

〈Original article〉

파일럿 규모의 LID공법을 적용한 축산폐수 처리수에 대한 생태독성 평가

박다경 · 장순웅* · 최한나¹

경기대학교 환경에너지공학과, ¹(주)태영건설

Ecotoxicity Assessment for Livestock Waste Water Treated by a Low Impact Development (LID) Pilot Plant

Da Kyung Park, Soon-Woong Chang* and Hanna Choi¹

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

¹TaeYoung E&C, Seoul 07241, Republic of Korea

Abstract - This study evaluated the ecotoxicological properties of livestock waste water treated by a LID (Low Impact Development) system, using a mixture of bio-reeds and bio-ceramics as suitable bed media for a subsequent treatment process of a livestock wastewater treatment plant. The relationship between the pollutant reduction rate and the ecotoxicity was analyzed with the effluents from the inlet pilot plant, with vegetated swale and wetlands and the batch type of an infiltration trench. Each pilot plant consisted of a bio process using bio-reeds and bio-ceramics as bed media, as well as a general process using general reeds and a bed as a control group. The results indicated that, after applying the HRT 24 hour LID method, the ecotoxicity was considerably lowered and the batch type pilot plant was shown to be effective for toxicity reduction. The LID method is expected to be effective for water quality management, considering ecotoxicity by not only as a nonpoint source pollution abatement facility but also, as a subsequent treatment process linked with a livestock manure purification facility. It is necessary to take the LID technic optimization study further to apply it as a subsequent process for livestock wastewater treatment.

Keywords : *Daphnia magna*, acute toxicity, nonpoint pollution source

서 론

비점오염원이란 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등의 불특정 장소에서 불특정하게 수질오염 물질을 배출하는 배출원을 말한다. 비점오염원에서 발생하는 비점오염물질은 대부

분 강우에 의존하여 배출된다. 특히 초기 강우에 고농도 비점오염물질이 집중적으로 발생하며 강우 강도와 강우 시간에 따라 농도가 다양하며 지역에 따라 비점오염물질의 성상 또한 다양하다(Kwon *et al.* 1998; Lee and Bae 2002; Seo *et al.* 2006). 2010년 기준 비점오염원의 BOD 배출량은 1,119 ton day⁻¹로 전체 68.3%, TP 배출량 57.6 ton day⁻¹로 58.9%를 차지하는 등 점오염원보다 비점오염원 부하량이 더 높은 것으로 나타났다(ME 2012). 4대강 비점오염원의 수질오염

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

기여율 또한 51~70%를 차지하는 등 비점오염원 관리의 중요성이 대두되었다(ME 2012).

정부는 2012년 ‘제2차 비점오염원 관리 종합대책’을 통하여 비점오염원의 유역과 발생원에 대한 비점오염원 관리 방안을 발표하였다(ME 2012). 도시 지역의 비점오염원 저감 대책인 LID (Low Impact Development; 저영향 개발) 공법은 강우 유출 발생지에서부터 침투, 저류를 통해 도시화에 따른 수생생태계를 최소화하여 개발 이전의 상태에 최대한 가깝게 만들기 위한 토지이용 계획 및 도시 개발 공법을 말한다(NIER 2012). LID 공법으로는 저류형 시설(저류지), 인공습지, 식생형 시설(식생수로, 식생여과대 등) 그리고 침투형 시설(침투도랑, 투수성포장 등)이 있다. LID 공법은 불투수 면적 및 강우의 도달시간을 최소화함으로써 침투 유출량 감소, 기저유량 증가 및 비점오염원 유출량 감소시킨다(ME 2013). 정부는 LID의 확대와 보급을 위해 “LID 기술 요소 가이드라인”을 집필하였으며, 2004년부터 침투 저류지, 침투도랑 등의 LID 공법이 적용된 비점 오염 저감 시설들이 시범 설치되고 있다(Choi *et al.* 2017). 비점오염원 관리의 중요성이 대두됨에 따라 국내에서는 도심지역을 중심으로 LID 공법에 관한 연구 및 적용이 활발히 진행되고 있으나(Lee *et al.* 2012), 국내 비점오염 관리정책은 도심지역 비점오염원에 대한 비중이 높지만 축산지역 비점오염원 관리는 미비한 실정이다.

가축사육이 밀집된 축산지역 비점오염원은 낮은 배출량에 비해 일반 생활하수보다 높은 부하량을 가지고 있는 주요 오염원이다(Lee *et al.* 1999). 축산지역 비점오염물질은 개별 농가에서 발생하는 분뇨의 이동 및 저장단계에서 발생하는 유출, 축사 청소 등 다양한 원인에 기인하여 발생된다(Lee 2004). 또한, 축산폐기물 일부는 퇴비, 액비 등의 자원화물로 전환되어 농업지역으로 2차 방출된다. 따라서 축산지역 비점오염원을 통합적 관리를 위해 자연자원과 연계 및 최적으로 관리하는 LID 공법으로 적용할 경우 효과적이다(Choi *et al.* 2015).

