

지반환경 연구 및 기술동향

지반환경기술위원회

1. 지반환경분야

1.1 개요

토양, 땅, 토지, 지반은 지구를 구성하고 지구상에 존재하는 인간 및 생명체의 생활터전이 되며 각종 시설물의 지지체 역할을 한다. 현대의 도시화 및 산업화 속에서 인간은 흙 및 토지에 대한 향수가 더욱 커져가고 있다. 이들 지반의 성질과 상태는 지금까지 자연의 조화에 의하여 균형을 유지해왔다. 그러나 산업혁명이후 인구의 도시집중 및 산업화에 의하여 지반내에 폐기물 및 오염물질이 축적됨에 따라 토양은 자정 및 복원능력을 상실하고 이로 인한 환경문제는 심화되고 있다.

지반환경은 지반에 관련된 환경문제를 다루는 분야로서 지반공학과 환경공학이 접목된 분야이고, 기타 지질학, 토양학, 수리학, 지하수학, 지구과학, 화학, 농학, 생물학 등과도 많은 연관성을 가지고 있다. 기존의 지반공학은 토질역학 및 기초공학을 기본으로 하여 지반에 관계되는 물리적, 수리적 및 역학적 특성을 규명하는 분야이고, 지반환경분야는 이외에 폐기물, 오염 등이 지반에 미치는 환경적 특성을 규명하는 분야이다.

지반환경분야에서 다루는 영역은 지반환경 조사 및 평가 분야, 폐기물매립 분야, 지반환경 복원

표 1. 지반환경 오염물질 배출원 및 이에 따른 오염물질의 종류

오염원	오염요인	예상오염물질
석유류 제조 및 저장시설	저장탱크 배관 부식, 누출사고	- BTEX, TPH, PAHs, PCP 등
유독물질 저장시설	저장탱크 배관 부식, 누출사고	- VOC, PAHs 등
산업지역	저장탱크 배관 부식, 누출사고	- 유류 - 유기용제 (TCE, PCE, 1,1,1-TCE 등) - 석유화학 원료 (톨루엔, 페놀 등) - 중금속 (카드뮴, 납, 6가크롬, 비소, 수은 등)
폐기물 매립지	침출수 누출	- 유기물, 중금속, VOC 등
폐기물 소각장	배출가스 및 소각재	- 다이옥신, PAHs, - Pb, Cd 등 중금속
휴.폐광산	폐광재, 갱내수	- 폐광재 : 중금속 - 갱내수 : 중금속, 산성폐수
군부대	폐기물 매립, 유류누출, 사격장, 훈련장, 군항, 비행장 등	- BTEX, PAHs, 중금속 등

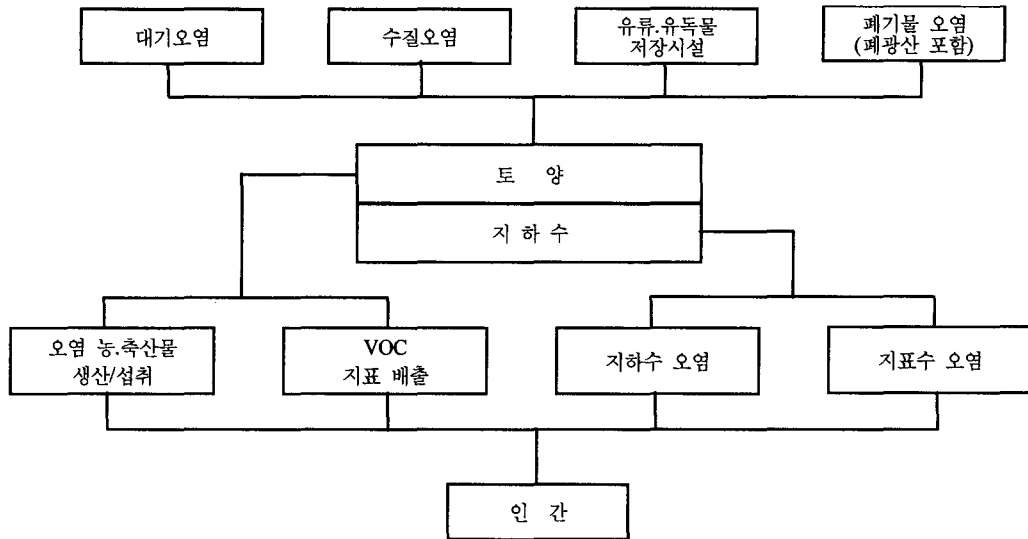


그림 1. 지반환경 오염과 이에 따른 피해경로

및 개선 분야 등이 있다. 지반환경 조사 및 평가 분야에서는 매립부지 조사, 오염지반 조사, 오염시료 채취, 폐기물 및 오염토의 실내 및 현장시험, 각종 모니터링, 오염도 분석 및 평가 등의 내용을 다룬다. 폐기물매립 분야에서는 매립지 부지선정, 기초지반 처리, 제방 및 옹벽의 안정, 매립사면 안정, 매립층의 공학적 특성, 매립지반의 침하 및 개량, 매립시설의 설계 및 시공, 차수재의 공학적 특성, 매립시설의 구조적 안정, 매립시설의 유지관리, 폐기물의 지반공학적 활용, 매립부지의 개량 및 재활용 등의 내용을 다룬다. 그리고 지반환경 복원 및 개선 분야에서는 토양과 오염물질의 상호작용, 오염물질의 흡착특성, 이동매개변수 산정, 오염물질이동 모델링, 불량매립지 복원, 오염 토양 및 지하수 복원, 지하굴착 및 그라우팅 공사에 의한 지반환경오염방지, 산지절개에 따른 경관훼손 및 사면붕괴방지, 지하 및 지중 구조물의 부식 및 침식억제, 천연재료를 활용한 연약지반 개량기술 등의 내용을 포함한다.

