

Research Article

Open Access

인공습지를 이용한 축산폐수처리장에서 수생식물의 생육특성과 영양염류 흡수특성

박종환,^{1†} 서동철,^{2†} 김성현,¹ 이충현,¹ 최정호,³ 이상원,⁴ 이동진,⁵ 하영래,¹ 조주식,^{2**} 허종수^{1*}

¹경상대학교 응용생명과학부(BK21 농생명산업 글로벌 인재 육성 사업단) & 농업생명과학원, ²순천대학교 생물환경학과, ³한국환경공단 환경분석처, ⁴경남과학기술대학교 제약공학과, ⁵국립환경과학원 영산강물환경연구소

Growth Characteristic and Nutrient Uptake of Water Plants in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater

Jong-Hwan Park,^{1†} Dong-Cheol Seo,^{2†} Seong-Heon Kim,¹ Choong-Heon Lee,¹ Jeong-Ho Choi,³ Sang-Won Lee,⁴ Dong-Jin Lee,⁵ Yeong-Rae Ha,¹ Ju-Sik Cho^{2**} and Jong-Soo Heo^{1*} (Division of Applied Life Science (BK21 Program) & Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea, ²Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 540-742, Korea, ³Division of Environmental Analysis, Korea Environment corporation, Incheon, 404-708, Korea, ⁴Department of Pharmaceutical Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju, 660-758, Korea, ⁵Yeongsan River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research Ministry of Environment)

Received: 23 October 2012 / Revised: 8 November 2012 / Accepted: 29 November 2012

© 2012 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

BACKGROUND: Constructed wetlands for wastewater treatment are vegetated by wetland plants. Wetland plants are an important component of wetlands, and the plants have several roles in relation to the livestock wastewater treatment processes. The objectives of this study were to investigate the growth characteristics and nutrient absorption of water plants in constructed wetlands for treating livestock wastewater.

METHODS AND RESULTS: In this study, livestock wastewater treatment plant by constructed wetlands

consisted of 1st water plant filtration bed, 2nd activated sludge bed, 3rd vertical flow(VF), 4th horizontal flow(HF) and 5th HF beds. *Phragmites communis* TRINIUS(PHRCO) was transplanted in 3rd VF bed, *Iris pseudoacorus* L(IRIPS) was transplanted in 4th HF bed and PHRCO, IRIPS and *Typha orientalis* PRESEL(THYOR) were transplanted in 5th HF. Growth of water plants in constructed wetlands were the highest in October. The IRIPS growth was higher than other plant as 264 g/plant in October. The absorption of nitrogen and phosphorus by IRIS were 3.38 g/plant and 0.634 g/plant, respectively. The absorption of K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu and Zn by water plants were higher in the order of IRIPS > THYOR > PHRCO.

CONCLUSION(S): The absorption of nutrients by water plants were higher on the order of IRIPS > THYOR > PHRCO in constructed wetlands for treating livestock wastewater.

Key Words: Constructed wetlands, Growth characteristics, Livestock wastewater, Nutrients uptake, Water plant

[†]These authors contributed equally to this work.

*교신저자(Corresponding author),

Phone: +82-55-772-1963; Fax: +82-55-772-1969;

E-mail: jsheo@gnu.ac.kr

**공동교신저자(Co-Corresponding author),

Phone: +82-61-750-3297; Fax: +82-61-752-8011;

E-mail: chojs@sunchon.ac.kr

서론

2008년말 현재 소, 돼지의 가축분뇨 발생량은 일일 133,964 m³이며, 이 중 돼지는 78,148 m³, 젓소는 20,338 m³, 한우는 35,478 m³로 돼지 사육농가에서 발생하는 가축분뇨가 58%로 가장 많은 양을 차지하고 있으며, 사육규모 별로는 대규모 사육농가인 허가대상이 52%, 중규모 사육농가인 신고 대상이 35%로 축산농가가 점점 대규모화 되고 있는 실정이다(Park *et al.*, 2011).

보편적으로 축산폐수처리시설에 적용되고 있는 축산폐수 처리공법은 활성슬러지 공법이지만 이 공법은 운전시 폭기조 내의 거품 및 sludge bulking 문제가 자주 발생하고 슬러지의 침전성이 불량하고, 유지관리비가 높아 대규모의 처리장에서나 운전이 가능하며, 중규모 또는 그 이하 규모에서는 처리장치의 운전이 기술적·경제적 난점이 많은 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2011). 물리·화학적 처리방법은 약품처리에 의한 비경제성과 응집으로 생성된 다량의 슬러지 처리문제 및 약품투입 등으로 인한 2차 오염 등의 문제점이 있다. 액상부식법은 호기성 소화법의 단점을 보완한 생물학적 처리와 화학적 처리방법을 병행한 처리방법으로서 단시간에 처리가 가능하며, 처리공정이 단순하여 운전관리가 용이하고, 24시간 연속운전이 가능하다는 장점이 있지만 화학적 처리로 인한 2차오염, 과도한 슬러지 발생량으로 인한 슬러지 처리비용 증가, 부식으로 인한 기기 수명의 단축 등의 문제점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다(Han and Han, 2010). 이에 축산폐수의 정화처리시설은 건설비 및 유지관리비가 저렴하고, 질소 및 인 처리효율이 높은 축산폐수 처리장이 필요할 것으로 판단된다. 그래서 본 연구진은 인공습지 축산폐수처리장 개발하기 위한 최적조건 및 처리효율 극대화에 대한 연구를 보고한바 있으나(Kim *et al.*, 2011; Seo *et al.*, 2011), 이들 연구는 축산폐수의 정화효율에 중점을 두어 진행되었으며, 축산폐수 처리를 위한 인공습지에서 수생식물, 여재 및 미생물 등에 대한 연구결과는 거의 없는 실정이다.

