

상향류식 수초여과지를 이용한 영양염류처리

이준호[†] · 방기용*

충주대학교 환경공학부 · *한밭대학교 토목 · 환경 · 도시공학부

(2006년 9월 15일 접수, 2006년 12월 11일 채택)

Treatment of Nutrients Using the Upflow Vegetated Filter

Jun-ho Lee[†] · Ki-woong Bang*

Division of Environmental Engineering, Chungju National University

*Division of Civil, Environment and Urban Engineering, Hanbat National University

ABSTRACT : Constructed wetlands are well known as highly efficient system to treat wastewater from different sources. Among the constructed wetlands, upflow types of constructed wetlands have become a common selection of wastewater during the last decade. We conducted a pilot scale study at green house on treating potential of nutrients by upflow vegetated filter(UVF) pilot wetland which was combined with hydrodynamic separator and used the cattail plant(*Typha angustifolia*), and operated with artificial nutrients influent. This study evaluate the performances of upflow vegetated filter in removal of nutrients. The objectives of this study were two-fold: (i) to evaluate the nutrients removal performance of pilot-scale upflow vegetated filter, filled with a mixture of perlite and soil media and planted with cattails and (ii) to design of scale-up upflow vegetated filter using Froude number. Results indicated that, under the condition of the ranges of hydraulic surface load rate were $22.7 \pm 9.6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$, the average removal of COD_{Mn} and TN, TP were 57.5%, 40.0% and 41.5%, respectively. Computational fluid dynamics, FLUENT 6.0 program was used to predict the distribution of velocity in UVF and hydrodynamic separator. Full scale UVF was designed using the Froude number scale-up method that was assumed geomertic similarity between model and prototype. Result shows that the UVF with 3 m diameter has capacity of design sewage flowrate $75 \text{ m}^3/\text{day}$.

Key Words : Upflow Vegetated Filter, Cattail, Froude Number

요약 : 인공습지는 다양한 유형의 하수, 폐수에 대해 높은 제거효율을 가진 것으로 알려져 있다. 상향류식 인공습지는 10여년 전부터 많이 이용되는 인공습지 공법중의 하나이다. 본 연구에서는 인공습지의 하나인 부들(cattail)을 perlite에 식재한 상향류식 수초여과지(upflow vegetated filter, UVF)장치와 수리동역학적 입자물질 전처리장치(hydrodynamic separator, HDS)를 조합한 장치를 제작하여 온실에 설치하였고, 인공하수에 대한 영양염류제거능을 분석하였다. 본 연구의 목적은 (i) 파일럿 규모의 UVF장치의 영양염류 처리능을 분석함에 있으며, (ii) Froude 수에 의한 확대설계시 직경에 대한 처리용량을 도출함에 있다. 인공하수의 처리능을 분석한 결과 평균 수면 적부하율 $22.7 \pm 9.6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ 범위의 운전조건에서 인공하수의 처리능을 분석한 결과 평균 제거효율은 COD_{Mn} , TN, TP에 대해 각각 57.5%, 40.0%, 41.5%를 나타내었다. Froude수를 이용한 무차원 상사법칙을 이용하여 UVF장치의 실규모 설계용량을 산정한 결과 UVF의 직경을 3 m로 설계할 경우 $75 \text{ m}^3/\text{day}$ 범위까지 처리가 가능한 것으로 산정되었다.

주제어 : 상향류식 수초여과지, 부들, Froude수

1. 서 론

농촌 지역에서 하수배출량은 전체 하수발생량의 약 10%를 차지하는데 하수처리시설이 없는 경우와 부적절한 처리로 인하여 상수원 오염에 주요 원인이 된다.^{1,2)} 우리나라 농어촌 지역 소규모 하수처리시설은 $50 \text{ m}^3/\text{일}$ 의 처리용량의 설계가 적합한 것으로 보고되었다.^{3,4)} 소농촌지역에 보급된 소규모 하수처리공법으로 20여 종의 장치형 처리공법이 있지만 시설의 유지관리를 위해 전문기술인력이 필요하고 시설비 및 전력소비가 과다 등의 문제점들을 가지고 있다.³⁾ 기존의 고

