

〈Original article〉

## 바이오갈대와 바이오여재를 적용한 인공습지의 효율성 및 독성평가

박다경 · 장순웅\* · 최한나<sup>1</sup>

경기대학교 환경에너지공학과, <sup>1</sup>(주)태영건설

### Toxicity Assessment and Evaluation of the Applicability of a Constructed Wetland of Bio-reeds and Bio-ceramics

Da Kyung Park, Soon-Woong Chang\* and Hanna Choi<sup>1</sup>

Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon 15442, Republic of Korea

<sup>1</sup>TaeYoung E&C, Seoul 07241, Republic of Korea

**Abstract** - Recently, a low-impact development (LID) technic such as a wetland has been proposed as a Nature-friendly process for reducing pollutants caused by livestock wastewater. Therefore, the *Daphnia magna* toxicity was analyzed for livestock wastewater samples, to determine if a wetland system would also be effective in reducing this ecotoxicity. In the present study, acute *D. magna* toxicity was not significantly dependent on the presence and type of reed, nor type of media. However, when treated with construction wetlands, ecotoxicities decreased as well as TN, TP and COD concentrations. Therefore, it is considered that a construction wetland system with bio reeds and bio-media as well as general reeds would be effective to reduce the ecotoxicity of livestock wastewater. To apply a wetland system as the subsequent treatment process to a livestock waste water treatment facility, it is necessary to perform an integrated evaluation such as treatment efficiency and the ecotoxicity test for various characteristics of livestock wastewater.

**Keywords** : low-impact development, *Daphnia magna*, acute toxicity, livestock wastewater

## 서 론

국민들의 소득수준 향상과 식생활 패턴의 변화에 따른 축산물 소비량은 지속해서 증가하고 있으며 이에 비례하여 국내 축산 농가 또한 급증하고 있다. 국내 가축량은 약 1,300만 마리로 이에 따라 발생하는 일일 축산폐수량은 103,178 t, 전체 오·폐수 배출량의 약 0.51%를 차지하고 있다(ME 2011). 그러나 축산폐수는 오염물질 발생량의 지표인 오염물질 부하량이 전체 발생량의 약 8%로, 상당량이 하천 및

호소 등에 방출되고 있으며 농업용 저수지의 축산폐수 오염 기여율은 전체의 24.8~28.7%를 차지하고 있다(KRCC 2006; ME 2007; MFAFF 2011).

축산폐수는 허가 및 신고대상의 농가에 따라 정화처리 시설을 통해 처리되고 있으나 발생원이 급여 사료 등에 따라 유입 수질성상 변동이 크다. 또한, 축산 폐수는 고농도의 유기물, 영양염류 특히 난분해성 유기물과 질소 및 인을 포함하고 있기 때문에 처리 과정에 있어 기술적, 경제적인 어려움이 크다. 일반적인 축산폐수 정화처리 시설에서 사용하는 처리방법은 주로 생물학적 처리방법인 활성슬러지 공법으로 오염물질의 약 90% 제거효율을 가지고 있으나 질소와 인은 충분히 제거되기 어려우며, 일부 방류수 수질 기준을 만족시

\* Corresponding author: Soon-Woong Chang, Tel. 031-249-9739, Fax. 031-244-9757, E-mail. swchang@kyonggi.ac.kr

키지 못하고 방류된다(Sorm *et al.* 1996; Jeong *et al.* 2000; Choi and Lee 2009). 노후화 및 부분보수 등으로 처리시설의 일부 병목현상이 발생하여 처리능력이 저하되고 있으며, 농가의 부실한 관리로 인하여 강우 유출 수와 함께 농업지역의 비점오염원으로 유출되기도 한다. 특히 미처리된 축산폐수는 공공처리시설의 처리 배출수의 7~28배의 고농도 오염원을 포함한 채 하천으로 유입되고 있다(Lee *et al.* 2015). 가축분뇨 정화처리시설의 방류수 수질 기준은 기타지역의 신고 대상 처리시설에서는 T-N  $400 \text{ mg L}^{-1}$ , T-P  $100 \text{ mg L}^{-1}$ 로 규제되고 있다(KMGL 2015). 방류된 질소와 인 등은 하천 수질 악화 및 호소의 부영양화 및 조류 번성으로 이어질 수 있기 때문에 질소와 인 성분의 처리효율을 높여 방류수 수질 기준을 만족시킬 수 있는 추가적인 후속처리공정이 필요하다(Choi *et al.* 2000).

축산지역의 특성과 규모의 효율성 및 유지관리의 용이성을 비교하면 높은 비용과 높은 수준의 운전기술이 필요하고도 처리공법보다는 자연 친화형 처리공법이 오염원 저감에 더 유리한 것으로 보고된 바 있다(Park *et al.* 2012). 자연 친화형 처리공법 중 하나인 인공습지는 침전, 여과, 흡착, 미생물 분해 등의 자연 상태의 습지의 정화능력을 이용하여 수질을 정화하는 방법의 하나로 인위적으로 조성된 시설인 재래식 수처리 시스템보다 에너지 소비와 비용이 적게 소요되는 장점이 있다. 또한, 인공습지는 축산 폐수와 같은 점오염원의 수질오염 제어뿐만 아니라 비점오염원으로 발생한 오염물질 처리에도 뛰어난 것으로 알려져 있다(Brix 1999; Park *et al.* 2004; Shin *et al.* 2009; Kim *et al.* 2011; Lee *et al.* 2011).

