자원환경지질, 제37권, 제1호, 99-106, 2004
Econ. Environ. Geol., 37(1), 99-106, 2004

금속광산지역 오염 토양/지하수의 복원기술 동향

김경웅*
광주과학기술원 환경공학과 지질환경 비소제어 연구실

Emerging Remediation Technologies for the Contaminated Soil/Groundwater in the Metal Mining Areas

Kyoung-Woong Kim*
Arsenic Geoenvironment Laboratory (NRL), Department of Environmental Science and Engineering, Kwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 500-712, Korea

Pollution reduction and/or control technology becomes one of the pressing post-semiconductor research field to lead an advanced industrial structure. Soil/groundwater remediation techniques may act as a core technology which will create many demands on pollution reduction areas. A plenty numbers of abandoned metal mines were left without any remediation action in Korea, and it may be potential sources of heavy metal and As contamination in the ecosystem. In order to bring this soil contamination to a settlement, the emerging soil/groundwater remediation techniques should be introduced. Main research topics in the United States and Europe move towards the clean remediation technology without any secondary impact and the feasible application of developing technique into the field sclae study. With these advantages, several soil/groundwater techniques such as electrokinetic soil processing, permeable reactive barrier, stabilization/solidification, biosorption, soil flusing with biosurfactant, bioleaching and phytoremediation will be summarized in this paper.

Key words : soil/groundwater remediation, heavy metal and As, clean technology

환경오염저감 및 제어기술은 환경/방재 기술분야로 포스트 반도체 주력산업의 고도화분야에 해당되며, 그 중 오염토양 및 지하수 복원기술은 앞으로 많은 수요가 예상되는 핵심기술이라 할 것이다. 국내의 경우 폐금속광산이 다수 존재하며 이로 인한 중금속 및 비소오염문제가 심각해지고 있는 시점에서 이를 복원하기 위한 최신기술의 동향을 알아보는 것이 필요할 것이다. 현재 이 분야의 선진국인 미국 및 유럽각국에서의 기술개발은 2차적인 오염을 유발하지 않을 청정기술의 개발과 개발기술의 현장적용에 초점이 맞추어 지고 있는 추세이다. 여기에 최근에 개발되어진 신기술중에 이러한 장점으로 인해 주목받고 있는 기술인 전기동력학 기술, 투수성 반응벽체기술, 고형화/안정화기술, 박테리아를 이용한 생체흡착기술, 박테리아를 이용한 용출기술, 식물정화기술을 소개하고자 한다.

주요어 : 환경오염 저감 및 제어기술, 중금속 및 비소, 청정기술

1. 서 론

환경오염저감 및 제어기술은 반도체를 뒤이을 50대 후보기술 중 주력산업의 고도화분야에 해당하며, 특히 오염토양/지하수의 복원기술은 국가기술지도(NTRM)상 핵심기술별 기술지도에서 제시된 자연재해 관련 기술개발 내용 중 지질환경내 유해원소재해에 의한 인명과 물적 피해의 예측·방지 및 차단·저감기술에 해당한다(국가과학기술위원회, 2002). 특히, 폐광지역의 토양 및 지하수의 중금속 및 비소오염은 유해원소에 의한 지질재해의 대표적인 사례중 하나로서 정확한 지질학적, 지구화학적 지식과 이론으로 조사 및 평가가 이루어져야 하며, 이를 바탕으로 오염 지질환경 처리 기법의 개발도 수행될 수 있을 것이다.

*Corresponding author: kwkim@kjist.ac.kr

산업폐수 등의 고농도 중금속에 대한 물리화학적 처리공정은 비교적 잘 정립되어있는 실정이나 지질환경에서 비교적 저농도로 광범위하게 발생하는 중금속오염의 처리기법 개발은 미비한 실정이다. 이러한 기술은 지질학적 및 지구화학적으로 중금속오염 발생가능 지역에 대해 토양 및 수계의 총함량 뿐만 아니라 존재형태등과 관계된 지구화학적 거동을 평가하여 수질오염 및 토양오염 기준치 미만으로 지질환경을 제어함을 목표로 한다. 이러한 목표에 기초하여 현재 유럽 및 미국등의 선진국에서는 2차 오염을 최소화하는 청정기술의 개발과 개발 기술의 현장 적용이 주 이슈가 되고 있으며, 본 논문에서는 이러한 장점을 가지고 있는 대표적인 기술들을 소개하고자 한다.

2. 본 문

2.1. 전기동력학 기술(Electrokinetic Soil Processing Technology)

전기동력학 기술은 수분을 함유하고 있는 토양이나 슬러지 등과 같은 다공질 매체에 수 mA/cm^2 정도의 낮은 직류전류를 공급해 주었을 때 일어나는 전기동력학적 현상들을 이용한 기술이다. 이렇게 낮은 직류전류를 공급해 줌으로써 매체 내에서 물리화학적 변화가 일어나면서 전기이동, 전기삼투, 물의 전기분해 등의 기작들이 복합적으로 작용하여 매체에 있는 오염 종들이 이동하여 제거된다. Fig. 1은 전기동력학 기술의 원리에 대해서 도식적으로 표현한 그림이다. 전기동력학 기술은 점토에서 점토질 토양과 같은 투수성이 낮은 토양에서 오염물질을 제거하는데 매우 효과적인 기술이다. 이 기술의 장점은 비교적 적은 운영비용과 중금속, 극성 또는 비극성의 유기물질, 방사성 물질 등과 같은 여러형태의 오염물질 제거에 적용할 수 있다는 것이다(Acar and Alshawabkeh, 1993; Hsu, 1997; Alshwabkeh *et al.*, 1999; Mulligan *et al.*, 2001; Virkutyte *et al.*, 2002).

