

식물정화기술을 활용한 오염지역의 환경복원

하성훈 (현대환경연구원 선임연구원)

- I. 들어가는 말
- II. 식물정화기술이란 무엇인가?
- III. 식물정화기술의 정화기법
- IV. 한계점과 잠재력
- V. 사례분석 및 시장전망
- VI. 맺음말

I. 들어가는 말

국제통화기금(IMF) 한파에 따른 기업체의 연쇄부도로 산업폐기물이 다량 방치되고 있어 심각한 환경오염 문제를 야기시키고 있다. 환경부가 지난 10월에 제출한 국감자료에 따르면 IMF이후 회사 부도로 인해 발생한 폐기물은 7백84개소에 18만2천3백10톤으로, 이 중 11%인 1만9천9백25톤만 처리되고 8월말 현재 5백88개소에 16만2천3백85톤이 처리되지 않은 상태로 방치되어 있다. 특히 이 산업폐기물 가운데에는 폐산과 폐알칼리 등 유해폐기물도 14개소에 6천2백15톤이나 포함돼 토양오염과 지하수오염 방지대책 등이 시급한 상태다. 따라서 공장부지나 산업시설 등 오염지역에 대한 처리와 환경복원 문제가 점차 사회의 관심을 받을 것으로 전망된다.

우리 나라에서 본격적으로 토양에 대한 오염현황을 종합적으로 파악하여 토양오염 예방대책과 오염토양에 대한 정화·복원 등 토양환경의 보전정책을 수립하게 된 것은 1996년 1월 6일 토양환경보전법이 시행되면서이다. 그러나 오염지역의 정화 및 복원

분야는 아직 국내 여건이나 인식이 부족하고 기술 수준도 상대적으로 낮은 실정이다. 한편 대표적인 토양정화기술을 살펴보면 토양세척기술, 열처리기술, 진공증기추출기술, 생물정화기술, 식물정화기술, 경작법 등이 있는데, 국내에서는 최근 이에 관한 연구가 한국과학기술연구원(KIST)을 중심으로한 국책연구기관과 민간연구소를 중심으로 활발하게 진행되고 있다.

미국의 경우 약 45만개에 이르는 오염지역(Brownfields)¹⁾이 급속한 사회적 관심의 대상으로 부상하면서 황폐한 오염지역이나 공장부지의 환경복원이나 재개발이 적극 추진되고 있다. 미국 EPA와 주정부는 협약을 통해 오염지역의 정화와 재개발을 촉진하여 생산적인 상업용지로 전환시킴으로써 환경개선효과와 함께 지역경제 활성화도 가져다 줄 것으로 기대하고 있다. 특히 미국 EPA에서는 오염지역에 대한 정화처리와 복원을 위해 식물을 활용하는 기술에도 많은 관심을 보이고 있다.

환경복원기술의 하나로 식물을 활용해서 오염된 토양과 지하수를 정화처리하여 복원하는 기술인 식물정화기술(Phytoremediation)은 오염지역 처리에 대한 환경친화성이 큰 '그린' 접근법으로 새롭게 부각되고 있다. 식물정화기술은 일반적인 처리기술과 비교할 때 비용 절감의 잠재력이 높다는 현장 실험 결과가 제시됨에 따라 최근 관심을 받고 있다. 따라서 본 글에서는 식물정화기술에 대한 개요 및 동향과 정화기법을 살펴보고 한계점 및 잠재력, 해외사례와 앞으로의 전망을 제시하였다.

Ⅱ. 식물정화기술이란 무엇인가?

1. 정의 및 개요

식물정화기술(Phytoremediation)²⁾은 식물이 토양과 지하수로부터 오염물질을 제거함으로써 부지를 정화시키거나 복원시키는데 활용되는 여러 방법을 지칭하는 일반적인 용어이다. 식물은 유기성 오염물질을 제거 또는 분해하고, 여과기 또는 집진기의 기능을 통해 금속성 오염물질을 밀폐하거나 안정화한다.

1) Brownfield에 대한 US EPA 정의 : Abandoned, idled, or under-used industrial and commercial facilities where expansion or redevelopment is complicated by real or perceived environmental contamination.

2) 'Phyto-' 는 식물로 번역되는 'plant' 와 같은 의미이다.

