

수생식물(부레옥잠 및 미나리)을 이용한 영양염류 제거에 관한 연구 Feasibility of Aquatic Plants (*Eichhornia crassipes* and Water dropwort) for Nutrients Removal

최돈혁[†] · 강 호* · 이미경
Donhyeok Choi[†] · Ho Kang* · Mikyung Lee

한국수자원공사 시화호환경관리센터 · *충남대학교 토목환경공학부
Sihwa Lake Environmental Management Center, Korea Water Resources Corporation
*Civil and Environmental Engineering, Chungnam National University

(2009년 10월 29일 접수, 2010년 01월 15일 채택)

ABSTRACT : Feasibility of floating aquatic plants (*Eichhornia crassipes* and Water dropwort) was investigated in order to control of sewage depending on various initial loading in a lab scale test. In addition, field test was conducted to assess the uptake rate of nutrient by *E. crassipes*. Lab-scale test applying primary domestic effluent operated at 4 day HRT shows that the highest uptake rates were 1.06 g N/m² · day and 0.39 g P/m² · day in the *E. crassipes* reactor. BOD removal efficiency in *E. crassipes* reactor was as high as 80% when the loading value was lower than 185 kg BOD/ha · day. While 70 ~ 80% removal efficiency of BOD was achieved when the loading value was lower 80 kg BOD/ha · day at the *W. Dropwort* reactor. Experiment results show that *E. crassipes* has a higher nutrients removal efficiency than *W. dropwort* under high pollutant loading. Input loadings of TN and TP should not exceed to 10 kg TN/ha · day and 2.0 kg TP/ha · day respectively to provide a 50% TN and 80% TP removal efficiencies using *E. crassipes*. The field test demonstrated that an annual yield of *E. crassipes* mass was estimated as a fresh weight of 30.9 m³/ha · yr. *E. crassipes* grown in field pads absorbed 76.7 kg N/ha · yr and 13.4 kg P/ha · yr as a dry weight.

Key words : Aquatic plants, *Eichhornia crassipes*, Water dropwort, Uptake rate, Nutrients

요약 : 본 연구에서는 수생식물 중 부레옥잠(*Eichhornia crassipes*)과 미나리(Water Dropwort)를 이용하여 유입수의 부하 변동에 따른 수처리 효율을 Lab-scale 실험을 통해 평가하고, 부레옥잠을 현장 적용하여 식물생체내 흡수된 질소, 인의 함량을 산정·제시하고자 하였다. 부레옥잠 식물체내 N, P 흡수율은 하수의 1차처리수를 적용하였을때 HRT 4 day에서 가장 높은 흡수율 1.06 g N/m² · day과 0.39 g P/m² · day으로 각각 나타났다. 부레옥잠의 경우, BOD 부하 185 kg BOD/ha · day 이하에서 80% 이상의 높은 효율을 보였으며, 미나리를 적용한 경우에는 80 kg BOD/ha · day 이하에서 70~80%의 효율을 나타냈다. 질소와 인의 처리효율 역시 부레옥잠이 미나리 보다 높은 부하에서도 처리 효율이 높은 것으로 나타났다. 부레옥잠을 이용하여 50% 이상의 TN 처리효율을 달성하기 위해서는 HRT 2 day 이상, 10 kg TN/ha · day 이하로 부하를 유지해야하고, TP의 경우, 80% 이상의 처리효율을 위해서는 TP 부하를 2.0 kg TP/ha · day 이하로 유지해야 하는 것으로 나타났다. 부레옥잠을 이용한 50일 동안의 현장적용 실험 결과로 부터 부레옥잠의 연중생산량은 30.9 m³/ha · yr로 나타났으며, 질소와 인의 연간 흡수율은 76.7 kg N/ha · yr, 13.4 kg P/ha · yr로 높게 나타났다.

주제어 : 수생식물, 부레옥잠, 미나리, 흡수율, 영양염류

1. 서론

녹색환경(Green environment)을 이용한 폐수처리 및 자원 회수는 중요한 관심사가 되고 있으며, 자연생태환경의 본질적인 잠재적 기능을 끊임없이 창출하여 수처리시스템에 도입하고자 노력하고 있다. 이러한 녹색환경을 적용한 시스템은 적은 투자비용으로 유지관리가 쉬운 장점이 있다. 따라서 국·내외에서는 수생식물을 이용한 인공습지(Constructed wetland)의 비점오염원의 저감 및 하·폐수처리가 활발히 적

용되고 있다.^{1,2)}

수생식물(Macrophytes)을 이용한 폐수처리의 가장 중요한 기능은 물리적 처리를 그 자체내에서 유도할 수 있으며, 물리적 여과를 통한 부유물질 저감과 함께 유기물질을 처리하고, 수생식물의 표면적을 이용하여 미생물의 성장 및 활성도를 증가시킬 수 있다.³⁾ 폐수처리에 주로 적용되는 수생식물에는 water hyacinth(*Eichhornia crassipes*), pennywort(*Hydrocotyle umbellate*), duck-weeds(*Lemna spec.*) 등이 있다.⁴⁾ 이러한 수생식물처리법(Aquatic Treatment)과 산화지(Oxidation

[†] Corresponding author : E-mail : choidh@kwater.or.kr Tel : 031-400-1401 Fax : 031-400-1465

Pond)의 근본적인 차이점은 산화지법은 조류와 박테리아 등 Microphyta를 이용하는 반면, 수생식물처리법은 수중 및 수표면에서 잘 자라는 수생식물 즉 Macrophyta를 이용한다는 점에서 다르다. 특히 수생식물의 이용은 에너지원으로 햇빛을 이용하고 탄소원으로 무기탄소를 사용하는 독립영양식물 (autotroph)로 재배하는데 아주 용이하며 특히 호수의 부영양화의 주범인 조류를 억제 하거나 혹은 그들과 경쟁관계에 있기 때문에 수질개선의 가능성이 인정되어 왔다. 종래의 처리 대상이었던 잡초류 수생식물이 최근들어 수질개선의 적극적인 참여자로 등장하고 있는 것이다.

