

중금속 오염 토양의 고도 선별 정화(복원)기술

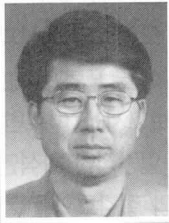
Advanced separation techniques for treatment of soil contaminated with heavy metals



글 | 李孝淑

(Lee, Hyo Sook)

금속기술사(비철야금), 공학박사,
한국지질자원연구원 자원활용소재연구부
책임연구원, 한국기술사회 여성위원장.
E-mail : hslee@kigam.re.kr



글 | 蔡泳培

(Chae, Young Bae)

한국지질자원연구원 자원활용소재연구부
책임연구원, 공학박사.
E-mail : cyb@kigam.re.kr

Recently, the serious problems have been occurred due to the contaminated sites with heavy metals are increasing. There are several remediation technologies of the metal contaminated soil such as physical separation, washing with water or acid, biologically, electrically, pyto remediation, ultrasonic etc. Among these technologies the physical separation can be put in a good option to solve the metal contaminated soil economically and environmental friendly. Because this technology has been already commercially certificated in the mineral processing field for a long time.

1. 서언

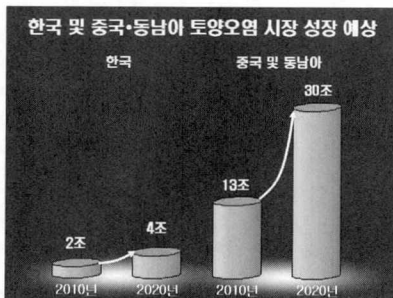
지난 30 여 년 동안 산업 경제 발전을 추구하면서 고도성장을 거듭해온 우리나라는 토양, 물 그리고 공기와 같은 생명 3대 요소의 오염이 심각해졌다. 토양의 경우, 산업단지, 유류저장소, 휴폐광산, 군사지역, 매립지 등과 같이 더 이상 방지할 수 없는 상태가 산재하고 있다. 오염된 토양은 지하나 하천 등으로 오염물질이 확산되어 가면서 오염된 지하수를 만들고, 이는 인간의 생명까지도 위협하고 있다. 중금속 오염토양에서 자란 농작물이 낱과 카드뮴 등으로 오염되어 먹거리 및 생활환경에 대한 불안이 확산되고 있다. 최근 중국 후난성에서 토양에 오염된 비소와 주석 등 중금속이 용출되어

흘러들어간 지하수를 마시고 주민 3천여명이 중독되고 3명이 사망하는 사건이 발생하는 등 사회적인 문제가 보도된 바 있다. (자료: 중앙일보 2008. 01. 24)

국내 토양과 지하수 오염원 현황은 토양오염 유발시설 신고지가 약 22,000개 사업소, 유류 제조 및 저장시설 17,000개소, 군부대 및 주한 미군 주둔지 1,300개 기지, 휴/폐광산으로 금속광 900개소, 석탄광 360 여 개소, 사업 종료 매립장 1,500개소 및 산업단지 등 이다. 이와 같이 광범위하게 국내에 산재된 오염 토양 지하수의 정화사업장은 환경시장과 직결된다. 향후 5-10년 후 국내외 토양 지하수 복원시장의 본격적인 성장이 예상되며, 국내 시장규모는 2010년 2조원, 2020년 4조원에 달할 것으로

예상되고 있다. 뿐만 아니라, 중국 등 동남아시아 시장이 2010년 13조, 2020년 30조로 급속한 성장이 예상된다. (그림 1. 2005. KISTEP 자료)

세계적으로 중금속 오염 토양의 복원기술은 유류 오염 토양 복원기술에 비해 아직 활성화되지 못하였다. 토양 중의 중금속은 분해되지 않고 축적되며 처리기술과 환경법규 상 여러 가지 난해함이 남아 있기 때문이다. 그러므로 이제 시작한 국내 중금속 오염 토양의 복원 시장을 활성화시키기 위한 기술개발은 매우 중요하다. 중금속 오염토양의 정화시장에서 신속하고 효율적인 정화기술을 개발하는데 도움을 주기 위해 본 원고에서는 중금속 오염 토양 정화기술의 개발현황과 정화기술을 소개하고자 한다.



