

전기비저항 탐사를 이용한 매립지 안정화 조사

하 희상, 정 연문
(현대건설기술연구소)

Electrical Resistivity Investigation at a Wastes Disposal Site

Heesang Ha, Yunmun Jung
(Hyundai Institute of Construction and Technology)

요 약: 쓰레기 매립지에 대한 오염의 전파 경로 및 수직·수평적인 오염의 분포에 대한 조사 및 환경 분야에 대한 적용성을 확인하기 위해 전기비저항 탐사를 수행하였다. 일반적으로 오염의 특성으로 인하여 매립지는 저비저항대로 나타나는데 기반암인 고비저항대와 대비하여 오염의 분포 및 전파 경로에 대하여 전기비저항 탐사는 훌륭한 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구 결과를 이용하여 장차 오염 토양 복원 기술을 적용하는 기초 자료로 사용할 수 있고 오염이 예상되는 지반에 또는 국내에 있는 1000개이상의 불량 매립지에 대한 사전 조사 방법으로 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 전기비저항 탐사, 매립지, 안정화 조사, 오염

Abstract: The primary objective of this study is to develop an investigating method to identify spatial variability of plumes and contaminants at contaminated sites. The electrical resistivity method was used to characterize contaminated sites. This technique is expected to use actively at contaminated sites in order to remedy the contaminated sites in the future. It was studied by applying electrical resistivity method into contaminated wastes disposal sites and verified that it was suitable method for the contaminated site characterization.

Keywords: electrical resistivity method, plumes, contaminated site

1. 서 론

사회가 발달되고 산업화가 진행될수록 지구는 다양한 오염원으로 인하여 사회적으로 커다란 문제를 야기하고 있다. 국내에서도 자동차 및 공장의 매연으로 공기오염이 심각하고 산업폐수와 생활 오염원 등으로 토양 및 지하수가 오염되어 구조물을 축조하거나 건설할 지역이 오염되어 현장의 지반 조사시에도 오염 정도를 조사해야 하는 상황에 이르렀다. 대기 및 하천의 수질 오염은 인간이 쉽게 접촉할 수 있고 오염 상황을 적시에 파악할 수 있는 상태이므로 추가오염을 방지하고 대책을 세울 수 있다. 하지만, 지반을 매체로 하는 토

양 및 지하수의 오염은 누구나 쉽게 인식할 수 없는 상황이므로 오염이 상당히 진행된 후에나 오염의 심각성을 파악할 수 있게 된다.

이미 오염된 토양 및 지하수에 대한 오염 분포 및 오염의 진행 상태를 조사하기 위해 최근 지구 물리 탐사법이 많이 적용되고 있다. 지구물리 탐사법은 비접촉, 비파괴적인 방법으로 원하는 위치의 지역을 개략적으로 신속히 조사하는 방법으로서 지금까지는 주로 지질 구조파악이나 광물자원의 조사에 적용되어 왔다.

그 중에서도 환경 오염원에 대한 조사는 원지반과 오염지역의 전기 전도도 차이를 측정하는 전기비저항 탐사법이 최근에 많이 적용되어 있다. 전기 전도도는 전기장이 가해질 때 전류를 흐르게 할 수 있는 능력으로 금속성 물질, 이온성 물질에서 높게 나타난다. 오염물질이 있으면 생화학, 또는 물리화학적 반응에 의하여 매질내에 자유 이온 농도가 증가하게 되고 이는 결국 전기 전도도를 높게 하여 오염되지 않은 지반과 현저한 차이가 나타나게 된다. 이러한 특성은 결국 오염 토양이나 오염 침출수를 찾는 데 효과적으로 이용될 수 있다.

지반의 전기적 특성은 전기의 옴의 법칙에 의거 매질에 전류를 매질에 인위적으로 흘려서 매질이 지니고 있는 저항치를 측정하는 시스템으로 토질의 종류에 따라 다르게 나타나는데 만약 오염된 토질은 전기의 비저항 치가 특이하게 다른 정량치를 가지고 있으므로 이를 이용하여 오염범위를 알 수 있다는 사실을 기본으로 하고 있다.

전기 전도도 또는 전기비저항의 변화는 오염 토양 조사에 가장 효과적으로 이용될 수 있는 물성치 중의 하나이다. 전기 전도도는 매립물 자체의 특성에 따라 변할 수 있으나 매립 물질로부터의 침출수는 일반적으로 주위에 비하여 높은 전기 전도도를 보이게 된다. 또한 유류나 용제류도 오염되지 않은 지하수나 주위 토양에 비하여 현격한 전기 전도도의 차이를 보이게 되므로 이러한 전기 전도도의 차이에 의한 오염토양의 측정은 가장 효과적인 방법중의 하나이고 또한 가장 먼저 적용되기 시작한 방법이다.

일반적으로 토양이나 암석은 전기의 흐름도를 표시하는 전도성은 주로 간극수에 의해 발생하며 이에 따른 변화는 지반의 간극률, 포화도, 간극수의 전기적 성질에 지배를 받게 되는 것이다. 만약 지반이 등방이고 균질한 물질로 되어 있다면 비저항치는 정해질의 농도 및 전해질의 성분에 따라서 변화함으로 이에 따른 특성을 파악하여 그 특징을 알 수 있는 것이다. 그러므로 전기비저항 탐사법은 토질과 암반의 형태, 공극, 공극내의 유체의 형태에 따른 함수이다.

전기비저항 탐사법이 이용되는 경우는 다음과 같다.

- 매립 폐기물 및 시설탐지
- 오염원 및 오염 형태 파악
- 지하수의 오염정도 파악
- 오염이 발생할 지질 조건
- 암반 및 흙의 공학적 특성 파악
- 수리 지질조건 판단
- 해안지역에서 염수와 담수의 경계 구분
- 모래와 자갈 퇴적층의 위치 결정
- 공동, 관로, 점토로 충전된 웅덩이 및 지하 매설 수로의 발견

2. 전기비저항 탐사

대부분의 쓰레기 처분장은 그 내부의 전도성 물질과 이온으로 인하여 전기비저항 값이 일반적으로 매우 낮다. 대지의 전기비저항이 낮으면 측정되는 전위차가 매우 작기 때문에 전기적 잡음이 포함될 가능성이 매우 높다. 이러한 잡음을 제거하기 위해서는 많은 전류를 대지에 흘려 주어 S/N 비를 높이게 된다. 전기비저항이 높게 나타나는 부분은 측정 전위차가 높으므로 상대적으로 S/N비가 높게 나타난다. 전극과 대지의 접촉저항을 줄이기 위해 이번 조사에서는 전극 주변에 소금물을 부어 접촉 저항을 줄이고자 하였다.

전기비저항 탐사의 쌍극자 간격은 4 ~ 5m, 전극 전개수 N은 8로 하였다. 이와 같은 탐사 변수는 오염대의 수평적인 분포와 아울러 수직적인 분포, 그리고 기반암의 심도 및 오염 가능성에 대한 정보를 함께 영상에서 획득하기 위한 목적이었다.

대부분의 측선에서 전기비저항이 낮음으로 인하여 많은 전기적 잡음이 발생되었으며, 전기적 잡음은 주로 자연 전위(Self Potential)에 기인한다고 추정된다. 이러한 자연 전위를 발생시키는 기구는 여러 가지가 있으나 쓰레기 매립지의 지하에 이온 농도가 높은 지하수 유동에 기인한다고 추정된다. 정확한 영상을 획득하기 위해서는 가능한 많은 측정 자료가 필요하나, S/N 비가 매우 낮거나, 자연 전위 등에 기인한 음의 값 자료는 오히려 자료 처리 과정에서 무시하거나 제거하는 것이 바람직하다. 아래의 현장 측정 탐사 자료 중에서 측정 위치의 단면도에서 비어 있는 부분은 자료 처리 과정에서 제외된 부분이거나 자연 전위 등의 이유로 발생한 음 전위 값들이다. 이번 탐사에서는 각 측정점에서 3번을 측정하여 오차가 2%이내인 값만 자료 처리에 적용하였으며 그 이상의 오차를 보이는 측정 값과 음의 측정 값은 제외하였다. 이와 같은 측정 자료의 분석 및 편집은 신뢰성 있는 영상의 획득을 위하여 가장 기본이 되는 사항이므로 주의 깊게 수행하여야 한다.

