



가축분뇨처리시설과 연계한 상향류식 인공습지의 자연형 후속처리공정 적용방안에 관한 연구

A study on application of eco-friendly follow-up process connected with livestock wastewater treatment plant using the upflow constructed wetland

최한나¹·조은하¹·강호근²·박주현^{3,4*}·강선홍⁴

Hanna Choi¹·Eunha Cho¹·Hogeun Kang²·Joohyun Park^{3,4*}·Seonhong Kang⁴

¹(주)태영건설, ²(주)네이코스엔지니어링, ³동문이엔티(주), ⁴광운대학교 환경공학과

¹Taeyoung E&C, ²Nakos Engineering, ³Dongmoonent Co., Ltd., ⁴Dept. of Environmental Engineering Kwangwoon University

ABSTRACT

This study developed an up-flow wetland providing either an eco-friendly follow-up process of medium-sized public treatment facility for livestock manure or a non-point source pollution controller near livestock farms. The four bench-scale up-flow wetlands were operated with four different bed media sets. The removal efficiencies of the wetland effluent for COD_{Cr}, TN, TP, SS were 35.2 %, 29.5 %, 31.2 % and 52.2 % for set 1(Blank, without reed, with bio-ceramic), 40.6 %, 43.4 %, 42.2 % and 55.4 % for set 2(with bio-reed & without bio-ceramic), 45.2 %, 48.7 %, 46.6 % and 66.3 % for set 3(with bio-reed & bio-ceramic), 32.9 %, 27.3 %, 29.3 % and 54.1 % for Set 4(with reed & bio ceramic), respectively. The set 3 condition having a mixture of bio-reed and bio-ceramic showed the highest efficiency in the bench-scale evaluation. This study suggests a mixture of bio-reed and bio-ceramic as suitable bed media in the construction of artificial wetlands near livestock farms. Soils including the bed media were monitored during the evaluation for trace elements. Soil analysis results were satisfied with the Korean Soil Contamination Standard. This study showed that the up-flow constructed wetland was feasible to treat the effluent livestock wastewater treatment facility.

Key words: Eco-friendly follow-up treatment, Livestock wastewater, Non-point source, Nutrient removal, Upflow constructed wetland

주제어: 자연형 후속처리공정, 가축분뇨, 비점오염원, 영양물질 저감, 상향류식 인공습지

1. 서론

경제가 발전함에 따라 식생활에도 많은 변화가 일어나, 2000년 이후부터 축산물의 소비량이 지속적으로 증가되면서 축산농가는 점차 대규모의 기업형태로 변화되고 있다. 이러한 가축 사육 두수의 증가로 인해

가축 분뇨량도 급격히 증가하였다. 축산농가에서 배출되므로 이용하는 등 자급자족의 처리가 가능했으나 최근에는 가축분뇨의 양이 지나치게 많아져 지역에 따라서 농경지면적 대비 이용량의 한계를 초과하고 있으며 수계의 오염원으로 인식되어 적정 처리방안이 필요한 실정으로(MOE, 2013a) 국내에서 발생하는 가축분뇨는 2012년 현재 퇴·액비 등 자원화 89 %, 정화 처리 11 %로 대부분 자원화시설에서 처리되고 있다

Received 17 April 2015; Revised 8 June 2015; Accepted 10 June 2015
*Corresponding author: Joohyun Park (E-mail: jhpark@dm-ent.kr)

pp. 293-303
pp. 305-317
pp. 319-323
pp. 325-335
pp. 337-345
pp. 347-357
pp. 359-370
pp. 371-380
pp. 381-393
pp. 395-406
pp. 407-414
pp. 415-425
pp. 427-436

(MOE, 2013b). 그러나 가축분뇨는 전체 오염원 중 오폐수 발생량의 1%에 불과하나 수질오염 부하량의 37%를 차지하고 있다(MOE, 2012).

특히, 정화처리의 경우 축산시설규모에 따라 차이가 있는데 허가 및 신고대상 규모의 경우 공동이나 개인 정화처리시설에서 처리 후 공공수역 직접 방류되며, 신고미만 규모의 축산농가의 경우 가축분뇨공공처리시설로 이송되어 단독 처리 후 방류하거나 1차 처리된 후 하수처리장으로 연계처리 된다.

한편 가축분뇨 정화처리시설의 방류수 수질기준은 가축분뇨 배출시설 규모와 설치지역에 따라 차이가 있으며, 배출시설 규모가 작을수록 방류수 수질기준은 매우 완화되어 있는데 총질소(T-N)의 경우 공공처리시설은 60 mg/L이나 기타지역의 신고대상 처리시설에서는 400 mg/L이며, 총인(T-P)의 경우 공공처리시설은 8 mg/L인데 반해 기타지역의 신고대상 처리시설은 100 mg/L로 규제되어 중소규모 정화처리시설의 처리수가 공공수역으로 방류될 경우 조류 발생 등 수질오염을 가중시킬 수 있다. 따라서 오염원의 수계 유출방지를 위해 수계에 유출되기 전에 발생원에서의 적절한 처리가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 가축분뇨 공공처리시설 또는 개별 정화처리시설에서 방류되는 처리수내 질소와 인의 추가 처리 및 축산지역에서 강우시 질소, 인 등 비점오염원을 함유한 강우 유출수의 처리를 위하여 바이오갈대 및 바이오 세라믹을 적용한 상향류식 인공습지를 개발하였으며, 실험실 규모의 상향류식 인공습지 운영을 통해 중소규모 가축분뇨 정화처리시설과 연계한 후속처리공정 및 축산지역 강우 유출수를 처리할 수 있는 자연형 처리시설로서의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 인공습지의 구성

본 연구에서 개발한 상향류식 인공습지에 사용한 바이오세라믹과 바이오갈대는 본 연구의 참여기관에서 개발된 것으로 바이오세라믹(Cho et al., 2008)은 제올라이트, 게르마늄 맥반석, 황토 및 점토 등을 소성하여 개발된 수질개선 소재이며, 바이오갈대(Lee et al., 2006)는 환경기술개발사업(MOE, 2005)에서 연구

를 통해 개량된 수생식물로 침출수 처리수와 같은 높은 염농도에서도 생육이 왕성하고 수질정화효과가 탁월한 개량갈대의 일종으로, 우량 갈대(Superior reed, *Phragmites australis*)에 식물의 생장을 촉진하고 활성을 높이는 유용한 미생물균을 갈대에 도포하여 식재함으로써 생장 및 활성을 촉진시켜 정화능력과 정화속도를 향상시켰다.

