

쓰레기 매립지 침출수 정화를 위한 갈대 선발

조용주 · 이종영 · 최홍근* · 김창균* · 이은주

서울대학교 생명과학부, *아주대학교 생명과학과

(2008년 6월 30일 접수; 2008년 9월 3일 수정; 2008년 9월 29일 채택)

A Selection of *Phragmites australis* for Purification of Waste Landfill Leachate

Yong-Joo Cho, Jong-Young Yi, Hong-Keun Choi*, Changkyun Kim* and Eun Ju Lee

School of Biological Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*Department of Life Sciences, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

(Manuscript received 30 June, 2008; revised 3 September, 2008; accepted 29 September, 2008)

Abstract

We investigated the ecological characteristics of reed populations growing in Korea and tried to select reed populations showing better growth patterns in waste landfill leachate. To examine the growth characteristics, 14 reed populations from various habitats were collected. Four reed populations were from inland reclaimed habitats, 4 reed populations from brackish or salt marsh habitats, and 6 reed populations from fresh water habitats. Total plant biomass after the treatment with landfill leachate showed that Daebudo and Nanjido reed populations had the higher biomass with 3755 g DW/pot and 3305 g DW/pot, respectively. Reed populations being sampled from the higher salinity and landfill habitats had relatively higher total biomass than that of other reed populations. Especially reed populations from landfill habitats showed higher biomass. Reed populations from Songjiho and Daebudo, which were believed to have tolerance to salt stress, also showed good growth patterns. Population from the fresh water habitats exhibited relatively lower tolerance to leachate treatment compared to others. From the results, we could conclude that reed populations from Nanjido and Daebudo with higher biomass and better salt tolerance were able to good candidates for purification of waste landfill leachate.

Key Words : *Phragmites australis*, Landfill, Leachate, Constructed wetland, Tolerance, Salinity

1. 서 론

쓰레기 매립지는 매우 다양하고 이질적인 환경으로 장소와 시간에 따라 화학물질들의 다양성이 나타나는 곳이고, 많은 유기물질들을 함유하고 있다. 이러한 매립지로부터 발생하는 침출수는 수자원에 아

주 심각한 위협성을 줄 수 있다¹⁾. 쓰레기 매립지의 침출수는 쓰레기의 직접적인 분리로 발생하는 액상 물질과 매립토양을 통해 삼투되어지는 침전물로 구성되어지는데, 이러한 침출수의 정확한 구성성분을 예측하는 것은 매립지의 상황에 따라 다르지만 기본적으로는 쓰레기의 분해과정에서 생성되는 생물학적, 화학적 과정을 통한 물질들이다²⁾. 따라서 매립지 침출수는 쓰레기의 구성성분, 매립년도, 지질학적 문제, 온도, 습도 등의 다양한 요인들의 각기 다른

Corresponding Author: Eun Ju Lee, School of Biological Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
Phone: +82-2-880-6673
E-mail: ejlee@snu.ac.kr

조성 때문에 특성을 파악하기 어렵다³⁾. 또한, 난분해성 물질들과 질소의 양이 많아 문제점이 제기되고 있고, 이러한 문제점들을 해결하기 위한 정화기술 및 이용방안에 많은 관심을 기울이고 있다.

습지는 영양염류의 보유 및 제거 또는 변형을 시킬 수 있기 때문에 최근에 비점오염원의 관리에 사용되고 있으며⁴⁾, 인공습지의 경우는 하수 처리에 사용되고 있으며 부유물질과 유기물질의 제거에 효과적이기 때문에 많이 이용되고 있다. 국내에서도 토양처리와 인공습지 시스템을 이용하여 130 ppm인 공장폐수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도를 60 ppm 이하로 저감시킨다는 보고가 있다⁵⁾. 습지에 의한 수질오염물질의 분해 및 제거에는 정수식물이 대표적으로 활용되고 있다. 정수식물의 지상부와 지하부의 조직, 미생물, 토양매체, 수중에 용해된 영양염류들이 서로 공생 관계를 유지하면서 생물, 화학적인 작용을 통해 이루어지므로 습지 시스템에서 정수식물의 역할은 대단히 중요하다⁶⁾.

갈대는 인공습지를 이용한 오염물질의 제거에 자주 이용되는 식물 중 하나이다⁷⁾. 최근 갈대를 이용한 인공습지는 산업용 폐수처리를 위해 광범위하게 사용되고 있으며⁸⁾, 우리나라에서도 농업용수 및 호수개선을 위해 정수식물인 갈대를 수질정화에 이용하고 있다. 또한 갈대는 단위면적당 생물량이 많기 때문에 흡수하는 영양염류의 총량도 상대적으로 많고 지하경으로 번식하는 특성이 있기 때문에 적당한 환경조건이 주어지면 짧은 기간 동안에 분포역이 넓게 확산되는 특성을 가지고 있다⁹⁾.