식물정화기술은 In-Situ³⁾ 또는 오염지역에서 오염물질 제거, 분해, 밀폐 등을 통해 오염된 토양, 슬러지, 침전물 및 지하수에 대한 위험저감을 위해 살아있는 식물을 직접 이용하는 것이다. 환경복원의 수단으로서 오염부지에 식물을 가꾸고 수확하는 일은 오염수준을 완화시키기 위해 얇거나 낮은 부지를 정화하는데 활용할 수 있는 환경친화적 기술이다. 또한 식물정화기술은 다른 물리적 정화기술을 대체하여 활용되거나 이들과 병행해서 활용할 수도 있다. 식물정화기술에 대해서 미국 EPA는 다음과 같이 설명하고 있다.

- 미적 즐거움을 주고 자연순응적이며 태양에너지에 의존하는 정화기술
- 오염부지가 깊지 않고, 오염수준이 낮을 경우 매우 유용한 정화기술
- 다양한 종류의 환경오염물질을 처리하는데 유용한 정화기술

식물정화기술의 활용 분야는 크게 토양과 지하수의 오염정화이며 토양의 오염정화에는 식물추출, 식물안정화, 식물촉진, 식물발산, 식물전환 등이 있고, 지하수의 오염정화에는 뿌리여과, 수압장벽, 식생대, 습지조성 등으로 활용되고 있다(<표 1> 참고).

식물정화기술에 활용되고 있는 식물들은 해바라기와 일부 초본류, 다양한 계피나무와 포플러, 미류나무, 버드나무 및 넓은 잎을 가지는 다양한 식물뿐만 아니라 대상 지역의 고유한 토착식물 등 매우 다양하다. 지속적인 연구를 통해 이들 식물들이 오염정화와 환경복원에 효과가 있는 것으로 밝혀지고 있다.

한편 식물정화기술은 금속류, 살충제, 솔벤트, 폭발성물질,⁴⁾ 원유, PAH⁵⁾ 및 매립

〈표 1〉 식물정화기술의 활용 분야

토양	지하수
<ul style="list-style-type: none"> · 식물추출 (Phytoextraction) · 식물안정화 (Phytostabilization) · 식물촉진 (Phytostimulation) · 식물발산 (Phytovolatilization) · 식물전환 (Phytotransformation) 	<ul style="list-style-type: none"> · 뿌리여과 (Rhizofiltration) · 수압장벽 (Hydraulic Barriers) · 식생대 (Vegetative Caps) · 습지조성 (Constructed Wetlands)

자료 : Glass, D., 1998.

3) 토양정화기술을 처리위치별로 분류하면 오염토양 내에서 정화처리하는 'In-Situ' 와 오염토양 밖에서 정화처리하는 'Ex-Situ' 로 나눌 수 있다. 한편 'Ex-Situ' 는 오염토양 위에서 정화처리하는 'On-Site' 와 운반후 별도의 장소에서 처리하는 'Off-Site' 로 구분된다.

침출수를 정화시키는데 활용할 수 있다. 미국내 식물정화기술은 현재 소규모 실험을 통해 적극적으로 연구되고 있다. 하지만 아직까지 실제 현장 규모의 적용은 몇 개의 프로젝트로 제한되어 있다.

2. 최근 동향

최근 미국 연방정부와 주정부에서는 오염지역 재개발에 대한 기존 규제정책을 완화하여 간소화하고 있다. 특히 매사추세츠(Massachusetts) 같은 주에서는 주정부가 소유한 오염지대에 대한 정화 프로그램(Clean-up Program)⁶⁾을 시행 중이며, 은행들도 예전에는 기피했었던 오염부지에 대한 자금 대출을 시작하고 있다. 또한, 1998년 3월 뉴욕타임스에서는 환경컨설턴트 그룹이 작성한 뉴욕시와 그 주변지역의 6,500개 오염지대 목록을 발표하였다. 오늘날 미국 전역에 있는 약 45만개의 오염지역이 환경복원을 통해 생산적인 목적으로 활용되기를 기다리고 있으며, 오염정화를 위한 자금지원은 이같은 목적을 추진하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

식물을 이용한 환경복원기술인 식물정화기술(Phytoremediation)은 미국 EPA 산하의 RTDF⁷⁾를 중심으로 추진되고 있으며 최근 많은 성과를 나타내고 있다. RTDF의 'Phytoremediation of Organics Action Team'에서는 식물정화기술 연구의 현황 평가, 연구결과를 제출하는 방법의 결정 및 오염지역의 정화에 적합한 식물정화기술의 개발 등을 담당하고 있다. 또한 미국 EPA는 학계나 민간의 식물정화기술에 대한 다양한 연구들을 개발·지원하고 있다.

