

물상추를 이용한 양어장 배출수의 질소 및 인의 제거

박종호* · 이원호¹ · 조규석 · 황규덕

충청북도내수면연구소
¹충주대학교 건설도시공학과

Nitrogen and Phosphorus Removal in Effluent from the Fish Culture farm by Using Water Lettuce, *Pistia stratiotes*

Jong-Ho Park*, Won-Ho Lee¹, Kyu-Seok Cho and Gyu-Deok Hwang

Department of Inland Fisheries Research Institute, Chung Cheong Buk-Do, Chung-ju, 380-250, Korea
¹Department of Construction & Urban Engineering, Chung Ju National University, Chung-ju, 380-702, Korea

Effluent from farm trefish contained high concentrations of nitrogen and phosphorus, such kinds of nutrients were released to the environment without proper treatment and thses increased the pollution of the environment. We evaluated the conventional treatment system with cost effective ecotechnologies for the removal of nutrients. Water lettuce chambers were investigated under the various experimental conditions to improve the efficiency of N&P removal and the treatment of from aquaculture effluent. In this research, six water lettuce chambers (80 liter each) received combination of aquaculture wastewater effluent at hydraulic retention times (HRTs) of 1, 2, 4 and 8days. The water lettuce chambers operated at a 8 day HRT investigated for aquaculture effluent (1st) showed average removal efficiency, BOD, T-N, T-P of 92.8, 79.0 and 93.6% on average respectively.

Keywords: Nitrogen & Phosphorus removal, Water lettuce, Hydraulic retention time

서 론

우리나라의 노지 양식장은 계절적으로 저수온기에는 수온이 너무 낮기에 양식어류의 생산에 제한을 받고 있다. 또한 양식장의 자가오염배출은 식수와 농업 및 공업용수로 사용되는 호소나 하천의 수질을 오염시키기도 하므로 양식장 배출수에 대한 규제가 강화되고 있다. 이러한 어려운 환경에서 우리나라 어류 양식업의 발전을 위한 해결책으로서 순환여과식 사육시스템을 이용한 고밀도 사육시스템이 제시되고 있다. 하지만 이러한 시설들의 경우 대부분이 초기 투자비가 많이 들고 기술적인 면을 요구하는 사항이 많아서 소규모 양어가 들에게 경제적인 부담을 최소화하고 앞으로 곧 시행될 양어장 배출수 수질기준에 대처하기 위한 새로운 방안이 모색되어야 하겠다.

수초를 이용한 폐수처리기는 자연 친화적이며, 경제적인 측면에서 최근 관심을 받고 있는데 하수(Gearheart and Finney, 1982; Hantzsche, 1985) 뿐만 아니라 섬유나 제지산업폐수(Davies and Cottingham, 1994; Kazunori et al., 1994), 광산폐수(Noller et al., 1994) 및 폐기물 침출수(Martin and Moshiri, 1994)등 매우 다양한 폐수처리에 이용되고 있다.

외국에서는 폐수처리용 수초식물로서 흔히 부레옥잠(Water Hyacinth)이나 부평초(Duck weed), 갈대(Reeds) 및 부들계지(Cattails) 등 다양한 식물을 사용한다. 우리나라에서도 수질정화에 사용된 바 있는 부레옥잠은 성장이 빠르고 유기물질 제거(전 등, 1993; 공, 1997), 중금속 제거에 대한 연구(Kim, 1994)가 수행된 바 있지만 양어장 배출수의 정화에 적용한 사례는 거의 없다. 부레옥잠은 온도에 민감하여 동절기에는 적용이 어려우며, 수확된 부레옥잠의 최종 처분이 마땅치 않다는 문제점을 갖고 있다. 그러나 물상추는 결빙기를 제외하고는 비교적 저온에서도 성장 가능한 식물이다.

