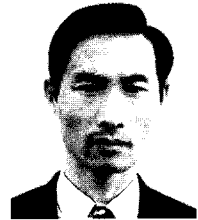


오염 토양 · 지하수의 조사기술

Site Investigation Technology of Contaminated Soil & Groundwater

박 삼 규

농업기반공사 지하수사업처
환경복원기획팀



1. 서 언

최근 들어 지구의 환경보전이 사회적으로 요구됨에 따라 토양 및 지하수질 오염이 사회적으로 심각한 문제로 대두되고 있다. 토양 및 지하수의 오염물질로서는 주로 휘발성 유기화합물과 중금속 등이 있으며, 이들은 유류저장시설 및 송유관, 유해성 폐기물 처분장 등 다양한 시설물에서 오염물질이 발생되고 있다.

오염된 토양 및 지하수를 복원하기 위해서는 오염상태를 정확히 파악하고 오염기구를 해명하여, 이 결과를 바탕으로 오염 복원 대책 입안을 수립해야 한다. 이를 위해서는 오염된 부지를 조사하여 오염물질의 분포와 거동을 파악하여 오염원, 오염 경로 및 오염범위를 정확하게 밝히는 것이 무엇보다도 중요하다.

국내에서도 환경부가 토양오염이 우려되는 지역에 대하여 토양오염 실태를 파악하기 위하여 토양 정밀조사지침(1999)이 발행되어 있으며, 오염된

토양 및 수질에 대한 공정시험법(1999)도 고시되어 있어 토양오염 조사 및 분석방법을 제시하고 있다. 그러나 지반을 구성하고 있는 토양 및 지하수는 그 성상이 매우 복잡하고, 또 점조사에 의해 얻어진 오염정보를 바탕으로 2차원 혹은 3차원의 오염분포를 추정하는데 어려운 점이 많다. 따라서 최근에 이러한 문제점을 보완하기 위하여 지반가시화 기술을 도입한 지구물리탐사가 이용되고 있으며, 그 실시 사례도 점차 증가하고 있는 실정이다.

본 문에서는 토양 및 지하수의 오염조사에 대한 기존의 방법을 개략적으로 살펴보고, 아울러 최근에 오염부지 조사에 소개되고 있는 물리탐사 기술에 대해서 소개한다.

2. 토양 및 지하수오염의 특징

토양 속으로 유입된 오염물질은 스스로 유동성을 가지지 않는 한 토양 공극 내에 존재하는 토양수나 토양 공기에 의하지 않고는 거의 움직일 수 없는 특징을 가진다. 그 결과 폐기물 등과 같은 오염물

질이 토양 내에 묻히게 되면 쉽게 드러나지 않고 마치 청정한 환경인 것 같이 보이게 된다. 그러나 토양이 일단 유해물질에 의해 오염되면 생물 존재 기반으로서의 본래 기능이 훼손되고, 물질의 이동성이 나빠 장기간에 걸쳐 작물 오염 및 지하수 등의 수환경 오염을 유발시켜 생태계는 물론 사람의 건강 및 생활환경에 여러 가지 악영향을 끼치게 된다. 또한 한번 오염된 토양은 그 특성상 자정작용이 어렵고 정화에 많은 시간과 비용이 수반된다는 점이다.

가. 토양오염의 특징

토양오염의 원인물질은 원재료의 누출이나 폐기물의 매립 등으로 지반에 직접 혼입되는 경우 외에도 사업 활동 등에 의해서 야기되는 수질오탁이나 대기오염에 의해서 2차적으로 토양 중에 오염되는

경우가 많다. 토양은 물, 대기와 비교하여 그 조성이 복잡하고 오염물질에 대한 반응도 다양하다.