도처리시설을 이용한 TN, TP 제거기술은 건설, 유지관리비용 및 운전이 난해하다.^{4,5)} 상향류식인공습지(vertical-flow constructed wetland)는 10여년 전부터 많이 이용되는 인공습지 공법중의 하나로 다양한 유형의 하수, 폐수처리에 적용되고 있다.⁶⁾ 인공습지는 미세 입자물질 뿐만 아니라 부영양화 원인물질인 질소와 인 물질 제거, 세균제거에도 그 효과가 뛰어나다. 또한 여재흡착이나 식물체 흡수 등의 제거로 영양염류 제거에 효과적이다.^{2,4,5,7)} 우리나라 농어촌과 같이 소규모 분산마을 형태의 지역에는 건설 및 유지관리가 용이한 수초여과지와 같은 자연정화법이 적합하다고 보고하였다.^{4,5,8)} 기존의 마을단위 소규모 하수처리시설을 고도처리하기 위해 생물학적 공법이나 화학적 공법을 적용함에는 비용측면과 운전기술 부족 등으로 그 적용에 한계가 있다. 따라서 건설

[†] Corresponding author
E-mail: jlee@cjnc.ac.kr
Tel: 043-820-5274

Fax: 043-820-5272

비용이 적게 소요되며, 운전관리가 용이하고, 질소, 인 물질 등의 영양염류를 제거할 수 있는 처리시설의 개발과 적용이 필요하다. 수초여과지의 성능을 최대화하기 위해서는 환경변수를 다양한 조건으로 운전하고, 영향인자들 간의 상호영향인자를 분석하여, 최적의 설계조건 및 변수를 도출하여야 한다. 본 연구의 목적은 상향류식 수초여과지(upflow vegetated filter, UVF)를 설계·제작하여 수면적부하율 및 유입수질 변화에 따른 처리효율 평가와 Froude 상사를 이용한 확대설계를 통해 직경에 대한 처리용량을 도출함에 있다. 이를 위해 직경 600 mm, 높이 1,200 mm의 파일럿규모의 상향류식 수초여과지를 설계, 제작하여 처리성능을 분석하였다.

2. 실험방법

2.1. UVF장치의 구성

기존 수초이용 하수도처리시설은 장방향 구조물로서 면적이 많이 소요되므로 시공성이 상대적으로 용이한 원형 구조물로 처리장치를 구성하였다. 상향류식 수초여과지장치(이하 UVF)는 완전혼합형 2 m³ 저류조, 관유량계, 바이패스밸브, 입자 및 영양염류주입장치, 수리동역학적 입자물질 분리장치(hydrodynamic separator, HDS), UVF로 구성하였다. UVF의 여과와 식재매체는 perlite를 이용하였다. Perlite는 화산암의 일종으로 perlite 원석을 700~1,200℃에서 급속으로 가열하면 8~15배 팽창된다. 비중이 약 0.2로 물보다 매우 가볍고, 구조는 작은 불규칙한 조각으로 구성된다.⁹⁾ Perlite는 육상녹화, 건축단열재, 식물양액재배지 등으로 이용되고 있는데, 공급율이 90% 이상 크므로 기름이나 염료 등의 흡착제거능이 우수한 물질이다. Perlite를 식재매체로 이용한 이유는 비중이 작아 부상하고, 여과속도가 빠르며, 입자에 의한 막힘현상이 적기 때문이다. HDS는 직경이 30 cm이고 높이가 45 cm로 제작하였는데, 유입수의 유속에 의한 선회류(vortex)를 이용하여 입자물질을 제거하기 위함으로 여과의 막힘 현상을 저감시키기 위해 적용하였다. UVF본체는 아크릴재질로 직경 600 mm, 높이 1,200 mm로 제작하였다. Perlite여과는 2 mm 이상 입경을 이용하였으며 여과층 높이는 30 cm로 하였다. Perlite는 부상하기 때문에 perlite 상층에는

