

제주도 쓰레기매립장 침출수 조사를 위한 전기 및 소형루프 전자탐사의 적용

송성호¹⁾ · 용환호¹⁾ · 안중기²⁾ · 김기표²⁾

Application of Electrical and Small-Loop EM survey to the Identification of the Leachate at a Waste Landfill in Jeju Island

Sung-Ho Song¹⁾, Hwan-Ho Yong¹⁾, Jung-Gi An²⁾ and Gee-Pyo Kim²⁾

요약 : 쓰레기매립장의 침출수 누출 탐지를 위한 물리탐사법은 침출수의 전기전도도를 대상으로 한 전기탐사법이 주로 적용되어 왔다. 이 연구에서는 제주도에 위치한 비위생매립지를 대상으로 전기비저항 탐사와 더불어 매립장 경계부와 토양층을 통한 침출수 누출 영역을 효율적으로 규명하기 위하여 다중주파수를 이용한 소형루프 전자탐사를 수행하였으며, 아울러 오염지역의 천부 지하수 유동 방향을 추정하기 위하여 침출수의 유동에 의해 발생될 수 있는 자연전위를 모니터링 하였다. 전기비저항 탐사 및 자연전위 모니터링 결과 매립지 주변을 통한 침출수의 누출 가능성은 거의 없는 것으로 나타났으며, 이는 주변 하천에서 정기적으로 실시한 수질 분석 결과와 일치된다. 또한 소형루프 전자탐사 자료에 대하여 공간 필터링 및 1차원 역산법을 적용한 결과 매립장 경계부의 위치 및 매립장 내부의 심도별 매립물에 의한 저비저항 이상대를 효과적으로 도출 할 수 있었다.

주요어 : 쓰레기매립장, 침출수, 제주도, 전기비저항 탐사, 자연전위 모니터링, 소형루프 전자탐사

Abstract : Among the various geophysical approaches to identify the leakage of leachate with conductivity variation, conventional electrical resistivity survey has been mainly used at waste landfill. We adopted small-loop electromagnetic (EM) survey using multi-frequencies in parallel with electrical resistivity survey to delineate the leakage of leachate through the shallow soil layer at a waste landfill in Jeju Island, and also with self-potential monitoring to detect the streaming potential produced by the movement of leachate. There were no evidences of leakage from waste landfill according to the results of the electrical resistivity survey and SP monitoring, and it was also true from the results of water quality analysis at stream around waste landfill periodically. On the other hand, the results of one-dimensional inversion of spatially-filtered small-loop EM survey data showed the anomalous zone of low resistivity with depth both around and inner waste landfill.

Keywords : waste landfill, leachate, Jeju Island, electrical resistivity survey, self-potential monitoring, small-loop electromagnetic survey

서 론

지금까지 쓰레기매립장 침출수 탐지를 위한 물리탐사법은 전기비저항 탐사가 주로 적용(이기화의, 1996)되어 왔지만, Atekwana *et al.*(2000)이 제시한 유류오염 지역의 불포화대에서 미생물에 의한 생분해에 의해 고비저항의 오염물질이 주변의 모래층에 비해 전기전도도가 높아진다는 연구결과는 단일 탐사법만으로는 오염영역에 대한 정확한 규명이 어려울 수 있음을 말해준다. 특히 체계적인 매립이 이루어지지 않은 비위생 매립지의 경우는 침출수의 누출범위 영역 규명이 중요하지만, 시료 채취 및 분석 방법은 경제적인 측면과 2차적인 오염 문제를 발생시킬 수 있기 때문에 효과적인 물리탐사법의 적용이

필수적이다. 침출수 누출 영역 탐지에 일반적으로 적용되는 전기비저항 탐사는 전극의 지표 접지 및 긴 전선의 설치 등 상대적으로 많은 시간이 필요하므로 광범위한 지역의 전기비저항 변화를 효율적으로 조사하는데 제한이 있다. 일반적으로 매립장의 침출수는 천부의 토양층을 따라 확산되는 경우가 많으므로 최근에는 오염영역의 효과적 조사를 위하여 다중주파수의 소형루프 전자탐사를 이용하여 지표 하부 약 10m 이내의 토양층에 대한 전기전도성 침출수의 분포 범위를 규명하는 등 현장 적용성을 검토한 연구 결과가 제시된 바 있다(송윤호와 정승환, 2002).

이 연구에서는 제주도에 위치한 비위생 매립장의 매립지 경계부와 침출수 누출 영역 탐지를 위하여 전기비저항 탐사와

*2003년 8월 12일 접수

1) 농업기반공사 농어촌연구원(Rural Research Institute, KARICO)

2) 농업기반공사 제주도본부(Jeju-do Office, KARICO)

더불어 소형루프 방식을 이용한 고해상도의 전자탐사를 이용하여 천부의 전기비저항의 변화를 탐사하였으며, 최근 송성호 외(2002)에 의해 오염현장에서 효과적으로 적용되고 있는 자연전위 방법을 병행하여 천부 지하수의 유동방향을 추정하였다.

지형 및 수리지질

연구지역인 비위생 매립장은 제주시 남쪽의 표고 165~205 m에 위치하고 있고, 매립장의 서쪽으로는 어승생에서 발원한 도근천이 지나고 있으며, 동쪽으로는 하천 연장이 짧은 원장내, 마두천, 시수천 등이 형성되어 있다. 이러한 하천들은 제주도의 다른 하천과 마찬가지로 평상시에는 하천의 유출수가 거의 없는 건천으로 강수가 집중되는 경우 일시적으로 하천유출이 발생하는 특징이 있다(Fig. 1).

매립지 주변의 지표지질은 저투수성의 장석현무암 II이 분포하고 있으며, 상류부에는 반상휘석현무암 I과 장석현무암 IV이 분포되어 있다(농업진흥공사, 1971). 매립장 주변에 기 개발된 관정의 주상도에 의하면 상부는 저투수성의 현무암층이 3~30 m 두께로 구성되어 있으며, 지하수의 주 유동층인 화산쇄설층이 1~5 m의 두께로 협재되어 있다(Fig. 2(a)). Fig. 2(b)는 매립지 주변 공공관정의 지질주상도를 이용하여 작성한 지질단면도와 불포화대에 대한 투수성 분포도로, 매립지 북동쪽에 위치한 F-434 관정은 지하 약 173 m까지 주로 비현정질현무암과 장석현무암 계열이 두껍게 분포하며, 감람석현무암, 사

력층 및 토사가 협재되어 나타나는데, 특히 투수성이 양호한 사력층의 경우 상부 약 50 m까지와 약 100 m 하부에 나타나고 있다. D-273 관정은 지하 약 100 m까지 비현정질현무암이 분포하고 있으며, 하부에는 사력층 및 파쇄대가 발달하는 현무암이 분포하고 있다. 매립장 하부의 도근천변의 D-71 관정의 경우는 투수성이 상대적으로 양호한 화산쇄설층과 파쇄대의 발달이 용이하며, 이러한 경향은 D-214에서도 나타남에 따라 하류부의 관정에서 상대적으로 수직방향의 지하수 흐름이 우세할 것으로 판단된다.