나. 지하수오염의 특징

지하수질은 함량·침수, 저유, 유출·양수의 각 단계에 있어서 수리지질환경에 의해서 영향을 받는다. 지하수의 오염은 일반적으로 폐기물 매립처분이나 폐액의 지중침수, 토지 이용 등에서 발생하는 경우가 많고, 토양 중의 대수층을 경유하기 때문에 발견이 늦고, 일단 오염이 발생되면 장기화되는 경향이 있다. 또, 대수층에 침수한 유해물질은 지하수의 유동과 함께 입체적으로 확산되고, 시간이 흐름에 따라 변질되어 간다.

3. 오염부지의 조사방법

토양 및 지하수의 오염조사에 있어서 일반적인

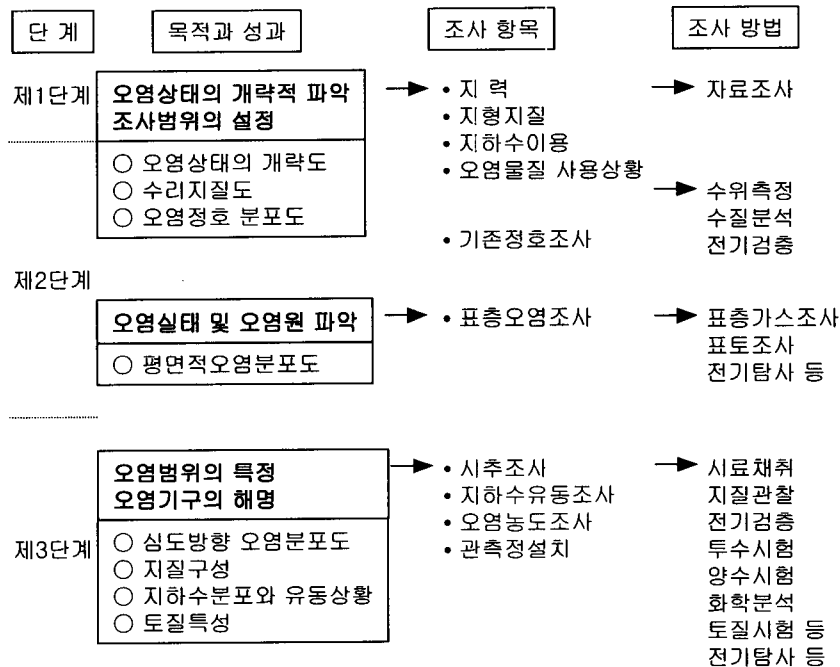


그림 1 오염부지 조사 흐름도

조사 흐름도를 그림 1에 나타낸다.

오염부지의 조사방법은 크게 3단계로 나눌 수 있으며, 단계적으로 조사를 실시하는 것이 보다 효율적이다. 제1단계 조사는 오염개황조사로서 오염상태를 개략적으로 파악하여 조사범위를 선정하기 위하여 실시한다. 제2단계 조사는 오염실태 및 오염원을 파악하여 평면적 오염분포도를 작성하고, 제3단계 조사는 정밀조사로서 오염범위를 특정하고 오염기구를 해명하기 위하여 실시한다. 아래에 각 단계별 조사개요에 대해서 간단히 서술한다.

가. 자료조사

자료조사에서는 표 1에 표시한 자료를 수집하고 조사지의 지하수 오염상태를 개략적으로 파악하여 조사대상 범위를 설정한다. 특히, 지력과 오염물질 사용이력은 평면조사 범위를 설정하는데, 지형 및 지질과 지하수 이용 상황은 시추심도를 설정할 때에 유용한 판단자료가 된다.

나. 기설정호(井戶)조사

자료조사에 있어서 제원이 불명확한 정호에 대해

표 1 수집 자료의 일람표

조사 종별	수 집 자 료
지 력	토지이용변경, 건물, 시설의 이동 등
오염물질 사용이력	오염물질의 경년적인 사용량, 사용 장소, 폐기처분 방법
지형 및 지질	수리지질도, 지질주상도, 전기검층, 현장투수시험 등
지하수 이용 상황	기설정호의 분포, 제원, 이용수량, 수위, 수질 등

서는 전기비저항검층 등으로부터 정호제원(대수층의 위치)을 밝히고, 가능하다면 조사범위의 모든 정호에 대해서 수위측정 및 수질분석을 실시하여 지하수 유동방향 및 오염 확산을 파악한다.

