

포항 유봉산업 폐기물 매립지에서의 중력, 자력, VLF탐사

권병두* · 오석훈* · 정호준* · 임형래* · 이춘기*

Gravity, Magnetic and VLF Explorations in the Ubong Industrial Waste Landfill, Pohang

Byung-Doo Kwon*, Seok-Hoon Oh*, Ho-Joon Chung*, Hyoung-Rea Rim*, Chun-Ki Lee*

ABSTRACT : Gravity, magnetic and VLF surveys were conducted to investigate the structural stability and hazards associated with the Ubong landfill in Pohang City, which has been built to dump industrial wastes. In 1994, the collapse of a bank happened in the 6th landfill site due to sudden heavy rain, and a large quantity of waste materials flowed out to the nearby landfill sites, factories and roads. We used 10×10 m resolution DEM data for gravity reductions. The maximum variation of the terrain effect in the survey area is about 0.5 mgal and the terrain effect is large in the vicinity of bank boundary. The Bouguer gravity anomaly map shows the effects due to the variation of thickness and type of waste materials. The small negative gravity anomaly increases from the 9th site to the 6th site. The small negative gravity anomaly of the 9th site reflects the relatively shallow dumping depth of average 14.5 m in this site and increased density of waste materials by the repeated stabilization process of soil overlaying. The 6th site is located at the center of the former valley and rainfall and groundwater are expected to flow from south-east to north-west. Therefore, considering the previous accident of mixing waste and bank materials at the north-west boundary of the landfill, there may be some environmental problems of leakage of contaminated water and bank stability. The complex inversion technique using Simulated annealing and Marquardt-Levenberg methods was applied to calculate three-dimensional density distribution from gravity data. In the case of 6th site, it is apparent that the landfill had been dumped in four sectors. However, most part of the 9th site show high density distribution. Magnetic surveys were carried out along three profiles in the 6th site and two profiles in the 9th site and showed that high magnetic industrial wastes were concentrated in the 6th site. The result of magnetic survey showing low magnetic anomalies along the boundaries of two sites is similar to that of gravity data. The VLF data also reveals four divided sectors in the 6th site, and overall anomaly trend indicates the direction of former valley.

서 론

현대사회에서 환경문제가 주요 이슈로 부각되면서, 산업화의 부산물로 갈수록 늘어나는 폐기물들을 처리하기 위한 매립지의 위생적 관리와 환경오염방지 및 재활용에 대한 연구가 다양한 방법으로 진행되고 있다. 특히, 매립지의 환경지질학적 특성을 연구하는데 있어서 지구물리탐사방법은 매립지의 구조와 층서, 대수층의 분포, 매립지의 규모, 매립물의 종류 및 상태를 해석하고, 지하 오염물질의 분포범위와 거동, 매립지의 구조적 안정화정도, 토지의 재이용 가능성을 평가하는데 필요한 각종 정보를 얻기

위해서 수행된다. 최근에 와서 환경지구물리학적 연구가 활발히 이루어지면서 매립지의 환경 영향 평가를 위한 조사에서도 다양한 지구물리탐사 방법의 응용이 시도되고 있다 (Ward, 1990).

우리나라에 분포하는 폐기물 매립지역에 대한 지구물리학적 연구로는 서울 난지도 매립지와 부산 석대 매립지에서 권병두 등 (1995, 1998)이 중력탐사, 자력탐사 및 VLF탐사를 수행하여 매립물의 밀도분포를 구하고 중력 및 자력이상대에 대하여 정성적, 정량적 해석을 실시한 바 있으며, Lee and Yoon (1995)은 난지도에서 슬립버저 전기비저항 탐사를 수행하여 매립물의 전기비저항 층서와 침출수 발생지역에 대한 연구를 수행하였다. 또한 이기화 등 (1996)은 난지도 매립지 상부에서 슬립버저 전기비저항 탐사와 함께 동일 송수신기배열 시간영역 전자탐

* 서울대학교 지구과학교육과 (Department of Earth Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea), E-mail: bdkwon@mantle.snu.ac.kr

사를 실시하여 매립물의 특성과 지하구조를 연구하였으며, 이기화 등 (1996)은 난지도에 인접한 한강변에서 쌍극자-쌍극자 배열을 이용한 2차원 전기비저항 탐사를 수행하여 매립지 경계부에서의 침출수 유출가능 경로를 추정하였다.

매립지에서의 중력탐사는 매립물의 밀도가 주변암에 비하여 일반적으로 매우 낮기 때문에 매립지 하부의 기반암의 심도 및 분포 양상을 조사하는데 유용하다. 또한, 중력이상 자료로부터 기반암의 중력효과를 분리 처리하는 과정을 통하여 매립물의 밀도 분포에 따른 매립물의 종류나 다짐 정도를 해석할 수 있다. 자력탐사 자료로부터도 매립물과 기반암의 대차율 차이에 따른 기반의 형태나 암상 변화에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 매립물 내에 들어 있는 자성 물체의 분포를 조사할 수 있다. VLF탐사는 천부 전도체 탐사에 효과적인 전자탐사 방법으로 파쇄대 등의 지질 구조선을 조사하는데 유용하며, 매립지 내에서는 전기 전도도가 높은 침출수의 생성 위치나 유동 경로를 탐지하는 데에 이용된다.

포항 유봉산업 폐기물 매립지는 1991년 11월 13일부터 산업 폐기물을 매립하기 시작하여 현재까지 매립이 진행 중이다. 1994년 제8매립장을 조성하고 있는 상태에서 제6매립장의 안정화 작업을 위한 복토작업을 하던 중 6월 18일부터 19일 사이에 내린 비로 인하여 제6매립장의 제방이 붕괴되어 매립되었던 산업폐기물이 다른 매립 예정지로 흘러들었으며, 이 중 일부는 인근의 공장 및 도로로 유출되는 사고가 발생하였다. 이에 따른 오염 범위와 매립지의 구조적 안정성을 규명하기 위하여 수리지질학적 조사가 수행되고 있다. 이 연구는 매립지와 주변 지역에서 중력탐사, 자력탐사 및 VLF탐사를 수행하여 매립지의 안정화 작업과 주변 지역으로의 오염 확산 방지 대책을 마련하는데 필요한 정보를 제공하고자 한다.

매립지 주변의 지질 개요

포항 유봉산업 폐기물 매립지는 행정구역상으로는 경상북도 포항시 남구 대송면 옥명리 일원에 위치한 지역으로 포항제철 및 관련 단지가 인접하여 있으며, 지리적 좌표로는 대략 북위 35°57'19"~35°57'29", 동경 129°23'08"~129°23'30"에 속한다. 매립지 주변 지역의 지질은 주로 중생대에 속하는 규장암 및 반암류가 우세하게 분포하고, 신생대 제3기의 화산암 및 화산퇴적암류는 중생대 기반암에 분지상으로 분포한다. 제3기층으로는 최하부층인 양북층 중의 장기 역암을 비롯하여 늑대리 응회암 및 조반암이 분포하고, 장기간의 결층 및 침식이 있는 뒤에 연일현무암

Table 1. Stratigraphic sequence of studied area.

