

난지도 일대의 침출수 양태 조사를 위한 전기 비저항 탐사 Electrical Surveys for Mapping Leachate in Nanji-Do Landfill Site

김 형 수 (Kim, Hyong Soo)
이 기 화 (Lee, Ki Hwa)
한 정 상 (Hahn, Jeong Sang)

한국해양연구소 극지연구소
서울대학교 지질학과
연세대학교 지질학과

요약/Abstract

난지도 매립지 및 주변 침출수의 부존 양태를 파악하기 위하여 전기 비저항 수직 탐사와 수평 탐사가 수행되었다. 매립지 내에서 수행된 전기 탐사 결과는 매립지 내에 기저 침출수가 해발 고도 30 m 지점을 전후로 하여 형성되어 있으며 이 기저 침출수 상부에도 상당량의 부유 침출수가 존재함을 보여준다. 매립지 주변에서 획득된 전기 탐사 결과는 난지도의 침출수에 의해 오염된 지하수가 한강으로 유입되고 있음을 보여준다. 또한 이 지역의 기반암 상부도 이미 오염된 지하수에 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 난지도 매립지 및 주변 지역의, 침출수에 의해 포화된 지층은 전기 비저항치가 10 ohm-m 이하인 것으로 판측되었으며, 이러한 낮은 비저항치는 이 지역의 지하수 및 지층이 매우 심각하게 오염되어있음을 지시한다.

Electrical soundings and profilings were conducted for mapping the leachate in the region of Nanji-Do Landfill site. The results of electrical surveys conducted in the landfill area show that the basal leachate is formed at the height about 30 m above the mean sea level and that there is abundant floating leachate over the basal leachate. The surveys conducted around the landfill reveal that the groundwater which may be contaminated by the leachate from the landfill flows to the Han River. The top of the basement rock in this area has been severely affected by polluted groundwater. The layer which is thoroughly saturated with leachate in this region has the very low resistivity value below 10 ohm-m and this low resistivity value indicates that the groundwater and geology are severely contaminated by the leachate and wastes of the landfill.

서 언

난지도 매립지는 1978년이래 서울시 쓰레기를 매

립해 온 대표적인 폐기물 매립지로 서울시 마포구 상암동 한강변에 위치하고 있다(Fig. 1). 이 매립지는 일체의 지하수오염 방지대책이 강구되지 않은 상태에서 매립이 진행된 불량 매립지(이철효, 1994)로

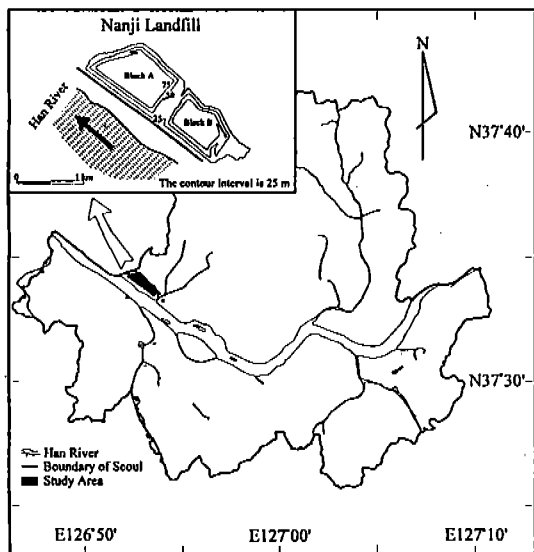


Fig. 1. Location and plan view of Nanji-Do Landfill.

이 매립지로부터 유출되는 침출수가 이 일대 지하수 및 주변 환경을 크게 오염시키고 있으며, 오염된 지하수는 한강으로 직접 유입되고 있을 것으로 믿어진다. 일반적으로, 폐기를 매립지에서 발생하는 침출수는 특별한 지하수 오염 방지대책이 강구되지 않는 한 적어도 수백 년간은 오염원으로 존재하게 된다.

1992년 10월말로 난지도 매립지가 폐쇄됨에 따라, 이 매립지의 폐쇄후 환경 오염 방지 대책과 안정화, 사후 관리 및 토지 이용 등의 필요성이 대두되게 되었으며 이를 위한 조사 및 설계가 요구되고 있다. 이러한 난지도 매립지의 사후 관리의 일환으로 본 연구는, 지구 물리 탐사 방법의 일종인 전기 비저항 탐사를 통해, 쓰레기 매립이 완료된 본 매립지의 침출수의 부존 양태를 파악하기 위해 수행되었다. 전기 비저항 탐사는 지하의 수직적, 수평적 전기 비저항 분포를 통해 매립지의 오염운(contaminant plume)이나 침출수(leakage)의 분포 양상을 추정하는데 매우 유용한 도구로 보고되어 있다(Benson et al., 1988).

난지도의 일반 지질

난지도 일대의 지질은 선캠브리아기의 편마암류와 이들을 관입한 중생대의 화성 맥암류, 그리고 이들을 부정합으로 덮고 있는 제 4 기의 충적층으로 이루어

져 있다. 선캠브리아기의 편마암류는 대부분이 흑운모 호상 편마암이며 부분적으로 화강 편마암, 안구상 편마암, 그리고 석영 편암등이 나타난다. 이들 편마암류는 심한 풍화 작용과 침식 작용으로 불량한 노두를 보이며 이들 암석은 풍화와 침식작용에 매우 약하여 지형적으로 저지대를 형성하고 있다. 또한 지역적으로 이들 편마암류 사이에 협재하는 규암, 석회암 및 석회규산염암등을 미루어 보아 이 편마암류의 기원은 퇴적 기원임을 암시한다. 제 4 기의 충적층은 한강 유역이나 하천의 계곡을 따라 넓게 분포하고 있다. 실제로, 매립이 수행되기 이전 난지도의 지표는 제 4 기 충적층인 하성 퇴적층으로 이루어져 있었으며 이 퇴적층은 일종의 하천-충적층계(streamer-alluvial system)이다.

난지도 일대의 지질 구조로는 주로 한강의 유로 방향과 평행하게 발달된 N60W 방향의 단층 및 절리 구조선과 이와 거의 수직하게 발달된 N45E 방향의 구조선으로 대표된다. 난지도 매립장에서의 시추 자료들은, 일반적으로, 본 매립장이 최상부의 쓰레기 매립층, 중간 하상 퇴적층, 그 하부의 풍화대, 그리고 최하부에 기반암인 편마암류로 이루어져 있음을 보여준다. 하상 퇴적 기원의 충적층은 보통 조립질의 모래와 점성이 큰 회갈색의 점토층이 협재하는 형태이며 원마도가 보통에서 양호정도를 보이는 5 mm 이하의 작은 자갈들로 이루어져 있다. 이 충적층은 지역적인 차이를 보이기는 하지만 보통 20 m 전후의 층후를 갖는다. 이 충적층 하부의 풍화대는 기반암인 편마암류의 풍화대로서, 보통 5 m 내외의 층후를 갖는다. 최하부의 기반암은 주변 일대에서 나타나는 편마암류인 흑운모 호상 편마암 또는 화강 편마암류들로 이루어져 있으며 절리등의 지질구조가 발달되어 있어 지하수의 유동이 용이한 것으로 보고되어 있다(서울특별시, 1994).

탐사자료 획득 및 처리과정

본 연구의 전기 비저항 탐사는 93년도 12월과 94년도 2월 두 차례에 걸쳐 그 조사가 수행되었다. 탐사에 사용된 장비는 ABEM사의 SAS 300B 전기 탐사기이다. 수행된 탐사는 수직 탐사와 수평 탐사로 대분되며 수직 탐사는 Schlumberger 배열법을 사용하였으며 수평 탐사는 Wenner 배열법을 사용하여 수행되었다. 난지도 지역에서 얻어진 수직 탐사 자료는 대화식 해석법(김형수, 이기화, 1993)을 이용하

난지도 일대의 침출수 양태 조사를 위한 전기 비저항 탐사

여 1차원 층상 구조로 정량 해석되었다. 이 정량 해석 과정에서 기존의 시험정 (test well)으로 부터 얻어진 정보를 최대한 이용하여 지질학적으로 타당한 모델이 되도록 하였으며 또한 주변의 전기 탐사 자료와의 대비를 통해 적어도 3회 이상의 보정 작업을 거쳐 지하 모델을 선정하였다. 해석된 지하 모델로부터 야기되는 이론적 전기 비저항치와 실제 관측된 비저항치와의 평균 제곱근 오차 (root mean square error)는 15% 이내이다. 또한 수평 탐사 자료는 전위 전극과 전류 전극의 배열에 따라 겉보기 비저항으로 환산, 보간 되어 등수치선도 (contour map)로 작성되었다.

1차 조사는 난지도 A 지구와 B 지구의 기저 지하수의 부존 양태와 난지도 주변에서의 지하수 분포 및 오염도의 개괄적 추정을 위해 수행되었다. 여기에서 A 지구는 난지도의 북서쪽 매립지를, B 지구는 난지도의 남동쪽 매립지를 지칭한다(Fig. 1 참조). Fig. 2는 1차 조사시 수행된 수직 탐사의 위치를 보

여준다. 1차 조사시 조사된 지점은 총 44 지점으로 매립지 내부에서 19점, 매립지 주변에서 25점의 수직 탐사가 수행되었다. 1차 조사시 매립지내에서 실시된 모든 수직 탐사는 기본적으로 전류 전극과 전위 전극을 난지도의 단축 방향(약 N40E)에 평행하도록 유지하면서 탐사를 수행하였다. 매립지 내에서 실시된 수직 탐사의 최대 탐사 심도는 100내지 165 m이며 난지도 주변 일대에서 수행된 수직 탐사의 경우 최대 탐사 심도는 50 m이다.