본 연구에서는 상향류식 인공습지의 수처리 특성을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험실 규모로 상향류식 인공습지를 제작하였다. 유입수는 인공습지 하부로 유입되어 상부에서 유출되며, 인공습지내 기반층과 토양층은 800 mm, 수층은 100 mm로 조성하였고 수층 내에 바이오갈대와 일반갈대를 이식하여 처리특성을 비교분석 하였다.

또한 실험실 규모의 상향류식 인공습지 크기는 1,000 mm(H)×500 mm(L)×500 mm(W)로서 15 mm 두께로 4대를 제작하였으며, 이 중 1대는 내부 구성 여재를 육안으로 확인할 수 있도록 투명한 재질의 아크릴(Set 1)로 제작하였고 나머지 3대는 PVC(Set 2, Set 3, Set 4) 재질로 제작하였으며, 각 인공습지의 총 부피는 0.25 m³이고, 바퀴를 부착하여 이동이 용이하도록 제작하였다.

인공습지의 내부 구성은 Table 1과 같이 갈대(바이오갈대, 일반갈대), 배양토(모래+흙), 바이오세라믹 및 세라믹블록, 자갈(가는자갈, 굵은자갈)로 서로 다르게 구성하였다. Set 1은 대조군으로 갈대의 식재 없이 토양에 여재로 자갈 및 세라믹블록, 바이오세라믹, 배양토로

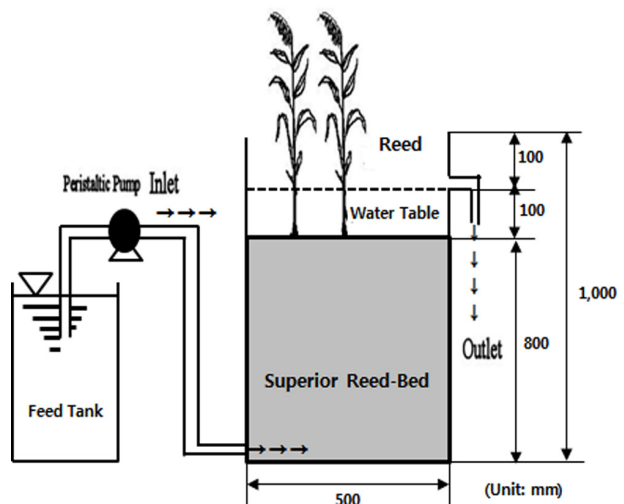


Fig. 1. Conceptual diagram of the upflow constructed wetland.



Table 1. Media configuration of the upflow constructed wetland

Classification	Set 1		Set 2		Set 3		Set 4	
	Media	Height	Media	Height	Media	Height	Media	Height
Media	Underwater	100	Underwater	100	Underwater	100	Underwater	100
	Soil	300	Soil	500	Soil	300	Soil	300
	Bio ceramic	200			Bio ceramic	200	Bio ceramic	200
	Ceramic block	100	Ceramic block	100	Ceramic block	100	Ceramic block	100
	Fine gravel	100	Fine gravel	100	Fine gravel	100	Fine gravel	100
	Coarse gravel	100	Coarse gravel	100	Coarse gravel	100	Coarse gravel	100
Total height	-	900	-	900	-	900	-	900
Characteristic	Control (No reed planting)		Bio reed planting		Bio reed planting and bio ceramic media		Reed planting and bio ceramic media	

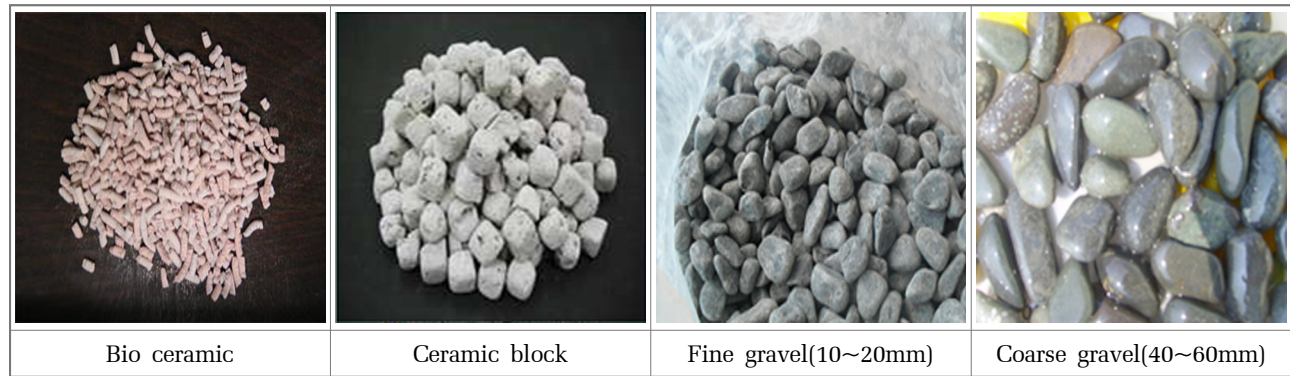


Fig. 2. Media and base materials in constructed wetland.

구성하였으며, Set 2는 바이오갈대의 효율평가를 위해 바이오갈대를 식재하고 여재로 자갈, 세라믹블록, 배양토로 구성하였다. Set 3은 바이오갈대와 바이오세라믹의 효율평가를 위해 바이오갈대를 식재하고 여재로 자갈, 세라믹블록, 바이오세라믹, 배양토로 구성하였으며, Set 4는 일반갈대의 효율평가를 위해 일반갈대를 식재하고 Set 3과 동일한 여재로 구성하였으며, 이를 통하여 인공습지 내의 수생식물의 식재에 따른 처리효율 검토(Set 1, Set 3, Set 4) 와 인공습지 토양층의 여재 충진에 따른 처리효율의 검토(Set 2, Set 3)를 수행하고자 하였다.

배양토는 바이오갈대와 일반갈대의 생장률을 높이고 수중에서 뿌리가 잘 견딜 수 있도록 모래와 흙을 8:2로 혼합하여 사용하였으며, 실험에 사용된 바이오세라믹, 세라믹블록, 자갈은 Fig. 2와 같다.

본 연구에 사용된 바이오갈대는 강원도 철원군 소

재 농장에서 대량 증식시킨 것을 종자상태로 파종하여 생장이 잘 되도록 도우미 미생물을 처리하여 포트단위로 육묘한 것을 사용하였고, 일반갈대는 충북 청주시 소재 농장에서 종자상태로 2차 육묘한 것을 포트단위로 사용하여 약 30일 정도 물을 공급하면서 순치시킨 후 상향류식 인공습지 3개에 수조에 각각 12개체씩 이식하였다.