	Quaternary	Alluvium	
		Unconformity	
Cenozoic	Tertiary	Nuldaeri Formation	Trachyte, Adesitic lahar Vitric tuff Tuff breccia
Mesozoic	Gyoungsang system felsite, Porphyry		

의 분출이 신생대 제4기에 있었다 (Table 1). 특히 영일지역에 분포하는 비석판체를 포함하는 응회암류는 화산작용에 수반된 Block faulting 등에 의해서 산발적으로 잔존하고 있는 것으로 판단된다 (유봉산업, 1995).

본 연구 지역에서 실시된 10여개 공의 시추 자료로부터 매립층 제방의 토층 형성 및 토질을 분석한 결과를 보면 제방부 매립토는 전지역에서 암갈색~암회색을 띠며, 매립지 남측의 절토 지역을 제외하면 다양한 종류의 쓰레기, 이암편, 풍화잔류토 등이 혼재되어 있다. 매립토 바로 아래에 일부 분포하는 풍화대는 0.3~4.1 m의 두께를 보인다. 상부 풍화토는 원암의 조직과 구조의 식별이 불가능할 정도로 심하게 풍화되어 있으며, 하부 풍화대의 이암편은 구조 및 조직의 식별이 가능한 상태로 토괴와 혼재되어 있다. 이들은 우기시 물을 함유하거나 지하수위 아래에 놓이면 함수비가 급격히 증가하여 매우 강한 점성을 나타내는 점토질 특성을 보이고, 투수성이 불량하여 건조에 장시간을 필요로 한다 (유봉산업, 1995).

매립지의 개요

포항 유봉산업 폐기물 매립지는 Y자형 (동서방향)의 작은 능선 사이에 경작지로 이용되었던 해발 30~65 m의 계곡을 중심으로 북측과 동측은 절토사면에 의해, 남측은 절토 작업후 1~24.4 m를 추가 성토하여 매립지를 조성하였다. 계곡 중심부를 따라 위치한 제6매립장은 서측으로 최고 35.7 m를 성토하여 제방이 축조되었다.

제1매립장부터 5매립장까지는 1983년 1월부터 1991년 11월 사이에 매립이 완료되었으며, 이후 이동하는 차량에 의해 다짐이 잘 되어 안정성에 별 이상이 없는 것으로 판단된다. 제6매립장은 1991년 11월부터 매립을 시작하여 1994년 4월에 매립이 완료되었으나, 1994년 6월 18일과 19일 사이 내린 폭우로 인하여 매립장이 붕괴되어 폐기물의 유출이 있었다. 유출된 폐기물은 제8매립장 조성 예정 부지에 임시로 적치한 후 9매립장으로 운반하여 매립되었다. 제9매립장은 1995년 3월부터 1996년 3월까지 매립되

었는데, 매립 면적은 22,041 m², 매립 용적은 290,000 m³, 평균높이는 14.5 m 정도이다. 한편, 제방이 붕괴된 6매립장의 경우 매립 면적은 35,500 m², 매립 용적은 1,065,000m³, 매립물의 평균높이는 30 m이다. 제7, 8매립장은 현재 매립이 진행중이다. 따라서 본 연구에서는 매립이 완료된 6매립장과 9매립장 및 주변 지역에서 매립물의 분포 및 매립지의 안전성을 평가하기 위한 지구 물리 탐사를 수행하였다. Fig. 1은 유봉산업 폐기물 매립지의 대략적인 조성도 및 지형도이다.

연구지역에 분포하는 매립지 주요 시설물로는 매립지 주위에 우수배제시설과 발생하는 침출수에 의한 오염을 방지하기 위한 차수시설이 있다. 매립지 내에서 발생한 침출수는 집수조를 설치하여 모은 후 자체 침출수처리장에서 처리하여 방류하고 있다. 매립지 상부에는 각종 미생물들에

의해 유기성 폐기물이 분해되면서 발생하는 가스 (LFG: Land Fill Gas)의 배출을 위한 가스배출시설이 있으며, 기타 운영 및 관리에 필요한 부대시설이 설치되어 있다.

중력 탐사

중력 이상

중력탐사는 LaCoste-Romberg Model G 중력계를 사용하여 실시하였으며, 각 측정점들의 고도 측정에는 RED 2A 광파측정기와 Nikon level을 이용하였다. 해발고도는 매립지 내의 TBM을 이용하여 계산하였다. 제6매립장과 9매립장에서는 20 m의 간격의 격자 형태로 중력을 측정하였으며, 각각 136 측정점과 42 측정점에서 중력 자료를 획득하였다. 매립지 일대의 광역적인 중력효과를 고려하기 위하여 주변 지역의 60 측정에서도 중력을 측정하였다.

매립지 내의 매립물과 기반암 사이의 밀도차에 따른 중력 이상을 분리하기 위하여 각종 중력 보정을 실시하였다. 탐사기간 동안의 조석효과는 이론적으로 계산하여 보정하여 주었으며, 각 측정점 간의 위도 차에 의한 중력효과는 무시하였다. 푸리에어 (free-air) 보정과 부계 부정은 해수면을 기준으로 실시하였으며, 부계보정을 위한 밀도는 매립 지역의 지질을 고려하여 기반 암의 평균 밀도인 2.33 g/cm³을 사용하였다.

매립지 조성을 위하여 축조된 인공 제방 및 주변의 구릉지에 의한 지형효과를 보정하기 위하여 지형보정을 수

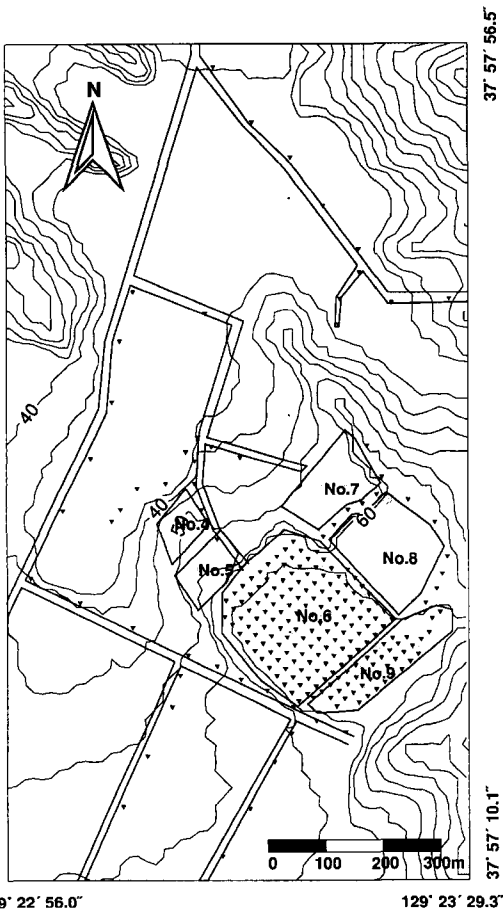


Fig. 1. Location map of the Ubong landfill area. Gravity, magnetic and VLF surveys were mainly carried out in No. 6 and No. 9 sites. Triangles indicate gravity measurement stations. Contour interval of topography is 10 meter.

