

생활오폐수에 대한 정화력이 높은 수생식물 선발

김춘송* · 고지연 · 이재생 · 박성태 · 구연충 · 강항원¹⁾

작물과학원 영남농업연구소, ¹⁾농촌진흥청
(2007년 1월 23일 접수, 2007년 3월 19일 수리)

Selection of Aquatic Plants Having High Uptake Ability of Pollutants in Raw Sewage Treatment

Choon-Song Kim*, Jee-Yeon Ko, Jae-Saeng Lee, Sung-Tae Park, Yeon-Chung Ku, and Hang-Won Kang¹⁾ (Yeongnam Agricultural Research Institute, National Institute of Crop Science, RDA, Milyang, 627-803 ¹⁾Rural Development Administration, Suwon, 441-707)

ABSTRACT: Excess runoff contaminated with N and P can impact the quality of downstream water. It has been known that aquatic plants improve the water quality through their intake of organic or inorganic nutrients. This study was conducted to select aquatic plants having high purification ability for nutrient N and P, and mineral nutrients related to EC such as K, Ca, Na, Cl, and SO₄ in raw sewage water in greenhouse. We assessed nutrient phytoremediation potential of alien hydrophyte and hydro-crop as well as native landscape hydrophyte to select suitable aquatic plant applied to artificial wetland and buffering site of stream-side. The amount of irrigation water during whole growing period of aquatic plants ranged from 225 L m⁻² to 444 L m⁻². *Oryza sativa*, *Typha orientalis*, *Zizania latifolia*, *Aster subulatus*, *Coix lachryma-jobi* var. *mayuen*, *Paspalum distichum* var. *indutum* which had high biomass consumed the large amount of irrigation water over 350 L m⁻². As a result of analysis of water purification effect, N and P content of shoot biomass, and media soil after experiment, *Oryza sativa*, *Zizania latifolia*, *Aster subulatus*, *Coix lachryma-jobi* var. *mayuen*, *Paspalum distichum* var. *indutum* showed high purification ability about eutrophication elements such as T-N and T-P. It is presented that *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes*, and *Paspalum distichum* var. *indutum* had excellent purification ability about K, Ca, Na, and Cl. Moreover, *Paspalum distichum* var. *indutum* greatly removed SO₄ in raw sewage water.

Key Words: aquatic plant, water purification, nutrient N and P, mineral nutrient, wetland

서 론

수생식물은 습지생태계의 1차 생산자로서 습지의 토양을 안정화시키고 침식을 방지하며, 수층 부유물질의 침전촉진과 영양염류와 유해물질을 흡수한다. 또한 수중과 저토에 산소를 공급하여 수생식물의 근계와 저토에 서식하는 미생물의 분해효율을 높이고, 차광에 의한 식물플랑크톤의 발생억제로 수질을 정화한다. 그리고 물새와 어류, 저서생물 등의 먹이로 직접 이용되기도 하고, 부착생물의 착생부위로 혹은 수서생물의 산란장, 양육장 및 은신처로서의 생태적 기능을 가진다. 이 외에도 수생식물은 가축의 사료, 비료 및 생활용품의 재료로 이

용되고 수변의 경관을 좋게 하는 심미적 가치를 지닌다^{1,2)}. 이와 같은 수생식물의 여러 기능 중에서 부영양화의 원인물질을 흡수제거하는 수질정화기능은 환경 보전적 측면에서 매우 중요한 역할을 한다.

미국에서는 질소와 인의 방류수 수질기준 강화에 따라 NASA나 환경보호국(EPA)을 중심으로 각 주에서 부엽식물 및 정수식물을 이용한 고도처리시설이 가동되고 있는 실정이고, 독일, 영국, 스위스를 비롯한 유럽의 여러 나라와 가까운 일본에서도 수생식물이 식재된 인공습지를 조성하여 수질을 정화하고 있다. 국내의 수생식물을 이용한 수질정화연구는 1980년대 이후 주로 도입 식물인 중남미 원산의 부레옥잠을 대상으로 하여 유기물과 영양염류 및 중금속 제거에 관한 연구를 수행하였다³⁻⁵⁾. 최근에는 미나리, 줄, 부들, 달뿌리풀, 노랑꽃창포 등 다양한 수생식물을 이용한 수질정화 연구가 수

*연락처:

Tel: +82-55-350-1281 Fax: +82-55-353-3050
E-mail: kcs3925@rda.go.kr

행되고 있으며⁶⁻⁸⁾, 소규모 인공 식물섬에 수생식물을 식재하여 수질을 정화하기 위한 연구가 진행 중이다⁹⁻¹³⁾. 그리고 농촌지역의 마을 단위에서 수생식물과 여재를 이용하여 소규모로 적용할 수 있는 환경친화형 하수처리시스템과 농촌 전원 독립가구 하수처리장치 개발에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다¹⁴⁻¹⁷⁾. 그럼에도 불구하고 아직까지 우리나라 자생수생식물의 수질정화능력에 대한 정밀한 연구는 빈약한 상태이다.

농촌지역이나 상수원 보호구역처럼 대도시와 같이 하수종말처리장을 적용하기 어려운 지역이나 서낙동강 유역과 같이 도농이 복합되어 있으면서 오염이 가속화되는 지역에서는 농업용수 확보와 수질보전을 위하여 수생식물을 이용한 환경친화적 정화기술의 개발이 요구되어 지며, 더불어 하천의 정비는 치수만을 목적으로 하는 것이 아니라 자연정화능의 향상을 위한 생태형 하천의 조성이 필요하다. 이를 위한 기초 연구로서 Kim 등¹⁸⁾은 서낙동강 유역에 자생하는 수생식물의

분포특성과 자연하천에서 수질정화 잠재능이 큰 수생식물을 탐색하였으나 자연상태에서 부영양화성분들의 체내함량을 기준으로 수생식물들의 정화능력을 추정하였을 뿐, 이들 수생식물의 실제 정화능력을 검증하지 않았다.

따라서 본 연구는 낙동강 하류에 자생하는 수생식물과 외래 수생식물, 습생작물의 T-N, T-P 및 EC 관련 무기성분에 대한 체내 축적과 제거능력을 검증하여 인공습지나 수변녹지 및 완충 저류지와 같은 수질정화시설을 조성하는데 이용할 수 있도록 수질정화능력이 높은 수생식물을 선발하고자 실시하였다.