다시 언급하면 지반환경분야에서는 지반환경 조사, 평가 및 복원 시스템 구축, 구조물 기초지반의 환경개선 시스템 구축, 친환경 건설부지 및 토지 조성기술, 친환경적 절취사면 복원, 폐광산지역의 복원, 유류오염지역의 복원, 생태계를 고려한 준설매립 및 연약지반개량, 환경을 고려한 지하굴착 및 그라우팅공사 등과 같은 지반의 환경문제를 담당한다.

1.2 기술동향

1.2.1 국외

지반환경분야의 기술은 미주 및 유럽에서는 미국, 영국, 독일 등이 기술을 선도하고 있으며 아시아에서는 일본이 우리와 같이 많은 노력을 하고 있다. 선진국에서는 미국의 Superfund 등과 같이 오염지역에서의 국가적 배상, 보상 및 복원을 통하여 관산학연이 연합하여 지반환경기술을 개발하고 있다. 특히 근래에는 Brownfield 및 Grayfield 등의 복원 프로그램을 적극추진하고 있는 실정이다.

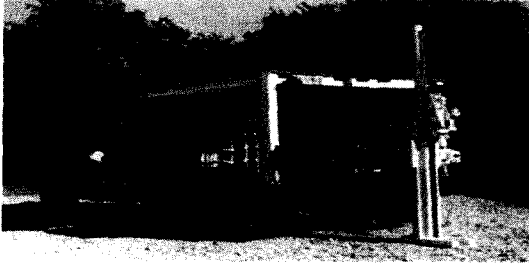


그림 2. 지반환경 조사차량

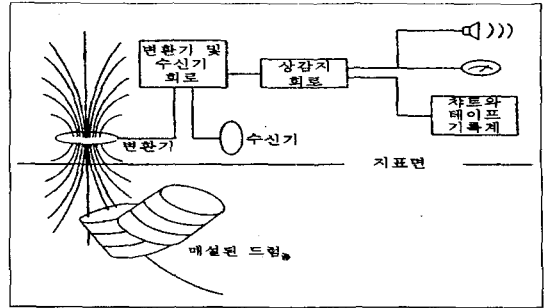


그림 3. 전자기법에 의한 지하저장탱크 탐사

(1) 지반환경조사 분야

지반환경의 특성 파악, 정화 및 복원, 오염 확산 방지를 위해서는 지반환경조사가 선행되어야 한다. 외국에서는 기존의 원격탐사(remote sensing), 지표물리탐사(surface geophysical survey), 공내물리검층(geophysical logging of borehole), 시추조사(drilling survey) 및 관입조사(penetrating survey) 기법의 응용기술이 개발되어 지반환경조사에 적극적으로 활용되고 있으며 이를 이용하여 지반내의 오염 범위, 오염농도, 오염두께, 지질구조 등이 정밀하게 측정되고 있다. 최근에는 오염지반 조사시에 탐사장비, 시추장비, 시료채취 장비, 화학분석장비, 컴퓨터 등이 장착된 지반환경 조사차량이 개발되기도 하였다.

지반환경조사시에 먼저 시료채취작업이 진행이 되는데 시료만을 간단하게 토양을 채취할 수 있는 Geoprobe 장비가 상용화되고 있다. 그리고 토양시료외에 가스 및 전기전도도를 측정할 수 있는 MIP(Membrane Interface Probe), MIP/SC(Soil Conductivity Probe)가 개발되었다. 그리고 최근에는 온도, 전기전도도, 고주파임피던스, 방사능, 유류농도, pH, Redox Potential 등을 측정할 수 있는 Probe가 개발되었고, 이를 장착한 Chemicon, Envirocon, SCAPS(Site Characterization and Analysis Penetration System) 등이 개발되었다.

(2) 폐기물 매립 및 재활용 분야

폐기물은 일반 흙보다 입자가 크고 불규칙하다는 특성을 가지고 있기 때문에 일반 토질시험에서 사용하고 있는 기존의 재래식 토질시험기로는 시험이 부정확하다. 따라서 외국에서는 기존의 토질시험장비보다 규모가 큰 대형전단시험, 대형압밀시험, 대형투수시험 등에 대한 시험기 및 시험방법이 개발되어 실제에 접근하는 시험결과치를 얻고 있다.

매립지의 차수재 특성중에서 가장 중요한 부분이 투수특성인데, 외국에서는 현장투수특성 파악을 위하여 보링공 시험(borehole test), 다공질 탐침(porous probe), 침투시험기(infiltrometer), 지하배수 시험(underdrain test) 등의 다양한 시험방법이 개발되었다. 특히, single 및 double ring infiltrometer 와 같은 제품이 개발되어 현장에서 많이 사용되고 있다.

매립지 차수재료로서 과거에는 주로 점토 등 천연재료를 이용하거나 PVC 등 저급의 차수재가 생산이 되었으나 최근에는 HDPE 등의 고급차수막, 마찰력을 증진시킨 돌기형 차수막, 벤토나이트와

차수막의 합성재인 GCL(geosynthetic clay liner) 등의 신재료가 개발되어 적용되고 있다. 매립장에 설치된 차수막의 누수를 탐사하기 위하여 DDS(damage detection system)가 개발되어 실제 사용되고 있다. 최근에 매립지의 복토재로 사용하는 흙을 구하기 어렵기 때문에 인공복토재 또는 대응복토재가 개발되었다. 인공복토재로는 SaniFoam, TerraFoam, ConCover, Land-Cover, Posi-Shell 등이 있다.

폐기물 매립지반은 장기적으로 유기물의 분해 및 부패가 발생하므로 일반지반과는 다른 침하형태를 나타낸다. 따라서 외국에서는 이에 대한 연구가 많이 진행되었으며 점성토압밀이론에 근거한 Sowers 방법, Morris와 Woods의 방법, 도시쓰레기매립지반의 침하율 측정에 근거한 Yen과 Scanlon의 방법, 유동학적 모델인 Gibson과 Lo의 모델, 공학재료의 천이적인 creep거동을 추정하는 Power Creep Law, Zimmerman의 이론 등과 같은 침하산정식 및 침하곡선식이 제안되었다.