2차 조사는 난지도 매립지 상부에 존재하는 부유 침출수 (floating leachate)의 존재 여부와 그 부존 양태 추정 및 1차 조사시 미진했던 탐사 지점의 보완을 목적으로 수행되었다. 여기에서 부유 침출수란 매립지 내부에서 발생된 고온 다습한 매립가스가 상대적으로 온도가 낮은 지표면 등에 의해 급격히 냉각되어 수증기 상태의 수분이 변해서 형성된 침출수를 지칭한다. 이처럼 기저 침출수 상부에 매립가스가 응축되어 기저 침출수와는 별개의 부유 상태의 침출

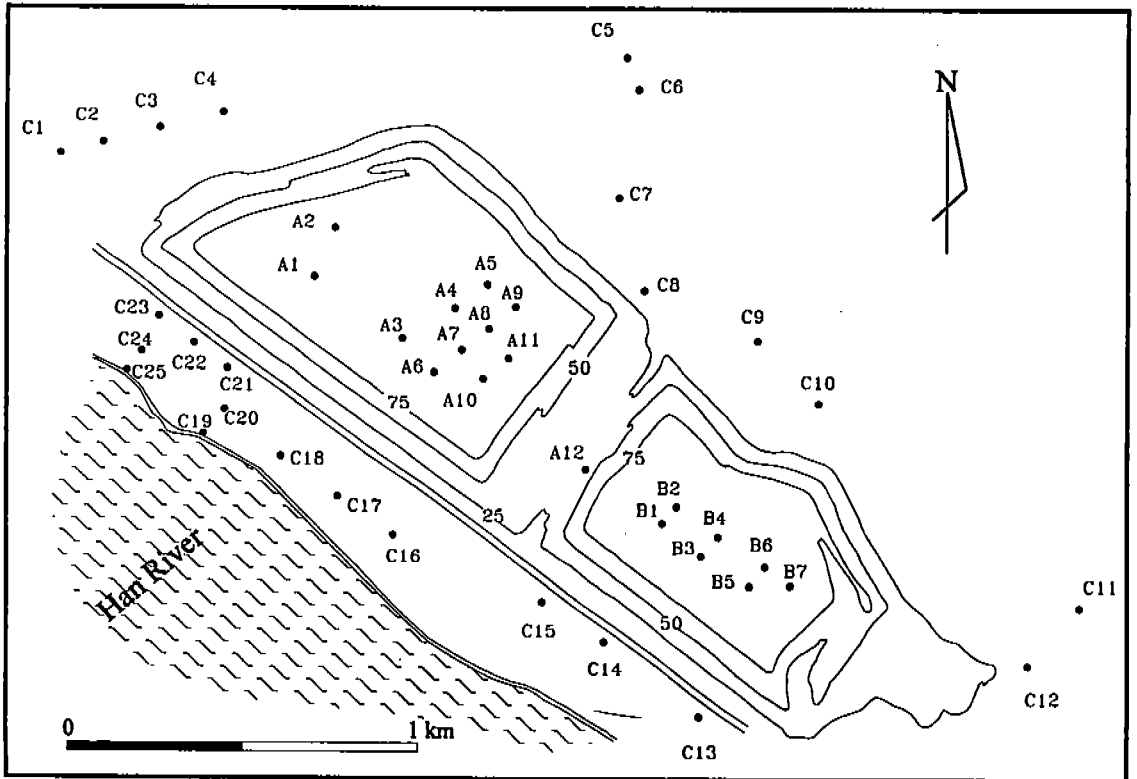


Fig. 2. Location of vertical electrical soundings in the first field work conducted in December, 1993.

수가 존재하는 현상은 대규모 매립지에서는 일반적으로 관측되는 현상이라고 할 수 있다(이철호, 1994). 2차 조사에서 수행된 수직 탐사는 1차 조사시의 탐사보다 상세한 탐사를 위해 수직 탐사시 넓혀나가는 전류 전극 간격을 1차 조사시에 비해 조밀하게 유지하여 수행되었으며 동일 지점에서 매립지의 장축 방향 (약 N60W)과 단축 방향의 양 방향에 대해서 전극들을 전개하는 방법으로 수행되었다. 2차 조사서, A 지구에서는 5개 지점에서 각 지점당 매립지의 장축 및 단축 방향 측정을 통해 총 10회의 탐사가, B 지구에서는 1개 지점에서 총 2회의 탐사가 이루어 졌다. 또한 A 지구와 B 지구 사이의 골짜기 지역에서 3점, 그리고 A 지구의 남동쪽 사면과 B 지구의 남동쪽 사면에서 각 각 1점씩의 수직 탐사가 수행되었다. 2차 조사에서 실시된 수직 탐사의 탐사 위치도는 Fig. 3과 같다. 이중 D1, D2, D3, D4, D5, D10 지점은 한 지점에서 난지도의 장축 및 단축 방향으로 전극을 전개하여 양 방향에 대한 탐

사가 이루어진 지점들이다.

2차 조사에서는 매립지 전반의 지하심도 60 m 정도까지의 평균적인 비저항 수평 분포를 밝혀내기 위해 Wenner 배열법을 사용한 수평 탐사를 실시하였다. A 지구에서의 수평 탐사는 10개 측선에 대해서 수행되었으며 B 지구의 수평 탐사는 6개 측선에 대해서 탐사가 수행되었다. Fig. 4는 2차 조사시 수행된 수평 탐사의 탐사 측선을 보여준다. 기본적으로 수평 탐사시 Wenner 배열법의 전극 간격은 40 m, 탐사 중심점의 이동 거리를 40 m 간격으로 설정하여 탐사가 수행되었으나 탐사 측선 H11, H12, H13의 경우는 배열 중심점의 이동 거리를 20 m로 하여 탐사가 수행되었다.

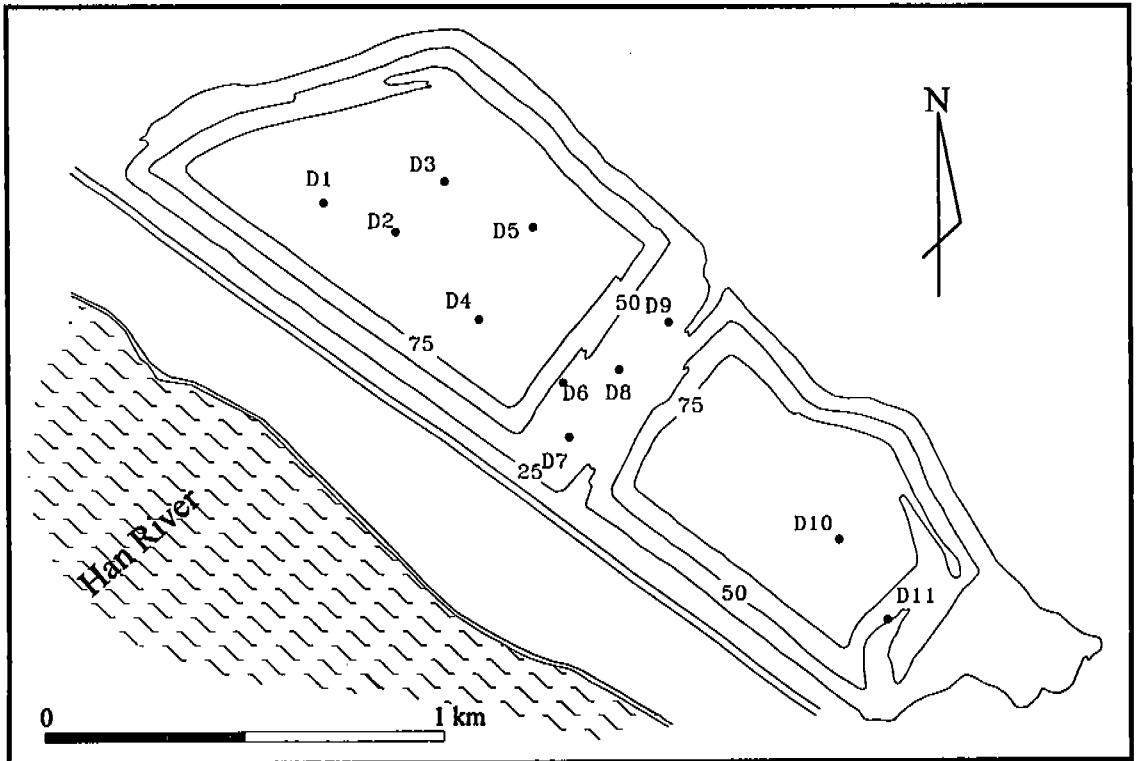


Fig. 3. Locations of vertical electrical soundings in the second field work conducted in February, 1994.

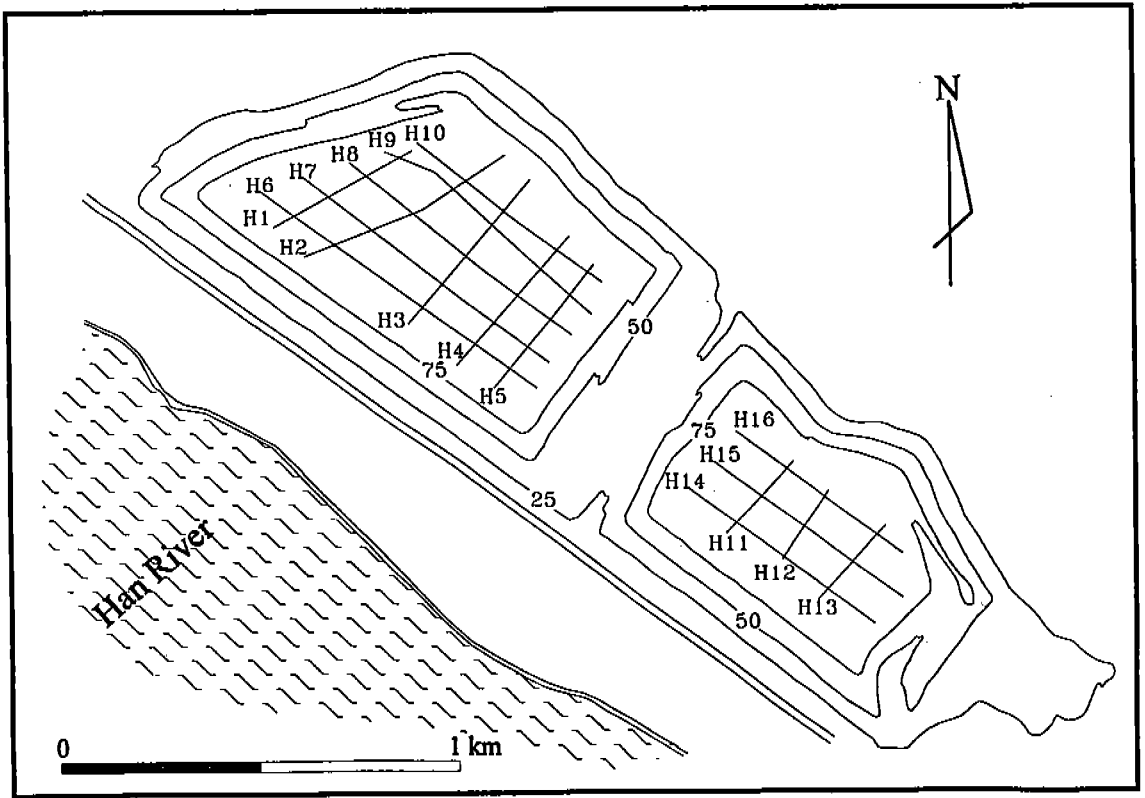


Fig. 4. Locations of horizontal electrical profilings.