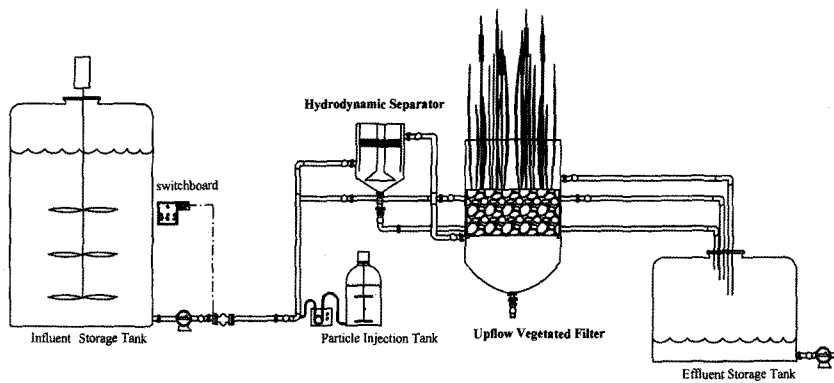
입경이 10 mm의 난석을 3 cm 두께로 덮었다. 식재한 식물은 부들(cattail)로 논에서 채취한 부들을 지하수로 세척하여 줄기는 제거한 12본의 뿌리를 식재하였다. 15평 규모의 온실을 제작하여 UVF장치를 설치하고 운전하였다. 저류조에는 지하수와 영양염류를 혼합하여 원심펌프로 UVF에 영양염류와 입자물질을 공급하였다. 유입수 저류조, 관유량계, HDS 및 UVF의 본체 등의 장치 구성도는 Fig. 1(a)와 같으며 Fig. 1(b)는 온실에 설치된 전경을 나타낸 것이다.

2.2. 운전조건

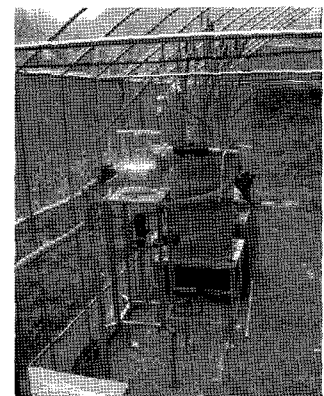
2004년 7월부터 11월 까지 복합비료와 토양입자를 유입원수에 주입하여 UVF장치의 유기물질과 영양물질 제거능을 분석하였다. 토양입자는 체(sieve)로 분류하여 200 μm 이하의 입경을 가진 미세입자를 주입하였다. 복합비료를 물에 용해시켜 저류조에 HDS에서 입자물질을 일부 제거한 후 UVF로 일정량의 유량을 주입하였다. HDS에서는 입자물질의 일부를 제거하고 UVF에 유입하는 유량을 제어하여 일정량 이상은 유입저류조로 순환하도록 하였다. 유량은 마그네틱 유량계를 이용하여 측정하였다. Table 1은 UVF장치의 운전조건과 유입수와 유출수의 수질 그리고 처리효율을 정리한 것이다. 유입유량의 범위는 2.5~34.6 m³/day로 평균 6.4 m³/day, 평균체류시간은 53 min의 조건으로 운전하였다. 수면적부하율의 범위는 8.8~122.5 m³/m²/day로 평균 22.7 m³/m²/day의 조건이다. 유입수의 COD_{Mn} 농도범위는 9.9~168.3 mg/L, TN은 3.5~19.1 mg/L, TP는 5.3~92.7 mg/L의 농도변화를 주었다.

Table 1. The operation conditions of UVF

Parameter	Min	Max	Mean
Flowrate(m ³ /day)	2.5	34.6	6.4
Retention Time(min)	7.1	97.9	53.2
Air Temperature(°C)	7.0	28.0	18.2
Surface Loading Rate(m ³ /m ² /day)	8.8	122.5	22.7
Influent COD _{Mn} (mg/L)	9.9	168.3	50.7
Influent TN(mg/L)	3.5	19.1	13.1
Influent TP(mg/L)	0.3	7.7	2.9



(a) Schematic diagram of upflow vegetated filter system



(b) Photograph of UVF

Fig. 1. Schematic diagram of upflow vegetated filter system.

