

## 국내 오염토양 복원 현황과 기술 동향

양지원<sup>†</sup> · 이유진

한국과학기술원 생명화학공학과  
305-701 대전시 유성구 구성동 373-1  
(2007년 6월 5일 접수, 2007년 6월 6일 채택)

## Status of Soil Remediation and Technology Development in Korea

Ji-Won Yang<sup>†</sup> and You-Jin Lee

Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST),  
373-1, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea  
(Received 5 June 2007; accepted 6 June 2007)

### 요 약

국내의 평균적인 토양오염도는 매년 증가하고 있으며, 오염물질의 지속성 및 잔류성이 큰 토양오염의 특성상 이를 복원하기 위해서는 막대한 비용이 소모될 것으로 추정된다. 우리나라에서는 토양 오염에 대한 사회적 관심이 증가함에 따라 1990년대 중반부터 토양 환경 관리와 복원을 위해 정책적으로 복원 기술의 개발과 오염토양 복원 사업을 추진하고 있다. 오염토양 복원 기술은 처리 위치별로 원위치 기술과 비원위치 기술로 나뉘며, 오염원의 제거방법에 따라 생물학적, 물리화학적, 열적 기술로 분류할 수 있다. 국내에서는 군부대 및 철도청 부지, 소규모의 유류 오염 지역에 대해 복원 사업을 실시한 사례가 대부분이며 석유화학 단지내의 오염 등은 회사 자체에서 내부적으로 처리하고 있어 일반에 공개되지는 않고 있지만 그 규모는 상당한 것으로 추산되고 있다. 대부분의 복원사업에는 가장 경제성이 입증된 토양증기추출법, 생물학적 통풍법과 같은 원위치 정화기술이 사용되었다. 최근에는 첨단 기술을 도입하여 환경친화적 토양 복원 기술을 개발하려는 연구가 진행 중이며, 이러한 연구의 예로서 나노 기술과 분자 생물학적 기법을 이용한 복원 기술 개발, 개별 기술의 한계를 극복하기 위한 통합기술 개발 등이 있다. 효율적인 오염토양의 복원을 위해서는 오염물질과 오염부지의 특성을 고려하여 연구 대상 기술의 현장 적용성을 높여야 하며, 무엇보다 토양에 대한 인식 변화와 환경 개선을 위한 지속적인 노력이 필요하다.

**Abstract** – Soil contamination in Korea has been accelerated every year. Because of their persistence and cumulative tendency in the environment, soil contaminants have potential long-term environmental and health concerns and it is estimated to cost enormous expense for clean-up. Korea government has legislated the law on conservation of soil environment in mid 1990s, and managed and treated hazardous wastes in contaminated sites as a remediation policy since then. Soil remediation technologies are classified into in-situ/ex-situ or biological/physico-chemical/thermal processes according to applied places or treatment methods, respectively. In Korea, clean-up of polluted sites has been mostly carried out at military areas, railroad-related sites and small-scale oil spilt sites. For these cases, in-situ remediation technologies such as soil vapor extraction (SVE) and bioventing were mainly used. In recent days, an environmental-friendly soil remediation emerged as a new concept - for example, a new soil remediation process using nanotechnology or molecular biological study and an integrated process which can overcome the limitation of individual process. To have better applicability of remediation technologies, comprehensive understandings about the pollutants and soil characteristics and the suitable techniques are required to be investigated. Above all, development of environmental technologies based on the sustainability accompanied by public attention can improve soil environment in Korea.

**Key words:** Soil Contamination, Remediation Technology, Pollutant, Clean-up

### 1. 서 론

토양은 인간 및 동식물이 살아가는 터전으로서 생육에 있어 가장 기본이 되며, 물질 순환 과정에서 받아들인 많은 종류의 유해 성분

을 흡착, 고정 또는 분해하는 정화 기능을 갖고 있다. 통상적으로는 평형 상태를 유지하고 있지만 그 정화 능력이 초과될 경우 정화 기능이 상실되어 오염이 진행된다. 특히 토양에서의 오염은 초기 단계에서 처리하지 못하면 광범위하게 확산될 수도 있으며 시간이 경과하면서 지하수 오염, 지표수 오염, 공기오염 등의 2차 오염을 야기하여 인체 및 생태계에 지속적으로 영향을 미칠 수 있다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: jwyang@kaist.ac.kr

토양은 일단 한 번 오염이 진행되면 정화 과정이 매우 복잡하고 어려우며 많은 비용이 소요되는 특성을 갖고 있다. 따라서 오염이 일어나지 않도록 예방하는 것이 가장 중요하며, 일단 오염된 토양에 대해서는 오염원의 형태에 따른 통합된 관리 및 효율적 정화 기술의 적용이 중요하다. 또한 토양은 고상(토양 입자), 액상(토양수분, 비수용성 액체), 기상(토양 공기)의 다양한 매질로 구성되어 있으므로 이러한 매질의 특성을 동시에 고려하여 토양 오염을 다루어야 한다.

토양오염에 대한 사회적 관심이 증가하고 오염토양의 복원 및 관리에 대한 필요성이 증대됨에 따라, 우리나라에서는 1995년 토양환경보전법을 제정하고 토양 오염 방지와 오염토양 복원에 대한 연구와 사업이 정책적으로 추진되어 왔다. 현재 16종의 토양오염물질이 지정·관리되고 있는데, 이를 추가하고 토지 이용 형태에 따른 오염 기준을 세분화하는 것이 검토되고 있다. 또한 전국적인 오염실태 파악을 위한 토양 측정망과 토양오염 유발시설 관리도 확대 실시하는 방안이 추진되고 있다. 이 밖에도 토양관련 전문기관 등록제도를 시행하고 오염토양 신고제도와 현장처리 제도를 도입하여 토양의 정화처리에 대한 방법과 절차를 개선하고 위해성평가를 도입하여 종합적이고 체계적인 토양환경 관리를 위한 노력이 진행 중이다[1].

이와 같이 토양환경보전법의 제정과 개정에 따른 노력을 통해 어느 정도 제도적 기반은 마련되었으나, 수질이나 대기 오염처럼 우리에게 직접적인 피해를 주지 않고 장기간에 걸쳐 간접적으로 나타나는 토양오염의 특성상 오염도는 점차 증가하고 있어 이를 복원하는 것이 시급하다. 우리나라에서는 1994년부터 정부차원에서 토양정화기술을 개발하기 시작하였으나, 1980년대부터 대규모의 복원사업이 시작된 선진국에 비해 아직까지 국내기술 수준은 크게 뒤떨어져 있으며 단순히 선진국의 기술을 도입하기 보다는 국내 지형과 오염특성에 맞는 기술 개발이 필요하다.

본고에서는 우리나라의 토양오염 현황과 복원사업의 사례에 대해 소개하고 현재의 복원기술 개발 동향에 대해 파악함으로써 추가적으로 오염토양의 복원을 위해 우리가 나아갈 방향에 대해 논의하고자 하였다.