3. 응용 사례

매립지 안정화 조사를 위한 실험 장소로서 양평 소재의 쓰레기 처분장을 선택하여 전기비저항 탐사의 환경문제 적용의 가능성에 대한 탐사를 수행하였다. 그림 1은 축척 150,000:1 지형도 상에 표시한 실험 장소의 위치이다. 조사 대상인 폐기물 처분장은 이미 처분이 완료되어 그 상부에 토양층을 피복한 상태의 불량 매립지이다. 매립은 4m 매립 후 50cm 복토를 한 후 다시 4m를 매립하고 상부 1m를 최종적으로 복토한 상태로 매립장의 총 깊이는 약 10m이다. 전기비저항 탐사는 토양에 공기 주입전과 공기 주입 2개월 후에 대하여 2회에 걸쳐 조사를 수행하였다.

이곳에서는 4개의 지점에 시추한 후 시추공에 강제적으로 공기를 순환시켜 호기성 세균에 의한 매립지의 안정화를 촉진시키기 위한 실험이 수행되었다. 공기는 약 2개월에 걸쳐서 주입되었으며 이러한 실험 과정에서 호기성 세균에 의한 매립지의 안정화에 대한 척도로 사용하고자 10개의 측선에 대한 비저항탐사를 공기 주입전과 공기 주입후에 실시하였다. 공기 주입 전·후의 비교를 위해 1개 라인(YP-9)을 매립장 밖에 라인을 선정해 조사하였다. 이 지역에 대한 탐사 측선도를 그림 2에 나타내었으며 전기비저항 탐사의 적용 실험은 다음과 같은 사항에 중점을 두었다.

1. 수평, 수직적인 오염대의 조사

2. 심도별 오염 물질의 발달 경향 및 이동 경로

적용된 물리탐사 기법은 쌍극자 배열 전기비저항 탐사법을 적용하였다.

그림 2는 그림 1에 표시한 실험장소에 탐사 축선을 표시한 탐사 축선도이다. 그림에서 나타낸 탐사 축선 상에 쌍극자 배열 전기비저항 탐사가 실시되었다. 그림 3의 (a)는 옥천 방면에서 양평 쪽을 바라볼 때의 양평 쓰레기 매립장의 전경이며 (b)는 축선 YP-5 부근의 침출수가 흐르고 있는 모습이다. 그림 3의 (a) 우측에 보이는 것이 도로이며 뒤에 보이는 건물들이 양평군 시내 지역이다.

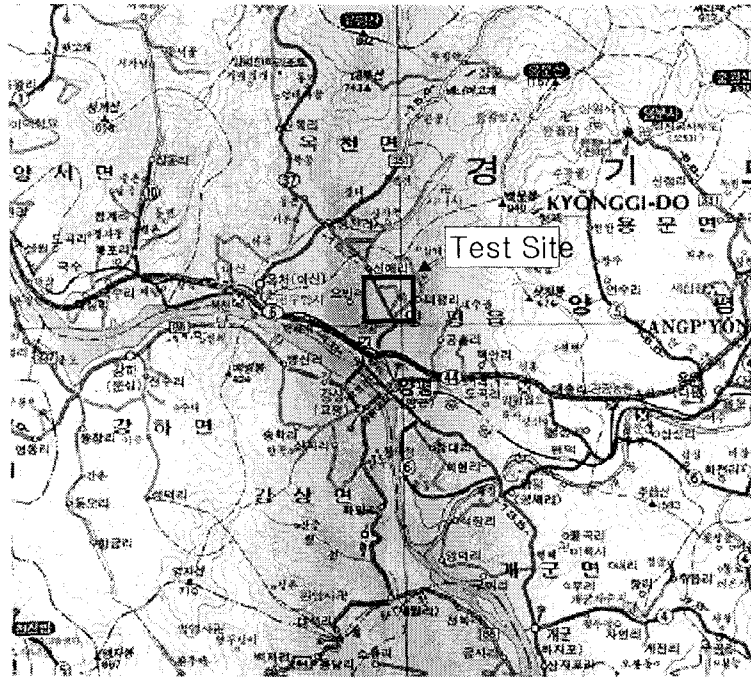


그림 1 양평 쓰레기 매립장 위치도

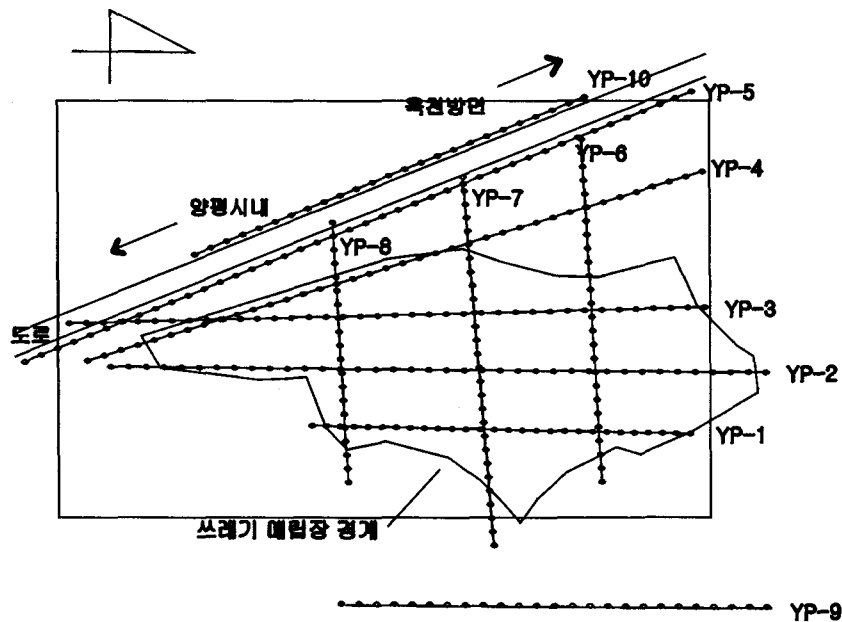
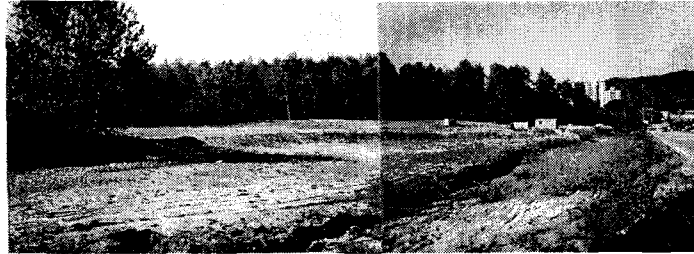


그림 2 전기비저항 탐사 축선도



(a)양평 쓰레기 매립장의 전경



(b)측선 YP-5 부근의 침출수 이동

그림 7 양평 쓰레기 매립지 전경

이상의 원리를 이용하여 본 연구에서는 불량 쓰레기 매립장을 선정하여 오염원의 분포 및 발달 상황을 조사하였다. 또한 매립장 안정화를 위해 4개의 시추공을 뚫은 후 공기를 2개월 간에 걸쳐 강제로 주입하였는데 공기 주입 전·후의 결과를 비교하여 전기비저항 탐사가 안정성 평가에 이용될 수 있는지에 대한 연구도 수행하고자 하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 4는 측선 YP-1의 쌍극자 탐사 결과 그림이다. 그림에서 측선 번호의 단위는 m이다. 그림 4에서 가장 윗쪽에 있는 그림은 현장에서 측정된 겉보기 전기비저항의 가단면도를 영상으로 나타낸 것이며, 가장 아래 그림은 현장 측정 겉보기 비저항 자료로부터 2차원

역산 기법을 이용하여 구해진 측선 하부의 참 전기비저항 분포 영상도이다. 한편 가운데 그림은 역산 결과인 2차원 전기비저항 분포로부터 이론적으로 계산된 겉보기 비저항 가단면도이다. 그러므로 현장 자료인 왼쪽 그림과 이론 자료인 중간 그림이 일치한다면 현장 측정 및 2차원 전기비저항 구조 영상의 정확도가 높다는 것을 의미한다. 측선 YP-1은 표고의 차이가 거의 없으므로, 지형 효과가 개재되어 있지 않으나, 다른 측선들의 경우 처분장의 경사로 인하여 지형 효과가 나타나므로, 일관성을 위하여 2차원 비저항 구조 영상에 심도가 아닌 해발 고도로 표시하였다.