재료 및 방법

공시재료

수생식물들의 생활오폐수에 대한 정화력을 검증하기 위하여 Table 1과 같이 서낙동강에 자생하는 수생식물 10종, 외

Table 1. The list of aquatic plants tested in the experiment

Group	English name	Korean name	Scientific name	AW ^{a)}	Family name	Life forms
Native	Common reed	갈대	<i>Phragmites communis</i> TRIN.	PC	Gramineae	Perennial, Emergent
	Brown silvertopgrass	고마리	<i>Persicaria thunbergii</i> H. GROSS	PT	Polygonaceae	Annual, Emergent
	Japanese cutgrass	나도겨풀	<i>Leersia japonica</i> MAKINO	LJ	Gramineae	Perennial, Emergent
	Singhara-nut	마름	<i>Trapa japonica</i> FLEROV	TJ	Trapaceae	Annual, Floating-leaved
	Amur sliver-grass	물억새	<i>Miscanthus sacchariflorus</i> BENTH.	MS	Gramineae	Perennial, Emergent
	Oriental Cattail	부들	<i>Typha orientalis</i> PRESL	TO	Typhaceae	Perennial, Emergent
	Marshpepper	여뀌	<i>Persicaria hydropiper</i> (L.) SPACH	PH	Polygonaceae	Annual, Emergent
	Frogbit	자리풀	<i>Hydrocharis dubia</i> (BL.) BACKER	HD	Hydrocharitaceae	Perennial, Floating-leaved
	Wild rice	줄	<i>Zizania latifolia</i> TURCZ.	ZL	Gramineae	Perennial, Emergent
	Sweet flag	창포	<i>Acorus calamus</i> var. <i>angustatus</i> BESS.	AC	Araceae	Perennial, Emergent
Alien	Water lettuce	물상추	<i>Pistia stratiotes</i> L.	PS	Araceae	Perennial, Free-floating
	Devil's beggarticks	미국가막사리	<i>Bidens frondosa</i> L.	BF	Compositae	Annual, Emergent
	Waterhyacinth	부레옥잠	<i>Eichhornia crassipes</i> (M.) SOLMS-LAUB.	EC	Pontederiaceae	Perennial, Free-floating
	Saltmarsh aster	비자루국화	<i>Aster subulatus</i> MICHX. Var. <i>subulatus</i>	AS	Compositae	Annual, Emergent
Knotgrass	털물참새피	<i>Paspalum distichum</i> L. var. <i>indutum</i> SHINNERS	PD	Gramineae	Perennial, Emergent	
Crop	Rice ^{b)}	벼	<i>Oryza sativa</i> L.	OS	Gramineae	Annual, Emergent
	Water dropwort	미나리	<i>Oenanthe javanica</i> (BL.) DC.	OJ	Umbelliferae	Perennial, Emergent
	Job's tears ^{c)}	율무	<i>Coix lachryma-jobi</i> var. <i>mayuen</i> S.	CL	Gramineae	Annual, Emergent

^{a)}AW : abbreviated word, ^{b)}rice cultivar : Kouketsumochi, ^{c)}Job's tears cultivar : Miryanguyulmu

래수생식물 5종 및 습생작물 3종을 공시하여 강우에 의한 희석효과를 피하기 위해 온실에서 시험을 수행하였다. 공시 수생식물은 서낙동강 유역 지천에서 자생하는 식물의 유묘를 가져와 6월 초에 이식하였으며, 물상추와 부레옥잠 등은 시중에 유통되는 것을 구입하여 실험에 이용하였다. 벼와 율무 등의 작물은 종자를 파종하여 육묘 후 사용하였다. Fig. 1과 같이 450 L 고무포트에 공시여재인 둔치 흙을 30 cm 채운 후 담수하여 포트당 20주씩 수생식물을 이식하였고, 대조구로서 수생식물을 식재하지 않은 포트를 두어 수생식물들의 수질 정화효과를 비교하였다.

밀양시 하수종말처리장의 생활오폐수인 유입혼합수를 수질정화용 공시하수로 이용하였고, 양수기로 pumping하여 관수하였으며, 유량계를 설치하여 포트당 관수량을 측정하였다. 1회 관수 후 다음 관수시기는 식물중에 따라 포트의 바닥이 보이기 시작하면 관수를 시작하여 담수깊이를 15 cm로 조절하였다. 본 연구에 사용한 공시하수와 공시여재의 이화학적 특성은 Table 2와 3에서 보는 바와 같다.

수질, 식물체 및 토양분석

표면수와 침투수의 물시료 채취는 관수 후 10일 간격으로 수행하였으며, 2 L의 폴리에틸렌용기에 담아서 실험실로 옮겨 T-N과 T-P와 같은 측정항목들을 수질오염공정시험법¹⁹⁾

에 따라 분석하였다. pH와 EC, DO는 현장에서 YSI(556 MPS)를 이용하여 측정하였다. T-N과 T-P는 각각 자외선흡광법과 아스코르빈산 환원법으로 분석하였으며, K, Ca, Na, Cl 등의 무기성분은 ICP(Perkin-Elmer, OPTIMA 3300XL)를 이용하여 분석하였다. 수질정화능력의 검정은 수질분석성적을 바탕으로 관수전의 생활오폐수 수질과 관수 후 포트의 수질을 비교하여 수생식물별 수질 정화효율을 계산하였고, 관수량을 포함하여 수질성분별 정화량을 계산하였으며, 여기에서 대조구인 무식재 포트의 계산치를 감하여 순정화량을 산정하였다. 10월 하순에 초장과 경수 및 개체수를 측정한 후 수확하여 60°C 건조기에서 향량이 될 때까지 건조시켜 건물중을 측정하였다. 건조한 식물체는 분쇄 후 체내 영양염류함량 분석시료로 사용하였다. 수생식물의 식물체시료는 습식분해법으로 분해 후 T-N은 Kjeldahl 법으로, P₂O₅는 Vanadate 법으로 분석하였고, K, Ca, Mg 등은 ICP(Perkin-Elmer, OPTIMA 3300XL)를 이용하여 분석하였다. 여재분석은 시험 전·후에 토양을 채취하여 표층토를 제거하고 음건시킨 후 2 mm 체로 통과시킨 토양시료를 가지고 농촌진흥청 표준분석법²⁰⁾에 따라 토양성분을 분석하였다. pH는 초자전극법, 유기물함량은 Tyurin법, 유효인산함량은 Lancaster법으로 분석하였고, 치환성양이온은 ICP를 이용하여 측정하였다.

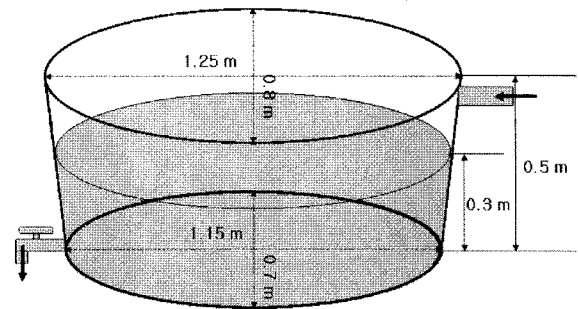


Fig. 1. Whole scene of greenhouse (left) and pot diagram used in the experiment (right) to assess the water purification ability of aquatic plants.

Table 2. Water quality of raw sewage used in the experiment

pH	EC (dS m ⁻¹)	Do	T-N	T-P	K	Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄
----- (mg L ⁻¹) -----										
7.6	0.69	0.18	32.8	11.8	38.4	37.8	13.7	40.8	55.9	36.3

Table 3. Chemical properties of media soil used in the experiment

pH	EC (dS m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	AV. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	K	Ca	Mg	Na
-(cmol ⁺ kg ⁻¹)-							
(1:5)							
6.3	0.07	9.67	114.7	0.09	3.94	1.00	0.36

결과 및 고찰

수생식물의 생육특성과 수질

수생식물의 초장, 경수 및 건물량을 조사한 결과는 Fig. 2와 같다. 초장은 벼가 162 cm로서 가장 컸고 부들과 미국가막사리, 비자루국화가 140 cm 이상을 보였다. 그러나 갈대와 줄은 자연 상태에 비하여 초장이 크지 않았는데 이는 온실조건과 이식기간 등이 자연 상태에 비하여 불리하였기 때문인 것으로 생각되었다. 수생식물의 증식력을 의미하는 개체수(경수)는 털물참새피와 나도겨풀이 많았고, 여뀌와 미나리 및 물상추도 높은 편에 속하였다. 건물생산량은 벼가 1,016 g m⁻²로 월등히 높았으며, 그 외 털물참새피, 율무, 줄, 미국가막사

리, 비자루국화가 500 g m⁻² 이상으로 높은 특징을 보였다.

