

단일 통풍형과 이중 통풍형 인공습지시스템의 하수처리 효율 비교

서동철¹⁾ · 임석천²⁾ · 조인성²⁾ · 이병주²⁾ · 이홍재³⁾ · 김상돈⁴⁾ · 이준배⁴⁾ · 조주식^{5)**} · 허중수^{2)*}

¹⁾루이지애나주립대 해양연안과학과, ²⁾경상대학교 응용생명과학부, ³⁾진주산업대학교 환경공학과,

⁴⁾국립환경과학원 영산강물환경연구소, ⁵⁾순천대학교 생명환경과학부

(2009년 9월 8일 접수, 2009년 9월 25일 수리)

Comparison of Removal Efficiencies in Single and Duplex Ventilation Constructed Wetland Systems for Treating Domestic Sewage

Dong-Cheol Seo¹⁾, Seok-Cheon Lim²⁾, In-Seong Jo²⁾, Byeong-Ju Lee²⁾, Hong-Jae Lee³⁾, Sang-Don Kim⁴⁾, Jun-Bae Lee⁴⁾, Ju-Sik Cho^{5)**}, and Jong-Soo Heo^{2)*} (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 of Environmental Engineering, Jinju National University, Jinju, 660-758, Korea, ⁴⁾Yeongsan River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research Ministry of Environment, Gwangju 500-480, Korea, ⁵⁾Division of Applied Life and Environmental Sciences, Sunchon National University, Sunchon, 540-742, Korea)

ABSTRACT: To develop environmentally friendly constructed wetlands(CWs) for treating domestic sewage which was produced in farming and fishing village, the efficiency of water treatment at different ventilation systems in the vertical bed, depths of horizontal bed, and sewage loads was investigated. In the vertical bed, BOD and COD by duplex ventilation system were lower than those by single ventilation system. But T-N and T-P concentrations by both ventilation systems in the vertical bed were little different. In the horizontal bed, BOD, COD, T-N and T-P in 1.0 m and 1.3 m depths were little different. To reduce the CWs' area and to improve the pollutant removal efficiencies, the optimum depth of horizontal bed was 1.3 m. In single and duplex ventilation CWs, the removal rate of BOD, COD, SS, T-N and T-P decreased slightly with the sewage load increases. In same sewage load conditions, the removal rates of BOD, COD, SS, T-N and T-P by duplex ventilation CWs were higher than those by single ventilation CWs. In summary, to effectively treat domestic sewage from farming and fishing village, the optimum constructed wetlands would be the duplex ventilation CWs.

Key Words: Constructed wetland, Duplex ventilation, Horizontal bed, Sewage treatment, Single ventilation, Vertical bed

서론

산업발달에 따른 공업화, 도시화 및 소비활동의 고도화 등으로 인하여 생활하수에 의한 수질오염이 사회적 문제로 대두되고 있다^{1,2)}. 현재 하수처리시설은 주로 도시지역에 편중되

어 설치 보급되어 있으며 농어촌 지역에서는 하수관거 확충 및 하수처리시설의 부족으로 인해 하수처리시설이 대부분 아직 보급되어 있지 않아 수질오염이 가중되고 있다. 또한 농어촌 지역은 축산시설의 증가, 각종 위락시설 및 농공지구의 개발에 따라 오염요인이 계속 증가하여 인근 소하천의 수질이 악화되어 부영양화의 원인이 되고 있다²⁾.

현재 농어촌의 소규모로 발생하는 하수를 처리하기 위한 공법은 도시생활하수의 처리공법인 활성슬러지법, 장기폭기법, 산화구법, 고도합병정화시스템, 토양피복형집축산화공법, 고효율오수정화법 및 혐기호기집축순환법 등 20여 종류의 기계식 처리공법들이 보급되고 있으나, 이들 기계식 공법들은

*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@sunchon.ac.kr

Table 1. Characteristics of the sewage used

	pH	BOD	COD	SS	T-N	T-P
Average	7.01	114.5	43.7	39.2	35.3	6.3
Range	6.95~7.06	90.4~125.3	38.2~50.1	36.1~110	20.6~39.4	3.4~6.9

Table 2. Characteristics of the filter medium used

pH	EC	O.M	T-N	T-P	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
(1:5H ₂ O)	(dS/m)	(%)	--(mg/kg)--								(mg)	
8.88	0.06	0.37	124	360	0.12	0.07	0.13	0.09	1670	189	13.4	8.4

하수처리효율이 낮을 뿐만 아니라 유지관리를 위한 전문기술 인력이 필요하며, 유지 관리비가 과다하게 사용되고, 기계고장 시 악취가 발생하는 등 여러 가지 문제점을 안고 있다^{2,3)}.

따라서 농어촌 환경의 특성을 감안하여 농어촌의 소규모로 발생하는 하수를 처리하기 위하여 시설비 및 유지관리비용이 저렴하고 지역의 환경에 잘 적응하며, 공정이 간단하고, 계획된 방류수질을 충족시킬 수 있는 하수처리공법의 개발 보급이 절실히 요구되어 환경친화형 자연정화공법이 대두되고 있다^{3,4)}.

