

부산시 석대 매립지에서의 중력, 자력, VLF탐사

권병두* · 서정희** · 오석훈*

Gravity, Magnetic and VLF Explorations in the Seokdae Landfill, Pusan

Byung-Doo Kwon*, Jung-Hee Seo** and Seok-Hoon Oh*

ABSTRACT : Gravity, magnetic and VLF surveys were carried out to investigate the dimension, nature and stability of the waste materials filled in the Seokdae landfill, Pusan. The Seokdae landfill, which is located in a former valley, was used as a dump for mainly domestic-type waste materials for 6 years from 1987. The landfill site is classified into A, B, C and D areas according to the sequence of dumping period. The Bouguer gravity anomaly map shows maximum variation of 3.1 mgals on the landfill and its general appearance has close relation with the thickness of waste filled. The local variation of anomaly, however, reflect the degree of compactness of waste materials which may be affected by the nature of waste and dumping time. In the case of area A, where dumping process was terminated at the very last stage, most part show negative anomaly compared to other areas. We think that the composition of the waste materials in the area A is high in leftover food and paper trash and they are still in uncompacted condition. In area B, the general trend of variation of gravity anomaly is appeared to be high anomaly in northern part and decrease to the southern part. This is well matched with the prelandfill topography of the landfill site. The southern part of area B is located in the center of valley and its present surface is comparatively rugged, which may be due to the differential settlement of deep buried waste. The thickness of waste in area C is relatively thin, but the gravity anomaly appears to be low. Considering the present condition of surface, it can be inferred that low density wastes such as leftover food were mainly filled in this area. Area D, as in the case of area B, shows gravity anomaly that has close relation with the prelandfill topography. Magnetic data show the variation of total field intensity varies in the range of 46600~51000 nT, and reach maximum anomaly of 4400 nT. The overall pattern of magnetic anomaly well reflects the distribution of magnetic materials in the landfill. The result of VLF survey reveals several low resistivity zones, which may serve as underground passages for contaminant flow, in the area C located near the small village.

서 론

환경문제가 큰 이슈로 등장하면서 매립지의 위생적 관리와 환경오염방지 및 재활용에 대한 연구가 다양한 방법으로 진행되고 있으며, 특히 지구물리탐사기법은 매립지의 구조적 안정성과 오염물의 유추가능성 및 침출수의 유동경로 등에 관한 자료를 제공한다. 우리나라 매립지에 관한 지구물리학적 연구로는 서울 난지도 매립지에서 권병두 등 (1995)이 중력탐사와 자력탐사를 수행하여 매립물

의 밀도분포를 구하고 중력 및 자력이상대에 대하여 정성적, 정량적 해석을 실시하였으며, Lee and Yoon (1995)은 슬립버저 전기비저항 탐사를 수행하여 매립물의 전기비저항 층서와 침출수 발생지역에 대한 연구를 수행하였다. 또한 이기화 등 (1996)은 매립장 상부에서 슬립버저 전기비저항 탐사와 함께 동일 송수신기배열 시간영역 전자탐사를 실시하여 매립물의 특성과 지하구조를 연구하였으며, 이기화 등 (1996)은 난지도에 인접한 한강변에서 쌍극자-쌍극자 전기탐사를 통해 매립지 경계부의 2차원 전기비저항도를 통한 침출수 유출경로를 추정하였다.

매립지의 환경지질학적 특성을 연구하는데 있어서 지구물리탐사방법은 매립지의 층서와 구조, 대수층의 분포, 매립지의 규모, 매립물의 종류 및 상태, 지하 오염물질의 분포범위와 거동, 매립지의 구조적 안정화정도, 토지의 재

* 서울대학교 지구과학교육과 (Department of Earth Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

** 서울대학교 자원공학과 (Department of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

이용 가능성을 진단하는데 대한 정성적, 정량적 자료를 얻기 위해서 수행된다. 중력탐사는 매립물의 밀도가 주변암에 비하여 일반적으로 매우 낮기 때문에 매립장 하부의 기반암의 심도 및 분포 양상을 조사하는데 유용하다. 또한, 중력이상 자료로부터 기반암의 중력효과를 분리 처리하는 과정을 통하여 매립물의 밀도 분포에 따른 매립물의 종류나 다짐 정도 매우 유용하며, 광역적으로는 기반암의 대자울 차이에 따른 기반의 분포나 암상 변화에 대한 정보를 얻을 수 있다. 한편, VLF탐사는 천부 전도체 탐사에 효과적인 전자탐사 방법으로 파쇄대와 같은 지질 구조선을 조사하거나 매립장 내에서는 전기전도도가 높은 침출수의 생성 위치나 유동 경로를 탐지하는 데에 이용된다.

본 연구의 조사대상인 부산시 석대 매립지는 계곡을 따라 매립이 완료된 상태이나 매립지에서 발생된 유독가스와 악취는 아직도 매립지 전역에서 나타나고 있으며, 곳곳에 침출수가 유출되어 고여 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 침출수는 지표수와 지하수를 심각하게 오염시키고 있고 이에 따른 매립지의 환경오염의 가능성 및 안정성에 대한 문제점이 제기되어 있다. 본 연구는 중력탐사, 자력탐사 및 VLF탐사 결과를 분석하여 석대 매립지의 안정화 작업과 주변 지역으로의 오염 확산 방지를 위한 각종 환경지질학적 자료를 제공하고자 한다.

매립지의 개요 및 주변 지형

석대 매립지는 행정구역상으로는 부산광역시 해운대구 석대동 산 192번지 일원에 속하며 지리적 좌표는 대략 북위 35°12' 58" ~ 35°13' 16" 이고, 동경 129°7' 38" ~ 129°7' 58" 에 속한다.

매립 이전에는 표고 50 m 이하의 농경지 및 임야로 구성된 구릉지로서 개좌산 남서쪽 능선 사이에 연한 소계곡이었으며, 1987년 6월부터 1993년 5월까지 부산시에서 발생한 생활폐기물을 약 6년간 산간 계곡에 위생 매립 방식으로 4단계로 구분하여 수용하였다. 매립 완료 후 고도는 최저 39.5m, 최고 83m로 나타났으며, 북고 남저형의 지형을 이루고 있다 (Fig. 1). 주변으로 석대천이 수영강으로 유입, 합류되어 수영만으로 최종 유출되고 있다.

총매립장 면적 662,410 m² 중 매립 면적은 514,345 m²로 12,848,317 m³이 매립되어 있다. 매립물은 음식물 찌꺼기와 채소, 연탄재, 종이류, 목재류, 금속쓰레기 등이다. 매립장은 A지구, B지구, C지구, D지구로 구분되며, D지구가 가장 아래쪽에, A지구가 가장 위쪽에 위치한다 (Fig. 2). A지구는 1989년 3월부터 1993년 5월까지, B지구는 1990년 4월부터 1991년 12월까지, C지구는 1990년

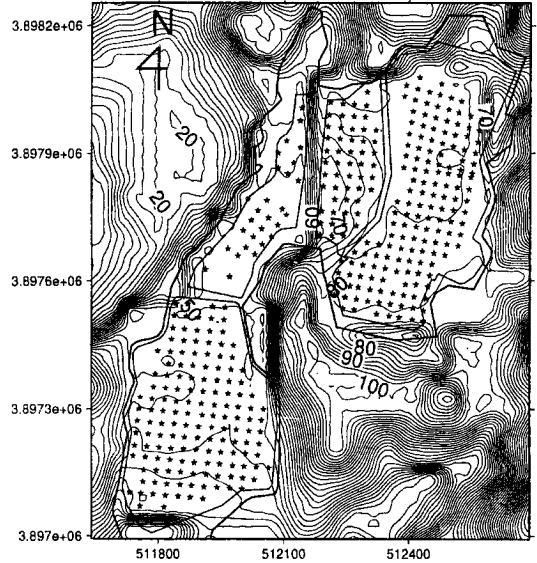


Fig. 1. Topographic map of the Seokdae landfill site. Asterisk marks indicate gravity measurements stations.

4월부터 1991년 4월까지, D지구는 1987년 6월부터 1993년 5월까지 매립이 진행되었다. 매립면적은 A지구, D지구, C지구, B지구순으로 넓게 나타난다 (부산직할시, 1993).