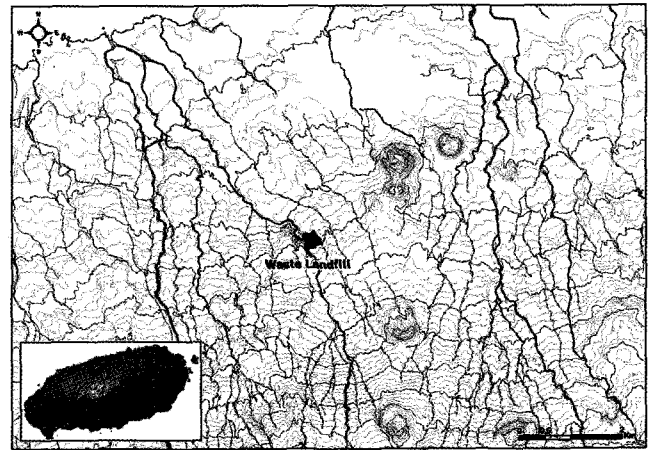


Fig. 1. Location map of the waste landfill at the northern part of the Jeju Island.

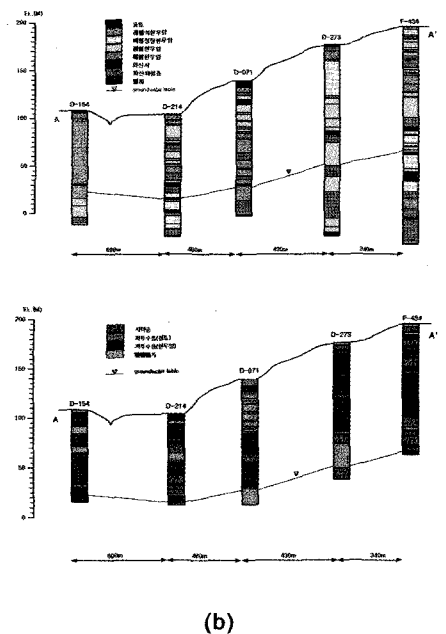
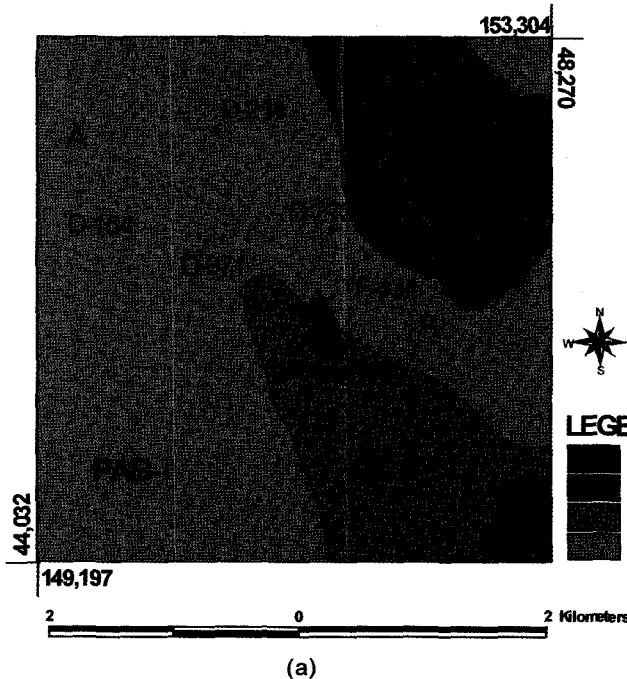


Fig. 2. Geological map (a) and geological section (b) using logging data at public wells near the waste landfill. (Abbr., PAB-I: Porphyritic Augite Basalt I, FB-I: Feldspar basalt I, FB-II: Feldspar basalt II, C: Cinder cone)

매립지 현황

본 매립지는 1980년부터 약 12년 동안 운영되었으며, 매립물의 성상은 연탄재 26.7%, 음식쓰레기 19.7%, 종이류 18.3%, 목재류 14.5%, 금속 및 초자류 7.9% 및 기타 12.9%로 구성되어 있으며, 평균 매립고는 약 25 m이다(제주시, 2000). 침출수 집수정에서 채취된 시료의 수질 분석 결과에 따르면 일반적인 침출수 농도에 비하여 상대적으로 저농도를 나타내는 것으로 나타났는데, 이는 고농도의 침출수와 우수가 혼합되어 이동하면서 생물학적 분해와 매립된 연탄재 등에 의한 흡착에 의한 것으로 분석되었다. 또한 최근 지표수 차수막과 수직 차수벽을 설치하기 이전의 침출수 발생량을 합리식, 경험식 및 HELP 모델을 이용하여 산정한 결과 일평균 약 70 m³/day로 추정된 바 있다.

물리탐사

이 연구의 목적은 비위생 매립지 주변의 수리지질 특성을 규명하여 매립 이후 지금까지의 오염 영역규명 및 향후 장기적인 오염 모니터링 대책 수립을 위한 기초자료 제공에 있다. 현장 조사는 침출수의 물리적인 특성을 대표하는 전기전도도 변동양상을 규명하기 위해 전기비저항 탐사와 소형루프 전자탐사를 수행하였으며, 이와 병행하여 침출수의 유동과 밀접한 관련이 있는 지하수 흐름에 의한 유동전위를 측정하는 자연전위 모니터링을 수행하였다.

전기비저항 탐사

일반적인 기반암의 전기비저항은 수천~수만 ohm-m인 반면 천부 표토층의 경우는 수백~수천 ohm-m으로 상대적으로 낮은 값을 갖는다. 특히 매립장 주변의 표토층의 경우는 지하수의 영향 뿐만 아니라 매립장 침출수의 경우 배경값과 비교하여 전기비저항의 차이가 크게 나타날 수 있으므로 오염원 및 오염 경로를 추적하는데 전기비저항 탐사를 효과적으로 적용할 수 있다.

일반적으로 쓰레기 매립장 주변의 수리지질 구조 파악이나 매립장에서 발생하는 침출수의 오염 상황에 대한 정밀 조사를 위한 전극배열법은 수평분해능이 가장 탁월한 쌍극자-쌍극자 배열법이 가장 적합하지만, 전극의 접지 불량 등에 의해 송신전류의 양이 제한되면 전극전개수가 증가함에 따라 측정 전위가 급격하게 감소하게 되어 신호대 잡음비가 현저히 감소하게 된다(김정호외, 2001). 이에 따라 이 연구에서는 신호대 잡음비가 높으나 수평 분해능이 가장 낮은 단극배열법을 변형하여, 분해능을 향상시킨 변형된 단극배열(modified pole-pole array)법을 선택하였다. 탐사에 이용된 장비는 미국 AGI사의 Sting R1과 스웨덴 ABEM사의 SAS 1000 시스템이다.

소형루프 전자탐사

전자탐사는 지표 또는 시추공 내에서 전기장 또는 자기장을 측정하여 지하 지질구조의 위치, 크기 및 물리적 성질 등에 대한 정보를 밝혀내는 물리탐사법으로, 송신원의 유무, 전자기장의 측정 방식, 탐사대상 심도 등에 따라 매우 다양한 방법이 개발되어 적용되고 있다. 일반적으로 전자탐사에서의 유도전류는 지하 매질의 전기전도도의 변화에 의해 크게 영향을 받기 때문에 이 연구지역의 매립장 침출수와 같은 전기전도도가 상대적으로 높은 전도성 매립물의 탐지에 상대적으로 유리한 것으로 알려져 있다(철순지 외, 2002).

