

인공습지 축산폐수처리장에서 주입방법에 따른 오염물질의 제거속도 평가

김성현[†] · 서동철^{1†} · 박종환 · 이충현 · 이성태² · 정태욱³ · 김홍출⁴ · 하영래 · 조주식^{1**} · 허종수^{*}

경상대학교 응용생명과학부(Bk21 농생명산업 글로벌 인재 육성 사업단)
& 농업생명과학원, ¹순천대학교 생물환경학과, ²경상남도농업기술원,
³부산광역시 보건환경연구원, ⁴경남과학기술대학교 제약공학과

Removal Velocities of Pollutants under Different Wastewater Injection Methods in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater

Seong-Heon Kim[†], Dong-Cheol Seo^{1†}, Jong-Hwan Park, Choong-Heon Lee, Seong-Tea Lee²,
Tae-Uk Jeong³, Hong-Chul Kim⁴, Yeong Rae Ha, Ju-Sik Cho^{1**}, and Jong-Soo Heo^{*}

Divison of Applied Life Science (BK21 Program) & Institute of Agriculture and Life Science, GyeongSang National University, Jinju, 660-701, Korea, ¹Department of Bio-Environmental Sciences, Sunchon National University, Suncheon, 540-742, Korea, ²Gyeongnam Agricultural Research and Extension Services, Jinju, 660-370, Korea, ³Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment Research, Busan, 611-813, Korea ⁴Department of Pharmaceutical Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju, 660-758, Korea.,

In order to effectively treat livestock wastewater in constructed wetlands by natural purification method, removal velocities of pollutants under different injection methods in constructed wetlands were investigated. The removal velocities of chemical oxygen demand (COD), suspended solid (SS), T-N and T-P by continuous injection method were slightly rapid than those by intermittent injection method in full-scale livestock wastewater treatment plant. The removal velocity (K; day⁻¹) of COD by continuous injection method was 0.38 d⁻¹ for 1st bed, 0.13 d⁻¹ for 2nd bed, 0.17 d⁻¹ for 3rd bed, 0.05 d⁻¹ for 4th bed and 0.17 d⁻¹ for 5th bed. The removal velocities (K; day⁻¹) of COD in 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th beds by intermittent injection method were 0.210 d⁻¹, 0.086 d⁻¹, 0.222 d⁻¹, 0.053 d⁻¹ and 0.137 d⁻¹, respectively. The removal velocity (K; day⁻¹) of SS by continuous injection method was 0.750 d⁻¹ for 1st bed, 0.108 d⁻¹ for 2nd bed, 0.120 d⁻¹ for 3rd bed, 0.086 d⁻¹ for 4th bed and 0.292 d⁻¹ for 5th bed. The removal velocities (K; day⁻¹) of SS in 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th beds by intermittent injection method were 0.485 d⁻¹, 0.056 d⁻¹, 0.174 d⁻¹, 0.081 d⁻¹ and 0.227 d⁻¹, respectively. The removal velocity (K; day⁻¹) of T-N by continuous injection method was 0.361 d⁻¹ for 1st bed, 0.121 d⁻¹ for 2nd bed, 109 d⁻¹ for 3rd bed, 0.047 d⁻¹ for 4th bed and 0.155 d⁻¹ for 5th bed. The removal velocities (K; day⁻¹) of T-N in 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th beds by intermittent injection method were 0.235 d⁻¹, 0.071 d⁻¹, 0.171 d⁻¹, 0.058 d⁻¹ and 0.126 d⁻¹, respectively. The removal velocity (K; day⁻¹) of T-P by continuous injection method was 0.803 d⁻¹ for 1st bed, 0.084 d⁻¹ for 2nd bed, 0.076 d⁻¹ for 3rd bed, 0.118 d⁻¹ for 4th bed and 0.301 d⁻¹ for 5th bed. The removal velocities (K; day⁻¹) of T-P in 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th beds by intermittent injection method were 0.572 d⁻¹, 0.049 d⁻¹, 0.090 d⁻¹, 0.112 d⁻¹ and 0.222 d⁻¹, respectively.

Key words: Livestock wastewater, Water plant filtration, Activated sludge, Natural purification method, Removal velocity.

서 언

접수 : 2012. 1. 19 수리 : 2012. 4. 25

*연락처 : Phone: +82557515470

E-mail: jsheo@gnu.ac.kr

**공동연락처 : Phone: +82617503297

E-mail: chojs@sunchon.ac.kr

†공동 제1저자

1970년대 이후 급속한 산업화에 따른 인구 및 소득증가로 인한 육류의 소비로 축산업이 활성화되면서 전통적인 재래식 가축사육 형태에서 전업식 사육형태로 전환되고 있으며, 최근의 농업시장 개방에 따른 국제경쟁력 약화 우려 및

수자원 보호를 위한 축산폐수의 규제 강화 등으로 인해 소 규모의 겸업농가의 수는 점차 감소하고 전업화, 대규모화된 농가로 전환되고 있는 추세이다 (Ministry of Environmental, 2003).