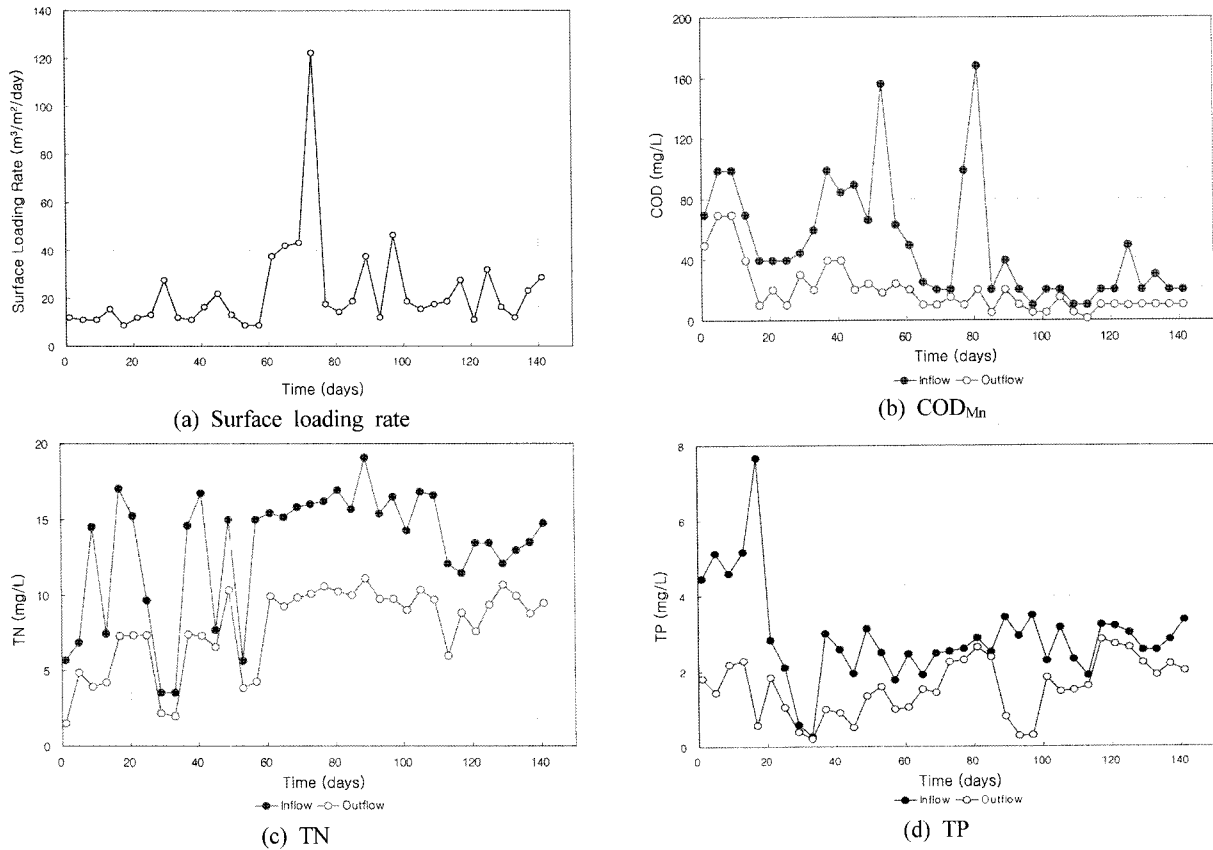


Fig. 2. The variation of surface loading rate and nutrient concentration.

Table 2. Summary of effluent concentration and removal efficiency

Constituents	Effluent(mg/L)			Removal efficiency(%)		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
COD _{Mn}	1.0	69.3	19.5	25.0	90.0	57.5
TN	1.5	11.1	7.8	11.6	73.7	40.0
TP	0.2	2.8	1.6	5.3	92.7	41.5

3. 결과 및 고찰

3.1. UVF장치의 운전결과

운전경과일수별 수면적부하율과 유입수, 유출수의 수질농도변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)에서와 같이 펌프작동 오류로 인하여 수면적부하율이 운전일수 75일이 경과하였을 때 약 122 m³/m²/day의 운전을 제외하면 대체로 15~40 m³/m²/day의 수면적부하율을 유지하였다. Table 2에서와 같이 유출수의 COD_{Mn}, TN, TP의 평균농도는 각각 19.5 mg/L, 7.8 mg/L, 1.6 mg/L를 나타내었다. 평균 제거효율은 COD_{Mn}, TN, TP에 대해 각각 57.5%, 40.0%, 41.5%로 최소, 최대, 평균 제거효율을 Table 2에 요약하였다. Fig. 2(b), (c)에서와 같이 COD_{Mn}과 TP의 경우 유입수 농도를 증가시켜도 유출수 수질농도는 비교적 안정한 농도를 유지하고 있다. TN의 경우는 유입수 농도가 증가하면 유출수 농도도 증가하는 경

향을 나타내었다. 본 실험기간동안에 수조여과지내 인 축적 및 배출로 인하여 유출수내 총인 농도의 증가현상은 발생하지 않았다.

국내·외 연구자들이 수행한 인공습지 관련 연구의 운전 조건 및 식재수종, 그리고 수질항목별 처리효율을 Table 3에 요약하였다. 유입수 수질, 운전조건, 환경여건에 따라 수질항목별 처리효율의 변화폭은 크다. 대체로 인공습지의 수면적부하율은 하수처리장 2차 침전지 수면적부하율 20 m³/day의 1/15~1/20 정도로 낮게 운전되고 있음을 보여준다.

