

갈대-상(床)을 이용한 쓰레기 매립지 침출수의 생물학적 연속흐름 처리

김인성 · 조용주 · 최홍근¹ · 이은주*

서울대학교 생명과학부 · ¹아주대학교 자연과학부

적 요: 본 연구는 수도권 매립지에서의 침출수 처리 방류수와 같은 특수한 수질 내에서 우수한 생장의 갈대 (*Phragmites australis*)를 선별하여 침출수 처리 방류수의 자연정화 방법 및 처리 효율을 확인하기 위해 실시하였다. 침출수 처리 방류수에 대한 우수 갈대의 선발을 위해 13개의 갈대 서식지로부터 수집한 갈대를 침출수 처리 방류수에서 배양하며 영양염류 제거, 생태-생리화학적 반응 및 생장율 등을 조사하여 선별하였다. 본 실험에서는 침출수 처리 방류수 내에서 우수한 생장을 나타낸 갈대와 자연계에서 분리한 도우미 미생물(효모, 유산균 및 광합성 세균 등)을 조합한 갈대-상(床; reed-bed)에 침출수 처리 방류수를 연속적으로 공급하면서 체류 시간 및 식재 밀도 차이에 따른 침출수 처리 방류수의 수질 정화 효율을 확인하였다. 침출수 처리 방류수를 공급하며 약 5주 후에 갈대-상을 통과한 배출수 수질을 분석한 결과, 색도(chromaticity)는 약 29.5~36.9%, 총질소(T-N)는 약 49.4~67.2%, 총인(T-P)은 약 42.1~94.6%, 생물화학적 산소요구량(BOD₅)은 약 74.5~88.8%, 화학적 산소요구량(COD_{Mn})은 약 15.6~20.8%, 총 고형물질(TDS)은 약 17.5~35.4% 그리고 염도(salinity)는 약 15.3~34.7% 등으로 감소되었다. 또한 체류시간은 생물화학적 산소요구량을 감소시키고 질소 및 인의 제거에 영향을 주었고 식재밀도는 인의 제거에 영향을 주었다. 이러한 결과로 갈대-상을 통해 처리된 생물학적 처리 배출수의 수질이 침출수 처리 방류수의 수질에 비해 향상되었음을 확인하였다.

검색어: 갈대-상(床), 매립지 침출수, 연속흐름방식, 자연정화기법

서 론

자연습지는 생태계 내에서 여러 기능적 작용을 하는데 이것은 종 다양성 유지, 하천 및 호소의 수량 조절 그리고 수질 개선 기능 등이다. 이러한 습지에서 정수식물, 부유 및 부엽식물 그리고 침수식물 등과 같은 다양한 수생식물이 서식한다. 특히, 갈대(*Phragmites australis*), 줄(*Zizania latifolia*) 및 애기부들(*Typha angustifolia*) 등과 같이 담수환경에서 흔히 발견되는 정수성 수생식물은 수심이 낮은 수로변이나 호소의 수변에 군락 형태로 분포하며 단위면적당 생물량이 다른 수생식물에 비해 높기 때문에 영양염류의 흡수량도 상대적으로 높게 나타난다. 특히, 다른 서식형태의 수생식물에 비해 이들 정수성 수생식물의 증식 및 생장은 주로 지하경에 의해 이루어지므로 연중 높은 재생산성이라는 특성을 가지고 있다(Cronk and Siobhan Fennessy 2001). 수생식물에 의한 담수생태환경 내의 수질정화는 기존의 물리 화학적인 방법에 비해 안전한 담수환경을 조성하는데 유리하다.

습지식물을 이용하여 하천 및 호소와 같은 수중 생태계 오염원의 자연정화에 대한 연구로는 독일에서 Seidel에 의해 1950년대에 처음 시작되어 수생식물에 의한 담수환경 자연정화 기능에 대한 연구(Seidel 1971, 1976) 등이 진행되었고, 미국에서는 1970년대부터 시작되어 생활하수의 생물학적 처리를 위해 자연

습지의 이용(Ewel and Odum 1985)과 생물학적 처리를 위한 다양한 수생식물의 선발(Dinges 1982) 등에 대한 연구로 발전하였다. 이러한 시도는 수생식물의 생산성과 영양물질의 순환이라는 과거의 순수생태학적인 개념을 넘어 수질정화라는 측면의 연구 필요성을 강조하게 되었다. 우리나라에서도 이러한 측면에서 수생식물을 이용한 축산폐수의 처리(김 등 1988), 하천 유역의 중금속 오염원 제거(박 등 1995, 강과 김 1996) 및 영양염류 제거(김과 임 1998, 김 등 1999, 정과 김 2002a, 2002b) 등에 대한 연구가 진행되었다. 담수생태계로의 영양염류 유입은 하천 및 호소의 부영양화를 발생시키고 이로 인해 다른 수중생물의 생존에 악 영향을 미치게 된다. 최근에 물리 화학적인 하수 및 오수의 처리과정 후 생태학적으로 보다 안전한 수질을 조성하기 위한 수생식물을 이용한 식물정화기법(phytoremediation) 연구가 요구되고 있으며, 오염된 담수생태환경의 수질 개선을 위해 수생식물이 가지고 있는 정화능력 즉, 물리 화학적 흡착(Jayaweera and Kasturiarachchi 2004), 흡수 및 축적(Wilson et al. 2000) 그리고 이러한 자연정화기능을 활용한 인공습지의 개발 및 이용방안 등이 연구되었다(Tchobanoglous 1993). 이를 위해서는 먼저 수질 오염원에 대한 정확한 정보를 바탕으로 이러한 수질 오염원에 대한 내성 수생식물을 선별하고 이를 가장 효과적으로 자연환경에 적용할 수 있는 방법을 개발하는 것이 필요하다.

