

부레옥잠과 미나리를 이용한 연속식 하수처리에서 COD, N 및 P의 제거

박진식

경운대학교 환경공학과
(2002년 5월 13일 접수, 2002년 6월 11일 수리)

Sewage Treatment Using Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and Watercress (*Oenanthe javanica*)

Jin-Sick Park (Dept. of Environmental Engineering, Kyungwoon University, Gumi 730-850, Korea)

ABSTRACT: This study was carried out to investigate sewage treatment efficiencies using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and watercress (*Oenanthe javanica*). In the hyacinth system, about 30% of COD introduced was removed during 2 days of hydraulic retention time, and about 30~50% of COD was removed in the watercress system during 1.2~2 days of hydraulic retention time. Therefore, COD loading of 76~170 kg COD/ha · day was removed during 2~3 days of hydraulic retention time at the 0.18 m² area in the water hyacinth-watercress continuous system. Also 40~50% of N and P in the sewage were removed in the tested water hyacinth-watercress system. Although COD, N and P concentrations in the final effluent were still higher than the limits of waste discharge, applicability of this waste water treatment system should be further investigated as an alternative method for small scale sewage treatments.

Key words: sewage treatment, water hyacinth, watercress, hydraulic retention time

서 론

수생식물에 의한 폐수처리란 자연 혹은 인공 습지에서 부레옥잠, 피막이풀, 미나리, 개구리밥 등의 수생식물을 활용하여 폐수중의 오염물질을 제거 및 처리하는 방법이다¹⁾. 이 처리방법은 식물과 미생물의 상호 공생 및 상승 작용을 통해 이루어진다. 대형 수생식물의 근계(root system)는 미생물의 매질이 되며 수중의 입자성 물질과 전기적으로 반대의 전하를 띄어 입자성 물질을 흡착시킴으로써 미생물의 먹이원을 제공하고, 통기 조직을 통해 산소를 근계로 전달시켜 미생물의 유기물 분해활동을 촉진시키며, 미생물의 유기물분해를 통해 생성된 영양염류는 식물의 영양원이 될 뿐만 아니라 식물이 합성한 유기물과 대사물질은 다시 미생물의 먹이원이 된다. 또한 중금속이나 방사성 물질을 흡수하거나 때로 유기물질을 직접 흡수하여 효소활동으로 대사하기도 한다²⁾.

이상의 기능 외에도 대형 수생식물은 근계에서 물리적인 여과를 통해 수중의 입자성 물질을 흡착시키며, 잔사성 소비자의 서식처를 제공하여 유기물질의 분해를 촉진시킨다. 또한

미생물에 대한 식물체의 합성유기물 및 대사물질의 공급기능 낮은 유기 부하 조건에서는 식물체가 근계의 미생물 군집을 안정적으로 유지시키는 완충계가 된다고 볼 수도 있다. 처리장에서의 수처리는 1960년대 중반에 대형 수생식물에 의한 유기물질의 처리를 목적으로 부상되었으며 수오염에 대한 완충지대로서 자연습지의 중요성은 1970년대 초반에 대두되었다.

이 분야의 초기 연구단계는 미국 NASA의 부엽식물 처리 시스템 floating plant treatment system)과 토양-정수식물 여과처리 시스템(rock/emergent plant treatment system), 독일 MAX Plank 연구소의 정수식물 라군 처리 시스템(emergent plant lagoon treatment system)이 대표적이다. NASA에 의한 일련의 연구는 폐쇄 생태학적 생명 부양계 프로젝트(CELSS, Closed Eco-logical Life Support Systems)에서 위성의 폐쇄 환경내 수질과 대기질의 개선을 위한 부엽식물의 처리시스템을 고안하면서 시작되었으며, 그 이후는 토양과 정수식물 근계의 여과처리 기능을 극대화한 토양-정수식물 여과처리시스템으로 이어졌다³⁾. 그 후 대형 수생식물에 의한 유기물 및 영양염류의 제거는 수처리장에서 종래의 물리화학적 및 생물학적 처리 시스템이 가지는 운영비 문제점을 보완함은 물론 시스템의 자연성과 수확물의 재이용성이 높다는 점에서 활발한 연구가 진행되었다^{4,6)}.