일반적으로 자연정화공법에 의한 오·폐수처리장에서 수생식물의 역할은 여재층의 유기물 함량을 증가시켜 여재표면의 미생물 생육을 촉진시키며, 여재의 입단 형성을 촉진시켜 폐수의 투수속도를 증가시킬뿐 아니라 오염물질 처리효율을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Kang and Shim, 1998). 또한 축산폐수처리장내에 수생식물이 생육함에 따라 여재층의 막힘현상을 크게 줄일 수 있고, 질소 인 그리고 각종 무기성분 등의 오염물질들을 흡수하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Seo *et al.*, 2006a). 또한 수생식물 생육상황은 축산폐수처리장의 수처리 효율과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 약취를 줄이고 미관상 혐오감을 크게 줄일 수 있어 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서 중요한 역할을 한다(Seo *et al.*, 2006b).

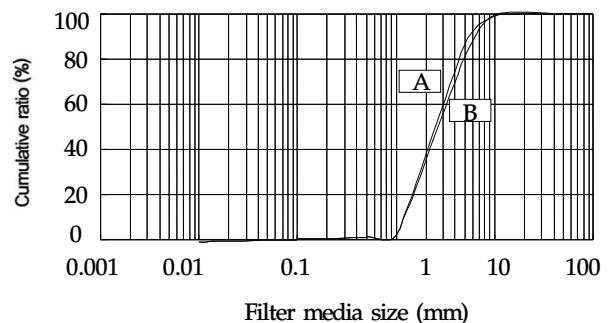
따라서 본 연구는 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서 이식한 수생식물의 축산폐수 처리시기별 생육특성과 영양염류 흡수특성에 대해 조사하였다.

재료 및 방법

공시재료

본 실험에 사용된 공시 축산폐수는 경남 진주시 이반성면 장안리에 위치한 실제 축산농가에서 채취하여 공시 원수로 사용하였으며, 시험 여재는 경남 사천시 용현면에 위치한 여재채취장에서 판매되는 여재를 사용하였다.

시험 축산폐수의 화학적 특성은 Table 1과 같고, 현장 축산폐수 처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성은 Table 2 및 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수 처리장에 사용된 여재는 Kim 등(2011)의 선행연구에 따라 수직 흐름조(VF)의 경우 왕사, 쇠석 및 방해석을 3 : 2 : 1로 혼합한 여재를 사용하였고, 수평 흐름조(HF)의 경우 왕사, 쇠석 및 제올라이트를 3 : 2 : 1로 혼합한 여재를 사용하였다. 수직 흐름조 및 수평 흐름조 여재의 유효입경(여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 10%되는 부분의 여재의 입경; d₁₀)은 각각 2.6 mm이었으며, 균등계수(여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 60%되는 입경과 10%되는 입경과의 비; d₆₀/d₁₀)는 각각 2.53 및 2.6이었다. 그리고 현장 축산폐수 처리장에 이식한 수생식물은 Seo 등(2006a)의 선행연구결과에 따라 3차 수직 흐름조에는 갈대(PHRCO), 4차 수평 흐름조에는 노랑꽃창포(IRIPS) 및 5차 수평 흐름조에는 갈대, 노랑꽃창포 및 부들(THYOR)을 이식하였으며, 모든 수생식물은 야외노지에서 성장한 수초를 분주하여 처리장내에 이식하였다. 공시 수생식물의 일반적인 특성은 Table 3에서 보는 바와 같다.



A: Mixed filter media in VF bed (Coarse sand : Broken stone : Calcite = 3 : 2 : 1),
B: Mixed filter media in HF bed (Coarse sand : Broken stone : Zeolite = 3 : 2 : 1).

Fig. 1. Particle size distribution of the filter media used.

Table 1. Characteristics of the livestock wastewater used

| | pH | EC | COD | SS | T-N | T-P |
|---------|-----|------|--------|-------|-------|-----|
| | | dS/m | | mg/L | | |
| Average | 6.8 | 2.64 | 10,639 | 9,400 | 5,024 | 725 |
| S.D | 0.7 | 0.28 | 2,451 | 2,514 | 1,127 | 102 |

* Standard Deviation.

Table 2. Characteristics of the filter media used

| Mixed filter media | pH | EC | OM | T-N | T-P | K | Ca | Mg | Na | Fe | Mn | Cu | Zn |
|--------------------|---------------------|------|------|-----------------|------|--------|--------|-------|-----|-------|-----|------|------|
| | 1:5H ₂ O | dS/m | g/kg | -----mg/kg----- | | | | | | | | | |
| A | 8.0 | 0.06 | 5.9 | 11.1 | 30.5 | 15,688 | 69,373 | 2,484 | 308 | 3,741 | 149 | 1.35 | 85.5 |
| B | 7.5 | 0.05 | 6.9 | 16.2 | 51.4 | 1,643 | 1,451 | 1,009 | 324 | 2,972 | 114 | 11.4 | 5.2 |

A: Mixed filter media in VF bed (Coarse sand : Broken stone : Calcite = 3 : 2 : 1),
 B: Mixed filter media in HF bed (Coarse sand : Broken stone : Zeolite = 3 : 2 : 1).

