

축산단지 비점오염물질 저감을 위한 자유수면형 인공습지 적용

이 정 용* / 강 창 국** / 이 소 영*** / 김 이 형****†

Application of Free Water Surface Constructed Wetland for NPS Control in Livestock Watershed Area

Jeongyong Lee* / Changguk Kang** / Soyoung Lee*** / Lee-Hyung Kim****†

요약 : 금강수계의 논산 양지리에 위치한 인공습지는 축산폐수처리시설에서 방류되는 처리수의 추가처리와 함께 강우시 유역에서 유출되는 비점오염물질을 처리하기 위하여 설치되었다. 본 시설은 2008년 설치된 이후부터 시설검증을 위한 모니터링을 수행중에 있으며 본 연구결과는 시설의 설치 직후로부터 1년간의 모니터링 결과를 정리한 것이다. 모니터링 결과, 평균 오염물질 저감효율은 TSS가 86%, BOD가 60%, TN은 45%, TP의 경우 70%로 산정되었다. 대부분의 모니터링에서 입자상 물질과 인의 평균 저감효율이 60% 이상의 높은 저감효율을 보이는 반면 질소의 경우 축산폐수의 높은 질소농도에 비해 낮은 유기물 농도에 의하여 낮은 저감효율을 나타내는 것으로 분석되었다. 따라서 유출수내 질소제거능 향상을 위해서는 긴 수리학적 체류시간 및 추가적 DO공급이 필요한 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 축산폐수, 비점오염물질, 자유수면형 인공습지, 저감효율

Abstract : Various development activities have lead to the destruction of the ecosystem such as natural wetlands. In order to protect these natural wetlands, the Ministry of Environment (MOE) in Korea enacted the Wetland Conservation Act in 1999 and designated protected areas for wetland conservation. The MOE adapted the use of Best Management Practices (BMP) such as retention ponds and constructed wetlands to treat the polluted water before entering the water system. One of these projects was a free-water surface flow (FWS) constructed wetland built as a secondary treatment unit for piggery wastewater effluent coming from a livestock wastewater treatment facility. Water quality monitoring for the constructed wetland was conducted during rainfall events. The results showed that the average removal efficiencies of TSS, BOD, TN, TP were 86, 60, 45, 70%, respectively. It was observed that the removal efficiency of particulate matter and phosphorus was high compared to nitrogen. Therefore, a longer hydraulic retention time was needed in order to improve the treatment efficiency of nitrogen. The results of this study can contribute to the wetland design, operation and maintenance of constructed wetlands.

keywords : piggery wastewater, non-point pollution source, FWS, removal efficiency

1. 서 론

인간의 각종 개발활동은 생태계를 훼손 및 소멸시키고 있으며, 이로 인한 자연습지의 훼손도

심각한 실정이다. 일반적으로 습지는 생태계의 보고로써 각종 경제적, 환경적, 수리적, 심미적 등의 가치를 지니고 있기에 최근들어 습지의 보존, 복원 및 확대에 대한 관심이 높아지고 있다. 미

† Corresponding author : leehyung@kongju.ac.kr

* 정희원 · 공주대학교 건설환경공학과 석사과정 · E-mail : jjangaw@kongju.ac.kr

** 정희원 · 공주대학교 건설환경공학과 석사과정 · E-mail : kcg1792@kongju.ac.kr

*** 정희원 · 공주대학교 건설환경공학과 박사과정 · E-mail : leeso1018@kongju.ac.kr

**** 정희원 · 공주대학교 건설환경공학과 교수 · E-mail : leehyung@kongju.ac.kr

국, 이탈리아 등을 포함하는 선진국의 경우 1960년대 이후 수많은 인공습지가 건설되었으며, 인공습지에 관한 연구 활동이 활발히 진행되고 있다. 국내의 경우 1999년 2월 환경부 주관으로 습지보전법을 제정하고, 습지보호구역을 지정하면서 습지에 대한 관심과 연구 활동이 활발히 진행되고 있다(농림부, 2004; 신재석 등, 2009; 이상돈, 2003; Mitsch et al., 1998).