## 2. 국내 토양오염 현황

주요 토양오염원 및 오염물질은 Table 1과 같다. 국내에서 기존의 토양오염 문제는 광산지역의 중금속 오염이 중심이었으나, 최근에는 첨단산업으로부터 배출되는 유기화합물에 의한 오염이 문제가 되고 있다. 토양 내에서 이들은 물리화학적 특성과 이동성에 따라 다른 거동을 보이는데, 중금속의 경우는 주로 토양 표토층에 분포하면서 문제가 되고 있으며, 유기화합물은 토양 심층부 및 지하수

층에까지 분포하면서 토양 및 지하수를 오염시키고 있는 것으로 나타났다[2].

우리나라에서는 중금속 6종(카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가 크롬)과 유류성분(BTEX(benzene, toluene, ethylbenzene, xylene)을 포함한 총석유계탄화수소인 TPH(total petroleum hydrocarbons)), 유기인 화합물, PCB(polychlorinated biphenyls), 페놀류, 시안화합물의 11개 항목이 최초로 토양오염 물질로서 지정되었고 그 후 몇 차례의 개정을 거쳐 현재는 니켈, 아연, 불소화합물, TCE(trichloroethylene), PCE(tetrachloroethylene) 등을 포함하여 16종이 지정되어 관리되고 있다.

환경부에서는 전국 토양에 대한 오염 추세를 파악하고 오염 우려지역에 대한 오염실태를 조사하여 토양오염을 예방하고 오염토양을 정화하는 등 토양보전 대책을 수립하기 위한 기초자료로 활용하기 위하여 토양 측정망을 운영하고 토양오염 실태조사를 실시하고 있다. 2005년 국내 토양측정망 및 실태조사 결과, 전반적으로 전국 평균 토양오염도는 토양오염 우려기준을 초과하지 않았으나, 2001년도에 신규로 지정된 Ni, Zn, F가 비교적 높게 나타났다. 특히, 조사 지점 3,902지점 중, 56지점(1.4%)에서 토양오염 우려기준을 초과하였는데, 오염물질 별로는 Ni 19지점, Cu 17지점, Zn 12지점, As 9지점 등 중금속이 차지하는 비율이 높은 것으로 나타났으며, 이 밖에도 TPH 3지점, BTEX 2지점이 우려기준을 초과하였다[3].

그러나 토양오염은 오염토양이 지하수와 접하지 않는 한 이동성이 거의 없어 인근지역의 오염도를 측정하여도 오염의 개연성이 확인되지 않는 경우가 많으므로 실제 토양오염도는 더 심각할 것으로 추정된다. 토양오염을 유발할 가능성이 있는 시설 및 부지로서 폐기물 매립지, 유류 및 유해화학물질 저장시설, 광산지역, 과거 군부대 주둔지역을 들 수 있는데, 폐기물 매립지의 경우 사용이 종료된 매립지중 81.6%에서 침출수가 처리되고 있지 않으며, 지하저장 유류시설의 경우에는 세계적으로 약 23%가 부식에 의한 누출사고가 발생하는 것으로 알려져 있다[4]. 또한 현재까지 조사된 29개소의 주한 미군 기지 중 26개소(약 90%)가 장기간 군용차량 운용 등에 의해 오염된 것으로 확인되었으며 우리나라 군부대의 오염은 이보다 더 심각한 것으로 추정된다[5]. 이와 같이 각 시설의 평균적인 토양오염 가능성을 이용하여 추정해 볼 때, 국내 토양오염 시설 및 지역은 2,432~7,427개소 이상이며, 이 지역의 면적은 7,649~7,958 ha 이상일 것으로 예상된다[4]. 그리고 이 수치에는 산업시설지역의 토양오염은 포함되지 않고 있어 전국의 토양오염도는 이보다 훨씬 상회할 것으로 보고 있다.

산업화와 공업화가 점점 가속화됨에 따라 국내 토양오염도는 매년 증가하고 있으며, 2002~2005 토양·지하수 오염도 자료를 바탕으로 전망한 결과 2015년과 2020년에는 오염도가 더욱 증가될 것

Table 1. Soil pollutants and pollution sources

Pollution sources	Origin of pollution	Pollutants
Refining and storage of petroleum hydrocarbons	Corrosion and leakage of pipes and storage tanks	BTEX, TPHs, PAHs, PCP etc.
Storage tanks of toxic chemicals	Corrosion and leakage of pipes and storage tanks	VOCs, PAHs etc.
Industrial area	Corrosion and leakage of pipes and storage tanks	TPHs, chlorinated organic compounds (TCE, PCE, 1,1,1-TCE etc.), Raw chemicals (Toluene, Phenol etc.), heavy metals (Cd, Pb, Cr <sup>6+</sup> , As, Hg etc.)
Landfill site	Landfill leakage	Organic compounds, heavy metals, VOCs etc.
Incineration plant	Exhaust gas, incineration ash	Dioxin, PAHs heavy metals (Pb, Cd etc.)
Abandoned mines	Mine tailing, mine water	Mine tailing: heavy metals Mine water: heavy metals, acid wastewater
Military site	landfill, oil leakage, training field	BTEX, PAHs, heavy metals etc.

으로 예상된다[5]. 이를 복원하기 위해서는 이전 미군기지 부지 오염토양 및 지하수 정화에만 최소 5,000억 원의 비용이 소요될 것으로 추산되는 등[5] 최소 8,062억 원~2조 1,395억 원의 비용이 소요될 것으로 예측된다[4]. 따라서 이들을 효과적으로 관리·복원하기 위한 정책적 뒷받침과 기술 개발이 시급한 실정이다.

### 3. 복원기술의 종류 및 특성

오염토양 복원기술의 종류는 매우 다양하며, 대표적인 오염토양 복원 기술과 분류는 Table 2와 같다. 복원 기술은 크게 오염토양의 처리 위치에 따라 원위치(in-situ)와 비원위치(ex-situ) 기술로 나누어지며, 단순히 오염의 확산을 방지하기 위한 오염물질 차폐기술과 오염물질을 제거하는 기술로 구분된다.

비원위치 정화기술은 오염토양을 굴착하여 이동시켜 처리하는 기술로서 처리 공정의 관리 및 효율 평가가 용이하나, 굴착과 이동에 많은 비용이 소요되며 굴착과정에서 지반환경 교란을 야기시켜 오염의 확산을 유발할 가능성이 있다. 이에 비해 원위치 기술은 오염토양을 현장에서 직접 처리하는 기술로서 주변환경으로 오염물질이 노출될 가능성이 적고 비용 또한 비원위치 기술에 비해 저렴한 편이다. 그러나 현장 토양의 불균질성에 의해 정화 효율이 제한될 수 있으므로 면밀한 부지 평가와 모니터링 기술이 필요하다.

