

## 전기비저항 탐사를 이용한 충주 무릉매립장 침출수 분포에 관한 연구

김 준 경\*

세명대학교 자원환경공학과

### A Study on the Leachate Distribution of the Mooreung Landfill Site with Electrical Resistivity Surveys

Jun Kyoung Kim\*

Dept. of Earth Resources and Environmental Geotechnics Engineering, Semyung University

충주시에 위치하고 있는 무릉 생활폐기물 매립장에 쌍극자 배열을 이용한 전기비저항 탐사를 수행하여 폐기물 매립장 내부와 주변지역에 대해 침출수 존재 여부와 존재할 경우 하류지역으로 유출경로를 분석하고자 하였다. 매립장 내부의 전기비저항 분포특성을 고려할 때 매립 후 시간이 경과하여 매립물질로부터 유도된 침출수가 측선 곳곳에서 하부 지반의 공극으로 스며들고 있는 것으로 분석된다. 또한 3개 측선 모두 공통적으로 단면도 왼쪽 지역에 고립된 이상대가 존재하고 이상대의 위치, 발달형태와 전기비저항 절대값 등을 종합적으로 고려할 때 상류, 중류 및 하류 지역에서 각각 발달된 전기비저항 이상대가 상호 연결 가능성이 대단히 높은 것으로 분석된다. 마지막으로 매립장 출입구 부근에 설치된 측선에 대한 전기비저항 탐사결과는 매립장 일부 구간에서 매립장 외부로 침출수가 유출했을 가능성이 대단히 크고 보다 정확한 유출경로 및 심도 등을 분석하기 위해 향후 다른 방법의 지구물리탐사 및 지구화학적방법을 이용하여 보다 많은 탐사가 필요한 것으로 판단된다.

**주요어** : 무릉매립장, 전기비저항탐사, 쌍극자배열, 침출수

The electrical resistivity prospecting method with dipole-dipole array was applied to the Mooreung landfill site in order to survey the existence of leachate around the landfill site. Moreover, if there is leachate within Mooreung landfill site, the analysis of potential pathways to exterior environments was tried. Within the landfill site, the overall characteristics of the electrical resistivity anomalies suggest that the leachate induced from the landfill materials has infiltrated the basement rock and fill the pores of basement rock in some parts of the landfill site. The consistency of the anomaly locations (left part of each survey line), anomaly geometries, and absolute resistivity value of anomaly through the 3 survey lines suggests that the resistivity anomaly be connected from the upstream to the downstream and correspond to the leachate material. Finally, the result from the electrical resistivity survey line near the gateway of the landfill site suggests that some of the leachate induced from landfill material leaks to the exterior groundwater system. It is necessary that more surveys using both geochemical and geophysical methods should be performed to find out potential pathways and depths of the leachate more precisely.

**Key words** : Mooreung landfill site, electrical resistivity survey method, dipole-dipole array, leachate

## 서 언

충주시에 위치하고 있는 무릉 생활폐기물 매립장에 쌍극자 배열을 이용한 전기비저항 탐사를 수행하여 폐기물 매립장 내부와 주변지역에 대해 침출수 존재 여부

와 만약 침출수가 존재할 경우 하류지역으로 상세한 유출경로를 분석하고자 하였다. 또한 전기비저항 탐사방법이 생활폐기물 매립장의 효과적인 침출수 조사를 위해 적용 가능성이 있는지에 대해 조사하였다. 마지막으로 본 연구를 통하여 폐기물 매립장의 안정화 정도를 지구

\*Corresponding author: kimjkl@unitel.co.kr

물리화학적 방법을 이용하여 개략적으로 평가하고 향후 충주 무릉매립장을 재개발하기 위해 종합계획을 수립할 때 참고자료를 제시하고자 하였다.

미국의 경우 1970년대까지 비위생 매립을 계속 진행한 결과 매립장 주변 환경에 많은 영향을 주었으며 오염된 매립장 지역을 환경적으로 회복하기 위하여 막대한 예산을 투입하고 있으며, 또한 다양한 오염방지 및 오염지역 탐지와 관련된 기술을 개발하고 있다. 국내의 경우 1990년대 말까지 폐기물 정책을 매립위주로 실시해 왔으며, 최근에 매립장 확보의 한계성 때문에 재활용 및 소각 쪽으로 정책을 전환시키고 있다. 국내에서 지금까지 매립된 대부분의 생활 및 산업 폐기물 매립장이 위생매립이라는 개념을 사용하고 있으나, 실질적으로 매립장들은 부지 선정과정에서 지질 및 지형학적 여건을 제대로 고려하지 않았고 또한 환경오염 방지시설에 대한 인식 및 투자가 부족하여 본래 의미의 위생매립장이 극히 드물다. 또한 위생매립장이라고 하더라도 관리가 제대로 이루어지지 않아 침출수 유출 및 지반침하의 문제가 심각하게 발생하여 비위생 매립장으로 분류되고 매립장 주변의 지하수, 지표수 및 토양에 대해 오염시켜 사회적 문제가 되고 있다.

위생 또는 비위생 매립장의 침출수 및 발생가스 등에 의한 오염상태를 정성적 및 정량적으로 분석하기 위해 조사하기 위해 다양한 지구화학적 및 지구물리학적 탐사방법이 적용되어 오고 있다(Ward, 1990). 2가지 종류의 방법 중에서 지화학적 탐사방법은 우선 토양 또는 주변 관련 지표 및 지하수계의 시료를 샘플링하고, 시료 처리과정을 거친 후 화학분석을 수행하여 중금속 함량이나 다른 화학적 요인(pH, 총용존고형물량, 전기전도도, 염도, 용존산소량 등)을 분석한다. 한편 지구물리학적 탐사방법 역시 다양하게 개발되고 있고 이들 방법을 활용하여 매립장 구조와 층서, 매립장의 규모·상태 및 지하 오염물질의 분포범위와 거동, 매립장의 구조적 안정화 정도를 분석할 수 있다.