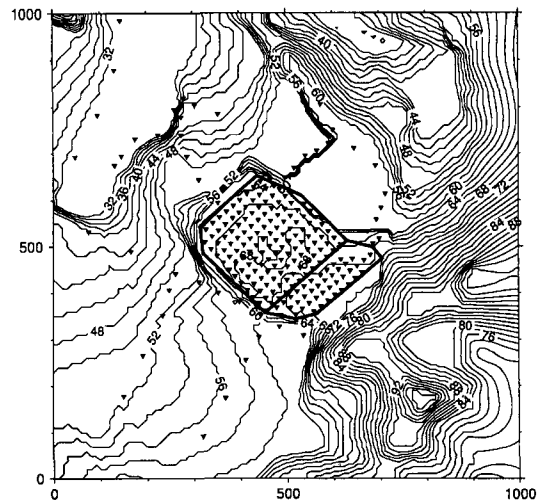


Fig. 2. Regional topographic map of the Ubong landfill area based on digital elevation map (DEM). Contour interval is 4 meter.

행하였다. 이번 연구의 경우와 같은 정밀 중력 탐사에서는 정확한 지형자료가 필요하므로 10 m×10 m DEM (Digital Elevation Map)을 사용하였다 (Fig. 2). 이번에 사용한 DEM이 만들어진 이후에 변형된 매립지 내부의 일부 지형은 광파측정기로 측정된 고도를 추가로 사용하여 최대한 정확도를 높이고자 하였다. 지형보정은 지형 자료를 다중이차곡면 (multiquadric surface) 방정식을 이용하여 수학적으로 근사한 후, 측정점 주변지역을 일정한 구획으로 나누는 Hammer chart 구분구획법을 통해서 원통프리즈름에 대한 중력효과를 계산하는 방법으로 수행하였다. 본 연구 지역은 매우 소규모 지역일 뿐만 아니라 주변이 낮은 구릉지를 형성하고 있기 때문에 원거리 지형 효과의 변화량은 매우 작은 값을 보이므로 근거리 지형을 중심으로 한 정밀보정이 필요하다. DEM자료의 해상도를

충분히 활용하기 위하여 측정점을 중심으로 10 m×10 m의 단위블럭으로 지형을 읽어서 근거리 보정을, 30 m×30 m의 단위블럭으로 중거리보정을, 90 m×90 m의 단위블럭으로 원거리 보정을 실시하여 정밀도를 향상시켰다. 지형효과는 최대 0.5 mgal의 값을 보이며 매립지 내의 경계 제방에서 비교적 큰 값을 보인다.

제6매립장과 9매립장은 전체적으로 고도 차가 약 5 m 이내이지만 매립지 경계와 매립지 내의 일부 지역의 높은 고도의 영향으로 이와 관련된 푸리에어 이상이 인지되며, 매립지 내에서의 푸리에어이상의 최대 변화폭은 1.6 mgal 정도이다 (Fig. 3). 매립물의 밀도분포를 주로 반영하는 부계이상은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 최대 1.4 mgal 정도의 이상폭을 나타낸다. 그러나 매립지 남서쪽의 충적층 지역과 매립지 동쪽의 구릉지의 밀도차에 기인하

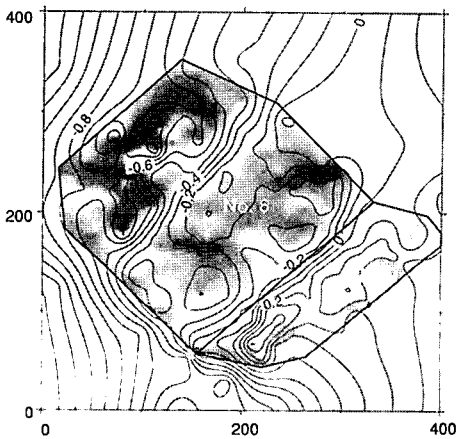


Fig. 3. Free-air anomaly map of the Ubong landfill area. Contour interval is 0.1 mgal.

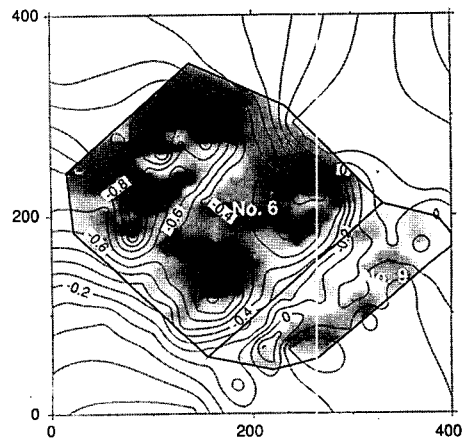


Fig. 4. Bouguer anomaly map of the Ubong landfill area. Contour interval is 0.1 mgal.

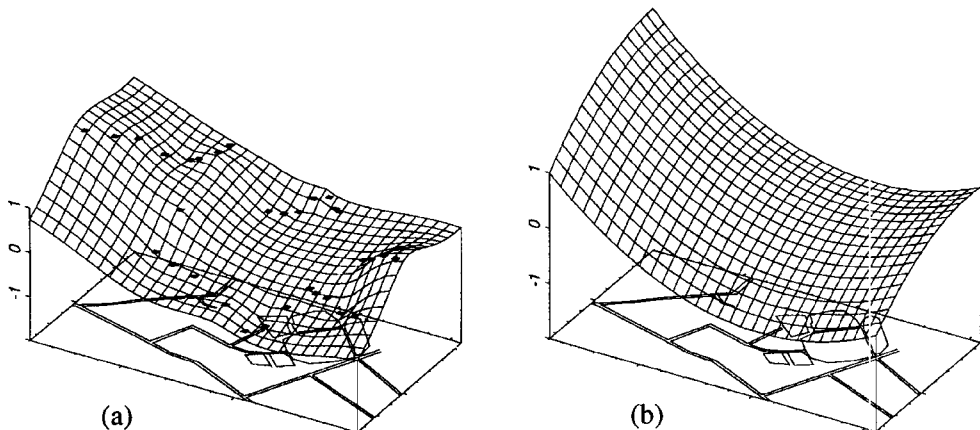


Fig. 5. (a) Bouguer anomalies for the area outside the landfill sites. (b) Regional anomaly map obtained by a polynomial surface fitting of (a).