이들 기술은 오염원의 제거방법에 따라 생물학적, 물리화학적, 열적 기술로 분류할 수 있다. 열적 처리기술은 통제된 환경에서 토양을 고온에 노출시켜 소각이나 열분해를 통해 토양 중에 함유되어

있는 유해물질을 분해시키도록 고안된 기술이다. 물질의 직접 연소에 의한 열처리(소각, 800~1,200 °C)와 간접 연소에 의한 열처리(열분해, 400~800 °C)의 두 가지 형태로 구분된다. 열적 기술의 처리효율에 영향을 미치는 인자로는 수분 함량, 회분 함량 등의 물리적 특성과 대상오염물질의 화학적 특성 등이 있다. 본 기술은 높은 정화 효율을 가지며 적용 범위가 넓은 장점이 있으나, 에너지 처리비용이 높고, 중금속의 경우에는 일정 온도에서 처리되지 않으며 고온에서 유리화되는 단점이 있다.

물리화학적 처리기술로는 물, 산 및 유기 용매, 계면활성제 등 추출용매나 증기를 이용하여 추출하거나 전기적 방법에 의해 오염원을 토양과 지하수에서 다른 매체로 이동시키는 방법, 화학적 산화/환원법에 의해 분해시키는 방법, 흡착/침전 등을 통해 별도로 분리·농축시키는 방법이 있다. 토양증기추출, 토양세정, 토양세척, 화학적 추출법 등 오염물의 추출 효율이 제거율을 결정하는 경우에는 대상 오염물의 물성(증기압, 용해도, 헨리상수, 분배계수 등)과 토양의 양이온 교환 능력, pH, 총유기탄소 함량, 입경분포, 점토 함량, 수분 함량 등이 효율에 영향을 미친다. 고형화 및 안정화 기술은 오염물질이 이동하지 못하도록 물리적으로 가두거나 첨가제와 오염물질의 화학반응에 의해 이동성을 감소시키는 방법으로서 대상 중금속과 고화제/안정화제의 물리화학적 특성이 고려되어야 한다.

생물학적 처리기술은 토양 미생물 활성화 또는 적정화시키거나 특별히 개발된 미생물을 첨가하고 생존 조건을 최적화시켜 유기화합물의 생분해를 촉진시키는 방법으로서 다른 기술에 비해 친환경적이며 경제적인 방법이다. 최근 들어 각각의 오염물을 분해할 수 있는 미생물 균주의 발견과 분해기작의 규명이 이루어지면서 발전속도가 빨라지고 있다. 그러나 복원 기간이 길고, 고농도의 독성 오염물에서는 효율이 제한되며 환경 조건의 변화에 민감한 단점이 있다.

대체로 오염물질의 농도가 높고 오염지역 규모가 작을 경우에는 열적 처리, 오염물질의 농도가 낮고 오염지역 규모가 클 경우는 생물학적 처리가 유리한 것으로 평가되며, 물리화학적 처리는 다양하게 적용되고 있다.

이러한 복원 방법은 오염물의 종류와 토질에 따라 적용되는 기술의 종류가 달라질 수 있으나, 대부분의 오염부지가 여러 종류의 오염물질에 의해 복합적으로 오염되어 있고, 한 가지의 기술 적용으로는 효율의 한계가 있다. 그러므로 이들을 단독으로 사용하기 보다는 복합적인 사용이 추천되며, 반드시 오염물의 성질과 부지의 특성을 고려하여 복원 기법을 선정하여야 한다.

### 4. 국내 오염토양 복원 현황

우리나라 토양 복원 사례의 대부분은 소규모의 유류오염 지역으로서 주유소 등 특정 토양오염 방지시설에서 경미한 누출사건이 발생하여 시정명령에 따라 복원한 경우이다. 국내에서는 오염토양의 복원을 촉진하기 위해 민간부분의 사업추진에 앞서 우선 공공기관의 부지에 대한 오염조사와 복원 사업을 활발히 추진하고 있으며 이에 따라 군부대 및 철도청 그리고 매립장 등에 대한 복원 사업이 진행되었다.

국내에서 가장 최초로 대규모로 수행되었던 부지는 부산 정비창(문현지구)으로 2000년 초 150억 원 규모의 정화사업이었다. 이와 더불어 2006년까지 H 사령부를 비롯하여 50억 원 미만의 사업들이 부분적으로 발주되었으며 2007년 초 원주 부지에 대해 120억 원 규

Table 2. Soil remediation technologies [6]

Class	Remediation technology	
In-situ treatment technology	Biological treatment	Bioventing
		Enhanced biodegradation
		Natural attenuation
		Phytoremediation
	Physical/chemical treatment	Chemical oxidation
		Electrokinetic separation
		Fracturing
		Soil flushing
		Soil vapor extraction
		Solidification/stabilization
	Thermal treatment	Thermal treatment
Ex-situ treatment technology	Biological treatment	Biopiles
		Landfarming
		Composting
		Slurry-phase biological treatment
	Physical/chemical treatment	Chemical extraction
		Chemical reduction/oxidation
		Dehalogenation
		Soil washing
		Separation
		Solidification/stabilization
	Thermal treatment	Hot gas decontamination
		Incineration
		Open burn/open detonation
		Pyrolysis
		Thermal desorption
Containment		Landfill cap
		Landfill cap enhancement
		Cut-off wall
Other treatment technology		Excavation
		Off-site disposal
		Retrieval

모의 정화공사가 발주되어 진행되고 있다. 철도청 부지의 경우에는 2003년 부산역사에 대해 65억 원 규모의 사업을 전자입찰로 수행하였으며 2005년에 인근 역사에 대해서도 105억 원 규모의 사업을 발주하여 복원이 진행되고 있다[7].

그 밖에 폐금속광산 주변지역의 토양오염방지사업을 1995년부터 실시하고 있으며, 민간부분의 자율적인 토양 복원을 추진하도록 유도하기 위해 5대 정유사와 자발적인 협약을 체결하여 저유소 등의 부지에서 복원이 이루어지고 있다.

#### 4-1. 부산 문현지구 토양복원 사례[8, 9]

부산시 남구 문현동 소재의 구 육군 제2 정비창 복원사업은 국내 최초의 공식적이고 최대규모의 정화 사업으로서 2001년부터 2003년까지 106,500 m<sup>2</sup>(약 32천 평)의 부지에 대해 150억 원 규모의 정화사업이 실시되었다(Fig. 1).

1996년 문현금유단지 조성을 위한 기반시설공사 시행 중, 토양 오염이 확인되어 건설 공사를 중지하고 정밀조사가 실시되었다. 오염원인 물질은 유류로서 TPH에 대해 전체 시료 중 52.5%가 토양오염 우려기준(2,000 mg/L)을 초과한 것으로 나타났으며, BTEX에 대해서도 7%가 우려기준을 초과하였다. 오염물질은 지표로부터 심도 5 m 이내에 분포하였으며 특히 2~3 m 심도의 토양이 심하게 오염되었다.

한편 지하에 매립된 폐유 및 폐기물 침출수의 지하수계 유입에 의해 지하수면 부근에 일부 부유 기름층(free oil layer-LNAPL)이 형성되는 등 지하수 시료에서도 유분이 검출되었으며, 지하수 시료의 80%에서 납(Pb)이 지하수 수질기준은 물론 폐수배출 허용기준을 크게 초과하여 검출되었다.