지난 20~30년간 부레옥잠은 하·폐수의 유출수 수질향상을 위해 많이 적용되어 왔다. Zimmels 등은 부레옥잠과 물배추(*Pistia stratiotes*)를 도시하수 처리에 적용하였으며, HRT 2.5~4 day로 운영할 경우, 여름과 겨울철 모두 COD 78% 이상의 높은 처리효율을 보인다고 제시하였다.^{5,6)} 또한, 현재까지 미나리(Water dropwort)를 이용한 수생식물처리법에 관한 기작은 아직까지 명확히 밝혀지지 않고 있으나, 최근 들어 비점오염원 저감을 위한 Landscape ecology planning에 있어서 riparian zone(buffer zone)에 적용되어지고 있다.⁷⁾ 미나리의 경우, 부레옥잠처럼 넓은 표면적을 제공하는 뿌리 시스템을 갖고 있지는 않지만, 수중에 뿔어 있는 줄기와 소수의 뿌리가 미생물이 부착성장 할 수 있는 filter media를 제공하고 이곳에서 부착증식에 의한 유기물 분해 및 자연 침전에 의해 오염물질 제거된다. Wang 등의 연구결과에 의하면 이러한 부레옥잠 및 미나리 등의 수생식물은 Cd, Hg, Pb 등의 중금속 처리에 있어서도 매우 높은 phyto remediation으로 제시된 바 있다.⁸⁾ 이처럼 수생식물의 수처리 효율에 대해서는 많은 연구가 이루어진 반면, 식물생체 내에 흡수된 질소 및 인의 함량에 대한 연구는 부족한 실정이다.^{9,10)}

따라서 본 연구에서는 수생식물 중 부레옥잠과 미나리를 이용하여 유기물 부하 변동에 따른 수처리 효율을 Lab-scale 실험을 통해 평가하고, 이중 처리 효율이 높은 식물을 호소에 적용하여 국내 기후조건에서 성장가능성 및 식물 생체 내 흡수된 질소, 인의 함량을 산정 제시하고자 한다.

2. 실험방법 및 분석방법

Lab-scale 실험에 사용한 운전조건 및 실험장치는 Table 1, Fig. 1과 같다. 부레옥잠의 경우는 HRT 1, 2, 4, 8 day에 대해 평가 하였으며(Table 1), 미나리 재배 실험의 경우는 용적용 50 L로 하여 HRT 2, 4, 8 day에 대해 실험을 실시하였다. 유입수는 D시에 위치한 하수종말처리장의 1차 및 2차 처



Fig. 1. Schematic layout of lab-scale experiments.

Table 1. The initial set-up parameters for removal efficiency using aquatic plants

Reactor	Volume(L)	Surface Area(m ²)	HRT(day)	Feed	Input volume (L/d)
1	80	6.2	1, 2	Primary Eff.	60, 40
2	80	6.2	1, 2	Secondary Eff.	60, 40
3	80	0.24	4	Primary Eff.	20
4	80	0.24	4	Secondary Eff.	20
5	80	0.24	8	Primary Eff.	30
6	80	0.24	8	Secondary Eff.	30

리수를 이용하였다. 현장 적용 실험은 대청호 본류와 서하천 합류지점에서 여름, 가을철(8월 29일~10월 30일)에 걸쳐 약 50일 동안 실시하였다. 현장실험을 위하여 특별히 고안된 수표면 인공재배지 4개 pad (2 m × 2 m/pad)를 설치하였다.

수질분석은 Standard method에 준하여 분석하였으며,¹¹⁾ 식물체 습중량(Fresh weight)은 식재한 후 일정간격으로 측정하였다. 특히 단위면적당 최적 밀도 1.5 kg/m²를 유지하기 위해 수확하여 처리하였다. 처리된 식물체를 105℃에서 24시간 건조하여 건조중량을 측정하였으며, 건조한 후 잘게 분쇄하여 시료 0.5 g을 kjeldahl flask에 취한 후 황산 5 mL를 넣고, 고온으로 가열하면서 H₂O₂를 0.5 mL씩 넣어 총 7~8 mL의 백색투명 시료로 변하게 한후 GF/C로 여과 후 N, P 함량을 분석하였다. 식재한 부레옥잠의 초기 건조중량은 7~14 g의 범위를 보였으며, 이때의 식물체 N, P 함량을 곱하여 실험조 내의 모든 부레옥잠이 갖고 있는 초기 N, P 건조중량을 구하였다. 이후 실험재배 중에 수확한 부레옥잠과 최종적으로 수확한 부레옥잠의 건조중량에 식물체 N, P 함량을 곱하여 실험기간 중에 부레옥잠이 흡수한 총 N, P의 건조중량을 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 부레옥잠 및 미나리의 수처리 효율성 평가

부레옥잠의 성장 변화는 Table 2에 제시된 바와 같이 1차 처리수를 연속시료로 주입한 재배조의 부레옥잠 성장률이 2차처리수를 원수로 사용한 것보다 높은 것을 알 수 있다. 1차 처리수를 적용할 경우, 습중량과 건조중량의 성장률은 각각 9.9~11.3 DW/m²·day, 14~34 g DW/m²·day으로 높은값을 보였다(Table 2). 야외 재배에서 겨울철에는 3~5 g DW/m²·day, 여름철에는 30 g DW/m²·day, 그리고 봄과 가을에는 15~25 g DW/m²·day로 연평균 21 g DW/m²·day으로 부레옥잠 성장률이 제시된 바 있다.¹²⁾