우리나라에서 갈대는 전국적으로 수생태계 및 육상생태계 등 다양한 지역에 걸쳐 분포해서 자라고 있다. 따라서 본 연구는 우리나라에서 다양한 서식지에 분포하고 있는 갈대 개체군을 이용하여 수도권 매립지 침출수 처리수의 생물학적 처리효율을 높일 수 있도록 침출수 처리수 내에서 성장특성을 비교하여 성장 및 영양염류의 흡수율과 엽록소 함량을 비교하여 염분 스트레스에 적응력이 높은 우수 갈대 개체군을 선별하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 실험은 매립지의 침출수를 정화하기 위하여 다양한 환경에서 서식하는 갈대 개체군을 이용하여

침출수에 대한 반응을 살펴봄으로써 적합한 개체군을 선별하고자 인공수조를 활용하였다. 우선 침출수를 처리한 후 각각의 개체군의 성장특성 중 생물량과 엽록소 함량을 비교하여 생장이 우수한 개체군을 선별하고자 하였고, 또한 수질오염원 중 많은 부분을 차지하고 있는 질소와 인의 함량을 비교하고 침출수 성분 중 함유량이 많은 철과 아연의 함량을 비교하여 잠재적인 제거효율을 평가하고자 실행하였다.

2.1. 갈대의 채집 및 인공 수조 실험

쓰레기 매립지의 침출수 처리수에 대한 내성 갈대 개체군 실험은 2001년 6월부터 11월까지 수행하였다. 갈대 개체군의 선별은 내륙북도형, 담수형, 기수 및 염습지형으로 구분하여 선정하였다. 내륙북도형 갈대는 서울 난지도 매립지, 경기도 성남시 하산운동 매립지, 인천 모전리 매립지, 대호 방조제에서 채집하였고, 담수형 갈대는 인천 쓰레기 매립지에 인접한 시천천, 담수호인 경안천, 울산 태화강과 여천천, 담수지역인 안산습지, 서산 해미천에서 채집하였고, 기수 및 염습지형 갈대는 석호인 매호, 향호, 송지호와 경기도 안산시 대부도 등 총 14곳의 장소에서 채집하여 실험에 이용하였다(Table 1). 식물체 채집은 지하부에 어린 눈(bud)이 형성된 부위를 기준으로 채집하였고, 채집된 갈대 시료들은 지상부 10 cm 정도를 남겨두고 윗부분을 잘라주었다. 채집된 식물체는 아이스박스에 보관하여 운반시 스트레스를 최소화하였다. 인공 수조로 옮겨진 각각의 식물체는 지름 40 cm, 높이 25 cm의 토분에 모래를 2/3 가량 넣은 후 토분 당 갈대 시료 6개씩 이식하였다(Fig. 1). 준비된 식물체는 김포 매립지에 설치된 인공 수조에서 침출수 처리실험을 진행하였다.

2.2. 침출수 처리수의 처리 및 분석

준비된 식물체들은 침출수 처리수의 처리에 앞서 지하수를 이용하여 2주간 안정화 후에 침출수 처리수를 처리하였다. 침출수 처리에 이용된 인공 수조는 폴리에스테르수지(FRP)를 이용하여 가로 2 m, 세로 10 m, 높이 1 m로 제작하였다. 수도권 매립지 관리공사 내 침출수 처리수는 여러 단계의 공정을 거쳐 최종 방류수로 방류되는데 본 실험에 이용된

Table 1. Sampling sites and transplantation date

Habitat type	Sampling site, transplantation date (2001) and site abbreviation
Reclaimed type	Hasanundong, Seoungnam city, June 20 (June 21) : Sn
	Mojeonli, Icheon city, June 25 (June 27) : Ic
	Nanji-do, Seoul, June 25 (June 27) : Nj
	Dangjin tide embankment, June 22 (June 23) : Dh
Fresh-water type	Paldang-ho, Gyeonggi province, June 20 (June 21) : Pd
	Ansan city, Gyeonggi province, June 26 (June 27) : As
	Taehwa river, Ulsan city, June 28 (June 29) : Th
	Yeocheon, Ulsan city, June 28 (June 29) : Us
	Sicheon cheon, Incheon city, June 15 (June 15) : In
	Haemicheon, Seosan city, June 22 (June 23) : Ss
Brackish type	Daebudo, Gyeonggi province, June 26 (June 27) : Db
	Hangho, Kangwon province, July 2 (July 4) : Hh
	Maeho, Kangwon province, July 2 (July 4) : Mh
	Songjiho, Kangwon province, July 3 (July 4) : Sj

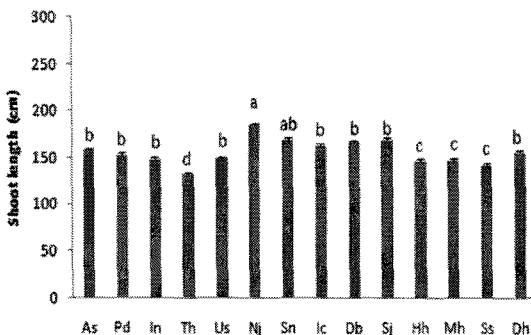


Fig. 1. Shoot height (cm) of various *Phragmites australis* populations. Bars represent means±SE (n=20). Bars with same letters are not significantly different at 0.05 level.