매립지 주변의 지질개요

매립지가 위치하는 부산지역의 지질은 경상계 퇴적암층 (이천리층)을 관입 및 분출한 중생 화산암류와 산성 화산암류, 그리고 이를 관입한 불국사 화강암류와 마산암류, 맥암류 등으로 대별되며, 시대적으로는 중생대 백악기에 속한다. 지질구조는 대체로 북북동 방향으로 발달되어 있다. 석대 매립지 일원의 지질은 안산암질암, 유문암질암 및 이를 덮고 있는 충적층으로 구성되어 있다 (Fig. 2).

매립지 내에서의 시추 자료를 보면, 쓰레기 매립층 아래는 모래와 자갈의 혼합층으로 이루어져 있고, 그 하부에는 기반암이 풍화되어 만들어진 토층과 풍화암층, 토목공학적인 분류기준에 의한 연암 및 경암의 순으로 수직 분포를 보인다 (정상용, 1995). 조사지역 서측 능선부를 따라서는 기반암인 화성암과 풍화대가 모두 노출되어 분포한다. 안산암질암은 매립지 동쪽에 위치하며 세립질 안산암, 반상 안산암 및 각력 안산암으로 구성되어 있으며, 절리나 단층들이 발달되어 있다. 석대 매립지의 서측에 분포하는 유문암질암은 안산암질암을 관입 분출하며, 유동구조의 발달이 미약하다. 매립지 입구의 서측에 분포

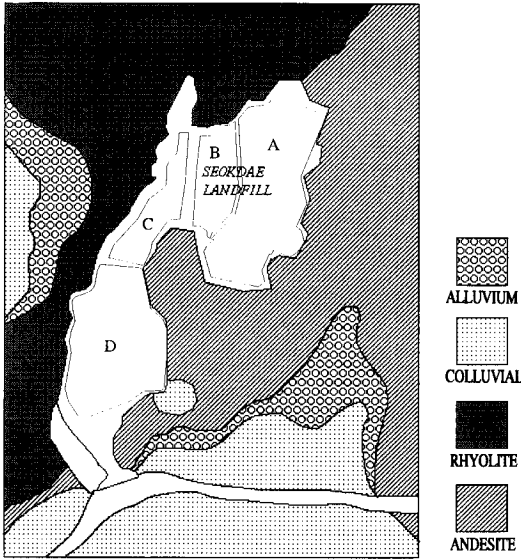


Fig. 2. Geologic map of the Seokdae landfill and adjacent area. Landfill site is classified into four areas (A, B, C, D) according to sequential time of waste filling-in.

하는 유문암에는 열극이 매우 많이 발달되어 있다. 유문암질에 발달된 절리 중 북동 방향의 절리계는 부산 일원의 대단층과 연관되며, 동서 방향의 절리계는 유문암질 암석 뿐만 아니라 안산암질 암석에도 발달되어 있어 이 지역에서 국부적으로 우세하게 나타나는 구조선이다.

중력 탐사

중력 탐사는 연구 대상 지역의 수평적 밀도차에 기인하는 중력이상을 측정하고 이를 해석하는 지구물리 탐사방법으로 지하의 밀도 이상체의 분포와 지질구조에 관한 정보를 제공한다. 본 연구에서 사용한 중력계는 LaCoste-Romberg Model G이다. 중력 보정에 필요한 측정점의 고도는 RED2A 광과측정기로 측정하였으며, 매립지 내의 TBM을 이용하여 고도를 계산하였다.

중력측정을 위하여 매립지의 각 지구별로 측선간격 30 m, 측정 간격 30 m로 위치와 고도를 측량 하였으며, 탐사 여건상 측량이 불가능한 지역은 상황에 따라 적절하게 측정점의 위치를 결정하였다. 측정점은 A지구에서는 155점, B지구에서는 53점, C지구에서는 27점, D지구에서는 146점, 매립지 외부 지역에서 6점 등 총 387점이다. 각 측정점의 위치는 UTM좌표를 이용하여 표시하였다 (Fig. 1).

각 측정점에서의 측정 중력치를 비교, 분석하여 지하의 광체나 지질구조를 조사하는 중력탐사에서는 탐사대상체

와 주변암과의 밀도차에 의한 중력 변화량만이 필요하므로 다른 요인들에 기인되는 중력 변화량을 제거시키는 중력보정을 실시하였다.

중력계내의 스프링의 크립현상으로 생기는 기계적인 오차를 보정하기 위해 기준점에서 중력 측점을 반복 수행하였고, 크립현상에 의한 중력값의 변화를 선형적이라고 가정하고 선형보간법에 의해 보정치를 결정한 후 이를 가감하였다. 또 탐사기간 동안 각 측점에 대한 전체의 상대적인 위치의 변화로 생기는 조석변화량은 컴퓨터 프로그램을 이용하여 보정하여 주었다. 각 측정점들 간의 위도 차에 의한 중력효과를 제거하기 위한 위도보정은 본 조사지역의 경우 측정점들 간의 위도 차이가 작기 때문에 실시하지 않았다.

지구 중심으로부터 각 측정점까지의 거리가 측정점간의 고도차만큼 다르기 때문에 나타나는 중력값의 차이를 보정하여 주는 푸리에어 (free-air)보정은 해수면을 기준으로 실시하였으며, 측정점과 기준면 사이에 존재하는 물질의 인력에 의해서 나타나는 중력의 차이를 보정하여 주는 부계보정시 부계판의 밀도는 매립지 지역의 기반암인 유문암과 안산암의 평균밀도인 2.5 g/cm^3 을 사용하였다.

측점 주변의 지형에 의한 영향을 보정하기 위하여 이 일대 지형도를 격자의 형태로 구분한 후 평균고도를 읽어서 지형과 같은 불규칙한 면을 수학적으로 구현하는 multiquadric surface로 표현하였으며, 측정점 주변지역을 일정한 구획으로 나누는 Hammer chart의 구분구획법을 이용하여 원통프리즈에 대한 중력효과를 계산하여 지형보정을 실시하였다. 이번 연구에서는 평균고도를 지형도에서 직접 읽지 않고, 30 m×30 m DEM (Digital Elevation Map) 자료를 이용하여 기존의 수작업보다 정밀도를 훨씬 개선하였다. Multiquadric surface를 만들기 위해서 필요한 중력 측정점 주변 지역의 지형자료는 근거리, 중거리, 원거리로 나누어서 모형표를 작성하였는데, 측정점을 중심으로 30 m×30 m의 단위블럭으로 지형을 읽어서 근거리보정을, 90 m×90 m의 단위블럭으로 중거리보정을, 150 m×150 m의 단위블럭으로 원거리보정을 실시하였다.

이와 같이 보정된 중력 측정값으로부터 GRS67 식으로 계산한 표준중력값을 빼주어 중력이상을 구하였다. Fig. 3의 푸리에어 이상도는 고도에 민감하게 반응하여 매립지의 지형과 비슷한 양상을 보이며 최대 이상폭은 5.4 mgal 정도로 나타난다. 한편, 부계이상도 (Fig. 4)의 전체적인 이상폭은 3.1 mgal 정도로 나타난다. 이들 이상도의 전반적인 양상은 기반암의 지형 즉 매립물의 두께와 밀접한 관련을 가지고 있는 것으로 보이며, 구역별로 매립물의 종류나

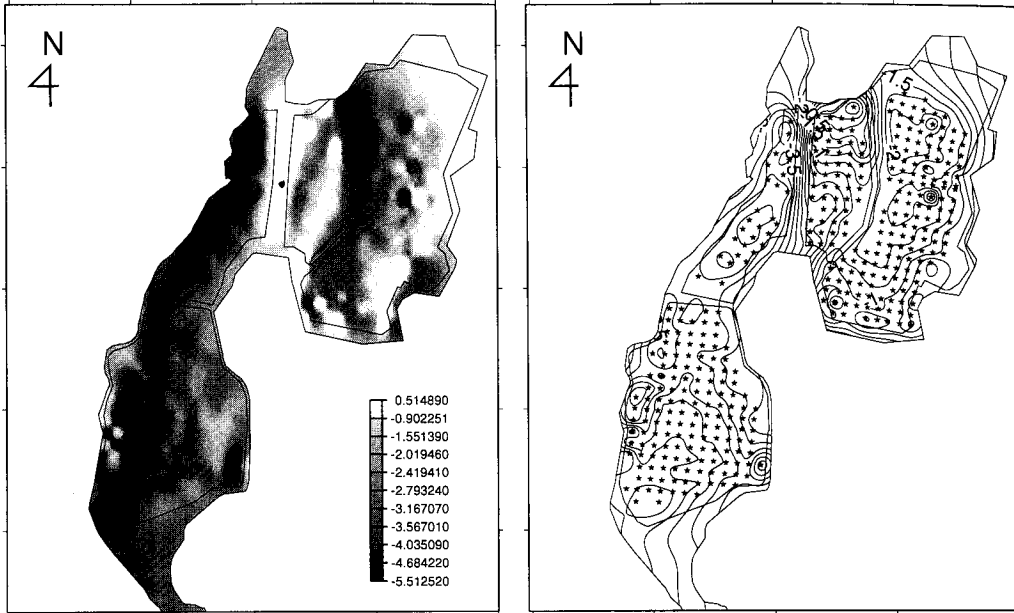


Fig. 3. Grey-scaled (left) and contoured (right) maps of Free-air anomaly of gravity data obtained at the Seokdae landfill site. Contour interval is 0.25 mgal.

