

인공습지에 의한 축산폐수의 처리시 계절적 영향

Seasonal Effects of Livestock Wastewater Treatment by a Constructed Wetland

박재홍*·권수열***

Jae-Hong Park*·Soo-Youl Kwon***

:: Abstract ::

Constructed wetlands are considered as an important tool for wastewater treatment, wastewater management and flooding control. In addition, one of the most promising technologies for application in many countries seems to be constructed wetlands due to their properties such as utilization of natural processes, simple construction, operation and maintenance, process stability, cost effectiveness, etc.

This research is performed to find the possibility for treating livestock wastewater using a constructed wetland. The removal efficiencies of COD_{Cr}, TN, TP, SS, and color were 97.9%, 97.8%, 97.2%, 99.1%, and 84.9%, respectively. In particular, SS was completely removed. In conclusion, constructed wetlands could be applied to livestock wastewater treatment. Further, it needs time for stabilization to reduce the pollutants accumulated in soil.

Keywords: Constructed Wetland, Livestock Wastewater, COD_{Cr}, SS, TN, TP, Color

:: 요 지 ::

인공습지는 하수처리, 하수관리, 홍수제어등 다양한 분야에 적용될 수 있는 system으로 고려될 수 있다. 또한 인공습지는 자연친화적인 공법으로 건설, 운전 및 유지, 비용의 저렴등 여러 장점을 지니고 있어 많은 나라에서 적용가능한 공법중 하나로 간주되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 수질오염의 주요한 원인으로 간주되고 있는 축산폐수를 인공습지로 처리하여 그 적용가능성을 살펴보고자 하였다.

실험결과 COD_{Cr}, TN, TP, SS, 색도의 제거율이 각각 97.9%, 97.8%, 97.2%, 99.1%, 84.9%로 나타났다. 특히 SS의 제거율이 높게 나타났다. 따라서 인공습지를 이용한 축산폐수의 처리가능성은 높은 것으로 나타났다. 한편 인공습지에 유입되어 토양에 축적된 오염물질이 토양에서 안정화 되는 데는 일정한 시간이 소요될 것으로 판단된다.

핵심용어: 인공습지, 축산폐수, 화학적 산소요구량(크롬법), 부유물질, 총인, 색도

+ To whom correspondes should be addressed. sykwon@mail.knou.ac.kr

* 국립환경과학원 수질총량관리센터

** 한국방송통신대학교 환경보건학과 교수

1. 서론

축산폐수는 발생량에 비해 수질오염 부하량이 매우 크고 국내축산농가의 경우 법적인 규제가 어려운 곳이 대부분이므로 수질오염의 주원인으로 관심의 대상이 되고 있다(한국환경기술단체연합회, 2002). 이러한 축산폐수는 축산폐수처리장, 분뇨처리장 및 하수처리장과의 연계에 의해 방류수 수질이하로 처리하도록 규제하고 있으나 처리시설 용량이 크게 부족하여 일부는 처리시설을 거치지 않고 방류되거나 토양살포, 비료등으로 농지에 환원되고 있는 실정이다(한국환경기술단체연합회, 2002). 따라서 미처리되거나 불완전처리된 축산폐수는 수계로 유입되어 수질에 악영향을 미칠 뿐 아니라 토양에 주입된 경우에도 토양오염 및 지하수환경에 부정적인 영향을 미칠 가능성도 배제할 수 없다. 이처럼 미처리되거나 불완전 처리되어 환경계로 배출된 축산폐수는 비점오염원으로 작용하여 점오염원으로 관리될 때 보다 더욱 처리 및 관리를 어렵게 한다.

인공습지를 이용한 폐수처리는 지속적으로 개발 및 발전되어 현재는 전세계적으로 도시하수, CSO(combined sewer overflow), 낙농폐수, 매립지 침출수, 병원폐수등의 산업폐수, storm-water, runoff 등 비점오염원으로부터 발생하는 오염물질의 처리, 농업폐수등 다양한 분야에서 적용되고 있어 폐수의 관리 및 수질오염제어에 있어서 중요한 역할을 수행하고 있다(Cooper, 1999; Haberl, 1999). 또한, 인공습지의 적용 분야도 과거에 주로 적용되었던 도시하수에서부터 염료, 중금속, 방사성오염물질, 광산폐수, 폭발성폐기물 등에 이르기 까지 이용범위가 광범위하며 폐수 및 폐기물 처리의 전 분야에 걸쳐 다양하게 적용되고 있다.