Table 3. General characteristics of water plants in livestock wastewater treatment plant

| Korean name | Scientific name | Bayer code | Vegetative characteristics | Source |
|-------------|----------------------------------|------------|---|-------------------|
| 갈대 | <i>Phragmites communis</i> TRIN. | PHRCO | 1-3 m height, 1-2 cm diameter, September blooming | Wetland Riverside |
| 노랑꽃 창포 | <i>Iris pseudoacorus</i> L. | IRIPS | 0.5-1 m height, 2-5 cm diameter, May blooming | Wetland Lake |
| 부들 | <i>Typha orientalis</i> Presel | TYHOR | 1-1.5 m height, 1-2 cm diameter, July blooming | Wetland Riverside |

현장 축산폐수처리장 설계 및 시공

현장 축산폐수처리장은 Fig. 2와 같이 수생식물 여과조-활성슬러지조-인공습지를 연결하여 하나의 시스템으로 운전이 가능하게 제작하였다. 각 조의 크기는 1차 처리 수생식물 여과조의 경우 공히 직경 0.90 m × 높이 1.00 m인 플라스틱 원통을 사용하여 용량이 0.63 m³되게 시공하였으며, 2차 처리 활성슬러지조는 세로 3 m × 가로 3 m × 높이 1 m로 용량이 9 m³이 되게 시공하였다. 또한 3차 처리인 인공습지의 수직 흐름조의 경우 세로 4 m 가로 4 m × 높이 1 m로 용량이 16 m³이 되게 제작하였고, 4차 처리 수평 흐름조의 경우는 세로 4 m 가로 5 m × 높이 1 m로 용량이 20 m³이 되게 시공하였으며, 5차 처리 수평 흐름조의 경우 세로 4 m × 가로 5 m × 높이 0.5 m로 용량이 10 m³이 되게 시공하였다. 수생식물 여과조에는 자갈을 하부에서부터 0.30 m까지 충전한 후 인공습지에서 생육한 수생식물을 건조하여 3~5 cm 크기로 분쇄하여 하부 0.30 m에서부터 0.90 m까지 충전하였고, 활성슬러지조에는 산청군 축산폐수 공공처리시설에서 채수한 활성슬러지를 하부에서 0.90 m까지 주입하였다. 수생식물 여과조-활성슬러지조-인공습지를 연계한 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수의 흐름은 1차 수생식물여과조에 축산폐수를 800 L/day 유입시켜 수직여과방식으로 처리하여 유출된 수생식물여과조 처리수는 자연유하식으로 2차 활성슬러지조로 유입되게 하였고, 활성슬러지조에 유입된 축산폐수는 폭기하여 반응조에서 처리가 되게 하였으며, 활성슬러지조에서 처리된 처리수는 인공습지로 유입되게 하였다. 또한, 인공습지에서 축산폐수의 흐름은 활성슬러지조에서 처리된 처리수를 호기성조에 유입시켜 수직 여과방식으로 처리하여 유출된 처리수는 자연 유하식으로 4차 및 5차 처리인 수평 흐름조로 순차적으로 유입되게 하였고, 각 수평 흐름조에 유입된 축산폐수는 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

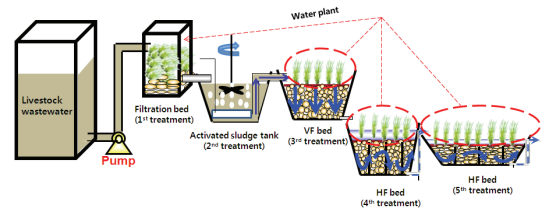


Fig. 2. Diagram of a livestock wastewater treatment system by natural purification method with water plant filtration and activated sludge beds.

축산폐수처리장에서 수생식물의 조사시기

인공습지 축산폐수처리장의 수생식물은 2010년 7월 1일에 이식하였으며, 수생식물의 생육특성은 2010년 8월 1일(수생식물 이식 후 1개월), 2010년 10월 1일(수생식물 이식 후 3개월), 2010년 12월 1일(수생식물 이식 후 5개월)에 각각 조사하였으며, 영양염류의 흡수특성은 생육특성 조사와 동일한 시기에 채취한 식물체의 T-N, T-P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu 및 Zn을 각각 조사하였다.

분석방법

식물체 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원 표준분석법(NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다. 식물체 시료를 70°C dry oven에서 3일간 건조하여 시험용도에 따라 마이크로 분쇄기로 0.1 mm 입자 크기로 분쇄하였으며, T-N 및 T-P는 습식분해법(H₂SO₄ + H₂O₂)으로 시료를 분해한 후 분해된 여액을 사용하여 T-N 분석은 Kjeldahl 증류법(Gerhardt Autosampler Vapodest 50 carouse, Germany)으로 분석하였으며, T-P의 분석은 Vanadate법(UV2550PC, Perkin Elmer)으로 분석하였다. 또한 K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu 및 Zn의 분석은 습식분해법(H₂SO₄ + H₂O₂)으로 시료를 분해한 후 분해된 여액을 사용하여 ICP-AES(OPTIMA 4300DV/5300DV, Perkin Elmer)으로 분석하였다.