수도권 매립지의 침출수 처리 방류수의 수질은 물리-화학적 방법으로 처리한 이후에도 고농도의 염분과 영양염류, 강한 산

* Corresponding author; Phone: 82-2-880-6673, e-mail: ejlee@plaza.snu.ac.kr

화력의 부유물질 및 높은 색도 등을 나타내고 있어서 이러한 수질의 방류수가 자연 하천에 직접 유입되면 다른 수서생물의 생존에 유해한 영향을 미치게 된다. 본 연구진은 선행연구로서 수도권 매립지에서 발생하는 쓰레기 매립지의 침출수 처리 방류수 내에서 우수한 성장 및 유기 오염원 제거에 적합한 수생식물 종(species)으로 갈대(*P. australis*)를 선발하였고 다양한 서식지에서 성장하는 갈대를 대상으로 침출수 처리 방류수에 가장 우수한 성장율을 나타내는 갈대 개체군을 선발하였다 (Kim *et al.* 2003).

이러한 선행 연구를 바탕으로 본 연구에서는 쓰레기 매립지의 침출수 처리 방류수 내에서 생장이 우수한 갈대와 자연계에서 분리한 도우미 미생물군을 조합한 갈대-상(reed-bed)에서 침출수 처리 방류수의 생물학적 재처리 효율을 확인하고 이의 응용방안을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

침출수 처리 방류수

본 실험에 사용된 침출수 처리 방류수는 수도권 매립지에서 발생하는 매립지 침출수를 물리-화학적으로 처리한 후 자연계로 방류시키는 처리수로 실험을 진행하면서 3회 분석한 평균 측정 결과는 수소이온농도 7.12, 총질소 127.42 mg/L, 총인 0.278 mg/L, 생물화학적 산소요구량 4.0 mg/L, 화학적 산소요구량 44.2 mg/L, 색도 105.1도, 총 고형물질 18,900 mg/L 그리고 염분농도 19.6 % 등으로 분석되었다. 각각의 분석항목의 측정 값은 실험 기간 중 큰 변동폭이 없이 일정하게 유지되었다.

우수 성장 갈대

실험 대상인 우수 성장 갈대(*Phragmites australis*) 개체군은 선행 실험인 갈대의 침출수 처리 방류수에 대한 적응, 성장 및 처리 효율 실험 등을 통해 선발하였다 (Kim *et al.* 2003). 이렇게 선발된 갈대로부터 수집한 종자를 격리된 환경에서 파종-배양하여 2년간 우수 성장 형질을 유지하였으며, 우수 성장 형질을 가진 2년생 갈대 개체들 중에서 생장이 유사한 개체를 선발하여 실험에 사용하였다. 침출수 처리 방류수에 대한 우수 성장 갈대의 생물학적 처리효율은 다른 갈대에 비해 약 20~30%이상 그리고 성장율은 약 60~80% 이상 높았던 것으로 우수 성장 갈대 선발 실험에서 확인하였다 (Kim *et al.* 2003).

갈대-상(reed-bed)

본 실험에서는 이러한 침출수 처리 방류수 내에서 우수한 성장을 나타낸 갈대 개체군과 침출수 처리 방류수의 생물학적 처리 효율을 최대화 하고자 자연계에서 식물의 성장을 유리하게 하는 도우미 미생물군(helper microorganisms)은 토양 및 수층에 처리하여 조합한 형태인 갈대-상(reed-bed)을 조성하여 사용하였다. 도우미 미생물군은 효모(yeast; *Saccharomyces cerevisiae*), 유산균(lactic acid bacteria; *Lactobacillus plantarum*) 및 광합성 미생

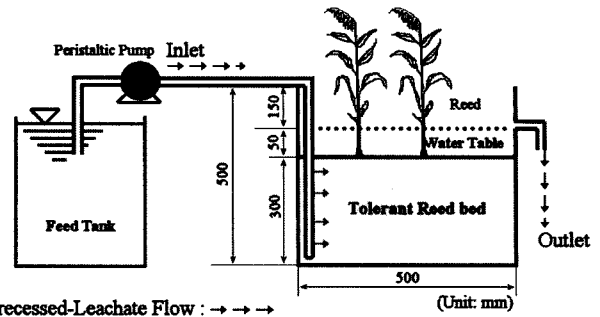


Fig. 1. The scheme of experimental tank.

물(phototrophic bacteria; *Rhodospseudomonas palustris*) 등을 혼합한 형태로 제주도에 위치한 (사)유용미생물 환경센터로부터 공급받아 사용하였다. 침출수 처리 방류수의 생물학적 재처리 효율을 확인하기 위한 우수 성장 갈대-상에 사용된 실험도양은 강변 모래를 세척하여 사용하였고 실험 탱크(H 50×L 50×W 50 cm)는 스테인레스 재질로 제작하여 사용하였다(Fig. 1).