환경친화형 자연정화공법은 일부 지역에서 시공하여 운영하고 있으나, 농어촌의 실정에 맞는 공법을 개발하기 위해서는 몇 가지 수정 및 보완해야 할 문제점을 가지고 있다. 자연정화공법인 인공습지 하수처리장의 문제점은 장기간 하수처리장 운영시 공극폐쇄현상으로 인한 지하부로 공기가 원활히 공급되지 않아 하수처리 효율이 감소되는 것과 하수처리장 건설시 기계식공법에 비해 부지면적이 많이 소요되는 점을 들 수 있으며, 이들 문제점은 자연정화공법인 인공습지 하수처리장의 보급에 걸림돌로 작용하고 있다^{5,6)}. 특히 현재 국내 하수처리에 적용되어 온 수직흐름(Vertical flow; VF)-수평흐름(Horizontal flow; HF) 인공습지 중 그 동안 효율적으로 운영되어 오고 있는 공법으로 단일 통풍형 인공습지 공법을 들 수 있으나⁷⁾, 이 공법 또한 처리효율과 부지면적에 대한 문제점을 지니고 있어 공법개선이 필요할 것으로 판단된다. 이에 본 연구자들은 단일 통풍형 인공습지 공법의 단점을 보완할 수 있는 공법으로 이중 통풍형 인공습지 공법을 개발하였다.

따라서 본 연구는 농어촌 등에서 소규모로 발생하는 하수처리를 위한 효과적인 인공습지 하수처리장 개발을 위하여 수직흐름(Vertical flow; VF)-수평흐름(Horizontal flow; HF) 인공습지를 단일 통풍형 인공습지(Single ventilation constructed wetlands; SV CWs)와 이중 통풍형 인공습지(Duplex ventilation constructed wetlands; DV CWs)로 구분하여 시공한 후 최적 인공습지 공법을 선정하기 위해 수직흐름조 통풍방법별, 수평흐름조 깊이별 및 하수 부하량별 수처리 효율을 각각 조사하였다.

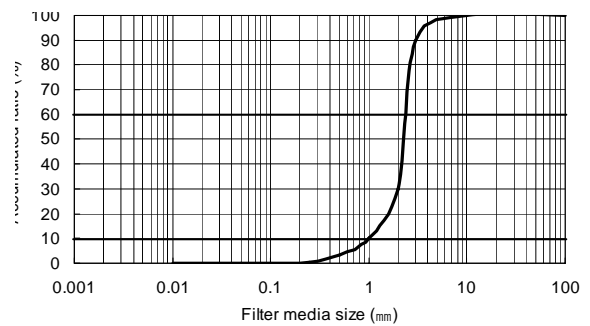


Fig. 1. Particle distributions of the filter medium used.

재료 및 방법

공시재료

본 하수처리장에 사용된 공시 하수는 진주시 수곡면 효자리의 농촌지역에서 배출되는 생활하수를 사용했으며, 공시 여재는 여재 채취장에서 채취한 여재를 사용하였다. 공시하수 및 여재의 이화학적 특성은 Table 1과 2에서 보는 바와 같다. 원여재의 유효입경(여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 10%되는 부분의 여재의 입경: d₁₀)은 1 mm이었으며, 균등계수(입경 누적분포곡선에서 60%통과 입경과 10%통과 입경과의 비; d₆₀/d₁₀)는 약 2.4이었다 (Fig. 1). 인공습지 하수처리장에 이식한 공시 수생식물은 갈대, 달뿌리풀, 노랑꽃창포, 샷갯사초, 물억새 및 큰고랭이의 6 종류를 이식하였으며, 각 수생식물은 야외 노지에서 성장한 수생식물을 분주하여 이식하였다.

하수처리장 설계 및 시공

하수처리 공법에 따른 수처리 효율을 조사하기 위하여 시공한 환경친화형 인공습지 하수처리장은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 수직흐름(Vertical flow; VF)-수평흐름(Horizontal flow; HF) 인공습지를 단일 통풍형 인공습지(Single ventilation constructed wetlands; SV CWs)와 이중 통풍형 인공습지

(Duplex ventilation constructed wetlands; DV CWs)로 구분하여 시공하였다.

단일 통풍형 및 이중 통풍형 인공습지 모두 수직흐름(VF)조의 용량은 가로 7,941 mm × 세로 8,500 mm × 높이 1,000 mm 크기로 하여 총 67.5 m³ 용량으로 동일하게 하되, 통풍방법을 단일 통풍형 구조와 이중 통풍형 구조로 달리 하여 시공하였다. 단일 통풍형 구조(Fig. 2A)는 수직흐름조 하부에만 직경 150 mm의 PVC관을 1,600 mm × 1,600 mm 면적으로 설치하였고, 곳곳에 공기가 소통되게 굴뚝형태의 PVC관을 세웠다. 그리고 하부의 PVC관에는 작은 구멍을 뚫어 수직흐름조에서 처리된 하수를 PVC관에 모이게 하여 수평흐름조로 유입되게 하였고, 동시에 PVC관 상단부 위에는 공기가 자연적으로 유입되게 하였다. 단일 통풍형 공법의 수직흐름조내 여재 주입은 표면에서 600 mm까지는 입경이 1~4 mm인 여재를 채워 넣었고, 그 하층부터는 입경 250 mm인 자갈을 채워 넣었다.