인공습지는 침전, 여과, 흡착, 미생물 분해, 식물 식물에 의한 정화 등 자연 상태의 습지가 보유하고 있는 정화능력을 향상시켜 오염물질을 저감하는 시설이다(환경부, 2008). 인공습지는 수리학적 제어, 수생식물 및 흐름형태 등과 같은 다양한 조건들을 조정할 수 있기 때문에 기존의 자연습지에 비해 보다 효과적인 정화기능을 가질 수 있다. 또한 유지관리가 용이하며, 다양한 오염부하에 대한 적응능력이 높은 특징을 지니고 있어 축산폐수, 농업폐수, 광산배수, 산업폐수, 합류식하수의 월류수 등 다양한 분야에서 직접적으로 처리 또는 후속처리공정으로 이용되고 있다(최선화 등, 2006; Haberl, 1999). 그 중 축산단지에서 배출되는 폐수 속에는 유기물, 박테리아, 영양염류, 다양한 입자상 물질 등이 배출되고 있으며 종종 금속류와 농약 등이 포함되어 유출된다. 강우시 축산농가로부터 발생하는 유출수는 공공처리시설의 방류수 수질기준과 비교하여 7~28배정도 높게 나타나고 있으며, 처리시설의 부실한 관리로 인하여 축산폐수와 더불어 비점오염물질이 함께 유출된다(환경부, 2006). 비점오염원은 점오염원과 달리 오염물질이 건기시 다양한 형태로 존재하다가 강우시 강우유출수와 함께 유출되어 특별한 처리 없이 하천이나 호소로 직접 유입되는 특성을 보인다. 축산단지에서 일부 처리되지 않은 고농도의 축산폐수가 하천이나 호소 등으로 곧바로 유입되었을 때 하천 및 호소의 수질 개선에 영향을 미치며, 지하수, 토양 등에 유입되었을 경우 악영향을 끼치게 된다(박재홍 등, 2004; 이소영 등, 2009). 따라서 환경부에서는 인공습지

를 활용한 다양한 시범사업이 실시되고 있으며, 수계별 비점오염원 관리방안 마련을 위하여, 수계 특성을 반영할 수 있는 지역 중 시범사업의 일환으로 2007년부터 축산폐수처리장의 후속공정으로 인공습지를 도입하여 시행 중에 있다(환경부, 2009). 본 연구에서는 축산폐수처리장의 후속공정으로서, 강우시 축산단지내 축산폐수와 더불어 발생하는 비점오염물질 처리에 대한 인공습지의 적용 가능성과 오염물질에 대한 저감효율성을 평가하고자 한다. 이러한 연구 결과는 향후 비점오염물질 저감을 위한 자유수면형 인공습지를 적용함에 있어 기여할 것이다.

2. 연구방법

2.1 인공습지의 현황 및 구조

환경부는 축산단지내 폐수처리장의 후속공정 및 유역으로부터의 비점오염원 관리를 위하여 충남 논산시 양지리에 자유수면형 인공습지를 조성하였다. 인공습지의 부지면적은 9,778 m²이며 유역면적은 11 ha이다. 인공습지의 토지이용현황은 대지로 구성되어 있다. 비강우시에는 축산폐수처리시설에서 처리된 축산폐수가 습지내로 유입되는 연속흐름방식으로 처리하고 있으며, 강우시에는 축산단지 지역의 강우유출수가 추가로 유입되도록 설계되었다. 인공습지의 구성은 Fig. 1과 같이 침전지, 포기조(유로형 습지), 깊은 습지, 얇은 습지, 깊은 습지 및 침전지 순으로 구성되어 있으며, 각 공정별 용량과 체류시간은 Table 1에 나타내었다. 인공습지의 각 공정별 용량은 272~1,626 m³의 범위이며 총 4,006 m³의 용량을 갖도록 설계되었다. 인공습지의 평균 깊이는 얇은 습지의 경우 약 0.5 m, 깊은 습지의 경우 약 1 m로 설계되었었으며, 각 공정별 체류시간은 3.3~19.6 hr의 범위로 조성되었다. 또한 포기조의 안정된 미생물 농도유지를 위하여 얇은 습지로부터 포기조로 일부 순환(0.1Q) 기능을 가지고 있다.