수생식물의 생육기간 동안 표면수와 침투수의 평균수질을 분석한 결과는 Table 4와 같다. 관개수로 이용한 밀양시 하수종말처리장 유입혼합수의 수질은 T-N 32.8 mg L⁻¹, T-P 11.8 mg L⁻¹, K 38.4 mg L⁻¹로서 매우 오염농도가 높았다. 모든 수생식물의 표면수는 관개수에 비하여 측정항목별로 농도가 낮았으며, 대조구인 무식재에 비하여도 낮은 함량을 보여 수생식물에 의한 수질정화가 이루어졌음을 알 수 있었다. T-N의 농도는 4.2~6.1 mg L⁻¹의 범위로서 물상추와 털물참새피에서 가장 낮았고 율무와 자라풀에서 무식재와 비슷한 6.0 mg L⁻¹을 보였다. T-P의 농도는 0.8~4.2 mg L⁻¹의 범위를 보였고, 털물참새피와 부레옥잠에서 가장 낮은 함량을

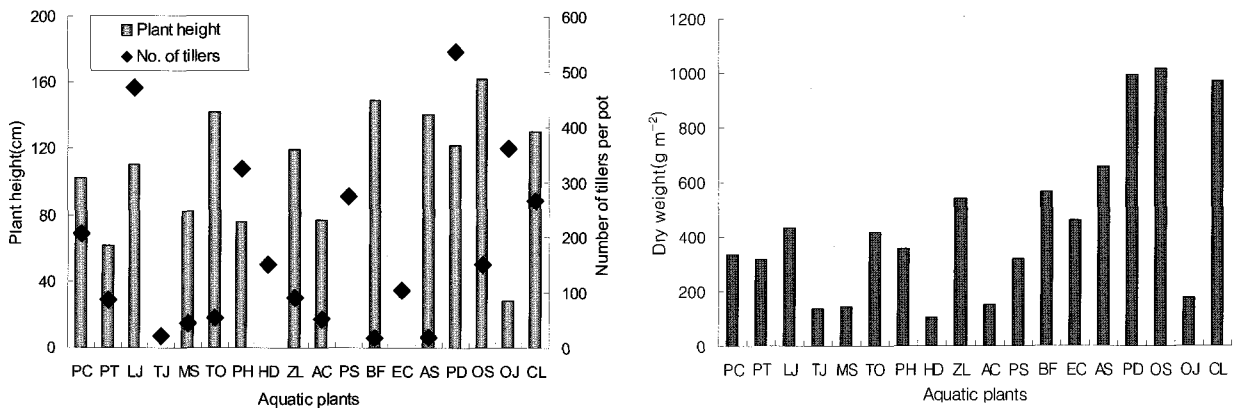


Fig. 2. Growth characteristics of aquatic plants.

Table 4. Average quality of surface and percolation water during whole growing period of aquatic plants

Aquatic plants	Surface water					Percolation water					
	T-N	T-P	K	Ca	Na	T-N	T-P	K	Ca	Na	
	----- (mg L ⁻¹) -----										
Native	PC	5.2	2.6	13.7	33.9	39.5	3.2	0.4	5.4	64.5	54.2
	PT	4.7	2.5	5.9	27.6	27.5	4.4	0.4	3.6	40.0	56.4
	LJ	5.8	3.4	11.8	42.9	47.0	4.3	1.0	5.7	46.9	56.1
	TJ	5.3	1.7	8.1	24.2	27.9	3.1	0.3	3.0	31.0	50.3
	MS	4.8	1.1	11.3	31.4	37.3	3.9	0.4	4.7	44.6	57.5
	TO	5.9	7.3	11.6	34.8	46.2	3.4	2.6	7.7	50.9	56.8
	PH	4.9	2.2	12.7	44.3	36.5	3.6	0.2	3.9	40.7	69.2
	HD	6.0	3.0	7.1	24.6	32.9	3.8	0.2	3.3	35.2	51.8
	ZL	5.2	4.1	20.0	39.8	57.1	3.3	0.6	5.5	52.0	58.4
	AC	5.7	2.0	14.7	34.3	41.5	2.7	0.5	3.7	48.0	52.4
Alien	PS	4.2	2.0	0.3	14.4	27.7	3.5	0.6	4.6	36.9	22.6
	BF	5.3	2.9	14.2	43.2	42.6	3.2	0.3	5.5	43.2	86.7
	EC	4.4	0.9	0.4	13.6	23.5	3.9	0.9	3.0	21.2	22.5
	AS	5.3	3.6	10.0	26.2	44.7	4.4	1.2	4.0	33.6	56.2
	PD	4.3	0.8	0.7	26.5	27.0	3.0	0.4	2.1	31.0	49.1
Crop	OS	5.6	4.2	12.4	40.3	44.9	4.6	1.4	5.6	43.9	54.5
	OJ	5.2	1.2	5.6	29.4	37.7	4.1	0.6	4.8	34.7	58.2
	CL	6.0	1.7	6.6	27.0	37.7	3.3	0.6	2.7	25.9	55.3
Non-planting	6.1	4.2	13.5	31.9	37.2	4.2	1.5	6.9	38.1	55.4	

나타냈다. K함량은 0.3~14.7 mg L⁻¹의 범위였는데, 물상추와 부레옥잠에서 월등히 낮은 함량을 보였고 창포와 미국가막사리, 갈대에서는 오히려 무식재보다 높은 함량을 보였다. EC와 관련이 있는 Ca과 Na함량은 기존 정화식물로 알려진 부레옥잠에서 가장 낮았고, 그 외에 물상추와 털물참새피에서 낮은 함량을 보였다.

침투수는 전체적으로 표면수의 수질에 비하여 T-N과 T-P, K 함량은 더 낮아졌으나, Ca과 Na함량은 오히려 증가하는 경향이였다. Ca과 Na의 경우 수생식물의 요구량이 T-N과 T-P, K에 비하여 상대적으로 낮으므로 수생식물에 의하여 흡수되지 못한 성분이 토양에 다량 흡착되어 있다가 침투수로 용출된 결과로 판단되며, 이와 관련하여 향후에 보다 정밀한 연구가 필요할 것으로 생각된다. T-N의 함량은 2.7~4.6 mg L⁻¹의 범위를 보였고, 창포와 털물참새피에서 가장 낮은 함량을 보였으며, T-P의 함량은 0.2~2.6 mg L⁻¹의 범위로서 여뀌와 자라풀에서 가장 낮은 함량을 보였다. K 함량은 2.1~7.7 mg L⁻¹의 범위로서 표면수에 비하여 수생식물간 차이가 크지 않았다. 털물참새피와 율무에서 K의 함량이 가장 낮았으며, 부들과 무식재에서 높은 함량을 보였다. Ca의 함량은 부레옥잠, 율무, 털물참새피에서 낮았으며, Na

함량은 부레옥잠과 물상추에서 월등히 낮은 경향이였다.

