한국환경농학회지 제27권 제1호 (2008)
Korean Journal of Environmental Agriculture Vol. 27, No. 1, pp. 18-26

연구보문

자연정화공법에 의한 농촌 전원독립가구 하수처리장에서 하수 중 오염물질의 존재형태별 거동과 분해속도

서동철[1] · 김형준[2] · 박우영[2] · 임종서[2] · 황승하[2] · 박찬훈[2] · 최정환[2] · 이홍재[3] · 이도진[4] · 조주식[5)**] · 허종수[2,6)*]

[1)]루이지애나주립대학교 습지생물지구화학연구소, [2)]경상대학교 응용생명과학부, [3)]진주산업대학교 환경공학과, [4)]순천대학교 농업교육과, [5)]순천대학교 생명환경과학부, [6)]경상대학교 농업생명과학원

(2007년 12월 4일 접수, 2008년 3월 20일 수리)

Behavior and Decomposition Velocity of Pollutants on Various Forms from Domestic Sewage in Small-scale Sewage Treatment Plant by Natural Purification Method

Dong-Cheol Seo[1)], Hyung-Jun Kim[2)], Seung-Ha Hwang[2)], Woo-Young Park[2)], Jong-Sir Lim[2)], Chan-Hoon Park[2)], Jeong-Hwan Choi[2)], Hong-Jae Lee[3)], Do-Jin Lee[4)], Ju-Sik Cho[5)**] and Jong-Soo Heo[2,6)*] ([1)]Wetland Biogeochemistry Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70802, USA, [2)]Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea, [3)]Department of Environmental Engineering, Jinju National University, Jinju, 660-758, Korea, [4)]Department of Agricultural Education, Sunchon National University, Sunchon, 540-742, Korea, [5)]Division of Applied Life and Environmental Sciences, Sunchon National University, Sunchon, 540-742, Korea, [6)]Institute of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701)

ABSTRACT: Behavior and decomposition velocity of pollutants on various forms from domestic sewage in sewage treatment plant were investigated in order to obtain the basic data for improving the removal efficiency of pollutants and to reduce the area in constructed wetland by natural purification method. The removal amounts of BODs and CODs in aerobic bed were significantly higher than those of the other beds. In aerobic bed, the removal amounts of IBOD and ICOD were more than those for SBOD and SCOD, respectively, whereas the removal amounts of BODs and CODs in anoxic and anaerobic beds were little different. The removal amounts of SSs in aerobic bed were also higher than those for the other beds, and the removal amounts of VSS in all beds were more than those for FSS. The removal amounts of DTN and DTP in all beds were more than those for STN and STP, respectively. In addition, the decomposition velocities of TBOD, TCOD and TSS in aerobic bed were 30.79, 17.15 and 29.96 day^{-1}. Moreover, the decomposition velocities of BODs, CODs and SSs in aerobic bed were very rapid than those in the other beds. On the other hand, the decomposition velocities of BODs, CODs and SSs in anoxic and anaerobic beds were a little different regardless of the forms of pollutant. The decomposition velocities constants of T-N in aerobic, anoxic and anaerobic beds were 4.78, 0.12 and 0.10 day^{-1}, respectively. Moreover, the decomposition velocities constants of T-P in aerobic, anoxic and anaerobic beds were 13.09, 0.12 and 0.13 day^{-1} respectively. The decomposition velocity of T-Ns and T-Ps in aerobic bed were slightly rapid than those in the other beds, whereas the decomposition velocities of T-Ns and T-Ps in anoxic and anaerobic beds were slightly different regardless of the forms of pollutant.

Key Words: various forms of pollutants, sewage treatment plant, aerobic bed, anoxic bed, anaerobic bed, decomposition velocity, behavior of pollutants, natural purification method.

*연락저자:
Tel: +82-55-751-5470 Fax: +82-55-757-0178
E-mail: jsheo@gsnu.ac.kr
**공동연락저자:
Tel: +82-61-750-3297 Fax: +82-61-750-3890
E-mail: chojs@sunchon.ac.kr

서 론

인구 증가 및 산업활동 증가에 따른 생활하수 배출량과 산업폐수 발생량은 꾸준히 증가하고 있으며, 오염물질의 과도한 배출은 자연의 환경용량을 초과하여 수역의 생태계 균

형을 파괴시키고 수질환경을 악화시키고 있으며, 이에 따른 수질보존과 개선을 위한 대책이 절실히 필요한 실정이다[1]. 현재 하수처리시설은 주로 도시지역에 편중되어 설치 보급되어 있으며, 농어촌 지역에서는 하수관거 확충 및 하수처리시설의 부족으로 인해 하수처리시설이 대부분 보급되어 있지 않아 수질오염이 가중되고 있다[2]. 특히, 농촌 지역은 외딴 전원독립가구와 축산시설의 증가 및 각종 위락시설의 개발에 따라 오·폐수가 처리과정을 거치지 않고 대부분 단독정화조 처리 후 무단 방류되어 인근의 수계로 그대로 유입되고 있는 실정이다[3]. 이로 인해 인근 소하천은 수질오염을 초래하고 상수원 및 농업용수를 오염시킬 뿐만 아니라 악취 및 해충 피해 등을 유발하여 쾌적한 생활환경을 위협하는 요인이 되고 있다[4]. 이에 단독정화조의 처리효율 향상과 단점을 보완하기 위한 합병정화조가 개발·보급되었으나, 이들 합병정화조 또한 대부분 시설을 위탁관리 하기 때문에 관리비용이 과다하게 소요되고, 전문인력이 항상 필요하며, 악취 발생과 슬러지 처리의 2차 오염원을 발생시키는 등 여러 가지 문제점이 지적되고 있다[2].

따라서 농촌 전원독립가구 등에서 배출되는 소형 하수처리를 위한 하수처리장은 현행 단독정화조 및 합병정화조에 비해 처리효율이 매우 높고, 유지관리비와 에너지 소비가 없으며, 운전이 용이해야 할 것이다. 또한 이러한 가정용 하수처리장은 규모가 작고 간편하게 설치 할 수 있어야 할 뿐만 아니라 주변 경관과 잘 어울려야 할 것이다. 특히, 2008년부터 전 수역에 강화될 방류수 수질기준[5] (T-N: 20 mg L^{-1} 및 T-P: 2 mg L^{-1})이 적용되면 이들 방류수 수질기준을 만족하기 위한 가정용 하수처리장의 개발이 절실히 필요할 것으로 판단된다[4,6].

