

장기 모니터링을 통한 환경친화형 인공습지 하수처리장의 수질정화효율 평가

서동철^{1),†} · 조인성^{2),†} · 임석천²⁾ · 이병주²⁾ · 박성규²⁾ · 천영석²⁾ · 박종환²⁾
이홍재³⁾ · 조주식^{4),**} · 허종수^{2),5),*}

¹⁾루이지애나주립대 해양연안과학과, ²⁾경상대학교 응용생명과학부, ³⁾(재)산청한방약초연구소,
⁴⁾순천대학교 생명환경과학부, ⁵⁾경상대학교 농업생명과학원
(2009년 6월 4일 접수, 2009년 6월 25일 수리)

Evaluation of Pollutant Removal Efficiency in Environmentally Friendly Full-scale Constructed Wetlands for Treating Domestic Sewage during Long-term Monitoring

Dong-Cheol Seo^{1),†}, In-Seong Jo^{2),†}, Seok-Cheon Lim²⁾, Byeong-Ju Lee²⁾, Seong-Kyu Park²⁾, Yeong-Seok Cheon²⁾, Jong-Hwan Park²⁾, Hong-Jae Lee³⁾, Ju-Sik Cho^{4),**}, and Jong-Soo Heo^{2),5),*} (¹⁾Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, 70803, USA, ²⁾Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea, ³⁾Department Sancheong Insitute of Medicinal Herb on Foundation, Jinju, ⁴⁾Division of Applied Life and Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon, 540-742, Korea, ⁵⁾Institute of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea)

ABSTRACT: A constructed wetland which was composed of aerobic and anaerobic areas was evaluated for 3 years to effectively treat the sewage produced in farming and fishing communities. For 3 years in a constructed wetland, biochemical oxygen demand(BOD), chemical oxygen demand(COD), suspended solids(SS), total nitrogen(T-N), and total phosphorus(T-P) in effluent were 0.2~11.8, 1.0~41.9, 1.1~6.5, 4~60 and 0.02~3.51 mg/L, respectively. Removal rate of BOD, COD and SS in effluent were 97, 92 and 99%, respectively, in the third year. As time goes by, removal rate of T-N and T-P in treated water in aerobic area and effluent were gradually increased in a constructed wetland. In the third year, removal rate in effluent were 62 and 73%, respectively. By the seasons, removal rate of BOD, COD, SS, T-N and T-P were 97~98, 87~91, 99, 43~61 and 76~86%, respectively. Removal rate of BOD, COD, SS and T-P were not affected by the seasons, but that of T-N in winter and spring were decreased than the other seasons.

Key Words: constructed wetland, sewage treatment, long-term monitoring, BOD, COD, SS, T-N, T-P

서 론

인구 및 산업활동 증가에 따라 생활하수 배출량과 산업폐수 발생량은 꾸준히 증가하고 있으며 오염물질의 과도한 배

출은 자연의 환경용량을 초과하여 수역의 생태계 균형을 파괴시켜 수질환경의 현저한 악화를 야기 시켰다. 이에 수질보존 및 개선을 위한 대책이 절실히 필요한 실정이다¹⁾.

농어촌에서 발생하는 하수는 과거에는 오염부하가 적어 자연의 자정작용만으로도 충분히 정화될 수 있었으나 근래에는 생활수준의 향상으로 생활하수량이 증가하면서 하수의 오염농도 및 부하량이 자연정화능력을 상회할 정도로 증가하여 이들을 적절히 처리하지 않으면 농어촌지역에 위치한 하천의 수질뿐만 아니라 주변의 농경지에도 악영향을 미치게 된다²⁾.

이러한 농어촌 지역의 하수를 현행 도시지역에서 발생하는

*연락처:

Tel: +82-55-751-5470 Fax: +82-55-757-0178

E-mail: jsheo@gsnu.ac.kr

**공동연락처:

Tel: +82-61-750-3297 Fax: +82-61-750-3890

E-mail: chojs@suncheon.ac.kr

†공동 제1저자

하수처럼 활성슬러지법 등의 기계식 공법으로 처리할 경우 시간과 경제적인 면에서 많은 부담이 된다. 그러므로 농어촌 지역의 소규모로 발생하는 하수처리시설은 농어촌의 특성에 맞게 다양한 부하에 대한 적응능력이 높고, 상대적으로 비용이 낮으며, 에너지의 필요성이 낮고, 유지관리가 쉬워야 한다³⁾.

이에 기계식 처리법의 문제점을 보완하고 농어촌 지역의 특성에 맞는 하수처리 공법으로 자연정화공법이 대두되었으며, 토양처리방법, 산화지 처리법, 식물을 이용한 처리법 및 습지처리법 등이 그 대표적인 방법이다⁴⁾. 그러나 이러한 자연정화공법은 하수처리에 있어서 과도한 부지면적이 소요되며 겨울철 처리효율이 낮아지고 공극폐쇄로 인한 투수속도가 저하되는 등 하수처리장을 안정적으로 장기간 운영하는 것이 가능할지, 그 여부가 아직 확실히 구명되어 있지 않고 있다^{5,6)}. 농어촌 지역에서 소규모로 발생하는 하수처리시설은 하수처리 효율이 높아야 하며, 그 지역의 특성에 맞게 부하변동에 쉽게 적응할 수 있어야 한다. 그리고 유지관리비가 적게 들고, 전문 인력이 없어도 하수처리장이 안정적이며 장기간 운영이 가능하여야 할 것이다¹⁾.

따라서 본 연구는 장기간 모니터링을 통해 농어촌 등에서 소규모로 발생하는 하수를 환경친화형 인공습지 하수처리장에서 효과적으로 처리하기 위하여 인공습지를 호기성조 및 혐기성조로 구분하여 시공한 다음, 3년 동안의 오염물질의 처리효율을 조사하여 시기별, 연차별 및 계절별 수처리 효율을 각각 조사하였다.