〈그림 1〉 아시아 토양오염 시장 성장 예상

2. 기술개발의 국내외 현황

2.1 해외 기술개발 현황 및 동향

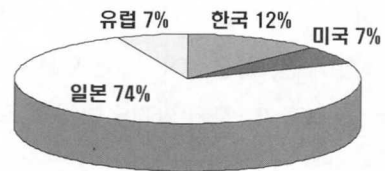
2.1.1 특허 분석

세계 중금속 오염토양 정화기술의 특허를 연도별로 분석한 결과, 중금속 오염토양의 정화

(복원)기술에 대한 특허는 2000년대 들어 출원건수가 증가하였다.(그림 2) 국가별 관련특허건수(1992~2006)는 미국 7건, 일본 78건, 유럽 7건, 한국 13건으로 토지이용도가 높은 일본에서의 기술개발이 가장 활발하였다.(그림 3)



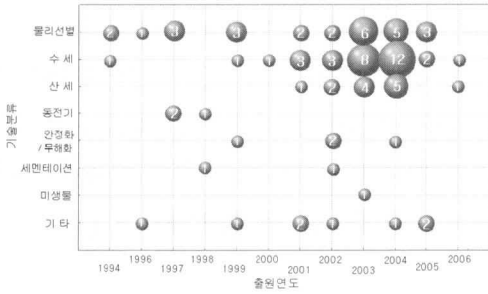
〈그림 2〉 각 국가의 연도별 출원건수 추이



〈그림 3〉 각 국가별 특허 출원건수

특허 건수가 가장 많은 일본 특허를 세부기술 및 연도별로 추이를 분석한 바, 물리적 선별기술이 1994년 이후 꾸준히 개발되어 왔으며 수세·산세 기술은 최근 들어 특허건수가 급증한 것을 알 수 있다. 이는 물리적 선별법 공정만으로는 환경기준치 이하로 중금속의 분리가 곤란하여 수세·산세 공정을 연계한 것으로 판단된다. (그림 4)

미국은 전 국가적으로 유해 폐기물 오염 토양 복원에 대한 필요성은 환경오염보상법(

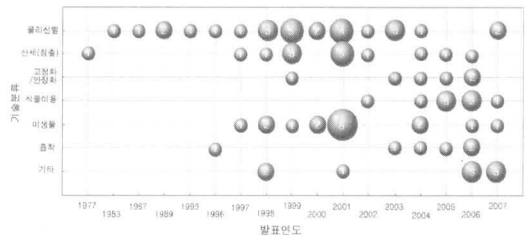


〈그림 4〉 일본 특허기술 및 연도별 특허 건수

CERCLA, 그 중 핵심 부분인 유해폐기물 토양 복원 부분은 Superfund 법이라고 함)과 자원 보전법(RCRA) 등에 의한 복원 프로그램과 시장에 대한 분석이 이뤄지고 있다. 미국 내 Superfund 지원을 받은 중금속 오염토양 처리 사이트에서 사용된 기술은 고형화·안정화법 174건, 화학적 처리법 11건, 수세·산세법 8건, 물리적 선별 7건, 식물정화법 4건으로, 전체 적용 기술 중 고형화·안정화기술이 86%로 대부분을 차지하는 것은 미국에서의 중금속 오염토양의 처리는 오염원의 이동차단이 중심인 것을 알 수 있다.