3.2. UVF장치설계 및 용량산정

UVF장치를 설계하기 위해서는 우선 대상 지역에서 배출되는 하수발생량을 파악해야 한다. 우리나라 농어촌 지역 소규모 하수처리시설은 50 m³/day의 처리용량의 설계가 적합한 것으로 보고하였다.^{3,4)} 침투유량비를 1.5로 하면 설계유량은 75 m³/day가 될 것이다. 기존 수조재배지의 경우 장방향으로 구성되어 소요부지가 많이 필요하므로, 본 과제에서는 원형 구조물로 설계하고자 한다. UVF장치의 전처리장치로 HDS를 설치하여 입자물질 제거를 수행하고자 한다. HDS는 상대적으로 직경이 작아 유입유량에 의한 원심력으로 강한 선회류가 유도되며, UVF의 직경을 크게 하여 선회류의 영향이 적도록 하였다. 이와 같은 현상을 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)프로그램인 FLUENT 6.0²¹⁾를 활용하여 Fig. 3과 같이 모의하였다.

Table 3. Summary of constructed wetland operation condition and removal efficiency for various wastewater

Wetland Type	Researcher	Surace Loading rate(m ³ /m ² /day)	Influent	Vegetation	Removal Efficiency(%)				
					BOD ₅	COD	SS	TN	TP
SFW	Yang ⁷⁾	0.13	polluted stream water	cattail, reed				30~38	
SFW	Nam <i>et al</i> ¹⁴⁾	0.064~0.759	agricultural reservoir	reed	52.0~71.3	35.6~48.6	50.8~89.7	35.0~74.3	21.0~60.8
SFW	Yoon <i>et al</i> ¹³⁾	0.06	septic tank effluent	reeds, duckweed	77.1		74.8	24.1	46.2
VFW+Pond	Kim <i>et al</i> ¹⁰⁾	0.042	wastewater treatment plant effluent	reeds, cattails, iris	21.5	19.9		59.1	67.9
FWS	Park <i>et al</i> ¹²⁾		aquaculture effluent	water lettuce	82-92	42-53	92	79	93.6
FWS	Park <i>et al</i> ¹¹⁾		synthetic sewage	water hyacinth, duckweed, dropwort		50~88		28~82	21~73
SFW	Seo <i>et al</i> ⁴⁾	0.075~0.6	sewage	reed, iris	91	73	83,	45~59	80~96
FWS	Kaseva ¹⁶⁾		sewage treatment plant effluent	reeds		33.6~60.7		32.2~44.3	
FWS	Sonstom ¹⁸⁾	<0.165	storm runoff	cattail, reed			41~49	52~56	66~72
FWS	Mashauri ¹⁷⁾		sewage	reed		66	80		
SFW	Vymazal ¹⁹⁾		sewage treatment plant effluent, urban runoff	cattail, reed	88.0		84.3	41.6	51.0
SFW+FWS	Ansola ²⁰⁾		sewage treatment plant effluent, urban runoff	cattail, reed	61.4	59.5	60.9	35.6	34.8

FWS: free water surface, SFW: subsurface flow wetland, VFW: vertical flow wetland

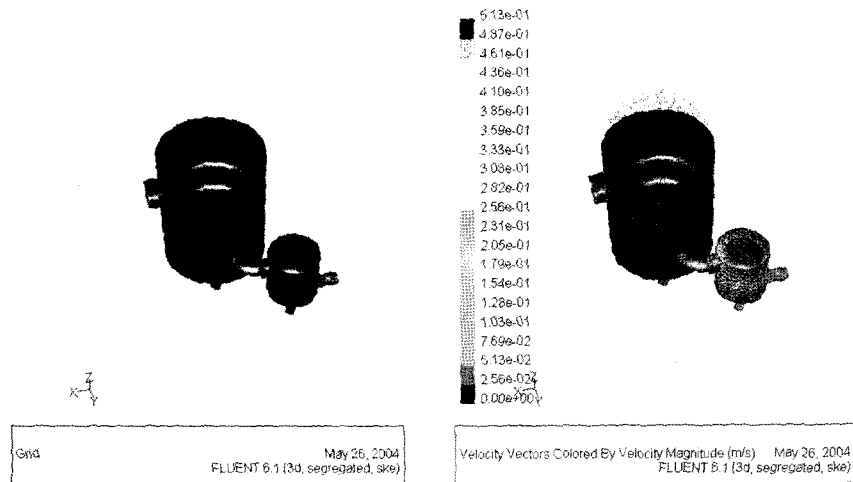


Fig. 3. Simulated UVF device using computational fluid dynamics.