인공습지는 식물이 뿌리내리는 여재와 습지 내에 성장하는 습지식물로 구성되어 서로 영향을 주고받는 생태적 유기관계로 구성되어 있다(Ko *et al.* 2010). 인공습지에서 여과, 침전 및 무생물 요소의 저장소 등의 역할을 하는 여재의 종류로는 자유수면 인공습지에서는 토양이, 지하수면 인공습지는 자갈 또는 암석 등이 자연적인 여재로 사용되고 있으며 최근 왕사, 쇠석, 방해석 및 제올라이트 등을 이용한 인공적 여재 사용에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다(Kim *et al.* 2011).

인공습지에 사용되는 습지 식생 식물로는 부들(*Typha* spp.), 갈대(*Phragmites* sp.), bulrush(*Scirpus* spp.) 등이 있으며 이들은 습지에서 오염물질을 직접 제거하기도 하지만 주변 미생물들에게 산소를 공급하는 등의 환경을 변화시켜 간접적으로 제거하기도 한다. 최근 연구에서 발표된 바이오갈대는 오염수 내에서의 생장 우수 수생 식물 종으로 선정된 갈대와 갈대 도우미 미생물이 결합한 갈대이다(ME 2005). 바이오갈대는 생리적 내성과 질소, BOD, 인, 염분, 색도 및

중금속 등의 제거율이 일반 수생식물보다 월등히 제거효율이 높으며 좁은 면적에서 짧은 체류 시간에서도 고효율로 수질오염물질 제거가 가능한 것으로 알려져 있다. 기존 자갈 등과 같은 자연적 여재에 비해 천연광물소재인 제올라이트 및 게르마늄, 황토 등으로 구성된 무기성 흡착이 가능한 인공적 여재인 바이오세라믹은 높은 이온교환능력과 넓은 비표면적을 가지고 있어 우수한 수질 정화효율을 가지고 있는 것으로 보고된 바 있다(Cho *et al.* 2008). 그러나 인공습지 충전여재로서 오염원 저감에 관한 효율성 연구가 다양한 반면 처리 유출수가 생태계에 미치는 영향에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 최근 축산폐수처리장 후속처리공정으로 제안되고 있는 맞춤형 자연정화처리공법(인공습지) 적용이 수생태 독성영향 저감에도 효과적인가를 평가하고자 갈대 및 여재 종류에 따른 5가지 인공습지를 설계하였고 각 공정별 적용 후 24시간 물벼룩 급성독성실험을 실시하여 독성변화를 분석하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 시료 채취

가축분뇨처리를 위한 자연형 후속처리공정 적용방안에 관한 연구를 수행하고자 전라북도 A 지역 가축분뇨 공동 처리시설의 1차 침전조에서 2015년 2월(Sample 1)과 2015년 6월(Sample 2, 3)에 각각 채수한 시료이다. 시료는 채수 즉시  $4^{\circ}\text{C}$ 에서 냉장 보관 후 이동하였고 각 시험공정에 유입수로 공급되었다. 각각의 수리학적 체류시간을 적용한 뒤 공정별로 유입수와 유출수를 채수하여 24시간 이내 이화학분석과 생태독성시험을 수행하였다(Cho *et al.* 2015).

### 2. 공정 개요

총 5개(인공습지 A, B, C, D, E)의 상향류식 인공습지를 다음과 같이 설계하였다(Fig. 1)(Cho *et al.* 2015). 인공습지 조성 시 식생 갈대의 성능을 분석하기 위하여 갈대를 사용하지 않은 인공습지 A와 일반 갈대를 사용한 인공습지 B, 그리고 바이오갈대를 사용한 인공습지 C를 설계하였으며 이때 여재는 모두 동일하게 바이오여재(바이오세라믹, 바이오블록)와 일반여재(가는 자갈, 굵은 자갈)를 혼용하였다. 인공습지 조성 시 바이오여재(바이오세라믹, 바이오블록)에 대한 성능을 평가하기 위하여 바이오세라믹을 가는 자갈로 대체한 인공습지 D와 바이오세라믹과 바이오블록을 모두 가는 자갈로 대체한 인공습지 E를 설계하였으며 이때 식생 갈

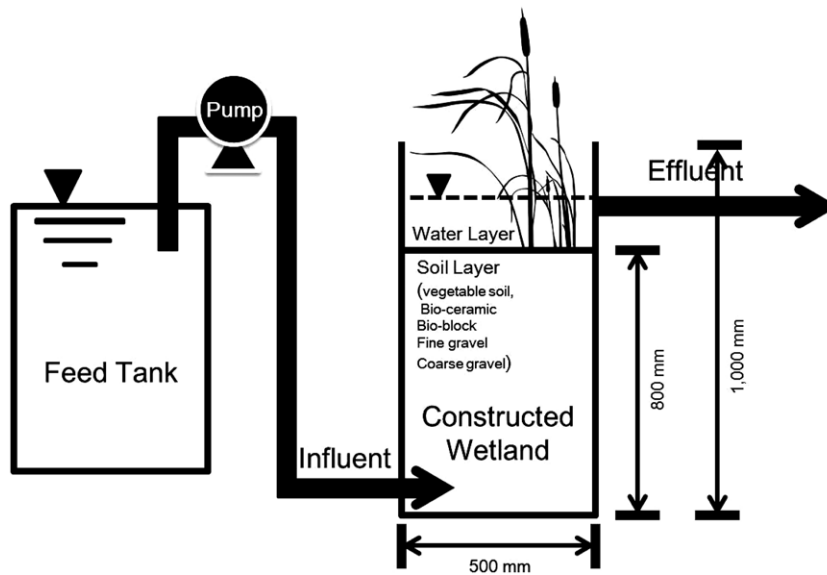


Fig. 1. Conceptual diagram of the constructed wetland (modified from Choi *et al.* 2015).