2.1.2 서지 분석

세계 중금속 오염토양 정화 기술개발에 관한 문헌을 검색·분류한 결과, 물리 선별기술과 산세 기술은 1970년 후반부터 지금까지 꾸준히 연구되어 왔으며 2003년 이후부터 고정화, 식물정화(Pytoremediation)에 관한 연구도 증가하고 있다. 환경친화적인 기술로 미생물과 흡착에 대한 연구도 꾸준히 계속되고 있다. 기타 기술로는 동전기 및 초음파 등을 이용한 중



〈그림 5〉 중금속 오염토양 정화 논문의 연도별 기술 분류

금속 오염토양 정화기술에 대한 연구이다. 이제까지 발표된 기술들을 검토한 결과, 한 가지 기술만으로 중금속 오염물질을 환경기준 이하로 정화하는 것은 어려운 것을 알 수 있다. (그림 5)

2.2 국내 기술개발 현황 및 동향

국내에서 중금속 오염 토양 복원에 관한 기술 개발은 환경부의 차세대 환경사업에 포함되어 수행되었으나, 중금속 오염토양 정화기술에 관련된 특허 출원/등록 건수는 일본에 비하여 1/6 수준으로 기술개발이 부족한 것으로 나타나고 있다. (그림 2) 국내에서 수행해온 중금속 오염토양 정화기술과제를 기술별로 분석한 결과, 고형화/안정화, 미생물 및 동전기기술 등 다양한 기술 개발이 수행되었다. 그 중에서 고형화·안정화 기술은 현 토양 오염 공정시험법상 적용 타당성이 낮은 수준으로 평가되고 있다. 동전기 기술은 투수계수가 큰 토양(10% 이하 포화도)과 중금속이 입자상인 토양 및 토양과 중금속이 이온결합된 경우 등에는 강산의 세정제 투입이 필요하여 기술적용의 어려운 문제가 남아 있다. 중금속제거를 위해 산세기술을 현

장에 직접 적용할 경우, 낮은 선별효율, 높은 처리비, 산세 후 고·액분리 어려움 등 여러 가지 문제점이 도출되었다.

중금속 오염 토양 정화기술은 실험실에서 연구는 상당히 진행되어 왔으나, 아직 현장 실증 연구가 부족하여 중금속 오염토양 정화에 대한 뚜렷한 기술 개발의 대안을 갖고 있지 못한 상태이다. 따라서, 환경부는 오염 토양 정화사업의 중요성을 인식하고 2008년부터 2017년까지 10년 동안 토양의 오염 조사, 정화, 및 사후관리 등의 원천기술부터 현장 적용기술에 이르기까지 전반적이고 장기적인 기술개발을 위한 사업으로 'GAIA PROJECT'를 시작하였다. 이 사업은 우리나라 토양 지하수 환경시장의 90%를 국내기술로 대체하는 것을 목표로 하고 있다.

3. 중금속 오염 토양 정화기술

중금속 토양오염은 경제·산업 활동에 의하여 발생할 뿐 아니라 광물 등 자연적으로 존재하는 금속입자에 의해서도 발생할 수 있으며 현행 토양오염공정시험법은 가용성·난용성 금속 성분 모두를 오염물로 규정하여 규제하고 있다. 토양중의 금속 성분은 자연적으로 분해되지 않기 때문에 오염토양으로부터 분리 제거해야 한다. 중금속 오염토양 정화기술은 크게 토양 중의 오염물질을 분리, 추출하거나, 오염된 토양을 고형화·안정화하는 방법 등으로 대별할 수 있다.

중금속 오염 토양의 고형화·안정화기술은

미국에서 가장 많이 적용하고 있는 기술이다. 그러나, 국내 중금속 오염토양의 관리기준과 분석방법에 관한 토양 환경보전법 및 토양오염 공정시험법상 현실적인 애로사항이 있다. 다시 말해서 토양의 중금속 분석방법을 왕수(염산:질산=3:1)를 용해제로 하여 4시간 이상 환류 분해하여 금속의 오염도를 분석하는 방법, 즉 전함량 분석 방법을 현재는 아연과 니켈 성분에만 적용하고 있으나, 앞으로 전 금속 성분으로 확대할 방침이어서 중금속 안정화·고형화 기술은 적용이 매우 어려운 실정이다. 중금속의 고형화·안정화 기술 뿐 아니라, 전 함량 분석 방법을 채택할 경우 중금속 오염 토양의 정화 기술은 극히 제한적이며 처리가 어려운 오염 토양은 폐기물로 매립을 조장할 수 있다. 그러나 토양 환경 보전법에 의하면 오염 토양의 외부 반출은 도시지역내 건설공사, 긴급사고 오염, 오염 토양 5 m³ 미만, 정화부지 5 m³ 이내로 극히 제한적이어서 정당한 폐기물 매립도 쉽지 않다.