4) 대표적 폭발성물질로는 TNT, DNT, TNB, RDX, HMX 등이 있다.

5) PAH : Polynuclear Aromatic Hydrocarbons

6) 정화(Clean-up)란 인체와 환경에 악영향을 미치는 유해물질이 배출되지 않도록 예방하거나 배출된 물질을 제거하기 위한 제반 활동을 말한다.

7) RTDF(Remediation Technologies Development Forum)는 1992년에 유해폐기물 문제에 대한 혁신적인 해결책 마련을 위해 공공부문과 민간부문 사이의 상호협력을 강화할 목적으로 미국 EPA에 의해 설립되었다. RTDF는 고효율 저비용의 유해폐기물 특성화 및 처리 기술의 개발이라는 공동 목표를 공유하는 기업체, 정부기관 및 학계 등이 파트너로 참여하여 활동영역을 넓히고 있다.

Ⅲ. 식물정화기술의 정화기법

1. 식물정화기술의 기본 메커니즘

식물정화기술은 오염물질의 추출, 밀폐, 분해라는 세 가지 기본 메커니즘을 통해 유지된다.

첫째, 추출(Extraction)이란 식재된 수목의 새싹과 잎에 오염물질이 이동해서 축적되는 것을 말한다. 식물정화기술 분야의 전문가들은 식물을 토양에서 오염물질을 뽑아 올리는 '태양에너지 펌프'로 비유한다. 오염물질은 매년 식물의 열매나 낙엽에 포함돼 수거할 수 있기 때문에 결과적으로 대상 부지에서 오염물질이 정화되는 것이다. 수거된 식물체는 안전하게 건조해서 소각되거나 퇴비화된다. 일부 경제성 있는 금속의 경우 실제 소각재에서 회수하여 산업계에서 재사용할 수도 있다.

둘째, 밀폐(Containment)란 식물이 오염물질을 이동하지 못하게 하는 것이다. 예를 들면 어떤 식물은 매우 높은 농도의 금속성분을 뿌리에서 흡수할 수 있다. 비록 오염부지의 모든 식물과 그 뿌리를 수거해서 안전하게 멀리 옮기는 것은 현실적으로 불가능하지만 적어도 오염물질이 환경 내에서 더 이상 순환되지 않게 할 수 있다.

셋째, 분해(Degradation)란 탄화수소와 기타 유기화합물로 구성된 오염물질의 구조를 파괴해서 더 이상 유해하지 않게 하는 과정이다. 이같은 분해 작용은 식물의 뿌리부에서 공생하는 미생물이나 곰팡이, 뿌리의 화학 작용과 뿌리의 효소에 의해 일어난다. 또 다른 분해 작용으로 식물의 자체 메커니즘을 들 수 있다. 일부 식물은 유기독성물질을 흡수해서 독성의 특정 화학성분을 이용할 수 있는 기능을 가지고 있다.

2. 금속성 오염물질의 정화기법

금속류로 오염된 부지에서 식물은 식물추출(Phytoextraction), 뿌리여과(Rhizofiltration), 식물안정화(Phytostabilization)의 세 가지 메커니즘을 통해 토양과 지하수에 있는 금속성분을 안정화하거나 제거한다.

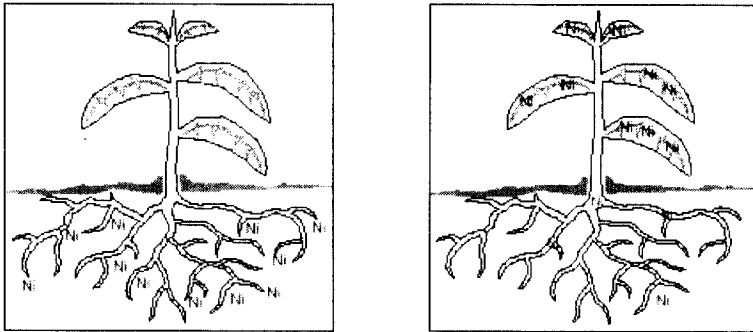
(1) 식물추출(Phytoextraction)

식물추출은 식물축적(Phytoaccumulation)이라고도 불리며, 식물뿌리에 의해 토양에 있는 오염물질이 잎이나 줄기와 같은 식물 윗부분으로 이동해서 축적되는 것을

말한다. 니켈과 같은 금속류는 토양에서 식물뿌리로 흡수되어 줄기 및 잎을 통해 이동한다. 금속류를 가진 식물은 토양 속의 금속 농도가 허용수준으로 낮아질 때까지 오염부지에서 수확해서 폐기하고 재식재하는 과정을 반복한다(<그림 1> 참고).