실험방법

각각의 실험 탱크에 실험 도양은 높이 30 cm(약 80 kg)가 되도록 적체하였고 지하수를 공급한 후 우수 성장 갈대를 식재하였다. 갈대 식재 후 약 7일간 지하수를 계속 공급하면서 우수 성장 갈대를 실험 도양 내에서 적응시킨 후 매립지의 침출수 처리 방류수를 약 5 cm의 수층이 형성되도록 공급하였다. 침출수 처리 방류수를 공급하면서 도우미 미생물군 용액 처리는 실험 탱크 체적의 1/10,000배인 약 10 ml를 실험 초기에 3일 간격으로 3회 처리하였다. 본 실험에 사용된 실험 탱크와 우수 성장 갈대-상에 공급되는 침출수 처리 방류수의 흐름은 Fig. 1과 같고 실험 탱크 내에서 침출수 처리 방류수의 유속, 체류시간, 갈대 식재 밀도 및 도우미 미생물군의 처리 등에 대한 내용은 Table 1과 같다.

Table 1. Culture condition for the continuous flow system experiment

Bed No.	Inflow rate (L/h)	Retention time (h)	Planted density (pot/m ²)	Plant ¹	Helper micro-organisms ²
T-1	2.4	24	16	<i>Phragmites australis</i>	Treated
T-2	4.8	12	16		
T-3	9.6	6	16		
T-4	4.8	12	8		
T-5	4.8	12	24		

¹ Plant is the reed (*Phragmites australis*) showing superior growth in processed-leachate from waste landfills.

² Helper microorganisms consist of yeast, lactic acid bacteria and phototrophic bacteria.

분석항목 및 방법

연속 흐름 방식 내에서 갈대-상을 이용하여 침출수 처리 방류수의 생물학적 재처리 효율을 결정하기 위해 갈대-상을 통과하기 전과 후의 수질을 분석하였다. 분석 및 측정 항목은 수소이온농도(pH), 총질소(T-N), 총인(T-P), 생물화학적 산소요구량(BOD₅), 화학적 산소요구량(COD_{Mn}), 색도(chromaticity), 총 고형물질(TDS) 및 염분농도(salinity) 등이었다. 수소이온농도는 pH 전극법(Senslons pH ISE meter, HACH)을 이용하였고, 총 고형물질 및 염분농도 등은 전기전도도계(150 A⁺ Conductivity meter, ORION)를 사용하여 현장에서 직접 측정하였다. 총질소 및 총인의 분석을 위해 갈대-상에서 처리된 배출수 100 ml에 분해 촉매제로 0.125 g CuSO₄·5H₂O와 1.5 g K₂SO₄를 첨가하고 3.5 ml H₂SO₄를 첨가하여 약 4 ml까지 가운 농축하고 Kjeldahl 분해관에 옮겨 120°C에서 60분, 390°C에서 120분간 산 분해를 하였다. 산 분해 후 전체 용액량을 50 ml로 하여 분석시료로 사용하였다. 질소와 인 분석은 흡광광도계(QuikChem, Lachat Instruments)를 사용하여 질소는 660 nm에서 인은 880 nm에서 흡광도를 측정하고 정량화하였다. 생물화학적 산소요구량과 화학적 산소요구량 그리고 색도는 수질오염 및 폐기물 공정시험방법(환경부, 1993)의 방법으로 측정하였다.

결과 및 고찰

수소이온농도 및 색도

자연조건에서 담수환경의 수소이온농도는 수환경의 산성 또는 알칼리성을 나타내는 중요한 인자이다. 이러한 수소이온농도는 자연상태에서 보통 5.0에서 8.6 사이로 측정되는데 이러한 농도범위는 수중의 이산화탄소 및 중탄산염의 농도와 수중의 부식물질 함량 등에 의해 영향을 받는다. 또한 유기물질이 생물화학적 산화와 무기물질 즉, 철 이온, 암모니아 및 황 화합물 등의 화학적 산화로 인해 영향을 받는다(WHO 1978). 매립지 침출수의 물리 화학적 처리과정에서 난분해성 유기화합물을 산화시키기 위해 다량의 철 화합물을 처리한다. 이러한 철 화합물로 인해 침출수 처리 방류수는 옅은 황색을 나타내고 시간이 지남에 따라 철 화합물의 산화에 의해 암갈색으로 변화된다. 이것은 침출수 처리 방류수의 초기 수소이온농도를 자연상태 수준으로 조절(pH 7.1)하여 방류하더라도 시간이 지남에 따라 담수환경 내에서 산화반응을 발생시켜 수환경의 수소이온농도에 영향을 미치게 된다. 연속흐름방식 내에서 우수 성장 갈대-상에 침출수 처리 방류수를 공급하면서 주기적으로 수소이온농도(pH)와 색도(chromaticity)를 측정된 결과는 Fig. 2와 같다. 측정 초기에 수소이온농도는 약 8.5 정도로 침출수 처리 방류수 기준보다 1.5 가량 높게 측정되었으나 생물학적 처리 시간이 지남에 따라 수소이온농도는 중성으로 감소하는 경향을 보였다. 실험 초기에 갈대-상을 이용한 생물학적 처리수의 수소이온농도가 증가한 것은 사용한 실험 토양에 유입된 침출수 처리 방류수 내의 난분해성 유기물질과 이러한 난분해성 유기물질의 응집제로 사용되는

