

난지도 매립장의 안정화에 따른 지질환경 변화 조사를 위한 지구물리 탐사

이기화* · 권병두** · 임형래** · 양준모**

*서울대학교 지구환경과학부 · **서울대학교 지구과학교육과

요 약

난지도 매립장의 안정화에 따른 지질환경 변화를 조사하기 위하여 탐사가 가능한 제 2 매립장 상부와 한강변에 연한 매립지의 기저지역에서 중력, 자력, 쌍극자-쌍극자, 자연전위 탐사를 수행하였다. 제 2 매립장 상부에서 수행한 중력과 자력 탐사 결과를 4 년전의 선행연구 결과와 비교하면 매립장 중앙 부분에서 밀도구배가 작아지고 복잡한 양상을 보였던 자력이상 분포가 많이 단순해진 것으로 나타난다. 이는 매립지의 안정화과정에서 침하와 복토작업이 반복되면서 매립물의 다짐작용이 순조롭게 진행되고 있는 것으로 보인다. 제 1 매립장 차수벽 밖에서 실시한 쌍극자-쌍극자 전기탐사와 자연전위탐사 결과에는 제 1 매립장 주위의 불량한 탐사환경에 의한 영향이 많이 나타난다. 제 2 매립장의 차수벽 안과 밖에서 실시한 쌍극자-쌍극자 전기탐사 결과를 비교하면 차수벽이 침출수를 어느 정도 차단하는 효과를 볼 수 있다. 제 2 매립장의 상부와 사면에서 수행한 자연전위탐사에서는 특별한 자연전위 이상은 나타나지 않으나, 하부의 차수벽 내부에서 수행한 자연전위탐사 결과에는 침출수를 모으는 집수정의 영향이 크게 나타난다.

주요어: 난지도 매립지, 중력탐사, 자력탐사, 쌍극자-쌍극자 탐사, 자연전위탐사

Kwon Byung-Doo, Lee Kiehwa, Rim Hyoungrae and Yang Junmo, 2000, Geophysical Investigation of the change of geological environment of the Nanjido Landfill due to the Stabilization Process. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 3, n. 2, p. 113-126

ABSTRACT: We have conducted multiple geophysical surveys to investigate the geoenvironmental change of the Nanjido Landfill due to the stabilization process. Geophysical surveys are comprised of gravity, magnetic, dipole-dipole electrical and SP methods. Due to the field conditions, surveys were conducted on the top surface of the landfill no.2 and southern border areas in front of landfills. The gravity anomalies obtained on the top surface of the landfill no.2 in 1999 show that the gradient of the anomaly on the central area is decreasing in comparison with that observed four years ago. The complexity of magnetic anomaly pattern is also decreasing. These facts suggest that the stabilization work of the Nanjido landfill makes some progress by compaction process due to repetitive subsidence and refilling. The dipole-dipole electrical resistivity and SP data obtained on the outside of the waterproof wall at the landfill no.1 were severely affected by unsatisfactory surface conditions. On the other hand, the dipole-dipole electrical resistivity profiles obtained on the inside and outside parts of the waterproof wall at the landfill no.2 show the blocking effect of leachate flow by the waterproof wall. Few SP anomalies are observed on the top and side surfaces of the landfill no.2, but SP anomalies obtained on the base area inside the waterproof wall strongly reflect the effect of leachate collecting wells.

Key words: Nanjido landfill, Gravity, Magnetic, SP, Dipole-dipole resistivity survey

(Lee Kiehwa, Graduate School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea; Kwon Byung-Doo, Rim Hyoungrae and Yang Junmo, Department of Earth Sciences of Education, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea. email: rhr@mantle.snu.ac.kr)

1. 서 론

우리 생활에서 환경문제가 중요한 이슈로 등장하면서 쓰레기 매립장의 위생적인 관리와 환경오염 방지 및 재활용에 대한 연구가 다양한 방법으로 진행되고 있다. 이러한 환경문제에 응용되는 지구물리탐사기법은 매립장의 구조적 안정성과 오염물의 유출 가능성 및 침출수의 유동경로 등에 관한 정보를 제공한다. 우리 나라에 산재해 있는 대규모 매립장에 대한 지구물리학적 연구로는 서울 난지도 매립장에서 권병두 등(1995)이 중력탐사와 자력탐사를 수행하여 매립물의 밀도분포를 구하고 중력 및 자력이상대에 대하여 정성적, 정량적 해석을 실시한 바 있으며, Lee and Yoon(1995)은 솔렘버저 전기비저항 탐사를 수행하여 매립물의 전기비저항 층서와 침출수 발생지역에 대한 연구를 수행하였다. 또한 이기화 등(1996a)은 매립장 상부에서 솔렘버저 전기비저항 탐사와 함께 동일 송수신기 배열 시간영역 전자탐사를 실시하여 매립물의 특성과 지하구조를 연구하였으며, 이기화 등(1996b)은 난지도에 인접한 한강변에서 쌍극자-쌍극자 전기탐사를 수행하여 얻은 매립지 경계부의 2 차원 전기비저항 분포로부터 침출수의 유출경로를 추정하였다. Lee and Yoon(1997), 이기화와 윤종렬(1998), 권병두 등(1998, 1999)은 부산시 석대매립장과 포항시 유봉산업 쓰레기매립장에서 전기탐사, 중력, 자력, VLF탐사를 수행하여 매립지 특성에 관한 연구를 수행하였다.

매립장의 환경지질학적 특성을 연구하는데 있어서 지구물리탐사 방법은 매립장의 구조와 층서, 대수층의 분포, 매립장의 규모, 매립물의 종류, 상태 및 지하 오염물질의 분포범위와 거동, 매립장의 구조적 안정화정도, 토지의 재활용 가능성을 진단하는데 정성적, 정량적 자료를 얻기 위해 사용된다(Ward, 1990).

이번 연구의 대상인 난지도 매립장은 서울시 마포구 상암동에 위치하며, 1973 년 3 월부터 1992 년 까지 반입된 생활쓰레기 및 산업폐기물로 인하여, 전체면적 53 만평에 매립용량 약 1억 m³의 대규모 인공산을 형성하고 있다. 난지도 매립장은 한강변에 바로 인접하여 철저한 위생관리 등이 요구되고 있으나, 매립당시 위생기반시설의 구축이나 오염방지 시설을 제대로 설치하지 않은 채 운영되어 침출수의 유출, 매립가스의 발생, 산업폐기물 매립구역의 대규모 침하 등의 현상이 나타나 심각

한 환경문제를 유발해 왔다. 1992 년 서울시가 “난지도 매립지 환경오염 방지 및 안정화 대책 기본계획”을 발표한 후 난지도 매립지의 위생적 관리와 환경오염 방지 및 매립지의 재활용에 관한 연구가 활기를 띠기 시작하였으며, 이후 현재까지 반복적인 복토작업에 의한 매립지 안정화사업 및 인근에 건설되는 상암동 월드컵 주경기장의 주변 환경 조성과 연계된 매립지 재활용계획이 추진되고 있다. 안정화사업의 주요 과제인 침출수의 유출을 방지하기 위하여 매립지를 둘러싸는 차수벽이 설치되었고, 침출수와 유수를 수집하는 집수구와 배수구가 설치되어 있다.

이번 연구는 1995~1996 년도에 걸쳐서 수행된 난지도 매립장에 관한 지구물리학적 연구(권병두 등, 1995; 이기화 등, 1996a,b)의 후속연구로서 약 4 년이 지난 시점인 1999 년 10 월에 중력탐사, 자력탐사, 전기비저항탐사, 자연전위(SP) 탐사를 수행하였다. 제 1 매립장은 현재도 진행 중인 복토작업 때문에 생긴 늪지와 각종 작업용 기자재들로 인하여 상부에서는 탐사를 수행하지 못하였으며, 제 2 매립장의 상부에서 수행한 중력 및 자력 탐사자료를 비교 분석하여 매립장의 물리적 특성 변화의 양상과 안정화사업의 성과를 해석하였다. 전기비저항탐사와 자연전위탐사는 침출수나 유수의 경로 추정과 차수벽의 효과를 검증하기 위하여 실시하였으며, 향후 매립지의 재활용계획 수립시 참고자료로 이용될 수 있을 것이다.

