

매립지 오염평가를 위한 물리탐사의 적용사례

이철효 ((주)오이코스), 박삼규 (농업기반공사)

Application of Geophysical Prospecting to Site Assessment of Waste Landfill

Cheol Hyo Lee (OIKOS Co., Ltd.)

Sam Gyu Park (Korea Agriculture and Rural Infrastructure Corporation)

요약 : 토양 및 지하수의 오염이 사회적으로 심각한 문제로 대두되면서, 복원대책을 위한 조사 방법으로서 물리탐사 기술이 도입되고 있다. 최근의 물리탐사 기술은 컴퓨터를 비롯한 디지털기술의 발달에 힘입어 측정 및 해석기술이 발전함에 따라 짧은 시간에 대량의 데이터를 취득할 수 있으며, 신뢰성이 높은 해석결과를 얻을 수 있게 되었다. 또한 지반 가시화 기술로 탐사결과를 보다 알기 쉽게 영상화할 수 있게 되어, 오염지반의 조사뿐만 아니라 정화 과정의 모니터링 등에 널리 사용되고 있다.

본문은 쓰레기 매립지를 대상으로 전기비저항탐사 및 전자탐사를 실시하고, 탐사결과를 이용하여 매립지의 오염특성 평가를 위한 물리탐사의 적용성에 대해서 검토했다. 그 결과 전기비저항탐사 및 전자탐사를 통하여 매립장내의 오염분포 및 침출수의 유동경로 등에 유용한 정보를 얻을 수 있었다.

주요어: 물리탐사, 쓰레기 매립지, 환경부지평가

Abstract: Recently, the pollution of soil and groundwater becomes a serious social problem, and geophysical exploration methods have been introduced as a remedial investigation method of subsurface. Digital technologies such as personal computer have revolutionized our ability to acquire large volume of data in a short term, and to produce more reliable results for subsurface image. Also, color graphics easily visualizes the survey results in a more understandable manner, and it is widely used for not only characterizing the contaminated subsurface but also monitoring contaminant and remedial process.

In this paper, electrical resistivity and electromagnetic (EM) surveys were carried out in order to understand characteristics of waste landfills, and the applicability of geophysical prospecting to site assessment of waste landfill was also tested. According to the result, electrical resistivity and electromagnetic (EM) surveys were effective in estimating distribution of the leachate plume.

Keywords: geophysical exploration, waste landfill, environmental site assessment

1. 서론

폐기물의 최종 처리로서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 매립 방식은 매립 운영 기간과 매립 완료 이후에도 지속적으로 환경문제를 안고 있으며 상당 기간 지하수 환경으로 오염물질을 배출하는 대표적인 면 오염원이다. 그 동안 환경 영향을 고려하지 않고 비위생적으로 처리되어 온 매립지는 각종 환경문제를 야기시켜 왔다. 불량매립지에서 발생하는 환경문제로는 크게 유해한 매립가스와 가스폭발 및 악취발생, 폐기물의 분해에 따른 매립층의 부동침하와 사면의 불안정 문제와 침출수의 발생으로 인한 주변 지표수 및 지하수의 오염으로 구분된다. 특히 침출수에 의한 피해는 장기적이고 위해하며, 과거 로마시대에 매립된 쓰레기장에서 발생하는 침출수가 아직도 흘러나와 주변에 영향을 미치고 있으며 (Jones-Lee et al., 1993) 무책임하게 방치된 죽음의 운하였던 러브 캐널 사건은 불량매립지가 대부분인 우리에게 큰 교훈을 주고 있다.

또한 침출수 유출로 인한 토양과 지하수 오염은 궁극적으로 인간의 생활과 밀접한 관련을 맺고 있으며 일단 토양이 오염되면 이를 다시 자연상태로 되돌리기 위한 정화 처리에는 막대한 비용과 상당한 시간을 요구한다.

이러한 오염부지의 정확한 조사를 위해서는 각종 토질조사 및 수리지질조사 등을 실시하여 오염토양 지하하부의 특성 파악, 오염정도 및 추이의 조사, 지하수위, 수질 및 지하수의 유출 특성 등 많은 정밀조사가 선행되어야 한다. 그러나 시추조사는 그 자체가 가지는 1차원적 한계로 인하여 시추지점 직하부의 특성만을 직접적으로 파악할 수 있을 뿐 전반적인 영역에서의 지반 및 오염특성 파악은 이들 시추지점의 각 자료들로부터 유추하게 되므로 많은 무리가 따르게 되고, 지반하부의 토질이나 지하수의 특성, 오염정도 등이 불규칙할 경우 (대부분의 경우 지반하부의 지질구조는 예측하기 곤란하며 따라서 오염물질의 이동경로도 예측이 어렵다), 이들 시추자료 및 시추공에 대한 시험자료만으로 전반적인 상태를 예측하는 데는 많은 오류가 수반되기 마련이다. 따라서, 오염지역의 지반특성 및 오염정도를 전반적으로 파악하는 데는 지구물리학적 이론을 응용한 물리탐사법의 도입이 필요시 되며 국내의 경우 아직 널리 알려져 있지는 않으나 환경 선진국인 서구의 여러 국가들은 일찍이 시추조사 및 시험에 앞선 사전조사로서 물리탐사법을 폭 넓게 활용해오고 있다. 특히 물리탐사법은 주변 환경에 변화를 주지 않는 비파괴적이고 환경 친화적인 장점이 있기 때문에 더욱더 유용한 방법이 될 수 있는 것이다.

오염분포와 그 진행상황의 측정을 위해서는 여러 가지 방법이 사용될 수 있다. 토양샘플이나 시추공 조사를 통한 측정은 직접적인 방법으로 그 조사시간 및 비용면에서 광역적 지역에 대한 조사로는 한계성이 있다고 볼 수 있다. 반면, 물리탐사법은 비접촉, 비파괴적인 방법으로 넓은 지역에 대하여 신속하게 조사할 수 있다는 이점이 있다. 현재까지 물리탐사법은 주로 지질구조 파악이나 광물자원의 조사를 위하여 사용되어 왔으며, 최근 들어 토양 오염조사 등의 환경공학적 문제로의 접근에 사용되기 시작하였다.

그러나, 매립지의 오염조사는 지역에 따라, 매립방법과 매립시간 및 매립지 조건 등에 따라 매우 불균질하고 복잡한 특성을 나타내게 되며 현재 국내에서의 적용은 도입단계로 그 연구와 적용사례가 절대적으로 부족하여 다양한 상황에 신속하고 적절하게 대처하기 어려운 실정이다. 이에 본고에서는 물리탐사법을 매립지에 적용함에 있어서 우선 매립지의 특성을 살펴보고, 매립지와 물리탐사와의 관계를 통해서 매립지 평가를 위한 탐사방법의 적용성을 평가하고, 국내외의 물리탐사 적용사례 분석을 통해서 매립지 조사방법으로서 물리탐사의 유용성을 살펴보고자 한다.

2. 환경 물리탐사 개요

오염지역을 조사하는 방법으로는 크게 항공기나 인공위성을 통해 얻은 사진이나 스펙트럼을 판독하는 공중 원격탐사 (airbone remote sensing), 본고에서 다루고자하는 지표물리탐사 (surface geophysical survey), 지중의 공내에 검층기기를 삽입하여 시추조사의 약점을 보완하는 공내 물리검층 (borehole logging), 오염지역을 직접 시추하여 시료를 채취하는 시추조사 (drilling survey) 및 관입콘센서를 지중에 삽입하는 관입조사 (penetrating survey)로 나눌 수 있다. 이들 오염지반조사의 물리탐사 방법에 대한 특성은 표 1과 같으며, 일반적으로 많이 사용되는 물리탐사의 오염조사 적용성은 표 2와 같다. 물리탐사의 범위는 매우 광범위한 반면, 시추조사의 조사영역은 상대적으로 작고, 특정지점중심의 조사에 국한되어 있다.

