

식물정화기술의 개요와 환경오염 제어에의 응용 현황

이재흥*

An Overview of Phytoremediation Technology and Its Applications to Environmental Pollution Control

Jae Heung Lee*

접수: 2012년 10월 2일 / 게재승인: 2012년 10월 20일
© 2012 The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering

Abstract: Phytoremediation-the use of plants for the *in situ* treatment of contaminated soil and water-has recently emerged as an inexpensive and user-friendly alternative to traditional methods of environmental clean-up. The present article outlines the characteristics of phytoremediation based on accumulated research evidence, along with discussions on its advantages and disadvantages. It further reviews various mechanisms involved in the phytoremediation processes: phytoextraction, rhizofiltration, phytostabilization, phytovolatilization and phytodegradation. Along the way, the author summarizes examples of its applications to environmental pollution control. These include wastewater treatment, removal of heavy metals, and hydrocarbons, remediation of recalcitrant contaminants, phytoremediation of radionuclides, and application of transgenic plants for enhanced biodegradation and phytoremediation. The remainder of the article briefly concludes with directions for future research.

Keywords: Phytoremediation, environmental pollution control, hyperaccumulator, removal of heavy metals, uptake of radionuclides, growth-promoting bacteria, transgenic plants

1. 서론

현재 전 세계 인류가 당면하고 있는 현안으로서 난치병 치료의 문제, 식량 부족의 문제, 화석 연료 등 에너지 고갈의 문제, 그리고 환경오염의 문제 등이 있다. 이러한 어려운 문제들을 해결하기 위하여 여러 가지 대안들이 제시되고 있지만 생명공학기술 (biotechnology)이 앞으로 부분적으로나마 이러한 현안들을 해결해 줄 수 있을 것이며, 앞으로 생명공학기술을 이용한 제품과 서비스가 일상화되는 바이오사회 (bio-society)가 점차 다가올 것으로 전망된다.

지구온난화 문제와 더불어 지구환경오염 문제는 한 국가가 해결해 낼 수 있는 문제가 아니다. 역사적으로 보면 환경 문제를 지구적 차원에서 논의한 최초의 국제회의의 “유엔인간 환경회의”가 1972년 스웨덴의 스톡홀름에서 열렸고, '85년에는 오존층 보호를 위한 “비엔나 협약 (Vienna Convention)”, 그리고 '87년에는 오존층 파괴물질에 대한 “몬트리올 의정서 (Montreal Protocol)”가 채택되었다. 이어서 '92년 브라질 리우데자네이루에서 “유엔환경개발회의”가 개최되었고 기후 변화협약과 생물보존을 위한 생물 다양성 보호 문제를 논의하였으며, 향후 지구환경보전의 기본원칙을 규정하는 “리우 선언”과 21세기 환경보전의 구체적 실천 강령인 “의제21”, 그리고 그 실천방안의 하나로 “교토의정서 (Kyoto Protocol)”를 채택하였다. 한편 올해 9월에는 4년마다 개최되는 환경 분야의 권위 있는 “2012세계자연보전총회”가 뜻 깊게도 제주에서 성공적으로 개최되었다.

환경오염의 주된 발생원인은 인구의 폭발적인 증가에 따른 오염 배출량의 증가, 공업과 농업 발달에 따른 난 처리성 합성물질의 소비 증대, 에너지 소비 증가에 따른 석탄 및 석유 등 화석연료 연소과정에서 생성되는 오염물질 대량 발생

한국기술교육대학교 기계공학부
School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education, 1800 Chungjeol-ro, Byungcheon-myon, Cheonan city, Chungcheongnamdo 330-708, Korea
Tel: +82-41-560-1249, Fax: +82-41-560-1253
e-mail: jaeheung@kut.ac.kr

Table 1. Different types of mechanism in the phytoremediation processes

Mechanism	Process description	Application
Phytoextraction (= Phytoaccumulation)	The use of metal-accumulating plants to remove toxic metals from soil.	Removal of heavy metals (Co, Cu, Pb, Zn, Ni, Cr, Cu, Hg, Mn etc.)
Rhizofiltration	The use of plant roots to remove toxic metals from polluted waters.	Removal of metals and radionuclides
Phytostabilization	The use of plants to eliminate the bioavailability of toxic metals in soil.	
Phytovolatilization	The use of plants to extract inorganic contaminants, which are then dispersed into the atmosphere by volatilization from aerial parts.	Removal of trichloroethylene (TCE) using poplar Removal of methyl tertiary butyle ether (MTBE) using eucalyptuse
Phytodegradation (= phytotransformation)	The use of plants and associated microorganisms degrade organic pollutants. Plants roots in conjunction with their rhizospheric microorganisms are utilized to remediate soils contaminated with organics.	Removal of chlorinated solvents, herbicides and insecticides

등에서 기인한다. 이러한 오염물질들은 수질오염, 토양오염, 대기오염 문제를 일으키며 또한 지구온난화 문제를 야기하기도 한다. '90년대 중반 이후 환경오염저감 및 제어 목적으로 점차 떠오르고 있는 식물정화기술 (phytoremediation technology)은 다양한 식물을 이용하여 토양이나 물에 오염된 물질들을 식물로 추출 농축하거나, 뿌리여과, 안정화 또는 나무 잎을 통해 휘발시키는 기술이다 [1-7]. 특히 이 기술은 넓은 영역에 걸쳐 낮은 농도로 오염된 지역의 환경문제를 해결하는데 매우 효과적이다. 식물 중에는 특이적으로 중금속이나 방사성 물질을 고농도로 과축적하는 식물들 (hyperaccumulators)이 알려져 있으며, 또한 최근에는 유전자조작방법으로 품종 개량된 형질전환식물이 식물정화법에 활용되고 있는 실정이다 [8-11]. 한국생물공학학회에서는 그러나 식물정화기술에 대한 소개나 이용 현황에 대한 논문이 아직까지 보고되지 않았다. 본 총설에서는 식물정화법에 대한 장점과 제한점 [12-14], 식물정화법의 여러 기작 [2,3,7,12]과 식물정화기술의 응용사례 [15-26], 그리고 향후 전망에 대하여 살펴보려고 한다.