최근 위생 또는 비위생 쓰레기 매립장에 대한 지구물리학적 탐사는 전기탐사, 중력, 자력, VLF탐사 등과 같이 다양한 방법이 적용되어 왔다. 일부 연구자(이재용과 김학수, 1992; 임해룡, 1992; 장현삼 외, 1998)에 의해 폐기물매립장의 토양오염 조사를 위해 전자 및 전기탐사를 수행하였고, 특히 제주도 쓰레기매립장에서 전기비저항탐사와 전자탐사를 수행하여 침출수 조사를 하였다(송성호 외, 2003). 특히 최근에 들어 GPR(지표투과 레이더)방법을 매립장 탐사에 적용하여 많은 성과를

보이고 있다(장현삼외, 1998). 전기비저항 탐사법을 제천생활 폐기물 매립장 및 충주 노은면 생활폐기물 매립장에 각각 적용하여 침출수의 3차원적인 분포 특성을 조사하였다(최오순, 1997; 김준경외, 2004). 또한 침출수 오염조사를 위해 전자탐사 및 자력탐사 방법을 적용하였다(손정술외, 2005).

### 탐사 지역

연구대상 지역인 충주 무릉매립장은 충주시 살미면 무릉리에 위치하고 38번 국도변에 있는 전형적인 계곡형 매립장이다. 충주시 살미면은 충주시청으로 부터 남동쪽으로 약 10.56 km 지점에 있으며, 남동 방향으로 상모면, 남서 방향으로 장연면, 감물면, 북서 방향으로 살미면과 불정면에 각각 인접해 있다. 또한 북동에서 남서 방향에 걸쳐서 충주호와 바로 인접해 있고 상세한 위치는 Fig. 1에 제시되어 있다. 지표 수리적으로 매립장 주위의 지표수는 약 100 m 이내의 거리에 바로 인접하고 있는 충주호에 합류된다. 충주호는 수도권 지역의 상수원 보호구역이기 때문에 충주 무릉 매립장은 오염에 대단히 민감한 지역으로 판단되어 본 연구를 위한 매립장으로 선택되었다. 또한 무릉매립장 하부에 위치하고 있는 집적조에서 집적된 침출수는 트럭에 의해 매일 하수종말 종합처리장으로 운반되고 있으며 여름 우기에 는 집적되는 침출수량이 평소보다 약 3배 정도로 증가하는 특징을 갖고 있다. 충주 무릉 생활폐기물 매립장은 1996년 10월부터 1999년 10월까지 약 3년간 운영되었고 자세한 사항은 Table 1에 제시되어 있다.

### 전기비저항탐사를 위한 축선배열 및 자료획득

매립장의 일반적인 지반상태 및 존재가능성이 있는 침출수의 분포를 분석하기 위해 다양한 지구물리탐사 방법 중에서 전기비저항 탐사를 실시하였고, 여러 가지 전극배열법 중에서 쌍극자 전극배열법을 선택하였다. 본 연구를 위해 스웨덴 ABEM사가 개발한 SAS 300C 전기비저항 측정시스템을 사용하였다.

Fig. 2에서 방향 표시 및 조밀한 등고선으로부터 알 수 있는 바와 같이 매립장을 둘러싸고 있는 주변지역은 지형적으로 대체로 급경사이나 매립장 자체는 계곡의 상류에서 하류로 완만하게 내리막 경사를 이루고 있으며 Fig. 2의 왼쪽 상부가 계곡의 상류이고 하부가 충주호가 있는 하류에 해당된다. 또한 그림의 중앙 하부에서 오른쪽으로 돌아가는 2개의 평행한 곡선은 출입구로부터 매립장 상부로 올라가는 진입도로이다. 그리고 매립장의

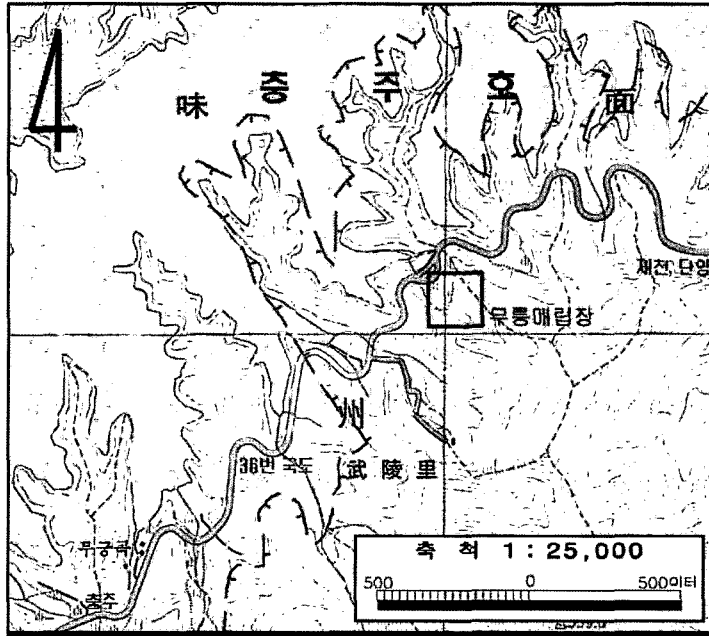


Fig. 1. Geographical map of Mooreung landfill site.

Table 1. Specifications of the Mooreung landfill site.