인공 수조는 침출수의 처리공정 후 집수되는 집수장 옆에 위치하였다. 인공 수조와 침출수 집수장까지 관으로 연결하였으며, 침출수 처리수는 펌프(5마력)를 이용하여 수위 25 cm로 처리하였으며 주 1회 새로운 처리수로 처리해 주었다. 또한 강우에 의해 처리수가 희석될 경우 비가 온 후에는 바로 침출수 처리수를 교체해 주었다. 침출수 처리수의 pH, 전기전도도(EC), 총질소, 질산태 질소(NO_3^-), 암모니아태 질소(NH_4^+)를 분석하였다. 전기전도도는 현장에서 직접 측정하였고, 그 외 항목은 실험실에서 시료 운반 후 분석하였다. 실험실에서 분석한 침출수 처리수 시료는 200 ml의 플라스틱 병에 담아 아이스박스에 보관하여 성분의 변화를 최소화 하였다. 처리수 성

분 분석은 거름종이를 이용하여 부유물질을 거른 후 그 여과액을 분석에 사용하였다. 시료의 pH는 거름종이(Whatman, No. 44)로 부유물을 제거한 후 pH meter (WTW pH 330)로 측정하였다. 전기전도도와 염분농도는 Conductivity meter(YSI 30)를 사용하여 현장에서 측정하였다. 총질소의 경우는 거름종이(Whatman, No. 44)로 부유물을 제거 후 농업과학공동기기센터에 의뢰하여 UV 분광광도계(model 9000100)로 분석하였다. NH_4^+ -N과 NO_3^- -N은 Flow Injection Analyzer(Quickchem 8000)로 정량화 하였다.

2.3. 생장특성 비교

쓰레기 매립지의 침출수에 대한 내성 개체군을 선별하기 위하여 우선 침출수를 처리한 후 생장과 영양염류의 함량 및 침출수 성분 중 함유량이 높은 아연과 철의 함량을 측정하여각각의 개체군이 침출수에 의한 반응의 차이를 비교하고자 하였다. 갈대 개체군들의 생장특성 비교를 위해 엽록소함량 및 길이생장을 측정하였고, 지상부와 지하부로 나눈 후 생물량을 비교하였다. 엽록소함량은 2001년 8월 3일 갈대 개체군마다 임의적으로 10개의 잎을 채취한 후 잎 표면에 붙은 이물질을 제거한 후 시료 잎 100 mg을 7 ml DMSO (dimethyl sulfoxide)가 든 vial에 넣은 후, 65°C에서 5시간 배양한 후 엽록소를 추출하였다. 추출과정 후 3 ml의 큐벳에 옮기고 645 nm, 663 nm, 470 nm에서 흡광도를 측정하여 엽록소 a, 엽록소 b, 카로테노이드 함량을 각각 측정하였다.

길이생장은 2 m의 접자를 이용하여 2001년 10월 31일 수확하기 전에 각 개체군별로 임의로 20개체씩을 선정하여 화서를 포함한 식물체 높이를 측정하였고, 생물량은 10월 31일과 11월 1일 각 개체군별로 3개의 화분을 선정하여 수거한 후 측정하였다. 또한 총질소 분석을 위해 건조기에서 60°C로 건조시킨 갈대를 1 mm이하의 분쇄기로 분쇄하였다. 분쇄한 시료 0.2 g에 3 g의 분해촉진제 (K_2SO_4 와 $CuSO_4$ 를 9:1로 혼합)와 황산원액 5 ml를 분해관에 넣고 450°C에서 약 30분간 가열하였다. 분해시료를 실온에서 식힌 다음 여과하여 증류수로 50 ml까지 채워 분석시료로 사용하였다. 분석기기는 Automatic Kjeldahl Protein/Nitrogen Analyser (Kjeltec Auto 1035/1038 System, Tecator AB, SWEDEN)를 사용하여 분석하였다. 총인, 아연 및 철 함량은 건조기에서 60°C로 건조시킨 갈대를 1 mm이하의 분쇄기로 분쇄한 후, 분쇄된 시료 0.2 g를 분해관에 담고 질산 (HNO_3)을 2.5 ml를 첨가하고 약 12시간 동안 방치한 후 80°C에서 1시간동안 분해하였다. 분해시료를 상온에서 식힌 후 과염소산 2.5 ml를 첨가하고 약 180~200°C에서 분해시료가 맑아질 때까지 가열하였다. 분해시료가 맑아지지 않으면 상온으로 식힌 후 과염소산을 조금씩 가해서 다시 가열하였다. 분해시료가 맑아지면 80°C에서 과염소산의 흰 연기가 발생할 때까지 가열하고 실온에서 식힌 후 증류수로 50 ml까지 채워 분석시료로 사용하였다. 분석기기는 Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer (ICPS-1000IV, Shimadzu, JAPAN)를 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 침출수 처리수 성분 분석