국내에서 대형 수생식물을 이용한 수질정화 연구는 1980

*연락 저자:

Tel: +82-54-479-1235 Fax: +82-54-479-1333

E-mail: jspark@kyungwoon.ac.kr

년대 이후 시작되었는데, 그 유형은 호수에 자생하는 식물대의 정화능 평가나 오염된 호수 또는 하수에 인위적인 식물 식재를 통한 정화능 실험으로 크게 구분된다. 현재 국내에서 수처리에 범용으로 적용되고 있는 수생식물은 도입 식물인 부레옥잠인데, 중남미 원산인 이 식물이 국내에 언제 어떤 경로를 통해 도입되었는지는 확인하기 어렵다고 한다. 현재 폐·하수처리나 양식장 배수의 정화, 군부대 생활하수의 처리 등에 활용되고 있으나 저비용 및 처리공정의 안전성과 같은 장점과 아울러, 유기 및 중금속 농도에 따른 적용상 제한, 처리용량에 따른 부지확보 문제, 동한기 처리식물의 유지관리, 과잉 생산된 식물체의 주기적 제거, 제거물의 재이용에 대한 기술 확보 등이 선결되어야 하는 제한점을 가지고 있다⁷⁾.

따라서 이 방법은 모든 처리시스템에 보편적으로 적용될 수 있는 방법이 아니어서 고농도 폐하수의 경우에는 유입수에 대한 전처리가 요구되며, 부지 요구도가 커서 처리용량이 소규모로 제한되고, 동한기 처리를 위해서는 온실이 필요하며, 제거물의 사료 및 퇴비화 공정을 갖춘 공장이 근접하여 수송이 가능하거나, 유기비료로 환원할 수 있는 농경지가 주변에 조성되어 재활용의 고리가 사전에 협의되어야만 한다. 이러한 시스템이 활용 가능한 적지로서는 소규모 농축산지나 열대어 양식장 및 최근 공공수역의 하천부지에 많이 조성되어 있는 각종 요식업소를 꼽을 수 있다. 대규모의 기계적 처리시스템을 운영할 수 없는 농축산지나 단위 요식업소는 간단한 침전지에 이어 수생식물 온실 처리조를 구성하여 오수를 처리할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 부레옥잠과 미나리를 이용하여 유입수의 농도 및 체류시간의 변화에 따른 유기물질 및 영양염류의 처리효율을 조사함으로써 소규모 하수처리에 적합한 운전조건을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

실험재료

본 실험에 사용된 부레옥잠은 물옥잠과에 속하는 수생식물로서 장림하수처리장의 최종침전지에 있는 부레옥잠을 채취하였으며, 미나리는 녹산 병방에 있는 미나리밭에서, 그리고 좁개구리밥은 김해시 근교 논에서 채취하였으며 실험하기 전날에는 순응기간으로 수도수에 48 hr 두었으며, 실험전에는 증류수로 수회 씻어 사용하였다. 실험기간은 최적성장조건을 갖추는 7월~10월에 걸쳐 실험하였고 실험에 이용된 원수는 인공하수를 제조하여 이용하였다.

실험장치 및 운전

실험장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 부레옥잠과 미나리를 이용하여 혼합조를 구성하였다. 유입수가 부레옥잠조를 거친 후에 다시 미나리조를 거치도록 설계하였다. 실험조는 20(W)×90(L)×25(H) cm 크기의 투명유리수조를 이용하여, 유입구 지역에는 폐수가 고르게 살포되도록 가로 20 cm, 세로