이중 통풍형 구조(Fig. 2B)는 수직흐름조 하층뿐만 아니라 중단부에도 PVC관을 넣어 수직흐름조에 공기의 유입이 원활하도록 하였다. 즉 수직흐름조 하단부는 직경 150 mm의 PVC관을 가로 1,200 mm × 세로 1,200 mm 면적으로 설치하였고, 이곳의 PVC관에 구멍을 뚫어 처리된 하수가 수평흐름조로 유입되게 하였다. 그리고 하수가 수평흐름조로 유입되는 동안 PVC관 상층으로 공기가 소통되게 하였고, 수직흐름조 중단부는 하단부에서 높이 500 mm 지점에서 사용했던 것과 동일한 PVC관을 가로 1200 mm × 세로 1200 mm 간격으로 하부의 PVC관과 엇갈리게 하여 공기가 수평으로 소통되게 설치하였다. 그리고 단일 통풍 구조와는 달리 굴뚝형태의 PVC관은 설치하지 않았다. 이중 통풍형 인공습지 공법의 수직흐름조의 경우 표면으로부터 300 mm까지는 입경 1~4 mm의 여재를 채워 넣었고, 표층 300~500 mm사이에는 공기 통풍형 PVC관이 있기 때문에 입경 130 mm의

자갈을 채워 넣었으며, 표층으로부터 500~800 mm사이에는 입경 1~4 mm의 여재를 채웠다. 그리고 800 mm이하 층은 처리수의 원활한 유입과 공기의 흐름을 좋게 하기 위하여 입경 250 mm인 자갈을 200 mm 깊이로 채워 넣었다.

단일 통풍형 및 이중 통풍형 공법에서 수평흐름(HF)조의 특성은 두 공법 모두 동일한 용량으로 설계 및 시공하였으나 단일 통풍형 공법의 경우 수평흐름조의 깊이를 1.0 m로 하였고, 이중 통풍형 인공습지 공법의 경우 1.3 m로 달리하여 설계 및 시공하였다. 단일 통풍형 공법의 수평흐름조의 크기는 가로 12,435 mm × 세로 6,800 mm × 높이 1,000 mm 크기로 시공하여 총 84.5 m³되게 하였고, 여재의 주입은 표면에서 600 mm까지는 입경 1~4 mm인 여재를 사용하였고, 그 하층부터는 입경 250 mm인 자갈을 채워 넣었다. 이중 통풍형 인공습지 공법의 경우 수평흐름조의 크기는 가로 9,565 mm × 세로 6,800 mm × 높이 1,300 mm크기로 시공하여 총 84.5 m³되게 하였고, 여재의 주입은 수평흐름조 깊이 1.3 m는 표면에서 700 mm까지는 입경 1~4 mm인 여재를 사용하였고, 그 하층부터는 입경 250 mm인 자갈을 채워 넣었다.

단일 통풍형 공법에서의 하수는 자연 유하식으로 하수처리장의 침사조와 스크린을 거쳐 유량 조정조에 모이게 한 뒤, 유량 조정소에서 수직흐름조에 하수를 유입시켰고, 유입된 하수는 수직흐름조 표면에 골고루 유입되어 수직으로 여과되면서 하수가 1차 처리되게 하였다. 1차 처리된 처리수는 수평흐름조로 유입되게 하였고, 유입된 처리수는 수평의 지그재그방향으로 흘러 최종 방류되게 하였다. 특히, 수평흐름조에서는 하수의 체류시간을 최대화하기 위하여 조를 4등분하여 지그재그 방식으로 흐르게 하였다.

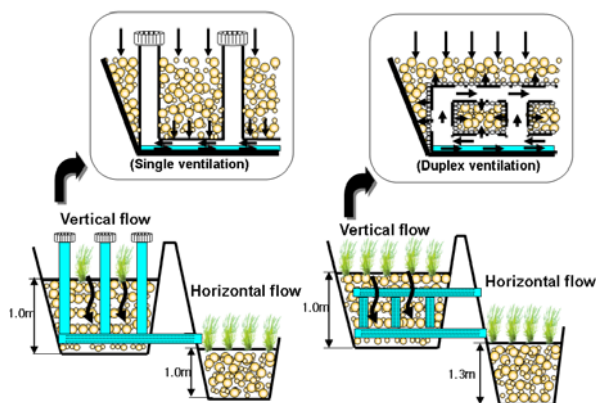
하수처리장 운전조건 및 조사시기

하수처리장의 운전은 공시하수를 자연유하식으로 수직흐름조 전체 표면에 골고루 유입시켰으며, 수직흐름조 유입수를 하수원수, 수직흐름조 통과수를 수직흐름조 처리수 그리고 수평흐름조 통과수를 방류수로 명명하였다.

수직흐름조 통풍방법 및 수평흐름조 깊이에 따른 수처리 효율 조사에서의 하수원수 유입량은 222 L/m²·day로 하였고, 하수부하량에 따른 수처리 효율 조사에서의 하수원수 유입량은 222 및 444 L/m²·day로 하였다. 환경친화형 인공습지 하수처리장에서 수처리효율 조사는 하수원수, 수직흐름조 처리수 및 방류수를 각 조건별로 3주간 실험하였고, 시료 채취 시기는 각 조건별로 운전 1주부터 2주까지는 주 1회, 마지막 3주에는 매일 1회씩 총 9회 채취하여 분석한 결과를 평균하여 각 조건별 수처리 효율을 구하였다.