2. 식물정화법의 특징과 제한점

식물정화법 (phytoremediation)은 기존의 물리·화학·생물학적 환경오염 처리방법과 비교하여 여러 가지 장점을 가지고 있다 [2,12,13]. 즉

- 초기 자본투자 비용이 적게 소요되며, 운영비 또한 매우 저렴하다 (60-80% 저렴).
- 환경 친화적이고 심미적이어서 대중으로부터 거부감이 없다.
- 환경파괴가 적고, 토양 및 지하수의 원위치 (*in situ* treatment)에서 처리가 가능하다.
- 무기오염물질 (중금속, 비금속, 방사성물질 등)이나 유기오염물질 (탄화수소, 화약류, 염소화합물 등) 모두 처리 가능하다.

한편 제한점을 요약하면 다음과 같다. 즉

- 정화속도가 느려서 오염물질 제거에 오랜 시간 (~수 계절)

이 걸릴 수 있다.

- 식물 뿌리가 닿지 않는 깊은 토양이나 지하수에는 적용하기 어렵다.
- 중금속이나 오염물질이 흡수된 식물들은 나중에 상위 먹이사슬을 따라 섭취했을 때 동물이나 인간에게 나쁜 영향을 줄 수 있다.
- 식물이 잘 성장할 수 없는 지역 (특히 고농도 독성물질 오염 지역, 추운 지방 등)에는 적용하는데 한계가 있다.

식물정화법은 특히 중금속 제거에 매우 효과적이는데, 이 목적에 부합하는 식물 특성으로는

- 척박한 토양에서도 잘 자라고, 땅속 깊이 뿌리를 내릴 수 있으며,
- 고농도 금속에 내성을 갖는 식물이어야 하며,
- 식물 내에 그 금속을 고농도로 축적할 수 있는 능력을 가져야 하며,
- 성장속도가 빨라야 하고,
- 수확 후 생체량 (biomass)이 많아야 좋다.

이러한 특성을 가지는 식물로서는 버드나무 (*Salix*), 자작나무 (*Betula*), 포플러 (*Populus*), 오리나무 (*Alnus*), 플라타너스 (*Acer*) 등이 있다 [7].

3. 식물정화법에 있어서 여러 기작들

식물정화법은 오염물질이 제거되는 기작에 따라 식물추출법 (phytoextraction), 뿌리여과법 (rhizofiltration), 식물안정화법 (phytostabilization), 식물휘발법 (phytovolatilization), 그리고 식물분해법 (phytodegradation) 등 크게 5가지로 나눌 수 있는데, Table 1에 그 각각 기작 [1,3,4]에 따른 주요 내용과 활용 예를 요약하였다.

3.1. 식물추출법 (phytoextraction)

토양 내에 있는 오염물질을 지상에 있는 나무줄기에 농축하여 오염물질을 제거시키는 기작을 말한다. 식물정화법 중에

Table 2. Examples of hyperaccumulator plants currently used in the phytoremediation process

Metal or radionuclides	Plant	Concentration (mg/kg)
As	Sunflower (<i>Helianthus annuus</i>)	-
	Chinese Brake fern (<i>Pteris vittata</i>)	22,000
Cd	Willow (<i>Salix viminalis</i>)	-
Cd and Zn	Alpine pennycress (<i>Thlaspi caerulescens</i>)	Cd 10,000-15,000
		Zn 10,000-15,000
Pb	Indian mustard (<i>Brassica juncea</i>)	10,000-15,000
	Ragweed (<i>Ambrosia artemisiifolia</i>)	-
	Poplar trees	-
Ni	<i>Alyssum</i> sp.	4,200-24,400
¹³⁷ Cs and ⁹⁰ Sr	Sunflower (<i>Helianthus annuus</i>)	-
	Giant milky weed (<i>Calotropis gigantea</i>)	-
Hg and Pb	Transgenic yellow poplar	-

서 이 방법이 가장 넓이 사용하고 있으며 식물을 이용하여 중금속등을 흡수 축적시켜 제거하는데 많이 사용하고 있다. 나중에 식물은 수확하여 매립처리하거나 소각하면 재로 남게 되고, 이로부터 필요시 중금속을 재 회수 할 수 있다. 쌍떡잎 식물 (*Brassica juncea*, *Thlaspi caerulescens*, *Alyssum* sp. 등) 과 양치식물 (*Pteris vittata*, *Pennisetum glaucum* 등)의 과축적 식물 (plant hyperaccumulator)들이 많이 사용되고 있다. 예로서 양치식물인 *Dicroptheris dichotoma*는 휘도류인 La, Ce, Pr, Nd를 과축적하는 것으로 알려져 있다 [27]. Table 2에 중금속 등 여러 오염 물질을 과축적하는 주요 식물종들을 요약하였다 [7]. 이런 식물들은 뿌리나 줄기에 있는 세포의 액포 내로 오염물질을 저장함으로 중금속에 대한 내성을 갖게 되는 것으로 보인다. 그러나 불행히도 과축적 식물들은 대부분 생체량 (biomass)이 낮은 특징을 가지고 있다.