침출수 처리수의 화학적 조성을 확인한 결과 pH의 경우 약알칼리성으로 나타났으며, 전기전도도와 염분농도 및 용존산소량은 각각 27.6 ms/m, 22.4%, 14.5 ppm으로 나타났다 (Table 2). 또한, 총질소의 경우 214.1 ppm으로 나타났으며, NO_3^- 는 182.7 ppm으로 NH_4^+ 보다 약 10배 정도 높게 나타났다. 김 (2001)의¹⁰⁾ 보고에 의하면 인천 매립지 침출수 분석 결과, pH의 경우 7.64±0.01, 전기전도도 26.14 (ds/m), NO_3^- 는 검출되지 않았고, NH_4^+ 의 경우 2176.5 ppm 정도로 나타났는데 이는 매립년도와 물질 및 기온

Table 2. Chemical properties of landfill leachate (n=3)

Factor	Value
pH	7.4±0.2
Conductivity (ms/m)	27.6±0.8
NO_3^- (ppm)	182.7±15.0
NH_4^+ (ppm)	18.0±1.2
Total-N (ppm)	214.1±16.4
DO (mg/L)	14.5±0.3
Salinity (%)	22.4±1.0

과 강수량에 따라 성상이 다르게 나타날 수 있기 때문에 본 실험결과와 다소 차이가 있는 것으로 사료된다.

3.2. 엽록소 함량

갈대 개체군들의 엽록소 a, b 양과 카로티노이드 양을 측정하였다 (Table 3). 엽록소 a의 경우 난지도 개체군이 22.7 mg/L 가장 높게 나타났으며 울산 개체군이 15.9 mg/L로 가장 낮게 나타났다. 엽록소 b의 함량을 살펴본 결과 조사된 개체군들 사이에 1.8~2.3 mg/L의 분포로 나타났고 카로티노이드 함량도 5.0~6.7 mg/L으로 개체군 사이에 차이가 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 엽록소 a/b 비율을 확인한 결과 담수형 개체군들은 6.9~8.9로 나타났으며, 내륙복토형 개체군들은 7.5~11.4이었고, 기수 및 염습지형의 경우 8.2~9.2사이로 나타났다. 생태형에 따라 비교한 결과 내륙복토형 개체군들의 차이가 높게 나타났으며, 기수 및 염습지형은 개체군 사이의 차이가 가장 적게 나타났지만 내륙복토형 개체군 중 난지도 개체군이 다른 개체군에 비해 높게 나타나 침출수에 의한 엽록소 a의 생성 억제 영향을 적게 받은 것으로 확인되었다. 환경스트레스는 식물 잎의 엽록소 함량을 감소시키는 역할을 한다¹¹⁾. 엽록소 함량 중 특히 엽록소 a의 경우 염분농도가 높아 수분스트레스가 발생할 경우 파괴된다. 침출수 처리수의 분석결과 염분농도가 높아 식물에게 스트레스를 줄 것으로 판단된다. Ewing¹²⁾에 따르면, 영양염류가 많은 조건에 NaCl이 첨가되면 수용성 당을 증가시키고 단백질과 엽록소 a를 파괴하여 식물의 생장을 저해하는 원인이 된다고 보고된 바 있다. 이렇게 엽록소 함량은 식물의 광합성 능력에 영향을 줄 수 있기 때문에 침출수를 처리한 후 엽록소 함량을 비교하여 스트레스에 대한 반응 지표로 사

Table 3. Photosynthetic pigment contents of *Phragmites australis* grown with landfill leachate treatments. F: Fresh-water type, R: Reclaimed type, B: Brackish type

Habitat type	Site	Pigment content (mg/L)			
		Chl. a	Chl. b	Carotenoid	Chl. a/b ratio
F	As	17.3	2.0	5.3	8.7
	In	16.5	2.4	6.7	6.9
	Ss	18.6	2.1	5.6	8.9
	Th	19.0	2.1	6.4	9.1
	Us	15.9	1.8	5.0	8.8
	Pd	18.5	2.1	5.4	8.8
R	Nj	22.7	2.0	6.6	11.4
	Sn	19.5	2.1	6.4	9.1
	lc	19.9	2.3	5.7	8.7
	Dh	16.6	2.2	6.0	7.5
B	Db	16.6	1.8	5.2	9.2
	Sj	19.4	2.2	6.1	8.8
	Hh	17.4	2.0	6.3	8.7
	Mh	18.8	2.3	6.3	8.2

용될 수 있으리라 사료된다.