수생식물의 체내 영양염류 함량

부영양화 성분을 흡수하여 제거하는 수생식물의 특성을 고려하여 체내 양분함량별로 수생식물을 분류한 결과는 Fig. 3에서와 같다. T-N과 P₂O₅ 함량이 각각 7 과 5 g m⁻² 이상인 고함량 식물군(I 군)에는 줄, 벼, 털물참새피, 율무 등 정수식물들이 주로 속하였다. 반면에 T-N 함량은 7 g m⁻² 미만이나 P₂O₅ 함량(>5 g m⁻²)이 상대적으로 높은 식물군(III 군)에는 부유식물인 부레옥잠과 물상추가 분류되어졌다.

수생식물의 무기성분 흡수능력을 살펴보기 위하여 체내 양분함량을 분석하여 수생식물을 분류한 결과(Fig. 4), Ca과 Na함량이 물상추와 부레옥잠에서 높아서 I 군으로 분류되었으며, 털물참새피는 Na함량이 5 g m⁻² 이상으로 II군에 속하였다. Ca함량이 상대적으로 높은 III군에는 고마리, 부들, 물억새, 율무 등이 분류되었다.

수생식물의 부영양화성분 정화능력

수생식물에 의한 수질정화력을 검증하기 위하여 관수량과 T-N에 대한 정화효율 및 정화량을 분석하였다(Table 6). 관

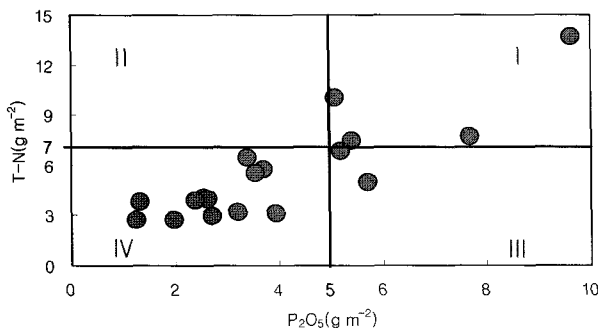


Fig. 3. Grouping of aquatic plants by the content of nutrient N and P per area unit (m²).

^{a)}I : T-N, ≥7 g m⁻² & P₂O₅, ≥5 g m⁻², II : T-N, ≥7 g m⁻² & P₂O₅, <5 g m⁻², III : T-N, <7 g m⁻² & P₂O₅, ≥5 g m⁻², IV : T-N, <7 g m⁻² & P₂O₅, <5 g m⁻².

Group ^{a)}	Scientific name
I	<i>Zizania latifolia</i> , <i>Oryza sativa</i> , <i>Paspalum distichum</i> var. <i>indutum</i> , <i>Coix lachryma-jobi</i> var. <i>mayuen</i>
II	-
III	<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Pistia stratiotes</i>
IV	<i>Aster subulatus</i> , <i>Typha orientalis</i> , <i>Phragmites communis</i> and so on, twelve species

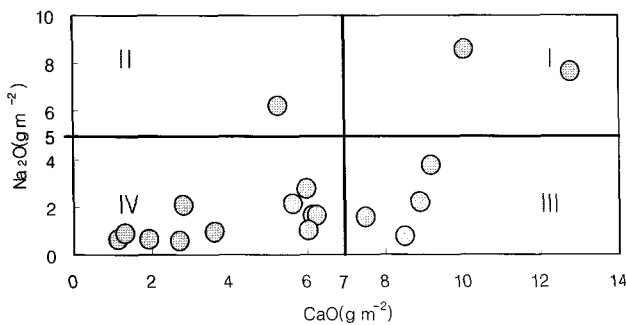


Fig. 4. Grouping of aquatic plants by the content of nutrient Ca and Na per area unit (m²).

^{a)}I : Na₂O, ≥5 g m⁻² & CaO, ≥7 g m⁻², II : Na₂O, ≥5 g m⁻² & CaO, <7 g m⁻², III : Na₂O, <5 g m⁻² & CaO, ≥7 g m⁻², IV : Na₂O, <5 g m⁻² & CaO, <7 g m⁻².

Group ^{a)}	Scientific name
I	<i>Pistia stratiotes</i> , <i>Eichhornia crassipes</i>
II	<i>Paspalum distichum</i> var. <i>indutum</i>
III	<i>Persicaria thunbergii</i> , <i>Typha orientalis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Coix lachryma-jobi</i> var. <i>mayuen</i>
IV	<i>Aster subulatus</i> , <i>Oenanthe javanica</i> , <i>Persicaria hydropiper</i> , and so on, eleven species

수량은 무식재의 207 L m²에서부터 벼의 444 L m²까지 수생식물에 따라 큰 차이를 보였는데, 벼와 부들, 울무, 비자루국화, 털물참새피에서 관수량이 많았다. 관수량의 차이는 온실에서 다른 조건이 동일하였으므로 수생식물이 가지는 증발산량의 차이에 기인된 것으로 생각된다.

T-N에 대한 표면수의 정화효율은 81.6~87.3%의 범위로서 무식재를 포함한 전 수생식물에서 80% 이상의 정화효율을 보였고, 수생식물이 식재된 포트에서 무식재에 비하여 정화효율이 높은 결과를 나타냈으며, 고마리, 물억새, 여뀌, 물상추, 털물참새피, 부레옥잠에서 85% 이상의 정화효율로서 높았다. 이는 Seo 등¹⁵⁾의 자연정화공법에 의한 인공습지에서 질소처리 효율인 46%에 비하여 훨씬 높은 결과였다. 표면수의 T-N 정화량은 67.5~145.8 mg m² day⁻¹의 범위였는데, 무식재구에서 67.5 mg m² day⁻¹으로 가장 낮은 정화량을 보였고, 부들, 비자루국화, 벼, 울무, 털물참새피에서 120 mg m² day⁻¹ 이상의 높은 정화량을 보여 T-N에 대한 수질정화 식물로서 가능성이 높았다. 칩투스수의 정화효율은 표면수에 비하여 조금 증가한 86.6~91.8%의 범위였고, 정화량도 71.1~150.6 mg m² day⁻¹의 범위로서 표면수보다 증가하였는데, 부들과 줄, 비자루국화, 털물참새피, 벼, 울무에서 높은 결과를 나타냈다. Yang²¹⁾은 부들을 식재한 인공식물섬에서 하루에 171.4 mg m⁻²의 질소를 제거할 수 있었다고 보고하였는

데, 본 연구에서도 부들이 130.1 mg m² day⁻¹을 정화하여 유사한 결과를 보였다.