3.2. 뿌리여과법 (rhizofiltration)

이 방법은 토양이 아닌 수용액 또는 액상폐수에 있는 오염물 질들 (주로 금속류, 유기오염물질 및 방사성오염물질 등)을 식물의 뿌리 또는 뿌리와 연관된 여러 근권세균 (growth-promoting bacteria)에 의해 제거하는 기작이다. 식물 뿌리에는 여러 미생물들이 붙어 생장하고, 근권 (rhizosphere)이라고 부르는 뿌리와의 얇은 경계면이 조성된다. 근권 미생물은 식물정화에서 매우 중요한 역할을 하는데, 근권 미생물들은 식물의 뿌리에서 생산되는 영양원으로 살아간다. 근권 미생물은 식물성장을 저해하는 독성오염물질을 분해함으로써 식물의 성장을 돕고, 식물이 오염물질을 잘 분해 할 수 있도록 도와주는 역할을 한다 [28,29]. 뿌리여과법이 적용된 사례로서는 폐광이나 습지대로부터의 중금속 제거 [30-32], BOD₅ 제거 [15,33,34], 해바라기 (*Helianthus annuus*)를 사용하여 우크라이나 체르노빌 근처 연못 내 방사성물질 ⁹⁰Sr과 ¹³⁷Cs의 제거 [25] 등이 좋은 예들이다.

3.3. 식물안정화법 (phytostabilization)

오염물질을 분해하지는 못하지만 오염물질을 침전시키거나 근권에 흡착시켜 오염물질의 이동성을 줄여주고 더 깊은 토

양 속 또는 지하수로 이동하지 못하도록 해 주는 기작이다. 뿐만 아니라 어떤 식물들은 중금속들을 분해시키지는 못 하지만 보다 더 물에 잘 용해될 수 있도록 돕거나 독성이 줄어들도록 해 준다. 예로서 독성이 강한 Cr⁶⁺은 뿌리 근권 박테리아의 도움으로 독성이 줄어든 Cr³⁺로 전환되는 것으로 알려졌다 [2].

3.4. 식물휘발법 (phytovolatilization)

어떤 식물들은 금속이온을 더 휘발성이 강한 상태로 전환시켜주어 독성을 경감시키고, 식물 잎에 있는 기공을 통하여 대기 중으로 배출시켜 준다. Trichloroethylene (TCE)는 포플러에 의해 휘발될 수 있으며, methyl t-butyl ether (MTBE)는 유칼립투스나무에 의해, selenium은 갓 (Indian mustard)에 의해 dimethylselenide로, 그리고 methyl mercury는 담배나무에 의해 mercury vapor로 휘발시킬 수 있다. 뿐만 아니라 근권미생물은 Hg²⁺를 volatile Hg로 전환시켜 주는데, 이러한 기작들이 식물휘발법에 해당된다 [7].

3.5. 식물분해법 (phytodegradation)

식물분해법은 식물이 생산하는 여러 종류의 효소가 체초제, 살충제, 염소화합물 등 여러 독성물질을 부분 분해 또는 완전 분해시켜 저독성 또는 무독성 물질로 전환되는 방법이다. 식물분해법과 관련하여 유용한 효소들로서는 nitroreductase, laccase, peroxidase, nitrilase 등이 알려져 있으며, 어떤 식물들은 trichloroethylene (TCE)를 분해할 수 있는 dehalogenases, 2,4,6-trinitrotoluene (TNT)를 분해 하는 nitroreductases, 체초제 및 살충제등을 분해하는데 필요한 oxygenases 등 여러 종류의 효소들을 생산할 수 있는 능력을 가지고 있다 [12,13].

4. 식물정화법의 적용 사례

식물정화법에 의한 환경오염 처리 응용예로서는 폐수처리, 중금속처리, 탄화수소 처리, 염소화합물 처리, 방사성물질 처리 등 현재 여러 공정에 폭넓게 사용되고 있다. Table 3에

Table 3. Examples of environmental pollution control that uses phytoremediation process

Process	Plant used	Effect	Reference
Wastewater treatment			
BOD ₅ and suspended solids	<i>Phragmites australis</i>	Removal of 88% BOD ₅ and 84% SS	[15]
Ammonium-nitrogen removal	<i>Cyperus papyrus</i>	Removal of 75% NH ₄ -N	[33]
Removal of heavy metals			
Pb and Ni	<i>Lemna minor</i>	76% of Pb and 82% of Ni	[30]
Hg	Transgenic yellow poplar	Mercury pollution control	[10]
Removal of hydrocarbons			
Petroleum	<i>Spartina alterniflora</i>	58% degradation per year	[22]
Diesel-contaminated soil	Legume, pine and poplar	-	[40]
Removal of recalcitrant compounds			
TNT(2,4,6-trinitrotoluene)	Johnsongrass	97% of TNT in 93 days	[43]
Glycerol trinitrate	Transgenic tobacco plant	Biodegradation of explosive	[57]
PCB(polychlorinated biphenyl)	Legumes and grasses	Removal of 62% PCB	[24]
Removal of radionuclides			
⁹⁰ Sr and ¹³⁷ Cs	<i>Calotropis gigantea</i>	90% of ⁹⁰ Sr and 40% of ¹³⁷ Cs	[26]
⁹⁰ Sr and ¹³⁷ Cs	<i>Helianthus annuus</i>	-	[25]

각각의 대표적 사례들을 정리하여 요약하였다.