2. 매립지의 개요 및 주변 지형

연구지역은 북위 37° 33' 7.4" ~ 37° 35' 58.3" , 동경 126° 50' 44.6" ~ 126° 53' 58.3" 에 해당되며, 행정구역상 서울특별시 마포구 상암동에 속한다. 난지도 매립장을 중심으로 남쪽에 한강이 북서방향으로 흐르고 북쪽에는 난지천이 남서방향으로 흐르고 있으며, 제 1 매립장의 서부경계에서 난지천은 한강과 합류된다. 매립장을 중심으로 반경 7 km이내에는 고도 300 m 이하의 야산이 완만한 경사를 이루면서 나타나는데, 난지도 매립장의 북쪽으로 대덕산(126.8 m)과 망월산(179.4 m), 남으로 증산(75.8 m)과 우장산(98.9 m)이 위치한다. 연구지역 내에는 선캠브리아기의 편마암류와 이들을 관입한 중생대 관입암류, 그리고 이들과 부정합을 이루는 제 4 기 충적층이 분포한다. 난지도 매립장은 한강 하도의 제 4 기 하성충적층 위에

위치하고 있다(Fig.1).

난지도 매립지 안정화사업의 일환으로 난지도 주변 18 개 공에서 실시된 시추자료에 의하면, 매립지 주변의 층서구조는 매립층, 충적층, 풍화대층, 기반암층으로 구성된다. 매립층은 각종 쓰레기와 복토재의 혼합층으로 연탄재, 각종 프라스틱류, 비닐류, 유리조각, 벽돌, 벽재, 슬러지, 실트질 모래 등으로 이루어지고, 충적층은 한강과 그 지류를 따라 운반, 퇴적되어 형성된 미고결 상태의 하상 충적층으로 평균 21 m 정도의 두께를 나타내며 점토, 모래, 실트로 구성된 상부 세립층과 모래, 자갈로 구성된 하부 조립층으로 구분된다. 또한 풍화대층은 기반암의 풍화로 형성된 층으로 암석 조직이 완전 분해되어 토질화 되었으나, 모암의 원 구조는 보존하고 있는 상태이다. 기반암층은 호상 흑운모편마암과 화강암질 편마암이 불연속적인 파쇄대면이나 절리를 따라 암석의 내부까지 심한 풍화를 받아 암체가 암괴상으로 분리를 시작하

는 상태로 나타나고 있다(서울특별시, 1994).

매립이전인 1978 년에는 고도 2~8 m의 평탄한 지역이던 난지도에는 1992 년 쓰레기매립이 종료되면서 고도 94~98 m의 거대한 매립장이 형성되었으며, 현재 면적 1,094,000 m²의 제 1 매립장과 707,000 m²의 제 2 매립장으로 분할되어 있다. 매립장에서는 현재도 안정화공사가 진행중이고, 야외탐사 당시에 제 1 매립장 상부에는 곳곳에 높지가 형성되어 접근이 용이하지 않았다.

3. 중력 탐사

3.1. 중력 측정 및 보정

중력탐사는 연구 대상체내의 밀도 차에 기인하는 중력이상을 측정하고 이를 해석하는 지구물리 탐사 방법으로 지하의 밀도 이상체 분포와 지질구조에 관한 정보를 제공한다. 이 연구에서 사용한 중력계는 LaCoste-Romberg Model G이다. 중력보

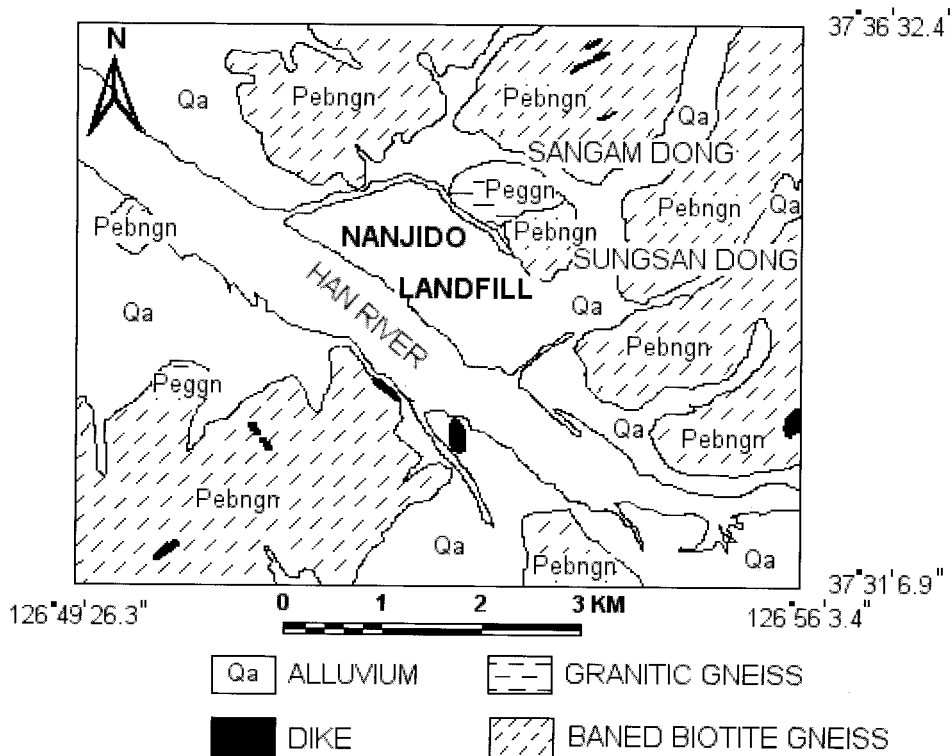


Fig. 1. Geologic map of the Nanjido landfill and vicinity.

정에 필요한 측정점들의 고도는 RED2A 광파측정기로 측정하였으며, 난지도 매립지 북서쪽에 위치하는 대덕산 정상(고도: 126.40 m)을 이용하였다. 중력측정은 탐사가 가능했던 제 2 매립장 상부에서 측선간격 50 m, 측정간격 50 m로 총 6 개 측선의 59 개 측정점에서 측정하였다. 광역이상 제거를 위하여 필요한 난지도 매립장 주변지역에 대한 중력측정은 4 년간의 시차에 의한 변화는 거의 없을 것으로 생각하여 선행연구(권병두 등, 1995)의 결과를 그대로 이용하였다. 각 측정점의 좌표는 편이상 서울 지형도상의 TM좌표계로 표시하였다 (Fig. 2).

중력측정치로부터 중력이상을 구하기 위하여서는 탐사대상체와 주변압과의 밀도차에 의한 중력 변화량만이 필요하므로, 다른 요인에 기인되는 효과를 제거하는 중력보정이 필요하다. 이전의 연구결과와 대비하기 위하여 중력보정 방법들은 권병두 등(1995)의 방법을 따랐다. 중력계내의 스프링의 크립현상으로 생기는 기계적인 오차는 기준점에서 중력측정을 반복 수행하여 보정하였고, 탐사기간 동안 각 측정점에 대한 천체의 상대적인 위치 변화로 생기는 조석변화량은 컴퓨터 프로그램을 이용하여 보정하였다.