Table 4. Growth characteristics of water plants in livestock wastewater treatment plant

| Bed | Bayer code | At months after transplanting of plant | Dry weight (g/plant) | Plant heights (cm) | Root heights (cm) | Branched number (ea) |
|---------------------------------|------------|--|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| 3 rd Vertical flow | PHRCO | 1 | 21.4±2.1 | 63.1±7.1 | 11.2±3.2 | 7±0.8 |
| | | 3 | 36.4±4.2 | 196.2±42.4 | 21.4±6.8 | 16±4.2 |
| | | 5 | 28.4±1.6 | 118.4±10.3 | 19.8±2.4 | 11±1.4 |
| 4 th Horizontal flow | IRIPS | 1 | 78.1±4.6 | 42.8±6.8 | 20.1±1.1 | 6±1.1 |
| | | 3 | 264.4±21.1 | 145.6±11.7 | 32.5±9.1 | 12±3.2 |
| | | 5 | 186.4±12.2 | 84.5±15.1 | 30.5±10.2 | 10±4.3 |
| 5 th Horizontal flow | PHRCO | 1 | 15.8±3.1 | 52.7±10.2 | 14.5±8.6 | 6±0.9 |
| | | 3 | 31.5±2.7 | 211.4±30.0 | 36.1±12.4 | 12±5.1 |
| | | 5 | 17.2±3.1 | 104.7±24.7 | 24.8±10.4 | 8±2.4 |
| | IRIPS | 1 | 65.5±5.2 | 54.2±10.2 | 13.6±6.5 | 7±1.0 |
| | | 3 | 204.8±9.0 | 151.6±13.2 | 34.5±10.2 | 12±2.1 |
| | | 5 | 175.4±8.4 | 78.4± 6.9 | 24.9±8.5 | 9±1.1 |
| TYHOR | 1 | 34.2±3.8 | 42.8±11.2 | 7.4±2.1 | 7±0.9 | |
| | 3 | 103.4±2.2 | 215.6±14.7 | 18.9±2.2 | 10±1.8 | |
| | 5 | 86.2±9.1 | 112.8±9.4 | 15.4±4.2 | 8±1.8 | |

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L., TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

결과 및 고찰

축산폐수처리장에서 수생식물의 생육특성

현장 축산폐수처리장에서 3차, 4차 및 5차 처리조 모두 축산폐수 처리시일이 경과할수록 수생식물의 생육은 이식 후부터 3개월 동안 왕성하게 생육하였으며, 5개월 후에는 생육이 저조하였다.

수생식물의 생육 1개월 후인 2010년 8월의 생육상황을 조사한 결과는 Table. 4와 같이 3차, 4차 및 5차 처리조내의 갈대, 노랑꽃창포 및 부들은 초기생육이 전반적으로 양호한 편이었다.

수생식물의 생육 3개월 후인 2010년 10월의 생육상황을 조사한 결과 수생식물의 생육 1개월에 비해 초장, 분얼수 및 잎수 등 생육발달이 왕성하였으며, 처리조 전체에 수생식물이 무성하게 퍼졌다. 특히 노랑꽃창포의 경우 타 수생식물에 비해 생육이 매우 좋았다.

수생식물의 생육 5개월 후인 2010년 12월의 3차, 4차 및 5차 처리조내 각 수생식물의 생육상황을 조사한 결과 처리조내의 모든 수생식물은 생육이 저조하였다. 이는 겨울철 식물의 고사로 인한 것으로 판단된다.

인공습지 축산폐수처리장의 처리조에 이식한 수생식물의 축산폐수 처리시일이 경과함에 따른 건물중량을 조사한 결과는 Table 4에서 보는 것과 같이 처리조내 갈대, 노랑꽃창포 및 부들의 건물중량은 수생식물 이식 3개월 후인 10월까지 서서히 증가하였다. 특히 노랑꽃창포의 건물중은 갈대 및 부들에 비해 월등히 높았다. Kang 등(2011)에 따르면 자유수면형 인공습지에서 수생식물의 건물중량은 이와 동일한 경향으

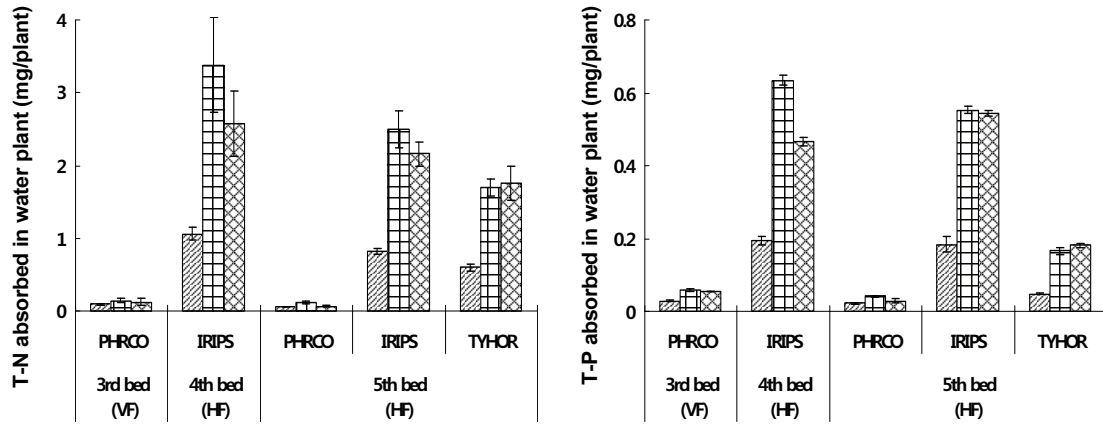
로 10월까지의 증가하는 경향이었으나, 10월 이후부터는 서서히 감소하는 경향이였다. 또한 Seo 등(2006a)에 의하면 자연정화공법에 의한 하수처리장에서 수생식물의 건물중량을 조사한 결과 갈대에 비해 부들이 건물중량이 높은 것으로 보고 되었는데 본 연구 결과도 그와 동일한 경향이였다.