일부 식물은 다른 식물과 비교해서 매우 많은 양의 금속류를 흡수한다. 오염부지에 식물을 식재한 후 일정 기간동안 성장하면 이들을 수확해서 금속류의 재활용을 위해 소각하거나 퇴비화하는데, 이같은 과정을 반복함으로써 토양오염 수준을 낮출 수 있다. 만약 식물을 소각하였다면 소각재는 유해폐기물 매립장에 처분해야 하지만 소각재의 부피는 오염토양 자체를 처리하기 위해 굴토해야 하는 부피의 10% 미만이다. 니켈, 아연, 구리는 식물정화기술로 가장 잘 제거되는 금속류이다. 왜냐하면 약 400여 종의 식물이 이들 금속류를 잘 흡수하는 것으로 밝혀져 있기 때문이다.

〈그림 1〉 식물추출에 의한 금속류의 축적



주 : 왼편 그림은 니켈과 같은 금속류가 식물뿌리 근처 토양을 오염시킨 것이며, 오른편 그림은 토양에 존재하던 금속성 오염물질이 흡수되어 뿌리와 줄기를 통해 잎으로 이동한 모습이다.

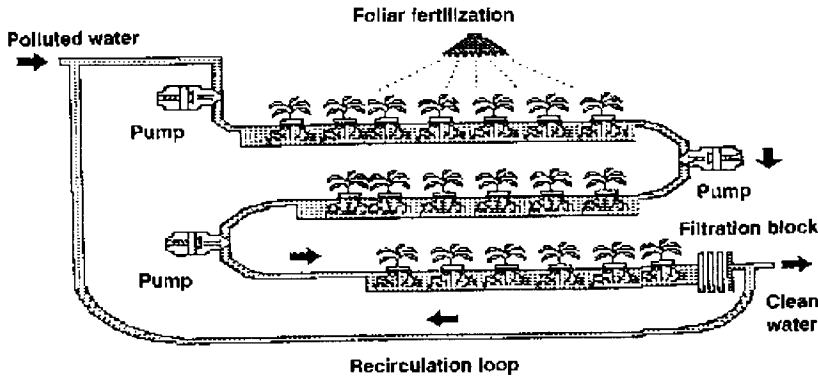
자료 : U.S. EPA, 1998.

(2) 뿌리여과(Rhizofiltration)

뿌리여과는 뿌리부 주변에 용해 상태로 있는 오염물질을 식물뿌리에 흡착 또는 침전하거나 뿌리 속으로 흡수하는 작용을 말한다. 뿌리여과는 식물추출과 유사하지만 식물을 토양보다는 오염된 지하수의 처리에 우선적으로 활용한다는 점이 다르다. 정화처리에 이용되는 식물은 토양 보다 물 속에 뿌리를 둔 온실에서 재배된다(<그림 2> 참고). 식물을 환경에 적응시키기 위해 매립장에서 오수(汚水)를 모아서 기존의 용수

를 대신하여 식물에 공급하는 대형 뿌리 시스템(Root System)에 의해 개발된 식물을 그 뿌리가 물과 오염물질을 흡수할 수 있도록 오염지역에 식재한다. 식물뿌리가 오염물질을 삼투(滲透)시킨 이후 식물은 수확한다. 뿌리여과의 한 사례로서 우크라이나 체르노빌(Chernobyl)의 오염지역에 해바라기를 식재한 실험을 통해 연못의 물 속에 있는 방사능 오염물질을 성공적으로 제거한 경우가 있다.

〈그림 2〉 식물여과 시스템을 통한 흐름



주 : 본 시스템은 8~12주된 해바라기의 뿌리에 오수를 흘려보낸다

자료 : Raskin, I.