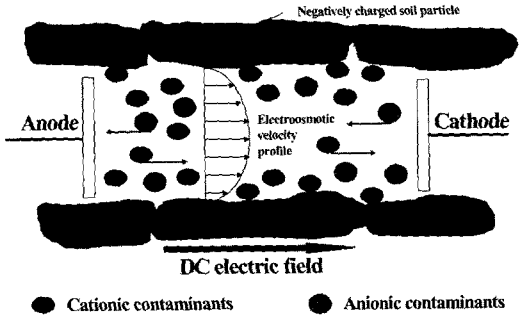

Fig. 1. Fundamental principle of electrokinetic soil processing technology (Acar and Alshawabkeh, 1993).

현재에는 카올리나이트, 광미, 슬러지 등과 같은 여러 매체로부터 다양한 형태의 오염물질을 전기동력학 기술을 이용하여 제거하는 많은 연구들이 수행되고 있으며, 그 결과 4일간 수행된 실험실 규모의 실험에서 납과 카드뮴의 제거효율은 카올리나이트와 광미에서 각각 75-85%와 50-70%를 얻을 수 있었다. 뿐만 아니라, 도시 하폐수 슬러지로부터 전기동력학 기술을 이용한 중금속 제거에 대한 파일럿 스케일의 연구에서는 중금속 오염물질의 제거효율이 중금속 종류와 존재형태에 의해 영향을 받지만, 네 종류의 중금속들(카드뮴, 크롬, 구리, 납)의 제거효율이 40-80% 정도로 나타났다(Kim *et al.*, 2002). 이러한 실험적인 연구는 도시 하폐수 슬러지에 존재하는 유해 중금속들을 제거함으로써 슬러지를 매립을 통하여 안전하게 처분하는데도 본 기술이 적용될 수 있다는 것을 증명하였고, 또한 아세트산과 citric산 등을 이용하여 본 기술의 효능을 향상시키게 되면 투수성이 낮은 토양으로부터 방사성 오염물질들을 제거하는데도 본 기술이 응용 가능하는 것을 실험실 규모의 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 아세트산에 의해서 향상된 전기동력학 기술을 이용하여 카올리나이트에서 우라늄과 스트론튬의 제거효율이 각각 85%와 90%로 나타났다(Kim *et al.*, 2003).

위에서 언급한 불투수성 매체에서 오염물질을 제거하는 전기동력학적 추출과 더불어 지금까지 전기동력학 기술이 다음과 같은 여러 환경문제에 응용되고 있다(Alshawabkeh and Acar, 1996; Hsu, 1997): (1) 전기영동을 이용하여 매우 높은 함수율을 갖는 슬러지 형태의 광미, 슬라임, 또는 슬러지로부터 고체입자들을 농집하는 탈수공정, (2) 투수성이 낮은 토양에 미생물, 영양분, 화학성분, 그리고 그라우트 등을 주입하는 전기동력학적 공정, (3) 매립지에서 라이너를 통한 유해물질 유출을 막기위한 전기동력학적 유체막 공정.

2.2. 투수성 반응벽체 기술(Permeable Reactive Barrier Technology)

투수성 반응벽체(Permeable Reactive Barrier: PRB)는 오염대가 존재하는 지반에 설치하여 지하수 오염대의 수리학적 흐름을 이용, 오염물질의 화학적 반응을 유도하여 오염물을 제거 하는 기술이다(Fig. 2). 반응벽체는 설계와 시공이 간단하고 양수처리법등의 현장 정화기술에 비해 경제적이며 후처리가 거의 필요 없고 유지관리가 용이한 기술이다(Cantrell and Kaplan, 1999).

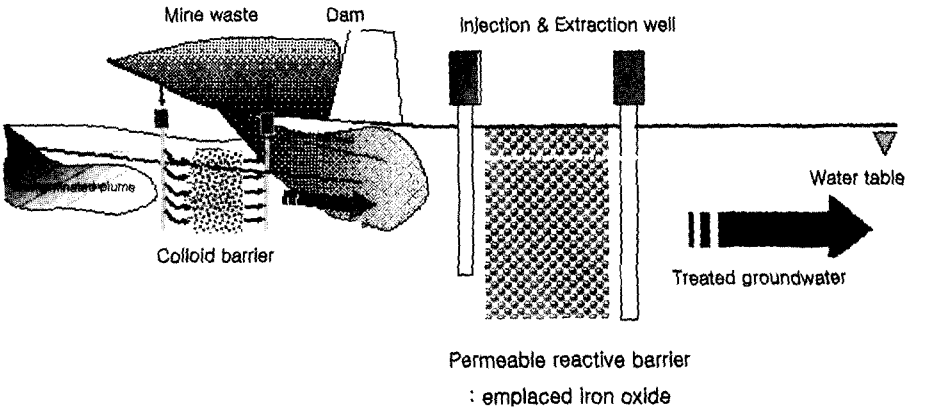

Fig. 2. Description of conceptual system for permeable reactive barrier around the mining area (Cantrell and Kaplan, 1999).