Location소재지	total area(m <sup>3</sup> )	landfill volume(m <sup>3</sup> )	period for operation	end date of landfill
Choongju, Salmimyun Mooreungr San 29-1	12,500 m <sup>3</sup>	100,500 m <sup>3</sup>	1996.10-1999.10	1999.9.10

양쪽 가장자리에는 우수로가 있어 우수는 자연수로서 충주호로 직접 흘러 들어가게 되어 있고, 매립장 내부에서 발생하는 침출수를 출입문 부근에 위치하고 있는 집적조(Fig. 2의 최하단 보다 아래에 위치하고 있음)에 모아서 침출수 전용 운송수단을 이용하여 처리장으로 운반하고 있는 실정이다.

매립장 내부의 2차원 전기비지향 단면을 효과적으로 분석하기 위하여 매립장 지역의 지형적인 특성을 고려하여 측선을 설계하였다. 본 연구지역은 지표 지형 및 주변 수계 등을 고려할 때 지하수의 유동 방향이 남동 방향(상류)에서 북서방향(하류)으로 추정되어 쌍극자 배열 측선을 침출수의 유동예상 방향과 직교하는 방향으로 4개의 측선을 설정하였다.

Fig. 2에 제시되어 있는 바와 같이 4개 측선 가운데 3개의 측선은 매립물질이 존재하고 있는 매립장 내부의 지표에서 수행하였고 측선 #4는 매립물질의 흘러내림을 막고 있는 옹벽과 출입문 사이의 하류지역에 다른 측선과 거의 평행하게 설치하였다. Fig. 2에서 측선 #3과 측

선 #4사이에 굵은 점선 부분은 옹벽을 나타내고 있다.

4개 각각 탐사측선은 주변지역의 급경사와 접근성 등과 같은 현장 탐사조건에 따라 측선의 시작 및 끝부분의 위치, 측선길이, 전극수 및 전극간격이 결정되었으며 자세한 설명은 Table 1에 각각 상세하게 제시되어 있다. 측선 #1, #2 및 #3은 Fig. 2에 제시되어 있는 바와 같이 매립장 하부 옹벽경계로부터 상류 방향으로 각각 40 m, 25 m 및 10 m 정도 거리를 가지고 있다.

측선 #1은 최상부 측선으로 옹벽으로부터 가장 먼 거리에 위치하고 있으며 측선길이가 약 115 m이고 측선의 오른쪽 끝은 진입도로에 미치지 못하고 있다. 측선 #2는 매립장 옹벽 정상부로부터 상류방향으로 두 번째로 먼 거리에 위치하고 있으며 약 120 m에 대해 측정하였다. 측선 #2의 오른쪽 끝은 진입도로를 지나서 주변 급경사 지역과 만나고 있다. 측선 #3은 측선길이가 약 154 m이고 측선의 오른쪽 끝부분은 진입도로에 미치지 못하고 있다. 마지막으로 측선 #4는 급경사의 옹벽 정상부로부터 계곡 하류의 출입문 방향으로 약 40 m 가량

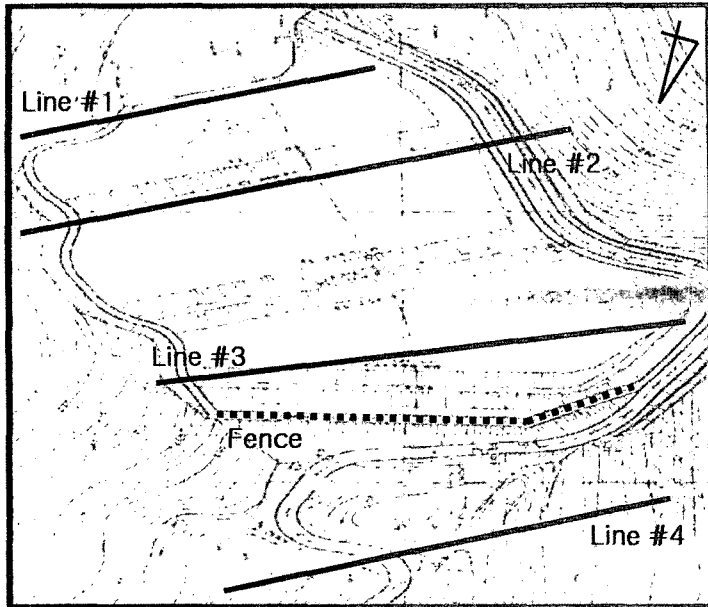


Fig. 2. Location map of the 4 electrical resistivity survey lines with line numbers.

Table 2. Location, length, number of electrodes, interval between electrodes for the resistivity surveys.

Line #	location	length (m)	total electrode numbers	interval between electrodes (m)	Remarks
Line #1	upstream in landfill site	115	24	5	
Line #2	middlestream in landfill site	120	25	5	
Line #3	downstream in landfill site	154	23	7	
Line #4	40m apart from fence	85	14	5	

하류에 위치하고 있고 계곡이 좁아서 전개길이가 가장 짧다. 특히 측선 #4는 매립물질의 외부 유출을 막고 있는 옹벽과 매립장 입구에 위치하고 있는 집적조 사이를 가로질러 설치하였고 침출수가 외부 지질매체로 유출되는 가능성을 조사하기 위해 설치하였다.

**전기비저항탐사 결과**

전기비저항탐사는 우선 현장에서 전기포텐셜을 관측하고, 이를 이용하여 전기비저항값을 계산하고 종합적으로 분석하여 지하구조 및 지하매질 특성을 도출하는 과정으로 이루어져 있다. 특히 지하매질의 전기비저항값을 계산하는 과정은 지하구조 모델의 매개 변수값을 점진적으로 변화시키면서 계산에 의한 이론값과 실제로 얻은 관측치를 비교하여 차이제곱의 합이 최소가 되도록 시행착오적으로 매개 변수 값을 구하는 역산문제이다.