표 1. 물리탐사의 특성비교 (US EPA, 1993)

방 법	토질 /지질	침출수	매설 폐기물	NAPLs	탐사깊이(m)	경제성
지표 전기 및 전자탐사						
Self potential	예	예(C)	예	아니오	S 10s	L
Electrical resistivity	예	예(C)	예(M)	가능	S 50(km)	L-M
Induced polarization	예	예(C)	예	가능	S km	L-M
Complex resistivity	예	예(C)	예	예	S km	M-H
Dielectric Sensors	예	예(C)	아니오	가능	S 2	L-M
Time domain Reflectometry	예	예(C)	아니오	예	S 2	M-H
Electromagnetic induction	예	예(C)	예	가능	S 60(200)	L-M
Transient electromagnetics	예	예(C)	예	아니오	S 150(200+)	M-H
Metal detectors	아니오	아니오	예	아니오	C/S 0-3	L
VLF resistivity	예	예(C)	예	아니오	C/S 20-60	M-H
Magnetotellurics	예	예(C)	아니오	아니오	S 1000+	M-H
기타 지표 물리탐사						
Ground penetration radar	예	예(C)	예	예	C1-25(100s)	M
Magnetometry	아니오	아니오	예(F)	아니오	C/S 0-20	L-M
Gravity	예	예	아니오	아니오	S 100s+	H
Radiation detection	아니오	아니오	예(핵)	아니오	C/S 지표부근	L
[비고] (C)=오염물질이 지하수의 전도도를 변화시킬 때 감지된 오염 (F)=철금속, (T)=전도도보다는 온도에 의해 감지된 오염, S=지점측정, C=연속측정, L=낮음, M=중간, H=높음						

쓰레기 매립지에 대한 평가방법으로서의 물리탐사는 오염특성 및 오염영역과 오염확산에 대한 전체적인 정보를 제공함으로써 주변환경에 변화를 주지 않는 비굴착 및 비파괴조사의 효과적인 방법이며, 최근 탐사방법의 효율성과 경제성이 인정되어 적용이 증가하는 추세에 있다 (Richaed et al., 1995; LaGrega et al., 1994). 탐사방법은 매립지의 오염환경 특성을 정성적, 정량적으로 평가하는 유용한 수단으로 사용되고 있다 (Ward, 1990).

일반적인 매립지에 있어서 물리탐사의 적용은 다음과 같은 장점이 있다 (Whitely et

al., 1992).

- 매립지의 수평적 크기 및 매립깊이 결정
- 매립지내의 빈공간과 같은 대규모의 불균질대 위치 파악
- 폐기물이 집중적으로 매립되어 있는 부분 확인
- 오염구간 (plume) 및 매립구조 파악
- 침출수에 의한 지하수 오염파악

표 2. 물리탐사의 환경오염 평가 적용성

적 용	GPR 탐사	전자탐사	전기 비저항탐사	탄성파 굴절탐사	금속 탐사	자력 탐사
자연조건						
흙 및 암반의 층두께	1	2	1	1	NA	NA
수평변화 작성	1	1	1	1	NA	NA
연직깊이 결정	1	2	1	1	NA	NA
수평 또는 연직조건에 고도분석	1	1	2	2	NA	NA
수면깊이 및 대수층 두께	2	2	2	1	NA	NA
포화 파쇄대, 전단지역	2	2	2	2	NA	NA
점토층의 작성	1	1	1	2	NA	NA
공동 및 함몰 탐지	1	2	2	2	NA	NA
침출수 및 오염원						
오염물질의 존재	2	1	1	NA	NA	NA
오염경계의 작성	2	1	1	NA	NA	NA
오염물질의 수직범위 결정	2	2	1	NA	NA	NA
오염물질의 양	NA	1	1	NA	NA	NA
흐름방향 결정	2	1	1	NA	NA	NA
흐름율	NA	1	1	NA	NA	NA
수면 상하의 오염물질 탐사	2	2	2	NA	NA	NA
비포화대 오염물질 탐사	2	1	1	NA	NA	NA
[비고] 1=일차적 사용, 2=이차적 사용, NA=적용성 없음						

오염부지의 조사를 위해서는 여러 가지 물리탐사방법이 사용될 수 있는데, 이는 근본적으로 폐기물이나 이로부터의 침출수 자체가 주위 토양 또는 지하수나 암반과는 다른 물리적 성질을 가지고 있다는 사실에 기초를 두고 있다. 침출수나 기타 유류, 용제류 등은 일반적으로 주위 지하수에 비교하여 현저한 전기적 성질의 차이를 보이게 되고, 오염물질 자체도 주위 환경과는 다른 물리적 혹은 전기적 성질을 보이게 된다. 또한 하부의 지질구조나 암석, 토양의 성질에 따라 오염물질의 이동경로가 결정되므로 이의 파악 또한 매우 중요하다 할 수 있다. 이에 물리탐사를 실시함으로써 오염정도 및 분포 상황을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 주변 지질구조 파악을 통하여 오염의 원인 규명 및 향후 오염분포의 예측이 가능하며 일정기간의 정기적인 측정을 통하여 시간 경과에 따른 오염 진행상황을 파악할 수도 있다.

환경오염 조사에 적용할 수 있는 물리탐사방법은 전기탐사, 전자탐사, 탄성파탐사, 중력 및 자력탐사와 지표 레이더 (GPR) 탐사 등 여러 가지 방법이 있는데 오염토양을 대상으로는 전기탐사, 전자탐사와 GPR탐사가 주로 이용되고 있다. 선진 외국의 적용 예로서는 오염

토양에서 전기비저항 및 전자탐사 (Barker, 1990; Buselli et al., 1990)와 자력탐사, 전기비저항 및 굴절법탐사 (Carpenter et al., 1991)를 적용한 경우 등 수 많은 사례가 있으며 이외에 GPR 탐사 (Lanz et al., 1994)와 시추공 지구물리탐사를 적용한 사례가 있다.

표 2에서와 같이 환경오염과 매립지 침출수에 대한 적용성이 매우 양호한 전기비저항탐사와 전자탐사에 대하여 주로 살펴보고자 한다. 적용 방법에 있어서 가장 간단하며 광역적인 조사에 효율적인 방법으로 알려진 전기비저항탐사법과 전자유도 탐사법을 사용하여 매립지와 주변지역의 전기전도도를 측정하고 이로부터 매립지와 주변의 오염특성을 파악하고자 하였으며 물리탐사방법을 통한 매립특성의 해석과 침출수 차단을 위한 수단으로서 차수벽의 누출평가 적용성을 알아보려고 하였다.

3. 매립지 특성과 침출수발생

매립지에 물리탐사방법을 적용하기 위해서는 매립지의 특성과 매립지에서의 침출수 발생을 이해해야 한다. 탐사는 간접조사 방법이므로 자료의 정확성과 유용성의 증대를 위해서는 매립지의 특성을 반영한 직접조사가 병행되어야 한다.

3.1. 매립지의 기능

폐기물의 처리과정은 일반적으로 수집 운반과정, 중간처리과정, 최종처리과정으로 구분할 수 있으며, 최종처리과정은 폐기물을 최종적으로 자연에 환원하는 과정이므로 원칙적으로 매립처리만이 유일한 처분방법이라 볼 수 있다. 매립처분은 생활 환경 보전상 지장이 생기지 않는 방법으로 폐기물을 적절히 매립함으로써 자연계의 대사기능을 이용하여 안전화, 무해화하는 데 목적이 있다. 이 목적을 달성하기 위해서는 매립처분의 계획과 운영방법이 중요하며, 이것은 지역의 특성과 폐기물 특성에 따라 결정되어야 하고 그 결정을 위해서는 폐기물의 발생량과 종류, 최종처리장의 위치 등 많은 인자들을 고려해야 한다.

최종처리장으로서 매립지가 갖추어야 하는 기능은 첫째, 매립된 폐기물이 안전하게 저류될 수 있는 저류기능, 둘째, 침출수 등 매립지내에서 발생한 폐액이 외부로 누출되는 것을 방지하는 차수기능, 셋째로, 폐기물의 안정화, 침출수의 감량화 및 양질화를 도모하며 유해가스 및 악취발생, 폐기물 비산, 해충서식 등의 영향을 최소화할 수 있도록 하는 처리기능을 갖추어야 한다 (환경부 1991).

3.2. 불량매립지

이상과 같이 매립지가 갖는 기능인 매립폐기물의 저류, 차수, 처리기능을 갖지 않은 매립지는 불량매립지이며 일일복토, 중간복토 및 최종복토를 하지 않은 매립지를 비위생 매립지라 할 수 있다. 따라서 불량매립지는 당연히 비위생 매립지라 할 수 있다.

미국토목학회(ASCE)의 위생매립지에 대한 정의는 다음과 같다 (EPA, 1989).

위생매립(Sanitary Landfill)이란 주민을 포함한 공공의 건강이나 안전에 해(hazard)가 됨이 없고 폐(nuisance)가 없도록 폐기물을 처분하는 행위로서 공학의 원리를 이용하여 가능한 한 적은 면적에 폐기물 부피를 최소화한 다음 처분된 폐기물을 최소한 매일 복토로 덮는 방법이다.