본 현장에서는 복원 공법 효율의 극대화를 위해 오염토양/비오염토양 구분하여 굴착/야적으로 처리오염토양을 극소화하고, 굴착/야적시부터 고농도/저농도별, 토양성상별로 오염토양을 구분하며, 야적기간 중 바이오 파일법으로 사전 저감 후 처리하는 공법을 적용하였다.

본 부지에는 토양경작법, 열탈착공법, 바이오 파일법의 3가지 복원 기술이 적용되었다. 토양경작법의 경우 오염 농도가 낮고, 점토 성분이 적은 토양을 대상으로 하였다. 일반적인 토양경작법의 적용을 위해서는 탄화수소 분해균이 10<sup>6</sup> CFU/g 이상, 토양 pH는 6~8 범위이나, 본 현장은 9.8×10<sup>3</sup>~6.0×10<sup>5</sup> CFU/g, pH 5.3~6.5로서 처리 속도를 향상시키기 위해 pH 조절제와 미생물을 투여하고 자동화 온실을 이용하여 온도와 수분함량 등을 조절하였다.

윤활유 등으로 오염되어 토양경작법으로 처리효율이 낮은 토양과 상대적으로 고농도로 오염된 토양에 대해서는 열탈착공법이 적용되었다. 사용된 열탈착 장비는 시간당 7~20 톤(평균 18 톤)의 토양이

처리 가능하며, 열탈착기와 열산화기의 온도는 각각 800, 900 °C로서 탄소 40(C40)까지 범위의 유류에 대해 55,000 ppm까지 처리할 수 있었다.

야적기간(평균 8개월) 중에도 저감효과 극대화하기 위해 바이오 파일법이 적용되었는데, 미생물, 영양분, pH 조절제, 수분 투여로 최대효율 유지하고 야적장 내 배출가스의 2차 오염 최소화를 위해 방수덮개, 발생가스 포집처리, 침출수 집수처리 시스템이 설치되었다.

이와 같은 복원 기술의 적용 결과, 2003년 6월 기준으로 행정권 고기준 대비 TPH 평균 잔류는 33.9%(271/800 mg/kg), 토양환경보전법의 규제대상 우려기준 대비 약 13.5%(271/2,000 mg/kg)로서 행정권고 목표기준을 달성하였으며 지하수 조사 결과에서도 자연수 수준으로 정화되어 성공적 성과를 나타내었다.

#### 4-2. 폐광주변 중금속 오염토양 처리

폐금속 광산 주변지역은 주로 1920~1930년대 이후 개발되어 대부분 방치된 상태이며 채련과정에서 발생하는 광미의 유실, 갱내수 유출 등으로 주변농경지 등 토양이 중금속에 오염되고 있다. 이에 대응하기 위해 환경부에서는 오염 우려가 큰 158개 광산을 중점 관리하고 있으며 오염도가 높은 광산에 대해 우선적으로 폐금속광산 주변지역 토양오염 방지사업을 실시하고 있다. 1995년 이후 2003년 말까지 25개 광산에 대해 총사업비 360억 원 규모의 방지사업을 추진하였다. 그러나 전체 폐광산의 수에 비해 복원 사업이 진행 비율은 비교적 낮은 실정이다[4].

가학광산은 경기 광명시에 위치한 총 연장 7.83 km의 광산으로서 1995년부터 3,841백만 원을 투입하여 시범적으로 복원 사업을 실시하였다. 주변 지역에서 카드뮴, 아연, 납, 수은 등의 중금속 오염이 심각한 것으로 나타났는데, 특히 카드뮴과 아연은 각각 우려기준의 최고 17배와 8배에 달하는 것으로 조사되었다. 이에 대해 오염원의 유실을 방지하는 시설의 설치, 하천 저질토의 준설, 농경지에 대한 객토, 토양 개량제 사용 등 오염된 토양을 개선하여 폐광 주변지역의 농산물과 인체 피해를 예방하는 사전효과를 가져왔다[9].

그러나 이러한 폐광주변 지역의 오염 방지사업의 내용을 살펴보면, 갱도폐쇄, 매립처리장 조성, 차수공사, 광재, 오염토양 및 건축 폐기물처리, 유출수 처리시설 설치, 사면보호공사, 우수배제공사, 농수로 정비, 오염토양 처리, 도로공사, 식재, 조경공사, 준설공사 등으로[10] 오염원인 물질의 근본적인 처리보다는 단순 토목공사 차원의 작업만 행해지고 있어서 지하수로 중금속이 용출될 가능성이 여전히 존재하는 등 문제점이 지적되고 있다.

국내에서 중금속 오염 토양을 처리하기 위해 시멘트, 황화나트륨, 황화수소나트륨 등을 이용한 고형화/안정화 기법, 염화 제2 철과 과산화수소수를 이용한 비소의 불용화, 투수성 반응벽체 기술, 동전기 공법 등이 실험실 수준 또는 파일럿 규모로 시도되고 있으나[11] 아직 이들을 적용한 복원 사례는 없으며, 현장 적용을 위해서는 더 많은 실증연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

### 5. 오염토양 복원기술의 최신 연구 동향

우리나라에서 2000년 이후 토양정화를 실시한 434개의 부지에 대해 적용한 복원기술의 현황은 Fig. 2와 같다. 주로 토양증기추출법과 생물학적 통풍법과 같은 원위치 정화기술이 대부분을 차지하



Fig. 1. MoonHyun remediation site in Busan.

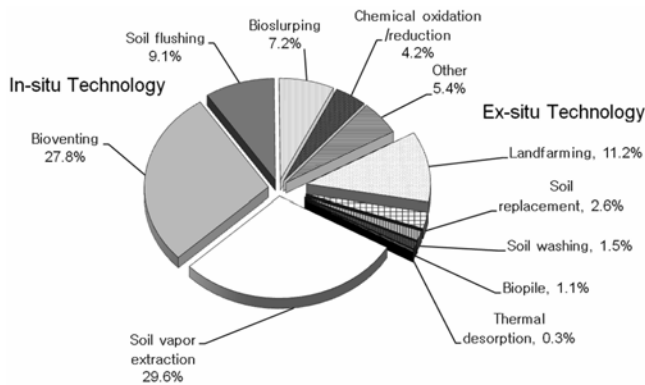


Fig. 2. Soil remediation technologies applied in Korea (2000~2006).

고 있는데(83.3%), 이는 정화비용이 상대적으로 저렴한 원위치 기술이 선호되는 경향을 보여주는 것이다. 그러나 원위치 공법의 효율이 제한되는 점토질 토양에 대해서는 비원위치 기술을 적용하려는 경향도 나타나며[7], 이를 해결하기 위해 저투수성 토양과 불균질한 토질에 대한 효율 향상 대책이 요구되는 실정이다.

또한 열적 처리보다는 물리화학적 처리기술의 사용 빈도가 점차 많아지고 있는 추세이며, 고화처리, 열탈착처리, 소각처리기술 등 에너지 소모가 많고 2차 대기오염을 유발할 가능성이 있는 기술의 이용도는 낮아지거나 정체되고 있다. 굴착처리, 차폐처리, 고화처리기술 등의 점유율이 낮아지고 있는데, 이는 가능한한 오염물을 완전히 제거하여 잔재물을 줄이는 방향으로 토양정화기술이 발전하고 있음을 의미한다[12].