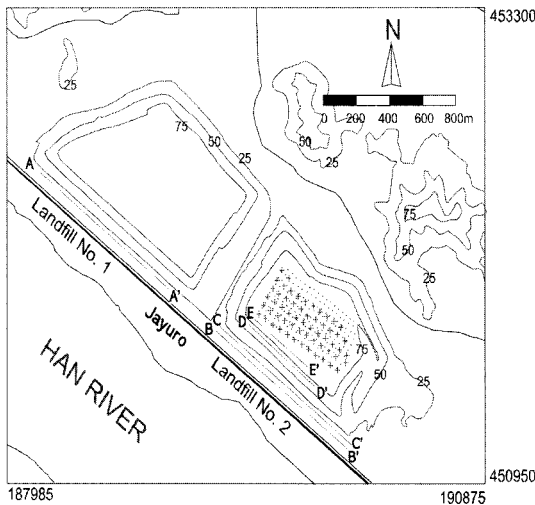


Fig. 2. Topographic map of the study area showing gravity(+) and magnetic(·) measurement points and dipole-dipole DC and SP survey profiles. Contour interval is 25m. Numerals denote coordinates of the TM projection system.

난지도 매립장이 주변보다 85 m 이상 돌출한 형태이므로 중력보정을 위한 기준고도를 110 m로 설정하여 프리에어 보정을 실시하였다. 매립장 주변지역의 천부 지하지질구조와 매립장내의 밀도변화를 함께 해석하기 위해서 부계보정을 위한 측정점과 기준면 사이의 밀도는 매립물의 평균밀도를 취하였다. Nettleton(1954)의 방법으로 추정된 매립물의 평균밀도는 1.8 g/cm³으로 나타났다.

이번 연구에서 중력탐사는 소규모 지역에서 조밀한 측정간격으로 실시되었으며 측정치의 변화폭도 그리 크지 않으므로, 선행연구와 마찬가지로 미세한 지형변화를 잘 반영할 수 있는 Talwani와 Ewing(1960)의 방법을 이용하여 지형보정을 실시하였다. 이 방법은 임의의 지형을 여러 개의 다각형 판을 이용하여 표현하고, 측점에 대한 다각형 판의 입체각을 이용하여 지형보정을 실시하는 방법이다. 난지도 매립장 주변의 지형효과를 계산하기 위하여, 매립장을 중심으로 반경 3.5 km 내의 범위에서, 디지털라이저(digitizer)를 이용하여 지형도에서 5 m 간격의 등고선을 따라 지형자료를 읽고, 이것을 이용하여 입체각을 계산하여 지형보정을 실시하였다. 또, 난지도 남쪽에 위치하는 한강은 북서방향으로 거의 직선에 가까운 형태로 흐르고 있으므로, 한강에 의한 지형효과를 보정하기 위해서 한강을 축 방향으로 무한히 뻗어있는 이차원 형태로 가정하고 지형보정 값을 계산하였다.

3.2. 중력 역산 및 해석

이번 연구에서는 제 2 매립장 상부에서 과거보다 2 배정도 많은 측정점에서 중력을 측정하였으므로 보다 정밀한 이상도의 작성이 가능하였다. Fig.3은 매립장 상부의 프리에어이상도로서 고도에 민감히 반응하여 중력이상의 모양이 매립지 지형과 비슷한 양상을 보이며, 최대 이상폭은 2.2 mgal 정도로 나타난다. 한편, Fig.4는 제 2 매립장 상부의 부계이상도로서 0.15~1.4 mgal 정도의 변화를 보인다. 제 2 매립장 북서부에서 양의 이상값이 나타나며, 매립장 중앙에서 북동방향으로 상대적으로 주변의 매립장 동쪽과 남쪽의 외벽 부근보다 더 높은 이상값이 나타난다. 선행연구(권병두 등, 1995)의 부계이상도(Fig.5)와 비교해 보면, 매립장 중앙부와 그 주변의 밀도 양상이 선행 연구결과와는 차이를 보임을 알 수 있다. 이런 결과는 매립물 자체의 변화라기 보다는 반복적인 복토작업과 함께 계속 진행되는 매립장의 침하현상에 의한 매립

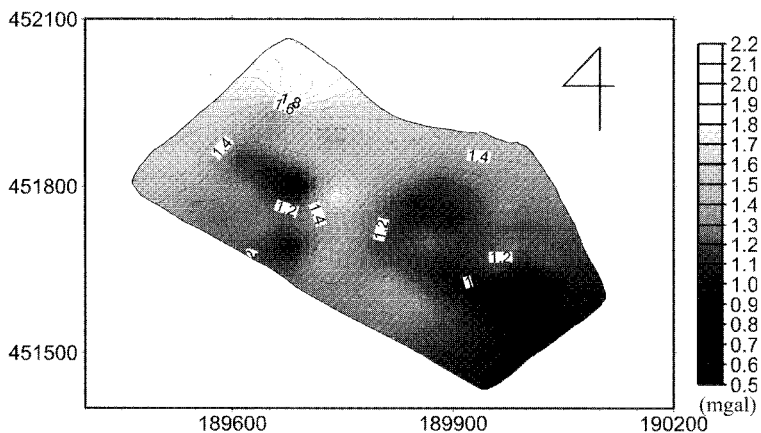


Fig. 3. Free-air anomaly map of gravity data obtained at the Nanjido landfill no.2 in 1999. Contour interval is 0.2 mgal.

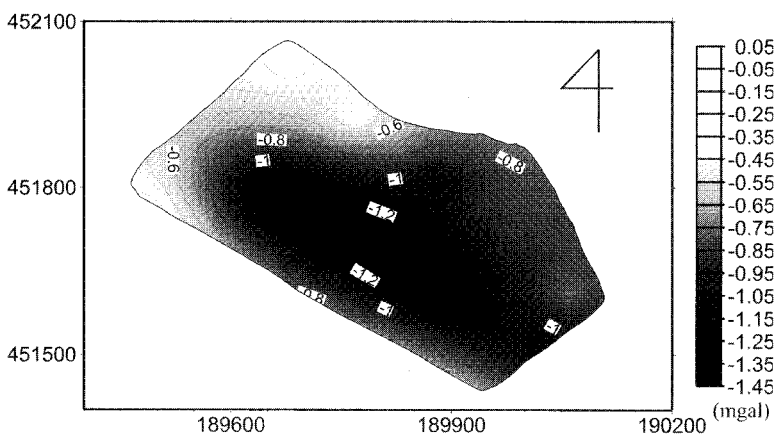


Fig. 4. Bouguer anomaly map of gravity data obtained at the Nanjido landfill no.2 in 1999. Contour interval is 0.2 mgal.

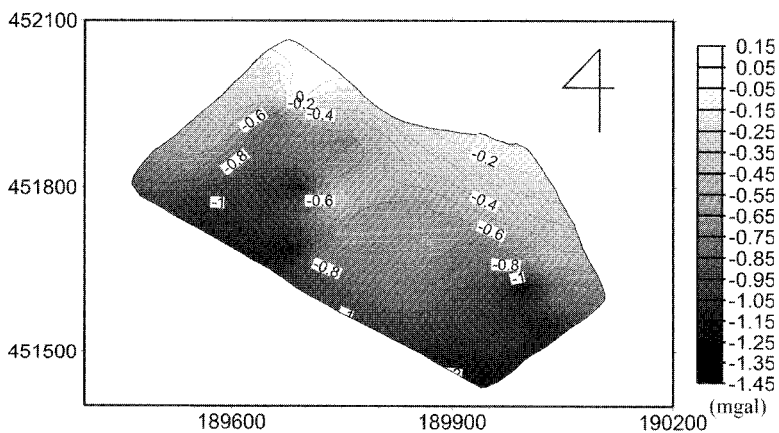


Fig. 5. Bouguer anomaly map of gravity data obtained at the Nanjido landfill no.2 in 1994. Contour interval is 0.2 mgal.

물의 다짐작용이 진행된 결과로 판단된다. 즉, 매립장의 중앙부에는 계속되는 복토작업으로 매립물의 평균밀도가 증가하며 안정화가 촉진되는 경향이 나타나나, 변두리 지역이나 매립장의 사면은 구조적 불안정성 때문에 다짐작용이 상대적으로 미약할 수밖에 없어 현재와 같은 이상값의 분포를 보인다고 해석할 수 있다. 한편 매립장 북서부에서 나타나는 양의 이상대는 선행연구의 결과와 비교해서 큰 변화가 없는데, 이는 초기에 매립된 건축폐자재의 영향이 여전히 크게 나타난다고 추정해 볼 수 있다.