측선 YP-1은 도로 반대 쪽에서 도로와 약간 경사진 측선이다. 쓰레기 매립지 주변의 지형 고저를 살펴보면 측선 YP-1 방향과 측선 YP-6 방향 그리고 측선 YP-5 방향으로 약한 경사를 이루고 있다. 따라서 지표수의 유동은 측선 YP-1 방향에서 도로 방향으로 그리고 도로를 따라 양평 쪽으로 흐를 것으로 예상된다. 지표수의 이동 방향은 주변 강물과 만나게 되므로 침출수의 유동경로를 정확히 규명해야 할 필요가 있다. 측선 YP-1에서 측정된 겉보기 비저항은 10개의 측선 중 낮은 편에 속하며 따라서 S/N비 또한 낮다고 볼 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 $70 \Omega\text{m}$ 이하로서, 많은 부분에서 $20 \Omega\text{m}$ 정도의 낮은 전기비저항 값을 보이고 있다. 역산 결과를 보면 이와 같은 경향이 더욱 뚜렷하게 나타나는데, 지표에서부터 하부까지 $30 \Omega\text{m}$ 내외의 낮은 전기비저항 값을 보이고 있으며 일부 구간에서는 $10 \Omega\text{m}$ 정도의 매우 낮은 전기비저항 값이 나타난다. 이와 같은 낮은 전기비저항 값은 지하수 또는 인접한 하천수 등에 의한 영향보다는 오염 물질에 의한 것으로 판단된다. 또한 전기비저항이 낮은 부분이 오른쪽 부분에 주로 분포하는데 이는 지표의 경사방향으로 인한 지표수 및 지하의 침출수 이동 예상 경로와도 일치하고 있다. 즉 이 측선의 해석 결과를 놓고 보면 YP-1번 측선을 따라 침출수의 이동을 예상할 수 있다.

측선 YP-1의 현장 측정 겉보기 비저항 가단면도에서 나타나는 특징 중의 하나는 측선 60m 정도까지 심부로 갈수록 전기비저항이 증가하고 있다. 우리 나라 기반암이 대부분 고비저항이며 따라서 대부분의 탐사 자료에서도 심부에 대응되는 겉보기 비저항 값이 천부의 것보다 높게 나타나는 경향과 일치하는데 이러한 것으로 유추해 보면 YP-1 측선의 하부에 기반암 분포를 추정할 수 있다. 매립지의 조성시 매립 깊이가 약 10m에 달하므로 그 하부는 풍화암 등의 기반암으로 추정할 수 있는데 역산 결과를 보면 48m 우측 부분은 매우 낮은 비저항을 갖는 물질이 기반암까지 침투하여 기반암의 전기비저항이 매우 낮아진 것으로 판단된다. 이와 같이 낮은 저 비저항 물질은 전술한 바와 같이 일반적인 지하수나 혹은 하천수로서는 대치될 수 없으므로, 오염물질의 분포를 나타내는 저 비저항대일 가능성이 대단히 높다고 해석된다.

그림 5는 측선 YP-2의 쌍극자 배열 전기비저항 탐사의 역산 결과 그림이다. 측선 YP-2는 측선 YP-1과 도로쪽으로 10 m 이동하여 평행하게 측정한 측선이다. 측선 YP-2의 현장 측정 겉보기 비저항 가단면도는 측선 YP-1과 약간 다른 경향을 보이는데, 역산 결과를 보면 좌측 약 30m까지는 10m 하부에 고비저항대가 나타나는데 이것은 기반암의 영향으로 보인다. 전반적으로 $30 \Omega\text{m}$ 이하의 전기비저항을 보이며 측정 65 ~ 75m 사이에 $10 \Omega\text{m}$ 의 매우 낮은 전기비저항 분포를 보이고 있다. 이는 오염의 이동 통로 또는 파쇄대의 영향으로 추정된다. 또한 전반적으로 심도 10m 이내에는 $10 \sim 30 \Omega\text{m}$ 의 낮은 비저항 분포를 보이고 있다.

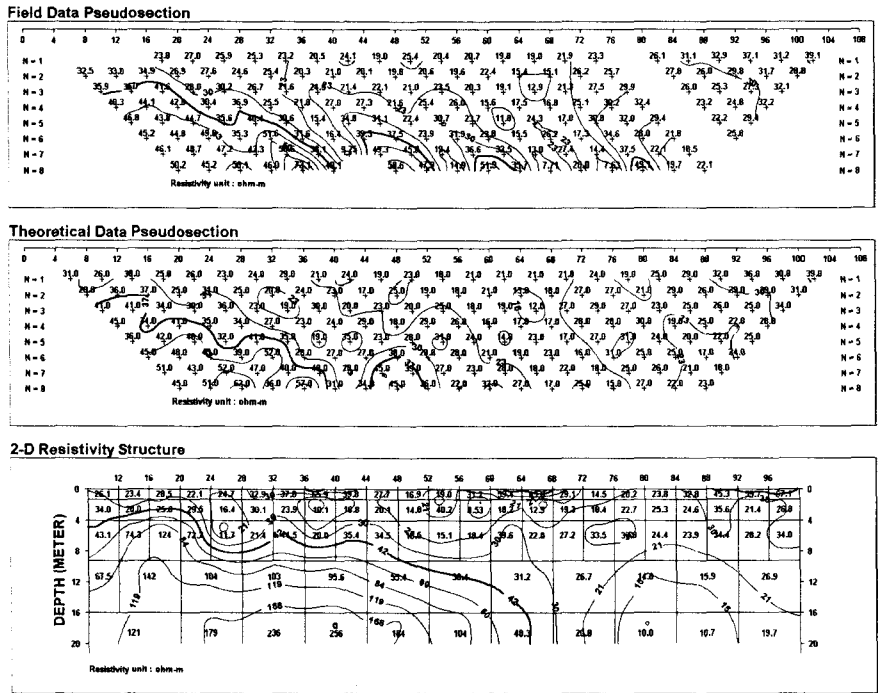


그림 8 측선 YP-1의 전기비저항 탐사 결과

이 역산 결과로 분석해보면 측선이 쓰레기 매립지의 중심부에 위치하여 오염이 매립지 전반에 걸쳐 매립 깊이 보다 더 깊은 심부까지 넓게 퍼져 있다는 사실을 알 수 있다. YP-2의 가단면도 상에서 135 ~ 150m 사이의 자료의 부재는 전체적으로 고비저항인 지역이므로 자연전위보다는 전극 접촉저항으로 인해 적절한 전류가 흐르지 못해 S/N비가 낮아져서 제거한 부분이다.

그림 6은 측선 YP-3의 쌍극자 배열 전기비저항 탐사 결과 그림이다. 측선 YP-3는 측선 YP-1과 도로쪽으로 20m 이동하여 평형하게 측정된 측선이다. 이 탐사에서는 쓰레기 매립지의 오염의 수직, 수평 분포 특성을 살펴보기 위해 가능한한 격자 구조로 조사를 하고자 하였다. 측선 YP-3의 현장 측정 겉보기 비저항 가단면도는 측점 115m를 기준으로 저비저항대와 고비저항대가 수평으로 경계를 이루고 있다. 역산 결과를 보면 측점 115m부터 140m까지는 천부에도 고비저항대가 나타나며 측점 115m부터 180m까지는 심도 10m 하부부터는 고비저항대가 넓게 분포하고 있는데 이는 기반암의 분포 특성으로 보인다. 지형적으로 살펴보면 측점 120m 정도에서 쓰레기 매립지의 경계부분이 위치하는데 경계부분은 외곽지역과 수 m 정도의 표고차이가 존재한다. 측점 120m에서의 천부 고비저항대는 지형적 영향으로 판단된다. 측점 65m 심부의 고비저항대는 기반암의 영향으로 판단되며 측점 70 ~ 100m에 천부의 저 비저항대는 측선 YP-2에서 계속 이어지는 오염의 전파로 인한 영향으로 판단된다. 전반적으로 측점 0에서 115m 까지는 기반암까지 오염이 넓게 분포하고 있으며 지표 부근과 기반암을 따라 오염이 이동하고 있다고 할 수 있다.