우리나라 폐기물 관리법상에는 흔히들 많이 사용하는 위생매립이란 용어가 없고 대신 특정폐기물에 대하여 관리형 매립지와 차단형 매립지 및 안정형 매립지로 구분하고 있으며 일반폐기물은 보통 관리형 매립에 준하는 실정이다. 따라서 법규상의 매립시설기준을 만족시키지 못하는 것을 불량매립지라 할 수 있다.

그러므로 난지도 매립지는 매립지로서 갖추어야 할 아무런 기능이 없는 전형적인 불량매립지로서 매립지라기보다는 시간이 오래 경과된 중간 적환장으로서의 기능만이 있는 셈이다.

3.3. 매립지의 장기적 반응과 영향

폐기물 매립지는 보통 “연속적인 화학적, 생물학적 고정상 반응기(continuous-chemical-and-biological-fixed-bed reactor)”로 정의하며 매립지의 복잡한 분해반응 산물은 침출수와 매립가스(LFG, Landfill Gas)이다. 매립지내 잔류 고형혼합물은 유기물과 무기물로 구성되어 있고 화학적으로 활성이 없으며 (inert), 물보다 용해성과 유동성이 훨씬 작다.

매립지에서의 환경오염방지는 분해산물인 가스와 침출수의 관리 및 처리이며, 매립된 상태의 폐기물로부터의 분해산물이 장시간 동안 주변환경에 동화(compatible)할 수 있을 때까지 관리해야 한다. 즉 매립지의 최종저장 능력(final storage quality)은 매립지에서의 유출물이 더 이상의 처리없이도 매립지 주변 자연환경에 해를 끼치지 않고 조화를 이룰 수 있는 상태를 의미한다 (Chrestensen, 1989).

그림 1은 매립지에서의 특정물질이 시간에 따라 침출수와 가스로 유출되는 형태를 나타낸 그림이다. 매립지에서의 분해산물인 가스와 침출수는 매립지를 벗어나면서 많은 환경오염물과 접하게 된다. 그러나 주요 가스생성물은 10~20년간 지속되며 이 기간 동안만 관리되는 반면 침출수는 가스보다 장시간 중요한 잠재오염원으로 주변환경에 지속적인 위협의 존재가 되고 있다. 따라서 폐쇄 매립지에서의 주요 관리 대상의 오염원은 침출수이며 이로 인한 주변환경오염 특성을 분석하고 관리하는 것이 매립지에서 가장 중요한 사항이다. 침출수의 관리기간은 장기간 주기적인 모니터링 후에야 결정이 가능하며, 또한 목표 관리수질에 따라서도 유동적이지만 오랜 시간 지속적인 관리가 필요함을 알 수 있다.

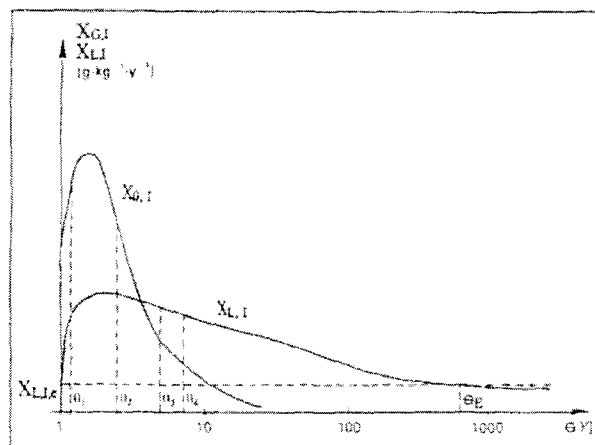


그림 1. 매립지 유출물의 시간에 따른 변화 양상 (Chrestensen, 1989).

$X_{G,i}, X_{L,i}$: 특정물질 i 가스와 침출수의 유출량

$X_{L,i,e}, t_E$: 최종 저장 능력에 도달한 특정물질 i 의 유출량과 도달 시간

3.4. 침출수의 발생과 영향요소

매립지의 폐기물 중에서 분해 가능한 유기물질이 미생물에 의해 분해되고 용해되어 침출수로 나타나는데, 이때 발생하는 침출수의 주성분은 유기산으로 메탄 형성 박테리아에 의하여 분해되며 메탄과 이산화탄소 그리고 물로 변한다. 분해성 유기물질이 미생물에 의해 분해되어 최종적으로 안정화, 토양화가 이루어진다고 생각할 수 있다.

매립지에서 침출수의 발생량과 수질을 결정하는 인자로는 강우량이 복토층을 통과하는 침입수의 양과 폐기물의 함수능 (field capacity) 및 수리전도도(hydraulic conductivity) 등이 있는데, 그 중 가장 큰 영향인자는 침입수의 양이다.

침출수의 발생량을 결정짓는 인자로서, 강우량 중 복토층을 통과하는 침투수의 양 (infiltration), 증발산량 (evapotranspiration) 및 표면유출율 (run-off) 등이다. 강우가 매립지 표면에 도달되면 일부는 표면 유출되고 일부는 침투된다. 또한 일부는 증발산으로서 대기중에 방출되며 침투된 물의 양이 증발산량보다 크면 매립지 함수율은 함수능을 초과하여 침출수로 증력배수된다.

불량매립지는 복토도 불량하여 우수가 그대로 유입되어 침출수량이 많으며 주변 지역보다 큰 충전율(recharge rate)은 매립내부의 침출수위를 상승시키고 (mound), 수리동수구배가 커져서 국부적인 지하수흐름을 교란시켜 모든 방향으로의 방사상 흐름을 일으킨다. 다행히 지하수량에 비해 적은 양의 침출수가 유입되면 회석비도 커지고 침출수위 상승도 작아 국부적인 지하수흐름에 변화를 주지 않고 지하수와 함께 이동하므로 하류구배만을 오염시킨다.

4. 매립지와 물리탐사의 관계

4.1. 매립지 오염원의 이화학적 성질

매립쓰레기에서의 침출수의 누출은 지반의 물리화학적 성질을 변하게 한다. 매립지 주변의 물리적 성질은 매립대상물질의 특성, 매립구조 및 매립방법, 그리고 각종 오염원에 의한 화학적 및 생물학적 작용에 따라 상당히 변하게 되며, 이러한 성질은 지반의 전기전도도, 유전상수 등에 영향을 미치게 되며, 탐사의 방법은 이러한 물리화학적 특성을 평가하는 방법이다. 매립지에서의 오염물질은 매립지의 생화학적인 반응의 결과로 발생하여 토양과 지하수를 오염시키고 특히 침출수와 같은 이온성 오염물질의 증가는 전기전도도를 증가시키게 된다. 특히 전기장이 가해졌을 때 전류를 흐르게 하는 능력을 의미하는 전기전도도는 금속성이나 이온성 물질이 있을 경우 높게 나타난다.

오염부지의 효율적인 조사를 위해서 먼저 오염물질의 누출 등에 의해 유기되는 주변 토양이나 지하수 및 암반의 물리적 성질의 변화를 고려하고 그 물성변화의 측정에 가장 적합한 물리탐사법의 검토를 수행하여야 한다.

오염물질이 토양으로 누출되어 야기된 이러한 물성치의 변화를 검토한 후, 가장 적합한 물리탐사법들에 대하여 기술하고 이들을 이용하여 부지 주변의 오염도를 직접 조사하여 얻어진 자료를 처리, 해석함으로써 오염토양의 지질학적, 지구물리학적 조건에 적합한 물리탐사법과 자료처리 및 해석기법을 확립할 수 있는 것이다.

화학물질과 침출수의 누출은 주위 토양의 화학적 성질뿐만 아니라 물리적인 성질에도

큰 변화를 주게 되는데, 주변토양에서의 물성의 변화는 오염물질의 특성, 지질구조, 그리고 각종 생물학적, 화학적 작용에 따라 변하게 된다. 이러한 물성치 변화 중 물리탐사에 효율적으로 이용될 수 있는 것으로는 전기전도도, 유전율 등을 들 수 있다.

