

매립장 침출수 환경 재해에 관한 연구

Analysis of Environmental Hazard by the Leachate from Disposal Waste

김 준 경* / 배 효 준** / 최 오 순***

Kim, Jun Kyoung / Bae, Hyo Jun / Choi, Oh Soon

Abstract

The domestic and the industry wastes which mainly come out of human life activities have been usually processed mainly by the incineration method and/or the method of reclamation. The method of reclamation, specially open dumping, has caused significant environmental pollution problems on the local or regional soil and groundwater system by leachate. Therefore, to investigate the 3-D structure characteristics of environmental pollution area is one of the hot subjects. We applied dipole-dipole method of electrical resistivity survey to investigate 3-D environmental contamination characteristics of the Noeun landfill area. For electrical resistivity survey, the line for measurements was established parallel to the main boundary of the Noeun landfill, for effective investigation of the whole landfill area. The result shows that the uppermost layer of the Noeun landfill is believed to be stabilized completely, based on the result of electrical resistivity values. However, the lowest layer of the Noeun landfill was partially polluted by leachate. Therefore, the electrical resistivity survey method is believed to be the one of the most effective methods to investigate three-dimensional distribution of leachate occurred in the lower part of landfill area.

Key words : reclamation, incineration, open dumping, leachate, dipole-dipole method

요 지

생활폐기물 및 산업폐기물은 인간의 활동으로부터 배출되며 소각법 혹은 매립법 또는 2가지 방법을 동시에 이용하여 처리되고 있다. 특히 매립법은 침출수로 인하여 매립지가 있는 지역의 지하수계를 심각하게 오염시켜 환경재해를 발생시키고 있다. 따라서 오염지역의 침출수 오염특성을 3차원적으로 조사하여 환경재해를 최소화하는 것이 중요하다. 본 연구는 비위생 매립지인 충주시 노은 매립장의 3차원적 침출수 오염특성을 조사하였다. 조사를 위한 1개 축선의 방향은 주된 매립지 경계와 평행하도록 설치하였다. 노은 매립장을 탐사한 결과 가장 상부층은 안정화가 완전하게 진행되었으나 가장 하부층은 부분적으로 침출수가 일부 존재하는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 산업폐기물, 생활폐기물, 침출수, 소각법, 매립법

* 세명대학교 자원환경공학과 교수
** 세명대학교 자원환경공학과 대학원생
*** 제천 제천중학교 청풍분교 교사

1. 서론

폐기물은 산업혁명 이후 인구의 증가, 산업의 발전 그리고 생활 문화의 변화에 따라 그 총발생량이 급격히 증가하고 있어 폐기물 처리에 대한 방안 또한 다양하게 제시되고 또한 실용화되고 있다. 이 중에서 매립방법은 가장 경제적인 수단으로 받아들여지고 있다. 즉 소각을 해도 최종적으로 매립재가 발생되기 때문에 이러한 한 자연생태계로 순환시킨다는 관점에서 폐기물처리에서 가장 합리적인 수단으로 분위기속에서 지금까지 매립을 꾸준히 실시해 왔으나, 매립지의 부지난과 주민들의 반대로 의하여 매립방법도 한계성을 보이기 시작하였다. 이에 따라 2002년 3월에 환경부는 자원순환형 폐기물 관리체계를 정착시키고자 '제 2차 국가폐기물관리 종합계획'을 확정하였다. 그 내용은 폐기물의 발생량 자체를 우선적으로 줄이고, 발생된 폐기물을 최

대한 자원화하여 재활용하며, 최종적으로 처리가 불가피한 폐기물은 환경적으로 안전한 위생적인 매립을 하는 정책이다(환경부 환경백서, 2003).

이러한 불량 쓰레기 매립지에 대한 오염을 파악하는 탐사로는 지화학적 방법과 지구물리학적 방법으로 크게 나눌 수 있다. 지화학적 방법으로 매립지에 대한 탐사는 토양 또는 수계의 시료를 샘플링하고, 시료 전처리과정을 거친 후 화학분석을 하여 중금속 함량이나 다른 화학적 요인(pH, 총용존고형물량, 전기전도도, 염도, 용존산소량등)을 분석하여 오염평가를 하고 있다. 지구물리학적 방법으로 매립지에 대한 탐사는 매립장의 구조와 층서, 매립장의 규모·상태 및 지하 오염물질의 분포범위와 거동, 매립장의 구조적 안정화 정도, 매립장 토지의 재활용 가능성 진단으로 그 목적에 따라 다양한 탐사를 적용하여 정성적, 정량적 자료를 얻기 위해 사용되어 지고 있다.