는 광역적인 중력변화도 관찰되고 있다. 또한, 매립지 내에서 실시되었던 시추자료에 의하면 매립지 직하부에는 풍화토와 이암으로 된 기반암이 분포하고 있어, 이들의 형태와 밀도차도 중력이상에 반영될 수 있다. 이러한 매립지 주변 지질에 의한 광역적인 중력 효과를 분리하기 위하여, 매립지 외부의 60개 측정에서 측정된 중력값 (Fig. 5(a))을 추출하여 3차 평면으로 근사하고 (Fig. 5(b)), 이를 이용하여 광역이상을 계산하였다. 광역 중력 이상은 매립지 북동쪽에서 남서쪽으로 낮아지는 양상을 보이는데, 이는 남서쪽은 밀도가 낮은 층층이 주로 분포하는 계곡이고 북동쪽은 구릉이 분포하여 상대적으로 높은 밀도를 갖는 기반암의 영향이 나타난 것으로 보인다. Fig. 6은 이러한 광역이상을 제거하여 구한 잔여중력 이상도로서 매립지 내에 분포하는 매립물의 중력이상을 보다 잘 나타내준다.

중력이상의 형태는 전반적으로 매립물의 밀도분포와 매립물 두께의 영향을 잘 반영하고 있고, 9매립장에서 6매립장으로 갈수록 중력이상값의 변화폭이 커지는 양상을 보인다. 이는 매립 이전의 지형에 따라 9매립장의 깊이가 얇고 6매립장으로 갈수록 두꺼워짐을 반영한다. 6매립장의 중력이상은 매립장을 네 구역으로 나누어 제방을 만든 후 매립한 형태를 보이고 있으며, $-1.14 \sim -0.25$ mgal의 이상값을 갖는다. 절토한 지역으로 비교적 안정적이라고 판단되는 6매립장의 좌측하부 지역은 가운데 부분에서 작은 이상값이 나타나고, 우측 하부 지역의 이상값은 전반적으로 가운데가 주변보다 작으면서 불규칙한 분포를 보이는데 이는 밀도가 높은 매립물이 가운데 부분에 불규칙하게 분포하기 때문인 것으로 해석된다. 제방을 쌓아 경계를

조성한 우측상부 지역은 6매립장 하부보다 더 낮은 이상값을 보이고, 최대 음의 이상값을 나타내는 지역도 양분되어 있어 밀도가 낮은 매립물이 상대적으로 더 두껍고 불규칙한 형태로 매립된 것으로 추정된다. 가장 문제가 되고 있는 6매립장의 좌측상부 지역은 조성된 매립지의 면적으로는 다른 지역에 비해 작지만 제방을 가장 높게 축성한 지역이고, 이전에 붕괴사고가 있었던 곳이다. 중력 이상값의 분포도 낮은 음의 이상값이 경계까지 연장되는 것으로 보아 낮은 밀도의 매립물이 제방을 축소한 곳까지 연장되는 것으로 추정된다. 실제시추 자료에도 제방 부근에 매립물이 많이 섞여 있는 것으로 알려져 있다. 또한 6매립장은 지형적으로 계곡의 중앙부에 해당하므로 우수나 지하수의 흐름이 남동쪽에서 북서쪽의 흐름이 예상되고, 이는 매립지의 북서쪽 경계에서 매립물이 제방에 섞여있는 사실과 맞물려 침출수의 유출과 제방의 안정성에 영향을 미칠 것으로 보인다.

제9매립장은 매립 깊이가 14.5 m로 얇고 계획적인 매립과 복토의 반복 작업으로 매립물의 밀도가 높아서 중력 이상값의 분포도 비교적 작은 음의 이상값을 보인다. 제9매립장 내에서는 남서쪽에서 가장 작은 음의 이상값이 나타나는데 이곳은 매립지 경계의 도로와 인접한 곳으로 매립물이 잘 다져서 밀도가 높고, 매립지의 경계 부근이므로 매립물의 두께가 매우 얇은 영향이라고 보여진다. 이처럼 중력이상도로부터 정성적으로 추정할 수 있는 매립물의 밀도 분포를 정량적으로 얻기 위해서는 중력 역산을 실시하여야 한다.

밀도 역산

매립지 일대에서 수행한 중력탐사 자료를 보다 정량적으로 해석하기 위하여 3차원 역산을 수행하였다. 3차원 중력역산 방법에는 이상체의 밀도는 일정하다고 가정하고 이상체의 깊이를 역산하는 방법과 지하구조를 셀로 분할하여 각 셀의 밀도를 추정하는 밀도 역산이 있다. 매립지와 같이 매립물의 밀도차가 심하게 나타나는 지역에서는 일정한 밀도를 가지는 이상체를 가정할 수 없기 때문에 매립물의 깊이를 정확히 추정하기에는 어려움이 따른다. 또한, 매립장내에서 구역별로 매립물의 밀도를 구하는 것이 이번 중력탐사의 목적이므로 셀 방식의 밀도역산을 수행하였다. 제6매립장은 30 m 깊이로 굴착한 후 성토과정을 거쳐 조성되었으며, 경계제방의 안정성을 위해 하부로 갈수록 좁아지는 형태의 모양을 가진다. 제9매립장은 14 m 깊이로 굴착하였으며 역시 하부로 갈수록 좁아지는 구조를 가진다. 이러한 매립장의 조성 구조를 감안하여,

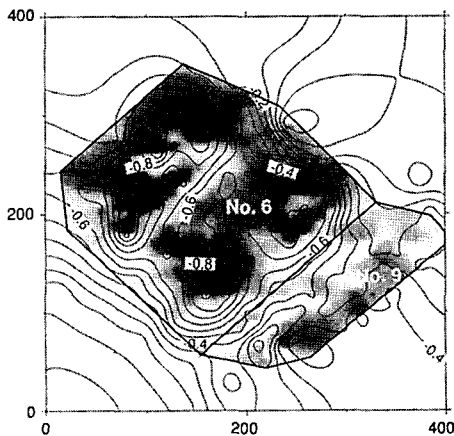


Fig. 6. Residual Bouguer anomaly map obtained by removing regional anomaly of Fig. 5 (b). Contour interval is 0.1 mgal.

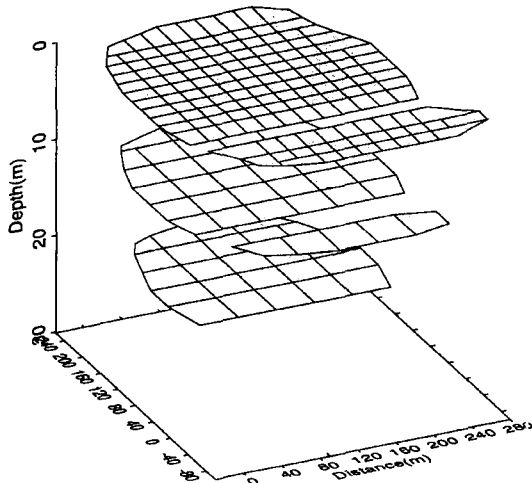


Fig. 7. The plan view of polygonal blocks divided for density inversion at each layer. Polygons are top plan of blocks.