축산지역 비점오염물질에는 영양물질(*e.g.* TN, TP 등) 이외에도 병원균 및 가축 사육 시 사용되는 항생제가 포함되어 있다. 특히 항생제가 적절한 처리 없이 수계로 유입될 경우 생태계 교란 및 독성을 일으킬 수 있다(Poels *et al.* 1984). 축산폐수에 다량 포함되어 있는 암모니아성 질소도 수생생태계 독성을 유발한다(Georgieva *et al.* 2010; Ferretti and Calesso 2011). 2011년부터 환경부에서는 생태 독성제도를 통하여 유해 화학물질을 통합 관리하고 있다. 하지만 생태독성 관리제도는 개별 산업폐수 배출 유해물질에 대해 통합관리를 주된 목적으로 폐수종말처리 시설(35개 업종) 및 공공하수처리 시설을 대상으로만 실시하고 있을 뿐 축산지역 비

점오염원과 LID 공법을 적용한 유출수의 생태독성 연구는 전무한 실정이다.

본 연구는 최근 축산지역 비점오염원 관리방안으로 제시된 LID 공법이 적용된 축산폐수를 대상으로 생태독성 평가를 수행하였다. 본 연구에 사용된 LID 공법은 바이오세라믹과 바이오갈대를 이용한 연속식 파일럿 플랜트(인공습지, 식생수로)와 회분식 파일럿 플랜트(침투도랑)이며 일반갈대와 일반 흙을 이용한 대조군을 제작하여 비교하였다. 처리 효율성과 생태독성과의 연계성을 평가하기 위해 이화학적 분석으로 TN, TP, COD를 생태독성 평가를 위해 24시간 물벼룩 독성시험을 수행하였다.

시료 및 실험방법

1. 시료

본 연구에 유입수로 사용된 시료는 3회 각각 채수한 시료로, 충청남도 B 가축분뇨 공동 처리 시설에서 채수한 시료는 수리학적 체류시간 24시간(Sample 1)과 48시간(Sample 2) 공정에 적용하였으며, 전라북도 A지역 가축분뇨 공동 처리 시설의 1차 침전조 시료는 96시간(Sample 3) 공정에 적용하였다. 채수된 시료는 원수조(200 L, 2조)로 유입하였으며 침사지(저류조, 400 L)와 조정조(폭기조, 400 L)를 거친 뒤 화학용 정량펌프를 이용하여 동량 유입되었다(Fig. 1). 각각의 파일럿 플랜트 공정 적용 후 유입수와 유출수를 각각 채수(2 L)하여 4°C 냉장보관 및 이동 후 채수 24시간 이내 항목별로 분석하였다.

2. 파일럿 플랜트

파일럿 플랜트는 비닐하우스에 설치하였으며 옆면을 개방하여 자연 환풍 및 자연 온도를 유지하였다. 파일럿 플랜트는 유입식 플랜트와 회분식 플랜트 두 형태로 제작하였으며 조성 성분에 따른 처리 효율성을 평가하기 위하여 일반공정과 바이오공정을 각각 설계, 총 4개의 파일럿 플랜트를 설계하였다. 일반공정은 일반갈대 및 일반여재(식생토, 자갈 등)를 사용하였으며 바이오공정은 바이오갈대 및 바이오여재(바이오블록, 바이오 세라믹)를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 일반갈대는 충북 청주시 소재 농장에서 파종한 *Phragmites communis Trin* 종으로 우리나라 전역에서 자생하며 높은 전기전도도(EC)와 고농도의 특정 이온에서도 생장이 가능하다(ME 2005). 본 연구에 사용된 바이오갈대는 갈대(*Phragmites communis Trin*)와 토양에서 분리한 도우미 미생물(Helper Microorganism)인 미생물광

