

## 자연정화공법에 의한 인공습지 하수처리장에서 최적 수생식물의 선정

서동철 · 장병일 · 조인성 · 임석천 · 이홍재<sup>1)</sup> · 조주식<sup>2)</sup> · 김홍출<sup>3)</sup> · 허종수\*

경상대학교 응용생명과학부, <sup>1)</sup>진주산업대학교 환경공학과, <sup>2)</sup>순천대학교 생명환경과학부, <sup>3)</sup>진주산업대학교 미생물공학과  
(2006년 3월 17일 접수, 2006년 3월 27일 수리)

### Selection of Optimum Water Plant in Constructed Wetland by Natural Purification Method for Municipal Sewage Treatment

Dong-Cheol Seo, Byeong-Il Jang, In-Seong Jo, Seok-Cheon Lim, Hong-Jae Lee<sup>1)</sup>, Ju-Sik Cho<sup>2)</sup>, Hong-Chul Kim<sup>3)</sup>, and Jong-Soo Heo (Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea, <sup>1)</sup>Department of Environmental Engineering, Jinju National University, Jinju, 660-758, Korea, <sup>2)</sup>Division of Applied Life and Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon, 540-742, Korea, <sup>3)</sup>Department of Microbiological Engineering, Jinju National University, Jinju, 660-758, Korea)

**ABSTRACT:** Objectives of this experiment were to select of the optimum water plant and to investigate the removal efficiency of the major nutrients in the constructed wetland by natural purification method for municipal sewage treatment in the farming and fishing village. For the experiment, we used "constructed wetland" which was consisted of aerobic (vertical filter system) and anaerobic systems (horizontal filter system). Both systems were filled with gravel and filter media, and grew water plants on top of them. And then, we investigated several items such as sewage treatment efficiency, growth status of water plants and the absorbed amount of inorganic elements in water plants with periodical periods. In aerobic area, removal efficiencies of BOD, COD, T-N and T-P were over 92%, 74%, 25% and 57%, respectively, and then when the water is passed through anaerobic area, the efficiency was over 96%, 84%, 44% and 71%, respectively, which was increased more treatment efficiency than that of aerobic area. Absorption amounts of nitrogen and phosphorous in *Miscanthus sacchariflorus* BENTH were the highest in the water plants as 17.7 and 2.41 g/plant in the aerobic area, respectively. Absorption amounts of nitrogen and phosphorous in *Scirpus tabernaemontani* GMEL were the highest in the water plants as 8.7 and 1.13 g/plant in the anaerobic area, respectively. For the selection of optimum water plants in the constructed wetland by natural purification method for municipal sewage treatment, it were observed that there were *Miscanthus sacchariflorus* BENTH, *Phragmites japonica* STEUD and *Phragmites communis* TRINIUS in the aerobic area and were *Zizania latifolia* TURCZ, *Scirpus tabernaemontani* GMEL, *Typha orientalis* PRESL, *Iris pseudoacorus* L and *Carex dispalata* BOOTT in the anaerobic area.

**Key Words:** constructed wetland, natural purification method, Municipal sewage treatment, water plant, filter media, aerobic area, anaerobic area

### 서 론

경제성장과 산업의 발달로 생활용수 및 공업용수의 수요량은 날로 증가하고 있으며, 생활하수, 공장폐수 및 축산폐수 등으로 인한 수질오염이 날로 심화되고 있어 각종 용수의 안정적인 공급을 위한 하천수질 보전대책이 절실히 요구되는 실정이다<sup>1,2)</sup>.

도시에서 발생하는 하수는 대부분 기계식공법으로 처리되어

하천으로 방류되고 있으나, 인구밀도가 낮은 농어촌 등에서 발생하는 하수는 거의 처리되지 않고 하천이나 바다로 방류되고 있다. 농어촌 등 소규모로 발생하는 하수는 전체 하수 발생량의 약 10% 정도이며, 하수 발생량이 50톤/일 이하인 마을이 약 89%를 차지하고 있다. 또한 농어촌 지역의 물은 식수원이나 농업용수로 사용되기 때문에 깨끗하게 유지 관리하는 것은 필수적이다<sup>3)</sup>.

우리 나라의 농어촌 오수처리 방법은 지역적인 특성을 충분히 고려하지 않고 획일적으로 적용하려는 경향이 있다. 정부에서 농어촌, 산간지 등 소규모로 발생하는 하수를 처리하기 위하여 그 동안 전국의 260여개 마을에 자연정화공법의 일종인 모

\*연락처:

Tel: +82-55-751-5470 Fax: +82-55-757-0178  
E-mail: jsheo@nongae.gsnu.ac.kr

관침윤트랜치공법을 도입하였다. 그러나 모관의 폐쇄로 인하여 그 처리기능이 미비된 곳이 많아 이 공법의 보급은 중단되었고, 그 후 기계식인 표준 활성슬러지법, 장기폭기법, 접촉폭기법, 고효율처리법 등이 보급되었으나 이들 하수처리공법은 하수처리 효율이 낮고, 에너지 소비가 높으며, 기계고장시 악취가 발생하는 등 여러 가지 측면에서 문제점이 나타나고 있는 실정이다<sup>4,6)</sup>.

소규모로 발생하는 하수를 처리하기 위해서는 하수발생량의 변화에 쉽게 적응하고, 하수처리 효율이 높을 뿐만 아니라 하수처리 비용이나 시설관리유지 비용이 낮고 지역의 환경에 잘 적응하며, 공정이 간단하고 시설비가 비교적 저렴한 하수처리공법의 개발이 절실한 실정에 있다<sup>3,4)</sup>. 또한 농어촌지역의 특성과 수처리의 효율적인 측면을 감안해 볼 때, 농어촌 지역의 하수처리 공법은 자연 스스로가 가지고 있는 자연정화기능을 최대한 활용하여 지역 특성에 맞고 유지관리가 용이한 하수처리 방식을 도입하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

그러나 현행 자연친화형 하수처리공법으로는 토양처리방법, 산화지 처리법, 식물을 이용한 처리법, 습지 처리법, 휴경지를 이용한 처리 및 삼림토양침투에 의한 처리 등이 있으나, 이러한 자연정화공법은 하수처리에 있어서 악취발생이나 공극폐쇄로 인한 투수속도의 저하, 과도한 부지면적 소요 및 농어촌 지역의 특성상 오수 유입량의 큰 변동으로 처리효율 저하 등의 문제점이 있다<sup>4,7)</sup>. 따라서 최근에 자연정화공법에 의한 인공습지 하수처리장을 개발하려고 하고 있으나, 이들 개발을 위해서는 수생식물, 여재, 미생물과 하수처리공법 등 여러 요인의 최적조건 구명에 대한 연구가 필요한 실정이다.