Table 2. *Eichhornia crassipes* growth rate

Parameters	HRT	P. E.	S. E.
growth rate (g FW/l ea.d)	2	10.6-11.9 (11.3)	4.2-9.5 (8.7)
	4	8.12-14.5 (10.9)	2.0-6.1 (3.4)
	8	7.3-13.2 (9.9)	1.1-4.0 (2.6)
growth rate (g DW/m ² .d)	2	18.45	6.27
	4	34.06	12.46
	8	14.2	14.36
Specific growth rate, K(1/d)	2	0.104-0.108 (0.106)	0.043-0.080 (0.064)
	4	0.07-0.12 (0.097)	0.047-0.075 (0.063)
	8	0.099-0.114 (0.107)	0.059-0.075 (0.066)
Doubling Time(days)	2	6.55	10.83
	4	7.14	11
	8	6.48	10.5

P.E. and S.E. represent the primary effluent and secondary effluent in STP respectively.

실험 중 수확한 부레옥잠 내 N, P 함량은 Fig. 2에 제시된 바와 같이 1차처리수를 적용할 경우, N 흡수율은 0.5~1.1 g N/m² · day, P 흡수율은 0.2~0.4 g P/m² · day, 2차처리수를 적용할 경우에는 N 흡수율은 0.3~0.6 g N/m² · day, P 흡수율은 0.09~0.16 g P/m² · day로 2차처리수에서 보다 1차처리수에서 재배한 부레옥잠의 N, P 흡수율이 훨씬 높은 것을 알 수 있다(Fig. 2).

부레옥잠의 뿌리는 마치 부착증식 시스템과 같이 filter

media를 제공하고 뿌리에서 부착생물막(Biological attached film)이 형성되면서 유기물이 처리된다. 살수여상에서는 이 생물막이 점차 증대되어 유입폐수의 전단력에 의해 탈리(Slaugh off)된다. 부레옥잠의 경우도 이러한 탈리 현상이 일어날 뿐만 아니라 성장속도가 워낙 빨라서 형성된 고밀도의 활성부착 미생물이 부레옥잠의 수확과 함께 처리된다. 즉, 부레옥잠 재배지는 부착증식 시스템과 침전조를 겸비한 혼합반응조라고 할 수 있다. 하수종말처리장의 1차처리수와 2차처리수를 연속시료로 주입한 실내실험 재배조에서 HRT를 1, 2, 4, 8 day로 운영하였을 때 각 오염물질 처리 현황을 Table 3에 제시하였다. 각 반응조 R1, R2, R3, R4의 유기물 부하(Organic loading rate)는 185 kg BOD/ha · d, 127 kg BOD/ha · d, 48 kg BOD/ha · d, 24 kg BOD/ha · d이다.

Fig. 3에 제시된 바와 같이 평균 TSS 농도 103 mg/L인 1차처리수를 연속시료로 주입한 실험재배조에서 TSS의 처리효율은 HRT가 1 day 일때 76.3%, HRT가 8 day 일때는 90.4% 까지 증가하여 HRT에 따라 14%의 처리효율 차이를 보였다. 한편, 2차처리수(TSS 45 mg/L)를 주입한 경우에는

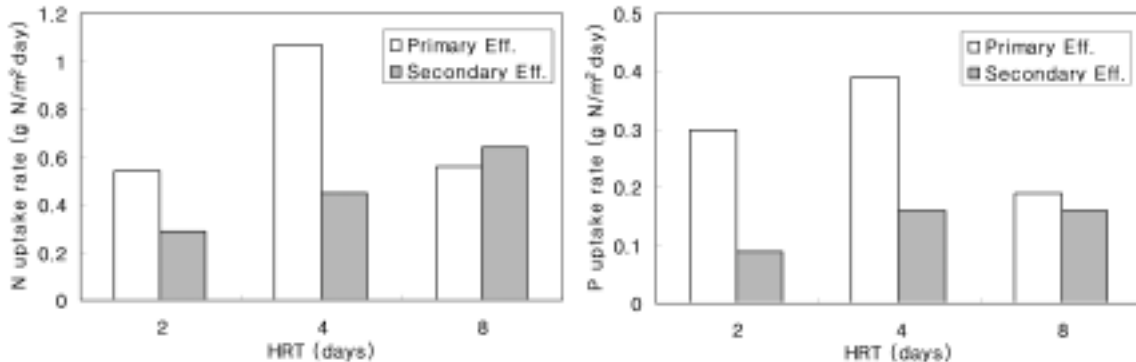


Fig. 2. Nitrogen and phosphorus uptake rate vs. HRT (lab-scale experiment).

Fig. 3. Average concentrations of influent and effluents respect to the different feeding conditions as HRT changes (*Eichhornia crassipes* reactor) (Unit: mg/L)

Parameters	P. Inf.	Eff.				Parameters	S. Inf.	Eff.			
		R1	R2	R3	R4			R1	R2	R3	R4
HRT(d)		1	2	4	8	HRT(d)		1	2	4	8
TSS	103.0	29.8	24.5	8.6	8.7	TSS	45.2	7.9	8.5	4.2	4.2
VSS	43.1	8.7	5.5	4.3	3.5	VSS	23.0	3.3	3.9	1.7	1.5
TCOD	139.0	55.3	43.9	35.8	33.4	TCOD	59.6	30.1	23.7	22.1	19.5
SCOD	80.3	34.6	27.3	20.2	19.2	SCOD	38.0	16.9	17.7	16.3	13.5
BOD	60.7	8.2	7.2	5.1	4.2	BOD	28.1	5.1	3.7	3.3	2.2
TN	25.0	19.8	7.9	5.9	4.4	TN	20.0	18.7	10.5	9.0	7.5
TKN	24.0	16.2	7.3	4.5	3.7	TKN	12.8	10.4	4.6	3.7	2.7
NH ₃ -N	19.4	13.6	2.7	1.4	0.5	NH ₃ -N	7.4	4.0	1.0	0.7	0.4
TP	1.365	0.846	0.200	0.152	0.056	TP	0.410	0.147	0.044	0.036	0.025
PO ₄ -P	1.190	0.806	0.130	0.059	0.030	PO ₄ -P	0.310	0.125	0.023	0.017	0.014

P.Inf. and S.Inf. represent the primary effluent and secondary effluent in STP respectively.