이에 본 연구자들은 이러한 정화조의 문제점을 해결하고 새로운 가정용 하수처리장의 필요성을 모두 만족할 수 있는 공법을 개발하기 위해 수생식물, 여재 및 미생물을 이용한 인공습지 하수처리장을 개발하였다[7]. 하지만 본 자연정화공법에 의한 가정용 소형 하수처리장을 단독주택에 보급하기 위해서는 설계 및 시공시 규격화된 설계 지침이 필요하며, 이를 위해서는 전원독립가구 하수처리장에서 하수 중 오염물질의 존재형태별로 정확한 거동을 파악해야하고, 각 오염물질의 분해속도를 정확히 파악해야 할 것이다.

따라서 본 연구는 오염물질 (유기물, 질소 및 인)의 처리효율 극대화를 위한 기초자료 확보와 하수처리장의 설계 및 시공시 부지면적 감소방안을 확보하기 위해 본 연구팀에 의해 개발되어 설치된 실제 농촌 전원독립가구 하수처리장에서 하수 중 오염물질의 존재형태별 거동과 오염물질의 분해속도를 조사하였다.

재료 및 방법

공시재료

본 연구의 현장 하수처리장에 사용된 공시 하수는 경남 진주시 대평면에 소재하는 전원독립가구에서 배출되는 생활하수를 사용하였으며, 공시 여재는 여재채취장에서 채취한 여재를 사용하였다. 공시 하수의 특성은 Table 1과 같고, 여재의 이화학적 특성은 Table 2에서 보는 바와 같다. 현장 하수처리장에 사용한 여재는 본 연구자들의 선행연구를 통해 최적여재로 조사된 혼합여재 (왕사 : 쇄석 = 1 : 1)를 사용하였다[8]. 본 실험에 사용된 여재의 공극률은 33.5%이었고, 비중은 1.53 g cm^{-3}이었다. 여재의 유효입경 (d_{10})은 1.3 mm이었고, 균등계수 (d_{60}/d_{10})는 2.31로서 하수투수에 적합한 것으로 판단되었다. 일반적으로 인공습지에서의 하수투수에 적합한 균등 계수는 5보다 작아야 되는 것으로 알려져 있다[9]. 본 현장 하수처리장에 이식한 수생식물은 갈대, 노랑꽃창포 및 골풀 등 3종으로 모두 식물원에서 생육한 것을 구입한 후 이식하였고, 호기성조에는 갈대를 이식하였으며, 혐기성조에는 노랑꽃창포와 골풀을 각각 이식하였다.

농촌 전원독립가구 하수처리장 설계 및 시공

본 연구에 사용된 농촌 전원독립가구 하수처리장은 호기성조 (수직흐름; 수생식물), 무산소조 (수평흐름) 및 혐기성조 (수평흐름; 수생식물)로 구성된 호기-무산소-혐기 조합형으로 설계 및 시공하였다(Fig. 1). 호기성조, 무산소조 및 혐기성조의 명칭은 각조의 하수처리 특성을 고려하여 명명하였다. 호기성조의 크기는 가로 2.0 m × 세로 2.0 m × 높이 0.9 m로서 용량이 3.6 m^3되게 제작하였고, 그 상부에 수생식물을 이식하였으며, 하수의 흐름을 수직흐름으로 하였다. 무산소조

Table 1. Chemical characteristics of the domestic sewage used

pH	EC	DO	BOD	COD	SS	T-N	T-P
	(dS m^{-1})	---------- (mg L^{-1}) ----------					
7.2 ± 0.25	0.63 ± 0.07	0.28 ± 0.08	152 ± 29	82.6 ± 3.6	117 ± 12.5	65.9 ± 6.6	5.64 ± 1.23

* Data represent mean ± standard deviation (n=48).

Table 2. Chemical characteristics of mixed filter media used

pH	EC	O.M.	T-N	T-P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn
(1:5H_2O)	(dS m^{-1})	(%)	---------- (mg kg^{-1}) ----------									
8.1	0.04	0.92	24.3	82.2	1,022	3,266	1,313	231	2041	10.1	4.57	10.0

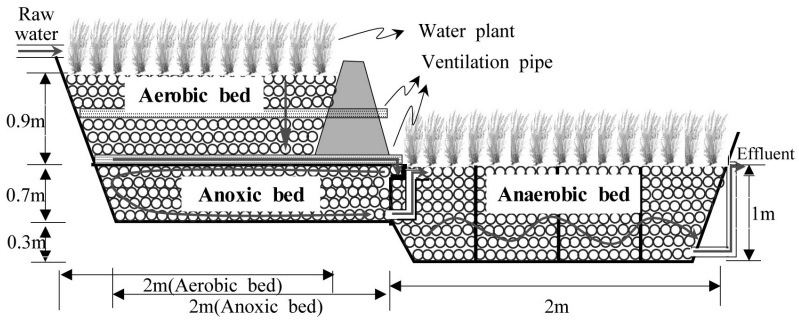

Fig. 1. Schematic diagrams of small-scale sewage treatment plant with aerobic-anoxic-anaerobic beds condition.

크기는 가로 2.0 m × 세로 2.0 m × 높이 0.7 m로서 용량이 2.8 m^3되게 제작하였으며, 산소를 완전히 차단하기 위해 Fig. 1과 같이 호기성조 하부에 설치하였고, 하수의 흐름을 수평흐름으로 하였다. 혐기성조의 크기는 가로 2.0 m × 세로 2.0 m × 높이 1.0 m로서 용량이 4.0 m^3되게 하였고, 그 상부에 수생식물을 이식하였으며 하수의 흐름을 수평흐름으로 하였다.

호기-무산소-혐기 조합형 하수처리장에서 하수의 흐름은 하수원수를 호기성조에 유입시켜 수직여과방식으로 처리한 후 유출된 호기성조 처리수는 자연유하식으로 무산소조로 유입되게 하였다. 이들 무산소조로 유입된 호기성조 처리수는 무산소조에서 수평여과방식으로 흘러서 혐기성조로 유입되게 하였다. 이들 무산소조 처리수는 다시 혐기성조로 유입되어 수평여과방식으로 흘러 최종 방류되게 하였다. 본 처리장에서 처리된 처리수는 구분을 위해 호기성조를 통과한 하수를 호기성조 처리수로 하였고, 무산소조를 통과한 하수를 무산소조 처리수로 하였으며, 무산소조를 거쳐 혐기성조를 통과한 하수를 방류수로 하였다.