따라서, 본 연구에서는 비교적 저온에서도 성장 가능한 물상추를 이용하여 양어장의 사육수 및 배출수로부터 질소와 인 제거 및 조류 발생 억제 가능성을 조사하고 양어장 배출수의 적정처리 방법을 연구할 목적으로 실시하였다.

재료 및 방법

실험재료 및 방법

본 연구에 사용된 실내 실험용 재배조는 두께가 1 cm인 플라

*Corresponding author: jhpark@cb21.net



Fig. 1. Photograph of water lettuce growing chamber.

스티폼을 이용하여 폭 62 cm, 높이 60 cm, 길이 86 cm로 된 직육면체형 재배조 6개를 설치하였다. 물상추의 높이를 고려하여 유입 및 유출구는 실험용 재배조 상부로부터 10 cm 정도 밑에 설치하였으며, 반응조의 실용적용은 120 L가 되도록 제작하였다. 단회로 현상(short circuit)을 방지하기 위하여 재배조의 모서리에 방류판을 설치하였다(Fig. 1). 여러번의 시행착오를 통하여 재배조의 부피가 일정치 못한데서 오는 복잡성을 해소하기 위하여 6개 실험용 재배조의 부피를 80 L로 일정하게 고정하여 실험하였다. 실내실험은 충북내수면연구소에서 실시하였고, 실내실험에

사용된 유입수는 연구소내 사육조의 1차 및 2차 배출수이며 6개월간 분석한 이들의 특성은 Table 1과 같다.

각각의 실험용 재배조에 어린 물상추(줄기에서 뿌리까지 길이가 대략 10~15 cm)를 식재하였으며 초기 식재 밀도는 재배면적 m²당 평균 1.5 kg이 되도록 하였다. 재배면적을 결정하기 위한 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time; HRT)은 1일, 2일, 4일, 8일로 운전하였다. 측정항목으로는 Total suspended solids(TSS), Total chemical oxygen demand(TCODcr), Total Kjeldahl nitrogen(TKN), Ammonia nitrogen(NH₄⁺-N), Total phosphorus(T-P), Ortho phosphate(PO₄³⁻-P) 등이며, SCOD 측정은 시료를 0.45 μm membrane filter로 여과한 여액을 이용하여 측정하였고, 그 외의 측정방법은 Standard Methods(APHA et al., 1989)에 준하여 분석하였다. 수온, pH, DO는 각각의 재배조에서 매일 측정하였고, TKN, NH₄⁺-N과 T-P 및 PO₄³⁻-P, BOD, COD, TSS, VSS는 주 3회로 시료를 채취하여 분석하였다. Table 2에 시료분석에 사용한 실험방법을 나타내었다.

결과 및 고찰

유기물질 제거(BOD와 COD)

물상추를 이용한 수생식물처리에서 콜로이드성이나 용존성

Table 1. Characteristics of influent

Items	Concentration (mg/L)	
	1'st	2'nd
pH	7.10±0.36	7.05±0.37
Biological oxygen demand (BOD)	38.50±18.12	16.20±8.58
Chemical oxygen demand (COD)	114.20±31.30	54.20±5.30
Total Phosphorus (T-P)	1.25±0.53	0.44±0.19
PO ₄ ³⁻ -P	0.97±0.40	0.32±0.15
Total Kjeldahl nitrogen (TKN)	21.80±2.10	12.00±1.60
NH ₄ ⁺ -N	15.80±3.60	6.30±1.20
Nitrate (NO ₃ ⁻ -N)	0.43±0.20	4.69±1.02
Total Nitrogen (T-N)	23.10±0.36	18.50±0.37
Total suspended solids	106.10±27.42	36.60±8.64
Volatile suspended solids	45.70±11.60	22.10±2.23