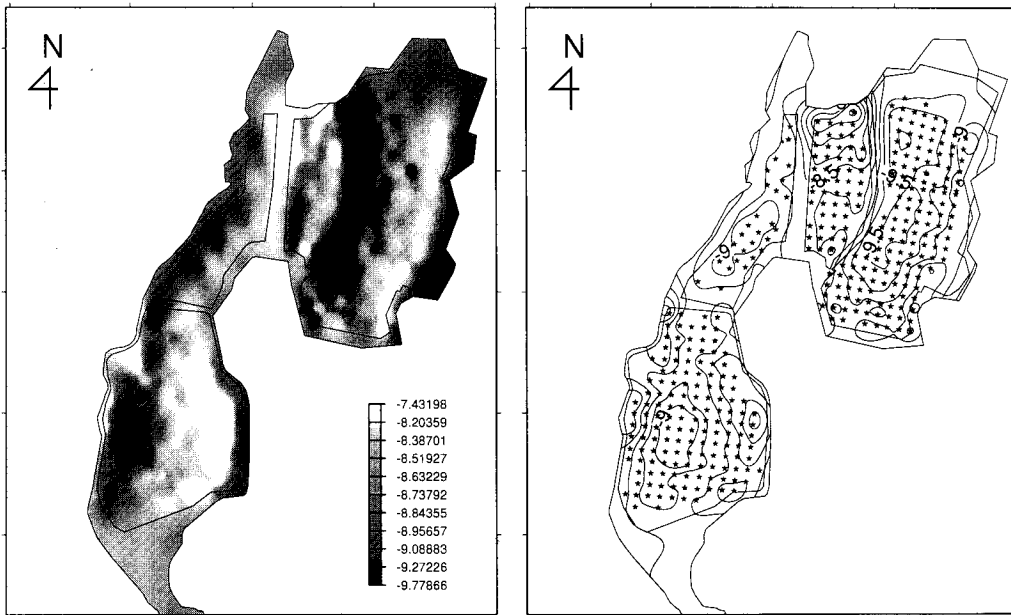


Fig. 4. Grey-scaled (left) and contoured (right) maps of Bouguer anomaly of gravity data obtained at the Seokdae landfill site. Contour interval is 0.25 mgal.

매립작업의 종결 시기에 따른 매립물의 다짐 정도의 차이에 의한 영향도 섞여 나타나는 것으로 생각된다.

A지구는 대체로 다른 지구에 비해서 큰 음의 중력이상값을 나타내는 부분들이 넓게 분포하고 있는데, 이는 매

립이 가장 늦게 완료된 지역이기 때문에 매립물의 다짐 정도가 가장 약하고, 매립 기간 후반에는 매립물 중 음식쓰레기와 종이류의 비율이 높았기 때문인 것으로 추정된다.

B지구에서는 북쪽 경계 부근에서 가장 낮은 이상값이

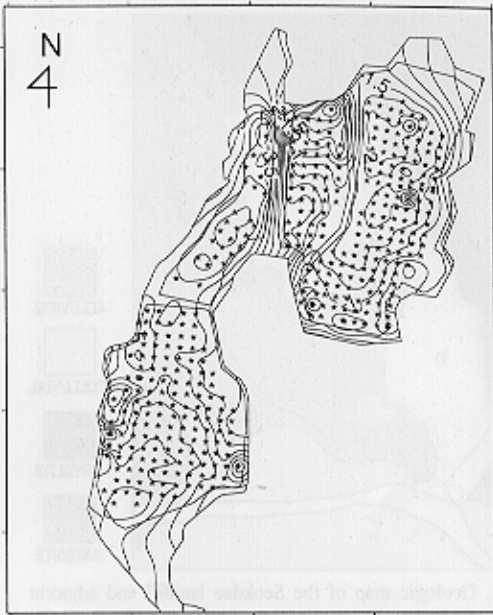
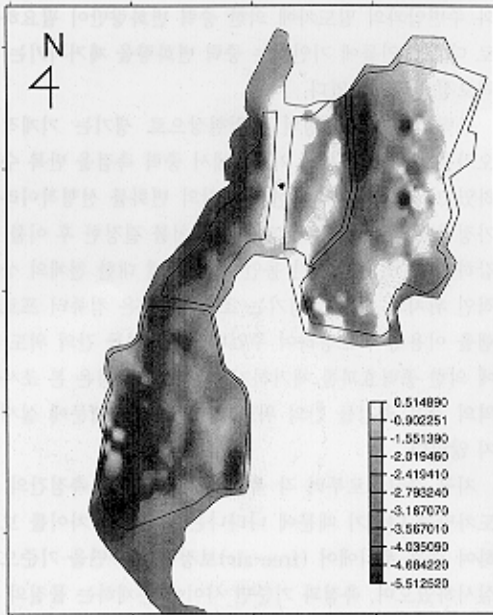


Fig. 3. Grey-scaled (left) and contoured (right) maps of Free-air anomaly of gravity data obtained at the Seokdae landfill site. Contour interval is 0.25 mgal.

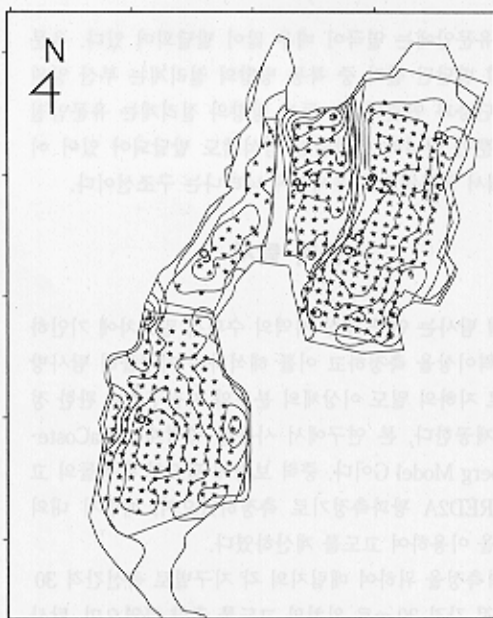
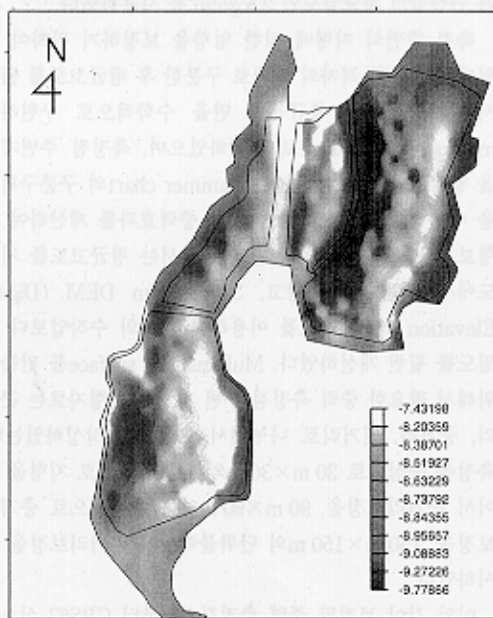


Fig. 4. Grey-scaled (left) and contoured (right) maps of Bouguer anomaly of gravity data obtained at the Seokdae landfill site. Contour interval is 0.25 mgal.