현장하수처리장 운전조건 및 조사시기

호기-무산소-혐기 조합형 현장하수처리장에서 하수 부하량은 300 ± 100 L m^{-2} day^{-1}이었고, 하수는 농촌 전원독립가구에서 배출되는 즉시 하수를 본 하수처리장으로 유입되게 운전하였다. 하수처리장 운전기간 중의 계절별 평균기온은 봄이 12.3℃, 여름이 24.6℃, 가을이 15.8℃ 및 겨울이 1.8℃이었고, 연평균기온은 13.6℃이었다. 그리고 계절별 상대습도는 봄이 62.7%, 여름이 79.2%, 가을이 70.8% 및 겨울이 61.5%이었고, 연평균 상대습도는 68.6%이었다.

농촌 전원독립가구 하수처리장에서 존재형태별 오염물질 거동조사는 2006년 1월부터 2006년 12월까지 유입수, 호기성조 처리수, 무산소조 처리수 및 방류수로 구분하여 조사하였고, 시료 채취는 1년 동안 매주 1회씩 분석하였으며, 분석한 결과를 평균하여 오염물질의 존재형태별 거동을 조사하였다. 그리고 존재형태별 오염물질의 분해속도는 2006년 6월부터 2006년 12월까지 유입된 BODs, CODs, SSs, T-Ns 및 T-Ps의 주입농도 (C_o)에 대한 각조의 체류시간 (HRT)별 처리수 (C)의 농도비율 (C/C_o)을 이용하여 조사하였다. 오염물질의 분해속도 조사를 위한 반응속도 방정식은 $\ln(C/C_o)$ = -Kt의 1차 반응식을 이용하여 조사하였다. 호기성조, 무산소조 및 혐기성조의 하수 체류시간은 각각 0.1, 4.0 및 5.76 day으로 본 하수처리장에서 하수의 총 체류시간은 9.86 day이었다. 분석용 시료는 체류시간 (HRT) 0, 0.05, 0.10, 4.10, 5.02, 7.94 및 9.86 day에서 각각 채취하였다.

분석방법

수질분석은 수질오염공정시험방법과 APHA의 Standard method에 준하여 실시하였다[10,11]. pH는 초자전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany)로 분석하였으며, DO 및 BOD는 윙클러아자이드화나트륨 변법, COD는 산성 $KMnO_4$법, SS는 유리섬유여과법, T-N은 자외선 흡광광도법, T-P는 아스코르빈산 환원법으로 분석하였다. 하수 중 오염물질의 존재형태 변화는 하수 중 TBOD (Total BOD) 및 TCOD (Total COD)의 존재형태는 각각 유리섬유 여지 (GF/C)에 하수를 흡인 여과시켜 여액을 SBOD (Soluble BOD) 및 SCOD (Soluble COD)로 하고, GF/C에 여과시켜 여과지를 통과하지 못한 것을 IBOD (Insoluble BOD) 및 ICOD (Insoluble COD)로 구분하였다. 하수 중 TSS (Total Suspended Solid)의 존재형태는 하수를 회화시켰을 때 타서 휘발되어 감량되는 부분인 VSS (Volatile Suspended Solid)와 잔류하는 부분인 FSS (Fixed Suspended Solid)로 구분하였고, T-N과 T-P의 존재형태는 GF/C에 여과시켜 여과지를 통과한 여액을 DTN (Dissolved T-N) 및 DTP (Dissolved T-P)로 하고, GF/C에 여과시켜 여과지를 통과하지 못한 것을 STN (Suspended T-N) 및 STP (Suspended T-P)로 구분하여 각각 조사하였다.

결과 및 고찰

하수 중 오염물질의 존재형태별 거동

하수 중 오염물질의 존재형태별 거동을 조사한 결과는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 하수원수의 TBOD는 152 mg L^{-1}이었고, 그 중 79%가 IBOD이었다. 호기성조 처리수 중의 TBOD는 7.1 mg L^{-1}로 TBOD의 95.3%가 호기성조에서 처리되었으며, BOD 존재형태별 감소폭은 SBOD가 29.7 mg L^{-1} 및 IBOD가 115.2 mg L^{-1}이었다. 무산소조 처리수 및 방류