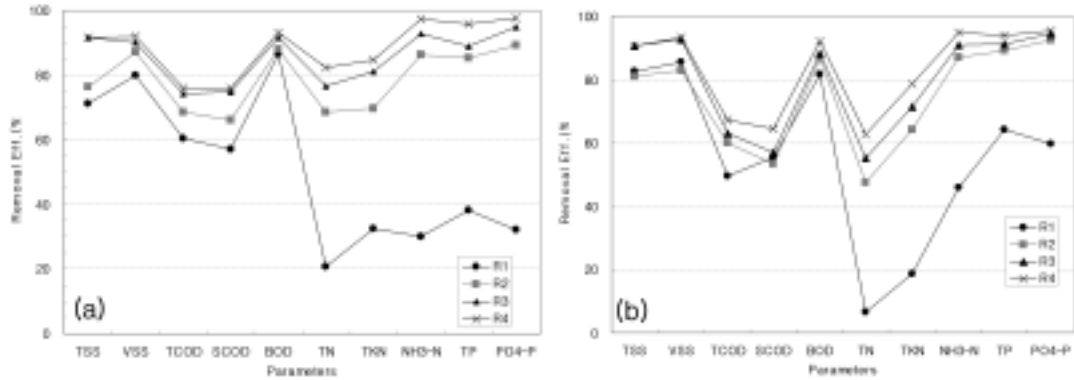


Fig. 3. Removal efficiencies of *Eichhornia crassipes* by applying primary effluent (a) and secondary effluent (b) due to the different HRT (HRT=1 day (R1), HRT=2 day (R2), HRT=4 day (R3), HRT=8 day (R4)).

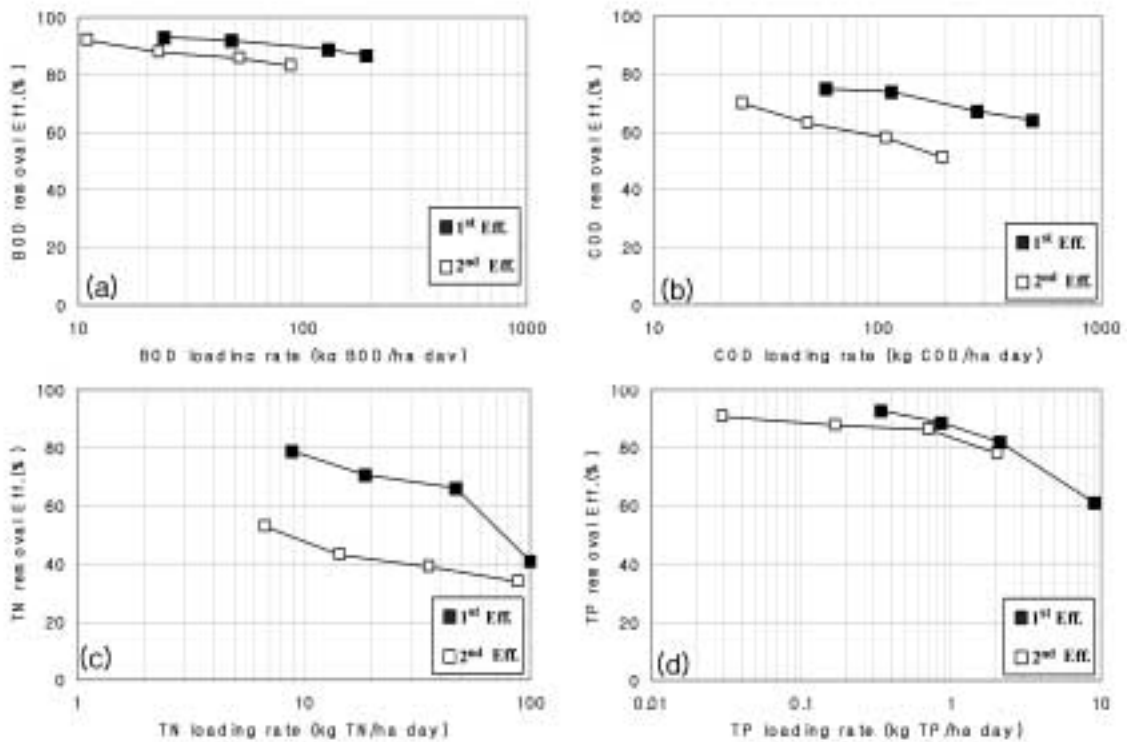


Fig. 4. Removal efficiencies vs. pollutant loading rates applying *Eichhornia crassipes* due to the different HRT.