4.1. 폐수처리에서의 이용

갈대 *Phragmites australis*를 이용한 2단 reed-bed system을 사용하여 BOD₅ 1006 mg/L인 고농도 축산폐수를 56 mg/L 까지 처리한 예가 보고 되었다 [15]. 체코에서는 '90년대부터 18-4500m²의 대규모 습지대를 조성하여 폐수처리에 이용하여 왔으며 BOD₅가 88%, SS (suspended solids)가 84%까지 제거되는 등 좋은 결과가 얻어진 사례가 있다 [16]. 한편 우간다에서는 *Cyperus papyrus* (papyrus)와 *Miscanthidium violaceum*을 사용하여 암모니아성 질소와 인과 같은 영양염에 대한 제거 결과가 보고되었다 [33]. 한편 *Typha latifolia*와 *Salix atrocinerea*를 이용하여 도시폐수처리를 위한 효율적 반응기 설계에 대한 문헌 [34], 다년생 식물인 *Cupressus sempervirens*와 *Quercus ilex*등에 의한 olive mill wastewater 처리 등이 보고되었다 [35].

4.2. 중금속 처리에서의 이용

산업폐수 등 고농도의 중금속들에 대한 처리공정은 이미 정립되어 있지만 폐광산 등지에서 흘러나오는 저농도 중금속 처리에 대하여는 식물정화법을 이용하는 것이 매우 바람직하다. 우리나라 전국에는 수백 개의 폐광산광산이 산재하고 있고, 이 폐광산에서 흘러나오는 오염물질들이 논과 밭, 하천을 오염시키고 있다. 식물정화법에 의한 토양 중금속오염처리 관련하여 현재 많은 문헌이 보고 되고 있다 [2,3,9,30,32]. 식물정화법은 중금속 오염 처리 비용이 적게 소요되며, 또한 다시 이 중금속의 재회수가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 식물정화법에 의한 오염물질 처리에 있어서 우선 최적의 식물종을 선택하는 것이 가장 중요한 문제인데, 여러 중금속을 과축적하는 식물종 (hyperaccumulators)이 문헌에 알려져 있다 (Table 2). 과축적 능력을 가지는 식물은 그렇지 않은 식물종 (non-accumulators)에 비하여 50-100배 이상의 고농

도로 중금속을 축적한다. 수생식물을 포함하여 약 400여종의 과축적식물 [4,7]이 알려져 있는데, 축적 수준은 나무 기준으로 Zn과 Mn에 대하여는 10 g/kg, Co, Cu, Ni의 경우는 1 g/kg, Cd의 경우는 0.1 g/kg 정도이다. *Brassica junica*에 의한 Pb처리, *Thlaspi caerulescens* 및 *Solanum nigrum*에 의한 Cd처리, *Lemna minor*에 의한 Pb와 Ni 제거, *Lolium perenne*에 의한 Cu, Pb, Zn 제거 [36] 등이 보고되고 있다. 특히 Pb처리에 대하여는 형질전환식물을 이용한 사례가 많이 발표되어 있으며, EDTA와 같은 킬레이트를 토양에 첨가시켜주면 Pb의 용해도가 증가되어 뿌리가 더 용이하게 금속을 흡수할 수 있게 된다 [1,17,37].

한편 준금속에 해당되는 As의 처리에 대하여도 활발히 연구가 진행되고 있다. 주로 해바라기 (*Helianthus annuus*)와 Chinese Brake fern (*Pteris vittata*)등의 식물이 이용되고 있다 [7,32,38]. 또한 비금속류인 Se에 대하여는 유전자 조작 변형식물을 이용한 토양오염 처리에 대한 연구가 보고된 바 있다 [39].

4.3. 탄화수소 및 관련물질의 제거

주유소 등지에는 탱크의 부식으로 휘발유와 석유가 새어나와 토양이 오염되기도 한다. 석유로 오염된 습지대에 *Spartina alterniflora*를 이용하여 식물정화 처리한 사례 [22], *Echinodorus cordifolius*를 사용하여 COD값이 높은 ethylene glycol 오염폐수를 처리한 사례 [23], 또한 최근에는 탄화수소 디젤오염 처리에도 Italian ryegrass와 *Melilotus albus* 식물을 사용한 사례가 보고되고 있다 [40,41]. 뿐만 아니라 naphthalene처리에도 *Arabidopsis thaliana*가 적용된 사례가 있으며, microarray system을 이용하여 이 식물에서 발현되는 유전자들에 대한 연구가 보고되었다 [42].