폐기물매립부지 재활용에서는 일반지반과는 달리 침하, 가스 및 침출수 문제가 발생하기 때문에 지반침하 방지 및 대응 기술, 폐기물지반 안정화기술, 기초지지력 개선기술, 가스발생 처리기술, 기초파일 부식대책기술 등과 같은 기술이 개발되고 있다. 특히, 폐기물매립부지의 처리를 위하여 치환공법, 산화촉진공법, 동다짐공법, 그라우트공법, 소각공법, 고결공법, 약취제거공법, 산화촉진공법,

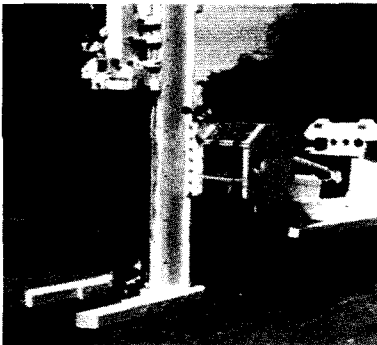


그림 4. 토양시료채취용 Geoprobe 장비



그림 5. 매립지 복토용 인공복토재

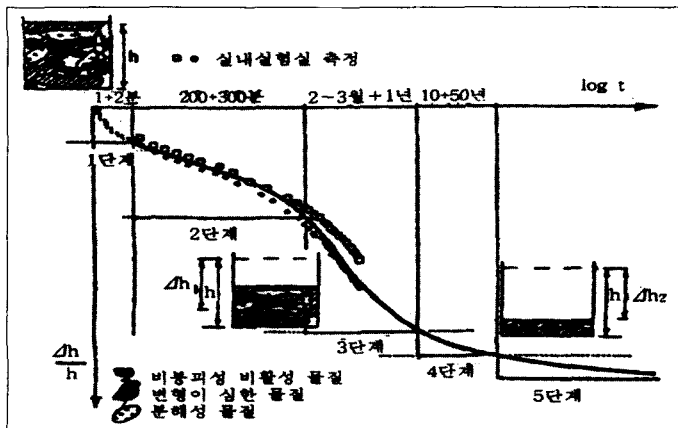


그림 6. 폐기물 매립지반의 침하곡선

굴착자원화공법, 지중혼합고결공법 등이 개발되고 있다. 그리고 매립부지에 건설되는 기초의 설치 및 부식방지를 위하여 폐기물의 침하에 의한 기초의 부마찰력 산정, 조대물질내에서의 기초 항타기술, 기초의 부식방지 기술 등이 개발되고 있다.

사후종료매립지(비위생매립지)의 복원 및 정비시에는 구조적인 측면과 환경적 측면이 검토되고 있다. 구조적인 측면에서는 매립사면안정, 붕괴방지, 매립지 침하해석, 침하방지, 매립지 도로, 옹벽시설, 제방시설, 관리시설 등의 내용이 검토되고, 환경적인 측면에서는 매립층의 분해 촉진, 침출수 처리, 침출수 유출로 인한 오염복원, 매립가스 처리, 악취 제거, 폭발위험 제거, 매립지 및 가스 재활용 등이 검토된다. 비위생매립지의 정비를 위하여 이송처리공법, 선별이적처리공법, 차단공법, 흡착벽공법, 고형화/안정화공법 등이 다양하게 개발되고 있다.

전세계적으로 천연재료의 고갈로 인하여 건설재료난이 심화되고 있기 때문에 폐기물을 건설재료로 재활용하고자 하는 노력이 활발하게 진행되고 있다. 이 경우 흙의 공학적 특성을 규명하는 것과 같이 폐기물의 공학적 특성을 규명하는 것이 필요하다. 따라서 쓰레기, 고로슬래그, 제강슬래그, 폐석회, 펄프 및 제지폐기물, 광산폐기물, 석탄회, 인산폐기물, 건설폐기물, 준설폐기물, 하수 및 상수 슬러지 등과 같은 생활, 산업 및 건설폐기물에 대한 공학적 및 환경적 특성을 규명하는 노력이 많이 진행되고 있다. 그래서 폐기물의 단위중량, 함수비, 수분보유능력, 다짐, 입도, 간극비 등의 물리특성, 내부마찰각, 점착력, 압축지수, 압밀계수, 투수계수 등의 역학특성, 평판재하시험, 표준관입시험, 콘관입시험, 거동계측 등의 현장특성, 화학성분, 용출농도, 흡착성, pH, 유기물함량, 온도, 가스성분, 침출수성분 등의 환경특성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그리고 이들 폐기물을 도로노반재, 성토재, 뒷채움재, 매립재 등과 같이 건설재료 및 지반재료로의 재활용에 대한 방안들이 강구되고 있다.

(3) 지반오염 분야

지반 오염원은 매우 다양한데 주로 폐기물, 산업공단, 지하저장탱크에 의한 오염이 가장 심각한 상태에 있다. 지반내의 오염물질은 포화대(saturated zone) 또는 불포화대(vadose zone)에 존재하게 되는데 포화대내에서의 오염물질이동은 그동안 많은 연구가 진행되어 이동특성이 규명이 되었으나 불포화대에서의 오염물질 이동특성은 완전하게 규명이 되지 않아 이에 대한 연구가 활발하게 진행이 되고 있다.

지반환경 정화 및 복원 기술은 매우 다양한 형태로 개발이 되어 현장에 적용되고 있다. 오염지반 정화기술로는 Bioventing, Bioremediation, Land OK, Biopiles, Composting, Fungal Biodegradation, Landfarming, Slurry-Phase Biological Treatment, Natural Attenuation, Phytoremediation 등의 생물학적 처리기술, Electrokinetic Remediation, Fracturing, Soil Flushing, Soil Vapor Extraction, Solidification/Stabilization, Chemical Extraction, Chemical Reduction/Oxidation, Dehalogenation, Separation, Soil Washing, Solar Detoxification, Soil Mixing 등의 물리화학적처리기술, Hot Gas Decontamination, Incineration, Open Burn/Open Detoxication, Pyrolysis, Thermal Sorption, Thermally Enhanced Soil Vapor Extraction 등의 열적처리기술, Landfill Cap, Landfill Cap Enhancement 등의 차단기술, Permeable Reactive Barrier의 투수성반응벽 등이 개발되었다.