다. 표층오염조사

오염물질이 중금속과 같이 이동성이 작은 경우는 표토조사를 실시한다. 한편, 휘발성의 유기염소화합물의 경우는 침투한 지층 내의 토양가스 농도를 조사한다. 오염물질의 종류별로 농도평면 분포도를 그리고, 사용 장소나 배수경로의 배치도를 중첩시켜 오염원과 평면오염분포를 추정한다. 휘발성이 있는 유기염소계화합물에 적용되는 각종의 표층가

표 2 표층가스 조사법의 비교 (Okumura and Ohora, 1999)

	활성탄흡착 Pyrolysis 질량분석법	검지관법	Portable Gas Chromatograph (GC-PID법)	활성탄흡착 열탈착법 (GC-PID법)
샘플링방법	천공→특수활성탄흡착 관리설치→1~4주 후 회수	천공→지층가스 정량강제흡인	천공→지층가스 정량강제흡인	천공→특수흡착관삽입→ 지층가스 정량강제흡인
측정법	흡착가스를 가열방출→Pyrolysis 질량분석	산화 비색법	Gas Chromatograph법	열탈착→Gas Chromatograph법
검출농도한계	< ppb (상대치)	ppm	ppb	< ppb
분석 시간	(> 2개월)	10분	15분	15분
표준적인측정 간격	수 ~ 수십m (정밀조사)	수m	수 ~ 수십m	수 ~ 수십m (정밀조사)
현장적응성	부적합	가장 적합	적 합	적 합

스 조사법을 비교하면 표 2와 같다.

라. 시추조사

기존자료나 기설정지의 지하수위, 수질의 측정뿐만 아니라 충분한 정보가 얻어지지 않을 경우에는 지질 및 토양의 오염상황, 대수층 별로 지하수의 오염상황 등을 파악하고 관측정을 설치할 목적으로 시추조사를 실시한다.

조사지점의 선정은 원칙적으로 정호조사에 있어서 천층 지하수가 가장 오염된 정호에 근접한 지점, 혹은 표층오염조사에 있어서 가장 오염농도가 높게 검출되는 지점을 선정한다. 다음으로는 그림 2에서 표시한바와 같이 지하수 하류지역에 지하수 유향과 오염농도 분포를 파악하기 위하여 2~3점을 선정하고, 필요에 따라서는 지하수 상류지역(BH-5 지점)의 오염유무를 확인하기 위하여 조사를 실시한다.

시추조사는 여러 가지 방법에 제안되어 있으나, 일반적으로 기계시추를 많이 사용하고 있다. 시추에 의해 토양시료를 채취하여 지층을 관찰함과 동시에 오염물질 농도를 측정한다. 또 시추공을 이용하여 원위치시험, 지하수 수질조사 등을 실시한다.

토양시료 채취는 원칙적으로 오염이 확인되지 않는 심도까지 실시하고, 휘발성유기 화합물 등의 경우에는 현지에서 검지관 분석 등을 실시한다.

그림 3에 시추조사 내용을 열거한다. 토양조사로서는 지층조사와 오염조사로 대별되며, 공내시험을 통해서 지하수에 대한 여러 가지 정보를 얻는다.

마. 원위치(In-site) 시험

원위치 시험으로서는 현지분석, 현장투수시험 및 전기검층 등을 들 수 있다.

1) 현지분석

휘발성 유기염소계화합물이나 탄화수소화합물에 대해서는 표층오염조사(표 2참조)에서 서술한 바와 같이 검지관이나 Potable Gas Chromatograph 법을 이용해서 토양 및 수질의 현지분석을 수행한다.

측정원리는 밀폐된 용기 안에 일정량의 토양과 증류수를 혼합하여 오염물질을 수중에 용출시켜, 이 때 동기 중에 휘산된 오염물질농도를 분석하는 방법이다. 지하수도 같은 방법으로 분석이 가능하다.