2.2 실험실 규모의 인공습지 처리효율 분석

인공습지는 초기 2주간은 현장에서 공급이 용이한 지하수를 이용하여 안정화시켰으며, 본 연구에 사용된 시료는 전라북도 용안 축산자원화 단지에서 채수한 액비를 희석하여 사용하였으며 Table 2에서 물리·화학적 특성을 제시하였다.

액비를 이용하여 Table 3과 같이 방류수에서 채수한 액비를 분석하여 가축분뇨 정화처리시설 방류수

pp. 293-303
pp. 305-317
pp. 319-323
pp. 325-335
pp. 337-345
pp. 347-357
pp. 359-370
pp. 371-380
pp. 381-393
pp. 395-406
pp. 407-414
pp. 415-425
pp. 427-436

Table 2. Characteristics of effluent from livestock wastewater treatment plant (Unit : mg/L)

Classification	T-N				T-P				COD _{Cr}			
	1st	2nd	3rd	Ave.	1st	2nd	3rd	Ave.	1st	2nd	3rd	Ave.
Concentration	1202.12	1170.21	1191.48	1187.93	127.07	129.83	136.59	131.16	4062	4187	4125	4124

Table 3. Effluent quality limits of livestock wastewater treatment plant(KMGL, 2015a) (Unit : mg/L)

Classification		BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	Coliform count (number/ml)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
Public treatment plant		30	50	30	3,000	60	8
Treatment plant by livestock wastewater treatment manufacturer		30	50	30	3,000	60	8
Treatment plant by object of permission discharge facilities	Special area	40	-	40	-	120	40
	Other area	120	-	120	-	250	100
Treatment plant by subject to report discharge facilities	Special area	120	-	120	-	250	100
	Other area	150	-	150	-	400	100

수질 기준(TN: 60이하, TP: 8 이하)을 적용하여 총질소와 총인의 농도를 중심으로 20배 희석하여 유입수로 사용하였다. 유입수의 공급은 실험결과의 정량화를 위해서 정량펌프를 이용하여 공급률이 고려된 체류시간인 HRT(Hydraulic Retention Time) 24 hr(Q=70 ml/min)으로 균일하게 주입하도록 설계하였다.

오염물질에 대한 인공습지의 처리효율을 평가하기 위하여 인공습지 유입부와 유출부에서 시료채취를 하였으며, 2014년 3월부터 4월까지 60일 동안 총 50회의 시료에 대해 COD_{Cr}, T-N, T-P, SS를 수질오염공정시험방법과 Standard Method의 실험방법을 준용하여 분석하였다(MOE, 2014; APHA, 1992). COD 분석법의 경우 국내 수질오염공정시험기준에는 COD 망간법으로 되어 있으나, 미국, 유럽 등의 대부분의 선진국에서는 크롬법을 채택하고 있다. 이는 망간법의 유기물 산화력이 많은 유기물질 종류에서 25 ~ 65%인 반면, 크롬법의 유기물 산화력은 95 ~ 100%에 가깝기 때문에 유기물 총량이 보다 정확하게 분석될 수 있다는 측면에서 Standard Method의 COD 크롬법으로 분석을 하였다(John, 1993).

2.3 실험실 규모의 인공습지 토양 모니터링

수생식물을 이용하여 수질오염물질을 효과적으로 제거하기 위해서는 수생식물의 높은 생물량 및 왕성한 근계 형성 그리고 오·폐수의 높은 전기전도도(EC), 온도,

습도 및 고농도의 특정 이온(ion)에 대한 생장 저해를 받지 않아야 한다. 따라서 운영에 따른 인공습지 토양의 전기전도도(EC)의 변화를 분석하기 위하여 토양모니터링센서(WT-1000B, Mirae sensor, Korea)와 데이터로거를 설치하여 실시간으로 토양의 상태를 측정하였으며, 토양층의 COD, T-N, T-P, 수분 및 유기물 함량, pH, 중금속(As, Cd, Cu, Ni, Pb, K, Mg, Ca, Fe)의 축적정도를 평가하기 위하여 토양오염공정시험법에 따라 분석하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 인공습지 수질 모니터링 결과

실험실 규모의 인공습지 처리 효율을 평가하기 위하여 설치 후 수질분석결과 및 수처리 효율을 아래 Fig. 3, 4와 Table 4에 나타내었다(Fig. 3, Fig. 4, Table 4).

운전기간동안 유입수의 평균 농도는 COD_{Cr} 117.6 mg/L, T-N 28.4 mg/L, T-P 2.7 mg/L, SS 68.4 mg/L로 나타났으며, 인공습지에서 처리된 유출수의 평균 수질은 다음과 같다.

Set 1(대조군)은 COD_{Cr} 78.5 mg/L, T-N 20.1 mg/L, T-P 1.8 mg/L, SS 28.5 mg/L로 나타나 평균 처리효율은 COD_{Cr} 35.2 %, T-N 29.5 %, T-P 31.2 %, SS 52.2 %로 나타났다.

Set 2(바이오갈대)는 COD_{Cr} 71.5 mg/L, T-N 16.3 mg/L,



T-P 1.5 mg/L, SS 27.1 mg/L로 평균 처리효율은 COD_{Cr} 40.6 %, T-N 43.4 %, T-P 42.2 %, SS 55.4 %로 나타났다.

Set 3(바이오갈대 & 바이오세라믹)은 COD_{Cr} 64.7 mg/L, T-N 14.7 mg/L, T-P 1.4 mg/L, SS 21.6 mg/L로 평균 처리효율은 COD_{Cr} 45.2%, T-N 48.7%, T-P 46.6%, SS 66.3%로 나타났다.

1. Set 4(일반갈대 & 바이오세라믹)는 COD_{Cr} 80.3 mg/L, T-N 20.8 mg/L, T-P 1.8 mg/L, SS 29.0 mg/L로 평균

처리효율은 COD_{Cr} 32.9%, T-N 27.3%, T-P 29.3%, SS 54.1%로 나타났다.