제6매립장은 3개의 층, 제9매립장은 2개의 층으로 분할하였다. 깊이에 따른 중력자료 역산의 해상도를 고려하여 제1층은 주로 20 m×20 m 격자로 분할하였으며, 제2층과 제3층은 40 m×40 m 크기의 격자로 분할하였다. 이러한 격자구조는 셀의 수를 감소시켜 역산의 안정성을 높이며, 천부에서의 해상도를 향상시킬 수 있다. Fig. 7은 각 층의 격자 구조를 보여주고 있으며, 총 215 개의 셀이 사용되었다.

지구물리 역산은 주로 비선형적인 문제이므로 해를 구하기 위하여 선형화시키는 방법을 사용하게 된다. 이러한 방법은 초기치에 크게 의존하게 되어 오차의 국소적 최소치에 도달하는 경우가 많다. 대부분의 역산 문제들은 다중 국소점을 포함하므로 이 방법을 한계를 가지게 된다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 여러 가지 광역적 최적화 기법이 연구되어지고 있으며, 예를 들어 Simulated Annealing 기법과 Genetic 알고리즘 등이 그것이다. 본 연구에서는 선형화 기법과 광역적 최적화 기법을 비교하고, 상호 보완적으로 적용함으로써 보다 정확한 역산을 수행하였다. 선형화 기법으로는 Marquardt-Levenberg 방법을 사용하였으며, 광역 최적화 기법으로는 확률적으로 접근하는 방법 중의 하나인 Simulated Annealing 기법을 사용하였다.

Marquardt-Levenberg 방법은 해의 안정성을 위하여 일반적인 최소자승 방법에 감쇠 인자 (damping factor)를 적용하여 역산을 수행하는 방법이다. 본 연구에서는 각 반복과정에서 SVD (Singular Value Decomposition)를 통해 계산된 고유값의 범위 내의 감쇠인자 중 오차를 최

소화하는 값을 적용함으로써 수렴속도를 향상시킨 방법을 사용하였다. Simulated Annealing은 고온으로 가열되어 분자의 운동 상태가 자유로웠던 물질이 서서히 냉각하면서 에너지가 최소가 되는 과정을 최적화 문제에 도입한 광역적 최적화 기법의 일종으로 국소적 최소치가 아닌 광역적 최소치에 도달하게 된다. 이 연구에서는 각 모델 파라미터의 민감도를 고려하여 수렴속도를 향상시킨 ASA (Adaptive Simulated Annealing) 방법 (오석훈 등, 1997)을 사용하였다.

본 매립지에 매립된 폐기물의 성상은 정확히 알려져 있지 않으나, 제6매립장이 매립될 당시에 조사된 결과에 의하면, 폐수처리 오니 (슬러지)가 68.5%로 가장 많고, 연소재 6%, 분진류 5.5%, 광재류 4.9% 등의 순으로 분포하고 있다. 오니는 탈수과정을 거쳐 최종 매립되지만, 함수율이 높아 상당히 낮은 밀도를 가질 것으로 예상되며, 연소재나 분진류 역시 건축폐자재나 광재류 등 다른 폐기물들에 비해 밀도가 비교적 낮다. 제6매립장 상부에서 4구획으로 나누어져 나타나는 매우 큰 음의 중력 이상값은 위와 같은 매립물의 성상에 기인하는 것으로 생각된다. 역산을 수행하는 과정에서 해의 안정성을 도모하기 위하여 밀도차의 제한이 필요한데, 매립물의 성상을 고려하여 최대 $-1.2 \sim -0.5 \text{ g/cm}^3$ 의 밀도차로 제한하였다.

잔여중력이상도로부터 균일한 밀도 (-0.7 g/cm^3)를 초기치로 하여 수행된 Marquardt-Levenberg 방법에 의한 역산과 초기치가 필요없는 Simulated Annealing을 이용한 역산 결과를 각각 Fig. 8(a)와 (b)에 도시하였다. 심부로 갈수록 두 방법에 의한 결과의 차이가 커지는데, 이것은 심부의 블록들의 경우 지표에서 측정된 중력에 대한 영향이 낮아 상대적으로 밀도의 변화폭이 커지기 때문이다. 이러한 심부의 블록들은 초기치에 의해 크게 좌우될 수 있으므로 Marquardt-Levenberg 방법의 경우 심부의 블록들이 국소적 최소치에 빠질 우려가 있다. 반면, Simulated Annealing은 확률적인 과정을 통해 보다 광역적인 최소치를 찾아가는 하지만, 이와 같은 3차원 역산에 있어서는 많은 모델 파라미터에 의해 수렴속도가 매우 느려지게 된다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 Simulated Annealing을 통해 일정한 반복회수를 수행한 후의 역산 결과를 Marquardt-Levenberg 방법의 초기치로 하여 역산을 수행하였다. 오차의 수렴성을 비교하기 위하여 40m 상향연속 시킨 중력이상으로부터 역산된 모델 파라미터를 초기치로 한 경우를 고려하여 반복회수에 따른 RMS 오차를 Fig. 9에 도시하였다. 방법 1 (method 1)은 -0.7 g/cm^3 로 균일한 밀도차를 초기치로 한 경우를 가리키며, 방법 2 (method 2)는 상향연속을 이

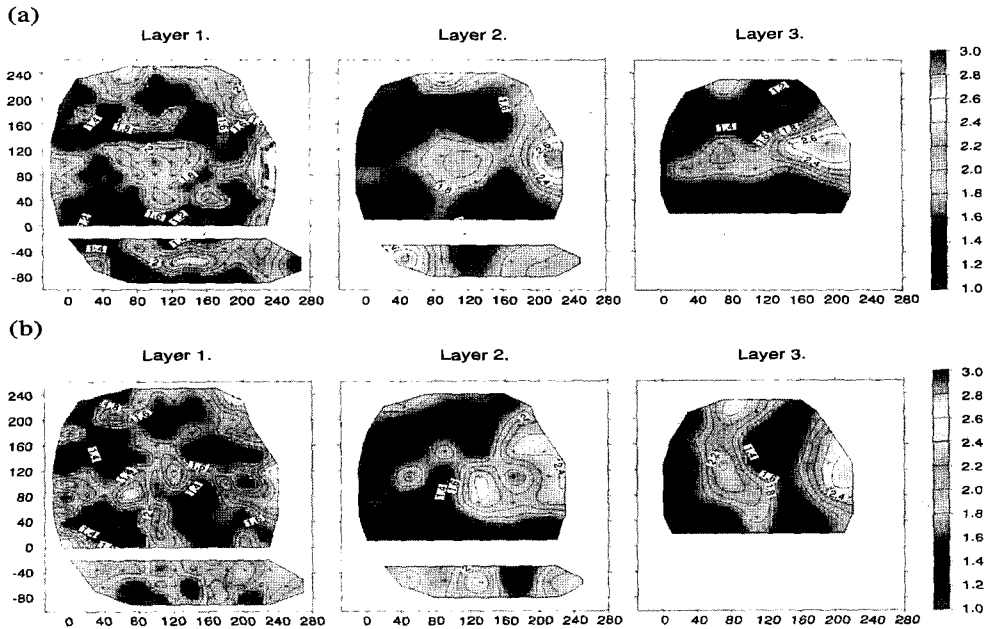


Fig. 8. (a) Densities of each block calculated by Marquardt-Levenberg method. (b) Densities of each block calculated by simulated annealing (SA) method.

