

## 자연정화공법에 의한 인공습지 하수처리장에서 하수처리 공정개선에 따른 질소 및 인의 처리효율 향상 방안

서동철<sup>1)</sup> · 박우영<sup>2)</sup> · 임종서<sup>2)</sup> · 박찬훈<sup>2)</sup> · 이홍재<sup>3)</sup> · 김홍출<sup>4)</sup> · 이상원<sup>4)</sup> · 이도진<sup>5)</sup> · 조주식<sup>6)\*\*</sup> · 허종수<sup>2,7)\*</sup>

<sup>1)</sup>루이지애나주립대학교 습지생물지구화학연구소, <sup>2)</sup>경상대학교 응용생명과학부, <sup>3)</sup>진주산업대학교 환경공학과,  
<sup>4)</sup>진주산업대학교 미생물공학과, <sup>5)</sup>순천대학교 농업교육과, <sup>6)</sup>순천대학교 생명환경과학부, <sup>7)</sup>경상대학교 농업생명과학원  
(2008년 1월 9일 접수, 2008년 3월 21일 수리)

### A Study on the Improvement of Treatment Efficiency for Nitrogen and Phosphorus by Improved Sewage Treatment Process in Constructed Wetland by Natural Purification Method

Dong-Cheol Seo<sup>1)</sup>, Woo-Young Park<sup>2)</sup>, Jong-Sir Lim<sup>2)</sup>, Chan-Hoon Park<sup>2)</sup>, Hong-Jae Lee<sup>3)</sup>, Hong-Chul Kim<sup>4)</sup>, Sang-Won Lee<sup>4)</sup>, Do-Jin Lee<sup>5)</sup>, Ju-Sik Cho<sup>6)\*\*</sup> and Jong-Soo Heo<sup>2,7)\*</sup> (<sup>1)</sup>Wetland Biogeochemistry Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70802, USA, <sup>2)</sup>Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea, <sup>3)</sup>Department of Environmental Engineering, Jinju National University, Jinju, 660-758, Korea, <sup>4)</sup>Department of Microbiological Engineering, Jinju National University, Jinju, 660-758, Korea, <sup>5)</sup>Department of Agricultural Education, Suncheon National University, Suncheon, 540-742, Korea, <sup>6)</sup>Division of Applied Life and Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon, 540-742, Korea, <sup>7)</sup>Institute of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701)

**ABSTRACT:** To effectively treat the domestic sewage that was produced on a small-scale in farming and fishing village in order to encourage an ecologically friendly environment, a small-scale sewage treatment apparatus using natural purification methods that consisted of an aerobic and an anaerobic plots were constructed. The efficiency of sewage treatment according to the sewage loading was investigated to obtain the optimum sewage loading in small-scale sewage treatment apparatus. Removal rate of pollutants according to the sewage loading were in the order of  $150 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1} \approx 300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1} > 600 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ . Therefore, the optimum sewage loading was  $300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ . Under the optimum sewage loading, removal rate of BOD,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , turbidity, T-N and T-P were 99, 94, 99, 49 and 89%, respectively. However, to satisfy the water quality standard in effluent in small-scale sewage treatment apparatus for domestic sewage treatment, the low removal efficiency of T-N and T-P must be improved. So to improve the removal rate of T-N and T-P, the efficiency of sewage treatment according to the improved sewage treatment process such as, re-treatment at aerobic plot, anaerobic condition of aerobic plot, changing the filter media sizes and the depths in anaerobic plot, and also addition of oyster shells to filter media at anaerobic plot were investigated. In case of 150 cm depth in anaerobic plot with filter medium A (effectivity particle size 1.50 mm) and addition of oyster shells to filter media at anaerobic plot, removal rate of T-N and T-P in both plots were increased by 10 and 3%, and 14 and 7% in comparison with 100 cm depth in anaerobic plot with filter medium B (effectivity particle size 0.95 mm), respectively. The optimum improved sewage treatment process in small-scale sewage treatment apparatus were 150 cm depth in anaerobic plot with filter medium A and addition of oyster shells to filter media at anaerobic plot.

**Key Words:** constructed wetland, sewage treatment, oyster shell, T-N, T-P, anaerobic plot, aerobic plot

\*연락처:

Tel: +82-55-751-5470 Fax: +82-55-757-0178  
E-mail: jsheo@gsnu.ac.kr

서론

\*\*공동연락처:

Tel: +82-61-750-3297 Fax: +82-61-750-3890  
E-mail: chojs@suncheon.ac.kr

세계적으로 환경문제에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 우리나라에서도 환경을 보전해야 한다는 전국민적인 공감

대가 형성되었으나 인구증가 및 산업의 발달로 생활용수 및 공업용수의 수요량은 날로 증가하고 있고 이로 인한 수질 오염이 점차 심화되고 있어 하천수질 보전대책이 절실히 요구되는 실정이다<sup>1,2)</sup>.

생활하수는 수질오염의 주된 원인이며 우리나라 현재인구 약 46,878천명이 배출하는 생활하수 발생량은 1일 약 16,273천톤에 이르고 있다. 현재 도시 지역에서 발생하는 하수는 주로 활성슬러지법을 이용한 기계식 공법으로 하수종말처리장에서 처리되어 하천으로 방류되고 있으나, 농어촌 등에서는 하수관거가 설치되어 있지 않거나 하수처리시설이 설치되어 있지 않아 대부분의 하수가 처리되지 않고 하천이나 바다로 방류되고 있는 실정이다. 농어촌의 소규모로 발생하는 하수는 하수 총 발생량의 약 10%정도이며, 하수 발생량이 1일 50톤 이하인 마을이 약 89%를 차지하고 있다<sup>3)</sup>.