잉여의 철 화합물[Fe₂(SO₄)₃] 등이 토양층을 통과하면서 발생한 산화반응에 의해서 수소이온농도가 변화된 것으로 생각된다. 갈대와 같은 정수성 수생식물은 담수환경으로 대기 산소를 이동시키는 역할을 한다(Armstrong *et al.* 2000, Colmer 2003). 이러한 정수성 수생식물의 기능으로 인해 갈대-상은 대기 산소를 실험 탱크 내의 토양과 수환경으로 산소를 공급하여 생물학적으로 안전한 수소이온농도를 유지할 수 있을 것으로 생각한다. 침출수 처리 방류수에 다량 포함되어 있는 철 화합물[Fe₂(SO₄)₃]의 산화반응에 의해 방류수에 색도를 증가시킨다. 생물학적 처리된 방류수의 색도를 측정된 결과 5주 후에 대부분의 실험 탱크에서 침출수 처리 방류수의 색도에 비해 29.5~36.9% 가량 감소하였다. 이러한 결과는 부들(*Typha latifolia*)에 제지공장에서 발생하는 처리-방류수를 2년간 적용한 결과 색도가 2%에서 59%까지 다양하게 감소되었다는 연구결과(Hammer *et al.* 1993)와 유사한 결과였다. 이와 같은 결과로 침출수 처리 방류수를 갈대-상에서의 생물학적 재처리는 수소이온농도 및 색도를 발생시키는 난분해성 유기물 및 무기물질 등을 제거하고 분해할 수 있음을 알

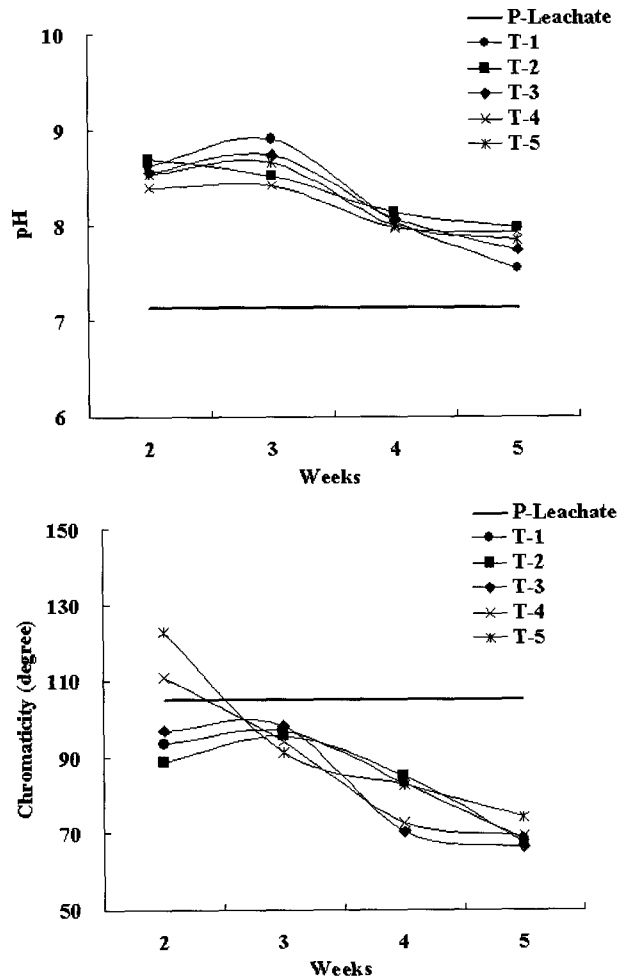


Fig. 2. Variations of pH and chromaticity of effluent after various reed-bed treatments.

수 있었다.