또한 지구물리학에 있어서 역산문제는 대부분 주어진 지배방정식이 비선형 함수로 되어 있고, 비선형 함수에

대한 역산은 우선 모델을 선형화하여, 선형적 역산 알고리즘을 반복 적용함으로써 모델을 순차적으로 보정해가는 반복법을 주로 이용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 1차 미분 연산자를 이용한 평활화 제한 (First Order Smoothness Constraint)과 2차 미분 연산자를 이용한 평활화 제한을 동시에 적용하여 지하매질의 전기비저항의 분포가 공간적으로 가능한 부드럽게 변화하도록 제한을 두어 이론값과 실측값 간의 오차가 최소인 전기비저항값을 계산하였다. 4개의 측선중에서 측선 #2의 오른쪽 끝부분에서 약간 급한 경사가 존재하지만 다른 3개의 탐사측선에서는 거의 수평상태를 유지하고 있어 지형보정은 4개의 측선 모두에 대해 생략하였다.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6은 각각 측선 #1, #2, #3 및 #4의 전기비저항탐사를 수행한 후 측정자료를 이용하여 역산한 결과 그림이다. 각각의 그림은 가로축은 수평거리(m)이고 세로축은 심도(m)를 나타내고 스케일은 그림에 표시되어 있다. 또한 각각의 그림은 3개

의 그림으로 이루어져 있고 가장 상부에 위치하는 현장 자료(Field Data)는 현장에서 측정된 정규화된 전위(Normalized potential) 값에 전극배열에 따른 거리계수(Geometric factor; G)를 곱하여 얻어진 겉보기 비저항 값을 나타낸 결과이다. 또한 해당 그림에서 비어 있는 부분은 여러 가지 원인으로 음의 값이 측정되어 역산으로부터 제외시킨 영역이다. 중간 그림은 이론적으로 계산된 2차원 전기비저항 단면도이며 역산에 의해 얻어진 지하구조 모델 즉 가장 하부의 그림에서 얻어진 지하구조 모델을 기초로 하여 순수하게 이론식을 이용하여 수학적 계산에 의해 얻어질 수 있는 겉보기 전기비저항 분포이다. 따라서 상부 그림과 중간 그림의 특징이 유사할수록 하부 그림에서 제시된 지하구조 모델이 상대적으로 보다 많은 신뢰성을 가지게 된다. 마지막으로 하부 그림은 역산 모델링 결과 얻어진 2차원 전기비저항 단면도이다.

Fig. 3은 매립장 최상부를 가로지르는 축선 #1에 대한 2차원 전기비저항 단면도를 나타낸 것으로, 전극간격은 5 m이고, 측정거리는 약 115 m이다. Fig. 3은 3개

의 그림으로 이루어져 있고 각각은 앞에서 설명한 바와 같다. 또한 Fig. 3의 오른쪽은 Fig. 2의 오른쪽 측 상류의 진입도로가 있는 위치에 해당한다. 역산모델링으로부터 얻어지는 전기비저항 단면도에 대한 좌우 위치는 축선 4개 전기비저항 단면도가 모두 동일하다.

전기비저항 단면도를 살펴보면 전체적으로 중앙 상류 부분이 전기비저항 값이 작고 심도가 깊어질수록 값이 높아지고 있어 전기비저항 단면도에서 심도 약 15 m 이하의 하부 물질은 전기비저항값과 기하학적 분포형태를 고려할 때 지역의 기반암으로 추정된다. 전기비저항값이 상대적으로 작은 상부는 주로 매립물질과 토양으로 이루어진 것으로 분석된다.

특히 Fig. 3의 전극번호 #5 및 #6 사이에 5-10 m의 얇은 심도에 고립된 형태로 발달된 전기비저항 이상대(blue 색)가 존재하고 있고, 전기비저항값이 배경부분과 커다란 차이를 보여주고 있다. 최저 전기비저항값은 약 0.47  $\Omega\text{m}$ 로서 포화 및 불포화된 매립장의 배경 전기비저항값에 해당하는 15-100  $\Omega\text{m}$ 보다 훨씬 낮은 전기비저항 값을 보여주고 있다(김지수, 2003). 이상대의 발달형태(고립된 원모양) 등과 같은 기하학적인 특성과 전기비저항값을 고려하면 침출수가 부분적으로 미약하게 고립된 형태로 발달되어 있는 것으로 분석된다. 물론 여기서 제시된 전기비저항값은 역산 알고리즘으로 야기되는 오차를 가지고 있다.

Fig. 4는 축선 #2에 대한 탐사결과로서 전극간격은 5m, 측정거리 약 120 m에 대해 측정된 2차원 전기비저항 단면도이다. 축선 #1에 비하여 작은 값을 가진 전기비저항대가 상대적으로 깊어지고 있다. 이러한 특징은 계곡형 매립장의 특징으로 계곡하부로 내려갈수록 그리고 계곡의 중앙부에 위치할수록 두꺼워지는 매립물질 및 유도된 2차물질에 의한 영향으로 분석된다.