탐사 해석 결과

난지도 A 지구 수직 탐사 결과

A 지구에서는 1차 탐사시 A1부터 A11까지의 11개 지점, 2차 탐사시 D1부터 D5까지의 5개 지점에서 수직 탐사가 수행되었다. 1차와 2차에서 얻어진 A 지구의 수직 탐사 자료는 A8 지점에서의 자료를 제외하고는 모두 층상 구조 해석이 가능한 양호한 결과를 보여주고 있다. Fig. 5는 A 지구에서 수행된 일부 수직 전기 탐사의 획득 자료와 해석 결과를 보여준다.

A 지구에서 전기 탐사 정량 해석에 참조되었던 기존의 시험정 자료는, 94년 2월 현재의 매립지의 최상부에 설치된 IB1, IB2, IB3, IB5, GM1, GM4과 매립이 해발고도 약 17 m 정도 진행되었을 때 착정되었던 No. 3 그리고 No. 4이다. 이들 시험정들의 위치는 Fig. 6에 보여진다.

Fig. 7은 난지도 매립지 및 주변 일대의 수직 전기 탐사 결과를 해석하기 위해 선정된 가상 단면의 위치를 보여주고 있다. 이 단면의 위치는 난지도의 단축 및 장축 방향과 수직 탐사 위치 등을 고려하여 선정되었으며 비저항 가상 단면은 계산에 의해 얻어진 지하 비저항 모델과 관측된 비저항 곡선 그리고 제반 시추 자료의 정보를 통해서 작성되었다. Fig. 8은 A 지구 매립지의 가상 해석 단면중 단축과 평행한 전기 비저항 분포 단면을, Fig. 9는 A 지구의 장축방향과 평행한 단면을 보여 주고 있다. 그러나, 이 해석 단면은 난지도 지하의 비저항 구조를 전반적인 형태에 따라 단순화시켜 표현하였으므로 국부적으로 나타나는 작은 규모의 비저항 구조는 표현되지 않는 경우도 있다.

해석을 위한 가상 단면의 지하 비저항층은 길보기 비저항치, 비저항 모델, 그리고 기존의 시험정등의 자료를 참고하여 5개의 층으로 구분하였다. 이 중 최상부층은 지표 부근의 비저항층으로 비교적 높은

비저항을 보여주고 있다. 이층은 매립층의 함수비나 기후적 영향 및 기타 요인에 따라 그 비저항이 유동적으로 변하는 층으로 판단된다. 제 2 층은 비저항의 범위가 20에서 200 ohm-m에 해당하는 매립층으로 이는 부분적으로 부유 침출수나 강수의 지하 침투수에 의해 부분적으로 포화된 매립층으로 판단하였다. 또한 비저항 10 ohm-m 이하의 제 4 층은 기저 침출수에 의해 완전히 포화된 매립층이거나 총적층일 가능성이 높으며 이에 비해 제 3 층은 비저

항치가 10에서 20 ohm-m에 해당하는 층으로 부유 침출수, 또는 기저 침출수에 의해 부분적인 포화가 이루어진 점이대로 판단된다. 실제 기저 침출수의 지하수위는 이 점이대층이나 제 4 층의 상부구간에 존재할 것으로 사료된다. 그러나 제 3 층과 제 4 층의 구분은 수직 전기 탐사의 특성상, 비저항 모델을 통해 뚜렷이 구분하기 어렵기 때문에 두 층의 경계는 다소 임의적이다. 최하부층은 비저항치가 200 ohm-m 이상의 값을 보여주는 층으로 이층은 조밀한

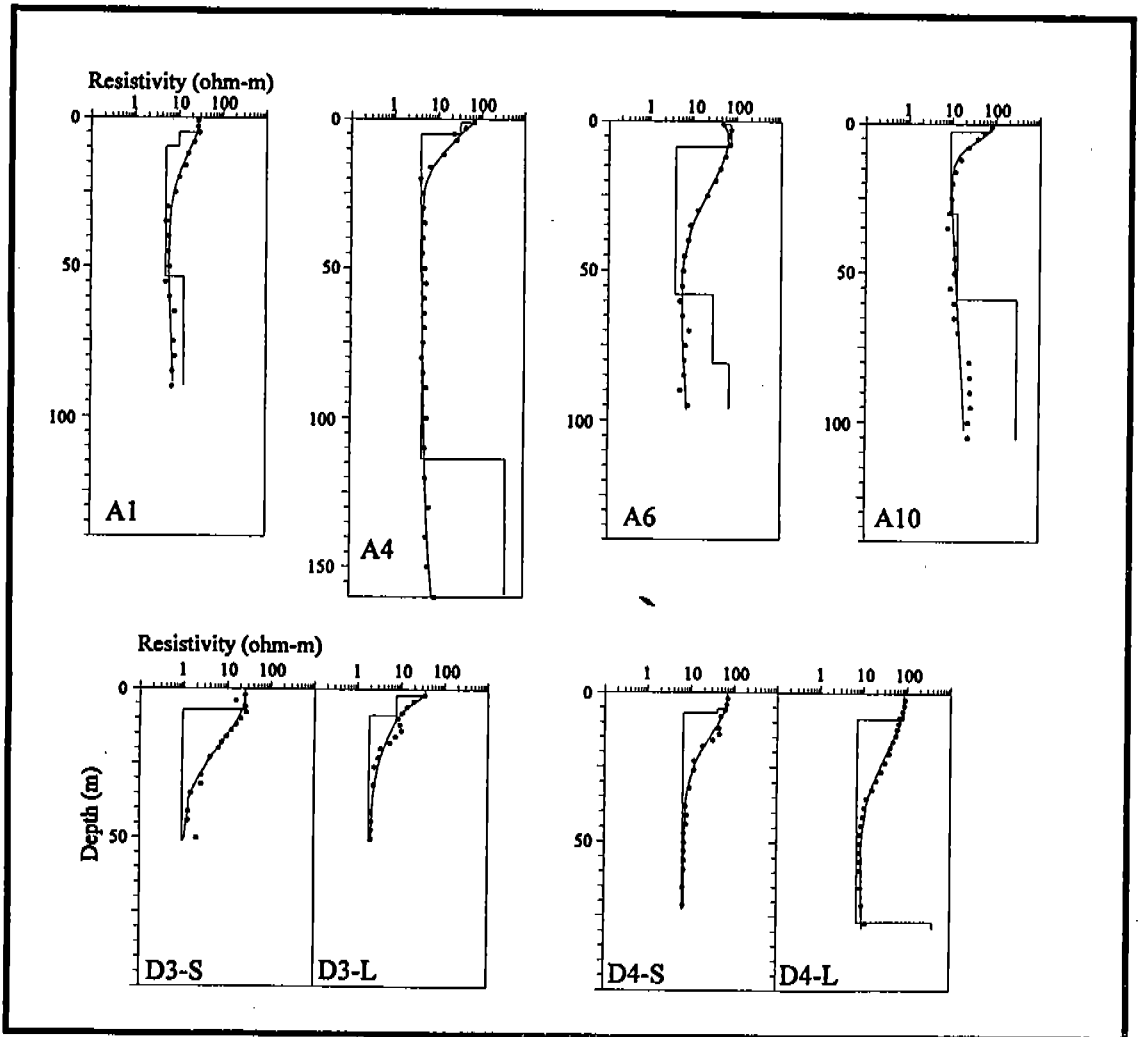


Fig. 5. Resistivity sounding curves and interpretations in Block A of Nanji-Do Landfill (point=observed values, smooth curve=calculated values, stepwise line=resistivity model: "-S" indicates the electrical sounding conducted along the short axis of Nanji-Do Landfill and "-L" along the long axis of it).

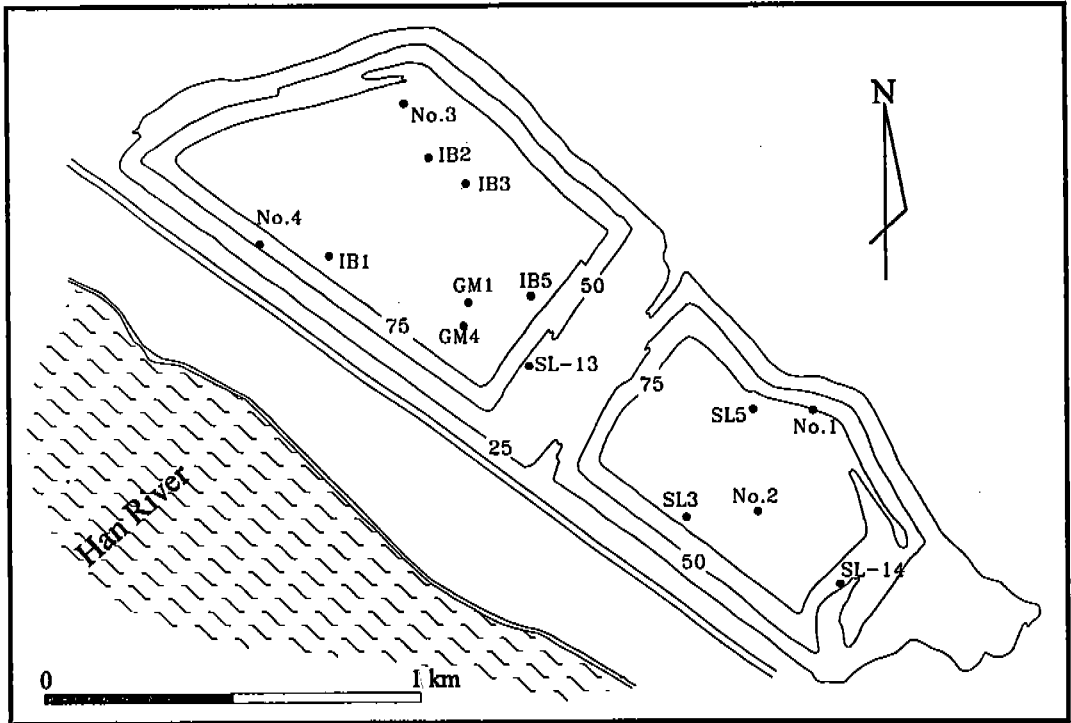


Fig. 6. Locations of the test wells used for interpretation of electrical soundings