수처리 분야에서 인공습지가 이처럼 다양하게 이용되고 있는 이유 중 하나는 재래식 수처리방법에 비해 에너지소비가 매우 낮고 비용이 적게

소요된다는 점을 들 수 있으며 아울러 장래의 처리시설들은 환경친화적인 방법들로 점차 변화되고 있어 인공습지를 이용한 폐수처리법은 그 이용이 앞으로 보다 확대될 전망이다(Brix, 1999; Hamiton등, 1999). 반면, 다량의 폐수를 처리하기 위해서는 넓은 부지가 필요하다는 단점이 있는데 부지확보가 곤란한 곳에서는 인공습지의 적용이 여의치 않을 수 있다. 그러나 국내의 경우 축산농가가 소규모로 넓은 지역에 산재해 있기 때문에 소규모의 인공습지를 설치하여 축산폐수처리에 적용시킬 수 있을 것으로 판단된다.

인공습지의 또 다른 단점으로는 악취, 여름철의 해충발생, 폐수처리에 장시간소요, 처리효율의 인위적인 조정이 용이하지 않고, 처리효율 및 운전의 용이성이 계절적인 영향을 받기 쉽다는 점이다.

이러한 단점에도 불구하고 전세계적으로 인공습지를 이용한 다양한 연구와 실제 폐수처리에 대한 적용이 이루어지고 있지만 국내의 경우는 인공습지에 대한 연구가 부족한 실정이며 특히 축산폐수의 처리에 인공습지를 적용한 예가 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 축산폐수 발생량의 상당부분이 환경기초시설을 거치지 않고 미처리 상태로 토양 등에 투기되거나 액비 등의 형태로 농경지에 주입되고 있는 국내실정을 고려하여 축산폐수의 토양 및 습지처리시 계절적인 처리능(효율)을 파악하여 습지를 이용한 축산폐수의 처리가능성과 운전시의 고려사항등을 살펴보고자 하였다.

2. 실험 및 방법

2.1. 폐수성상

본 연구에 사용된 축산폐수는 축산폐수가 액비등의 형태로 농지에 주입되는 것을 고려하여 Y시 축산폐수 공동처리장의 생물학적처리(액상부식)수를 사용하였으며 계절별로 인공습지에

주입된 축산폐수의 성상을 표 1에 나타내었다.

2.2 인공습지의 설계 및 운전

실험에 사용된 인공습지(그림 1)는 높이 0.6m, 길이 2.0m, 폭 1.0m의 두께 10mm의 아크릴판을 사용하여 제작하였으며 약 2,000kg의 발토양(유기물(4.9%), 무기물(76.1%), 수분(19.0%))이 0.45m 높이로 채워졌다. 충전된 토양의 토성은 삼각도표법을 이용할 경우 점토 15%, 미사 20%, 모래 65%의 사양토의 특성을 지니고 있다. 발토양을 인공습지의 토양매질로 사용한 이유는 국내에서 축산폐수를 농경지에 액비의 형태로 주입하고 있기 때문에 점토질의 논토양 보다는 실험이 용이하기 때문이다. 농경지 토양에 축산폐수를 주입하여 유출수의 특성을 조사하고 계절변화에 따라 유출수의 성상이 어떻게 변화하는가를 파악함으로써 인공습지가 축산폐수를 처리하기 위한 하나의 수처리 시스템으로 사용할 수 있는지의 여부를 파악하고 또 한편으로는 농경지가 일종의 인공습지로서 축산폐수의 처리를 위한 처리 system으로 적용가능

한지의 여부를 동시에 파악하고자 한 것이다.

유입수와 유출수의 저류시설을 위해 반응조의 양측면에 길이방향으로 20cm를 직경 1-1.5cm의 자갈로 채웠다. 반응조의 바닥은 폐수의 흐름을 용이하게 하기 위해서 약 2%의 경사를 두었다.

또한 인공습지에 수변구역등에 일반적으로 서식하는 성장이 상당부분 완료된 갈대(*Phragmites australis*) 30수를 6월 중순경에 채취하여 인공습지의 토양 15cm 하부에 식재하여 축산폐수를 인공습지에 주입하는 동안 갈대의 외관상 성장을 파악하였다.