또한 전극번호 #6과 #7, #8과 #10 및 #13과 #14 사이에서 3개의 고립된 전기비저항 이상대가 발달되어 있고 전기비저항값은 각각 약 1.06, 1.41 및 0.37  $\Omega\text{m}$ 이며, 3개 이상대 모두 포화 및 불포화된 매립장의 배경 전기비저항값에 해당하는 15-100  $\Omega\text{m}$ 보다 훨씬 낮은 전기비저항값을 보여주고 있다(김지수, 2003). 특히 지반 축선의 가장 중앙지역에 발달된 #13과 #14 사이의 전기비저항 이상대는 심도가 가장 깊고 값이 가장 낮은 특징을 보여주고 있다. 3개의 전기비저항 이상대의 기하학적 발달형태, 위치, 상대적인 심도 및 아주 낮은 전기비저항값을 고려하면 침출수가 부분적으로 발달되어 고립되어 존재하고 있는 것으로 분석된다.

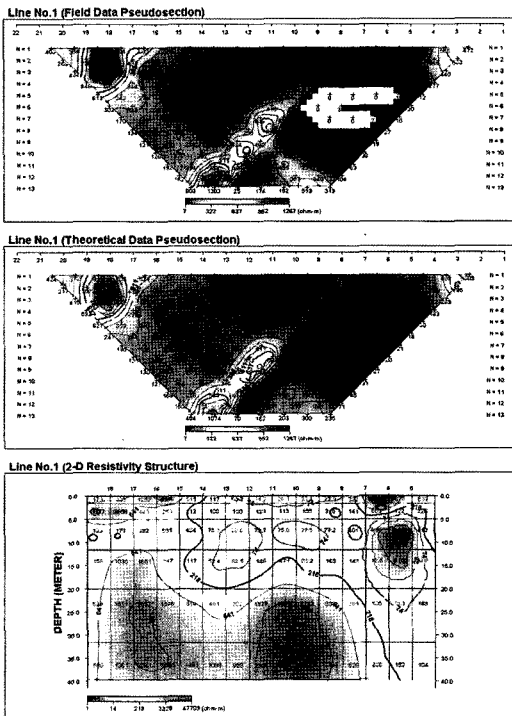


Fig. 3. Eclectical resistivity section of the survey line #1. (top; field data pseudosection, middle; theoretical data pseudosection, bottom; 2-D resistivity structure).

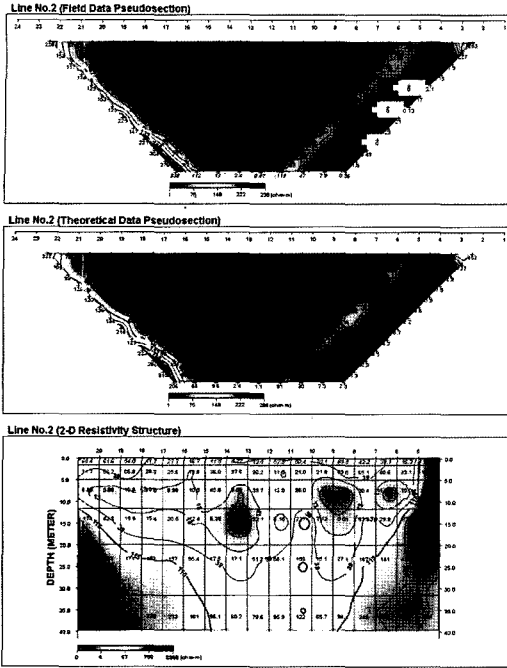


Fig. 4. Eclectical resistivity section of the survey line #2. (top; field data pseudosection, middle; theoretical data pseudosection, bottom; 2-D resistivity structure).

전극번호 #10과 #11사이의 심도 약 12m 이하에 거의 수직으로 발달되어 있고 주변지역 보다 높은 값의 전기비저항대가 존재하고 있다. 이러한 특징은 매립장 내부 지반에서 불균질하게 암반이 발달되어 있는 것으로 분석된다. 이러한 수직 모양으로 발달되고 높은 값의 전기비저항대는 보다 하류 측선(#3 측선)의 연장선상의 위치에서 뚜렷하게 관찰되고 있고 또한 상류 측선(#1 측선)에서도 미약하게 흔적이 관찰이 가능하기 때문에 이러한 분석을 뒷받침해 주고 있다.

또한 단면도의 우측경계에 선명한 붉은 색으로 표시된 높은 값의 전기비저항대는 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 주변 계곡의 급경사지역에 해당하며 지형보정을 하진 않았기 때문에 결과 단면도에서는 수평으로 표시되어 있고 Fig. 2의 등고선 분포로부터 개략적으로 유추할 수 있다.

Fig. 5는 측선 #3의 전기비저항 단면도이고 측선 #1과 #2 등 2개의 측선과 거의 평행을 유지하며 매립장 내부에서 가장 하류에 위치하는 측선이며 길이는 약 120m이다. 측선 #1 및 #2에 비하여 작은 값의 전기비저항 이상대의 바닥 심도가 점점 깊어지고 있으며 또한 특히 단면도의 오른쪽 전극번호 #12에서 #19 사이에 낮

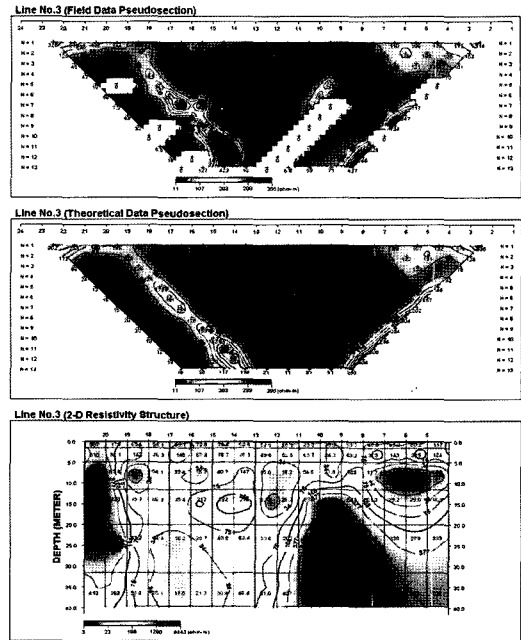


Fig. 5. Eclectical resistivity section of the survey line #3. (top; field data pseudosection, middle; theoretical data pseudosection, bottom; 2-D resistivity structure).