나노 크기입자를 반응물질로 하여 오염된 지역을 설정해서 광역적인 굴착 없이 지중 충진 할 수 있는 기술도 개발되고 있다(Ko *et al.*, 2002).

나노 크기 적철석 입자는 지하수의 산도나 침전물과량 발생 등의 물리화학적인 성질을 변화시키지 않고, 넓은 표면적을 이용하여 높은 반응성을 갖는다. 또한, 음의 표면전하를 띠는 토양입자에 양의 표면전하를 갖는 적철석 입자와의 정전기적 반응에 의해서 안정한 산화철 피복 모래를 형성할 수 있다. 특히, 철산화물의 흡착특성을 유지하며 모래의 투수성을 유지할 수 있는 적철석 피복 모래는 중성의 산도에서 이온강도 조절로 쉽게 제조할 수 있다. 이 충진 물질은 투수성 반응 벽체에 활용하기에 적합하며, 비소와 같은 오염물질을 흡착하여 안정한 화합물을 형성하는데 적철석이 활용 될 수 있다(Jain *et al.*, 1999).

반응벽체의 주된 벽체 물질형태는 적철석 피복 모래나 적철석 콜로이드이며, 비소의 제거효율을 살펴보기 위해서 컬럼 및 배치 실험도 수행되고 있다. 이때, 고려된 영향 인자는 음이온 경쟁 영향과 유동 환경에서의 제거 특성이었다. 비소 3가와 5가를 흡착제거시 공존 황산염 이온이 가장 큰 경쟁효과를 보였고, 탄산염 이온과 질산염이온은 상대적으로 낮은 경쟁 효과를 보였으나, 고농도의 탄산염과 질산염 이온이 존재시 비소 흡착의 방해 효과가 컸다. 유동적인 환경인 컬럼에서의 비소제거시 상대적으로 적철석 피복모래의 양이 충분히 투입되어야 음이온 경쟁 및 비소의 흡착능력을 향상 시킬 수 있다는 연구결과도 발표되었다.

특히, 국내 광산폐기물들중 광미는 미래의 기술 발달에 따라 자원화하여 사용할 수 있으므로, 격리저장하여 침출수의 발생으로 지하수의 오염을 근본적으로 막는 것이 필요하다. 따라서, 광미 및 폐광석등을 HDPE같은 지오멤브레인으로 차단시 유출 사고에 대비해서 충진물질들을 첨가하는 등의 조치가 필요하다. 또한, 일반 오염지역에서의 고비용의 철산화물질을 투입하는 것 보다 피복된 형태로 투입시 고효율 및 저비용을 유지할 수 있으며, 다음과 같은 기대효과를 가지고 있다.

- 반응벽체 설치시 광역적인 굴착없이 반응물질을 충진하는 고효율/저비용 기술의 활용
- 현재 가용한 양수처리같은 지하수 처리 시스템과 결합된 혁신적인 충진기술개발
- 설계지침 작성으로 설계 기준 및 시공의 기본 수립
- 나노 크기의 충진 물질을 지중에 주입함으로 투수성 유지등 체계적인 문제 파악

이러한 연구의 활용방안으로는 폐광산 일대 오염대의 확산 처리이외에도 불량매립지역의 지하수 침출수 처리, 군부대 지역의 지하수 처리, 농축산 밀집지역의 지하 침출수 처리 및 산업공단내 지하수 오염 처리가 될 수 있을 것이다.

2.3. 고형화/안정화 기술(Solidification/Stabilization Technology)

고형화/안정화 기법은 물리적, 화학적인 방법을 통해 독성물질과 오염물질의 유동성을 감소시키는 기술이다. 고형화는 오염물질의 용출을 물리적으로 차단하여 유동성을 감소시키고 조작이 용이하도록 물리적 특성을 변화시키는 공정이며, 안정화는 오염물질을 화학적으로 유동성이 적고 안정한 물질로 전환시키는 공정이다(Fig. 3).

고형화 기법은 주로 중금속으로 오염되어 있거나 유

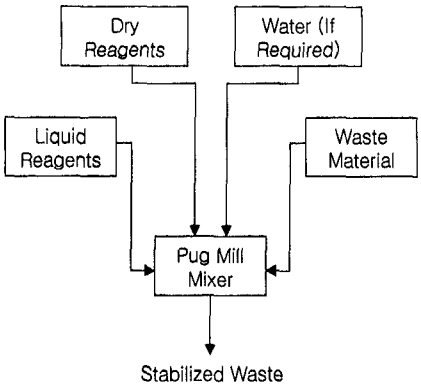

Fig. 3. Schematic diagram of a solidification/stabilization system.

