

연구논문

쓰레기 매립장 주변의 침출수 오염조사 사례: 전자탐사 및 자력탐사의 적용

손정술¹⁾ · 김정호¹⁾ · 이명종¹⁾ · 고경석²⁾

Case Study on the Investigation of Leachate Contamination from Waste Landfill Using Electromagnetic and Magnetic Methods

Jeong-Sul Son¹⁾, Jung-Ho Kim¹⁾, Myeong-Jong Yi¹⁾ and Kyung-Seok Ko²⁾

요약 : 이 연구에서는 생활쓰레기 매립장 주변에서 침출수로 인한 오염조사를 목적으로 전자탐사와 자력탐사법인 지구물리학적 조사 기법과 지하수 시료 분석과 토양가스 탐사법을 수행하였다. 본격적인 지구화학적 모니터링 이전에 매립장의 경계 및 침출수의 오염상황을 살펴보기 위한 사전탐사의 개념으로 탐사가 수행되었다. 전자탐사 기법을 이용하여 매립장 및 그 주변의 토양의 전기전도도 분포를 구하였으며 이를 통해 침출수로 인한 오염상황을 파악하였으며, 자력탐사의 기법을 통해서 지표에 드러나지 않은 매립지의 경계를 추정할 수 있었다. 전자탐사를 통해 확인된 침출수의 오염양상은 매립장 주변에 설치된 모니터링의 지하수 분석 자료에서 확인할 수 있었으며, 자력탐사를 통해 확인된 매립지의 경계는 토양가스 조사 결과와도 일치하였다. 이 연구를 통하여, 물리탐사 기법의 토양오염조사의 가능성을 확인할 수 있었으며, 지구화학 탐사결과를 통해 그 결과의 타당성을 확인할 수 있었다.

주요어 : 매립지, 전자탐사, 자력탐사, 지하수분석, 토양가스 조사

Abstract : In this study, we offered the results of geophysical and geochemical survey on the municipal waste disposal area to delineate the size and extent of leachate contamination. Preliminary to intensive geochemical investigation, we performed two geophysical methods to characterize the survey area. Electromagnetic (EM) and magnetic method were used for site investigation. From the EM method, we can get the information of soil conductivity directly related to the leachate of the contaminations and from magnetic anomalies we can find the boundary of landfill which is not identified on the surface due to soil capping. The results of geophysical survey were well matched to those of geochemical method carried out inside and near the landfill. Electric conductivity (EC) of the groundwater sampled from low resistivity anomaly region of EM result was higher than background value and the border estimated from the magnetic survey showed good agreement with that estimated from the soil gas detection survey.

Keywords : waste landfill, electromagnetic survey, magnetic survey, geochemical analysis, soil gas detection survey

서론

쓰레기 매립장은 환경오염물을 매립을 통해 처분하는 곳이므로 필연적으로 매립지 및 그 주변은 환경오염원에 노출되어 있어, 매우 엄격한 위생관리가 필요하다. 그러나, 현재까지 이루어져 왔던 쓰레기 매립은 엄격한 관리가 이루어지기 전부터 매립이 진행되어 왔던 지역이 많으며, 매립물의 종류 및 매립지의 범위 등에 대한 적절한 문서화가 이루어지지 않아 매립지의 상황을 파악하기 어려운 지역 또한 상당수에 이르고 있다. 또한, 원래의 계획과는 다르게 매립이 진행된 지역의 경우가 많아 지하수 및 토양오염의 문제를 발생시키고 있는 실정

이다. 이러한 침출수로 인한 오염에 대한 대책 수립을 위해서는 오염의 범위나 정도를 파악하는 것이 매우 중요하다.

지구물리학적 탐사방법은 매립지의 경계 및 규모와 관련된 유용한 정보를 제공하며, 특히 전기전도도와 같은 지구물리학적 물성정보를 제공할 수 있다. 이러한 지구물리학적 물성정보로부터 지층 하부의 물리-화학적 변화에 대한 정보를 추정할 수 있어, 지층내부의 화학적 특성정보를 유추해 내는 것이 가능하다. 침출수 오염이 진행된 지역에서는 지하수 내부의 화학적인 성분변화로 인하여 전기적인 물성변화가 발생하며, 이러한 변화는 물리탐사 기법의 적용결과 얻어진 지층의 전기전도도 분포를 통해 확인할 수 있다. 이러한 연유로 인해

*2005년 4월 12일 접수

1) 한국지질자원연구원 지반안전연구부(Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources) jsson@kigam.re.kr

2) 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부(Geological and Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