중력탐사자료로부터 매립물의 밀도분포를 구하기 위하여 삼차원역산을 수행하였다. 본 연구에서는 비선형적인 역산문제를 계산하는데 있어서 고온으로 가열되어 분자의 운동상태가 자유로웠던 물질이 서서히 식어가면서 에너지가 최소가 되는 과정을 최적화하는 문제에 도입하여 확률적으로

접근하는 방식 중의 하나인 Simulated Annealing 기법을 도입하여 역산을 수행하였다(오석훈 등, 1998).

밀도역산을 위한 모델은 선행연구와의 비교를 위하여 최대한 유사한 모델을 설정하였다. 제 2 매립장의 모델로 각각 두께가 다른 총 4 개의 층, 각 층을 18 개의 블록으로, 즉 총 72 개의 블록으로 나누었는데, 이는 선행연구의 경우와 비교해서 층의 수는 동일하고 블록의 수는 2 배 증가한 모델이다. 그러나 이번 중력탐사에서는 과거보다 측정점의 수가 2 배 증가했기 때문에 이러한 블록의 설정은 비교적 타당하다고 생각한다.

각 층별 역산결과(Fig.6)를 보면, 전반적으로 매립장 상부에서 하부로 갈수록 밀도가 증가하며 매립장 중앙부의 밀도가 주변보다 상대적으로 높다. 또, 각 층의 밀도분포는 서로 큰 차이가 없음을 볼 수 있는데, 이러한 결과는 그 동안의 안정화공

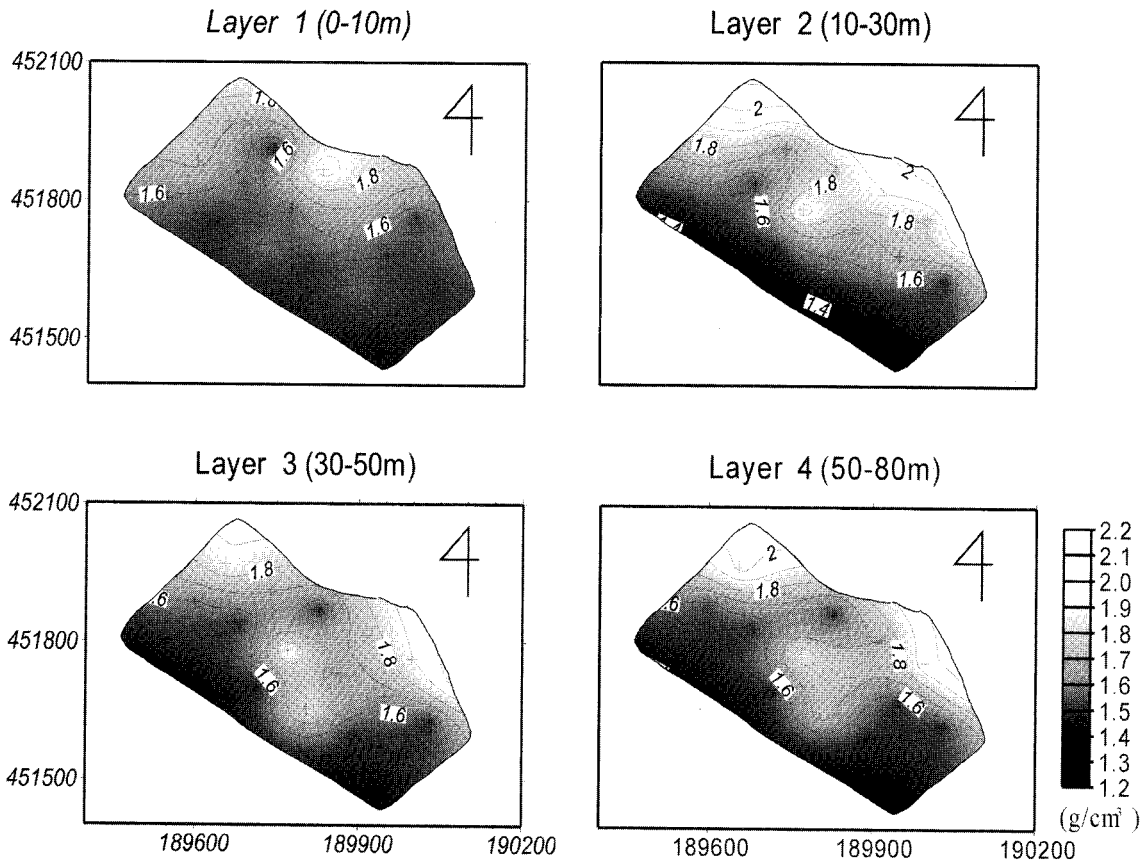


Fig. 6. Density distribution obtained by cell inversion of gravity data obtained at the Nanjido landfill no.2 using the simulated annealing method. Contour interval is 0.2 g/cm³.

사로 인하여, 선행연구에서 상대적으로 저밀도 지역이었던 매립장 중앙부와 불안정했던 수직적 밀도분포가 안정화되었다는 사실을 뒷받침해 준다.

4. 자력 탐사

암석의 대지술 차이에 의해 유발된 지구자기장의 변화를 측정하는 자력탐사는 매립장 하부의 기반구조를 조사하거나 매립물내의 자성물체 탐지에 유용하다. 자력탐사는 Scintrex ENVI GRAD 핵자력계를 사용하여 탐사가 가능한 제 2 매립장 상부에서 선행 연구(권병두 등, 1995)와 동일하게 30 m간격의 격자망으로 총 190 여개의 측정에서 총 자기력을 측정하였다(Fig. 2). 지구자기장의 일변화에 의한 영향을 보정하기 위하여 자력기준점을 설치 운영하였으며, 탐사기간 중 지구자기의 일변화량은 최고 30~40 nT 정도로 관측되었으며, 자기 폭풍과 같은 현상은 나타나지 않았다.

자력탐사 자료를 이용하여 지하 지질구조를 해석하기 위해서는 지하이상체 이외의 원인으로부터 생길 수 있는 자력효과를 제거하여야 한다. 이를 위하여 측정치에서 IGRF(International Geomagnetic Reference Field)를 제거하는 정규보정을 실시하였고, 임의의 복각을 가지는 지역에서 조사된 자력 이상을 복각이 90° 인 지역 즉, 극지방에서 나타나는 자력효과로 변환시키는 자극화 변환(Reduction

To the Pole)을 실시하였다.

Fig. 7은 난지도 제 2 매립장 상부에서 측정된 총자력 이상도이다. 총자력 이상값은 최대 4600 nT의 차이를 나타내며, 이상값의 분포는 매립물 내의 자성물질에 기인하는 국부적 변화 양상을 보인다. 남서부에는 낮은 자력이상값이 나타나는데 이는 중력이상도에 낮은 이상값을 보이는 지역과 거의 일치한다. 이 곳에는 밀도와 자성이 낮은 생활쓰레기가 집중적으로 매립된 것으로 여겨지고, 남서경계부를 따라 나타나는 양의 이상값은 매립장 외벽을 쌓을 때 사용된 건축폐자재의 영향으로 생각된다.