80% 이상의 높은 처리효율을 보였으며, HRT를 증가하더라도 TSS 침강 효율은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

COD의 경우, 유입수의 평균 TCOD 농도가 139 mg/L인 1차처리수를 주입한 경우, TCOD 처리율은 60~75%를 보였으며, 2차처리수 60 mg/L를 주입한 경우에는 50~70%의 처리효율을 보였다. 즉, HRT를 증가시킬 경우, 1, 2차처리수 모두 10~20%의 효율이 증가되는 것으로 나타났다. BOD의 경우, HRT 변화에 상관없이 80% 이상의 높은 처리 효율을 보이는 바, 부레옥잠을 적용할 경우 처리시스템의 목표에 따라 다르겠지만, HRT를 짧게 유지하면 재배지의 면적을 줄일 수 있기 때문에 경제적인 것으로 판단된다. 부레옥잠을 이용

한 질소 제거는 질산화와 탈질화에 의해 주로 이루어지며, 식물체에 의해 흡수된 것을 수확함으로써 처리된다. TN 농도가 25 mg/L인 1차처리수를 연속시료로 주입한 경우, HRT가 1 day 일때 20% 처리율에서 HRT가 8 day 일때 80% 처리율로 증가하여 무려 60%의 차이를 나타내었다. 또한, 평균 TN 농도가 20 mg/L인 2차처리수를 연속시료로 주입한 경우에는 HRT 1 day 일때 7% 처리율에서 HRT 8 day에는 62%의 처리 효율로 50% 이상의 차이를 보였다. 즉, TN의 효율을 높이기 위해서는 HRT를 2 day 이상 유지시켜야 40~60% 이상의 처리 효율을 기대할 수 있을 것으로 보인다.

인은 화학 흡착과 침전반응에 의해서 주로 처리되며 식물체

Fig. 4. Average concentrations of influent and effluents respect to the different feeding conditions as HRT changes (Water dropwort reactor) (Unit: mg/L)

Parameters	P. Inf.	Eff.			Parameters	S. Inf.	Eff.		
		R1	R2	R3			R1	R2	R3
HRT(d)		2	4	8	HRT(d)		1	2	4
TSS	90.8	5.5	6.4	4.5	TSS	27.6	4.0	4.5	4.6
VSS	65.5	3.8	3.9	3.1	VSS	19.0	2.6	3.0	3.2
TCOD	156.0	67.6	57.5	47.4	TCOD	53.2	30.7	25.9	21.3
SCOD	65.0	30.0	23.7	21.6	SCOD	26.0	15.3	14.2	11.8
BOD	47.8	13.8	8.7	6.4	BOD	15.4	5.5	3.2	3.3
TN	22.9	10.2	10.8	8.7	TN	13.1	8.8	6.2	7.3
TKN	23.8	3.8	4.1	3.1	TKN	9.3	3.3	3.4	2.6
NH ₃ -N	20.4	2.2	2.4	1.8	NH ₃ -N	7.8	1.9	1.4	1.7
TP	2.130	0.790	0.542	0.246	TP	0.710	0.320	0.150	0.117
PO ₄ -P	1.550	0.690	0.467	0.194	PO ₄ -P	0.620	0.270	0.119	0.090

P.Inf. and S.Inf. represent the primary effluent and secondary effluent in STP respectively.

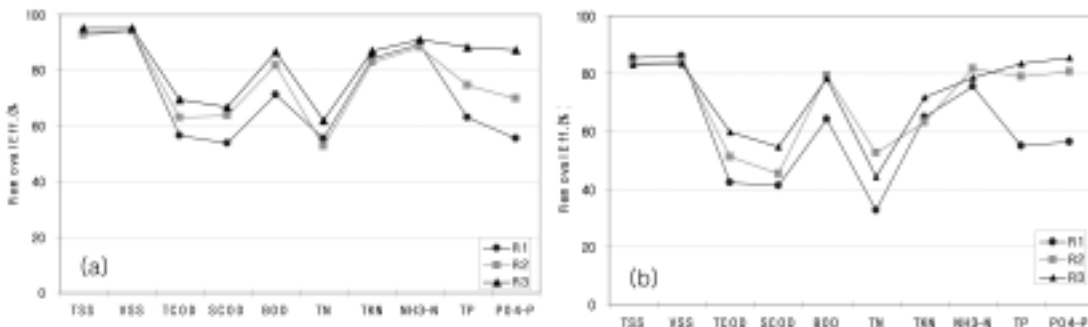


Fig. 5. Removal efficiencies of *Water dropwort* by applying primary effluent (a) and secondary effluent (b) due to the different HRT (HRT=2 day (R1), HRT=4 day (R2), HRT=8 day (R3)).

흡수도 큰 몫을 차지한다. 부레옥잠이 인을 잘 흡수하기 위해서는 시료중의 N : P 비가 적어도 5 : 1 이상이 되어야 한다.¹³⁾ 즉 질소가 충분치 못하면 식물체는 P를 흡수할 수 없다는 것을 의미한다. 평균 TP 농도가 1.365 mg/L인 1차처리수를 주입한 경우, HRT 1 day에는 38%의 처리효율을 HRT 8 day에서는 96%의 처리효율을 보여 HRT가 증가함에 따라 무려 50%의 차이를 나타내었다. 따라서 TP 역시 TN과 마찬가지로 HRT를 2 day 이상으로 운영해야 하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 부레옥잠의 유입수별 오염부하에 따른 처리 효율을 제시한 것이다. BOD 부하 변동에 따른 BOD 처리 효율은 전반적으로 80% 이상의 높은 효율을 보이는 바, OLR을 185 kg BOD/ha · day로 설계하는 것이 재배지의 면적을 줄일 수 있어 경제적인 것으로 판단된다. COD 부하에 따른 COD 처리율은 유입수 성상에 따라 처리 효율의 차이가 현저하다. 따라서 70% 이상의 효율을 보이기 위해서는 1차처리수의 COD 부하는 HRT 2 day에 269 kg COD/ha · day, 2차처리수의

부하는 HRT 8 day에 25 kg COD/ha · day 미만으로 유지되어야 한다. TN의 경우, 1차처리수를 이용하였을 때 60% 이상의 처리효율을 달성하기 위해서는 총질소 부하율은 50 kg TN/ha · day를 넘지 말아야 하며 2차처리수의 경우, 총질소 부하율은 4 kg TN/ha · day 미만을 유지해야 하며 HRT도 10일 이상 길게 유지해야 할 것으로 판단된다. TP의 경우, 처리율 80% 이상을 달성하기 위해서는 TP 부하율은 2.0 kg TP /ha · day를 초과해서는 안될 것으로 판단된다.