4.4. 난 처리성 유기화합물 제거에서의 활용

화약류 [43,44], 제초제와 살충제 [45,46], 그리고 염소화합

Table 4. List of major phytoremediation companies in the United States

Company name	Location	Expertise in remediation	Plants used
Ecolotree, Inc.	Iowa City, IA	Removal of contaminants in municipal or industrial wastewater streams	Poplar trees and grasses
Phytotech, Inc.	Monmouth Junction, NJ	Removal of metals and radionuclides	Sunflowers and Indian mustard plants
Phytokinetics, Inc.	Logan, UT	Removal of organic chemical contaminants in soil and groundwater	Perennial ryegrass
Applied Natural Sciences, Inc.	Hamilton, OH	Removal of pesticides, nitrate fertilizers and trichloroethylene in groundwater	Poplar and willow trees
Phytoworks, Inc.	Gladwyne, PA	Identifying and isolating plant enzymes capable of degrading contaminants such as polychlorinated biphenyls (PCBs) and explosives	-

물 등 처리되기 어려운 유기화합물들 [47-50]을 식물정화법으로 해결하려는 연구가 진행되고 있다. 군사시설 등지에는 여러 화약류로 오염되는 경우가 있는데 특히 trinitrotoluene (TNT), polychlorinated biphenyls (PCBs), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), 그리고 살충제와 제초제 처리에도 식물정화법이 활용이 되고 있다. 특히 농약류인 제초제나 살충제 등은 물에서 검출되므로 수생식물을 이용하는 경우가 있고 버드나무 (*Salix* sp.)가 활용되기도 한다.

4.5. 방사성오염물질의 제거에 활용

방사성 오염물질의 정화에도 여러 종류의 식물이 활용되고 있다 [51]. 유명한 사례로서 1986년 4월 우크라이나에서 발생한 Chernobyl 원전사고 이후 연못에 오염된 방사성 오염물질인 cesium (¹³⁷Cs)과 strontium (⁹⁰Sr)을 제거하기 위하여 해바라기를 이용한 sunflower project가 '94년부터 Phytotech 회사 주도하에 시작되었다. 해바라기는 여러 금속 등이 혼합된 오염물질 중에서 선택적으로 방사성물질들을 cesium은 뿌리에, strontium은 줄기에 축적하는 것으로 알려졌다 [25]. 또한 해바라기 뿌리는 우라늄 함유액으로부터 30,000배 농축할 수 있는 능력이 있는 것으로 알려지고 있다 [6]. 해바라기 이외에도 giant milky weed (*Calotropis gigantea*)를 사용하면 24시간 배양조건하에서 ⁹⁰Sr은 90%, ¹³⁷Cs은 44%제거되는 것으로 알려졌다 [26]. Uranium 광산 지역에서는 방사성핵종 (radionuclides)들이 외부환경으로 노출되는데, uranium으로 오염된 토양을 갈대 (*Phragmites australis*)로 처리 될 수 있었다 [52]. 한편 방사성물질로 오염된 수용액 폐기물 처리에 water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)가 주목 받고 있는데, 특히 ⁶⁰Co 및 ¹³⁷Cs제거를 위한 유효한 후보식물로 평가되고 있다 [53]. 작년에 일어난 후쿠시마 원전 사고지역에도 식물정화법이 앞으로 유효하게 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

5. 형질전환 식물을 활용한 식물정화기술의 개발

전술한바와 같이 어떤 식물들은 토양이나 물에 오염된 중금속을 과축적한다. 최근에는 유전공학법에 의한 식물의 품종

개발 연구가 본격화 되고 있다 [9,10,54-58]. 특히 Hg, Pb, Cd, As, Se 등 중금속류들을 무독화 시키거나 과축적하는 형질전환 식물에 대한 연구가 보고되었다. 예를 들면 박테리아로부터 mercuric ion reductase 유전자를 *Arabidopsis thaliana*에 도입하여 수은저항성 형질전환식물을 개발하였다 [10,55-56]. 이 외에도 pentaerythritol tetranitrate reductase 유전자를 발현하는 transgenic tobacco plants의 개발 [57], phytochelatin synthase 유전자를 도입시켜 Pb 과축적 *Nicotiana glauca*을 개발 [58], 그리고 Se-과축적 형질전환 식물의 개발 [39]이 발표되었다. 또한 독성화합물들의 대사에 공통적으로 관련되는 효소 mammalian cytochrome P450을 발현하는 포플러 (*Populus*)를 개발하여 trichloroethylene (TCE) 대사에서 개선된 결과를 얻기도 하였다 [59]. 한편 대기오염 물질인 NO₂를 질소원으로 사용하여 질소화합물로 동화하는 식물 (NO₂-philic plant)을 개발함으로써 식물정화법에 의한 대기오염물질의 제어가 시도되고 있다 [12]. 또한 Cd-binding protein (metallothionein)을 코딩하는 유전자를 식물에 발현함으로써 Cd 저항성이 증가되는 형질전환식물을 개발할 수도 있을 것으로 예상된다 [3].

