

오염 토양의 식물상 복원효율에 미치는 식물, 근권세균 및 물리·화학적 인자의 영향

홍선화 · 조경숙*

이화여자대학교 환경공학과

Effects of Plants, Rhizobacteria and Physicochemical Factors on the Phytoremediation of Contaminated Soil. Hong, Sunhwa and Kyung-Suk Cho*. Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea – Phytoremediation is an economic and environmentally friendly technique to remediate contaminated-soil. In this study, the effects of plants, rhizobacteria and physicochemical factors on phytoremediation have been reviewed. For successful phytoremediation, the selection of plants is primarily important. To remediate soil contaminated with petroleum hydrocarbon, raygrass (*Lolium multiflorum lam*), white mustard, vetch (*Vicia villosa*), tall fescue (*Festuca arundinacea*), legumes, poplar, and Pine (*Pinus densiflora*) were mainly applied, and the removal efficiency of petroleum hydrocarbon were ranged 68 to 99%. Corn (*Zea mays*), raygrass (*Lolium multiflorum lam*), vetch (*Vicia villosa*), mustard, clover (*Trifolium repens*), and tall fescue (*Festuca arundinacea*) were used for the removal of polycyclic aromatic hydrocarbon, and their removal efficiencies were 50-98%. Rhizobacteria play significant roles for phytoremediation because they can directly participate in the degradation of contaminant as well as promoting plants growth. The following rhizobacteria were preferred for phytoremediation: *Azospirillum lipoferum*, *Enterobacter cloacae*, *Azospirillum brasilense*, *Pseudomonas putida*, *Burkholderia xenovorans*, *Comamonas testosteroni*, *Pseudomonas gladioli*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus megaterium*, and *Bacillus subtilis*. Physicochemical factors such as pH, temperature, nutrient, electron acceptor, water content, organic content, type of contaminants are consequential limiting factors for phytoremediation.

Key words: Phytoremediation, soil contamination, plant, rhizobacterium, limiting factors

서 론

산업화에 따른 각종 합성 물질들이 개발되어 대량으로 사용됨에 따라 생산과 운반, 저장 등의 과정에서 토양으로 유입 되어 심각한 환경오염을 유발시키게 된다. 오염 물질에 토양이 노출이 되면, 미생물을 비롯한 생물의 활성이 저해하고 오염 물질들이 축적됨에 따라 토양 스스로의 자정능력을 상실시키게 된다.

오염된 토양을 복원하는 방법은 크게 물리·화학적 처리 기술과 생물학적 처리기술로 구분할 수 있다. 물리·화학적 처리 기술에는 토양 증기 추출법, 토양 세척법, 열적 처리 기술, 고형화 안정화법, 소각, 열분해, 휘발, 열탈착법이 있으며, 생물학적 처리 기술에는 landfarming, biofile, bioreactor, phytoremediation 등이 있다[27]. 다양한 토양 복원기술 중 물리·화학적 처리 기술은 운전비용이 많은 소모되고, 2차 오염 야기의 문제가 있어 자연친화적인 방법인 생물학적 처리

기술이 선호되고 있다. 생물학적 방법 중에서도 식물과 토양 미생물의 상호 작용으로 오염물질을 제거하는 식물상 복원이 주목 받고 있다.

식물상 복원이란 오염된 토양이나 지하수, 퇴적물 등을 식물과 뿌리 근권 미생물의 상호 기작을 이용하여 정화하는 복원 기술로, 특히 낮은 농도로 넓은 범위에 걸쳐 오염된 경우에 효과적이다[48]. 흡수된 오염물질은 식물 혹은 체내에 있는 미생물에 분해되어 처리되기도 하지만, 식물 체내에 흡수되어 농축된 경우에는 식물을 수거하여 오염물질을 제거하기도 한다[48]. 식물상 복원에서는 식물 근권에 서식하는 근권세균이 매우 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 근권세균은 식물에게 해로운 작용을 하는 유해 근권세균(deleterious rhizobacteria; DRB)과 식물에 이로운 영향을 미치는 식물 성장 촉진 근권세균(plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)으로 나누어진다[41]. PGPR은 Kloepper과 Schroth에 의해 처음으로 정의되었으며, 이는 토양에 있는 세균이 식물 근권에 서식하면서 식물의 성장을 촉진 시키는 세균을 의미한다[23]. 이들은 식물 뿌리에 흡착하거나, 뿌리에 군락을 형성하고 뿌리 삼출물을 이용하여 성장하게 된다. 근권세균은 항생물질을 생산하여 식물병원균

*Corresponding author

Tel: 82-2-3277-2393, Fax: 82-2-3277-3275

E-mail: kscho@ewha.ac.kr

으로부터 식물을 보호하거나, 대기 중의 질소가스를 고정하여 식물에게 질소원을 공급하거나, 식물의 성장을 조절하는 효소를 생산하거나, 여러 대사를 통하여 토양 내의 인과 같은 미네랄을 가용화 시켜 식물이 흡수하기 쉽게 도와주는 등의 영향을 미친다[19, 23, 26, 31].

오염 물질을 제거하는데 이용되는 식물상 복원 방법은 오염물질이 제거되는 기작에 따라 phytotransformation, rhizosphere remediation, phytostabilization, phytoextraction 및 rhizofiltration의 5가지로 구별할 수 있다(Table 1). Phytotransformation은 주로 제초제(예, atrazine, alachlor), 방향족화합물(예, benzene, toluene, ethylbenzene, xylene), 염소계화합물(예, trichloroethylene, TCE), 폭발성 화합물(예, 2,4,6-trinitro-toluene, TNT; Hexahydro-1,3,5-trinitro- 1,3,5-triazine, RDX)을 제거하는데 이용되며, 식물체 내에서 오염 물질을 분해하는 방법이다[48]. Rhizosphere remediation은 polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)와 같은 유기화합물을 분해하는데 이용되는데, 식물 근권을 이용하여 오염물질을 분해하는 방법이다[47, 48]. Phytostabilization은 식물을 이용하여 오염물질을 안정화 시키는 방법으로 중금속 제거에 많이 이용된다[18, 48]. Phytoextraction은 토양 내의 오염물질을 식물체 내에 축적하는 방법으로 중금속 제거에 많이 사용되고[18, 48], Rhizofiltration은 식물체 뿌리에 오염 물질을 축적하여 제거하는 방법으로 중금속 및 방사선 동위원소 등을 제거할 때 많이 이용된다[18, 48]. 이러한 식물상 복원은 생태계의 균형 파괴와 2차 오염이 거의 없는 환경

친화적이라는 장점 이외에도 오염물질을 처리해야 하는 별도의 공간이 필요하지 않고, 환경오염이 최소화되며 식물이 가진 능력을 이용하기 때문에 처리비용이 저렴하다는 등의 장점을 가지고 있다[34].

오염 토양의 성공적인 복원을 하기 위해서는 오염 물질처리에 이용할 수 있는 최적의 식물, 오염물질 분해 세균의 식물성장 촉진 능력 및 토양에의 정착능력, 씨앗의 발아 조건 등을 포함하여 식물 성장에 영향을 미치는 직·간접적인 조건들이 조화를 이루어야 한다. 이에 본 논문에서는 오염된 토양을 식물상 복원을 이용하여 정화하는데 있어서 주요한 제한 요소인 식물, 미생물 및 물리·화학적 인자의 영향에 대해 고찰하고자 한다.