Table 2. Analytical methods and instruments

Items	Experimental method	Instrument
NH ₄ ⁺ -N	Ammonia-Selective Electrode method	Orion Model 720A
NO ₂ ⁻ -N	Colorimetric method	Spectrophotometer (HP 8424)
NO ₃ ⁻ -N	Ultraviolet spectrophotometric screening method	Spectrophotometer (HP 8424)
T-N	TKN+NO ₂ ⁻ -N+NO ₃ ⁻ -N	-
PO ₄ ³⁻ -P	Ascorbic acid method	Spectrophotometer (HP 8424)
T-P	Persulfate digestion method	Spectrophotometer (HP 8424)
pH	Glass electrode method	Orion 290A
Dissolved oxygen	Galvanic electrode method	YSI 52
BOD ₅	Winkler method azide modification	-
Suspended solids	Filtration	Glass fiber filters (GF/C)
Chemical oxygen demand	K ₂ Cr ₂ O ₇ Open reflux, titrimetric method	-

Table 3. Results of the experiments (1'st)

Items	Influent		Effluent			
HRT (day)	-	1	2	4	8	
OLR (kg COD/ha-day)	-	480	269	118	59	
(kg BOD/ha-day)	-	185	127	48	24	
W.T. (°C)	-	21.1	23.9	24.3	24.8	
pH	-	7.31	7.26	7.22	7.16	
DO (mg/L)	-	5.02	2.55	2.67	2.71	
TCOD (mg/L)	114.20	40.08(64.8%)	38.03(66.6%)	29.46(74.2%)	29.12(74.5%)	
SCOD (mg/L)	65.15	30.88(52.6%)	22.22(65.9%)	15.25(76.6%)	14.79(77.3%)	
BOD (mg/L)	38.50	5.08(86.8%)	4.35(88.7%)	3.39(91.2%)	2.77(92.8%)	
TSS (mg/L)	106.10	25.15(76.3%)	37.67(64.5%)	12.31(88.4%)	9.02(91.5%)	
VSS (mg/L)	45.70	9.28(79.7%)	4.98(89.1%)	4.71(89.7%)	3.20(93.0%)	
TKN (mg/L)	21.80	10.86(50.2%)	6.78(68.9%)	4.69(78.5%)	3.82(82.5%)	
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	15.80	8.75(44.6%)	2.34(85.2%)	1.22(92.3%)	0.54(96.6%)	
T-N (mg/L)	23.10	13.81(40.2%)	8.11(64.9%)	6.56(71.6%)	4.85(79.0%)	
PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	0.97	0.38(60.8%)	0.14(85.6%)	0.06(93.8%)	0.03(96.9%)	
T-P (mg/L)	1.25	0.47(62.4%)	0.22(82.4%)	0.13(89.6%)	0.08(93.6%)	

*() Removal efficiency

Table 4. Results of the experiments (2'nd)

Items	Influent		Effluent			
HRT (day)	-	1	2	4	8	
OLR (kg COD/ha-day)	-	185	116	50	25	
(kg BOD/ha-day)	-	87	53	23	11	
W.T. (°C)	-	20.8	23.6	24.4	24.7	
pH	-	7.03	7.25	7.26	7.25	
DO (mg/L)	-	5.98	3.38	3.24	3.22	
TCOD (mg/L)	54.20	26.56(51.0%)	22.82(57.9%)	19.62(63.8%)	15.99(70.5%)	
SCOD (mg/L)	30.90	16.56(46.4%)	14.46(53.2%)	11.12(64.0%)	8.47(72.6%)	
BOD (mg/L)	16.20	2.87(82.3%)	2.24(86.2%)	1.94(88.0%)	1.31(91.9%)	
TSS (mg/L)	36.60	4.43(87.9%)	6.04(83.5%)	3.88(89.4%)	3.11(91.5%)	
VSS (mg/L)	22.10	2.90(86.9%)	3.29(85.1%)	2.19(90.1%)	1.90(91.4%)	
TKN (mg/L)	12.00	7.73(35.6%)	4.10(65.8%)	3.88(67.7%)	3.05(74.6%)	
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	6.30	3.28(47.9%)	0.81(87.1%)	0.67(89.3%)	0.39(93.8%)	
T-N (mg/L)	18.50	11.80(36.2%)	11.17(39.6%)	10.51(43.2%)	8.51(54.0%)	
PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	0.32	0.08(75.0%)	0.03(90.6%)	0.02(93.8%)	0.01(96.9%)	
T-P (mg/L)	0.44	0.10(77.3%)	0.05(88.6%)	0.04(90.9%)	0.03(93.2%)	