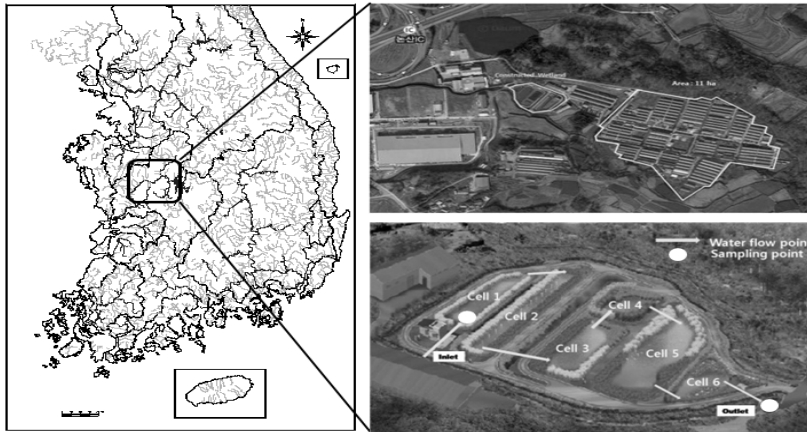


Fig. 1 인공습지의 위치 및 시료 채취 지점

Table 1 인공습지 제원

	Cell 1 (침전지)	Cell 2 (포기조)	Cell 3 (깊은습지)	Cell 4 (얕은습지)	Cell 5 (깊은습지)	Cell 6 (침전지)	Total
면적 (m ²)	560	776	805	527	1,474	350	4,492
용량 (m ³)	453	565	810	280	1,626	272	4,006
수심 (m)	0.81	0.73	1.01	0.53	1.10	0.78	4.96
체류시간 (hr)	5.5	6.8	9.8	3.4	19.6	3.3	48.4
침투유량시 체류시간 (hr)	1.6	2.0	2.9	1.0	5.8	1.0	14.3

일반적으로 인공습지에 있어서 오염물질 처리 효율에 영향을 끼치는 요인은 다양하나 그 중에서 침전 및 식생에 의한 차단이 주요한 오염물질 제거기작으로 나타났다. 문헌(정용준, 2006; Mitsch, 2002)에 따르면, 인의 제거능이 높은 식생은 부레옥잠, 미나리, 창포, 애기부들 순으로 나타났으며, 질소 제거효율이 높은 식생은 미나리, 부레옥잠, 창포, 애기부들의 순으로 나타났다. 그러나 본 인공습지에서는 높은 유기물질 및 영양염류의 오염물질이 포함된 축산배수가 유입되기에 일반적인 부유성 정수식물 대신 고농도 오염부하에 적응성이 높은 바이오 갈대를 대부분의 cell에 식재하여 습지를 조성하였다. 그러나 이러한 습지 식물도 cell별 내부가 아닌 얕은 수심을 가진 가장자리 위주로 약 50cm 이내로 조성되어 식물에 의한 오염물질의 제거는 크게 높지 않을 것으로 평가된다.

2.2 모니터링

축산폐수처리장의 후속공정인 인공습지의 처리 효율을 평가하기 위하여 2008년 10월부터 2009년 9월까지 강우시 총 9회의 모니터링이 실시되었다. 수질시료는 유입수와 인공습지의 말단부인 유출수를 채취하였다. 유입수와 유출수의 시료채취간격은 첫 번째 수질시료를 채취한 이후 15분까지 5분 간격으로 수질시료를 채취하였으며, 15분 이후 30분에 시료를 채취하였다. 1시간 이후에는 강우 유출이 끝날 때까지 시료를 채취하였다(김이형과 강주현, 2004a, 2004b). 분석항목으로는 pH, DO, 온도, 탁도, 전기전도도를 현장에서 측정하였다. 채취된 시료는 냉장상태로 실험실로 운반하여 TSS, BOD, COD_{Mn}, DOC, TN, TKN, NH₄-N, TP의 수질분석을 실시하였다.