현행 농어촌의 소규모로 발생하는 하수처리를 위한 공법은 도시생활하수의 처리공법인 활성슬러지법, 장기폭기법, 산화구법, 고도합병정화시스템, 토양피복형접촉산화공법, 고효율오수정화법 및 혐기호기접촉순환법 등 20여 종류의 기계식 처리공법들이 보급되고 있으나, 이들 기계식 공법들을 유지관리하기 위해서는 전문기술인력이 필요하고, 시설비 및 전력소비가 과다할 뿐만 아니라 기계고장시 약취가 발생하는 등 여러 가지로 많은 문제점을 안고 있다<sup>4)</sup>.

현재까지 알려져 있는 환경친화형 자연정화공법으로는 토양처리방법, 산화지법, 식물을 이용한 처리법, 습지처리법, 휴경지를 이용한 처리 및 삼림토양침투에 의한 처리 등이 있으나, 이러한 자연정화공법은 하수처리 과정 중 약취가 발생되거나 공극이 폐쇄되어 투수속도가 저하되며 과다한 부지면적이 소요되고, 또한 농어촌 지역의 특성상 오수 유입량의 큰 변동으로 처리효율이 저하되는 등 여러 가지 문제점이 있는 것으로 알려져 있다<sup>4,5)</sup>.

농어촌 지역과 같은 소규모 하수처리시설은 지역 특성에 맞게 하수의 발생지점인 각 가정이나 마을단위로 하수를 처리하는 발생원 처리개념을 도입하고, 하수처리공법을 선정하

기 위해서는 하수처리시설비, 부지면적, 유지관리비 등 경제성과 유지관리의 용이성, 슬러지 처리 및 처분의 간편성, 유입하수량 및 수질변화에 대한 대응성, 고도처리의 가능성 및 증축의 용이성, 동절기 처리효율의 안정성, 처리 기술의 보급 및 발전성 등과 같은 기준을 토대로 선정하도록 해야 할 것이다<sup>5)</sup>.

본 연구는 농어촌 등에서 소규모로 발생하는 하수를 자연정화공법 의한 인공습지에서 효과적으로 처리하기 위하여 소형 하수처리장치를 호기성조 및 혐기성조로 구분하여 시공한 다음, 최적 하수 부하량을 조사하기 위해 하수 부하량별 오염물질의 처리효율을 조사하였다. 그리고 최적 하수 부하량하에서 앞으로 강화될 방류수 수질기준(질소 20 mg L<sup>-1</sup> 및 인 2 mg L<sup>-1</sup>)을 만족시키면서 안정적인 하수처리를 위한 최적 수처리 공정개선 방안을 조사하기 위하여 방류수의 호기성조에의 채처리, 호기성조의 혐기성화, 혐기성조의 깊이와 여제입경 변경 및 여제에 굴패각 혼합유무 등으로 수처리 공정을 개선하여 오염물질의 처리효율을 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 공시재료

소형 하수처리장치에 사용된 공시 하수는 일반 가정에서 배출되는 생활하수였으며, 공시 여재는 경남 사천시 국도골재에서 채취한 여재를 사용하였다. 공시 하수의 이화학적 특성은 Table 1에서 보는 바와 같이 BOD가 평균 278 mg L<sup>-1</sup> 및 T-N이 평균 56.9 mg L<sup>-1</sup>로 일반적인 생활하수의 성상을 나타내었다. 하수 처리장치에 사용한 여재의 이화학적 특성은 Table 2~3과 같이 입경이 다른 여재 A 및 B의 두 종류 여재를 사용하였으며, 사용된 여재의 입경은 본 연구자의 자연정화공법에 의한 하수처리장에서 최적여재 선정 결과에 준하였다<sup>6)</sup>. 여재 A 및 B의 유효입경(d<sub>10</sub>)은 각각 1.5 및 0.95 mm이었으며, 균등계수(d<sub>60</sub> d<sub>10</sub><sup>-1</sup>)는 각각 2.00 및 2.42이었다. 일반적으로 인공습지에 적합한 여재의 균등계수는 5이하

Table 1. Chemical characteristics of the sewage used

BOD	COD <sub>Mn</sub>	Turbidity	T-N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	T-P
.....(mg L <sup>-1</sup> ).....		(NTU)	.....(mg L <sup>-1</sup> ).....				
278±54	133±38	227±74	56.9±18.6	38.2±12.4	0.06±0.01	0.2±0.1	8.7±2.5

Data represent mean ± standard deviation (n=72).

Table 2. Chemical characteristics of the filter media used

Filter media	pH	O.M	T-N	T-P	K	Ca	Mg
	(1:5H <sub>2</sub> O)	(%)	..... (mg kg <sup>-1</sup> ) .....				
Filter medium A	7.9	0.79	8.52	2.06	635	790	215
Filter medium B	7.3	1.31	13.07	2.16	1,251	775	210

\* O.M : Organic Matter.

**Table 3. Physical characteristics of the filter media used. Values for porosity,  $d_{10}$ ,  $d_{60}$  and the uniformity coefficient ( $d_{60}/d_{10}$ ) are mean of triplicate analyses. Values for hydraulic conductivity (Ks) are means±SD (n=3)**

Filter media	Porosity (%)	Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	$d_{10}$ (mm)	$d_{60}$ (mm)	$d_{60}/d_{10}$	Ks (m day <sup>-1</sup> )
Filter medium A	37	1.58	1.50	3.00	2.00	1234
Filter medium B	34	1.59	0.95	2.30	2.42	650

이므로 모든 여재가 이를 만족하였다. 그리고 하수처리장에 이식한 공시 수초는 갈대, 달뿌리풀, 물억새, 샷갯사초, 노랑꽃창포 및 골풀을 (주)한림녹화건설에서 구입하여 이식하였다. 하수처리장에 이식된 수초는 호기성조에는 갈대 및 달뿌리풀을 재식거리 20 cm × 20 cm되게 이식하였으며, 혐기성조에는 물억새, 샷갯사초, 노랑꽃창포 및 골풀을 호기성조와 동일한 재식거리로 이식하였다.