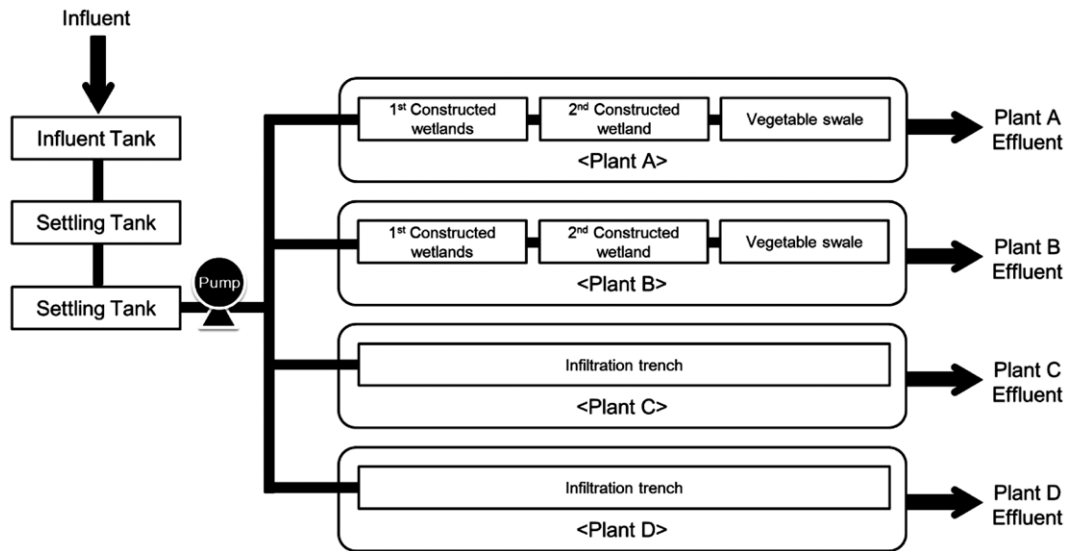


Fig. 1. Flow chart of fabrication process.

합성 세균, 효모, 유산균, 방선균, 사상균 (*Lactobacillus* Sp., *Saccharomyces* Sp., *Rhodopseudomonas* Sp. 등)을 조합한 인공갈대로 강원도 철원군 소재 농장에서 파종하였다 (ME 2005). 바이오세라믹은 천연광물분말 (제올라이트, 게르마늄 맥반석 및 점토 등)과 맑은물제제 (미생물 배양용액 등)가 천연광물분말에 침투할 수 있도록 혼합 및 숙성시키는 공정, 숙성된 혼합물을 일정 형상으로 성형하는 공정, 성형체를 수분 제거 및 건조 공정, 건조된 성형체를 700~800°C에서 40~80분간 소성하는 공정 순으로 제조하였다 (Cho *et al.* 2008). 성형과정 과정에 따라 바이오세라믹은 바이오세라믹 (Ø 3 mm, 펠릿형)과 발포형 세라믹 (Ø 20 mm, 발포형) 두 종류로 제조하였다. 천연광물의 특성인 이온 교환, 흡착능력이 큰 특징을 가진 수질 개선 여재로 광분해 및 광촉매 및 광분해 기능을 통하여 질소화합물의 분해가 가능하며 흡착 작용을 통한 수중의 질소, 인, 유기물 제거가 가능한 것으로 알려져 있다 (Cho *et al.* 2008; Park 2016).

1) 유입식 파일럿 플랜트

유입식 파일럿 플랜트는 2단습지 (상향류 1차 인공습지와 하향류 2차 인공습지)와 식생수로로 구성되었다. 각 공정의 규격은 1차 인공습지 100 cm (W) × 160 cm (L) × 86 cm (H), 2차 인공습지 120 cm (W) × 120 cm (L) × 86 cm (H) 그리고 식생수로 70 cm (H) × 650 cm (L) × 80 cm (H)이다. 공정은 총 두 가지 형태로 일반갈대와 자갈을 이용한 일반공정 (플랜트 A)과 바이오여재 및 바이오갈대를 이용한 바이오공정 (플랜트 B)을 설계하였다. 각각 공정의 여재 충전 내용은 다음과 같다 (Table 1).

2) 회분식 파일럿 플랜트

회분식 파일럿 플랜트는 침투도랑으로 구성되어 있으며 100 cm (W) × 350 cm (L) × 80 cm (H)의 직사각형 형태의 아크릴을 이용하여 제작하였다. 공정은 총 두 가지 형태로 일반갈대와 자갈을 이용한 일반공정 (플랜트 C)과 바이오여재 및 바이오갈대를 이용한 바이오공정 (플랜트 D)으로 설계하였으며 각각 공정의 여재 충전 내용은 다음과 같다 (Table 2).