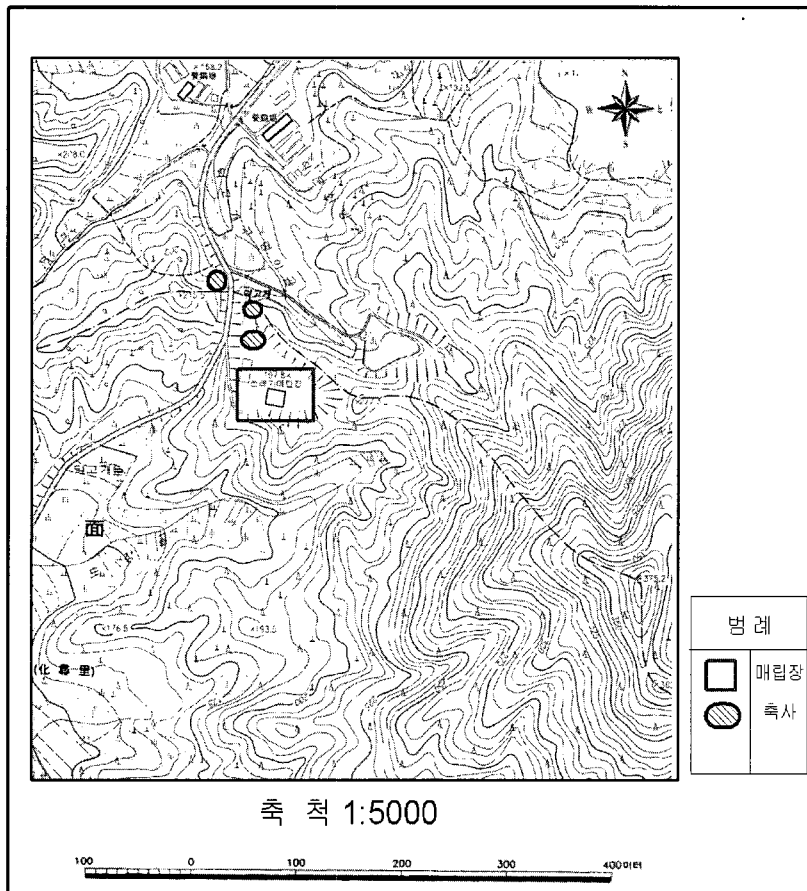


그림 1. 노은 매립장 지형도

현재까지 불량 쓰레기 매립지에 대한 지구물리학적 탐사는 탐사 목적에 따라 여러 가지 방법으로 이루어 졌다. 서울 난지도 매립장에서 권병두 등(1995)이 중력탐사와 자력탐사를 수행하여 매립물의 밀도분포를 구하고 중력 및 자력이상대에 대하여 정성적, 정량적 해석을 실시하였으며, 또한 슬럼프져 전기비저항 탐사를 수행하여 매립물의 전기비저항 층서와 침출수 발생지역에 대한 연구를 수행하였다. 이기화 등(1996a)은 매립장 상부에서 슬럼프져 전기비저항 탐사와 함께 동일 송수신기 배열 시간영역 전자탐사를 실시 매립지의 특성과 지하구조를 연구하였고, 이기화와 윤종렬(1998), 권병두 등(1998)은 부산시 석대매립장과 포항시 유봉산업쓰레기매립장에서 전기탐사, 중력, 자력, VLF탐사를 수행하여 매립지 특성에 관한 연구를 수행하였다. 특히 송성호등(2003)은 제주도 쓰레기매립장에서 전기비저항 탐사와 전자탐사를 수행하여 침출수 조사를 하였으며 최근에 들어 GPR(투과 레이더)탐사가 매립지 탐사에 적용되어 많은 성과를 보이고 있다.

이 논문의 연구지역인 노은 매립지는 충주시 신니면과 충주시 노은면의 경계지점인 덕고개(위도 392.5° - 393°, 경도 265.5° - 267°)에 위치해 있는 계곡형 매립지로 그림 1에 표시되어 있다(장호원도폭). 수리적으로 매립지 주위의 자연수는 도랑을 타고 1.5Km 정도를 유하하여 남한강 지류인 한포천에 합류하여 12Km 정도 다시 유하하여 충주 조정지댐 아래인 충주시 양성면 능암리에서 한강(한강 하구 지점 181Km)에 합류된다. 노은 생활폐기물 매립지는 1992년 6월부터 1999년 6월까지 운영되었고, 매립고는 3m, 매립면적은 9,034m², 매립용적은 27,102m³로 매립되었고, 현재 매립은 종료되었다.