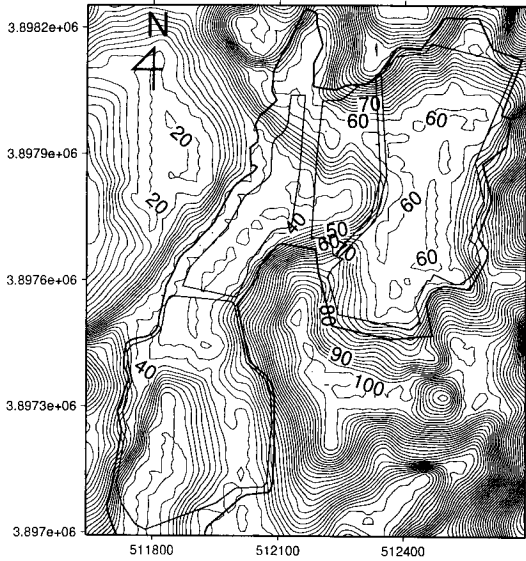


Fig. 5. Prelandfill topography of the Seokdae landfill site. Contour interval is 2.5 m.

나타나며 남쪽으로 내려 갈수록 이상값은 커지는 경향을 보이고 있는데 이는 매립 이전의 지형도에서 확인할 수 있는 원래의 지표면의 양상과 대체로 일치한다. 계곡의 중앙부에 위치하는 B지구 남쪽 부분은 매립물 표면의 기복이 비교적 심한데 이는 두꺼운 매립층에서 나타나는 불균질한 침하현상 때문인 것으로 생각된다.

C지구는 다른 지구에 비해 매립물의 두께가 얇은 지역임에도 불구하고 낮은 이상값을 나타낸다. C지구는 D지구 다음으로 매립이 빨리 완결된 곳으로, 지형의 변화가 그다지 심하지 않은 지역이다. 현재 매립지 표면의 상태와 함께 고려해 볼 때 이 지구에는 낮은 밀도의 음식 쓰레기 등이 집중적으로 매립된 것으로 추정된다. 중력탐사 당시 C지구는 다른 지구에 비해서 표면에 많은 물들이 고여 있었는데 이는 이 지역에 수분을 잘 흡수하지 못하고 부패가 잘되는 음식쓰레기가 주로 매립되었을 것이라는 생각을 뒷받침한다고 볼 수가 있다. 이렇듯 매립 완결 시기와 지형, 고인 물도 잘 배수가 되지 않는 상황으로 미루어 볼 때, C지구는 구조적으로 매우 불안정하다고 추정할 수가 있다. 또한 이 지구는 VLF 자료에서도 침출수의 유출경로로 예상되는 저비저항대가 관찰되기도 하였다. 이 지역의 바로 인접한 곳에 부락이 있으므로, 오염가능성을 평가하기 위한 보다 정밀한 조사가 이루어져야 할 것이다.

D지구는 B지구와 같이 매립 당시의 기반 지형과 가장 밀접한 상관성을 가지는 이상값의 분포를 보여 주며, 이 지구 내에서의 이상값의 차이는 최대 2.2 mgal에 달한다.

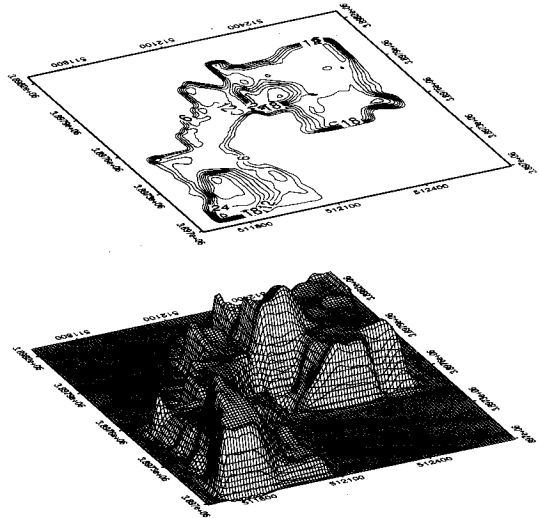


Fig. 6. Inferred thickness of the waste in Seokdae landfill calculated from the two topographic maps of Fig. 1 and Fig. 5. Upper one is contour map and the lower one is its three-dimensional view.

D지구 외곽부의 낮은 이상값은 매립물의 두께가 얇을 뿐만 아니라 도로나 매립지 외벽 등의 시공시에 성토 재료로 쓰인 모래나 자갈 등이 많이 함유되었기 때문인 것으로 추정된다.

매립 이전의 지형자료 (Fig. 5)와 매립 이후의 지형자료 (Fig. 1)를 비교하면 매립물과 관련된 몇 가지 정보를 유추할 수 있다. Fig. 6은 두 지형 자료의 고도 차이를 이용하여 추정한 매립물의 두께이다. 매립 이전의 지형과 매립 이후의 지형을 비교하여 보면, 매립장 주변의 지형이 전체적으로는 큰 변화를 보이지는 않으나, B지구와 C지구의 북쪽 부근이 약간 변형이 되었음을 확인할 수가 있다. 매립 이전의 지형도를 보면 깊은 계곡이 C지구에서 B지구의 중앙부를 통과하고 C지구의 좌측은 고도가 상대적으로 낮았음을 알 수 있다. C지구는 B지구보다 매립이 빨리 진행되어 완결된 곳인데, C지구의 좌측 하단에서부터 매립을 시작하여 골짜기쪽으로 계속해서 매립이 진행되었고, 골짜기를 다 채운 다음 B지구의 상부에 계속해서 매립을 진행하였다고 추정할 수가 있다.

중력 자료의 역산

중력 탐사자료로부터 매립물의 밀도 분포를 구하기 위해 3차원 역산을 수행하였다. 본 연구에서는 역산문제를 확률적으로 접근하는 방식 중의 하나인 simulated annealing 기법을 도입하여 역산을 수행하였다 (1997, 오석훈 등).

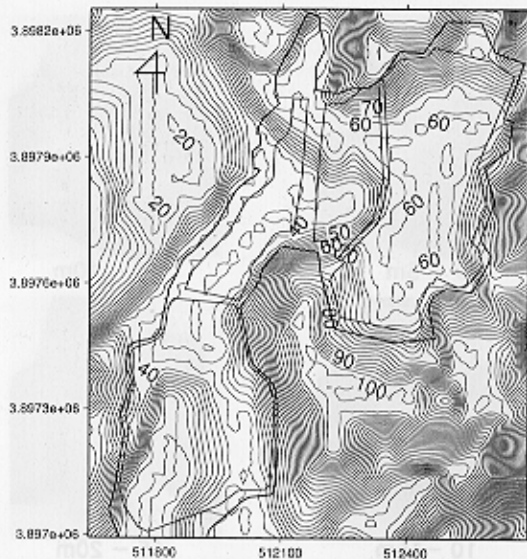


Fig. 5. Prelandfill topography of the Seokdae landfill site. Contour interval is 2.5 m.

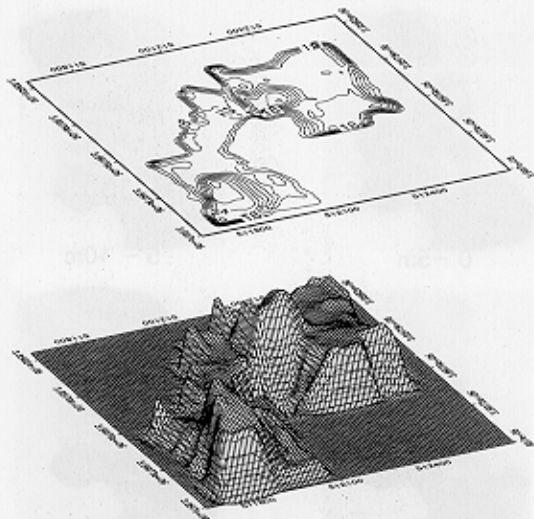


Fig. 6. Inferred thickness of the waste in Seokdae landfill calculated from the two topographic maps of Fig. 1 and Fig. 5. Upper one is contour map and the lower one is its three-dimensional view.