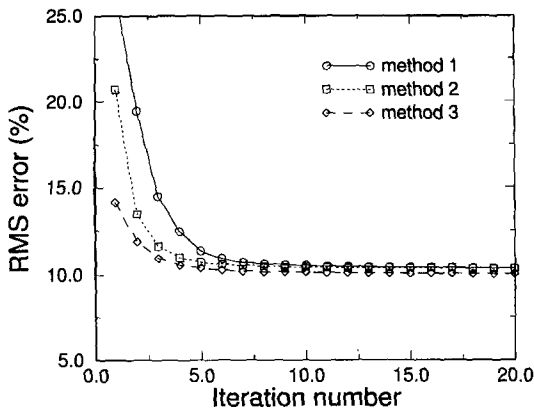


Fig. 9. RMS errors of three methods with respect to iteration numbers. The initial values of density contrast are taken as constant values (-0.79 g/cm^3) for the Method 1, density values obtained by inversion of 40 m upward continued gravity for Method 2 and density values obtained by SA inversion for the method 3.

용한 경우, 방법 3 (method 3)은 Simulated Annealing을 이용한 경우를 나타낸다. 방법 3의 경우, 나머지 방법들보다 다소 낮은 오차에 수렴함을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터, Simulated Annealing을 충분히 반복하거나 물리적인 제한조건을 적절히 가하면 보다 낮은 광역적 최소치에 수렴할 수 있을 것으로 생각된다. 방법 3을 이용하여 최종적으로 계산한 밀도 분포는 Fig. 10과 같다. 역산을 통해

추정할 수 있는 매립장의 평균 밀도 분포는 $1.5\sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ 로 생각된다.

제6매립장의 전체적인 밀도 분포의 특성을 살펴보면, 전반적으로 중력 이상의 양상과 같이 네 구역으로 분할되어 매립되었음을 알 수 있으며, 중앙부의 밀도가 높은 경향을 보인다. 매립당시 효율적인 매립을 위하여 내부진입로를 만든 바 있는데, 이 진입로는 복토와 다짐작용이 잘 이루어져서 높은 밀도를 가지는 것으로 생각된다. 또한, 전 매립층에 걸쳐 좌측 제방부근에서의 밀도가 낮게 나타나는 경향을 보인다. 매립지의 제방에는 안정성을 위하여 건축폐자재 등 밀도가 높은 매립물을 매립하는 것이 일반적이거나, 본 매립지의 경우 시추자료에서도 나타나듯이 좌측 제방에 일반폐기물이 제방 하부까지 분포하기 때문에 밀도가 낮게 나타난다. 이는 제방의 안정성에 있어 문제점으로 제기된다. 특히 좌측 상부가 밀도가 낮은 것으로 보이며, 이 곳은 1994년 제방붕괴 사고가 발생하였던 곳으로, 보수된 제방이 아직 불안정한 상태임을 나타낸다. 각 층별로 매립물의 특성을 살펴보기 위하여 각 층별로 밀도 분포를 히스토그램으로 나타내었다 (Fig. 11). 최상부의 제1층은 다소 높은 밀도를 보이며, 평균적으로 1.9 g/cm^3 의 밀도를 가지는 복토 및 매립물의 혼합물과 $1.1\sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ 의 슬러지가 혼재하는 것으로 생각된다. 제2층과 3층에서는 오히려 더욱 낮은 밀도를 보이는데 이는 초기 매립당시 함수율이 높은 슬러지가 매립되었던 것으로

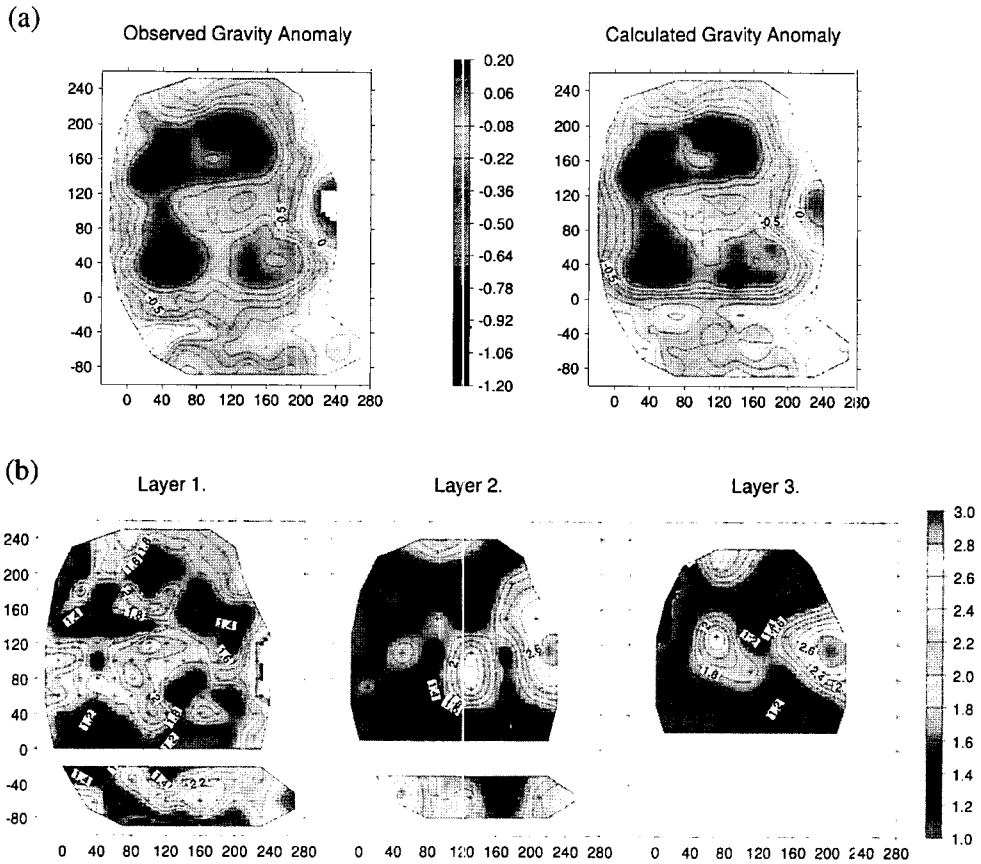


Fig. 10. (a) Comparison between the observed and calculated anomaly maps. (b) The final results of density distribution of each layer obtained from Marquardt-Levenberg method using SA.