T-P에 대한 정화효율과 정화량을 살펴본 결과는 Table 7과 같다. 표면수에서 정화율은 38.5~93.1%의 범위였고, 물억새, 털물참새피, 부레옥잠이 90% 이상의 정화율을 보였다. 표면수의 T-P 정화량은 무식재가 19.3 mg m² day⁻¹으로 가장 적었으며, 벼와 비자루국화, 털물참새피, 울무가 40 mg m² day⁻¹ 이상으로서 가장 정화량이 많았다. 칩투스수에서 T-P 정화율은 77.8~98.3%의 범위를 보였는데, 대부분의 수생식물에서 90% 이상의 정화율을 보였고, 특히 여뀌와 자라풀, 마름, 미국가막사리가 정화율이 높았으며, 비자루국화와 벼, 울무가 50 mg m² day⁻¹ 이상의 높은 정화량을 나타냈다. Seo 등¹⁵⁾은 생활하수를 자연정화공법에 의한 인공습지에 처리한 결과 T-P처리 효율이 71% 라고 보고 하였고, Jeong 등⁶⁾은 축산폐수처리의 수경재배에 의한 부레옥잠과 미나리의 T-P에 대한 정화효율이 58%와 59%라고 보고하였는데, 본 연구에서는 둔치 흙을 충전 여재로 이용하였기 때문에 미생물과 토양흡착에 의하여 보다 높은 정화율을 얻은 것으로 생각되었다.

수생식물을 식재한 포트의 수질과 식재하지 않은 포트의 수질을 분석하여 전 생육기간동안의 순정화량을 검정한 결과, Table 8에서 보는 것처럼 부영양화 성분인 T-N과 T-P 모두에 대한 순정화량은 벼, 줄, 비자루국화, 울무, 털물참새피 등

Table 6. The purification effect of aquatic plants on T-N

Aquatic plants	Amount of irrigation water (L m ⁻²)	Surface water		Percolation water	
		WPE ^{a)} (%)	PAW ^{b)} (mg m ² day ⁻¹)	WPE (%)	PAW (mg m ² day ⁻¹)
Native	PC	287.1	84.2	95.2	102.4
	PT	268.6	85.6	90.4	91.6
	LJ	314.3	82.4	102.4	108.4
	TJ	256.9	83.7	85.5	91.6
	MS	250.9	85.4	84.3	88.0
	TO	402.9	81.9	130.1	143.4
	PH	224.9	85.0	75.9	79.5
	HD	249.9	81.7	80.7	88.3
	ZL	355.7	84.2	118.1	126.5
	AC	320.7	82.7	104.8	116.9
Alien	PS	294.3	87.3	101.2	103.6
	BF	322.9	83.8	107.2	115.7
	EC	282.9	86.7	97.6	98.8
	AS	398.6	83.8	132.5	136.1
	PD	357.1	86.8	122.9	128.9
Crop	OS	444.3	83.0	145.8	150.6
	OJ	270.9	84.2	90.4	94.0
	CL	385.7	81.6	124.1	137.3
Non-planting	207.1	81.6	67.5	71.1	

^{a)}WPE : Water purification efficiency (%) = (average quality of irrigation water-average quality of surface or percolation water in aquatic plant pot) / average quality of irrigation water × 100, ^{b)}PAW : Purification amount of water quality per day(mg m² day⁻¹) = [Amount of irrigation water × (average quality of irrigation water - average quality of surface or percolation water in aquatic plant pot)] / growth period after irrigation of sewage water.

Table 7. The purification effect of aquatic plants on T-P

Aquatic plants	Surface water		Percolation water		
	WPE (%)	PAW (mg m ⁻² day ⁻¹)	WPE (%)	PAW (mg m ⁻² day ⁻¹)	
Native	PC	78.1	31.3	96.4	39.8
	PT	78.6	30.1	96.7	37.3
	LJ	71.5	32.5	91.6	41.0
	TJ	85.2	31.3	97.9	36.1
	MS	90.6	32.5	96.2	33.7
	TO	38.5	21.7	77.8	44.6
	PH	81.4	26.5	98.3	31.3
	HD	74.8	26.5	98.0	34.9
	ZL	64.9	32.5	94.8	48.2
	AC	82.8	37.3	96.1	43.4
Alien	PS	83.5	34.9	94.6	39.8
	BF	75.7	34.9	97.0	44.6
	EC	92.3	37.3	92.6	37.3
	AS	69.2	39.8	89.5	50.6
	PD	93.1	47.0	96.7	49.4
Crop	OS	62.6	39.8	88.0	55.4
	OJ	89.6	34.9	95.0	36.1
	CL	85.6	47.0	94.9	51.8
Non-planting	64.5	19.3	87.5	25.3	

Table 8. Classification of aquatic plants by purification ability of nutrient N and P during whole growing period

Net purification amount of T-P (g m ⁻²)	Net purification amount of T-N (g m ⁻²)		
	0~2.0	2.1~4.0	4.1~
0~1.0	<i>Persicaria thunbergii</i> (2.0, 0.9) ^{a)} <i>Trapa japonica</i> (1.5, 1.0) <i>Persicaria hydropiper</i> (0.7, 0.6) <i>Hydrocharis dubia</i> (1.1, 0.6)	-	<i>Typha orientalis</i> (5.3, 0.3)
1.1~2.0	<i>Miscanthus sacchariflorus</i> (1.5, 1.1), <i>Oenanthe javanica</i> (1.9, 1.3)	<i>Phragmites communis</i> (2.4, 1.1), <i>Leersia japonica</i> (2.9, 1.1), <i>Pistia stratiotes</i> (2.9, 1.3), <i>Eichhornia crassipes</i> (2.5, 1.5), <i>Bidens frondosa</i> (3.3, 1.3), <i>Acorus calamus</i> var. <i>angustatus</i> (3.2, 1.6)	<i>Oryza sativa</i> (6.6, 1.7), <i>Zizania latifolia</i> (4.3, 1.1), <i>Aster subulatus</i> (5.4, 1.7)
2.0~	-	-	<i>Coix lachryma-jobi</i> var. <i>mayuen</i> (4.8, 2.3), <i>Paspalum distichum</i> var. <i>indutum</i> (4.6, 2.3)

이 T-N 4.1 g m⁻² 이상, T-P 1.0 g m⁻² 이상으로 높아서 부영양화성분에 대한 수질정화력이 높은 결과를 보였고, 한편 부들은 T-P보다 T-N에 대한 정화력이 높은 수생식물로 밝혀졌다. 실제 수질정화량(Table 8)과 체내함량(Fig. 3)을 분석한 결과로 볼 때 줄, 벼, 율무, 털물참새피 등의 정수식물이 부영양화성분의 정화능력이 뛰어난 수생식물로 밝혀졌다. 본 연구와 공시 수생식물에 차이는 있지만 Seo 등¹⁵⁾은 자연정화공법에 의한 인공습지에 적합한 수생식물을 호기성조와 혐기성조로 구분하여 호기성조에는 심근성의 물억새, 달뿌리풀, 갈대

가, 혐기성조에는 줄, 큰고랭이, 부들, 노랑꽃창포가 적합하다고 보고한 바 있다. 벼는 수생생태계에서 안정적인 생장을 하는 작물로서 Kang & Shim²²⁾의 보고에 의하면 공장폐수와 같은 열악한 수질환경에서도 피해가 적었으므로 본 연구의 결과에서처럼 수질정화식물로서의 가치도 크다고 할 수 있다.