4.2. 전기전도도와 전기비저항

전기전도도 혹은 전기비저항의 변화는 환경오염 조사에 가장 효과적으로 이용될 수 있는 물성치 중의 하나이다. 전기전도도는 오염물질 자체의 특성에 따라 변할 수 있으며 매립장의 침출수는 일반적으로 주위에 비하여 높은 전기전도도를 보이게 된다. 또 유류나 용제류는 오염되지 않은 지하수나 주위 토양에 비하여 현격히 낮은 전기전도도를 보이게 되므로 이러한 전기전도도의 차이에 의한 오염토양의 측정은 가장 효과적인 방법 중의 하나이고 또한 가장 먼저 적용되기 시작한 방법이다. 미고결 퇴적층에 있어서 전기수직탐사(VES)를 병행해서 얻은 현지 각 대수층의 전기비저항치와 대상 대수층의 수리전도도(K)와 투수량계수(T)사이에는 매우 밀접한 관계가 있음이 오래 전부터 알려져 왔다 (한정상, 1988).

일반적으로 지하수와 같이 균질유체는 대체적으로 수리전도도가 대수층의 구성물질의 입경 분포상태, 구성입자의 모양, 공극의 형태, 공극의 배열, 표면적과 같은 암체의 고유투수계수와 지하수자체의 특성에 따라서 변한다.

대수층의 고유투수계수는 공극, 공극의 배열상태나, 유효공극의 전기전도도에 따라 크게 좌우되므로 대수층의 수리전도도(K)는 바로 지층의 고유투수계수에 따라 변할 뿐만 아니라 유효공극의 전기전도도에 직접 비례할 것이다. 대수층내에서 전류의 흐름은 대수층내에서의 지하수의 흐름과 같이 저항이 작은 통로를 따라 흐른다. 공극내에서나 공극 주위에서 전기전도도의 형태는 일반적으로 이온 상태다. 그러므로 대수층의 전기비저항치는 대수층 매질 자체의 고유 전기비저항보다는 공극과 공극에서 전류의 흐름경로는 수리적인 흐름경로와 유사하다. 따라서 대수층의 전기비저항은 대수층의 수리전도도와 아주 밀접한 관계를 가진다

지하수 환경내에 오염물질이 유입되면 지하수의 전기비저항이 크게 달라지므로 오염운(contaminant cloud)의 이동상황은 제반 수리분산인자를 이미 알고 있는 지역에서는 이러한 전기비저항을 조사하여 최소의 경비로 오염범위를 손쉽게 유추할 수 있다.

전기비저항의 크기를 결정하는 여러 가지 요소로는 암석의 공극률, 공극의 유체포화율, 공극 내외의 유체의 성질, 조암광물의 종류, 암석구성입자의 크기 및 성질, 조암광물의 종류, 암석의 고화도 등을 들 수 있으며, 파쇄대, 균열대, 단층 및 기타 지질구조의 형태 등도 전기비저항의 변화에 큰 영향을 준다. 일반적으로 지층의 비저항은 공극률, 공극내의 유체의 염도, 지층내의 유체의 분포상황 등의 순으로 큰 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다.

전기비저항은 주로 지층의 공극율과 공극을 채우고 있는 유체의 염도에 의해 결정된다고 하였다. 이러한 현상은 대부분의 조암광물이 전기적 부도체이기 때문에 발생된다. 수분의 전기전도도는 그 수분에 용해되어 있는 미량의 전해질에 의하여 현저하게 변한다. 이 전해질은 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ 등의 양이온과 CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_2^{2-} 등의 음이온 등이며 이 물질들의 농도에 따라 변하게 된다.

현재 전기탐사는 제반 지구물리탐사와 함께 환경적인 요인에 대한 기초적이고 광역적인 탐사로서 세계적으로 널리 사용되고 있으며 특히 지하수와 관련되어 많은 연구가 진행되어 왔고 현재도 진행되고 있다. 그러나 이러한 전기탐사는 수질조사, 지질조사, 지화학탐사, 토질조사, 지반 역학조사 등의 기타 조사들과 함께 병행되면서 각각의 결과를 고려하여 종합적으로 평가가 이루어 질 때 최대의 해석 효과를 기대할 수 있다.

전기전도도의 차이를 이용한 물리탐사법은 크게 전기 및 전자탐사로 대별할 수 있는데, 전기탐사는 직류 혹은 낮은 주파수의 교류를 이용하는 방법으로 대개 대지에 접촉한 전극사이의 전위차를 측정하여 지하의 전기비저항을 측정하며, 대표적인 방법으로는 전기비저항 탐사법을 들 수 있다. 전자탐사는 고주파수의 교류를 이용하는 방법으로 일차 전자기장에 의하여 유기되는 이차 전자기장을 측정함으로써 지하 전도체의 분포를 확인하는 방법이다. 일반적으로 지표와 직접 접촉없이 탐사를 수행하므로 전기탐사법에 비하여 신속한 탐사가 가능하다.

5. 매립지 탐사사례분석

5.1. 사례1 - 난지도 매립지 물리탐사 적용

매립지의 특성평가를 위한 탐사방법의 적용은 난지도 매립지에서 최초로 적용되었으며, 그 이후로 많은 연구가 진행되었다. 삼성건설에 의해 1993년부터 시작된 난지도 매립지 안정화 사업의 기본설계에서 대규모 매립지의 조사와 진단을 위한 본격적인 탐사방법이 적용되었다. 이후에도 난지도를 대상으로한 다양한 연구가 김형수 외(1995) 권병두 외(1995) 등 다수에 의해 수행되었다.

1) 난지도 매립지 침출수 수질의 분포 특성

BOD, COD, TDS, 전기전도도(EC)와 Cl^- 등의 침출수 농도를 이용하여 매립지로부터 이격거리에 따른 오염물질의 농도를 비교하여 침출수 수질의 수평농도 분포 특성을 고찰하여 보았다. 매립지로부터 이격 거리에 따른 오염물질의 농도는 매립지 중심으로부터 거리가 멀어질수록 농도는 비선형적으로 감소하는 경향을 보였다 (그림 2). 이러한 현상은 난지도 매립지의 침출수가 매립지 중심부에서 방사상으로 이루어지며 그 주변 지하수환경으로 이동하고 있으며 최종적으로는 한강과 샛강으로 유출되고 있음을 뒷받침해 주고 있다. 대체적으로 매립지에서 동일거리에 위치한 관측지점에서 각 오염성분별 농도는 한강쪽이 샛강보다 높는데 이는 한강쪽으로 유출되는 침출수의 유출량(flux)이 샛강쪽보다 많기 때문인 것으로 판단된다.

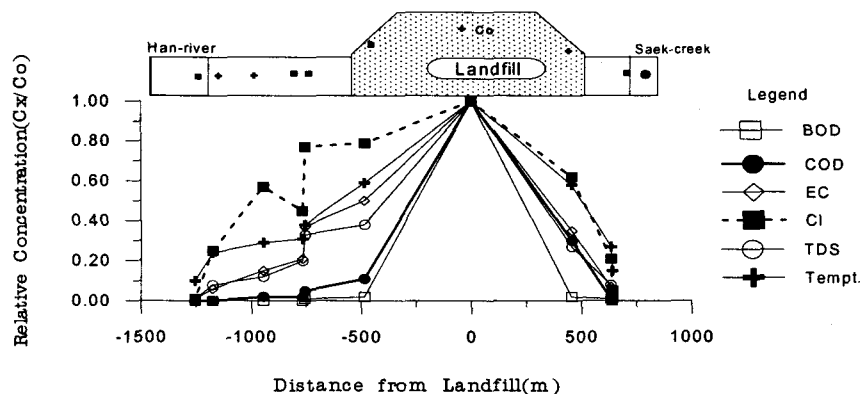


그림 2. 매립지로부터 이격 거리에 따른 오염물질의 농도.

매립지의 침출수 성분을 이용한 오염거리를 평가해보면 전체 평균 오염거리는 약 695m

정도로 나타났다 (이철호, 1994). 매립지에서 한강까지의 평균거리가 350 m 내외이므로 한강 주변의 하류 구배 구간에 분포된 총적층과 한강은 이미 침출수에 의해 상당히 오염된 것으로 해석되었다. 따라서 물리탐사를 이용한 오염구역의 탐사를 실시할 경우 이러한 특성을 반영하여 매립지 내부와 주변지역, 오염구간과 비오염구간, 상류지역과 하류지역의 구분을 통한 탐사결과의 비교는 의미 있을 것이다.

2) 전기전도도 (EC) 측정 및 분석

EC는 오염물질의 이온강도를 나타내는 수질인자로서 물에 용해되어 있는 용질의 총량(TDS)을 나타내는데 사용할 수 있다. 일반적으로 EC는 salt의 함량에 따라 증가하기 때문에 온도와 마찬가지로 현장에서 측정이 매우 용이한 인자이다. 따라서 비오염 지하수는 EC가 매우 낮으나 침출수에 의해 오염된 지하수는 다량의 용존물질과 salt를 함유하고 있으므로 비오염 지하수에 비해 EC가 매우 높고 침출수에 의해 오염정도가 클수록 EC값은 증가한다. EC는 온도가 1°C 증가함에 따라 약 2 %씩 증가한다.