표 2. 지반/지하수 오염 방지 및 복원기술

처리매체	처리위치	처리방법	처리기술	오염물 특성
토 양	현장 원위치 (in-situ)	생물학적	- biodegradation - bioventing	- 생분해성 - 생분해성
		물리화학적	- soil flushing - solidification/stabilization - soil vapor extraction	- 중금속/반휘발성 - 중금속 - 휘발성
		열적	- thermally enhanced SVE - vitrification	- 반휘발성 - 중금속
	현장내 지상 혹은 현장외 (on-site/ off-site)	생물학적	- composting - landfarming	- 생분해성 - 생분해성
		물리화학적	- soil washing - solidification/stabilization	- 중금속 - 중금속
		열적	- incineration - low temperature thermal desorption - vitrification	- 유기성 - 유기성 - 중금속
지하수	현장 원위치	생물학적	- oxygen enhanced with air sparging - oxygen enhanced with H ₂ O ₂	- 생분해성 - 생분해성
		물리화학적	- air sparging	- 휘발성
		기타	- natural attenuation	- 생분해성
	현장내 지상 혹은 현장외	물리화학적, 생물학적	- pump and treat	

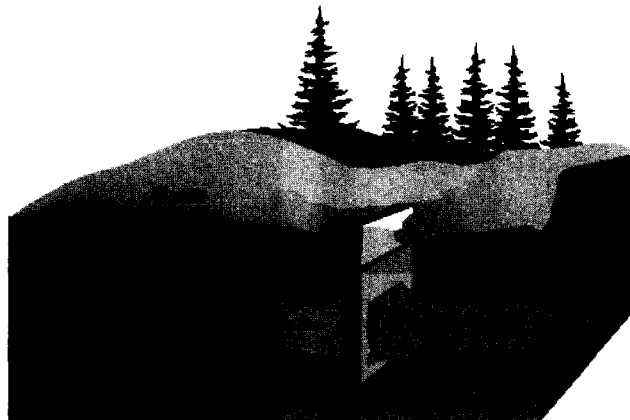


그림 7. 투수성반응벽에 의한 지반오염 정화

전세계적으로 시대적 부흥에 따라 오염지역의 재개발사업은 가속화되고 있다. 과거에는 개발비용, 개발기술, 행정지원 등의 제한에 의하여 오염지역이 적극적으로 개발되지 못하였다. 그러나 최근에는 오염지역 지가상승, 토지활용성 증대, 신규건축물 증대, 행정지원 확대, 신규복원기술 개발 등에 의하여 적극적인 개발이 추진되고 있다. 외국에서는 오염지역의 성공적인 재개발을 위해서 오염처리를 위한 환경공학자 및 지반공학자 뿐만 아니라 오염처리비용부담 및 법적대응을 위한 법률가, 변호사 등이 공동으로 참여하고 있다.

(4) 기타 지반환경 분야

지하굴착 공사시에는 주변침하, 지하수저하, 그라우팅오염, 벤토나이트폐액처리 등과 같은 문제점이 도출되고 있다. 따라서 주변지반 침하 및 구조물 붕괴 방지를 위한 굴착보조기술, 지하수위 저하 방지 및 유도배수 기술, 친환경적 지반그라우팅 재료개발, 벤토나이트폐액 고형화기술 등에 노력을 하고 있다. 특히, 지반그라우팅의 경우 시멘트의 사용에 따른 Cr^{6+} 의 저감을 위한 대체재료개발이 활발하게 진행되고 있다.

해안준설매립공사시 해안지역의 갯벌 및 생태계의 파괴를 초래하게 되고, 준설후 발생하는 탁류와 부유사로 인하여 오탉수가 발생하게 되며, 연약지반개량시 고분자합성배수재료의 사용으로 지반내에 장기적인 오염요인이 되고 있다. 외국에서는 갯벌 및 생태계를 고려한 친환경적 준설매립을 실시하고 연약지반개량용 천연배수재료를 개발하고 있다.

건설부지조성이나 도로건설 시에 무분별하게 산지를 절개하게 되면 주변미관이 훼손되고 강우에 의한 침식으로 인하여 사면붕괴가 발생한다. 따라서 산지절개 최소화기술, 친환경적 녹화기술, 사면보강기술, 침식방지기술 등이 개발되고 있다. 사면보강기술중에서 많이 사용되고 있는 soil nailing의 부식을 방지하기 위하여 최근에는 FRP를 사용한 PermaNail 등이 개발되었다.

1.2.2 국내

국내에 지반환경이라는 용어가 소개되고 관련 연구 및 기술개발이 시작된 것은 1990년대 초로서 10여년 전에 불과하며, 선진외국에 비하여 국내의 연구실적 및 기술력은 매우 일천한 상태이다. 국내는 현재 유류, 폐기물, 농약, 중금속, 방사능, 화학물질 등으로 인하여 지반환경오염이 가중되어 가고 있다. 이로 인하여 각종 산업지역, 주거지역, 건설현장, 토지개발지구 등에서 불법폐기물, 토양오염, 지하수오염 문제를 직면하는 사례가 증가하고 있으며, 주변 생태계 및 주거환경이 파괴되고 있다. 따라서 국토의 효율적인 개발 및 국토환경의 보전을 위해서 이의 적절한 처리 및 대책기술 개발이 절실한 실정이다.