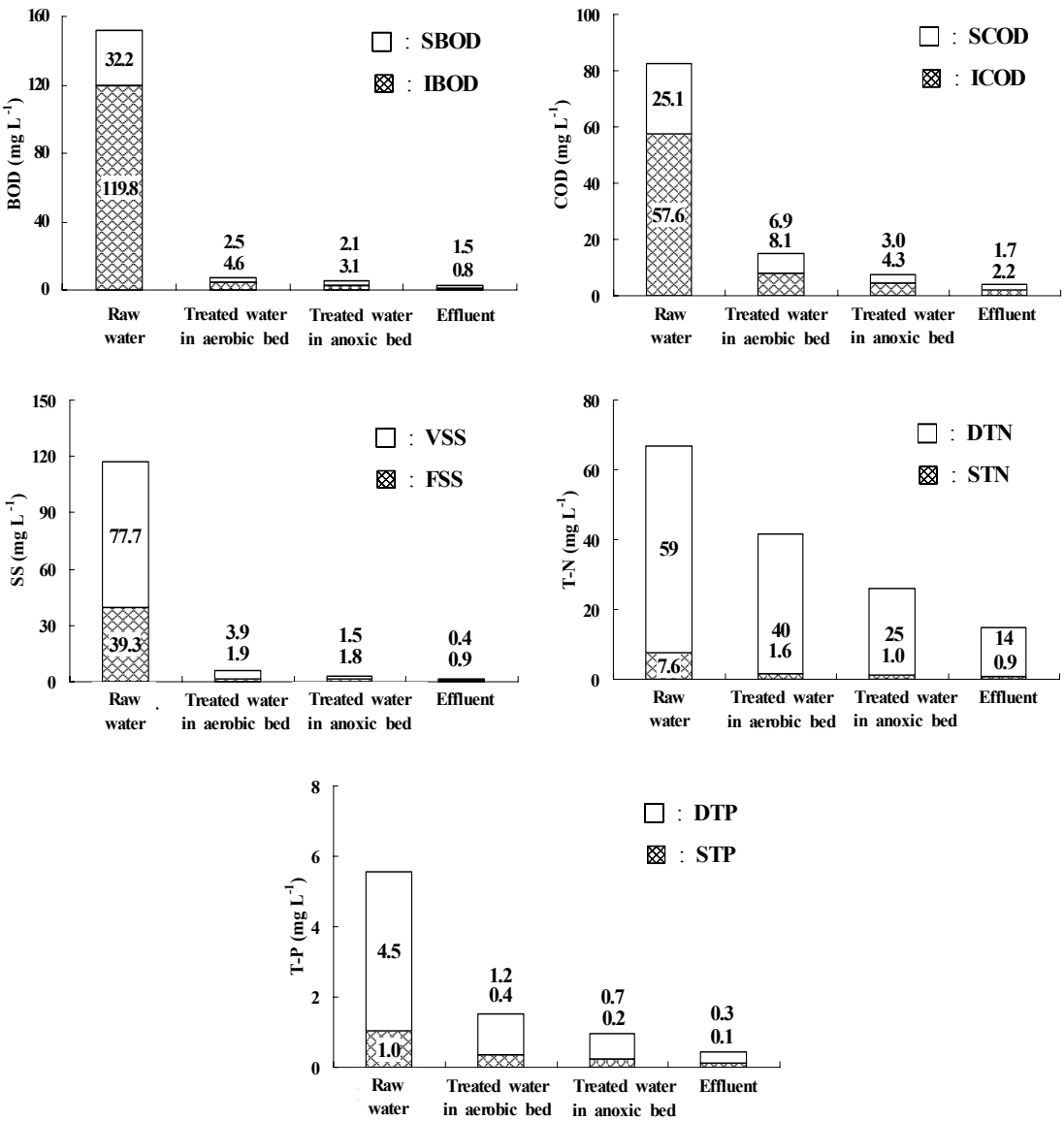

Fig. 2. Behavior of pollutants on various forms from domestic sewage in small-scale sewage treatment plant.

수 중의 BOD는 호기성조에서 처리된 이후부터 미미하게 감소하였고, 존재형태별에 따라서도 별 차이가 없었다. 특히, 방류수 중 TBOD는 2.3 mg L^{-1} 정도로 그 중 SBOD가 1.5 mg L^{-1} 및 IBOD가 0.8 mg L^{-1}정도로 매우 높은 BOD 처리 효율을 보였다. 따라서 농촌 전원독립가구 하수처리장의 BOD 존재형태별 거동은 호기성조의 경우 IBOD가 SBOD에 비해 감소폭이 매우 컸으며, 무산소조와 혐기성조의 경우 IBOD와 SBOD가 큰 차이 없었다. 1차 호기성조에서 대부분의 BOD가 처리되는 것은 본 하수처리장의 호기성조에서는 이중통기관과 수생식물에 의해 풍부한 산소가 공급되기 때문인 것으로 사료된다. 일반적으로 자연정화공법을 이용한 하수처리장에 있어서 BOD 제거는 수생식물 뿌리부 주위의 미생물에 의해 주로 여재의 표층에서 분해되는데, 이는 수생식물 뿌리 주위에 반응기질과 산소가 풍부하여 박테리아의 생장과 활력이 가장 좋기 때문이다[12]. 특히 호기성조에서 제거되는 BOD의 대부분이 IBOD인 것은 본 하수처리장은 여재로 채워져 있어서 유입된 하수 중 IBOD 형태의 유기물이 표층에 쉽게 흡착 및 여과되기 때문으로 사료된다.

하수원수의 TCOD는 82.7 mg L^{-1}이었고, 그 중 SCOD가 57.6 mg L^{-1}로서 69.7%를 차지하였다. COD는 BOD와 존재형태별 경향이 유사하였으며, 호기성조, 무산소조 및 혐기성조에서 각각 76.0, 91.2 및 95.3%의 TCOD가 처리되었고, 특히, 호기성조에서 처리된 대부분의 COD는 ICOD이었다. 하지만 호기성조에서의 COD 처리효율은 BOD 처리효율에 비해 약간 적었는데, 이는 COD의 경우 생물학적으로 분해가 불가능한 COD (Non-biodegradable COD; NBDCOD)

가 포함되어 있기 때문으로 사료된다.

하수원수의 TSS의 함량은 117.0 mg L^{-1}정도로 그 중 VSS의 함량이 77.7 mg L^{-1}이었고, FSS의 함량이 39.3 mg L^{-1}정도로 유입되는 대부분의 하수는 VSS 형태이었다. 호기성조 처리수의 TSS 함량은 5.8 mg L^{-1}로 호기성조에서 TSS의 93%가 처리되었으며, 이들 TSS 중 67%가 VSS이었다. 무산소조 처리수 및 방류수의 TSS 함량은 각각 3.3 및 1.3 mg L^{-1}이었고, 존재형태에 따라 별 차이 없었다. 일반적으로 인공습지에 의한 SS의 처리는 주로 여과기능에 의해 이루어지는데, 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 부유물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 고형물질 중에서 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수 그리고 기타 화학반응 등을 거치면서 궁극적으로 처리되게 된다[13].

농촌 전원독립가구 하수처리장에서 하수원수의 T-N 함량은 66.6 mg L^{-1}정도로 그 중 DTN 함량이 88.6%로 대부분을 차지하였다. 호기성조 처리수의 T-N 함량은 41.6 mg L^{-1} 정도로 37.5%가 호기성조에서 처리되었고, 처리된 T-N 중 DTN의 처리농도가 STN의 처리농도에 비해 약간 높았다. 호기성조에서 T-N의 처리효율은 BOD, COD 및 SS와 달리 높지 않았다. 이는 호기성조에서는 탈질보다는 하수원수 중 질소의 대부분인 유기성질소 및 암모니아성질소가 질산성질소로 전환되는 질산화가 주된 화학반응이기 때문이다. 무산소조 처리수의 T-N 처리효율은 호기성조 처리수에서 37.5%가 처리되었으며, 무산소조 처리수의 DTN 및 STN의 함량은 각각 25 및 1.0 mg L^{-1}로 처리되는 대부분의 T-N은 DTN 형태이었다. 방류수의 경우도 무산소조 처리수와 비슷한 경향으로 T-N 처리효율은 무산소조 처리수에서 42.7%가 처리되었으며, DTN 및 STN 함량은 14 및 0.9 mg L^{-1}로 DTN이 대부분 처리되었다. 이와 같이 T-N은 유기물이나 SS와 달리 무산소조와 혐기성조에서 높은 처리효율을 보였는데, 이는 질소의 경우 호기성조에서는 질산화가 일어나며, 무산소조와 혐기성조에서 탈질화가 일어나기 때문이다. 일반적으로 인공습지에서 T-N의 제거는 식물에 의한 흡수보다 질산화와 탈질에 의한 생물학적 처리가 주된 처리과정으로 알려져 있다[5].