총질소 및 총인

담수생태계에서 질소와 인 함량의 증가는 하천 및 호소의 부영양화를 초래하고 이러한 결과로 담수조류의 증식을 유발시킨다. 수도권 매립지의 침출수는 대부분 음식물 쓰레기를 매립한 후 발생된 것으로 많은 양의 질소 및 인 화합물이 포함되어 있고 물리 화학적 처리를 통해 침출수 처리 방류수의 배출 허용 기준인 질소 300 mg/L 이하와 인 8 mg/L 이하에 맞추어 방류하고 있다. 하지만 이러한 방류수 수질 허용 기준은 폐기물 관리법에 의해 결정된 것으로 이와 같이 고농도의 질소와 인이 함유된 방류수가 담수환경에 유입된다면 심각한 부영양화를 유발하게 된다. 이러한 이유로 수질환경보전법에서는 하수 및 폐수 처리장 방류수의 질소와 인 함량 기준을 '청정지역'인 경우 질소 30 mg/L 이하와 인 4 mg/L 이하, '가 지역'인 경우 질소 60 mg/L 이하와 인 8 mg/L 이하로 정하고 있다. 연속흐름 방식을 이용한 갈대-상에서 침출수 처리 방류수를 처리한 결과 5주 후에 질소는 49.3~67.1% 가량 제거되었고 인은 42.1~94.6% 가량 제거되어 갈대-상을 이용한 생물학적 처리 후 배출수 내의 질소 함량은 41.7~64.4 mg/L 그리고 인 함량은 0.015~0.126 mg/L임을 확인하였고 이러한 농도는 수질환경보전법에서 규정하고 있는 농도에 적합한 것으로 확인되었다(Fig. 3). Vymazal(1993)은 서로 다른 입자의 실험토양에 갈대-상을 조성하여 총질소 17~99 mg/L, 총인 1.9~15.4 mg/L 농도의 축산폐수를 2년 동안 공급하여 실험한 결과 총질소는 약 45.8% 그리고 총인은 약 49.2%가 제거되었음을 보고하였다. 이러한 결과는 본 실험 결과에서와 같이 우수 생장 갈대-상에서 질소보다 인 제거율이 더 높게 나타났던 결과와 같은 경향이었다. 본 실험에서 질소와 인 제거를 체류 시간 및 식재 밀도와 관계로 조사한 결과 질소의 제거는 체류 시간이 길수록 그리고 식재 밀도가 높을수록 제거 효율이 높았음을 확인하였고 인의 제거는 식재 밀도가 제거 효율에 주로 영향을 주었음을 알 수 있었다.

생물화학적 산소요구량 및 화학적 산소요구량

수중 생태계 내에서의 생물화학적 산소요구량과 화학적 산소요구량은 주로 수중에 존재하는 유기 화합물의 함량에 영향을 받고 일반적으로 생물화학적 산소요구량이 약 1~6 mg/L인 수중에서 화학적 산소요구량은 약 30~100 mg/L 정도를 나타낸다(Kadlec and Knight 1996). 본 실험에서 사용된 침출수 처리 방류수의 생물화학적 산소요구량은 약 4 mg/L이었고 화학적 산소요구량은 약 44.2 mg/L로 분석되었다. 이러한 농도의 방류수를 갈대-상에 지속적으로 공급하며 화학적 산소요구량은 1주일 단위로 측정(Fig. 4)하였고 생물화학적 산소요구량은 5주 후에 측정된 결과는 Fig. 5와 같다. 침출수 처리 방류수를 우수 생장 갈대-상에서 5주 동안 처리한 생물학적 재처리수의 생물화학적 산소요구량과 화학적 산소요구량은 모두 감소하였다. 특히, 체류시간이 가장 긴 실험 탱크(T-1)에서 생물화학적 산소요구량은 약

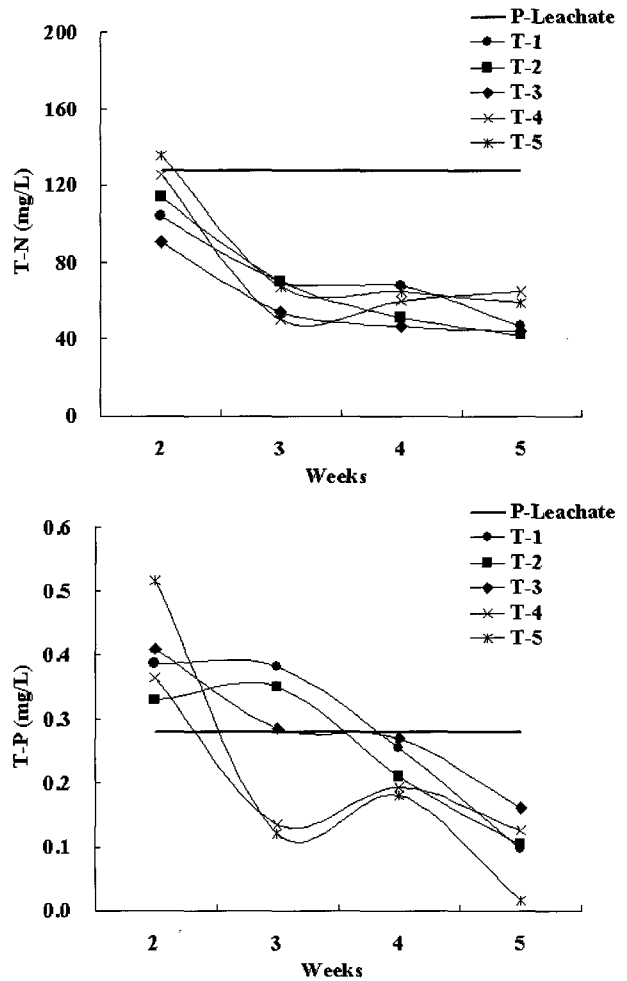


Fig. 3. Nitrogen and phosphorus contents in effluent after various reed-bed treatments.

88.8%, 화학적 산소요구량은 약 20.8%로 가장 높은 감소율을 보여 수중에서 생물화학적 산소요구량과 화학적 산소요구량의 증가에 관련된 유기 화합물의 제거는 체류시간에 가장 크게 영향 받았음을 알 수 있었다. 또한 생물화학적 산소요구량의 감소율은 Vymazal(1993)의 연구 결과에서 확인된 생물화학적 산소요구량 감소율인 약 89.5%와 유사하였으나 화학적 산소요구량 감소율은 Vymazal의 연구 결과에서 확인된 약 83.1%보다 낮은 비율로 확인되었다. 이러한 결과는 화학적 산소요구량을 발생시키는 난분해성 유기물의 분해 및 제거는 갈대-상의 조성에 영향을 받지 않고 습지 내에서의 장기간 처리와 안정된 수생식물 군집에서 더 효율적으로 분해 및 제거될 수 있다고 생각된다.