2008년 말 현재 소·돼지의 가축분뇨 발생량은 133,964 m³ day⁻¹이며, 이 중 돼지 78,148 m³ day⁻¹, 젖소 20,338 m³ day⁻¹, 한우 35,478 m³ day⁻¹로 돼지사육농가에서 발생되는 가축분뇨가 58%로 가장 많은 양을 차지하고 있으며, 사육규모별로는 대규모 사육농가인 허가대상이 52%, 중규모 사육농가인 신고대상이 35%로 축산농가가 대규모화하고 있다. 또한 전체 가축분뇨 발생량 중 약 80%는 자체적으로 퇴비·액비화 시설을 갖추어 비료로 활용하고 있으며, 일부 농가에서는 정화처리하거나 재활용업체 및 해양배출, 공공처리시설을 이용하여 가축분뇨를 처리하고 있다 (Ministry of Environmental, 2006). 그러나 최근 정부에서 발표한 자료에 따르면 해양오염방지법 시행규칙개정으로 2012년부터는 하수오니 등의 해양투기가 전면 금지될 예정에 있어 앞으로 축산폐수처리시설이 크게 늘어날 전망이다 (Lee, 2010).

현행 축산폐수의 정화방법으로는 물리·화학적 처리방법과 생물학적 처리방법으로 구분된다. 현재까지 대부분의 축산분뇨 처리장에 적용된 공법은 혐기성 및 호기성 처리법들을 혼합한 형태의 생물학적 처리방법이 많이 이용되고 있지만, 생물학적 처리방법은 고도의 운전 기술과 숙련된 운전 인력이 필요할 뿐만 아니라 많은 부지가 소요된다 (Kim et al., 2005 Min et al., 1998). 또한 공공 축산폐수 처리장 방류수 수질 기준을 초과하거나 유입수 농도가 일정하지 않아 고도처리시설 운영 시 처리가 어렵다 (Lee, 2010).

따라서 축산농가 환경의 특성을 감안하여 소·중규모나

그 이하의 규모에서 발생하는 축산폐수를 처리하기 위하여 시설비 및 유지관리비용이 저렴하고 지역의 환경에 잘 적응하며, 공정이 간단하고, 계획된 방류수질을 충족시킬 수 있는 축산폐수처리 공법의 개발이 절실히 요구되어 환경친화형 자연정화공법이 대두되었다. 이에 본 연구진은 선행연구 (Park et al., 2011 Seo, et al., 2011)를 통해 자연정화공법에 의한 축산폐수처리의 최적조건을 구명하였다. 하지만 선행연구는 축산폐수처리의 최적조건 및 처리효율의 극대화 방안을 위주로 조사하였으며, 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서의 처리단계별 오염물질 처리경향에 대해서는 보고된 적이 없다.

따라서 본 연구는 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서 오염물질의 처리경향을 파악하고, 이를 토대로 설계 및 시공시 부지면적 감소와 오염물질의 처리효율 극대화를 위한 기초자료를 제시하기 위하여 오염물질의 제거속도를 조사하였다

재료 및 방법

공시재료 본 실험에 사용된 시험 축산폐수는 경남 진주시 이반성면 장안리에 위치한 실제 축산농가에서 채취하여 시험 원수로 사용하였으며, 시험 여재는 여재채취장에서 채취한 여재를 사용하였다.

공시 축산폐수의 화학적 특성은 Table 1과 같고, 현장 인공습지 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성은 Table 2 및 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 현장 인공습지 축산폐수처리장에 사용된 여재는 호기성조의 경우 왕사, 쇠석 및 방해석을 3 : 2 : 1로 혼합한 여재를 사용하였고, 혐기성

Table 1. Characteristics of the livestock wastewater used.

pH	EC	COD	SS	T-N	T-P
(1:5)	dS m ⁻¹	----- mg L ⁻¹ -----			
6.8±0.7	2.64±0.28	10,639±2,451	9,400±2,514	5,024±1,127	725±102

Table 2. Characteristics of the filter media used.

Mixed filter media	pH	EC	OM	T-N	T-P
	(1:5)	dS m ⁻¹	%	----- mg kg ⁻¹ -----	
A [†]	8.0	0.06	0.59	11.1	30.5
B	7.5	0.05	0.69	16.2	51.4

Mixed filter media	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Mn	Zn
	----- mg kg ⁻¹ -----							
A	15,688	69,373	2,484	308	3,741	1.35	149	85.5
B	1,643	1,451	1,009	324.1	2,972	11.4	114.6	5.2

[†]A: Mixed filter media in VF bed (Coarse sand : Broken stone : Calcite = 3 : 2 : 1),

B: Mixed filter media in HF bed (Coarse sand : Broken stone : Zeolite = 3 : 2 : 1).

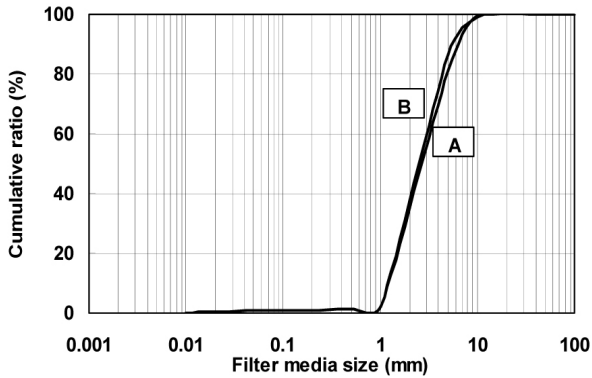


Fig. 1. Particle size distribution of the filter media used.
A: Mixed filter media in VF bed (Coarse sand : Broken stone : Calcite = 3 : 2 : 1),
B: Mixed filter media in HF bed(Coarse sand : Broken stone : Zeolite = 3 : 2 : 1).