재료 및 방법

공시재료

본 인공습지 하수처리장에 사용된 공시 하수는 한국교원

대학교 기숙사에서 배출되는 생활하수였으며, 공시 모래는 하천에서 채취한 모래를 사용하였으며, 공시 하수 및 모래의 이화학적 특성은 각각 Table 1 및 2에서 보는 바와 같다. 하수처리장에 사용한 모래의 입도 분포도는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 입도 0.1 mm이하가 2.0%, 0.1~0.25 mm가 3.1%, 0.25~0.50 mm가 7.9%, 0.50~1.00 mm가 25.0%, 1.00~2.00 mm가 31.0% 및 2.00 mm이상이 31.0%로 모래의 입경이 0.1~2.0 mm가 약 70%정도 되었다. 본 인공습지 하수처리장에 이식한 공시 수초는 물억새, 달뿌리풀, 갈대, 샷갓사초, 줄, 부들 및 노랑꽃창포 등 7종이었다.

하수처리장 설계 및 시공

인공습지 하수처리장은 1999년에 Fig. 2와 같이 호기성조와 혐기성조로 구분하여 설계 및 시공하였다. 호기성조(수직 흐름조)와 혐기성조(수평흐름조)는 각 조의 산화환원 특성을 고려하여 명명하였다. 호기성조는 가로 10 m × 세로 10 m × 높이 1 m로 용량이 100 m³이 되게 하였고, 혐기성조는 가로 10 m × 세로 20 m × 높이 1 m로 용량이 200 m³이 되게 하여 호기성조와 혐기성조의 용적비율을 1 : 2로 시공하였다. 호기성조와 혐기성조 모두 밑바닥과 측면에 차수막을 설치하여 하수의 누수를 방지하였고, 각 조의 바닥으로부터 20 cm까지 하부층에는 자갈을 채우고 그 위에 80 cm깊이로 모래를 채웠다.

공시 수생식물은 모두 식물원에서 구입하였으며, 호기성조에는 물억새, 달뿌리풀, 갈대 및 샷갓사초를 이식하였으며, 혐기성조에는 샷갓사초, 줄, 부들 및 노랑꽃창포를 각각 이식하였다. 본 하수처리장에서 수생식물의 이식은 호기성조와 혐기성조 모두 가로 방향으로는 서로 다른 종류의 수초를 이식하였고, 세로 방향으로는 서로 같은 종류의 수초를 2반복

Table 1. Chemical characteristics of the sewage used

	pH	DO	BOD	COD	SS	T-P	T-N
	----- (mg/L) -----						
Average	7.20	0.20	144	185	266	6.3	50.6
Range	6.05~8.54	0.01~1.50	46~224	34~248	124~395	2.2~14.2	36.0~137.5

Table 2. Physico-chemical characteristics of the sand used

Specific gravity	pH	EC	OM ¹⁾	NH ₄ -N	NO ₂ -N + NO ₃ -N	T-N	T-P
	(1:5 H ₂ O)	(dS/m)	(%)	----- (mg/kg) -----			
2.68	6.3	0.04	0.55	2.31	2.63	44.6	1.89
K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn
----- (mg/kg) -----							
27.1	159	34.2	2.9	56.3	11.9	0.25	0.72

¹⁾Organic matter

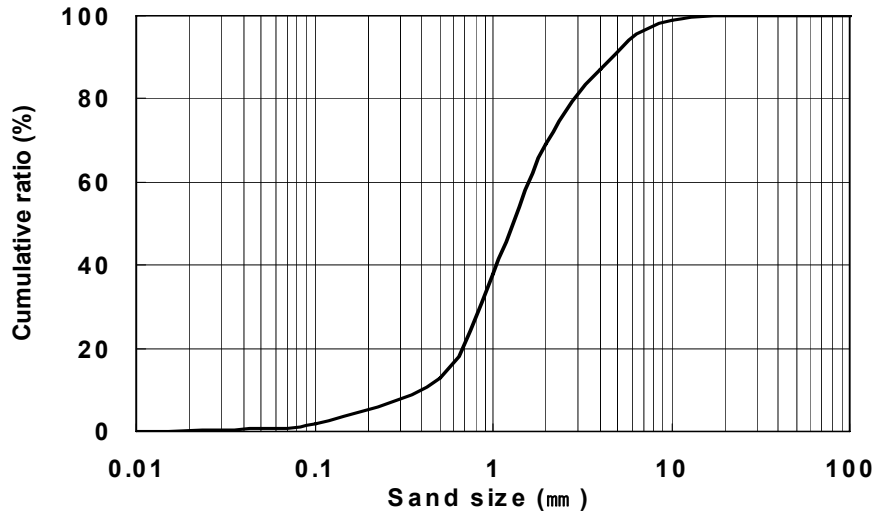


Fig. 1. Particle distributions of the sand used.

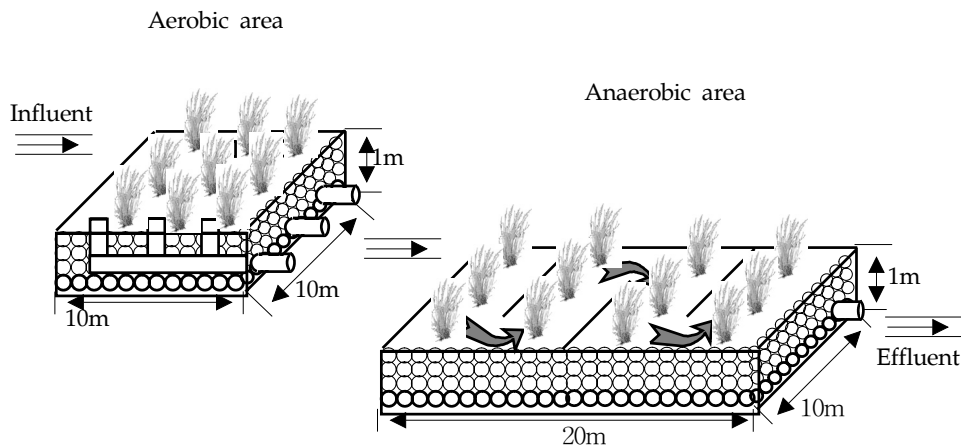


Fig. 2. Diagram of environmentally friendly constructed wetlands for treating sewage.