분석방법

수질분석은 수질오염공정시험법과 APHA의 standard method에 준하여 다음과 같이 하였다^{8,9)}. BOD는 윙클러 아



A) Single ventilation CWs B) Duplex ventilation CWs

Fig. 2. Diagrams of single and duplex ventilation constructed wetlands.

지드화나트륨 변법, COD는 산성 KMnO₄법, 부유물질은 유리섬유여지법, 총 질소는 자외선 흡광도법, 총 인은 아스코르빈산 환원법으로 분석하였다.

결과 및 고찰

수직흐름조 통풍 방법에 따른 인공습지 공법별 수처리 효율 인공습지 하수처리장에서 수직흐름조 통풍방법에 따른 BOD, COD, T-N 및 T-P 함량을 조사한 결과는 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 하수원수의 BOD는 약 90~123 mg/L 정도 이었고, 단일 통풍형 구조의 수직흐름조 처리수 중 BOD는 약 27~32 mg/L 정도이었고, 이중 통풍형 구조의 수직흐름조 처리수 중 BOD는 약 18~23 mg/L 정도로서 이중 통풍형 구조가 단일 통풍형 구조에 비해 BOD 처리 효율이 다소 높은 것으로 나타났다. 이와 같이 이중 통풍형 구조가 단일 통풍형 구조에 비해 수직흐름조 처리수중의 BOD 처리율이 높은 것은 이중 통풍형 구조로 인해 공기의 공급이 원활해서 미생물에 의한 BOD 처리가 보다 효과적으로 이루어진 것으로 판단된다. 이는 본 연구자¹⁰⁾의 선행연구인 batch 실험에서 수행된 결과와도 일치하였다. Batch 실험결과 이중 통풍형 구조는 수직흐름조 전체에 용존산소를 골고루 공급할 수 있었고, 이로 인해 유기물의 처리효율이 향상되었다.

하수원수의 COD는 약 28~50 mg/L이었고, 단일 통풍형 구조의 수직흐름조 처리수 중 COD는 약 16~19 mg/L 정도이었고, 이중 통풍형 구조의 수직흐름조 처리수 중 COD는 약 13~15 mg/L 정도로서 이중 통풍형 구조가 단일 통풍형 구조에 비해 COD 처리 효율이 약간 높았다. 이와 같이 이중 통풍형 구조가 단일 통풍형 구조에 비해 수직흐름조 처리수 중의 COD 처리 효율이 높은 것은 BOD와 유사한 결과로 이중 통풍형 구조로 인해 공기의 공급이 원활했기 때문으로 판단된다.

하수원수의 총 질소 농도는 약 23~35 mg/L이었고, 두 공법의 수직흐름조 처리수는 하수처리 시일에 따라서 별 차이 없이 안정적으로 처리되었고, 단일 통풍형 구조의 수직흐름조 처리수 중 총 질소 농도는 약 11~13 mg/L 정도이었고, 이중 통풍형 구조의 수직흐름조 처리수 중 총 질소 농도는 약 10~12 mg/L로 단일 통풍형 구조와 별 차이가 없었다. 수직흐름조에서는 통풍형 구조에 의해 산소가 공급되었고, 그로 인해 호기성 미생물에 의한 질산화 작용으로 유기태 질소 및 NH₄-N가 NO₃-N로 전환된다¹⁰⁾. 수직흐름조만으로는 총 질소의 처리효율이 그다지 높지 않은 것은 전환된 NO₃-N가 혐기성 조건에서 미생물에 의해 탈질화 되어야 하나 수직흐름조건만으로는 탈질이 일어나지 못하기 때문이다¹¹⁾. 따라서 인공습지 하수처리장에서 높은 질소 처리효율을