미나리를 이용한 수처리 효율은 HRT 2, 4, 8 day에 대해 평가하였다(Table 4). 각 반응조 R1, R2, R3의 유기물부하(Organic loading rate)는 78 kg BOD/ha · d, 29 kg BOD/ha · d, 15 kg BOD/ha · d의 조건으로 운영하였다. 부레옥잠과 마찬가지로 수리학적 체류시간이 증가하면 오염물질의 처리효율이 증가하는 일반적인 경향을 보였다(Fig. 5). SS 처리 효율은 HRT 및 유입수의 성상에 상관없이 80% 이상의 높은 처리 효율을 나타내었다. COD의 경우, HRT가 증

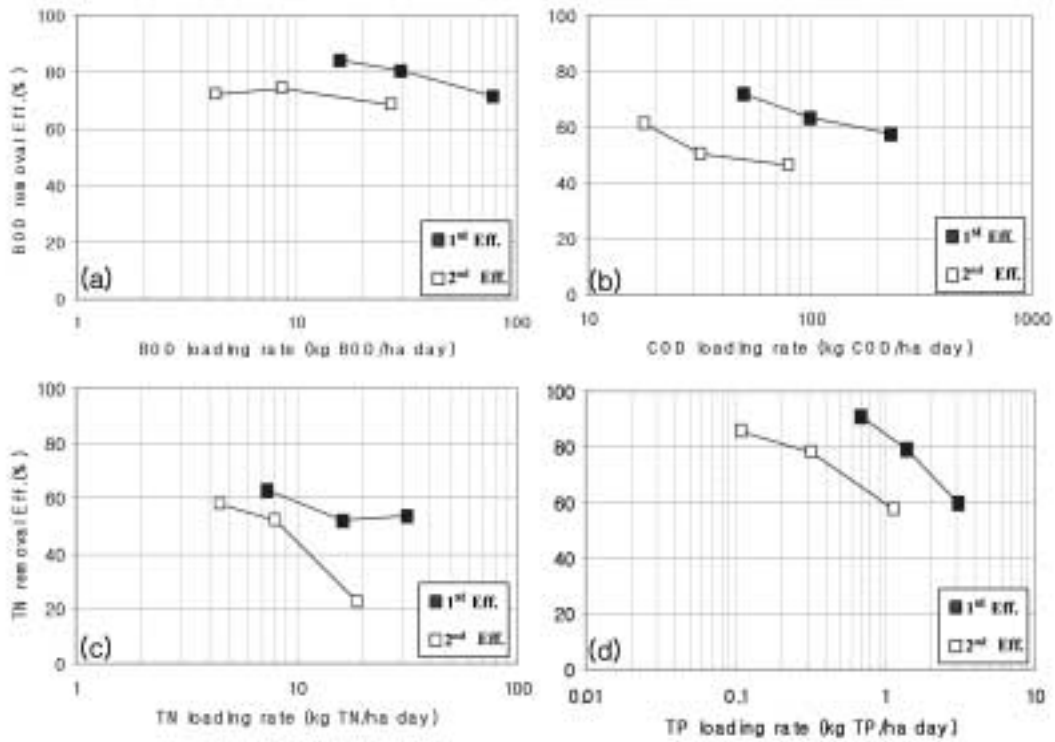


Fig. 6. Removal efficiencies vs. pollutant loading rates applying Water dropwort due to the different HRT.

가함에 따라 처리효율이 증가하나, 1차처리수를 유입한 경우에서 처리효율이 높게 나타났다. BOD 역시 COD와 마찬가지로의 형태를 보였다. TN의 경우, 1차처리수를 적용한 경우, 약 60%로 부레옥잠에 비해 낮은 처리효율을 보였다. TP 역시 유입시료 성장률 차이는 없으나, HRT 1 day에서는 58~60%, HRT 2 day에서는 74~78%를 각각 보여 HRT에 따라 현저한 차이를 나타내었다.

미나리의 유입부하에 따른 처리효율을 보면, 1차처리수를 주입한 실험재배조에서 OLR을 15 kg BOD/ha · day에서 78 kg BOD/ha · day로 증가시킬 경우, BOD 처리 효율은 84%에서 72%로 12%의 감소를 보였다(Fig. 6). 한편, 2차처리수를 주입한 경우, BOD 부하의 증가와 무관하게 70%의 처리율을 나타내었다. COD의 경우, 처리율을 60%로 유지하기 위해서는 1차처리수의 경우, 110 kg COD/ha · day 미만, 2차처리수의 COD 부하는 20 kg COD/ha · day 미만으로 유지해야 한다.

3.2. 부레옥잠의 현장적용 평가 결과

Lab-test 결과로부터 부레옥잠과 미나리 모두 수처리 효율이 높은 것으로 제시되었으나, 본 연구에서는 보다 처리 효율이 안정적이고 수심이 깊은 곳에서도 수경재배가 쉬운 부레옥잠을 현장에 50일 동안 적용하였다.

조사기간 동안 재배 지점의 수온은 18~27°C의 범위로 부레옥

잠 생육에 적합하였으며, 표층 pH는 7.8~10.3의 범위로 다소 높았다. 현장재배지의 질소와 인의 농도는 Table 5에 제시된 바와 같이 2.2~3.6 mg N/L, 0.038~0.066 mg P/L의 범위로 부영양화 단계시작 농도를 훨씬 넘어선 것을 알 수 있다(Table 5).