축산폐수처리장에서 수생식물의 영양염류 흡수특성

수생식물의 생육시일별 영양염류 흡수량은 수생식물내 영양염류 함량에 생육시기별 건물중량을 고려하여 산출하였다. 질소 흡수량은 3, 4 및 5차 처리인 수직 흐름조 및 수평 흐름조 모두에서 수생식물 이식 후 1개월까지 점점 증가하였으나 증가폭이 크지 않았고, 수생식물 이식 후 3개월 후인 가을철에는 수생식물의 질소 흡수량이 최대가 되었다(Fig. 3). 그러나 수생식물 이식 후 5개월 후인 겨울철에는 기후적인 영향으로 수생식물이 고사되어 질소 흡수량이 다시 감소하였다.

질소 흡수량이 최대인 수생식물 이식 후 3개월인 2010년 10월에 각 수생식물의 질소 흡수량은 수직 흐름조에 이식한 갈대가 0.146 g/plant, 4차 수평 흐름조에 이식한 노랑꽃창포가 3.38 g/plant 이었고, 5차 수평 흐름조에 이식한 갈대는 0.11 g/plant, 노랑꽃창포는 2.49 g/plant 및 부들이 1.70 g/plant으로 노랑꽃창포가 다른 수생식물에 비해 질소 흡수량이 매우 높았다.

1차 수생식물 여과조 및 2차 활성 슬러지조에서 처리된 처리수 중의 질소는 대부분 토양입자 중의 점토 입자에 흡착되어 수생식물에 의해서 흡수되든지 혹은 미생물에 의해 분해 및 탈질 됨으로써 제거되는 것으로 알려져 있다(Seo *et al.*, 2006a). 유기태 질소는 침전과 여과로 제거되며, 이 유기태 질



PHRCO: *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS: *Iris peseudoacorus* L., TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL., VF: Vertical Flow, HF: Horizontal Flow.

Fig. 3. Uptake of T-N and T-P by water plants at months after transplanting of plant in livestock wastewater treatment plant (▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month).

소는 더욱 분해되어 암모니아 이온을 방출하는 용존성 아미노산으로 가수분해되기도 한다. 암모니아는 식물과 미생물이 섭취하기 용이하고, 호기성 조건에서 생물학적 질산화에 의하여 질산태 질소로 전환되기도 한다. 식물이 이용할 수 있는 질소의 형태는 암모니아태 질소와 질산태 질소로서 식물의 뿌리에 부착된 미생물이 유기태 질소를 분해하여 식물이 이용할 수 있는 형태로 전환시켜 줌으로서 최종적으로 식물이 이를 흡수하게 되는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 1999).

수생식물 생육시일에 따른 인 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 수생식물 이식 후 인 흡수량은 질소의 흡수량과 비슷한 경향으로 갈대, 노랑꽃창포 및 부들에서 수생식물 이식 후 3개월까지 인 흡수량이 점점 증가하였다. 수생식물 이식 후 5개월 후인 12월에는 겨울철 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 수생식물의 인 흡수량이 다시 감소하였다.

인 흡수량이 최대인 수생식물 이식 후 3개월 후인 2010년 10월에 각 수생식물의 인 흡수량은 3차 수직 흐름조의 갈대 (0.058 g/plant)가 5차 수평 흐름조의 갈대(0.058 g/plant)에 비해 높은 경향이였으며, 4차 수평 흐름조의 노랑꽃창포 (0.63 g/plant)가 5차 수평 흐름조 노랑꽃창포(0.55 g/plant)에 비해 높은 경향이였다. 5차 수평 흐름조에서 수생식물의 인 흡수량은 노랑꽃창포 >> 부들 > 갈대 순이었다.

식물이 흡수할 수 있는 인은 HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$ 의 형태이며, 질소의 경우와 마찬가지로 부착미생물이 유기인을 분해함으로써 식물이 흡수할 수 있도록 만들어 준다(Lee *et al.*, 1999). Lee 등(1994)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. 습지식물로 흡수되는 인의 양은 질소에 비하여 매우 적으며, 인이 습지에 연간 0.005 g/plant이 유입될 경우 약 65-95%가 식물에 의하여 제거되나 0.001-0.015 g/plant이 유입될 경우는 식물에 의한