Table 1. Media configuration of the constructed wetland system.

	Constructed wetland system (height, unit: mm)				
	A	B	C	D	E
Reed planting	None	General reed	Bio-reed	Bio-reed	Bio-reed
Water layer	100	100	100	100	100
Vegetable soil	400	400	400	400	400
Bio-ceramic	200	200	200	0	0
Bio-block	100	100	100	100	0
Fine gravel	100	100	100	300	400
Coarse gravel	100	100	100	100	100

대는 모두 동일하게 바이오갈대를 이용하였다.

인공습지의 크기는 500 mm (L) × 500 mm (W) × 1,000 mm (H)이고 20 mm 두께의 아크릴 재질로 모두 동일하게 제작하였으며 총 부피는 약 250 L이다. 인공습지별 갈대 식재 종류 및 여재 충전물의 조성은 Table 1과 같다. 인공습지는 기반 층과 토양층은 800 mm, 수 층은 100 mm 조성되어 있으며 수 층 내에 일반 갈대 또는 바이오갈대를 각각 12개씩 이식하였다. 유입수는 인공습지 하부에서 유입되었으며 체류 시간 이후 상부로 유출되었다.

본 연구에서 사용된 일반 갈대 (*Phragmites communis* Trin)는 우리나라 전역에서 자생하는 수생식물로 높은 생물량 및 왕성한 근계 형성 그리고 오·폐수의 높은 전기전도도(EC) 및 고농도의 특정 이온에 대한 생장 저해를 받지 않는 특징을 가지고 있다(ME 2005). 바이오갈대는 침출수와 처리 수 내에서 가장 우수한 생장률을 보이는 서울의 난지도 매립지의 갈대 (*Phragmites communis* Trin)와 도우미 미

생물(Helper Microorganism; HM)을 조합하여 갈대의 생물학적 처리효율을 극대화한 갈대로 본 연구에서 사용된 도우미 미생물(HM)은 *Lactobacillus* Sp., *Saccharomyces* Sp., *Rhodospseudomonas* Sp. 등 토양으로부터 분리한 도우미 미생물광합성 세균, 효모, 유산균, 방선균, 사상균 등으로 구성되어 있다(ME 2005). 본 연구에서 사용된 일반 갈대는 충북 청주시 소재 농장에서 파종하였으며 평균 줄기의 길이는 275.8 mm ( $\pm 49.6$  mm), 평균 뿌리 길이는 77.1 mm ( $\pm 16.6$  mm) 그리고 평균 중량은 5.2 g ( $\pm 1.9$  g)이다. 바이오갈대는 강원도 철원군 소재 농장에서 대량 증식된 갈대로 평균 줄기의 길이는 428.6 mm ( $\pm 77.8$  mm), 평균 뿌리 길이는 42.1 mm ( $\pm 19.8$  mm) 그리고 평균 중량은 6.9 g ( $\pm 2.7$  g)이었으며 갈대는 종자 상태에서 파종한 뒤 약 30일간 안정기를 거친 후 인공습지에 이식하였다.

본 연구에서 사용된 바이오여재인 바이오세라믹은 천연광물인 제올라이트, 게르마늄 맥반석, 그리고 점토 등으로 구성된 천연광물분말과 맑은물제재를 혼합하여 숙성 후 성형 공정과 소성과정(온도 700~800°C, 시간 40~80분)을 적용하여 제조하였다(Cho *et al.* 2008). 성형과정에서 펠릿의 크기에 따라 바이오세라믹(지름 2 mm, 길이 약 2~5 mm)과 바이오블록(지름 5 mm, 길이 5~10 mm)으로 나누었다. 바이오세라믹은 천연광물의 특성인 이온 교환, 흡착능력이 크고 상대적으로 낮은 온도에서 소성하여 천연광물의 공극 특성을 최대한 유지되었다. 또한, 미생물 배양용액을 도포하여 제작된 바이오세라믹은 그 생산물로부터 얻어지는 다양한 무기 이온이 포함되어 있다. 이외에도 바이오세라믹은 수중의 질

소, 인, 유기물, 중금속물질을 흡착하여 수중으로 부상하며 광촉매와 질소화합물의 광분해 기능을 가진다(Park 2016). 배양토는 모래와 흙을 8:2로 혼합하여 사용하였고 가는 자갈은 10~20 mm, 굵은 자갈은 40~60 mm 크기를 이용하였다. 각 공정별 인공습지는 초기 2주간 지하수를 이용하여 안정화시켰다(Choi *et al.* 2015).