2.3 EMC 산정 및 효율 산정

강우시 유출되는 비점오염물질의 부하량 산정에 있어 EMC(Event Mean Concentration)는 중요한 인자이나, 강우 및 유출의 불확실성과 초기 강우와 같은 유출특성에 대한 자료의 부족으로 농도산정에 많은 어려움이 존재한다. 본 연구에서 식 (1)을 이용하여 각 지점별로 EMC를 산정하였으며, 여기서 $C(t)$ 와 $q_{run}(t)$ 는 강우 지속시간 t 에 대한 오염물질의 농도와 유출율을 의미한다. 또한 산정된 EMC를 바탕으로 식 (2)를 이용하여 인공습지의 오염물질 저감효율을 산정하였다. 여기서 L_i 는 유입부하량(kg)을 나타내며, D_e 는 유출 부하량(kg)을 의미한다.

$$EMC(mg/L) = \frac{\sum_{t=0}^{t=T} C(t) \cdot q_{run}(t)}{\sum_{t=0}^{t=T} q_{run}(t)} \quad (1)$$

$$R(\%) = \frac{L_i - D_e}{L_i} \times 100 \quad (2)$$

Table 2 모니터링 강우사상

모니터링 일자	건기일수 (day)	총 강우량 (mm)	유입지속시간 (hr)	평균 강우강도 (mm/hr)	총유출량 (m ³)
2008.10.22	11.6	4.0	7.6	0.53	48.0
2009.03.12	7.0	10.0	10.0	1.00	89.9
2009.04.24	3.2	2.5	3.7	0.67	93.6
2009.05.02	5.0	11.0	4.3	2.59	102.6
2009.05.12	8.9	14.0	10.8	1.30	721.9
2009.05.21	8.6	31.5	13.6	2.32	721.5
2009.08.11	3.0	19.0	8.0	2.38	278.0
2009.09.27	5.9	8.5	13.5	0.63	71.7

3. 연구결과 및 고찰

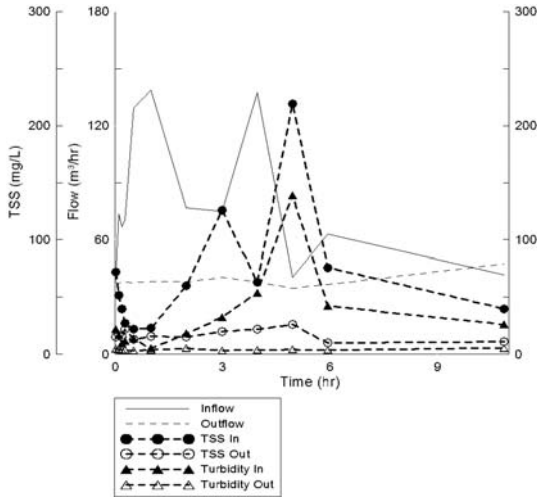
3.1 모니터링 강우사상

Table 2는 강우사상에 대한 모니터링 결과를 나타내고 있으며, 강우 전 건기일수의 범위는 3.0~11.6 일의 분포를 보이고 있으며, 총 강우량은 2.5~31.5 mm의 분포를 나타내고 있다. 유입지속시간은 3.7~13.6 hr로 나타났으며, 평균 강우강도는 0.53~2.59 mm/hr로 다양한 범위를 나타내는 것으로 조사되었다. 모니터링 기간 동안 유입수의 pH 범위를 살펴보면 계절적 변화와 관계 없이 7.6~8.7의 범위를 보였으며, 수온은 식물이 성장하는 4월에서 10월까지의 범위가 15~22℃의 범위를 보여 식물성장에는 적절한 수온을 나타내는 것으로 조사되었다. 모니터링 기간 중 DO는 1.7~4.0mg/L의 범위를 보이는 것으로 조사되었다. 그러나 본격적인 강우가 시작되기 전인 5월 말에는 부영양화의 원인으로 습지 cell 중에서 일부는 높은 DO를 보이는 경향이 있는 것으로 나타났다.