최근 유럽 및 미국 등의 선진국에서는 2차 오염을 최소화하는 청정 기술의 개발과 개발 기술의 현장 적용에 초점을 맞추는 추세이다 [14].

이는 우리나라에서도 마찬가지로 오염의 확산이나 부가적인 환경 훼손이 없는 환경친화적 토양 복원기술 개발에 대한 연구가 진행 중이다. 또한 나노 기술(NT)과 생물 기술 (BT) 등의 첨단 기술을 환경 기술에 도입하여 융합기술을 개발하려는 시도가 활발히 진행되고 있다. 대상 오염 물질로는 기존의 중금속과 유류 외에 새로운 토양오염의 규제항목으로 추가된 유기성 화합물인 PCE 및 TCE와 중금속의 일부 항목 등에 대해 다양한 복원 기술 개발이 시도되고 있다. 여기서는 최근의 연구 동향을 이해할 수 있는 대표적인 복원 기술들에 대해 소개하고자 한다.

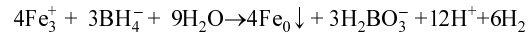
### 5-1. 나노 기술을 적용한 토양/지하수 오염물질 제거

1~100 nm 크기의 단일 나노 입자는 같은 물질의 벌크 재료와 다른 특이한 전자적, 화학적, 기계적 특성을 가진다. 이러한 나노 입자를 조작, 분석하고 제어하는 나노 기술은 최근 다양한 산업 분야에서 응용되어 기존의 기술을 획기적으로 향상시킬 수 있는 기술로서 주목 받고 있다.

나노 입자나 나노 구조의 물질은 기존의 마이크로 크기의 물질에 비해 표면적이 증대되어 오염물질에 대한 흡착 성능과 반응성이 크게 향상되므로, 환경 분야에서도 이를 이용하여 토양 및 지하수 내 오염물질을 효율적으로 제거하고 기존 복원 기술의 효율을 높이려는 연구가 진행되고 있다. 이들을 원위치 토양 정화에 적용할 때는 나노 입자를 포함한 반응 구역(reactive zone)을 설치하고 상대적으로 고정시켜 적용하거나, 토양 공극을 통해 나노 입자가 오염지역을 이동하도록 흐름을 형성시키는 방법이 이용된다. 대표적인 나노

입자로는 나노 영가철, 비이온성 양친성 폴리우레탄, alumina-supported noble metal 등이 있으며 이 중 나노 영가철을 이용한 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다[15].

나노 영가철은 화학적으로 다음과 같은 메커니즘에 의해 제조된다[16].



나노 영가철의 높은 반응성은 할로겐화 유기용제를 효과적으로 제거할 수 있는 것으로 보고되고 있다. TCE, 1,1,1-trichloroethane 등의 할로겐화 유기용제는 나노 영가철로부터 전자를 공급받아  $\alpha$ -elimination,  $\beta$ -elimination, hydrogenolysis, hydrogenation 등의 경로를 통해 탈염소화 반응이 일어나 ethane 등과 같은 무해한 물질로 최종 분해된다[17].

최근에는 영가철을 이용한 다양한 중금속의 제거에 대한 연구가 수행되고 있다. Cr(VI)와 Pb(II)는 영가철과 반응하여 각각 Cr(III)과 Pb(0)로 환원되는데, 이는 마이크로 사이즈의 영가철에 비해 나노 영가철을 이용할 경우 30배 이상 우수한 제거 효율을 보이는 것으로 보고되었다[18]. 국내에서도 지하수 중에 포함되어 있는 As(III)와 As(V)에 대해 나노 영가철을 이용하여 흡착, 제거하는 연구를 진행하여 기존의 영가철에 비해 1,000배 이상 높은 반응 속도를 확인하였다. 이러한 반응은 pH 4~9의 범위에서 효과적이며,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{H}_4\text{SiO}_4^0$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ 가 경쟁이온으로 존재할 경우에는 반응속도가 저하될 수도 있음을 발견하였다[19].

또한 나노 영가철의 할로겐화 유기용제와의 반응성 향상을 위한 촉매 금속의 코팅, 토양 매질 내에서의 이동성과 분산성 향상을 위한 고분자, 생분해성 계면활성제를 이용한 표면 특성 변화 등 다양한 표면 개질 방법이 시도되고 있다[19].

본 연구실에서는 나노 영가철이 쉽게 산화되고 반응 후 회수가 어려운 단점을 보완하기 위해 담체에 고정화된 나노 영가철을 제조하고 담체의 재활용 가능성을 시험하였다. 담체로서 양이온 교환막과 알지네이트 비드가 이용되었는데 고정화된 나노 영가철에서도 높은 반응성을 보였으며 고정화 담체를 재사용할 때에도 처음과 비슷한 분해 효율을 얻을 수 있었다(Fig. 3, 4). 따라서 고정화 담체의 형태를 용도에 맞게 제작함으로써 토양 및 지하수 내의 오염물질을 나노 영가철을 이용하여 경제적이고 효과적으로 분해할 수 있을 것으로 기대된다.

### 5-2. 생물학적 복원의 효율 향상을 위한 분자생물학적 연구

오염토양의 생물학적 처리 기술은 토양 미생물을 이용하여 오염물질을 분해시킨다는 점에서 가장 환경친화적인 근원 기술로서, 토양 미생물의 유전적, 생리화학적 정화능력에 의해 이루어진다. 생물

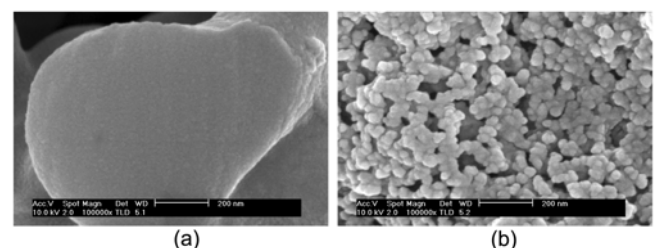


Fig. 3. SEM images of the surface of membrane w/o (a) and w/immobilized nanoscale zero-valent irons (b).

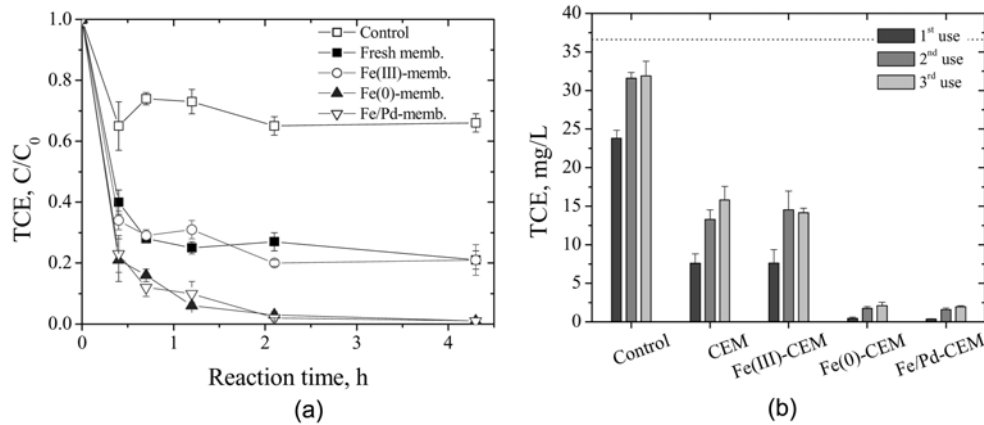


Fig. 4. Degradation of TCE using immobilized nanoscale zero-valent iron on cation-exchange membrane (a) and reuse of the membrane (b).