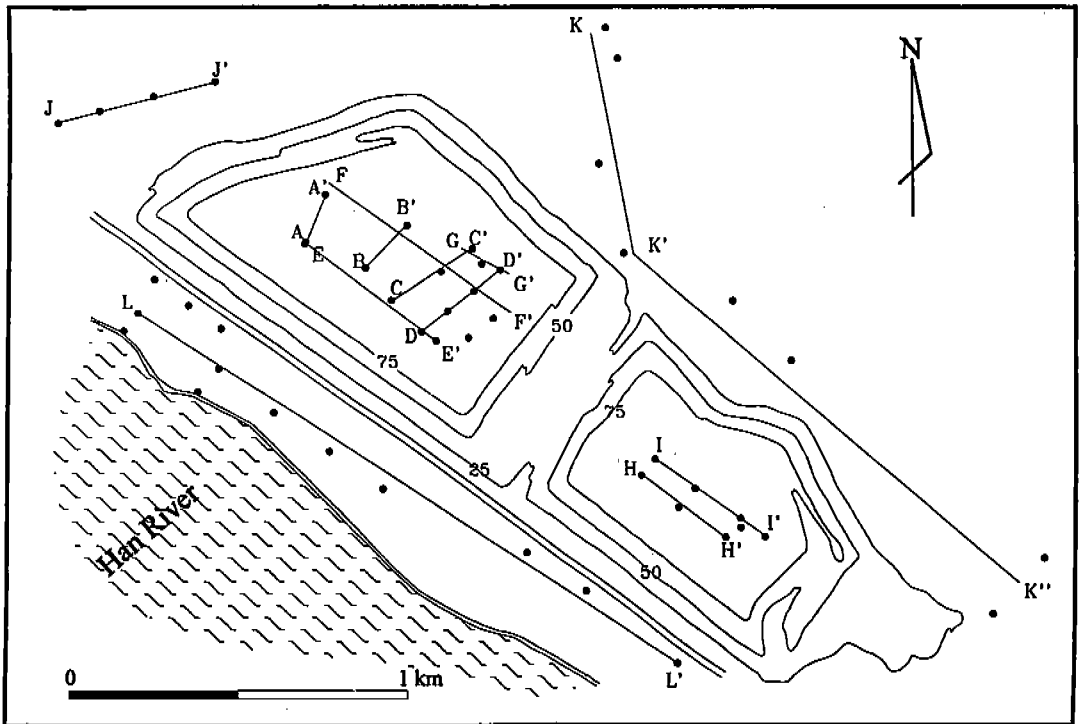


Fig. 7. Location of profiles for the geoelectric sections in Nanji-Do Landfill.

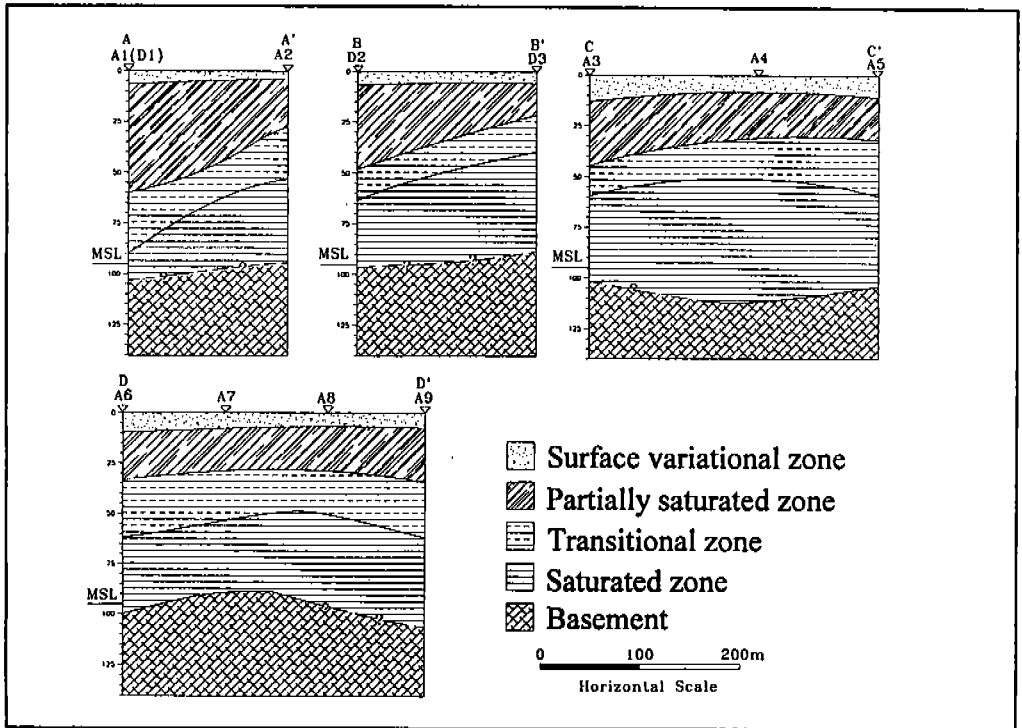


Fig. 8. Geoelectric sections for the profiles of Block A parallel to the short axis of Nanji-Do Landfill.

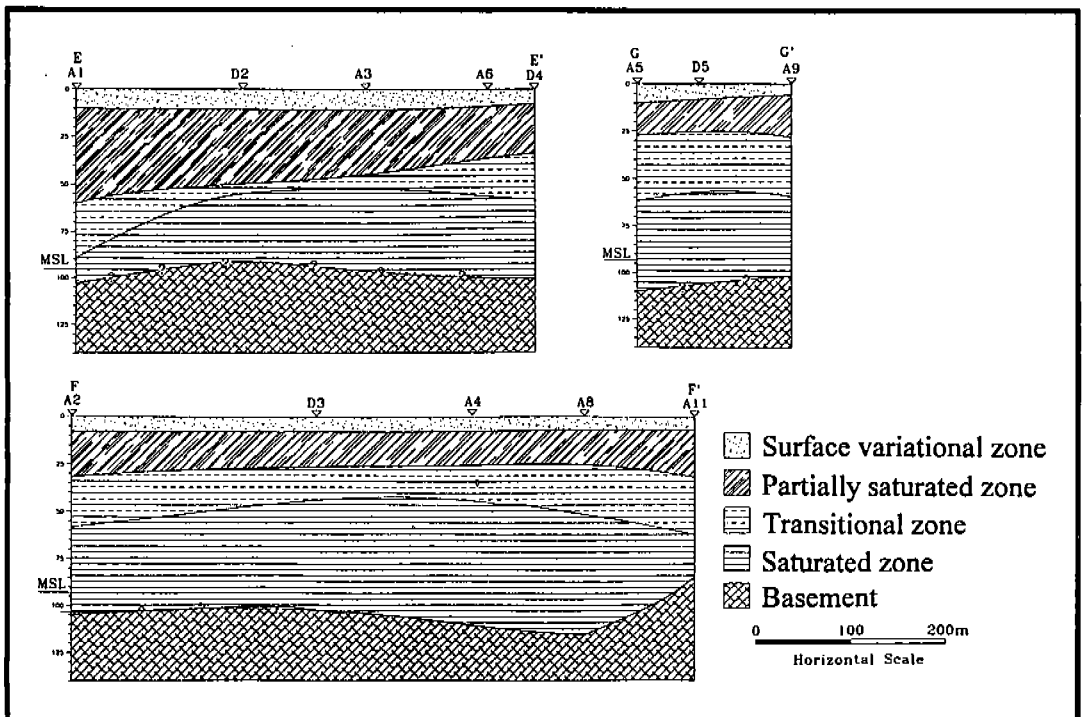


Fig. 9. Geoelectric sections for the profiles of Block A parallel to the long axis of Nanji-Do Landfill.

하부 층적층, 혹은 기반암층으로 판명하였다. A 지구 매립지에서 가장 깊은 심도까지 탐사가 수행된 지점은 A4 지점으로, 그 심도는 165 m에 달한다. 이 지점의 해석 결과 평균해수면 이하 20 m 지점에 기반암에 해당되는 고비저항층이 존재하고 있음을 보여주며 그 비저항은 적어도 300 ohm-m 이상으로 평가되었다. 이러한 기반암의 심도는, 매립지내에서는 이 심도까지의 시추자료가 없으나 난지도 주변에서 얻어진 다목적 관측정의 시추자료에서 보여주는 기반암의 심도와 매우 유사한 심도를 보여주고 있다. 그러나 탐사 심도와 전기 탐사 해석의 한계 때문에, 탐사 지점에 따라서는 기반암의 상부 경계를 명확히 규명 할 수 없었다.

2차 탐사시 수행된 D1 부터 D5 지점에서의 탐사는 전극들의 방향이 난지도의 장축과 단축에 대해서 2개 방향으로 탐사가 실시되었으나 전극의 배열 방향에 따라 크게 다른 결과를 보이고 있지는 않다. 이들 탐사 자료에서 볼 수 있듯이, 장축 방향의 수직 탐사와 단축 방향의 수직 탐사가 거의 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있으며, 이는 본 매립지가 기본적으로 층상 구조 가정보로 해석이 가능함을 시사한다.

A1 지점은 다른 지점과는 달리 비저항 10 ohm-m 이하의 층이 지표면하 약 10 m부터 50 m 지점에 존재하는 것으로 나타났으며 현재 부유 침출수가 지표에 표출된 D3 지점의 경우 지표 심도 약 8 m에서 부터 2 ohm-m 이하의 낮은 비저항 층이 존재함을 보여주고 있다. 그리고 이러한 비저항층의 하부 경계는 적어도 탐사가 수행된 심도인 지표면하 50 m까지는 연장되는 것으로 보인다. 이러한 지표 부위의 낮은 비저항층은 부유 침출수와 매우 밀접한 관계를 시사한다.

A10, A11 지점에서의 수직 탐사 결과는 해발 고도 30 m 이상 (지표심도 60 m)에서 200 ohm-m 정도의 고비저항대가 존재하는 현상을 보여주고 있다. 그러나 이 고비저항층을 기반암으로 판단하기는 어려우며 이는 이 지점이 지하수의 유동과 배태가 불가능한 구성 물질로 구성되어 있음을 암시한다. 즉, 과거 이 지점 부위가 매립을 위한 차량의 주통행 도로였음을 감안할 때 당시의 통행 차량에 의한 하층으로 지반이 상대적으로 고화된 상태에 있을 가능성과 이 지역에 매립된 물질이 주로 콘크리트와 같은 건설 폐자재로 구성되어있을 가능성이 있다.