*() Removal efficiency

BOD는 부유상태나 혹은 부착상태에 있는 미생물에 의해 직접 흡수 분해되며 입자성 BOD는 식물의 뿌리에 흡착되면서 박테리아에 의해서 분해된다. 또 침강성 고형물이 침강하면서 이것에 수반하고 있는 많은 유기물을 제거하고있다. 본 연구에서 1차와 2차 배출수를 연속시료로 주입하고 수리학적체류시간(HRT)을 1일에서 8일까지 변화시키면서 실내 재배조내의 BOD 제거 효율을 조사한 결과를 Table 3에 나타난 바와 같다. 수리학적 체류시간이 증가하면 오염물질의 제거효율이 증가하는 보편적인 경향을 보였다. 2차 배출수(평균 BOD=16.20 mg/L)를 연속

시료로 한 재배조에서 BOD 제거효율은 82~92%, 1차 배출수(평균 BOD=38.50 mg/L)에서는 87~93%로써 2차 배출수에서보다 1차 배출수에서 재배한 물상추의 BOD 제거율이 약 5%정도 높았다. 또한, HRT를 1일에서 8일로 운영하면서 제거효율의 변화는 1차 배출수를 연속시료로 한 실험재배조에서는 약 6%차이, 2차 처리수에서는 약 10%의 차이를 보이고 있으며, 특히, HRT 1일과 2일 사이에서의 BOD 제거율 차이는 2~4% 수준으로써 미비하였다. 따라서 물상추 처리시스템의 처리목표에 따라 다르겠지만 HRT를 짧게 유지하는 것이 결국 재배지

면적을 줄일 수 있어 경제적이라고 사료된다.

Wolverton and McDonald(1979)는 유입수 BOD가 50 mg/L 이었고, HRT가 7일인 경우 야외실험에서 72%의 BOD 제거율을 얻었고, Dinges(1979)는 유입수의 BOD 46 mg/L로 4.5일간 HRT를 거친 후 87%의 제거효율을 얻었으며, Reed et al.(1981)은 유입수 BOD 13 mg/L로 HRT 11일에서 77%의 제거효율을 얻었다고 보고하여 비록 실내 실험이지만 본 연구결과는 우수한 것으로 사료된다.

COD 제거율도 BOD와 마찬가지로 HRT가 증가함에 따라 증가하나 BOD 제거효율에 훨씬 미치지 못하였다. HRT가 1일에서 8일로 증가되면서 유입수의 평균 TCOD가 114.20 mg/L인 1차 배출수를 연속시료로 주입한 실험 재배조에서 TCOD 제거율은 65~75%, 그리고 유입수의 평균 TCOD가 54.20 mg/L인 2차 배출수에서는 51~71%의 TCOD 제거효율을 나타내었다. HRT가 증가되면서 제거효율의 변화는 1차 배출수를 연속시료로 한 실험재배조에서는 약 10% 차이를, 2차 배출수에서는 약 20%의 차이를 보였다. 유입수의 Soluble COD(SCOD)는 1차 배출수의 경우 TCOD의 약 42.4%, 2차 배출수의 경우는 53%로써 2차 배출수의 용존 COD부분이 더 많았다. 하지만 SCOD 부분이 42%에서 53%의 수준임에도 불구하고 처리효율은 TCOD와 비슷하였다. 1차 배출수를 연속시료로 주입한 실험재배조에서 SCOD 제거율은 HRT가 1일 일때 53%였고 HRT가 8일일 때는 77%로 나타났다.