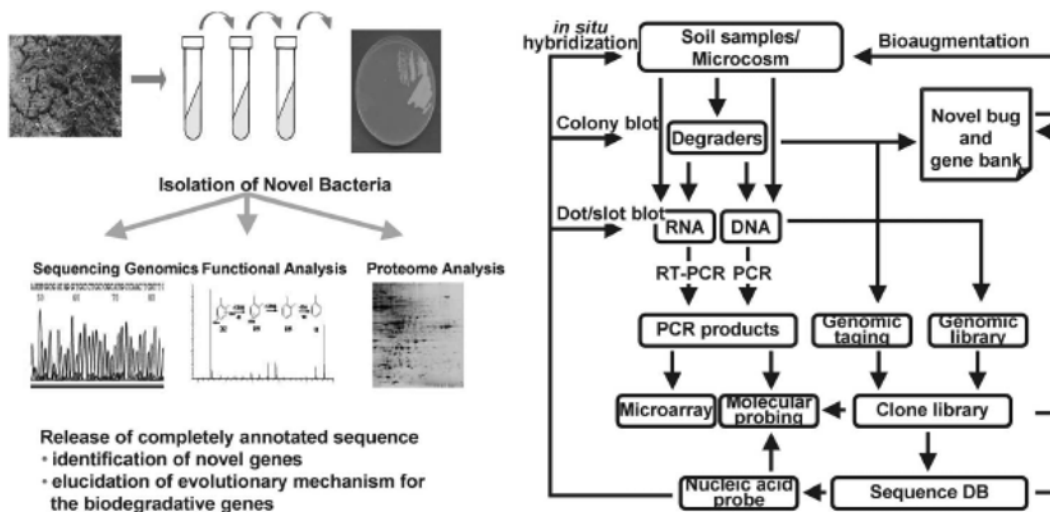


Fig. 5. Molecular biological study for the analysis of microbial behavior and biodegradation mechanism for organic contaminants.

학적 정화가 진행되는 동안 환경요인의 변화에 따른 분해 미생물의 군집 및 분해 유전자 발현 양상 변화에 대한 연구는 생물학적 복원 속도와 정도를 설명, 예측하게 하며, 복원 비용과 소요 시간 등을 고려하여 최적의 운전 조건을 결정하는 기초가 된다. 이에 토양/지하수 유기오염물질의 미생물학적 분해 기작의 총체적 규명을 통해 생물학적 환경정화기술을 개발하려는 시도가 분자생물학적 방법을 도입하여 진행되고 있다(Fig. 5)[20].

최근에는 다양한 분자생물학적 방법을 이용해 미생물의 군집 분석하려는 연구가 진행되고 있다. Biofilm에 있는 질소제거 관련 미생물 군집을 FISH(fluorescent in situ hybridization)를 이용해 분석한 결과, 배양을 통한 군집 분석의 한계를 넘어 각 미생물 군집 간의 상호작용 및 질소 처리 능력이 있는 미생물 간의 경쟁관계를 알아내는 것이 가능하였다[21]. 또한 T-RFLP(terminal restriction fragment length polymorphism)를 이용해 비소로 오염된 지하수 속의 미생물 군집 분석을 통해 여러 미생물 군집 중 3가 비소에서 5가 비소로 산화에 관련된 군주에 대해 알아냈으며, 기존의 연구에서 짐작했던 것과 다른 군주가 실제로 이용됨을 밝혀냈다[22]. 뿐만 아니라 biostimulation, bioaugmentation 등 다양한 생물학적 토양 복원 방법의 효율성을 적용 전후의 미생물 군집을 DGGE(denaturing gradient gel electrophoresis)를 통해 관찰함으로써 평가할 수 있었다[23].

본 연구실에서는 유류 오염토양에 대해 오염물을 분해하는 균주를 분리하고, 오염토양의 생물학적 복원에서 토착 미생물과 외부 미생물의 복원 효율을 비교하며, 토양 복원 과정에서 미생물의 군집 변화를 관찰하는 연구를 진행하고 있다. PCR(polymerase chain reaction)과 DNA 서열 분석과 같은 분자생물학적 방법을 이용해 경유로 오염된 토양에서 경유를 유일 탄소원으로 사용할 수 있는 *Rhodococcus erythropolis* 중에 속하는 균주를 비롯한 4종의 미생물을 분리하였으며, 이렇게 분리된 미생물들을 오염토양에 bioaugmentation 방법으로 첨가하여 일반적으로 경유 분해능이 우수하다고 알려진 외부 균주를 첨가한 경우와 복원 효율을 비교하였다. 그 결과 복원 초기에는 외부 균주를 첨가한 오염토양의 경유 제거율이 높았으나 시간이 지날수록 토착 미생물을 첨가한 토양의 경유 제거율이 좋아져 결과적으로는 더 좋은 복원 효율을 나타내었다. 또한 이 실험과 동시에 진행된 DGGE를 이용한 토양 내 미생물 군집의 변화를 관찰한 결과 시간이 지날수록 다양한 밴드 패턴이 나타났는데(Fig. 6), 이로부터 복원이 진행되어 오염물의 농도가 낮아짐에 따라 전체적인 미생물의 수가 증가했음을 알 수 있었다. 두 결과를 종합하여 볼 때, 외부 균주를 첨가한 경우 초기에는 오염물의 제거가 활발히 일어났으나 이후 토착 미생물들의 활동이 활발해짐에 따라 외부 미생물의 농도가 줄어들었으며 DGGE 패턴 상의 뚜렷하게 나타나는 밴

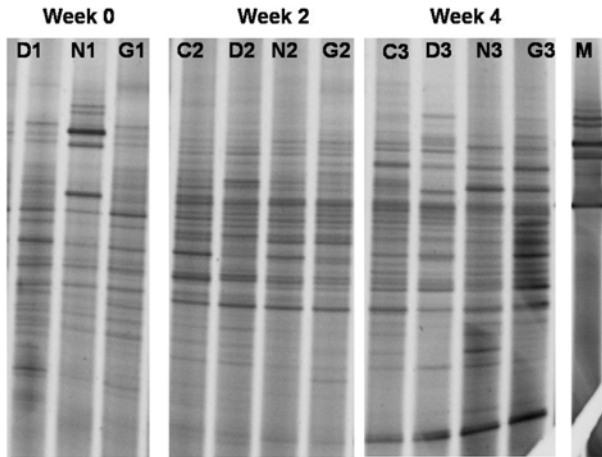


Fig. 6. Change of microbial diversity by bioaugmentation of (N) indigenous and (G) foreign microorganisms.