인공습지는 batch type으로 운전되었으며 토양의 단위 중량당 폐수 주입량은 $3\sim4\times 10^{-2}$ m³/ton, 폐수의 체류시간은 평균 16.5일, 운전기간은 계절별로 약2개월씩 운전하였다. 유입부에 주입된 축산폐수는 인공습지를 수평방향으로 유하한 후 방류되었다.

운전기간동안 계절별 온도는 봄철의 경우 11~15℃, 여름 25~30℃, 가을 13~15℃, 겨울 2~5℃의 기온을 나타내었다.

Table 1. Quality of livestock wastewater used in this study

Items (mg/L)	Season			
	spring	summer	fall	winter
CODcr	9,820	9,786	9,920	9,650
SS	6,425	6,600	6,520	6,150
IN	910	918	887	898
TP	220	215	219	214

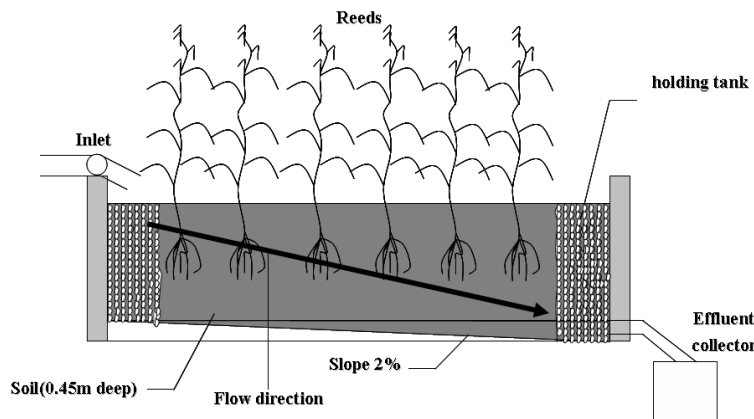


Fig. 1. Schematic of the constructed wetland

2.3 분석방법

채취된 시료는 Standard Methods와 수질오염공정시험법에 제시된 분석법에 따라 분석하였다(APHA, 1998; 환경부, 1999). 시료내의 유기물질 함량을 나타내는 COD는 크롬법을 이용하여 측정하였다. 총질소는 시료를 분해병에 넣고 알칼리성 과황산칼륨 용액을 가하여 고압 증기 멸균기안에서 분해한 후 발색후 자외선 흡광도를 측정하여 분석하였으며, 총인은 Stannous Chloride 법에 의해 분석하였다. 색도는 시료를 0.45 μ m membrane filter로 여과한 후 UV-vis spectrophotometer(UV1601 PC, Shimadzu)를 이용하여 355nm에서 흡광도를 측정하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CODcr 제거

계절에 따라 인공습지에서 처리된 축산폐수의 CODcr의 제거율을 표 2에 나타내었다.

표 2에 나타난 바와 같이 실험기간동안 CODcr의 제거율은 매우 높은 것으로 나타났는데 계절에 따라 CODcr은 96.9-98.8%의 제거율을 각각 나타내었다. 실험의 수행횟수가 증가하면서 CODcr의 제거율은 모두 약간씩 감소하는 경향을 나타내고 있는데 이는 계절적인 영향에 의한 것이 아니라 토양에 축산폐수의 주입이 지속됨에 따라 토양내에서 유기물(CODcr)의 완

전한 제거가 이루어질 수 있는 충분한 시간적인 여유가 없이 축산폐수가 토양에 계속해서 주입되는 관계로 미 제거된 유기물이 토양에 축적되고 점차 토양의 유기물의 제거능이 감소됨에 따라 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

계절적인 영향을 살펴볼 때 계절변화에 따른 유기물의 제거효율에는 큰 차이는 없는 것으로 판단된다. 즉 유기물의 제거가 온도에 따른 토양 미생물의 활성등에 영향을 받기 보다는 토양매체의 여과 및 흡착에 따른 영향에 우선 좌우되는 것으로 판단되어지며, 인공습지에 주입된 축산폐수가 축산폐수처리장에서 이미 생물학적인 처리가 완료된 상태의 처리수이기 때문에 생물학적으로 분해 가능한 유기물은 어느 정도 제거되었다고 볼 수 있기 때문이다. 그렇지만 축산폐수의 지속적인 주입으로 인한 토양내에서의 유기물축적과 원수자체가 이미 생물학적인 처리를 거친 후 라는 점에도 불구하고 여름철과 겨울철의 COD 제거효율을 살펴볼 때 상당한 차이를 나타내고 있어 온도에 의한 계절적인 영향을 완전히 무시할 수는 없을 것으로 판단된다.