되게 이식하였다. 그리고 하수처리장에 이식된 수초는 재식 거리를 20 cm × 25 cm되게 이식하였다.

하수처리장 운전조건

공시하수를 호기성조 전체 표면에 일정량씩 골고루 유입 시켰고, 호기성조에서 수직흐름에 의해 처리된 호기성조 처리수는 자연유하식으로 혐기성조에 유입되게 하였다. 혐기성조로 유입된 호기성조 처리수는 수평흐름에 의해 처리되어 최종 방류되게 하였다. 그리고 호기성조의 공극폐쇄현상을 방지하기 위하여 호기성조를 2등분하여 1주일씩 교대로 하수를 유입하였다.

하수처리 시기별 오염물질 처리효율 조사를 위해 본 인공습지 하수처리장에서 시공초기부터 3년 동안 하수원수, 호기성조 처리수 및 방류수의 수질을 각각 조사하였고, 연차별 오염물질 처리효율은 하수처리 시기별 결과를 연차 단위로 구

분하여 각 오염물질의 처리효율을 비교하였다. 계절별 오염물질 처리효율은 하수처리 시기별 결과를 봄은 3, 4, 5월, 여름은 6, 7, 8월, 가을은 9, 10, 11월, 그리고 겨울은 12, 1, 2월로 각각 구분하여 계절별로 오염물질의 처리효율을 평균하여 비교하였다.

하수처리 효율 조사는 하수처리장이 완공된 이후 매달 실시하였으며, 하수원수, 호기성조 처리수 및 방류수로 하여, 첫 1주부터 3주까지는 주 1회씩 3회, 마지막 4주는 매일 1회씩 7회 시료를 채취하여 분석하였고, 그 결과를 평균하여 각 조건에 따른 수처리 효율을 조사하였다.

분석방법

수질분석은 수질오염공정시험법과 APHA의 standard method에 준하여 다음과 같이 하였다^{7,8)}. pH는 초자전극법, 용존산소 및 BOD는 윙클러 아지드화나트륨 변법, COD는

산성 KMnO_4 법, 부유물질은 유리섬유여지법, 총 질소는 자외선 흡광광도법, 총 인은 아스코르빈산 환원법으로 각각 분석하였다.

토양의 화학성분 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원의 토양 및 식물체분석법⁹⁾에 준하여 pH는 초자전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany)로 분석하였으며, 유기물은 Tyurin법으로 하였고, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ 및 T-N은 Kjeldahl법으로 하였으며, T-P는 분해 후 Vanadate molybdate법으로 하였고, K, Ca, Mg, Na 및 중금속 함량은 분해 후 Atomic absorption spectrophotometer (AA-SCAN8)로 각각 분석하였다.

결과 및 고찰

하수처리 시기별 수질변화

하수처리 시기별 하수원수, 호기성조 처리수 및 방류수 중의 BOD는 Fig. 3과 같이 하수원수의 BOD는 46~224 mg/L로서 큰 폭으로 변화하였고, 호기성조 처리수의 BOD는 0.5~24.3 mg/L이었으며, 방류수의 BOD는 0.2~11.8 mg/L이었다. 하수원수의 BOD는 대부분 호기성조에서 처리되었고, 방류수의 BOD는 더욱 낮아져 평균 BOD가 4.6 mg/L로서 현행 BOD 방류수 수질기준¹⁰⁾인 10 mg/L을 만족하였다. 본 인공습지 하수처리장에서 처리되는 BOD 중 대부분은 호기성조에서 처리되었으며, 혐기성조에서는 호기성조에 비해 BOD 처리효율이 약간 낮았다. 이는 대부분의 유기물이 호기성조에서 처리되어 혐기성조에 유입되는 BOD의 농도가 상대적으로 낮았기 때문으로 사료된다. 이들 연구결과는 Seo¹¹⁾의 연구결과와 유사한 경향을 보였다. 일반적으로 인공습지내의 BOD 처리는 부유성 유기물의 토양에 의한 여과 및 흡착, 그리고 하수처리장에 이식한 수초 뿌리 주위에 성장하고 있는 미생물의 분해에 의해 이루어지는 것으로 판단된다¹²⁾.

하수원수의 COD는 34~248 mg/L이었고 호기성조 처

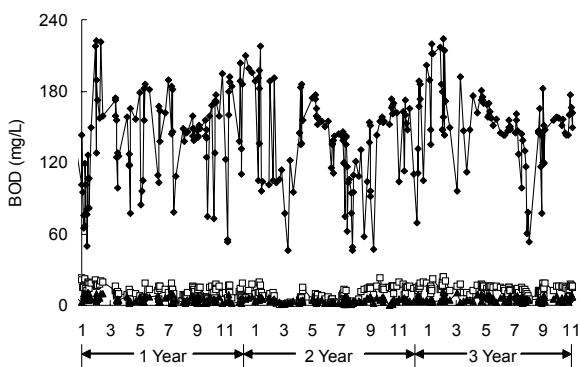


Fig. 3. Variations of BOD in the water in constructed wetlands. (◆ : Raw water, □ : Treated water in aerobic area, ▲ : Effluent).