수생식물의 무기성분 정화능력

생활오폐수를 처리한 수생식물들의 K에 대한 정화력을 검증한 결과(Table 9), 표면수의 정화율은 47.9~99.3%의

범위로 물상추와 털물참새피, 부레옥잠에서 월등히 높았으며, 표면수의 정화량은 정화율이 높았던 물상추, 털물참새피, 부레옥잠과 더불어 부들, 비자루국화, 벼, 율무 등에서 130 mg m² day⁻¹ 이상으로 높은 결과를 보였다. 수생식물의 K 정화효과는 표면수에 비하여 침투수에서 증가되는 경향이었으며, 털물참새피와 율무, 부레옥잠, 마름에서 92% 이상의 정화율을 보였고, 정화량은 벼, 율무, 비자루국화, 부들, 줄, 털물참새피에서 140 mg m² day⁻¹ 이상으로 높은 결과를 나타냈다.

수생식물이 식재된 포트의 K 정화량에서 무식재의 K 정화량을 감한 순정화량은 Fig. 5와 같다. 표면수의 순정화량은 여뀌의 0.6 g m⁻²에서 털물참새피의 8.3 g m⁻²까지 수생식물

중에 따라 큰 차이를 보였는데, 대체적으로 털물참새피와 율무, 벼, 비자루국화, 물상추, 부들, 부레옥잠이 높은 정화력을 지니고 있었다. 반면에 침투수에서는 표면수에서 높은 정화능력을 보였던 물상추와 부레옥잠의 순정화량이 크게 감소되었고, 줄의 순정화량은 크게 증가되는 결과를 보였다. 이와 같은 결과는 물상추와 부레옥잠이 부유식물로서 토양에 뿌리를 고정하지 않고 물에 떠 있기 때문에 표면수에서 정화효과가 높았으나, 줄은 토양에 많은 근경을 뻗고 있기 때문에 침투수에서 정화효과가 크게 증가되는 경향을 보인 것으로 생각된다. 전체적으로 K에 대한 정화효과는 표면수와 침투수에서 수생식물에 따라 약간의 차이가 있었으나 털물참새피와

Table 9. The purification effect of aquatic plants on K

Aquatic plants	Surface water		Percolation water		
	WPE (%)	PAW (mg m ² day ⁻¹)	WPE (%)	PAW (mg m ² day ⁻¹)	
Native	PC	64.3	85.5	85.8	114.5
	PT	84.7	104.8	90.5	112.0
	LJ	69.4	101.2	85.2	124.1
	TJ	78.8	94.0	92.3	109.6
	MS	70.4	81.9	87.7	101.2
	TO	69.8	130.1	80.0	149.4
	PH	67.1	69.9	89.9	94.0
	HD	81.4	94.0	91.5	106.0
	ZL	47.9	78.3	85.6	141.0
	AC	61.8	91.6	90.4	133.7
Alien	PS	99.3	134.9	87.9	119.3
	BF	63.0	94.0	85.7	127.7
	EC	98.8	128.9	92.3	120.5
	AS	73.8	136.1	89.7	165.1
	PD	98.1	162.7	94.5	156.6
Crop	OS	67.8	139.8	85.3	175.9
	OJ	85.5	107.2	87.6	109.6
	CL	82.7	147.0	92.9	166.3
Non-planting	64.8	62.7	81.9	78.3	

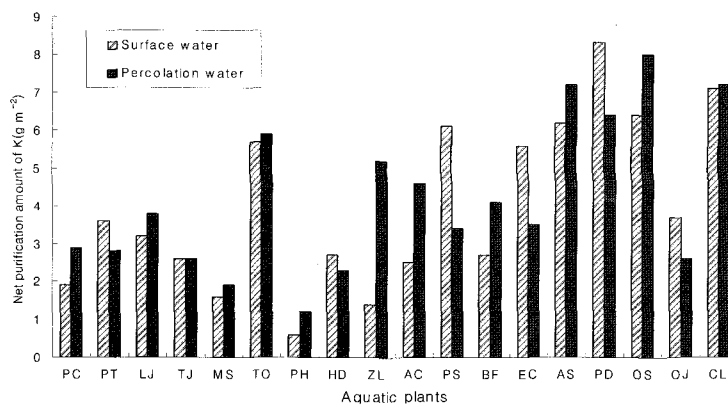


Fig. 5. Net purification amount of aquatic plants on K during whole growing period.

* Net purification amount of K during whole growing period (g m⁻²) = purification amount of K by aquatic plants - purification amount of K in non - planting pot.

울무, 벼, 비자루국화, 물상추, 부들, 부레옥잠, 줄이 높아서 K에 대한 정화능력이 우수한 수생식물로 검정되었다.

서낙동강과 같이 바다와 인접한 하천의 EC는 농업용수로도 사용하기 어려울 정도로 높아서 문제시 되고 있다²³⁾. EC와 관련이 있는 무기성분에 대한 수질정화력을 검정하고자 Ca와 Na의 순정화량을 분석한 결과, Table 10에서 보는 것처럼 정수식물인 털물참새피와 부유식물인 물상추 및 부레옥잠이 Ca와 Na 모두 4 g m⁻² 이상을 정화하는 효과를 보여 EC 저감효과가 우수한 것으로 밝혀졌다. 울무와 비자루국화는 Ca에 대한 정화력은 높았으나 상대적으로 Na에 대한 정화력이 낮은 특징을 보였다. 무기성분의 체내흡수량(Fig. 4)과 순정화량(Table 10)을 분석한 결과로 볼 때 부유식물인 물상추와 부레옥잠, 그리고 정수식물인 털물참새피가 EC관련 무기성분의 정화력이 우수한 수생식물로 검정되었다. Kim 등⁵⁾은 축산폐수를 이용하여 부레옥잠을 재배한 결과 EC 함량이 현저히 낮아졌다고 보고하였는데 본 연구에서도 EC에 대한 정화효율이 높은 수생식물로 검정되었다.

Ko 등²³⁾의 보고에 의하면 서낙동강과 같이 바다와 인접

해 있거나 SO₄를 많이 함유한 특이산성토로 이루어진 하천에서는 Cl과 SO₄의 농도가 높은 특징을 보이므로 수생식물에 의한 표면수의 Cl과 SO₄에 대한 정화력을 살펴보았다(Fig. 6). 대부분의 수생식물들은 무식재구와 마찬가지로 Cl과 SO₄에 대한 정화능력이 없거나 미미한 결과를 보였으나, Ca와 Na에 대한 정화효과가 컸던 부레옥잠과 물상추가 염소에 대한 정화력이 높았고, 부들과 털물참새피, 울무 등도 Cl을 정화하는 수생식물로 검정되었다. 그리고 SO₄에 대한 정화력은 털물참새피가 월등히 높았으며, 그 외에 갈대, 마름, 부들, 미국가막사리, 울무 등도 SO₄를 정화할 수 있는 수생식물로 밝혀졌다.