선행연구(권병두 등, 1995)의 자극화이상도(Fig.8)에서는 자력이상값이 4000~-2500 nT정도의 범위를 보이나, 이번 연구 얻은 자극화이상도(Fig.9)에서는 4000~-1000 nT정도의 범위를 보인다. 선행연구의 자극화이상도(Fig.8)에서는 자력이상값들의 분포가 다소 복잡한 양상이지만 전반적으로 남서방향에 양의 이상값을 보이고 북쪽으로 음의 이상값이 나타나고 있다. 반면에, 이번 연구의 자극화이상도(Fig.9)에서는 남서방향에 양의 이상값과 북서방향의 음의 이상대가 나타나는 경향은 유사하나 이전의 복잡하고 작은 규모의 이상대들이 현재의 이상도에서는 통합되어 비교적 단순해진 형태로 나타난다. 이는 선행연구 시기 이후 침하가 계속 되어 왔고, 매립장 상부의 안정화 공사의 일환으로 침

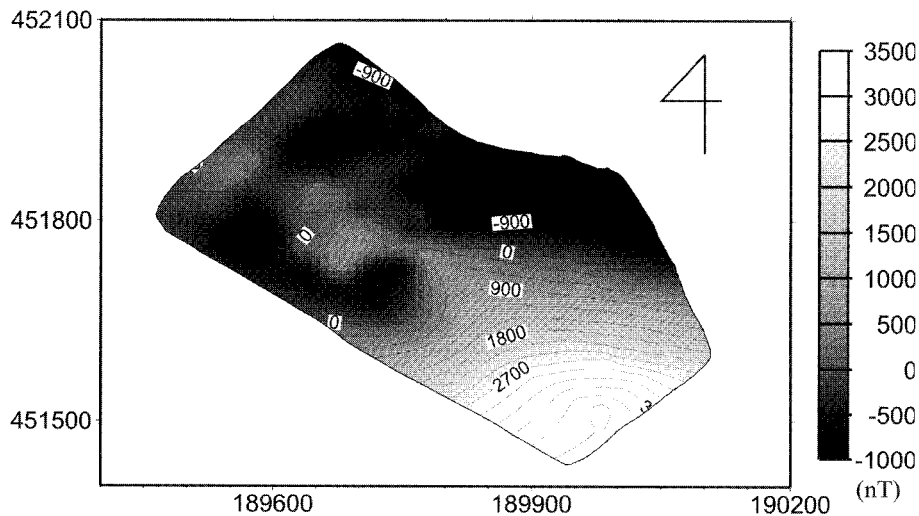


Fig. 7. Total magnetic anomaly map of the Nanjido landfill no.2 obtained in 1999. Contour interval is 300 nT.

하된 지역에 자기이상을 갖지않은 일반적인 토사로 계속적인 복토작업이 이루어졌다. 이로 인하여 지표면으로부터 자력이상체인 매립물의 깊이가 깊어지고 매립물과 흙이 혼합되면서 안정화 효과가 나타나고 있는 것으로 해석된다.

5. 쌍극자 - 쌍극자 전 기 탐 사

5.1. 자료의 획득

난지도 주변 지역의 오염상태를 조사하기 위하여 한강변에 연한 난지도 매립장 의 남쪽 하부에

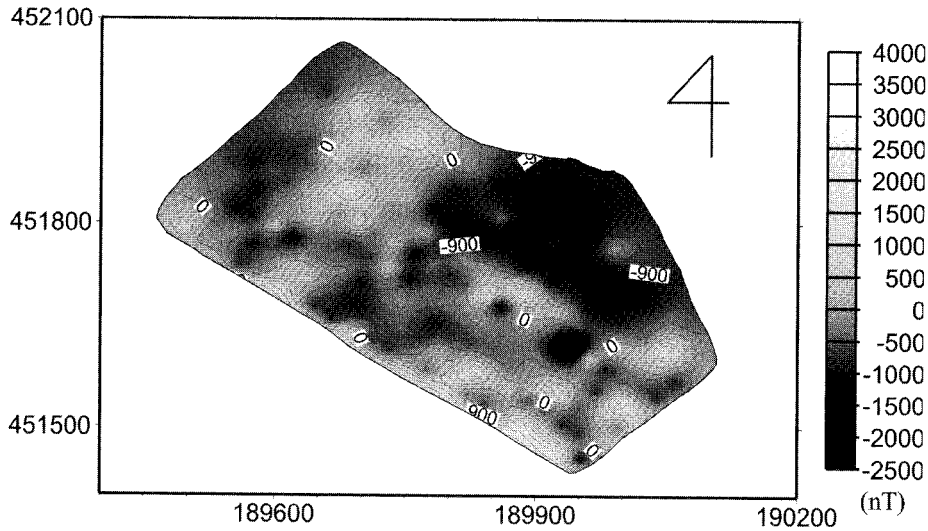


Fig. 8. Reduced-to-pole magnetic anomaly map of the Nanjido landfill no.2 in 1994. Contour interval is 300 nT.

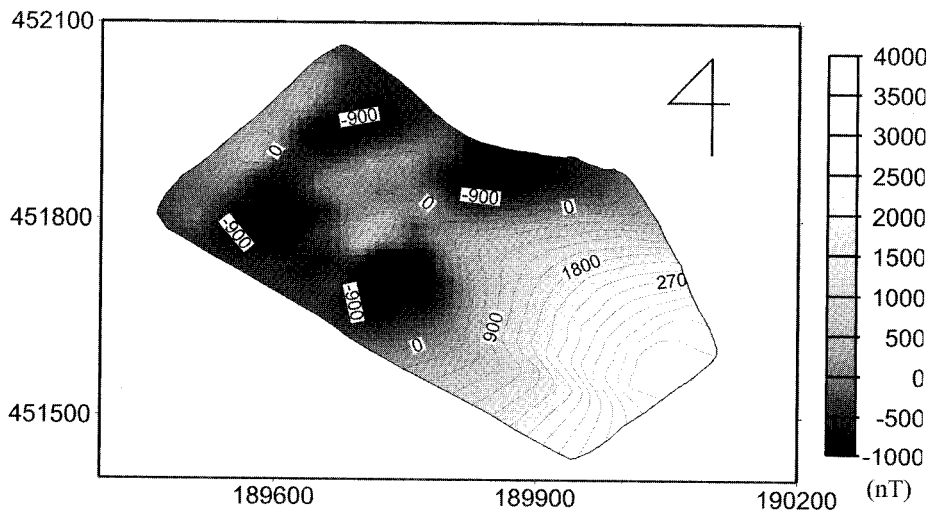


Fig. 9. Reduced-to-pole magnetic anomaly map of the Nanjido landfill no.2 in 1999. Contour interval is 300 nT.

서 3 개의 측선을 설정하여 쌍극자-쌍극자 전기탐사를 수행하였다(Fig. 2 참조). 선행연구(이기화 등, 1996)의 전기탐사 측선은 매립지에서 한강 쪽으로 약 500 m 정도 떨어진 지역에 위치하였으나 이후 포장도로로 바뀌어서 같은 지역에서는 탐사를 수행할 수 없었고, 이번에는 측선 설정이 가능한 매립지 직하부 도로변(자유로) 지역에서 탐사를 수행하였다. 측선 A-A'는 제 1 매립장 중앙을 기준으로 차수벽 바깥쪽에서 약 900 m 길이로 측정하였고, 측선 B-B'와 C-C'는 제 2 매립장 중앙 하부에서 차수벽 안쪽과 바깥쪽에서 평행하게 약 1 km 길이로 측정하였다. 전극의 배열간격은 모두 50 m를 유지하였다. 쌍극자-쌍극자 탐사는 다른 전기비저항탐사에 비해 노력이 많이 들지만, 탐사 지역의 이차원적인 전기비저항 분포단면을 보여주는 대표적인 방법이다. 이번 탐사의 목적은 수평적, 수직적 전기비저항분포로부터 기반암의 심도 및 충적층 발달지역과 파쇄대 존재 가능지역을 추정하고, 이미 설치된 차수벽의 차수효과를 확인하는데 있다. 측선 주변에서 전기탐사에 영향을 미

칠 수 있는 구조물로는 인접한 자유로 지하에 설치되어 있는 전선 등을 고려할 수 있다. 측선 중간 중간에 물이 고이거나 흐르는 지역이 있어 전극 설치가 불가능한 경우는 측점을 수 m 이동하여 측정하였다.