Set 1, 2, 3, 4에서 액비의 희석농도가 일별로 달라지는 이유는 초기 축산자원화 단지에서 채수한 액비 농도를 기준으로 20배 희석하여 사용하였는데, 축산자원화 단지에서의 액비가 채수시마다 농도 차이가 발생하였다. 그리고 인공습지로 유입되기 전 원수를 모아 두는 저류조 용량이 3,000 L 대용량이어서 내부

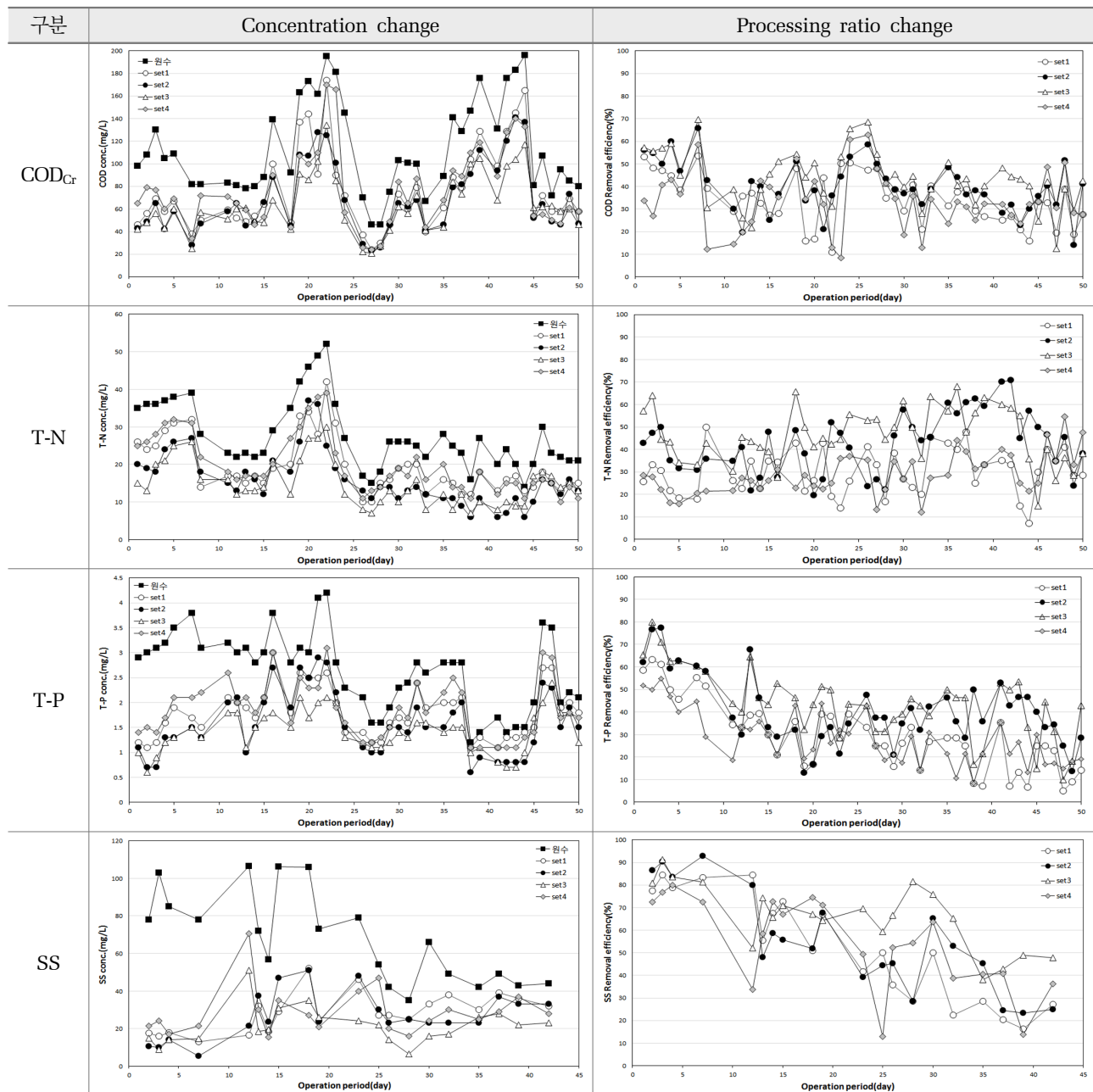


Fig. 3. Change of COD, T-N, T-P and SS concentrations and treatment efficiency of each bench scale constructed wetlands.

- pp. 293-303
- pp. 305-317
- pp. 319-323
- pp. 325-335
- pp. 337-345
- pp. 347-357
- pp. 359-370
- pp. 371-380
- pp. 381-393
- pp. 395-406
- pp. 407-414
- pp. 415-425
- pp. 427-436

세정 및 완전한 배출이 어렵고 전달 사용한 시료가 남아 있는 문제로 인하여 희석수 농도가 일별로 차이가 발생한 것으로 판단된다.

인공습지 내의 수생식물의 식재에 따른 총질소와 총인의 처리효율은(Set 1 vs Set 3 vs Set 4) 일반갈대가 식재된 Set 4의 효율(T-N 27.3%, T-P 29.3%)과 식

재가 없는 Set 1의 효율(T-N 29.5%, T-P 31.2%)이 유사하게 나타나 아직까지 일반갈대의 효율이 나타나지 않고 있다고 판단된다. 이는 유묘를 식재 후 약 30일 정도 경과 후부터 측정을 시작하였기 때문에 일반갈대의 생장에 따라 변화될 것으로 예측되며, 바이오갈대가 식재된 Set 3의 경우 Set 1 및 Set 4 대비 바이오