드들은 이미 분리된 4종의 미생물 외에도 유류 오염 환경에서 활발히 성장할 수 있는 다른 토착 미생물이 있음을 의미한다고 할 수 있다.

이와 같이 분자생물학적 군집 분석을 통해서 토양 및 지하수 속의 미생물들의 상호작용에 대한 이해를 늘릴 수 있을 뿐만 아니라, 이를 조절하고 강화시킴으로써 생물학적 복원 효과를 증대시킬 수 있다.

### 5.3. 오염부지 복원을 위한 통합기술 개발

다매체 오염원인 토양과 지하수의 정화는 물리적, 화학적, 생물학적 복원기술의 개별적인 적용만으로는 효율적이고도 완벽한 복원이 이루어 질 수 없다. 따라서 이들의 한계를 극복하고 복합 오염물로 오염된 토양의 효율적인 정화를 위해 요소기술들을 복합적으로 적용하는 통합기술의 개발에 대한 연구가 진행되고 있다.

이러한 통합기술은 오염 부지의 특성에 따른 개별 기술의 복합적 적용과 모니터링 기술, 위해성 평가 등이 포함된 통합 시스템의 개발과 개별 요소기술의 특성을 결합한 향상기법의 개발을 모두 포함한다.

개별기술의 한계를 극복하기 위해 2가지 이상의 요소기술을 결합한 통합공정은 생물학적 처리 기술의 한계를 극복하기 위해 물리화학적 처리 방법을 결합하거나, 오염물의 탈착이나 생분해 효율을 향상시키기 위해 열적 처리 기술을 함께 적용하는 등의 방법이 이용되고 있다.

결합기술의 한 예로는 동전기 정화기술을 이용한 향상 공정이 있다. 동전기 공정(electrokinetics, EK)은 비교적 최근에 연구되기 시작한 원위치 토양 정화기술로서 토양에 전극을 설치하고 전류를 공급함으로써 전기장 하에서 공극 내의 공극수와 이온성 물질의 이동을 유발시켜 오염물을 제거하는 기술이다(Fig. 7). 이는 저투수성 토양에 매우 효과적인 기술로 알려져 있으며 각종 중금속, 방사성 원소와 같은 이온성 오염물질에 대해서 주로 적용되어 왔다[24].

이를 토양 세척/세정법과 결합하여 소수성 유기오염물에 대한 처리 효율을 향상시키거나[25], 화학적 산화법과 결합하여 저투수성 토양 내에서 오염물질의 산화 분해 반응을 촉진시키며[26], 동전기 현상을 이용하여 토양 내 미생물과 영양분의 분포를 조절하여 생물학적 처리의 효율을 높이는 등[27] 다양한 결합 공정에 대한 연구가 진행되었다. 또한 본 연구실에서는 최근 동전기 공정의 전극 부식 문제를 해결하고 전극 표면에서 전기화학 산화 반응이 일어날

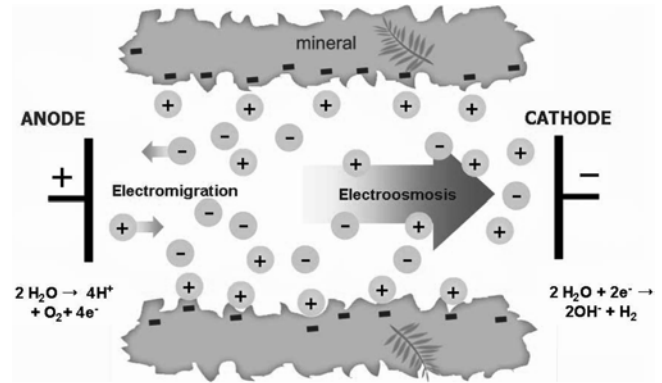


Fig. 7. Schematic diagram of electrokinetic remediation.

수 있는 전극재료를 사용하여 오염물의 분해를 유도하는 동전기-전기화학 산화 통합 공정에 대한 연구도 진행 중이다.

오염부지의 통합 복원 시스템 개발의 예로서 본 연구실에서 2002년부터 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행한 미세계면현상을 응용한 지하환경 통합 복원 공정 개발에 대한 연구를 들 수 있다. 유류 및 할로겐화 유기화합물로 오염된 토양/지하수를 대상으로 고상-액상, 기상-고상, 고상-기상 사이의 계면에서 일어나는 다양한 현상들을 이용하는 요소기술들을 복합적으로 적용함으로써 오염물질의 제거 효율을 향상시키고 사용된 계면활성제의 회수 공정과 미생물 군집 변화 관찰을 통한 모니터링 기술 등을 결합하여 통합 공정을 제시하였다.

특히 TCE로 오염된 토양의 정화를 위해 토양세정법/MEUF (micellar-enhanced ultrafiltration) 공정/투과증발 막공정(pervaporation)의 통합 공정을 제시하고 이들의 적용 가능성을 확인하였다(Fig. 8). 원위치 정화기술인 토양세정법에는 계면활성제 M-TWO1030 5%와 isopropyl alcohol 5%를 혼합하여 이용하였는데, 10 Pore volume으로 90% 이상의 제거율을 달성하였다. 사용된 계면활성제의 회수를 목적으로 수용액으로부터 오염물을 제거하기 위해 투과증발 막공정이 적용되었는데, 이는 5 g/L 이하의 농도의 계면활성제 용액에 대해 90% 이상의 제거 효율을 얻을 수 있으며 함께 존재하는 염과 알

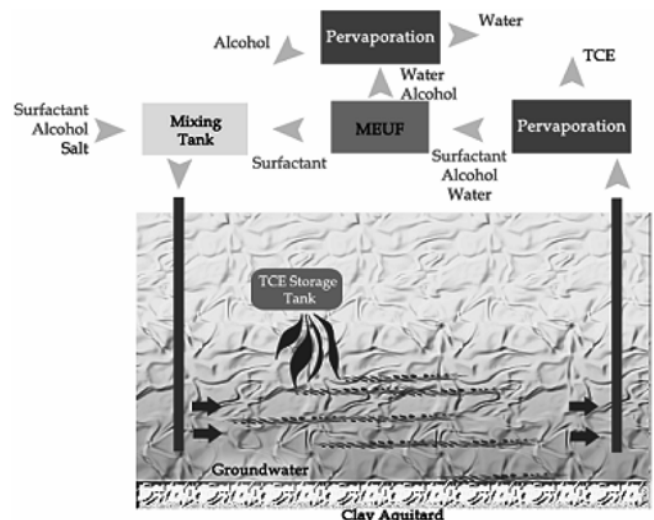


Fig. 8. Schematic diagram of integrated remediation process for TCE-contaminated soil.

코울의 영향은 거의 없었다. 또한 MEUF 공정은 회수된 계면활성제를 효과적으로 농축할 수 있는 공정으로 평가되었다[28].