하수원수의 T-P 함량은 5.5 mg L^{-1}정도로 그 중 DTP 함량은 4.5 mg L^{-1}, STP 함량은 1.0 mg L^{-1}정도이었다. 유입되는 하수원수 중 T-P는 대부분 DTP 형태이었다. 호기성조 처리수, 무산소조 처리수 및 방류수 중 T-P 함량은 각각 1.6, 0.9 및 0.4 mg L^{-1}로 하수의 체류시간이 증가할수록 처리효율이 꾸준히 증가되는 경향이었다. 이는 본 하수처리장에서 인의 처리는 주로 여재에 의한 흡착/침전이 주된 처리 과정이기 때문이다. 하지만 호기성조 처리수의 경우 DTP의 감소폭이 다른 조에 비해 컸는데, 이는 일반적으로 미생물은 호기성조에서는 인을 흡수하고, 혐기성조에서는 인을 방출하는 특성 때문인 것으로 판단된다. 본 자연정화공법에 의한 인공습지 하수처리장의 방류수 중 인 농도는 현행 T-P의 방류수 수질기준인 8 mg L^{-1}을 만족하면서 안정적으로 처리되고 있었으며, 2008년부터 T-P의 방류수 수질기준이 2 mg L^{-1}로 강화되더라도 안정적으로 처리가 가능할 것으로 판단된다. 일반적으로 인공습지를 이용한 하수처리장에서 인 처리의 주요기능은 미생물의 흡수/분해, 여과와 흡착/침전인데, 인 부하량이 처리조의 용량을 초과할 경우에 누적되었던 인 성분이 세척에 의해 용출되어 오히려 유출수의 농도가 높게 나타날 수 있다[14].

오염물질의 존재형태별 분해속도

현장 하수처리장에서 오염물질의 존재형태별 분해속도를

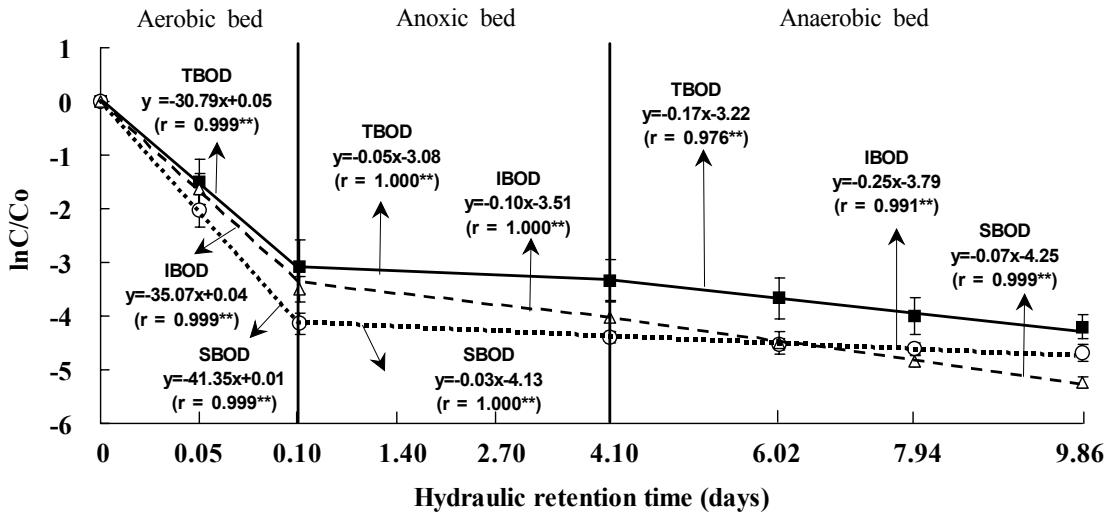

Fig. 3. Decomposition velocity of BODs in the water in small-scale sewage treatment plant. Data represented mean ± standard deviation (error bar). (denote significance at 1% levels).**

조사하기 위해 각 분해속도 직선식의 로그 반응비 ($\ln(C/C_o)$)와 체류시간과의 상관관계를 검토한 결과 모든 오염물질의 존재형태별 직선식은 서로 고도의 유의성이 있는 음(-)의 상관을 보였다(Fig. 3-7). 분해속도 직선식으로부터 분해속도 상수를 조사한 결과는 Table 3에서 보는 바와 같다. TBOD의 분해속도 상수 (K)는 호기성조가 30.79 day^{-1}, 무산소조가 0.05 day^{-1} 및 혐기성조가 0.17 day^{-1}로서 호기성조의 분해속도가 다른 조에 비해 빨랐는데, 이는 본 처리장 호기성조의 이중통풍형 구조에 의해 원활한 산소가 공급됨으로서 호기성 미생물에 의해 유기성 오염물질들이 빨리 분해/이용되었기 때문으로 판단된다. 호기성조에서 존재형태별 BOD의 분해속도 상수 (K)는 SBOD가 41.35 day^{-1} 및 IBOD가 35.07 day^{-1}로서 SBOD가 IBOD에 비해 분해속도가 훨씬 빨랐다. 이는 SBOD형태가 미생물에 의한 분해나 흡수하기 용이한 용존상태이기 때문으로 판단되며, 반면에 IBOD는 비용존성으로 미생물이 이를 즉시 이용할 수가 없고, 일단 여과된 후 이들은 미생물에 의해 서서히 분해된 후 이용되어야 하기 때문이다. 무산소조에서 존재형태별 BOD의 분해속도 상수 (K)는 SBOD가 0.03 day^{-1} 및 IBOD가 0.10 day^{-1}로서 IBOD가 SBOD에 비해 분해속도가 약간 빨랐다. 혐기성조에서 존재형태별 BOD의 분해속도 상수는 SBOD가 0.07 day^{-1} 및 IBOD가 0.25 day^{-1}로서 SBOD가 IBOD에 비해 분해속도가 약간 빨랐다(Fig. 3 및 Table 3). 따라서 존재형태별 BOD의 분해속도는 호기성조에서는 SBOD > IBOD 순이었고, 무산소조와 혐기성조에서는 IBOD > SBOD 순이었다. 또한 TBOD의 분해속도는 호기성조 > 무산소조 > 혐기성조 순이었다.

TCOD의 분해속도 상수 (K)는 호기성조가 17.15 day^{-1}, 무산소조가 0.18 day^{-1} 및 혐기성조가 0.11 day^{-1}로서 TCOD의 분해속도는 호기성조가 무산소조와 혐기성조에 비해 전반적으로 매우 빨랐다. 이는 BOD와 마찬가지로 호기성조의 이중통풍형 구조에 의해 원활한 산소가 공급되었기 때문으로 판단된다. 존재형태별 COD의 분해속도 상수 (K)는 SCOD가 24.89 day^{-1} 및 ICOD가 23.33 day^{-1}로서 존재형태별로 별 차이 없었으며, 무산소조 및 혐기성조에서도 호기성조와 유사한 경향으로 SCOD와 ICOD의 분해속도는 별 차이 없었다(Fig. 4 및 Table 3). 또한 호기성조에서 SCOD의 분해속도는 SBOD와 비교해 볼 때 존재형태별로 분해속도가 약간 느렸는데, 이는 SCOD의 경우 SBOD와 달리 생물학적으로 분해가능한 SCOD와 생물학적으로 분해 불가능한 SCOD로 나눌 수 있고, 이 중 생물학적으로 분해 불가능한 SCOD로 인해 SCOD의 분해속도가 느려지기 때문으로 판단된다.