SS제거

평균 TSS 농도 106.10 mg/L인 1차 배출수를 연속시료로 주입한 실험 재배조에서 TSS의 제거효율은 HRT가 1일 일 때 76%에서 HRT가 8일 일 때는 92% 까지 증가하여 HRT에 따라 15.2%의 제거효율 차이를 보였다. 반면 평균 TSS 농도가 36.60 mg/L인 2차 배출수에서는 HRT가 1일에서 8일로 변하면서 제거효율은 거의 변하지 않은 채 88%를 유지하고 있는데 이는 1차 배출수와 2차 배출수의 TSS 농도차에 기인된 것으로 2차 배출수가 HRT 1일 이상 증가하더라도 TSS 침강효율에는 거의 차이가 없음을 간접적으로 보여주었다.

Wolverton and McDonald(1979), Dinges(1979) 등의 연구자료를 종합해 보면 HRT 10일 이내로 유지되는 부레옥잠 시스템에서 TSS 제거율의 범위는 60~93% 까지 조사되었고 평균 제거율은 74%를 얻을 수 있는데 본 연구결과는 이보다 높게 나타났다. 유입수의 VSS는 1차 배출수의 경우 TSS의 42%, 2차 배출수의 경우는 51%로써 2차 배출수가 더 많은 휘발성 고형물을 함유하고 있다. 오염물 처리의 주된 작용이 일어나고 있는 뿌리는 뿌리 줄기에 잔뿌리가 많이 붙어 있는 형태로 미생물의 접촉여재를 제공하고(Weber and Tchobanoglous, 1984), 미생물들은 뿌리를 통해 확산되는 산소를 공급받는다(Stowell et al., 1980). 본 연구결과 대부분 1 μm 이하의 Bacterial cell 이거나 Colloidal particle 로써 흡착, 여과 분해에 의한 것으로 사료된다.

N 제거

본 연구에서 HRT를 1일에서 8일까지 변화시키면서 총질소 제거율에 대해서 조사한 결과 평균 T-N 농도가 23.10 mg/L인 1차배출수를 연속시료로 주입한 실험재배조에서 HRT 1일 일 때 40% 제거율에서 HRT 8일 일 때 79% 제거율로 증가하여 39%의 차이를 나타내었다. 반면 평균 T-N농도가 18.50 mg/L인 2차 배출수를 연속시료로 주입한 실험 재배조에서는 HRT 1일 일때 36% 제거율에서 HRT 8일 일때 54%로써 18%의 차이를 보이고 있어 HRT 변화에 따른 총질소제거율 차이는 1차 배출수 재배조가 2차 배출수 재배조보다 약 2배 정도 높았다.

그 이유는 NH₄⁺-N 농도 차이가 현저한 상태에서 질산화 반응속도가 비슷하면 질산화량은 큰 차이를 나타내기 때문에 즉 유입 TKN중 NH₄⁺-N은 1차 배출수가 72.5%, 2차배출수는 52.5%로써 1차 배출수는 총질소중 유기질소 비율이 27.5%정도로 작아서 질산화를 위한 기질인 NH₄⁺-N이 2차 배출수보다 2배 이상 함유하고 있음을 알 수 있었다. HRT변화에 따른 NH₄⁺-N 제거율은 1차 배출수 45~97% 제거율과 2차 배출수 48~94% 제거율로 유사한 제거율을 나타내었다.

Wolverton and McDonald(1979) 연구에 의하면 HRT를 3.5~15.5일로 변화할 때 TKN 제거율은 54~76% 범위로 보고하고 있고, Dinges(1979)는 HRT 4, 5일에서 57% 질소제거율을 얻었다. 본 실험에서 얻은 결과는 비교적 기 보고된 값 보다 높은 결과를 보여 주고 있다.