일반적으로 자연정화공법에 의한 인공습지 하수처리장에서 수생식물의 역할은 여재층의 유기물함량을 증가시켜 여재 표면의 미생물 생육을 촉진시키며, 여재의 입단 형성을 촉진시켜 하수의 투수속도를 증가시킬 뿐만 아니라 오염물질 처리 효율을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 또한 하수처리장내에 수생식물이 생육함에 따라 여재층의 막힘현상을 크게 줄일 수 있고 질소, 인 그리고 각종 무기성분 등의 오염물질들을 흡수하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다<sup>8)</sup>. 따라서 수생식물의 생육상황은 하수처리장의 수처리 효율과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 악취를 줄이고 미관상 혐오감을 크게 줄일 수 있는 등 자연친화형 하수처리장에서 중요한 역할을 한다<sup>7)</sup>.

자연친화형 하수처리장에서 최적의 수생식물 선정을 위해서는 호기성조 및 혐기성조에서 수생식물의 생육이 왕성하고, 하수처리 효율을 증가시킬 뿐만 아니라, 뿌리의 발육이 호기성조와 혐기성조에 적합하고, 병충해에 강하고, 주위 환경과 조화를 이룰 수 있어야 할 것이다.

따라서 본 연구는 농어촌 등 소규모로 발생하는 생활하수를 자연친화적으로 처리하기 위한 대책의 일환으로 인공습지에 적용되는 최적의 수생식물을 선발하기 위하여 다년생 수생식물 10종을 하수처리장에 식재한 후 하수 처리효율, 처리시기별 수생식물의 생육상 및 무기성분 흡수량 등을 조사하여 보고하는 바이다.

### 재료 및 방법

#### 공시재료

본 인공습지 하수처리장에 사용된 공시 하수는 교원대학교에서 배출되는 생활하수였으며, 공시여재는 여재채취장에서 채취한 여재를 사용하였다.

공시 하수 및 여재의 화학적 특성은 각각 Table 1~2에서 보는 바와 같다. 하수처리장에 사용한 여재의 입도 분포도는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 입도 0.1 mm 이하가 2.0%,

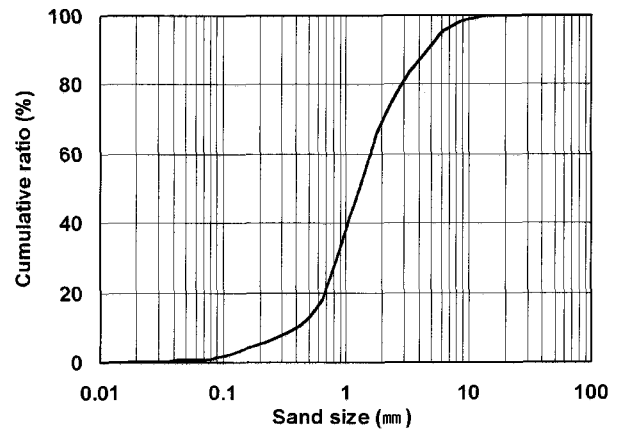


Fig. 1. Particle distributions of the filter media used.

Table 1. Chemical characteristics of the municipal sewage used

	pH	DO	BOD	COD	SS	T-N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	T-P
						(mg/L)				
Average	7.3	0.18	144.3	153	266	62.0	46.5	0.11	0.67	6.8
Range	7.3~	0.14~	140~	122~	177~	56.6~	36.0~	0.07~	0.48~	5.5~
	7.4	0.23	149	171	475	72.1	56.4	0.13	0.77	9.1

Table 2. Chemical characteristics of the filter media used

pH	EC	O.M	T-N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	T-P	K	Ca	Mg	Na
(1:5H <sub>2</sub> O)	(dS/m)	(%)	(mg/kg)							
7.0	0.04	0.24	51.7	3.05	0.95	1.3	8.1	79.3	16.2	2.7

0.1~0.25 mm가 3.1%, 0.25~0.50 mm가 7.9%, 0.50~1.00 mm가 25.0%, 1.00~2.00 mm가 31.0% 및 2.00 mm 이상이 31.0%로 모래의 입경이 0.1~2.0 mm가 약 70% 정도 되었다. 그리고 본 인공습지 하수처리장에 이식한 공시 수생식물은 큰고랭이(*Scirpus tabernaemontani* GMEL.; SCPTA), 줄(*Zizania latifolia* TURCZ.; ZIZLA), 갈대(*Phragmites communis* TRINIUS; PHRCO), 부들(*Typha orientalis* PRESL; TYHOR), 물억새(*Miscanthus sacchariflorus* BENIH.; MISSA), 달뿌리풀(*Phragmites japonica* STEUD.; PHRJA.), 삿갓사초(*Carex dispalata* BOOTT.; CRXDI), 노랑꽃창포(*Iris pseudoacorus* L.; IRIPS), 골풀(*Juncus effusus* L. var. *decipiens* BUCH.; IUNED) 및 붓꽃(*Iris nertschinskia* LODD.; IRINE)으로 총 10종으로 각각 호기성조 및 혐기성조에 갖 짝이 난 수생식물을 이식하였다.

**하수처리장치 설계 및 시공**

자연정화공법에 의한 인공습지 하수처리장의 단면도 및 평면도는 각각 Fig. 2와 같이 호기성조(수직흐름조)와 혐기성조(수평흐름조)로 구분하여 설치하였으며, 호기성조와 혐기성조의 명명은 각조의 특성을 고려하여 임의로 하였다. 호기성조의 크기는 가로 10 m × 세로 10 m × 깊이 1 m, 혐기성조의 크기는 가로 10 m × 세로 20 m × 깊이 1 m로 하였으며, 호기성조와 혐기성조의 크기를 1 : 2의 비율로 하였고, 하수의 누수를 방지하기 위하여 처리장 하부 및 옆면에 두께 5 mm의 차수막을 설치하였다. 각 조에는 하부에서부터 자갈을 30 cm, 그 위에 여재를 60 cm 높이로 채워 넣었다. 호기성조는 구역을 이등분하여 1주일씩 교대로 각 구역에 공시 하수를 유입시켰고, 혐기성조의 4곳에 하수의 흐름방향과 수직으로 차수막을 설치하여 하수가 지그재그 식으로 흐르게 하여 유하거리를 최대화 시켰다.

공시 수생식물은 (주)한림녹화건설에서 10종을 구입하여 이식하였고, 이식방법은 호기성조와 혐기성조 모두 가로방향으로는 서로 같은 종류의 수생식물을 2반복으로 이식하였다. 수생식물의 재식거리는 갈대조 및 습지 모두 가로 50 cm × 세로 40 cm로 하였고, 호기성조에는 총 460주, 혐기성조에는 총 860주를 각각 이식하였으며, 분석용 시료채취를 위하여 각 조에 각 수생식물을 10주씩 보식하였다.