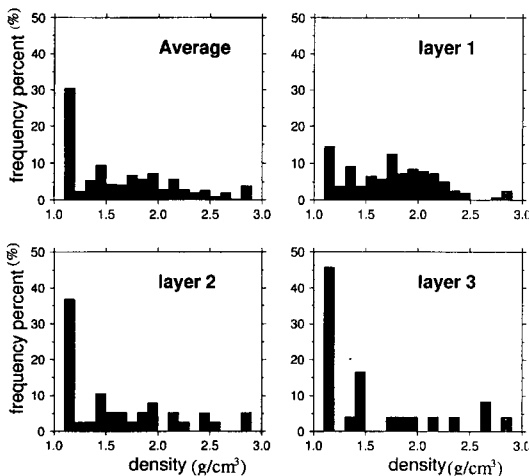


Fig. 11. Frequency percent of density of blocks.

추정된다.

제9매립장의 경우, 6매립장에 비해 깊이가 얇은 14 m 깊이로 매립된 지역으로 전반적으로 높은 밀도를 보인다.

이 곳은 제방 붕괴사고 이후 조성되며, 가장 최근에 매립이 완료된 곳으로 계획적인 매립에 의해 복토와 다짐작용의 상태가 양호한 것으로 생각된다.

자력 탐사

자력탐사는 매립지 내의 자성체 분포에 기인하는 자력 이상을 측정하고 이를 해석하는 지구물리탐사 방법이다. 자력 측정은 제6매립장에서 3개의 축선, 9매립장에서 2개의 축선을 설정하여 Fluxgate 자력계를 사용하여 총자력값의 수직성분을 측정하였다. 이 측정값은 매립물의 대자율 분포에 대한 해석을 실시하기 위하여 탐사 지역의 복각을 이용하여 총자력값으로 환산하였다. 이 계산을 수행하기 위해서는 암석들의 자화강도는 지구자기장에 의해서 형성된다는 것이고, 잔류자화의 크기는 지구자기장에 의해 유도된 자화강도에 비하면 값이 매우 작다는 가정이 필요한데 매립장의 경우는 이러한 가정이 성립한다고 볼 수 있다.

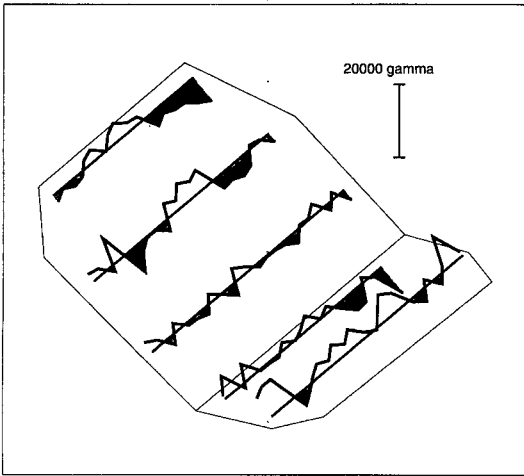
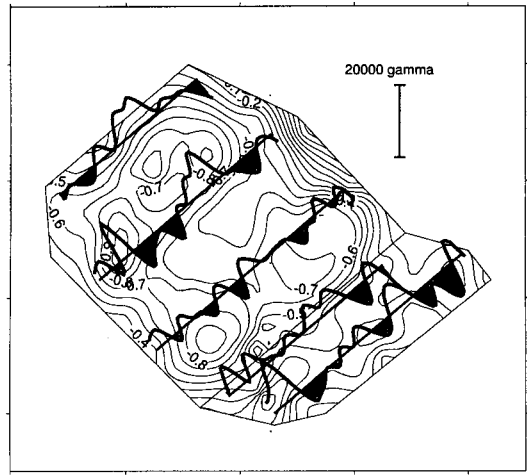


Fig. 12. Total magnetic anomalies obtained at the Ubong landfill sites. The value of IGRF in the survey area is 49496 gamma.

자력탐사 자료로부터 지하 구조 이외의 원인으로부터 생길 수 있는 자력 효과를 제거시키고 해석의 편의를 위하여 정규보정 (normal correction)과 자극화변환 (reduction to the pole)을 실시하였다. 자극화변환은 임의의 북극을 가지는 지역에서 조사된 자력이상을 북극이 90°인 지역, 즉 극지방에서 나타나는 자력효과로 변환시키는 수학적 방법이다. 정규보정은 측정치에서 IGRF (International Geomagnetic Reference Field)를 제거하는 것으로 중력 탐사에서 표준 중력을 빼주어 중력이상을 계산하는 과정과 유사하다. 그러나 본 연구 지역은 측정 간의 거리가 약 1 km를 넘지 않는 좁은 지역이므로 보정값의 변화는 거의 없다.

북극을 이용하여 계산한 총자력값을 살펴보면, 42000~57000 nT의 범위를 보이며, 최대 15000 nT의 이상값을 가진다 (Fig. 12). 매립지의 일부 지역에서만 자력 탐사를 수행하였기 때문에 자력탐사 결과를 단독으로 해석하기에는 무리가 있어 자극화 변환된 자력 이상을 중력탐사 결과와 대비 분석을 하였다 (Fig. 13). 매립지에서의 자력값의 분포는 매립물 내의 자성 물질에 기인하는 국부적인 양상과 기반암의 지형과 대지울의 변화에 의한 광역적인 이상이 병존하게 된다. 제6매립장과 9매립장의 경우, 국부적인 자력 탐사에서 기반암이 자력값에 미치는 영향은 그리 크지 않을 것으로 생각되므로 자력이상값은 매립물 내의 자성 물질의 양상을 반영한다고 할 수 있다.

제6매립장의 아래에 위치한 측선의 우측은 중력의 양상과는 반대를 보이고 있다. 즉, 중력이상값이 크게 나타나는 부분에서는 자력이상값이 작게 나타나고 있고, 변화폭이



분은 매립물의 두께가 얇은 지역이라고 추정할 수가 있으므로, 대자율이 큰 산업폐기물이 매립되었다기보다는 기반암과 매립물의 경계에서 나타나는 효과라 볼 수 있다. 이 측선 우측부의 음의 자력이상은 중력이상값과 비교하였을 때, 저밀도, 저대자율의 산업폐기물이 매립되었다고 추정할 수 있다.

VLF 탐사

VLF 전기탐사는 대잠수함 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. 이 연구에서는 ABEM사의 WADI를 이용하여 VLF 탐사를 실시하였으며, 22.2 kHz의 주파수가 사용되었다. 측정점과 측선의 간격은 모두 10 m이고, 28개의 측선상에 총 626 점에서 측정을 하였다.

Fig. 14(a)와 (b)는 측정된 자료의 실수와 허수 성분을 보여준다. VLF 탐사의 반응은 전도체 직상부에서 최대값을 나타내는 것이 아니라 영점 통과점으로 나타낸다. 실제로 실수 성분을 표현한 (a)를 살펴보면, 상당히 복잡한 형태의 모양을 하고 있어 탐사자료를 그대로 해석하기에는 상당히 무리가 따른다. 따라서, 이상대에서 양의 극대

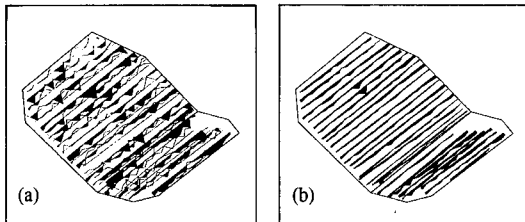


Fig. 14. VLF profiles obtained at the Ubong landfill sites. (a) In-phase component, (b) quadrature component.