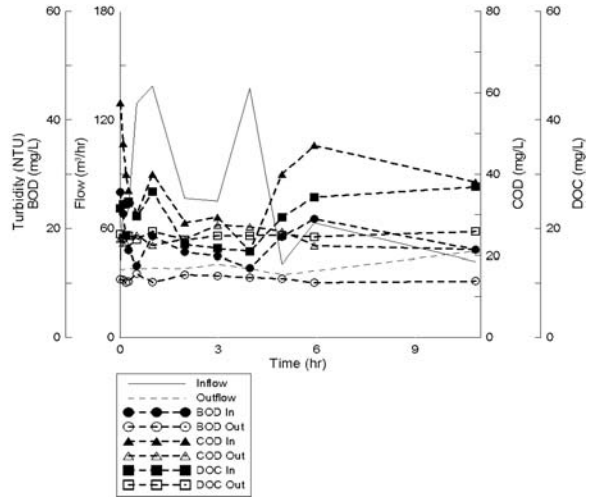
3.2 수리수문 농도곡선 및 유입·유출 특성

Fig. 2는 2009년 5월 21일에 발생한 강우시 수행된 모니터링 결과를 이용한 수리수문 농도곡선을 나타낸 것이다. 시간이 경과할수록 대부분의 오염물질의 농도는 감소하는 경향을 나타내고 있

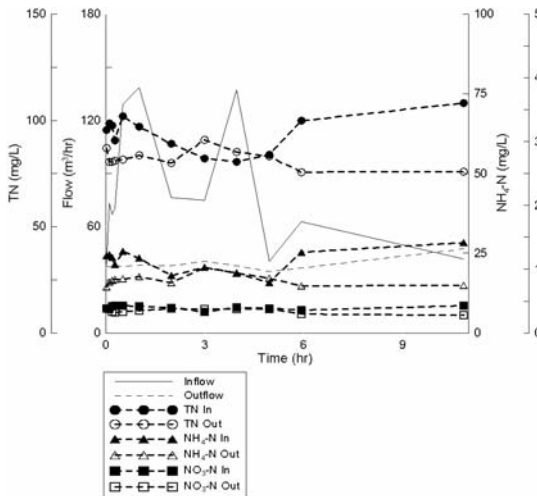
는데, 이러한 원인은 유역으로부터 강우초기에 높은 오염물질이 유출되는 초기강우 때문으로 판단된다. 그러나 침투유량이 발생하면서 오염물질의 농도가 다시 증가하는 경향을 보이는 강우가 존재하였는데, 이는 강우에너지에 의하여 큰 입자상 물질이 다량 유입된 결과로 보여진다.



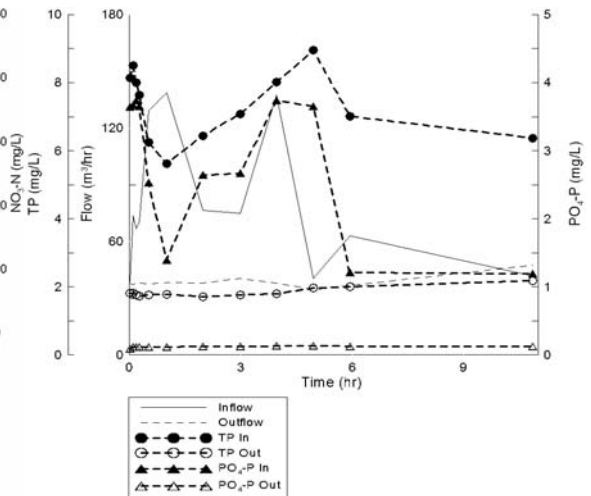
(a) TSS 및 Turbidity



(b) BOD, COD 및 DOC



(c) TN, NH₄-N 및 NO₃-N



(d) TP 및 PO₄-P

Fig. 2 강우시 수리수문 농도곡선 (09.05.21)

3.3 EMC 및 저감효율 산정

모니터링 결과 산정된 습지 유입수 및 유출수에 대한 EMC 결과가 Fig. 3에 나타나고 있는데, 유입수의 평균 TSS 농도는 219.8 mg/L, BOD는 62.1 mg/L, COD_{Mn}이 132.0mg/L를 나타내고 있으며, TN은 130.6 mg/L 그리고 TP는 6.65 mg/L로 산정되었다. 유입수의 성상을 비교하면 유기물의 농도에 비해 높은 질소 농도는 생물학적 처리에 큰 영향을 끼칠 것으로 판단된다. 인공습지로부터 유출되는 평균 EMC를 살펴보면, TSS가 44.5 mg/L, BOD는 33.8 mg/L, COD_{Mn}은 84.1 mg/L, TN은 118.3 mg/L로 나타났고, TP의 경우 2.79 mg/L로 산정되었다. 이와 같이 유기물질 농도에 비해 높은 질소의 농도는 유출수의 타 오염물질에 비해 높은 질소 농도의 유출을 야기시켜 생물학적 처리에 애로점으로 작용하는 것으로 평가된다.