조의 경우 왕사, 쇠석 및 제올라이트를 3 : 2 : 1로 혼합한 여재를 사용하였다. 호기성조 및 혐기성조 여재의 유효입경 (여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 10%되는 부분의 여재의 입경 ; d_{10})은 각각 2.6 mm이었으며, 균등계수 (여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 60%되는 입경과 10%되는 입경과의 비 ; d_{60} / d_{10})는 각각 2.53 및 2.62이었다. 그리고 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물은 다년생 수생식물인 갈대 및 노랑꽃창포 등 2종이었으며, 모든 수생식물은 야외노지에서 성장한 수초를 분주하여 처리장내에 이식하였다.

자연정화공법에 의한 축산폐수처리장 설계 및 시공

현장 인공습지 축산폐수처리장은 본 연구진의 선행연구 (Park et al., 2011)를 토대로 하여 수생식물여과조-활성슬러지조-인공습지를 하나의 시스템으로 연계하여 설계 및 시공하였다 (Fig. 2). 현장 인공습지 축산폐수처리장에서 각 조의 크기는 수생식물여과조의 경우 직경 0.90 m × 높이 1.00 m인 플라스틱 원통을 사용하여 용량이 0.63 m³이 되게 제작하였으며, 활성슬러지조는 세로 3 m × 가로 3 m × 높이 1 m로 용량이 9 m³이 되게 제작하였다. 그리고 인공습지에서 호기성조의 경우 세로 4 m × 가로 4 m × 높이 1 m로 용량이 16 m³이 되게 제작하였고, 1차 혐기성조의 경우는 세로 4 m × 가로 5 m × 높이 1 m로 용량이 20 m³이 되게 제작하였으며, 2차 혐기성조의 경우 세로 4 m × 가로 5 m × 높이 0.5 m로 용량이 10 m³이 되게 제작하였다. 수생식물여과조는 자갈을 하부에서부터 0.30 m까지 충전한 후 인공습지에서 생육한 수생식물을 건조하여 3~5 cm 크기로 분쇄하여 하부 0.30 m에서부터 0.90 m까지 충전하여 구성하였고, 활성슬러지조는 산청군 축산폐수 공공처리시설로부터 확보한 활성슬러지를 0.90 m까지 채운 후 공기로 폭기시켰다. 그리고 인공습지의 호기성조의 경우는 왕사, 쇠

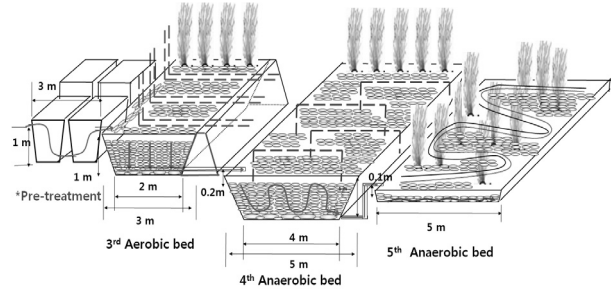


Fig. 2. Diagrams of constructed wetlands with filtration bed and activated sludge bed for treating livestock wastewater.
***Pre-treatment : 1st water plant filtration bed and 2nd activated sludge bed.**

석 및 방해석 3:2:1의 비율로 혼합하여 여재를 충전하였고, 혐기성조에는 경우는 왕사, 쇠석 및 제올라이트를 3:2:1의 비율로 혼합하여 충전하였다. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수의 흐름은 1차 수생식물여과조에 축산폐수를 유입시켜 수직여과방식으로 처리하여 유출된 1차 처리수는 자연유하식으로 2차 활성슬러지조로 유입되게 하였고, 폭기 중인 활성슬러지조에 유입된 축산폐수는 호기성 미생물에 의해 2차 처리되게 하였으며, 2차 처리수는 인공습지로 자연유하되게 하였다. 또한 인공습지에서 축산폐수의 흐름은 3차 호기성조에서 수직여과방식으로 처리한 후 호기성조 처리수를 자연유하식으로 4차 및 5차 혐기성조를 거쳐서 처리되게 하였고, 각 혐기성조에 유입된 축산폐수는 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

축산폐수처리장 실험방법 및 조사시기

자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서의 축산폐수 주입방법별 수처리 효율은 운전 2개월 동안 조사하였으며, 각 처리단계별로 COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율을 각각 조사하였다. 또한 축산폐수처리장에서 오염물질의 처리경향을 파악하고, 이를 토대로 축산폐수처리장의 설계 및 시공시 부지면적 감소와 오염물질의 처리효율 극대화를 위한 기초자료로 활용하기 위해 현장 축산폐수처리장에서 오염물질의 반응비 조사결과를 이용하여 COD, SS, T-N 및 T-P의 제거속도를 각각 조사하였으며, 각 오염물질의 제거속도는 $\ln(C/C_0) = -Kt$ 의 1차 반응속도식을 이용하였다.

오염물질의 제거속도는 1차 반응으로 가정하여 $V=KC$ 로 정의할 수 있으며, 반응속도 V 는 하나의 오염물질 농도에 관계될 때 순간적인 시간 dt 에서 농도 C 가 dc 만큼 변하는 순간으로 $-dc/dt$ 로 정의된다.