은 전기비저항값 이상대가 최대 가탐심도인 약 40m까지 연결되어 수직통로 모양을 보여주고 있다. 이러한 특징은 앞서 제시한 바와 같이 계곡형 매립장의 특징으로 계곡 하류로 내려갈수록 두꺼워지는 매립물질 및 유동된 2차물질에 의한 영향으로 분석된다.

본 측선은 전극번호 #8과 #11사이에 부분적으로 수직 형태의 주변보다 높은 값을 가진 전기비저항대가 존재하고 있다. 전기비저항 이상대는 암반이 불균질하게 발달한 특징으로 판단되며 이는 측선 #2에서 제시된 바와 유사하다. 불균질하게 발달된 암반은 매립물질 및 침출수 등이 이동하지 못하도록 자연적인 차단벽 역할을 하고 있어 왼쪽 지역의 전기비저항 이상대가 고립되어 존재하고 있는 것으로 분석된다.

고립된 전기비저항 이상대의 값은 약 2-3 Ωm 정도의 아주 낮은 값을 보여주고 있다. 그리고 측선 #1 및 #2의 전기비저항 이상대와 비교할 때 상류에 위치하고 있는 이상대보다 상대적으로 규모가 훨씬 크게 발달되어 있다. 따라서 고립된 이상대의 전기비저항 절대값, 위치 및 발달형태를 고려할 경우 상류의 2개 측선의 왼쪽에 발달된 전기비저항 이상대와 연결되어 하류에 침출수 등이 집적되어 있을 가능성이 대단히 높은 것으로 분석

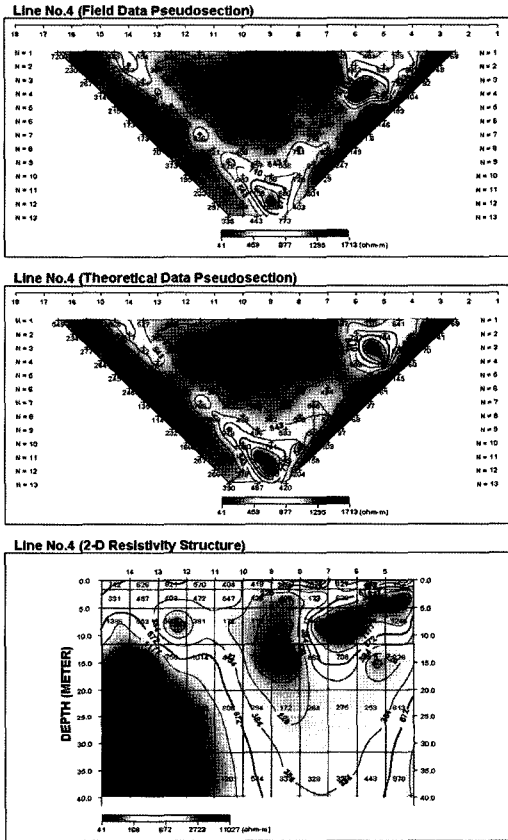


Fig. 6. Eclectical resistivity section of the survey line #4. (top; field data pseudosection, middle; theoretical data pseudosection, bottom; 2-D resistivity structure).

된다.

Fig. 6은 측선 #4에 대한 전기비저항 단면도이고 매립물질을 차단하는 옹벽으로부터 계곡 하부로 약 40m 떨어진 매립장 출입구 부근에 위치하고 전극간격 및 길이는 각각 5m 및 85m이다. 측선의 좌측 및 우측경계는 급경사 지역이고 그리고 측선의 거의 중앙에 계곡의 자연수 및 우수 배출 시설이 위치하고 있다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 본 측선은 매립장 내부에서 생성된 침출수 등이 침출수 유도관을 벗어나 주변 지반에 오염 가능성 여부를 조사하기 위해 설치되었다.

전극번호 #8과 #10사이에 심도 약 10m에서 20m에 걸쳐서 아주 잘 발달된 낮은 값의 전기비저항 이상대를 보여주고 있다. 본 측선에서 보여주는 전기비저항 이상대는 #1, #2 및 #3 측선에 비하여 심도가 가장 깊고 규모면에서 가장 크게 발달되어 있다. 그리고 전기비저항 이상대의 전기비저항 값은 약 47에서 72  $\Omega$ m 정도의

분포를 보여주고 있어 일반 지하수보다 비교적 낮은 전기비저항값을 가지고 있다. 따라서 전기비저항 이상대의 주변 시설물과의 상대적인 위치, 발달심도, 크기, 발달형태 및 절대값을 고려할 때 본 측선의 전기비저항 이상대는 배수로의 지표수가 지하로 일부 스며들어 생성된 지하수와 또한 침출수 유도관으로부터 일부 누출된 침출수가 섞여서 생성된 지하수에 의한 가능성이 대단히 큰 것으로 분석된다. 하지만 향후 시추와 보다 상세한 지구물리 및 지구화학적 조사가 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 측선 #1, #2, #3 및 #4를 상대적인 위치를 고려하여 반입체적으로 나타낸 것으로 4측선 상호간의 연결성 및 일관성을 보다 효과적으로 분석하기 위한 것이다. 앞서 각각 측선의 분석에서 제시된 바와 같이 낮은 전기비저항 이상대의 하한 경계의 심도가 하류에 위치하고 있는 측선으로 갈수록 점차 깊어지고 있음을 잘 보여주고 있다. 또한 우측의 전기비저항 이상대가 측선 #1, #2 및 #3에 걸쳐서 일관성 있게 발달되어 있음을 잘 보여주고 있다. 뿐만 아니라 상대적으로 높은 값을 가진 전기비저항 이상대가 위에서 지적한 바와 같이 낮은 전기비저항 이상대의 바로 좌측 경계를 이루고 있는 특징을 보여주고 있으며 이러한 특징은 역시 측선 #1에서는 미약하게 보여주고 있으나 #2 및 #3에서 공통적으로 잘 보여주고 있다. 특히 측선 #4의 경우 전기비저항 이상대의 단면도의 중앙위치에서 4측선 중 가장 낮은 심도에 발달되어 있다.