침출수의 EC는 43,400 $\mu\text{S/cm}$ 이고 S-4 관측정의 배경 EC는 200~270 $\mu\text{S/cm}$ 였다. 매립지로부터 거리에 따라서 EC의 절대값이 서로 상당한 차이를 보이는데 이는 각 지점별로 오염받은 intensity가 서로 다르기 때문이다. 대체적으로 매립지에서 거리가 가깝고 침출수의 flux가 클수록 EC의 값이 크다. 비오염 지하수의 TDS와 EC는 지하수의 수온에 따라 약간의 차이가 있긴 하나 대체적으로 $\text{TDS}=(0.55-0.75)\text{EC}$ 의 상관관계를 가지고 있다. 그러나 난지도 매립지 인근 지하수계에서 측정한 TDS와 EC의 상관관계는 $\text{TDS}=155+0.39\text{EC}(r=99)$ 이다. 이는 비오염 지하수의 상관관계와는 전혀 다른 양상을 보이고 있다.

일반적으로 EC는 용존 고형물 (dissolved solids) 이외에 colloid 상태나 입자로 존재하는 오염물질이나 침전물 또는 오염된 지하매체의 전기전도도를 종합적으로 나타내는 수질특성인자이므로 현장상태의 지하수 오염정도를 탐지하는데 있어 TDS보다 광범위하게 사용할 수 있는 오염지시인자이다. 뿐만아니라 전기비저항은 EC의 역수이므로 매립지내에서 침출수의 수두나 침출수에 의해 오염된 지하수의 오염구간(plume detection)이나 오염정도를 판명하는데 전기비저항탐사를 사용할 수도 있음을 암시한다.

3) 난지도매립지 전기비저항 분포해석

난지도 주변에서의 전기비저항 분포를 파악하여 오염의 정도를 간접적으로 파악하기 위하여 오염의 영향이 적은 난지도 배후 지역과 상류구배 및 하류의 한강변을 따라 매립지 주변 일대의 전기비저항 수직탐사를 실시하였다. 탐사지점 (그림 3)과 관측치와 해석 결과를 그림 4에 나타낸다. 측정된 비저항치를 지표층과 저비저항층 그리고 고비저항층으로 단순화시켜 상대적으로 오염 가능성이 큰 구간을 쉽게 구분할 수 있다. 저비저항층은 침출수에 의해 영향을 받아 저항이 적게 나타나는 층으로 해석할 수 있다.

난지도 주변 지역 전기탐사 결과의 가장 큰 특징은 난지도의 한강변에서의 저비저항층이 가장 두껍게, 그리고 매립지의 E5, E6은 측정심도 전구간에 걸쳐 나타나는 현상을 볼 수 있으며, 총적층 전구간과 암반층 일부 구간을 오염시키고 있음을 간접적으로 나타내고 있다. 이러한 결과는 난지도의 오염된 지하수가 한강으로 유입됨을 암시한다고 볼 수 있다. 한강변의 매립지 경계 부위는 측정심도 전구간이 오염된 것으로 나타났으며 특히 E6의 저심부로 갈수록 크게 낮은 비저항치는 구조대의 가능성을 보이고 있다. 이것은 이 부근의 관측공인 C지점의 암반층에 구조대가 발달하고 있다는 결과와 잘 일치한다. 한강 쪽으로의 오염부하 특성을 보기 위하여 E8, E9의 일직선상의 측정 결과에서 보는 바와 같이 매립지 쪽인 E8의 비저항치는 10 ~ 20 ohm-m의 낮은 값을 나타내고 이층이 두껍고 한강 쪽으로 갈수

록 점이적으로 변하여 E9에서는 20 ~ 30 ohm-m의 비저항치를 나타내고 층도 알아지는 특성을 보이고 있다. 즉, 매립지에서 한강 쪽으로 갈수록 한강의 영향으로 비저항 값이 커지고 심도가 작아지는 것은 매립지에서의 두꺼운 침출수 오염원이 한강으로 들어가면서 희석되는 현상으로 해석할 수 있다.

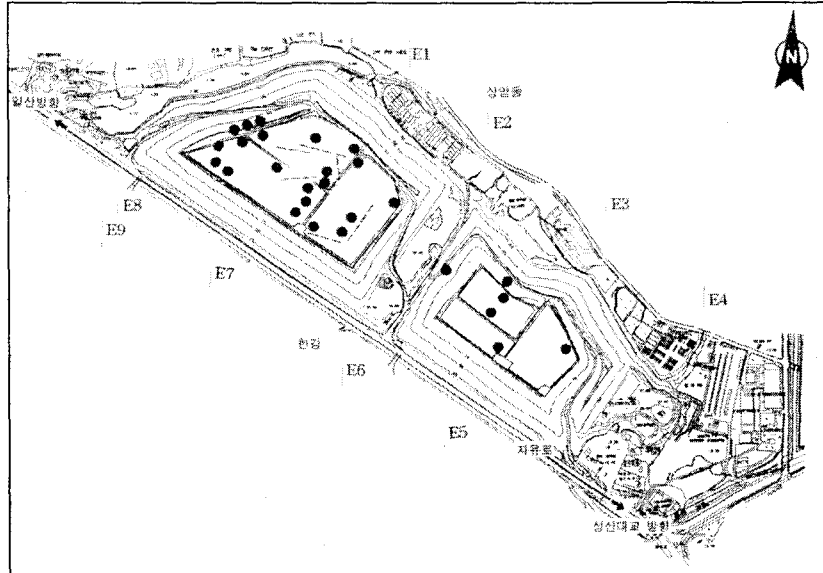


그림 3. 수직탐사 지점도.

한편, 상암동 일대에서 얻어진 자료는 한강 쪽과 대조적으로 지하 약 20 m 지점부터 200 ohm-m 이상의 상대적으로 큰 전기 비저항층이 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 상대적으로 높은 비저항은 이 지역의 기반암이 지표로부터 매우 가까이 존재하거나 이 지역의 지하가 지하수에 의해 상대적으로 적은 영향을 받고 있는 것으로 보여진다. 그러나 이러한 난지도 주변 부위에서의 결과는 난지도 주변을 끼고 흐르는 셋강과 한강의 지표수가 지하 전기비저항 구조에 미치는 영향도 함께 고려해야 더욱 타당한 자료 해석이 될 것이다.

E4부근은 주변의 하수 슬러지 집중매립 구역으로부터의 오염물질이 유입되고 있음을 나타내고 있다. 기타 지역도 어느 정도는 오염의 가능성을 내포하고 있으나 전기비저항치가 한강변처럼 큰 값이 아니고 심도도 낮고 제한적이어서 난지도 매립지의 침출수인지 주변의 생활하수나 기타 오염원인지는 전기탐사로 확인할 수 없고 반드시 시료채취에 의한 수질분석에 의해 결정지어질 수 있다.

본 연구를 통해 얻어진 자료를 분석해 보면 난지도의 기반암의 비저항은 적어도 200 ohm-m 이상으로 보여지며 한강변의 지하수층에 의해 완전히 포화된 비저항의 범위는 10 ohm-m 이하로 상암동 지역과는 상대적인 차이를 보이고 있다. 또한 다른 오염되지 않은 일반 지하수층의 비저항치에 비해 현저히 낮은 것이며 일반적으로 충적층 지하수의 비저항치가 20 ~ 80 ohm-m를 보이는 것과 (山本莊奕, 1993) 비교할 때, 전기비저항탐사에 의한 불량매립지에서의 침출수 오염확인 방법은 매우 유용하다 할 수 있다. 관측정이 극히 제한되는 현실에서 전기탐사는 오염 특성의 전체적인 경향을 쉽게 판단할 수 있는 간접적인 수단일 수 있다.