3.3. 생물량 및 줄기생장 측정

쓰레기 매립지 침출수를 처리한 수조의 갈대 개체군 별로 임의적으로 20 개체씩을 선정하여 높이를 측정한 결과는 다음과 같다(Fig. 1). 난지도, 송지호, 성남 개체군이 각각 평균 184.0 ± 4.5 cm, 168.0 ± 5.8 cm, 169.0 ± 3.4 cm로 다른 개체군에 비해 높게 나타났다. 태화강과 서산 개체군이 각각 132.6 ± 5.2 cm, 142.4 ± 4.2 cm로 가장 낮게 나타났다. 또한 다른 개체군과 달리 송지호와 대부도 개체군의 경우에는 서식지에서 성장한 줄기의 높이보다 침출수를 처리한 후 줄기의 높이가 높아졌다. 습지에서 서식하는 식물들은 환경의 변화로 인하여 성장에 영향을 받고 염분, 수심, 토양유기물 및 미네랄과 영양염류 등과 같은 환경요인에 의해 습지의 환경이 부분적으로 달라질 수 있다. 이러한 환경의 변화로 인하여 염습지 내에서 습지식물과 목본식물들의 종내 변이가 발생할 수 있다¹³⁾. 본 실험결과 서식지에서 자라는 줄기의 생장패턴과 매립지 침출수 처리로 인한 형태적인 변이는 이질적인 침출수에 의해 수환경이 바뀌면서 발생한 것으로 사료된다.

6월 처리 후 11월 수조에서 갈대를 수거한 후 지상부와 지하부로 나누어 건중량을 측정한 결과는 다음과 같다(Fig. 2). 전체적으로 지상부에 비해 지

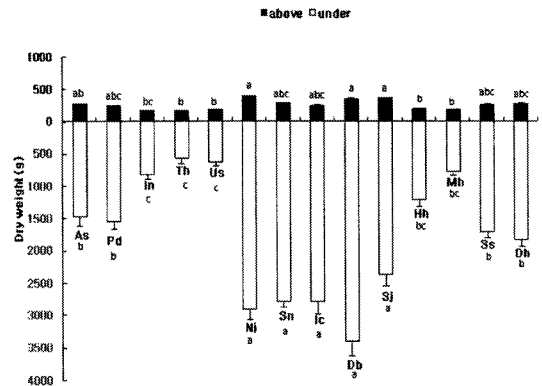


Fig. 2. Dry weight (g/pot) comparison of various *Phragmites australis* populations. (■: above-ground, □: under-ground). Bars represent means \pm SE (n=3). Bars with same letters are not significantly different at 0.05 level.

하부의 건중량이 높게 나타났다. 지상부의 경우 송지호 개체군 351.3 ± 24.6 g/pot, 대부도 개체군 348.8 ± 25.6 g/pot, 난지도 개체군 391.3 ± 14.6 g/pot으로 다른 개체군에 비해 높았고, 태화강, 울산, 인천 개체군의 경우 각각 164.2 ± 19.9 g/pot, 175.4 ± 14.6 g/pot, 163.8 ± 15.3 g/pot로 가장 낮은 생물량을 나타냈다. 지하부는 대부도, 난지도 및 인천의 개체군에서 각각 3472.7 ± 217.4 g/pot, 2914.3 ± 154.4 g/pot, 2894.7 ± 183.1 g/pot로 나타났으며 송지호 역시 2378.3 ± 154.6 g/pot

로 다른 개체군에 비해 생물량이 많았다. 가장 적게 측정된 지역은 울산과 대화강 및 매호 개체군으로 각각 623.9 ± 58.8 g/pot, 564.3 ± 82.8 g/pot, 776.7 ± 51.7 g/pot으로 나타났다. 개체군들을 비교했을 때 매립지와 염습지의 개체군들이 다른 지역에서 서식하는 개체군들에 비해 생물량이 우수한 것으로 나타났다. 이는 매립지 조건이 침출수와 비슷한 환경조건을 가지고 있고, 침출수 성분 중 염분농도가 높기 때문에 상대적으로 염분이 있는 조건에서 서식한 개체군들이 내성이 있고, 영양염류가 풍부한 조건이 더해지면서 침출수에 적응을 잘 하는 것으로 판단되었다. 따라서 식물을 이용한 수질정화를 위해서는 종의 선택 뿐 만 아니라 종 내 개체군들 사이에서 성장 특성과 서식지 환경을 고려해야 할 것으로 사료된다.

3.4. 총질소 분석

침출수 처리수를 처리한 수조 내에서 성장한 갈대 개체군들을 수집하여 지상부와 지하부의 총질소량을 분석한 결과는 다음과 같다(Fig. 3). 지상부는 송지호 개체군이 11.3 ± 0.9 g/kg으로 가장 높았고, 다음으로 성남과 이천 개체군이 각각 9.1 ± 1.1 g/kg,

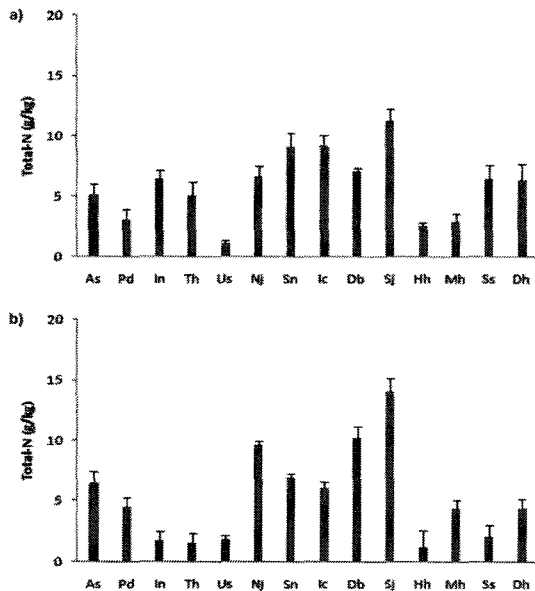


Fig. 3. Comparison of total-N content at various reed populations (a; above-ground, b; under-ground). Bars represent means \pm SE (n=3).