**호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치 설계 및 시공**

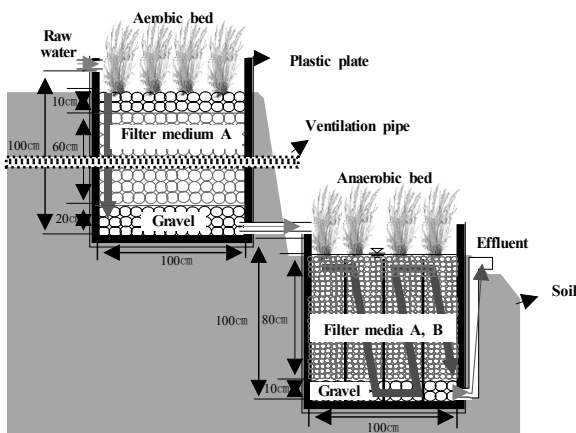
호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치는 Fig. 1과 같이 호기성조와 혐기성조를 연결하여 1개 시스템을 제작하였으며, 호기성조와 혐기성조의 크기는 각각 가로 100 cm × 세로 100 cm × 높이 100 cm로서 용량이 1 m<sup>3</sup> 되게 제작하였다. 하수처리장 호기성조에는 여재 A(유효입경 1.50 mm), 혐기성조에는 여재 B(유효입경 0.95 mm)를 각각 주입하였다. 호기성조에는 통기관을 각조의 바닥과 하부에서 50 cm위치에 설치하여 자연통풍이 되게 하였다. 하수처리장치에서의 하수의 흐름은 호기성조에 하수원수를 유입시켜 수직여과방식으로 하수를 처리하여 유출된 호기성조 처리수는 자연유하식으로 혐기성조로 유입되게 하였다. 혐기성조에 유입된 호기성조 처리수는 수평여과방식으로 처리되도록 하였고, 혐기성조에서 여재와 처리수의 체류시간을 최대화하기 위하여 혐기성조를 4등분하였으며, 4등분된 각 조에서의 하수 흐름은 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

**호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치에서 수처리 공정개선**

호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치에서 질소와 인의 처리효율을 향상시키기 위해 최종 방류수의 호기성조 재처리, 호기성조의 혐기성화, 혐기성조의 깊이와 여재입경 변경 및 여재에 굴폐각 혼합유무로 수처리 공정을 각각 개선하여 수처리 효율을 각각 조사하였다. 최종 방류수의 호기성조 재처리에 따른 수처리 공정개선 방법은 모든 설계조건은 상기 호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치와 동일하나 하수처리장에서 방류되는 300 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 방류수를 호기성조에 10%인 30 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>을 호기성조에 재주입하였다. 호기성조의 혐기성화에 따른 수처리 공정개선 방법은 모든 설계조건은 상기 호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치와 동일하나 호기성조의 이중통기관을 막고 수위를 여재 표면까지 높여서 호기성조를 혐기성화하였다. 혐기성조 깊이 및 여재입경 변경에 따른 수처리 공정개선 방법은 상기 호기-혐기 조합형 소형하수처리장치의 호기성조는 동일하나 혐기성조의 크기를 가로 0.82 m × 세로 0.82 m × 높이 1.5 m로서 여재 깊이를 1.5 m로 제작하되 가로 및 세로의 폭을 줄여 혐기성조 전체 용적은 1 m<sup>3</sup>로 상기 호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치와 동일하게 하였다. 또한 1.5 m 크기의 혐기성조에 주입되는 여재는 여재 A 및 B의 두 종류로 각각 달리 하였다. 여재에 굴폐각 혼합에 따른 수처리 공정개선 방법은 모든 설계조건은 상기 호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치와 동일하나 혐기성조에 주입한 여재 B에 굴폐각을 10% 섞어서 주입하였다. 이때 사용한 굴폐각의 입경은 여재의 입경과 동일하게 하였다.

**운전조건 및 조사시기**

공시 하수를 호기성조 전체 표면에 일정량씩 골고루 자연유하식으로 유입시켰다. 본 소형 하수처리장치에 유입한 하수유입량은 호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치에서 부하량별 수처리 효율조사의 경우 1일 150, 300 및 600 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 하였고, 수처리 공정개선에 따른 수처리 효율조사의 경우 1일 300 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 되게 하였다. 하수처리장치의 운전기간 중의 계절별 평균기온은 봄이 12.9°C, 여름이 25.1°C, 가을이 16.1°C 및 겨울이 1.07°C 이었고, 연평균기온은 13.8°C 이었다. 그리고 계절별 상대습도는 봄이 57.3%, 여름이 75%, 가을이 73% 및 겨울이 57.7%이었고, 연평균 상대습도는 66.3%이었다. 소형 하수처리장치에서 하수처리효율 조사시기는 2000년 9월부터 2001년 9월까지 매달 실시하였으며,



**Fig. 1. Schematic diagram of the sewage treatment apparatus for sewage treatment.**

초기 한달 동안은 하수처리장치를 시운전하였다. 시료의 채취지점은 하수원수, 호기성조 처리수 및 혐기성조 처리수인 방류수로 하였으며, 시료의 채취는 매달 처음 1주부터 3주까지는 1주 1회, 마지막주에는 1주 3회씩 분석하여, 매달 총 6회 분석하였으며, 그 결과를 이용하여 각 조건별 하수처리 효율을 구하였다.