리수의 COD는 1.4~77.1 mg/L이었으며 방류수중의 COD 농도는 1.0~41.9 mg/L로 나타났다(Fig. 4). 하수원수의 농도 변화량에 관계없이 방류수중의 평균 COD가 13.2 mg/L로서 현행 COD 방류수 수질기준¹⁰⁾인 40 mg/L을 만족하고 있었으며, 특히 하수처리 운전 1년 후부터 방류수 중의 평균 COD는 더욱 낮아져 약 8.2 mg/L로 매우 안정적으로 처리되었다. 이와 같이 하수처리 운전 1년 후부터 COD 처리효율이 점점 증가되는 것은 미생물들이 COD에 함유되어 있는 난분해성 물질 (NBDCOD)에 대해 어느 정도 적응능력을 가지기 시작했기 때문으로 판단된다. 본 하수처리장에서 COD 처리경향은 BOD와 유사하였는데, 이는 유입된 하수가 대부분 생활하수로 미생물에 의해 분해가 용이한 유기물이 대부분이었기 때문인 것으로 판단된다¹³⁾. 본 실험결과는 Seo¹¹⁾의 경상대학교에서 배출되는 오폐수를 대상으로 한 연구와 거의 유사한 처리경향을 보였다.

하수처리 경과시기에 따른 하수원수 중 부유물질의 농도는 124~395 mg/L범위이었고 호기성조 처리수의 부유물질 농도는 10.1~32.0 mg/L범위이었다(Fig. 5). 방류수중의 부

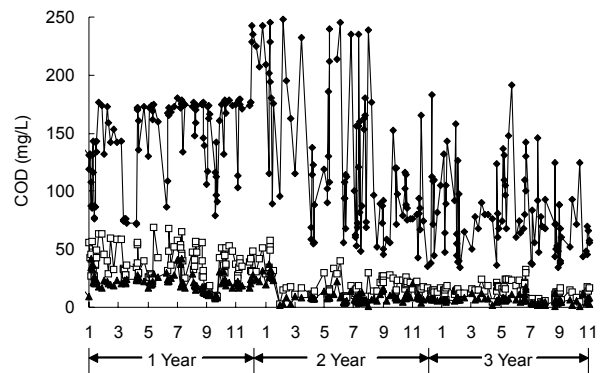


Fig. 4. Variations of COD in the water in constructed wetland. (◆ : Raw water, □ : Treated water in aerobic area, ▲ : Effluent).

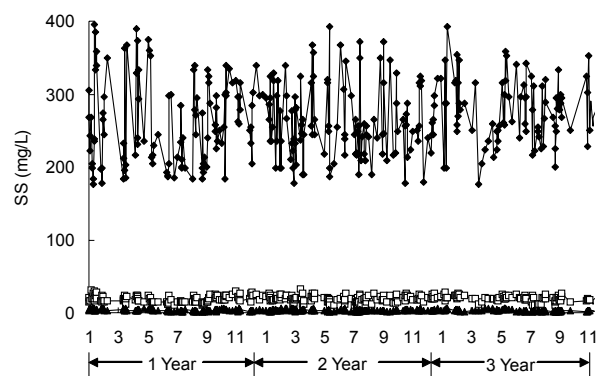


Fig. 5. Variations of SS in the water in constructed wetland. (◆ : Raw water, □ : Treated water in aerobic area, ▲ : Effluent).

유물질 농도는 1.1~6.5 mg/L로 나타나 방류수의 부유물질 농도는 현행 부유물질 방류수 수질기준¹⁰⁾인 10 mg/L을 만족하고 있었으며, 3년 동안 일정한 부유물질 처리효율을 보였다. 본 인공습지 하수처리장에서 부유물질의 처리는 주로 여과기능에 의해 이루어지는데, 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 부유물질은 입자상태로 처리조내에서 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 고형물질 중에서 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수 그리고 기타 화학반응 등을 거치면서 궁극적으로 처리되게 된다¹³⁾.

인공습지 하수처리장에서 유입되는 하수원수의 총 질소 농도는 36~168 mg/L범위로 큰 폭으로 변화하였고, 호기성조 처리수의 총 질소 농도는 9~93 mg/L범위로 하수원수에 비해 감소하였으며, 방류수의 총 질소 농도는 4~60 mg/L범위로 각 조에 유입되는 총 질소 농도에 따라 편차가 심하여 특정시기에는 총 질소 방류수 수질기준¹⁰⁾인 20 mg/L을 초과하였다(Fig. 6). 하지만 하수처리장 시공 후 3년 후에는 총 질소 농도가 약 20 mg/L이하로 거의 안정적으로 처리되었다. 따라서 총 질소의 안정적인 처리를 위해서는 하수처리

장이 빨리 안정화 될 수 있게 유지관리가 필요할 것으로 판단되며, 본 하수처리장에서는 3년 이후부터 질소 처리효율이 안정적으로 유지되는 경향이였다. Seo¹⁴⁾에 의하면 인공습지 하수처리장에서 질소의 안정적인 처리를 위해 초기 시공 후 3년 이상의 안정화기간이 필요하다고 하였는데, 본 연구결과도 이들 경향과 일치하였다.

인공습지 하수처리장에서 질소처리는 식물에 의한 흡수보다 질산화와 탈질화가 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다¹¹⁾. 하수원수의 유기성질소가 호기성조내에서 호기성 미생물에 의한 질산화 작용(nitrification)으로 질산성 질소로 전환되며, 질산성 질소는 혐기성조내에서 혐기성 미생물에 의하여 탈질화 작용(denitrification)이 일어나면서 질소(N₂)와 아산화질소(N₂O)로 전환되어 이들이 대기중으로 이동하여 질소가 처리되는 것으로 알려져 있다¹⁵⁾. 수생식물의 근권도 질소처리에 상당한 역할을 하여, 정수식물은 대기중의 산소를 뿌리로 전달하고 토양에서 발생하는 질소와 아산화질소를 대기중으로 이동시키는 통기조직이 잘 발달되어 있는 것으로 알려져 있다. 산소가 뿌리로 전달되며 뿌리주변에 얽은 호기상태의 근권이 형성된다. 근권에서는 암모니아화와 질산화가 일어나며, 근권을 둘러싸고 있는 혐기상태의 심토층에서는 탈질화로 질소와 아산화질소가 발생하여, 습지식물의 통기조직을 통하여 대기중으로 이동하는 것으로 알려져 있다¹⁵⁾.