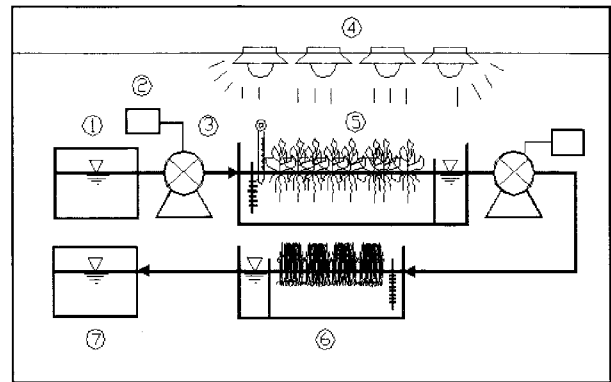


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus. ① Influent, ② Timer, ③ Pump, ⑤ Water hyacinth, ⑥ Watercress and ⑦ Effluent.

15 cm, 두께 3 mm의 투명 아크릴 판에 직경 7 mm인 구멍을 일정하게 뚫은 정류판을 설치하였으며, 유출구 지역에는 가로 30 cm, 세로 20 cm의 웨어를 설치하여 다음 조에 고형물이 유입되지 못하도록 하였다. 후속처리로 설치된 미나리조는 20(W)×60(L)×25(H) cm로 제작하였으며, 역시 정류판과 웨어를 설치하였다. 폐수 주입을 위하여 정량 pump와 timer를 설치하였으며, 검은 폴리에틸렌 비닐로 만든 온실조에서 실험하였다. 부레옥잠은 길이(줄기에서 뿌리까지)가 25~30 cm인 중간 크기를, 그리고 미나리의 길이는 25~30 cm의 크기로 줄기와 잎을 제거하여 사용하였으며, 생육밀도는 7.5 kg/m²로 하였다. 실험기간 중의 실험실조 내의 평균온도와 상대습도는 18.5~22℃, 50~65%이었으며, 조도는 조도계(Model DM-28, TAKEMURA ELECTRIC WORK LTD., Japan)로 측정하여 16 시간 광주기를 주어 3000 lux로 유지 시켰다. 광조건은 삼파장 램프(220 V/60 Hz)를 실험조 수면으로부터 15 cm 높이에 설치하였다.

각 반응조별로 HRT (Hydraulic Retention Time)는 부레옥잠조(EC)의 경우에는 2 day로 고정시켰으며 미나리조(OJ)의 경우에는 4단계에 걸쳐서 HRT를 달리하면서 실시하였는데, OJ 1, 2, 3 및 4는 각각 2, 1.8, 1.4 및 1.2 day로 하였다. COD 부하는 부레옥잠조에서 133~160 kg COD/ha·day로 일반적인 농촌 하수의 농도보다 높게 하였으며, 미나리조의 경우에는 OJ 1, 2, 3 및 4에서 각각 81.67, 92.64, 100.22 및 105.56 kg COD/ha·day로 HRT에 따라 점차적으로 농도를 높이면서 운전하였으며, 유입수의 특성은 Table 1에 나타내었다. 각종 분석은 환경오염공정시험법 및 Standard Methods에 준하여 실시하였다^{8,9)}.

결과 및 고찰

HRT에 따른 pH 및 DO변화

pH가 3.5 이하의 강산이나 10.0 이상의 강염기에서는 식물 형태학적 이상을 일으켜 1주 이내에 사멸할 수 있기에 운전

Table 1. Characteristics of the influent sewages

Characteristics	Water hyacinth		Watercress	
	Range	Average	Range	Average
COD _{cr} (kg/ha · day)	133~160	143.11	81.67~105.56	95.02
Temp (°C)	18.5~22.5	19.5	18.5~22.5	19.7
pH	6~8	7.2	6~8	7.28
DO (mg/L)	3.9~4.1	4.02	1.0~2.0	1.8
COD _{cr} (mg/L)	300~360	310	190~250	224
T-N (mg/L)	30~37.6	32.9	26.5~29.9	30.27
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	15~19	17	12.11~15.95	13.2
T-P (mg/L)	6.8~9.6	8.30	5.9~8.1	7.28
PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	1~3	2.1	1~3	1.6

초기에 pH를 6~8 사이로 조절하였으며, 운전기간동안 pH는 약간의 변화만 있을 뿐 영향은 없었다. DO는 운전초기에는 4.0 mg/L 전후의 범위를 보였으나 재배 하루 후에는 1.0 mg/L를 그리고 그 이후부터는 0.5 mg/L 이하의 낮은 농도를 보였다. 하지만 후속처리조인 미나리조에 유입되기 전의 폐수는 약간의 저류기간을 가졌기에 1.0~2.0 mg/L의 DO 상태를 보였다.