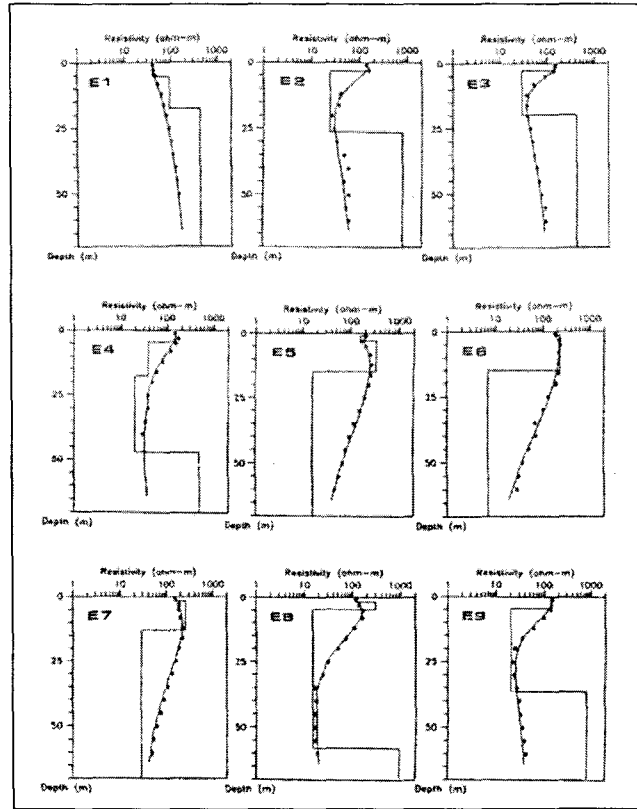


그림 4. 난지도 주변 지역의 전기비저항탐사 결과 해석도.
 (점: 겹보기비저항 관측치, 실선: 이론치, 직선: 고유비저항 해석단면)

5.2 사례2 - 매립구조 해석을 위한 탐사방법의 적용

본 조사는 00시에 소개한 비위생 불량매립지로서 매립장 내부의 매립구조를 파악하고자 전자탐사 및 전기탐사를 실시하여 매립지의 전기전도도를 측정하고 심도에 따른 오염물질의 분포상황을 조사함으로써 침출수 유출에 의한 주변의 토양 오염 정도를 파악하고 매립지 오염 정화처리 계획수립에 여러 정보를 제공하며 앞으로 정화처리후의 처리상태를 검증하기 위한 물리탐사의 기초자료를 획득하는데 그 목적이 있다.

1) 현장 자료 획득

본 매립지의 매립면적은 11,000 m²이고 매립고는 약 9.0 m 이며, 매립기간은 1990년 10 월부터 1993년 3월까지 약 30개월이다. 이곳은 전형적인 곡간 매립지의 특성을 보이고 있다. 매립장의 종방향 2 m 간격으로 29개의 축선(L1-L29)에 대해 전자탐사를 실시하였으며 전기 탐사는 전자탐사 결과를 해석한 후 나타난 이상대의 중심을 기준으로 종방향과 횡방향으로 각 한 축선씩 총 2 축선(E1-E2)에 대해 탐사를 실시하였다 (그림 5참조).

현장 자료측정시 전자탐사의 경우 측정간격은 1.0 m로 하였고 EM31의 수직 자기 쌍극자 측정 모드를 이용하였으며 전기전도도만을 측정하여 해석하였다. 또 전기탐사시 전극간격은 탐사목적에 부합하게 횡축선(E1)은 3.0 m로, 종축선(E2)은 5.0 m로 설정하였으며 이에 따른 탐사심도는 대략 15-20m가 된다.

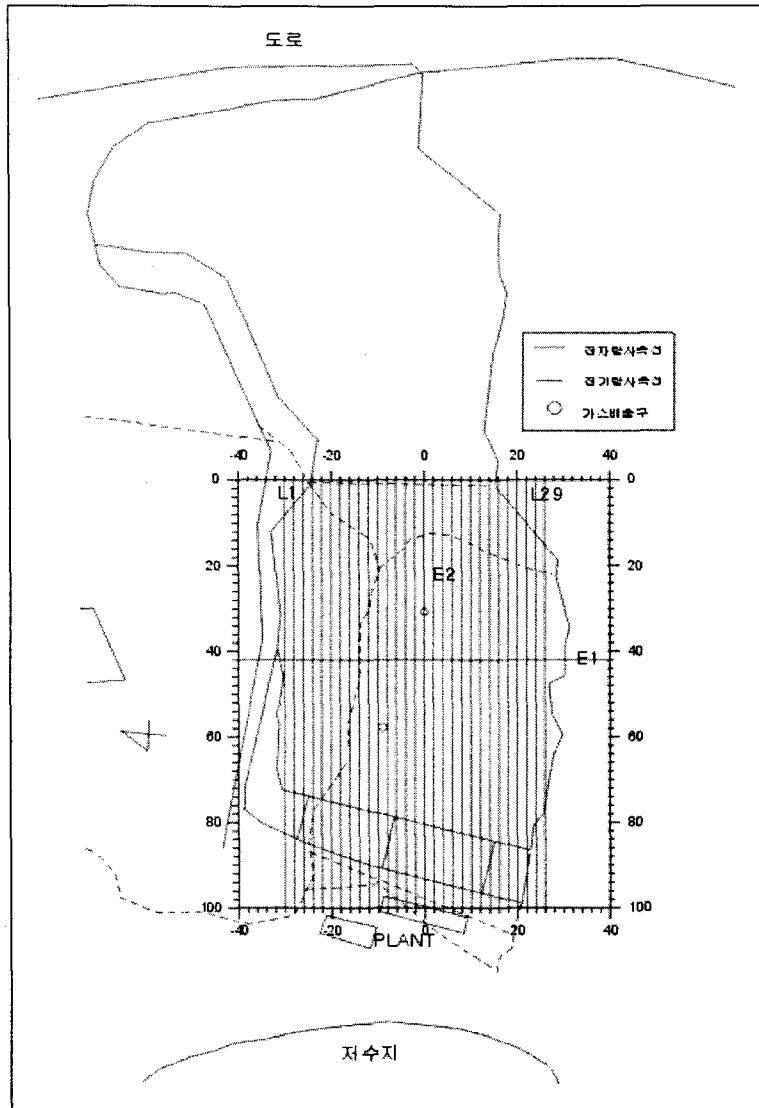


그림 5. 탐사 축선도 (전자탐사 29축선, 전기탐사 2축선).

2) 자료 처리 및 해석

그림 6은 29개 축선의 전자탐사결과 얻어진 전기전도도를 칼라 등고선도로 나타낸 것이다. 탐사결과 얻은 전기전도도는 대략 5 ~ 90 mS/m 범위에서 변화를 보이고 있다. 이러한 등고선도는 전도도 수치가 높은 지역일수록 매립지 내부의 오염도가 심함을 의미한다. 전자탐사 결과로부터 수평적인 오염지역의 분포 및 경로 등을 알아낼 수 있는 것이다.

자료에서 판단할 때 이 지역의 전기전도도 배경치는 15 ~ 20 mS/m를 보이는 것으로 판단되며 30 mS/m 이상을 보이는 지역은 하부의 토양이 오염되어 있다고 보여진다. 한편 이러한 이상 지역의 모양 및 전개 양상으로부터 오염지역은 그림의 상부에서 기인된 것이며 이로부터 추적된 하부의 침출수는 지하수의 흐름과 더불어 저수지 방향(그림의 하부 방향)으로 이동하고 있음을 알 수 있겠다.

오염지역의 수직적인 분포 상황을 파악하기 위하여 그림 6에 표시된 바와 같이 전자탐사 결과 이상지역 중앙을 중심으로 종방향과 횡방향으로 2축선의 전기탐사를 실시하였으며 이들 축선은 등고선도에서 흑색 실선으로 E1(횡방향) 및 E2(종방향)로 표시되어 있다.

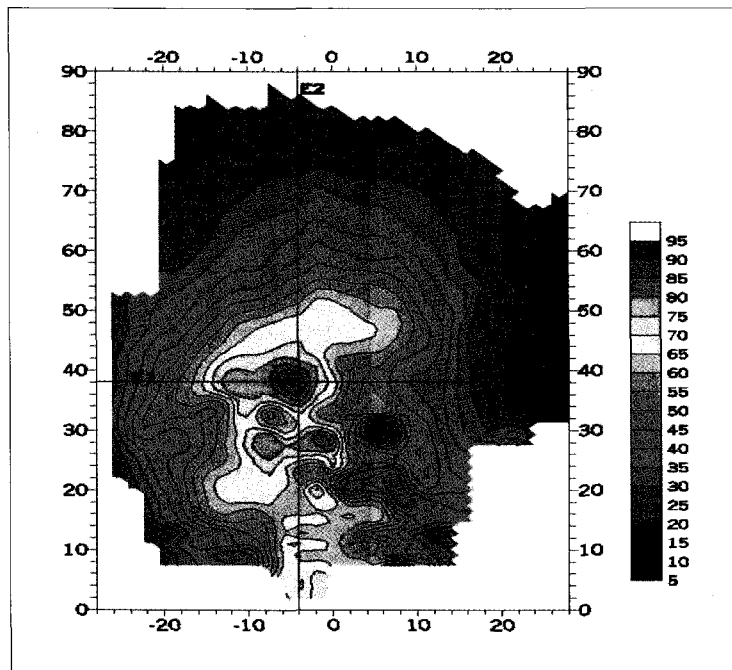


그림 6. 전자탐사 결과 전기전도도 등고선도.