### 3. 이화학적 분석

각 공정별 유입수와 유출수에 대해 TN(총질소), TP(총인) 그리고 COD(화학적산소요구량)를 각각 3회씩 분석하였다. TN은 자외선 흡광도법으로 분석하였으며 과정은 다음과 같다. 시료(50 mL)와 알칼리성 과황산칼륨 용액(10 mL)을 혼합하여 고압증기멸균기에서 120°C에서 30분 동안 가열분해 전처리를 하였다. 전처리한 시료의 상층 액은 GF/C 여과지로 여과 후 25 mL 취하여 5 mL의 염산(16+1)을 넣어 pH 2~3으로 조절 후 흡광광도계(UV2550PC, Perkin-Elmer)을 이용하여 220 nm에서 측정하였다(ES 04363.1a, ME 2017). TP은 아스코르빈산 환원법으로 분석하였으며 과정은 다음과 같다. 시료(50 mL)와 과황산칼륨용액(4% (W/V), 10 mL)을 혼합하여 고압증기 멸균기에서 120°C에서 30분 동안 가열분해 전처리를 하였다. 전처리한 시료의 상층 액은 GF/C여과지로 여과 후 25 mL 취하여 몰리브덴 산암모늄·아스코르빈산 혼합용액 2 mL를 첨가하여 상온(20~40°C)에서 15분 방치 후 10 mm 흡수 셀에 옮겨 흡광광도계(UV2550PC, Perkin-Elmer)를 이용하여 880 nm에서 측정하였다(ES 04362.1c, ME 2017). COD는 중크롬산칼륨법으로 시료 20 mL와 황산제이수는 0.4 g, 비등석 5개, 황산은 용액 2 mL, 0.025 N 중크롬산칼륨 10 mL 넣어 2시간 동안 가열하였다. 가열된 시료를 방냉시킨 후 증류수를 이용하여 총량 140 mL를 맞춘 뒤 O-페난트로린제일철 용액 3방울을 넣은 후 0.025 N 황산제일철암모늄액을 사용하여 적정하였다(ES 04315.3b, ME2017).

### 4. 생태독성시험

물벼룩에 대한 독성영향은 US-EPA와 환경부에서 제시하는 급성독성 평가 시험법에 따라 수행하였다(US-EPA 2002; ES04751.1 ME 2017). 시험생물 종인 *D. magna*는 국립환경과학원에서 분양을 받았으며 시료의 농도는 0%, 6.25%, 12.5%, 25%, 50%, 100%로 대조군을 제외한 총 5단계의 농도에서 실험을 하였다. 생후 24시간 미만의 어린 물벼룩(neonate) 5마리를 농도별로 준비된 시료(50 mL)에 노출시켰다. 생태독성시험은 총 4반복으로 실시하였으며 시험조건은 온도 21±1°C, 광조건 명 : 암 = 16 : 8 (800 Lux), 습도

는 40%로 유지하였다. 시험의 정도관리를 위해 중크롬산칼륨(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)을 이용한 표준독성시험을 함께 실시하였다. 시료 노출 24시간 경과 후 각 neonate의 유영저해와 죽음을 판단하였으며 시험생물의 50%가 유영저해를 일으키는 농도인 EC<sub>50</sub>을 도출하였다. EC<sub>50</sub> 결과로부터 생태 독성 값(TU, Toxic Unit, 100/EC<sub>50</sub>)을 산출하였다. 단, 100% 시료에서 물벼룩의 0~10%에 영향이 있을 경우에는 TU를 0으로 하고, 물벼룩의 10~49%영향이 있을 경우에는 0.02×영향 받은 %로 TU를 계산하였다(ME 2017).

### 5. 통계처리

이화학적 분석결과의 유의성은 일원배치분산분석(One-way ANOVA)과 t-test로 검정하였으며, 사후분석에는 Tukey post-hoc method를 사용했다. 생태독성영향농도(EC<sub>50</sub>)와 95% 신뢰도 구간은 Trimmed Spearman-Kärber Method를 이용하여 산출하였다. 모든 통계값에서 유의수준은 0.05 이하( $p < 0.05$ )로 하였다.

## 결 과

### 1. 식생 갈대 종류에 따른 처리효율 및 생태독성영향

공정별 인공습지로 처리 후 유입수 대비 유출수의 농도를 비교한 결과, 시료(Sample 1, 2, 3)는 각 공정별 인공습지(A, B, C)에 적용 후 TN, TP, COD 농도 모두 감소하였다(Table 2). Sample 1이 유입수로 적용된 경우 갈대가 식재되지 않은 인공습지 A는 TN(15.4%)≈TP(15.4%)≈COD(12.5%)가 유사한 비율로 저감되었고, 일반갈대가 식재된 인공습지 B에 의해 TP(38.5%)>TN(19.2%)>COD(15.6%), 바이오갈대가 식재된 인공습지 C에 의해 TP(38.5%)>TN(15.4%)>COD(9.4%) 순으로 유의하게 감소하였다(Fig. 2). Sample 2가 유입수로 적용된 경우 인공습지 A에 의해 TP(19.8%)>COD(18.3%)>TN(6.9%), 인공습지 B에 의해 TP(45.6%)>COD(22.1%)>TN(19.8%), 인공습지 C에 의해 TP(51.1%)>TN(24.3%)>COD(23.8%) 순으로 유의하게 감소하였다(Fig. 2). Sample 3을 유입수로 적용한 경우 인공습지 A에 의해 TN(25.5%)>TP(17.9%)>COD(6.4%) 순으로 감소하였고, 인공습지 B에 의해 TN(58.5%)≈TP(59.3%)≈COD(53.4%)와 인공습지 C에 의해 TN(66.7%)≈TP(66.9%)≈COD(56.5%)는 유사한 비율로 저감하였다(Fig. 2). 갈대종류에 따른 이화학적 처리효율은 TP가 가장 민감하게 반응 하는 것으로 나타났다.