기본적으로 수직 전기 탐사가 보여주는 결과는 A

지구 매립지가 지표면하 10 m 부근에서는 부분적으로는 부유 침출수의 영향을 받기 시작하고 비저항이 10 ohm-m 이하의 적은 비저항치를 갖는 층은 거의 기저 침출수에 의해 포화된 층으로 사료되며, 이 기저 침출수에 의해 포화된 층은 매립지의 중심 지역에서 상대적으로 두꺼운 모양으로 형성되어 있는 것으로 관찰된다. 또한 기반암으로 보이는 층의 비저항치도 200내지 400 ohm-m로서, 일반적인 지역에서 관측되는 변성암 기반암류에 비해 상대적으로 낮은 비저항을 보이는 점을 사료해 볼 때 본 지역에 분포된 기반암은 침출수에 의해 어느 정도 오염된 것으로 보인다. A 지구 매립지의 해석 단면들 상에서 볼 수 있듯이 기저 침출수의 수위는 사면 쪽이 낮고 매립지 중심부가 높은 것이 특징적이며 대체적인 기저 침출수의 수위는 해발고도 15에서 45 m 범위 존재하는 것으로 판단된다.

난지도 B 지구 수직 탐사 결과

B 지구 매립지에서는 1차 조사시 B1부터 B7까지의 7개 지점, 2차 조사시 D10의 1개 지점에서 수직 탐사가 수행되었다. B 지구에서, 1차 조사시 수행된 탐사 지점 B1부터 B7 지점은 A 지구에서와 마찬가지로 매립지의 단축 방향과 전극들이 평행하도록 수직 탐사가 수행되었으며 2차 조사시 탐사된 D10 지점에서는 단축과 장축의 양방향에 대해서 수직 탐사가 수행되었다.

Fig. 10는 B 지구에서 얻어진 일부 수직 전기 탐사 자료와 해석 결과를 보여준다. B 지구에서 얻어진 모든 수직 탐사 자료는 층상 구조로 해석이 가능한 매우 양호한 결과를 보여주었으며 수직 탐사 관측치의 양상은 A 지구의 그것과 크게 벗어나지는 않으나 침출수에 의한 저 비저항대의 값이 A지구의 최소치보다 2에서 5 ohm-m 정도 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 후에 언급될 수평 탐사 결과치 와도 상응하는 결과이다.

B 지구에서 전기 탐사 정량 해석에 참조되었던 기존의 시험정 자료는 94년 2월 현재의 매립지의 최상부에 설치된 SL-3, SL-5의 자료와 매립이 해발고도 15 m 정도 진행되었을 때 측정되었던 No. 1, No. 2이다(Fig. 6 참조). SL-3과 SL-5의 자료는 지하수면이 해발고도 68 m와 89 m에 형성되어 있는 것으로 보고되어 있으나 이 지하수위는 부유 침출수의 지하수위로 사료되며 기저 침출수는 이보다 하부에 존재할 것으로 믿어진다. 과거의 시험정

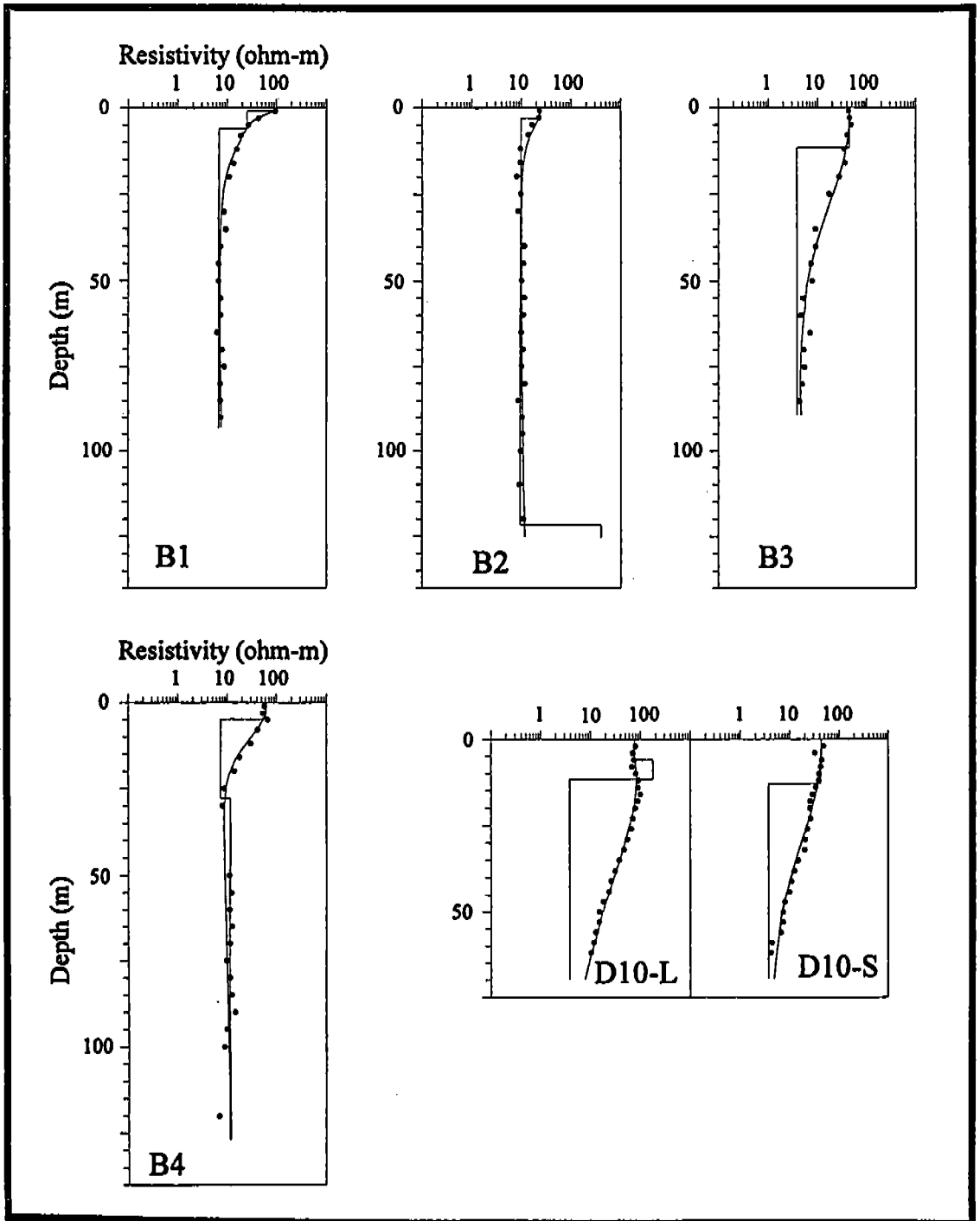


Fig. 10. Resistivity sounding curves and interpretations in Block B (point=observed values, smooth curve=calculated values, stepwise line=resistivity model: "-S" indicates the electrical sounding conducted along the short axis of Nanji-Do Landfill and "-L" along the long axis of it).

난지도 일대의 침출수 양태 조사를 위한 전기 비저항 탐사

No. 1과 No. 2에서는 난지도 지역의 기반암에 대한 정보가 있으며 이 기반암은 해수면 이하 약 20 m 지점부터 나타나는 것으로 보고되어 있다. 이러한 기반암의 정보는 A 지구의 A4 지점에서 관측된 기반암으로 사료되는 비저항층과 잘 일치하고 있다. 또한 B2의 해석 결과도 다소 지하 심부의 자료가 부족한 면이 있으나 이러한 기반암으로 사료되는 비저항층의 정보를 부분적으로 제공한다. 또한 B1, B2, B3와 B4 지점의 해석 결과는 지표로부터 10 m 이내에서 부터 10 ohm-m 정도의 낮은 비저항층이 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 천부에서의 저비저항대는 기저지하수와는 별개인 부유 침출수에 의한 저비저항대로 판단된다.

해석을 위한 가상 단면은 수직 탐사 측점의 위치를 감안하여 난지도의 장축에 평행하게 선정되었으며(Fig. 7 참조), 이 가상 단면의 결과는 Fig. 11에 보여진다. B 지구의 지하 단면도 A 지구와 같이 5개의 비저항층으로 구분하였다. 가상 비저항 단면에서 볼 수 있듯이 HH'와 II'의 비저항구조는 A 지구에 비해 다소 단순한 모양을 보이고 있으며, 접이대

에 해당하는 제 3 층이 A 지구보다 더 두텁고 넓게 나타난다. 그러나 해석 결과 B 지구 지층의 최소 비저항치는 A 지구의 최소 비저항치에 비해 다소 높은 것으로 나타났다. 이러한 다소 높은 비저항값을 보이는 이유는 다음의 두 가지로 해석된다. 첫째, 기저 침출수에 의한 완전 포화된 층이 A 지구에 비해 깊은 곳에 형성되어 있을 가능성이 있다. 둘째, B 지구 매립지에서 침출수 자체의 오염도가 상대적으로 A 지구보다 적어 그 비저항치가 높을 가능성이 있다. B 지구 역시, A 지구에서와 같이, 위치에 따라 다소 차이를 보이는 하지만 지표면 이하 약 60 m 지점부터는 기저 침출수에 의해 완전 포화가 이루어진 것으로 추정되며 전체적인 B 지구의 기저 침출수의 수위는 해발고도 15내지 40 m 범위에 존재하는 것으로 사료된다.