이번 연구에서 적용한 소형루프 전자탐사는 침출수 오염원에 의한 천부(<10 m) 전기비저항 변화양상을 고찰하기 위한 목적으로 수행되었다. 탐사장비는 광대역의 이동 송수신 전자탐사 장비인 미국 Geophex사의 GEM-2를 이용하였다. 획득 자료는 2차장의 동상성분(in phase) 및 이상성분(out of phase: quadrature)을 1차장으로 정규화시킨 2차장 크기(ppm 단위) 및 겐보기 전기전도도이며, 이때 겐보기 전기전도도는 겐보기 비저항으로 변환하여 사용이 가능하다(송윤호 외, 2001). 그렇지만 겐보기 전기전도도는 지하하부에 존재하는 모든 이상체에 대한 영향을 반영하는 것이므로 이상체의 위치나 전기전도도 분포 등 정량적 정보를 도출하기 위해서는 적절한 자료처리 및 역산법의 적용이 필수적이다. 따라서 이번 현장 조사 결과는 GEM-2를 이용한 자료에서 겐보기 비저항 계산 및 1차원 역산을 수행하여 지표 하부의 심도별 전기전도도 분포를 해석하였다.

자연전위 탐사

일반적으로 관측되는 자연전위는 보통 수 십 mV 정도로 양(+) 또는 음(-)의 값을 가지는 반면 오염이 심각한 지역의 경우는 큰 값이 관측될 수 있으며, 지하수의 유동에 의한 전기역학적인 요인과 밀접한 관련이 있다(송성호와 배광욱, 2002).

자연전위법은 지열, 지진 등 지구구조적인 운동과 관련된 연구 및 지질공학적 목적에 적용된 바 있다(Corwin and Butler, 1989). 국내에서는 전기역학적 효과를 고려한 단층의 파쇄대나 대수층 규명 목적 탐사와 유동전위를 고찰함으로써 각종 양수 시험, 저수지/방조제의 누수 부위 탐사에 적용된 사례 등이 있으며(정현기외, 1989; 권병두외, 1993; 조진동외, 1996; 송성호외, 2000; 송성호와 용환호, 2003), 최근에는 오염영역 규명에도 적용된 바 있다(송성호외, 2002).

탐사결과 및 해석

여기서는 앞서 제시된 각종 물리탐사 기술의 적용 결과를 비위생 매립지 주변의 수리지질구조와 관련시켜 복합적으로 해석하였으며, 매립장 주변에서 발생한 침출수의 누출 영역을 규명하기 위하여 천부에 대한 고해상도 탐사 결과를 종합적으

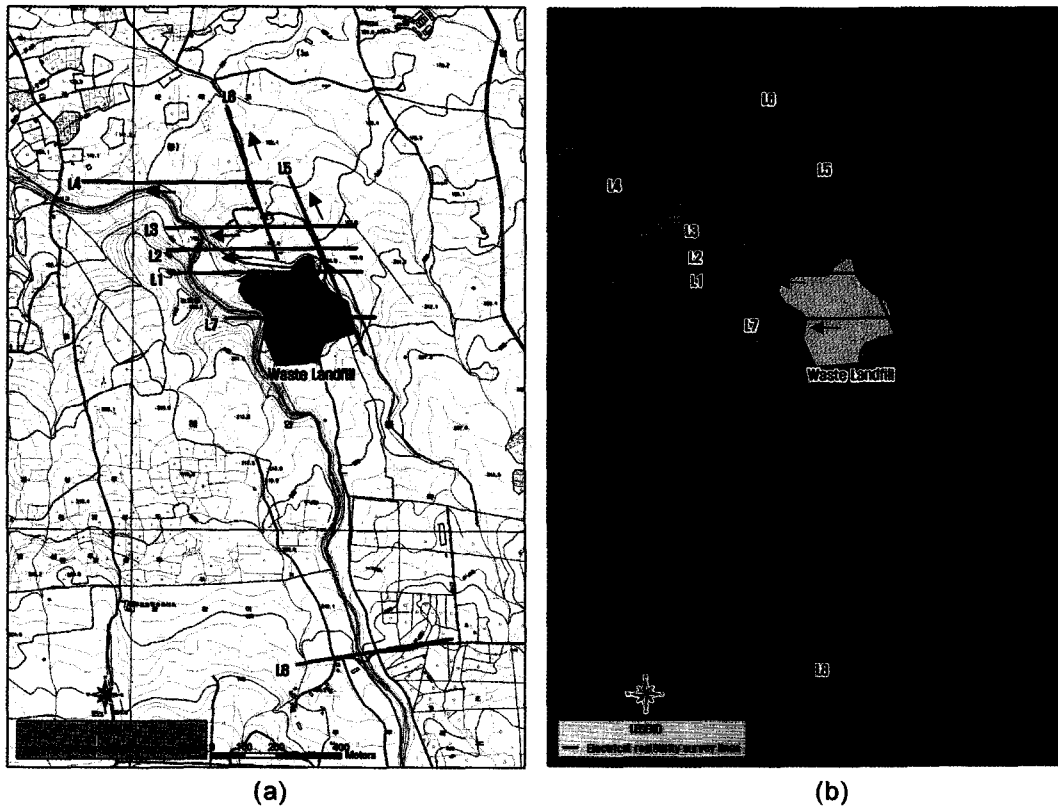


Fig. 3. Location (a) and hillshade (b) map of the electrical resistivity survey lines. Each arrows mean the direction of survey.

로 분석하였다.

전기비저항 탐사

전기비저항 탐사는 조사지역 주변의 전체적인 수리지질구조와 오염 경로 파악을 위하여 전극간격을 20 m로 하여, 지표로부터 지하수 자연수위까지의 깊이인 120 m를 포함하도록 설정하였다. 탐사는 신호대 잡음을 향상시키는 배열법으로 변형된 단극배열법과 슬럼버저 배열법을 병행하여, 매립지를 중심으로 상류부(L8), 매립지 내부(L7), 매립지 하류 경계부 1측

선(L1) 및 매립지 하부 3측선(L2, L3, L4)을 지형경사와 수평하게 배열하였으며, 2개의 측선(L5, L6)을 매립지 하류부의 수평 배열 측선들과 수직되게 배열하여 탐사를 수행하였다 (Fig. 3).

Fig. 4(a)는 조사현장의 전반적인 수리지질 구조를 파악하기 위하여 수행된 변형된 단극배열 전기비저항 탐사에 의한 2차원 전기비저항 분포영상으로, 매립지 내부인 L-7 측선에 대한 단면도에서는 약 40 ohm-m 이하의 저비저항대가 지표로부터 약 30 m 두께로 나타나는데, 이는 매립물의 두께와 일치되며

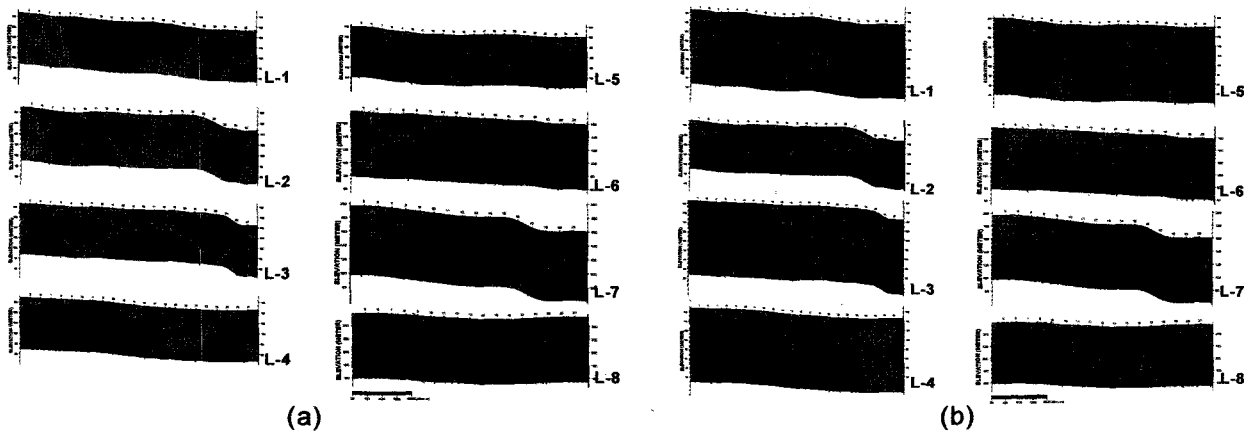


Fig. 4. The inversion results of both modified pole-pole array (a) and Schlumberger array (b) electrical resistivity survey at each lines.