**하수처리장치 운전조건 및 조사시기**

인공습지 하수처리장의 운영은 집수정에 유입된 하수를 정량펌프를 이용하여 1일 8~24 m<sup>3</sup>을 1시간 간격으로 0.3~1 m<sup>3</sup>씩 수직여과방식인 호기성조에 골고루 유입시켰다. 호기성조를 통과한 처리수는 자연유하식으로 혐기성조로 유입되게 하였으며, 혐기성조를 통과한 처리수를 방류수로 하였다. 수처리의 효율조사는 1999년 4월부터 1999년 10월까지 매달 실시하였으며, 하수 원수, 호기성조 통과수 및 혐기성조 통과수를 최종방류수로 하여 매달 마지막 1주일간은 매일 한번씩, 총 49회 분석한 결과를 평균하여 수처리 효율을 조사하였다. 수생식물의 생육상황 및 무기성분 함량 조사는 1999년 3월 19일 이식하여 이식 후 50, 80, 150, 210 및 260일에 시료를 채취하여 각각 실시하였다.

**분석방법**

수질분석은 수질오염공정시험법과 APHA의 standard method에 준하여 다음과 같이 하였다<sup>9)</sup>. pH는 초자전극법, DO와 BOD는 잉클러-아지드화나트륨 변법, COD는 산성 KMnO<sub>4</sub>법, SS는 유리섬유여과법, 총 질소는 자외선 흡광광도법, 총 인은 아스코르빈산 환원법으로 분석하였다.

여재 및 식물체의 분석은 토양화학분석법에 준하여 다음과 같이 하였다<sup>10)</sup>. 식물체의 분석은 시료를 습식분해액(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: HClO<sub>4</sub> = 1:1)으로 분해시킨 다음 T-N는 Kjeldahl법, T-P는 Vanado molybdate법(Beckman, DU 650 spectrophotometer, U.S.A.)으로 분석하였다. 그리고 K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu 및 Zn의 분석은 습식분해법으로 분해시킨 여액을 필요에 따라 희석하여 Atomic absorption spectrophotometer(Shimadzu AA-680, Japan)로 분석하였다.

**결과 및 고찰**

**인공습지 하수처리장에서 수처리효율**

호기성조 및 혐기성조를 통과한 처리수중의 BOD, COD, T-N 및 T-P의 처리효율을 조사한 결과는 Fig. 3과 같다. 하수 원수의 BOD는 평균 144.3 mg/L이었으며, 호기성조를 통과한 호기성조 처리수의 BOD는 평균 10.9 mg/L로서 BOD 처리효율이 92%이었고, 혐기성조를 통과한 방류수의 BOD는 평균 4.5 mg/L로서 BOD 처리효율이 96%로 매우 높았다.

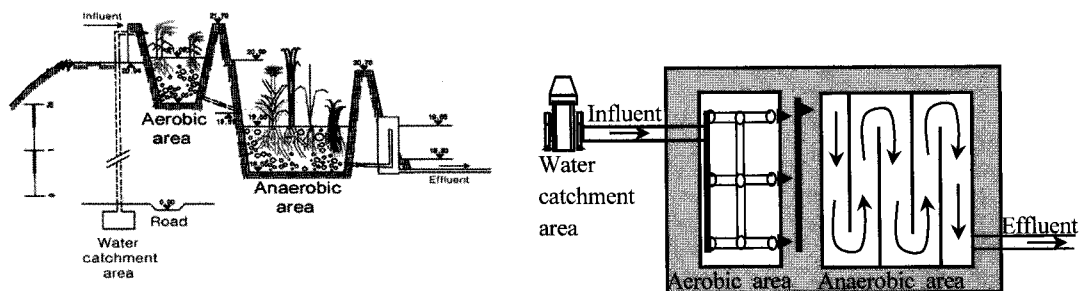


Fig. 2. Diagrams of constructed wetland for treatment of municipal sewage.

일반적으로 인공습지에서 수생식물은 지상부의 내부통기 조직과 연결된 뿌리에서 근권으로의 산소 방출을 하는 것으로 알려져 있으며, 갈대의 경우 어린뿌리가 가장 중요한 산소 공급원이며, 이와 같은 산소공급의 결과는 근권내 혐기-호기층의 공존이 배출수의 질산화작용과 탈질작용을 촉진시키고, 또한 혐기층에서는 하수중 유기물을 이산화탄소와 메탄으로 분해시켜 그 결과 BOD가 낮아지는 것으로 알려져 있다<sup>11)</sup>.

하수 원수의 COD는 평균 약 153 mg/L이었으며, 호기성조를 통과한 호기성조 처리수의 COD는 평균 약 39 mg/L로서 COD 처리효율이 74%이었고, 혐기성조를 통과한 방류수는 평균 약 23 mg/L로서 COD 처리효율이 84%로 매우 높게 처리되었다. 일반적으로 인공습지를 이용한 하수처리에 있어서 COD의 감소는 수생식물 뿌리부의 미생물에 의해 유기물이 표면에서 1.5 cm 깊이 사이에서 주로 분해되는데 그 이유는 이 층에 반응기질과 산소가 풍부하여 박테리아의 성장과 활력이 가장 좋기 때문이다<sup>11)</sup>.

하수 원수의 총 질소는 평균 약 62 mg/L이었으며 호기성조를 통과한 호기성조 처리수중의 총 질소는 평균 약 47.2 mg/L로서 총 질소 처리효율이 25%이었고, 혐기성조를 통과한 방류수는 평균 약 40.2 mg/L로서 총 질소 처리효율이

더욱 증가하여 46%로 처리되었다. 현행 타 하수처리공법에 비해 질소 처리효율이 다소 높은 경향으로 Huang 등<sup>12)</sup>이 인공습지에서 생활하수처리에 관한 실험에서 질소의 처리율이 33~45%범위, Lee 등<sup>13)</sup>은 식물을 이용한 오수의 고도처리를 위한 실험에서 총 질소 처리효율이 40%라고 하였다.

하수 원수의 총 인은 평균 약 6.8 mg/L이었으며, 호기성조를 통과한 호기성조 처리수의 총 인은 평균 약 2.9 mg/L로서 총 인 처리효율이 57%이었고, 그리고 혐기성조를 통과한 방류수는 1.9 mg/L로서 총 인 처리효율이 더욱 증가하여 71%로 높게 처리되었다. Lee 등<sup>13)</sup>은 식물을 이용한 오수의 고도처리를 위한 수면하 흐름방식에 의한 실험실적 오수처리 실험에서 총인 처리율이 25~30%라고 하였는데, 이에 비하여 본 실험에서의 총 인 처리율은 70%이상으로 매우 높게 처리되었다.