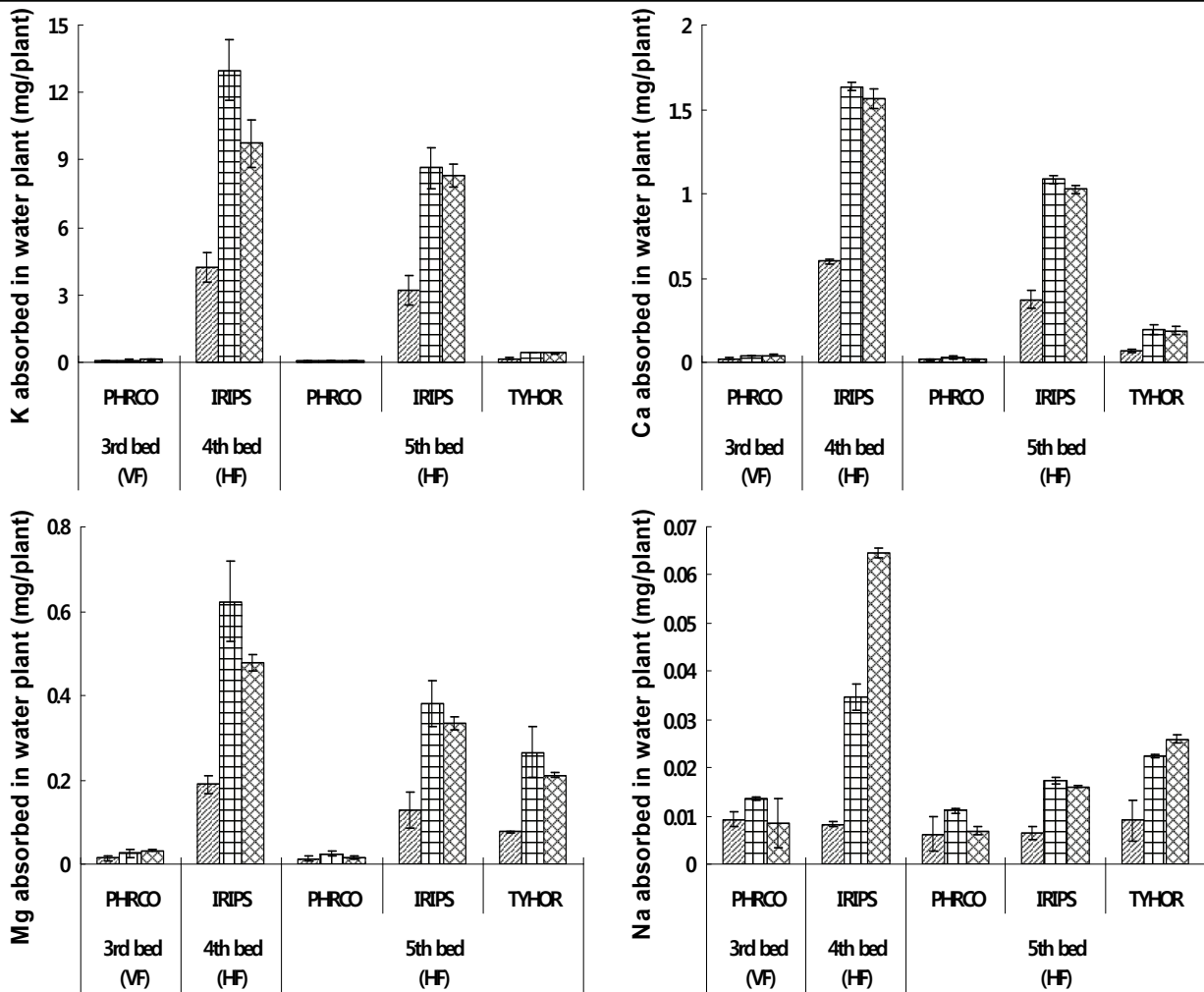
처리율이 30-40%로 낮아지는 경향으로서 인의 흡수량은 습지로 유입되는 인의 농도에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(Yang, 1999).

이상의 결과를 미루어 볼 때, 질소 및 인 처리에 효과적인 수생식물은 노랑꽃창포로 사료된다. Kim(2008)의 연구결과에서도 노랑꽃창포는 생육이 왕성한 8월과 10월에 질소 및 인 정화효율이 높았으며, 생육이 저조했던 겨울철에도 정화효율이 일정한 수준으로 유지된다고 보고하였다.

수생식물 생육시기에 따른 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 3, 4, 5차 처리인 수직 흐름조 및 수평 흐름조 모두에서 수생식물 이식 후 축산 폐수 처리 경과일수가 증가함에 따라 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량이 점점 증가하였다.

K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 수직 흐름조와 수평 흐름조 모두에서 수생식물 이식 후 1개월까지 점점 증가하였으나 증가폭이 크지 않았고, 수생식물 이식 후 3개월 후인 가을철에는 수생식물의 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량이 최대가 되었다. 그러나 수생식물 이식 후 5개월 후인 겨울철에는 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량이 다시 감소하였다.

3차 수직 흐름조의 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 수생식물 이식 후 3개월 후인 2010년 10월에 갈대가 각각 0.102, 0.040, 0.025 및 0.013 g/plant으로 연중 가장 높았다. 또한 4차 수평 흐름조의 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 수생식물 이식 후 3개월 후에 노랑꽃창포의 경우 12.99, 1.64, 0.62 및 0.03 g/plant으로 연중 가장 높았고, 5차 수평 흐름조 부들의 경우 0.44, 0.20, 0.27 및 0.02 g/plant으로 연중 가장 높았다. 따라서 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 전반적으로 노랑꽃창포 >> 부들 > 갈대 순이었다. Seo 등(2006a)는 자연정화공법에 의한 하수처리장 수평 흐름조에서 수생식물의 무기성분의 흡수특성에 관한 연구결과 노랑꽃창포가 부들에 비해 높은 흡수능력을 가졌다고 보고 하였는데, 본 연구결과도 이



PHRCO: *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS: *Iris pseudoacorus* L., TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL, VF: Vertical Flow, HF: Horizontal Flow.

Fig. 4. Uptake of K, Ca, Mg and Na by water plants at months after transplanting of plant in livestock wastewater treatment plant (▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month).

와 동일한 경향이였다. 이는 부들에 비해 노랑꽃창포의 건물중량이 높음으로써 도출된 결과인 것으로 사료된다. 또한 Kim 등(2007)의 생활폐수 처리를 위한 최적 수생식물 선정 실험의 결과에서도 수질정화능력은 건물중량에 비례적으로 증가하는 경향을 보였다.