Drehwing 등¹⁵⁾은 실험실 규모의 처리장치를 실제 규모로 설계하기 위해 식 (1)과 같은 Froude수를 이용한 무차원 상사법칙을 제안하였다.

$$F_r = \frac{v^2}{gs} \tag{1}$$

여기서, F_r = Froude 수, v = 유속, g = 중력가속도, s = 길이이다. $v = Q/A$ 이고 A 는 유입부 직경(D)의 함수이다. 식 (2)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_r = \left(\frac{Q^2}{D^5} \right) \tag{2}$$

따라서, 유량 Q 와 직경 D 와의 관계는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{Q_{model}}{Q_{prototype}} = \left(\frac{D_{model}}{D_{prototype}} \right)^{2.5} \tag{3}$$

여기서, Q_{model} , D_{model} 은 실험실 규모의 UVF장치 유량 및 직경이다. $Q_{prototype}$, $D_{prototype}$ 은 실제 규모의 UVF장치의 유량과 직경이다. 식 (3)을 이용하여 UVF직경을 1 m에서 0.2 m 간격으로 증가시켜 5 m까지의 증가에 따른 처리용량을 산정한 결과는 Fig. 4와 같다. UVF의 직경을 3 m로 설계할 경우 평균하수발생량 50 m³/day에서 침투유량 75 m³/day의 용량의 처리가 가능한 것으로 산정되었다.

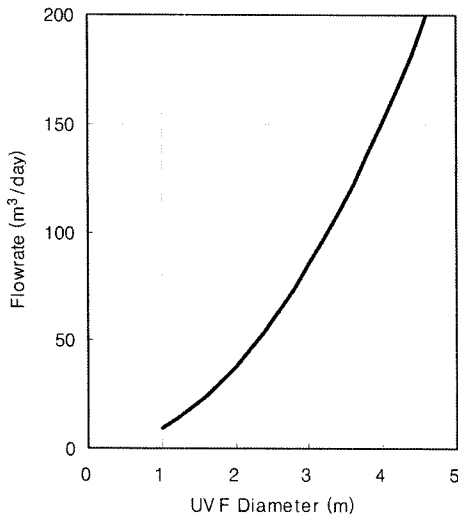


Fig. 4. Determine the UVF diameter using the Froude number.

4. 결론

농촌지역 하천 및 호수의 부영양화를 방지하기 위해서는 TN, TP와 같은 영양염류의 제거가 강조되고 있으며 법적기준도 강화되었다. 기존의 소규모 장치형 하수처리공법은 유지관리를 위해서는 전문기술인력이 필요하고 시설비 및 전력소비가 과다할 뿐만 아니라 기계 고장시 악취발생 등 여러 문제점들을 가지고 있다. 또한, 기존의 고도처리시설을 이용한 TN, TP 제거기술은 건설, 유지관리비용 및 운전이 난해하며 유입하수의 C/N비가 낮아 처리효율 향상에 한계가 있다. 따라서 건설비용이 적게 소요되며, 운전관리가 용이하고, 질소, 인 물질 등의 영양염류를 제거할 수 있는 수초여과지를 개발하고자 본 과제를 수행하였다. 실규모 수초이용 하수고도처리시설의 처리성능을 평가하고, 상향류식 수초여과지(UVF)를 제작하여 처리효율을 분석하였다. 부들(cattail)을 perlite에 식재한 상향류식 수초여과지(upflow vegetated filter, UVF)장치와 입자물질 전처리장치(hydrodynamic separator, HDP)를 조합하여 인공하수를 처리능을 분석한 결과 평균 제거효율은 COD, TN, TP에 대해 각각 57.5%, 40.0%, 41.5%를 나타내었다. Froude수를 이용한 무차원 상사법칙을 이용하여 UVF장치의 실규모 설계용량을 산정한 결과 UVF의 직경을 3 m로 설계할 경우 평균하수발생량 50 m³/day에서 침투유량 75 m³/day의 용량은 충분히 처리가 가능한 것으로 산정되었다. UVF장치는 자연적인 처리공법으로 유지관리가 용이하고, 무인운전이 가능하며 또한 높은 수면적부하율로 컴팩트한 공간에 적용할 수 있고 농촌지역에 경관과 조화를 이루어 마을단위 소규모 하수고도처리 공정에 적합할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 학술진흥재단 지역대학우수과학자 지원과제(과제번호: R05-2004-000-11659-0)으로 수행하였으며, 본 연구