(3) 식물안정화(Phytostabilization)

식물안정화는 식물뿌리를 통한 흡수와 축적, 뿌리 위에 흡착, 뿌리부내에 침전 등을 통해 토양과 지하수에서 오염물질을 고정시키기 위한 목적으로 특정 식물을 활용하는 것이다. 이 과정은 오염물질의 이동성을 저감시키고, 지하수와 대기 중으로의 확산을 방지한다. 또한 식물안정화는 먹이사슬로의 유입에 대한 생물유효성(Bioavailability)을 감소시킨다. 이 기술은 지표토에서 높은 금속농도 또는 황화물질에 의한 물리적 방해 때문에 자연식생이 부족한 부지에서 식생대(植生帶)를 재조성하는데 활용된다. 금속에 대한 내성 수종은 침식에 의한 오염의 잠재적 이동, 노출된 지표토의 유출과 지하수에 의한 토양오염의 침출을 감소시키기 위해 부지에서 식생을 복원하는데 활용된다.

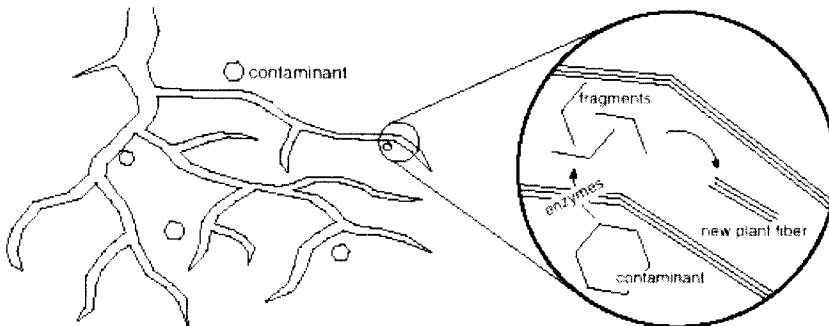
3. 유기성 오염물질의 정화기법

유기성 오염물질은 보편적인 환경오염물질이다. 이러한 유기성 오염물질에 대해 식물을 이용한 정화처리에는 식물분해(Phytodegradation), 뿌리분해(Rhizodegradation), 식물발산(Phytovolatilization) 등의 방법이 있다.

(1) 식물분해(Phytodegradation)

식물분해는 식물전환(Phytotransformation)이라고도 하며 식물의 신진대사 과정을 통해 식물 내의 오염물질을 제거하거나 식물에 의해 만들어진 효소와 같은 물질의 작용을 통해 식물외부의 오염물질을 제거하는 것을 말한다(<그림 3> 참고). 오염물질은 단순한 분자로 분해되거나 식물세포 내에 흡수되어 식물성장의 촉진을 돕는 작용을 한다. 식물은 급속한 화학반응을 유발시키는 효소와 복합화합물질인 단백질을 가진다. 특정 효소는 암모니아 폐기물을 제거하거나 전환하며, 다른 효소는 TCE(Trichloroethylene)와 같은 표백제를 분해하거나 제초제를 분해한다.

〈그림 3〉 식물분해에 의한 유기성 오염물질의 제거



주 : 식물뿌리의 효소가 유기성 오염물질을 분해하여 그 잔재물들은 새로운 식물성분으로 활용한다.

자료 : U.S. EPA, 1998.

(2) 뿌리분해(Rhizodegradation)

뿌리분해는 식물촉진(Phytostimulation), 고도 뿌리부 생분해(Enhanced Rhizosphere Biodegradation), 식물보조 생분해(Planted-Assisted

Biodegradation)라고도 하며, 뿌리부의 접촉으로 활성화되는 미생물 활동을 통해 토양에 있는 오염물질을 전환하는 것이다. 뿌리분해는 식물분해 과정보다 느리게 진행된다. 곰팡이, 박테리아 등의 미생물은 양분이나 에너지로 유기물을 소모하거나 소화한다. 특정 미생물은 연료나 솔벤트와 같이 인간에게 유해한 유기물을 소화할 수 있고, 생분해라는 과정을 통해 유해한 유기물을 무해한 물질로 전환할 수 있다. 식물뿌리에서 생성되는 당분, 알콜 및 산(酸) 등의 자연물질은 토양미생물의 먹이가 되는 유기탄소와 이들의 활동을 촉진하는 부수적인 양분을 포함하고 있다. 또한 생분해는 식물뿌리가 토양을 변화시켜서 촉진되고 토양에 수분을 공급한다.