그러므로 $V=KC$ 에서 V 대신에 $-dc/dt$ 를 대입하여 정리하면 $dc/c=-Kdt$ 식을 유도할 수 있으며, 이 식은 $t=0$ 일 때, $C=C_0$ 의 조건을 주어 적분하면 식 (1)과 같고 이를 정리하여 식으로 나타낼 수 있다 (Seo, 2005).

$$\int_{C_0}^C \frac{1}{C} dC = -K \int_0^t dt \quad (1)$$

$$\ln \frac{C}{C_0} = -Kt$$

C_0 : 초기 ($t=0$) 농도,
 C : 나중 (t 시간 후) 농도,
 K : 제거속도상수 (time^{-1}),
 t : 반응시간 (time).

따라서 상기 식에서 오염물질의 제거속도 상수 K 는 초기 농도에서 체류시간에 따른 오염물질의 감소된 농도로부터 Y축에는 $\ln [C/C_0]$, X축에는 시간 (t)로 직선식을 그어서 나온 기울기를 이용하여 구할 수 있다.

분석방법 수질분석은 수질오염공정시험법과 APHA의 standard method에 준하여 다음과 같이 하였다 (Kim et al., 2001; APHA, 2005). COD는 산성 과망간산칼륨법, SS는 유리섬유여과지법, T-N은 자외선 흡광광도법, T-P는 아스코르빈산 환원법으로 각각 분석하였다.

결과 및 고찰

축산폐수처리장에서 주입방법에 따른 오염물질의 제거속도 조사 현장 축산폐수처리장에서 COD의 제거속도는 Fig. 3 및 Table 3에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 제거속도 방정식은 연속적 주입의 경우 1차 처리조인 수생식물여과조는 $\ln(C/C_0) = -0.377 \times \text{HRT}(\text{day})$ ($r=1^{**}$), 2차 활성슬러지조는 $\ln(C/C_0) = -0.129 \times \text{HRT}(\text{day}) + 0.351$ ($r=1^{**}$), 3차 호기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.174 \times \text{HRT}(\text{day}) + 0.377$ ($r=0.993^{**}$), 4차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.052 \times \text{HRT}(\text{day}) + 2.556$ ($r=0.978^{**}$) 및 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.169 \times \text{HRT}(\text{day}) + 1.552$ ($r=0.982^{**}$)으로 모든 처리조의 방정식은 고도의 부의 상관관을 보였다. 현장 축산폐수처리장에서 제거속도 방정식은 간헐적 주입의 경우 수생식물여과조는 $\ln(C/C_0) = -0.210 \times \text{HRT}(\text{day})$ ($r=1^{**}$), 2차 활성슬러지조는 $\ln(C/C_0) = -0.086 \times \text{HRT}(\text{day}) + 0.176$ ($r=1^{**}$), 3차 호기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.174 \times \text{HRT}(\text{day}) + 1.968$ ($r=0.983^{**}$), 4차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.053 \times \text{HRT}(\text{day}) + 2.151$ ($r=0.998^{**}$) 및 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.137 \times \text{HRT}(\text{day}) + 0.863$ ($r=0.958^{**}$)으로 연속적 주입한 경우와 동일한 경향으로 고도의 부의

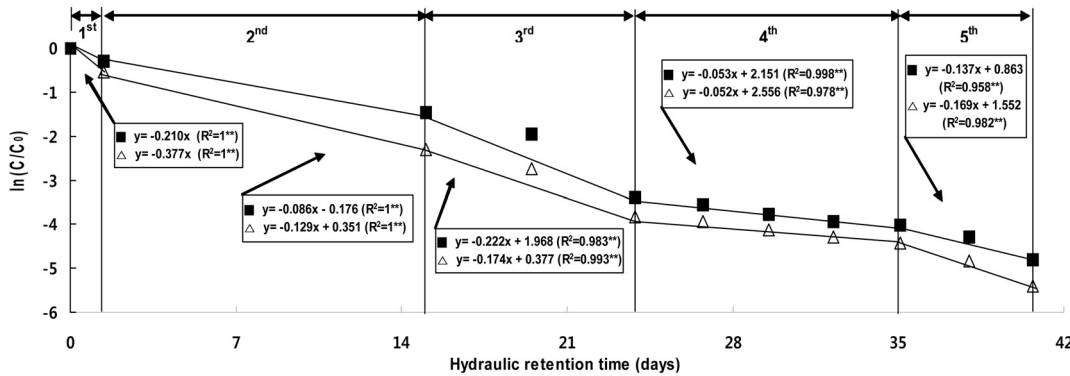


Fig. 3. Removal velocity of COD in the water according to the hydraulic retention time in livestock wastewater treatment plant by natural purification method (△ : continuous injection, ■ : intermittent injection).

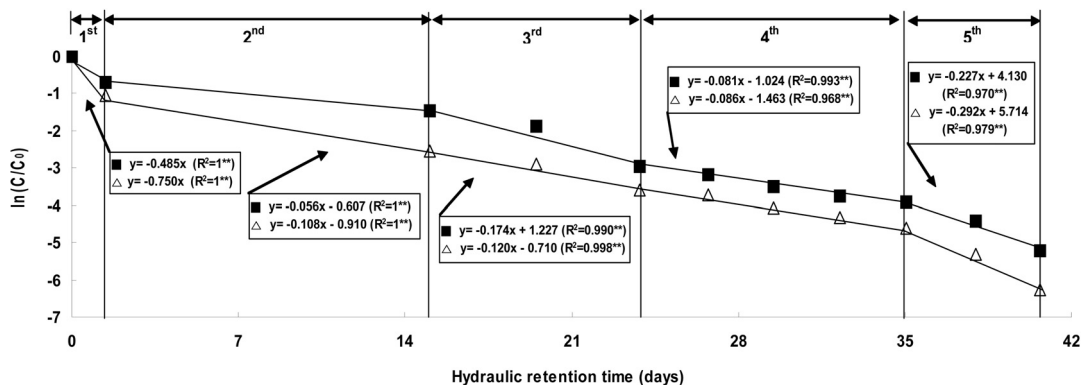


Fig. 4. Removal velocity of SS in the water according to the hydraulic retention time in livestock wastewater treatment plant by natural purification method (△ : continuous injection, ■ : intermittent injection).