6. 결론

식물정화법은 환경오염지역에 적절한 식물을 식재한 후 그 식물로 하여금 오염물질을 추출, 여과, 안정화 등의 기작을 통하여 제거하는 방법이다. 우선 오염물질의 흡수는 식물의 뿌리 접촉면에서 일어나기 때문에 오염원의 깊이와 오염물질의 농도를 잘 고려해야 하며, 식물종과 식물의 성장속도 그리고 식물의 생체량 (biomass)등도 잘 검토하여야 한다. 또한 식물의 생장은 온도와 pH, 영양분, 수분 등에 의하여 크게 영향을 받기 때문에 식물정화기술을 적용할 때 이점에 유의해야 한다. 일반적으로 주위에 중금속 등 오염물질의 농도가 높으면 식물 성장이 저해되는데, 이러한 환경조건하에서 해당 오염물질을 과축적할 수 있는 유용한 식물종을 선택하고 그 오염물질에 내성을 갖는 식물을 육종할 필요가 있다. 최근에는 오염물질의 흡수, 이동, 분해 및 제거, 그리고 저항성 등에 관계가 있는 핵심 대사경로의 정보가 모아지고 있어서

형질전환 식물의 개발이 가속화 될 것으로 생각된다. 특히 microarray technology와 proteomics 관련 기술 등이 후보 유전자단백질의 탐색에 적극 활용될 것으로 생각된다 [42]. 뿐만 아니라 뿌리와 상호작용하는 근권미생물 (plant-promoting bacteria)이 식물의 성장을 도와 줄 수 있어서 이의 적절한 활용이 매우 중요하다 [28,29]. 한 가지 더 언급하고 싶은 것은 실제 식물정화기술은 기존의 물리·화학·생물학적 환경 오염 처리방법과는 달리 식물의 광합성에 의한 CO₂ 감소 효과도 가지고 있는 장점이 있다. 예를 들어 Cd, Pb, Zn 등으로 오염된 토양에 willow (*Salix* spp.)와 rapeseed (*Brassica napus*)를 심어서 중금속을 제거하고, 부산물로 생산되는 바이오매스를 바이오에너지 생산에 재활용하려는 연구가 진행되고 있다 [60,61]. 해바라기 씨와 채종류 씨 등은 바이오디젤의 제조에, 그리고 나머지 목질계 바이오매스는 바이오에탄올 제조에도 활용될 수 있을 것이다.

식물정화기술은 현재 초기 단계에 있지만 앞으로 토양오염, 지하수를 포함한 수질오염, 방사성물질 오염 등 여러 형태의 환경오염문제를 해결해 줄 수 있는 환경 친화적 대안기술로 떠오르고 있다. 식물정화기술은 분명히 새롭게 떠오르는 분야이고 많은 가능성을 가지고 있다. Table 4에서도 알 수 있듯이 특히 미국에서 이 분야의 사업이 확대되고 있으며, 그동안 염소화합물류, 탄화수소류, 중금속류, 방사성물질의 정화 등 수 많은 프로젝트가 성공적으로 진행되었다 [62]. 식물정화기술 분야는 식물생물학, 토양화학, 유전공학, 미생물학, 환경공학 등 다학제간의 협력이 필요한 분야로서 앞으로 더 많은 연구와 노력을 통하여 현재 인류가 직면하고 있는 환경문제를 개선하는데 큰 도움을 주게 될 것으로 기대된다.

감사

이 논문은 한국기술교육대학교 교육연구진흥지원 프로그램의 일부 지원에 의해 수행되었음.

References

- Pulford, I. D. and C. Watson (2003) Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees-a review. *Environment Int.* 29: 529-540.
- Garbisu, C. and I. Alkorta (2001) Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresour. Technol.* 77: 229-236.
- Salt, D. E., M. B. Blaylock, N. P. Kumar, V. Dushenkov, B. D. Ensley, I. Chet, and I. Raskin (1995) Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology* 13: 468-474.
- Dobson, A. P., A. D. Bradshaw, and A. J. M. Baker (1997) Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science* 277: 515-522.
- Cunningham, S. D., W. R. Berti, and J. W. Huang (1995) Phytoremediation of contaminated soils. *Trends Biotechnol.* 13: 393-397.
- Meagher, R. B. (2000) Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 3: 153-162.
- Scragg, A. (2006) *Environmental Biotechnology*. 2nd ed., pp. 204-216. Oxford University press, Oxford, UK.
- Kärenlampi, S., H. Schat, J. Vangronsveld, J. A. C. Verkleij, D. van der Lelie, M. Mergeay, and A. I. Tervahauta (2000) Genetic engineering in the improvement of plants for phytoremediation of metal polluted soils. *Environ. Pollut.* 107: 225-231.
- Eapen, S. and S. F. D'Souza (2005) Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals. *Biotechnol. Advan.* 23: 97-114.
- Rugh, C. L., J. F. Senecoff, R. B. Meagher, and S. A. Merkle (1998) Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation. *Nat. Biotechnol.* 16: 925-928.
- Aken, B. V. (2008) Transgenic plants for phytoremediation: helping nature to clean up environmental pollution. *Trends Biotechnol.* 26: 225-227.
- Morikawa, H. and Ö. C. Erkin (2003) Basic processes in phytoremediation and some applications to air pollution control. *Chemosphere* 52: 1553-1558.
- Boyajian, G. E. and L. H. Carreira (1997) Phytoremediation: a clean transition from laboratory to marketplace? *Nat. Biotechnol.* 15: 127-128.
- Dowling, D. N. and S. L. Doty (2009) Improving phytoremediation through biotechnology. *Curr. Opin. Biotechnol.* 20: 204-206.
- Biddlestone, A. J., K. R. Gray, and G. D. Job (1991) Treatment of dairy farm wastewaters in engineered reed bed systems. *Process Biochem.* 26: 265-268.
- Vymazal, J. (2002) The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecol. Eng.* 18: 633-646.
- Chaney, R. L., M. Malik, Y. M. Li, S. L. Brown, E. P. Brewer, J. S. Angle, and A. J. Baker (1997) Phytoremediation of soil metals. *Curr. Opin. Biotechnol.* 8: 279-284.
- Krämer, U. (2005) Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils. *Curr. Opin. Biotechnol.* 16: 133-141.
- McGrath, S. P. and F. J. Zhao (2003) Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Curr. Opin. Biotechnol.* 14: 277-282.
- Kamal, M., A. E. Ghaly, N. Mahmoud, and R. Côté (2004) Phytoaccumulation of heavy metals by aquatic plants. *Environmental Int.* 29: 1029-1039.
- Ye, W. L., M. A. Khan, S. P. McGrath, and F. J. Zhao (2011) Phytoremediation of arsenic contaminated paddy soils with *Pteris vittata* markedly reduces arsenic uptake by rice. *Environ. Pollut.* 159: 3739-3743.
- Lin, Q. and I. A. Mendelsohn (1998) The combined effects of phytoremediation and biostimulation in enhancing habitat restoration and oil degradation of petroleum contaminated wetlands. *Ecol. Eng.* 10: 263-274.
- Teamkao, P. and P. Thiravetyan (2010) Phytoremediation of ethylene glycol and its derivatives by the burhead plant (*Echinodorus cordifolius* L.): effect of molecular size. *Chemosphere* 81: 1069-1074.
- Chekol, T., L. R. Vough, and R. L. Chaney (2004) Phytoremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soil: the rhizosphere effect. *Environment Int.* 30: 799-804.
- Adler, T. (1996) Botanical cleanup crews: using plants to tackle polluted water and soil (phytoremediation). *Sci. News* 150: 42-43.
- Eapen, S., S. Singh, V. Thorat, C. P. Kaushik, K. Raj, and S. F. D'Souza (2006) Phytoremediation of radiocesium (¹³⁷Sr) and radiocesium (¹³⁷Cs) using giant milky weed (*Calotropis*