총 고형물질 및 염분농도

매립지 침출수 처리 방류수는 다량의 부유성 고형물질과 염분을 함유하고 있다. 실험이 진행되는 동안 계속해서 침출수 처리 방류수의 총 고형물질과 염분농도를 측정된 결과, 총 고형물질은 평균 18,900 mg/L 그리고 염분농도는 평균 19.6%인 것

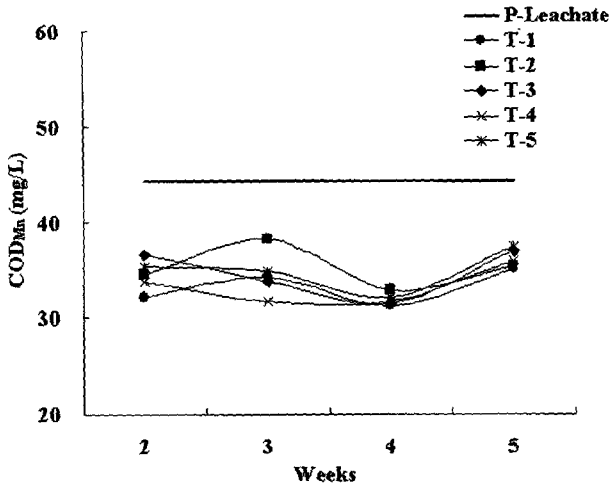


Fig. 4. Variations of COD_{Mn} in effluent after reed-bed treatments.

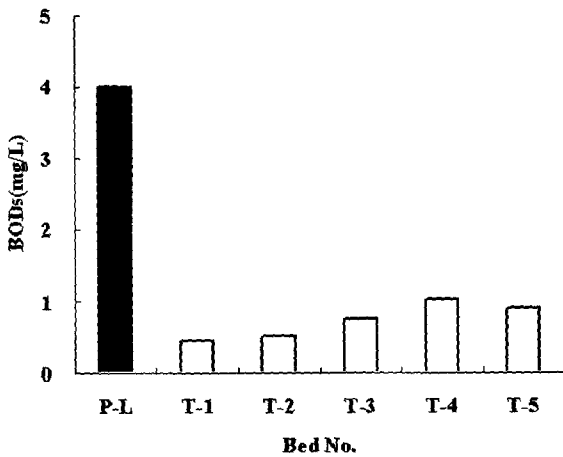


Fig. 5. BOD₅ values in effluent after reed-bed treatments during 5 weeks.

로 측정되었다. 이와 같은 총 고형물질과 염분을 함유한 침출수 처리 방류수를 5주 동안 우수 성장 갈대-상에 공급하면서 그 변화량을 측정된 결과 Fig. 6과 같다. 갈대-상에서 처리된 배출수의 총 고형물질 함량은 약 17.5~35.4% 감소되었고 염분농도는 약 15.4~34.7% 감소되어 5주 후 각각의 실험 탱크에서 총 고형물질은 약 12,200~15,600 mg/L 그리고 염분 함량은 약 12.8~16.6% 잔류하는 것으로 확인되었다. 일반적으로 습지에서 염분 농도가 0.5~0.8‰ 이상이면 약간의 염분이 있는 것으로 판단한다. 담수 생태계에서 염분 농도가 증가하면 정수성 수생식물은 근권에서 이산화탄소의 순흡수량이 감소하고 이러한 영향으로 수생식물은 기공을 열어 이산화탄소를 흡수하게 된다. 하지만 이러한 경우 수생식물은 체내의 수분이 손실되어 결국에는 수생식물에서 수분 스트레스가 발생한다(Longstreth *et al.* 1984, Bradley and Morris 1990). 그리고 수생식물의 뿌리가 호기성 호흡 또는 혐기성 대사반응을 하지 못하게 되면 뿌리는 영양물질 즉, 질소와 같은 원소의 흡수율이 급격히 감소하게 되어 수생식물의 생체량