2) 현장투수시험

시추공에서 대수층의 투수성을 파악하기 위하여

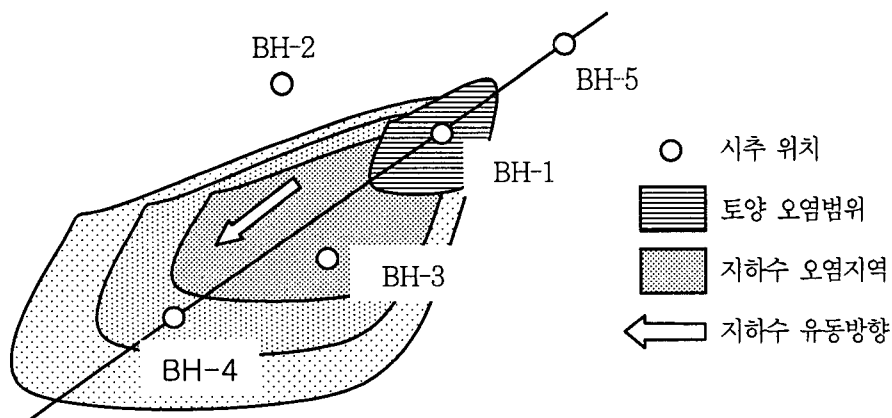


그림 2 오염원 주변의 시추배치 계획

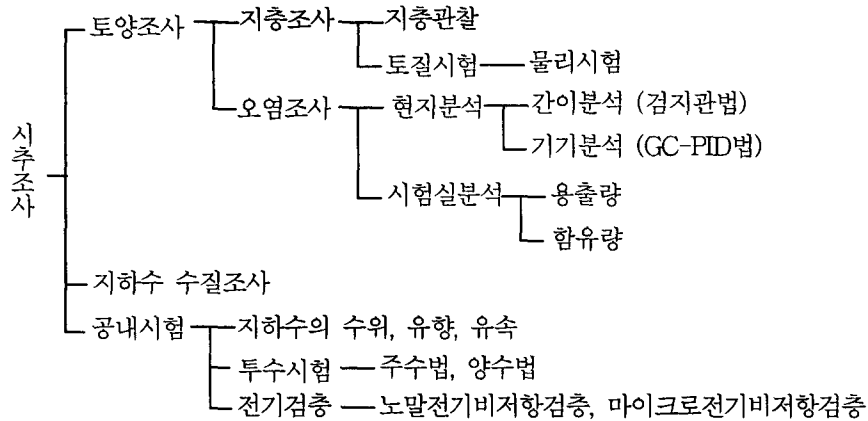


그림 3 시추조사 내용

현장투수시험을 실시한다. 시험방법은 공내에 물을 주입시켜 침수량을 구하는 주입법과, 공내로부터 물을 양수한 후, 수위의 회복을 측정하는 양수법이 있지만, 지층상태 등을 고려하여 적절한 방법을 선택한다.

3) 전기검층 (Electric Logging)

지층의 경계나 호층상태, 대수층의 검출, 불투수층 등을 파악하기 위해서 시추공내의 공벽주위에 있어서 지층의 전기비저항을 측정한다. 특히, 사층중에 얇은 점토층이 협재되어 있을 경우, 대수층과 불대수층을 보다 상세하게 검출하기 위하여 노말 전기비저항 검층(Normal Resistivity Logging) 과 마이크로 전기비저항 검층(Micro Resistivity Logging)을 조합해서 실시한다. 노말 전기비저항 검층은 전극간격이 넓는데 비해서 마이크로 전기비저항 검층은 전극간격이 매우 좁아 탐사 깊이가 얇은 대신에 공벽주위의 상세한 지층 판별이 가능하다.