3. 분석방법

1) 수질분석

시료의 수질분석 수질공정시험법에 따라 COD (화학적산소요구량, ES 04315.3b), TN (총질소, ES 04363.1a), TP (총인, ES 04362.1c)를 3회 반복 측정하였다 (ME 2017). COD 분석법은 시료 20 mL와 황산수는 0.4 g, 비등석 2개, 황산은 용액 2 mL, 중크롬산칼륨 용액 (0.025N) 10 mL를 250 mL 플라스크에 넣어 잘 흔들어 섞고 가열판에서 2시간 동안 가열한다. 냉각시킨 후 총량이 140 mL가 되도록 증류수를 넣은 후 1,10-페난트로린제일철 용액 3방울을 넣은 후 황산제일철암모늄용액 (0.025 N)을 사용하여 적정한다. TP 분석법은 시료 50 mL와 알칼리성과황산칼륨 용액 10 mL를 넣은 분해병을 고압증기 멸균기에 넣어 120°C, 30분간 가열분해하여 전처리한다. 전처리한 시료의 상층액을 유리섬유여과지 (GF/C)로 여과한 뒤 25 mL에 염산 (1+16) 5 mL 넣어 pH 2~3으로 조정한다. 시료를 10 mm 흡수셀에 넣어 흡광도기 (UV2550PC, Perkin-Elmer) 220 nm에서 시료의 흡광도를 측정한다. TP 분석법은 질산-황산분해법을 통하여 전처리

Table 1. Media configuration of the pilot plant (continuous type).

	Plant A (General process)		Plant B (Bio process)	
	Media	Height (cm)	Media	Height (cm)
1st Constructed wetlands	General reed		Bio reed	
	Vegetable soil	30	Vegetable soil	30
	Gravel	36	Bio ceramic	5
			Form ceramic	10
			Gravel	21
2nd Constructed wetlands	<i>Iris pseudacorus</i>		<i>Iris pseudacorus</i>	
	Silty soil	20	Silty soil	20
	Gravel	40	Bio ceramic	10
			Form ceramic	10
			Gravel	20
Vegetable Swale	General Reed		Bio reed	
	Silty soil	20	Silty soil	20
	Gravel	30	Bio ceramic	10
			Gravel	20

Table 2. Media configuration of the pilot plant (batch type).

Plant C (General process)		Plant D (Bio process)	
Media	Height (cm)	Media	Height (cm)
General reed		Bio reed	
Vegetable soil	20	Vegetable soil	20
Fiber filter		Fiber filter	
Gravel	35	Bio ceramic	10
		Gravel	25
Fiber filter		Fiber filter	
Silty soil	26.5	Silty soil	26.5

한 시료 25 mL를 취하여 몰리브덴산암모늄·아스코빈산 혼합용액 2 mL 넣고 혼든 뒤 상온(20~40°C)에서 15분 방치 후 10 nm 흡수셀로 옮긴 후 흡광도기(UV2550PC, Perkin-Elmer)를 이용하여 880 nm 파장에서 시료 용액의 흡광도를 측정한다.

2) 생태독성

생태독성실험은 US-EPA와 환경부에서 제시하는 물벼룩(*Daphnia magna*) 급성독성 평가시험법에 따라 수행하였다(US-EPA 2002; ES04751.1 ME 2017). 농도시험 범위는 대조군(0%)과 희석하지 않은 유입수 및 공정별 유출수(100%)를 최고 농도로 하여 5단계 농도(6.25%, 12.5%, 25%, 50%, 100%)로 설정하였으며 희석에 사용된 희석수는 증류수와 NaHCO₃, CaSO₄·2H₂O, MgSO₄ 및 KCl를 이용하여 제조하였다(US-EPA 2002; ME 2017). *D. magna*는 국립환경과학원에서 분양 받았으며 생후 24시간 이내의 *D. magna* 총 120마리를 6개 농도군에 20마리씩 나누어 배치하였다. 반복 처리군은 4개이며 50 mL의 시험수가 담긴 유리 비이커에 각 5마리씩 나누어 24시간 동안 노출시켰다. 본 시험의 정도관리

를 위해 중크롬산칼륨(K₂Cr₂O₇)을 이용한 표준독성시험을 함께 수행하였다. 시험은 온도 21±1°C, 광조건 명:암=16:8 (800 Lux), 습도는 40%의 조건을 유지했으며 24시간 노출 후 neonate의 유영저해와 죽음을 판단하였다. *D. magna*의 50%가 유영저해를 일으키는 농도인 EC₅₀을 도출하였다. 도출한 EC₅₀은 다음과 같은 계산식(TU=100/EC₅₀)을 통하여 생태독성값(TU; Toxic Unit)을 산출하였다. 단, EC₅₀ 값이 도출되지 않을 경우 다음과 같이 TU 값을 산출하였다. 물벼룩의 0~10%에 영향이 있을 경우에는 TU를 0으로 하고 100% 시료에서 물벼룩의 10~49% 영향이 있을 경우에는 0.02×영향 받은 %로 TU를 계산하였다(ME 2017).

4. 통계처리

이화학적 분석의 유의성 검정은 SPSS를 이용하여 ANOVA로 비교 후 p<0.05 수준에서 Tukey post-hoc test를 이용하여 상호 검정하였다. 생태독성실험에 따른 EC₅₀은 Trimmed Spearman-Kärber Method를 이용하여 도출하였다.