(3) 식물발산(Phytovolatilization)

식물발산은 식물에서 대기 중으로 오염물질을 배출하거나 오염물질을 변환시키는 식물에 의해 오염물질이 흡수되거나 증산되는 것을 말한다. 식물발산은 식물이 성장함에 따라 활발해지는데, 일부 식물들은 수분과 유기성 오염물질을 흡수하여 특정 오염물질을 잎으로 이동한 뒤 대기 중으로 증산시키거나 발산시킨다. 한 사례연구에서는 오염부지에 식재한 포플러나무가 흡수한 TCE(Trichloroethylene)의 90%를 발산시킨다는 결과를 보여 주었다.

IV. 한계점과 잠재력

식물정화기술은 여러 가지 장점과 함께 단점도 가지고 있다(<표 2> 참고). 먼저 식물을 활용한 환경복원기술의 장점을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 식물정화기술은 대상 부지를 굴삭한 뒤 오염토양을 처리시설로 운송하여 화학·기계적 공정을 거쳐 정화하는 일반적인 환경복원 방법에 비해 복원 기간은 오래 걸리지만 비용이 저렴하다.

둘째, 식물정화기술의 가장 매력적인 특성은 초기 설치비용이 적다는 점이며 이러한 낮은 투자비용으로 인해 여러 이점을 가진다.

셋째, 식물은 깨끗한 태양에너지로 자라기 때문에 유지비용도 매우 낮다.

넷째, 식물정화기술 프로젝트에 대한 일반 시민들의 선호도는 공원 같은 아름다움, 경관, 먼지 저감, 새와 야생동식물의 서식지와 같은 요인 때문에 매우 높다. 수목으로 덮여 있는 부지를 나대지로 황폐하게 버려져 있는 부지 보다 더욱 선호하는 것이 일반

적이다. 이것은 부지에 수목이 자라고 있는 경우가 환경적으로도 건전한 상태라는 것을 의미하며, 또한 누구나 한눈에 오염정화 과정을 확인할 수도 있다.

식물정화기술은 이상과 같은 여러 장점에도 불구하고 다음과 같은 몇 가지 한계점을 가진다.

첫째, 식물정화기술은 모든 오염지역에서 효과를 발휘하지는 못하며 특히 심각하게 오염된 지역에서는 효과적이지 않다.

둘째, 식물정화기술의 효과는 일반적으로 토양과 지하수에서 오염물질의 농도가 비교적 낮고, 깊이 얇은 대상 부지로 한정된다.

셋째, 식물정화기술 분야는 아직 초기단계로서 대부분의 검증은 실험단계이다. 객관적 검증 자료의 부족으로 실제 채택 과정에서 정책담당자는 여러 의문을 표명할 것이기 때문에 시행단계에서는 단계별로 충분한 설명과 설득이 필요할 것이다.

넷째, 정화를 위해 식재된 식물이 미치는 환경영향에 대해 아직 검증되지 못한 부분이 있다. 야생동물이 먹이사슬을 통해 오염된 식물의 새싹과 잎을 먹었을 경우 먹이사슬에 미치는 영향이나 식물이 토양의 오염물질을 흡수하여 증산작용을 통해 배출하였을 때 대기질에 미치는 영향 등에 대한 연구가 계속 진행되어야 한다.

〈표 2〉 식물정화기술의 장단점 비교

장 점	단 점
오염토양 내에서 처리(In-Situ)	깊이가 얇은 토양, 하천, 지하수로 제한
자연순응적 기술	유해물질의 농도 집중으로 식물에게 유해
태양에너지 활용	다른 생물학적 처리와 연계된 대규모 전환의 제한
일반 물리적 처리의 10~20% 비용	물리적 처리에 비해 느림
자연 정화보다 전환의 신속	대체로 수용성 오염물질에 효과가 국한
일반대중의 높은 선호	분해 생성물의 독성과 생물학적 유효성이 규명되지 못함
대기 및 수질오염 배출이 거의 없음	지하수로 오염물질의 이동
부수적 폐기물의 발생이 거의 없음	오염물질이 동물에 의해 먹이사슬로 유입될 잠재력
토양이 부지 내에 유지되고 추가적인 처리가 가능함	정책담당자의 거부감

자료 : Chappell, J., 1997. p.3

식물정화기술은 여러 가지 단점에도 불구하고 많은 성장잠재력을 가지고 있다. 미국의 경우, 깊이 50cm의 1에이커(4046.8㎡) 면적의 오염토양에 대한 식물정화의 예상 비용은 6만~10만 달러로서 동일한 면적에 대한 굴토와 매립처리비용인 40만~170만 달러에 비해 매우 저렴하다. 식물정화기술은 소량의 물질을 재활용하거나 특정 금속류의 회수도 가능하게 한다. 또한 오염부지에 대한 모니터링 및 유지관리를 위한 추가 비용이 들지 않는다. 이같은 요인으로 식물정화기술은 환경친화적이면서 신뢰할 수 있고, 비용효과적인 기술로서 최근 연구가 급속히 확산되고 있다.