HRT에 따른 유기물 제거

운전 경과 일수에 따른 부레옥잠, 미나리의 HRT에 따른 COD 제거효율을 Fig. 2에 나타내었다. 그림과 같이 부레옥잠 조에서 COD의 초기 유입 농도는 260~360 mg/L로 평균 310 mg/L의 농도로 유입시켰다. 운전개시 2일 후의 최종 유출수 농도는 145~170 mg/L로 평균 160 mg/L로 약 50%의 제거 효율을 보였다. 또한 주입 후 식물체의 잎이 수중에 침전되어 유기물을 환원함에 따라 증가하였으나, 일조시간이 끝난 후 저류기간동안 어느 정도 안정화되어 HRT 1 day 이후부터는 유기물질의 제거율이 증가하기 시작했다. 부레옥잠조 보다 하루 늦게 가동한 미나리조는 부레옥잠조에서 평균 30% 제거된 후 유입되었으며 그 농도는 190~250 mg/L의 농도 범위를 보였다. 미나리조에 유입된 폐수는 그 부하를 HRT가 짧아짐에 따라 점점 높게 설계하였는데, 245~277 kg COD/ha · day로 유입되었다. HRT가 1.8~2.0 day인 유출수의 농도가 140~161 kg COD/ha · day로 나타나 그 제거율이 평균 40% 전후를 나타냈으며, 총 제거율은 47~54%를 보여 평균 50% 이상의 제거율을 보였다. 하지만 유기물 농도부하가 280 kg COD/ha · day 이상이고, HRT가 1.8 day 미만으로 짧아질수록 미나리조 자체의 제거율은 평균 30%, 총 제거율 30% 미만의 낮은 제거율을 보였다.

질소 제거

Total N의 경우 부레옥잠은 초기 유입 농도가 30~37 mg/L로 그 부하가 19~32 kg N/ha · day로 유입시켰다.