P 제거

평균 총 인 농도가 1.25 mg/L인 1차 배출수를 연속시료로 하였을 때 HRT 1일에서 62%의 총인제거율을, HRT 8일에서 93.6%의 제거율을 보여 HRT가 증가함에 따라 제거율에 차이가 있음을 알 수 있었다. 평균 총 인의 농도가 0.44 mg/L인 2차 배출수에서도 HRT를 8일까지 증가시켰을 경우 16%의 제거율 차이를 보였다.

유입수의 총인 중 PO₄³⁻-P는 1차 배출수 77.6%, 2차 배출수가 72.7%를 함유하고 있어, 대부분이 무기인으로써 각종 화학 반응이나 식물체의 흡수에 용이한 형태였다. 1차 처리수와 2차 처리수에서 HRT에 따른 PO₄³⁻-P 제거 양상도 T-P와 거의 유사하였다.

소규모 양어장 배출수 처리를 위한 최적조건 및 성능평가

수생식물 재배 규모를 선정하는데 가장 중요한 인자는 유기물 부하율(Organic Loading Rate; OLR) 혹은 유기물 면적 부하이다. 즉 단위면적당 하루에 어느 정도 유기물의 질량이 부하되느냐를 의미하는 것이다.

BOD부하가 HRT 8일 일 때 11 kg BOD/ha·day으로 92% BOD 제거율을 나타내고 있고 HRT 1일 때 185 kg BOD/ha·day으로 87%를 보이고 있어 BOD부하가 BOD제거율에 큰 영향을 미치지 않고(약 5% 제거율 차이) 거의 무관함을 알 수 있었다(Fig. 2).

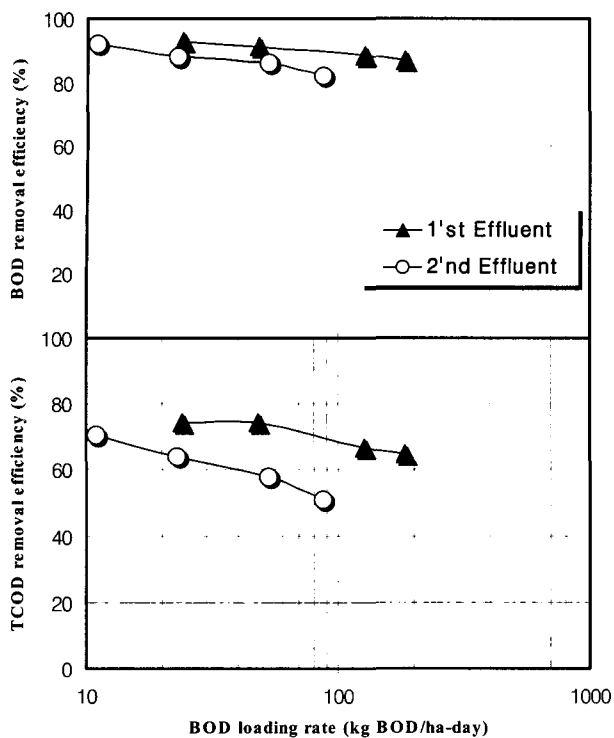


Fig. 2. BOD loading rate versus BOD and TCOD removal efficiency.

만약 양어장에서 1일 발생하는 사육수량을 500톤으로 가정하였을 경우 이 사육수의 BOD를 본 연속실험 조건을 갖춘 물상추 시스템으로 90% 제거한다면 540 m²의 재배면적이 요구될 것으로 사료된다.

요 약

양식장에서 생성되는 어류의 노폐물이나 미섭취되고 남은 사료분은 고농도의 질소와 인을 함유하고 있으나 미처리된 상태로 처리하고 있어 그에 따른 처리방안이 요구된다. 본 연구에서는 기존의 처리공정의 대응으로 생태공학적인 처리로서 경제적으로 질소와 인 제거를 위해 실내재배조에 물상추를 적용하였다. 양식장 배출수 처리를 위한 생물여과상의 처리효율을 향상시키기 위하여 물상추 여과조를 설치하여 다양한 조건하에 시도되었다. 실험 재료인 수초는 물상추를 재배하였고, 6개의 수조(62×60×86 cm)에 재배조 용량이 80 L가 되도록 채우고 수리학적 체류시간(hydraulic retention time; HRT)을 1, 2, 4, 8일로 하여 운영하였다. HRT 8일인 경우 1차 배출수를 대상으로 하였을 경우 BOD, T-N, T-P의 제거율은 92.8, 79.0 및 93.6%로 각각 나타났다.