5.2. 쌍극자-쌍극자 탐사 해석

Fig. 10은 제 1 매립장을 둘러싸고 있는 남쪽 차수벽 바깥쪽에 위치한 A-A' 측선을 20 개의 전극을 50 m간격으로 측정한 쌍극자-쌍극자 탐사단면도이다. 관측된 가단면도 상에는 심부의 고비저항대를 제외하고는 모두 100 ohm-m 이내의 저비저항대가 나타남을 알 수 있다. 실제로 역산한 단면을 보면 표층에서 약 50 m 정도의 깊이까지는 10 ohm-m 내의 비저항값을 보이고, 50~100 m 사이에는 고비저항대가 존재하고 있으나 그 보다 더 깊은 곳에는 다시 낮은 비저항대가 나타나는 삼층 구조로 해석된다. 그러나 탐사시 흘려준 전류가 약 100 mA 정도라서 두께 약 50 m 정도의 전기비저항이 매우 낮은 표층으로 대부분의 전류가 흘

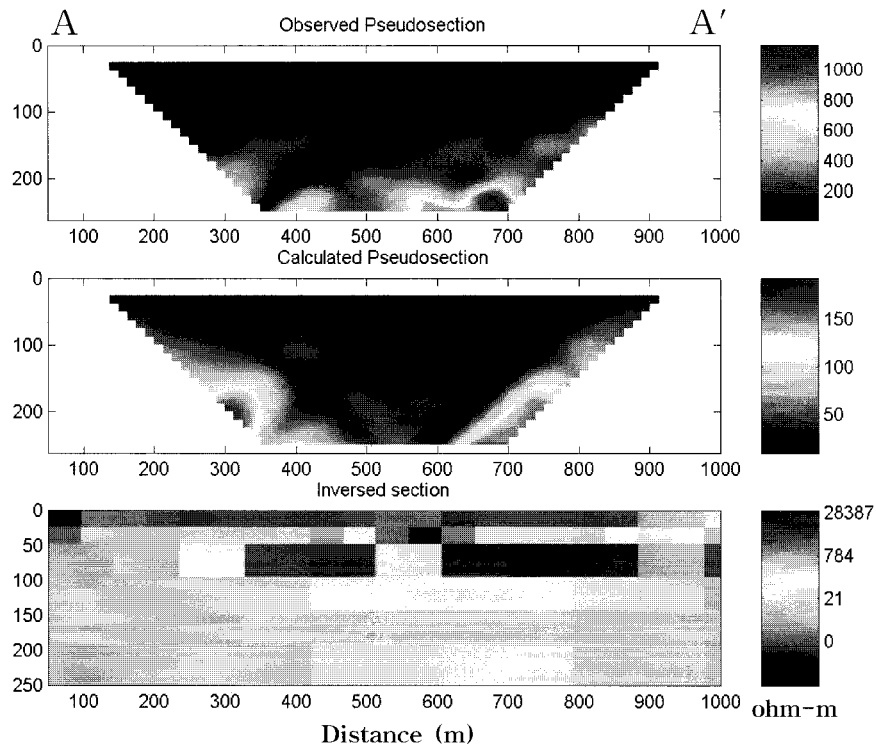


Fig. 10. Dipole-dipole array DC resistivity sections along the profile A-A' in southern front of the landfill no.1. Dipole length a=50 m.

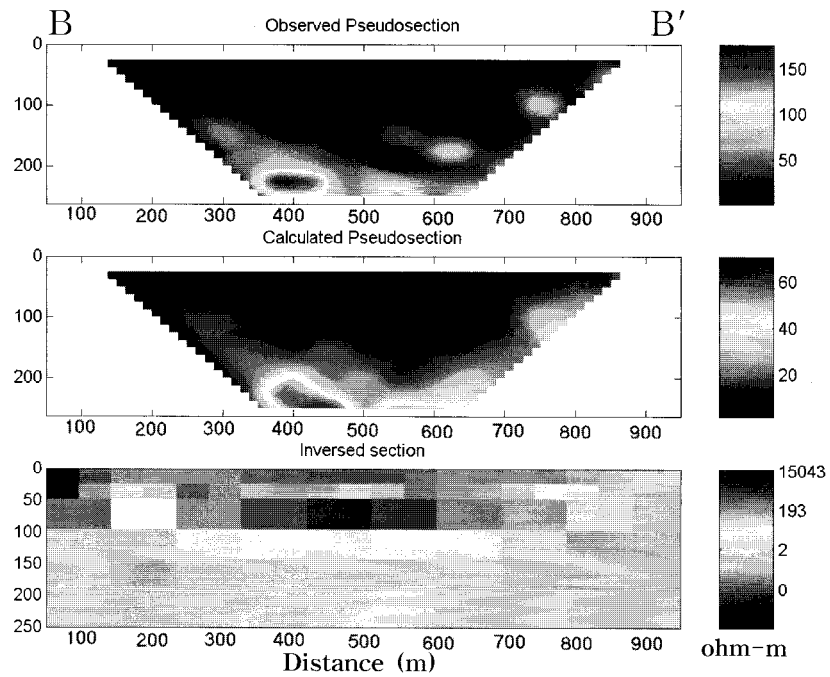


Fig. 11. Dipole-dipole array DC resistivity sections along the profile B-B' outside of the water proof wall in front of the landfill no.2. Dipole length $a=50$ m.

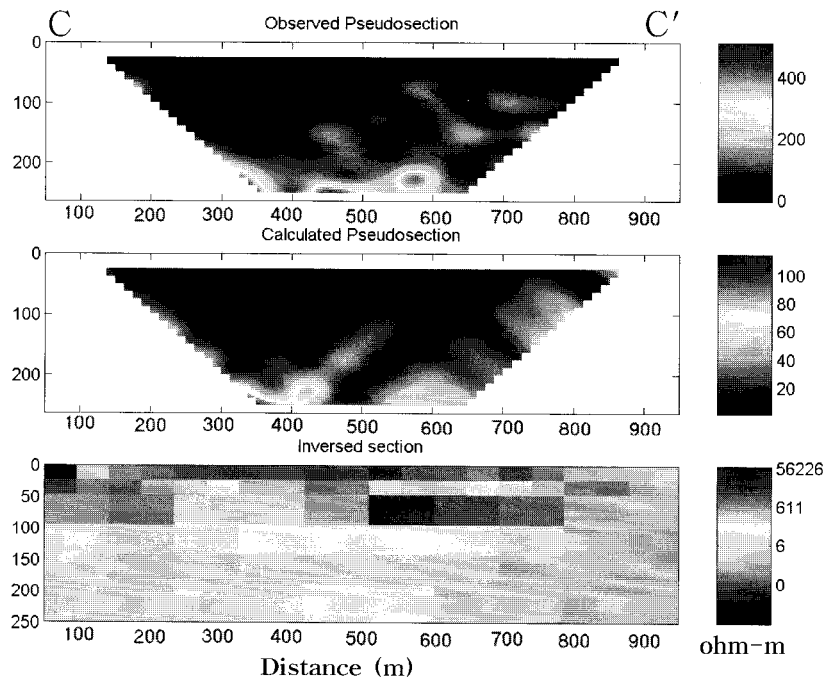


Fig. 12. Dipole-dipole array DC resistivity sections along the profile C-C' inside of the water proof wall in front of the landfill no.2. Dipole length $a=50$ m.

러버리게 되면, 두 번째 층의 고비저항대를 통과하여 세 번째 층으로 흐르는 전류는 매우 미약하게 된다. 따라서 세 번째 층의 존재에 대한 해석은 신뢰도가 상당히 떨어지게 되므로, 이 지역의 단면은 개략적으로 표층의 저비저항과 두 번째 층의 고비저항대로 구분하여 해석할 수 있다.