시험 후 토양 화학성

Fig. 7과 8은 생활오폐수처리에 의한 수생식물의 수질정화력 검정 후 토양의 화학성을 분석한 결과이다. EC는 고마리와 마름, 자라풀, 물상추, 털물참새피, 울무, 부레옥잠에서 시험전 토양에 비하여 소폭 감소되었고, 나머지 수생식물에서는 생활오폐수 관수에 의한 토양 양이온의 증가로 상승하

Table 10. Classification of aquatic plants by purification ability about nutrient Ca and Na during whole growing period

Net purification amount of Ca (g m ⁻²)	Net purification amount of Na (g m ⁻²) ^{b)}		
	0~2.0	2.1~4.0	4.1 ~
0 ~2.0	<i>Oenanthe javanica</i> (1.6, 0.2) ^{a)} , and so on, nine species	<i>Persicaria thunbergii</i> (2.2, 4.0)	-
2.1~4.0	<i>Hydrocharis dubia</i> (3.0, 1.7)	<i>Trapa japonica</i> (3.3, 3.6)	-
4.1~	<i>Coix lachryma-jobi</i> var. <i>mayuen</i> (4.3, 0.6), <i>Aster subulatus</i> (4.9, 0.1)	-	<i>Pistia stratiotes</i> (8.1, 4.4), <i>Eichornia crassipes</i> (8.1, 5.9) <i>Paspalum distichum</i> var. <i>indutum</i> (4.1, 5.9)

a) (,) : Net purification amount of Ca and Na during whole growing period, respectively

b) Net purification amount (g m⁻²) = purification amount of water quality by aquatic plants - purification amount of water quality of non-planting pot.

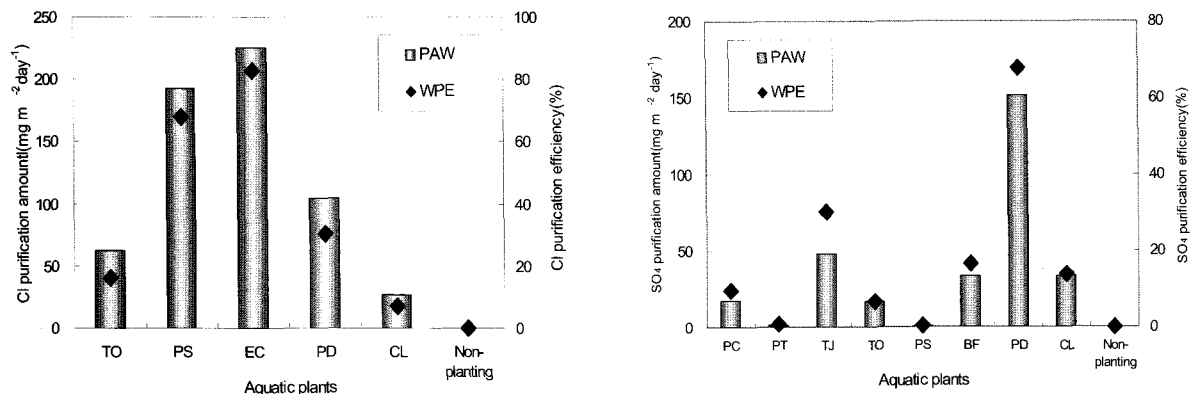


Fig. 6. The purification effect of aquatic plants on Cl and SO₄.

* PAW : Purification amount of water quality per day, WPE : Water purification efficiency.

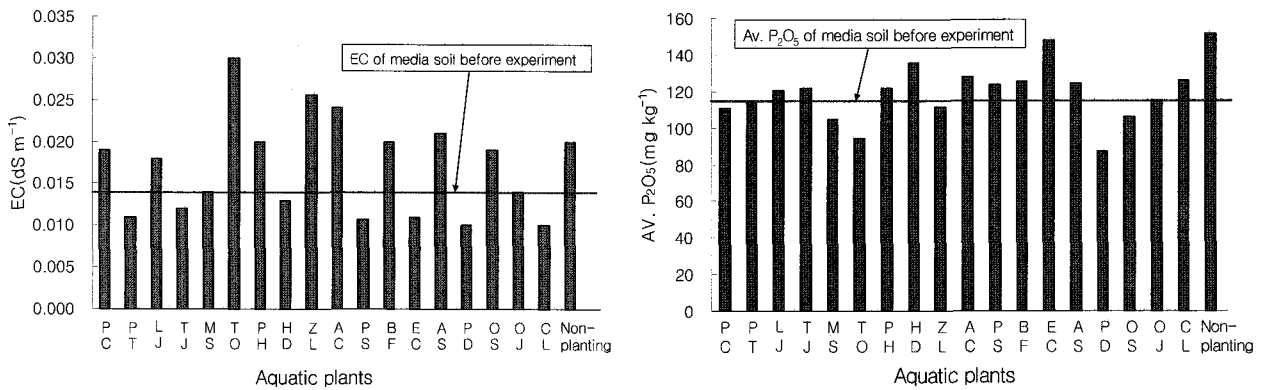


Fig. 7. EC and AV. P₂O₅ properties of media soil with aquatic plants after experiment.

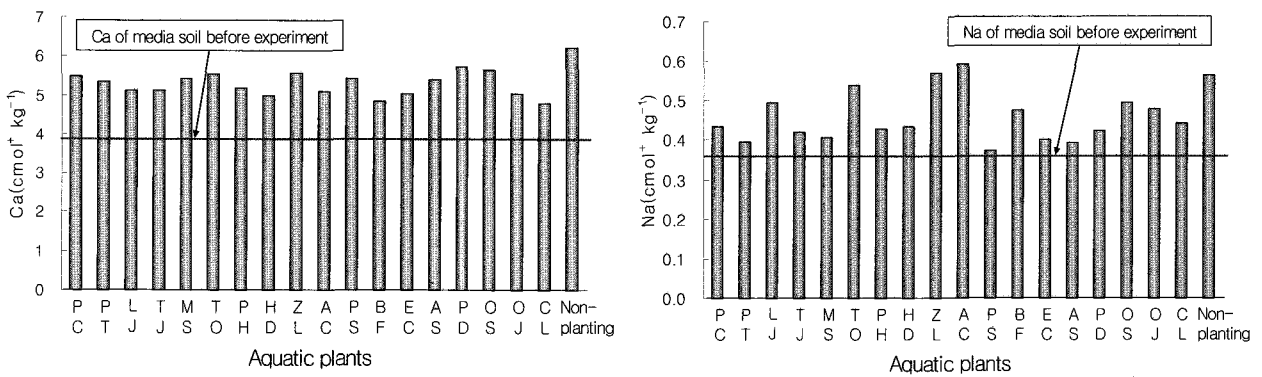


Fig. 8. Ca and Na properties of media soil with aquatic plants after experiment.

는 경향을 보였다. 유효인산 함량은 시험 전 토양에 비하여 수생식물에 따라 증가하거나 감소하는 특징을 나타냈으나, 무식재구와 비교하면 모든 수생식물에서 낮은 함량을 보여 수생식물에 의한 정화효과가 인정되었다. 특히 갈대와 물억새, 부들, 줄, 벼 등의 정수성 수생식물들과 근락형성이 빠른 털물참새피에서는 시험 전 토양의 인산함량보다도 감소되는 경향을 나타냈다. Ca와 Na 등의 치환성양이온들은 농도가 높은 생활오폐수를 관수하였기 때문에 수생식물에 흡수되지 못한 성분들이 토양에 흡착되어 시험 전 토양에 비하여 증가하였으나, 무식재구보다는 낮은 함량을 보여 수생식물에 의한 정화효과를 확인할 수 있었다.