국내의 산업화추진 및 인구증가로 인하여 그동안 공업용지, 주거용지 등의 건설부지 조성이 급격하게 증가하였다. 과거에는 건설부지 조성과 관련하여 환경문제가 그다지 문제시 되지 않았으나 최근에 들어와 크게 사회문제화 되고 있다. 따라서 건설부지 조성과 관련하여 환경파괴, 오염발생 등과 관련하여 많은 문제가 제기되고 있다. 산업 및 인간활동으로 발생된 폐기물과 오염물질에 의하여 부지가 오염되는 사례가 급증하면서 이들 오염부지를 건설부지로 사용하는 사례가 증가하고 있다. 또한 폐기물을 건설부지 조성재료로 재활용하거나 폐기물매립부지를 건설부지로 재활용하는 사례도 증가하고 있다. 따라서 이와 관련한 연구가 미력하나마 조금씩 진행이 되고 있다.

(1) 지반환경조사 분야

국내에서 사용되고 있는 지반환경 조사장비 및 기구는 거의 대부분 외국에서 수입하여 사용되고 있는 실정이고, 조사 및 분석 항목도 매우 단순하다. 그러나 최근에는 국가프로젝트를 통하여 정부출연 연구기관에서는 물리탐사 및 환경콘 등과 같은 지반환경조사 기법 및 장비의 개발이 진행되고

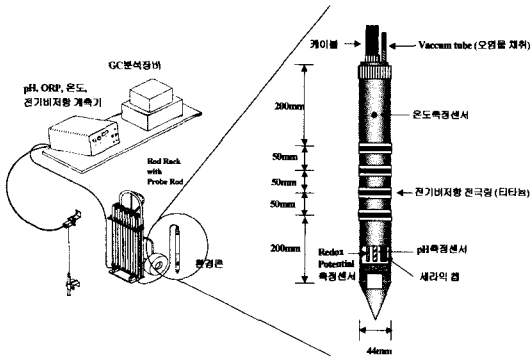


그림 8. 환경콘 오염지반조사 장비



그림 9. 환경콘에 의한 지반환경측정

있으나 아직까지 상용화된 제품은 개발되지 못하고 있는 실정이다. 환경콘은 지중에 오염된 다양하고 복잡한 오염상황을 판단하기 위하여 개발된 것으로 전기비저항, Redox Potential, pH 및 온도의 측정 및 지중오염물의 추출이 동시에 가능하다.

(2) 폐기물 매립 및 재활용 분야

우리 나라에서 폐기물매립지에 대해 위생매립장 개념이 도입되기 시작한 것은 1980년대 이후로 이때부터 매립지가 비위생매립지에서 차츰 위생매립지로 전환하게 되었다. 현재는 폐기물관리법에 매립지의 설치기준이 엄격하게 제정되어 위생적인 매립지의 건설이 이루어지고 있다. 그리고 폐기물 매립시설에 대한 설치검사 및 정기검사 제도가 신설이 되어 매립지의 위생화 및 안정화에 많은 기여를 하고 있다.

우리 나라는 위생적인 개념의 폐기물매립장의 건설경험이 10여년 이상이 되어 이제는 설계 및 시공기술의 수준이 많이 향상되었다. 또한 국내는 지형적인 특성으로 인하여 산지와 해안지역에 매립지를 건설하는 경우가 많아 산지 및 해안지역에서의 매립장 건설기술이 발전하였다. 특히, 우리나라

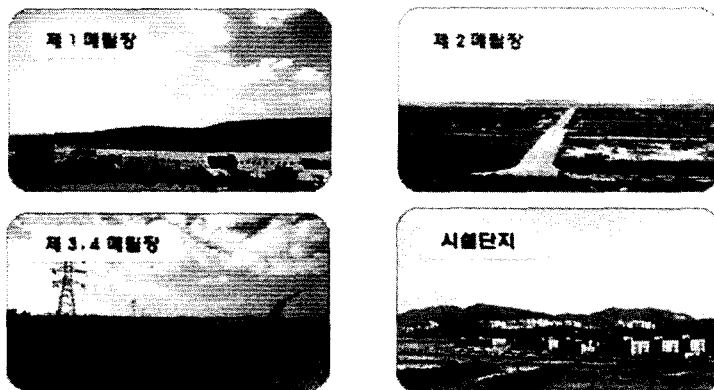


그림 10. 수도권 매립지 및 시설단지

지형의 계곡 및 해안매립지를 고려한 차수재개발에 대한 연구가 산·학·연 등에서 부분적으로 이루어지고, 기술을 도입하고있는 실정이다.

과거에는 차수재를 외국의 수입에 의존을 하였으나 현재에는 벤토나이트혼합토, 지오멤브레인, GCL 등이 자체기술력에 의하여 개발 및 생산되어 국내 현장에 대부분 적용하고 있다. 그리고 지오멤브레인, GCL 등은 동남아 등지의 해외에도 수출을 할 수 있는 정도의 기술력 및 생산력을 보유하고 있다.

폐기물 매립성토체는 비균질성이 크고 장기간에 걸쳐 부패하는 현상이 일어나기 때문에 일반 흙성토체와는 응력상태, 구성성분, 물리적 특성, 역학적 특성, 그리고 압축특성 등에 있어서 다른 공학적 성질을 지니게 된다. 그러나 아직은 국내 폐기물에 대한 지반공학적 특성이 제대로 규명되고 있지 않다. 따라서 사면안정 해석, 차수재 설치, 제방안정성 검토에 있어서 중요한 인자로 사용되고 있는 폐기물 단위중량 및 밀도, 차수재 마찰특성 등에 대한 값은 외국수치를 그대로 인용하고 있는 경우가 많다.