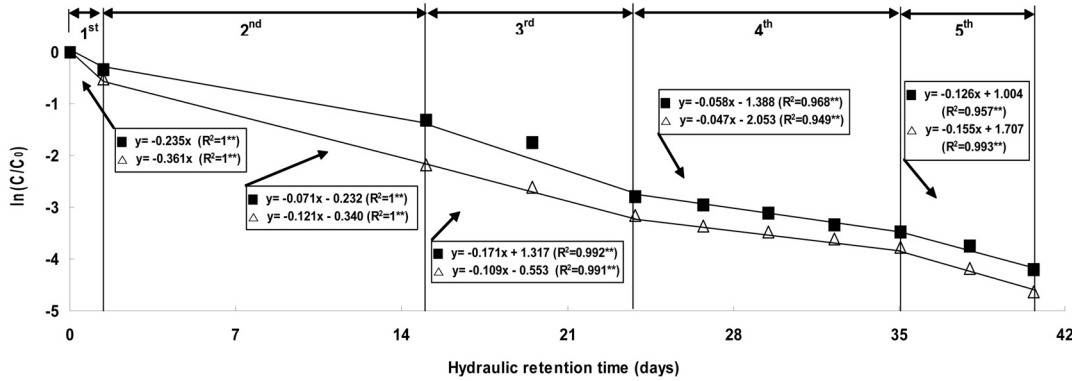


Fig. 5. Removal velocity of T-N in the water according to the hydraulic retention time in livestock wastewater treatment plant by natural purification method (△ : continuous injection, ■ : intermittent injection).

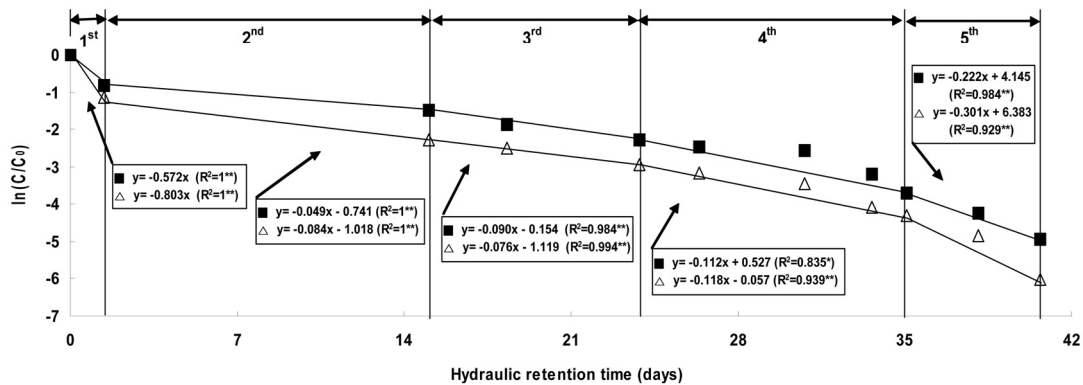


Fig. 6. Removal velocity of T-P in the water according to the hydraulic retention time in livestock wastewater treatment plant by natural purification method (△ : continuous injection, ■ : intermittent injection).

상관을 보였다. 제거속도 상수 (K)는 연속적 주입의 경우 1차, 2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.377, 0.129, 0.174, 0.052 및 0.169 d⁻¹이었고, 간헐적 주입의 경우 0.210, 0.086, 0.222, 0.053 및 0.137 d⁻¹였으며, 제거속도는 연속주입이 간헐적 주입에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이였다. 특히 활성슬러지조에서의 COD제거속도는 가장 빨랐는데, Hwang (1998)의 활성슬러지조 공정을 이용한 돈사폐수처리에 관한 연구결과 TCOD 제거 효율은 71~90% 까지 처리가 되었고, SCOD의 경우 61~78%까지 처리한다고 보고하였다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 활성슬러지조는 축산폐수 중 분리되지 않는 입자상 고형물을 처리함으로써 유기성 오염물질을 제거할 수 있을 것으로 판단되며, 특히 COD 및 SS처리에 적합할 것으로 판단된다. 또한 본 축산폐수처리장의 장기간의 활성슬러지조를 운영에 대한 연구는 미흡한 실정으로서 활성슬러지조의 안정적인 운영을 위한 연구가 더욱 진행되어야 할 것으로 판단된다.