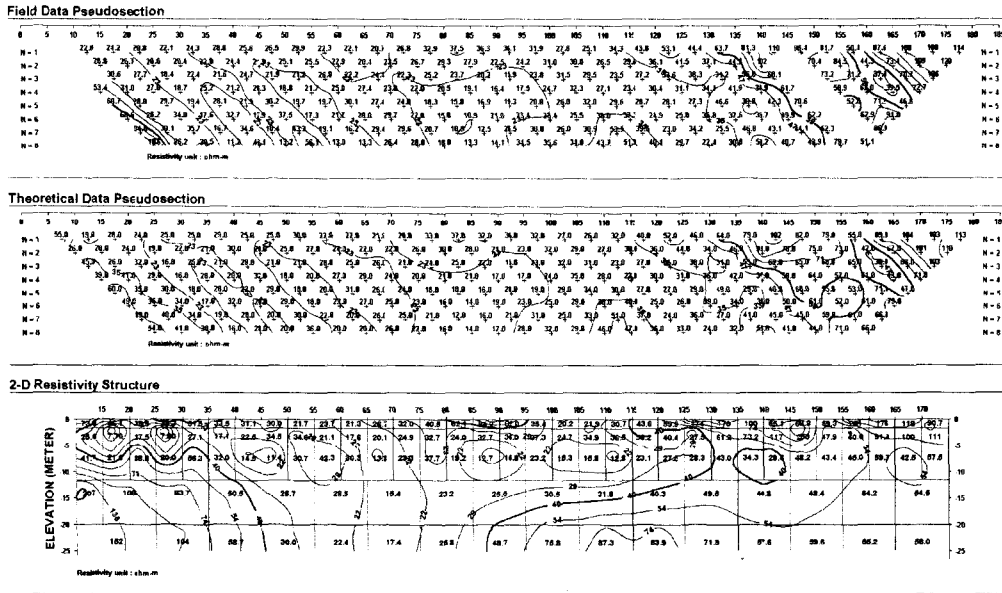


그림 9 측선 YP-2의 전기비저항 탐사 결과

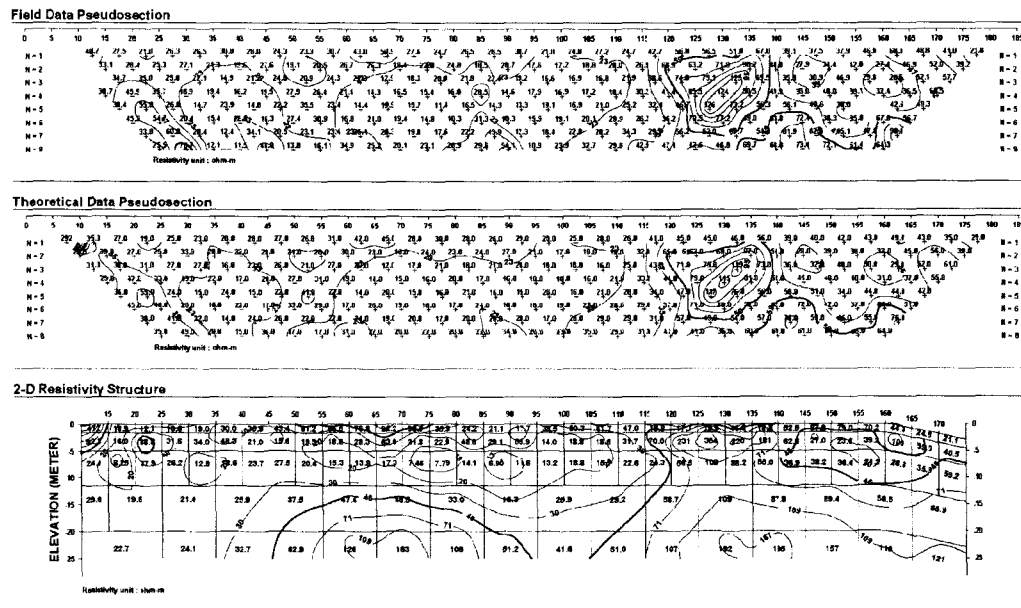


그림 10 측선 YP-3의 전기비저항 탐사 결과

측선 YP-4는 북동쪽에서 남서쪽으로 이어지는 도로와 거의 평행한 측선이다. 측선 YP-4는 쓰레기 매립지의 외곽 경계를 따라 설정하였다. 그림 7은 측선 YP-4의 쌍극자 배열 전기비저항 탐사 결과이다. 역산 결과를 보면 좌측 부분 즉 도로의 상부 지역 근처는 심부까지 고비저항대로 나타나며 우측으로 갈수록 저 비저항대가 지배적으로 나타난다.

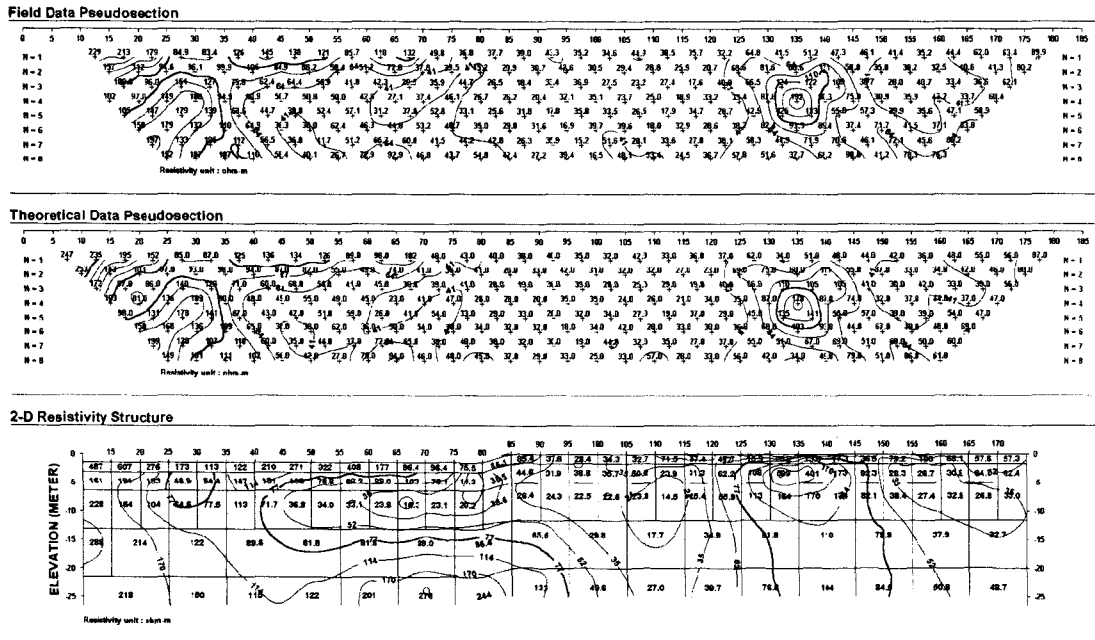


그림 11 축선 YP-4의 전기비저항 탐사 결과

이것은 좌측부분은 지형을 살펴보면 산악지역의 끝자락으로서 심부까지 기반암이 잘 발달되어 있는 것으로 판단되며 또한 쓰레기 매립지에서 약간 거리가 있으며 표고도 높은 지역에서 낮은 지역으로 변하는 지점에 위치하고 있으므로 오염의 이동 경로는 아닌 것으로 예상되는 지역이다. 그러나 매립지의 경계와 근접하는 축점 60m 부터는 오염의 영향으로 보이는 저 비저항대가 넓게 발달하고 있다.