기성 오염물의 방출이 주요문제로 고려되지 않는 폐기물에 대하여 적용이 가능하다. 중금속으로 오염된 토양이나 폐기물을 고형화하는 연구는 결합제와 첨가제에 따라 다양하게 진행되고 있다. 일반적으로 포틀랜드 시멘트와 포졸란 물질이 주로 결합제로 이용되며, 중금속의 용해도 감소효과를 높이기 위한 첨가제 및 점토 등의 무기성 흡착제 이용에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 고형화 처리의 장점으로는 In-situ, Ex-situ 모두 적용할 수 있다는 점, 상대적으로 처리비용이 저렴하다는 점, 다양한 오염물질을 동시에 처리할 수 있다는 점 등이 있으며, 단점으로는 단일 결합제로 모든 금속에 효과적일 수 없다는 점, 부수적인 희석을 제외하고는 금속 총함량의 감소는 없다는 점, 처리 후 부피 증가를 가져온다는 점 등이 있다(U.S. EPA, 1991).

화학적 안정화 방법은 산화-환원, 중화, 복합체, 이온교환, 침전 등의 반응을 통해 독성이 적고 용해도가 낮은 물질로 전환하거나 유동성을 감소시켜 오염의 확산을 억제하는 방법이다. 중금속으로 오염된 토양의 화학적 안정화 방법은 중금속을 함유한 폐수처리 기술에 기본을 두고 있다. 예를 들어 비소와 같이 5가일 때 이동성과 독성이 적은 물질은 3가 비소에서 5가 비소로 산화시키는 과정을 거쳐야 하며, 크롬의 경우 반대로 환원을 통해 6가 크롬을 3가 크롬으로 변환시킨다. 화학적 안정화 기법은 특히 단일 오염물의 경우 공정이 매우 단순하고 처리비가 저렴하다는 장점이 있지만 환원된 크롬이나 납, 수은 등을 함유한 폐기물의 산화는 독성이 있고 유독성이 강한 형태로 전환될 수 있으며, 알칼리 폐기물의 중화는 금속수산화물의 재용해로 유동성의 증가를 가져올 수 있다는 단점이 있다(U.S. EPA, 1988).

현재에는 비정질 철수산화물을 이용한 광미내 비소의 안정화 연구등이 수행되고 있으며(Kim *et al.*, 2003), 이 연구에 의하면 철수산화물이 생물수용성(bioavailable) 형태의 비소 안정화에 크게 기여하였고 안정화 효율은 투여한 철의 초기 농도, pH 등에 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 장기적 안정도 실험에서는 시간 경과에 따라 안정화 효과가 증가하는 것으로 나타났다.

2.4. 박테리아를 이용한 생체흡착기술(Bacterial Biosorption Technology)

여러 종류의 산업폐수 중에 존재하는 유독성 중금속은 적절한 처리 없이 방출될 경우 수계 및 토양환경을 심각하게 저해한다. 따라서 폐수로부터 중금속을 제거하기 위한 다양한 물리화학적 처리법이 개발되어 있다(Reynolds and Richards, 1996). 그러나 물리화학적 처리법은 고가의 투자 및 운전 비용이 요구되고 유독성 슬러지가 발생하는 등의 부작용이 나타나 최근에는 생체흡착법(biosorption)에 의한 중금속 제거에 대한 관심이 증대되고 있다(Fig. 4). 생체흡착법은 박테리아, 조류 및 효모 등의 미생물을 생체흡착제(biosorbent)로서 이용, 이들 표면에 중금속 이온을 흡착시켜 제거하는 기술을 말한다(Volesky and Holan, 1995). 이는

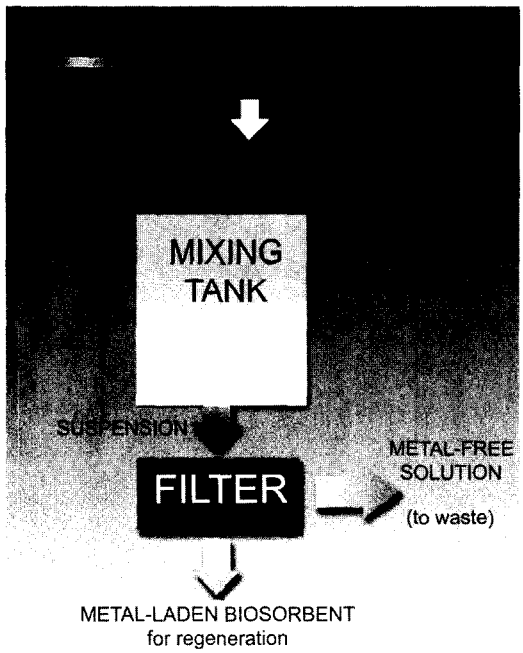

Fig. 4. Biosorption process using bacterial biosorbent for metal removal (Volesky, 1990).