현장 축산폐수처리장에서 SS의 제거속도는 Fig. 4 및 Table 3에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 제거속도 방정식은 연속적 주입의 경우 수생식물여과조는 수생식물여과조는 $\ln(C/C_0) = -0.750 \times \text{HRT}(\text{day})$ ($r=1^{**}$), 2차

활성슬러지조는 $\ln(C/C_0) = -0.108 \times \text{HRT}(\text{day}) - 0.910$ ($r=1^{**}$), 3차 호기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.120 \times \text{HRT}(\text{day}) - 0.710$ ($r=0.962^{**}$), 4차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.086 \times \text{HRT}(\text{day}) - 1.463$ ($r=0.968^{**}$) 및 5차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.292 \times \text{HRT}(\text{day}) + 5.714$ ($r=0.979^{**}$)으로 모든 처리조의 방정식은 고도의 부의 상관을 보였다. 현장 축산폐수처리장에서 제거속도 방정식은 간헐적 주입의 경우 수생식물여과조는 $\ln(C/C_0) = -0.485 \times \text{RT}(\text{day})$ ($r=1^{**}$), 2차 활성슬러지조는 $\ln(C/C_0) = -0.056 \times \text{HRT}(\text{day}) - 0.607$ ($r=0.962^{**}$), 3차 호기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.174 \times \text{HRT}(\text{day}) + 1.227$ ($r=0.990^{**}$), 4차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.081 \times \text{HRT}(\text{day}) - 1.024$ ($r=0.993^{**}$) 및 5차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.227 \times \text{HRT}(\text{day}) + 4.130$ ($r=0.970^{**}$)으로 고도의 부의 상관을 보였다. 제거속도는 연속적 주입한 경우가 간헐적 주입한 경우에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이였다. 제거속도 상수(K)는 연속적 주입의 경우 1차, 2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.750, 0.108, 0.120, 0.086 및 0.292 d⁻¹이었고, 간헐적 주입의 경우 0.485, 0.056, 0.174, 0.081 및 0.227 d⁻¹였으며, 제거속도는 연속주입이 간헐적 주입에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이였다.

Heo (2007)의 보고에 따르면 자연정화공법에 의한 시설 원예지대 오염용수처리장의 혐기성조는 SS의 제거속도에

큰 영향이 없다고 보고 하였는데, 본 축산폐수처리장의 경우는 혐기성조에서의 제거속도는 빠른 경향이였다. 이는 상대적으로 시설원예지대 오염용수에 비해 축산폐수의 SS함량이 높아 전처리 과정에서 모든 SS를 제거하지 못하기 때문으로 사료되며, 축산폐수처리장에서 혐기성조의 SS의 제거 영향은 높은 것으로 사료된다.

현장 축산폐수처리장에서 T-N의 제거속도는 Fig. 5 및 Table 3에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 제거속도 방정식은 연속적 주입한 경우 수생식물여과조는 $\ln(C/C_0) = -0.301 \times \text{HRT}(\text{day})$ ($r=1.000^{**}$), 2차 활성슬러지조는 $\ln(C/C_0) = -0.121 \times \text{HRT}(\text{day}) - 0.340$ ($r=1.000^{**}$), 3차 호기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.109 \times \text{HRT}(\text{day}) - 0.553$ ($r=0.991^{**}$), 4차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.047 \times \text{HRT}(\text{day}) - 2.053$ ($r=0.949^{**}$) 및 5차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.155 \times \text{HRT}(\text{day}) + 1.707$ ($r=0.993^{**}$)으로 모든 처리조에서 고도의 부의 상관을 보였다. 현장 축산폐수처리장에서 제거속도 방정식은 간헐적 주입한 경우 수생식물여과조는 $\ln(C/C_0) = -0.235 \times \text{HRT}(\text{day})$ ($r=1.000^{**}$), 2차 활성슬러지조는 $\ln(C/C_0) = -0.071 \times \text{HRT}(\text{day}) - 0.232$ ($r=1.000^{**}$), 3차 호기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.171 \times \text{HRT}(\text{day}) + 1.317$ ($r=0.992^{**}$), 4차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.058 \times \text{HRT}(\text{day}) - 1.388$ ($r=0.968^{**}$) 및 5차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.126 \times \text{HRT}(\text{day}) + 1.004$ ($r=0.957^{**}$)으로 부의 상관을 보였다. 제거속도 상수(K)는 연속적 주입의 경우 1차, 2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.361, 0.121, 0.109, 0.047 및 0.155 d^{-1} 이었고, 간헐적 주입의 경우 0.235, 0.071, 0.171, 0.058 및 0.126 d^{-1} 였으며, 제거속도는 연속주입이 간헐적 주입에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이였다.

자연정화공법에 의한 현장 축산폐수처리장에서 T-P의 제거속도는 Fig. 6 및 Table 3에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 제거속도 방정식은 연속적 주입한 경우 유입에서 수생식물여과조는 $\ln(C/C_0) = -0.803 \times \text{HRT}(\text{day})$ ($r=1.000^{**}$), 2차 활성슬러지조는 $\ln(C/C_0) = -0.084 \times \text{HRT}(\text{day}) - 1.108$ ($r=0.939^{**}$), 3차 호기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.076 \times \text{HRT}(\text{day}) - 1.119$ ($r=0.994^{**}$), 4차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.118 \times \text{HRT}(\text{day}) - 0.057$ ($r=0.939^{**}$) 및 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.301 \times \text{HRT}(\text{day}) + 6.838$ ($r=0.929^{**}$)으로 모든 처리조의 방정식은 고도의 부의 상관을 보였으며, 간헐적 주입한 경우 수생식물여과조는 $\ln(C/C_0) = -0.572 \times \text{HRT}(\text{day})$ ($r=1^{**}$), 2차 활성슬러지조는 $\ln(C/C_0) = -0.049 \times \text{HRT}(\text{day}) - 0.741$ ($r=1.000^{**}$), 3차 호기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.090 \times \text{HRT}(\text{day}) - 0.154$ ($r=0.984^{**}$), 4차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.112 \times \text{HRT}(\text{day}) + 0.527$ ($r=0.835^{**}$) 및 5차 혐기성조는 $\ln(C/C_0) = -0.222 \times \text{HRT}(\text{day}) + 4.145$ ($r=0.984^{**}$)으로 연속 주입한 경우와 동일한 경향으로 고도의 부의 상관을 보였다. 제거속도 상수(K)는 연속적 주입의 경우 1차, 2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.572, 0.049, 0.090,