중금속 오염 토양으로부터 중금속 분리 또는 추출의 알려진 기술들의 장점과 단점을 표 1에 요약하였다. (표 1)

3.1. 중금속 오염 토양의 물리 선별 기술

중금속 오염토양의 정화는 단독기술로 국내 환경기준치 이하로 처리하기 어렵다. 중금속 오염 토양에 관한 토양 환경 보전법과 중금속 관리기준 및 분석방법 등의 엄격한 법적 제도 하에서는 토양 중의 중금속을 분쇄 선별 하는

〈표 1〉 중금속 오염 토양의 특성 및 처리 기술 비교

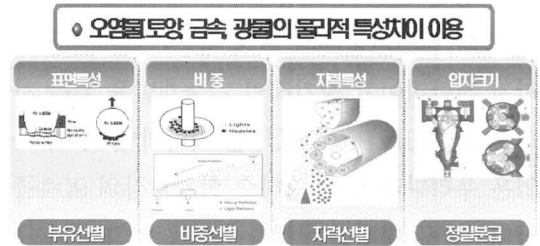
처리기술 비교			
	토양세척	열 처리	전기적 처리
장점	세척에 의한 오염토양의 정화는 저비용	유류나 유기물 오염토양의 정화에는 효과 양호	처리비용이 저렴 in-situ 처리가 가능
단점	입자상의 중금속이 혼입되어 오염된 토양의 경우, 중금속물질의 제거가 용이하지 않음	중금속 오염토양의 경우, 중금속의 용출율은 저하시킬 수 있으나, 원천적인 제거는 불가능	이온화된 중금속처리가 가능하나, 입자상의 중금속 물질의 처리가 어려움.
처리기술 비교			
	미생물처리	화학적 처리	물리적 선별
장점	2차환경오염이 발생가능성이 낮음	중금속을 용출하여 제거하기 때문에 원천적 제거가 가능함	중금속 물질만을 선별적으로 분리함으로써 화학침출 처리량을 감량화
단점	장기간의 처리·정화기간이 요구됨	중금속 물질들이 조대 입자상으로 존재하는 경우 경제성 및 폐수 처리 등의 문제점 대두	중금속 입자가 미세하거나 이온상태로 존재할 경우 효율이 낮을 수 있음

물리 선별기술 및 일부 세척기술 만이 가능한 대안으로 생각한다. 물리적 분리·선별기술은 중금속 오염토양 정화를 위한 핵심기술임에도 불구하고 선별 기술에 대한 이해도가 낮아 중금속 오염토양 정화에 적용사례가 드문 상태이다.

토양 중 중금속의 물리적 선별기술은 이미 광물자원으로부터 미량 함유되어 있는 유용 금속을 분리 회수 목적으로 이미 상용화된 기술이다. 이 기술은 공정운용에 따른 2차 환경오염물의 발생이 없고, 대용량 처리 및 운전비용이 저렴한 기술이다.

3.2 물리 선별(자원처리)기술이란?

자원처리기술의 원리는 광물이 가지는 비중 (specific gravity), 입자의 표면특성, 자성 (magnetic susceptibility), 전기전도도 및 유전율, 입자의 형상, 경도(hardness), 내열성 등의 물리적 혹은 물리화학적 특성의 차이를 이용하는 것으로써, 적용되는 기술은 분쇄 및 분급, 비중선별, 자력선별, 정전선별 및 부유선별 등으로 분류할 수 있다.(그림 6)



〈그림 6〉 중금속 오염 토양 정화를 위한 자원처리기술

사격장, 금속산업단지 및 금속광산주변 토양의 입자상으로 존재하는 금속과 비금속의 경도 차이에 의한 분쇄 및 분급기술을 적용하여 중금속의 선택적 분리가 쉽게 가능하다. 즉 압력, 충격, 마찰 등에 의하여 분쇄할 경우, 경도가 낮은 비금속입자로 구성된 토양입자는 경도가 큰 금속입자보다 쉽게 분쇄되는 선택적 분쇄기법을 이용하여 중금속을 분리할 수 있다. 이때 특정입자크기만을 분류하는 분급기술과 병행함으로써 토양 중 중금속의 분리를 효율적으로 할 수 있다.