현장에 설치한 수표면 인공재배지는 유량의 유출입 특성이 없는 호수의 내수면에 부표를 이용하여 띄운 형태이기 때문에 오염물질의 질량수지관계를 수립할 수 없다. 따라서 pad(2 m × 2 m)내에 식재한 부레옥잠 중 30개의 어린 부레옥잠을 골라서 라벨을 달아 표시한 후 7일 간격으로 재배지로부터 회수하여 습증량의 증감을 산출하였고, 2~10 g DW 내외로 1 pad 당 약 40개를 식재하였다. 성장을 측정하기 위한 어린 부레옥잠의 초기 평균 습증량은 30 g, 건증량은 2.5 g 이었다. Table 6에 제시된 바와 같이 어린부레옥잠 2 개체당 1일 습증량 기준으로 1.7 g씩 증가하였으며, 비증식속도(k)는 0.027(1/day)이고, 식물체 중량 기준으로 개체가 2배로 증식되는 기간은 26일로 나타났다. Cornwell 등은 하수처리수에서 부레옥잠의 배수가 되는 기간을 6.2 day로 제시한 바 있으며, 오염도가 심한 지역일수록 부레옥잠의 성장속도가 빠른 것을 알 수 있다.^{14,15)}

재배지역으로부터 N, P 처리효율을 보기 위해 성장률과 식물체내 함유한 N, P 처리에 관한 평가를 하였다. Table 7에 제시된 바와 같이 부레옥잠의 평균 질소 함량은 3.09% 인 함량은 0.54%로 N/P ratio는 Kawai의 조사결과와 유사한 값

Table 5. Water properties of field area

Parameters	Range	Avg.
	(mg/L)	
TSS	14 ~ 38	20.6
VSS	4.5 ~ 7.6	6.1
TCOD	4.5 ~ 6.9	5.7
SCOD	2.6 ~ 5.1	3.7
BOD	1.5 ~ 2.3	2.0
TN	2.2 ~ 3.6	3.10
NH ₄ -N	0.8 ~ 1.6	0.50
NO ₃ -N	0.8 ~ 1.6	1.10
TP	0.038 ~ 0.066	0.055
PO ₄ ³⁻ -P	0.014 ~ 0.031	0.023

Table 6. Comparison of *Eichhornia crassipes* growth rates obtained by lab-scale and field-scale test (09/01 ~ 10/31)

Parameters	Field-scale	Lab-scale		
		HRT(days)	1st eff.	2nd eff.
growth rate (g FW/l ca)	1.7	2	11.8	7.2
		4	12.4	4.0
		8	9.9	3.5
specific growth rate, K (1/d)	0.027	2	0.406	0.064
		4	0.097	0.063
		8	0.108	0.066
doubling Time (days)	25.7	2	9.5	15.6
		4	10.4	16.0
		8	9.3	15.1

인 5.72로 나타났다.¹⁶⁾

이상의 결과를 토대로 현장재배지에서 부레옥잠의 연중생산량을 단위면적당 습중량의 증가(부레옥잠의 성장기간: 6개월)로 산정하면, 부레옥잠의 연중생산량은 30.94 m³/ha · yr로, 재배지 1 ha당 1 month에 2.6 ton의 습중량이 생산되는 것을 알 수 있다. 이 등의 연구결과에 의하면 NO₃/NH₄의 ratio는 1~3(meq/L)의 범위일 때 가장 잘 성장하였으며, NO₃/NH₄의 ratio가 1 : 3일 경우, 7주 후 28%가 고사하였다고 보고된 바 있다.^{17~19)} 본 연구에서 재배지의 수질 분석시 평균값으로 9 : 3.8 정도로 질소의 균형은 잘 이루어졌던 것으로 보인다. 재배기간 중 특이하게 관찰되었던 사항은 뿌리가 무려 1 m 이상되는 부레옥잠을 많이 관찰 할 수 있었는데, 이는 재배지의 영양염류 농도가 충분치 못하여 양분 흡수기관인 뿌리가 과도하게 발달된 데 기인된 것으로 판단된다. 이 역시 고농도의 양분이 있는 곳에서 뿌리는 대체적으로 짧고, 저농도로 갈수록 뿌리는 길어진다는 보고와 관련이 있다.²⁰⁾

Table 7. The ranges of water content, nitrogen and phosphorus contents(%), and N/P ratio of *Eichhornia crassipes*

Aquatic plant	Water content(%)		N(DW %)		P(DW %)		N/P
	Range	Avg.	Range	Avg.	Range	Avg.	
<i>Eichhornia Crassipes</i>	90.4-93.7	92	2.14-4.91	3.09	0.05-1.90	0.54	5.72

Table 8. Annual uptake rate of nitrogen and phosphorus applying *Eichhornia crassipes*

Annual production (kg Wet wt./ha·yr)	%DW (%)	Annual production (kg DW/ha·yr)	Dry production (g DW/m ² ·day)	N content (%)	P content (%)	Uptake rate (kg/ha·yr)	
						N	P
30944	92	2847	5.36	1.80	0.94	20.01	13.4

본 현장재배 결과로부터 부레옥잠은 1일 1 m²당 1.36 g의 DW가 증가함으로 이를 N, P 흡수율로 환산하면 76.69 kg N/ha · yr과 13.4 kg P/ha · yr에 해당되는 것으로 나타났다 (Table 8).