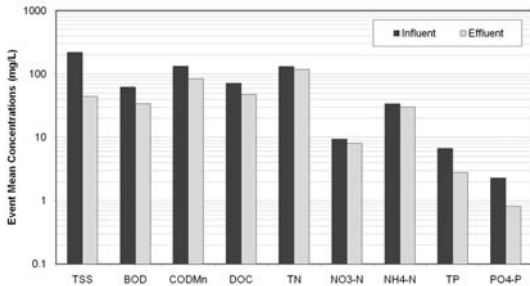


Fig. 3 유입 · 유출 EMC 산정결과

Fig. 4는 모니터링 결과를 바탕으로 산정된 강우시 오염물질 저감효율을 나타내고 있다. TSS의 평균 저감효율은 86%, BOD는 60%, TN은 45%, TP는 70%로 산정되었다. 이와 같이 입자상 물질과 인의 경우 평균 저감효율이 60% 이상의 높은 효율을 보이는 반면 질소의 경우 대체적으로 낮은 저감효율을 나타내는 것으로 분석되었는데, 이는 아질산성 질소의 축적으로 인하여 질산화가 충분하게 진행되지 못한 결과라고 판단된다. 또한 유입수내 유기물의 농도에 비해 높은 질소의 농도가

생물학적 처리에 영향을 끼친 것으로 분석된다. 따라서 질소 제거 효율 향상을 위해서는 아질산성 질소 축적의 원인 분석 등에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

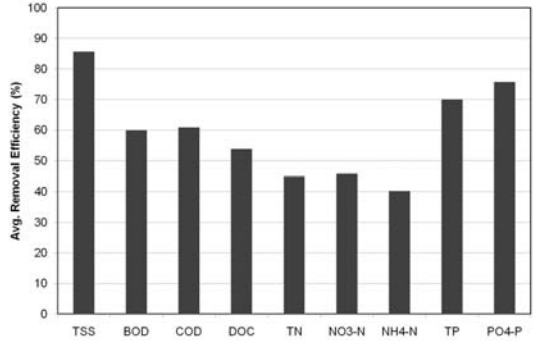


Fig. 4 인공습지의 오염물질별 평균 제거효율

4. 결 론

생활수준 및 경제발전으로 인하여 국민들은 높은 환경의 질을 요구하고 있다. 높은 환경의 질은 강화된 환경 및 수질기준으로 나타나고 있는데, 2000년대 이후 시행되고 있는 수질오염총량관리제 및 비점오염관리제 등이 대표적인 강화된 수질 오염저감제도로 평가된다. 특히 새로운 수질관리 제도는 수질과 수량의 동시관리를 요구하고 있기에 유역내 물순환과 오염물질의 저감이 동시에 수행되는 시설의 설치가 필요하다. 최근 들어 인공습지 설치의 중요성이 부각되는 이유는 물순환 및 오염물질을 동시에 저감하는 기능을 가진 시설이라는 점과 함께 생태계를 복원할 수 있다는 장점을 가져 다양한 목적, 즉 도시 강우유출수, 농업 배수, 축산폐수, 하수처리장의 후속공정 등에 이용되고 있다. 본 연구는 축산폐수의 추가적 오염물질 제거를 위하여 후속공정으로 설치된 자유수면형 인공습지의 적용 가능성과 오염물질에 대한 저감효율성을 평가하기 위해 수행되었다. 축산단지는 처리시설의 설치에도 불구하고 매우 높은 농도의 오염물질이 인근 수계로 유출되어 지속적인