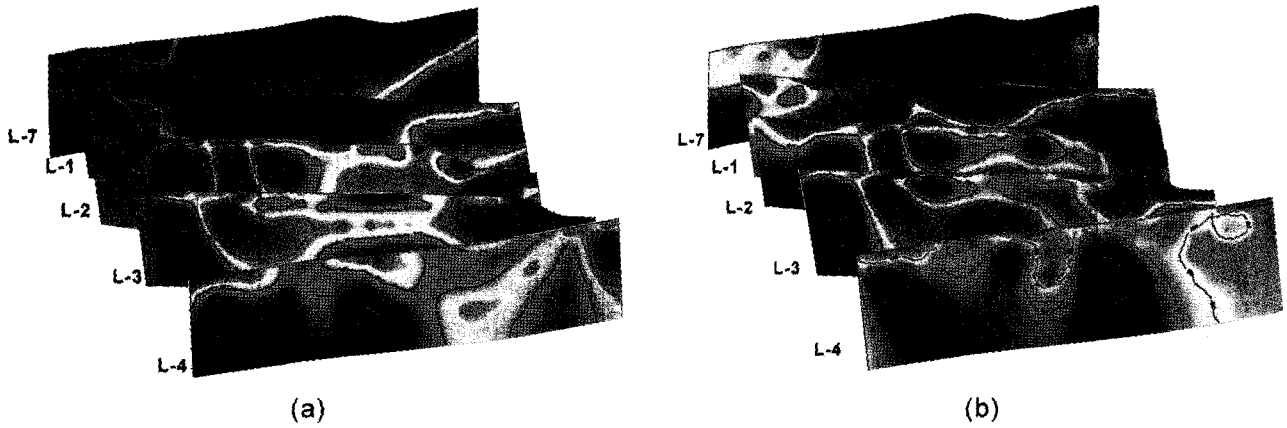


Fig. 5. The fence diagram with inversion results of both modified pole-pole array (a) and Schlumberger array (b) electrical resistivity survey at each lines.

이 지역의 경우 지하수위가 지표 하 약 120 m 깊이임을 감안 할 때, 상부에서 나타나는 40 ohm-m 내외의 낮은 비저항은 침출수에 의한 매질의 전기전도도 증가의 영향으로 판단된다. 매립지 하류 경계부에 대한 L-1 측선의 경우는 40~80 ohm-m의 낮은 비저항 구간이 매립물 주변에 나타나는데, 이는 매립지를 관통하는 구간과 일치된다. L-1 측선으로부터 약 50 m 하류부에 평행하게 배열한 L-2와 L-3 측선에서는 이러한 저비저항대가 두 개로 나뉘어 지는데, 특히 21~26 측정 주변은 계곡부에 위치한 측정점으로 지표수에 의한 포화의 영향으로 판단되지만,

8~11 측정 주변은 지형적인 영향이 나타나지 않음에 따라 지표하의 수리지질 구조에 대한 추가적인 정밀 조사가 요구된다. 그러나 L-3 측선으로부터 약 100 m 이상 하류부에 대한 L-4 측선의 결과에서는 상부에서 나타난 뚜렷한 저비저항대의 연장성이 나타나지 않음에 따라 매립물에 의한 직접적인 영향은 없는 것으로 판단된다. 이상과 같은 수평적인 측선들과 수직방향으로 배열한 L-5와 L-6 측선의 탐사 결과에 의하면 매립지 주변에 위치한 두 측선의 시작점 주변에서 40 ohm-m 내외의 낮은 비저항대가 나타남에 따라 수평적으로 배열된 L-2와 L-

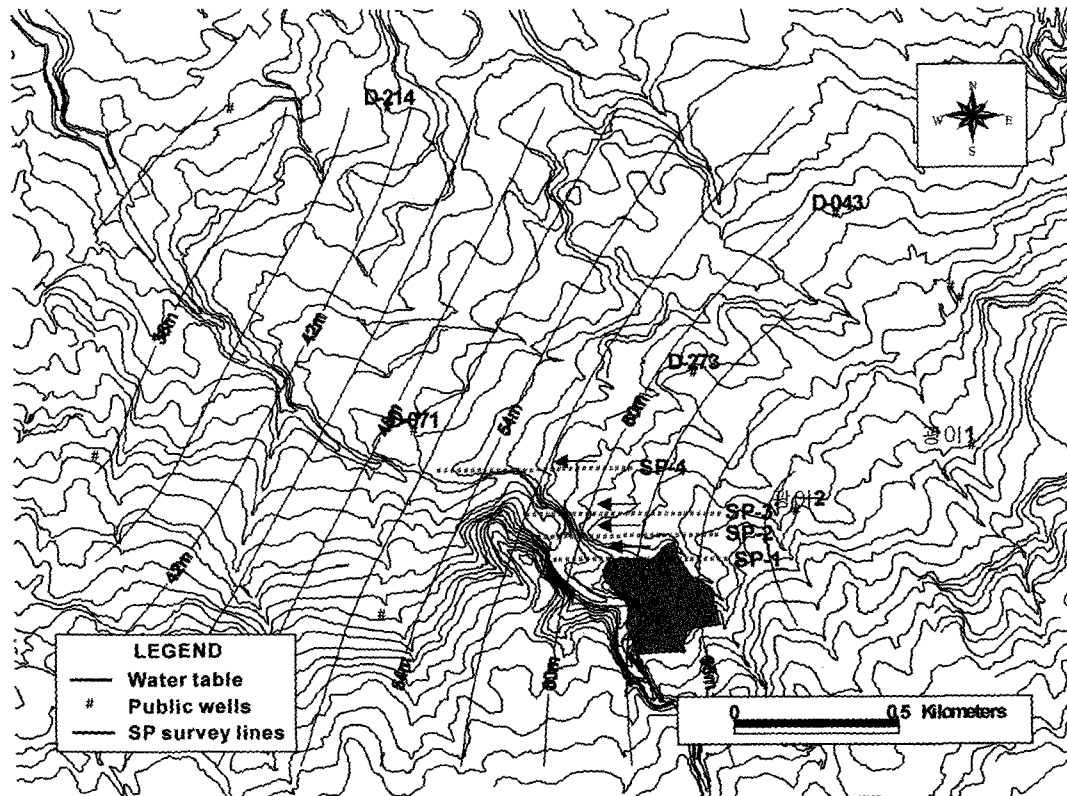


Fig. 6. Location map of self-potential survey with groundwater level with 20 m spacing.

3 측선에서 해석된 결과가 타당함을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 변형된 단극배열의 동일 측선에 대하여 전극배열법을 슬림버저 배열로 바꾸어 측정된 결과를 해석한 2차원 단면으로 앞서 변형된 단극배열의 탐사 결과와 유사하지만, 이 배열법은 지층이 수평적임을 가정하기 때문에 L-7 측선의 해석 결과에서는 40 ohm-m 이하의 저비저항대가 지하로 확장되어 나타난다.