본 론

식물

식물상 복원에 있어 그 성공여부를 좌우하는 것은 식물 종의 선택이다[48]. 식물은 토양에 자리를 잡아 기상부에서는 대기 오염물질을 감소 시켜주고, 뿌리가 자리잡고 있는 지하부에서는 오염물질의 식물로의 축적을 도와주며, 오염 물질을 제거하는 근권세균의 성장을 도와주는 역할을 한다. 오염물질의 종류와 그 지역의 기후 등에 의해 식물 성장에 크게 영향을 받게 된다[48]. 따라서 오염물질의 종류에 따라 식물의 발아를, 성장률은 모두 다르며 식물의 종에 따라 오염물질의 제거 효율도 다르므로 식물의 선택은 매우 중요한

Table 1. Processes and mechanisms of phytoremediation [18, 48].

Method	Mechanism	Medium	Pollutant	Plant
Phytotransformation	Degradation by plant	Soil,	• Herbicides (atrazine, alachlor)	• Phreatophyte trees (poplar, willow, cottonwood, aspen)
		Groundwater, Landfill, Wastewater	• Aromatics (benzene, toluene, ethylbenzene, xylene) • Chlorinated aliphatics (trichloroethylene) • Nutrients • Ammunition wastes (2,4,6-trinitro-toluene, hexahydro-1,3,5-trinitro- 1,3,5triazine)	
Rhizosphere bioremediation	Degradation in rhizosphere	Soil, Sediments, Wastewater	• Pesticides • Aromatics (polynuclear aromatic hydrocarbons)	• Phenolics releasers (mulberry, apple, osage orange) • Grasses (rye, fescue, bermuda) • Phreatophyte tree
Phytostabilization	Complexation	Soil, Sediments	• Metals • Hydrophobic organics	• Phreatophyte trees • Grasses
Phytoextraction	Hyper-accumulation	Soil, Brownfields, Sediments	• Metals (Pb, Cd, Zn, Ni, Cu)	• Sunflowers • Indian mustard • Rape seed plants • Barley, hops • Crucifers • Nettles, dandelions
Rhizofiltration	Rhizosphere accumulation	Wetlands, Sediments	• Metals (Pb, Cd, Zn, Ni, Cu) • Radionuclides (¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, U) • Hydrophobic organics	• Aquatic Plants • Emergents • Submergents (algae, stonewort, parrot feather, eurasian water milfoil, hydrilla)

문제이다. 식물상 복원을 할 때에는 다음과 같은 (1) 오염물질에 대한 내성, (2) 많은 양의 오염 물질의 축적능, (3) 빠른 성장 속도, (4) 복원 현장에서의 적응력과 성장 가능성, (5) 근권미생물의 다양성 등을 고려하여 식물을 선택하여야 한다[46]. 생장이 빠르고 오염물질에 대해 저항성이 높은 식물이 식물상 복원에 많이 사용된다[36]. 예를 들면 포플러는 오염물질에 대한 강한 내성이 있어 빠른 성장을 하기 때문에 다양한 오염물질 지역의 식물상 복원에 사용되고 있다[7].

Table 2에서는 오염물질 종류별로 많이 이용되는 식물 종류와 제거 효율을 나타내었다. Phosphorodithioic acid, S-(3,4-dihydro-4-oxobenzow[1,2,3]-dx-triazin-3-ylmethyl)O, O-dimethyl phosphorodithioate 등과 같은 azinphos methyl은 살충제의 일종으로 농작물과 식물에 잔류하고 있고, 그와 함께 토양오염을 일으키는 주요 오염물질이다[16]. Flocco *et al.*(2004)는 자주개자리(*Medicago sativa lam*)를 이용하여 azinphos methyl로 오염된 토양을 처리하였는데[16], 식물 배양 20일 후 식물이 없는 토양에서는 azinphos methyl이 약 20%정도 자연저감 되었으나, 식물을 식재한 토양에서는

azinphos methyl가 검출되지 않았다.

석유계 탄화수소화합물(petroleum hydrocarbons)로 오염된 토양 처리를 위해서도 식물상 복원방법이 많이 이용되고 있다. Liste와 Felgentreu(2006)는 쥐보리(*Lolium multiflorum lam*), vetch(*Vicia villosa*), 버섯류(white mustard)를 이용하여 장기간 석유계 탄화수소화합물로 오염된 토양의 식물상 복원을 하였는데, 그 제거 효율은 95일 동안 약 68-73%이었다. 버섯류는 이들 식물 중 가장 제거 효율이 좋았으며, 식물체의 성장은 vetch 가 가장 우수하였고, 뿌리 부분에서의 오염물질의 제거 효율은 쥐보리가 가장 높았다[33]. 그 이외에도 Huang 등(2005)은 4개월 동안 툴페스큐(*Festuca arundinacea*) 단독으로만 사용하였을 경우 디젤이 50% 정도 저감이 되었는데, PGPR을 함께 이용하여 식물상 복원을 할 경우 그 효율이 90%까지 향상 되었다[21]. Palmroth 등(2002)은 콩과식물(leguminosae), 포플러, 소나무(*Pinus densiflora*) 3가지 식물을 가지고 식물상 복원을 수행하였다[44]. 그 결과 콩과식물을 식재한 경우 유류 제거 효율은 96-99%, 포플러 97%, 소나무는 88%로 콩과식물이 유류오염 물

Table 2. Serviceable plants and their efficiency for the removal of various contaminats.

Contaminant	Plant	Removal efficiency	References
Azinphos methyl	Alfalfa (<i>Medicago sativa lam</i>)	> 100% removal after 20 d	[16]
	Grass (<i>Lolium multiflorum lam</i>)	> 98% removal after 180 d	[44]
	Herbal plant	85 - 92% removal after 2 m	[51]
	Legume (<i>leguminosae</i>)	67 - 74% removal after 60 d	[44]
	Poplar	95 - 100% removal after 2 m	[51]
Diesel	Poplar	> 97% removal after 330 d	[44]
	Pine (<i>Pinus densiflora</i>)	> 88% removal after 330 d	[44]
	Ryegrass (<i>Lolium multiflorum</i>)	> 96% removal after 63 d	[15]
	Grass(<i>Lolium multiflorum lam</i> , Legume	68-73% removal after 95 d	[33]
	Cypus laxus lam	> 90% removal after 180 d	[13]
	Tall fescue (<i>Festuca arundinacea</i>)	> 90% removal after 120 d	[21]
Polyaromatic hydrocarbons (PAH)	Maize (<i>Zea mays</i>)	> 92% removal after 60 d	[55]
	Grass(<i>Lolium multiflorum lam</i>), Legume, crucifer	> 59% removal after 95 d	[33]
	Ryegrass (<i>Lolium multiflorum</i>)	> 98% removal after 60 d	[55]
	Alfalfa (<i>Medicago sativa lam</i>)	12 - 87% removal after 15 w	[24]
	Clover (<i>Trifolium repens</i>)	> 63% removal after 12 m	[57]
	Tall fescue (<i>Festuca arundinacea</i>)	> 50% removal after 12 m	[57]
Heavy metal	Maize, Poplar	> 60% removal after 30 d	[30]
	Piptatherum miliaceum (<i>Piptatherum miliaceum</i>)	43-84% removal after 6 w	[17]
	Piptatherum miliaceum (<i>Piptatherum miliaceum</i>)	81-92% removal after 6 w	[17]
Polychlorinated biphenyl (PCB)	Alfalfa (<i>Medicago sativa lam.</i>), flatpea (<i>Lathyrus sylvestris lam</i>), sericea lespedeza (<i>Lespedeza bicolor</i>), deertongue (<i>Carphephorus odoratissimus</i>), reed canarygrass (<i>Phragmites communis</i>), switchgrass (<i>Panicum virgatum lam.</i>), tall fescue (<i>Festuca arundinacea</i>)	> 82% removal after 4 m	[8]
Radiostrontium(¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr)	milky weed (<i>Luffa cylindrical</i>)	44% - 99% removal after 15 d	[12]
2,4,6-trinitro-toluene (TNT), Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5triazine(RDX)	Bullrush (<i>Typha orientalis</i>), Elodeia (<i>Egeria Densa</i>), Canary grass (<i>Phoenix canariensis</i>)	> 90% removal	[48]

질의 제거효율이 가장 높았다. 이 밖의 식물에는 벼과식물(*gramineae*)은 98%[44], 허브는 85-92%[51], 쥐보리는 96% 이상[15], 포플러는 95-100%[51], 사이프러스(*Cyprus laxus lam*)은 90% 이상[13]의 유류 제거 효율을 나타내었다. 또한, 디젤로 오염된 토양에서 벼과식물보다는 콩과식물이 식물체의 발아율이 높았고, 벼과식물과 콩과 식물 중에서는 쥐보리, 붉은 토끼풀(*Trifolium pretense*), 자주개자리 등의 식물이 발아율이 높았다[1].