참고문헌

AHPA., AWWA and WPCF, 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed. American Pub-

- lic Health Association, 1532 pp.
- Davies, T. H., and P. D. Cottingham, 1994. The use of constructed wetlands for treating industrial effluent(textile dyes), *Wat. Sci. Tech.*, **29**(4): 227-232.
- Dinges, R., 1979. Development of Hyacinth wastewater treatment systems in texas: (in) *Aquaculture Systems for Wastewater Treatment. Seminar Proc. and Eng. Assessment. U.S. EPA, Washington, D. C.* pp. 193-231.
- Gearheart, R. A., and B. A. Finney, 1982. Utilization of wetlands for reliable low-cost wastewater treatment - A pilot project, IV World Congress on Water Resources, Buenos Aires, Argentina, September 5-9.
- Hantzsche, N. N., 1985. Ecological consideration in wetland treatment of municipal wastewater, *Wetland systems for wastewater treatment: Engineering Application*, Van Nostrand Reinhold Co. NY. pp. 7-25.
- Kazunori, H., D. J. Frederik and J. A. Moore, 1994. Microbial ecology of constructed wetlands used for treating pump mill wastewater. *Wat. Sci. Tech.*, **29**(4): 223-239.
- Kim, J. Y., 1994. Heavy metal and mitigating effect of heavy metal toxicity to carp by Water Hyacinth. M.S. thesis, Seoul City Univ., Korea 120 pp (in Korean).
- Martin C. D. and G. A. Moshiri, 1994. Nutrient reduction in an in-series constructed wetland system treating landfill leachate. *Wat. Sci. Tech.*, **29**(4): 267-272.
- Noller, B. N., P. H. Woods and B. J. Ross, 1994. Case studies of wetland filtration of mine wastewater in constructed and naturally occurring systems in Northern Australia. *Wat. Sci. Tech.*, **29**(4): 257-265.
- Reed, S. C., R. Bastian and W. Jewell, 1981. Engineers assess aquaculture systems for wastewater treatment: an overview. (in): *Aquaculture Systems for Wastewater Treatment: Seminar Proceedings and Engineering Assessment. U.S. EPA, EPA 430/9-80-006, NTIS No. PB 81-156705.* pp. 1-12.
- Stowell, R., R. Ludwig, J. Colt, and G. Tchobanoglous, 1980. Towards the rational design of aquatic treatment system. Paper presented at the ASCE Covention, 14-18 April, Portland, Oregon, Department of Civil Engineering University of California, Davis, California.
- Weber, A. S. and G. Tchobanoglous, 1984. Nitrification in water hyacinth treatment system. *J. Environmental Engineering Division, ASCE.* **111**(5): 699-713.
- Wolverton, B. C. and R. C. McDonald, 1979. Upgrading facultative wastewater lagoons with vascular aquatic plants. *JWPCF.*, **51**: 305-313.
- 공동수, 1997. 대형 수생생물을 이용한 수질개선 기법의 현황과 전망 -국내사례를 중심으로- 제198회 학연산연구교류회, 한국과학재단, 18 pp.
- 전만식, 김범철, 1993. 부레옥잠(*Eichhornia crassipes*(Mat.)Solms)의 성장특성과 영양염류 제거효율에 관한 연구. 1993년 환경종합 학술대회요약집, pp. 303-308.

원고접수 : 2003년 5월 19일

수정본 수리 : 2003년 9월 5일

책임편집위원 : 이정열