저렴하고 운전이 용이하며 독성부산물 발생이 적고 높은 제거효율을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 금속에 따라 선택흡착(selectivity)이 가능한 등의 장점이 있다. 특히 박테리아는 중성 및 알칼리 pH 조건에서 표면에 carboxyl, phosphoryl, hydroxyl 등의 음전하 작용기가 분포하고 있어 중금속을 비롯한 용존 양이온을 쉽게 흡착할 수 있어 효과적인 흡착제로 사용될 수 있다 (Mullen *et al.*, 1989). 다양한 종류의 생체흡착제를 사용한 후 그 흡착량에 대한 비교 연구 등이 활발히 이루어지고 있으며, 산, 염기, 에탄올 등을 이용한 전처리 과정을 통해 생체흡착제에 대한 중금속 흡착량을 증가시켜 그 제거효율을 향상시키고자 하는 연구도 수행되고 있다. 그러나 이들 대부분의 연구는 일반적으로 단일금속의 흡착 특성에 관한 연구들로서 두 종류 이상의 금속이온이 포함된 다성분계에서의 흡착특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 실제 수환경에서와 같이 다양한 종류의 금속이온이 공존하면 단일로 존재할 때의 흡착거동과는 다른 결과를 보일 수 있다. 또한 다성분계에 대한 연구의 경우에도 같은 전자가를 가지는 금속의 흡착거동에 관한 연구가 일반적으로서 서로 다른 전자가를 갖는 금속이 공존할 경우의 흡착특성 연구는 극히 드문 형편이다.

생체흡착에 관한 연구로서 박테리아의 일종인 Pseudomonas aeruginosa에 대하여 Co(II), Ni(II), Cr(III) 이온 각각의 흡착특성에 대하여 살펴보고 이들이 용액 내에 공존하고 있을 때 나타나는 다성분계 금속 이온의 흡착특성에 관한 연구들이 수행되고 있다. 또한, 박테리아의 생장단계, 용액의 pH, 양이온의 공존 등의 요소가 중금속 흡착에 미치는 영향이 연구되어지며, 흡착특성 비교를 위해 다양한 조건으로 전처리한 박테리아를 대상으로 하여 그 흡착거동이 파악되고 있다. 이러한 실험결과를 바탕으로 생체 흡착기술을 이용하여 중금속으로 오염된 토양 및 지하수 처리에 관한 적용 가능한 최적화 모델을 설정하기 위한 연구들도 수행 중이다.

2.5. 박테리아를 이용한 용출기술(Bioleaching Technology)

중금속 및 비소의 지구화학적 순환에 관한 많은 연구를 통하여 일부 박테리아가 자연조건에서 중금속 및 비소의 전기화학종(species) 결정에 매우 중요한 역할을 한다는 것이 밝혀졌다. 현재 박테리아를 이용하여 비소로 오염된 자연상태의 토양으로부터 비소를 용출함으로써 오염토양을 복원할 수 있는 기제(mechanism)는 다음과 같이 크게 두 가지로 알려져 있다(Fig. 5).

첫째, 직접적인 박테리아의 대사작용에 의하여 비산염을 보다 이동도가 큰 아비산염으로 환원시키는 과정으로 박테리아는 이를 통하여 생장에 필요한 에너지를 얻거나 (dissimilatory) 비소의 독성을 감소시키기 위한 (detoxification) 활동을 하게 된다(Ahmann *et al.*, 1997). 둘째, 이화적 철산화물 환원박테리아(dissimilatory Fe(III) reducing bacteria)가 Fe(III)를 최종 전자수용체로 사용하며 철산화물을 용해하는 과정 중에 철산화물에 흡착된 형태의 비소가 동시에 용출되어 나오는 기제가 있다(Nickson *et al.*, 2000). 최근에는 이처럼 철 및 비소의 화학종을 변화시킬 수 있는 박테리아의 특수한 능력을 이용하여 비소로 오염된 토양으로부터 비소를 용출, 제거하는 기법에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

2.6. 식물 정화기술(Phytoremediation Technology)

식물정화법은 오염된 토양, 슬러지, 침전물과 지하수에 대해 오염물질의 제거, 분해 및 봉쇄등을 통해 현장에서 위해성 제거를 위해 살아있는 녹색식물을 직접적으로 사용하는 것을 말한다(USEPA, 1998). 이 방법은 생물학적 정화방법과는 달리 박테리아 대신 식물을 정

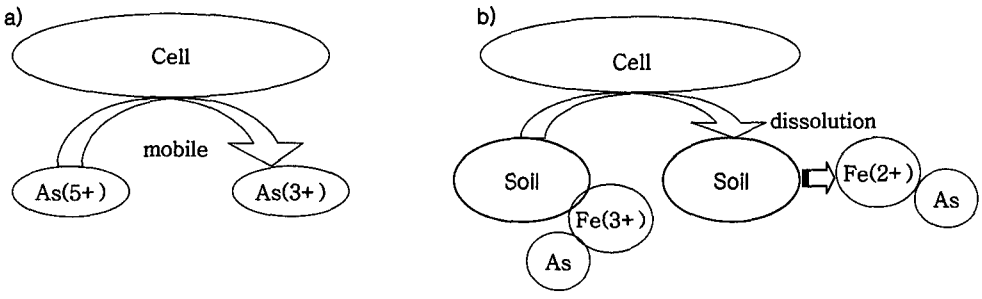

Fig. 5. Two microbial mechanisms to enhance the mobility of As (a) detoxification or dissimilatory reduction (b) reductive dissolution of Fe-oxides onto which As is adsorbe.