토양환경보전법에 규정되어 있는 중금속들의 비중은 Cd=8.65, Cu=8.96, As=4.80,

Hg=13.54, Pb=11.34, Cr=7.19 등이며, 토양을 이루는 점토광물 및 비금속광물들의 비중은 2.66 이기 때문에 상기의 비중선별 방법으로 토양 내 혼재된 중금속입자의 분리는 쉽게 할 수 있다.

토양에 함유된 중금속을 제거하는 공정에서 자력선별 기술을 이용하는 경우에는 입자크기분리기술의 적용을 앞 단계에서 수행하는 것이 그의 효율을 높일 수 있는 방법이 된다. 자력선별에 사용되는 설비는 전자석 혹은 영구자석을 사용하는 경우가 있으며, 습식 및 건식의 상태에서 사용할 수 있는 설비 등이 다양하게 개발되어 있으므로 매우 효율적인 중금속 분리가 가능하다.

부유선별기술은 물질입자 표면의 친수성(親水性) 또는 소수성(疏水性)의 특성에 따라 분리할 수 있는 기술이다. 어떠한 입자상의 물질들을 물에 분산시킨 상태에서 기포를 불어넣으면 소수성이 높은 입자가 선택적으로 기포에 부착되어 기포와 함께 떠올라 분리되는데, 이것이 부유선별기술의 원리이다. 이러한 기술은 계면활성, 표면장력, 흡착 등의 원리를 이용하고, 물질의 표면특성을 임의로 조절하여 분리할 수 있다는 장점이 있으므로 중금속 오염 토양에 함유된 중금속을 분리할 수 있다는 장점이 있고, 특히 토양세척공정 중에서도 널리 응용이 가능하다는 점에서도 활용성이 인정되는 기술이다.

4. 결론

중금속 오염 토양 정화사업은 국내 뿐 아니라,

해외 진출을 위해 인도네시아, 태국, 중국 등 동남아시아의 환경 법규준수 평가(Environmental Compliance Audit)에 적극적으로 참여하고, 선진 다국적기업과 업무제휴를 통해 해외시장에 진출할 필요가 있다.

해외시장에 진출하기 위해서 국내 토양 정화의 경쟁력이 있는 기술개발과 전문 인력을 확보하여 국내 사업을 활성화 시켜야 한다. 경쟁력 있는 기술 개발은 고도 처리의 원천기술개발과 국토 이용율이 높고 인구 밀도가 높은 국내 실정에 맞는 기술을 개발해야 한다. 국내 실정에 적합한 중금속 오염 토양 정화기술로 자원처리분야에서 이미 실증된 물리선별기술이 경쟁력있는 기술의 대안이 될 수 있다.

국가는 오염 토양의 현황과 정화 대상을 정밀 조사하여 현황을 파악하고 정화사업의 장기적인 계획을 수립하므로써 토양 정화사업의 시장성을 제시해야 한다. 또한 관련 기업의 기술개발을 유도할 뿐 아니라 전문 인력을 유인하고 확보해야 한다. 이를 위해서 2008년 60억 원 정도의 국가 연구개발비로는 성과를 기대하기 어려우며 앞으로 국가차원에서 전폭적인 연구비 증가가 필요하다.

기술개발과 전문 인력 유입은 국내 시장을 활성화 시키며 많은 경험을 쌓아 경쟁력을 확보하므로 토양 정화사업이 환경복원의 차원을 넘어선 차세대 국가 경제 성장 동력사업이 될 것을 확신한다.

(원고 접수일 2008년 4월 22일)