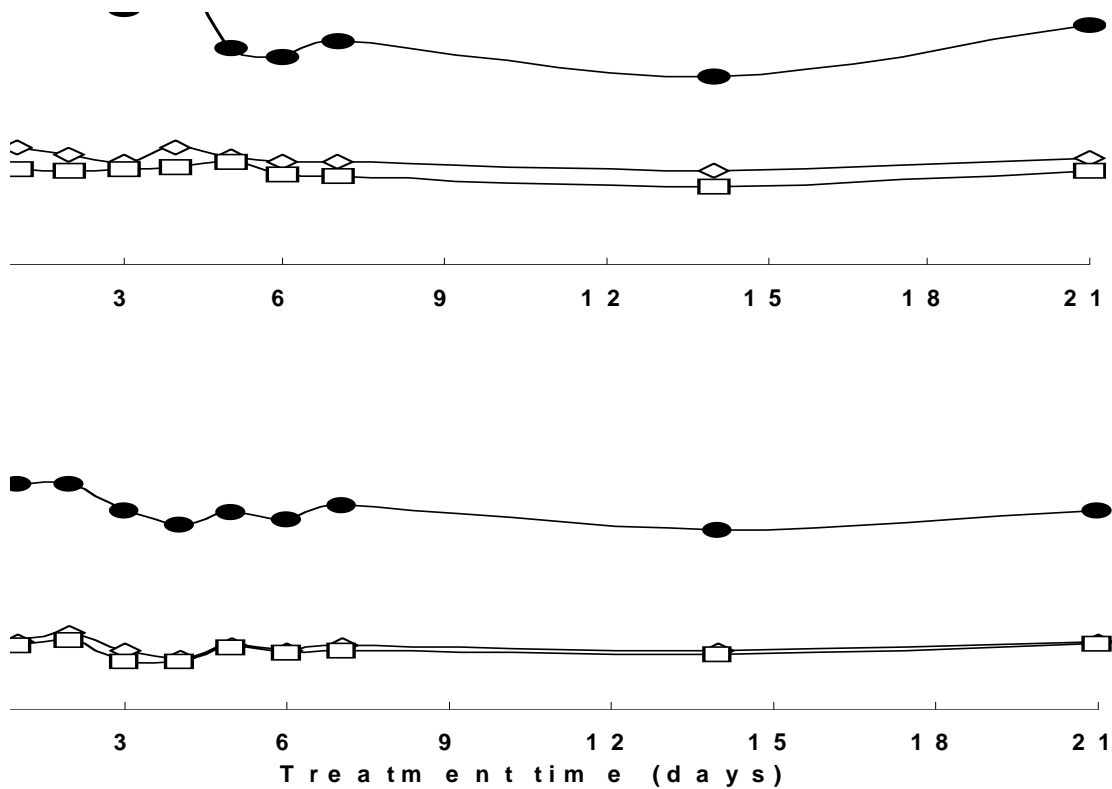


Fig. 3. Variation of BOD, COD, T-N and T-P in the water according to the ventilation system in vertical flow (VF) bed. (●: Raw water; ◇: Single ventilation system; □: Duplex ventilation system).

연기 위해서는 수직흐름조에서 왕성한 질산화 작용으로 대부분의 유기태 질소 및 NH₄-N을 NO₃-N으로 전환시켜야 하며, 이렇게 전환시킨 NO₃-N은 혐기성조건으로 유지된 수평흐름조로 유입시켜야 할 것이다. 따라서 수직흐름조의 이중 통풍형 구조가 단일 통풍형 구조보다는 충분한 산소를 공급할 수 있어 총 질소를 효과적으로 처리할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 본 연구자¹⁰⁾의 선행연구인 batch 실험에서 NH₄-N와 NO₃-N의 모니터링을 통해 조사된 연구 결과와도 일치하였다.

하수원수의 총 인 농도는 약 3.4~4.6 mg/L이었고, 단일 통풍형 구조의 수직흐름조 처리수 중 총 인 농도는 약 1.0~1.6 mg/L정도이었고, 이중 통풍형 구조의 수직흐름조 처리수 중 총 인 농도는 약 1.0~1.2 mg/L정도로서 단일 통풍구조와 비슷한 처리효율을 보였다. 따라서 총 인의 처리효율은 수직흐름조 통풍방법에 따라 별 차이가 없었다. 이는 VF-HF 인공습지에서 대부분의 인은 주로 흡착 및 침전에 의해 처리되기 때문으로 판단된다¹²⁾. 이는 본 연구자^{11,13)}의 선행연구인 여재별 흡착 및 column 실험을 통해 증명되었으며, 본 연구결과도 선행연구 결과와 일치하였다. 일반적으로 인공습지에서 인은 여재에 의한 흡착 및 침전, 수초에 의한 흡수, 미생물에 의한 흡수 및 분해 등의 다양한 방법으로 처리된다¹²⁾. 이상의 결과를 미루어 볼 때 수직흐름조의 최적 통풍방법은 이중 통풍형 구조이었다.

수평흐름조 깊이별 수처리 효율

수직흐름조의 최적조건인 이중 통풍형 구조에서 수평흐름조의 깊이별 수처리효율을 조사하기위해 수평흐름조 깊이에 따른 BOD, COD, T-N 및 T-P를 조사한 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 하수원수의 BOD 농도는 약 95~120 mg/L이었고, 이중 통풍형 구조를 통과한 호기성 처리수 중 BOD는 약 13~15 mg/L정도이었다. 수직흐름조 처리수를 수평흐름조로 유입시켰을 경우 깊이 1.0 m로 된 수평흐름조를 통과한 방류수 중의 BOD는 수직흐름조 처리수에 비해 더욱더 낮아져서 BOD는 약 7~13 mg/L정도이었으며, 깊이 1.3 m로 된 수평흐름조를 통과한 방류수 중의 BOD는 약 9~10 mg/L정도이었다. 수평흐름조 깊이에 따른 방류수 중의 BOD 처리효율은 수평흐름조의 깊이 1.3 m가 1.0 m에 비해 약간 높았다. 특히 수평흐름조의 깊이 1.3 m의 경우 방류수 수질기준¹⁴⁾인 10 mg/L에 만족하였으나, 수평흐름조의 깊이 1.0 m의 경우 방류수 수질 기준을 약간 초과하였다. 따라서 BOD 처리를 위한 수평흐름조의 최적 깊이는 1.3 m이었다.