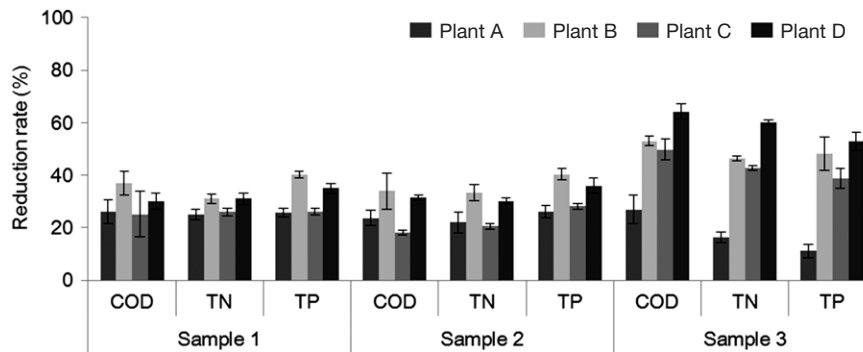
결과 및 고찰

1. 파일럿 플랜트의 처리효율

유입수와 유출수에 대한 이화학적 분석결과는 다음과 같다(Table 3). Sample 1, 2, 3의 유입수 성상은 COD, TP는 유사하였다(COD: p=0.09; TN: p=0.12). 반면 TN은 Sample 1, 2의 경우 200 mg L⁻¹ 이상으로 Sample 3(약 60 mg L⁻¹)에 비해 약 3배 이상 높았다. 본 연구에 사용된 유입수는 가축분뇨 정화처리 시설의 방류수 수질기준 중 기타 지역의 신

Table 3. Average concentration of TN (total nitrogen), TP (total phosphorus) and COD (chemical oxygen demand) in influent and effluent.

	mg L ⁻¹	Influent	Plant A	Plant B	Plant C	Plant D
Sample 1 (HRT ¹ 24 h)	COD	252.31 ± 6.01	189.24 ± 4.82	174.1 ± 4.87	186.71 ± 3.65	174.1 ± 5.81
	TN	220.85 ± 14.01	164.15 ± 3.48	132.22 ± 2.70	163.08 ± 2.98	143.38 ± 3.86
	TP	18.06 ± 0.86	13.36 ± 0.83	11.37 ± 0.81	13.51 ± 1.55	12.61 ± 0.56
Sample 2 (HRT 48 h)	COD	278.02 ± 5.70	216.89 ± 11.11	184.98 ± 8.57	220.65 ± 2.89	194.09 ± 2.77
	TN	227.16 ± 3.35	168.06 ± 5.52	135.61 ± 4.96	163.22 ± 2.60	145.25 ± 6.56
	TP	18.05 ± 1.95	13.77 ± 0.53	11.93 ± 1.26	14.78 ± 0.16	12.38 ± 0.16
Sample 3 (HRT 96 h)	COD	285.37 ± 3.07	238.68 ± 5.48	152.77 ± 2.62	162.97 ± 2.57	113.79 ± 2.13
	TN	59.4 ± 2.55	52.8 ± 1.51	30.86 ± 3.77	36.39 ± 2.32	27.92 ± 2.05
	TP	12.93 ± 1.94	9.44 ± 0.71	6.07 ± 0.22	6.49 ± 0.50	4.63 ± 0.37

¹hydraulic retention time**Fig. 2.** Average removal efficiencies of the pilot plant.

고대상 처리 시설 기준 (BOD 120 mg L⁻¹, SS 120 mg L⁻¹, TN 250 mg L⁻¹, TP 100 mg L⁻¹)에 만족하였다.

Sample 1의 플랜트별 처리효율은 TP의 경우 공정별 처리효율이 유의한 차이를 보이지 않았다 ($p=0.106$). COD, TN의 경우 플랜트 B (유입식 바이오공정, COD 31.0%, TN 40.1%)가 가장 높았으며 플랜트 D, 플랜트 C, A 순으로 높았다 (Fig. 2). Sample 2의 플랜트별 처리효율은 플랜트 B (유입식 바이오공정, COD 33.5%, TN 40.4%, TP 33.9%), 플랜트 D (회분식 바이오공정, COD 30.2%, TN 36.1%, TP 31.4%)는 높은 반면 플랜트 A, C (일반공정)의 이화학적 TN, TP, COD 처리효율은 각각 21.9~26%, 18.1~28.2%로 플랜트 B, D (바이오공정)보다 비교적 낮았다 (Fig. 2). Sample 3의 플랜트별 처리효율은 플랜트 D (회분식 바이오공정, COD 60.1%, TN 53.0%, TP 64.2%), 플랜트 A (유입식 바이오 공정, COD 46.5%, TN 48.1%, TP 53.1%), 플랜트 C (회분식 일반공정, COD 42.9%, TN 38.7%, TP 49.8%) 순으로 높았으며 플랜트 D (11.11~26.9%)의 처리효율은 다른 플랜트보다 비교적 낮았다 (Fig. 2, $p < 0.05$).