시료 유입수(Sample 1, 2, 3)대한 물벼룩 급성독성 값은

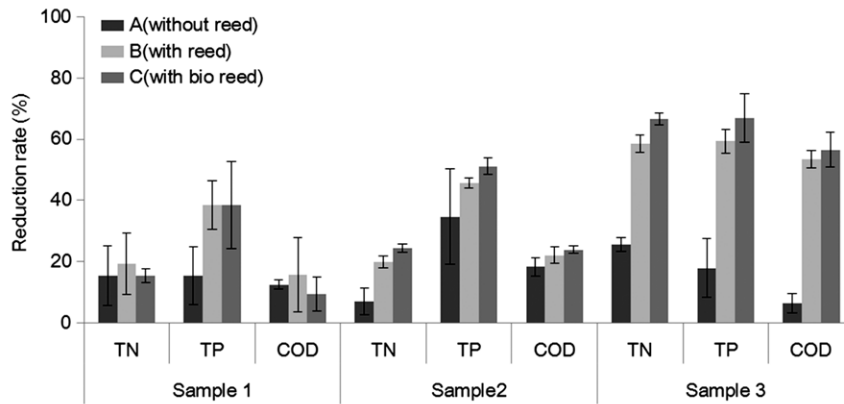


Fig. 2. Average removal efficiencies of constructed wetland systems (A, B, and C) for sample 1, 2, and 3.

Table 2. Average concentration of TN (total nitrogen), TP (total phosphorus) and COD (chemical oxygen demand) in influent, effluent from the constructed wetland systems

		Influent (mg L <sup>-1</sup> )	Effluent (mg L <sup>-1</sup> )				
			A	B	C	D	E
Sample 1	TN	130.08 ± 7.46	109.86 ± 12.52	105.03 ± 5.15	110.06 ± 10.32	130.08 ± 4.70	130.09 ± 6.78
	TP	13.09 ± 1.00	11.09 ± 1.24	8.04 ± 0.40	8.05 ± 1.48	8.00 ± 0.97	8.07 ± 0.70
	COD	320 ± 9.35	280.03 ± 4.51	270.06 ± 5.01	290.01 ± 8.77	310.00 ± 12.54	315.02 ± 10.14
Sample 2	TN	131.59 ± 3.4	122.50 ± 3.04	105.54 ± 3.81	99.64 ± 2.61	101.14 ± 4.83	109.02 ± 6.39
	TP	20.18 ± 2.04	13.19 ± 2.56	10.97 ± 2.08	9.87 ± 0.95	11.72 ± 1.95	13.74 ± 2.59
	COD	381.26 ± 17.07	311.56 ± 11.82	297.12 ± 7.35	290.43 ± 5.01	333.73 ± 10.13	351.75 ± 2.57
Sample 3	TN	61.72 ± 4.06	46.00 ± 2.65	25.59 ± 1.76	20.57 ± 3.55	45.07 ± 2.65	28.59 ± 3.67
	TP	12.53 ± 1.86	10.29 ± 1.52	5.10 ± 1.24	4.14 ± 1.22	7.95 ± 1.53	5.49 ± 1.23
	COD	220.55 ± 8.39	206.39 ± 6.49	102.68 ± 5.75	95.88 ± 2.47	190.64 ± 7.63	143.25 ± 6.09

Table 3. Toxicity unit (TU) of effluent from the constructed wetland systems

		Influent	Effluent				
			A	B	C	D	E
Sample 1	EC <sub>50</sub> (%)	75.17 ± 13.88	N.A. <sup>1</sup>	N.A.	N.A.	N.A.	34.15 ± 2.31
	TU	1.3 ± 0.2	0	0	0	0	2.9 ± 0.2
Sample 2	EC <sub>50</sub> (%)	70.71 ± 0.00	70.71 ± 0.00	89.09 ± 1.25	N.A.	N.A.	N.A.
	TU	1.4 ± 0.0	1.4 ± 0.0	1.1 ± 0.1	0.8 ± 0.0	0	0
Sample 3	EC <sub>50</sub> (%)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	TU	0	0	0	0	0	0

<sup>1</sup>not available

각각 TU 1.3, TU 1.4, TU 0으로 이화학적 분석 시 TN, TP, COD의 농도가 상대적으로 높은 Sample 1과 Sample 2에서 물벼룩급성독성영향(TU > 1)이 나타난 반면, 상대적으로 낮은 Sample 3에서는 물벼룩 급성독성이 없는 것으로 나타났다(Table 3).