전국적으로 산재하고 있는 사후종료매립지(비위생매립지)환경부에서 국가적인 차원에서 재정적인 지원을 하여 연차적으로 복원사업이 진행되어가고 있다. 비위생매립지의 복원기법으로는 차단공법,



그림 11. 폐기물매립장 공사장면



그림 12. 사면 배수층 시험



그림 13. 가스측정을 통한 비위생매립지 안정화 조사



그림 14. 비위생매립지 정비사업



(a) 크레인과 추



(b) 타격장비



(c) 시공 완료 후

그림 15. 동다짐 공법에 의한 폐기물 매립지반의 개량



그림 16. 매립지 재활용



그림 17. 폐기물매립지 종료 후 공원조성

굴착이송공법, 선별처리공법 등이 적용되고 있다. 이 중에서 지중혼합고결차단공법, 이단역회전 및 구멍막힘방지 폐기물선별공법 등은 신기술로 등록되어 많은 활용이 되고 있다.

국내는 도시팽창 및 국토협소 등으로 인하여 폐기물매립지를 재활용하는 사례가 증가하고 있는데 이러한 사례로는 서울시 상계동매립지, 구의동매립지, 부산시 화명동매립지, 대전시 갑천변매립지, 안양평촌매립지, 전주매립지, 광주시 첨단기지매립지, 난지도매립지, 대구시대곡매립지 등이 있다. 이들 매립지는 공원, 식물원, 체육시설, 주택지, 농수산물센터 등으로 재활용되고 있다. 매립부지의 재활용을 위해서는 지반을 개량하여야 하는데 동다짐공법, 고화처리공법 등이 적용되고 있다.

산업 및 건설 폐기물을 건설 및 지반재료로 재활용하려는 연구가 활발하게 진행을 하고 있는데, 특히, 석탄회, 페타이어, 폐석회, 슬래그, 슬러지 등을 도로재, 성토재, 차수재, 벽돌, 뒷채움재 등으로 활용하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 남해안 지역의 연약지반개량 현장에서는 연약지반상부 하중 성토재로 비중이 흙보다 높은 슬래그를 재활용하여 큰 성과를 보고 있다.

(3) 지반(토양)오염 분야

토양오염의 사전예방 및 오염된 토양의 개선 등 토양환경을 종합적이고 효율적으로 보전한다는 제도적 장치를 마련하기 위하여 우리나라에서는 1995년 1월 환경부에서 토양환경보전법의 제정·

시행함에 따라 전국토의 토양오염실태조사 및 복원계획을 설정하고 있다. 또한 2004년에 개정될 법령에는 토양오염의 복원기준, 토양오염의 복원업 및 복원검증제도의 도입을 통한 토양 및 지반환경의 획기적인 발전을 이룩하고자 한다.

선진외국에서는 이미 지반환경에 대한 많은 연구가 수행되어 현재 많은 기술이 실용화되어 현장에 적용되고 있다. 그러나 국내의 경우 그 동안 몇몇 공공연구소, 학교 및 개인기업체에서 부분적으로 연구가 수행되어 왔다. 그러나 아직까지도 실제 현장에 적용될 수 있을 만큼의 상용화된 연구결과는 많이 도출되지 않은 상태이다.

국내에서 오염지반의 정화기술에 관한 연구는 그동안 환경부의 G7프로젝트 및 Ecotechnopia사업, 과학기술부의 스타프로젝트, 산업자원부의 공업기반기술개발사업, 건설교통부의 건설기술연구개발사업 및 기타 정부출연연구소의 자체연구사업을 통하여 진행되어 왔다.

이중에서 환경부의 G7프로젝트에서는 건설회사, 대학교 등이 Soil Vapor Extraction, Supercritical Fluid Extraction, Soil Flushing, Air Sparging 등의 물리화학적 처리기술, 열탈착/소각기술 및 Steam Injection 등의 열적 처리기술, Bioremediation, Bioventing 등의 생물학적 처리기술에 대한 연구를 수행하였다. 과학기술부의 스타프로젝트에서는 생물학적 처리기술, 열적 처리기술, 토양세척 및 추출기술, 화학적 처리기술 등이 연구되었다. 산업자원부의 공업기반기술개발사업에서는 국내 유수의 엔지니어링 회사 등이 Landfarming, Soil Vapor Extraction, Soil Flushing 등에 대한 연구를 수행하였다. 또한 정부출연 연구기관에서는 Electrokinetic Remediation, 차단기술, SVE+오존주입기술, 폐광산 및 폐수정화 처리기술 등이 연구되었다.

국내의 경우 오염지반에 대한 정화사업은 나날이 증가하고 있는 추세에 있으며 주유소, 군주둔지, 공장용지 등지에서 Pump & Treat 기술, SVE, Bioventing, Air Sparging, SVE, Bioremediation, Vacuum Extraction, Biotrench, Landfarming 등의 기술이 적용되고 있다.

이상과 같이 국내의 지반환경 기술동향에 대하여 살펴보았다. 지반환경분야에 대해 선진국과의 기술수준을 비교해 볼 때 지반환경 조사 및 평가 분야는 선진국은 차량탑재형 침단조사장비가 개발되어 있으나, 국내는 아직 국산형 조사장비가 개발되어 있지 않다. 폐기물매립 분야에서 선진국은 매립물의 공학적 특성파악, 폐기물 및 매립지반의 다양한 재활용, 인장력 및 마찰력이 큰 최신성능의