난분해성 석유계 탄화수소 물질인 PAH로 오염된 토양을 식물상 복원을 이용하여 정확히는 연구가 많이 진행되었다. Joner 등(2004)는 콩과식물(*Medicago sativa lam*)를 이용하여 PAH로 오염된 토양의 식물상 복원을 연구하였다[24]. 이때 각각 다른 3, 4, 5, 6개의 aromatic ring을 가진 PAH를 이용하였는데, 5주 동안 aromatic ring이 적을수록 토양내의 PAH 잔류 농도가 낮았으며(3-ring, 28-55%; 4-ring, 12-15%), 15주가 지난 후에는 71-99%의 제거 효율을 나타내었다. 그 이외에도 PAH는 다양한 식물을 이용하여 식물상 복원을 수행하였을 때 높은 제거효율을 보였는데, 옥수수(*Zea mays*)는 98%[55], 쥐보리, vetch, 버섯류는 95일 동안에 59%[33], 라이글라스(*Lolium multiflorum*)는 88%[55], 토끼풀은 63%[57], 그리고 툴페스큐는 50%[57]의 제거 효율을 보였다. 토끼풀보다는 쥐보리가 오염물질의 제거 능력과 성장률 모두에서 월등히 높았다[55]. 이 밖에도 탄화수소계 오염물질을 제거하는 데에는 쇠풀(*Andropogon brevifolius*), 수수(*Sorghum bicolor*), 버드나무(*Salix koreensis*), 귀리(*Avena sativa*) 등의 식물이 유류오염물질에 내성을 가지고 있는 것으로 보고 되었다[27].

유류와 함께 대표적인 토양 오염물질인 중금속으로 오염된 토양 정화를 위해 식물상 복원이 많이 이용되고 있다. Komarek 등(2007)은 옥수수와 포플러를 이용하여 납으로 오염된 농경지의 식물상 복원에 관한 연구를 수행하였다[30]. 이때 킬레이트제로 ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA)와 ethylene diamine disuccinic acid(EDDS)를 이용하여 수행되었는데 EDDS 보다는 EDTA가 납을 제거하는데 있어서는 좀 더 효과적 이었다. 또한, 포플러보다는 옥수수가 납의 제거 효율은 더욱 좋았다(60% 이상 제거). Garcia 등(2004)은 스피로글라스(*Piptatherum miliaceum*)를 이용하여 납과 아연으로 오염된 토양 식물상 복원을 연구하였는데, 아연보다는 납이 좀 더 많은 양이 제거 되었으며, 제거 효율은 아연의 경우는 43-84%, 납의 경우는 81-92% 이었다[17]. 이러한 결과는 중금속이 식물로 축적 되는 양이 아연보다는 납이 더 높았기 때문이다. 그 이외에 중금속 오염에 많이 사용되는 식물인 옥수수는 빠른 성장과 높은 생체량을 만들기 때문에 많이 사용되고 있다. Koo와 Cho(2006)에 의하면 400여종의 식물이 중금속을 축적하는 것으로 알려져 있는데, 알려져 있는 주요 식물의 과로는, 국화과(Asteraceae), 십자화과(Brassicaceae), 석죽과(Caryophyllaceae), 사초과

(Cyperaceae), 콩과(Fabaceae), 이나무과(Flacourtiaceae), 풀과(Lamiaceae), 벼과(Poaceae), 제비꽃과(Violaceae) 등이 있다[31].

Polychlorinated biphenyl(PCBs)는 독성 유기 화합물질로 두 개의 벤젠고리가 연결된 비페닐의 10개 수소원자 중 2~10개가 염소 원자로 치환된 화합물질이다[54]. Chekol 등(2004)은 자주개자리, 콩과(*Lathyrus sylvestris lam*), 싸리(*Lespedeza bicolor*), 디어팅(*Carphephorus odoratissimus*), 갈대(*Phragmites communis*), 스위치글라스(*Panicum virgatum lam*)와 툴페스큐를 이용하여 PCBs로 오염된 토양의 식물상 복원을 수행하였다[8]. PCB의 경우는 식물을 식재 하지 않은 토양에 비해 식물이 존재할 때 그 제거 효율이 82% 이었고, 식물이 존재할 때 토양 미생물의 활성도 증가 하였다. 그 밖에도 조롱박(*Luffa cylindrical*)의 경우는 PCBs를 잘 축적 하기 때문에 많이 사용된다[4].

그 이외에도 다양한 오염물질이 식물상 복원에 이용되었는데 Eapen 등(2006)은 유색을 띠는 담배(*Nicotiana tabacum*)를 이용하여 ^{137}Cs , ^{90}Sr 인 방사성 스트론튬의 식물상 복원을 하였는데[12], 15일이 지난 후에는 두 물질 모두 99% 이상의 제거율을 보였는데, 초기에는(24시간) ^{90}Sr 의 제거 효율이 더욱 좋아 98%이었으며(^{137}Cs 의 경우는 168시간 동안 44%), 식물은 지상부와 비교하였을 때 뿌리에 오염물질을 더욱 많이 축적하였다. 또한, Schnoor(1997)은 부들(*Typha orientalis*), 에로테이아(*Egeria Densa*), 카리리아글라스(*Phoenix canariensis*)를 이용하여 2,4,6-trinitro-toluene(TNT)와 Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine(RDX)를 90% 이상의 제거할 수 있었다[48].

미생물

식물상 복원은 식물의 능력을 이용하여 오염 물질을 제거하는 것 이외에도 식물의 성장을 돕고, 이와 함께 오염 물질을 제거하는 근권 미생물의 역할이 상당히 중요하다[19, 23]. 미생물중 근권 미생물은 유기오염 물질을 탄소원으로 이용할 뿐만 아니라 에너지를 얻기 위한 전자를 유기 오염 물질로부터 공급 받기도 한다[5]. 또한, 식물 뿌리로부터 영양물질이 분비되면 토양의 미생물 활성과 그들의 신진 대사가 활발해지면 이로 인해 식물은 토양 표면에서 오염물 제거 효율을 촉진 된다[11, 34, 48, 50]. 또한, 이러한 근권 세균은 토양으로부터 유기 오염물을 스스로가 얼마만큼 이용할 수 있는지와 연관이 있다[34]. 기본적으로 근권 미생물에 의한 오염 물질 분해 기작은 호기성/혐기성 호흡, 공대사 및 발효 등이 있다[27]. PAH, TPH, PCP, PCB, TCE, RDX와 같은 기본적인 유기화합물은 일반 토양 보다 근권 토양에서 좀 더 분해가 잘 이루어진다[45, 42].