**인공습지 하수처리장에서 수생식물의 생육상황**

수생식물의 이식후 생육시기에 따른 초장을 조사한 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 생육시기별 호기성조에서 초장은 수생식물의 성장 특성에 따라서 많은 차이가 있었다. 전반적으로 수생식물 이식 80일 이후부터 초장이 급격하게 성장하여 수생식물 이식 150일 후에 최대 초장을 보였으며, 이후 수생식물 이식 210일 후에는 계절적인 영향으로 더 이상 초장이 증가하지 않았다. 최대 성장을 보인 이식 150일 후의 호기성조에서 초장은 각 수생식물 한 주당 물억새>달뿌리풀>부들>갈대>큰고랭이>줄>삿갓사초>노랑꽃창포>골풀>붓꽃 순이었다. 각 수생식물의 초장만으로 비교해 볼 때 자연친화형 하수처리장의 호기성조에 적합한 수생식물은 물억새, 달뿌리풀, 부들, 갈대 및 큰고랭이 등인 것으로 판단되었다.

혐기성조에서도 호기성조에서와 마찬가지로 수생식물의 성장 특성에 따라서 많은 차이가 있었다. 전반적으로 수생식물 이식 80일 이후부터 초장이 급격하게 증가하여 수생식물 이식 150일 후에 최대 초장을 보였으며, 그 후 수생식물 이식 210일 후에는 계절적인 영향으로 더 이상 증가하지 않았

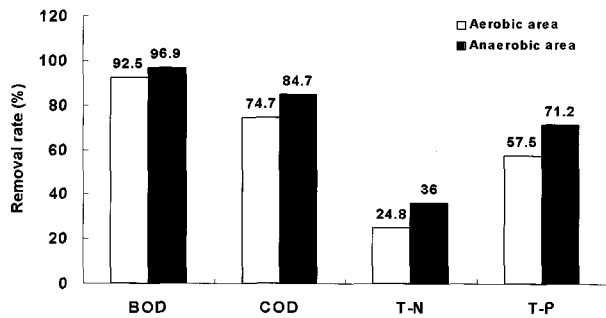


Fig. 3. Removal rate of BOD, COD, T-N and T-P after treatment of municipal sewage in constructed wetland.

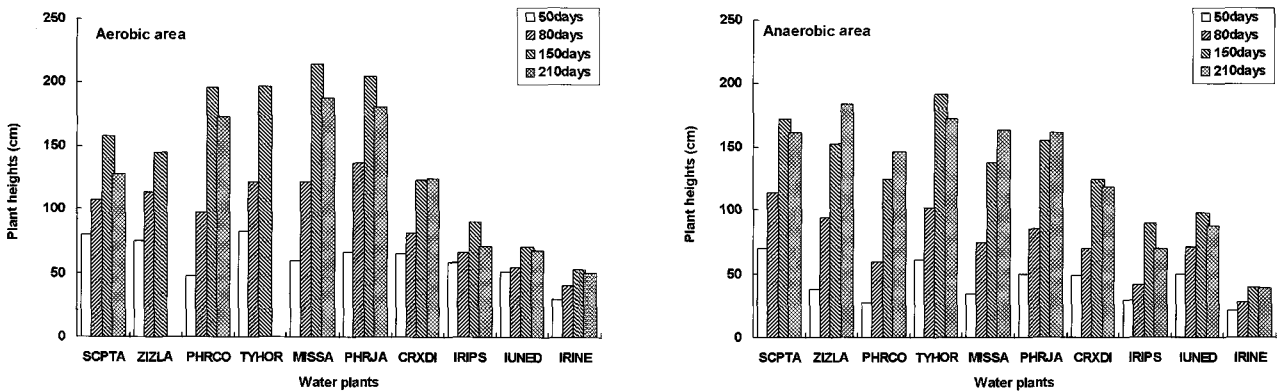


Fig. 4. Plant heights of water plants at days after transplanting in constructed wetland. (SCPTA; *Scirpus tabernaemontani* GMEI., ZIZLA; *Zizania latifolia* TURCZ., PHRCO: *Phragmites communis* TRINUS, TYHOR; *Typha orientalis* PRESL, MISSA; *Miscanthus sacchariflorus* BENTH., PHRJA; *Phragmites japonica* STEUD., CRXDI; *Carex dispalata* BOOTT., IRIPS; *Iris pseudoacorus* L., IUNED; *Juncus effusus* var. *decipiens* BUCH., IRINE; *Iris nertschinskia* LODD.)

다. 최대 성장을 보인 이식 150일 후의 초장은 각 수생식물 한 주당 부들>큰고랭이>달뿌리풀>줄>물억새>갈대>삿갓사초>골풀>노랑꽃창포>붓꽃 순이었다.

본 하수처리공법의 호기성조 및 혐기성조에 이식한 각 수생식물의 생육시기에 따른 건물생산량을 조사한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 수생식물의 종류에 따라 약간의 차이는 있었으나, 전반적으로 호기성조에 이식한 수생식물이 혐기성조에 이식한 수생식물에 비해 건물생산량이 많았다. 생육시기별 호기성조의 건물생산량은 수생식물의 생장 특성에 따라서 큰 차이가 있었다. 일반적으로 생육 80일 이후부터 건물생산량이 급격하게 증가하여 생육 150일 후에 최대 생산량을 보였고, 그 이후 계절적인 영향으로 생육 210일 후에는 급격히 감소하였다. 최대 건물생산량을 보인 생육 150일 후의 각 수생식물 한 주당 건물생산량은 큰고랭이, 줄, 갈대, 부들, 물억새, 달뿌리풀, 삿갓사초, 노랑꽃창포, 골풀 및 붓꽃이 각각 약 340, 634, 346, 228, 1340, 475, 337, 242, 88 및 30 g/plant로서 물억새가 타 수생식물에 비해 현저히 높았으며, 그 다음 줄>달뿌리풀>갈대=큰고랭이=삿갓사초>노랑꽃창포=부들>골풀>붓꽃 순이었다.

각 수생식물의 건물생산량만 비교해 볼 때 자연친화형 하수처리장에 호기성조에 적합한 수생식물은 물억새, 줄, 달뿌리풀, 갈대 및 삿갓사초 등의 것으로 판단되었고, 부들, 골풀 및 붓꽃 등은 부적합한 것으로 생각되었다. 혐기성조는 호기성조에 비해 수생식물의 생육 조건이 많은 차이가 있으며, 건물생산량을 조사한 결과 전반적으로 호기성조에 비해 생육이 저조하였다. 이는 호기성조에 하수가 유입되어 처리된 다음 혐기성조로 유입되었기 때문에 영양원이 호기성조에 비해 혐기성조가 적었기 때문인 것으로 사료되었다. 혐기성조에서의 수생식물 생육시기별 생육상황은 호기성조에서와 비슷한 경향으로 생육 80일 까지는 모든 수생식물의 건물생산량이 저조하였다. 그러나 그 이후 급격하게 증가하여 생육 150일 후에는 최대생산량을 나타내었고 계절적인 영향으로 다시 건물생산량이 급격히 감소하였다.