바. 실내분석 및 시험

토양, 지하수 및 토양 중의 가스에 포함되어 있는 오염물질의 화학분석은 지하의 오염사항을 파악

하기 위해서 중요하다. 또한 토질시험은 오염물질의 흡착성이나 지하수의 투수성 및 토양 중 가스의 투기성을 파악하기 위하여 실시한다.

1) 실내 화학분석

화학분석의 방법은 대상물질과 사용하는 분석기기 등에 따라서 다르지만, 공적기관에서 정한 공정시험법에 따라 실시할 필요성이 있다.

토양시료에 대한 오염분석은 토양오염공정시험법(환경부, 1999)이 고시되어 있으며, 지하수시료에 대해서는 수질오염공정시험방법(환경부, 1999)이 고시되어 있다.

2) 실내토질시험

구성지층의 물리적 특성이나 투수성, 투기성을 파악하기 위하여 토질시험을 실시한다. 시험항목으로는 입도, 비중, 함수량, 단위체적중량(밀도), 투수시험, 투기시험 등으로 토질시험법 등에 따라 실시한다.

사. 지하수 수질조사

오염의 3차원분포를 파악하기 위하여 각 대수층 별로 오염상황을 상세히 파악할 필요가 있다. 오염

표 3 오염부지 조사에 사용되는 지구물리탐사법 (Hiromasa Shima, 1997)

조사 대상	물리탐사의 대상	적용 가능한 기법
오염의 정도와 범위	상당히 고농도의 오염	전기비저항탐사, 전자탐사, 지하레이다 탐사
오염원	금속물(드럼통, 지하탱크)	전기비저항탐사, 전자탐사, 지하레이다 탐사
	비금속(폐기장, 오염플룸)	전기비저항탐사, 전자탐사, 지하레이다 탐사, 마이크로중력탐사
오염경로 (이동기구)	폐기물과 지반의 환경 지하구조의 연속성	전기비저항탐사, 전자탐사, 천층반사법, 마이크로중력 탐사, 지오토모그래피
정화대책	지하구조의 급변한 구조	
정화 모니터링	농도의 변화에 따른 비저항 변화	전기비저항탐사
	지하수 유동	유체유동전위법, 자연전위법
	인공 주입 물에 의한 물성 변화	전기비저항탐사, 지오토모그래피

범위 내에서 기설정호 및 관측정을 이용하여 지하수의 흐름에 따라 공간적으로 지하수 수질조사를 실시한다.

조사는 Screen위치를 알 수 있고 취수 대수층이 확인되는 정호와 관측정에 대해서는 가능한 기후가 안정된 시기에 단기간에 걸쳐 일제히 실시하여 대수층 별로 오염의 확산을 파악한다. 또, 대상오염물질 뿐만 아니라 토양 및 지하수 중의 화학적 분해 상황을 파악하기 위해서 분해 생성물을 조사한다.

4. 새로운 조사기술

토양 및 지하수의 오염조사에 있어서 2차원 혹은 3차원적으로 정확한 오염분포 범위를 파악하기 위해서는 수많은 시추조사 및 시료분석이 필요하게 되고, 이에 수반되는 시간과 경비도 많이 든다. 따라서 일반적으로는 일정 간격의 점조사에 의한 오염정보를 바탕으로 2차원 혹은 3차원적으로 확산시켜 오염분포를 추정하는 경우가 많다. 그러나 지반을 구성하고 있는 토양 및 지하수는 그 성상이 매우 복잡하고 균질하지 않기 때문에 점조사에 의해 공간적으로 확산시킨 오염분포범위 및 정도에

많은 문제점이 내포되어 있다. 최근에 이러한 문제점을 보완하기 위하여 지반가시화 기술을 도입한 지구물리탐사가 오염부지 조사에 이용되고 있으며, 그 실시 사례도 점차 증가하고 있는 실정이다.

가. 오염부지 조사에 이용되는 지구물리탐사법

오염부지 조사에 주로 사용되고 있는 지구물리탐사 방법과 그 이용목적은 표 3에 표시한다.