## 6. 결론 및 제언

국내 오염토양 복원은 2001년 부산 문현지구의 복원 사업을 시작으로 점차 확대되고 있으며, 오염토양 복원 기술에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 세계적으로 복원 기술의 개발은 점차 저비용의 친환경적 정화 방법을 추구하는 방향으로 발전하고 있으며, 국내에서도 이러한 동향에 발맞추어 나노 기술과 분자생물학적 기술 등의 첨단기술을 응용한 기술 개발과 개별기술의 한계를 극복하기 위한 통합 기술 개발이 시도되고 있다.

그러나 관련된 복원 기술에 대한 연구가 실험실 수준에 머무르고 있어 실제 현장에서는 몇 가지의 기술만이 제한적으로 적용되고 있다. 이러한 연구 대상 기술의 현장 적용성을 높이기 위해서는 오염 부지에 대한 지형적 특성과 오염 특성을 반영하여 기술 개발을 진행하고 경제성을 검토할 필요성이 있다. 이 밖에도 오염도 조사 기법의 개발과 복원 기술 선정 체계의 확립을 통해 보다 효율적인 복원이 이루어 지도록 노력해야 할 것이다.

무엇보다 토양을 생태계의 근원으로 생각하고 이를 반드시 복원해야 한다는 인식의 변화가 중요하며 토양 환경을 개선하려는 지속적인 노력이 필요하다.

## 감 사

이 논문은 과학기술부 국가지정연구실 사업의 연구개발비 지원에 의해 연구되었습니다(M1-0412-00-0001).

## 참고문헌

- Kim, J.-S., "Policy of Soil Environmental Conservation – Current Issues and the Future," *Environment preservation*, 6-9(2005).
- Jeong, S.-W., "Environmental Impact Assessment Schemes Considering Fate and Transport of Soil Contaminants," Research report, Korea Environment Institute(2003).
- Ministry of Environment, "Operational Results of Soil Network and Investigation of Actual Conditions in 2005," Korea(2006).
- Park, Y.-H., Yoon, S.-S., Bang, S.-W., Kim, M.-J., Yang, J.-U. and Lee, Y.-H., "Management and Remediation Policy of Contaminated Lands in Korea," Research Report, Korea Environment Institute(2002).
- Lee, C.-H., "Status and Prospect of Soil Remediation Industry," Konetic report, <http://www.konetic.or.kr/>.
- [http://www.fitr.gov/matrix2/section3/sec3\\_int.html](http://www.fitr.gov/matrix2/section3/sec3_int.html).
- Kwak, M., "Prospect and Present Status of Soil Environmental Remediation Industry," *J. KSEE*, 29(3), 271-274(2007).
- Ministry of Environment, "Case Study of Soil Remediation Technology," Korea(2002).
- Lee, J.-Y. and Moon, C.-H., "Remediation and Reuse of Contaminated Site," *J. Korean Geotechnical Society*, 21(11), 26-44(2005).
- Shin, J.-K., "Case Study of Soil Pollution in Abandoned Mines," Symposium on Geological Disaster and Remediation Technology, Nov., Seoul, 95-116(2002).
- Kim, M.-J., "Cleanup and Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil," Symposium on Geological Disaster and Remediation Technology, Nov. Seoul, 117-141(2002).
- [www.konetic.or.kr/env\\_info/report/13-6.pdf](http://www.konetic.or.kr/env_info/report/13-6.pdf), "Analysis of Current Status of Soil Remediation," Konetic report(2002).
- Lee, J.-Y. and Park, K.-J., "Current Status and Method of Soil Remediation Treatment in Korea," Konetic report, <http://www.konetic.or.kr/>.
- Kim, K.-W., "Emerging Remediation Technologies for the Contaminated Soil/groundwater in the Metal Mining Area," *Econ. Environ.*, 37(1), 99-106(2004).
- Tratnyek, P. G. and Johnson, R. L., "Nanotechnologies for Environmental Cleanup," *Nanotoday*, 1(2), 44-48(2006).
- Wang, C. and Zhang, W., "Synthesizing Nanoscale Iron Particles for Rapid and Complete Dechlorination of TCE and PCBs," *Environ. Sci. Technol.*, 31(7), 2154-2156(1997).
- Amold, W. A. and Roberts, A. L., "Pathways and Kinetics of Chlorinated Ethylene and Chlorinated Acetylene Reaction with Fe(0) Particles," *Environ. Sci. Technol.*, 34(9), 1794-1805(2000).
- Ponder, S. M., Darab, J. C. and Mallouk, T. E., "Remediation of Cr(VI) and Pb(II) Aqueous Solutions Using Supported Nanoscale Zero-valent Iron," *Environ. Sci. Technol.*, 34(12), 2564-2569 (2000).
- Ryu, A. and Choi, H., "Application of Nano-technology to Contaminated Soil/groundwater Remediation," *J. KSEE*, 29(3), 257-261(2007).
- Lee, K.-K., "Development of Environmental-friendly Technology for the Remediation of Soil/groundwater System," *News & Information for Chemical Engineers*, 22(2), 152-158(2004).
- Daims, H., Taylor, M. W. and Wagner, M., "Wastewater Treatment: a Model System for Microbial Ecology," *Trends in biotechnology*, 24(11), 483-489(2006).
- Casiot, C., Pedron, V., Bruneel, O., Duran, R., Personné, J. C., Grapin, G., Drakides, C. and Elbaz-Poulichet, F., "A New Bacterial Strain Mediating As Oxidation in the Fe-rich Biofilm Naturally Growing in a Groundwater Fe Treatment Pilot Unit," *Chemosphere*, 64(3), 492-496(2006).
- Baek, K. H., Yoon, B. D. and Kim, B. H., "Monitoring of Microbial Diversity and Activity During Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil with Different Treatments," *J. Microbiology and Biotechnology*, 17(1), 67-73(2007).
- Acar, Y. B., Gale, R. J., Alshawabkeh, A. N., Marks, R. E., Pupala, S., Bricka, M. and Parker, R., "Electrokinetic Remediation: Basic and Technology Status," *J. Hazard. Mater.*, 40(2), 117-137(1995).
- Yang, J.-W., Lee, Y.-J., Park, J.-Y., Kim, S.-J. and Lee, J.-Y., "Application of APG and Calfax 16L-35 on Surfactant-enhanced Electrokinetic Removal of Phenanthrene From Kaolinite," *Eng. Geol.*, 77(3-4), 243-251(2004).
- Park, J.-Y., Kim, S.-J., Lee, Y.-J., Baek, K. and Yang, J.-W., "EK-Fenton Process for Removal of Phenanthrene in a two-dimensional Soil System," *Eng. Geol.*, 77(3-4), 217-224(2004).
- Kim, S.-J., Park, J.-Y., Lee, Y.-J., Lee, J.-Y. and Yang, J.-W., "Application of a New Electrolyte Circulation Method for the ex Situ Electrokinetic Bioremediation of a Laboratory-prepared Pentadecane Contaminated Kaolinite," *J. Hazard. Mater.*, 118(1-3), 171-176(2004).
- Ministry of Science and Technology, "Integrated Remediation of Underground Environment by Applying Micro-interfacial Phenomena," Research Report of National research laboratory program, Korea(2004).