최대 건물생산량을 나타낸 생육 150일 후의 각 수생식물의 한 주당 건물 생산량은 큰고랭이, 줄, 갈대, 부들, 물억새, 달뿌리풀, 삿갓사초, 노랑꽃창포, 골풀 및 붓꽃이 각각 약 563, 462, 80, 275, 305, 201, 267, 230, 121 및 18 g/plant로서 큰고랭이>줄>물억새>부들>삿갓사초>노랑꽃창포>달뿌리풀>골풀>갈대>붓꽃 순으로 많았다. 각 수생식물의 건물생산량만 비교해 볼 때 자연친화형 하수처리장에 혐기성조에 적합한 수생식물은 큰고랭이, 물억새, 줄, 부들, 삿갓사초 및 노랑꽃창포 등의 것으로 판단되었다.

인공습지 하수처리장에서 수생식물의 무기성분 흡수량

수생식물의 생육시기에 따른 질소 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 질소 흡수량은 호기성조 및 혐기성조 모두에서 건물생산량과 비슷한 경향이였으며, 생육 80일까지는 수생식물에 의한 질소흡수량이 매우 적었으나 생육 150일 후에는 질소 최대 흡수량을 나타내었고, 그 이후 건물 생산량의 감소로 급격히 감소하였다. 최대 질소흡수량을 보인 생육 150일 후의 각 수생식물의 질소흡수량은 수생식물 한 주당 큰고랭이, 줄, 갈대, 부들, 물억새, 달뿌리풀, 삿갓사초, 노랑꽃창포, 골풀 및 붓꽃이 호기성조에서는 각각 약 7.6, 16.9, 7.3, 3.6, 17.7, 5.9, 7.7, 8.7, 1.8 및 0.7 g/plant로서 물억새>줄>노랑꽃창포>삿갓사초>큰고랭이>갈대>달뿌리풀>부들>골풀>붓꽃의 순이었다. 또한 혐기성조에서는 각각 약 8.7, 4.1, 0.9, 3.2, 2.4, 2.1, 2.4, 2.0, 1.7 및 0.3 g/plant로서 큰고랭이>줄>부들>물억새=삿갓사초>달뿌리풀>노랑꽃창포>골풀>갈대>붓꽃의 순이었다.

수생식물의 생육시일에 따른 인 흡수량을 조사한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 인 흡수량은 호기성조 및 혐기성조 모두에서 질소 흡수량과 비슷한 경향으로서 생육 150일에는 인 최대흡수량을 나타내었다. 호기성조에서 수생식물에 의한 한 주당 인 흡수량은 물억새, 줄, 삿갓사초, 노랑꽃창포, 큰고랭이, 갈대, 달뿌리풀, 부들, 골풀 및 붓꽃의 순으로 각각 2.41, 2.00,

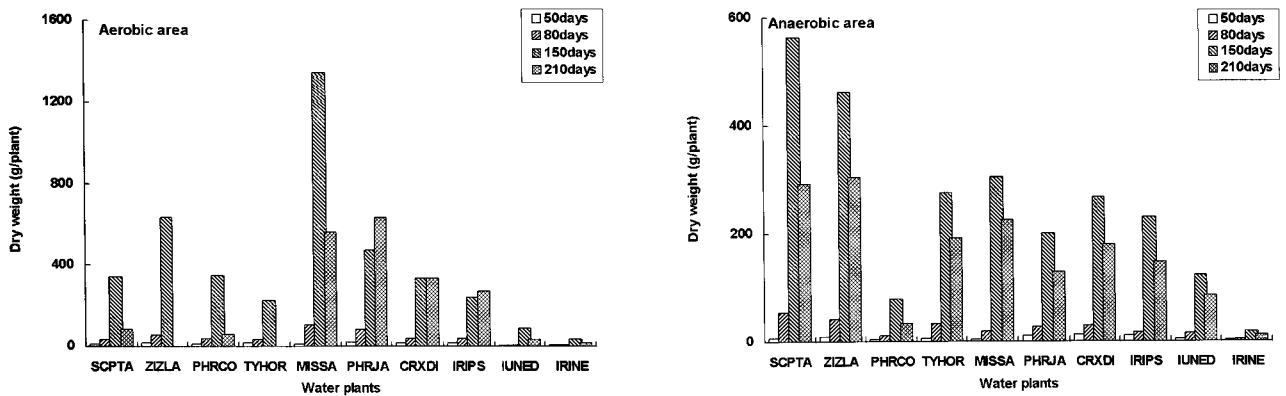


Fig. 5. Dry weight of water plants at days after transplanting in constructed wetland. (SCPTA; *Scirpus tabernaemontani* GMEL., ZIZLA; *Zizania latifolia* TURCZ., PHRCO; *Phragmites communis* TRINUS, TYHOR; *Typha orientalis* PRESL, MISSA; *Miscanthus sacchariflorus* BENTH., PHRJA; *Phragmites japonica* STEUD., CRXDI; *Carex dispalata* BOOTT., IRIPS; *Iris pseudoacorus* L., IUNED; *Juncus effusus* var. *decipiens* BUCH., IRINE; *Iris nertschinskia* LODD.)

1.16, 1.15, 1.10, 1.00, 0.64, 0.41, 0.20 및 0.10 g/plant로 나타났다. 또한 혐기성조에서 수생식물에 의한 한 주당 인 흡수량은 큰고랭이, 줄, 물억새, 부들, 샷샷사초, 노랑꽃창포, 달뿌리풀, 골풀, 갈대 및 붓꽃의 순으로 각각 1.13, 0.70, 0.46, 0.45, 0.40, 0.36, 0.26, 0.25, 0.15, 0.04 g/plant로 나타났다.

식물이 흡수할 수 있는 인은  $PO_4$ ,  $HPO_4$ ,  $H_2PO_4$ 의 형태이며, 질소의 경우와 마찬가지로 부착미생물이 유기인을 분해함으로써 식물이 흡수할 수 있도록 만들어 준다<sup>13)</sup>. Lee 등<sup>11)</sup>은 인이 갈대 뿌리부의 산화층에서 식물에 의한 흡수가 활발한 반면 환원층에서는 인의 방출이 진행되고, 체류일수가 길어질수록 갈대에 의한 인의 흡수량이 많아져 인의 처리율이 향상되었다고 하였다.