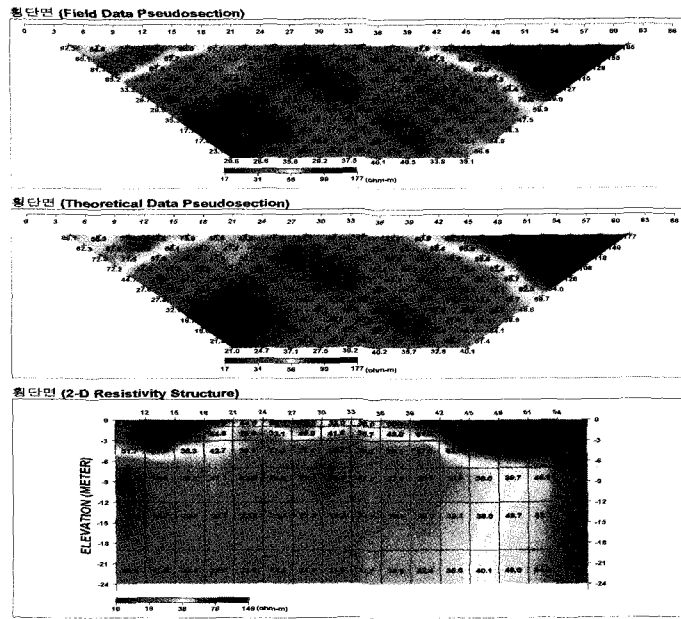
그림 7은 전기탐사 결과로 얻은 수직 전기비저항 분포도로써 E1축선의 결과(A)를 보면 상부의 고비저항대로부터 하부의 저비저항대로 구성되어 있음을 알 수 있으며 하부의 매립지와 토양의 경계가 불분명한 것은 매립지의 침출수가 하부지반과 직접적으로 영향을 미치고 있는 불량매립지의 특성을 보여주고 있다. E2 축선의 종단면도도 역시 이들 경계면을 표시하였으며 이는 그림 7의 (B)에 나타나 있다.

이들을 종합적으로 검토하면 매립된 쓰레기층은 횡단면도에서 보면 상부가 불룩한 형태를 띠고 있으며 중앙의 복토층은 약 0.5 ~ 1.0 m, 좌우제방부분은 약 5 ~ 6 m로 사료된다. 또 좌측 하부에 이상지역이 보이는 것으로 보아 축적된 침출수는 좌측으로 모이며 이들은 다시 지하수 흐름과 더불어 저수지 방향으로 이동하는 것으로 판단된다.

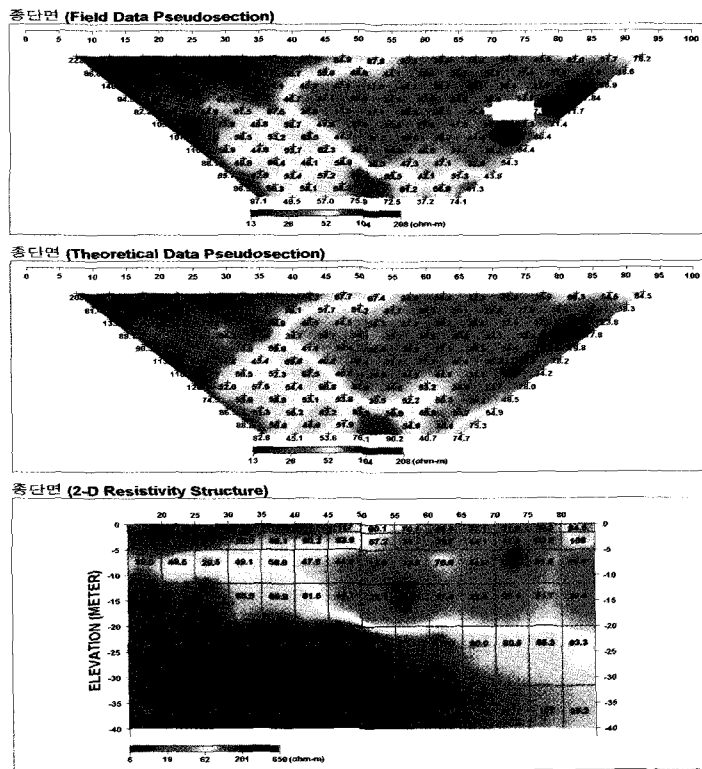
5.3. 사례 3 - 매립지에 오염된 농지의 오염범위 조사

본 사례는 매립지의 침출수가 누출되어 주변의 농지를 오염시킨 사례로서 매립지에 의한 오염의 범위와 매립지의 누출구간을 확인하기 위해 수행된 전자탐사의 결과이다.

그림 8은 전자탐사 결과의 전기전도도 분포를 나타내고 있다. 쓰레기 매립장은 상부에 제방을 경계로 위치해 있으며 이 지역의 배경 전기전도도는 약 10 mS/m로 판단되며 20 mS/m이상인 일부지역(좌상부지역, 수평좌표 0 ~ 80 m, 수직좌표 0 ~ 20 m)은 침출수에 의해 오염이 상당히 진행된 지역으로 판단되며 그 중간의 10 ~ 20 mS/m 지역은 전이대로 판단된다. 침출수에 의한 오염이 좌상부의 매립지에서 부터 시작되어 우하부로 진행되다가 두 방향으로 갈라져서 진행되고 있는 것으로 해석된다.



전기탐사 E1(횡) 측선 현장 측정자료 및 계산된 이론자료



전기탐사 E2(종) 측선 현장 측정 자료 및 계산된 이론 자료

그림 7. E1(횡) 측선과 E2(종) 측선에서 얻은 전기탐사 결과

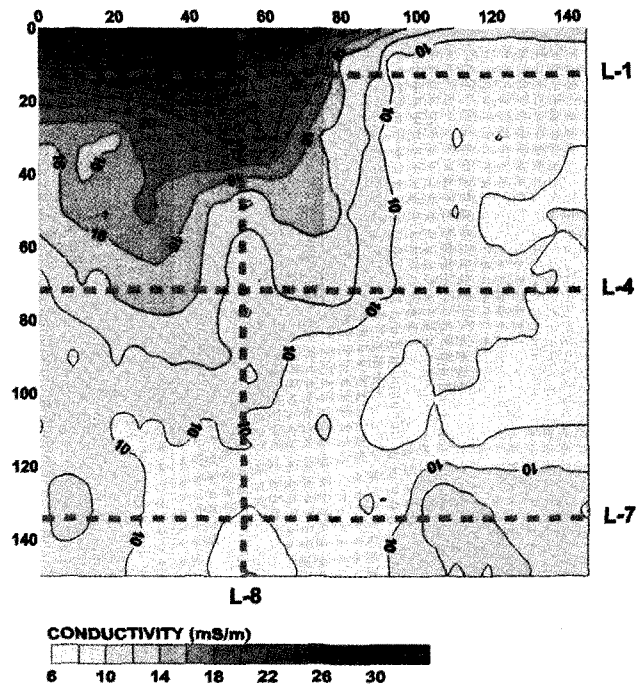


그림 8. 전자탐사에서 얻은 전기전도도 분포도.

5.4. 사례 4 - 침출수 차단을 위한 차수벽의 성능평가 누출 탐사

이 지역은 조수의 영향을 받는 해안가에 위치한 매립지로서 제방을 경계로 매립지와 바다가 붙어있고, 침출수 차단을 위한 강널말뚝 (sheet pile) 차수벽이 제방 안쪽의 제방하부 3 m 지점부터 해성 점토층인 15 m 정도의 심도까지 설치되어 있다. 그러나 일부 침출수가 누출되어 제방을 통해 해안으로 누출되어 민원이 발생하게 되었고 이에 차단벽의 효능평가와 누출지점의 확인을 위한 전기비저항탐사를 실시하였다.