각 공정별 인공습지(인공습지 A, B, C)에 처리 후 유출수에 대한 물벼룩 독성시험을 수행한 결과, Sample 1은 인공습

지로 처리한 모든 경우 물벼룩 독성영향이 감소했으며 식생 갈대 유무 및 종류와 무관하게 독성도가 TU 0으로 분석되었다. Sample 2는 인공습지 A(갈대 무)로 처리 후 TU 1.4로 처리 전과 독성도의 변화는 없었으나 인공습지 B(일반 갈대)로 처리한 경우 독성도가 TU 1.1, 인공습지 C(바이오갈대)로 처리한 경우 TU 0.8로 독성이 감소하는 경향을 나타냈다. Sample 3의 경우 공정별 인공습지에 처리한 유출수 역

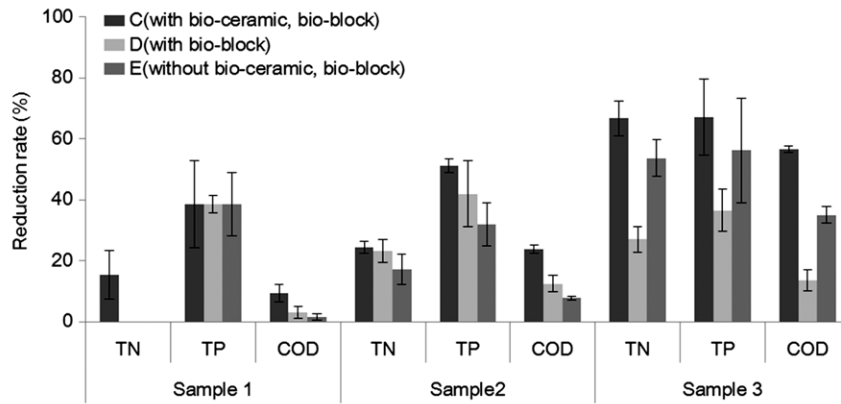


Fig. 3. Average removal efficiencies of constructed wetland system (C, D, and E).

시 유입수와 동일하게 물벼룩 독성 영향이 없었다.

2. 여재 종류에 따른 처리 효율 및 생태독성영향

Sample 1을 대상으로 여재 종류에 따른 인공습지 (C, D, E)에 대한 영향을 분석한 결과 평균 TP 저감율은 약 38.5~38.8%로 TP제거에 모두 효과적이었으나 여재에 따른 영향은 없었다 (Fig. 3,  $p=0.09$ ). TN과 COD는 처리 전과 비교해 약 17.2~24.3% 감소하였으며 인공습지 C (바이오블록, 바이오세라믹)가 가장 효과적이었다 (Fig. 3,  $p<0.05$ ). Sample 2의 경우 TN, TP, COD 제거에 인공습지가 모두 효과적이었으며 특히 인공습지 C는 COD 저감효율이 인공습지 D와 E에 비해 각각 약 1.6과 3.1배 높았다 (Fig. 3,  $p<0.05$ ). Sample 3을 인공습지 C, D 그리고 E에 적용한 경우 TN, TP, COD 농도 모두 저감되었다. 농도 저감효율은 TN과 COD에 대해 인공습지 C > 인공습지 E > 인공습지 D 순으로, TP에 대해 인공습지 C = 인공습지 E > 인공습지 D 순으로 높았다 (Fig. 3).

Sample 1의 경우 인공습지 C (바이오블록, 바이오세라믹), 인공습지 D (바이오블록)로 처리 후 TU 0로 감소하였지만 인공습지 E (일반여재)로 처리 후 TU 2.9로 독성영향이 나타났다. Sample 2의 경우 인공습지 C (바이오블록, 바이오세라믹), 인공습지 D (바이오블록), 인공습지 E (일반여재)로 처리 후 유입수보다 독성이 TU < 1.0 미만으로 감소하였다. Sample 3는 모든 공정에서 TU 0으로 처리 전과 동일하였다.

고 찰

본 연구 결과, 갈대와 여재 종류에 따른 처리효율은 바이오갈대와 바이오여재를 적용한 인공습지 C가 가장 높은 것으로 나타났다. 인공습지의 대표적인 질소와 인 제거 기작은

미생물에 의한 질산화, 탈질화 그리고 식생 식물에 의한 흡수과정으로 (Ko *et al.* 2010), 침출수 처리에 바이오갈대를 식생한 인공습지를 적용하였을 때 질소 처리효율은 약 46%, 인 처리효율은 21%로 보고된 바 있다 (ME 2005). 또한 다른 여재에 비해 TN 처리효율이 높은 것으로 알려져 있는 제올라이트 등으로 구성된 바이오세라믹은 중금속, 휘발성 유기화합물을 포함한 유류 성분 및 질소와 인과 같은 부영양 수질 오염물질, 유기물 등을 효과적으로 정화할 수 있으며 인 60% 이상, 중금속 (Cd) 70% 이상, 유류물질 95% 이상 제거 가능한 물질이다 (KEC 2008; Kim *et al.* 2011). 최근 이 두가지 특성을 접목한 자연친화적 공정인 바이오갈대와 바이오여재를 이용한 인공습지가 축산폐수 오염원 저감에 효과적임이 보고된 바 있다 (Choi *et al.* 2015). 본 연구는 이와 같은 자연친화적 공법적용이 수생태독성 저감에도 효과적인지 평가하기 위해 갈대 및 여재를 달리한 인공습지를 제작하여 축산폐수 시료를 대상으로 처리 전후 생태독성영향을 분석하였다.