수생식물의 생육시기 50일 및 150일 후 식물체의 K, Na, Ca 및 Mg 흡수량을 조사한 결과는 Table 3과 같이 무기성분 흡수량은 일반적으로 질소와 인과 유사한 경향으로 생육시일이 경과함에 따라 증가하는 경향이였다. 수생식물 생육 150일 후의 호기성조에서의 K 흡수량은 물억새 및 줄이 각각 30 및 23 g/plant로 가장 높았고, 달뿌리풀, 큰고랭이, 샷

사초, 부들, 갈대, 노랑꽃창포, 골풀 및 붓꽃의 순으로 높았다. 그리고 이 시기의 혐기성조에서의 K 흡수량은 큰고랭이, 줄 및 부들이 각각 26.6, 17.5 및 16.3 g/plant로 높았고, 그 다음이 샷샷사초, 노랑꽃창포, 물억새, 골풀, 달뿌리풀, 갈대 및 붓꽃의 순으로 높았다. Na 흡수량은 생육 150일 후 호기성조에서는 큰고랭이 및 부들이 각각 4.69 및 3.46 g/plant로 가장 높았고, 혐기성조에서는 부들, 큰고랭이 및 노랑꽃창포가 각각 6.08, 3.34 및 2.53 g/plant로 높았다. Ca 흡수량은 생육 150일 후 호기성조에서는 노랑꽃창포, 부들 및 줄이 각각 2.39, 1.41 및 1.07 g/plant로 가장 높았고, 혐기성조에서는 호기성조와 비슷한 경향이였다. Mg 흡수량은 생육 150일 후 호기성조에서는 물억새 및 줄이 각각 3.9 및 1.1 g/plant로 가장 많았고, 혐기성조에서는 큰고랭이가 다른 수초에 비해 0.94 g/plant로 가장 높았다.

**인공습지 하수처리장에서 최적 수생식물의 선정**

인공습지 하수처리장에서 최적 수생식물의 선정은 Table

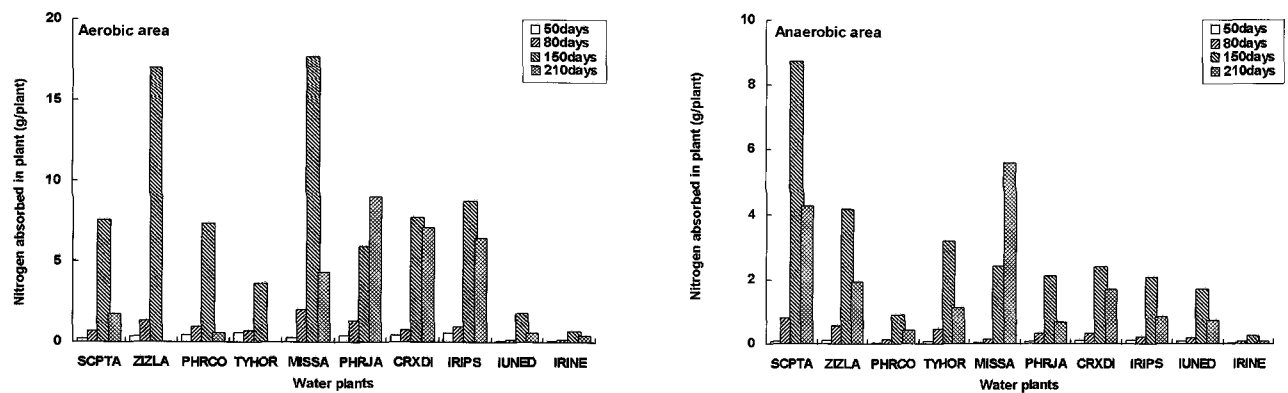


Fig. 6. Amount of nitrogen absorbed by water plants at days after transplanting in constructed wetland. (SCPTA; *Scirpus tabernaemontani* GMEL., ZIZLA; *Zizania latifolia* TURCZ., PHRCO: *Phragmites communis* TRINUS, TYHOR; *Typha orientalis* PRESL, MISSA; *Miscanthus sacchariflorus* BENTH., PHRJA; *Phragmites japonica* STEUD., CRXDI; *Carex dispalata* BOOTT., IRIPS; *Iris pseudoacorus* L., IUNED; *Juncus effusus* var. *decipiens* BUCH., IRINE; *Iris nertschinskia* LODD.)

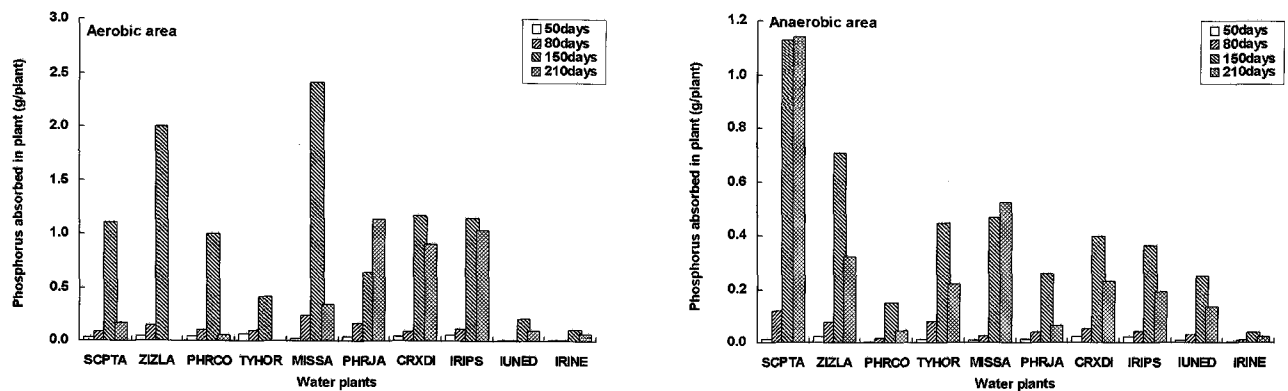


Fig. 7. Amount of phosphorus absorbed by water plants at days after transplanting in constructed wetland. (SCPTA; *Scirpus tabernaemontani* GMEL., ZIZLA; *Zizania latifolia* TURCZ., PHRCO: *Phragmites communis* TRINUS, TYHOR; *Typha orientalis* PRESL, MISSA; *Miscanthus sacchariflorus* BENTH., PHRJA; *Phragmites japonica* STEUD., CRXDI; *Carex dispalata* BOOTT., IRIPS; *Iris pseudoacorus* L., IUNED; *Juncus effusus* var. *decipiens* BUCH., IRINE; *Iris nertschinskia* LODD.)