하수원수의 COD 농도는 약 30~43 mg/L이었고, 이중 통풍형 구조로된 수평흐름조를 통과한 처리수 중 COD는 약 12~17 mg/L정도이었다. 수직흐름조 처리수를 수평흐름조로 유입시켰을 경우 깊이 1.0 m로 된 수평흐름조를 통과한 방류수 중의 COD는 수직흐름조 처리수에 비해 더욱더 낮아져서 COD는 약 8~10 mg/L정도이었으며, 깊이 1.3 m로

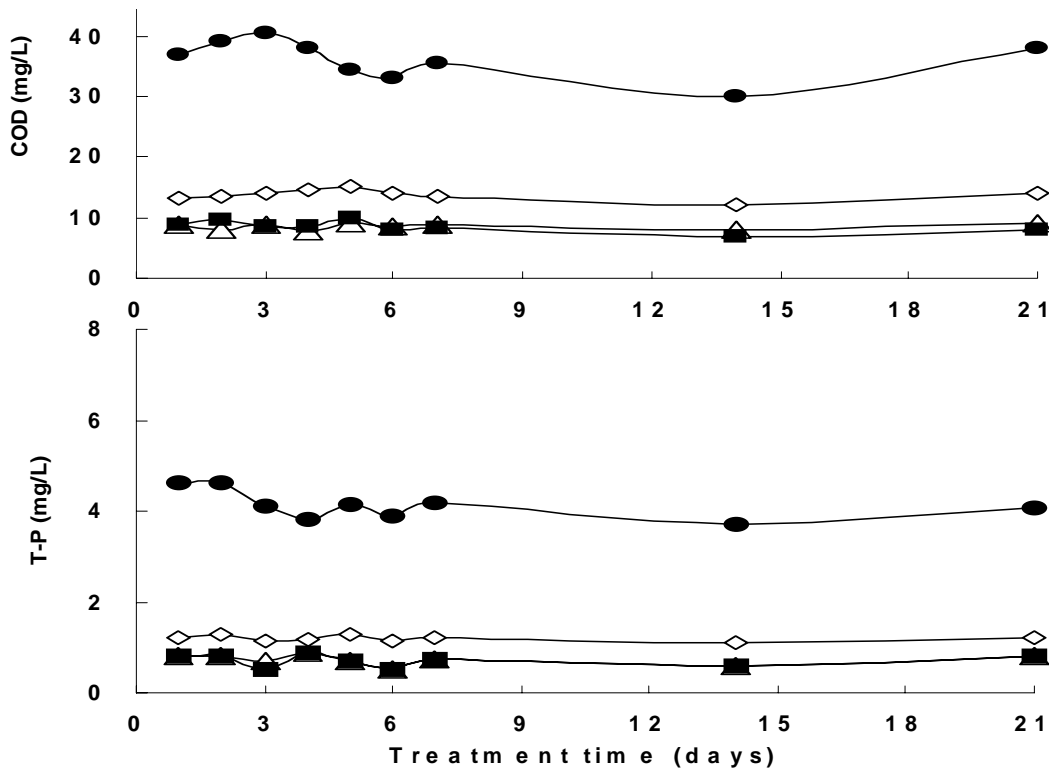


Fig. 4. Variation of BOD, COD, T-N and T-P in the water according to the depth in horizontal flow (HF) bed. (● : Raw water; ◇ : Duplex ventilation in VF bed; △ : 1m depth in HF bed; ■ : 1.3m depth in HF bed).

된 수평흐름조를 통과한 방류수 중의 COD는 약 7~9 mg/L 정도로 깊이에 따른 방류수 중의 COD는 별 차이가 없었으며, 수평흐름조 깊이 1.0 m와 1.3 m 모두 방류수 수질기준¹⁴⁾인 20 mg/L를 만족하였다.

하수원수의 총 질소 농도는 약 28~35 mg/L이었고, 이중 통풍형 구조로된 수직흐름조를 통과한 수직흐름조 처리수에서의 총 질소 농도는 약 7~12 mg/L정도이었다. 수직흐름조 처리수를 수평흐름조로 유입시켰을 경우, 깊이 1.0 m로 된 수평흐름조를 통과한 방류수 중의 총 질소 농도는 약 4~6 mg/L정도이었으며, 깊이 1.3 m로 된 수평흐름조를 통과한 방류수 중의 총 질소 농도는 약 4~8 mg/L정도로 수평흐름조 깊이에 따른 방류수 중의 총 질소 농도는 큰 차이가 없었으며, 수평흐름조 깊이 1.0 m와 1.3 m 모두 방류수 수질기준¹⁴⁾인 20 mg/L를 만족하였다.

하수원수의 총 인 농도는 약 3.7~4.8 mg/L이었고, 이중 통풍형 구조로 된 수직흐름조를 통과한 처리수 중 총 인 농도는 약 1.0~1.2 mg/L정도이었다. 수직흐름조 처리수를 수평흐름조로 유입시켰을 경우, 깊이 1.0 m로 된 수평흐름조를 통과한 방류수 중의 총 인 농도는 약 0.5~1.0 mg/L정도이었으며, 깊이 1.3 m로 된 수평흐름조를 통과한 방류수 중의 총 인 농도는 약 0.3~1 mg/L정도로, 수평흐름조 깊이에 따른 방류수 중의 총 인 농도는 별 다른 차이가 없었으며, 수평흐름조 깊이 1.0 m와 1.3 m 모두 방류수 수질기준¹⁴⁾인 2 mg/L를 만족하였다. 이와 같이 수평흐름조의 깊이에 따라 인 처리효율이 별 차이 없는 것은 수평흐름조를 동일한 체적 하에서 깊이만 달리하여 실제 처리수의 수리학적인 체류시간이 동일하였기 때문으로 판단된다. 일반적으로 인공습지에서 인 처리의 경우 여체에 의한 여과, 흡착 및 침전이 주된 처리로 이들 처리효율은 조내에서 물의 수리학적인 체류시간과 밀접한 관계가 있다¹²⁾. 이는 본 연구자^{11,13)}의 선행연구인 여체별 흡착 및 column 실험을 통해 증명되었다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 수평흐름조의 최적 깊이는 1.3 m이었다.