비를 지원한 한국과학재단과 학술진흥재단에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 박진식, 문추연, 장성로, "수생식물을 이용한 농어촌하수 처리에 관한 연구," 대한위생학회지, **17**(2), 40~47(2002).
2. 윤춘경, 임용호, 김형중, "인공습지에 의한 농공단지 폐수처리," 한국농공학회지, **16**(2), 154~162(1997).
3. 김형중, 윤경섭, 이광식, 신현범, 배요섭, 권태영, "농촌 지역 마을하수 처리현황과 개선방안," 농어촌과 환경, 1~11(2004).
4. 서동철, 이홍재, 조주식, 박현건, 김형갑, 허중수, "자연정화공법에 의한 하수처리장에서 최적 여재 선정," 한국환경농학회지, **22**(1), 26~35(2003).
5. 김형중, 양홍모, "수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리: 인공습지 및 연못-습지 시스템," 한국수자원학회지, **32**(5), 111~123(1999).
6. Prochaska, C. A., Zouboulis, A. I., "Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate," *Ecol. Eng.*, **26**, 293~303(2006).
7. 양홍모, "갈대 및 부들 습지셀의 연못시스템 방류수 질 소제거 비교," 한국환경농학회지, **23**(4), 234~239(2004).
8. Sakadevan, K., Bavor, H. J., "Nutrient removal mechanisms in constructed wetlands and sustainable water management," *Water Sci. Technol.*, **40**(2), 121~128(1999).
9. Roulia, M., Chassapis, K., Fotinopoulos, C. H., Savvidis, T. H., Katakis, D., "Dispersion and sorption of oil spills by emulsifier-modified expanded perlite," *Spill Sci. Technol.*, **8**(5-6), 425~31(2003).
10. 김혜주, 이옥하, "식물정화조를 이용한 농업용 폐수의 정화 및 재활용 사례," 한국환경생태학회지, **16**(2), 179~187(2002).
11. 박진식, "부레옥잠과 미나리를 이용한 연속식 하수처리에서 COD, N 및 P의 제거," 한국환경농학회지, **21**(2), 144~148(2002).
12. 박종호, 이원호, 조규석, 황규덕, "물상추를 이용한 양어장 배출수의 질소와 인의 제거," 한국양식학회지, **16**(4), 252~256(2004).
13. 윤춘경, 정광욱, 함종화, 전지홍, "자연정화방법에 의한 오수처리와 농업적 재이용 타당성 검토," 한국농공학회지, **45**(6), 194~206(2003).
14. 남귀숙, 배요섭, 김형중, 이상준, 이광식, "농업용 저수지 수질개선을 위한 지하흐름 갈대 인공습지의 적용," 한국습지학회논문집, **6**(4), 59~69(2004).
15. Drehwing, F. J., Murphy, C. B., Garver, S. R., Bhargava, D., Combined sewer overflow abatement program, Rochester, N. Y., EPA-600/2-79-031b, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio, pp. 43~60(1979).

16. Kaseva, M. E., "Performance of a sub-surface flow constructed wetland in polishing pre-treated wastewater: a tropical case study," *Water Res.*, **38**, 681~687(2004).
17. Mashauri, D. A., et. al., "Constructed wetland at the University of Dar Es Sallam," *Water Res.*, **34**(4), 1135~1144(2000).
18. Sonstorm, R. S., Clausen, J. C., Askew, D. R., "Treatment of parking lot stormwater using a StormTreat system," *Environ. Sci. Technol.*, **36**(20), 4441~4446(2002).
19. Vymazal, J., "The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience," *Ecol. Eng.*, **18**, 633~646(2002).
20. Ansola, G., Gonzalez, J. M., Cortijo, R., Luis, E., "Experimental and full-scale pilot plant constructed wetlands for municipal wastewater treatment," *Ecol. Eng.*, **21**, 43~52(2003).
21. FLUENT Inc. User Services Center, FLUENT Ver 6.0, pp. 1~56(2002).