노은 생활폐기물 매립지에 쌍극자-쌍극자 전기비저항 탐사를 수행하여, 지반하부의 3차원적 전기비저항 단면도를 분석할 수 있다. 또한 지반하부의 전기비저항값의 크기를 표준값과 비교하여 폐기물종류 및 침출수의 안정화 정도를 개략적으로 유추 가능하다. 이를 통하여 매립지의 침출수 유출로 인한 토양의 오염정도를 개략적으로 파악하며, 매립지의 안정화 정도 평가 및 향후 재활용계획 수립시 참고자료 제시에 목적을 두고 있다.

2. 전기비저항 탐사 이론 (electrical resistivity survey)

전기비저항 탐사(electrical resistivity survey)는 지하에 흘려 보낸 직류 또는 저주파수의 교류 전류원에 의해 만들어지는 전위차를 측정함으로써 지하의 전기비저항 분포를 결정하고 지하구조를 해석하는 탐사이다.

전기비저항 탐사 방법에는 수평, 수직, 2차원 및 3차원 전기비저항탐사 방법이 있다. 이들 탐사 방법은 조사 장소의 상황이나 조사 목적에 따라서 달리 사용되지만, 현재 우리나라는 전기비저항 탐사 자료 역산법의 발달에 힘입어 수평 탐사 및 수직탐사의 구분이 없어졌으며, 지하의 층서 구조를 파악하는 1차원 탐사, 측선 하부의 2차원적 영상을 획득하는 2차원 탐사, 탐사 지역하부 지반의 3차원 영상을 획득하는 3차원 탐사로 구분하고 있으며, 최근에는 2차원 및 3차원 전기탐사를 이용하는 것이 일반적으로 사용하고 있다. 전극배열에는 웨너 배열, 슬럼프져 배열, 쌍극자 배열, 단극-쌍극자 배열, 단극 배열 및 변형된 전극배열이 있다.

이번 연구에서는 측선 하부의 2차원적 영상을 획득하는 2차원 탐사를 선택하였고, 배열은 분해능이 뛰어나지만 S/N비가 낮은 쌍극자 배열을 선택하여 탐사를 실시하였다.

임의의 물체 양단에 일정한 전압을 걸어 주면 어떤 물체는 많은 양의 전류를 흘려 보내지만, 어떤 물체는 아주 적은 양의 전류를 흘려 보낸다. 이와 같이 전류의 흐름을 방해하는 특성을 그 물체의 전기저항(R)이라 하는데, 만약 그림 2와 같은 도선에 전류를 흘려 보내 주면 저항기의 저항은 물체의 길이 및 단면적과 저항기의 고유성질, 즉 전기비저항(resistivity) ρ에 좌우된다. 식으로 표현하면 <식 2-1-1>과 같다.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{<식 2-1-1>}$$

즉 전기저항(R)은 전기비저항(ρ)과 길이(l)에 비례하고 단면적(A)에는 반비례관계를 가지게 된다. <식 2-1-1>의 Ohm의 법칙을 이용하여 다시 표현하면 <식 2-1-2>와 같다.

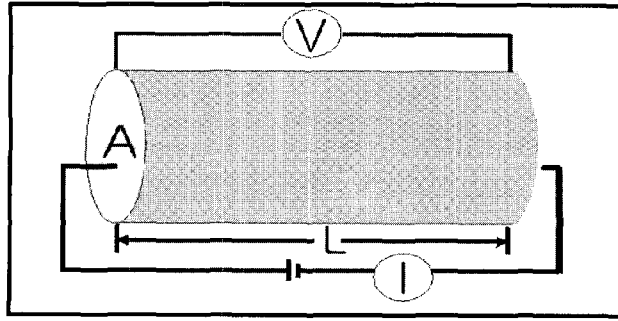
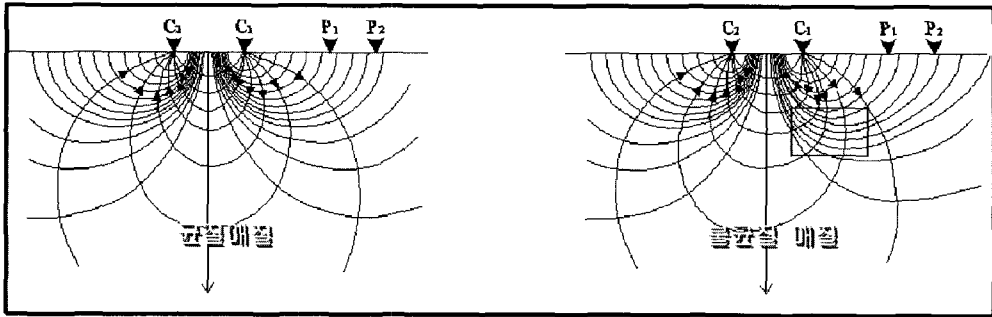


