 1988, Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment, EPA/625/1-88/022, Cincinnati, OH
12. IAQPRC(International Association on Water Pollution Research and Control), 1990, Constructed Wetlands in Water Pollution Control, Edited by P.F. Cooper and B.C. Findlater, Pergamon Press, UK
13. WPCF(Water Pollution Control Federation), 1990, Natural Systems for Wastewater Treatment, Manual of Practice FD-16, Alexandria, VA.
14. Methods of Soil Analysis, 1982, part 2 : Chemical and Microbiological Properties, 2th. Edition. American Society of Agronomy, Inc, Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI., USA.
15. Reyes O, Sanchez E, Pellon A, Borja R, Colmenarejo MF, Milan Z, Cruz M, 1997, A comparative study of sand and natural zeolite as filtering media in tertiary treatment of wastewaters from tourist areas, J. Environ. Sci. Health, A32(9&10), pp. 2483-2496