본 인공습지 하수처리장에서 하수원수의 총 인 농도는 2.2~14.2 mg/L범위이었고, 호기성조 처리수의 총 인 농도는 0.03~6.36 mg/L범위이었으며, 방류수의 총 인 농도는 0.02~3.51 mg/L범위로 더욱 낮아졌다. 인공습지에서 총 인의 처리는 인산염의 침전, 기질의 흡착, 수생식물에 의한 흡수, 조류와 세균에 의한 흡수 등으로 예상할 수 있다¹⁶⁾. 그 중에서 인공습지 하수처리장에서 인 처리는 미생물에 의한 처리량이 낮고 식물 흡수에 의한 부분적인 처리가 일어나지만 대부분이 여재에 의한 여과, 흡착 및 침전에 의한 처리로 총 인 부하량이 처리조의 용량을 초과할 경우에 누적되었던 인 성분이 용출되어 오히려 유출수의 인 농도가 높게 나타날 수도 있는 것으로 보고되고 있다¹⁵⁾. 따라서 인공습지에서 여재내의 인 포화는 인공습지의 수명을 결정하는 매우 중요한 요인으로 판단되고 있으며, 이러한 이유로 인공습지에서 인 흡착능이 높은 여재의 선발은 인공습지 개발에서 매우 중요한 연구방향이 될 것이다¹¹⁾.

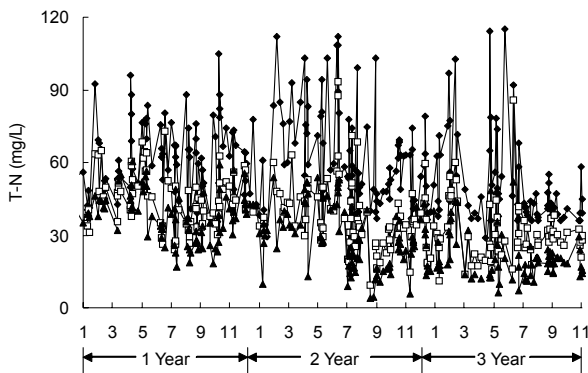


Fig. 6. Variations of T-N in the water in constructed wetlands. (◆ : Raw water, □ : Treated water in aerobic area, ▲ : Effluent).

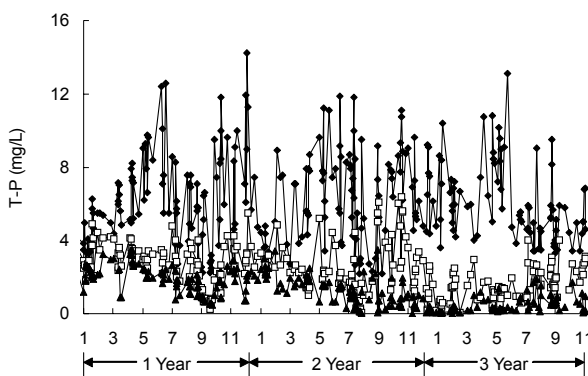


Fig. 7. Variations of T-P in the water in constructed wetland. (◆ : Raw water, □ : Treated water in aerobic area, ▲ : Effluent).

연차별 수처리 효율

하수처리장에서 연차별 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율을 조사한 결과는 Fig. 8에서 보는 바와 같다. BOD 처리효율은 호기성조 처리수의 경우 91%이상 처리되었고, 방류수의 경우 97%이상 처리되었으며, 호기성조 처리수와 방류수 모두에서 연차에 따라 별 차이 없이 높은 처리효율을 보였다. COD 처리효율은 호기성조 처리수의 경우 연차에 따라 별 차이 없이 76~84%정도였고, 방류수의 경우 하수처