Fig. 5는 매립장 주변 전체에 대한 수평적인 전기비저항의 변화와 수평적인 이상대의 공간적인 연관성을 효과적으로 파악하고자 fence diagram으로 도시한 결과로, 매립장 내부와 하류 경계부인 L-7과 L-1 측선에서의 약 40 ohm-m 이하의 저비저항대가 하류부 측선인 L-2와 L-3 측선에서 두 갈래로 나누어지는 영상이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 특히 모식도 우측에 나타난 이상대는 계곡의 방향과 일치되며, 왼쪽으로 나타나는 이상대는 도로를 따라 발달되는 형태를 보여준다. 이러한 국부적인 이상대 중 계곡부의 경우는 지표수의 흐름과 연관되어 해석이 가능하지만, 반대쪽에 나타나는 이상대의 경우는 지형 및 수리지질 구조로 설명이 불가능함에 따라 향후 시추조사 등의 추가적인 조사가 필요하다고 판단된다.

자연전위 탐사

대부분 오염지역의 경우 오염영역 및 향후의 오염의 예상 진행상황은 수리지질구조와 관련하여 지하수의 분포 및 유동양상과 밀접한 관계가 있으므로 지하수위 등의 지하수 유동현상 파악이 매우 중요하다. 조사지역 주변에 위치한 관정에서 2002년도 9월에 측정된 지하수위를 기초로 작성된 등수위선도를 Fig. 6에 도시하였다. 전반적으로 북서쪽으로의 지하수 유동방향이 나타남을 알 수 있는데, 이는 지형 구배와 일치된다. 지금까지 지하수 유동과 관련된 연구결과에서 수리지질구조에 의해 발생하는 자연전위의 이상 구간은 주변의 배경 자연전위 변화와 다르게 나타날 수 있으므로(송성호와 배광옥, 2002), 2차원 전기비저항 탐사의 측선과 동일한 측선에 대하여 각각 약 1일 간의 자연전위 모니터링을 실시하였다.

Fig. 7은 조사지구에서 얻어진 자연전위 자료를 기준전위에 대한 총 전위로 나타낸 그래프로, 매립지 경계부인 SP-1 측선의 경우는 각 측점에서의 자연전위값의 변화가 지그재그(Zig-zag) 형태로 나타나는데, 이러한 결과는 매립지에 묻어진 쓰레기의 다양한 성상에 의한 영향이 자연전위값에 반영된 것으로 판단된다. 매립지 하류부에 SP-1 측선과 평행하게 배열한 SP-

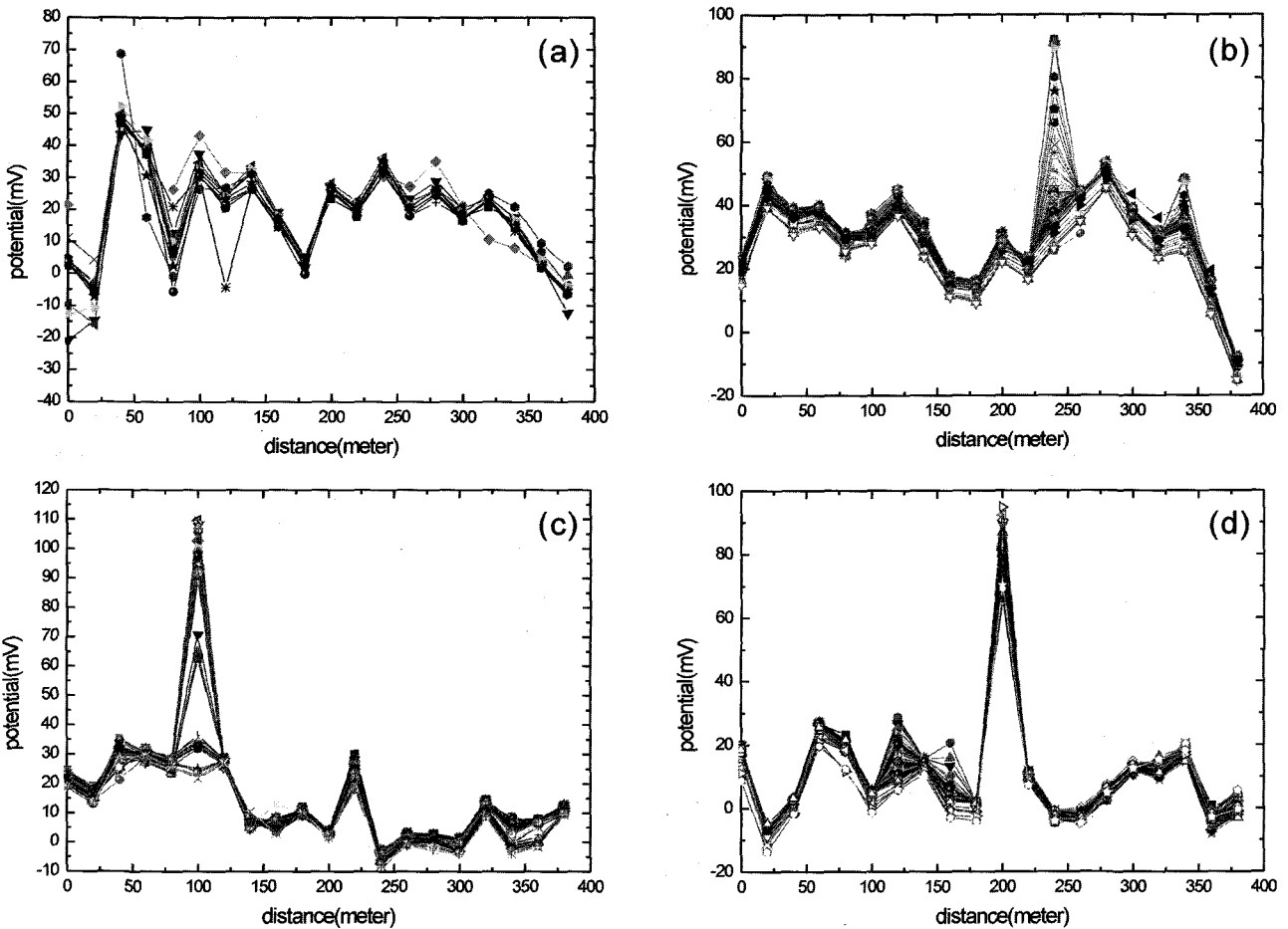


Fig. 7. SP profiles at each survey lines with total field of SP. SP data at each lines were monitored during 24 hours. (a) SP-1 (b) SP-2 (c) SP-3 (d) SP-4