3.2. Suspended solids(SS) 제거

표 3에 나타난 결과에서 볼 수 있듯이 SS의 제거율은 계절별로 약 99% 수준인 것으로 나타나 주입된 고형물은 인공습지내 토양을 거치면서 거의 완전하게 제거되는 것으로 나타났다. 특히 폐수의 흐름방향이 수평흐름 형태로 유하되

Table 2. CODcr removal efficiencies

Season	CODcr(mg/L)		
	Infl.	Effl.(avg.)	Removal(%)
spring	9,820	164-185 (177)	98.2
summer	9,786	98-126 (117)	98.8
fall	9,920	194-265 (218)	97.8
winter	9,650	265-325 (299)	96.9

Table 3. SS removal efficiencies

Season	SS(mg/L)		
	Infl.	Effl.(avg.)	Removal(%)
spring	6,425	37.5-65.5 (51.4)	99.2
summer	6,600	23-75 (59.4)	99.3
fall	6,520	20-95 (52.2)	99.2
winter	6,250	78.5-114.5 (93.8)	98.5

Table 4. TP removal efficiencies

Season	TP(mg/L)		
	Infl.	Effl.(avg.)	Removal(%)
spring	220	3.0-6.5 (5.7)	97.4
summer	215	3.2-8.5 (5.8)	97.3
fall	219	4.5-9.1 (6.4)	97.1
winter	214	5.1-11.3 (6.8)	96.8

기 때문에 수직방향의 흐름에 비해 토양매질을 여과하는 시간이 매우 길며, 여과 거리도 훨씬 길기 때문에 고형물을 여과 시키는데 유리한 것도 SS의 제거효율을 높이는데 효과적이다.

한편 표 3에서 보는바와 같이 실험횟수가 증가 되더라도 고형물의 제거효율은 유기물(CODcr)의 경우에서처럼 지속적으로 감소되지 않고 폐수의 주입횟수와는 무관하게 유사한 제거효율을 나타내고 있어 인공습지에 축산폐수의 주입이 어느 정도 지속되더라도 고형물의 제거효율에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 관측되었다.

3.3 TP 제거

표 4에 나타낸 결과에서 볼 수 있듯이 TP의 제거율 계절별로 96.8-97.4%로 나타났다. TP의 제거도 CODcr의 제거경향과 유사하게 축산폐수의 주입횟수가 늘어날수록 제거효율은 감소

되는 경향을 나타내었는데 이러한 경향은 인의 제거도 유기물의 경우와 마찬가지로 주로 토양 입자의 흡착 기작에 기인하며 축산폐수의 주입 횟수가 증가하면서 토양입자의 인흡착능이 포화 상태에 도달하여 점차 제거율의 감소로 나타나고 있는 것으로 판단된다.

3.4. TN 제거

TN 제거율을 표 5에 나타내었는데 TN의 제거율은 계절별로 96.7-98.8%의 효율을 나타내었다.

인공습지를 거친 축산폐수 유출수내의 질소형태는 NO₂⁻가 불검출-0.4mg/L, NO₃⁻가 0.4-0.85mg/L, NH₃가 평균 11.2mg/L로 유출수 TN농도의 약 64%정도가 NH₃로 구성되어 있어 인공습지 내에서 충분한 질산화가 이루어지지 않은 것으로 조사되었다. 따라서 총질소의 제거

Table 5. TN removal efficiencies

Season	TN(mg/L)		
	Infl.	Effl.(avg.)	Removal(%)
spring	910	8.5-12.4 (10.9)	98.8
summer	918	10.4-21.6 (16.5)	98.2
fall	887	13.5-22.4 (17.7)	98.0
winter	898	18.9-36.7 (29.6)	96.7

울과 축산폐수처리장의 TN 방류수기준을 고려할 때 처리효율은 비교적 양호한편이지만 유출되는 질소의 대부분이 NH₃ 형태를 띄고 있어 환경계로 유출될 경우 수계의 용존산소 고갈의 원인이 될 가능성을 배제할 수 없기 때문에 2차적인 오염의 사전예방을 위해서는 NH₃에 대한 후속처리가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

3.5 Color 제거

축산폐수의 색도제거정도를 파악하기 위해 인공습지에 주입되는 유입수에 대하여 spectrophotometer를 이용하여 200 - 1,100nm에서의 흡광도를 측정하였다. 측정된 결과 355nm에서 흡광도가 최대치를 나타내었다. 따라서 355nm에서 측정된 유입수와 유출수의 흡광도를 바탕으로 색도의 제거율 평균값을 그림 2에 나타내었다.