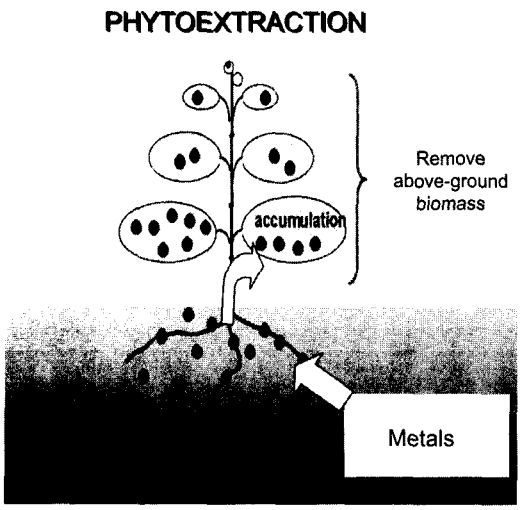

Fig. 6. Phytoextraction technology for removal of heavy metals in soils.

화공정에 사용하는 것으로 오염제거를 위해 현재 적용되고 있는 방법들에 대한 잠재적으로 가능한 대안이다.

다음에 열거된 방법들은 금속계 오염물질에 대해 가장 흔히 사용되는 식물정화기술의 종류들이다. 식물축적법(Phyroaccumulation)이라 불리기도 하는 식물추출법(Phyroextraction)은 식물 뿌리를 통해 식물의 지상쪽 부분으로 토양내 금속오염물질을 흡수시켜 이동시키는 것을 의미한다(USEPA, 1998). 식물추출법은 최초로 연구되어진 방법으로 가장 널리 사용되고 있으며 금속의 과축적(Hyperaccumulation)도 이 범주에 속한다(Fig. 6). 성장기간을 거쳐 식물은 추수되거나 소각되며 혹은 퇴비화 된다. 소각 후 그 재는 매립식 쓰레기로서 버려지지만 그 체적은 오염된 토양을 굴착하는 것에 비해 상당히 줄어든다. 소각 후 재로부터 식물을 이용해 채취한 금속을 재생 이용하는 것 또한 가능하다. 식물채광(Phytomining)이란 용어는 이 공정을 일컫는 것이다. 뿌리여과(Rhizofiltraion)는 식물이 뿌리를 통해 물질을 흡수하는 자연적인 능력을 이점으로 갖는다. 이 과정에서 오염물질은 뿌리를 둘러싼 용액에서 뿌리로 흡수되거나 혹은 뿌리 위에 흡착(침전)되어진다. 식물은 토양보다는 수중에서 뿌리와 함께 성장해 나가므로 오염된 유출수를 정화하는데 사용될 수 있다. 식물을 순응시키기 위해 뿌리조직이 잘 발달된 후 오염원으로 부터의 물이 식물의 수원(water source)으로 대체되며, 결과적으로 식물이 오염된 지역으로 이전되는 것이다. 식물이 오염물질로 포화 됨에 따라 식물은 채취되거나 제거된다. 해바라기(Helianthus annuus L.)는 우크라이나 체르노빌지역근처의 적용에서 보고된 바와 같이 연못 물내 방사성오염물질을 제거하는데 효과적으로 사용되었다. 식물뿌리는 수중에 존재하는 오염물질을 흡착하는 높은 표면적을 갖는 생여과재(Biofilter)로서 작용하였다. Jackson(1998)은 뿌리가 있는 수생 도관식물(vascular plant)내 금속 축적에 관한 이론적 틀에 관해 연구하여 침전물로부터 뿌리로의 흡수와 연이은 육상조직으로의 이동은 금속 이동에 관한 기본적 경로임을 보고하였다. 뿌리를 내린 거대식물의 금속농도는 일반적으로 결정격자에 붙어있는 금속을 배제한채 땅속 침전물 내 금속 농도에 비례한다는 결과도 발표되었다(Jackson, 1998). 식물휘발(Phytovolatisation)은 변형된 형태로 잎에서 배출되거나 휘발되는 셀레늄이나 수은과 같은 휘발성 금속의 흡수를 의미한다. 셀레늄은 저농도로서 식물성장에 필수적이며 갓(Indian mustard, Brassica juncea)과 같은 식물 특정 종에 의해 methyl selenate의 형태로 휘발된다. 식물안정화법(Phytostabilization)은 부식억제와 다량의 물의 증발산을 통해 폐기물 부지를 안정화시키는 것으로 Aitchison *et al.* (2000)은 금속오염물질을 식물로 안정화할 수 있는 잡종 포플라의 능력을 조사하였다

토양과 수계이외에도 식물정화법은 오염된 공기를 정화하는 방법이 될 수도 있다. 높은 활성을 갖는 식물-박테리아 군집의 실내조건 하에서 휘발성 오염물질을 정화하기 위해 식물을 사용하는 것은 이용이 잦은 사무실, 흡연실 및 거주지역내 공기를 정화하기 위해 사용될 수 있다(Grosse *et al.,* 2000). 또한 식물은 오염물질의 추가적 유입으로부터 지역을 보호하는 벽체를 형성하거나 복원되지 않은 혹은 부분적으로 복원된 토양에 대한 덮개로써 사용 될 수 있다.