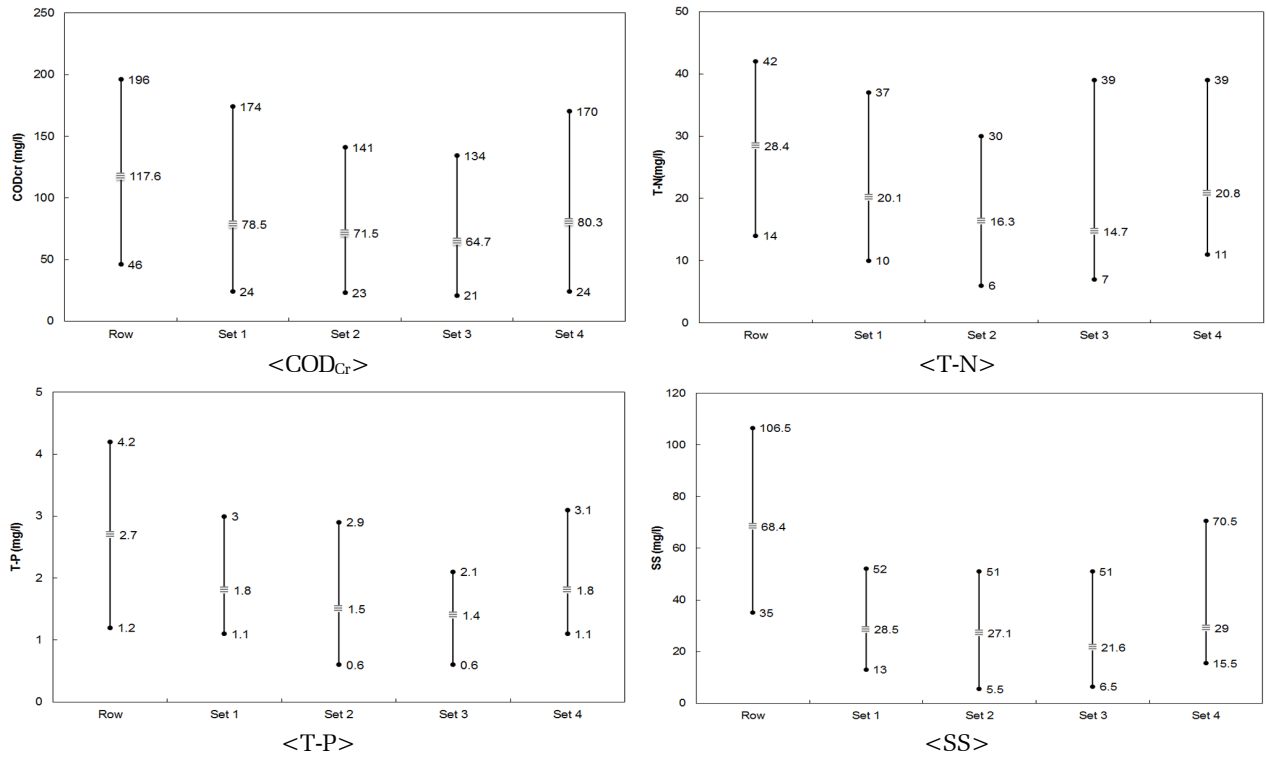


Fig. 4. Maximum, minium and average value of T-N, T-P, SS in the bench scale constructed wetlands.

Table 4. Maximum, minium and average value of concentration and treatment efficiency in the bench scale constructed wetlands (Unit : mg/L, %)

Concentration	CODcr			T-N			T-P			SS			
	Aver.	Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.	
Influent	117.6	196.0	46.0	28.4	42.0	14.0	2.7	4.2	1.2	68.4	106.5	35.0	
Effluent	Set 1	78.5	174.0	24.0	20.1	37.0	10.0	1.8	3.0	1.1	28.5	52.0	13.0
	Set 2	71.5	141.0	23.0	16.3	30.0	6.0	1.5	2.9	0.6	27.1	51.0	5.5
	Set 3	64.7	134.0	21.0	14.7	39.0	7.0	1.4	2.1	0.6	21.6	51.0	6.5
	Set 4	80.3	170.0	24.0	20.8	39.0	11.0	1.8	3.1	1.1	29.0	70.5	15.5
Treatment efficiency	CODcr			T-N			T-P			SS			
	Aver.	Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.	
	Set 1	35.2	53.7	10.8	29.5	50.0	7.1	31.2	63.3	6.7	52.2	84.5	16.3
	Set 2	40.6	65.9	19.8	43.4	70.8	19.6	42.2	77.4	12.9	55.4	92.9	23.3
Set 3	45.2	69.5	21.8	48.7	68.0	27.6	46.6	80.0	16.7	66.3	91.3	38.1	
Set 4	32.9	62.9	8.3	27.3	44.0	12.0	29.3	54.8	8.3	54.1	80.0	13.0	



갈대에 의한 효율 차이가 분명하게 나타나고 있어 바이오갈대가 일반갈대보다 성장속도가 빠르고 고농도 유입수에 강한 것으로 사료된다(MOE, 2005). T-N 농도의 감소는 알려져 있는 인공습지의 질소제거 기작 즉, 미생물에 의한 질산화-탈질화, 식물에 의한 흡수, 물리적 반응인 흡착-침전 등에 의해 제거되었을 것으로 생각된다(Faulker and Richardson, 1989; Spiels and Mitsch, 2000; Gersberg et al., 1985). 인공습지에서 인

제거는 미생물과 식물에 의한 흡수, 토양에 의한 흡착, 유기물 및 무기물과 결합에 의한 침전 등으로 제거되었을 것으로 생각된다(Reddy et al., 1998). 그러나 인공습지는 T-P 흡착에 대한 포화용량이 존재하고 이용량을 초과하면 인이 처리되지 못하고 용출되어 유입보다 유출수의 T-P 농도가 높게 나타나는 경향이 있으나(Gerrites, 1993), 본 인공습지의 경우 인의 탈착이 아직 일어나지 않은 것으로 판단된다.

Table 5. Treatment efficiency of constructed wetlands(MOE, 2003) (Unit : mg/L, %)

Classification	HRT	Influent	BOD	SS	T-N	T-P	Note
		Treatment efficiency					
Bio-Park(JAPAN)	0.5h	Influent	6.9	20.9	3.7	0.12	
		Treatment efficiency	28	42	15	21	
Shinjung lake(KOREA)	1.9h	Influent	3.1~10.4	7.0~42.0	1.4~4.0	0.08~0.33	
		Treatment efficiency	9.1~78.8 (49.2)	4.3~89.5 (65.7)	0.1~55.0 (23.9)	0~49.7 (27.4)	
Senegawa(JAPAN)	5h	Influent			2.82	0.185	
		Treatment efficiency			17	21	
Sannogawa(JAPAN)	5~10h	Influent			3.4	0.23	
		Treatment efficiency			32	39	
Shinyang river(KOREA)	1.5day	Influent	6.0	15.4	5.8	0.198	
		Treatment efficiency	58	65	57	57	
North Americal DB	4~14day	Influent	5.1~151.0		3.32~51.0	0.53~11.0	
		Treatment efficiency	64.8		70.1	54.3	
Lakelamd, FL(U.S.A)	-	Influent	3.88	5.60	10.36	9.05	
		Treatment efficiency	19.6	16.1	80.8	53.4	
Canon Beach, OR(U.S.A)	10~14day	Influent	27	51			
		Treatment efficiency	77.8	78.4			
West Jackson County, MS(U.S.A)	12day	Influent	13~46	12~49			
		Treatment efficiency	62~93	53~89			
Hillsboro, OR(U.S.A)	4~27day	Influent	5.1	7.7	11.9	6.3	
		Treatment efficiency	40	-24.7	59.7	39.7	
Des Plains River, IL(U.S.A)	6.5day	Influent		49.8	1.8		T-N: NO ₃ -N
		Treatment efficiency		86~90	61~92	65%	
Non-point source management (Management manual)		Treatment efficiency		76	30	49	