일반공정 (플랜트 A, C)과 바이오공정 (플랜트 B, D)을 비교한 결과, 바이오갈대와 바이오여재가 적용된 바이오공정

의 저감효율 (COD 31.0~60.1%, TN 35.1~53.0%, TP 30.2~64.2%)이 일반공정 (COD 16.4~42.9%, TN 11.1~38.7%, TP 18.1~49.8%)보다 효율이 높았다 (Fig. 2, $p < 0.05$). 매립지 침출수 처리 시 바이오갈대 처리효율은 TN 49.4~67.2%, TP 42.1~94.6%로 나타났으며 이외에도 BOD, 색도, 염도, TDS 등 처리 가능하다고 보고된 바 있다 (Kim *et al.* 2004). 본 연구에서 사용된 바이오갈대와 바이오세라믹을 적용한 인공습지의 축산폐수 처리효율은 COD 45.2%, TN 48.7%, TP 46.6%로 일반갈대를 사용한 인공습지에 비해 처리효율이 높았다 (Choi *et al.* 2015). 본 연구 결과 COD, TN, TP 등과 같은 수질오염물질 저감시설에 바이오갈대 및 바이오여재가 적용 가능할 것으로 판단된다.

수리학적 체류시간 (HRT; hydraulic retention time)에 따른 이화학적 처리효율 (COD, TN, TP)을 비교한 결과 HRT 96시간 (Sample 3)의 경우 플랜트 A를 제외한 모든 공정에서 처리효율 (38.7%~60.1%)이 가장 높았으며 HRT 24시간 (Sample 1, 25.0%~40.1%), HRT 48시간 (Sample 2, 18.1%~40.36%) 순으로 처리효율이 높았다 (Fig. 2, $p < 0.05$). 체류시간은 질소 및 인의 제거효율과 밀접한 관련이 있는 중요한 설계 및 운영인자이며, 체류시간이 길수록 처리효율은 증가

Table 4. Toxicity Unit (TU) of effluent from the pilot plant.

		Influent	Plant A	Plant B	Plant C	Plant D
Sample 1	EC ₅₀ (%)	40.61 ± 5.36	70.71 ± 0.0	43.53 ± 6.64	57.43 ± 8.8	70.71 ± 0.0
	TU	2.5 ± 0.3	1.4 ± 0.0	2.3 ± 0.4	1.7 ± 0.3	1.4 ± 0.0
Sample 2	EC ₅₀ (%)	44.55 ± 8.38	70.71 ± 0.0	46.65 ± 13.75	43.53 ± 6.64	40.61 ± 5.36
	TU	2.2 ± 0.3	1.4 ± 0.0	2.1 ± 0.6	2.3 ± 0.4	2.5 ± 0.3
Sample 3	EC ₅₀ (%)	N.A. ¹	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	TU	0	0	0	0	0

¹not available

하는 것으로 알려져 있다(Yang 2002; Kim *et al.* 2004).

2. 파일럿 플랜트의 독성평가

파일럿 플랜트의 조성에 따른 생태독성 영향을 평가하기 위해 이화학적 처리효율을 평가한 시료를 대상으로 물벼룩 급성독성시험을 수행하였다(Table 4). 유입수 기준으로 Sample 1, 2, 3의 물벼룩 급성독성 값은 각각 TU 2.5, TU 2.2, TU 0으로 이화학적 분석 시 TN 값이 낮은 Sample 3(약 60 mg L⁻¹)에서는 물벼룩 급성독성이 없는 반면 TN 값이 높은 Sample 1과 Sample 2(약 200 mg L⁻¹)에서 물벼룩 급성독성 영향(TU > 1)이 나타났다(Tables 3, 4). 돈사폐수의 경우 총 질소의 약 77%가 암모니아성 질소이며 질소산화물(NO₂⁻, NO₃⁻)은 거의 존재하지 않는 것으로 알려져 있다(Han *et al.* 1998; Park *et al.* 1998). Ferretti and Calesso (2011)는 조개의 암모니아질소 LC₅₀은 10.6 mg L⁻¹로 보고하였다. Gersich and Hopkins (1986) 연구에 따르면 암모니아성 질소의 *D. magna* 48 h LC₅₀은 2.94 (2.70~3.22) mg L⁻¹다. 축산폐수에 포함되어 있는 다양한 형태의 질소화합물이 물벼룩 독성의 원인으로 작용될 것으로 판단된다.