### 분석방법

수질분석은 수질오염공정시험법(2000)과 APHA의 standard methods(1995)에 준하여 다음과 같이 하였다<sup>7,8)</sup>. BOD는 윙클러이저드화나트륨 변법, COD<sub>Mn</sub>은 산성 KMnO<sub>4</sub>법, Turbidity는 Portable turbidimeter(HACH, Model 2100P, USA), T-N은 자외선 흡광도법, NH<sub>4</sub>-N은 인도페놀법, NO<sub>2</sub>-N은 디아조화법, NO<sub>3</sub>-N은 부루신법 및 T-P는 아스코르빈산 환원법으로 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### 호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치에서 부하량별 수처리 효율

BOD 처리효율(Table 4)을 조사한 결과 하수원수의 BOD는 평균 278 mg L<sup>-1</sup>이었고, 호기성조 처리수의 BOD는 하수 부하량 300 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>까지의 경우 12.9~14.2 mg L<sup>-1</sup>로 하수 부하량에 따라 별 차이 없었으나, 하수 부하량 600 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 경우 16.7 mg L<sup>-1</sup>로 BOD 처리효율이 약간 감소하였다. 하지만 방류수의 BOD 처리효율은 하수 부하량에 따라 별 차이 없이 모든 부하량에서 98%이상 처리되어 방류수중의 BOD는 4.1~5.7 mg L<sup>-1</sup>정도로서 현행 방류수 수질기준<sup>9)</sup>인 20 mg L<sup>-1</sup>에 비하여 매우 낮은 수준이었다. 또한 앞으로 방류수 수질기준<sup>9)</sup>이 10 mg L<sup>-1</sup>로 강화된다고 하더라도 별 문제가 없을 정도로 매우 잘 처리되었다. 일반적으로 자연정화공법을 이용한 인공습지 하수처리장에 있어서 BOD의 감소는 호기성조 여체의 표층에서 주로 분해되는데 이는 이층에 반응기질과 산소가 풍부하여 박테리아의 성장과 활력이 가장 좋기 때문이다<sup>4,6)</sup>. 본 소형 하수처리장치는 이중통기관관의 자연통풍과 수초에 의한 뿌리주위의 산소공급으로 인해 호기성조 전체에서 미생물에 충분한 산소를 공급함으로써 타 공법에 비해 BOD 처리효율이 높은 것으로 사료되었다.

COD<sub>Mn</sub> 처리효율(Table 4)을 조사한 결과 하수원수의 COD<sub>Mn</sub>는 평균 133 mg L<sup>-1</sup>이였으며, 호기성조 처리수의 COD<sub>Mn</sub> 처리율은 BOD와 유사한 경향으로 하수 부하량 300 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>까지의 경우 86.5~87.0%로 안정적으로 처리되었으나, 하수 부하량 600 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 경우 COD<sub>Mn</sub> 처리효율이 82.2%로 약간 감소하였다. 또한 방류수의 COD<sub>Mn</sub> 처리효율은 전반적으로 호기성조 처리수에 비해 더욱 더 높아졌으며, 모든 조건에서 91%이상 처리되어 방류수중의 COD<sub>Mn</sub>는 7.7~11.7 mg L<sup>-1</sup>정도로서 현행 방류수 수질기준<sup>9)</sup>인

40 mg L<sup>-1</sup>을 만족하면서 매우 안정적으로 처리되었다. 그리고 호기성조에서 COD<sub>Mn</sub> 처리효율은 전반적으로 BOD 처리효율에 비해 약간 낮았는데, 이는 COD에는 화학적으로는 안정하여 잘 분해되지 않으면서 미생물에 의해서 잘 분해되는 유기물이 함유되었기 때문으로 판단된다. 하지만 방류수중의 COD 처리효율은 혐기성조의 긴 체류시간으로 인해 BOD 처리효율과 큰 차이가 없었다.

탁도 처리효율(Table 4)을 조사한 결과 하수원수의 탁도는 평균 227 mg L<sup>-1</sup>이였으며, 하수 부하량에 따른 호기성조 처리수의 탁도 처리효율은 모든 조건에서 95.6%이상이었다. 호기성조에서 처리된 후 혐기성조를 통과한 방류수의 탁도 처리효율은 호기성조 처리수에 비해 더욱 더 높아졌으며, 모든 조건에서 99%이상 처리되어 방류수 중의 탁도는 약 0.9~1.0 mg L<sup>-1</sup>정도로서 매우 높은 처리효율을 보였다. 일반적으로 자연정화공법에 의한 탁도의 처리는 주로 여과기능에 의해 이루어지는데 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 탁도를 일으키는 현탁물질은 입상상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 현탁입자들은 대개가 무해하지만 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수, 기타 화학반응을 거치면서 궁극적으로 처리된다<sup>4)</sup>.

T-N 처리효율(Table 4)을 조사한 결과 하수원수의 T-N 함량은 평균 57 mg L<sup>-1</sup>정도이였으며, 호기성조 처리수 중의 T-N 처리효율은 27.1~36.9% 정도로 하수 부하량에 따라 큰 차이가 없었다. 호기성조에서 처리된 후 혐기성조를 통과한 방류수 중의 T-N 처리효율은 48.3~50.0% 정도로 모든 부하량에서 호기성조 처리수에 비해 증가되었다. 모든 하수 부하량에서 방류수 중의 T-N 함량은 28.5~29.4 mg L<sup>-1</sup>정도로서 현행 방류수 수질기준<sup>9)</sup>인 60 mg L<sup>-1</sup>의 약 절반수준 이하로 처리되어 안정적으로 처리되었다. Huang 등<sup>10)</sup>이 인공습지에서 생활하수처리에 관한 실험에서 질소의 처리율이 33~45%범위라고 하였고, Lee와 Kim<sup>11)</sup>은 식물을 이용한 오수의 고도처리를 위한 실험에서 T-N 처리효율이 40%라고 하였으나, 본 하수처리공법은 이들 공법에 비해 질소 처리효율이 약 5%정도 높았다. 하지만 앞으로 방류수 수질기준<sup>9)</sup>이 60 mg L<sup>-1</sup>에서 20 mg L<sup>-1</sup>로 강화됨에 따라 보다 안정적인 처리를 위해서 T-N 처리효율을 향상시킬 수 있는 방안이 필요할 것으로 판단된다.