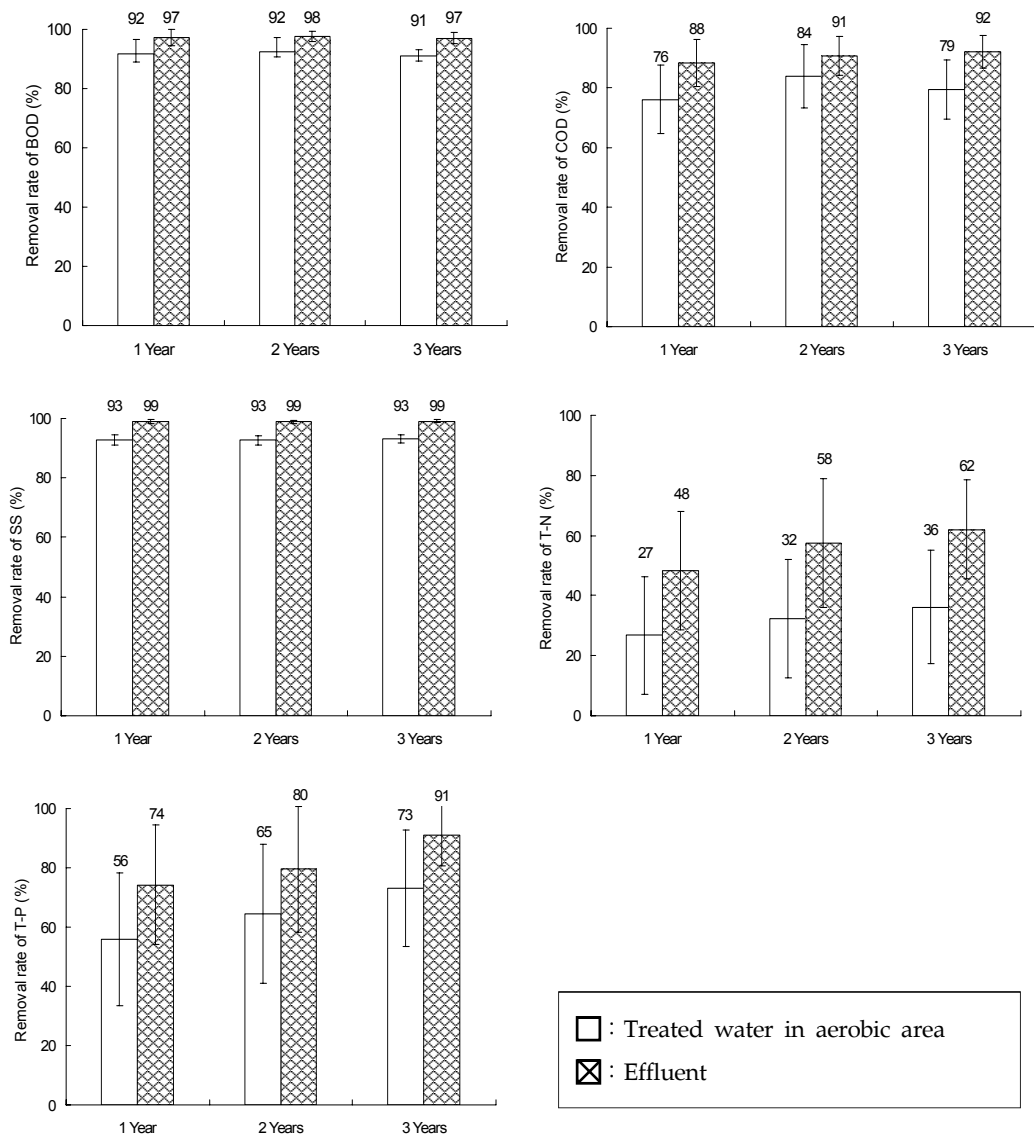


Fig. 8. Removal rate of BOD, COD, SS, T-N and T-P for 3 years after sewage treatment.

리 연차가 증가함에 따라 점차 처리효율이 증가하는 경향으로 시공 후 3차년도 COD 처리효율은 92%로 1차년도 보다 약 4%정도 증가하였다. 이는 하수내에 포함된 난분해성 오염물질에 의한 영향으로 판단되며, 하수처리 초기에는 미생물들이 이들 난분해성 물질을 거의 분해시키지 못하나 연차가 증가함에 따라 미생물들이 이러한 난분해성 오염물질에 대해 적응능력을 가지면서 서서히 이들의 분해율이 높아지기 때문에 판단된다. 일반적으로 COD는 생물학적으로 분해 가능한 BDCOD(Biodegradable COD)와 생물학적으로 분해가 불가능한 NBDCOD(Nonbiodegradable COD)를 함유하고 있다¹¹⁾.

부유물질 처리효율은 연차에 따라 별 차이가 없었으며, 호기성조 처리수의 부유물질 처리효율은 93%이상이었으며, 방류수에서 부유물질 처리효율은 99%이상이었다. 하수처리장에

서 부유물질의 일차적인 처리기작은 주로 여재에 의한 여과이므로 연차에 관계없이 일정한 처리효율을 나타내었다. 일반적으로 부유물질의 처리는 주로 여과 등의 물리적인 분리과정을 거쳐 식물뿌리나 여재에 부착되어 있는 미생물의 활발한 분해작용 등을 통해 처리되는 것으로 알려져 있다¹²⁾.

총 질소 처리효율은 호기성조 처리수와 방류수에서 하수처리 연차가 증가함에 따라 점차 처리효율이 증가하는 경향이었으며 시공 후 3차년도의 호기성조 처리수중 총 질소 처리효율은 36%로 시공초기에 비하여 9%정도 증가하였으며, 방류수의 총 질소 처리효율은 시공 후 3차년도가 62%로 1차년도에 비하여 14%정도 증가하였다. 이와 같이 총 질소 처리효율이 연차가 증가할수록 점점 증가되는 것은 질소관련 미생물들이 시공 후 유입된 하수중의 영양염류를 이용하면서 그 개체수와 미생물의 활성이 증가되었기 때문에 판단된다.

총 인 처리효율도 총 질소와 유사한 경향으로 호기성조 처리수와 방류수에서 시공 후 연차가 증가함에 따라 처리효율이 점점 증가하는 경향으로 하수처리장 시공 후 3차년도도의 방류수중의 총 인 처리효율은 91%로 1차년도에 비해 17%가 증가되었다. 이는 하수가 하수처리장으로 꾸준히 유입됨에 따라 하수처리장내에 Ca, Mg, Al 및 Fe 등의 함량이 증가하게 되고, 인은 이들 성분과 결합하여 Ca-P, Mg-P, Al-P 및 Fe-P의 결합을 형성하기 때문으로 사료된다. Seo 등^{17,18)}의 인 흡착에 관한 연구에 따르면 인공습지 여재내에 Ca, Mg, Al 및 Fe를 주입시 인의 흡착능력이 증가된 것으로 보고되었다.

계절별 수처리 효율

하수처리장 시공 후 3년 동안 호기성조 처리수 및 방류수의 계절별 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율을 조사한 결과는 Fig. 9에서 보는 바와 같다. 하수처리장에서 계절별 BOD 처리효율은 4계절 모두 별 차이 없이 호기성조 처리수의 BOD 처리효율은 90~93%범위로 BOD의 대부분이 호기성조에서 처리되었으며, 방류수의 BOD 처리효율은 97~98%범위로 매우 높은 처리효율을 보여 현행 방류수 수질기준¹⁰⁾인 10 mg/L을 만족하였다. 이처럼 겨울철에 BOD 처리효율이 감소하지 않은 것은 겨울철에 고사된 수생식물들이 하수처리장 표면을 그대로 덮어 지온을 보호함으로써 미생물의 활성이 크게 감소되지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 계