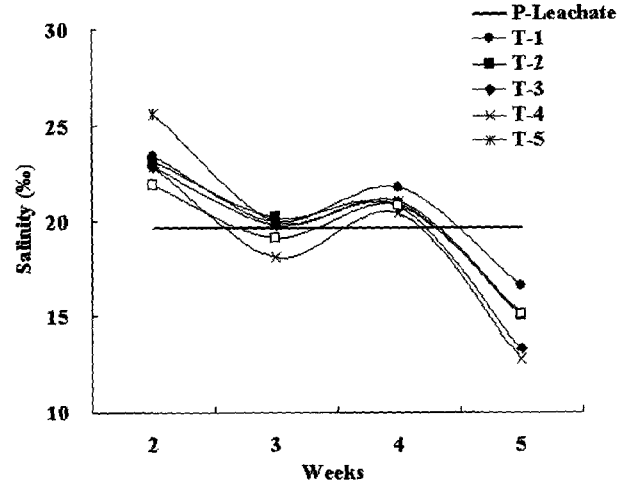
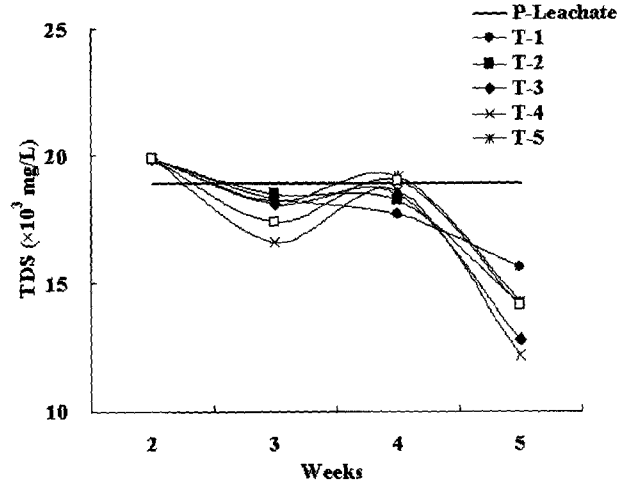


Fig. 6. Variations of TDS and salinity in effluent after reed-bed treatments.

이 감소하고 이로 인해 수생식물 군집의 일차 생산성이 감소하는 결과를 발생시킨다(Van Wijck *et al.* 1992, Lee *et al.* 1999). 갈대-상을 이용한 자연정화 처리 방법을 통해 매립지 침출수 처리 방류수를 생물학적으로 처리한 결과 기존의 침출수 처리 방류수의 수질 기준에 비해 개선되었음을 확인하였다. 더욱이 갈대-상을 조성하는데 사용되는 갈대의 밀도는 인 제거에 영향을 주었고 침출수 처리 방류수의 체류시간은 생물화학적 산소 요구량과 영양염류(질소 및 인)의 제거에 영향을 주었음을 확인하였다. 그리고 본 실험에서 사용된 우수 성장 갈대는 염분 농도가 높은 침출수 처리 방류수라는 고농도의 염분을 함유한 특수한 수질에 적합한 식물종으로 선정된 것으로 다른 갈대에 비해 염분 내성에 강한 형질을 가지고 있음을 성장 실험을 통해 확인하였고, 조직배양을 통해 고농도의 염분에 대한 내성을 보존하고 있다. 따라서 본 실험에 사용된 갈대 개체는 염분 농도가 높은 습지나 하천에서 자연적인 복원을 유도하기 위한 도입종으로의 이용성 및 자연정화식물로의 유용한 자원식물로 생각한다. 또한, 지금까지 여러 가지 방법 적용되어 왔던 수생식물을 이용

한 수질오염원 제거에 비해 본 연구의 방법은 수생식물에 의한 제거에 전적으로 의존하지 않고 수생식물의 근권에 유용한 미생물을 동시에 처리해 줌으로서 수생식물의 성장을 증대시키고 토양층을 수생식물의 성장에 유리한 조건으로 형성시켜 영양염류와 같은 유기오염원의 제거에 더욱 효과적이고 다른 수생식물의 도입 및 정착에 유리한 것으로 하천 및 호소의 가장자리에 이와 같은 방법으로 수생식물을 식재하면 자연습지 복원 및 신규 도입에 유리할 것으로 생각한다. 그리고 본 연구에서와 같이 수생식물을 이용한 하천 및 호소에서 수질오염 제거는 자연친화적인 방법으로 여러 가지 다양한 방법으로 수생식물의 적용 및 구조물 설계 등과 같은 좀더 연구가 동시에 진행되어야 할 것으로 생각한다.

사 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업에 의해서 수행되었습니다.