그림 2. 도선의 전기저항



(a) 균질한 매질

(b) 불균질한 매질

그림 3. 전기비저항의 전류 및 등전위선 분포도

$$\rho = R \frac{A}{l} = \frac{A}{l} \frac{\Delta V}{I} \quad \text{<식 2-1-2>}$$

지하에 일정한 전류(I)를 흘려 보낸 후 전위차(ΔV)를 측정하는 방법으로 지하 매질의 전기비저항 분포를 알아낼 수 있다 이 원리를 도시한 것이 그림 3이다.

그림 3의 (a)와 같이 전기비저항의 전류 및 등전위선 분포가 균일한 지하 매질에 전류 전극(C_1, C_2)를 통해 일정한 전류를 흘려주면 이 전류 그림과 같은 경로를 통해 C_1 에서 C_2 로 흘러간다. 이 때 이 전류 경로에 수직으로 같은 값의 전위를 갖는 등전위선이 형성되는데 이 등전위선은 지면까지 이어지게 된다. 우리는 지표의 전위 전극(P_1, P_2) 사이에 전위차계(전압계)를 설치하여 두 전위 전극에 닿은 등전위선의 차이 즉, 전위차를 측정함으로써 전기비저항(ρ)을 계산할 수 있게 된다. 만약 지하 매질이 그림 2의 (a)와 같이 매우 균질한 매질이라면 계산된 전기비저항 값은 참 전기비저항(true resistivity)을 얻게 되지만, 그림 3의 (b)와 같이 매질이 불균질한 매질이면 측정된 전기비저항 값은 참 전기비저항 값이 아닌 다른 전기비저항 값을 가지

게 되는데 이를 겉보기 비저항(apparent resistivity) ρ_s 이라 한다.

그럼 지하구조에서 전기비저항의 식을 살펴보자. 통상적이 전기비저항 탐사에서 전류 및 전위 전극은 지표에서 위치하게 되므로 거리 r 만큼 떨어진 위치에서 반구의 표면적(A)은 $2\pi r^2$ 이고 길이(l)는 r 이므로 <식 2-1-2>는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho = 2\pi r \frac{\Delta V}{I} \quad \text{<식 2-1-3>}$$

지반의 전기비저항 값은 암석의 종류, 공극률과 포화도, 지하수의 전기비저항, 풍화나 변질에 수반되는 점토광물의 함유량, 온도 등에 변화한다. 일반적으로 점토 광물의 함유량이 많을수록, 체적 함유율이 높을수록 전기비저항은 낮아진다. 전기비저항 탐사에서는 이러한 지반의 성질을 이용하여 지반 상황을 파악한다. 그림 4는 전기비저항을 좌우하는 요소와 주요지질 매질에 따른 전기비저항 범위를 잘 나타내고 있다(Ward, 1990).