하수원수의 NH<sub>4</sub>-N 및 NO<sub>3</sub>-N 함량은 각각 평균 38.2 및 0.2 mg L<sup>-1</sup>정도로 하수의 대부분은 NH<sub>4</sub>-N 형태이였으며, 호기성조 처리수 중의 NH<sub>4</sub>-N 함량은 6.4~11.7 mg L<sup>-1</sup> 정도로 하수원수에 비해 급격히 감소한 반면에 NO<sub>3</sub>-N 함량은 22.5~24.9 mg L<sup>-1</sup> 정도로 하수원수에 비해 급격히 증가하였다(Table 4). 이와 같은 결과는 호기성조의 바닥과 하부에서 50 cm위치에 설치되어 있는 이중통기관관에 의한 자연통풍이 여체층내의 미생물에게 충분한 산소를 공급함으로써 호기성조내의 질산화 반응이 원활하게 진행되었기 때문으로 사

료된다. 또한 호기성조 처리수 중의  $\text{NH}_4\text{-N}$  함량은 하수 부하량이 증가함에 따라 점점 증가한 반면에  $\text{NO}_3\text{-N}$  함량은 하수부하량이 증가함에 따라 점점 감소하였는데, 이는 하수 부하량 증가가 질산화미생물과 하수의 접촉시간을 감소시켜 질산화율이 감소되었기 때문으로 판단된다. 방류수 중의  $\text{NO}_3\text{-N}$  함량은 호기성조 처리수로부터 급격히 감소하는 경향으로서 이는 혐기성조로 유입된  $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 미생물에 의해 탈질되어  $\text{N}_2$ 나  $\text{N}_2\text{O}$ 로 휘산되었기 때문으로 판단된다. 하지만 혐기성조에서 탈질율은 그다지 높지 않았는데, 이것은 호기성조에서 대부분의 유기물이 제거되어 혐기성조에서 탈질에 필요한 수소공여체가 부족하고, 용존산소의 존재로 인해 탈질시 미생물이  $\text{NO}_3\text{-N}$ 을 적게 소모하기 때문으로 판단된다. 따라서 본 인공습지 하수처리장에서 질소 처리효율을 높이기 위해서는 수처리 공정개선을 통해 혐기성조에서 탈질을 위한 충분한 유기물을 공급하거나, 용존산소를 더욱 감소시킬 수 있는 방안이 필요할 것으로 판단된다.

T-P 처리효율(Table 4)을 조사한 결과 하수원수의 T-P는 평균  $8.70 \text{ mg L}^{-1}$ 이었으며, 하수 부하량별 호기성조 처리수의 T-P 처리효율은 하수 부하량  $300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 까지는 70.1~72.4%이었으나, 하수 부하량  $600 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  이상부터 T-P 처리효율이 57.5%로 약간 감소하였는데, 이는 하수 부하량 증가로 인해 호기성조에서 하수의 조내의 체류시간이 감소하기 때문으로 사료된다. 방류수 중의 T-P 처리효율은 호기성조 처리수에 비해 더욱 더 높아졌으며,

하수 부하량 150, 300 및  $600 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 에서 각각 89.6, 89.2 및 75.8%로 하수 부하량이 증가함에 따라 점점 감소하는 경향으로서 이는 하수 부하량이 증가함에 따라 상대적으로 하수의 조내 체류시간이 점점 감소함으로써 생기는 현상으로 특히 본 하수처리장에서 인의 주요 처리기작인 여체에 의한 인의 흡착 및 침전량이 짧은 체류시간으로 인해 감소하기 때문으로 판단된다. 본 하수처리장에서 방류수 중의 T-P 함량은  $0.9\sim 2.1 \text{ mg L}^{-1}$  정도로서 현행 방류수 수질기준<sup>9)</sup>인  $8 \text{ mg L}^{-1}$ 에 비하여 매우 낮은 수준에 불과하므로 안정적인 처리가 가능하였다. 그러나 앞으로 T-P의 방류수 수질기준<sup>9)</sup>이  $8 \text{ mg L}^{-1}$ 에서  $2 \text{ mg L}^{-1}$ 로 강화됨에 따라 보다 안정적인 인 처리를 위해서는 T-P 처리효율을 향상시켜야 할 것으로 판단된다. Lee와 Kim<sup>11)</sup>은 실험실적 오수처리 실험에서 T-P 처리율이 25~30%라고 하였고, Yoon 등<sup>12)</sup>은 인공습지 하수처리장의 T-P 처리율은 약 63%이었는데, 이에 비하여 본 실험에서의 T-P 처리율은 75.9%이상으로 매우 높게 처리되었다. 자연정화공법을 이용한 하수처리장에서 인 처리의 주요 처리기작은 미생물의 분해, 침전, 여과 및 흡착인데 부하량이 처리조의 용량을 초과할 경우에 누적되었던 인 성분이 세척에 의해서 또는 용출되어 오히려 유출수의 농도가 높게 나타날 수 있다<sup>4)</sup>. 이상의 결과를 미루어 볼 때 본 소형 하수처리장에서 BOD,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , 탁도, T-N 및 T-P를 안정적으로 처리하기 위한 최적 부하량은  $300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이었다.