식물정화법은 비용효율이 높은 현장복원방법으로 간주된다. 현재 우라늄오염토양은 용출 혹은 킬레이트 반응처리를 위해 오염부지를 일단 외부로 옮긴 후 다시 이전 부지로 되돌린다. 그러나 정화를 위해 다량의 토양을 운반하는 것은 환경적으로 파괴적일 뿐만 아니라 운송으로 인한 비용이 많이 든다. 운송은 또한 잠재적으로 해로운 금속을 입자상 물질로써 대기중으로 방출시키는 위험을 증가시킨다. 일부 산업체에서는 복원공정의 상대적으로 높은 비용을 이유로 추후 복원처리를 위해 단순히 오염토양을 적치하는 경향도 있다. 선택사항으로써 토양으로부터 금속을 다량 축적하는 식물의 재에서 금속을 재생 이용하는 것도 복원비용의 일부를 보상할 수 있을 것이다. 만일 재생이용이 여의치 않다면 적어도 식물소각의 적용은 오염물질의 체적을

감소시킬 수 있으며 비용과 폐기의 환경적 영향을 상당히 감소시킬 수 있을 것이다(Hossner *et al.*, 1998). 미국 EPA는 식물정화법이 기존의 처리공정비용의 최대 50-80%까지 절약할 수 있다고 추정하고 있다(USEPA, 1998). 저비용 이외에도 식물정화법은 또 다른 이점을 가지고 있는데, 영구적인 처리해법, 즉 영구적으로 오염물질을 매체에서 제거할 수 있으며 부지를 과도하게 교란시키지 않고도 적용할 수 있다. 이 방법은 식물이 일반적으로 가장 생체이용이 가능한 오염물질 부분을 복원할 수 있기 때문에 토양 혹은 대수층내에 비용출되는 부분들이 존재할 수 있도록 허용하는 위해성 기반 복원 접근방법으로서 양립 가능하다. 또한 식물정화법은 방사성원소나 중금속을 제거하고 혼합된 폐기물 부지의 유기오염물질을 분해하는 다용도 기술이 될 수 있다. 혼합 폐기물이란 유해한 특성을 나타내며 유해 폐기물로서 폐기되어야 하고 저농도 방사성 폐기물로서 폐기를 요구할 충분한 양의 방사성 원소를 포함한 폐기물을 의미한다. 이외에도 식물정화법은 심미적인 거부감을 보다 줄일 수 있으며 대중에게 더욱 용이하게 받아들여질 수 있다는 최대의 장점을 가지고 있다.

3. 결 론

중금속 및 비소로 오염된 토양을 복원하기 위하여 현재까지도 물리화학적인 방법으로 주로 고형화/안정화(solidification/stabilization) 기술, 강산을 이용한 용출(acid leaching) 처리방법이나 토양 세척/세정법이 많이 적용되었으나 현재의 추세로는 저비용, 무동력(passive) 기술인 투수성 반응벽체 기술, 현장 처리기술로 2차 오염이 상대적으로 적은 전기동력학적 기술이 널리 개발되어 지고 있다. 또 다른 추세로는 미생물을 이용한 처리방법으로 박테리아를 이용한 생체흡착기술 및 용출기술이 있으며, 식물을 이용한 처리기술도 활발한 연구가 진행되고 있다.

사 사

본 논문은 과학기술부 한국과학기술기획평가원에서 지원하는 국가지정연구실 사업(지질환경 비소제어 연구실)과 광주과학기술원의 기관고유 사업에 의해 지원받아 수행된 연구 내용중 일부이다. 저자는 본 논문의 작성에 도움을 준 이종운교수, 김주용박사, 김순오박사, 고일원박사와 신경희, 고은정, 강소영, 이상우, 장페이춘, 최은영에게 감사를 표한다.

참고문헌

국가과학기술위원회 (2002) 국가기술지도. 대한민국.

Acar, Y.B. and Alshawabkeh, A,N. (1993) Principles of electrokinetic remediation. Environ. Sci. and Technol., v. 27, p. 2638-2647.

Ahmann, D., Krumholz, L., Hemond, H., Lovely, D. and Morel, F. (1997) Microbial mobilization of arsenic from sediments of the Abergona waershed. Environ. Sci. and Technol., v. 31, p. 2923-2930.

Aitchison, E.W., Kelley, S.L. Alvarez, J.J. and Schnoor, J.L. (2000) Phytoremediation of 1,4-dioxin by hybrid poplar tress. Water Environment Research, v. 72, p. 313-321.