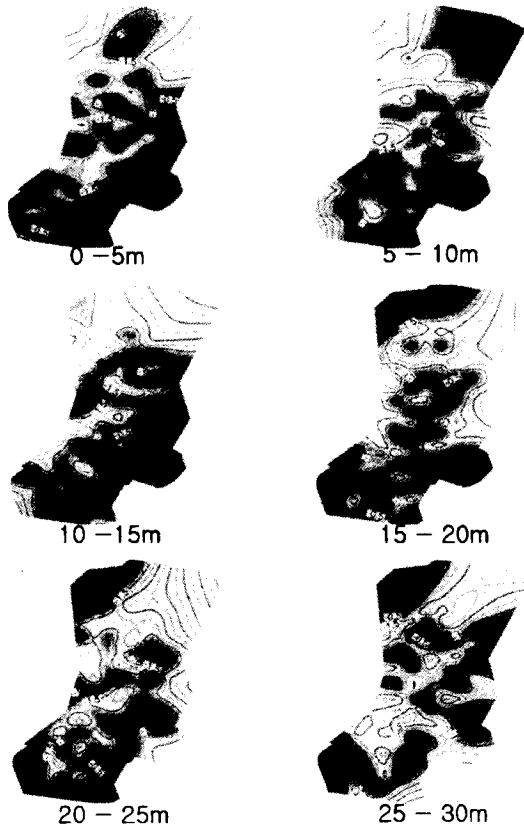


Fig. 7. Density distribution obtained by cell inversion of gravity data of area A by using the simulated annealing method. Each contour map shows average density of the waste layer divided at 5 m intervals.

지구물리 역산 문제는 비선형적인 경우가 대부분이어서 해를 구하기 위해서 선형화시키는 방법을 사용하지만, 이러한 방법은 초기치에 크게 의존하므로 국소적 최소치에 도달하는 경우가 많다. 대부분의 역산 문제들이 다중 국소점을 포함하므로 이 방법은 문제가 있다고 할 수가 있다.

반면 simulated annealing은 고온으로 가열되어 분자의 운동 상태가 자유로웠던 물질이 서서히 식어가면서 에너지가 최소가 되는 과정을 최적화 문제에 도입한 광역적 최적화 기법의 일종으로 국소적 최소치가 아닌 광역적 최소치에 도달하게 된다.

매립지 중 매립 면적이 큰 A 지구와 매립 당시의 지형과 가장 상관도가 큰 중력이상 분포를 보이는 D 지구에 대해서 역산을 수행하였다. 지하구조를 유추하는 데에는 매립 이전의 지형자료를 이용하였고, 매립 되기 전의 지형자료와 매립 이후의 지형자료를 비교하여 얻은 개략적인 매립물의 부피 분포를 바탕으로 3차원 역산을 수행하였다.

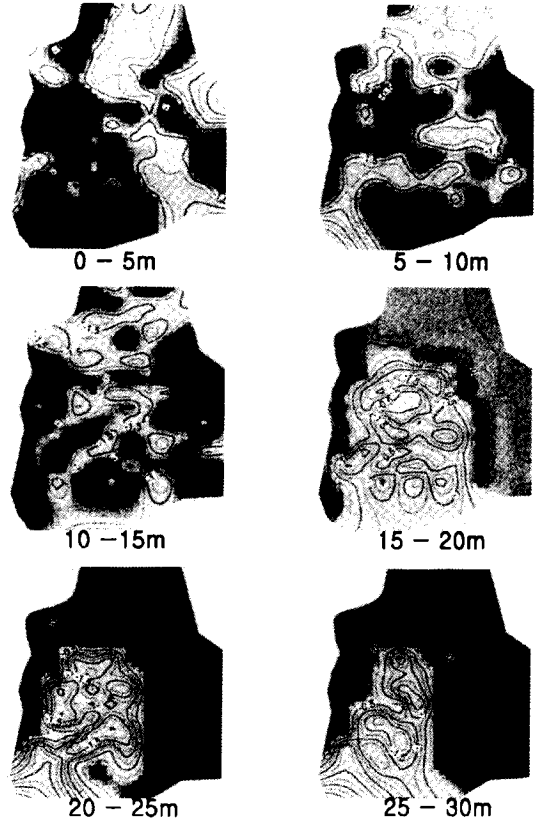


Fig. 8. Density distribution obtained by cell inversion of gravity data of area D by using the simulated annealing method. Each contour map shows average density of the waste layer divided at 5 m intervals.

Fig. 7과 Fig. 8는 각각 A, D지구의 자료에 대해 위의 방법을 이용하여 얻은 매립물의 밀도분포를 5 m 간격의 층별로 나타낸 것이다. 먼저 D지구의 경우 각 층별로 밀도의 분포가 큰 차이가 없는 것으로 미루어보아 매립물은 비교적 안정적인 상태를 유지하고 있는 것으로 판단된다. 이는 이 지역에서 매립이 가장 먼저 이루어져 어느 정도 안정화가 진행된 것으로 보이며, 매립 초기에는 매립물의 종류를 일정하게 조절하는 등의 비교적 체계적인 관리가 이루어졌기 때문인 것으로 생각한다. 그러나 A지구의 경우, 구역별로 밀도의 차이가 큰 양상을 보이고 있어 비균질적인 매립이 이루어진 것으로 추정되며, 각 층별도도 아직 안정화가 충분히 이루어지지 않았음을 관찰 할 수 있다.

자력 탐사

암석의 대자율의 차이에 의해 유발된 지구자기장의 변

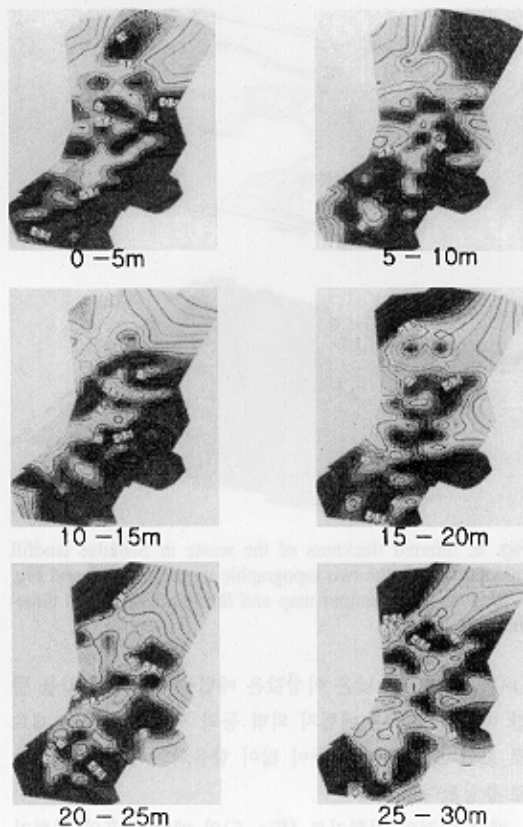


Fig. 7. Density distribution obtained by cell inversion of gravity data of area A by using the simulated annealing method. Each contour map shows average density of the waste layer divided at 5 m intervals.

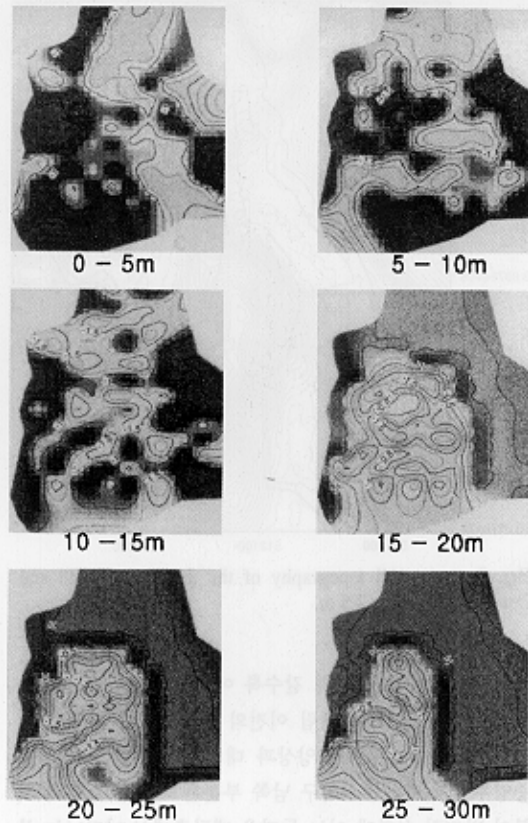


Fig. 8. Density distribution obtained by cell inversion of gravity data of area D by using the simulated annealing method. Each contour map shows average density of the waste layer divided at 5 m intervals.