환경엔지니어링에서 이용되고 있는 지구물리탐사는 오염의 정도와 범위, 오염원, 오염경로, 정화대책 및 정화모니터링을 하기 위한 목적으로 전기비저항탐사(Electrical Resistivity survey)를 비롯하여 전자탐사(Electromagnetic Survey), 지하레이다 탐사(Ground Penetrating Radar), 자연전위법(Spontaneous Polarization), 지오토모그래피(Geotomography) 등의 탐사법이 이용되고 있다.

나. 적용사례

토양 및 지하수의 오염복원을 위해서는 부지내의 오염원이 되고 있는 지하매설관이나 지하저장시설, 오염물질의 분포범위 및 경로, 오염부지의 특성을

효율적으로 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다. 아래에 환경오염조사의 일환으로 실시한 지하매설물, 오염물질의 분포, 유지관리에 적용한 사례에 대해서 소개한다.

1) 지하매설물조사

지하매설물 탐사로 많이 사용되는 것이 GPR이다. GPR탐사법은 고주파 대역 (수 십MHz~수 GHz)의 전자파를 지표에서 송신 안테나를 통해 지하로 방사시킨 후 지표하부의 지층경계, 파쇄대,

공동, 매설관등과 같은 지하의 불균질층이나 물질로부터 반사하여 수신안테나로 포착 될 때까지의 전파시간을 측정하여 지반구조나 매설물의 위치와 형상을 영상화하는 탐사법이다.

그림 4는 유류오염 지역에서 지하매설관을 찾기 위해서 실시한 GPR탐사 결과이다. 이 그림에 의하면, 깊이 30cm 부근에 아스콘 포장층이 매립되어 있으며, 그 하부의 약 3m 부근에 6개(A~F)의 지하매설관이 있는 것으로 추정하고, Trench

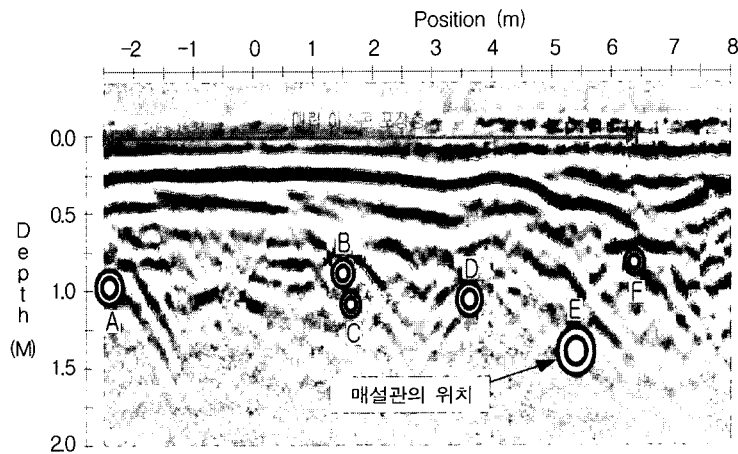


그림 4 GPR탐사 결과로부터 추정한 지하매설관의 위치

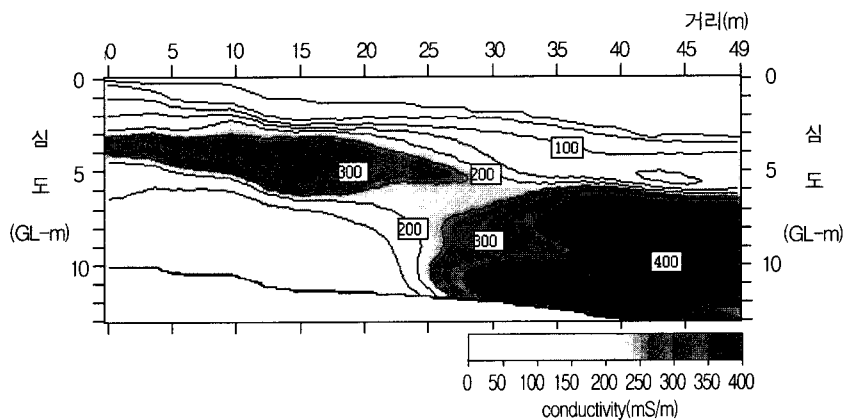


그림 5 전자탐사 결과로부터 얻은 전기전도도 분포

조사에 의해서 그 위치를 확인했다.