4. 결론

- 1) 호소내 부영양화를 저감시키기 위한 방안으로 수생식물(부레옥잠, 미나리)을 이용하여 이들의 성장률 및 영양염류 처리 효율을 Lab-scale 실험과 현장적용 실험을 실시하였다. 부레옥잠의 식물체내 N, P 흡수율은 1차처리수에서 HRT 4 day 일때, 가장 높은 흡수율 1.06 g N/m² · day, 0.386 g P/m² · day을 각각 보였다.
- 2) 부레옥잠 연속 실험에서 HRT별, 시료의 성장별 BOD 처리율은 큰 차이가 없으며 BOD 부하 185 kg/ha · day 이하에서 80% 이상의 높은 처리율을 나타내었다. COD의 경우는 유입 성장별 그리고 HRT에 따라 처리효율 차이는 현저하고, COD 처리효율을 약 70% 이상 달성하기 위해서는 1차처리수의 COD 부하는 HRT 2 day에 269 kg COD/ha · day 미만, 2차처리수의 부하는 HRT 8 day에 25 kg COD/ha · day 미만으로 유지해야 한다. TN의 처리효율을 60% 이상 달성하기 위해서는 1차처리수의 부하는 50 kg TN/ha · day 미만, 2차처리수의 경우 4 kg TN/ha · day 미만의 부하가 유지되어야 하는 것으로 나타났다. TP의 처리율을 80% 이상 달성하기 위해서는 1차 및 2차처리수의 총인 부하율을 2.0 kg TP/ha · day 미만으로 유지해야 한다.
- 3) 미나리를 적용한 실험의 경우, SS 처리는 HRT 및 유입수의 성장에 상관없이 80% 이상의 높은 처리 효율을 보였다. 한편, 유기물의 경우, HRT가 증가함에 따라 효율은 증가하나, 1차처리수를 주입한 경우에 처리 효율이

더 높게 나타났다. TN의 처리 효율은 약 60%로 부레옥잠과 비교하여 다소 낮은 효율을 보였다. TP 역시 유입 시료 성상별 차이는 없으나, HRT 1 day에 58~60%, HRT 2 day에 74~78%를 각각 보여 HRT에 따라 현저한 차이를 보였다.

- 4) 부레옥잠의 현장재배 실험 결과, 연중생산량은 습증량 기준으로 약 30.9 m³/ha · yr이며, N, P 흡수율은 76.7 kg N/ha · yr과 13.4 kg P/ha · yr로 높은값을 보였다.
- 5) 이상의 결과로부터 부레옥잠 및 미나리를 이용할 경우, 부영양화가 가중되는 봄부터 여름철 수처리 효율을 높일 수 있으며, 특히, 유입부하가 적어지는 시기에는 HRT를 길게 운영해야 할 것으로 사료된다.

KSEE

사 사

본 연구는 한국수자원공사 “수생식물 재배를 통한 댐저수지 유입수 수질개선 타당성 조사연구” 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Campbell, C. S. and Ogden, M., “Constructed wetlands in the sustainable landscape”, Wiley, New York(1999).
2. Gopal, Br., “Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials and problems” *Water Sci. Technol.*, **40**(3), 27~35(1999).
3. Brix, H., “Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?”, *Water Sci. Technol.*, **32**(5), 11~17(1997).
4. US Environmental Protection Agency “Constructed wetlands treatment of municipal wastewater: Manual”, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, 166(2000).
5. Zimmels, Y., Kirzhner, F. and Malkovskaja, A., “Application of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* for treatment of urban sewage in Israel”, *J. Environ. Management*, **81**, 420~428(2006).
6. Zimmels, Y., Kirzhner, F. and Kadmon, A., “Effect of circulation and aeration on wastewater treatment by floating aquatic plants”, *Sep. purification Technol.*, **66**, 570~577(2009).
7. Whang, B. C. and Lee M. W. L., “Landscape ecology planning principles in Korea”, *Landscape and Ecological Engineering*, **2**(2), 147~162(2006).
8. Wang, Q., Cui, Y. and Dong, Y., “Phytoremediation of polluted waters potentials and prospects of wetland plants”, *Acta Biotechnol.*, **22**(1-2), 199~208(2002).
9. 김영철, 정팔진, 안익성, “자연현상을 이용한 질산화 탈질공정에 의한 하수처리장 유출수의 질소제거”, *대한환경공학회지*, **27**(3), 323~329(2005).
10. 김영철, 정하영, 이진우, “산화제와 부유 수생식물에 의한 2차 처리수의 수질향상에 관한 연구”, *대한환경공학회지*, **25**(8), 1022~1031(2003).
11. WEF, Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th Ed., 1998
12. Kobayashi, J. T., Thomaz, S. M. and Pelicice, F. M., “Phosphorus as a limiting factor for *Eichhornia crassipes* growth in the upper Paraná River Floodplain”, *Wetlands*, **28**(4), 905~913(2008).
13. Lagos, C., Urrutia, R., Decap, J., Martinez, M. and Bidal, G., “*Eichhornia crassipes* used as tertiary color removal treatment for Kraft mill effluent”, *Desalination*, **246**(4), 45~54(2009).
14. Cornwell, D. A., Zolt Jr., J., Patrinely, C. D., Furman, T. and Kim, J. I., “Nutrient removal by water hyacinth” *J. Water Pollut. Control Fed.*, **49**, 57~65(1977).
15. Dhote, S. and Dixit, S., “Water quality improvement through macrophytes-a review”, *Environment Monitoring and Assessment*, **152**, (1-4), 149~153(2009).
16. Kawai, H., Uehara, M. Y., Gomes, J. A., Jahnel, M. C., Rossetto, R., Alem S. P., Riberio, M. D., Tinel, P. R. and Grieco, B. M., “Pilot-scale experiments in water hyacinth lagoons for wastewater treatment”, *Water Sci. Technol.*, **19**, 129~173(1987).
17. 이창복, *대한식물도감*, 향문사(2003).
18. Shimoda, Y., Takagaki, M., Thongbai, P., Ohyama, K. and Ozawa, K., “Improving water quality by using plants with water convolvulus (*Ipomoea aquatica* forks.) as a model, International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions, ISHS Acta Horticulturae, 797(2008).
19. Woolfolk, W. T. M. and Friend, A. L., “Growth response of cottonwood roots to varied NH₄:NO₃ ratios in enriched patches”, *Tree Physiology*, **23**, 427~432(2003).
20. Toft, J. D., “Community Effects of the non-indigenous aquatic plant water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in the Sacramento/San Joaquin Delta, California, Master of science, University of Washington, 1~8(2000).