그 이외에도 근권 미생물은 식물의 성장을 저해하는 식물 독성 오염물을 분해함으로써 식물의 성장을 돕고, 식물이 무독성 오염물을 잘 분해 할 수 있도록 도와주는 역할을 한다

[27]. 또한 근권 미생물은 항생물질을 생산 함으로써 토양 내 병원균에 의해 발생하는 여러 가지 식물 질병으로부터 식물을 보호하는 역할을 하기도 한다[27, 52].

Table 3에 근권 미생물이 식물생장에 미치는 영향을 조사한 기존 연구 결과를 정리하였다. 토마토(*Lycopersicon esculentum*)에 *Bacillus subtilis* BEB-13b를 접종하였을 때,

Table 3. Effects of rhizobacteria on plants growth in uncontaminated soil.

Plant	Rhizobacterium	Effect on plant growth	Reference
Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	<i>Bacillus subtilis</i> BEB-13bs	Increase of root dry weight and length (18-26%↑)	[37]
Lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	<i>Bacillus subtilis</i> DSM-8563	Plant growth (77%↑)	[29]
Apple (<i>Malus domestica</i>)	<i>Bacillus</i> sp. OSU-142	Promotion of plant growth (shoot length, 59.2%↑; fruit yield, 116.4%↑)	[3]
	<i>Burkholderia</i> sp.OSU-7	Promotion of plant growth (shoot length, 18.3%↑; fruit yield, 88.2%↑)	
	<i>Bacillus</i> sp.M-3	Promotion of plant growth (shoot length, 7.0%↑; fruit yield, 73.7%↑)	
	<i>Pseudomonas</i> sp.BA-8	Promotion of plant growth (shoot length, 14.3%↑; fruit yield, 137.5%↑)	
Raspberry (<i>Rubus idaeus</i>)	<i>Bacillus</i> sp.OSU-142	Promotion of plant growth (fruit yield, 33.9%↑; cane length, 13.6-15.0%↑)	[43]
	<i>Bacillus</i> sp.OSU-142 + <i>Bacillus</i> sp. M-3	Promotion of plant growth (fruit yield, 74.9%↑; cane length, 15.0%↑)	
Sweet cherry (<i>Prunus avium</i> L.)	<i>Bacillus</i> sp. OSU-142	Promotion of plant growth (fruit weight, 4.15%↑; shoot length, 11.3%↑)	[14]
	<i>Pseudomonas</i> BA-8	Promotion of plant growth (fruit weight, 5.37%↑; shoot length, 11.8%↑)	
	<i>Bacillus</i> sp.OSU-142 + <i>Bacillus</i> sp. M-3	Promotion of plant growth (fruit weight, 1.24%↑; shoot length, 29.6%↑)	
Soybean (<i>Glycine max</i>)	<i>Setaria faberi</i> G1-1	Promotion of root growth (48.6%↑)	[32]
	<i>Setaria faberi</i> TFR1	Promotion of root growth (60%↑)	
	<i>Setaria faberi</i> TFR4	Promotion of root growth (45.9%↑)	
	<i>Amaranthus</i> sp. TPR40	Promotion of root growth (50.6%↑)	
	<i>Xanthium strumarium</i> CCH27	Promotion of root growth (50%↑)	
Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	<i>Setaria faberi</i> G1-1	Promotion of root growth (30.8%↑)	[32]
	<i>Setaria faberi</i> TFR1	Promotion of root growth (60%↑)	
	<i>Setaria faberi</i> TFR4	Promotion of root growth (20%↑)	
	<i>Amaranthus</i> sp. TPR40	Promotion of root growth (50%↑)	
	<i>Xanthium strumarium</i> CCH27	Promotion of root growth (56%↑)	
Lespedeza (<i>Kummerowia triata</i>), water agrimony (<i>Bidens tripartita</i>), foxtail (<i>Setaria viridis</i>), sedge (<i>Carex leiorhyncha</i>), millet (<i>Panicum bisulcatum</i>), umbrella sedge (<i>Cyperus amuricus</i>), evening primrose (<i>Oenothera erythrosepala</i>), hedge parsley (<i>Caucalis scabra</i>)	<i>Pseudomonas</i> spp.	Promotion of plant growth	[2].
Pepper (<i>Piper nigrum</i>),	<i>Bacillus subtilis</i> GB03 + <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> in 937a	Promotion of plant growth (root mass, 26%↑; shoot mass, 47%↑)	[28]
Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	<i>Bacillus subtilis</i> GB03 + <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> in 937a	Promotion of plant growth (root mass, 59%↑; shoot mass, 63%↑)	
Pea (<i>Pisum sativum</i>)	<i>Pseudomonas putida</i> biotype A7	Increase of root length (43%↑)	[49]
Pea (<i>Pisum sativum</i>)	<i>Pseudomonas fluorescens</i> AM3	Increase of root length (37%↑)	

접종하지 않은 토양에 비해 식물의 길이와 무게가 약 18% 증가하였고[37], 상추(*Lactuca sativa*)에 *Bacillus subtilis* DSM-85633를 접종하였을 때 미생물 활성이 약 21% 증가하였고 식물의 성장은 77% 증가하였다[29]. Aslantas 등(2007), Orhan 등(2006), Esitken 등(2006)은 *Bacillus* OSU-142, *Burkholderia* OSU-7, *Bacillus* M-3, *Pseudomonas* BA-8, *Bacillus* OSU-142를 이용하여 사과(*Malus domestica*), 라즈베리(*Rubus idaeus*), 스위트체리(*Prunus avium lam*)의 식물 성장에 미치는 영향을 연구하였다[3, 43, 14]. 그 결과, 사과는 지상부의 길이가 미생물을 접종할 경우 7-16.3% 향상되었고, 라즈베리의 경우 수확량은 약 33.6-47.9%, 길이는 13.6-15.0%가 증가하였으며, 스위트체리는 수확물의 무게는 1.24-5.37%, 식물체의 길이는 11.3-29.6% 증가하였다. Li와 Kremer(2006)은 같은 근권 미생물을 이용하여 각각 다른 식물 종에서의 식물 성장 촉진 여부를 연구하였다[32]. *Setaria faberi* G1-1, *Setaria faberi* TFR1, *Setaria faberi* TFR4, *Amaranthus* sp. TPR40, *Xanthium strumarium* CCH27를 콩(*Glycine max*)에 접종할 경우, 뿌리 길이는 각각 48.6, 60.0, 45.9, 50.6, 50.0%, 지상부 길이의 경우는, 5.0, 13.6, 1.6, 9.1, 16.6%가 증가하였다. 밀(*Triticum aestivum*)의 경우, 뿌리 길이는 각각 30.8, 60.0, 20.0, 50.0, 56.0%, 지상부 길이는 각각 1.6, 14.6, 3.7, 28.6, 4.0%로 증가하여 지상부 보다는 뿌리가 상기 미생물 접종에 의해서 성장이 촉진됨을 확인하였다. 호수 주변의 불모지 토양에 *Pseudomonas* spp.와 호수 주변에 식생하는 식물인 짜리나무(*Kummerowia triata*), 짚신나물속 식물(*Bidens tripartita*), 뚝새풀(*Setaria viridis*), 사초(*Carex leiorhyncha*), 수수(*Panicum bisulcatum*), 우산사초(*Cyperus amuricus*), 달맞이꽃(*Oenothera erythrosepala*), 사상자(*Caucalis scabra*)를 함께 식재해 73일 동안 재배한 후 식물 성장을 비교한 결과, 미생물을 접종한 경우 식물 길이는 12.4~17.3 cm로 성장하지만, 미생물을 접종하지 않은 경우에는 8.5~11.4 cm이었다[2]. 한편, 미생물 접종은 식물 생체량에도 영향을 미치는데, 미생물이 존재할 때는 생체량이 가장 높은 것이 42.0 g, 미생물이 존재하지 않을 때는 35.1 g으로 미생물에 의해 식물성장이 증가하였다[2]. 후추(*Piper nigrum*)와 토마토에 *Bacillus subtilis* GB03과 *Bacillus amyloliquefaciens* 937a를 접종하여 8시간 또는 12시간 빛을 주어 4주 동안 식물을 재배한 후, 뿌리와 줄기의 생체량을 비교하였다[28]. 12시간 빛을 주는 조건하에서 재배한 경우, 미생물이 있을 때 후추와 토마토의 생체량은 각각 0.008, 0.017 g 이었다. 또한, 줄기 생체량은 미생물이 있을 때 후추와 토마토 각각 0.015, 0.059 g이었고, 미생물이 없을 때는 0.008, 0.022 g 이었다. 즉, 미생물 접종에 의해 뿌리와 줄기 생체량이 모두 증가함을 알 수 있었다. 그러나 8시간 빛을 준 조건에서는 미생물 접종에 의한 후추와 토마토의 줄기와 뿌리의 생체량 증가는 관찰 되지 않았다. 옥수수과 밀의 근권 토양에서 분리한 근권 세균인 *Pseudomonas*