그림 8은 축선 YP-5의 쌍극자 배열 전기비저항 탐사 결과이다. 축선 YP-5는 도로 바로 약 2m 정도 옆에서 도로를 따라 측정한 축선으로 오염의 수평적인 전파 영역 범위를 결정하기 위해 설정한 축선이다. 축선 YP-4와 인접해 있으며 역산 결과를 살펴보면 심도 15m 부터 심부까지 전반적으로 넓은 고비저항대가 분포하고 있으며 천부는 저 비저항대가 넓게 분포하고 있다. 심부의 고비저항대는 기반암의 분포를 나타내고 있는 것으로 판단되며 천부의 저 비저항대는 오염으로 인한 것으로 추정된다. 쓰레기 매립지와 인접하게 되는 축점 110 ~ 145m까지는 파쇄대로 인하여 기반암까지 오염이 확산된 것으로 보인다. 이상의 결과를 종합해보면 전반적으로 심도 10m 하부부터는 기반암이 발달되어 있으나 지역에 따라 오염이 심부로 침투된 지역이 있으며 전체적으로 쓰레기 매립지를 둘러싼 지형 분포에서 예상하는 것과 마찬가지로 축선 YP-1에서 축선 YP-5쪽으로 도로 상부에서 도로를 따라 하부쪽으로 오염이 이동하는 특성을 보이고 있다. 도로와 비슷한 방향의 축선에서 추정된 결론을 명확히 하기 위해서 축선 YP-6, 7, 8은 축선 YP1 ~ YP5과 수직되는 방향으로 탐사를 수행하였다. YP-6, 7, 8의 축점 시작점은 도로 쪽이며 축점이 증가할수록 도로 쪽에서 멀어지는 방향이다. 이는 격자 형태로 자료를 획득하여 지구 통계학(geostatic)적인 자료 처리를 하기 위하여 설정하였다.

그림 9는 축선 YP-6의 쌍극자 배열 전기비저항 탐사 결과이다. 축선 YP-6는 기존의 축선과 수직으로 측정한 축선으로 축점들간의 표고차이로 인한 지형효과는 기 개발된 지형효

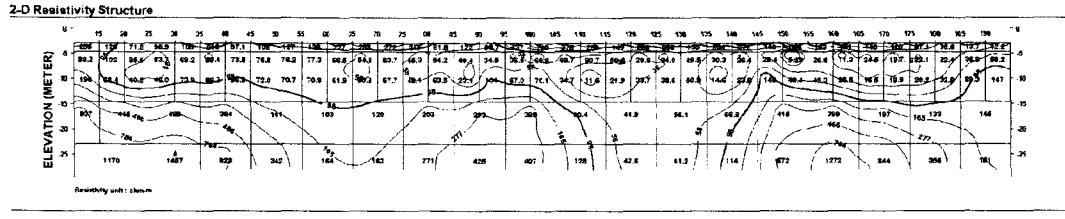
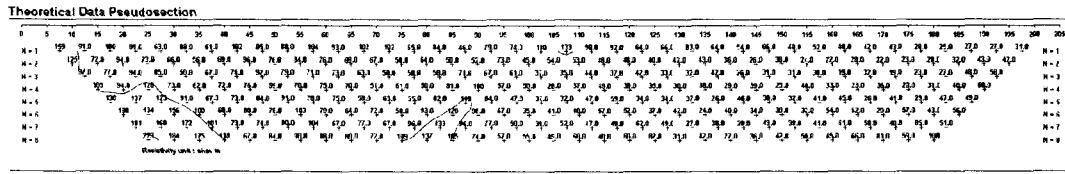
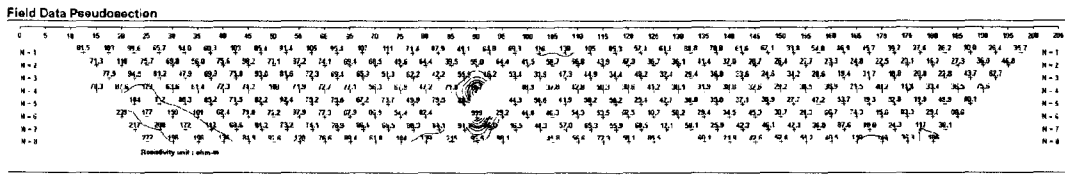


그림 12 축선 YP-5의 전기비저항 탐사 결과

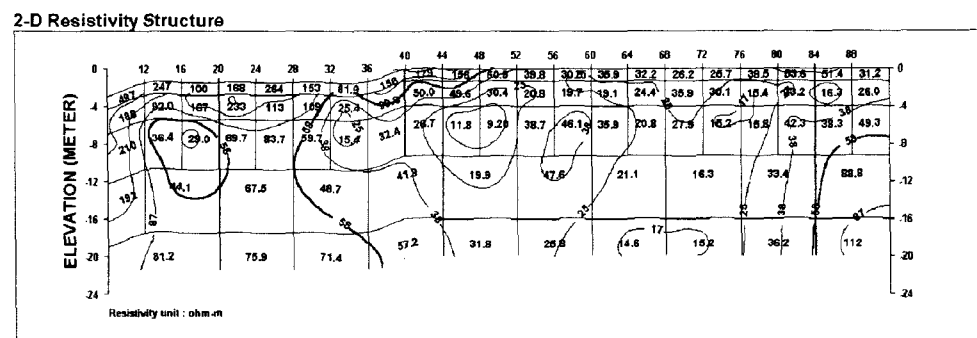
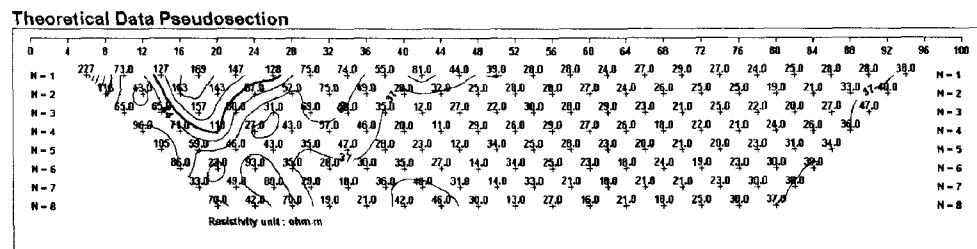
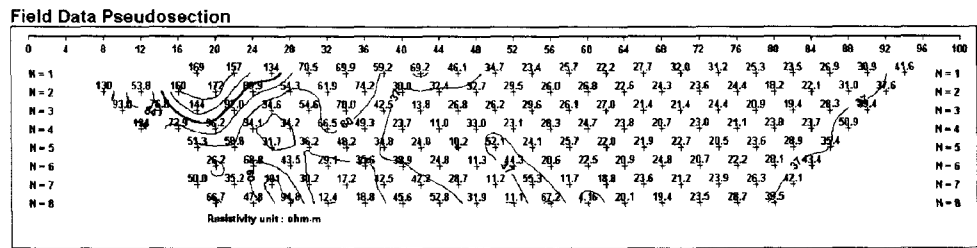


그림 13 축선 YP-6의 전기비저항 탐사 결과

과 보정 프로그램으로 보정하였다. 도로쪽에서 멀어지는 방향으로 갈수록 표고가 증가하는 양상을 띄고 있다. 역산 결과를 살펴보면 측점 약 30m까지는 천부에 고비저항대가 존재하며 그 다음부터 약 10m는 지형적인 특성, 즉 지표의 땅이 갈라진 곳이 많아 나타나는 고비저항대로 보인다. 이 측선은 도로쪽 약 30m를 제외하고는 거의 심부 까지 저 비저항대로 오염이 매립지 하부까지 오염이 분포하고 있음을 알 수 있다. 가단면도를 살펴보면 우측에서 오염이 심부로 갈수록 좌측으로 확산되고 있는 양상을 살펴볼 수 있다.