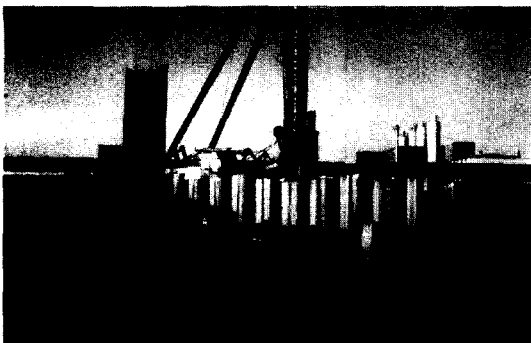


그림 18. 지중오염차단용 연직차수벽

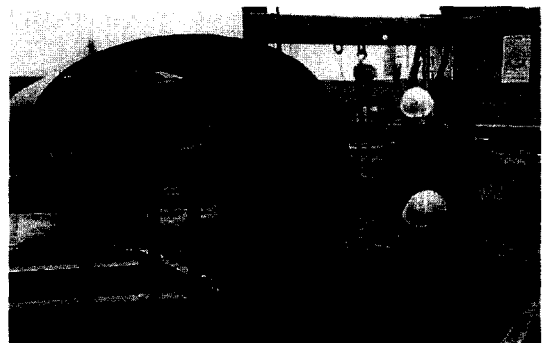


그림 19. 지중오염차단용 지오멤브레인연직차수벽

차수재 및 복토재 개발 등이 이루어졌으나, 국내는 매립물의 공학적 특성파악 부재, 폐기물 및 매립지반의 부분적 재활용, 보통의 차수재 및 복토재 개발 등이 이루어졌다. 지반환경 복원 및 개선 분야는 선진국은 다양한 생물학적, 물리학적, 열적 처리기술 및 이들 기술을 상호 복합화 시킨 복합기술이 개발되고 있으나, 국내는 아직 단순한 처리기술을 개발하거나 외국의 기술을 도입하고 있는 단계이다.

1.3 미래 기술전망

폐기물매립장건설시에 현재는 차수재로서 점토, 벤토나이트혼합재, 지오멤브레인, GCL 등이 사용되고 있으나, 향후에는 기존 차수재보다는 성능이 우수한 마찰강화형 지오멤브레인, 산업폐기물 재활용차수재, 흡착차수재, 토질안정차수재, 보강형 차수재, 복합 GCL재, 연약지반 대응형 차수시설, 급경사 설치가능 차수시설 등이 개발될 것이다. 또한 미생물(microorganism), 생폴리머(biopolymer) 등을 이용하여 흡착성 및 차수성을 증진시킨 Bio liner 차수재가 개발될 것이다. 매립장에 설치된 차수막이 파손되어 침출수가 누수되는 경우 현재에는 특별한 보수대책이 없으나 향후에는 폐기물의 매립도가 높은 매립장에도 적용될 수 있는 차수막누수 보수기술이 개발될 전망이다.

폐기물매립지반에 대한 정밀한 공학적 및 환경적 특성파악을 위하여 폐기물매립지반에 적합한 시추기술 및 보링기술이 개발되고, 폐기물의 경우 일반 토질시험에서 사용하고 있는 기존의 채래식 토질시험기로는 시료의 크기효과 등의 이유로 정확한 공학적 특성을 파악하기 어렵기 때문에 폐기물의 공학적 특성을 더욱 정확하게 파악할 수 있는 초대형의 전단, 압밀, 투수 시험장비 등이 개발될 것이다. 그리고 폐기물매립지반에 대한 해석기술 및 설계기술이 더욱 발전될 것이다.

매립지상부에 안정적인 구조물 건설을 위하여 매립지반의 정확한 토질상수 결정, 구조물 기초형식 선정, 설계지지력 산정, 침하메카니즘 규명기술이 발전될 것이다. 폐기물 매립지반의 거동특성을 파악하고 오염특성을 분석하기 위하여 매립지에 적용될 수 있는 현장계측 및 모니터링 기술이 더욱 활성화 될 것이다. 그리고 건설부지로서 불량한 매립지의 안전성 및 환경성을 확보하기 위한 개량 및 복원공법이 개발될 것이다.

사후종료매립지 정비사업에서 침출수의 오염원을 차단하는 공법이 현재는 많이 적용되고 있으나 앞으로는 침출수내의 오염원을 제거하는 투수성반응벽의 부분적인 적용이 활발해 질 것으로 예상되고, 침출수내의 모든 오염물질의 제거가 가능한 고효율 및 고흡착성의 투수성반응벽이 개발될 것이다.

폐기물매립지를 일반용지로 활용하려는 사례가 증가하고 있는바, 앞으로는 공원, 초지, 임야 등의 저급지보다는 주택지, 공장부지 등의 고급지로의 사용성이 증가하게 될 것이고, 이 경우 지반침하, 가스처리, 침출수처리 등에 대한 고도의 구조적 및 환경적 대책기술이 개발될 것이다. 또한 폐기물매립지의 지속적인 사용, 오염물질억제 및 조기안정화를 위한 매립개념을 도입한 생물학적 반응시스템(Bio-Reactor System) 형태 도입이 예견될 수 있다.

향후에는 건설재료난이 더욱 심화되므로 페타이어, 슬래그, 폐석회 등의 산업폐기물, 광미, 폐석탄 등의 광물폐기물, 제지, 상·하수 슬러지 등의 슬러지폐기물, 건설잔토, 폐콘크리트, 폐목재, 폐철근 등의 건설폐기물에 대한 재활용기술이 더욱 적극적으로 개발될 것이다. 폐기물 중에는 오염물질 흡

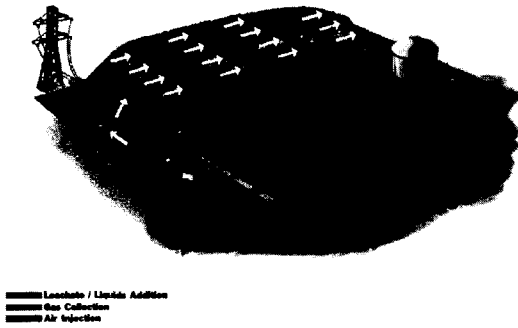


그림 20. Aerobic -Anaerobic Bioreactor

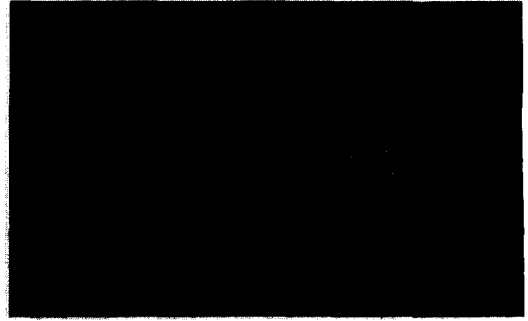


그림 21. 준설토를 이용한 골프장 조성

착능력, 지반지지력 증대기능, 지반개량효과 등이 뛰어난 재료를 발굴하여 단순활용보다는 흡착재 또는 개량재로 고급활용하는 기술이 모색될 것이다. 폐기물을 건설재료 및 지반재료로 재활용함으로써 폐기물의 감량화 및 자원화, 매립량 감소에 의한 매립부지 감소, 폐기물의 적정처리에 의한 환경문제 저감 등의 효과를 크게 거두게 될 것이다.