난지도 주변 일대 수직 탐사 결과

난지도 매립지 주변의 전기 비저항 구조를 밝혀내기 위해 행해진 주변 일대의 수직 탐사의 위치는 Fig. 2에 보여졌으며, Fig. 12는 이들 탐사 자료층

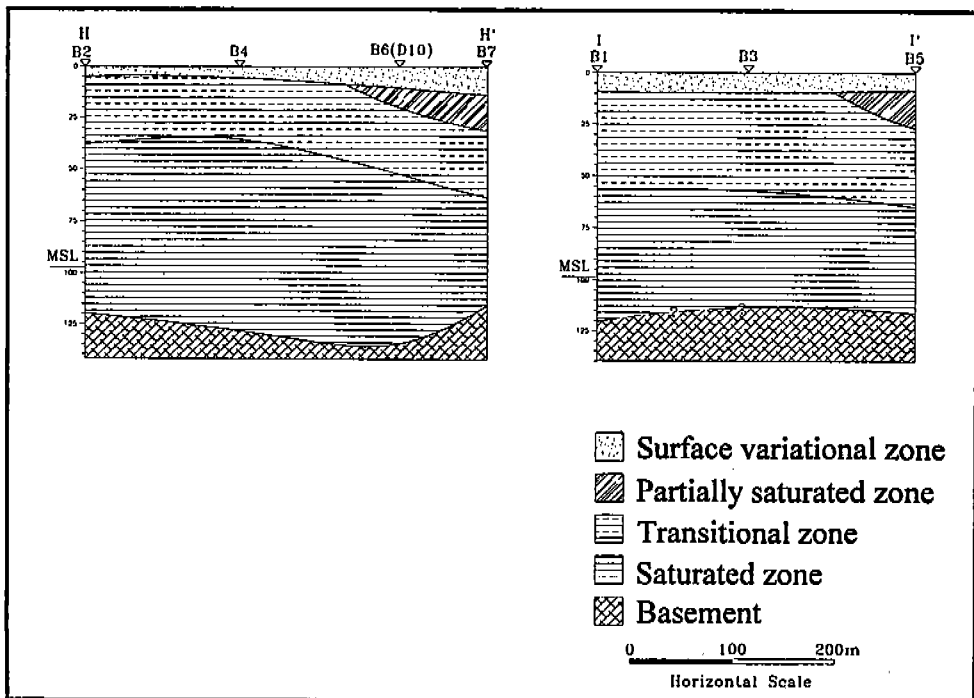


Fig. 11. Geoelectric sections of Block B.

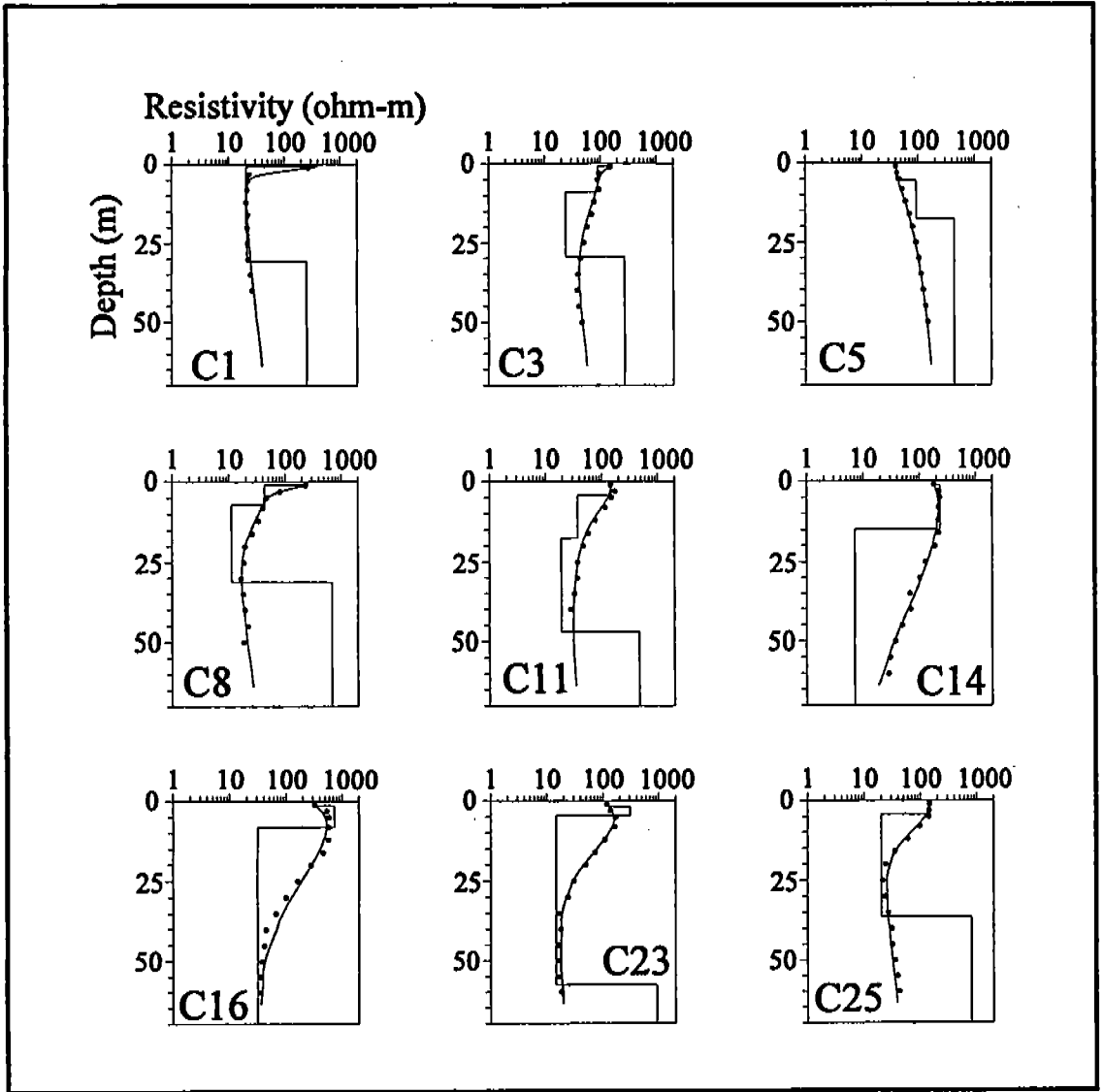


Fig. 12. Resistivity sounding curves and interpretations around the Nanji-Do Landfill(point=observed values, smooth curve=calculated values, stepwise line=resistivity model).

일부의 관측치와 해석 결과를 보여준다. 해석을 위해 사용된 가상 단면은 지표층과 저비저항층 그리고 기반암층으로 단순화되어 있으며 저비저항층은 지하수에 의해 부분적으로는 영향을 받는 세립질층적층과 풍화대에 해당한다고 판단된다. 가상 단면의 위치는 매립지의 가상 단면의 위치와 함께 Fig. 7에 주어져 있다. 난지도 주변의 가상단면 결과는 Fig. 13에 보여진다.

이들 주변 전기 탐사 결과의 가장 큰 특징은 난지도의 남서부위인 한강변에서의 저비저항층이 가장 두껍게 나타나는 현상을 볼 수 있다. 이러한 결과는 난지도 매립지에서 발생한 침출수가 한강변까지 이미 거동하여 인근 층적층을 상당히 오염시켰음을 나타내고 있다. A 지구 및 B 지구 매립지의 하류구배 구간에서 실시한 탐사의 결과는 본 역의 지하수위 분포 구간인 3내지 5 m 영역에서 그 전기 비저항치

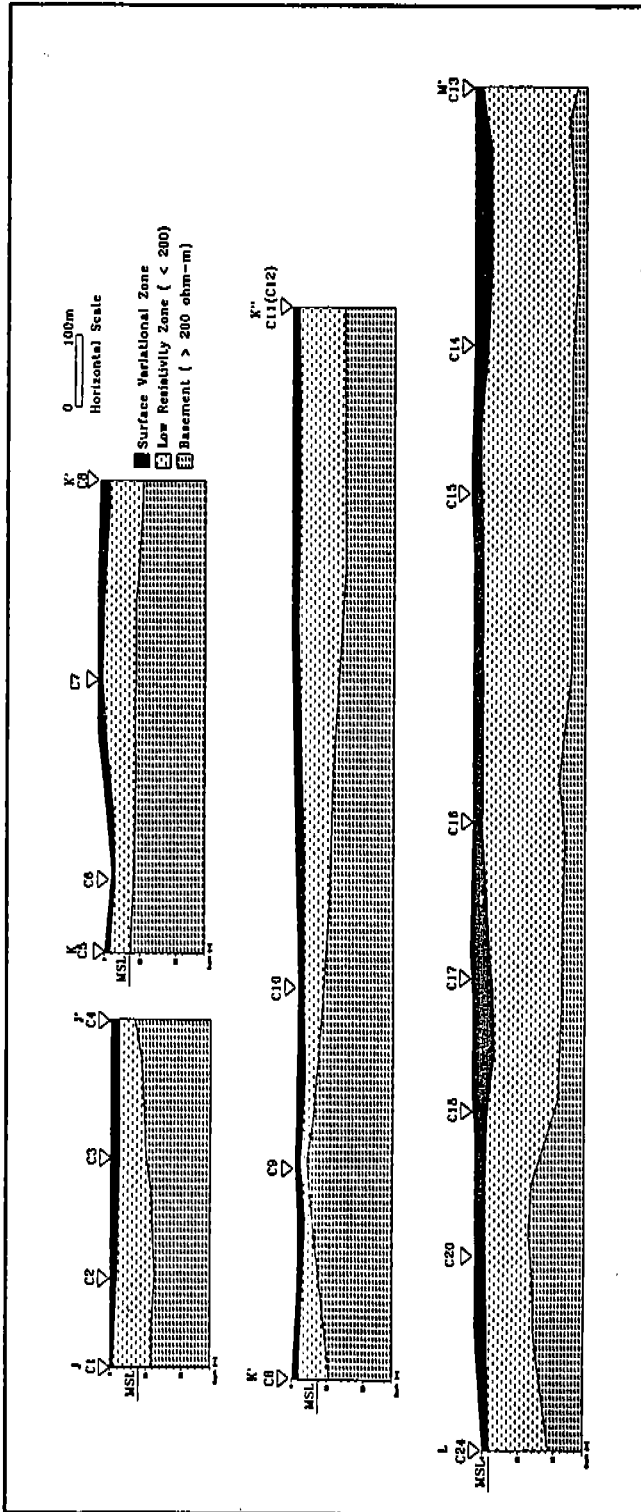


Fig. 13. Geoelectric sections around Nanji-Do Landfill.

가 10내지 30 ohm-m로 매우 낮게 나타났으며 이러한 사실은 난지도 매립지에서 발생한 침출수가 한강변으로 이미 분산되었으며 이러한 오염된 지하수가 한강으로 유입되고 있음을 강력히 시사한다.

한편, 매립지의 북측 및 북동측을 감싸 흐르는 셋강의 북단에 위치한 C1, C2, C3 및 C4 지점과 셋강에서 북동쪽으로 약 250 m 지점에 위치한 C5, C6 지점에서의 자료는 지하 약 11내지 30 m 지점부터 250내지 750 ohm-m 이상의 대체적으로 큰 전기비저항층이 존재하는 것으로 나타났다. 이 고비저항층은 기반암으로 판단되며 기반암 상부에는 특별하게 나타나는 저비저항대는 관찰되지 않는다. 이러한 결과는 난지도에서 유출되는 침출수가 셋강 하도까지만 영향을 미치고 그 건너편에는 큰 영향을 미치지 못했음을 입증한다. 이와는 대조적으로 셋강변이나, 셋강의 남서단의 자료인, C5부터 C6까지의 자료는 30 ohm-m 이하의 비저항층이 지표에서 심도 25내지 45 m 영역까지 존재하는 양상을 보여준다. 이러한 사실은 이 구간이 난지도 매립지의 침출수 영향을 받고 있음을 암시하며 실제, C8 지점에 인접한 다목적 관측정에서 Hermit 2000으로 측정한 수비전도도와 침출수 및 지하수의 혼합수 온도가 배경수질에 비해 훨씬 높은 현상과도 잘 일치되는 결과이다.