그림 10은 측선 YP-7의 쌍극자 배열 전기비저항 탐사 결과이다. 측선 YP-7은 측선 YP-6과 평행하게 도로쪽에서 시작하여 매립지의 반대쪽 경계까지 이어지는 측선이다. 측선 YP-7의 역산 결과를 살펴보면 도로쪽에서 약 30m 지점까지는 고비저항대가 거의 전 심도에 걸쳐 분포하고 있으며 매립지 내부에서는 전 심도에 저 비저항대가 분포하고 있고 다시 측점 72m 이후 부터는 심도 10m 이하에서는 고비저항대가 심도 10m 이내에서는 저 비저항대가 분포하고 있음을 알 수 있다. 측점 72m부터 100m 지점까지는 심도 10m 지점에 기반암과의 경계로 추정되는 고비저항대가 명확하게 나타나고 있다. 측점 100m 지점은 쓰레기 매립지의 경계로 경계 밖과 표고차가 약 3 ~ 4m 존재한다. 측점 30m ~ 72m 지점까지는 전 심도에 걸쳐서 저 비저항대가 발달되어 있는데 이는 매립지의 중간부분의 위치로서 연약한 기반암에 오염이 심부로 확산되었음을 추정할 수 있게 한다. 측점 72m 우측에 발달한 심도 10m 부터의 기반암으로 인하여 이 기반암이 오염의 심부 확산을 막아 오염의 이동 경로는 매립지의 중심부를 통과하는 쪽으로 유도되었을 것으로 판단된다.

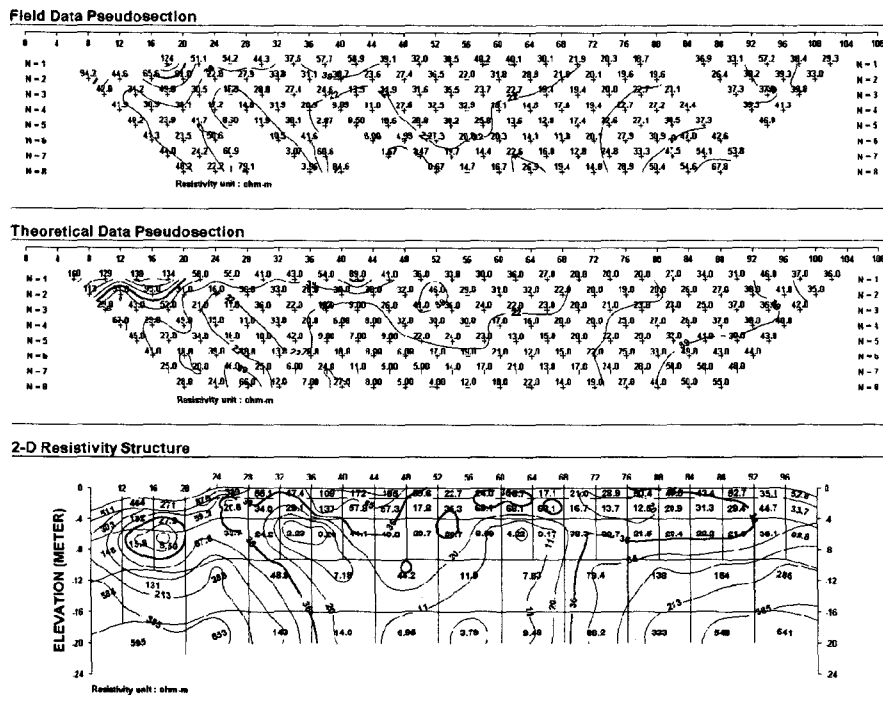


그림 14 측선 YP-7의 전기비저항 탐사 결과

기반암의 분포와 오염의 이동을 좀 더 명확히 하기 위해 YP-7과 평행하게 30m 우측으로 설정한 측선이 YP-8이다. 그림 11은 측선 YP-8의 쌍극자 배열 전기비저항 탐사 결과를 나타낸 그림이다. 가단면도 상에서 낮은 저 비저항대로 인한 S/N비의 감소로 일부 제거된 자료가 나타나 있다. 전체적으로 YP-7과 비슷한 양상을 보인다. 매립지 양쪽 경계 부분에서 심부에 고비저항대가 발달되어 있으며 매립지 중앙 부분에는 심부까지 저 비저항대가 발달되어 나타나고 있다. 즉 오염의 확산은 매립지의 중심에서 주로 이루어지고 있으며 도로와 평행하게 양평 방향으로 오염이 전파되고 있다고 하겠다.