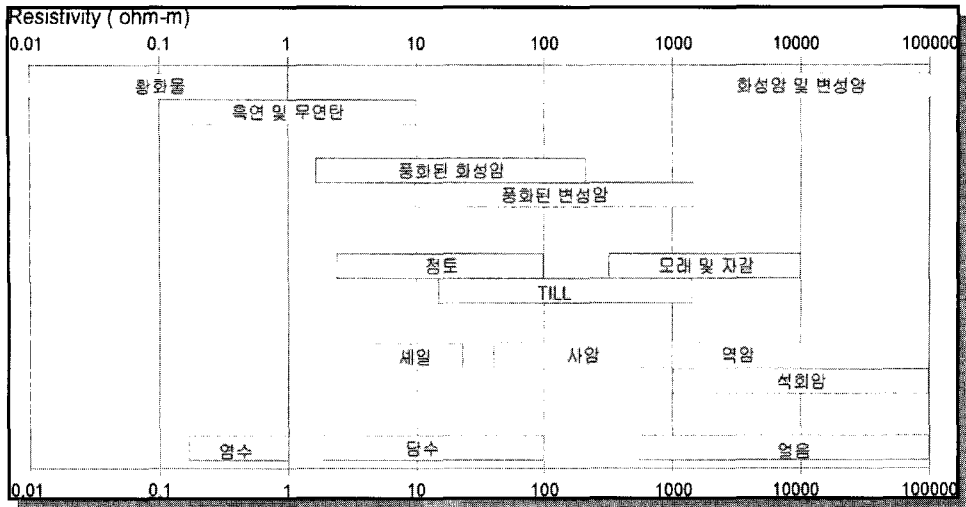


그림 4. 주요 기반암에 대한 전기비저항 값

표 2. 전기비저항 탐사장비 기본 구성 요소

장 비 명	수 량
전류 송수신원 본체(Main body)	1
STING, AGI사 (미국)	1
전극봉(Electrode)	24
탐사축선(Electric Cable; 50m/set)	12
Control box(배전판; 24 channel)	1
бат테리 및 бат테리 충전기	2
Notebook 컴퓨터	1

3. 전기비저항 탐사 자료측정

본 연구에서 사용된 측정 장비는 미국 AGI사의 STING을 사용하였고, 장비의 자세한 설명은 표 2와 같다.

본 연구지역은 지형적으로 개곡형 매립지로서 매립지 입구 주위를 제외하고 모두 산으로 둘러 쌓여 있어, 비가 올 경우 우수가 산에서 매립지로 흘러 들어오게 되어 있다. 또한 북동방향(상부)에서 남서방향(하부)쪽으로 약간의 경사를 가지고 있고, 매립지 입구 근처에 약간의 밭이 이루어져 있다. 따라서 침출수의 유동 방향은 북동방향(상부)에서 남서방향(하부)으로 추정되었다.

지형적으로 상부에서 하부로 경사가 이루어졌으며, Line #1의 왼쪽끝 부분에 약간의 밭이 이루어져

있다. Line #1은 하부쪽 축선으로 매립지 출입구에서 약 10m 가량 떨어져 있고, 왼쪽으로부터 약 96m 가량을 측정하였다.

4. 결 과

지구물리탐사 자료의 해석은 기본적으로 관측치료를 기초로 지하구조를 도출하기 위하여 그 물리적 성질을 추정하는 것이다. 이러한 목적을 위하여 지하구조모델의 매개 변수(Parameter) 즉, 물리적 또는 기하학적 성질을 변화시키면서 주어진 함수를 이용, 계산에 의한 이론치와 실제로 얻은 관측치를 이론치와 실제로 얻은 관측치를 비교하여 최소가 되는 매개 변수값을 시행착오로 구하는 것이다. 그러나 지구물리학에 있어서 역산문제(Inverse Problem)는 대부분은 비선형이고, 이러한 비선형