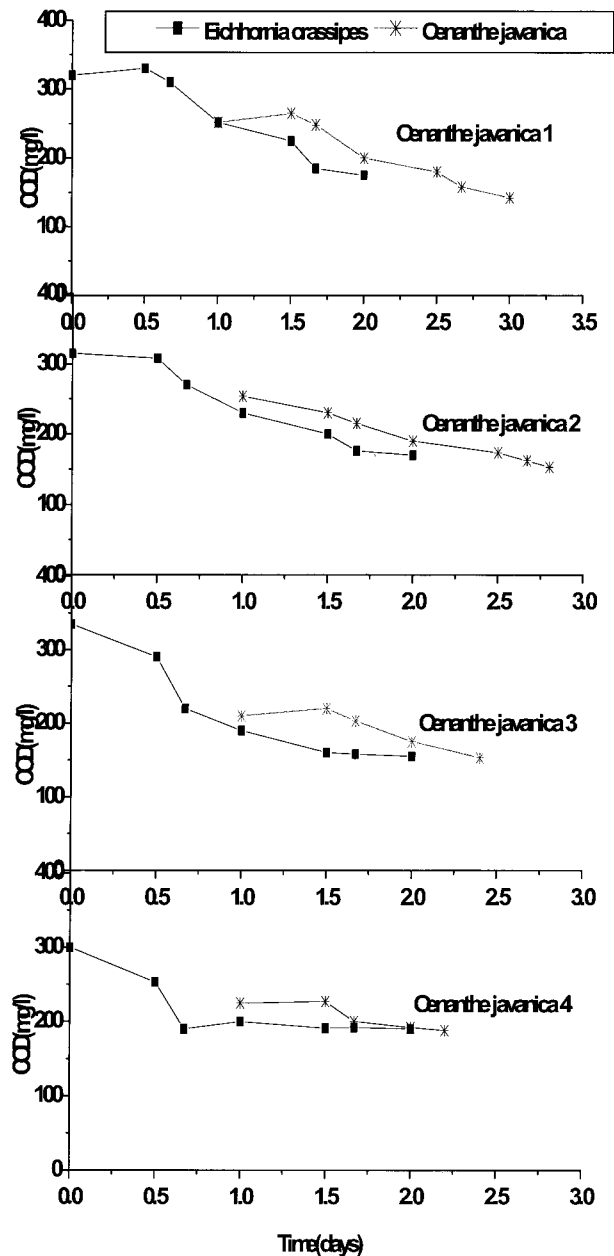


Fig. 2. Variation of COD concentration with operation time.

HRT 2 day 후 제거율은 평균 45%를 보였다. 미나리조로 유입된 폐수의 농도는 역시 부레옥잠조를 하루 거친 후 약 15%가 제거된 상태에서 유입되었으며, 그 부하가 30~38 kg N/ha · day, HRT 1.8~2 day의 조건 하에서 미나리조에서만 약 40~52%, 총 제거율 49~59%을 보였으나 37~45 kg N/ha · day, HRT 1.2~1.4 day의 범위에서는 약 27~28%, 총 제거율 40~41%를 보였으며, NH₄⁺-N의 경우 부레옥잠조는 평균 52%의 효율을 보여 Total N보다 높은 제거효율을 보였으며, 미나리조는 22~38%의 제거효율을 보이는 것으로 나타

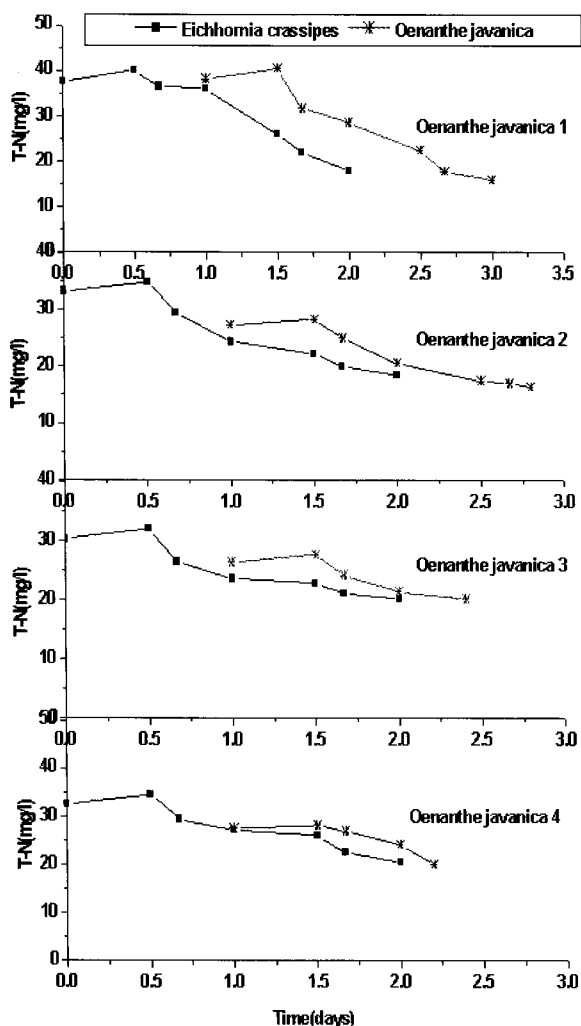


Fig. 3. Variation of total N concentration with operation time.

났다.