**Table 4. Removal rate of pollutants in the water according to the sewage loading in a small-scale sewage treatment apparatus**

Items	Sewage loading ( $\text{L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )					
	150		300		600	
	Treated water in aerobic bed	Effluent	Treated water in aerobic bed	Effluent	Treated water in aerobic bed	Effluent
BOD ( $\text{mg L}^{-1}$ )	14.2±1.7 (94.9)	4.4±1.2 (98.4)	12.9±2.2 (95.4)	4.1±0.8 (98.5)	16.7±2.3 (94.0)	5.7±1.0 (97.9)
$\text{COD}_{\text{Mn}}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	18.0±2.5 (86.5)	9.4±1.8 (92.9)	17.3±1.6 (87.0)	7.7±1.4 (94.2)	23.7±2.3 (82.2)	11.7±1.6 (91.2)
Turbidity (NTU)	8.2±0.7 (96.4)	0.9±0.1 (99.6)	8.1±0.5 (96.4)	0.9±0.2 (99.6)	9.9±0.3 (95.6)	1.0±0.4 (99.6)
T-N ( $\text{mg L}^{-1}$ )	35.9±5.8 (36.9)	28.5±2.6 (50.0)	36.9±3.6 (35.1)	28.8±3.8 (49.4)	41.5±6.0 (27.1)	29.4±4.9 (48.3)
$\text{NH}_4\text{-N}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	6.4±2.8	5.5±2.1	7.4±3.0	5.7±2.6	11.7±3.3	9.5±2.4
$\text{NO}_3\text{-N}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	24.9±4.4	18.3±2.9	24.4±5.2	17.7±2.8	22.5±4.8	16.1±3.7
$\text{NO}_2\text{-N}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.3±0.1	0.7±0.3	0.2±0.1	0.8±0.2	0.2±0.1	0.9±0.3
T-P ( $\text{mg L}^{-1}$ )	2.4±0.5 (72.4)	0.90±0.2 (89.6)	2.6±0.7 (70.1)	0.94±0.1 (89.2)	3.7±1.2 (57.5)	2.1±0.7 (75.9)

( ) : Removal rate of pollutants (%).

### 호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치에서 수처리 공정개선에 따른 수처리 효율

호기-혐기 조합형 소형 하수처리장치에서의 최적 부하량인  $300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  조건하에서 질소와 인의 처리효율 향상을 위한 수처리 공정개선에 따른 수처리 효율은 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

방류수의 호기성조 재처리에 따른 방류수 중의 오염물질의 처리효율(Fig. 2a)을 조사한 결과 방류수를 호기성조에 재처리한 조건의 T-N 및 T-P 처리효율이 재처리 하지 않은 조건에 비해 각각 2%씩 높아졌으나, 반면에 BOD 및  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 의 처리효율이 각각 2 및 4%씩 낮아졌다. 따라서 본 하수처리장에서 방류수의 호기성조 재처리로 수처리 공정을 개선한 경우 질소와 인의 처리효율은 약간 향상되었으나, 유기물인 BOD와  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 의 처리효율이 상대적으로 약간 감소되었으므로 이 공정개선 방법은 유기물 처리효율 감소에 대한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

호기성조의 혐기성화에 따른 방류수 중의 오염물질의 처리효율(Fig. 2b)을 조사한 결과 BOD,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , T-N 및 T-P 처리효율은 호기성조의 혐기성화로 인해 전반적으로 감소되는 경향으로 특히 T-N 및 T-P 처리효율은 각각 15 및 20% 정도 낮아졌다. 따라서 호기성조를 혐기성화로 수처리 공정을 개선한 경우 대부분의 오염물질의 처리효율이 감소하여 이 공정개선 방법은 수처리 효율향상을 위해 적합하지 못한 것으로 판단된다.

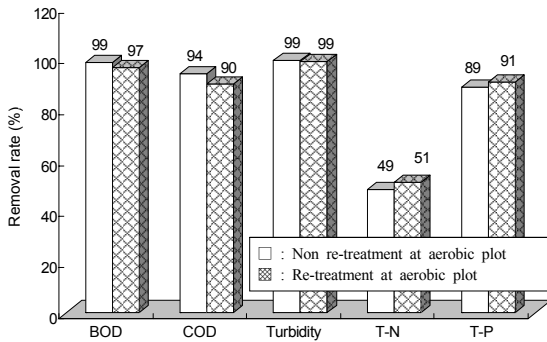
혐기성조의 깊이 및 여재 입경 변경에 따른 방류수 중의 오염물질 처리효율(Fig. 2c)을 조사한 결과 BOD,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  및 탁도의 처리효율은 혐기성조의 깊이 및 여재 입경에 따라 별 차이 없이 각각 98~99, 92~94 및 98~99%로 매우 높은 처리효율을 보였다. T-N의 처리효율은 혐기성조 1.5 m 깊이에서 여재 A(유효입경 1.50 mm) 및 B(유효입경 0.95 mm)를 사용한 경우가 각각 59 및 70%로서 대조구인 혐기성조 1 m 깊이에서 여재 B를 사용한 경우에 비해 각각 10 및 21% 향상되었는데 이와 같은 결과는 혐기성조의 깊이가 1.5 m로 깊어짐에 따라 심층에서 용존산소가 점점 감소되어 혐기성조건이 좋아지고 이로 인해 탈질율이 높아지기 때문으로 사료된다. 탈질율은 용존산소 농도가  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$ 일때는  $0 \text{ mg L}^{-1}$ 일때 보다 약 50% 정도 감소하는 경향이므로<sup>13)</sup> 탈질율을 높이기 위해서는 최대한 혐기성조를 용존산소 농도가 낮은 혐기성조 조건으로 만들어야 할 것이다. T-P의 처리효율은 혐기성조 1.5 m 깊이에서 여재 A 및 B를 사용한 경우가 각각 92 및 93%로서 대조구인 혐기성조 1 m 깊이에서 여재 B를 사용한 경우에 비해 각각 3 및 4% 향상되었다. 이상의 결과로 볼 때 전반적으로 혐기성조 1.5 m 깊이에서 표면적이 넓은 여재 B(유효입경 0.95 mm)가 여재 A(유효입경 1.50 mm)에 비해 높은 오염물질 처리효율을 보였다. 하지만 하수처리장 운전 3개월 후 이들의 투수속도를 조사한 결과 혐기성조 1.5 m 깊이에서 여재 B의 경우 투수속도가  $0.13 \times$