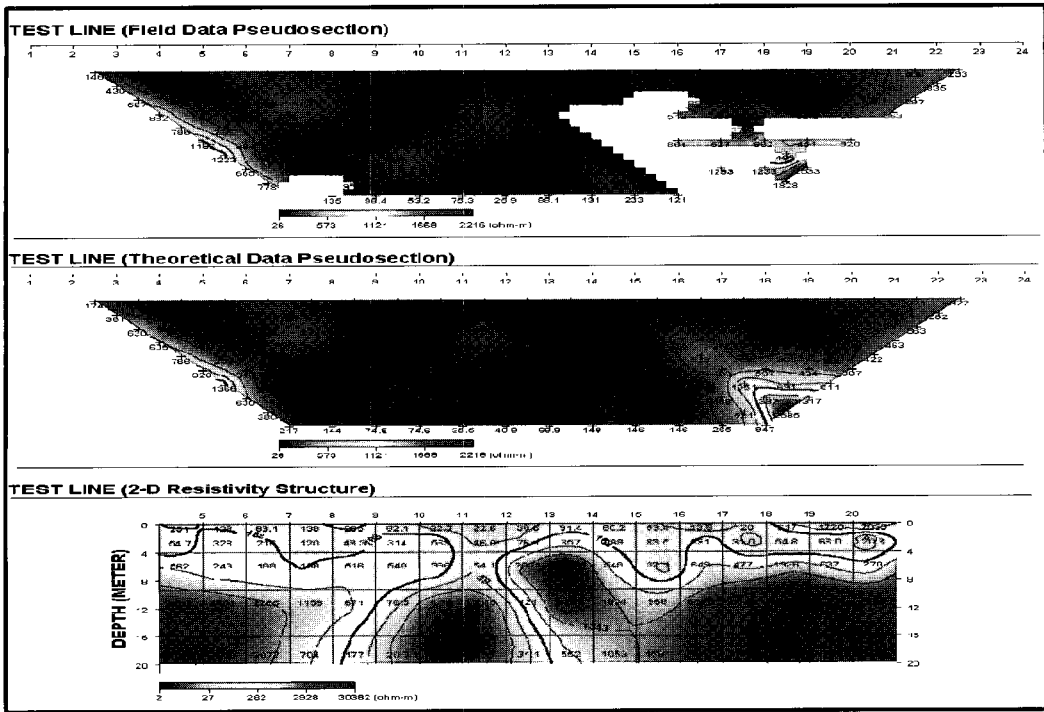


그림 6. Line #1의 전기비저항

단면도역산문제의 해법은 임의의 초기모델에 대해 문제를 선형화하여, 선형 역산알고리즘을 반복 적용함으로써 모델을 순차적으로 보정해가는 반복법이다.

그림 5는 Line #1의 전기비저항값 결과를 나타내는 그림이다. 전기비저항 결과 단면도에서 가장 위에 위치하고 있는 그림은 현장자료(Field Data)이다. 이는 현장에서 측정된 정규화된 전위(Normalized Potential)값에 전극배열에 따른 거리계수(Geometric Factor; G)를 곱하여 얻어진 겉보기 비저항(Apparent Resistivity)값들을 나타낸 결과로 이는 진비저항(True Resistivity)값이 아니며, 값이 없는 부분은 잡음으로 인해 자료의 신뢰도에 문제가 있어 역산에는 제외시킨 영역의 표시이다. 중간 그림인 이론자료(Theoretical Data)는 역산에 의해 얻어진 결과를 지하 모델로 하여 완전히 수학적 계산에 의한 가상탐사로 실제상황과 가장 유사한 결과이다. 그리고 아래에 위치하고 있는 그림인 2차원 전기비저항 구조도(2-D Resistivity Structure)이다. 이 그림은 Diprowin(2000)에서 지원하는 역산법(Inversion Method), 즉 1차 미분연산자를 이용한 평활화제한(1'st Order Smoothness

Constraint)과 2차 미분연산자를 이용한 평활화 제한(2'nd Order Smoothness Constraint)을 이용한 지하 전기비저항의 분포가 공간적으로 부드럽게 변화하도록 제한을 두고 이론값과 실측값 간의 오차가 최소가 되도록 수학적 역산을 통하여 얻어진 지하구조이다.

그림 5는 매립지 하부쪽을 전극간격 4m, 왼쪽으로부터 측정거리 96m로 측정한 전기비저항 탐사 단면도이다. 관측된 가단면도상에서 깊이가 약 6m를 기준으로 상·하의 전기비저항값의 확연한 차이가 보이고 있어, 표토층의 낮은 비저항대(수백 Ω m 이하)와 두 번째 층의 고비저항대(1,000Ωm 이상)로 구분할 수 있다. 중앙부분 즉 측정번호 #10 - #12 사이에 수직으로 발달된 저 전기비저항 이상대가 있고, 그 양쪽 주위에 상대적으로 높은 전기비저항 이상대가 거의 수평으로 발달되어있다.

그림 5를 보면 지표로부터 깊이 약 4m까지 100 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항값을 수평구간 전체적으로 보이고 있다. 또한 측정번호 #9 - #13 구간에서 깊이 약 10-20m까지 20 ohm-m 이하의 아주 낮은 전기비저항 이상대가 발달되어 있으며, 이 낮은 전기비저항 이상대를 중심으로 양쪽이 상대

적으로 높은 전기비저항 이상대가 발달되어 있다. 이것으로 볼 때 매립고의 깊이는 약 4m정도로 판단되며, 중앙 지점에 보이는 아주 낮은 전기비저항 이상대에 침출수가 스며들어 하부지반의 공극중에 모여 있는 것으로 판단된다. 이 부분을 제외하고 다른 부분은 전반적으로 안정화가 되어 있는 것으로 보인다.