- gigantea* R.Br.) plants. *Chemosphere* 65: 2071-2073.
27. Shan, X., H. Wang, S. Zhang, H. Zhou, Y. Zheng, H. Yu, and B. Wen (2003) Accumulation and uptake of light rare earth elements in a hyperaccumulator *Dicropiteris dichotoma*. *Plant Sci.* 165: 1343-1353.
 28. Glick, B. R. (2003) Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnol. Advan.* 21: 383-393.
 29. Sheng, X., L. Sun, Z. Huang, L. He, W. Zhang, and Z. Chen (2012) Promotion of growth and Cu accumulation of bio-energy crop (*Zea mays*) by bacteria: implications for energy plant biomass production and phytoremediation. *J. Environ. Manage.* 103: 58-64.
 30. Axtell, N. R., S. P. K. Sternberg, and K. Claussen (2003) Lead and nickel removal using *Microspora* and *Lemna minor*. *Bioresour. Technol.* 89: 41-48.
 31. Weis, J. and P. Weis (2004) Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration. *Environment Int.* 30: 686-700.
 32. Carrier, M., A. Loppinet-Serani, C. Absalon, F. Marias, C. Aymonie, and M. Mench (2011) Conversion of fern (*Pteris vittata* L.) biomass from a phytoremediation trial in sub- and supercritical water conditions. *Biomass Bioenergy* 35: 872-883.
 33. Kyambadde, J., F. Kansimime, L. Gumaelius, and G. Dalhammar (2004) A comparative study of *Cyperus papyrus* and *Miscanthidium violaceum*-based constructed wetlands for wastewater treatment in a tropical climate. *Water Res.* 38: 475-485.
 34. Ansola, G., J. M. González, R. Cortijo, and E. de Luis (2003) Experimental and full-scale pilot constructed wetlands for municipal wastewaters treatment. *Ecol. Eng.* 21: 43-52.
 35. Bodini, S. F., A. R. Cicalini, and F. Santori (2011) Rhizosphere dynamics during phytoremediation of olive mill wastewater. *Bioresour. Technol.* 102: 4383-4389.
 36. Arienzo, M., P. Adamo, and V. Cozzolino (2004) The potential of *Lolium perenne* for revegetation of contaminated soil from a metallurgical site. *Sci. Total Environ.* 319: 13-25.
 37. Römken, P., L. Bouwman, J. Japenga, and C. Draaisma (2002) Potentials and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soils. *Environ Pollut.* 116: 109-121.
 38. Natarajan, S., R. H. Stamps, L. Q. Ma, U. K. Saha, D. Hernandez, Y. Cai, and E. J. Zillioux (2011) Phytoremediation of arsenic-contaminated groundwater using arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.: effects of frond harvesting regimes and arsenic levels in refill water. *J. Hazard. Mater.* 185: 983-989.
 39. Rugh, C. (2004) Genetically engineered phytoremediation: one man's trash is another man's transgene. *Trends Biotechnol.* 22: 496-498.
 40. Palmroth, M. R. T., J. Pichtel, and J. A. Puhakka (2002) Phytoremediation of subarctic soil contaminated with diesel fuel. *Bioresour. Technol.* 84: 221-228.
 41. Afzal, M., S. Yousaf, T. G. Reichenauer, M. Kuffner, and A. Sessitsch (2011) Soil type affects plant colonization, activity and catabolic gene expression of inoculated bacterial strains during phytoremediation of diesel. *J. Hazard. Mater.* 186: 1568-1575.
 42. Peng, R. H., R. R. Xu, X. Y. Fu, A. S. Xiong, W. Zhao, Y. S. Tian, B. Zhu, X. F. Jin, C. Chen, H. J. Han, and Q. H. Yao (2011) Microarray analysis of the phytoremediation and phytosensing of occupational toxicant naphthalene. *J. Hazard. Mater.* 189: 19-26.
 43. Sung, K., C. L. Munster, R. Rhykerd, M. C. Drew, and M. Y. Corapcioglu (2003) The use of vegetation to remediate soil freshly contaminated by recalcitrant contaminants. *Water Res.* 37: 2408-2418.
 44. Rylott, E. L. and N. C. Bruce (2009) Plants disarm soil: engineering plants for phytoremediation of explosives. *Trends Biotechnol.* 29: 73-81.
 45. Olette, R., M. Couderchet, S. Biagianti, and P. Eullaffroy (2008) Toxicity and removal of pesticides by selected aquatic plants. *Chemosphere* 70: 1414-1421.