putida biotype A7와 *Pseudomonas fluorescens* AM3를 완두콩(*Pisum sativum*)과 함께 재배하면서 식물성장에 악영향을 미치는 ethylene의 중간대사 산물인 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC)의 첨가 효과를 비교하였다[49]. 그 결과, ACC를 첨가하지 않은 경우, *Pseudomonas putida* biotype A7, *Pseudomonas fluorescens* AM3에서는 완두콩의 길이는 각각 11.6, 10.5 cm이었고 미생물을 접종하지 않은 조건에서의 완두콩 길이는 6.7 cm로 미생물 접종에 의해 완두콩의 성장이 향상되었다. 또한, ACC(10 mM)를 첨가한 경우, 미생물 접종시 완두콩 길이는 10.3, 1.9 cm이었으나, 무접종시 1.0 cm로 근권 세균 공존에 의해 ACC에 의한 식물 성장 억제 효과가 없어지거나 감소되는 것을 알 수 있었다.

오염물질을 식물을 이용하여 제거하는 식물상 복원 기술에 근권 세균을 첨가하였을 때 오염물질의 제거효율에 미치는 영향에 관한 기존 연구 결과를 Table 4에 요약 정리하였다. 방부제나 살충제로 많이 사용되는 비소로 오염된 토양(136~269 $\mu\text{g/g}$)에 근권 세균(*Pityrogramma calomelanos*)와 고사리(*Pteridium aquilinum*)를 이용한 6달 동안 식물상 복원을 적용한 결과, 근권 세균이 존재할 때는 식물의 생체량이 0.37 g로 미생물이 없을 때(0.2 g)보다 높았으며, 비소의 잔류농도도 미생물이 존재할 때는 294 $\mu\text{g/g}$, 근권 세균이 존재하지 않을 때는 263 $\mu\text{g/g}$ 으로, 근권 세균 존재에 의해 식물 성장을 향상됨과 동시에 오염물질의 제거효율도 향상되었다[22]. 원유로 오염된 토양의 경우, *Azospirillum lipoferum* strain 15와 밀을 함께 배양하였을 때, 14일 동안 원유가 56.5%가 제거되었으며, 밀 뿌리의 성장이 촉진하였다[38]. TPH와 PAH로 오염된 토양의 경우, 툴페스큐를 이용하여 오염토양을 복원할 때, *Enterobacter cloacae* CAL-2, *Azospirillum brasilense* Cd, *Pseudomonas putida* UW3의 접종에 의해 오염물질에 대한 툴페스큐의 내성이 강해지고 오염물질에 의한 스트레스 하에서도 툴페스큐의 성장이 촉진되었다[20, 21]. 또한, PCB 오염 토양에 애기장대(*Arabidopsis thaliana*)에 *Pseudomonas putida* Flav1-1와 *Pseudomonas putida* PML2를 함께 접종한 경우 28일 동안 PCB가 90% 이상 제거되었다[40]. 담배, 겨자무(*Armoracia rusticana*), 쥐털이슬(*Circaea alpina*), 알파파(*Medicago sativa*)에 *Burkholderia xenovorans* LB400 와 *Comamonas testosteroni* B356를 접종한 경우 2주 동안 2-chlorobenzoate는 90% 이상, 2,3-, 2,4-, 2,5-, 2,6-dichlorobenzoates는 20-40% 정도 제거되었다[35]. PCP 오염 토양에 식물 근권에 분리한 *Pseudomonas gladioli* M-2196만을 접종한 경우에는 PCP가 겨우 10% 제거되었지만, 중국골파(*Allium schoenoprasum*)를 동시에 식재하면 28일 동안 PCP를 40%까지 제거할 수 있었다[39].

중금속은 그 자체가 분해되는 것이 아니라 식물체에 축적에 의해 토양으로부터 제거하기 때문에 근권의 발달은 중금속 제거에 큰 영향을 미친다[31]. 즉, 식물상 복원에 의한 중

Table 4. Effects of rhizobacteria on plants growth and remediation efficiency in contaminated soil.

Contaminant	Plant	Rhizobacterium	Effect	Reference
Arsenic	Siverback fern (<i>Pteridium aquilinum</i>)	<i>Pityrogramma calomelanos</i>	Increase of biomass (37%↑); >11.5% of As removal after 6 m	[22]
Crude oil	Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	<i>Azospirillum lipoferum</i> strains 15	>56.5% of crude oil removal after 14 d	[38]
Total petroleum hydrocarbons (TPH)	Tall fescue (<i>Festuca arundinacea</i>)	<i>Enterobacter cloacae</i> CAL-2	Promotion of plant growth	[21]
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)	Tall fescue (<i>Festuca arundinacea</i>)	<i>Azospirillum brasilense</i> Cd	Increase of plant tolerance against PAH	[20]
		<i>Enterobacter cloacae</i> CAL 2		
		<i>Pseudomonas putida</i> UW3		
Polychlorinated biphenyls (PCB)	Arabidopsis (<i>Arabidopsis thaliana</i>)	<i>Pseudomonas putida</i> Flav1-1	> 90% of PCB removal after 28 d	[40]
		<i>Pseudomonas putida</i> PML2		
Pentachlorophenol (PCP)	Chinese chive (<i>Allium schoenoprasum</i>)	<i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 and <i>Comamonas testosteroni</i> B356	> 90% of PCB removal after 2 w	[35]
		<i>Pseudomonas gladioli</i> M-2196		
Heavy metals	Brassica juncea (<i>Brassica campestris subsp. napus var. nippo-oleifera</i>)	<i>Pseudomonas gladioli</i> M-2196	> 40% of PCP removal after 28 d	[39]
		<i>Azotobacter chroococcum</i> HKN-5		
		<i>Bacillus megaterium</i> HKP-1		
Heavy metals	Brassica juncea (<i>Brassica campestris subsp. napus var. nippo-oleifera</i>)	<i>Bacillus mucilaginosus</i> HKK-1	Increase of root length (28%↑) and shoot length (51%↑)	[56]
		<i>Bacillus subtilis</i> SJ-101		
		<i>Bacillus subtilis</i> SJ-101		

금속 제거에 있어 근권 미생물의 역할을 타 오염 물질에 비해 더욱 더 중요하다. 유채(*Brassica campestris subsp. napus var. nippo-oleifera*)를 이용한 식물상 복원에 있어 근권 미생물을 함께 접종하여 중금속 제거 효율을 증가시킨 연구사례가 있다. 예를 들면 남과 아연 제거에 *Azotobacter chroococcum* HKN-5가 활용되었는데, 이 세균은 식물의 성장을 촉진함과 동시에 중금속 독성으로부터 식물을 보호하였다[53]. 또한, *Bacillus megaterium* HKP-1, *Bacillus mucilaginosus* HKK-1, *Bacillus subtilis* SJ-101은 니켈로 오염된 토양에서 갖의 뿌리길이는 28%, 줄기는 51%가 세균을 접종하지 않은 조건보다 더 성장하였다[56]. 이 밖에도 중금속 제거에 있어 근권 미생물의 이용은 많은 연구가 보고되고 있다.