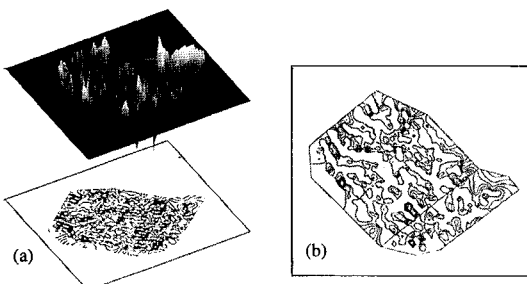


Fig. 15. Filtered VLF profiles by using the Fraser (1969) method. (a) 3-D plot of VLF values. (b) Plot showing only positive values of (a).

값이 나타나도록 하는 필터링 작업을 수행하였다 (Fraser, 1969). 필터링을 거친 자료를 등치선도로 표현한 것이 Fig. 15(a)로 특징은 제6매립장에서 4개의 구획으로 이상대가 구분되어 진다는 사실이다. 이는 다른 탐사자료에서도 인지되는 매립장의 매립 방식 때문에 일어나는 현상으로 생각된다. 그러나 그림에서 나타나는 VLF 반응이 매립물과 기반암의 전기 전도성의 차이에서 발생한 것인지 혹은 침출수의 유출로 인해 발생한 것인지에 대해서는 이 자료만으로는 확인하기가 힘들다.

필터링을 거친 자료는 양의 이상값이 의미를 가지게 되므로, Fig. 15(a)를 양의 값만으로 그린 그림이 Fig. 15(b)이다. (b)는 (a)와는 다른 정보를 제공하고 있다. 양의 이상값이 한쪽 방향으로의 방향성을 가지고 있다는 사실로 이 방향이 계곡의 방향과 일치한다는 사실에 주목할 필요가 있다. 이는, 침출수가 계곡의 방향으로의 흐름을 보이고 있는 것으로 해석할 수 있다.

결론

폐기물 매립지가 환경에 미치는 문제점에 대한 일반의 인식이 증대되면서 매립지 부지의 선정과 관리, 지속적인 환경영향 평가를 위한 여러 가지 기술들이 연구되고 있다. 이러한 환경문제 해결을 위한 한 기법으로 지구물리 탐사의 유용성이 여러 측면에서 확인되고 있으며, 보다 정밀하고 복합적인 탐사 및 해석 기법에 대한 연구가 요구되고 있다. 이 연구에서는 포항 옥명리 산업폐기물 매립지를 대상으로 매립지의 전반적인 규모 및 안정성에 대한 검토를 위하여 중력 및 자력, VLF 탐사를 동시에 실시하여 복합적으로 해석하였다.

특히 최근에 매립이 완료된 제6, 9 매립장의 안정성에 대한 문제가 제기되고 있기 때문에, 이 지역을 중심으로 탐사를 수행하였다. 중력탐사 결과, 제6매립장에서의 중력이상값은 $-1.14 \sim -0.25$ mgal의 변화를 보이며, 내부진입로에 의해 4구역으로 분할된 매립지 내의 매립형태를 잘 반영하고 있으며, 전반적으로는 매우 낮은 이상을 보이고 있다. 제6매립장의 매립 당시 매립물의 조성을 보면, 폐수처리 오니(슬러지)가 주 성분으로 알려져 있으며, 중력역산을 통한 오니의 밀도는 대략 $1.1 \sim 1.6$ g/cm³인 것으로 추정된다. 위생매립을 위한 복토의 혼합물 및 슬러지 외의 폐기물의 밀도는 평균적으로 1.9 g/cm³의 분포를 보이며, 매립물의 전체적인 평균 밀도는 $1.5 \sim 1.6$ g/cm³인 것으로 추정된다. 남서쪽 제방 부근의 밀도가 전 매립층에서 낮은 값을 보이는데, 이는 시추자료에도 반영되고 있듯이 이 지역의 제방이 불안정하게 조성되었기 때문인

것으로 생각된다. 특히 제방붕괴 사고가 발생한 지역에서 가장 낮은 밀도를 보이는 점은 이 곳의 안정성에 문제점이 있는 것으로 볼 수 있다.

자력탐사는 매립지 상부에서 5개의 축선을 따라 수행하였다. 총 자력 이상은 42000~57000 nT 정도로 나타나 역시 큰 변화 폭을 보이며, 중력이상의 양상과 어느 정도 연관성을 인지할 수 있다. 자력이상은 주로 표층 매립물의 대자율에 의해 좌우되는 것으로 생각되는데, 대체적으로 낮은 밀도를 보이는 곳에서 높은 자력이상을 나타내는 것을 알 수 있으며, 이는 낮은 밀도의 슬러지가 상대적으로 높은 대자율을 가지는 것으로 추정된다.

VLF 탐사에서는 매립물의 전기 전도성의 차이에 따른 이상값의 변화는 복잡한 매립물의 분포를 보여주고, 필터링을 의한 분석을 통해서 매립지 내의 침출수의 흐름이 계곡 방향으로 존재함을 추정할 수 있다.

사 사

이 연구는 대학부설 기초과학연구소 학술연구조성비 지원으로 이루어진 연구과제 (과제번호 : BSRI-97-5407) 의 일부로 연구비를 지원해 주신 관계기관에 감사 드립니다. 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. 한국자원환경지질학회지, 28권 5호, p. 469-480.
- 권병두, 서정희, 오석훈 (1998) 부산시 석대 매립지에서의 중력, 자력, VLF탐사. 자원환경지질학회지, 31권 1호, p. 59-68.
- 오석훈, 권병두, 서백수 (1997) Simulated Annealing을 이용한 전기비저항 자료의 역산. 한국자원공학회지, 34권 3호, p. 285-293.
- 이기화, 권병두, 오석훈, 김차섭 (1996) 난지도에 인접한 한강변에서의 쌍극자-쌍극자 전기탐사. 한국자원환경지질학회지, 29권 3호, p. 335-343.
- 이기화, 권병두, 정호준 (1996) 난지도 매립장 전기·전자탐사. 대한지하수환경학회지, 3권 2호, p. 95-100.
- 유봉산업, (1995) 유봉산업 폐기물 매립시설 환경성 검토 및 사후대책수립 보고서.
- 정상용 (1995) 부산 석대 폐기물 매립장 일대의 지하수 오염. 대한지하수환경학회지, 2권 1호, 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.
- Ward, S.H. (1990) Geotechnical and environmental geophysics, Society of Exploration Geophysicists.

1998년 12월 15일 원고접수, 1999년 1월 13일 게재승인.