로 국민적 관심의 대상이었다. 따라서 본 연구는 축산단지에서 강우시 유출되는 비점오염물질과 축산폐수처리장의 방류수를 재처리하기 위한 인공습지의 적용가능성을 연구한 결과이다. 모니터링 결과, 인공습지에서의 입자상 물질, 유기물 및 인은 60% 이상의 높은 저감효율을 보이고 있으나, 질소의 경우 미미한 질산화로 인하여 처리효율이 약 40% 정도의 낮은 저감효율을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 유기물에 비해 상대적으로 높은 질소의 유입농도도 원인이지만 아질산성 질소의 축적으로 인한 낮은 질산화도 원인인 것으로 평가되었다. 따라서 원활한 질소제거를 위해서는 아질산성 질소의 축적원인 규명과 충분한 질산화 및 탈질산화 유도방안 수립이 필요한 것으로 판단된다. 현재 본 인공습지 시설에서는 식생조사, 퇴적물, 습지내 미생물의 활성도 평가 등이 수행 중에 있기에 향후 지속적인 모니터링 결과는 인공습지의 효율평가 및 설계와 운영 및 유지관리 방안 도출에 기여할 것이다.

사 사

본 연구는 환경부의 차세대 Eco-Innovation 사업(과제번호 413-111-004)의 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김이형, 강주현, 강우 시 발생하는 고속도로 유출수의 초기우수 특성 및 기준, 한국물환경학회지, Vol. 20, No. 6, pp. 641-646, 2004a.
 김이형, 강주현, 고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정, 한국물환경학회지, Vol. 20, No. 6, pp. 631-640, 2004b.
 농림부, 농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계·관리 요령, 농업기반공사, 2004.
 박재홍, 최의소, 조일형, 인공습지를 이용한 축산폐수의 처리, 한국물환경학회지, Vol. 20, No.

2, pp. 157-162, 2004.
 신재석, 김성철, 조광주, 최충호, 최인욱, 박정자, 박구현, 바이오산업폐수처리수의 재이용을 위한 Hybrid 인공습지 시스템의 적용가능성 연구, 한국습지학회지, Vol. 11, No. 1, pp. 115-121, 2009.
 이상돈, 우리나라 습지 보전 현황과 향후 관리방향에 대한 연구, 한국습지학회지, Vol. 5, No. 1, pp. 1-13, 2003.
 이소영, Marla C. M., 최지연, 김이형, 축사 유역관리를 위한 인공습지의 정화능력평가, 한국토목학회 정기학술대회발표논문 초록집, pp. 222, 2009.
 정용준, 하수종말처리장 방류수와 비점오염원 처리를 위한 주암호 인공습지 2년 운영사례, 한국물환경학회지, Vol. 22, No. 6, pp. 1031-1037, 2006.
 최선화, 안열, 김호일, 인공습지의 수질정화효율평가, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동 춘계학술발표회 논문집, pp. 349-356, 2006.
 환경부, 비점오염원관리업무편람, 2006.
 환경부, 비점오염저감시설의 설치 및 관리 운영 매뉴얼, 2008.
 환경부, 금강수계 비점오염저감시설 모니터링 및 유지관리 보고서, 2009.
 Haberl, R., Constructed wetlands: A Chance to Solve Wastewater Problems in Developing Countries, Wat. Sci. Tech., Vol. 40, pp. 11-17, 1999.
 Mitsch, William J., Xinyuan Wu, Robert W. Nairn, Paul E. Weihe, Naiming Wang, Robert Deal, and Charles E. Boucher., Creating and restoring wetlands: A whole-ecosystem experiment in self-design. Bioscience, Vol. 48, No. 12, pp. 1019-1030, 1998.
 Mitsch, W. J., Development of Macrophyte Communities and Subsequent Ecosystem Function in Two Created Wetlands: A Whole-Ecosystem Experiment, In proceedings

이정용 · 강창국 · 이소영 · 김이형

of the Nanjing International Wetlands
symposium, Society of wetlands scientists,
Nanjing, pp. 55-65, 2002.

- 논문접수일 : 2011년 06월 17일
- 심사의뢰일 : 2011년 06월 21일
- 심사완료일 : 2011년 10월 14일