TSS의 분해속도 상수 (K)는 호기성조가 29.96 day^{-1}, 무산소조가 0.13 day^{-1} 및 혐기성조가 0.19 day^{-1}로서 TSS의 분해속도는 호기성조가 무산소조와 혐기성조에 비해 전반적으로 매우 빨랐다. 이는 본 하수처리장은 하수가 호기성조에서 1차 처리되고, 1차 처리된 하수가 다시 무산소조에서 2차 처리된 후 최종적으로 혐기성조를 거쳐 방류되므로 호기성조에서 우선적으로 대부분의 SS가 여재에 의해 여과되어 처리되기 때문이다. 존재형태별 SS의 분해속도 상수 (K)는 호기

Table 3. Decomposition velocity constant (K) of pollutants on various forms in the water in small-scale sewage treatment plant

(Unit : day^{-1})

Pollutants		Decomposition velocity constant (K)		
		Aerobic bed	Anoxic bed	Anaerobic bed
BOD	TBOD	30.79	0.05	0.17
	SBOD	41.35	0.03	0.07
	I BOD	35.07	0.10	0.25
COD	TCOD	17.15	0.18	0.11
	SCOD	24.89	0.21	0.09
	I COD	23.33	0.16	0.11
SS	TSS	29.96	0.13	0.19
	VSS	35.07	0.27	0.21
	FSS	39.12	0.03	0.11
T-N	T-N	4.78	0.12	0.10
	DTN	8.90	0.09	0.09
	STN	39.12	0.09	0.03
T-P	T-P	13.09	0.12	0.13
	DTP	15.61	0.12	0.13
	STP	27.33	0.10	0.13

성조에서 VSS가 35.07 day^{-1} 및 FSS가 39.12 day^{-1}로서 분해속도는 FSS가 VSS에 비해 약간 빨랐으나 큰 차이는 없었다. 무산소조 및 혐기성조에서의 존재형태별 SS의 분해속도는 전반적으로 VSS와 FSS가 별 차이 없었다(Fig. 5 및 Table 3). 이와 같이 존재형태별 SS의 분해속도가 별 차이 없는 것은 VSS와 FSS는 용존성과 비용존성의 구분이 아닌 회화에 의한 휘산(volatile)과 잔류(fixed) 부유물질로 구분되었기 때문에 이들 형태가 미생물이나 수생식물에 의한 부유물질의 분해속도에 큰 영향을 주지 못하기 때문으로 판단된다.

T-N의 분해속도 상수 (K)는 호기성조가 4.78 day^{-1}, 무산소조가 0.12 day^{-1} 및 혐기성조가 0.10 day^{-1}로서 호기성조가 무산소조 및 혐기성조에 비해 약간 빨랐다. 이들 T-N 분해속도는 호기성조의 질산화 속도와 무산소조 및 혐기성조의 탈질화 속도와 밀접한 연관이 있다. 왜냐하면 본 하수처리장의 호기성조에서는 하수원수 중 대부분인 organic-N 및 NH_4-N이 NO_3-N로 전환되는 질산화가 일어나고, 무산소조와 혐기성조에서는 전환된 NO_3-N이 혐기성 조건에서 N_2O나 N_2로 휘산되는 탈질화가 일어나기 때문이다. 이들 결과를 통해 호기성조의 질산화 속도가 무산소조 및 혐기성조의 탈질속도에 비해 상당히 빠른 것으로 판단된다. 존재형태별 T-N의 분해속도 상수 (K)는 호기성조의 경우 DTN이 8.90 day^{-1} 및 STN이 39.12 day^{-1}로서 분해속도는 STN이 DTN에 비해 매우 빨랐으며, 무산소조 및 혐기성조의 경우 DTN과 STN의 분해속도는 큰 차이 없었다(Fig. 6 및 Table 3). 이는 호기성조의 경우 하수원수 중의 STN이 여재에 의해 쉽게 여과되기 때문으로 판단된다. 이렇게 여과된 STN은 호기성

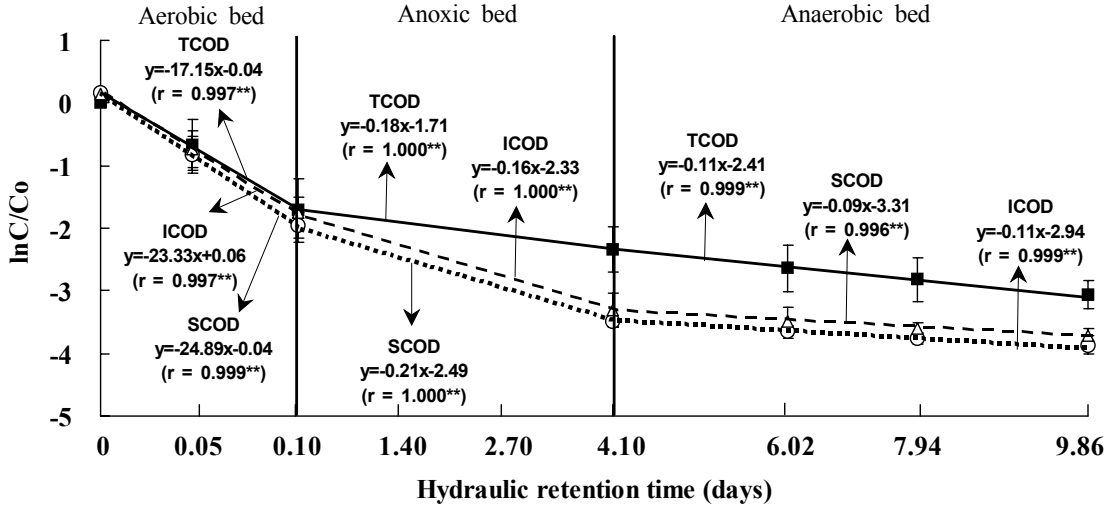

Fig. 4. Decomposition velocity of CODs in the water in small-scale sewage treatment plant. Data represented mean ± standard deviation (error bar). (denote significance at 1% levels).**