**Table 3. Amount of K, Na, Ca and Mg absorbed by water plants at days after transplanting in constructed wetland**

Chemical properties	Conditions	Days after transplanting	SCPTA	ZIZLA	PHRCO	TYHOR	MISSA	PHRJA	CRXDI	IRIPS	IUNED	IRINE
			------(g/plant)-----									
K	Aerobic area	50	0.4	0.7	1.0	1.4	0.5	1.0	0.7	1.1	0.2	0.2
		150	15.0	23.0	10.0	13.0	30.0	18.5	14.0	8.2	2.8	0.9
	Anaerobic area	50	0.3	0.5	0.1	0.4	0.2	0.3	0.5	0.6	0.2	0.1
		150	26.6	17.5	1.7	16.3	5.1	4.2	9.2	7.6	5.0	0.5
Na	Aerobic area	50	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
		150	4.6	2.0	0.7	3.5	0.8	0.5	0.9	2.4	0.4	0.1
	Anaerobic area	50	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
		150	3.3	1.0	0.2	6.1	0.6	0.6	0.8	2.5	0.4	0.1
Ca	Aerobic area	50	0.04	0.05	0.03	0.13	0.03	0.05	0.05	0.16	0.01	0.03
		150	0.99	1.08	0.28	1.41	0.80	0.43	0.40	2.39	0.17	0.22
	Anaerobic area	50	0.03	0.05	0.01	0.07	0.01	0.03	0.06	0.14	0.02	0.03
		150	1.49	1.59	0.08	1.88	0.21	0.19	0.24	2.47	0.10	0.13
Mg	Aerobic area	50	0.03	0.06	0.04	0.06	0.02	0.05	0.05	0.06	0.01	0.01
		150	0.54	1.08	0.62	0.55	3.89	0.67	0.77	0.77	0.15	0.07
	Anaerobic area	50	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.05	0.01	0.01
		150	0.94	0.79	0.13	0.87	0.43	0.36	0.60	0.73	0.21	0.04

(SCPTA; *Scirpus tabernaemontani* GMEL., ZIZLA; *Zizania latifolia* TURCZ., PHRCO: *Phragmites communis* TRINUS, TYHOR; *Typha orientalis* PRESL, MISSA; *Miscanthus sacchariflorus* BENTH., PHRJA; *Phragmites japonica* STEUD., CRXDI; *Carex dispalata* BOOTT., IRIPS; *Iris pseudoacorus* L., IUNED; *Juncus effusus* var. *decipiens* BUCH., IRINE; *Iris nertschinskia* LODD.)

**Table 4. Calculated mark from growth state of the water plants for selection of optimum water plants at 150days after transplanting in aerobic area**

Items	Weight	SCPTA	ZIZLA	PHRCO	TYHOR	MISSA	PHRJA	CRXDI	IRIPS	IUNED	IRINE
Dry weight (g/plant)	(20)	339.5 (12)	633.5 (18)	345.5 (14)	228.0 (6)	1339.5 (20)	475.0 (16)	336.5 (10)	241.5 (8)	88.5 (4)	30.5 (2)
Nitrogen absorbed (g/plant)	(20)	14.46 (10)	31.61 (18)	15.72 (14)	12.24 (8)	54.92 (20)	18.72 (16)	15.31 (12)	11.08 (6)	3.56 (4)	1.54 (2)
Phosphorus absorbed (g/plant)	(20)	2.00 (12)	3.99 (18)	1.73 (12)	1.35 (10)	7.64 (20)	2.66 (16)	2.26 (14)	1.84 (12)	0.50 (8)	0.25 (4)
K, Na, Ca, Mg absorbed (g/plant)	(10)	21.03 (8)	27.16 (9)	11.60 (5)	18.46 (6)	35.49 (10)	20.10 (7)	16.07 (5)	13.76 (5)	3.52 (2)	1.29 (1)
Damages by blight and harmful insects	(10)	slight (3)	sever (1)	- (10)	slight (3)	- (10)	- (10)	- (10)	- (10)	- (10)	- (10)
Root growth	(10)	shallow rooting (0)	shallow rooting (0)	deep rooting (10)	shallow rooting (0)	deep rooting (6)	deep rooting (6)	shallow rooting (3)	shallow rooting (3)	shallow rooting (3)	shallow rooting (1)
Harmony with the environment	(10)	low (late withering) (0)	low (late withering) (0)	middle (10)	low (late withering) (0)	middle (10)	middle (10)	excellent (10)	excellent (10)	middle (6)	low (growth deficiency) (3)
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>45</b>	<b>64</b>	<b>75</b>	<b>33</b>	<b>96</b>	<b>81</b>	<b>64</b>	<b>54</b>	<b>37</b>	<b>23</b>
<b>Rank</b>		<b>7</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>

(SCPTA; *Scirpus tabernaemontani* GMEL., ZIZLA; *Zizania latifolia* TURCZ., PHRCO: *Phragmites communis* TRINUS, TYHOR; *Typha orientalis* PRESL, MISSA; *Miscanthus sacchariflorus* BENTH., PHRJA; *Phragmites japonica* STEUD., CRXDI; *Carex dispalata* BOOTT., IRIPS; *Iris pseudoacorus* L., IUNED; *Juncus effusus* var. *decipiens* BUCH., IRINE; *Iris nertschinskia* LODD.)

**Table 5. Calculated mark from growth state of the water plants for selection of optimum water plants at 150days after transplanting in anaerobic area**

Items	Weight	SCPTA	ZIZLA	PHRCO	TYHOR	MISSA	PHRJA	CRXDI	IRIPS	IUNED	IRINE
Dry weight (g/plant)	(20)	563.0 (20)	461.5 (18)	79.6 (4)	274.6 (14)	304.5 (16)	201.4 (8)	267.0 (14)	229.5 (10)	121.3 (6)	18.4 (2)
Nitrogen absorbed (g/plant)	(20)	16.74 (20)	12.70 (18)	1.91 (4)	8.43 (16)	4.49 (10)	4.29 (8)	5.02 (12)	6.45 (14)	2.55 (6)	0.43 (2)
Phosphorus absorbed (g/plant)	(20)	3.602 (20)	2.092 (18)	0.276 (4)	1.457 (16)	1.092 (12)	0.497 (6)	0.951 (10)	1.428 (14)	0.634 (8)	0.097 (2)
K, Na, Ca, Mg absorbed (g/plant)	(10)	32.33 (10)	20.88 (8)	2.11 (2)	25.15 (9)	6.34 (5)	5.35 (3)	10.84 (7)	13.30 (7)	5.71 (4)	0.77 (1)
Damages by blight and harmful insects	(10)	slight (3)	sever (1)	- (10)	slight (3)	- (10)	- (10)	- (10)	- (10)	- (10)	- (10)
Root growth	(10)	shallow rooting (6)	shallow rooting (10)	deep rooting (10)	shallow rooting (10)	deep rooting (10)	deep rooting (10)	shallow rooting (10)	shallow rooting (10)	shallow rooting (10)	shallow rooting (3)
Harmony with the environment	(10)	low (3)	excellent (10)	middle (6)	excellent (10)	middle (6)	middle (6)	excellent (10)	excellent (10)	middle (6)	low (growth deficiency) (3)
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>82</b>	<b>83</b>	<b>40</b>	<b>78</b>	<b>69</b>	<b>51</b>	<b>73</b>	<b>75</b>	<b>50</b>	<b>23</b>
<b>Rank</b>		<b>2</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>10</b>

(SCPTA; *Scirpus tabernaemontani* GMEL., ZIZLA; *Zizania latifolia* TURCZ., PHRCO: *Phragmites communis* TRINUS, TYHOR; *Typha orientalis* PRESL, MISSA; *Miscanthus sacchariflorus* BENTH., PHRJA; *Phragmites japonica* STEUD., CRXDI; *Carex dispalata* BOOTT., IRIPS; *Iris pseudoacorus* L., IUNED; *Juncus effusus* var. *decipiens* BUCH., IRINE; *Iris nertschinskia* LODD.)