$10^4 \text{ m sec}^{-1}$ 로서 혐기성조 1.5 m 깊이에서 여재 A의  $0.79 \times 10^4 \text{ m sec}^{-1}$ 과 대조구인 혐기성조 1 m 깊이에서 여재 B의  $0.85 \times 10^4 \text{ m sec}^{-1}$ 에 비해 급격히 감소하여 혐기성조 1.5 m 깊이에서 여재 B의 경우 장기간 운영시 공극폐쇄 현상이 생길 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 혐기성조 깊이 및 여재 입경을 이용한 최적 수처리 공정개선 방법은 혐기성조 1.5m 깊이에서 여재 A(유효입경 1.50 mm)로서 하수처리장에서 장기간 사용할 수 있으면서 질소와 인의 처리효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 본 공정개선 방법은 혐기성조의 깊이를 1.5 m로 깊게 하고 표면적으로 줄임으로서 그 동안 인공습지의 문제점이었던 넓은 부지면적을 감소시킬 수 있는 대안으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

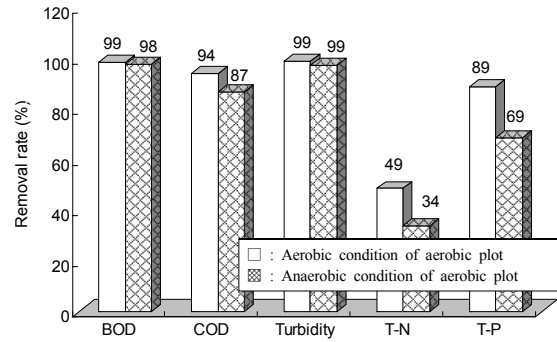
여재에 굴폐각 혼합 유무에 따른 방류수 중의 오염물질의 처리효율(Fig. 2d)을 조사한 결과 BOD,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  및 탁도의 처리효율은 여재에 굴폐각 혼합 유무에 따라 별 차이 없이 각각 97~99, 93~94 및 99%로서 전반적으로 비슷한 경향이였다. 하지만 T-N 및 T-P의 처리효율은 굴폐각을 혼합한 경우 각각 63 및 96%로서 여재에 굴폐각을 주입하지 않은 것에 비해 14 및 7% 향상되었다. 이는 굴폐각의 경우 다공성의 큰 표면적(분말의 표면적이  $5\sim 7 \text{ m}^3 \text{ g}^{-1}$ )으로 인해 흡착에 아주 좋은 특성을 가지고 있어 이들 표면에 미생물들의 활착이나 오염물질(질소 및 인)의 흡착이 용이하기 때문으로 사료된다<sup>14)</sup>. Seo 등(2005)의 보고에 의하면 인공습지에서 굴폐각의 흡착능력은  $833 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 모래나 쇄석 등의 다른 여재에 비해 매우 높은 흡착능력을 보였고, 이들 굴폐각을 사용하면 인공습지에서 인의 포화시기를 연장할 수 있다고 하였다. 특히 본 하수처리장치내의 여재에 굴폐각을 혼합한 조건은 여재에 굴폐각을 혼합하지 않은 조건에 비해 높은 T-P 처리효율을 보였는데 이는 탈인재인 굴폐각에 의한 정석탈인법에 의한 것으로 판단된다. 정석탈인법은 수중의 인을 Ca이온과 반응하여 난용성인 Hydroxyapatite [ $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ ]로 정석 처리하는 방법이다<sup>4)</sup>. 정석탈인법의 반응식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



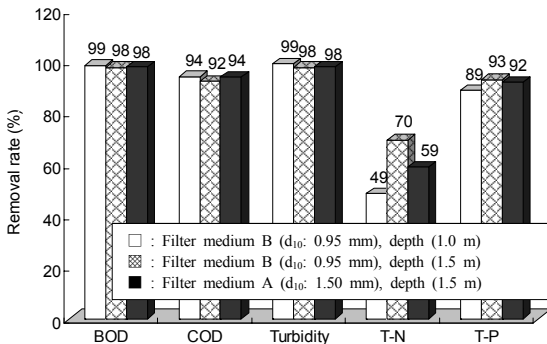
탈인제로 사용된 굴폐각의 주성분은 칼슘으로 37.6% 정도이며 이를  $\text{CaCO}_3$ 로 환산하면 94%가 되어 거의 대부분이 칼슘으로 이루어져 있으므로 이들을 인이 함유된 하수를 일정시간 체류시키면 표면 침전반응을 통하여 하수 중의 인을 처리할 수 있다<sup>4)</sup>. 정석 탈인법의 영향인자는 탈인제 이외에도 pH, Ca 이온농도 및 공존 이온농도 등이 있다. Ferguson과 King<sup>15)</sup>의 연구에 의하면 Hydroxyapatite의 결정화는 pH, Mg 농도, 알칼리도 및 불소에 의해 크게 영향을 받으며, pH가 높으면 결정생성속도가 증가하지만 Mg와 탄산은 결정생성을 방해한다고 보고하였다.