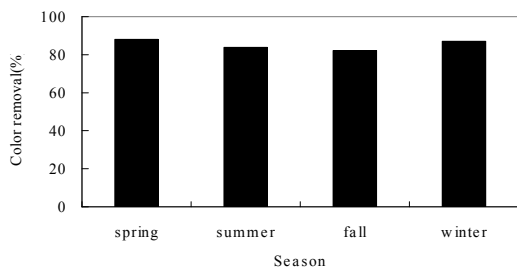


Fig. 2. Color removal efficiency

색도의 제거율은 계절에 따라 82.0-87.8%의 효율을 나타내었다. 계절에 따라, 실험횟수가 증

가함에 따라 제거율이 약간 감소하는 경향을 나타내었으나 큰 차이는 없는 것으로 관측되었다.

3.6 갈대의 외형적 성장 상태

축산폐수 주입에 따른 갈대의 외형적 성장을 관찰하기 위하여 갈대를 이식하여 살펴본 결과 완전히 성숙된 갈대를 이식한 관계로 어린싹에서부터의 성장상태를 관찰할 수는 없었으나 이식된 갈대 총30수중 20수는 외형적인 성장상태가 양호하였으며, 6수는 잎의 고사가 부분적으로 진행되었으며, 4수는 고사하였다. 그러나 고사한 갈대의 본 뿌리로부터 새싹이 돌아나는 등 실험기간동안 성장에는 큰 장애가 없는 것으로 관측되었다.

4. 결론

축산폐수 처리장의 생물학적 처리수를 인공으로 조성된 습지에 적용하였을 때 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

처리수의 수질은 상당히 양호한 편이었으며 특히 SS의 경우 평균 99%이상의 높은 제거효율을 나타내었다. 계절적으로는 대체적으로 큰 차이는 없었으나 여름철의 경우가 처리수의 수질이 타 계절에 비해 다소 양호한 것으로 나타났다.

인공습지의 면적당 오염물질의 제거율은 계절에 따라 CODcr의 경우 60.5-98.7g/m²/d, SS

는 45.8-51.2g/m²/d, TP는 1.6-1.7g/m²/d, TN은 6.3-7.0g/m²/d를 나타내어 유기물과 SS의 제거율이 영양소의 제거율보다 높게 나타났다.

축산폐수의 인공습지 주입시 습지의 토양에 축적된 오염물질의 경우 축산폐수 주입 후 습지를 일정기간 방치해 됨으로써 축적된 오염물이 토양내에서 지속적으로 감소될 수 있도록 하여야 할 것으로 사료된다. 따라서 인공습지에 축산폐수를 주입하여 처리할 경우 일정시간의 휴지기는 반드시 필요할 것으로 판단된다.

또한 갈대를 이용한 식생의 외관상의 변화를 살펴본 결과 축산폐수의 주입에 따른 식생의 부정적인 영향은 없는 것으로 판단된다.

결론적으로 인공습지를 이용하여 축산폐수를 처리할 때 축산폐수의 적정주입량고려, 주입후일정기간의 휴지기등이 충족된다면 축산폐수 처리를 위한 하나의 system으로서 인공습지가 고려될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

한국환경학술단체연합회, 국내축산폐수의 효율적

관리를 위한 연구, 2002.

환경부, 수질오염 공정시험법, 1999.

APHA, AWWA and WEF., Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater, 20th edition, Washington D.C., USA, 1998.

Brix, H., How 'green' are aquaculture, constructed wetlands and conventional wastewater treatment systems?, Wat. Sci. Tech., Vol. 40, pp. 45-50, 1999.

Cooper, P., A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems, Wat. Sci. Tech., Vol. 40, pp. 1-9, 1999.

Haberl, R., Constructed wetlands: A chance to solve wastewater problems in developing countries, Wat. Sci. Tech., Vol. 40, pp. 11-17, 1999.

Hamilton, H., Nix, P. G. and Sobolewski, A. An overview of constructed wetlands as alternatives to conventional waste treatment system, Water Pollut Res. J. Canada, Vol. 28, pp. 529-548, 1999.