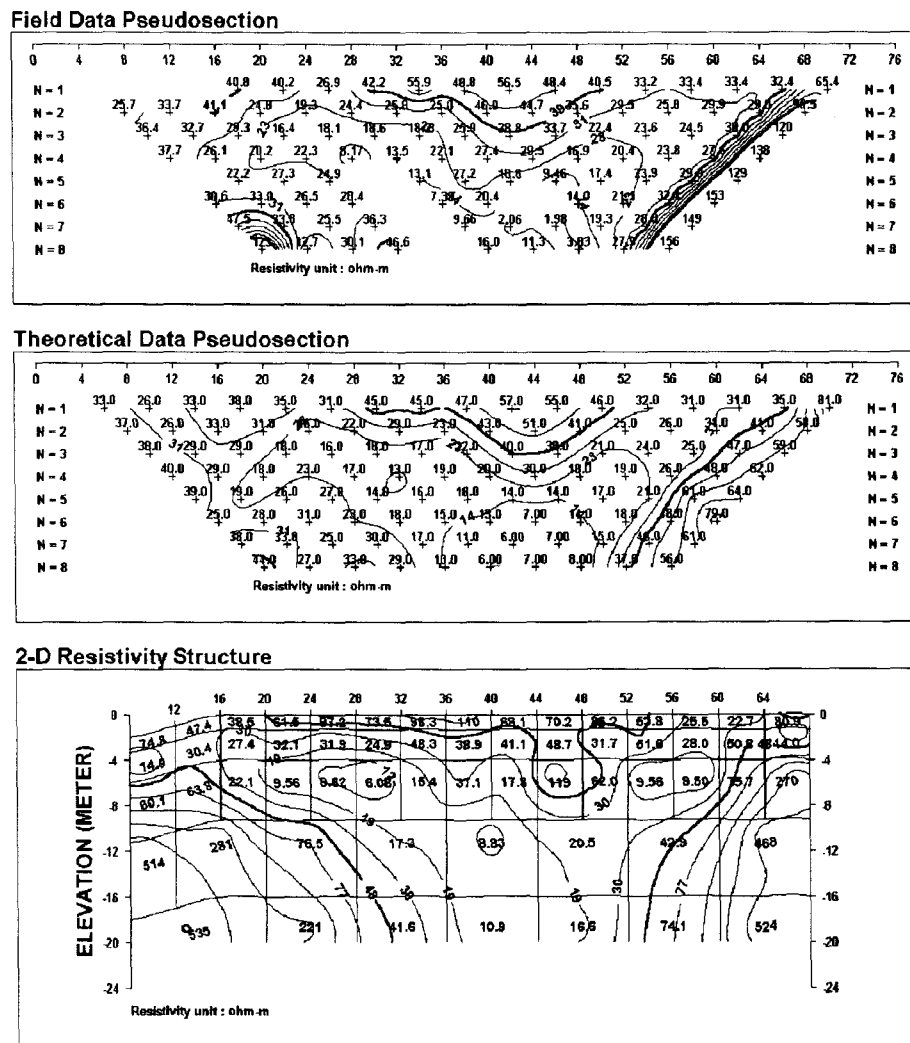


그림 15 측선 YP-7의 전기비저항 탐사 결과

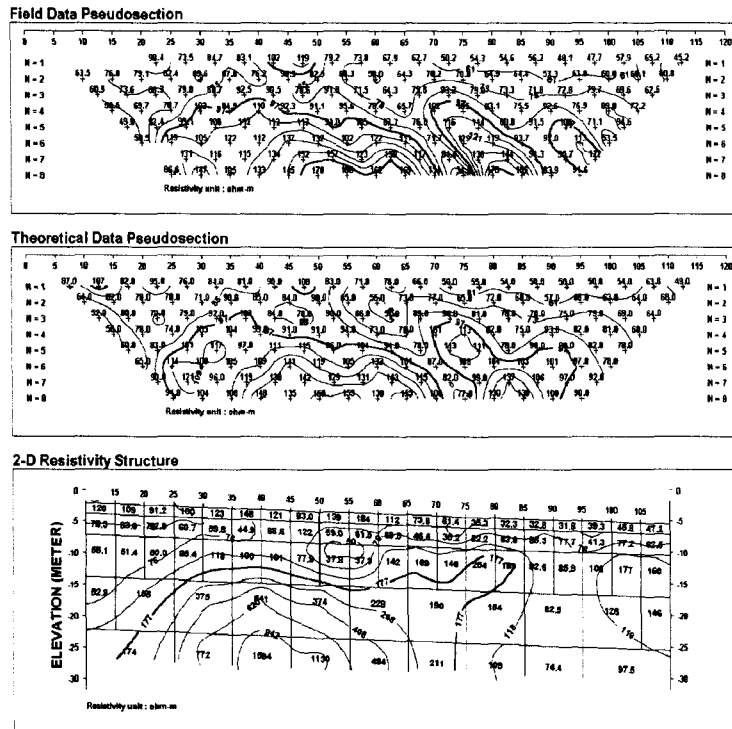


그림 16 측선 YP-10의 전기비저항 탐사 결과

YP-10은 도로에 의한 오염의 확산이 어떤 형태로 전파되었는지를 규명하기 위해 설정된 측선이다. YP-10은 YP-5와 평행하게 도로를 지나 설정하였다. 쓰레기 매립지에서 도로를 건너면 표고차이가 약 7 ~ 8m 정도 있는 작은 개천이 흐르고 있다. 이 측선에서 규명하고자 한 것은 오염이 도로 하부를 통하여 이 개천으로 전파가 되고 있는가 하는 것이었다. 그림 12에 측선 YP-10의 쌍극자 배열 전기비저항 탐사 결과를 나타내었다. 전반적으로 60 Ωm 이상의 높은 전기비저항을 나타내며 특히 측점 25 ~ 65m까지 심부에 고비저항대가 나타나고 있다. 천부에 부분적인 저 비저항대는 개천의 지하수로 인한 영향으로 판단되며 전반적으로 균질한 고비저항대가 넓게 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 그림 12의 등고선도에서 살펴보면 이 지역은 쓰레기 매립지보다 명확히 고비저항대라는 것을 알 수 있다. 따라서 YP-5에서 발달한 기반암과 상부의 도로공사의 영향으로 오염의 전파는 도로를 넘어서 보다는 도로 방향을 따라 쓰레기 매립지의 중간 부분을 주로 통과하여 양평 방향으로 이동되고 있음을 추측할 수 있다.

일반적인 주변 지형에서의 기반암 및 토양의 비저항 대비를 해보기 위해 쓰레기 매립지 하부 경계에서 약 50m 정도 떨어진 지역에서 조사한 측선이 YP-9이다. 그림 13에 측선 YP-9의 전기비저항 탐사 결과를 나타내었다. 도로쪽과는 쓰레기 매립지를 사이에 두고 있으며 측선의 총 전개길이는 84m이고 표고는 쓰레기 매립지보다 약 2m 정도 높은 밭이다. 측선 YP-9의 역산 결과를 보면 전반적으로 100 Ωm 이상의 분포를 보이고 있으며 심부로 갈수록 기반암의 영향으로 비저항이 증가되는 일반적인 양상을 보인다. 쓰레기 매립지와 인접한 측선을 조사함으로써 주변 기반암 및 토양의 기본적인 비저항을 조사할 수 있었으

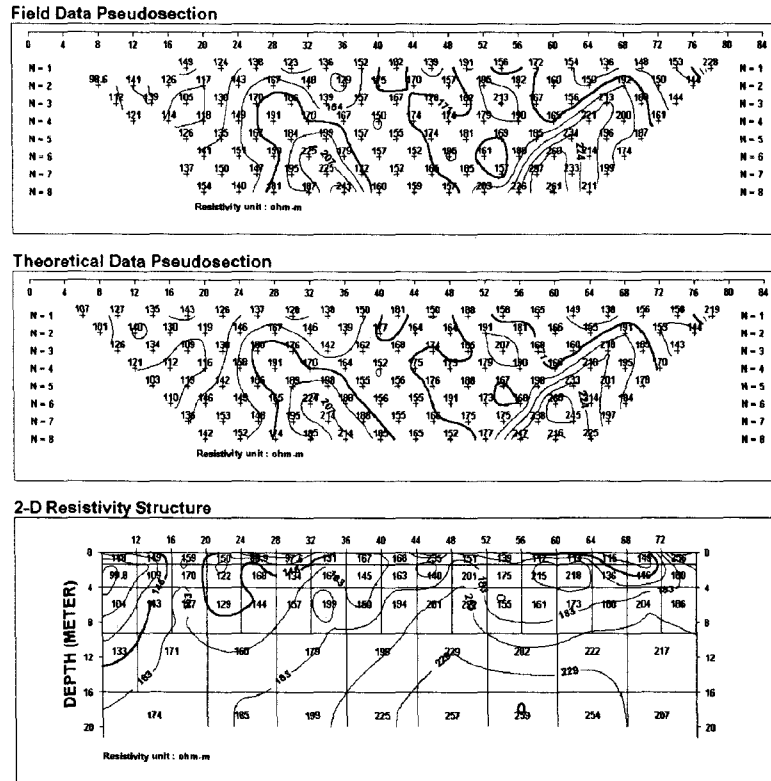


그림 17 측선 YP-9의 전기비저항 탐사 결과

며 매립지내의 저 비저항 발달이 오염의 영향이라는 것을 추정할 수 있었다.

이러한 결과를 토대로 자료를 취합하여 지구통계학적(geostatistic)인 방법 중 Krigging 기법을 이용하여 심도별로 오염의 분포를 나타내어 보았다.

그림 14는 심도 5m 와 10m 일때의 수평적인 전기비저항 분포를 나타내고 있다. 심도 5m에서의 비저항 분포는 주로 쓰레기 매립지에 집중되어 있으며 심도 10m에서의 비저항 분포를 비교해서 살펴보면 오염이 도로쪽과 양평 방향으로 이동되어 있음을 알 수 있다. 또한 심도 10m에서 도로 반대쪽 부분의 비저항이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이 자료로부터 매립된 쓰레기 내부에서 낮은 저 비저항을 띄게 만드는 오염원이 쓰레기 매립지의 중심부로 또한 양평쪽으로 이동되고 있다는 사실을 알 수 있다.

그림 15에 심도 15m와 20m의 수평적인 전기비저항 분포를 나타내고 있다. 심도 15m와 심도 20m의 수평적인 전기비저항 분포를 살펴보면 저 비저항대는 측선 YP-2와 측선 YP-3 하부에 집중되어 있다. 또한 기반암의 영향으로 심도가 깊어질수록 저 비저항대의 분포가 적어지고 있다. 그림 15는 쓰레기 매립 깊이 10m 이하를 기반암으로 가정하면 기반암 내에서 깊이에 따른 오염의 분포를 명확히 알 수 있는 것으로 포켓 형태로 오염이 쓰레기 매립지 중심부에 모여 있음을 알 수 있다.