## 결 언

충주시에 위치하고 있는 무릉 생활폐기물 매립장에 전기비저항탐사(쌍극자 배열)를 수행하여 폐기물 매립장 내부 및 주변지역에 대해 침출수 존재 여부를 분석하였다. 우선 매립장 내부의 3개의 전기비저항 탐사측선에 대한 전기비저항 탐사결과를 종합적으로 살펴보면 상류에서 하류로 내려 갈수록 배경물질의 전기비저항값 보다 훨씬 작은 값을 가진 전기비저항 이상대의 심도가 점점 깊어지고 있음을 보여주었다. 특히 매립장 내부의 가장 하부 측선인 측선 #3에서 얻어진 전기비저항 단면도는 심도가 얕은 지역의 물질 보다 깊은 지역 물질의 전기비저항값이 점차 작아지고 가탐심도 최하부 약 40m에서 가장 낮은 17.3  $\Omega$ m의 비저항 이상대가 잘 발달되어 있는 특징을 보여 주었다. 따라서 전기비저항 이상대가 가탐심도 이하까지 연결되어 전체적으로 수직통

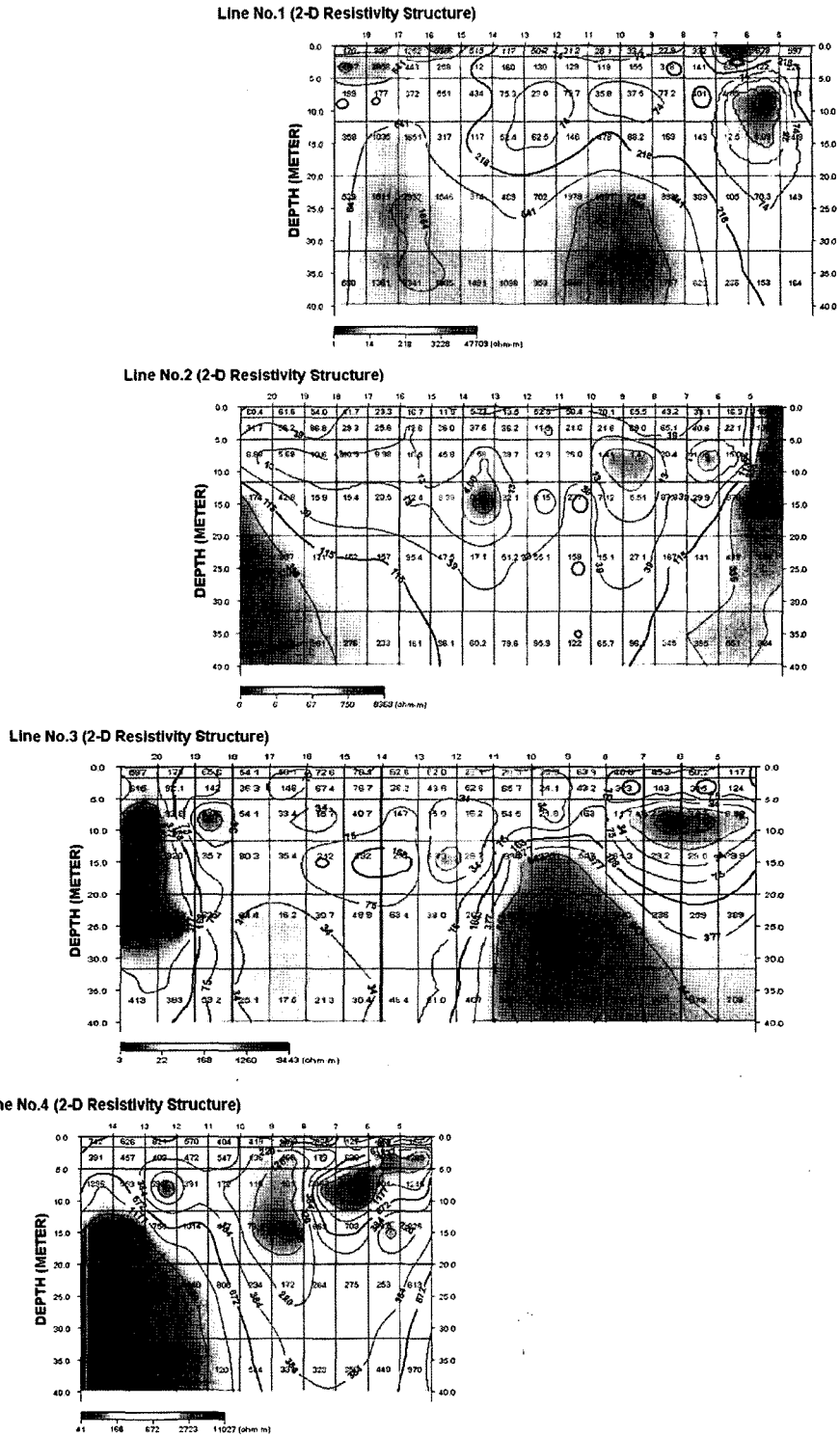


Fig. 7. Eclectical resistivity sections of the 4 survey lines(#1, #2, #3, and #4) considering relative locations of 4 survey lines array.