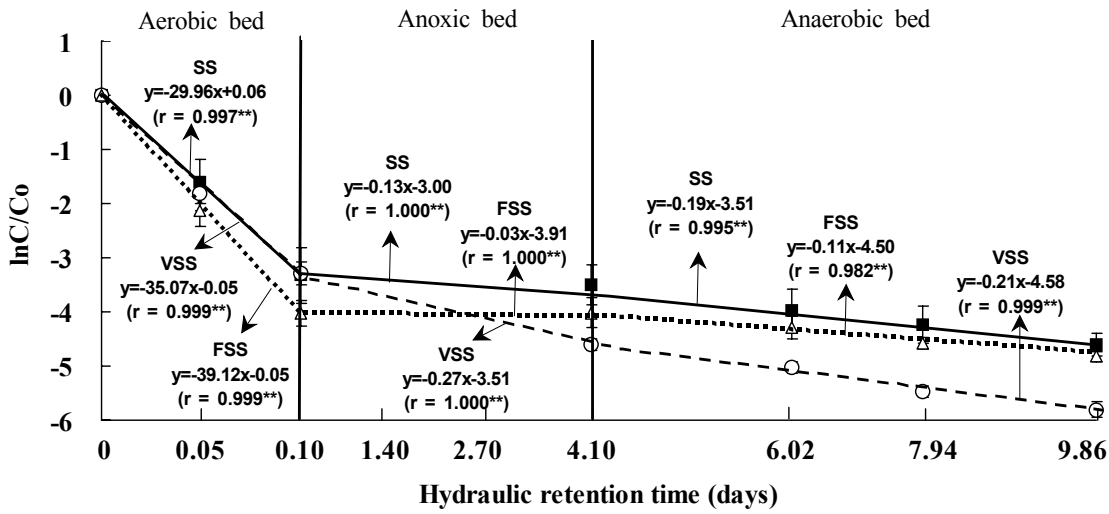

Fig. 5. Decomposition velocity of SSs in the water in small-scale sewage treatment plant. Data represented mean ± standard deviation (error bar). (denote significance at 1% levels).**

미생물에 의해 질산화되거나, 수생식물에 의해 흡수되어 최종처리 되게 된다. 따라서 본 자연정화공법에 의한 하수처리장에서 높은 질소처리효율을 얻기 위해서는 호기성조는 질산화 속도가 빠르므로 체류시간보다 왕성한 질산화 작용을 위한 충분한 산소공급이 중요할 것으로 판단되며, 무산소조 및 혐기성조는 탈질속도가 느리므로 혐기성조건과 하수의 체류시간 조절이 매우 중요할 것으로 판단된다.

T-P의 분해속도 상수 (K)는 호기성조가 13.09 day^{-1}, 무산소조가 0.12 day^{-1} 및 혐기성조가 0.13 day^{-1}로서 호기성조의 분해속도가 무산소조와 혐기성조에 비해 전반적으로 매우 빨랐다. 이는 각 조별에서 흡착이나 침전 등에 의한 T-P 처리농도는 비슷한 반면에 호기성조내에서의 하수 체류시간이 상대적으로 무산소조와 혐기성조에 비해 짧기 때문으로 사료된다. 존재형태별 T-P의 분해속도 상수 (K)는 호기성조의 경우 DTP가 15.61 day^{-1} 및 STP가 27.33 day^{-1}로서 STP가 DTP에 비해 분해속도가 약간 빨랐는데, 이는 STP가 DTP에 비해 호기성조에서 1차적으로 여재에 의해 용이하게 여과된 후 흡착 및 침전에 의해 처리되기 때문인 것으로 판단된다. 무산소조의 존재형태별 T-P의 분해속도는 존재형태에 상관없이 0.10～0.12 day^{-1} 정도 이었고, 혐기성조의 경우도 무산소조와 유사한 경향으로 0.13 day^{-1}정도로 큰 차이가 나지 않았다(Fig. 7 및 Table 3). 이는 본 하수처리장에서 T-P의 주요 처리기작이 여재의 흡착 및 침전이기 때문으로 동일한 여재와 비슷한 체류시간을 가지는 무산소조와 혐기성

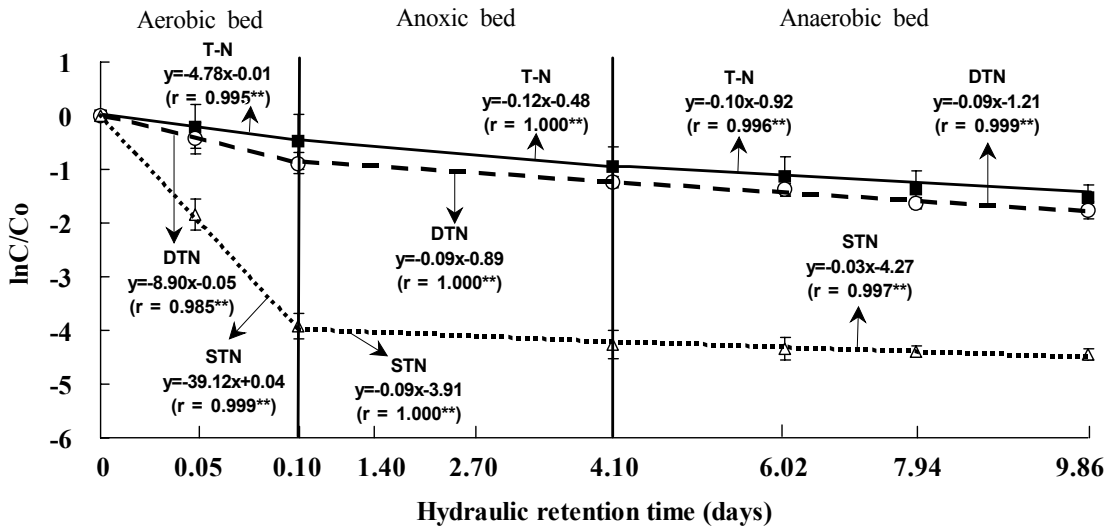

Fig. 6. Decomposition velocity of T-Ns in the water in small-scale sewage treatment plant. Data represented mean ± standard deviation (error bar). (denote significance at 1% levels).**