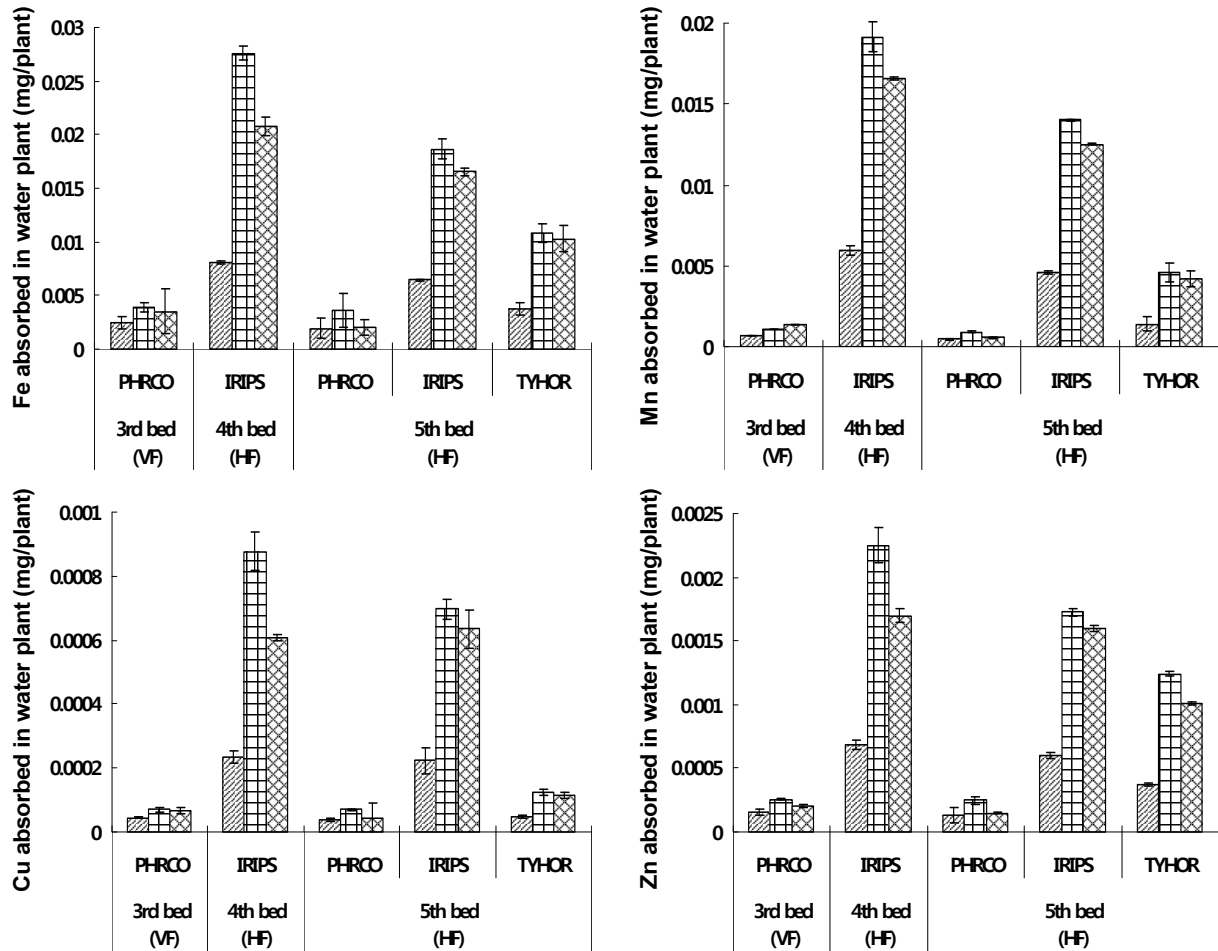
수생식물 생육시기에 따른 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 3, 4 및 5차 처리인 수직 흐름조 및 수평 흐름조 모두에서 수생식물 이식 후 축산폐수처리 경과일수가 증가함에 따라 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량이 점점 증가하였다.

Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량은 3차, 4차 및 5차 처리인 수직 흐름조 및 수평 흐름조 모두에서 수생식물 이식 후 1-2개월까지 점점 증가하였으나 증가폭이 크지 않았고, 수생식물 이식 후 3개월 후인 가을철에는 수생식물의 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량이 최대가 되었다. 그러나 수생식물 이식 후 5개월 후인 겨울철에는 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량이 다시 감소하였다.

3차 수직 흐름조의 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량은 수생식물 이식 후 3개월 후인 2010년 10월에 갈대가 각각 0.004, 0.001, 0.00007 및 0.0003 g/plant으로 연중 가장 높았다. 또한 4차 수평 흐름조의 Fe, Cu, Mn 및 Zn 흡수량은 수생식물 이식 후 3개월 후에 노랑꽃창포의 경우 0.028, 0.019, 0.0009 및 0.002 g/plant으로 연중 가장 높았고, 5차 수평 흐름조 부들의 경우 0.011, 0.005, 0.0001 및 0.001 g/plant으로 연중 가장 높았다. 따라서 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량은 전반적으로 노랑꽃창포 >> 부들 > 갈대 순이었다.

요 약

수생식물은 인공습지 오·폐수처리장에서 여재의 입단 형성을 촉진시켜 폐수의 투수속도를 증가시킬 뿐만 아니라 악취를 줄이고 미관상 혐오감을 크게 줄일 수 있으며, 수처리 효율과 밀접한 관련이 있다고 보고하였다. 이에 본 연구는 수



PHRCO: *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS: *Iris pseudoacorus* L., TYHOR: *Typha orientalis* PRESEL. VF : Vertical Flow, HF: Horizontal Flow.