9.2 ± 0.8 g/kg으로 나타났으나, 울산 개체군은 1.1 ± 0.2 g/kg으로 다른 개체군에 비해 현저히 질소함량이 낮았다. 지하부는 송지호 개체군이 14.1 ± 1.1 g/kg으로 함량이 높았고, 향호 개체군이 1.2 ± 1.3 g/kg으로 가장 낮은 함유량을 보였다. 지상부와 지하부를 합한 총질소 함량은 송지호 개체군이 25.4 g/kg으로 가장 높았으며, 다음으로 대부도와 난지도 및 성남개체군이 각각 17.3 g/kg, 16.3 g/kg, 16 g/kg으로 나타났고, 향호와 대화의 개체군이 3.8 g/kg, 5.7 g/kg으로 가장 낮았다. 또한 지하부와 비교하여 지상부의 질소함량이 다소 높게 나타났다. 또한, 폐수 중에 질소가 24.7 ppm일 때, 고랭이는 94%, 갈대는 78.5%, 부들은 28.3%를 제거한다고 보고된 바 있다⁶⁾. 그러나 부들이 고랭이나 갈대보다 질소흡수량과 축적량이 높고 증발산과 엽면적지수(leaf area index, LAI)가 높은 C₄식물이기 때문에 광합성효율이 높으며 특히 질소뿐 아니라 인의 흡수율도 높다고 하였다^{5,14)}. 그러나 갈대가 인공습지용 폐수처리에 가장 효과적인 이유는 각종수질오염 물질에 강한 내성과 지하경의 발달로 근권 토양에 산소를 공급함으로써 미생물에 의한 질산화와 탈질화 작용에 의한 질소 제거율이 높다¹⁵⁾. 또한 갈대는 단위면적당 생물량이 높기 때문에 흡수하는 영양염류의 총량도 상대적으로 많고 지하경으로 번식하는 특성이 있어 적당한 환경조건이 주어지면 짧은 기간 동안에 분포역이 넓게 확산되는 특성을 가지고 있다⁹⁾. 따라서 갈대는 침출수 처리수의 질소 제거에 효과적인 종으로 판단된다.

3.5. 총인 분석

갈대 개체군들의 지상부와 지하부로 나누어 총인을 분석한 결과는 다음과 같다(Fig. 4). 지상부는 대부도 개체군이 1.66 ± 0.12 g/kg로 가장 많은 양의 인을 함유하고 있었고, 대화 개체군이 0.57 ± 0.10 g/kg로 식물체내 가장 적은 양의 인을 함유하고 있었다. 지하부의 경우 대부도와 난지도 개체군이 각각 2.67 ± 0.13 g/kg, 2.79 ± 0.10 g/kg로 가장 높았고, 매호 개체군이 1.54 ± 0.08 g/kg로 가장 낮았으며, 지상부에 비해서 지하부의 인의 함량이 2배 정도 높게 나타났다. John¹⁶⁾은 침출수 처리수 내 포함되어 있는 인은 갈대의 줄기와 지하경, 뿌리 순으로 많이 흡수되며 처리된 침출수 내 인을 99%이상 흡수되어 진다고 보고한 바 있다. 매립지 침출수는 철의 성분이 많기

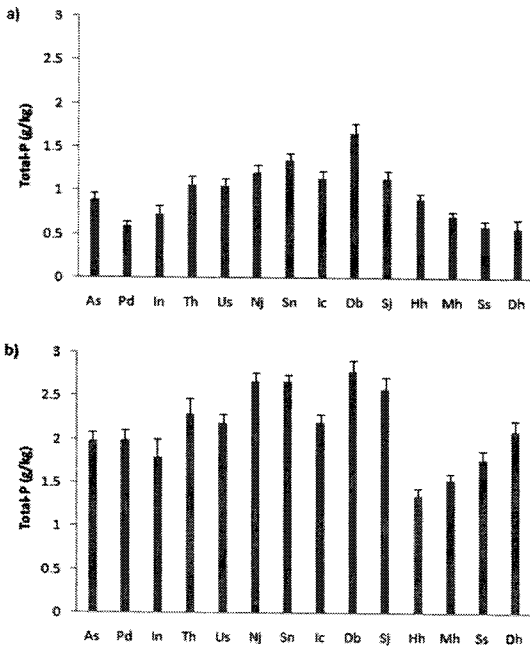


Fig. 4. Comparison of total-P content at various *Phragmites australis* populations (a; above-ground, b; under-ground). Bars represent means±SE (n=3).