이러한 난지도 주변의 자료는 결국 난지도 침출수의 영향권이 남서쪽으로는 한강까지 그리고 북단과 북동 단으로는 한강의 지천인 셋강까지 미치고 있으며 이러한 침출수는 결국 지하수 혹은 셋강의 지표수를 통해 한강 하류로 그대로 흘러가고 있음을 보여주고 있다.

기타지구 수직 탐사 결과

기타 지역은 난지도 A 지구 매립지와 B 지구 매립지 사이의 지형적으로 낮은 골짜기 부분과 매립지의 사면에 해당하는 지역으로 A12, D6, D7, D8, D9, D11 지점이 이에 해당된다(Fig. 2,3 참조). Fig. 14는 이들 수직 전기 탐사의 관측치와 해석 결과를 보여준다. A12 탐사 자료는 지표로부터 약 50 m 지점부터 매우 높은 비저항층이 존재하는 것을 보여주며 이 비저항층은 이 지점의 기반암에 대비된다. 또한 D6의 자료는 이 지점 지표하 약 10 m 지점부터 비저항 8 ohm-m의 낮은 비저항층이 존재하고 있음이 탐사 결과 보여지며 이것은 이 곳에 있는 SL-13 시험정(Fig. 6 참조)에서 관측된 지하수위

와 일치하고 있으며, 이 지하수층의 비저항값이 약 7 ohm-m 정도임을 보여준다. 수직탐사 D7, D8, D9 지점은 난지도 매립지의 중앙에 위치한 골짜기 부분이다. 이들 탐사 자료의 결과는 지하 60 m까지는 고비저항층이 존재하지 않는 것으로 나타난다. 이 지역에서 수행된 시험시추나 지표지질조사 결과가 이 구간이 단층대인 것으로 밝혀진 사실을 뒷받침하는 또 다른 증거이다. 이 구역은 결국, 단층대에 따른 2차 유효 공극이 발달되어 있으며 이러한 구조를 따라 기저 침출수가 비교적 쉽게 하향 이동하고 있어 지하 심부까지 침출수의 영향을 받고 있음을 암시한다. D11 지점은 다른 수직탐사와는 매우 다른 양상을 보여주고 있으며 지하 심부에 특이한 저비저항층이 존재하지 않고 있는 것으로 나타났다. 그러나 이 지점에 있는 시험정 SL-14의 자료는 지표하 28 m 지점에서 지하수면이 확인되었다고 보고되어 있어 매우 상반된 결과를 보여주고 있다. 이러한 상반된 결과를 보여주는 이유는 정확히 추정 할 수는 없으나 탐사상의 문제가 있었거나 또는 이 지역에서 확인된 지하수가 기저지하수가 아닌 제한된 시기와 지점에 국부적으로 존재하는 지하수일 가능성이 있다.

난지도 매립지내의 수평 탐사 결과

Fig. 15는 난지도 매립지에서 얻어진 수평 탐사의 자료는 2차원 보간을 통해 등수치선도로 작성한 것이다. A 지구 매립지의 수평 탐사 결과에서 볼 수 있듯이 축선 H8, H9와 축선 H2가 교차하는 부위에 2 ohm-m의 매우 적은 전기 비저항치가 관찰되며, 실제로 이 지역은 탐사가 실시되는 동안, 자분(自噴)에 의해 매립지의 표면으로 침출수가 분출되고 있는 지역이다. 또한 H6과 H7 축선 사이에 난지도의 장축 방향으로 일정한 방향성을 갖는 이상대가 존재함을 관측할 수 있다. 이러한 장축 방향의 이상대는 매립당시에 H6 축선을 따라 존재하던 차량 도로와 제방의 방향과 일치하는 것으로 미루어 이 도로의 하부와 제방 부위가 상대적으로 고화되어 상대적으로 높은 비저항을 보임에 따라 이 방향에 평행한 비저항치 값이 H6 축선 쪽으로 갈수록 증가하는 형태로 나타난 것으로 추정된다. 전반적인 A 지구 수평 탐사의 결과는 비록 위치에 따라 차이는 있으나 난지도 A 매립지의 중심부위가 상대적으로 주변 부위에 비해 낮은 비저항을 보이는 경향이 있다. 이러한 수평 탐사의 결과는 매립지의 중심 부위의 지

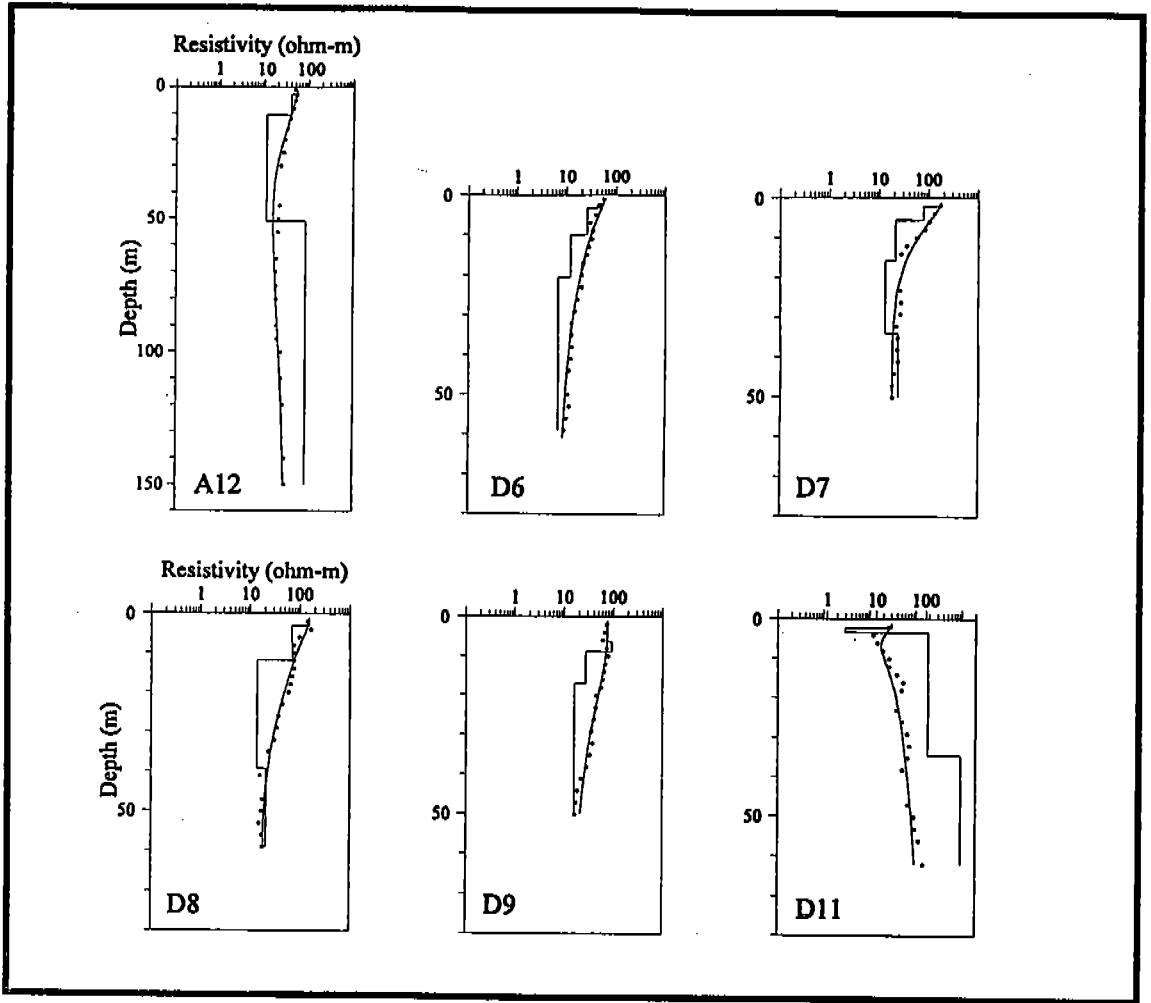


Fig. 14. Resistivity sounding curves and interpretations in the area between Site A and B (point=observed values, smooth curve=calculated values, stepwise line=resistivity model).

하수면이 상대적으로 주변보다는 높게 형성되어 있을 가능성을 보여주고 있다.

B 지구 매립지의 수평 탐사 결과는 전반적으로 A 지구의 수평 탐사 결과보다 약간 높은 겉보기 비저항치를 보이고 있다. 이러한 결과는 전술한 수직탐사의 결과와도 잘 부합된다. 이렇게 상대적으로 A 지구보다 B 지구의 비저항치가 높은 이유는 B 매립지의 지하수위가 A 지구보다 낮게 형성되어 있거나 매립된 물질이나 지하수가 상대적으로 높은 비저항을 지니고 있을 가능성 등을 들 수 있다. B 지구 매립지의 수평 탐사 결과도에 나타나는 겉보기 비저항의 최소치는 약 5 ohm-m로 축선 H12와 H15의

교차 부위이며 B 지구의 중심 부위에 해당된다. 이러한 중심 부위의 낮은 비저항의 결과는 주변부에 비해 중심 부위가 더 많은 지하수의 영향을 받고 있음을 간접적으로 시사한다. 만약 이러한 이유 이외에 중심 부위가 낮은 비저항을 보이는 또 다른 근거를 제시한다면 지형적으로 형성된 주변의 사면에 의해 사면에 가까운 주변부위가 매질의 비저항과는 상관 없이 지형적 요인에 의해 높은 비저항을 보일 가능성도 들 수 있다. 또한 B 지구의 최소값은 A 지구의 최소값에 비해 두배 이상의 값을 보이고 있으나 B 지구 역시 매립지가 아닌 일반 타 지역에서 얻어진 자료를 근거한 절대적인 기준에서 보아 매우 낮