전기탐사자료의 역산에는 Marquardt-Levenberg 방법을 사용하였고, 신속한 역산을 위하여 Broyden (1965)이 제안한 민감도행렬을 근사적으로 개선하는 방법(정호준, 1998)을 도입하였다. 두 번째 층인 고비저항대의 중간부분에 주위보다 낮은 비저항대가 존재하는 것으로 보아 이 구간에서 침출수의 흐름이 의심된다. 그러나 당시 제 1 매립장 주변의 탐사여건이 좋지 않은 상태라 속단하기는 어렵다. 선행연구(이기화 등, 1996b) 결과와는 측선의 위치가 동일하지 않아 단순비교는 무리이지만, 표층의 낮은 비저항과 약 50~70 m 사이의 고비저항대의 존재는 서로 일치한다.

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 제 2 매립장 하부의 차수벽 바깥쪽의 B-B' 측선과 차수벽 안쪽의 C-C' 측선을 따라 50 m 간격의 전극 19 개를 이용해서 얻은 쌍극자-쌍극자 단면도이다. A-A' 측선과 마찬가지로 상부의 저비저항대와 약 50 m 하부의 고비저항대로 나뉘어 나타난다. 두 측선을 비교하면 차수벽 바깥쪽에 있는 B-B' 측선(Fig. 11)의 고비저항대가 끊기지 않고 비교적 연속적으로 잘 나타나는 것으로 보아 차수벽에 의한 침출수의 차단 효과가 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면, 차수벽 안쪽의 C-C' 측선(Fig. 12)에는 심도 50~100 m 사이의 고비저항대 내에도 일부 구간에 저비저항대가 나타나는 것으로 보아 침출수가 침투한 양상인 것으로 해석된다.

선행연구(이기화 등, 1996b)에서는 침출수의 유출 가능성이 가장 높은 지역은 제 1 매립장과 제 2 매립장 사이의 구간이었으나, 이번 탐사에서는 현장 여건상 이 구간에는 측선을 연결할 수 없어서 변동 사항을 확인할 수 없었다.

6. 자연 전 위 탐 사

지표에 인위적인 전원을 가하지 않더라도 지하에서는 여러 가지의 원인에 의해 자연적으로 전위가 발생하는데 이를 자연전위(SP; Self-Potential, 혹은 Spontaneous Polarization)라 한다. 이러한 현상을 이용한 자연전위탐사는 그 방법이 단순하

고 탐사 비용도 다른 방법에 비하여 매우 저렴하므로, 다른 탐사법의 보조수단으로서 특히 지열탐사나 지하수탐사 등에서 많이 쓰이고 있다 (Corwin and Hoover, 1979). 자연전위의 발생원인에 대해서는 그 기작이 아직도 정확히 밝혀지지 않고 있지만 크게 전기화학적(electrochemical), 전기역학적(electrokinetic), 열전기적(thermoelectric) 효과로 설명된다(Corwin, 1990). 이 중에서 전기역학적인 효과는 공극을 가진 매질 내에서 유체가 흐르는 경로를 따라 공극 표면과 이동하는 공극류간의 상호 이온 교환작용에 의해 생성된다(MacInness, 1961). 난지도 매립장 주변의 경우 지열 이상대에 의한 열전기 효과나 화학적 현상에 의한 전기화학적 효과보다는 유수나 침출수의 흐름에 의한 전기역학적인 효과가 주된 요인으로 작용하는 것으로 보인다.

자연전위탐사에서는 전위전극과 지면과의 직접적인 접촉이 필요하기 때문에 전극 분극현상을 일으키지 않는 특수한 전극을 사용해야 하는데, 이번 탐사에서는 비분극 전극으로 Pb-PbCl₂ 전극을 사용하였다.

자연전위탐사는 제 1 매립장 직하부인 쌍극자-쌍극자 탐사측선과 동일한 측선(A-A')과 제 2 매립장의 상부(E-E')와 사면(D-D')에 위치하는 측선과 하부 차수벽 안쪽의 쌍극자-쌍극자 측선(C-C')에서 수행하였다(Fig. 2참조). 전극배열은 누적 오차를 줄일 수 있도록 측선의 중앙을 기준으로 하여 주위로 측정해 나가는 방법(Fixed-base configuration)을 채택하였다(Corwin and Hoover, 1979). 각 측선 상에서 측정점은 동일한 고도를 유지하고 측정점 간 간격은 10 m로 취하였으며, 각 측정점에서 평균 5~8 회정도 반복 측정하였다.

Fig.13~16은 각 측선상에서 측정된 자연전위를 보여준다. 여러 번 측정된 자료의 표준편차를 함께 도시하였는데, 편차가 큰 측정일수록 값의 변동이 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 13은 제 1 매립장 차수벽 바깥쪽의 A-A' 측선에서 측정된 SP이상으로 전반적으로 불규칙적인 값의 변동이 반복되는 양상을 보인다. 이 지역은 측정 당시 측정주위에 물이 고인 곳이 많았고 빗물이 제 1 매립장에서 차수벽 위쪽을 넘어 흐르는 것이 관측된 지역으로, 불안정한 지표상태로 인하여 이와 같은 불규칙한 이상값을 보이는 것으로 생각된다. Fig. 14는 C-C' 측선으로서 제 2 매립장 차수벽 안쪽에서 측정된 값이다. 이 측선의 특징은 화살표로

표시한 바와 같이 거의 일정한 간격으로 큰 양의 이상값이 나타나는 것인데, 이들 지점은 침출수와 유수를 모으기 위해 200 m 간격으로 설치된 집수정의 위치와 일치한다. 전기역학적 효과에서 양의 이상값은 유체의 상승흐름이 존재하는 것으로 해석되므로(Corwin, 1990), SP이상의 양상으로부터 집수정 주위로부터 집수정으로 유입되는 유체의 흐름이 있음을 알 수 있다. Fig. 15는 비교적 안정

화가 잘 진행되고 있는 제 2 매립장의 사면에서 측정된 값이다. 약 20 mV 내외의 전위 차를 보이면서 중앙부에서 소폭의 이상대가 나타남을 볼 수 있다. 이는 매립장 사면을 따른 유체의 흐름은 거의 없음을 보여주고, 중앙의 낮은 이상값은 단순한 측정 오차이거나, 국부적으로 존재하는 산화 가능한 금속폐기물의 영향일 가능성이 있다. Fig. 16은 제 2 매립장 상부에서 측정된 자연전위 값으

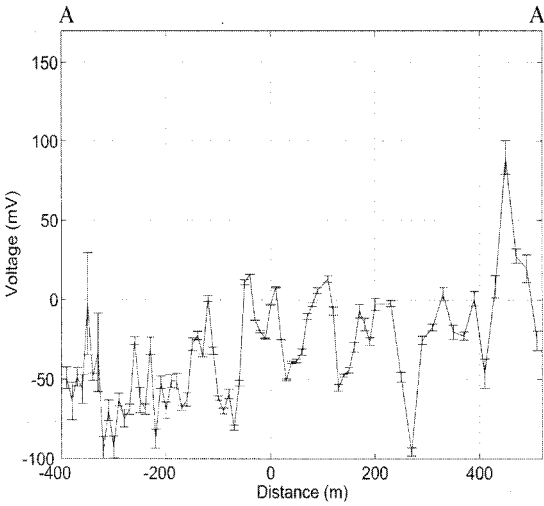


Fig. 13. SP anomalies along the profile A-A' in front of the landfill no.1.

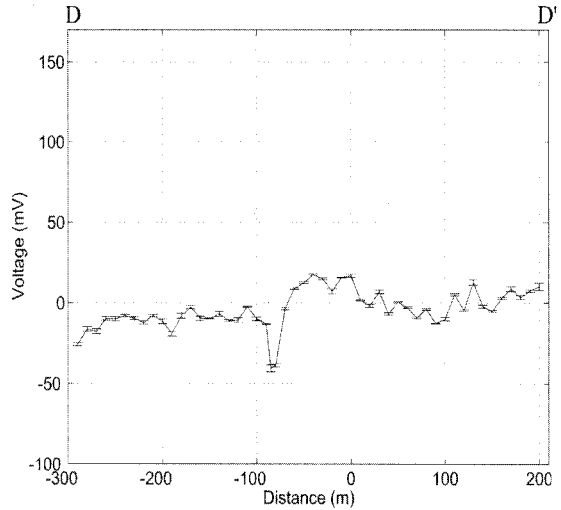


Fig. 15. SP anomalies along the profile D-D' at the southern slope of the landfill no.2.