본 연구에서 각 공정별 인공습지를 적용한 축산폐수 시료의 물벼룩급성독성을 측정된 결과, 비록 식생 갈대의 유무 및 종류 (일반 또는 바이오갈대)에 따른 영향은 없었으나 방류수 수질 기준 생태독성영향 (TU > 1.0)을 나타내는 시료 (Sample 1과 2)에 대해 인공습지 (A, B, C) 처리 후 모두 독성이 감소하였다. 축산폐수의 경우 총 질소의 약 70~80%가 암모니아성 질소 형태로 존재하며 다량의 암모니아질소는 수생태계의 독성을 유발한다 (Georgieva *et al.* 2010; Ferretti and Calesso 2011). Loureiro *et al.* (2012)은 NH<sub>4</sub>Cl을 이용하여 독성영향을 추가적으로 측정된 결과, 물벼룩 (*D. magna*)에 대한 암모니아성 질소 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)의 24시간 EC<sub>50</sub>은 99.94 mg L<sup>-1</sup>으로 보고했다. 오염원 처리 효율을 분석한 결과, 갈대 식생을 실시하지 않은 인공습지 A와 일반갈대를 식생한 인공습지 B, 그리고 바이오갈대를 식생한 인공습지 C 모두 TN,

TP, COD 제거에 효과적이었다. 이와 같은 결과는 비록 침출수 시료와 본 연구에서 사용한 축산폐수에 대한 처리효율은 상이하나 질소와 인의 농도를 줄인다는 점에서는 유사함을 나타내며 이는 생태독성을 유발하는 원인물질 감소를 통해 독성저감 효과가 발현된 것으로 판단된다.

바이오갈대가 식생된 인공습지에 대해 충전여재(일반 또는 바이오여재)에 따른 생태독성영향을 측정된 결과, 여재 종류에 의한 독성영향 변화는 없었으나(Sample 1, 인공습지 E 제외) 방류수 수질 기준 생태독성영향( $TU > 1.0$ )을 나타내는 시료(Sample 1과 2)에 대해 처리 후 독성이 감소하였다. 흥미롭게도 Sample 1에 대해 일반여재가 충전된 인공습지 E로 처리한 경우 유입수보다 독성이 유의하게 증가( $TU$  1.3에서 2.9로) 하였다. 오염원 처리효율을 분석한 결과, Sample 1에 대해 바이오세라믹과 바이오블록을 여재로 적용한 인공습지 C로 처리한 경우 TN과 COD가 처리 전과 비교하여 약 15.4% 저감된 반면, 바이오세라믹과 바이오블록이 모두 가는 자갈로 대체된 인공습지 E로 처리한 경우 유입수와 유사하였다. 또한 인공습지 E로 처리된 유출수는 인공습지 C로 처리된 유출수보다 TN이 약  $21 \text{ mg L}^{-1}$ , COD가 약  $25 \sim 25 \text{ mg L}^{-1}$ 보다 높았으며 이는 인공습지 D로 처리한 유출수의 결과와 유사하였다. 따라서 인공습지 오염원 처리효율만으로는 독성증가를 설명하기는 어렵다. 인공습지 E는 바이오여재가 적용된 인공습지보다 오염원 처리효율이 낮은 것으로 나타났으며 특히 SS 처리효율이 가장 낮은 것으로 보고된 바 있다(ME 2015). 부유물질은 타 독성물질과 동시 노출 시 *D. magna* 독성반응을 강화시키는 것으로 알려져 있다(Carl *et al.* 2003). 따라서 인공습지 E의 독성증가 원인은 독성물질의 낮은 저감율과 비교적 높은 SS농도로 인한 *D. magna*의 독성반응의 증가일 것으로 예상되나 정확한 독성 증가 원인을 규명하기 위해서는 생태독성원인 물질탐색(Toxicant Identification Evaluation) 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구결과 일반 갈대는 물론 바이오갈대와 바이오여재를 사용한 인공습지는 축산폐수의 TN, TP, COD 저감은 물론 생태독성 감소에도 효과적인 공법으로 판단되지만, 향후 가축분뇨 정화시설과 연계한 후속처리공정으로 적용하기 위해서는 다양한 성상의 축산폐수를 대상으로 처리효율과 생태독성시험이 연계된 통합평가가 추가적으로 필요한 것으로 사료된다.

## 적 요

축산폐수에 기인한 오염 물질 저감을 위해 최근 축산폐수

처리 후속공정으로 인공습지와 같은 자연친화적인 처리법이 제안되고 있다. 따라서 본 연구는 자연친화적 공법이 수생태독성 저감에도 효과적인지 알아보기 위해 다양한 공정의 인공습지를 제작하여 축산폐수 시료를 대상으로 처리 전후 오염저감율 및 물벼룩 급성 독성 변화를 분석하였다. 본 실험결과, 비록 갈대의 유무 및 종류, 그리고 여재의 종류에 따른 영향은 없으나 인공습지에 처리된 경우 유입수에 비해 TN, TP, COD 농도 저감과 더불어 생태독성 영향이 감소하였다. 따라서 일반 갈대는 물론 바이오갈대와 바이오여재를 사용한 인공습지는 축산폐수의 TN, TP, COD 저감은 물론 생태독성 감소에도 효과적인 공법으로 판단된다. 향후 가축분뇨 정화시설과 연계한 후속처리공정으로 적용하기 위해서는 다양한 성상의 축산폐수를 대상으로 처리효율과 생태독성시험이 연계된 통합평가가 필요한 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 2016학년도(2017) 경기대학교 대학원 연구원 장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Brix H. 1999. How 'green' are aquaculture, constructed wetlands and conventional wastewater treatment systems. *Water Sci. Technol.* 40:45-50.
- Carl H, SP Bradbury and DL Swackhamer. 2003. Influence of suspended solids on acute toxicity of carbofuran to *Daphnia magna*: I. Interactive effects. *Aquat. Toxicol.* 63:333-342.
- Cho EJ, SH Shim, YT Cho, YH Kim, IS Kim and EJ Lee. 2008. Bio-ceramic for water purification and manufacturing method thereof. KR-B-10-0807175.
- Choi GY and YS Lee. 2009. A study on the removal of nitrogen and phosphorus by operation mode for livestock wastewater treatment post-process using SBR. *Korean J. Environ. Health Sci.* 35:214-219.
- Choi HN, EH Cho, HG Kang, JH Park and SH Kang. 2015. A study on application of eco-friendly follow-up process connected with livestock wastewater treatment plant using the upflow constructed wetland. *J. Korean Soc. Water Wastewater* 29:359-370.
- Choi JW, YK Kim, JH Ryu, WC Lee and JT Han. 2000. Process development of algae culture for livestock wastewater treatment using fiber-optic photobioreactor. *KSBB J.* 15:14-21.