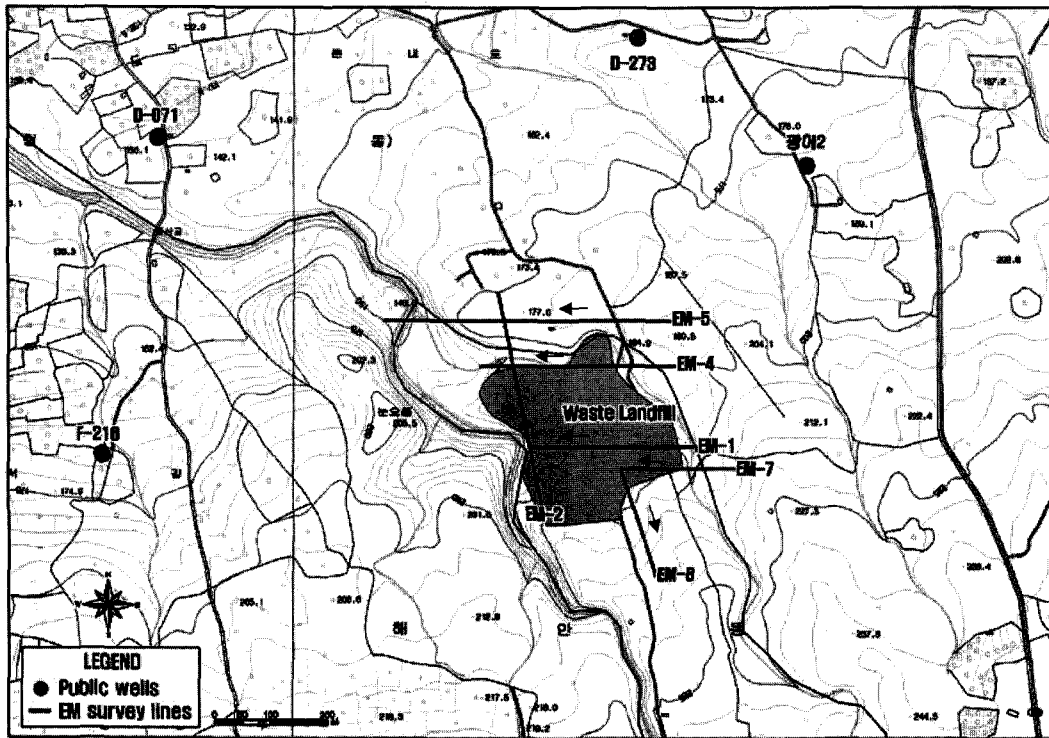


Fig. 8. Location map of the small-loop electromagnetic survey lines with 2 m spacing. Each arrows mean the direction of survey.

2와 SP-3 축선의 경우는 전반적으로 10~50 mV 범위 내에서 자연전위값의 변화가 나타나지만, 축선 우측부인 계곡부 근처에서 음 (-)의 이상대가 각각 나타나므로 이는 계곡부에 형성된 지하수의 흐름에 의해 주변지역에 비해 지하수의 유동 현상이 뚜렷하게 나타나는 영향으로 판단된다. 이 밖에 매립지로부터 멀리 떨어진 SP-4 축선의 경우는 뚜렷한 경향을 보여주지 않고, 200 m 지점에서 양 (+)의 이상치가 나타나는데, 이는 전곡 주변에 설치된 철재 울타리의 영향으로 나타나는 잡음에 의한 현상으로 판단된다.

소형루프 전자탐사

일반적으로 매립장의 침출수는 천부의 토양층을 따라 확산되는 경우가 많으므로 다중주파수의 소형루프 전자탐사를 적용하여 침출수에 의한 천부(<10 m) 오염영역을 파악하고자 수평루프를 이용한 고해상도 전자탐사를 수행하였다. 탐사 축선은 매립지를 중심으로 상류부와 하류부 및 경계부를 대상으로 배열하여 침출수의 유출 가능성을 중점적으로 파악코자 하였다(Fig. 8). 전자탐사의 경우 전자기파의 사용주파수와 지하 매질의 전기비저항 값에 따라 표피심도(skin depth)가 달라지지만, 이를 이용하는 경우 고주파수는 천부의 반응을, 저주파수는 상대적으로 심부의 반응을 나타내므로, 다중주파수를 이용하는 경우 지하의 심도별 전기전도도의 변화에 대한 정보를 파악할 수 있다.

연구지역에 대한 전자탐사 자료는 각 축선별로 10개의 주파

수를 대상으로 각 주파수별로 이상성분을 이용하였는데, 이때 현장취득 자료 중 지표 부근의 잡음에 의해 공간적으로 발생되는 국부적인 이상치를 제거하기 위하여 median 필터링을 수행하였다. 또한 심도별로 정확한 전기전도도의 분포를 파악하기 위하여 상대적으로 안정된 측정값을 나타내는 7개의 주파수 대역을 이용한 1차원 역산을 수행하였다.

Fig. 9는 각 축선별로 이상성분의 결과를 도시한 그래프로 고주파수 대역인 20,010 Hz의 반응이 가장 높은 반면 저주파수 대역인 330 Hz의 반응이 가장 낮게 나타났다. 이들 축선 중에서 매립지 내부 구간에서는 이상성분이 상대적으로 높게 나타나는데, 이 중 매립지를 동서방향으로 관통하는 축선인 EM-1, EM-7, EM-8에서는 매립에 의해 표고변화가 없는 내부 축점의 경우 이상성분이 공간적으로 급격한 변화가 없는 안정된 탐사 결과가 얻어졌다. 그러나 본 매립장은 남북방향으로 계단식 형태로 매립지를 조성하였기 때문에, EM-2 축선의 경우는 매립지 내부에서도 수평적인 변화폭이 상대적으로 크게 나타났다. 매립장 내부의 경우는 전체적으로 고주파수 대역인 14,850 Hz와 20,010 Hz에서 상대적으로 안정된 결과가 나타나는데, 이러한 결과는 매립물 상부에 토사 및 자갈 등의 복토층과 최상부의 피복재가 매립장 전체에 균일하게 덮여있는 영향을 반영한 것으로 판단된다.

Fig. 10은 각 축선별로 이상성분 자료에 공간 필터링을 적용한 후 겉보기 비저항을 구한 결과로, 매립장 내부의 값은 전체적으로 수십 ohm-m 이하의 저비저항으로 나타나며, 이는 앞

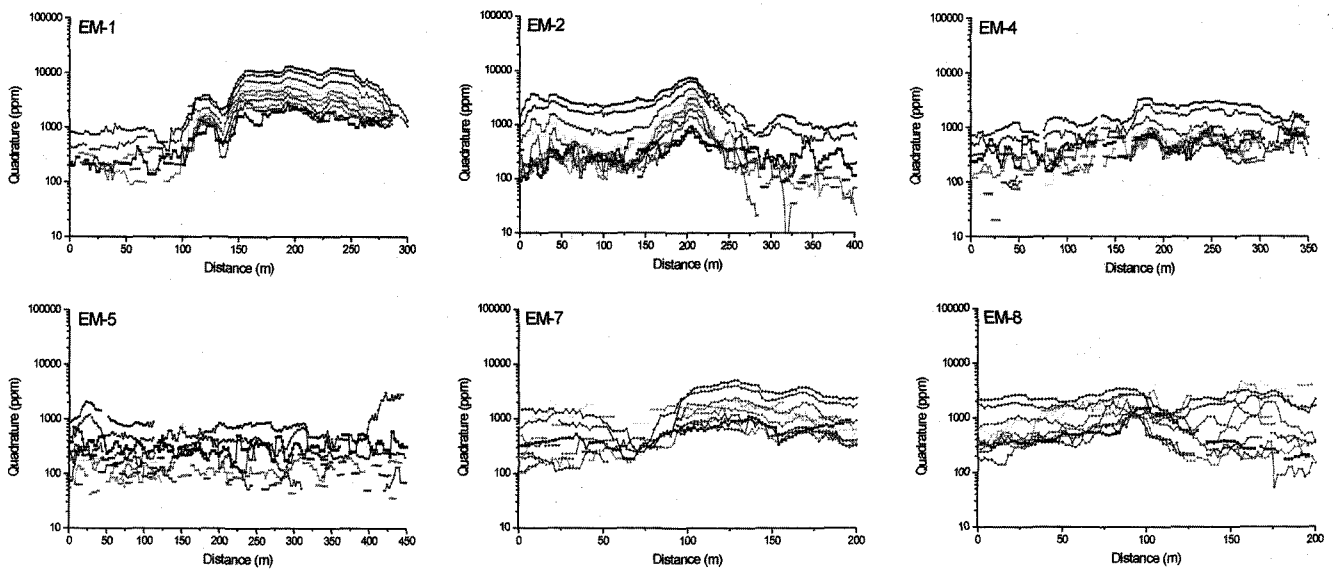


Fig. 9. Profiles of quadrature components using spatial filtering at each EM survey lines.