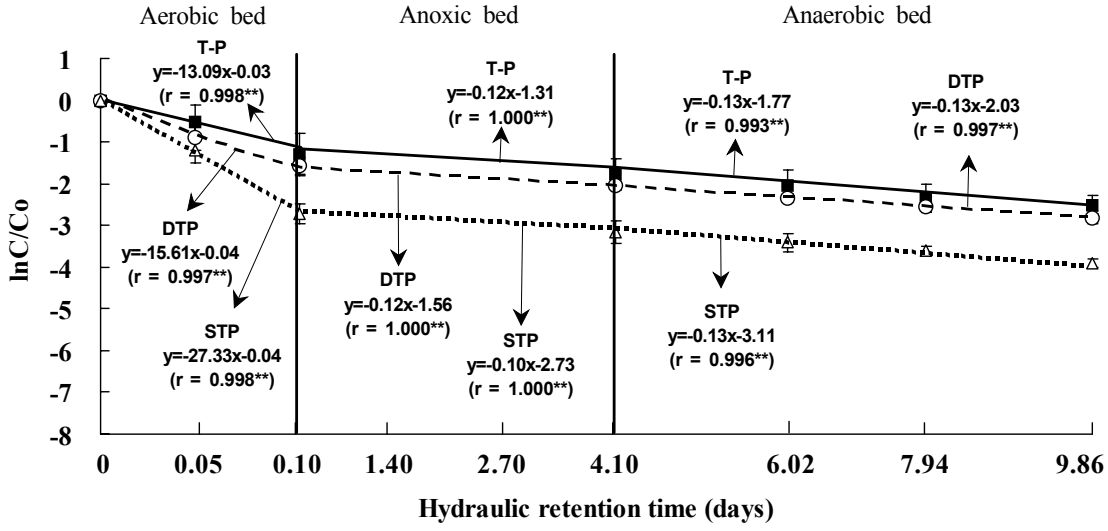

Fig. 7. Decomposition velocity of T-Ps in the water in small-scale sewage treatment plant. Data represented mean ± standard deviation (error bar). (denote significance at 1% levels).**

조는 거의 비슷한 분해속도를 가지는 것으로 판단된다.

요 약

본 연구는 농촌전원독립가구 하수처리장에서 오염물질의 존재형태별 처리 경향을 파악하여 하수처리장의 설계 및 시공 시 부지면적 감소와 오염물질의 처리효율 극대화를 위한 기초자료로 활용하기 위하여 농촌전원독립가구 하수처리장에서 하수 중 오염물질의 거동 특성과 오염물질의 존재형태별 분해속도를 각각 조사하였다. 하수 중 오염물질의 존재형태별 거동을 조사한 결과 BOD 및 COD는 대부분 호기성조에서 처리되었으며, 처리된 BOD와 COD는 대부분 insoluble형태이었다. 그러나 무산소조와 혐기성조에서의 BOD와 COD는 존재형태별로 별 차이 없었다. SS는 대부분 호기성조에서 처리되었으며, 처리된 SS는 대부분 volatile 형태이었다. T-N은 BOD, COD 및 SS와 달리 호기성조에서 처리효율이 높지 않았고, 처리된 대부분의 T-N은 dissolved 형태이었다. T-P는 모든 조에서 일정하게 처리효율이 증가되었으며, 처리된 T-P는 대부분 dissolved 형태이었다. 현장 하수처리장에서 존재형태별 오염물질의 분해속도를 조사한 결과 BOD, COD 및 SS의 분해속도는 호기성조에서 각각 30.79, 17.15 및 29.96 day^{-1}로 무산소조 및 혐기성조에 비해 매우 빨랐으며, 호기성조에서 존재형태별 분해속도는 BOD 및 COD의 경우 insoluble 형태가 빨랐으며, SS의 경우 fixed 형태가 빨랐다. T-N 및 T-P의 분해속도는 호기성조에서 각각 4.78 및 13.09 day^{-1}로 다른 조에 비해 약간 빨랐으며, 호기성조에서 존재형태별 분해속도는 suspended 형태가 약간 빨랐고, 혐기성조와 무산소조에서는 별 차이 없이 비슷하였다. 이상의 결과는 하수처리장의 설계 및 시공 시 부지면적 감소와 오염물질의 처리효율 극대화를 위한 기초자료로 활용 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 농업특정연구개발사업 (과제번호: 20060101033215)의 지원에 의해 이루어진 것임. 또한 이 논문은 2006년 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-214-F00003).

참고문헌

1. Kwun, S. K. and Yoon, C. G. (1999) Performance for a small on-site wastewater treatment system using the absorbent biofilter in rural areas. *Kor. J. Environ. Agric*. 18(4), 310-315.
2. Park, M. R. (2005) Development of sewage treatment apparatus for detached house in agricultural village by natural purification method. Master Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
3. Kim, H. J. (2008) Development of natural purification technology for sewage treatment of a detached house in agricultural village. Master Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
4. Lim, S. C. (2003) Efficiency of sewage treatment by improvement of water treatment system in environmentally friendly constructed wetland. Master Thesis, Gyeongsang National University of Education, Korea.
5. Ministry of Environment (2000) White paper on the environment. Ministry of Environment Republic, Seoul (in Korea), 357-486.
6. Seo, D. C. (2002) Development of sewage treatment apparatus by natural purification method. Master Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
7. Seo, D. C., Park, M. R., Kwak, N. W., Kim, H .J., Cho, J. S., Lee, H. J., Sung S. J., and Heo, J. S. (2006) Development of sewage treatment apparatus for detached house in agricultural village by natural purification method. *Kor. J. Environ. Agric*. 25(3), 202-210.
8. Seo, D. C., Lee, H. J., Cho, J. S., Park, H. G., Kim, H. K. and Heo, J. S. (2003) Selection of optimum pebbles size in sewage treatment plant by natural purification method. *Kor. J. Environ. Agric*. 26(1), 26-35.
9. Seo, D. C., Lee, B. J., Hwang, S. H., Lee, H. J., Cho, J. S., Lee, S. W., Kim, H. C., (2006) Treatment efficiency of existing forms of pollutants in sewage treatment plant by natural purification method. *Kor. J. Environ. Agric*. 25(2), 129-137.
10. APHA, AWWA, WCF (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
11. Ministry of Environment (2000) The standard method of water analysis. Ministry of Environment Republic, Seoul (in Korea).
12. Lee, D. B., Kim, J. G., Kang, J. G., Kim, S. K., So, J. D. and Rhee, K. S. (1994) Purification of animal wastewater using a reed-sand-filter system - I. retention period and seasonal variation. *Kor. J. Environ. Agric*. 13(2), 231-239.
13. Yoon, C. G., Kwun, S. K. and Kwan, T. Y. (1998) Feasibity study of constructed wetland for the wastewater treatment in rural area. *J. KSAE*. 40(3), 83-93.
14. Gerrites, R. G. (1993) Prediction of travel times of phosphate in soils at a disposal site for wastewater. *Water Res*. 27, 263-267.