하수부하량에 따른 인공습지 공법별 수처리 효율

농어촌 지역에서 소규모로 발생하는 하수는 부하 변동이 심하기 때문에 일반 기계식공법의 경우 하수부하 변동에 대한 대응성 부족으로 순간적인 고부하시 하수처리가 불가능하게 되는 문제점을 야기시켰다. 따라서 상기 최적 조건인 이중 통풍형 공법(수직흐름조: 이중 통풍형 구조, 수평흐름조 깊이: 1.3 m)하에서 하수부하 변동에 대한 대응성을 조사하기 위해 하수부하량을 222 L/m²·day 및 444 L/m²·day로 하여 하수부하량에 따른 수처리 효율을 조사하였고, 대조구로 단일 통풍형 공법(수직흐름조: 단일 통풍형 구조, 수평흐름조 깊이: 1.0 m)을 동일조건 하에서 함께 조사하였다.

인공습지 하수처리장에서 하수부하량에 따른 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P처리효율을 조사한 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 대조구인 단일 통풍형 공법에서 방류수 중의 BOD 처리효율은 유입하수량을 222 L/m²·day로 하였을

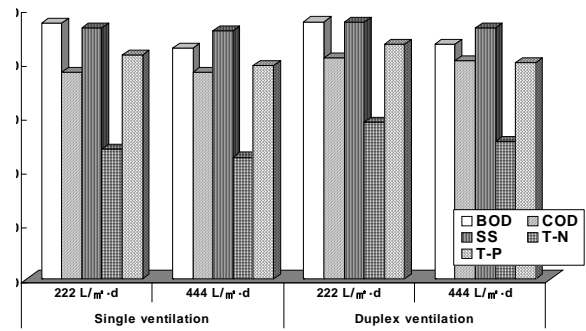


Fig. 5. Removal rate of BOD, COD, SS, T-N and T-P in the effluent according to the sewage loading in single ventilation (SV) and duplex ventilation (DV) CWs. (SV CWs: Single ventilation in VF bed, 1.0 m Depth in HF bed; DV CWs: Duplex ventilation in VF bed, 1.3 m Depth in HF bed).

때 약 95%이었고, 444 L/m²·day로 하였을 때 약 85%로서 유입하수량 222 L/m²·day에서 BOD 처리효율이 약간 높았다. 이중 통풍형 공법에서는 방류수 중의 BOD 처리효율은 유입하수량을 222 L/m²·day로 하였을 때 약 95%, 444 L/m²·day로 하였을 때 약 87%이었다. 유입하수량 222 L/m²·day에서는 단일 통풍형과 이중 통풍형 모두 높은 BOD 처리효율을 보였으며, 공법별로 큰 차이가 없었다. 하지만 두 공법 모두 하수부하량이 증가할수록 BOD 처리효율이 점점 감소하였고, 하수부하량 444 L/m²·day에서 BOD 처리효율은 이중 통풍형 공법이 단일 통풍형 공법에 비해 약간 높았다. 이는 이중 통풍형 공법의 경우 수직흐름조가 이중 통풍형 구조로 되어 있어 단일 통풍형 구조에 비해 공기 공급이 원활하여 유기물의 분해가 증가되었기 때문으로 판단된다. 이는 본 연구자¹⁰⁾의 선행연구인 batch 실험에서 증명되었다. 하수부하량에 따른 인공습지 공법별 COD 처리효율은 BOD와 유사한 경향이었고, COD 처리효율은 전반적으로 이중 통풍형 공법이 단일 통풍형 공법에 비해 약간 높았다.

이중 통풍형 공법에서 SS 처리효율은 부하량에 따라 별 차이 없이 약 93~95%정도이었고, 대조구인 단일 통풍형 공법에서도 부하량에 따라 별 차이 없이 약 92~93%정도로 모든 조건에서 방류수 수질기준¹⁴⁾을 만족하였다. SS는 수직흐름조에서 대부분 처리되는데, 이는 주로 여체에 의해 여과되어 처리되기 때문으로 판단된다. 이는 본 연구자¹⁰⁾의 선행연구인 batch 실험에서 증명되었다. 하지만 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 SS를 일으키는 현탁물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 현탁입자들은 대개가 무해하지만 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수, 기타 화학반응을 거치면서 궁극적으로 처리된다. 그러나 유입되어 잔류하는 현탁입자들의 부하량이 처리조내의 처리율을 초과하게 되면 처리조에 현탁물질이 누적되어 처리조의 전반적인 효율을 감소시킬 수 있다⁵⁾.

이중 통풍형 공법에서 방류수 중의 총 질소 처리효율은 유입하수량을 $222 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 하였을 때 약 58%였으며, $444 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 하였을 때 약 51%로서 하수부하량이 증가할수록 총 질소 처리효율이 약간 감소하였다. 대조구인 단일 통풍형 공법에서 방류수 중의 총 질소 처리효율은 유입하수량을 $222 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 하였을 때 약 48%였으며, $444 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 하였을 때 약 45%로서 유입하수량에 따라서 별 차이 없었다. 또한 동일한 하수부하량에서 이중 통풍형 공법이 단일 통풍형 공법에 비해 총 질소 처리효율이 약간 높았는데, 이는 이중 통풍형 공법은 수직흐름조의 이중 통풍형 구조에 의해 공기유입량이 많아 미생물에 의한 질산화가 활발히 일어났고, 수평흐름조의 깊이 1.3 m는 단일 통풍형 공법의 깊이 1.0 m에 비해 깊어 탈질을 위한 혐기성조건이 상대적으로 양호하였기 때문으로 판단된다. 이는 본 연구자¹⁰⁾의 선행연구인 batch 실험에서 깊이가 깊어짐에 따라 혐기성조건이 양호하여 질소처리효율이 향상된 결과와 일치 되었다.