물리·화학적 인자

오염된 토양의 식물상 복원에 있어서 기후와 그 외의 환경조건은 복원의 성공 여부를 좌우한다. 특히 온도와 pH, 수분함량, 유기함량 등은 식물을 배양할 때에 중요한 요소로 작용하게 된다[5]. 예를 들어, 디젤을 정화하는 식물로 알려져 있는 포플러, 버드나무(*Spiraea*), 미루나무(*Populus deltoides*)와 같은 호수식물은 땅 속 깊은 곳까지 뿌리를 내리고 사는 식물이기 때문에 토양의 pH와 수분함량 등이 이 식물의 생장에 중요 요소로 작용하게 된다[48]. 또한, 영양

물질이 결핍, 전지수용체와 탄소와 같은 에너지원이 결핍된 환경에서는 식물 생장뿐 만 아니라 미생물 활성도 저해를 받기 때문에 이들 요소들의 조절은 식물상 복원의 성공 여부를 좌우한다[5].

Table 5에서는 식물상 복원에 있어 식물과 미생물을 제외한 다른 요소들과 그들의 역할을 나타내었다. pH는 오염된 토양의 식물상 복원에 있어 중요한 제한요소로 작용하게 되는데, Betancur-Galvis(2006)는 phenanthrene, anthracene, benzo(a)pyrene으로 오염된 토양의 정화에 있어 pH가 미치는 영향을 연구하였다[6]. 그 결과, 중성의 토양에서는 112일 동안 오염물질이 완전히 제거되는 반면, 염기성 토양에서는 112일 동안 탄소고리가 가장 적은 phenanthrene도 100% 제거하지 못하였다. 한편, pH가 산성일 경우 식물의 생장이 잘 이루어지지 못하기 때문에 산성의 pH는 식물상 복원에 있어 제한 요소로 작용한다[48].

온도는 식물상 복원에 있어 매우 중요한 조절 요소인데, 온도는 식물의 성장, 생물학적 이용가능성, 물질전달, 미생물 신진대사 효율에 영향을 미치게 된다. 그 이외에도 전자수용체와 영양물질은 생물학적 이용가능 정도와 미생물의 신진대사에 영향을 미치며, 영양물질 등은 미생물의 신진대사와 생물학적 이용 가능성 등에 영향을 미치기 때문에 식물상 복원에 있어 중요한 제한 요소로 작용한다.

토양이 어떤 물질로 오염되었는지에 따라 식물과 미생물

Table 5. Physicochemical factors influencing phytoremediation efficiency

Factor	Influence	Reference
pH	Plant growth, bioavailability, mass transfer, microbial metabolism rate	[6]
Temperature	Plant growth, bioavailability, mass transfer, microbial metabolism rate	[10]
Electron acceptor	Bioavailability, microbial metabolism rate	[5]
Nutrient	Microbial metabolism rate	[5]
Co-substrate	Microbial metabolism rate	[5]
Soil texture	Bioavailability, mass transfer	[23]
Contaminant	Plant growth, bioavailability, mass transfer, microbial metabolism rate	[23]

의 선택 및 무생물적 인자 조절 방법이 달라지기 때문에 토양의 오염원도 식물상 복원의 제한 요소로 작용된다[48]. 식물상 복원에 있어 많이 이용되고 있는 주 오염 물질은 중금속과 유류이다. 휘발성이 없는 중금속의 경우, 식물에 축적되면 식물을 제거하여 오염물질을 제거하기 때문에 특히 식물의 선택이 중요하며, 토양에서의 물의 이동성에 따라 중금속도 함께 이동하기 때문에 중금속으로 오염될 경우 식물상 복원조건이 더욱 까다로워진다[58]. TPHs, PAHs, PCBs와 같은 유기화합물질의 경우는 오랜 기간 인류에서 사용하였기 때문에 토양의 그 잔류량이 매우 높다[58]. 고농도의 유기화합물질로 오염되면, 식물의 발아율이 낮아지고[25] 그와 동시에 식물뿌리 성장이 저하되어 근권 미생물의 정착이 어려워지게 된다. 이러한 연쇄작용은 식물상 복원의 실패의 원인이 될 수 있다.

식물상 복원에 있어 식물의 선택, 미생물의 선택, 물리화학적 인자 이외에도 다양한 제한요소들로 인해 식물상 복원의 성공여부가 결정된다. 식물상 복원은 식물과 미생물을 함께 조절하여 오염물질을 제거하는 기술이기 때문에 식물재배 기술과 함께 미생물을 조절할 수 있는 전문적인 기술이 필요하며, 식물상 복원 시 식물의 성장 속도와 미생물의 성장을 고려하여 복원이 완료되는 시점을 예측해야 하기 때문에 전문적인 지식을 가진 인적자원도 필요로 한다[48]. 또한, 물리화학적 인자의 영향을 많이 받는 기술이기 때문에 복원을 하는 동안 최적조건을 조성해 주는 기술과 프로그램 조절이 필요하다[5]. 또한, 식물상 복원은 오염물질을 다른 곳으로 이동시키지 않는 장점을 가지고 있는 반면 나무를 이용한 식물상 복원을 할 때에는 넓은 장소와 관리비용이 필요하다[48].

결 론

산업의 가속화로 인한 오염물질의 배출은 토양 생태계와 인체에 심각한 피해를 주고 있다. 토양 정화 기술 중 하나인 식물상 복원은 경제적이고 친환경적인 기술로, 오염된 토양을 복원하는데 있어서 적용 가능성이 매우 높은 기술이다. 그러나 식물만을 이용한 식물상 복원은 오염물질을 제거하는데 있어 한계점이 있기 때문에 최근 들어, 식물과 근권 미

생물을 이용한 식물상 복원 기술이 도입되고 있다. 식물과 근권 미생물을 함께 이용하기 위해서는 많은 제한 요소들이 작용하게 되는데, 첫째, 오염물질과 식물상 복원 장소 맞는 올바른 식물의 선택, 둘째, 식물과 함께 공존하며 오염물질을 분해할 수 있는 근권 미생물의 선택, 셋째, 식물성장과 미생물 정착에 필요한 온도, pH, 영양분, 수분함량, 최종 전자수용체 등과 같은 물리화학적 요인, 경제적 요인 및 전문 인적자원 등이 식물상 복원의 제한 요소로 작용된다. 향후 이러한 제한 요소를 최적화하여 토양 정화 효율을 극대화하기 위해 이들 제한 요소들에 대한 보다 깊이 있는 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있다.