pp. 293-303

pp. 305-317

pp. 319-323

pp. 325-335

pp. 337-345

pp. 347-357

pp. 359-370

pp. 371-380

pp. 381-393

pp. 395-406

pp. 407-414

pp. 415-425

pp. 427-436

일반적으로 식물을 이용한 오염물질 재처리라는 측면에서 단위 시간동안 우수한 식물 종(species)을 선별하여 적용하는 것이 중요하다. 그리고 식물의 근권(rhizosphere)에 도우미 미생물(Helper Microorganism, HM)과 같이 토양 및 수층 환경의 안정화를 촉진시킬 수 있는 미생물 상을 조성하는 것은 식물의 성장 및 생체량을 증가시킬 뿐만 아니라 토양 및 수층에서 여러 유기 및 무기물질의 왕성한 흡수를 통하여 오염원의 제거효율이 높다(MOE, 2005). 또한 유입되는 영양염류의 지속적 공급에 의하여 습지내 식물량은 식재된 이후 빠른 시간에 성장하고, 생태계 확대에 기여하는 것으로 나타났다(Kang, 2009).

Set 2와 Set 3는 인공습지 토양층의 여재 충진에 따른 처리효율을 비교할 수 있는데, 바이오세라믹이 충진된 Set 3가 모든 항목에서 처리효율이 높게 나타났다. 특히 SS의 경우 평균, 최대 및 최소 처리율이 10% 이상 차이가 나는 것으로 나타났다. 이는 인공습지의 조성시 바이오세라믹 여재의 충진을 통해 처리효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 상항류식 인공습지에서 SS의 처리효율이 높다는 것은 여재의 기능인 흡착 부분도 있겠지만, 부유물질이 공극사이를 채워 나타나는 현상일 수도 있기 때문에 유지관리에 대한 부분의 연구가 필요할 것으로 판단된다. 인공습지내 습지식물의 밀도가 높으면 바람 및 열에 의한 혼합효과 감소, 물질의 수평운동 방해 등으로 체류시간을 연장시켜 SS의 침전이 증가된다(Brix, 1993; Dinges, 1982). 또한 식물뿌리와 SS간 정전기적 작용에 의해 SS가 뿌리에 부착된 후 식물과 미생물에 의해 분해되는 등 습지식물의 밀도가 인공습지의 SS 처리효율을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Wolverton, 1989).

처리 효율은 Set 3(바이오갈대 & 바이오세라믹)가 타 인공습지에 비해 높게 나타나고 있으나 처리효율 비교기간이 다소 짧은 기간에 이루어졌으며, 현재까지 바이오갈대나 일반갈대 모두 유묘로써 갈대에 의한 효율로 판단하기에는 미흡한 경향이 있어 지속적인 운영에 따른 효율비교가 필요할 것으로 사료된다. 또한, Set 2(바이오갈대)의 경우 바이오 세라믹 층이 없는 대신 토양층이 다른 인공습지보다 200 mm 깊어 토양에 의한 여과효과로 Set 1 및 Set 4보다 처리효율이 높게 나타날 수도 있기 때문에 이에 대해 향후 추가 연구를 통하여 규명할 필요가 있다.

3.2. 인공습지 토양 유기물 및 중금속 분석 결과

인공습지를 이용하여 가축분뇨 정화처리장 처리수나 비점오염원을 재처리할 경우 유입수내 유기물 및 영양물질(N, P), 가축분뇨에 용존되어 있는 중금속 등이 토양층에 축적되어 토양오염의 원인으로 작용할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 인공습지 토양층의 유기물 등 오염원 변화를 정기적으로 모니터링 하였다.

1차 시료분석은 인공습지 설치 완료 후 지하수로 시운전한 후 분석한 결과이며, 실험 전후에 대한 비교가 가능하도록 하였다.

분석 결과는 Table 6과 같으며, 전반적으로 모든 Set에서 pH는 중성을 유지하였으며, 총인보다는 질소 축적량이 더 컸다. 특히 Set 3의 경우 3차까지는 질소와 인 모두 축적율이 가장 적었는데 4차에 질소의 축적량이 큰 폭으로 증가한 것으로 나타났는데 이는 당시 인공습지의 유입수 공급라인이 교체되면서 처리되지 않은 유입수가 그대로 인공습지 상부에 저류되어 나타난 것으로 판단된다. 또한 전반적으로 인의 축적량이 적었던 것은 인공습지 기반재로 사용한 바이오블록과 바이오세라믹 및 토양에 의한 흡착효과로 판단되며, 바이오세라믹이 충진되지 않은 Set 2의 경우 다른 Set 보다 초기 대비 인의 축적률이 크게 나타났으나 Set 2의 경우 타 Set에 비해 토양층의 두께가 깊어 토양층에 의해 흡착량이 증가된 것으로 사료된다.

유기물 함량은 모든 Set에서 3차부터 감소하는 추세를 나타났으며, 토양 무기물 함량은 각 항목별 증감에 차이가 있긴 하지만 중금속의 경우 Table 8에서 제시한 토양오염 우려 및 대책기준이내의 양호한 상태로 나타났다(Table 7). 기존 가축분뇨 및 퇴비·액비 사용에 따른 연구에서 지하수 및 토양 등 주변 환경에 대한 중금속의 영향은 나타나지 않았지만 처리시설 방류수에서 일부 잔류의약품물질이 소량 검출되어 개별 및 공공처리시설에서의 잔류의약품물질에 대한 모니터링이 필요한 것으로 나타났다(Jeong et al., 2014).

인공습지 내 토양의 pH는 모든 Set에서 1차에서 4차 까지 평균 7.01, 7.31, 7.37, 7.28로 비슷한 값을 나타냈는데, 인공습지 내 용존 이산화탄소가 감소하면 pH는 증가하며, 식물플랑크톤이 광합성을 할 경우 용존 이산화탄소를 소모하게 되어 pH가 증가하는 양상을 보인다(Home and Goldman, 1994).