Sample 1, 2, 3에 대해 파일럿 플랜트에 적용한 유출수를 대상으로 물벼룩 독성시험을 수행한 결과, 상대적으로 독성도가 낮은 Sample 3은 파일럿 플랜트별 유출수 또한 TU 0으로 유입수와 동일하였다. 상대적으로 독성도가 높은 Sample 1의 경우, 플랜트 A, B, C, D(HRT 24시간) 적용 후 독성 값이 각각 TU 1.4, TU 2.3, TU 1.7, TU 1.4로 유입수의 독성 값인 TU 2.5에 비해 감소하였다. 유입식 파일럿 플랜트(플랜트 A, B)에서는 바이오공정보다는 일반공정을 적용했을 때 독성이 저감된 반면 회분식 파일럿 플랜트(플랜트 C, D)에서는 일반공정과 바이오공정 모두 독성이 저감되었다. 반면 Sample 2(HRT 48h)의 플랜트 A 유출수는 TU 1.4로 약간 감소한 반면 플랜트 B, C, D 유출수는 각각 TU 2.1, TU 2.3, TU 2.5로 유입수의 오차 범위 내로 유사하였다($p=0.08$). Sample 1(HRT 24시간)과 Sample 2(HRT 48시간)의 이화학

적 처리효율을 비교한 결과, COD, TN, TP는 통계적으로 유의한 차이가 없었다(Table 3, Fig. 2, t-test, $p=0.06$). 축산폐수에는 농약, 항생제와 같이 유해성 및 독성 성분이 미량 포함된 것으로 알려져 있다(Lee *et al.* 1993). 본 연구는 각각 다른 날 채수한 시료를 이용하여 수행한 바, 향후 파일럿 플랜트의 독성저감 효율을 정확히 판별하기 위해서는 축산폐수에서 발생하는 독성 원인물질 판별 및 독성 메커니즘에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

비록 다양한 오염원을 대상으로 LID를 적용하여 오염물질의 처리효율을 분석한 연구는 있으나 LID 공법 적용 후 유출수에 대한 생태독성 평가는 거의 없는 실정이다. 본 연구결과 오염물질의 처리효율과 독성도의 저감효율 간의 해석 차이가 있는 것으로 보아 LID 공법을 비롯한 이화학적 처리효율 평가 시 생태독성 평가를 통하여 잠재된 독성물질에 대한 연구가 함께 수행되어야 할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

LID 공법은 미국 PGDER (Prince George's Gounty, Maryland department of Environmental Resources)에서 개발된 도시자원 보호 프로그램으로 비점오염원 관리뿐만 아니라 홍수피해, 지하수 고갈 등을 예방할 수 있다(ME 2009). 미국의 경우 농촌 지역 비점오염원을 관리방법으로 인공습지, 식생수로 등을 적용하고 있다(NIER 2014). 최근 바이오 세라믹은 고속도로 비점오염저감시설을 비롯한 다양한 비점오염저감시설로 사용되고 있다(ME 2015). 본 연구결과 바이오갈대와 바이오세라믹 등으로 구성된 LID 공법은 생태독성을 고려한 수질관리의 목적으로 축산지역 등의 비점오염원 저감시설과 가축분뇨처리장의 후속처리공정 등으로 적용 가능성이 있을 것으로 판단된다. 그러나 축산폐수 성상 및 LID 공법 특성상 계절적 변화에 민감하며 LID 공법이 장기간 사용될 경우 여재에 오염물질이 축적될 가능성도 보고된 바 있다(Park *et al.* 2004; Park and Kwon 2005). 향후 바이오갈대와 바이오세라믹 등으로 구성된 LID 공법을 현장 적용하기 위해서는 계절변화에 따른 LID 공법 최적화 연구가 필요할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 축산지역 비점오염원 저감시설로서 바이오갈대와 바이오여재를 이용한 저영양개발(LID)공법이 적용된 처리수에 대한 생태독성 평가를 수행하였다. 식생수로와 인공습지를 이용한 유입식 파일렛 플랜트와 침투도랑을 이용한 회분식 파일렛 플랜트를 제작하여 축산폐수처리장 시료를 대상으로 생태독성 시험을 수행하였고 처리 전 후의 오염원 저감율과 생태독성도와의 연계성을 평가하였다. 각 파일렛 플랜트는 바이오갈대와 바이오여재를 이용한 바이오공정으로 제작하였으며 대조군으로 일반갈대와 일반여재를 이용한 일반공정을 제작하였다. 본 연구결과, 유입식과 회분식 파일렛 플랜트 모두 일반공정보다 바이오공정이 적용된 경우 유출수의 COD, TN 그리고 TP 저감 효율이 더 높았다. 또한 HRT 24시간 LID 공법을 적용 후 물벼룩 독성도는 상당히 낮아졌으며 특히 회분식 파일렛 플랜트가 독성저감에 효율적인 것으로 나타났다. 바이오갈대와 바이오세라믹 등으로 구성된 LID 공법은 비점오염원 저감시설뿐만 아니라 가축분뇨 정화시설과 연계한 후속처리공정으로 생태독성을 고려한 수질관리에 효과적일 것으로 예상되며 향후 오염원과 독성도를 동시에 저감할 수 있도록 LID 공법 최적화 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