요 약

토양오염을 복원하는 방법 중 식물상 복원은 식물을 이용하여 오염물을 제거하는 기술로, 환경 친화적이며, 경제적인 기술이기 때문에 많이 이용되고 있다. 이 연구에서는 식물상 복원에 있어 식물의 영향, 근권 세균과 물리화학적 제한인자에 대해 고찰하였다. 성공적인 식물상 복원을 위해서는 식물의 선택이 가장 중요하다. 유류(디젤) 분해를 위해 적용된 식물은 쥐보리(*Lolium multiflorum lam*), 베치(*Vicia villosa*), 버섯류(white mustard), 툴페스큐(*Festuca arundinacea*), 콩과식물(leguminosae), 포플러, 소나무(*Pinus densiflora*) 등이고, 유류 제거 효율은 68-99% 이었다. PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons) 제거용으로는 옥수수(*Zea mays*), 쥐보리, 베치, 버섯류, 토끼풀(*Trifolium repens*), 그리고 툴페스큐가 이용되었고, 50-98%의 제거 효율을 보였다. 식물의 성장을 향상시킬 뿐 만 아니라, 오염물질을 직접적으로 제거할 수 있는 근권 세균도 식물상 복원에 있어 중요한 역할을 한다. 식물상 복원에 이용된 근권 세균에는 *Azospirillum lipoferum*, *Enterobacter cloacae*, *Azospirillum brasilense*, *Pseudomonas putida*, *Burkholderia xenovorans*, *Comamonas testosteroni*, *Pseudomonas gladioli*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis* 등이 있다. pH, 온도, 영양물질, 최종전자수용체, 수분함량, 유기물 함량, 오염물질 종류와 물리화학적 인자도 식물상 복원에 있어 제한 요소로 작용한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구지원사업(R01-2005-000-10268-0)과 한국과학재단 차세대바이오환경기술연구센터(AEBRC, R11-2003-006-06001-0)의 지원을 받았으며, 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- Adam, G and H. J. Duncan. 2002. Influence of diesel fuel on seed germination. *Environ. Pollut.* **120**: 363-370.
- Ahn, T. S., J. O. Ka, G. H. Lee, and H. G. Song. 2007. Revegetation of a lakeside barren area by the application of plant growth-promoting rhizobacteria. *J. Microbiol.* **45**: 171-174.
- Aslantas, R., C. Ramazan, and F. Sahin. 2007. Effect of plant growth promoting rhizobacteria on young apple tree growth and fruit yield under orchard conditions. *Sci. Horticulture-amsterdam* **111**: 371-377.
- Aslund, A. L. W., B. A. Zeed, A. Rutter, and K. J. Reimer. 2007. In situ phytoextraction of polychlorinated biphenyl (PCB) contaminated soil. *Sci. Total Environ.* **374**: 1-12.
- Boopathy, R. 2004. Factors limiting bioremediation technologies (review paper). *Bioresource Technol.* **74**: 63-67.
- Betancur-Galvis, L. A., D. Alvarez-Bernal, A. C. Ramos-Valdivia, and L. Dendooven. 2006. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated saline-alkaline soils of the former Lake Texcoco. *Chemosphere* **62**: 1749-1760.
- Burken, J. G. and J. L. Schnoor. 1996. Phytoremediation: plant uptake of atrazine and role of root exudates. *J. Environ. Eng.-ASCE* **122**: 958-963.
- Chekol, T., L. R. Vough, and R. L. Chaney. 2004. Phytoremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils: the rhizosphere effect. *Environ. Int.* **30**: 799-804.
- Coulon, F., E. Pelletier, L. Gourhant, and D. Delille. 2005. Effects of nutrient and temperature on degradation of petroleum hydrocarbons in contaminated sub-Antarctic soil. *Chemosphere* **58**: 1439-1448.
- Cunningham, S. D. and W. R. Berti. 1993. Remediation of contaminated soils with green plants: an overview. *In Vitro Cell Dev. Biol.* **29**: 207-220.
- Eapen, S., S. Singh, V. Thorat, C. P. Kaushik, K. Ra, and S. F. D'Souza. 2006. Phytoremediation of radiocesium (^{90}Sr) and radiocesium (^{137}Cs) using giant milky weed (*Calotropis gigantea* R.Br.) plants. *Chemosphere* **65**: 2071-2073.
- Escalante-Espinosa, E., M. E. Gallegos-Martinez, E. Favela-Torres, and M. Gutierrez-Rojas. 2005. Improvement of the hydrocarbon phytoremediation rate by *Cyperus laxus* Lam. inoculated with a microbial consortium in a model system. *Chemosphere* **59**: 405-413.
- Esitken, A., L. Pirlak, M. Turan, and F. Sahin. 2006. Effects of floral and foliar application of plant growth promoting rhizobacteria(PGPR) on yield, growth and nutrition of sweet cherry. *Sci. Horticulture-amsterdam* **110**: 324-327.
- Etsuko, K., M. Tsukasa, M. Shyoji, and T. Masahiko. 2006. Ryegrass enhancement of biodegradation in diesel-contaminated soil. *Environ. Exp. Bot.* **55**: 110-119.
- Flocco, C. G., M. P. Carranza, L. G. Carvajal, R. M. Loewy, A. M. Pechen de Dangelo, and A. M. Giulietti. 2004. Removal of azinphos methyl by alfalfa plants (*Medicago sativa* L.) in a soil-free system. *Sci. Total Environ.* **327**: 31-39.
- Garcia, G., A. Faz, and M. Cunha. 2004. Performance of *Piptatherum miliaceum*(*Smilo* grass) in edaphic Pb and Zn phytoremediation over a short growth period. *Int. Biodeter. Biodegr.* **54**: 245-250.
- Ghosh, M. and S. P. Singh. 2005. A review on phytoremediation of heavy metal and utilization of its byproducts. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **3**: 1-18.
- Glick, B. R., D. M. Karaturovic, and P. C. Newell. 1995. A novel procedure for rapid isolation of plant growth promoting *pseudomonads*. *Can. J. Microbiol.* **41**: 533-536.
- Huang, X. D., El-Alawi, Y., Penrose, D. M., Glick, B. R., and Greenberg, B. M. 2004. A multiprocess phytoremediation system for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils. *Environ. Pollut.* **130**: 465-76.
- Huang, X. D., Y. El-Alawi, J. Gurska, B. R. Glick, and B. M. Greenberg. 2005. A multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent total petroleum hydrocarbons (TPHs) from soils. *Microchem. J.* **91**: 139-147.
- Jankong, P., P. Visoottiviseth, and S. Khokiattiwong. 2007. Enhanced phytoremediation of arsenic contaminated land. *Chemosphere* **68**: 1906-1912.
- Johnson, D. L., D. R. Anderson, and S. P. McGrath. 2005. Soil microbial response during the phytoremediation of a PAH contaminated soil. *Soil Biol. Biochem.* **37**: 2334-2336.
- Joner, E. J., D. Hirmann, O. Szolar, H. J. Todorovic, D. C. Leyval, and A. P. Loibner. 2004. Priming effects on PAH degradation and ecotoxicity during a phytoremediation experiment. *Environ. Pollut.* **128**: 429-435.
- Kechavarzi, C., K. Pettersson, P. Leeds-Harrison, L. Ritchie, and S. Ledin. 2007. Root establishment of perennial ryegrass (*L. perenne*) in diesel contaminated subsurface soil layers. *Environ. Pollut.* **145**: 68-74.
- Kennedy, I. R., L. L. Pereg-Gerk, C. Wood, R. Deaker, K. Gilchrist, and S. Katupitiya. 1997. Biological nitrogen fixation in non-leguminous field crop: Facilitating the evolution of an effective association between *Azospirillum* and wheat. *Plant Soil* **194**: 65-79.
- Kim, J. Y. and K. S. Cho. 2006. Bioremediation of oil-contaminated soil using rhizobacteria and plant. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* **34**: 185-195.
- Klopper, J. W., A. Gutierrez-estrada and J. A. McInroy. 2007. Photoperiod regulates elicitation of growth promotion but not induced resistance by plant growth-promoting rhizobacteria. *Can. J. Microbiol.* **53**:159-167.