오염지반 조사시에 탄성파탐사, 전기비저항탐사, 인공분극탐사, 전자기탐사, GPR탐사 등과 같은 지반조사기구가 적극 응용 및 활용되고, 오염지반조사를 위한 이들 기구의 개조 및 탐사기법이 개발될 것이다. 기존에 개발된 환경콘에는 전기전도도, pH 등의 센서가 장착되었으나 향후에는 가스농도, 침출수농도, 방사능 등의 센서가 장착되어 더욱 정밀한 지반오염 조사장비가 개발될 것이다.

오염지반의 공학적 특성에 대한 연구가 활발하게 진행되어 오염지반의 지지력, 전단 및 압밀특성 등의 규명작업이 활발하게 진행될 것이고, 오염지역내에서 구조물을 세우는 경우 오염지반에 대한 기초해석 및 설계기술이 발전될 것이다.

현재까지는 주로 오염지반의 복원시에 물, 오존, 전기, 계면활성제, 미생물, 증기 등을 개별적으로 사용하는 복원기술이 주로 개발되었으나, 앞으로는 이들을 상호 결합한 Hybrid형의 복원기술이 개발되어 개별 오염물질보다는 복합 오염물질을 처리할 수 있게 될 것이다. 자연흡이 가지고 있는 천연의 흡착기능을 이용하는 자연회석기법에 의하여 자연저감이 가능한 오염물질은 자연회석기법으로 제거하고 이외의 오염물질은 인공복원기술을 이용하여 제거하는 기술이 개발된다. 연약지반현장에서 개량공법으로 사용되고 있는 연직배수공법을 활용한 연직배수복원공법의 기초기술이 그동안 개발이 되었으며 향후 이를 오염현장에 적용할 수 있는 실용화 기술이 개발될 것이다.

그동안 건설공사는 환경을 파괴하는 것으로 인식되어 왔던 것은 주지의 사실이다. 그러나 시대적 부응에 따라 앞으로는 환경을 고려하지 않은 건설공사는 진행되기 어렵게 된다. 특히 부지 또는 토지는 모든 인간생활의 터전이 되고 구조물의 기초가 되는 것으로 환경적으로 오염이 되지 않아야 하고 구조적으로 안정성을 유지하여야 한다. 이점에 있어서 토양환경보전법은 환경과 건설이 친환경적인 지속개발을 할 수 있는 법령이 될 것이다. 따라서 앞으로 자연친화형 및 생태계보존형으로 지반환경기술이 개발될 것이다. 그리고 자연환경을 최대한 유지 및 보존시킬 수 있는 자연공생형 지반환경기술이 조성될 전망이다.

1. 노회정, 이재영 (2002) “개량혼합토를 이용한 폐기물 매립지 차수층의 증감속 고정능력에 관한 연구”, 한국지하수토양환경학회지, Vol. 7, No. 2, pp. 63-71, 2002.
2. 문철환, 이재영 (2003. 9), “침하에 의한 폐기물 매립지 최종복토층 HDPE의 영향에 관한 연구”, 한국토목섬유학회논문집 제 2권 3호, pp. 11.
3. 이재영 외 9인 (2000), 산업폐기물처리, 신광문화사.
4. 장연수, 이광열 (2000), 지반환경공학, 구미서관.
5. 정하익 (1998), 지반환경공학, 유림출판사.
6. 정하익 (2003), 지반환경분야 연구활동, 한국건설기술연구원, KICT 개원 20주년 기념연구논총.
7. 전한용, 이재영 (2003), “생물학적 반응시스템(Bio-Rector System)을 이용한 폐기물 매립지”, 한국지하수토양환경학회, Vol. 8, No. 2. pp. 78-86.
8. 환경부 (1996), 인공 차수재 및 복토재 개발, 연차보고서.
9. 한국건설기술연구원 (1992), 도시폐기물의 건설부지활용과 위생매립시스템에 관한 연구, 연구보고서.
10. 한국건설기술연구원 (2000), 건설부산물 유효활용 기술, 연구보고서.
11. 한국건설기술연구원 (1995), 오염지반 및 지하수 정화기술에 관한 연구.
12. 한국건설기술연구원 (1999), 위생매립지 건설 및 비위행매립지 복원기술.
13. 한국지하수토양환경학회 편 (2001), 토양환경공학, 향문사.
14. ASTM Standards Designation NO. E 1527-00. (2000), Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase I Environmental Site Assessment Process.
15. ASTM Standards Designation NO. E 1903-97. (1998), Guide for Environmental Site Assessments: Phase II Environmental Site Assessment Process.
16. Hyun II Park, Seung Rae Lee, M.ASCE and Nam Young Do (2002), “Evaluation of Decomposition Effect on Long-Term Settlement Prediction for Fresh Municipal Solid Waste Sandfills”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 2. pp. 107-118, February 1.
17. O'Mahony, M. M. and Milligan, G. W. E. (1991), “Recycling of Construction Waste”, Waste Materials in Construction, Proceeding, International Conference on Environmental Implication of Construction With Waste Material, Studies in Environmental Science 48, pp. 225-231.
18. U.S EPA (1991), Soil Vapor Extraction Technology Reference Handbook, EPA/540/2-91/003, Glossary.
19. 本多淳裕 (1994), 建設副産物・廢棄物のリサイクル.
20. 財団法人 建設物価調査會 (1995), 建設副産物の再生・處理の積算.
21. 建設省 (1986), 建設事業への 發生廢棄物利用技術の開発, 概要報告書.