때문에 산화되어 붉은색을 띠게 되는데, 이러한 산화철이 지하경과 뿌리에 흡착이 되면 영양염류의

흡수를 방해하여 식물 성장을 저해한다¹⁷⁾. 기존의 다른 연구들은 수생식물을 이용한 영양염류의 제거 효율에 초점을 맞추어 진행하였지만 본 실험은 침출수에 대한 내성을 확인하고 개체군마다 생장특성이 다르게 나타나는 원인을 밝히기 위해 진행하였고, 침출수의 화학적 조성이 지역과 환경에 따라 다르기 때문에 인의 흡수량에 관해 다른 연구 결과와 비교하기에는 한계가 있었다.

3.6. 철과 아연 분석

최¹⁸⁾의 보고에 따르면 쓰레기 매립지 침출수 처리수 내 금속이온 중 철과 아연이 다른 것에 비해 많은 것으로 알려져 있다. 따라서 본 실험에서 갈대 개체군들의 아연과 철의 함량을 지상부와 지하부로 나누어 분석하였다(Table 4). 아연의 함량은 대부분의 개체군에서 지상부 내 아연의 함량이 지하부에 비해 다소 높았으며, 성남 개체군이 0.36 g/kg으로 가장 높게 나타났다. 철의 함량은 대부분의 개체군에서 지상부에 비해 지하부 내 철이 함량이 높게 나타났다으며, 난지도 개체군이 17.4 g/kg으로 가장 높았다. 철의 함량도 다른 개체군에 비해 매립지 개체군의 체내에 축적량이 많았다. 쓰레기 매립지 침출수에는 다양한 오염원들이 함유되어 있는데 이러한 물질들 중 금속이온들은 특히 식물의 성장을 저해

Table 4. Comparisons of Zn and Fe contents of *Phragmites australis* populations in landfill leachate treatment pilot (F: Fresh water type, R: Reclaimed type, B: Brackish type)

Type	Site	Zn (g/kg)		Fe (g/kg)	
		Above	Under	Above	Under
F	As	0.14	0.10	0.91	10.80
	In	0.08	0.08	2.14	1.59
	Ss	0.06	0.10	0.83	10.60
	Th	0.24	0.10	1.32	6.13
	Us	0.21	0.11	1.58	4.44
	Pd	0.05	0.10	1.96	7.20
R	Nj	0.11	0.10	1.02	16.39
	Sn	0.18	0.18	1.09	13.93
	Ic	0.13	0.11	1.37	12.88
	Dh	0.12	0.08	0.69	6.82
B	Db	0.13	0.09	2.12	12.63
	Sj	0.10	0.13	1.18	9.86
	Hh	0.15	0.08	1.10	5.45
	Mh	0.14	0.09	1.19	5.44

시킬 수 있는 요인들이기 때문에 식물과 금속이온의 작용에 대한 연구가 많이 이루어져 있다. 특히 인공습지를 이용해 수질정화를 위한 연구에서 철의 농도들을 살펴본 결과 적게는 3 mg/L으로부터 많게는 200 mg/L을 함유한 것들도 있다^{19,20)}. 침출수는 다른 금속에 비해 높은 농도의 Fe를 함유하고 있어 근권의 Fe²⁺이온을 산화시켜 불용성 Fe³⁺를 만들어 식물체 내 철의 흡수를 막아 독성물질에 대한 방어 기작을 방해하고 인과 같은 영양염류의 결핍을 유도하기도 한다. 따라서 산화된 철의 내성과 흡수력에 따라 내성개체군 선별에 도움이 될 수 있으리라 판단되며, 매립지에서 선별한 갈대 개체군들이 다른 개체군에 비해 철에 대한 내성이 있는 것으로 사료된다.

4. 결 론

쓰레기 매립지에서 발생하는 침출수를 국내 14곳에서 서식하는 갈대 개체군에 처리한 후 개체군들의 성장특성을 비교한 결과, 우선 줄기생장의 경우 난지도 개체군이 가장 높게 나타났고, 생물량을 측정한 결과 내륙복토형 개체군 중 매립지 개체군인 난지도, 성남, 이천 개체군과 기수 및 염습지형인 대부도와 송지호 개체군의 생물량이 높게 나타났다. 또한 식물체 내 총질소와 총인을 분석한 결과 총질소의 경우 난지도와 송지호 개체군의 함량이 높았으며, 총인의 경우, 난지도와 성남 개체군과 대부도와 송지호 개체군이 상위그룹을 형성하였다. 엽록소 함량, 줄기생장, 식물체 내 영양염류 함량, 철의 흡수량을 비교한 결과 생물량이 많은 난지도, 성남, 이천, 대부도, 송지호 개체군이 침출수에 내성이 있는 개체군으로 판단되었다. 특히, 난지도와 대부도 개체군이 침출수의 정화에 있어 가장 적합한 개체군으로 사료된다. 이러한 결과들은 침출수의 특성상 염분농도가 높기 때문에 서식지 환경이 비슷한 조건으로 매립지 개체군과 염분농도가 높은 지역의 개체군이 보다 효율적으로 적응한 것으로 판단되었다. 쓰레기 매립지의 침출수와 같이 특이적인 환경에 갈대를 이용하여 정화를 시키는 방법은 매우 효율적인 것으로 사료되지만 갈대의 경우 생육환경의 범위가 넓고 유전적 다양성이 높기 때문에 생육지의 환경이 변화함에 따라 다양한 반응을 나타낼 수