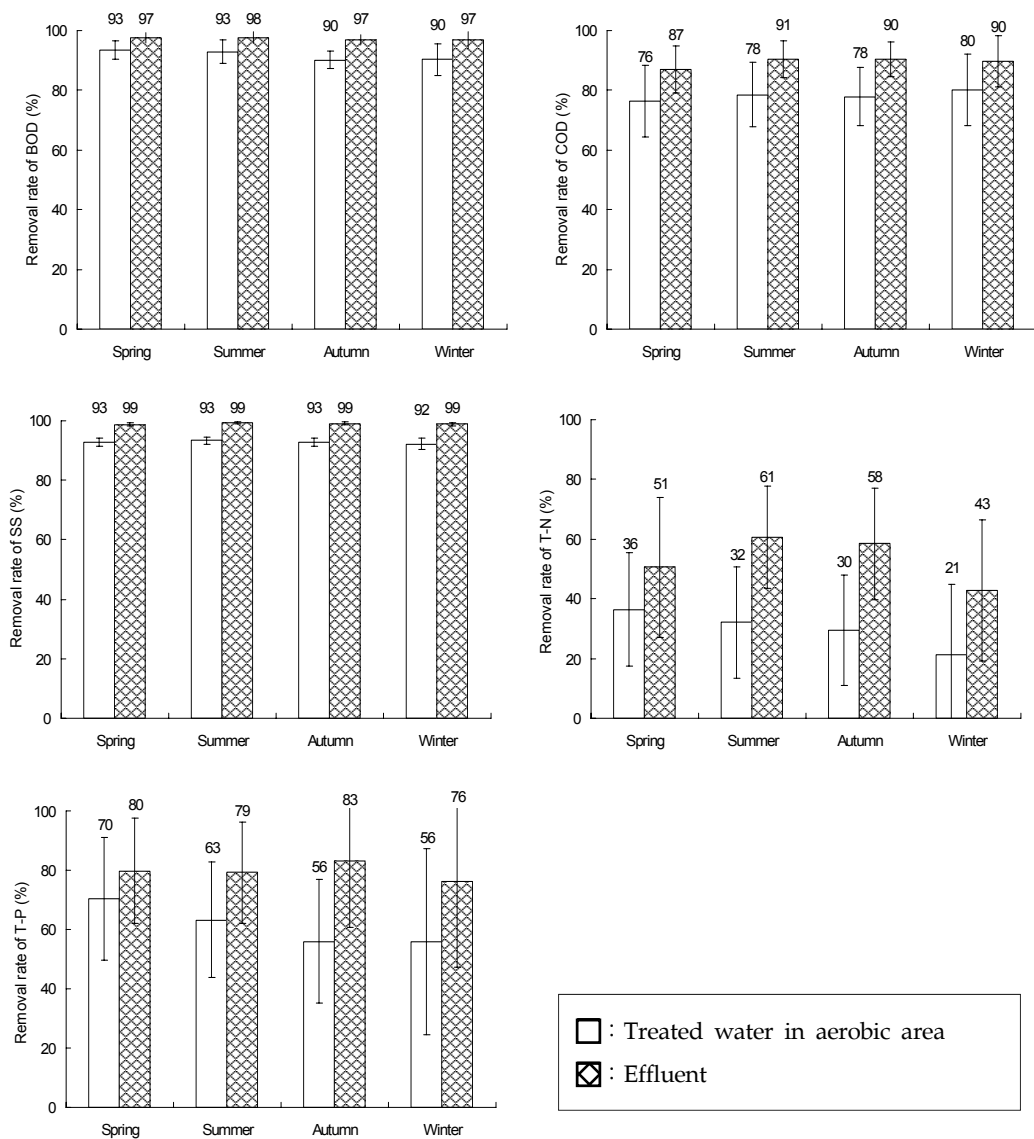


Fig. 9. Removal rate of BOD, COD, SS, T-N and T-P in constructed wetland on seasons.

절별 COD 처리효율도 BOD와 유사한 경향으로 4계절 모두 별 차이 없이 호기성조 처리수의 COD 처리효율은 76~80%범위로 COD의 대부분이 호기성조에서 처리되었고, 방류수의 COD 처리효율은 87~91%범위로 현행 방류수 수질 기준¹⁰⁾인 40 mg/L을 만족하였다.

계절별 부유물질 처리효율은 4계절 모두 별 차이 없이 호기성조 처리수의 부유물질 처리효율은 92~93%범위로 부유물질의 대부분이 호기성조에서 처리되었고, 방류수의 부유물질 처리효율은 99%이상으로 매우 높고 안정적으로 처리되었으며, 4계절 모두에서 현행 방류수 수질기준¹⁰⁾인 20 mg/L을 만족하였다. 부유물질 처리효율이 계절에 상관없이 일정한 처리효율을 보이는 것은 일차적인 처리가 계절이나 온도에 상관없는 여과기능에 의해 대부분 이루어지기 때문으로 사료된다.

계절별 호기성조 처리수 및 방류수의 총 질소 처리효율은 21~36 및 43-61%범위이었으며, 봄과 겨울의 총 질소 처리효율은 다른 계절에 비해 처리효율이 약간 감소하였고, 특히 겨울철 방류수의 총 질소 처리효율은 43%로 여름철의 61%에 비해 18%정도 감소하였다. 기온이 낮은 겨울철에 총 질소의 처리효율이 감소한 것은 겨울철 고사된 수생식물들에 의해 일정한 지온을 유지함에도 불구하고 높은 기온에서 잘 서식하는 탈질 미생물의 생육부진으로 탈질 미생물의 수와 활성이 감소되었기 때문인 것으로 사료된다. Kenney 등¹⁹⁾은 온도별 토양의 탈질율을 7-75°C 범위내에서 다양하게 실험한 결과 탈질율은 7 및 15°C의 경우 총 탈질가능량에 44 및 55%정도만 탈질이 되어 온도가 감소함에 따라 탈질효율이 급격히 감소하는 것으로 보고되었다.