2) 오염물질의 분포조사

오염물질의 분포를 조사하기 위해서는 전기비저항 및 전자탐사가 널리 사용되고 있다. 특히, 전자탐사는 자연적 혹은 인공적으로 가해진 전자기장에 의해 지하에 유기되는 유도전류에 의한 2차장 또는 합성장을 측정하여 지하의 전기전도도 분포를 파악하는 물리탐사법이다. 오염부지 조사에 있어서 주로 고주파수 대역을 사용하여 지하천부의 전기전도도를 측정하여 오염물질의 분포를 추정하는 기법이 발달되어 있다.

그림 5는 산업폐기물 처분장에서 실시한 전자탐사(EM31-MK2탐사기)로부터 얻은 전기전도도의 단면도를 나타낸다. 이 그림에서 전기전도도가 상대적으로 높은 부분(300ms/m 이상)이 오른쪽 하단에 나타나고 있으며, 이것은 산업폐기물 처분장에서 흘러나온 침출수가 지하수면 아래로 모여 있기 때문으로 판단되었다.

3) 유지관리

최종처분장의 매립지에서 내부의 오수(침출수)가 지하수나 공공수역에 침입하는 것을 방지할 목적으로 차수공법이 시행되고 있다. 이 차수공법은 합성

고무계나 합성수지계의 시트를 사용한 표면차수공이 많이 사용되고 있으나, 시트의 파손에 의한 침출수의 누수가 우려되고 있다. 최근에 차수시트 자체의 전기절연성을 이용하여 시트에서 발생하는 절연불량 장소를 전위나 전류의 변화로부터 파손의 유무를 전기적으로 검지하는 방법이 개발되어 있다.

그림 6에 전기적 차수기능 진단시스템의 원리를 나타내고 있다. 전면에 차수시트가 설치된 매립지에서 차수시트에 파손이 없을 경우는 매립지 내에 전압을 가해도 전류는 거의 흐르지 않는다. 그러나 차수시트가 파손되면 이 파손부를 통해서 전류가 직접내외를 흐르게 된다. 그래서 이 전류가 발생하면 그림 7(파손이 있을 경우)에 나타난 것처럼 파손부를 중심으로 전위분포의 왜곡이 발생한다. 이러한 전위분포의 왜곡을 차수시트 위쪽에 격자상으로 설치한 전위측정전극으로부터 얻을 수 있으므로 차수시트에 발생한 파손의 유무와 그 위치를 검출할 수 있다.

5. 맺음말

한번 오염된 토양 및 지하수는 오염원인과 범위를 파악하기가 어렵고, 파악할 수 있다하더라도 장

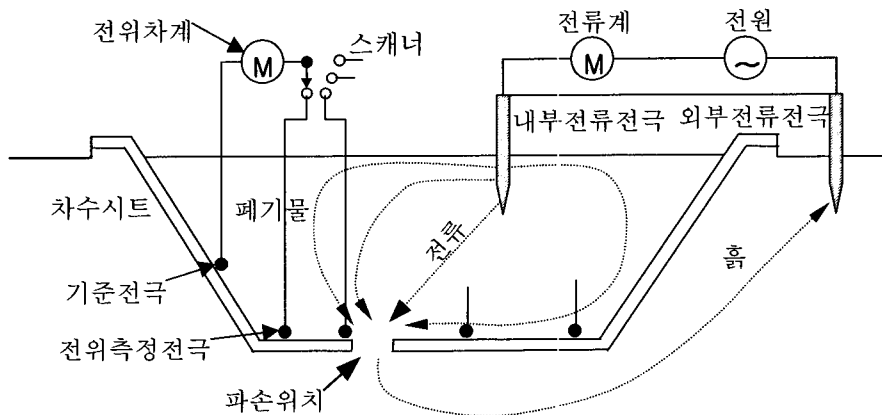


그림 6 전기적 차수기능 진단시스템 원리의 설명도 (Ebihara and Oshikata, 1999)