있다. 따라서 내성개체군을 선별하기 위해 우선 비슷한 생육지의 환경만을 고려하는 것도 하나의 방법이기는 하나 보다 범위를 넓혀 다양한 환경에서 생육하는 갈대를 이용하여 성장특성을 비교하여 선별하고 환경뿐 만 아니라 서로 다른 개체군의 유전적 다양성과 같은 내적요인의 차이를 고려한다면 보다 효율적으로 정화를 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) Jodie D., 2005, The potential for landfill leachate treatment using willows in the UK - A critical review, *Resour. Conserv. Recy.*, 45, 97-113.
- 2) Gettinby H., Sarsby R. W., Nedwell J. C., 1996, The composition of leachate from landfill refuse, *Proc., Instn. Civil Engres.*, 47-59.
- 3) Im J. H., Woo H. J., Choi M. W., Choi K. B., Kim C. W., 2001, Simultaneous organic and nitrogen removal from municipal landfill leachate using an anaerobic-aerobic system, *Water Res.*, 35, 2403-2410.
- 4) Weller M. W., 1981, *Freshwater marshes: Ecology and wildlife management*, University of Minnesota Press, Minneapolis, 163pp.
- 5) 광영세, 이충일, 2000, 정수식물의 내염성 및 NH₄⁺-N 흡수제거능 평가, *한국생태학회지*, 23, 45-49.
- 6) Gersberg R. M., Elkins B. U., Lyon S. R., Goldman C. R., 1986, Role of aquatic plants in waste water treatment by artificial wetlands, *Water Res.*, 20, 363-368.
- 7) Cooper P. F., Job G. D., Green M. B., Shutes R. B. E., 1996, *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*, WRC Publications, Medmenham, 206pp.
- 8) Kadlec R. H., Knight R. L., 1996, *Treatment wetlands*, CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, 928pp.
- 9) 농어촌진흥공사, 1998, 수생식물에 의한 수질개선 기법 연구(II), 연구보고서, 29pp.
- 10) 김기대, 2001, 서울 수도권 지역 쓰레기 매립지의 식생구조와 생태학적 복원, 박사 논문, 생명과학과, 서울대학교, 서울.
- 11) Hall A. J., Lemcoff J. H., Trapani N., 1981, Water stress before and during flowering in maize and its effects on yields, its components and their determinants, *May-dica.*, 26, 19-38.
- 12) Ewing W. S. B., 1981, The effect of salinity on the morphological and anatomical characteristics of *Atriplex triangularis* Willd, Master's thesis, Department of Botany, Ohio University, Athens, OH.
- 13) Enberg A., Wu L., 1995, Selenium assimilation and differential responses to elevated sulfate and chloride

- salt concentrations in salt grass ecotypes, *Ecotox. Environ. Safe.*, 32, 171-178.
- 14) Reddy K. R., Debusk W. F., 1987, Nutrient storage capabilities of aquatic and wetland plants, Edited by Reddy K. R. and Smith W. H., *Aquatic plants for water treatment and resource recovery*, Magnolia Pub. Inc., Orlando, Florida, 337-357.
 - 15) Cooper P. F., Boon A. G., 1987, The use of *Phragmites* for wastewater treatment by the root zone method: The UK approach, Edited by Reddy K. R. and Smith W. H., *Aquatic plants for water treatment and resource recovery*, Magnolia Pub. Inc., Orlando, Florida, 153-174.
 - 16) Peverly J. H., Surface J. M., Wang T., 1995, Growth and trace metal absorption by *Phragmites australis* in wetlands constructed for landfill leachate treatment, *Ecol. Eng.*, 5, 21-35.
 - 17) Yamauchi M., 1989, Rice bronzing in Nigeria caused by nutrient imbalances and its control by potassium sulfate application, *Plant Soil*, 117, 275-286.
 - 18) 최소영, 2002, 인천 쓰레기 매립지 침출수가 식물 생장에 미치는 영향, 석사논문, 생명과학과, 서울대학교, 서울.
 - 19) Younger P. L., 2000, The adoption and adaptation of passive treatment technologies for mine waters in the United Kingdom, *Mine Water Environ.*, 19, 84-97.
 - 20) Marsden M., Kerr K., Holloway D., Wilbraham D., 1997, The position in Scotland, Edited by Bord L., *Proceedings of the UK Environment Agency Conference on Abandoned Mines, Problems and Solutions*, Leeds, Environment Agency, 74-84.