Alshawabkeh, A,N. and Acar, Y.B. (1996) Electrokinetic remediation. II: Theoretical model. J. Geotech. Eng., v. 122, p. 186-196.

Alshawabkeh, A.N., Yeung, A.T., and Bricka, M.R. (1999) Practical aspects of in-situ electrokinetic extraction. J. Environ. Eng., v. 125, p. 27-35.

Cantrell, K.J. and Kaplan, D.I. (1997) Zero-valent iron for the in-situ remediation of selected metals in groundwater. J. of Environ. Eng., v. 123, p. 499-505.

Grosse, W., Stuhlfauth-Roisch, U. Cheng, S. and Vidakovic-Cifrek, Z. (2000) Strategies for selection in phytoremediation. Management Committee Meetings: Plant biotechnology for the removal of organic pollutants and toxic metals from wastewaters and contaminated sites, European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research (COST), Greece.

Hossner, L.R., Loeppert, R.H. Newton, R.J. Szaniszlo and Attrep, M., Jr. (1998). Literature Review: Phytoaccumulation of Chromium, Uranium, and Plutonium in Plant Systems. supported by the U.S. Dep. of Energy, Cooperative Agreement No. DEFC04-95AL85832, Amarillo National Resource Center for Plutonium, Amarillo, TX.

Hsu, C.N. (1997) Electrokinetic remediation of heavy metal contaminated soils. PhD dissertation, Texas A&M Univ., College station, Texas, USA.

Jackson, L.J. (1998) Paradigm of metal accumulation in rooted aquatic vascular plants. Sci. Tot. Environ., v. 219, p. 223-131.

Jain, A., Raven, K.P. and Loeppert, R.H. (1999) Arsenite and arsenate adsorption on ferryhydrite: surface charge reduction and net OH-release stoichiometry. Environ. Sci. and Technol., v. 33, p. 1179-1184.

Kim, K.H., Kim, S.O. Lee, C.W. Lee, M.H. and Kim, K.W. (2003) Electrokinetic processing for the removal of radionuclides in soils, Sep. Sci. and Technol., v. 28, p. 2137-2163.

Kim, J.Y., Davis, A.P. and Kim, K.W., (2003) Stabilization of available arsenic in highly contaminated mine tailings using iron : Environ. Sci. and Techol., v. 37, p. 189-195.

Kim, S.O., Moon, S.H. Kim, K.W. and Yun, S.T. (2002) Pilot scale study on the ex situ electrokinetic removal of heavy metals from municipal wastewater sludges, Water Research, v. 36, p. 4765-4774.

Korte, N.E. and Fernando, Q. (1991) A review of arsenic in ground water. Crit. Rev. Environ. Control, v. 21, p. 1-39.

Ko, I.W., Kim, J.Y. and Kim, K.W. (2002) Colloid barrier formation by nanoscale hematite particles. 4th Int'l Symp. on AEM, Cheju, Korea.

Lien, H.-L. and Zhang,W.-X. (2001) Nanoscale iron particles for complete reduction of chlorinated ethane. Colloids Surface. v. 191, p. 97-105.

Mulligan, C.N., Yong, R.N. and Gibbs, B.F. (2001) Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. Engrg. Geology, v. 60, p. 193-207.

Mullen, M.D., Wolf, D.C. Ferris, F.G. Beveridge, T.J. Flemming, C.A. and Bailey, G.W. (1989) Bacterial sorption of heavy metals, Appl. Environ. Microbiol., v. 55, p. 3143-3149.

Newman, D.K., Ahmann, D. and Morel, F.M.M. (1998) A brief review of microbial arsenate reduction. Geomicrobiology, v. 15, p. 255-268.

Nickson, R.T., McAtrhur, J.M. Ravenscroft, P. Burgess, W. G. and Ahmed, K.M. (2000) Mechanism of arsenic release to groundwater, Bangladesh and West Bengal. Applied Geochem., v. 15, p. 403-413.

Reynolds, T.D. and Richards, P.A. (1996) Unit operations and processes in environmental engineering, PWS Pub. Co., Boston.

U.S.EPA (1988) Technology screening guide for contaminated surface soils, EPA/540/2-88/004.

U.S.EPA (1991) Superfund Engineering Issue: Treatment of lead-contaminated soils, EPA/540/2-91/009.

U.S.EPA (1998) A Citizen's Guide to Phytoremediation. Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G), EPA 542-F-98-011.

Virkutyte, J., Sillanpaa, M. and Latostenmaa, P. (2002). Electrokinetic soil remediation-critical overview. Sci. Total Environ., v. 289, p. 197-121.

Volesky, B. (1990) Removal and recovery of heavy metals by biosorption. In: Volesky B., (ed.) Biosorption of Heavy Metals, CRC press, Boca Raton, p. 7-44.

Volesky, B. and Holan, Z.R. (1995). Biosorption of heavy metals, Biotechnol. Prog., v. 11, p. 235-250.

2003년 11월 24일 원고접수, 2004년 1월 30일 게재승인.