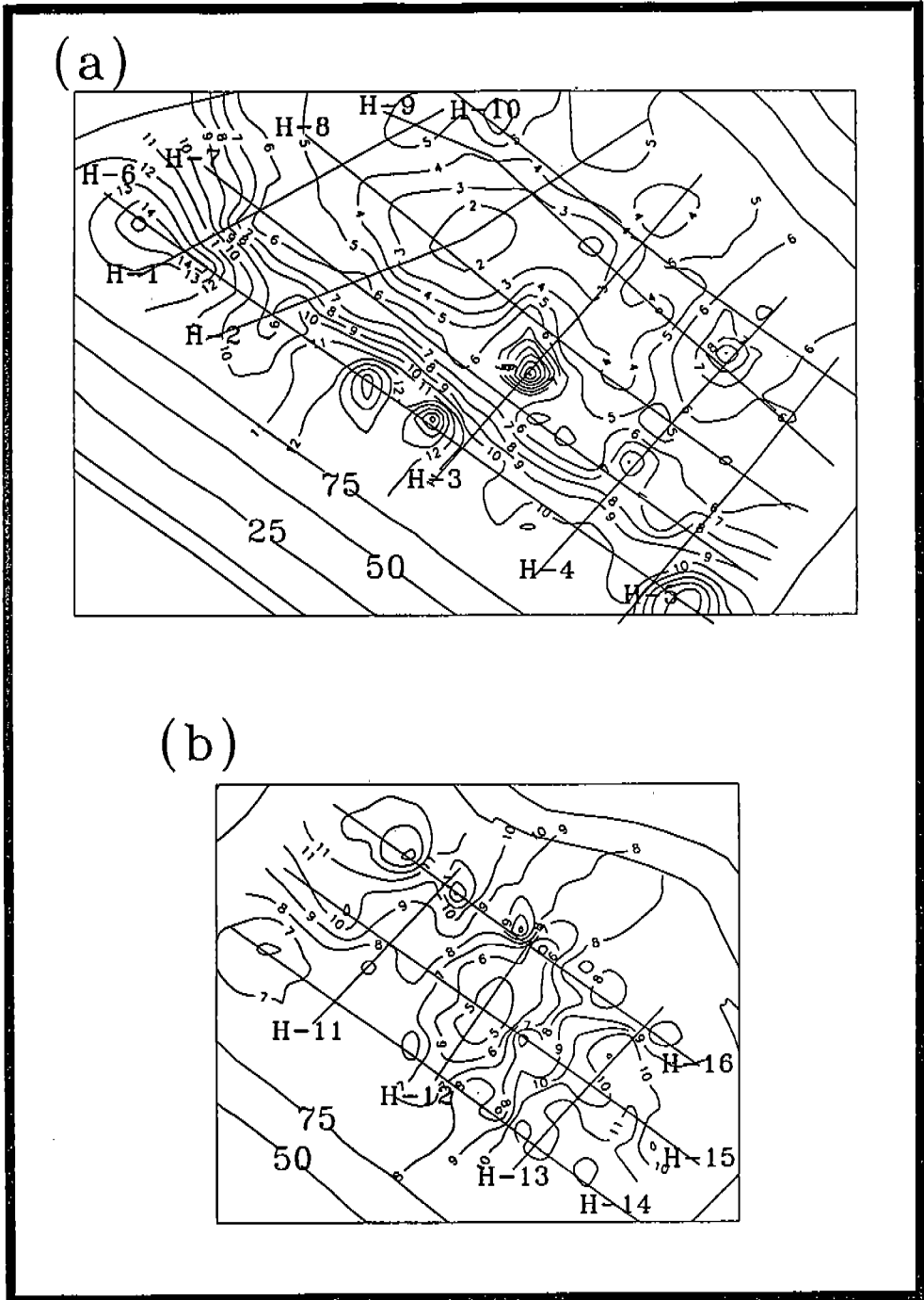


Fig. 15. (a) Map of apparent resistivity in Block A of Nanji-Do Landfill with Wenner spacing $a=40m$.
(b) Map of apparent resistivity in Block B of Nanji-Do Landfill with Wenner spacing $a=40m$.

은 겉보기 비저항을 보이고 있다. 이는 B 지구도 오염된 기저 지하수나 응축-부유 침출수등의 지하수의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. B 지구에서는 H12와 H13 축선의 중간 부분에 난지도 매립지의 단축 방향과 평행한 이상대를 보여주고 있는 것이 A 지구에 나타나는 장축 방향의 이상대와 다른 점이다. 그러나 B지구가 매립당시 차량 도로가 A 지구와는 달리 단축 방향 형성되어 있었음을 감안한다면 이러한 결과는 결국 A 지구에서 설명한 바와 같이 매립이 진행되던 당시의 기존 제방이나 도로가 전기 비저항 이상대를 형성할 가능성을 시사한다. 이러한 점은, 매립이 진행되는 당시의 구조들이 매립이 완료된 이후에도 매우 중요한 지질요소로서 작용할 수 있음을 보여준다.

결론 및 의견

난지도에서 수행된 전기 비저항 탐사는 난지도 매립지와 주변에서의 지하 침출수와 관련된 매우 유용하고도 기본적인 자료를 제공하고 있다. 매립지에서의 수직 탐사 자료는 본 매립지가 일정 심도 이하에서는 물론 상층부에서도 오염된 침출수에 의해 크게 지배되고 있음을 보여주고 있으며, 이러한 침출수의 근본적인 처리가 해결되지 않는 한 본 매립지의 개발 및 안정화 사업은 곤란하다고 판단된다. 매립지 내에서 수행된 수직 전기 탐사들의 해석 결과는 본 매립지가 심도에 따라 침출수의 부분적인 포화로부터 완전 포화의 상태로 변화되어 가는 특징을 가지고 있음을 보여준다. 부분적인 편차는 있으나, 난지도 매립지는 해발고도 30 m 전후에서 오염된 기저 지하수대를 형성하고 있으며 이러한 기저 지하수는 난지도의 기반암층이 나타나는 심도이하까지도 영향을 미치고 있다. 또한 수직 탐사 결과, 이 기저 지하수 상부에도 부유 침출수가 상당량 존재하고 있음을 알 수 있다.

매립지에서 수행된 수평 탐사는 본 매립지의 전기 비저항 분포를 개괄적으로 보여주고 있으며 이 수평 탐사에 의한 비저항 분포는 천부에 존재하는 부유 침출수의 분포 양태를 간접적으로 추정하는데 도움이 된다. 난지도에서 수평 탐사의 결과는 비저항 이상대가 매립 당시에 형성된 차량통행도로나 제방 등에 영향을 받은 것을 알 수 있으며 이는 침출수의 분포가 매립이 이루어지는 과정 중에 형성되는 구조물들에 의해 크게 좌우됨을 추정케 한다. 이러한 점

을 감안해 볼 때, 매립지의 조성과정에서 형성하게 되는 구조물들을 효과적으로 활용하면 매립지 및 주변의 환경 파괴를 줄이면서 매립지가 조성될 수 있음을 시사한다.

난지도 주변에서 얻어진 수직 탐사 자료의 해석 결과는 난지도 일대의 기반암 상부경계는 해발고도 이하 25 m 전후에 존재하는 것으로 나타났으며 또한 낮은 비저항의 분포가 난지도 남서쪽인 한강변을 따라 분포하고 있음을 보여주고 있다. 이외는 대조적으로 난지도를 감싸 흐르는 샛강의 북동부 지역, 상암동 일대는 상대적으로 높은 비저항 분포를 보며 이는 많은 양의 침출수가 샛강을 따라 한강으로 유입되어, 샛강의 북동부 상암동 일대까지는 크게 영향을 미치고 있지 않음을 시사한다. 그러나 난지도 주변 일대의 기반암의 비저항치는 일반적인 다른 지역에서 나타나는 비저항치에 비해 매우 낮은 값으로 이 일대의 기반암은 이미 풍화된 상태에서 오염된 지하수의 영향을 받고 있으며 이 기반암들이 침출수를 차단하지 못하고 있는 것으로 판단된다.

본 연구의 전기 탐사 자료를 분석해보면 난지도의 기반암의 비저항은 200 ohm-m 이상으로 보여지며 매립장에 형성되어있을 기저 침출수나 부유 침출수에 의해 완전히 포화된 층의 비저항의 범위는 10 ohm-m 이하로 오염되지 않은 지하수에 의해 포화된 층에 비해 현저히 낮은 비저항을 가지고 있다.

본 연구에서는 비록 전기 비저항 탐사법만이 난지도 지역에 적용되었으나 타 지구물리조사가 본 지역에 적용될 때 또 다른 가치 있는 지하 정보를 제공할 것으로 판단되며, 이러한 지구 물리 탐사로는 자력 탐사나 자연전위 탐사, VLF탐사, 방사능 탐사, 단성파 탐사, 비저항 Tomography 탐사 등을 추천할 수 있다. 현재 국내에서의 매립지 지역의 물리 탐사 해석에 가장 난해한 문제점은 탐사 결과 해석을 비교할 만한 기초적인 자료의 결핍에 있다. 다시 말해 특정한 물리적 수치가 어떠한 물성의 물질이며 구조인지를 직접적으로 비교 할 수가 없다는 점이다. 이러한 문제의 해결은 매립지에서 지구 물리 자료가 충분히 축적되고 이 자료들이 각각의 경우에 따라 대비 될 수 있도록 보다 많은 탐사와 해석 결과가 수행될 때 해결될 수 있다. 또한 난지도 매립지와 같은 경우 계절적인 영향에 따라 침출수의 부존 양태가 변동 할 것으로 추정되므로 장기간의 비저항 모니터링 (monitoring)등을 통해 시간적인 변화를 측정하는 일이 요구된다.

참 고 문 헌

사 사

- 김형수, 이기화, 1993, 대화식 방법을 이용한 Schlumberger 전기 탐사 및 Magnetotelluric 탐사 자료의 1차원적 해석, 지질학회지, 29(5), p. 493-506.
- 서울특별시, 1994, 난지도 매립지 안정화 공사 기본 설계 보고서, 919p.
- 이철호, 1994, 난지도매립지 침출수에 의한 지하수 오염 특성 분석, 서울대학교, 석사학위논문, 94p.
- Benson, R., Glaccum R. A., and Noel R. M., 1988, Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration, National Water Well Association, 236p.

본 연구의 힘든 조사작업을 도와준 서울대학교 지구물리연구실 대학원생들과 한서엔지니어링직원들께 진심으로 감사드리며, 조사의 편의를 위해 지원을 해준 삼성건설 난지도설계팀 및 서울시 난지도 사업부에게도 감사드린다.