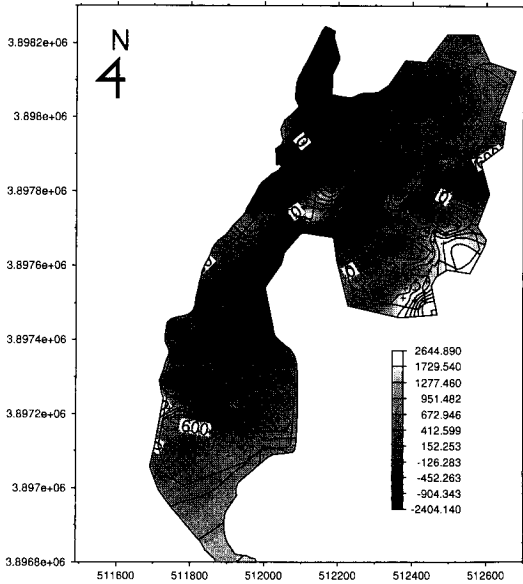


Fig. 9. Total field magnetic intensity map of Seokdae landfill site.

화를 측정하는 자력탐사는 매립장 하부의 기반 구조를 조사하거나 매립물내의 자성물체 탐지에 유용하다. 자력탐사 자료를 이용하여 지하 지질구조를 해석하기 위해서는 지하 구조 이외의 원인으로부터 생길 수 있는 자력 효과를 제거하여야 한다. 이를 위하여 측정치에서 IGRF (International Geomagnetic Reference Field) 를 제거하는 정규보정을 실시하였고, 임의의 복각을 가지는 지역에서 조사된 자력이상을 복각이 90°인 지역 즉, 극지방에서 나타나는 자력 효과로 변화시키는 자극화 변환 (Reduction To the Pole) 을 실시하였다. 또한 자기이상도의 방향성을 알아보기 위해서 방향필터링 (directional filtering)을 실행하였다.

Fig. 9는 석대매립지 상부에서 측정된 총자력도이다. 자력탐사 측정 지점은 중력탐사 지점과 동일하게 설정하였다. 매립지에서의 총자력값은 46600~51000 nT의 범위를 보이며, 최대 4400 nT의 이상값을 가진다. 자력값의 분포는 매립물내의 자성 물질에 기인하는 국부적인 이상과 기반암의 지형과 대자율의 변화에 의한 광역적인 이상이 병존하는 것으로 생각된다.

매립지 전반에 걸쳐 서쪽은 낮은 자력값을 나타내며, 동쪽은 비교적 높은 자력값을 보이는데 이것은 매립지가 위치한 계곡을 경계로 한 기반암의 암상 차이에 기인한 것으로 여겨진다. 즉, 매립지의 서쪽은 유문암과 총적층으로, 동쪽은 안산암으로 되어 있는데, 유문암의 대자율은

20~3000×10⁶ emu의 범위를 가지며 총적층도 이와 비슷한 대자율을 보이는 반면, 안산암은 평균 13500×10⁶ emu의 높은 대자율을 가지므로 동쪽 구역에서의 자력값이 크게 나타난다.

A지구에서는 안산암질 기반암의 영향으로 전반적으로 높은 자력값을 보이며, 중앙 부근에 국지적으로 자력값이 높은 이상대와 낮은 이상대가 동시에 나타난다. B지구의 경우, 매립지 내에서 가장 낮은 자력값을 보이며 A지구와의 경계부에서 자력값의 변화가 나타난다. 이것은 유문암질 기반암의 영향과 매립물의 특성 변화에 의한 것으로 생각되며, 지구별로 매립된 매립물의 종류에 차이가 있음을 알 수 있다. C지구는 많은 물이 고여 있는 등 매립지의 상태가 불량하고 측정의 분포가 '고르지 않아 자료의 해석이 다소 불확실하다. D지구는 매립지의 중앙부에 높은 자력값을 가지는 이상대가 뚜렷이 보이며, 북쪽으로는 비교적 낮은 자력값의 이상대가 나타난다. 이 지역은 기반암의 지형이 남북의 방향성을 가지는 반면, 자력값은 대체로 동서 방향의 경향성을 보이는 것으로 보아 기반암의 지형에 의한 영향보다는, 매립물의 종류에 따라 대자율의 변화가 크게 있는 것으로 생각된다. D지구의 자력이상은 중앙부에 높은 이상대를 보여주는 중력탐사의 결과와도 거의 일치하는 양상을 보여주는데, 이는 이 지역의 중앙부에 기반암보다 밀도는 낮으나 대자율이 큰 매립물이 다량 매립된 것을 시사한다.

Fig. 10은 매립물의 분포에 대한 방향 특성을 살펴보기 위하여 총자력도에 대해 여러 방향으로 방향 필터링을 적용하여 얻은 결과로, A지구에서는 자력이상의 패턴이 N 45E 방향으로, D지구의 중앙 부근에서는 EW 방향의 방향성이 뚜렷이 나타난다. B지구와 C지구는 비교적 좁은 지역이어서 방향성을 추정하기는 힘들다. 이러한 방향성은 매립 과정에서 매립 순서와 시기에 따라 매립물의 종류가 차이를 보이기 때문인 것으로 생각된다.

자력탐사 결과를 종합적으로 해석해 보면 석대매립지는 각 구역에 따라 조금씩 다른 자력 특성을 보이고 있으며, 각 구역 내에서도 기반암의 대자율과 매립물의 특성에 따라 자력이상이 복잡하게 나타난다. 석대매립지는 유문암과 안산암질 기반암의 경계에 위치하고 있어서 전체적인 경향이 기반암의 대자율 변화를 반영하고 있음을 볼 수가 있다. 대체로 자력값의 분포가 매립물의 두께 분포와 일치하고 있는 점은 주목할 만한 사실이다. 이는 다른 매립지와와의 비교연구가 필요한 부분으로 이와 같은 현상이 일반적이라면 자력 탐사가 매립 이전의 지형에 대한 정보가 없는 매립지의 매립 두께를 정성적으로 파악하는데 경제적인 방법이 될 수 있다는 것을 암시한다. 자력이

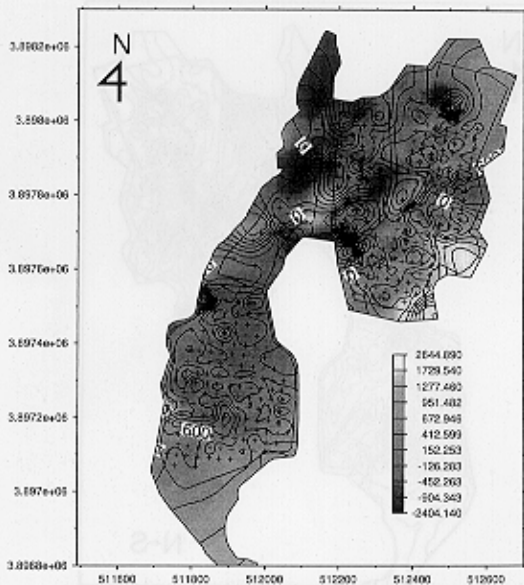


Fig. 9. Total field magnetic intensity map of Seokdae land-fill site.