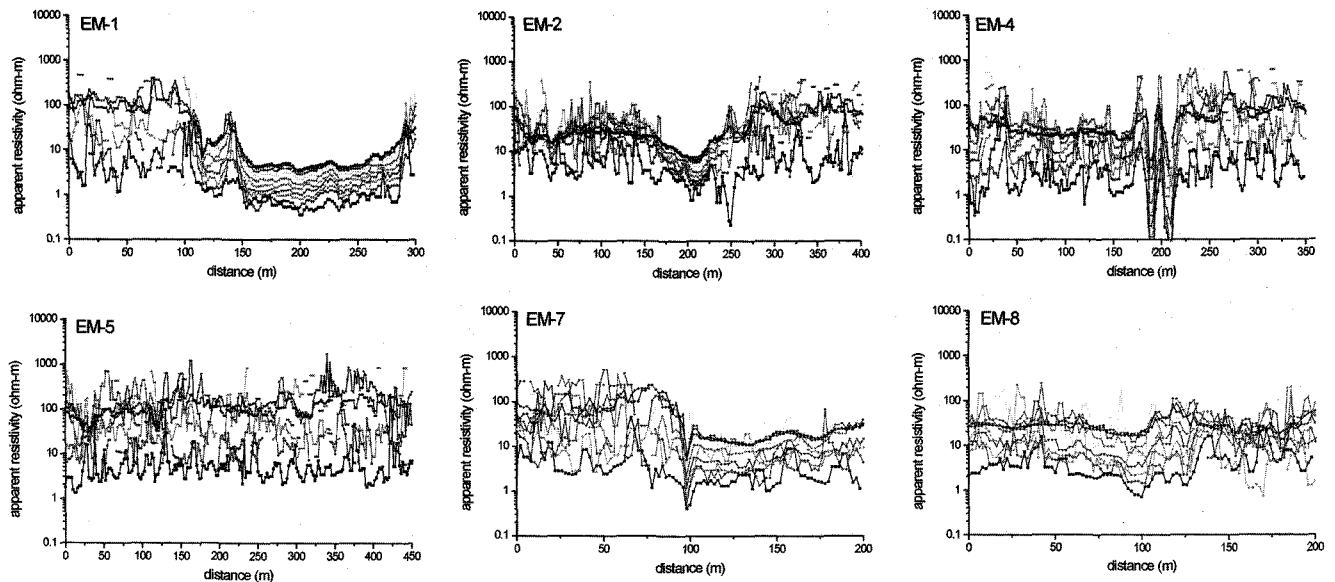


Fig. 10. Profiles of apparent resistivity obtained from spatial filtered data for quadrature components at each EM survey lines.

서의 이상성분에서 나타난 것과 같이 심도별로 연속적인 변화가 나타나는 결과와 일치된다. 또한 매립장 외부에서 수행된 EM-5 측선에 대한 탐사 결과는 매립장 내부에 대한 탐사 결과와 달리 일정한 경향성이 나타나지 않음에 따라 지표 하 약 10 m 이내의 천부의 경우는 매립장으로부터 발생 가능한 침출수의 영향이 거의 없는 것으로 판단된다. 그러나 이러한 각 주파수별 걸보기 비저항은 지하의 비저항 변화를 신속하게 파악할 수 있지만, 심도별 전기비저항을 계산하기 위해서는 역산법을 이용해야 한다. 이에 따라 이 연구에서는 공간 필터링을 이용하여 처리된 이상성분 자료에 설순지의(2002)가 제시한 평활화 제한을 가한 1차원 역산법을 적용하여, 매립장 주변 및 매립장에 대하여 심도별로 전기비저항의 분포 영상을 도출하

였다.

Fig. 11은 1차원 역산법을 이용하여 처리된 자료를 이용하여 각 측선별로 도시한 결과로, 이때 심도별 층의 구분은 매립장의 복토층 두께 및 탐사기기의 송수신기 간의 거리 등을 고려하여 0.5 m, 2.0 m, 5.0 m 및 6.6 m 깊이의 층을 갖는 모델을 가정하였다. 매립장의 중앙부를 동서로 가로지르는 EM-1 측선의 경우 상부는 약 2 ohm-m이며 하부로 갈수록 0.3~0.5 ohm-m로 낮아지는 경향을 보여주는데, 본 매립장의 매립고가 약 25 m인 점을 감안하면 매립물의 영향이 가장 크게 나타나는 것으로 판단된다. 매립장의 상부에서 수행된 EM-7, EM-8 측선의 경우는 역산에 의해 계산된 심도범위에서 전체적으로 10 ohm-m 내외의 전기비저항이 나타남에 따라 침출수의 영향

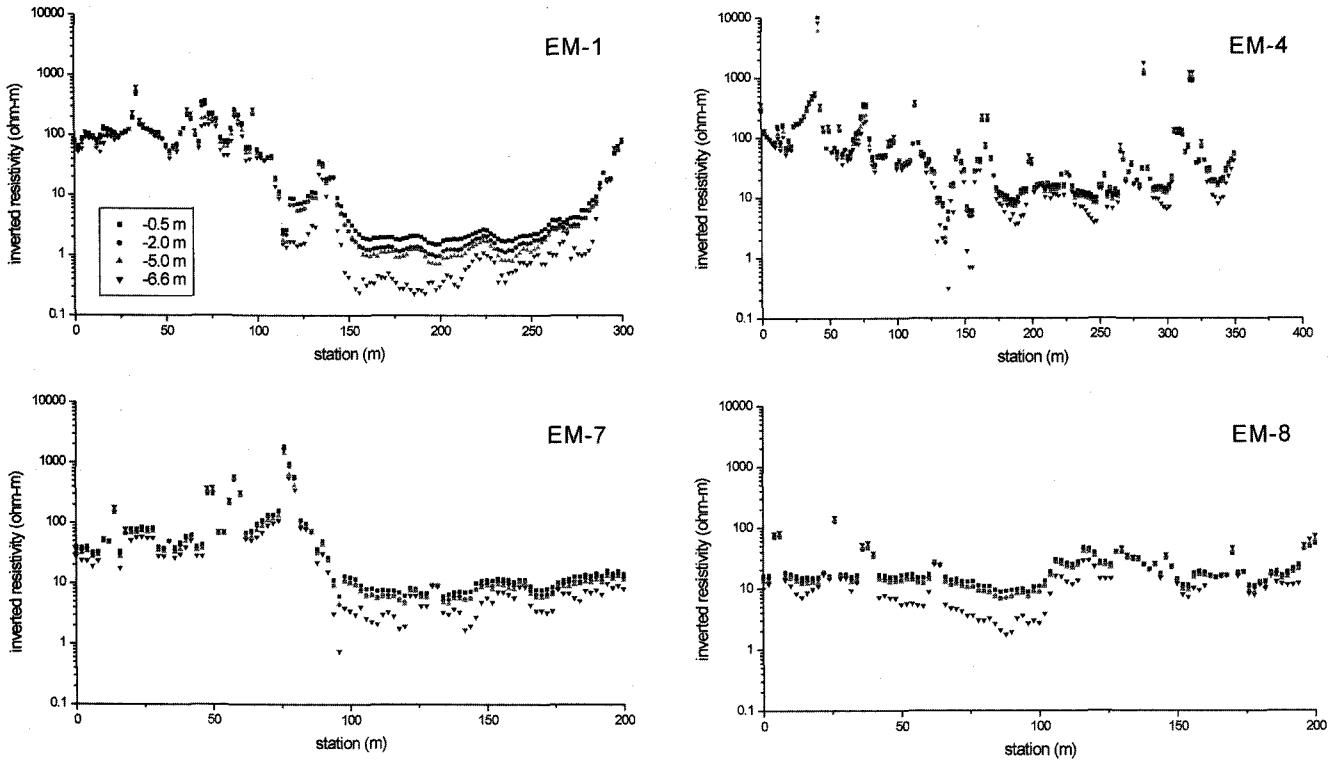


Fig. 11. Profiles of inverted resistivity at 0.5 m, 2.0 m, and 6.6 m obtained from one-dimensional inversion.