29. Kohler, J., F. Caravaca, L. Carrasco, and A. Roldán. 2007. Interactions between a plant growth-promoting rhizobacterium an AM fungus and a phosphate-solubilising fungus in the rhizosphere of *Lactuca sativa*. *Appl. Soil Ecol.* **35**:480-487.
30. Komarek, M., P. Tluatos, J. Szakova, V. Chrastny, and V. Ettler. 2007. The use of maize and poplar in chelant-enhanced phytoextraction of lead from contaminated agricultural soil. *Chemosphere* **67**: 640-651.
31. Koo, S. Y. and K. S. Cho. 2006. Interaction between plants and rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal-contaminated soil. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* **2**: 83-93.
32. Li, J. and R. J. Kremer. 2006. Growth response of weed and crop seedlings to deleterious rhizobacteria. *Biol. Control* **39**: 58-65.
33. Liste, H. and D. Felgentreu. 2006. Crop growth, culturable bacteria, and degradation of petrol hydrocarbons (PHCs) in a long-term contaminated field soil. *Appl. Soil Ecol.* **31**: 43-52.
34. Macek, T. M. and J. Kas. 2000. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation (research review paper). *Biotechnol. Adv.* **18**: 23-34.
35. Mackova, M., B. Vrchotova, K. Francova, M. Sylvestre, M. Tomaniova, P. Lovecka, K. Demnerova, and T. Macek. 2007. Biotransformation of PCBs by plants and bacteria-consequences of plant-microbe interactions. *Eur. J. Soil Biol.* **43**: 233-241.
36. Meers, E., B. Vandecasteele, A. Rytters, J. Vangronsveld, and F. M. G. Track., 2007. Potential of five willow species (*Salix spp.*) for phytoextraction of heavy metals. *Environmental and Experimental Botany* **60**: 57-68.
37. Mena-Violante, H. G. and V. Olalde-Portuga, 2007. Alteration of tomato fruit quality by root inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): *Bacillus subtilis* BEB-13bs. *Sci. Hortic-amsterdam* (In press).
38. Muratova, A. Y., O. V. Turkovskaya, L. P. Antonyuk, O. E. Makarov, L. I. Pozdnyakova, and V. V. Ignatov. 2005. Oil-oxidizing potential of associative rhizobacteria of the genus *Azospirillum*. *Microbiology.* **74**: 210-215.
39. Nakamura, T., T. Motoyama, Y. Suzuki, and I. Suzuki. 2004. Biotransformation of pentachlorophenol by Chinese chive and a recombinant derivative of its rhizosphere-competent microorganism *Pseudomonas gladioli* M-2196. *Soil Biol. Biochem.* **36**: 787-795.
40. Narasimhan, K., C. V. Basheer, B. Bajic, and S. Swarup. 2003. Enhancement of plant-microbe interactions using a rhizosphere metabolomics-driven approach and its application in the removal of polychlorinated biphenyls. *Plant Physiol.* **132**: 146-53.
41. Nehl, D. B., S. J. Allen, and J. F. Brown. 1996. Deleterious rhizosphere bacteria an intergrating perspective (review). *Appl. Soil Ecol.* **5**: 1-20.
42. Nichols, T. D., D. C. Wolf, H. B. Roger, C. A. Beyrouthy, and C. M. Reynold. 1997. Rhizosphere microbial populations in contaminated soils. *Water Ai, and Soil Pollut.* **95**: 165-168.
43. Orhan, E. A. E., S. Ercisli, M. Turan, and F. Sahin. 2006. Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth and nutrient contents in organically growing raspberry. *Sci. Hortic-amsterdam* **111**: 38-43.
44. Palmroth, M. R., J. Pichtel, and J. A. Puhakka. 2002. Phyto-remediation of subarctic soil contaminated with diesel fuel. *Bioresoure Technol.* **84**: 221-228.
45. Pradhan, S. P., J. R. Conrad, J. R. Paterek, and V. J. Srivastava. 1998. Potential of phytoremediation for treatment of PAHs in soil at MPG sites. *J. Soil Contamination* **7**: 467-480.
46. Santos, F. S., J. Hernandez-Allica, J. M. Becerril, N. Amaral-Sobrinho, N. Mazur, and C. Garbisu. 2006. Chelate-induced phytoextraction of metal polluted soils with *Brachiaria decumbens*. *Chemosphere* **65**: 43-50.
47. Schnoor, J. L., L. A. Licht, S. C. McCutcheon, N. L. Wolfe, and L. H. Carreira. 1995. Phytoremediation of organic and nutrient contaminats. *Environ. Sci. Technol.* **29**: 318-323.
48. Schnoor, J. L. 1997. Phytoremediation. Technology evaluation report, pp.8-18. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Iowa, U.S.A.
49. Shaharoon, B., M. Arshad, and A. Khilid. 2007. Differential response of etiolated pea seedlings to inoculation with rhizobacteria capable of utilizing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate or L-methionine. *J. Microbiol.* **45**: 15-20.
50. Shimp, J. F., J. C. Tracy, L. C. Davis, E. Lee, W. Huang, L. E. Erickson, and J. L. Schnoor. 1993. Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic materials. *Environ. Sci. Technol.* **23**: 41-77.
51. Tesar, M., T. G. Reichenauer, and A. Sessitsch. 2002. Bacterial rhizosphere populations of black poplar and herbal plants to be used for phytoremediation of diesel fuel. *Soil Biol. Biochem.* **34**: 1883-1892.
52. Thomas F. C., Chin-A-Woeng, W. Priester, A. J. Bij, and B. J. J. Lugtenberg. 1997. Description of the colonization of a gnotobiotic tomato rhizosphere by *Pseudomonas fluorescens* biocontrol strain WCS365 using scanning electron microscopy. *Mol. Plant Microbe. In.* **10**:79-86.
53. Wu, S. C., K. C. Cheung, Y. M. Luo, and M. H. Wong. 2006. Effects of inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria on metal uptake by *Brassica juncea*. *Environ. Pollut.* **140**: 124-35.
54. Wyrzykowska, B., N. Hanari, A. Orlikowska, I. Bochentin, P. Rostkowski, J. Falandysz, S. Taniyasu, Y. Horii, Q. Jiang, and N. Yamashita. 2007. Polychlorinated biphenyls and -naphthalenes in pine needles and soil from Poland-Concentrations and patterns in view of long-term environmental monitoring. *Chemosphere* **67**: 1877-1886.
55. Xu, S. Y., Y. X. Chen, W. X. Wu, K. X. Wang, Q. Lin, and X. Q. Liang. 2006. Enhanced dissipation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by combined plants cultivation. *Sci. Total Environ.* **363**: 206-215.
56. Zaidi, S., S. Usmani, B. R. Singh, and J. Musarrat. 2006. Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea*. *Chemosphere* **64**: 991-997.

57. Zakiya, D., M. Parrish, B. Katherine, and A. P. Schwab. 2005. Effect of Root Death and Decay on Dissipation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Rhizosphere of Yellow Sweet Clover and Tall Fescue. *Bioremediation and Biodegradation* **34**: 207-216.
58. Zhuang, X., J. Chen, H. Shim, and Z. Bai. 2007. New advances in plant growth-promoting rhizobacteria for bioremediation. *Environ. Int.* **33**: 406-413.

(Received Oct. 23, 2007/Accepted Nov.13, 2007)