로 모양을 보여주고 있다. 이러한 특징은 앞서 제시한 바와 같이 계곡형 매립장의 특징으로 계곡 하류로 내려 갈수록 두꺼워지는 매립물질 및 부분적으로 침출수가 매립장의 기반하부에 집적되어 나타나는 영향으로 분석된다. 이러한 특징은 매립 후 시간이 경과하여 매립물질로부터 유도된 침출수가 상대적으로 축선 중앙부에 모여 하부 지반의 공극으로 스며들고 있는 것으로 판단된다. 따라서 매립장 내부의 하부물질은 지반 하부 침출수에 의한 오염이 일부 이루어져 있는 것으로 판단된다.

또한 축선마다 약간 위치적 차이가 있지만 중앙에서 우측으로 약간 치우친 지역에 낮은 값의 전기비저항 이상대가 고립되어 발달되어 있는 특징을 보여주고 있다. 이러한 특징은 축선 #1, #2 및 #3에서 공통적으로 보여주고 있다. 뿐만 아니라 상대적으로 높은 값을 가진 전기비저항 이상대가 위에서 지적인 바와 같이 낮은 전기비저항 이상대의 바로 좌측 경계를 이루고 있는 특징을 보여주고 있으며 이러한 특징은 역시 축선 #1, #2 및 #3에서 공통적으로 보여주고 있다. 위 특징을 모두 고려할 때 3개 축선을 상류에서 하류로 가로지르는 방향으로 암반이 불균질하게 거의 수직형태로 발달하여 침출수 등이 중앙지역으로 이동하지 못하도록 차단벽 역할을 하고 있는 것으로 판단된다. 또한 왼쪽 지역의 고립된 이상대의 전기비저항 위치 및 발달형태와 전기비저항값을 모두 고려할 때 상류, 중류 및 하류 지역의 전기비저항 이상대와 연결 가능성이 대단히 높은 것으로 분석된다.

매립장 출입구 부근에 설치된 축선 #4에 대한 전기비저항 탐사결과를 종합하면 blue 색으로 표현되는 최저 전기비저항값은 42.7 $\Omega$ m 이고 이는 매립장 유수의 전기비저항값에 해당하는 10-50 $\Omega$ m (김지수, 2003)의 범위와 중복되는 구간이 있어 좌우 배수로로부터 지하로 스며든 일반 지하수와 매립장으로부터 유출된 침출수가 혼재하여 존재할 가능성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 매립장 일부 구간에서 침출수가 외부로 유출 가능성이 대단히 크고 보다 정확한 유출경로 및 심도 등을 정량적으로 분석하기 위해 향후 보다 정밀한 지구화학 및 지구물리 탐사가 필요한 것으로 판단된다.

충주시에 위치하고 있는 무릉 생활폐기물 매립장에 전기비저항탐사(쌍극자 배열)를 수행하여 폐기물 매립장 내부 및 주변지역에 대해 침출수 존재 여부 및 개략적인 분포를 정성적으로 확인하였다. 따라서 본 연구에서

적용한 전기비저항 탐사법은 폐기물 매립장의 안정화 정도를 정성적으로 평가하기 위해 효과적인 방법임을 확인되었다. 하지만 전자탐사 및 탄성과 지구물리탐사방법을 추가하여 동일지역에 수행하면 매립장에 대한 보다 정밀한 진단이 가능할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 김준경, 홍상표, 김광필, 조용진, 2004, 전기비저항탐사를 이용한 노은매립장 침출수 분포에 관한 연구. 환경영향평가학회지, 13(5), pp.223-230.
- 손정술, 김정호, 이명호, 고경석, 2005, 쓰레기매립장 주변의 침출수오염조사 사례: 전자탐사 및 자력탐사의 적용. 물리탐사, 8(2), pp.137-144.
- 송성호, 용환호, 안중기, 김기표, 2003, 제주도 쓰레기매립장 침출수 조사를 위한 전기 및 소형루프 전자탐사의 적용. 물리탐사, 6(2), pp.1-10.
- 이재용, 김학수, 1996, 불량쓰레기 매립지에 대한 물리탐사 적용사례 연구(I). 한국토양환경학회지, 1(2), pp.29-38.
- 장현삼, 임해룡, 홍재호, 1998, 쓰레기매립장의 토양오염 조사를 위한 전자탐사 및 전기탐사. 물리탐사, 1(2), pp.87-91.
- 김지수, 송영수, 윤왕중, 조인기, 김학수, 2003, 물리탐사의 활용, 시스마프레스, 791p.
- 임해룡, 1992, Fermat 원리 및 수정된 파선경로를 이용한 비선형파선 토모그래피 연구. 서울대학교 공학박사학위논문 205p.
- 최오순, 1997, 물리탐사를 통한 매립장 주변의 지하수분포에 관한 연구. 세명대학교, 석사학위논문,
- 환경부, 환경백서, 2005, 341p.
- Diprowin, 2000, 회송주식회사
- Ward S. H., 1990, Geotechnical and Environmental Geophysics, VOL I, II, and III, SEG, 200p.

2006년 11월 14일 원고접수, 2006년 12월 16일 게재승인

## 김준경

세명대학교 자원환경공학과  
충북 제천시 신월동 산 21-1  
Tel: 043-649-1319  
Fax: 043-648-7853  
E-mail: kimjkl@unitel.co.kr