V. 사례분석 및 시장전망

1. 텍사스 카스웰 공군기지 사례

식물정화기술의 대표적 사례로 미국 텍사스의 카스웰(Carswell) 공군기지에서 수행된 '스티브 록 프로젝트(Steve Rock Project)'가 있다. 1996년 봄부터 시작된 본 프로젝트에서는 공군기지의 원유저유소 주변의 얇은 지하수에서 검출되는 솔벤트의 일종인 삼염화에틸렌(TCE : Trichloroethylene)을 정화하기 위해 식물정화기술을 활용하였다. 오염물질을 흡수하고 정화하기 위해 670그루의 미류나무(Eastern Cottonwood Tree)를 식재하였다. 초기단계인 다른 많은 식물정화기술과 같이 이 프로젝트도 현재 실험단계이다.

〈그림 4〉 미국 카스웰 공군기지의 식물정화기술 적용 사례



주 : 왼편 사진은 오염된 부지를 정화하기 위해 서양버즘나무를 식재한 초기현장이며, 오른편 사진은 오염 농도가 높은 지역에 식재된 나무들의 성장 상태가 매우 좋고 뿌리의 기름 제거 미생물에 의해 토양도 정화되었음을 보여준다.

2. 식물정화기술의 시장 전망

식물정화기술은 아직 초기단계로서 미국에서 활발하게 연구되고 있다. 따라서 기존 연구, 현황 및 전망도 아직은 미국에 한정되어 있기 때문에 본 글에서는 식물정화기술을 활용한 미국의 부지 현황과 향후 시장 전망에 대해서만 간략히 살펴보았다. 먼저 미국에서 식물정화기술을 활용한 대상 부지는 1996년 카스웰 공군기지를 시작으로 대상지역과 오염물질이 점차 확대되고 있는 추세이다(<표 3> 참고).

<표 3> 미국내 식물정화기술을 활용한 부지 현황

대상 부지/주	개시일	선택 수종	오염물질/특성
Former Carswell Air Base/TX	Spring 1996	Eastern Cottonwood	TCE ¹⁾ /Groundwater at 4' -12'
Aberdeen Proving Grounds/MD	Spring 1996	Hybrid Poplar	TCE/Groundwater
Edward Sears Site/NJ	Fall 1996	Hybrid Poplar	TCE/Groundwater at 8'
Ammunition Army Depot/IA	Spring 1997	Wetland & Terrestrial Plants	TNT/Soil & Pond Water
Fort Wainwright/AK	Spring 1997	Felt Leaf Willow	Pesticides/Soil & Groundwater
Kaufman & Minter/NJ	Spring 1997	Hybrid Poplar	PCB ²⁾ /Groundwater
SRS/CT	Spring 1998	Hybrid Poplar	Mixed Solvents/ Groundwater
Calhoun Park/SC	Proposed	Local Landscaping Plants	PAH ³⁾ /Groundwater at 1' -4'
Industrial Excess Landfill/OH	Proposed	Hybrid Poplar	Mixed Waste ⁴⁾
Woodlawn Landfill/MD	Proposed	Hybrid Poplar	Mixed Waste

주 : 1) TCE : Trichloroethylene

2) PCB : Polychlorinated Biphenyls

3) PAH : Polynuclear Aromatic Hydrocarbons

4) Mixed Waste : 유해폐기물이 포함된 도시쓰레기를 말함

자료 : Rock, S. A. and P. G. Sayre, 1998. p. 12

식물정화기술의 미국내 시장규모에 대한 최근 연구에서 Glass(1998)는 1998년에 16.5~29.5만 달러로 전망하였다(<표 4> 참고). 분야별 시장 규모를 살펴보면 지하수에서 유기성폐기물의 처리 분야가 5~10만 달러로 가장 큰 시장이고, 매립장 침출수의 관리 분야와 토양에서 금속의 정화 분야가 각각 3~5만 달러 규모로 예상된다. 또한 식물정화기술의 중장기 시장규모는 2000년에는 55~103만 달러, 2005년에는

〈표 4〉 식물정화기술산업의 미국내 시장 규모(1998년)

(단위 : 백만 달러)

Organics in groundwater	5 ~ 10
Organics in soil	2 ~ 3
Metals in groundwater	0.1 ~ 0.2
Metals in soil	3 ~ 5
Radionuclides	0.5 ~ 1.0
Landfill Leachate	3 ~ 5
Organics in Wastewater	2 ~ 3
Metals in Wastewater	0.1 ~ 0.3
Other	0.8 ~ 2.1
Total	16.5 ~ 29.5

자료 : Glass, D., 1998.