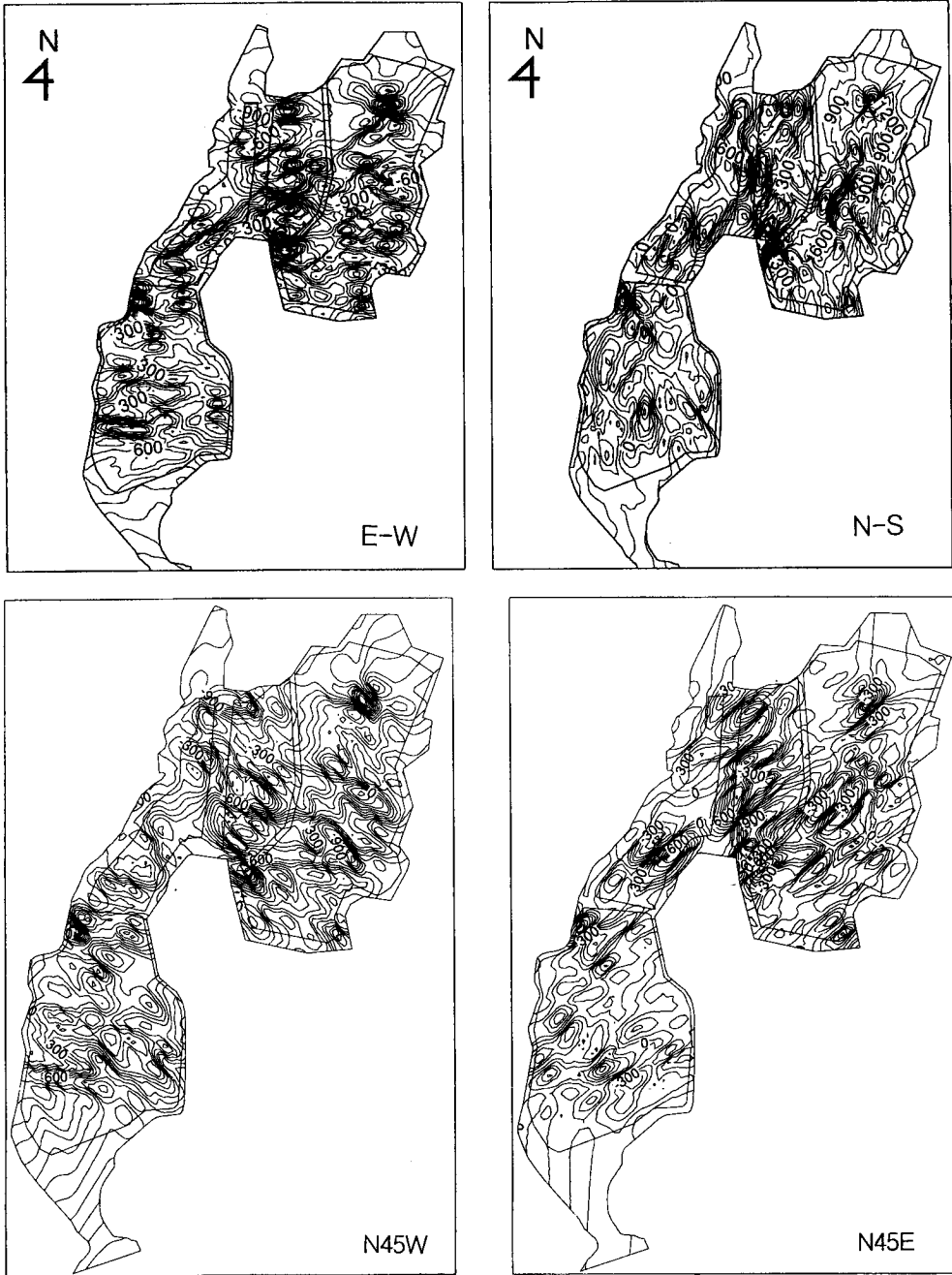


Fig. 10. Total field magnetic intensity map of Seokdae landfill after directional filtering along various directions indicated in each figure.

상도의 음영지도나 방향필터링을 통해 매립물의 방향성을 살펴보면 기반암의 방향성과 반대의 방향성을 나타낸다. 따라서 전체적인 자력 이상은 매립물의 매립 형태에 가장 크게 영향을 받은 것으로 생각된다. 매립을 용이하

게 하기 위해서 계곡을 가로지르는 방향으로 매립해 감으로써 긴 띠의 형태로 매립물의 물성이 변화하고 있다. 이와 같이 자력 탐사를 통해 얻은 매립물의 분포는 매립지의 침하, 침출수의 유출경로, 오염물질의 분포를 파악하는

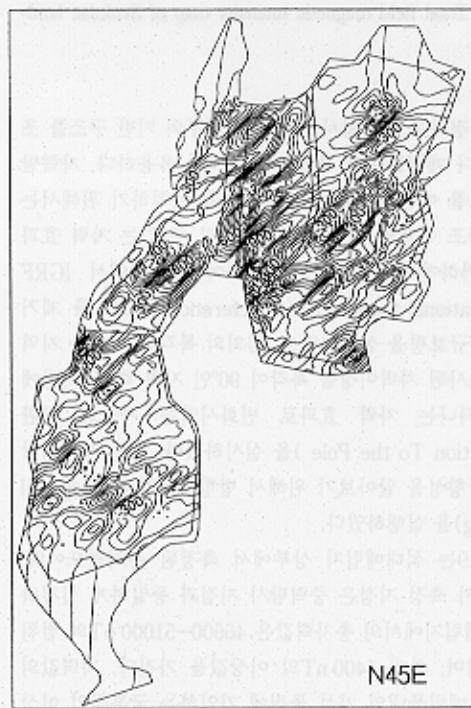
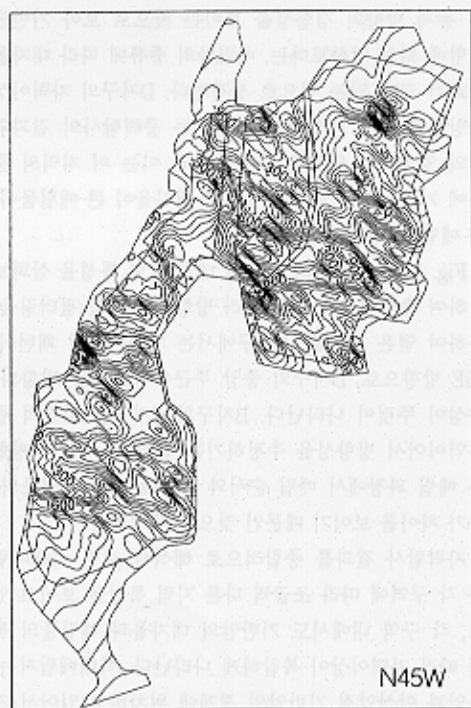
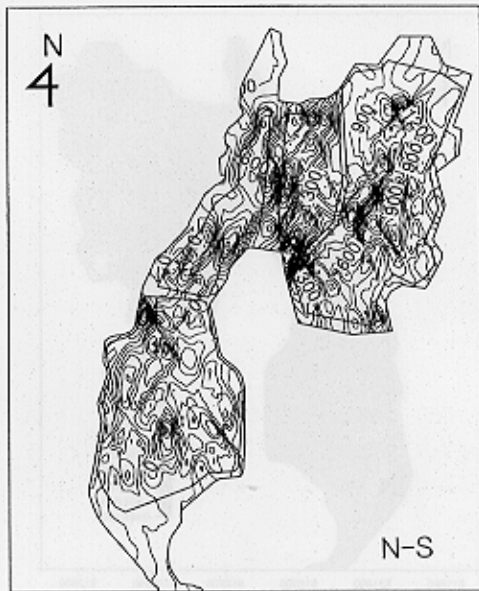
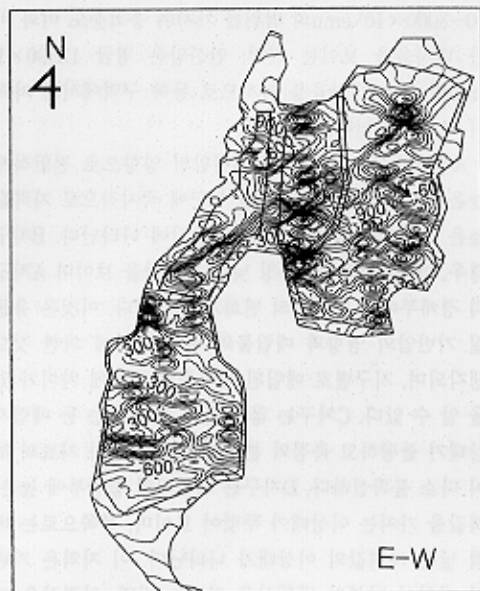


Fig. 10. Total field magnetic intensity map of Seokdae landfill after directional filtering along various directions indicated in each figure.

데 도움이 될 수 있을 것이다.