요약

인공습지나 수변녹지 및 완충 저류지와 같은 수질정화시설을 조성하는데 이용할 수 있는 수생식물을 선발하고자 낙동강 하류에 자생하는 수생식물과 외래 수생식물, 습생작물을 대상으로 부영양화 성분(T-N, T-P) 및 EC 관련 무기성분에 대한 정화능력을 검증하였다. 수생식물의 생육기간 동안 225~444 L m⁻² 범위의 생활오폐수를 사용하였으며, 건물생산량이 많았던 벼와 부들, 줄, 비자루국화, 율무, 털물참새피 등이 350 L m⁻² 이상으로 가장 많은 생활하수를 소모

하였다. 질소와 인의 체내흡수량과 실제 정화능력(정화효율 및 정화량) 및 수확 후 토양을 분석한 결과, 초장이 크면서 건물량도 많았던 벼, 비자루국화, 부들, 율무, 털물참새피, 줄 등이 부영양화성분에 대한 우수 정화식물로 선발되었다. 무기성분 중 K에 대한 정화력은 부영양화성분의 우수 정화식물로 선발된 수생식물과 더불어 물상추와 부레옥잠이 높은 결과를 보였다. EC와 관련이 높은 Ca와 Na, Cl에 대한 정화효과가 우수한 수생식물로는 물상추와 부레옥잠, 털물참새피가 선발되었으며, 특히 털물참새피는 SO₄에 대한 정화효과도 뛰어났다.

참고문헌

1. Yoon, H. S. (1991) A study on vascular hydrophytes of intertidal area in Nakdong estuary. - Productivity of intertidal vascular hydrophytes before and after the construction of Nakdong barrage. *Kor. J. Ecol.* 14(1), 63-73.
2. Yoon, H. S., Kim, G. Y., Kim, S. H., Lee, W. H. and Yi, G. C. (2002) Physio-chemical characteristics of water and distribution of vascular hydrophytes in the West Nakdong river, south Korea. *Kor. J.*

- Ecol.* 25(3), 165-173.
3. Pyon, J. Y., Lee, K. S. and Lee, J. S. (1985) Studies on removal of water pollutants by aquatic plants., I. Removal of organic matter by water hyacinth and factors affecting it's growth. *Kor. J. Weed Sci.* 5(2), 143-148.
 4. Lee, K. S., Kim, M. K., Pyon, J. Y. and Lee, J. S. (1985) Studies on removal of water pollutants by aquatic plants. II. Removal of water polluted nutrients and heavy metals by water hyacinth. *Kor. J. Weed Sci.* 5(2), 149-154.
 5. Kim, B. Y., Lee, J. S. and Kim, J. H. (1998) Survey on nutrient removal potential and growth state of water hyacinth(*Eichhornia crassipes*) at Seo-Ho. *Kor. J. Environ. Agri.* 17(2), 145-149.
 6. Jeong, K. H., Kim, W. H., Kim, M. J., Seo, S., Choi, G. C., Cho, Y. M. and Kim, Y. K. (2000) The effect of clarification by aquatic plant on livestock wastewater. *J. L. H. E.* 6(2), 83-89.
 7. Lee, J. E., Park, J. W. and Kim, J. E. (1999) Use of plant materials for decontamination of waste water polluted with 2,4-dichlorophenol. *Kor. J. Environ. Agri.* 18(3), 292-297.
 8. Park, J. S. (2002) Sewage treatment using water hyacinth(*Eichhornia crassipes*) and watercress(*Oenanthe javanica*). *Kor. J. Environ. Agri.* 21(2), 144-148.
 9. Ko, J. Y., Kang, H. W., Lee, J. S., Kim, C. S., Sakadevan, K. and Bavor, H. J. (2003) Nutrients removal efficiency by vegetation density on constructed wetland from small watershed. *Kor. J. Environ. Agri.* 22(4), 266-273.
 10. Kim, C. S., Son, S. G., Lee, J. H. and Oh, K. H. (2000) Community structure, productivity, and nutrient uptake of the vascular plants in the wetlands of the Asan lake. *Kor. J. Ecol.* 23(3), 201-209.
 11. Lee, K. S., Jang, J. R., Kim, Y. K. and Park, B. H. (1999) A study on the floating island for water quality improvement of a reservoir. *Kor. J. Environ. Agri.* 18(1), 77-82.
 12. Yang, H. M. (2002) Preliminary nitrogen removal rates in close-to-nature constructed stream water treatment wetland. *Kor. J. Environ. Agri.* 21(4), 269-273.
 13. Yang, H. M. and Rhee, C. O. (1998) Treatment level of a pond system for ecological treatment and recycling of animal excreta. *Kor. J. Environ. Agri.* 17(1), 70-75.
 14. Seo, D. C., Lee, B. J., Hwang, S. H., Lee, H. J., Cho, J. S., Lee, S. W., Kim, H. C. and Heo, J. S. (2006) Treatment efficiency of existing forms of pollutants in sewage treatment plant by natural purification method. *Kor. J. Environ. Agri.* 25(2), 129-137.
 15. Seo, D. C., Jang, B. I., Jo, I. S., Lim, S. C., Lee, H. J., Cho, J. S., Kim, H. C. and Heo, J. S. (2006) Selection of optimum water plant in constructed wetland by natural purification method for municipal sewage treatment. *Kor. J. Environ. Agri.* 25(1), 25-33.
 16. Seo, D. C., Park, M. R., Kwak, N. W., Hwang, H. N., Lee, H. J., Cho, J. S. and Heo, J. S. (2006) Optimum depth and volume ratio of aerobic to anaerobic bed for development of small-scale sewage treatment apparatus by natural purification method. *Kor. J. Environ. Agri.* 25(1), 14-24.
 17. Seo, D. C., Park, M. R., Kim, H. J., Cho, I. J., Lee, H. J., Sung, S. J., Cho, J. S. and Heo, J. S. (2006) Development of sewage treatment apparatus for detached house in agricultural village by natural purification method. *Kor. J. Environ. Agri.* 25(3), 202-210.
 18. Kim, C. S., Ko, J. Y., Lee, J. S., Hwang, J. B., Park, S. T. and Kang H. W. (2006) Screening of nutrient removal hydrophyte and distribution properties of vegetation in tributaries of the West Nakdong River. *Kor. J. Environ. Agri.* 25(2), 147-156.
 19. Korea Environmental Protection Agency (2000) Standard methods for the examination of water contamination. KEPA.
 20. National Institute of Agricultural Science & Technology (1988) Soil chemical analysis method. *Rural Development Administration.*
 21. Yang, H. M. (2002) Nitrogen removal rate in reed wetland cells of a pond-wetland stream water treatment system. *Kor. J. Environ. Agri.* 21(4), 274-278.
 22. Kang, B. H. and Shim, S. I. (1997) Growth responses of crops to wastes derived from some factories. *Kor. J. Environ. Agri.* 16(2), 161-165.
 23. Ko, J. Y., Lee, J. S., Kim, C. S., Jeong, K. Y., Choi, Y. D., Yun, E. S., Park, S. T., Kang, H. W. and Kim, B. J. (2006) Estimation of agricultural water quality using classification maps of water chemical components in Seonakdong river watershed. *Kor. J. Environ. Agri.* 25(2), 138-146.