Fig. 5. Uptake of Fe, Mn, Cu and Zn by water plants at months after transplanting of plant in livestock wastewater treatment plant (▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month).

생식물여과조-활성슬러지-인공습지를 하나의 시스템으로 시공한 축산폐수처리장에서 수생식물의 생육특성 및 영양염류의 흡수특성을 조사하기 위해 3차 수직 흐름조에는 갈대, 4차 수평 흐름조에는 노랑꽃창포 및 5차 수평 흐름조에는 갈대, 노랑꽃창포 및 부들을 2010년 7월에 이식하였으며, 축산폐수 처리시일을 1, 3 및 5개월로 구분하여 각 수생식물의 생육특성과 영양염류 흡수특성 조사하였다. 수생식물의 생육특성은 갈대, 노랑꽃창포 및 부들 모두 처리시일 3개월인 10월까지 는 수생식물의 성장과 동시에 수생식물이 무성하게 퍼졌으며, 특히 노랑꽃창포의 경우 타 수생식물에 비해 생육이 매우 좋았다. 수생식물의 생육 5개월 후인 2010년 12월의 경우는 겨울철 식물의 고사로 인하여 수생식물의 생육이 저조하였다. 수생식물의 영양염류 흡수특성은 수생식물 이식 후 1개월까지 점점 증가하였으나 증가폭이 크지 않았고, 수생식물 이식 후 3개월 후인 가을철에는 수생식물의 질소 흡수량이 최대가 되었다. 그러나 수생식물 이식 후 5개월 후인 겨울철에는 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 영

양염류의 흡수량이 다시 감소하였다. 또한 수생식물 종별 영양염류의 흡수특성은 노랑꽃창포 >> 부들 > 갈대 순이었고, 특히 노랑꽃창포가 다른 수생식물에 비해 영양염류의 흡수량이 매우 높았다.

감사의 글

This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ007358)" Rural Development Administration, Republic of Korea. This work was also supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea Government (Ministry of Education, Science and Technology), [NRF-2010-359-F00003, NRF-2010-0025548].

참고문헌

- Han, J.S., Han, G.B., 2010. A study of the effect of chemical pretreatment for livestock wastewater on the linked treatment of sewage, *J. of KORRA*, 18(1), 89-97.
- Kang, B.H., Shim, S.I., 1998. 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.
- Kang, S.W., Seo, D.C., Choi, I.W., Lee, J.B., Lim, B.J., Park, J.H., Kim, K.S., Kim, S.D., Heo, J.S., Cho, J.S., 2011. Characteristics of nutrient uptake by water plants in free water surface constructed wetlands for treating non-point source pollution, *Kor. J. Environ. Agric.* 30(3), 304-309.
- Kim, A.R., Kim, H.C., Seo, D.C., Park, J.H., Kim, S.H., Lee, S.T., Jeong, T.U., Choi, J.H., Kim, H.O., Cho, J.S., Heo, J.S., 2011. Selection of optimum filter media in small-scale livestock wastewater treatment apparatus by natural purification method, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(2), 285-292.
- Kim, C.S., Ko, J.Y., Lee, J.S., Park, S.T., Ku, Y.C., Kang, H.W., 2007. Selection of aquatic plants having high uptake ability of pollutants in raw sewage treatment, *Kor. J. Environ. Agric.* 26(1), 25-35.
- Kim, Y.S., 2008. Evaluation of the water purification capacity in *Iris psedacorus* and *acorus calamus*, *Kor. J. Hort. SCI. Technol.* 26(2), 172-176.
- Lee, D.B., Kim, J.G., Kang, J.G., Kim, S.K., So, J.D., 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.
- Lee, S.Y., Lee, S.J., Seo, M.W., Lee, S.W., Sim, S.Y., 1999. Reusing techniques of nutrient solution for recycling hydroponic culture of lettuce, *J. Bio. Env. Con.* 8, 172-182.
- NIAST. 2000. Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Park, J.H., Seo, D.C., Kim, A.R., Kim, S.H., Lee, S.T., Jeong, T.U., Choi, J.H., Kim, H.O., Cho, J.S., Heo, J.S., 2011. Optimum configuration method and livestock wastewater loading for treating livestock wastewater in constructed wetlands by natural purification method, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(2), 278-284.
- Seo, D.C., Jang, B.I., Jo, I.S., Lim, S.C., Lee, H.J., Cho, J.S., Kim, H.C., Heo, J.S., 2006a. Selection of optimum water plant in constructed wetland by natural purification method for municipal sewage treatment, *Kor. J. Environ. Agric.* 25(1), 25-33.
- Seo, D.C., Park, M.R., Kwak, N.W., Hwang, H.N., Lee, H.J., Cho, J.S., Heo, J.S., 2006b. 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. Agric.* 25(1), 14-24.
- Seo, D.C., Park, J.H., Kim, A.R., Kim, S.H., Lee, S.T., Jeong, T.U., Choi, J.H., Lee, S.W., Cho, J.S., Kim, H.O., Heo, J.S., 2011. A study on the improvement of treatment efficiency for nitrogen and phosphorus in livestock treatment system using constructed wetlands, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(3), 434-441.
- Yang, H.M. 1999. Non-point source and point source for conservation of water resources and environmentally friendly processing of contaminants natural constructed wetland and pond-wetland system, *Magazine of Korea water resources association*, 32, 111-123.