- Ferretti JA and DF Calesso. 2011. Toxicity of ammonia to surf clam (*Spisula solidissima*) larvae in saltwater and sediment elutriates. *Mar. Environ. Res.* 71:189–194.
- Georgieva N, Z Yaneva and L Dospatliev. 2010. Ecological monitoring of the fresh waters in Stara Zagora Region, Bulgaria: I. Quality analyses of nitrogen compounds contents. *Desalination* 264:48–55.
- Jeong KH, WH Kim, MJ Kim, S Seo, GC Choi, YM Cho and YK Kim. 2000. The effect of clarification by aquatic plant on livestock wastewater. *J. Anim. Environ. Sci.* 6:83–89.
- KEC. 2008. Report on pilot project of water pollution treatment facility on expressway. Korea Expressway Corporation. pp. 1–50.
- Kim AR, HC Kim, DH Seo, JH Park, SH Kim, ST Lee, TU Jeong, JH Choi, HO Kim, JS Cho and JS Heo. 2011. Selection of optimum filter media in small-scale livestock wastewater treatment apparatus by natural purification method. *Korean J. Soil Sci. Fertil.* 44:285–292.
- KMGL. 2015. Livestock manure of management and utilization act/enforcement regulations. Korea Ministry of Government Legislation.
- Ko DH, YC Chung and SC Seo. 2010. Removal mechanisms for water pollutant in constructed wetlands. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 32:379–392.
- KRCC. 2006. Agricultural water quality monitoring survey report. Korea Rural Community Corporation. pp. 1–10.
- Lee JY, CG Kang, SY Lee and LH Kim. 2011. Application of free water surface constructed wetland for NPS control in livestock watershed area. *J. Wetlands Res.* 13:481–488.
- Lee SI, MH Shin, JH Jeon, BK Park, JM Lee, CH Won and JD Choi. 2015. Effect of NPS Loadings from livestock on small watersheds. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 57:27–36.
- Loureiro S, TL Meyer, ALG Ferreira, MJB Amorim and AMVM Soares. 2012. Single and joint effects of perchlorates to *Daphnia magna*: Additivity and interaction patterns. *Fresenius Environ. Bull.* 21:844–852.
- ME. 2005. Screening and mass cultivation technique development of aquatic plants resistant to landfill wastewater and process. Ministry of Environment, Korea. pp. 43–257.
- ME. 2007. Livestock manure processing statistics. Ministry of Environment, Korea. p. 1.
- ME. 2011. A study on the economic analysis through the evaluation of livestock manure treatment facility and the improvement of installation and operation. Ministry of Environment, Korea. pp. 56–104.
- ME. 2015. Development of advanced management technology for livestock manure using Low Impact Development. Ministry of Environment, Korea. pp. 14–21.
- ME. 2017. Water pollution process test standard. Ministry of Environment, Korea. pp. 429–1173.
- MFAFF. 2011. Cattle trend survey. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Korea. p. 1.
- Park JH, DC Seo, SH Kim, CH Lee, JH Choi, SW Lee, DJ Lee, YR Ha, JS Cho and JS Heo. 2012. Growth characteristic and nutrient uptake of water plants in constructed wetlands for treating livestock wastewater. *Korean J. Environ. Agric.* 31:351–358.
- Park JH, ES Choi and IH Cho. 2004. Livestock wastewater treatment by a constructed wetland. *J. Korean Soc. Water Environ.* 20:157–162.
- Park JH. 2016. A study on the application of upflow constructed wetland connected with small-scale livestock manure treatment facility. Kwangwoon University Graduate School. pp. 48–58.
- Seo DC, SW Kang, H Kim, MJ Han, BJ Lim, JH Park, KS Kim, YJ Lee, IW Choi, JS Heo and JS Cho. 2011. Evaluation of treatment efficiencies of pollutants in Boknae bio-park constructed wetlands. *Korean J. Soil Sci. Fertil.* 44:263–270.
- Shin JS, SC Kim, KJ Cho, CH Choi, IW Choi, JJ Park and GH Park. 2009. Application of the hybrid constructed wetland for a reuse of the effluent from bio-industrial wastewater treatment plant. *J. Wetlands Res.* 11:115–121.
- Sorm R, G Birtone, R Saltarelli, P Jenick, J Wanner and A Tilche. 1996. Phosphate uptake under anoxic conditions and fixed-film nitrification in nutrient removal activated sludge system. *Water Res.* 30:1573–1584.
- US-EPA. 2002. Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms fifth edition. United States Environmental Protection Agency. pp. 140–158.

Received: 16 November 2017

Revised: 12 December 2017

Revision accepted: 13 December 2017