2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.361, 0.121, 0.109, 0.047 및 0.155 d^{-1} 이었고, 간헐적 주입의 경우 0.235, 0.071, 0.171, 0.058 및 0.126 d^{-1} 였으며, 제거속도는 연속주입이 간헐적 주입에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이였다.

Table 3. Removal velocity constant (K) of pollutants and correlation coefficient (r) in livestock wastewater treatment plant by natural purification method.

Items	Stage	Continuous injection		Intermittent injection	
		K (day^{-1})	Correlation coefficient (r)	K (day^{-1})	Correlation coefficient(r)
COD	1st bed	0.377	1.000 ^{**}	0.210	1.000 ^{**}
	2nd bed	0.129	1.000 ^{**}	0.086	1.000 ^{**}
	3rd bed	0.174	0.993 ^{**}	0.222	0.983 ^{**}
	4th bed	0.052	0.978 ^{**}	0.053	0.998 ^{**}
	5th bed	0.169	0.982 ^{**}	0.137	0.958 ^{**}
SS	1st bed	0.750	1.000 ^{**}	0.485	1.000 ^{**}
	2nd bed	0.108	1.000 ^{**}	0.056	1.000 ^{**}
	3rd bed	0.120	0.998 ^{**}	0.174	0.990 ^{**}
	4th bed	0.086	0.968 ^{**}	0.081	0.993 ^{**}
	5th bed	0.292	0.979 ^{**}	0.227	0.970 ^{**}
T-N	1st bed	0.361	1.000 ^{**}	0.235	1.000 ^{**}
	2nd bed	0.121	1.000 ^{**}	0.071	1.000 ^{**}
	3rd bed	0.109	0.991 ^{**}	0.171	0.992 ^{**}
	4th bed	0.047	0.949 ^{**}	0.058	0.968 ^{**}
	5th bed	0.155	0.993 ^{**}	0.126	0.957 ^{**}
T-P	1st bed	0.803	1.000 ^{**}	0.572	1.000 ^{**}
	2nd bed	0.084	1.000 ^{**}	0.049	1.000 ^{**}
	3rd bed	0.076	0.994 ^{**}	0.090	0.984 ^{**}
	4th bed	0.118	0.939 ^{**}	0.112	0.835 [*]
	5th bed	0.301	0.929 ^{**}	0.222	0.984 ^{**}

* and ** denote significance at 5.0 and 1.0% levels, respectively.

0.112 및 0.222 d^{-1} 이었고, 간헐적 주입의 경우 0.803, 0.084, 0.076, 0.118 및 0.301 d^{-1} 였으며, 제거속도는 연속 주입이 간헐적 주입에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이였다. 현장 축산폐수처리장의 T-P의 제거속도는 연속적 주입 방법이 간헐적 주입방법에 비해 약간 빨랐다. Park (2011) 연구결과 인공습지를 이용한 폐양액처리장에서 T-P의 제거속도는 고도의 부의 상관을 보인다고 보고하였으며, 본 연구결과와 동일한 경향이었고, 최종 방류되는 혐기성조의 제거속도 비교 결과 폐양액처리장의 경우 0.518 d^{-1} 이었고, 축산폐수처리장의 경우 0.301 d^{-1} 로 두 처리장 모두 T-P의 제거속도는 매우 빠른 경향이였다. 이는 폐양액 및 축산폐수 처리장에 사용한 여재 중 일부는 방해석으로 충전되어 있으며, 방해석은 대부분 $CaCO_3$ 형태로 이루어져 있으므로 정석탈인법에 의해 인이 Ca-P로 흡착되어 인공습지에서 높은 처리효율로 인이 처리될 수 있는 것으로 보고한 바 있다. 일반적으로 정석탈인법을 이용한 인 처리는 인을 함유하는 물에 인산칼슘으로 되는 동중동계종의 화합물과 접촉시키면 탈인제인 방해석 위에 인산 칼슘이 생성, 정석하는 현상을 이용한 정석 탈인법으로 수중의 인은 Ca이온과 반응하여 난용성인 hydroxyapatite [$Ca_5(OH)(PO_4)_3$]로 처리되는 것으로 알려져 있다 (Heyman, 1988; Lahmann, 1989).

또한 폐양액처리장이 축산폐수처리장에 비해 제거속도가 약간 빠른 경향이었는데, 이는 오염물질의 체류시간과 각 폐수간의 성상이 차이가 있으므로 두 처리장간의 직접적인 비교는 불가능할 것으로 판단된다.