인공습지 내 토양의 이온량, 즉 오염물질의 이온강



도를 나타내는 전기전도도(EC) 변화를 시간에 따라 측정된 결과 Set 1, 2, 3, 4의 인공습지 모두 처리 시간에 따라 다소 감소하는 경향이 나타났다. 갈대를 이식하지 않은 Set 1 인공습지는 초기에 측정된 전기전도도 측정값인 1.07 dS/m에 비해 약 60.7% 감소하였으

며, 바이오갈대를 식재한 Set 2와 Set 3은 각각 초기 측정된 전기전도도 0.74 dS/m, 0.70 dS/m에 비해 약 39.1%, 54.2% 감소하였고, 일반갈대를 식재한 Set 4는 초기 측정된 전기전도도 0.89 dS/m에 비해 66.2% 감소하였다.

Table 6. Analysis results of soil organic matter and nutrient matter in the constructed wetlands

Classification		1st(2/6)	2nd(3/10)	3rd(3/24)	4th(4/7)	Average
Set 1	T-N(mg/kg)	361.64	456.09	671.18	837.85	581.69
	T-P(mg/kg)	141.14	172.94	171.49	198.23	170.95
	COD(%)	0.13	0.30	0.08	0.15	0.17
	Moisture contents(%)	21.05	25.54	21.00	23.56	22.79
	Organic matter contents(%)	1.18	1.57	1.26	0.6	1.15
	pH	7.23	6.62	6.93	7.26	7.01
Set 2	T-N(mg/kg)	236.11	323.98	619.58	600.33	445.00
	T-P(mg/kg)	89.84	163.54	177.59	223.52	163.62
	COD(%)	0.13	0.22	0.11	0.18	0.16
	Moisture contents(%)	22.57	24.50	22.57	23.99	23.41
	Organic matter contents(%)	3.16	1.02	1.04	0.8	1.51
	pH	7.6	7.13	7.33	7.17	7.31
Set 3	T-N(mg/kg)	373.60	248.49	385.39	1,029.69	509.29
	T-P(mg/kg)	142.59	158.48	215.81	230.26	186.78
	COD(%)	0.15	0.27	0.09	0.23	0.19
	Moisture contents(%)	19.20	23.56	22.29	21.93	21.75
	Organic matter contents(%)	1.77	1.04	1.12	0.6	1.13
	pH	7.53	6.76	7.42	7.37	7.37
Set 4	T-N(mg/kg)	289.91	311.40	431.21	528.55	390.27
	T-P(mg/kg)	86.23	154.15	135.52	178.23	138.53
	COD(%)	0.07	0.41	0.12	0.10	0.18
	Moisture contents(%)	19.86	26.69	21.86	21.46	22.47
	Organic matter contents(%)	1.76	1.46	1.15	0.6	1.24
	pH	7.68	6.78	7.31	7.33	7.28

Table 7. Analysis results of soil inorganic and heavy metal in the constructed wetlands

(Unit : mg/kg)

Classification		Mg	K	Ca	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Set 1	1st	880.70	275.19	3,085.29	154.91	13.36	6.27	72.84	4.64	1.16	33.03
	2nd	1,180.54	366.39	2,323.11	128.77	37.53	13.90	77.10	5.12	1.69	34.43
Set 2	1st	1,254.93	355.28	3,646.25	189.00	25.45	11.04	68.96	5.07	1.56	35.15
	2nd	1,125.10	253.46	4,278.39	165.29	20.26	12.12	92.07	4.71	1.58	33.61
Set 3	1st	989.43	226.93	5,424.85	131.28	16.98	6.16	57.33	5.20	1.60	33.81
	2nd	1,111.56	243.57	4,672.60	152.75	16.48	8.84	53.28	4.84	1.58	34.29
Set 4	1st	714.94	234.60	2,243.61	124.81	8.31	10.29	86.34	5.34	1.60	36.83
	2nd	1,410.55	305.62	2,475.54	174.42	13.46	9.80	76.08	4.97	1.72	35.17

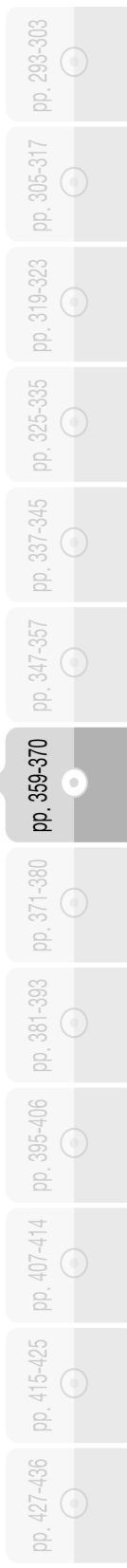


Table 8. Environmental standard indicators of soil in Korea(KMGL, 2015b)

Pollutant	Anxiety criterion			Measure criterion		
	1 Area	2 Area	3 Area	1 Area	2 Area	3 Area
Cd	4	10	60	12	30	180
Cu	150	500	2,000	450	1,500	6,000
As	25	50	200	75	150	600
Pb	200	400	700	600	1,200	2,100
Cr6+	5	15	40	15	45	120
Zn	300	600	2,000	900	1,800	5,000
Ni	100	200	500	300	600	1,500
F	400	400	800	800	800	2,000
Organophosphorus compound	10	10	30	-	-	-
PCB	1	4	12	3	12	36
CN	2	2	120	5	5	300
Phenol	4	4	20	10	10	50
Benzene	1	1	30	3	3	9
Toluene	20	20	60	60	60	180
에틸벤젠	50	50	340	150	150	1,020
크실렌	15	15	45	45	45	135
TPH	500	800	2,000	2,000	2,400	6,000
TCE	8	8	40	24	24	120
PCE	4	4	25	12	12	75
Benzopyrene	0.7	2	7	2	6	21

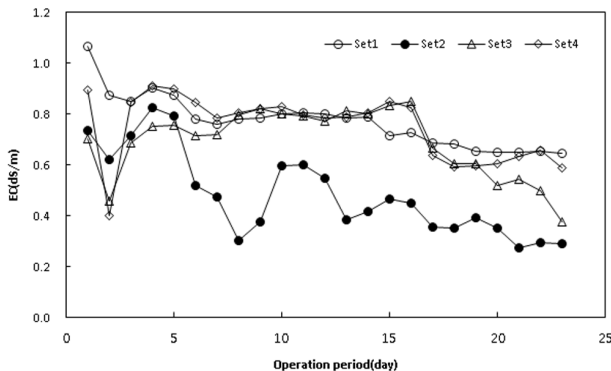


Fig 5. Changes of soil electric conductivity in the constructed wetlands.

4. 결 론

본 연구에서는 전국의 중소규모 가축분뇨 공공처리시설 또는 개별 정화처리시설과 연계한 자연친화적 후속처리공정 및 축산지역에서 강우시 유출되는 비점오염원을 저감할 수 있는 상향류식 인공습지를

개발하기 위하여 실험실 규모의 인공습지를 제작하여 수생식물의 식재유무, 토양의 여재충진 유무 등에 따른 처리 효율, 토양 유기물 및 중금속 분석을 수행하였다.