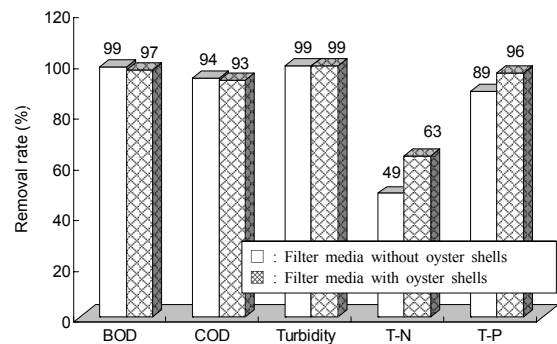
a) Re-treatment at aerobic plot



b) Anaerobic condition of aerobic plot



c) Changing the filter media size and the depth in anaerobic plot



d) Addition of oyster shells to filter media at anaerobic plot

Fig. 2. Removal rate of pollutants in effluent according to the improved sewage treatment process in small-scale sewage treatment apparatus.

### 요 약

농어촌 등에서 소규모로 발생하는 하수를 자연정화공법 의한 인공습지에서 효과적으로 처리하기 위하여 소형 하수처리장치를 혐기성조 및 혐기성조로 구분하여 시공한 다음, 최적 하수 부하량을 조사하기 위해 하수 부하량별 오염물질의 처리효율을 조사한 결과 호기-혐기 조합형 소형 하수처리장에서 전반적으로 하수 부하량이 증가함에 따라 오염물질의 처리효율이 점점 감소하는 경향으로 특히 하수부하량 300 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 이상에서 수처리효율의 감소폭이 약간 컸다. 따라서 본 소형 하수처리장에서 BOD, COD<sub>Mn</sub>, 탁도, T-N 및 T-P를 안정적으로 처리하기 위한 최적 부하량은 300 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 이었고, 이 때의 방류수 중 BOD, COD<sub>Mn</sub>, 탁도, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 99, 94, 99, 49 및 89%로 현행 방류수 수질기준을 만족하면서 안정적으로 처리되었다. 하지만 본 소형 하수처리장에서 방류수 중의 T-N 및 T-P 함량은 각각 28.5~29.4 및 0.9~2.1 mg L<sup>-1</sup> 정도로서 앞으로 질소와 인의 방류수 수질기준이 각각 20 및 2 mg L<sup>-1</sup>로 강화됨에 따라 보다 안정적인 수처리를 위해서는 T-N 및 T-P 처리효율을 향상시켜야 할 것으로 판단된다. 이에 최적 하수 부하량 하에서 질소와 인의 강화될 방류수 수질기준(질소 20 mg L<sup>-1</sup> 및 인 2 mg L<sup>-1</sup>)을 만족시키면서 안정적인 하수처리를 위한

최적의 수처리 공정개선 방안을 조사하였다. 호기-혐기 조합형 소형 하수처리장에서 수처리 공정개선 중 질소 및 인의 처리효율 향상이 가능한 방안은 혐기성조의 깊이 및 여재 입경 변경과 여재에 굴패각을 혼합한 방법이었다. 혐기성조의 깊이 및 여재 입경 변경 조건 중 혐기성조 1.5 m 깊이에서 여재 A(유효입경 1.50 mm)를 사용한 경우 T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 10 및 3% 향상시켰고, 여재에 굴패각 혼합한 경우 T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 14 및 7% 향상시켰다. 또한 동일한 조의 체적하에서 혐기성조의 깊이를 1.5 m로 깊게한 것은 혐기성조 깊이 1 m에 비해 부지면적을 약 33% 정도 감소시킬 수 있을 것으로 판단되며, 또한 굴패각을 사용한 것은 폐기물의 재활용면에서도 매우 효과적인 방안으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2000년도 농림부의 농림기술개발사업과제 “수초 모래 자갈을 이용한 환경친화형 농촌 하수처리 시스템 개발”의 연구결과 중 일부임. 또한 이 연구는 농촌진흥청 농업특정연구개발사업(과제번호: 20060101033215)의 지원에 의해 이루어진 것임.

### 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. Laber, J., Haberl, R. and Shrestha, R. (1999) Two-stage constructed wetlands for treatment hospital wastewater in Nepal. *Wet. Sci. Tech.*, 40(3), 317-324.
3. Ministry of Environment (2000) White paper on the environment. Ministry of Environment Republic, Seoul (in Korea).
4. Seo, D. C. (2002) Development of Sewage Treatment Apparatus by Natural Purification Method. Master Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
5. 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.
6. 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.
7. Ministry of Environment (2000) The standard method of water analysis. Ministry of Environment Republic, Seoul (in Korea).
8. APHA, AWWA, WCF. (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater, 17th Edition. American Public Health Association, Washington, DC.
9. Ministry of Environment (2002) White paper on the environment. Ministry of Environment Republic, Seoul (in Korea).
10. Huang, J., Reneau, Jr. R. B. and Hagedorn, C. (2000) Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater. *Wat. Res.* 34(9), 2582-2588.
11. Lee, Y. D. and Kim, H. H. (1999) A study on the advanced treatment of wastewater by plants. *Journal of the Environmental Sciences* 8(1), 75-81.
12. Yoon, C. G., Kwun, S. K. and Kwan, T. Y. (1998) Feasibility study of constructed wetland for the wastewater treatment in rural area. *J. KSAE.* 40(3), 83-93.
13. Oh, B. K. (1999) A study of the nitrification and denitrification process on the sewage disposal water plants and pebbles. Master Thesis. Korea National University of Education, Korea.
14. Seo, D. C., Cho, J. S., Lee, H. J. and Heo, J. S., (2005) Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland. *Wat. Res.* 39, 2445-2457.
15. Ferguson, J. F. and King, T. (1977) A model for aluminum phosphate precipitation. *J. Water control Pollt. Fed.*, 49(4), 646-658.