요 약

자연정화공법을 이용한 축산폐수처리장에서 주입부하량에 따른 대응성을 평가하기 위해 주입방법에 따른 수처리 효율 결과를 이용하여 오염물질의 처리경향을 파악하고, 이를 토대로 설계 및 시공시 부지면적 감소와 오염물질의 처리효율 극대화를 위한 기초자료를 제시하기 위하여 주입방법에 따른 오염물질의 제거속도를 조사하였다. 축산폐수처리장에서 시기별 주입방법에 따른 수처리 효율을 조사한 결과 최종 5차 방류수에서 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 연속적 주입의 경우는 각각 99.5%, 99.8%, 99.0% 및 99.8%였으며, 간헐적 주입의 경우는 99.2%, 99.5%, 98.5% 및 99.3%로서 상대적으로 연속적 주입이 간헐적 주입보다 높은 처리효율을 보였다. 축산폐수처리장에서 주입방법에 따른 오염물질의 제거속도 K (day^{-1})는 축산폐수 주입방법을 연속적 및 간헐적으로 구분하여 각 방법에 따른 COD, SS, T-N 및 T-P의 제거속도를 각각 조사하였으며, 각 오염물질의 제거속도는 $\ln(C/C_0) = -Kt$ 의 1차 반응속도식을 이용하였다. COD 제거상수(K)는 연속적 주입의 경우 1차, 2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.210, 0.086, 0.222,

0.053 및 0.137 d^{-1} 이었고, 간헐적 주입의 경우 0.377, 0.129, 0.174, 0.052 및 0.169 d^{-1} 였다. 그리고 T-N의 제거속도 상수(K)는 연속적 주입의 경우 1차, 2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.235, 0.071, 0.171, 0.058 및 0.126 d^{-1} 이었고, 간헐적 주입의 경우 0.361, 0.121, 0.109, 0.047 및 0.155 d^{-1} 였다. T-P의 제거속도 상수(K)는 연속적 주입의 경우 1차, 2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.572, 0.049, 0.090, 0.112 및 0.222 d^{-1} 이었고, 간헐적 주입의 경우 0.803, 0.084, 0.076, 0.118 및 0.301 d^{-1} 였다. 이상의 결과를 미루어 볼때 제거속도는 연속적 주입이 간헐적 주입에 비해 빠른 경향이였으며, 본 현장 축산폐수처리장은 축산폐수 유입 부하량 변동과 순간 부하량에 대한 대응성이 우수한 것으로 판단된다

감사의 글

본 연구는 농림수산물식품부 농림기술개발사업 (과제번호: 20090423)에 의해 이루어진 것임. 또한 본 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 [NRF2010-359-F00003] 및 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원의 일환으로 수행하였음.

인 용 문 헌

- APHA, AWWA, WCF. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 17th Edition. American Public Health Association. Washington. DC.
- Hwang, G.D., M.H. Kim, and C.H. Cho. 1998. A study on kinetics coefficients in activated sludge process for swine wastewater treatment. J. KSWQ DEC. 14:529-537.
- Heo, J.S. 2007. Development of a natural purification technology of polluted agricultural water from non-point sources in greenhouse area for sustainable agriculture. Ministry of Agriculture and Forestry.
- Heyman, A.M. 1988. Self-Financed resource, a direct approach to maintaining marine biological diversity. Paper presented at workshop on economics. IUCN General assembly. Costa Rica. 234-235.
- Kim, J.T., K.H. Moon, and J.W. Kim, 2001. The standard method of water analysis. Shinkwang a publishing company. Korea.
- Lee, J.G. 2010. Piggery wastewater treatment using an anoxic-oxic bioreactors and ozonation. Master Thesis. Yonsei University. Korea.
- Ministry of Environmental. 2003. Environmental white paper. Korea.
- Ministry of Environmental. 2010. Environmental white paper. Korea.

- Min, K.S., Y.J. Kim, K.H. Nam, and J.H. Ahn. 1998. Advanced treatment of piggery wastewater by MAP, precipitation and ozone oxidation process using pilot plant. J. Korea Solid Wastes Engineering Society. 15:646-654.
- Lahmann, E. 1989. Formulacion de un proyecto de conservacion de los recursos naturales Para la Zonade manglaves de Estero Real, Nicaragua. Mineographeol report. IUCN, San Joes, Costa Rich. 25.
- Park, J.H., D.C. Seo, A.R. Kim, S.H. Kim, S.T. Lee, T.U. Jeong, J.H. Choi, H. Kim, J.S. Cho, and J.S. Heo. 2011. Optimum configuration method and livestock wastewater loding for treating livestock wastewater in constructed wetlands by natural purification method. Korean J. Soil Sci. Fert. 44:278-284.
- Park, J.H., D.C. Seo, A.R. Kim, S.H. Kim, C.H Lee, S.T. Lee, T.U. Jeong, S.W. Lee, Y.R. Ha, J.S. Cho, and J.S. Heo. 2011. Treatment efficiencies and decomposition velocities of pollutants in constructed wetlands for treating hydroponic wastewater. Korean J. Soil Sci. Fert. 44:937-943.
- Seo, D.C, J.S Cho, H.J Lee, J.S Heo, 2005, Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland, Water Research, 39 : 2445-2457.
- Seo, D.C., J.H. Park, A.R. Kim, S.H. Kim, S.T. Lee, T.U. Jeong, J.H. Choi, S.W. Lee, J.S. Cho, H.O. Kim and J.S. Heo. 2011. A study on the improvement of treatment efficiency for nitrogen and phosphorus in livestock treatment system using constructed wetlands. Korean J. Soil Sci. Fert. 44:434-441.