계절별 총 인 처리효율은 4계절 모두 큰 차이 없이 호기성조 처리수의 총 인 처리효율은 56~70%범위로 총 인의 대부분이 호기성조에서 처리되었고, 방류수의 총 인 처리효율은 76~86%범위로 현행 방류수 수질기준¹⁰⁾인 2 mg/L을 만족하였다. 총 인의 처리효율이 계절에 따라 큰 변화를 보이지 않은 것은 하수처리장에 이식한 수생식물들에 의해 보호된 지온으로 미생물의 활성이 크게 감소되지 않았을 뿐만 아니라, 인공습지에서 인의 처리는 미생물에 의한 것보다 여과에 의한 여과 및 흡착, 그리고 침전에 의한 처리가 많은 부분을 차지하였기 때문인 것으로 사료되며, 이들 결과는 Seo¹⁸⁾의 결과와 일치하였다.

요 약

농어촌 등에서 소규모로 발생하는 하수를 환경친화형 인공습지 하수처리장에서 효과적으로 처리하기 위하여 인공습지 하수처리장을 시공한 후 3년 동안의 수처리 효율을 조사하였다. 하수처리 시기별 오염물질 농도 변화를 조사한 결과 BOD, COD 및 부유물질은 하수원수 농도의 편차가 심하였으나, 호기성조와 혐기성조를 통과하면서 농도가 급격히 감

소하여 방류수의 BOD는 0.2~11.8 mg/L, COD는 1.0~41.9 mg/L 및 SS 함량은 1.1~6.5 mg/L이었다. 방류수의 총 질소 농도는 4~60 mg/L범위로 각 조에 유입되는 총 질소 농도에 따라 편차가 심하였고, 방류수의 총 인 농도는 0.02~3.51 mg/L범위이었다. 연차별 BOD, COD 및 부유물질 처리효율은 연차에 따라 큰 차이를 보이지 않았으며, 시공 후 3차년도 방류수의 BOD, COD, 부유물질의 처리효율은 각각 97, 92 및 99%로 매우 높았다. 연차별 총 질소와 총 인의 처리효율은 호기성조 처리수와 방류수 모두에서 연차가 증가함에 따라 점차 그 처리효율이 증가하는 경향이었으며, 시공 후 3차년도의 방류수 중 총 질소 및 총 인 처리효율은 각각 62 및 73%이었다. 계절별 BOD, COD, 부유물질 및 총 인의 처리효율은 4계절 모두 큰 차이가 없었으며, 방류수의 BOD 처리효율은 97~98%, COD 처리효율은 87~91%, 부유물질 처리효율은 99% 및 총 인 처리효율은 76~86%로 나타났다. 하지만 계절별 방류수의 총 질소 처리효율은 봄과 겨울철이 다른 계절에 비해 처리효율이 약간 감소하였고, 특히 겨울철 방류수의 총 질소 처리효율은 43%로 여름철의 61%에 비해 18%정도 감소하였다.

참고문헌

1. Park, B. H., Nam, K. S. and Lee, K. S. (2001) Characteristics of water quality improvement in constructed wetlands under high hydraulic loadings. *Kor. J. water quality*. 17(4), 477-484.
2. Yoon, C. K., Kwun, S. K. and Kim, H. J. (1997) Study on natural wastewater treatment systems by constructed wetland for rural area. *Korean J. Environ. Engineers*. 39(4). 55-63.
3. Tanner, C. C., Adams, D. D. and Downes, M. T. (1997) Methane emissions from constructed wetlands treating agricultural wastewaters. *J. Environ. Qual.* 26, 1056-1062.
4. Park, M. R. (2005) Development of sewage treatment apparatus for detached house in agricultural village by natural purification methods. Master Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
5. Chung, D. Y. (1999) Development of an environmentally friendly sewage disposal model for agricultural and fishing village areas. *J. Korea Env Res & Reveg.* 2(1), 10-20.
6. Seo, D. C., Park, W. Y., Lim, J. S., Park, C. H., Lee, H. J., Kim, H. C., Lee, S. W., Lee, D. J., Cho, J. S. and Heo, J. S. (2008) A Study on the improvement of treatment efficiency for nitrogen and

- phosphorus by improved sewage treatment process in constructed wetland by natural purification method. *Kor. J. Environ. Agric.* 27(1), 27~34.
7. Kim, J. T., Moon, K. H. and Kim, J. W. (2001) The standard method of water analysis. Shinkwang a publishing company (in Korea).
 8. APHA, AWWA, WCF. (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater, 17th Edition. American Public Health Association, Washington, DC.
 9. Rural Development Administration. (1988) Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agriculture Science and Technology, Suwon (in Korea).
 10. Korean Ministry of Environment (2006) Environmental White Book of 2006. Ministry of Environment Republic, Seoul (in Korea).
 11. Seo, D. C. (2002) Development of sewage treatment apparatus by natural purification method. Master Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
 12. Kang, H. C., Freeman, C., Lee, D. and Mitsch, W. J. (1998) Enzyme activities on constructed wetland : Implication for water quality amelioration. *Hydrobiologia.* 368, 231~235.
 13. Yoon, C. K., Kwun, S. K., Woo, S. H. and Kwun, T. Y. (1999) Review of 3 - year experimental data from treatment wetland for water quality improvement in rural area. *Korean J. Environ. Engineers.* 15(4), 581~589.
 14. Seo, D. C. (2005) Development of treatment process of biological nitrogen and phosphorus in sewage treatment plant by natural purification system. Doctor Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
 15. Seo, D. C., DeLaune, R. D., Park, W. Y., Lim, J. S., Seo, J. Y., Lee, D. J., Ju Sik Cho, J. S. and Heo, J. S. (2008) Evaluation of a hybrid constructed wetland for treating domestic sewage from individual housing units surrounding agricultural villages in South Korea, *J. Environ. Monit.* 11, 134~144.
 16. Corbitt, R. A. and Bowen, P. T. (1994) Constructed wetlands for wastewater treatment, in *Applied Wetlands science and technology*, Kent, D. M. (ed.), Publishers Lewis, 221~241.
 17. 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.
 18. 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.
 19. Keeney, D. R. Fillery, I. R. and Marx, G. P. (1979) Effect of temperature on the gaseous nitrogen products of denitrification in a silt loam soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43, 1124-1128.