그림 9는 전기탐사로부터 얻은 비저항 단면도를 나타낸다. 비저항 단면도에서와 같이 해성 점토층 상부는 10 ohm-m 이하의 저비저항층이 발달되어 있고, 특히 좌측상부의 50 m 지점에 1 ohm-m 이하의 낮은 비저항대가 발달해 있다. 이 부근의 제방사면에는 침출수 누출양상이 보이는 지역으로 차수벽 상부를 통한 누출을 확인할 수 있었다. 이 결과를 토대로 이 지점에 대한 보완공사가 이루어졌으며, 또한 이 지점의 전후에 관측정이 설치되어 지속적인 수질을 관측하고 있다.

한편 180 m 구간과 300 ~ 400m 구간의 하부 9 m 심도 부근에 나타난 3 ohm-m 이하의 비저항 구간은 매립이력조사 결과 차수벽 설치 이전에 기존의 토양이 오염된 것이었으며, 제방조성시 대부분은 치환하였으나, 잔류한 오염구간으로 판명되었다. 이 자료를 통하여 알 수 있듯이 탐사결과의 해석에는 오염에 대한 정보와 과거 매립의 이력에 대한 정보가 충분하다면 탐사를 통한 오염의 원인과 대책수립이 가능함을 알 수 있다.

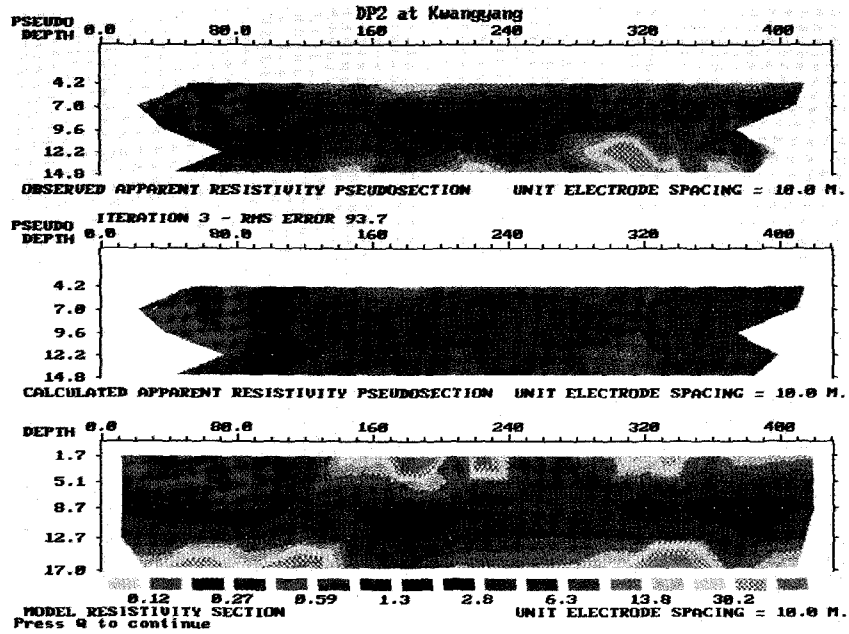


그림 9. 전기탐사 결과도.

6. 결 론

본 사례연구를 통해 물리탐사가 매립지에서 효율적으로 적용됨을 알 수 있다. 그러나 탐사에서 얻어진 자료의 해석은 제반 기초 지질 혹은 토질 조사를 필요로 하고, 또한 매립지의 특성과 매립의 이력에 대한 정보를 바탕으로 평가될 때 초기의 목적을 달성할 수 있다. 특히 매립지 탐사의 경우 전문분야로 인식되어 탐사 기술자에 의해서 수행되고 그 결과를 활용하는 사람은 주로 매립지 복원과 관련된 토목기술자나 환경기술자이다. 따라서 탐사에 대한 이해의 정도와 탐사를 보는 시각의 차이로 가끔 탐사결과에 대하여 이견을 보이는 경우가 있다.

현재 국내에서의 매립지 지역의 물리탐사 해석에 가장 난해한 문제점은 탐사 결과 해석을 비교할 만한 수치가 어떠한 물성의 물질이며 구조인지를 직접적으로 비교할 수 있는 자료가 충분치 못하다는 것이다. 이러한 문제의 해결은 많은 지구물리탐사 자료가 축적되고 이 자료들이 각각의 경우에 따라 대비될 수 있도록 보다 많은 탐사와 해석 결과가 수행될 때에만 해결될 수 있으며 이러한 자료는 비록 각 개인의 경우마다 다소의 차이를 보일 수는 있지만 전반적이고 핵심적인 문제의 해결에 큰 도움이 될 것이다.

또한 최근에는 매립지 조사에서 탐사의 경제성과 유용성이 인정되면서 탐사의 적용이 다소 늘고 있으나, 탐사가 마치 많은 정보를 제공하는 것으로 생각하고 접근하였다가 제한된 탐사의 결과에 대하여 다소 실망해하는 사례가 발생하고 있다. 또한 최근에 환경탐사에 대한 관심이 증가하면서 일부 비전문가와 일부 비전문 업체에서 추진하는 환경탐사의 적용은 더욱 이러한 결과를 야기시키고 있다. 탐사는 분명히 간접조사로서의 한계가 있고, 직접 굴착조사가 갖지 못하는 넓고 긴 구역에 대한 연속정보를 유용하게 얻을 수는 있으나 그 결과는 상대적인 것이며, 반드시 직접조사에 의한 검증이 필요한 것임을 충분히 이해시켜야 한다.

또한 탐사전문가도 환경오염에 대한 탐사의 경우 의욕에 앞서 다소 경쟁적으로 업무를

수행하고 있는 경향이 있으나, 아직까지도 환경탐사는 분명한 한계가 있음을 충분히 인식하고, 경험과 기술개발을 충분히 가져야 할 것이다. 또한 환경탐사의 경우 오염원인과 오염물질의 특성과 오염현장에 대해서도 적극적으로 이해하고자하는 노력이 함께할 때 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

- 권병두, 김차섭, 정호준, 오석훈, 1995, 난지도 매립지 및 그 주변의 지질환경연구: 자원환경지질, **28**, 469-480.
- 김형수, 이기화, 한정상, 1995, 난지도 일대의 침출수 양태조사를 위한 전기비저항 탐사: 지질공학 **5**, 259-276.
- 이철호, 1994, 난지도매립지 침출수에 의한 지하수오염특성 분석: 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.
- 한정상, 1988, 환경 수리지질학: 신우사.
- 환경부, 1991, 쓰레기 처리시설 구조지침 및 해설, 297-298.
- 山本莊突, 1993, 地下水 探査法.
- Jones-Lee et al., 1993, Groundwater pollution by MSW landfill: *SARDINIA93*, 1096.
- Barker, R. D., 1990, Improving the quality of resistivity sounding data in landfill studies, in Ward, S. H. Ed., Geotechnical and environmental geophysics, Vol 2: *Soc. Expl. Geophys.*, 245-252.
- Buselli, G., Barber, C., Davis, G. B., and Salama, R. B., 1990, Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods in Ward, S. H. Ed., Geotechnical and environmental geophysics, Vol 2: *Soc. Expl. Geophys.*, 27-39.
- Carpenter, P. J., Calkin, S. F., and Kaufmann, R. S., 1991, Assessing a fractured landfill cover using electrical resistivity and seismic refraction techniques: *Geophysics*, **56**, 1896-1904.
- Hoekstra P., and Blohm M. W., 1990, Case histories of time domain electromagnetic soundings in environmental geophysics, in Ward, S. H. ed., Geotechnical and environmental geophysics, Vol 2: *Soc. Expl. Geophys.*, 1-16.
- Kaufmann, A. A., 1992, Geophysical field theory and method: *Academic Press, Inc.*
- LaGrega et al., 1994, Hazardous waste management: *McGraw-Hill, Inc.*, 905-913.
- Benson, R. C., and Yuhr, L., 1995, Geophysical methods for environmental assessment: *Geoenvironment 2000*, ASCE, 57-76.
- Chrestensen, T. H., 1989, Sanitary Landfilling: *Academic Press*, 392.
- U.S. EPA, 1989, Decision-making guide to solids waste management.
- U.S. EPA, 1993, Subsurface characterization and monitoring techniques: *EPA 625-R-93-003a*.
- Ward, S. H., 1990, Resistivity and induced polarization methods, in Ward, S. H. Ed., Geotechnical and environmental geophysics, Vol 2: *Soc. Expl. Geophys.*, 147-189.
- Whitely, R. J., and Jewell, C., 1992, Geophysical technique in contaminated lands assessment - Do they deliver?: *Exploration Geophysics*, **23**, 557-565.