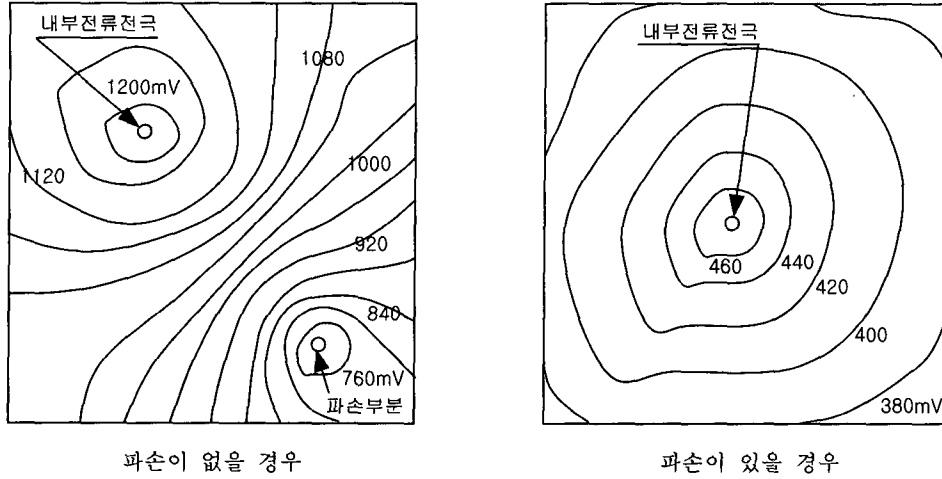


그림 7 모형실험 결과에 의한 전위분포도

기간의 시간과 많은 비용이 소요되는 경우가 많다. 특히 트리클로로에틸렌(Trichloroethylene) 등 유기염소계화합물에 의한 오염은 중금속(육가크롬 제외)이나 PCB의 오염과는 달리 땅속 깊게 침투하여 넓은 범위로 확산된다. 이와 같은 거동을 나타내는 유기염소계화합물에 의한 오염 분포와 거동, 정확효과 등을 파악하기 위해서는 시추조사와 함께 2차원 혹은 3차원의 오염정보를 간편하고 적은 비용으로 조사할 수 있는 기술개발이 요구되고 있다.

최근에 전자기술의 발달에 힘입어 지반가시화 기술이 도입되면서 지구물리탐사가 급속하게 발달하고 있으며, 짧은 시간에 다량의 자료를 획득할 수 있을 뿐만 아니라 탐사결과로부터 2차원 혹은 3차원의 지반정보를 가시화 할 수 있게 되었다. 현재 대부분의 오염조사는 시추조사에 의해서 이루어지고 있지만, 지구물리탐사를 도입해 시추조사와 병행하여 실시함으로써 오염물질의 분포범위 및 거동을 보다 정확하게 파악할 수 있으며, 오염복원의

대책수립을 위한 지반정보를 보다 상세하게 얻을 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

1. 수질오염공정시험방법(제99-208호), 환경부, 2000.
2. 토양오염공정시험방법(제1999-116호), 환경부, 1999.
3. 토양정밀조사지침(토양 67630-215호), 환경부, 1999.
4. Hiromasa Shima, 1997, Geophysical Exploration in Environmental Engineering, Butsuri-tansa, Vol. 50, No. 6, pp. 643-655. (Japanese)
5. Ebihara Masaaki and Oshikata Toshiro, 1999, 最終処分場における汚染の早期発見と修復技術, 基礎工, No. 1, pp. 57-59.
6. Okumura kohei and Ohora Teruo, 1999, 地盤・地下水汚染の調査計測技術, 基礎工, No. 1, pp. 43-47.