인용문헌

- 강경홍, 김인성. 1996. 하천유역의 관속식물을 이용한 토양내의 중금속 오염원 제거에 관한 연구. 한국환경토양학회지 1: 23-34.
- 김복영, 김규식, 박용대. 1988. 축산폐수의 오염물질 제거를 위한 수초 선발 이용 연구. 한국환경농학회지 7: 111-116.
- 김정희, 문형태, 남궁정. 1999. 대형 수생식물의 물질 생산과 질소와 인의 흡수량. 환경생물학회지 17: 27-34.
- 김하승, 임병선. 1998. 농경지 배출수의 수질 개선을 위한 수생식물의 정화능과 활용방안에 관한 연구. 한국환경관리학회지 4: 1-8.
- 박기남, 강경홍, 김인성. 1995. 하천유역의 관속식물에 의한 중금속의 생물학적 농축 및 중금속 오염도 평가에 관한 연구. 한국환경생물학회지 13: 175-188.
- 정연숙, 노찬호. 2002a. 양어장 배출수의 수처리를 위한 수생관속식물의 적용: I. 부엽식물인 부레옥잠 및 잠개구리밥의 성장과 영양염류의 흡수력. 한국생태학회지 25: 39-44.
- 정연숙, 노찬호. 2002b. 양어장 배출수의 수처리를 위한 수생관속식물의 적용: II. 정수식물인 줄 및 애기부들의 식물섬에서의 성장과 영양염류의 흡수력. 한국생태학회지 25: 46-49.
- 환경부. 1993. 수질오염·폐기물 공정시험방법. 동화기술, 서울. 577 p.
- Armstrong, W., D. Cousins, J. Armstrong, D.W. Turner, and P.M. Beckett. 2000. Oxygen distribution in wetland plant roots and permeability barriers to gas-exchange with the rhizosphere: a microelectrode and modeling study with *Phragmites australis*. Ann. Bot. 86: 687-703.
- Bradley, P.M. and J.T. Morris. 1990. The influence of salinity on the kinetics of NH_4^+ uptake in *Spartina alterniflora*. Oecologia 85: 375-380.
- Colmer, T.D. 2003. Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots. Plant Cell Environ. 26: 17-36.
- Cronk, J.K. and M. Siobhan Fennessy. 2001. Wetland plants; Biological and ecology. Lewis Publishers, New York. 462 p.
- Dinges, R. 1982. Natural systems for water pollution control. Van Nostrand Reinhold, New York. 252 p.
- Ewel, K.C. and H.T. Odum. 1985. Cypress swamps. University of Florida Press, Ann Arbor. 472 p.
- Hammer D.A., B.P. Pullin, D.K. McMurphy and J.W. Lee. 1993. Testing color removal from pulp mill wastewaters with constructed wetlands. In G.A. Moshiri (ed.), Constructed wetlands for water quality improvement. Lewis Publishers, New York. pp. 449-459.
- Jayaweera, M.W. and J.C. Kasturirachchi. 2004. Removal of nitrogen and phosphorus from industrial wastewaters by phytoremediation using water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). Water Sci. Technol. 50: 217-225.
- Kadlec, R.H. and R.L. Knight. 1996. Treatment wetlands. Lewis Publishers, New York. pp. 341-371.
- Kim, I.S., Y.-J. Cho, E.J. Lee, H.K. Choi and C.K. Kim. 2003. Effects of waste landfill leachate on the growth of *Phragmites australis*. In The Ecological Society of America. (ed.), The Proceedings of the 88th Annual Meeting. Savannah. p. 182.
- Lee, R.W., D.W. Kraus, and J.E. Doeller. 1999. Oxidation of sulfide by *Spartina alterniflora* roots. Limnology and Oceanography 44: 1155-1159.
- Longstreth, D.J., J.A. Bolanos, and J.E. Smith. 1984. Salinity effects on photosynthesis and growth in *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. Plant Physiol. 75: 1044-1047.
- Seidel, K. 1976. Macrophytes and water purification. In J. Tourbier and R.W. Pierson Jr. (eds.), Biological control of water pollution. Pennsylvania University Press, Philadelphia.
- Seidel, K. 1971. Macrophytes as functional elements in the environment of man. Hydrobiologia, 12: 121-130.
- Tchobanoglous, G. 1993. Constructed wetlands and aquatic plant systems: Research, design, operational and monitoring issues. In G.A. Moshiri (ed.), Constructed wetlands for water quality improvement. Lewis Publishers, New York. pp. 23-34.
- Van Wijck, C., C.J. De Groot and P. Grillas. 1992. The effect of anaerobic sediment on the growth of *Potamogeton pectinatus* L.: the role of organic matter, sulphide and ferrous iron. Aquatic Bot. 44: 31-49.
- Vymazal, J. 1993. Constructed wetlands for wastewater treatment in

- Czechoslovakia: State of the art. In G.A. Moshiri (ed.), Constructed wetlands for water quality improvement. Lewis Publishers, New York. pp. 255-267.
- WHO. 1978. Water quality surveys. Sydenhams Printers, Nairobi. pp. 60-61.
- Wilson, P.C., T. Whitwell and S.J. Klaine. 2000. Metalaxyl and simazine toxicity to and uptake by *Typha latifolia*. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 39: 282-288.
(2004년 12월 3일 접수; 2004년 12월 16일 채택)

Biological Treatment of Processed-Leachate from Landfills by Reed (*Phragmites australis*)-Bed in a Continuous Flow System

Kim, In Sung, Yong-Joo Cho, Hong-Keun Choi¹ and Eun Ju Lee
School of Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
¹*College of Natural Science, Ajou University, Suwon 443-749, Korea*

ABSTRACT : We investigate the biological treatment of processed-leachate from SUDOKWON landfill site in Korea by the reed (*Phragmites australis*)-bed with a continuous flow system. The reed individuals showing superior growth in processed-leachate experiment were selected among the reeds of thirteen natural habitats by means of the comparisons between the removal rates of nutrient salts, eco-physiological responses and growth. The reed-beds (combination of the reed individuals showing superior growth with helper microorganisms) were continuously supplied with processed-leachate. We monitored the effluents that passing through the reed-beds during the experiment period. After five weeks, analysis results of effluent from each reed-bed were as follows; chromaticity, total nitrogen, total phosphorus, biological oxygen demand, chemical oxygen demand, total dissolved solid and salinity decreased 29.5~36.9%, 49.4~67.2%, 42.1~94.6%, 74.5~88.8%, 15.6~20.8%, 17.5~35.4% and 15.3~34.7%, respectively. These results represented the substantial improvement of water-quality after passing through reed-bed in a continuous flow system.

Key words : Continuous flow system, Landfill leachate, *Phragmites australis*, Phytoremediation