VLF 탐사

VLF 전기탐사는 대잠수합 교신용의 15~25 KHz의 저주파수 대역의 전자파를 이용하여 지하의 전도성 광체나 파쇄대와 같은 지질구조에 의해 나타나는 전자장 변화를 측정하는 방법으로서 저렴한 탐사비, 신속한 현장작업, 간편한 탐사장비 등의 장점이 있어 천부탐사에 널리 이용된다. VLF탐사의 반응은 전도체 직상부에서 최대값을 나타내는 것이 아니라 영점 통과점을 나타낸다. 따라서 평면도 상에 VLF 탐사자료를 도시하였을 때, 전도체의 분포 경향을 한눈에 파악하기 위하여서는 이상대에서 양의 극대값이 나타나도록 하는 필터링 작업을 수행하여 쉽게 이상대를 파악할 수 있도록 하는 자료처리 과정을 거친다 (Fraser, 1969). 또한 허수영역 자료의 차이에 따라 전기전도도 이상대의 정성적인 특성을 파악할 수도 있다.

석대 매립지에서는 4개 지구에 대해서 ABEM사의 WADI를 이용하여 VLF탐사를 수행하였다. 1개의 측선 내에서는 15 m의 측정 간격으로, 총 40개의 측선에서 측정을 하였다 (Fig. 11). 매립지와 그 주변 지역에 전선주나 송전케이블 등과 같은 전기적인 잡음을 유발할 수 있는 시설물들이 많아 자료의 질이 양호한 상태는 아니나, C지구와 D지구가 연결되는 부분에서 천부에 저비저항대로 해석되는 부분이 관찰되었다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 비교적 명암이 분명한 자료가 실수영역에서 관찰되었고 같은 지점의 허수영역 자료로부터 침출수 유출의 가

능성을 추정할 수 있다. 이와 같은 관측 사실에서 주목해야 할 점은, 앞부분의 중력자료 해석에서도 언급한 바와 같이 C, D지구의 좌측 사면 아래 지역에 형성되어 있는 부락의 주민들로부터 침출수 유출에 따른 민원이 접수되어 부근에 차폐벽을 설치하기는 했으나, 정확한 유출 경로를 확인하기 위한 정밀 탐사작업은 이루어지지 않았다는 것이다. 차폐벽 설치와 같이 상당한 비용의 공사를 진행할 때, 사전에 VLF와 같이 간단하고 저렴한 탐사를 실시하여 개략적인 전기전도도 변화에 대한 조사를 하고 이상이 관찰되는 지역을 대상으로 정밀한 지구물리탐사를 수행한다면 침출수 유출 심도나 경로에 대한 정확한 예측이 가능할 것이며, 결과적으로 오염물질의 확산을 방지하기 위한 시설물을 경제적이고 효율적으로 설치할 수 있어 환경 보전에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

결론

인간생활의 피할 수 없는 부산물인 쓰레기의 최종적 처리는 대부분 매립지에서 이루어지고 있기 때문에 매립 예정지에 대한 철저한 사전·예비조사와 매립과정에서의 감시 및 사후관리가 철저히 요구된다. 이러한 과정에서 지구물리탐사가 제공할 수 있는 여러 자료 중 본 연구에서는 주로 매립지의 전반적인 규모 및 안정성을 확인하고, 환경영향 평가에 필요한 정보를 얻기 위하여 부산시 석대 매립지에서 중력, 자력 및 VLF 탐사를 실시하였다.

중력탐사 결과, 매립의 순서가 늦어질수록 매립 과정과 안정성에 문제가 있음이 나타났다. 매립이 가장 마지막에 이루어진 A지구의 경우 다른 지구에 비해 중력이상치의 변화 범위가 넓은 것으로 미루어보아 아직까지 부분적으로 침하가 계속되고 있음을 추정할 수 있었고, B지구는 매립물의 두께가 가장 두꺼우며 심한 불균질 침하 현상 때문에 매립지 표면의 기복이 심하게 나타났다. C지구의 경우는 인근에 부락이 형성되어 있음에도 불구하고 매립물의 특성이 명확하게 밝혀지지 않고 침출수의 유출 가능성이 매우 높은 것으로 판단되며, D지구는 가장 초기에 매립이 이루어진 지역으로 고른 중력이상값과 역산결과에 의한 밀도 분포 또한 큰 변화가 없는 것으로 보아 본격적인 안정화 과정에 들어간 것으로 보인다.

자력탐사로부터 관측한 총자력값은 46600~51000 nT의 범위를 보이며, 최대 4400 nT의 이상값을 가진다. 매립지 전반에 걸쳐 서쪽은 낮은 자력값을 보이며, 동쪽은 비교적 높은 자력값을 보임을 알 수 있다. 석대 매립지는 이 지역의 기반암을 이루는 서측부의 유문암과 동측부의 안산암의 경계에 위치하고 있는데, 이와 같은 자력이상의

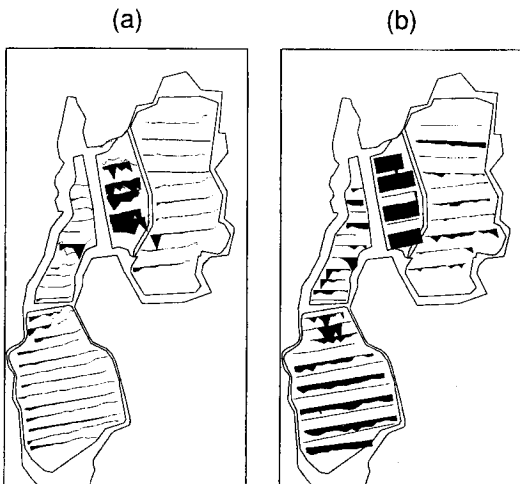


Fig. 11. VLF profiles measured in Seokdae landfill. (a) real part, (b) image.

양상은 이들 두 암석의 대자율의 차이에 기인하는 것으로 해석된다. B지구의 경우, 가장 낮은 자력값을 보이며 인접한 A지구와는 다른 특성을 보인다. D지구는 매립지의 중앙부에 높은 자력값을 가지는 이상대가 뚜렷이 보이며, 북쪽으로는 비교적 낮은 이상값이 나타난다. 기반암의 영향을 받는 이상대가 남북의 방향성을 가지는 반면, 각 지구 내에서 나타나는 국부적인 자력이상은 대체로 동서 방향의 경향성을 보이는 것으로 보아 매립물의 종류에 따라 대자율의 변화가 있는 것으로 생각된다. 또한 석대매립지 4개 지구에 대해 VLF탐사를 실시하여 C, D지구의 일부 지역에서 천부의 저비저항대를 확인하고 침출수의 유출 경로를 추정할 수 있었다. 이상의 자료를 바탕으로 보다 확실한 정보를 얻기 위해서는 국부적인 정밀 전기·전자탐사를 실시하여 3차원 비저항 분포를 구하고, 시추공 검층을 통한 확인 작업도 필요하다.

사 사

이 연구는 대학부설 기초과학연구소 학술연구조성비 지원으로 이루어진 연구과제 (과제번호 : BSRI-96-5407)의 일부로 연구비를 지원해 주신 관계기관에 감사 드립니다

다. 또한 연구지역의 DEM 자료를 제공해 주신 (주)범아 엔지니어링에도 감사를 드립니다.

참고문헌

- 권병두, 김차섭, 정호준, 오석훈 (1995) 난지도 매립지 및 그 주변의 지질환경 연구 : 중력 및 자력탐사. 자원환경지질, 28권, p. 469-480.
- 부산직할시 해운대구 (1993) 석대쓰레기 매립장 안전진단 및 사후환경관리 방안 연구.
- 오석훈, 권병두, 서백수 (1997) Simulated Annealing을 이용한 전기비저항 자료의 역산. 한국자원공학회지, 34권, p. 285-293.
- 이기화, 권병두, 오석훈, 김차섭 (1996) 난지도에 인접한 한강변에서의 쌍극자-쌍극자 전기탐사. 자원환경지질, 29권, p. 335-343.
- 이기화, 권병두, 정호준 (1996) 난지도 매립장 전기·전자탐사. 대한지하수환경학회지, 3권, p. 95-100.
- 정상용 (1995) 부산 석대 폐기물 매립장 일대의 지하수 오염. 대한지하수환경학회지, 2권, p. 1-8.
- Fraser, D.C. (1969) Contouring of VLF-EM data. Geophysics, v. 34, p. 958-967.
- Lee, K. and Yoon, J.R. (1995) Electrical explorations in and around the Nanjido waste landfill. J. Korean Society of Ground Water and Environments, v. 2, p. 64-71.

1997년 12월 16일 원고접수