1) 인공습지 처리 효율을 평가하기 위한 수질 모니터링 결과 운전기간동안 유입수의 평균 농도는 COD_{Cr} 117.6 mg/L, T-N 28.4 mg/L, T-P 2.7 mg/L, SS 68.4 mg/L로 나타났으며, 인공습지에서 처리된 유출수의 평균 처리효율은 Set 1(대조군)의 경우 COD_{Cr} 35.2%, T-N 29.5%, T-P 31.2%, SS 52.2%였으며, Set 2(바이오갈대, 바이오세라믹)는 COD_{Cr} 40.6%, T-N 43.4%, T-P 42.2%, SS 55.4%로 나타났다. Set 3(바이오갈대 & 바이오세라믹)의 평균 처리효율은 COD_{Cr} 45.2%, T-N 48.7%, T-P 46.6%, SS 66.3%로 나타났으며, Set 4(일반갈대 & 바이오세라믹)는 COD_{Cr} 32.9%, T-N 27.3%, T-P 29.3%, SS 54.1%로 나타났다.

2) 바이오갈대 등 수생식물의 식재에 따른 효율의 변화를 살펴보기 위해 식재 무(Set 1), 바이오갈대 식



재(Set 2), 바이오갈대 식재 및 바이오세라믹(Set 3), 일반갈대 식재(Set 4) 등을 비교하였을 때, 일반갈대 식재와 식재를 하지 않은 시설은 비슷한 효율을 보였으나, 바이오갈대 식재 시설은 가장 높은 처리효율을 보였다. 이는 바이오갈대가 일반갈대보다 성장속도가 빠르고 고농도 유입수에 강한 것으로 사료된다. 또한 토양에 충전된 바이오세라믹 여재의 존재 유(Set 3), 무(Set 2)의 비교시 처리효율이 바이오세라믹을 충전한 Set 3의 처리효율이 모든 항목에서 높게 나타났다. 이를 통해 살펴보면, 인공습지의 구성은 바이오갈대 및 바이오세라믹의 혼합적용이 가장 적합한 구성이라 판단된다.

3) 운전기간 동안 토양의 평균 유기물 함량은 모든 인공습지에서 3차부터 감소하는 추세로 나타났으며, 향후 갈대 성장 및 토양 미생물에 의한 변화를 모니터링 할 필요성이 있다. 전반적으로 모든 인공습지에서 pH는 중성을 유지하였으며, 총인보다는 질소 축적량이 더 많았다. 토양 무기물 함량은 분석결과 각 항목별 증감에 차이가 있긴 하지만 중금속의 경우 토양오염 우려 및 대책기준이내의 양호한 상태로 나타났다.

이를 통해 공공수계의 큰 오염원인 가축분뇨에서 유출되는 처리시설의 방류수를 인공습지와 연계한 처리를 통해 방류함으로써 수계의 오염부하를 저감하고 중소규모 축산지역 및 퇴액비 사용 농지에 한국형 처리시설을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- American Public Health Association (APHA) (1992) Standard Methods for examination of water and wastewater, AWWA. WPCF., 18th, pp.5-4~5-10.
- Brix, H. (1993) *Wastewater treatment in constructed wetlands, system design, removal processes, and treatment performance*, Lewis Publishers, pp.9-22.
- Cho, W. J., Shim, S. H., Cho, Y. T., Kim, Y. H., Kim, I. S., Lee, E. J. (2008) Bio-ceramic for water purification and manufacturing method thereof, KR-B-10-0807175.
- Dinges, R. (1982) *Natural Systems for Water Pollution Control*, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
- Faulker, S. P., Richardson, C. J. (1989) *Physical and chemical characteristics of freshwater wetland soils*, Lewis Publishers, pp.41-72.
- Gerrites, R. G. (1993) Prediction of travel times of phosphate on soils at a disposal site for wastewater, *Water Res.*, 27. pp.263-267.
- Gersberg, R. M., Elkins, S. R., Lyons, S. R., Goldman, C. R. (1985) Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands, *Water. Res.*, 20. pp.363-368.
- Home, A. J., Goldman, C. R. (1994) *Limnology*, McGraw-Hill, New York, USA, pp.115-132.
- Jeong, D. H., Lee, Y. J., Lee, C. G., Choi, S. A., Kim, M. Y., Lee, Y. S., Kim, M. J., Yu, S. J. (2014) Environmental impact of livestock manure and organic fertilizer use on the Masan stream watershed, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 23(2), pp.75-87.
- John, W. M. (1993) *Environmental Chemistry*, 2th ED., pp.401-432.
- Kang, C. G., Lee, S. Y., Marla C, M., Kim, L. H. (2010) Application of free water surface constructed wetland for treating the agricultural runoff, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 19(1), pp.83-89.
- Korea Ministry of Government Legislation (KMGL) (2015a) Livestock manure of management and utilization act/enforcement regulations.
- Korea Ministry of Government Legislation (KMGL) (2015b) Soil contamination policies in Korea.
- Lee, E. J., Choi, H. G., Kim, I. S., Choi, M. Y., Seo, J. S., Cho, W. J. (2006), Method for purifying water pollutant using plant, KR-B-10-0567018.
- Ministry of Environment (MOE) (2003) Composition and management of constructed wetland for eco-friendly river purification, pp.10.
- Ministry of Environment (MOE) (2005) Screening and mass cultivation technique development of aquatic plants resistant to landfill wastewater and process, pp.241-242.
- Ministry of Environment (MOE) (2012) Comprehensive plan for the advancement of livestock manure.
- Ministry of Environment (MOE) (2013a) A study on efficiency of legal systems and management systems for the advancement of livestock manure management in Saemangeum basins, pp.1.
- Ministry of Environment (MOE) (2013b) Measures for energy of the livestock manure.
- Ministry of Environment (MOE) (2014) Official test water pollution standards, pp.1065.
- Reddy, K. R., O'Conner, G. A., Gale, P. M. (1998) Phosphorous sorption capacities of wetland soils and stream sediment impacted by dairy effluent, *J. Environ. Quali.*, 27,

- pp.438-447.
- Spiels, D. J., 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, pp.77-91.
- Wolverton, B. C. (1989) *Aquatic plant/microbial filters for treating septic tank effluent, in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Municipal, Industrial and Agricultural*, Lewis Publishers, Chelsea, MI.