이중 통풍형 공법에서 방류수 중의 총 인 처리효율은 유입하수량을 $222 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 하였을 때 약 87%였으며, $444 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 하였을 때 약 80%로서 유입하수량 $444 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ 하였을 때 총 인 처리효율이 약 7%정도 높았다. 단일 통풍형 공법에서 방류수 중의 총 인 처리효율은 유입하수량을 $222 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 하였을 때 약 82%였으며, $444 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 하였을 때 약 79%로서 하수부하량이 적을수록 총 인 처리효율이 약간 높았다. 이와 같이 하수부하량이 증가할수록 총 인 처리효율이 감소하는 것은 하수부하량 증가로 인해 조내에서 처리수의 체류시간이 상대적으로 감소하기 때문으로 판단되며, 이들 결과는 본 연구자¹¹⁾의 선행연구 결과와 일치 하였다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 하수부하량에 따른 인공습지 공법별 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율은 이중 통풍형 공법이 단일 통풍형 공법에 비해 약간 높았다. 따라서 농어촌 등에서 소규모로 발생하는 하수를 효과적으로 처리하기 위한 인공습지 하수처리장은 이중 통풍형 공법으로 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

요 약

농어촌 등에서 소규모로 발생하는 하수처리를 위한 환경친화형 자연정화공법인 인공습지 하수처리장 개발을 위하여 수직흐름조(VF)-수평흐름조(HF) 인공습지 시스템을 수직흐름조는 현행 단일 통풍 구조에서 이중 통풍 구조로, 수평흐름조는 깊이를 현행 1.0 m에서 1.3 m로 하여 체적은 같으면서 표면적을 줄여 시공한 다음, 수직흐름조 통풍방법별, 수평흐름조 깊이별 및 하수부하량에 따른 수처리 효율을 조사하였다. 수직흐름조 통풍 방법에 따른 수처리 효율을 조사한 결과 BOD 및 COD는 이중 통풍형 구조가 단일 통풍형 구조에 비해 높은 처리효율을 보였다. 하지만 총 질소와 총 인은 두

통풍형 구조 모두 큰 차이 없이 유사한 결과를 보였다. 따라서 수직흐름조의 최적 통풍방법은 이중통풍형 구조이었다. 수평흐름조 깊이에 따른 수처리 효율을 조사한 결과 BOD, COD, 총 질소 및 총 인 함량은 수평흐름조 깊이에 따라 별 차이가 없었지만, 수평흐름조 깊이 1.3 m의 경우 인공습지 하수처리장의 시공시 부지면적을 감소시킬 수 있을 것으로 판단되므로 깊이 1.0 m에 비해 경제성과 유지관리면에서 바람직할 것으로 생각된다. 따라서 수평흐름조의 최적 깊이는 1.3 m이었다. 농어촌 지역에서 소규모로 발생하는 하수의 하수부하 변동에 대한 대응성을 조사하기 위하여 하수부하량에 따른 수처리 효율을 조사한 결과 BOD처리율은 하수부하량이 적을수록 약간 높았으며, COD 및 SS는 하수부하량에 따라서 별 차이가 없었고, 동일한 하수부하량에서는 이중 통풍형 공법이 대조구인 단일 통풍형 공법에 비해 높은 처리효율을 보였다. 총 질소 및 총 인 처리효율도 하수부하량이 증가함에 따라 처리효율이 점점 감소되는 경향이었고, 동일한 하수부하량에서는 이중 통풍형 공법이 단일 통풍형 공법에 비해 처리율이 약간 높았다. 따라서 하수처리장 공법별 및 하수부하량에서의 하수처리효율과 경제성 및 유지 관리비를 고려해 볼 때 농어촌 등에서 소규모로 발생하는 하수를 효과적으로 처리하기 위한 인공습지 하수처리장은 수직흐름조 통풍방법이 이중 통풍형 구조이며 수평흐름조의 깊이가 1.3 m인 이중 통풍형 공법이 되어야 할 것으로 판단된다.

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. 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.
5. Chung, D. Y. (1999) Development of an environmentally friendly sewage disposal model for agricul-

- tural and fishing village areas. *J. Korea Env Res & Reveg. Tech.* 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. 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.
 8. Kim, J. T., Moon, K. H. and Kim, J. W. (2001) The standard method of water analysis. Shinkwang a publishing company (in Korea).
 9. APHA, AWWA, WCF. (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater, 17th Edition. American Public Health Association, Washington, DC.
 10. Seo, D. C. (2002) Development of sewage treatment apparatus by natural purification method. Master Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 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.
 14. Korean Ministry of Environment (2006) Environmental White Book of 2006. Ministry of Environment Republic, Seoul (in Korea).
 15. 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. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 15(4), 581–589.
-