이 매립지 중앙부에 비해 상대적으로 적게 나타나는 것으로 판단되며, 매립장 하류의 경계부 외곽을 따라 수행된 EM-4 축선의 경우 지표 하부 약 5 m 이하에서 약 10 ohm-m 이하의 저비저항대가 국부적으로 나타남에 따라 침출수의 영향이 나타난 것으로 판단된다. 이러한 결과는 매립장 내부에서 남북방향으로 전개한 EM-2 축선의 경우 국부적으로 저비저항대가 나타나며, 특히 하류부로 갈수록 저비저항의 영향이 크게 나타나는 결과와 일치된다.

토의 및 결론

이 연구에서는 제주도에 위치한 비위생 매립지와 주변부에 대하여 침출수 누출에 의한 환경오염 가능성을 검토하기 위하여 종합적인 물리탐사를 수행하였다. 연구에 이용된 물리탐사법은 전기비저항 탐사, 자연전위 탐사 및 다중주파수 소형루프 전자탐사로 연구 대상지역의 전반적인 수리지질구조 및 오염범위 규명 등을 위하여 각 방법별로 적용한 결과를 복합적으로 해석하였다.

2차원 전기비저항 탐사는 전극간격을 20m로 설정하여 변형된 단극배열과 슬립버저 배열을 동시에 적용하였는데, 변형된 단극배열법이 제주도의 지질조건에 따른 전극의 접지 불량을 극복하는데 효과적이었으며, 신호 대 잡음비를 향상시킴에 따라 매립지 주변의 수리지질구조를 밝히는데 효율적임을 확인하였다. 특히 매립지 상부에서 수행된 탐사 결과 나타난 저비

저항의 이상대가 매립지 하류부에서 두 갈래로 나뉘어지는 이상화를 효과적으로 구현함에 따라, 매립지 침출수 누출 등 효율적인 관리를 위해서는 이러한 저비저항대의 위치에 추가적인 정밀조사와 지하수 수질변화를 모니터링할 수 있는 장기 관측정을 설치하는 것이 바람직할 것으로 나타났다. 또한 동일한 축선에서 수행된 자연전위 탐사 결과도 전기비저항 탐사의 결과를 효과적으로 뒷받침하는 것으로 나타났다.

비위생매립지의 경우 과거 부분별한 매립으로 인하여 매립장의 경계부를 정확하게 확인하는 것이 중요한데, 지하 약 10 m 이내의 천부를 대상으로 다중주파수 이동 송수신 방법인 고해상도 전자탐사 자료 처리 및 1차원 역산법을 적용한 결과 매립장 경계부의 위치 및 매립장 내부에 대하여 심도별로 매립물에 의한 저비저항의 이상대를 효과적으로 규명할 수 있었다. 또한 매립지 경계부를 통한 침출수의 누출 가능성을 파악하기 위하여 매립장 하부 경계부와 하류부에 동서방향으로 탐사를 수행한 결과 하부 경계부의 경우 국부적으로 저비저항의 이상대가 나타나지만, 매립지 하류부에서는 이러한 저비저항의 이상대가 나타나지 않음에 따라 매립지로부터 발생할 수 있는 천부 토양층을 통한 침출수 발생 가능성은 매우 낮은 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 제주시 폐기물사업소와 21세기 프론티어연구개발

사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단 연구비의 일부 지원(과제번호 3-3-1)에 의해 수행되었습니다. 부족한 논문의 심사를 맡아 논문의 세세한 부분까지 다듬어 주신 한국지질자원연구원의 조성준 박사님과 한성대학교의 고평범 박사님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 권병두, 오석훈, 이희순, 정현기, 1993, 제주도 기생화산의 자연전위 이상: 한국자원공학회지, **30**, 352-360.
- 김정호, 이명중, 송윤호, 정승환, 2001, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 전극배열법의 비교: 한국자원공학회, **38**, 116-128.
- 김정호, 이명중, 송윤호, 정승환, 2001, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극배열법에 관한 연구: 물리탐사, **4**, 59-69.
- 농업진흥공사, 1971, 제주도 지하수 보고서: 1-381, 1 지질도, 4 도면.
- 설순지, 송윤호, 조성준, 손정술, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사법을 이용한 매설물 탐지 및 지하 전기비저항 영상화: 물리탐사, **5**, 309-315.
- 송성호, 이규상, 김진호, 권병두, 2000, 방조제 누수지점 탐지를 위한 SP 및 단극배열 전기비저항 탐사의 적용: 자원환경지질, **33**, 417-424.
- 송성호, 배광옥, 2002, 지하수 오염지역에 대한 자연전위법 적용 사례: 한국지구과학회 2000년도 정기총회 및 추계학술발표회 논문요약집, 59-60.
- 송성호, 배광옥, 용환호, 박삼규, 2002, 자연전위탐사를 이용한 지하수 유동 해석: 2002 대한지질학회 추계학술발표회 논문집, 123.
- 송성호, 용환호, 2003, 대수층 이방성 분석을 위한 자연전위 모니터링의 적용: 자원환경지질, **36**, 49-58.
- 송윤호, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사의 감도분석 및 가탐심도 추정: 물리탐사, **5**, 299-308.
- 송윤호, 정승환, 이상규, 김정호, 황세호, 황학수, 이성곤, 조성준, 이명중, 설순지, 박인화, 2001, 지반물리탐사연구: 1999-R-T102-P-01, 산업자원부.
- 정현기, 최종호, 김정호, 정승환, 신인철, 1989, 자동연속기록 및 PC전송 가능한 디지털 SP측정기 개발 및 응용연구: KR-89-(B)-26, 한국동력자원연구소.
- 이기화, 권병두, 정호준, 1996, 난지도 매립장 전기, 전자탐사: 지하수환경, **3**, 95-100.
- 조진동, 정현기, 정승환, 김정호, 1996, 방조제 누수 부위 확인을 위한 SP/VLF 탐사법의 적용성: 자원환경지질, **29**, 623-627.
- 제주시, 2000, 제주시 매립지 기술진단 및 환경영향조사
- Atekwana, E. A., Sauck, W. A., and Werkema, D. D. Jr., 2000, Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site: *J. of Applied Geophysics*, **44**, 167-180.
- Corwin, R. F. and D. K. Butler, 1989, Geotechnical applications of the self-potential method, report 3. Development of self-potential interpretation techniques for seepage detection. Technical Report REMR-GT-6: US Army Corps of Engineers. Washington. DC.