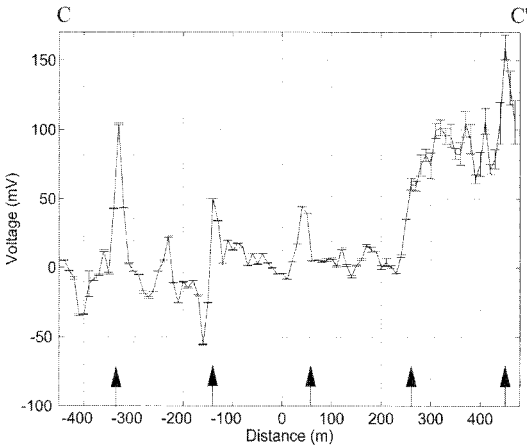


Fig. 14. SP anomalies along the profile C-C' outside of the water proof wall in front of the landfill no.2. Arrows indicate the location of leachate collecting wells.

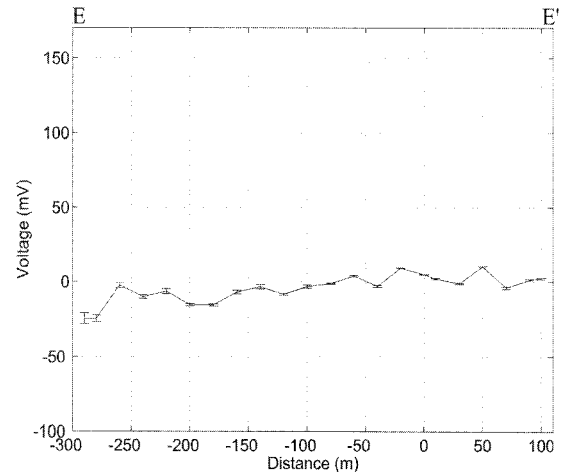


Fig. 16. SP anomalies along the profile E-E' on the top surface of the landfill no.2.

로, 전반적으로 약 10 mV 이내로 별다른 변화를 나타내지 않는 것으로 보아 자연전위를 생성시키는 근원이 없음을 알 수 있다. 이는 매립장 상부에는 특이한 유체의 흐름이 존재하지 않고, 계속된 복토로 인해 매립물에 의한 산화전위도 잘 나타나지 않는 것으로 해석된다.

7. 결 론

1995~1996년에 걸쳐 난지도 안정화사업의 일환으로 지구물리탐사를 수행한 이후 약 4년이 지난 시점에서 난지도의 안정화에 따른 환경지질학적인 변화를 조사하기 위하여 중력, 자력, 쌍극자-쌍극자, 자연전위 탐사를 수행하였다. 제 1 매립장 상부에는 곳곳에 물이 고인 늪지가 형성되어 있어서 탐사를 실시하지 못하고, 주로 제 2 매립장을 대상으로 변화 양상을 비교 연구하였다.

중력 탐사결과를 보면 제 2 매립장 중앙 부분에서는 계속된 침하와 반복적인 복토작업으로 매립물의 다짐작용이 진행되면서 상하 밀도구배가 작아지는 양상을 보인다. 자력탐사 결과에서도 전반적으로 자력이상값이 작아지고 복잡한 형태도 많이 줄어든 양상을 나타내는데, 이는 매립장의 표층부가 복토로 다져지면서 매립물들의 물성의 불균질성이 점차 약화되는 현상으로 해석할 수 있다. 따라서 중·자력 탐사의 결과에 의하면 매립장의 안정화작업이 어느 정도 성과를 나타내고 있는 것으로 보인다.

쌍극자 탐사의 경우, 탐사축선이 선형연구의 축선과 동일하지 않아서 단순 비교는 안되지만, 비저항단면도를 보면 층서는 크게 상층부의 저비항대와 50~100 m 부근의 고비저항대로 구성되어 서로 비슷한 양상을 보인다. 특히, 제 2 매립장의 차수벽 안과 밖에서 수행한 쌍극자-쌍극자 탐사에서는 차수벽의 효과가 어느 정도 나타나고 있음을 보여준다.

침출수의 유동에 민감하게 반응할 것으로 예상하고 수행한 자연전위탐사에서는, 제 1 매립장쪽 축선에서는 탐사당시 차수벽 위로 침출수가 흐르고 빗물이 고여있는 지역이 있을 정도로 강한 유수의 흐름이 있어서 자연전위 자료는 매우 복잡한 양상을 띤다. 한편, 제 2 매립장쪽 하부 축선에서는 집수정이 위치하는 곳에서 양의 이상값이 규칙적으로 나타나며, 매립장 상부나 사면에는 자연전위를 유발할만한 뚜렷한 근원은 없는 것으로 나타

났다.

사 사

이 연구는 대학부설 기초과학연구소 학술연구조성비 지원으로 이루어진 연구과제(과제번호: BSRI-98-5407)의 일부로, 연구비를 지원해주신 관계기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 권병두, 김차섭, 정호준, 오석훈, 1995, 난지도 매립지 및 그 주변의 지질환경 연구: 중력 및 자력 탐사, 자원환경지질, 28, 469-480.
- 권병두, 서정희, 오석훈, 1998, 부산시 석대 매립지에서의 중력, 자력, VLF탐사, 자원환경지질, 31, 59-68.
- 권병두, 오석훈, 정호준, 임형래, 이춘기, 1999, 포항 유봉산업 폐기물 매립지에서의 중력, 자력, VLF 탐사, 자원환경지질, 32, 177-187.
- 오석훈, 권병두, 서백수, 1997, Simulated Annealing 을 이용한 전기비저항 자료의 역산, 한국자원공학회지, 34, 285-293.
- 이기화, 권병두, 정호준, 1996a, 난지도 매립장 전기·전자탐사, 대한지하수환경학회지, 3, 95-100.
- 이기화, 권병두, 오석훈, 김차섭, 1996b, 난지도에 인접한 한강변에서의 쌍극자-쌍극자 전기탐사, 자원환경지질, 29, 335-343.
- 이기화, 윤종렬, 1998, 포항 옥명 폐기물 매립장에서의 전기탐사, 지구물리, 1, 41-50.
- 서울특별시, 1994, 난지도 매립지 안정화 사업 기초조사 보고서.
- 정호준, 1998, 웨이브렛 영역에서의 근사적 민감도 갱신을 이용한 2차원 MT 신속역산, 서울대학교 박사학위 논문.
- Broyden, C.G., 1965, A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations, Mathematical Computation, 19, 577-593.
- Corwin, R.F. and Hoover, D.B., 1979, The self-potential method in geothermal exploration, Geophysics, 44, 226-245.
- Corwin R.F., 1990, The Self-potential method for environmental and engineering applications, Geotechnical and Environmental Geophysics, SEG, 127-146.
- MacInness, D.A., 1961, The principles of electrochemistry, New York, Dover Publishing Co.
- Lee, K. and Yoon, J.R., 1995, Electrical explorations in and around the Nanjido waste landfill, Journal of Korean Society of Groundwater Environment, 2, 64-71.

- Lee, K. and Yoon, J.R., 1997, Electrical surveys at the Seokdae waste landfill of Pusan, Journal of Korea Society of Groudwater Environment, 4, 185-190.
- Nettelton, L.L., 1954, Regionals, residuals and structures, Geophysics, 19, 1-22.
- Talwani, M., and Ewing, M., 1960, Rapid computation of gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shape, Geophysics, 25, 203-225.
- Ward, S.H., 1990, Resistivity and induced polarization methods, Geotechnical and Environmental Geophysics, SEG, 147-189.

2000년 3월 4일 원고접수
2000년 6월 20일 원고채택