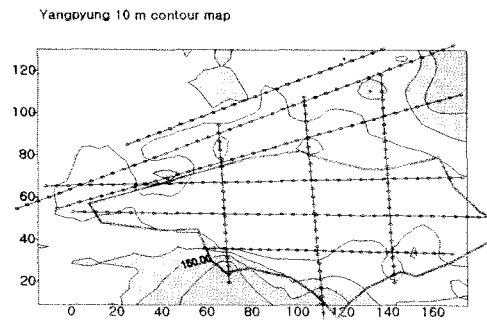
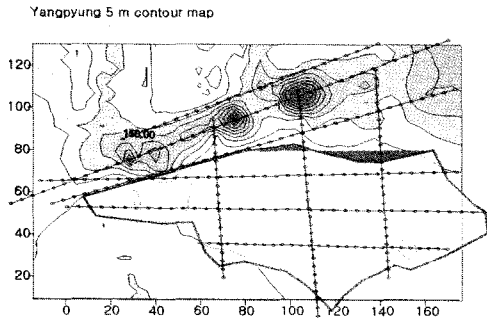


그림 18 심도 5m 및 10m에서의 전기비저항 분포도

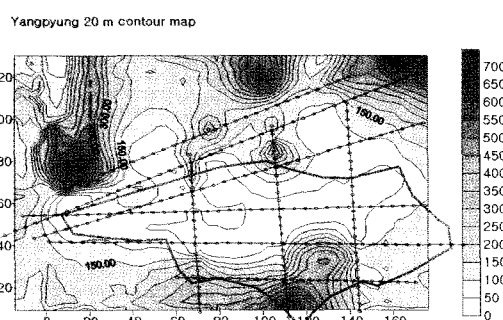
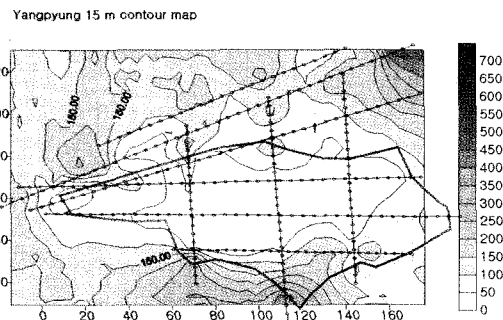


그림 19 심도 15m 및 20m에서의 전기비저항 분포도

이와 같은 사실을 각 심도에 따른 비저항 분포의 3차원 영상에서 다시 확인할 수 있다. 그림 16은 심도 5m에서의 전기비저항 분포 3차원 영상을 나타내고 있다. 평면 좌표 값은 그림 14와 그림 15와 같으며 z축은 비저항 값을 나타내고 있다. x 방향으로 축점 50에서 170m까지 그리고 y 방향으로 축점 0 ~ 70m 사이에 저 비저항대가 주로 밀집되어 있으며 도로에 해당되는 부분은 고비저항으로 막혀있어 지표 근처의 오염은 쓰레기 매립지 중심부로 주로 이동하고 있다는 사실을 알 수 있다. 그림 17은 심도 10m에서의 전기비저항 분포 3차원 영상을 나타내고 있으며 비저항 분포를 살펴보면 쓰레기 매립지 내부의 오염은 양평 방향으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 쓰레기 매립지 심도 10m를 기반암 분포와 거의

일치한다고 보면 이상의 사실에서 매립지 내부의 오염은 쓰레기 매립지 내부로 이동한 후 심도 10m 부근의 기반암을 따라 양평 방향으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 그림 18은 심도 15m에서의 전기비저항 분포 3차원 영상을 나타내고 있는데, 이 심도는 기반암 천부로 오염의 침투 형태를 알 수 있다. 30 Ωm 이내의 오염을 나타내는 저 비저항대는 주로 쓰레기 매립지 중심부에 집중되어 있다. 따라서 기반암을 내부에서의 오염은 쓰레기 매립지를 많이 벗어나지 않고 거의 쓰레기 매립지내에 머무르는 것으로 판단된다. 그림 19는 심도 20m에서의 전기비저항 분포 3차원 영상을 나타내고 있다. 심도 15m에서의 비저항 분포와 비교하면 쓰레기 매립지 경계부분에 고비저항으로 둘러싸여 있으며 그림 18과 비교해보면 저 비저항대의 규모도 작아지고 역시 쓰레기 매립지의 중심부에 집중되어 포켓 형태의 양상을 띄고 있음을 알 수 있다.

이상의 자료로부터 종합을 해보면 쓰레기 매립지 내부의 오염은 기반암을 따라 양평쪽

으로 이동하고 있으며 일부는 기반암대로 침투하여 포켓 형태로 수직적으로 분포하고 있으며 침투 깊이는 심도 20m 정도에 이르고 있으며 전기비저항 탐사로 오염의 분포 및 이동 경로를 충분히 조사할 수 있을 것으로 판단된다.

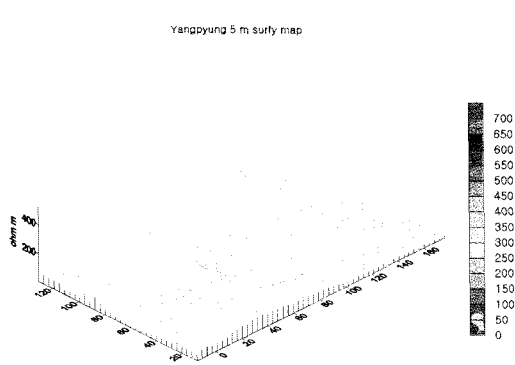


그림 16 심도 5m에서의 전기비저항 3차원 영상

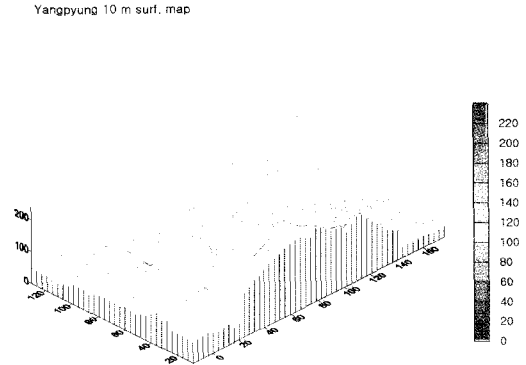


그림 17 심도 10m에서의 전기비저항 3차원 영상

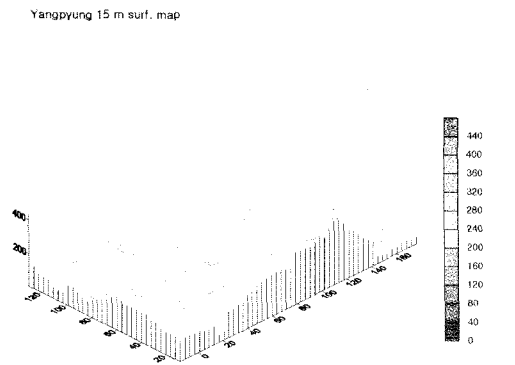


그림 18 심도 15m에서의 전기비저항 3차원 영상

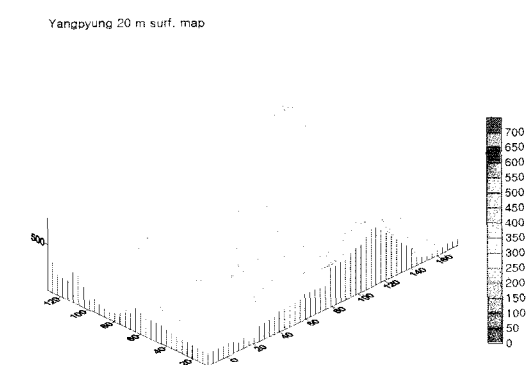


그림 19 심도 20m에서의 전기비저항 3차원 영상

5. 결 론

전기비저항 탐사를 이용하여 양평 쓰레기 매립장의 오염의 분포 및 전파 경로를 조사하기 위한 이상의 결과를 종합하면 다음과 같다.

일반적으로 전기 전도도가 높은 쓰레기 매립지의 오염의 특성으로 인하여 매립지에 대한 오염의 분포를 조사하기 위한 방법으로 전기비저항 탐사의 적용성이 아주 뛰어난 것을 알 수 있었고 또 이를 통하여 오염의 수직·수평적인 분포 및 오염의 전파경로 또한 추정 가능하였다. 전기비저항 탐사는 오염 토양 복원 기술을 적용하는 기초 기술로 사용할 수 있고 오염이 예상되는 지반에 대한 사전 조사 방법으로 사용할 수 있다. 전기비저항 탐사법을 이용하여 다음과 같은 여러 가지 분야에 적용될 수 있다고 판단된다.

- 개발 대상 부지의 오염 여부 파악
- 불량 매립이 의심되는 지반에 대한 사전조사를 통한 환경 특성 파악
- 오염 토양 복원 기술 적용에 필요한 사전조사
- 폐광산 주변의 중금속 오염정도 파악
- 방파제는 토양 제체를 통한 해수의 누수 탐지