인 제거

부레옥잠조의 Total P의 유입 농도는 그 범위가 6.7~9.6 mg/L로 평균 8.3 mg/L를 보였으며, 그 부하가 5.8~8.2 kg P/ha·day 이었다. HRT 2 day 후의 제거율은 평균 30%를 보였다. 미나리조로 유입된 폐수의 농도는 부레옥잠조에서 약 22%가 제거된 후 유입되었으며, 미나리조의 Total P부하가 7.9~8.9 kg P/ha·day, HRT 1.8~2.0 day에서는 약 30% 전후의 제거율을 그리고 총 제거율은 모든 조에서 30% 이상이었으며, $PO_4^{3-}P$ 의 경우는 부레옥잠조에서는 Total P보다 다소 높은 33%의 제거효율을 나타내었고 미나리조에서는 25~37%의 효율을 보이는 것으로 나타났다.

식물체 성장률

수생식물의 성장률과 화학적조성은 수생식물을 이용한 영양물질 제거의 기본적인 평가요소이다. 각각의 유기물질 부하

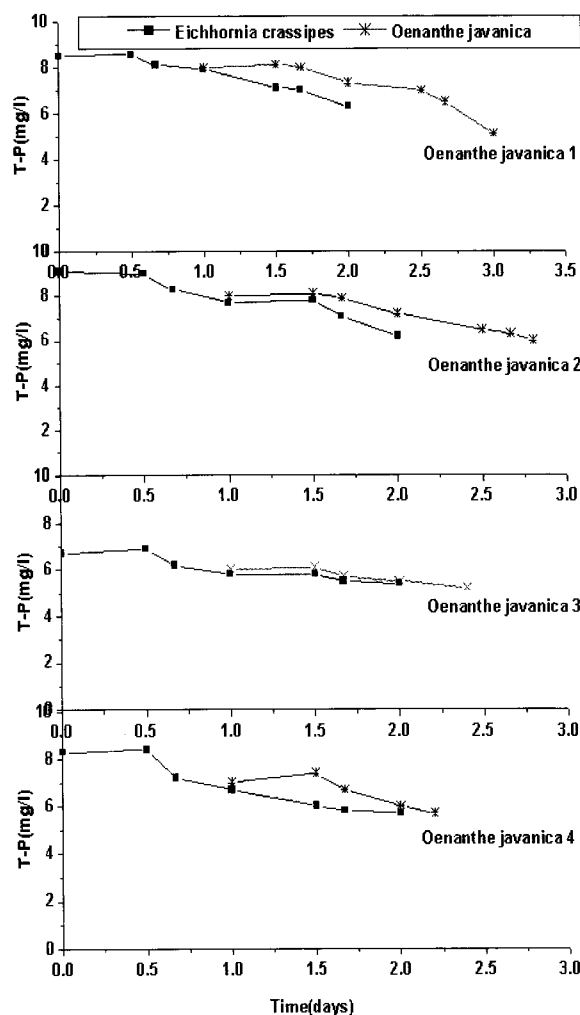


Fig. 4. Variation of total P concentration with operation time.

에 따라 반응조 별로 수확된 부레옥잠, 미나리 최종 생체량, 비성장 속도 및 영양염류 흡수율을 Table 2에 나타내었으며, 식물체의 생체량은 습중량으로 나타내었다. 운전을 위하여 초기에 이식한 부레옥잠, 미나리 N, P 함량은 각각 3.4와 0.7%로 나타났다. 식물체의 N 흡수율과 P 흡수율은 식물체 내로의 N, P량에 식물체 성장량의 건중량을 곱하여 구하였으며, N 흡수율은 부레옥잠이 $0.16 \text{ g N/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 나타났으며, 미나리의 경우는 $0.046 \sim 0.048 \text{ g N/m}^2 \cdot \text{day}$ 의 범위를 보였으며, P 흡수율은 부레옥잠이 $0.038 \text{ g N/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 나타났으며, 미나리의 경우는 $0.003 \sim 0.004 \text{ g N/m}^2 \cdot \text{day}$ 의 범위로 체류시간에 따른 차이는 거의 나타나지 않는 것으로 조사되어 질소의 흡수율에 비해 인의 흡수율이 아주 낮게 나타난 것을 알 수 있었는데, 이는 식물체의 질소/인 함량비가 수중의 총 질소/총 인의 함량비와 비례한다는 내용을 뒷받침해 주고 있다⁷⁾. 비성장속도는 부레옥잠은 평균 $0.064/\text{day}$ 를, 미나리는 $0.019 \sim 0.021/\text{day}$ 의 성장률을 보였다. 비성장속도가 일반적으로 식물체 밀도가 낮을 때에는 높게 나타나고 이와 반대로