 46. Mitton, F. M., M. Gonzalez, A. Peña, and K. S. B. Miglioranza (2012) Effects of amendments on soil availability and phytoremediation potential of aged *p,p'*-DDT, *p,p'*-DDE and *p,p'*-DDD residues by willow plants (*Salix* sp.). *J. Hazard. Mater.* 203-204: 62-68.
 47. Shen, C., X. Tang, S. A. Cheema, C. Zhang, M. I. Khan, F. Liang, X. Chen, Y. Zhu, Q. Lin, and Y. Chen (2009) Enhanced phytoremediation potential of polychlorinated biphenyl contaminated soil from e-waste recycling area in the presence of randomly methylated- β -cyclodextrins. *J. Hazard. Mater.* 172: 1671-1676.
 48. Didier, P., L. G. Philippe, H. Sonia, B. Amar, M. C. Claudia, D. M. and Falla Jairo (2012) Prospects of *Miscanthus x giganteus* for PAH phytoremediation: a microcosm study. *Ind. Crop. Prod.* 36: 276-281.
 49. Wang, M. C., Y. T. Chen, S. H. Chen, S. W. Chang Chien, and S. V. Sunkara (2012) Phytoremediation of pyrene contaminated soils amended with compost and planted with ryegrass and alfalfa. *Chemosphere* 87: 217-225.
 50. Abhilash, P. C., S. Jamil, and N. Singh (2009) Transgenic plants for enhanced biodegradation and phytoremediation of organic xenobiotics. *Biotechnol. Advan.* 27: 474-488.
 51. Willey, N. (2010) Soils contaminated with radionuclides. pp. 305-317. In: N. Willey (ed.). *Phytoremediation Methods and Reviews*, Humana Press, Totowa, NJ. USA.
 52. Černe, M., B. Smodiš, and M. Štok (2011) Uptake of radionuclides by a common reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) grown in the vicinity of the former uranium mine at Zirovski Vrh. *Nucl. Eng. Des.* 241: 1282-1286.
 53. Saleh H. M. (2012) Water hyacinth for phytoremediation of radioactive waste simulate contaminated with cesium and cobalt radionuclides. *Nucl. Eng. Des.* 242: 425-432.
 54. Misra, S. and L. Gedamu (1989) Heavy metal tolerant transgenic *Brassica napus* L. and *Nicotiana tabacum* L. plants. *Theor. Appl. Genet.* 78: 161-168.
 55. Rugh, C. L., H. D. Wilde, N. M. Stack, D. M. Thompson, A. O. Summers, and R. B. Meagher (1996) Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial *mer A* gene. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 93: 3182-3187.
 56. Bizily, S. P., C. L. Rugh, and R. B. Meagher (2000) Phytodetoxification of hazardous organomercurials by genetically engineered plants. *Nat. Biotechnol.* 18: 213-217.
 57. French, C. E., S. J. Rosser, G. J. Davies, S. Nicklin, and N. C. Bruce (1999) Biodegradation of explosives by transgenic plants expressing pentaerythritol tetranitrate reductase. *Nat. Biotechnol.* 17: 491-494.
 58. Gisbert, C., R. Ros, A. D. Haro, D. J. Walker, M. P. Bernal, R. Serrano, and J. Navarro-Aviñó (2003) A plant genetically modified that accumulates Pb is especially promising for phytoremediation. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 303: 440-445.
 59. Aken, B. V. (2009) Transgenic plants for enhanced phytoremediation

- of toxic explosives. *Curr. Opin. Biotechnol.* 20: 231-236.
60. Witters, N., R. Mendelsohn, S. V. Slycken, N. Weyens, E. Schreurs, E. Meers, F. Tack, R. Carleer, and J. Vangronsveld (2012) Phytoremediation, a sustainable remediation technology? Conclusions from a case study. I: energy production and carbon dioxide abatement. *Biomass Bioenergy* 39: 470-477.
61. Witters, N., R. Mendelsohn, S. V. Passel, S. V. Slycken, N. Weyens, E. Schreurs, E. Meers, F. Tack, B. Vanheusden, and J. Vangronsveld (2012) Phytoremediation, a sustainable remediation technology? II: economic assessment of CO₂ abatement through the use of phytoremediation crops for renewable energy production. *Biomass Bioenergy* 39: 470-477.
62. Vallero, D. A. (2010) *Environmental Biotechnology: A Biosystems approach*, pp. 360-362. Elsevier, London, UK.