〈표 5〉 식물정화기술산업의 미국 시장 전망(1998~2005)

(단위 : 백만 달러)

	1998	2000	2005
시장 규모	16.5~29.5	55~103	214~370

자료 : Glass, D., 1998.


214~370만 달러로 성장할 것으로 전망하고 있다(<표 5> 참고).

식물정화기술은 일반적인 환경복원기술에 비해 상당한 수준의 비용 절감 효과를 가져온다. Glass(1998) 등의 연구결과에 따르면 식물정화기술을 적용했을 경우 전체 처리 비용은 다른 정화기술에 비해 50~80% 정도 저렴한 것으로 평가되었다. 식물정화기술의 경제성과 더불어 환경친화성은 향후 이 기술의 확대와 시장 성장을 가져올 것으로 예상된다. 특히 유럽지역은 미국과 함께 중요한 식물정화기술의 시장으로 대두될 것이다.

VI. 맺음말

식물정화기술은 상대적으로 새로운 오염정화 및 환경복원기술이다. 일부 적용 사례에서는 정화처리에 필요한 대상지 현장 규모의 충분한 실험이 이루어졌다. 하지만, 일부 적용 사례는 온실이나 실험실 규모에서 입증되었고, 현재 현장에서 실험되거나

평가되고 있다. 식물은 성장을 위해 특정한 기간과 계절이 필요하기 때문에 현장연구 결과를 수집하고 평가하는데 여러 해가 걸린다. 그러나 현재 수행 중인 많은 연구 결과가 1~2년 내에 나올 것이다. 따라서 향후 이들 연구결과의 성과와 자료가 축적됨에 따라 정책담당자, 토지소유자와 복원전문가는 식물정화기술이 오염지역의 정화처리에 얼마나 효과적인지에 대한 결정을 더욱 쉽게 할 수 있을 것이다.

최근 동향을 종합할 때 오염지역의 환경복원 분야에서 식물정화기술의 잠재적 역할은 점차 중요해질 것이다. 따라서 토양정화 및 환경복원 분야의 전문가는 적어도 식물정화기술의 기본원리와 현재 추진 중인 오염지역의 복원 전략을 이해하고 있어야 할 것이다. 이같은 인식을 통해 식물정화기술이 미래의 성장시장이라는 사실을 알 수 있기 때문이다. 

■ 참고문헌

1. Chappell, J., Phytoremediation of TCE using Populus, Status Report prepared for the U.S. EPA Technology Innovation Office under a National Network of Environmental Management Studies Fellowship, USA, 1997. (<http://clu-in.com/phytoTCE.htm>)
2. Glass, D., The 1998 United States Market for Phytoremediation, A Market Report from D. Glass Associates, Inc. Needham, MA, USA, April 1998.
3. Miller, R.R., Phytoremediation, Technology Overview Report by Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, PA, USA, October 1996.
4. Raskin, I., "Phytoremediation : Using Plants to Remove Pollutants from the Environment", A Part of the American Society of Plant Physiologists (ASPP) Invited Author Series on Leading Plant Research. ASPP, MD, USA.
5. Rock, S.A. and P.G. Sayre, "Phytoremediation of Hazardous Wastes : Potential Regulatory Acceptability", Remediation, Vol. 8(4), John Wiley & Sons, Inc., NY, USA, Autumn 1998.
6. Thompson J.W., "Botanical Remedies", Landscape Architecture, Vol. 88(9), American Society of Landscape Architects, Indiana, USA, September 1998.

7. Urbanska, K.M., N.R. Webb, and P.J. Edward (eds), Restoration Ecology and Sustainable Development, Cambridge University Press, UK, 1997.
8. U.S. Environmental Protection Agency, A Citizen's Guide to Phytoremediation, U.S. EPA Office of Solid Waste and Emergency Response, USA, August 1998.