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

REFERENCES

- 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 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 JS, DG Kang, JM LEE, JY Choi, JW Nam, MS Kang, UY Lee, H Kwon, JS Jung and KH Hyeon. 2017. Cities and Citizens 'Editions LID, Water for Moist Cities: City and Citizens' Edition. Communication Books. pp. 1-50.
- 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.
- Gersich FM and DL Hopkins. 1986. Site-specific acute and chronic toxicity of ammonia to *Daphnia magna* straus. Environ. Toxicol. Chem. 5:443-447.
- Han DJ, JK Ryu, YT Rim and JM Rim. 1998. Reaction characteristics of pigery wastewater for biological nutrient removal. Korean J. Sanitation 13:44-56.
- Kim IS, YJ Cho, HK Choi and EJ Lee. 2004. Biological treatment of processed-leachate from landfills by Reed (*Phragmites australis*)-Bed in a continuous flow system. J. Ecol. Environ. 27:375-381.
- Kwon SK. 1998. Management improvement and perspective on nonpoint sources of water pollution in Korea. J. Korean Soc. Environ. Eng. 20:1497-1510.
- Lee HD and CH Bae. 2002. Runoff characteristics and strategies for non-point source reduction. J. Korean Soc. Water Qual. 18:569-576.
- Lee JH, SJ Cho, JK Kim, SC Seo and SD Kim. 2012. Development of a simple distributed hydrologic model for determining optimal installation location and quantifying efficiency of LID Devices for reducing non-point sources. J. Korean Soc. Hazard Mitig. 12:215-223.
- Lee KB, DB Lee, SB Lee and JD Kim. 1999. Change in agricultural irrigation water quality in Mankyong river. Korean J. Environ. Agric. 18:6-10.
- Lee KS, DK Ko, WC Choi, TY Oh, YS Park, CI Choi and YK Choi. 1993. Distribution of antibiotics or heavy metal resistant bacteria, and frequency of multi-drug resistance in Kum River area. Korean J. Environ. Biol. 11:131-144.
- Lee TG. 2004. A bibliographical study on realities and counterplan for non-point source. J. of NERI. 9:1-10.
- 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. 2009. Establishment of natural non-point pollution source management plan using LID technique. Ministry of Environment, Korea. pp. 2-3.
- ME. 2012. The second non-point pollution source comprehensive measures (12-'20). Ministry of Environment, Korea. pp. 3-16.
- ME. 2013. Guidelines for low impact development (LID) technology elements. Ministry of Environment, Korea. pp. 1-50.
- 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.
- NIER. 2012. Guidelines for optimal management of nonpoint source pollutants for total water pollution management. National Institute of Environmental Research, Korea. pp. 10–16.
- NIER. 2014. Establishment of guidelines for non-point source management plan in rural area. National Institute of Environmental Research, Korea. pp. 65–146.
- Park JH and SY Kwon. 2005. Seasonal effects of livestock wastewater treatment by a constructed wetland. *J. Wetlands Res.* 7:33–39.
- 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.
- Park MK, SJ Lee, HH Suh, HS Kim, YH Kim, BD Yoon and HM Oh. 1998. Advanced treatment of swine wastewater by a green alga, *scenedesmus quadricauda*. *Algae* 13:227–233.
- Poels J, PV Assche and W Verstraete. 1984. Effects of disinfectants and antibiotics on the anaerobic digestion of piggery waste. *Agric. Wastes* 9:239–247.
- Seo DC, MR Park, HJ Kim, IJ Cho, HJ Lee, SJ Sung, JS Cho and JS Heo. 2006. Development of sewage treatment apparatus for detached house in agricultural village by natural purification method. *Korean J. Environ. Agric.* 25:202–210.
- 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.
- Yang HM. 2002. Preliminary nitrogen removal rate in close-to-nature constructed stream water treatment wetland. *Korean J. Environ. Agric.* 21:269–273.

Received: 17 November 2017

Revised: 12 December 2017

Revision accepted: 13 December 2017