Table 2. Summary data for the plant growth and nutrient uptake

Item	Water hyacinth	Watercress			
		OJ 1	OJ 2	OJ 3	OJ 4
Operation time (day)	2	2	1.8	1.6	1.2
Specific growth rate (/day)	0.0648	0.0213	0.0208	0.019	0.020
Plant weight (kg/m ²)	7.83	7.61	7.57	7.54	7.53
Total N content (%)	3.23	1.21	1.19	1.18	1.15
Total P content (%)	0.74	0.11	0.09	0.08	0.09
N uptake rate (g N/m ² · day)	0.165	0.048	0.048	0.047	0.046
P uptake rate (g P/m ² · day)	0.038	0.004	0.003	0.003	0.003

식물체 밀도가 높을 때에는 낮게 나타나므로 최대 비증식속도는 성장한 식물체의 정기적인 제거를 통해서 얻을 수 있다고 한다. 그리고, 미나리는 유기물부하가 높고, 체류시간이 짧을수록 낮아지는 것을 볼 수 있다.

요 약

본 연구에서는 농어촌취락배수의 효율적 처리를 위해 수생식물인 부레옥잠과, 미나리를 이용한 연속식 실험에서 유기물부하(COD)와 Total N, Total P 등을 HRT와 농도를 달리하여 그 제거효율을 측정하였다. 유기물(COD)의 제거효율은 HRT가 2 day인 부레옥잠조에서는 평균 50%의 제거율을 보였으며, 미나리조에서는 HRT 1.2~2 day동안 30~50%의 제거율을 보였다. 영양염류의 제거효율은 총 질소의 경우 부레옥잠조는 약 32.9 kg N/ha · day의 부하에서 HRT 2~3 day인 경우 40~53%가 제거되었으며, NH₄⁺-N의 제거효율은 평균 52%로 Total N의 제거효율보다 다소 높았으며, 인은 8.2 kg P/ha · day의 부하에서 HRT 2~3 day인 경우 31~40%로 조사되었다. N 및 P 흡수율은 미나리보다 부레옥잠이 높게 나타났으며, 인의 흡수율은 질소의 흡수에 비해 낮게 조사되었다.

참고문헌

- 안창우, 이도원, 이상일, 김정옥 (1994) 습지에서 미나리와 미꾸라지를 이용한 수질정화 가능성, 물환경학회 94년도 학술연구발표 초록집, p.122-127.
- Orth, H. M. and Sapkota, D. P. (1988) Upgrading facultative pond by implanting water hyacinth, *Wat. Res.* 22, 1503-1511.
- Wolverton, B. C. and McDonald, R. C. (1978) Natural composition of water hyacinths grown on domestic sewage, *Eco. Bot.* 32, 363-370.
- Reed, S. C., Middlebrooks, E. J. and Crites, R. W. (1988) *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, McGraw-Hill, New York.
- Imaka, T. and Teranishi, S. (1988) Rates of nutrient uptake and growth of the water hyacinth, *Wat. Res.* 22, 943-951.
- Reedy, K. R. and Sutton, D. L. (1984) Water hyacinths for water quality improvement and biomass production, *J. Environ. Qual.* 14, 459-462.
- 국립환경연구원 (1996) 호수내 오염하천 유입부의 식물에 의한 정화처리 연구(II).
- 동화기술편집부 (1998) 수질오염 · 폐기물 · 토양오염 공정시험방법, 동화기술, 서울.
- APHW, AWWA, WPCF (1989) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17th ed., Port City Press, New York.