5. 결 론

1. 본 연구지역인 노은 매립장은 전기비저항 탐사 결과 상부는 안정화가 대체로 이루어졌지만, 하부의 경우 침출수에 의한 지반 하부 오염이 일부 이루어져 있는 것으로 판단된다.

2. 전기비저항 탐사 결과 침출수의 유동 경로는 상부(북동방향)에서 하부(남서방향)쪽으로 경사가 기울어져 있는 지형적 조건으로 인하여, 상부 방향에서 하부방향으로 흘러 하부쪽 지반 풍화대에 스며들어 있는 것으로 판단된다.

3. 따라서 이 매립장 부지를 타 용도에 이용하려 할 경우 매립완료 후 약 4년밖에 경과하지 못하였으므로 안정화를 위하여 보다 많은 시간이 요구되거나 전기비저항 이상대 부분에 대한 후속적인 조치가 일부 필요하다고 판단된다.

4. 향후 더욱 정밀한 침출수에 의한 오염분석을 위하여 추가적인 측정을 통하여 보다 많은 자료가 얻어지면 상세한 분석이 가능하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 김지수, 한수형, 최상훈, 이경주, 이인경, 이평구 (2002), 장풍 폐광산의 산성광산폐수의 의한 침출수 유동에 대한 지구물리 및 지화학탐사자료의 상관해석, 지구물리, 제 5권, p 19-28.
- 권병두, 김차섭, 정호준, 오석훈 (1995), 난지도 매립지 및 그 주변의 지질환경 연구, 자원환경지질, 제 28권, p 469-480.
- 권병두, 서정희, 오석훈(1998), 부산시 석대 매립지에석의 중력, 자력, VLF탐사, 자원환경지질, 제 31권, 59-68.
- 문윤섭, 이태중, 이채영, 윤준기(2003), 물리탐사 기법을 이용한 건축 폐기물 매립지의 규모 파악, 지구물리, 제 6권, p 13-24.
- 민경덕, 서정희, 권병두(1987), 응용지구물리학, 우성문화사.
- 손호웅, 김지수, 손영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수(2000), 지반환경물리탐사, 시그마프레스.
- 송성호, 용환호, 안중기, 김기표(2003), 제주도 쓰레기매립장 침출수 조사를 위한 전기 및 소형루프 전자탐사의 적용, 물리탐사 제 6권, p 1-10.
- 윤왕중, (1991), 대수적 영상재구성법에 의한 탄성파 지오코모그래피의 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교.
- 이기화, 권병두, 정호준, (1996a), 난지도 매립장 전기·전자탐사, 대한지하수환경학회지, 제 3권, p 95-100.
- 이기화, 권병두, 오석훈, 김차섭, (1996b), 난지도에 인접한 한강변에서의 쌍극자-쌍극자 전기탐사, 자원환경지질, 제 29, p 335-343.
- 이기화, 윤종렬, (1998), 포항 옥명 폐기물 매립장에서의 전기탐사, 지구물리, 제 1권, p 41-50.
- 이기화, 권병두, 임형래, 양준모(2000), 난지도 매립장의 안정화에 따른 지질환경 변화 조사를 위한 지구물리 탐사, 지구물리, 제 3권, p 113-126.
- 이재영, 김학수, (1996), 불량쓰레기 매립지에 대한 물리탐사 적용사례 연구(I), 한국토양환경학회지, 제 1권, p 29-38.
- 임해룡, (1992), Fermat 원리 및 수정된 파선경로를 이용한 비선형파선 토모그래피 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교.
- 장연수, 이광열(1994), 난지도 매립장 지반을 통한 오염이동 특성과 제어, Journal of Korean Society of Groundwater Environment, 제 1권, p 1-5.
- 조창수(2001), 시추공 탄성과 탐사 자료 영상화에서 분해는 향상, 공학박사학위 논문, 서울대학교.
- 최오순, (1997), 물리탐사를 통한 매립장 주변의 지하수분포에 관한 연구, 교육학석사학위논문, 세명대학교.
- 한국지구물리탐사학회(2002), 토목·환경 분야 적용을 위한 물리탐사 실무 지침, p 1-311.
- 환경백서(2003), 환경부, p 485-542