4~5에서 보는 바와 같다. 수생식물이 가장 왕성한 생육을 보인 생육 150일 후의 건물중량, 질소 흡수량, 인 흡수량 및 무기성분 흡수량을 고려하였으며, 하수의 오염물질 처리능력을 우선적으로 고려하기 위해 건물중량, 질소 흡수량 및 인 흡수량의 가중치를 다른 항목에 비해 높게 하였다. 그리고 실제 인공습지 하수처리장에서 최적 수생식물의 선정시 인공습지 환경요인을 고려하기 위해 병해충의 발생여부, 뿌리의 발육정도 및 주변환경과의 조화 등 달관조사 항목을 최적 수생식물 선정시 고려하였다.

호기성조에서의 최적 수생식물은 물억새>달뿌리풀>갈대의 순이었고, 이들 수생식물은 대부분 뿌리의 발육이 좋은 심근성 수생식물로 여재층 내로 산소를 공급하기 쉬운 통기조직이 발달된 수생식물들이었다. 따라서 호기성조에서는 영양물질의 흡수능력보다는 호기성조에서 호기성미생물에 의해 유기물을 산화분해하기 쉽게 뿌리의 발육이 왕성하고, 산소의 공급능력 및 투수속도를 향상시킬 수 있는 수생식물을 선정하는 것이 좋을 것으로 생각되었다.

혐기성조에서의 최적 수생식물은 줄>큰고랭이>부들>노랑꽃창포>삿갓사초의 순이었고, 이들 수생식물은 대부분 뿌리의 발육보다 줄기와 잎의 발육이 좋은 천근성 수생식물로서 호기성조의 최적 수생식물의 역할과는 달리 영양물질의 흡수량이 우수한 수생식물이 선정되었다. 따라서 혐기성조에서는 여재층내의 산소공급과 투수속도의 향상보다는 영양물

질(질소 및 인)의 흡수능력이 우수한 수생식물을 선정하는 것이 좋을 것으로 생각되었다.

## 요약

농어촌 등 소규모로 발생하는 생활하수를 자연친화적으로 처리하기 위한 대책의 일환으로 인공습지에 적용되는 최적의 수생식물을 선발하기 위하여 다년생 수생식물 10종을 하수처리장에 식재한 후 하수 처리효율, 처리시기별 수생식물의 생육상 및 무기성분 흡수량 등을 조사하였다. 인공습지 하수처리장에서 하수중 BOD, COD, T-N 및 T-P의 수처리효율은 호기성조를 통과한 호기성조 처리수에서 각각 92%, 74%, 25% 및 57%이었고, 혐기성조를 통과한 방류수에서 각각 96%, 84%, 44% 및 71%이었다. 수생식물 생육 150일 후의 질소 및 인 흡수량은 호기성조에서는 물억새가 각각 17.7 및 2.41 g/plant로 가장 높았으며, 혐기성조에서는 큰고랭이가 각각 8.7 및 1.1 g/plant로 가장 높았다. 인공습지 하수처리장의 호기성조에서 최적 수생식물은 물억새>달뿌리풀>갈대의 순이었고, 이들 수생식물은 대부분 뿌리의 발육이 좋은 심근성 수생식물이었다, 여재층 내로 산소를 공급하기 쉬운 통기조직이 발달된 수생식물들이었다. 인공습지 하수처리장의 혐기성조에서 최적 수생식물은 줄>큰고랭이>부들>노랑꽃창포>삿갓사초의 순이었고, 이들 수생식물은 대부분 뿌리의 발



육보다 줄기와 잎의 발육이 좋은 친근성 수생식물로서 호기성조의 최적 수생식물의 역할과는 달리 영양물질의 흡수량이 우수한 수생식물이 선정되었다.

### 감사의 글

본 연구는 1998년 환경부의 G-7 환경공학 기술개발사업 과제 “자연친화형 농어촌 수초골재 하수처리장 모델 개발의 연구결과와 2000년도 농림부의 농림기술개발사업과제 “수초 모래 자갈을 이용한 환경친화형 농촌 하수처리 시스템 개발”의 연구결과중 일부임.

### 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. Jun, M. S. and Kim, B. C. (1994) The effect of nutrients concentration upon the growth of water hyacinth. *J. KSWQ* 10(2), 128-135.
3. Laber, J., Haberl, R., and Shrestha, R. (1999) Two-stage constructed wetlands for treatment hospital wastewater in Nepal. *Wet. Sci. Tech.* 40(3), 317-324.
4. Jeong, D. Y. (1999) Development of an Environmentally Friendly Sewage Disposal Model for Agricultural and Fishing Village Areas. *The Korean Society for Environmental Restoration and Revegetation Technology* 2(1), 10-20.
5. 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. Agric.* 17(1), 70-75.
6. Chung, P. G. and Kwak, D. H. (1994) Pretreatment of Raw Water Using The Fixed - bed and Fluidized - bed Bio filter Processes. *J. KSWQ* 10(1), 24-30.
7. Yun, S. M. (1998) The analysis of self-cleansing power through the sewage disposal model of water plants and aggregate. Master Thesis, Korea National University of Education, Korea.
8. Kang, B. H. and Shim, S. I. (1996) Screening of saline tolerant plants and development of biological monitoring technique for saline stress. 1. Survey of vegetation in saline region and determination of saline tolerance of the plant species of the reasion. *Kor. J. Environ. Agric.* 17(1), 26-33.
9. APHA, AWWA, WCF. (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC, 4-112.
10. NIAST (2000) Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, Rural Development Administration, Suwon, Korea.
11. Lee, D. B., Kim, J. G., Kang, J. G., Kim, S. K., So, J. D., and Rhee, K. S. (1994) Purification of Animal Wastewater Using a Reed-Sand-Filter System - I. Retention Period and Seasonal Variation-. *Kor. J. Environ. Agric.* 13(2), 231-239.
12. Huang, J., Reneau, Jr. R. B., and Hagedorn, C. (2000) Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater. *Wat. Res.* 34(9), 2582-2588.
13. Lee, Y. D. and Kim, H. H. (1999) A Study on the Advanced Treatment of Wastewater by Plants. *J. of the Environmental Sciences* 8(1), 75-81.