전기비저항 및 전자탐사 기법이 매립지 오염조사에 보편적으로 활용되었다(이기화 등, 1996; 송성호 등, 2003). 최근에 들어서는 침출수 오염조사를 위해 지구물리 탐사와 더불어 지구화학 탐사가 동시에 적용된 사례연구가 발표되고 있으며 (Abbaspour *et al.*, 2000; Abu-Zeid *et al.*, 2004), 점점 그 적용이 늘어가고 있는 추세이다. 지구화학 탐사는 그 특성상 조사 지역의 일부에서 샘플링을 수행하고 이를 이용하여 그 사이의 변화양상을 유추하는 방법으로 오염원에 대한 가장 정확한 자료를 제공할 수 있으나, 넓은 조사지역에 대해 수행하기 위해서는 많은 수의 샘플링이 필요하므로 비용 및 시간이 많이 소요된다. 반면, 지구물리화학적 방법을 적용하는 경우에는 비용이나 시간적인 면에서는 강점을 가지나, 탐사를 통해 얻어진 물리적 물성과 오염원과의 직접적인 연관성을 찾기가 그리 쉽지 않은 한계점을 가지고 있다. 이 두 방법을 동시에 적용하는 경우에는 각각의 장단점을 서로 보완할 수 있으므로 조사 계획의 수립 및 진행에 많은 융통성을 가질 수 있게 된다. 한편, 지구물리화학적 조사방법 중 자력탐사의 기법은 그 탐사 결과가 전기적 물성자료와 연관성이 없음으로 인하여 침출수 오염 문제와 관련해서는 거의 적용되지 않았으나, 폐기물의 종류에 따라 매립지의 경계 및 매립물의 종류에 대한 정보를 제공할 수 있음으로 인하여 조사목적에 따라 활용되는 방법이다 (Hinze *et al.*, 1990).

이 연구에서는 매립지의 특성 파악 및 침출수의 오염상황과 누출경로를 조사할 목적으로 지구물리화학적 탐사방법과 지화학 분석을 동시에 수행하였다. 지구물리화학적 탐사방법으로는 전자탐사와 자력탐사 기법을 활용하였으며, 지화학 탐사로는 조사지역에 위치한 모니터링 시추공내의 지하수 분석과 매립지 상부에서 토양가스 탐사를 수행하였다.

자료 획득 및 자료처리

이 연구에서 조사대상지역으로 선정된 쓰레기 매립장의 경우에는 위생매립지 관련 법규정이 제정되기 이전부터 상당히 오랜 기간 동안 매립이 진행된 지역으로, 침출수로 인한 지하수 및 토양의 오염이 진행되었을 것으로 생각되는 지역이다. 매립과 관련되어 매립기간 및 매립물의 종류 등에 명확한 문서가 남아 있지 않아 그 형성내역에 대해서는 정확한 파악이 어려웠으나, 주로 주변지역의 생활쓰레기들이 매립된 것으로 판단되었다. 조사가 진행되는 기간에는 매립지 상부의 경우에는 매립이 완결되어, 상부를 토양층으로 피복하는 공사가 진행 중이었다. 매립지 하부는 논으로 조사가 수행된 시기가 12월 초라 비어있는 상태였으나, 물빠기가 제대로 되어 있지 않아 대부분 진흙탕으로 남아있었다. 매립이 진행되는 기간 중에 위생 매립지 관련 법규정이 정립되어 바닥에 차수막 및 침출수 처리 시설을 갖춘 후에 2차 매립이 진행된 것으로 파악되었다. 차수막 설치 이전에도 매립이 있었다는 점과, 한쪽이 열려

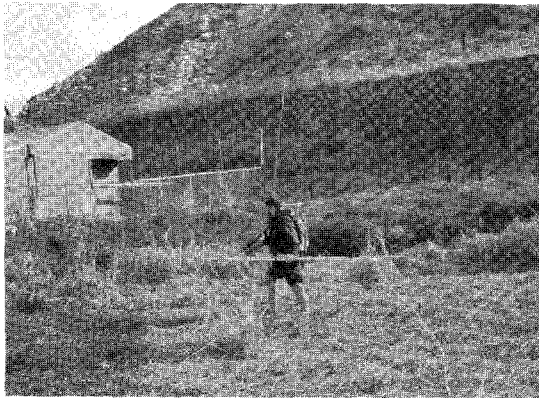
있는 계곡부에 형성된 매립지의 형태상 침출수의 완벽한 차단이 힘든 점들로 미루어 볼 때 오염이 일정정도 진행되었을 것을 판단되었다.

지구물리학적 탐사기법으로는 전자탐사와 자력탐사를 이용하였으며, 지구화학적인 탐사방법으로는 시추공내 지하수 분석과 토양가스탐사를 수행하였다. 전자탐사와 자력탐사는 모두 비접지식의 탐사방법으로 단시간 내에 넓은 지역에 대한 탐사를 수행할 수 있는 장점을 가지고 있으며, GPS와 같이 위치정보를 탐사와 동시에 기록하는 경우에는 그 탐사 효율을 극대화할 수 있다. 그러나 위의 두 가지 탐사기법은 광역적인 탐사기법으로 넓은 지역에 대한 개략탐사가 장점인 반면에 정밀한 오염해석과 관련해서는 그 정확도가 떨어지는 한계점도 역시 가지고 있다. 지구물리화학적 조사는 매립지의 상부 및 매립지 주변부의 탐사가 가능한 지역에 대해 수행되었다. 지하수 분석의 경우에는 매립지 주변에 설치된 시추공에서의 지하수 샘플에 대해서 수행되었으며, 토양가스 탐사의 경우에는 매립지 상부의 몇 개의 축선에 대하여 수행되었다. 각각의 탐사 자료의 획득에 대한 내용은 아래와 같다.

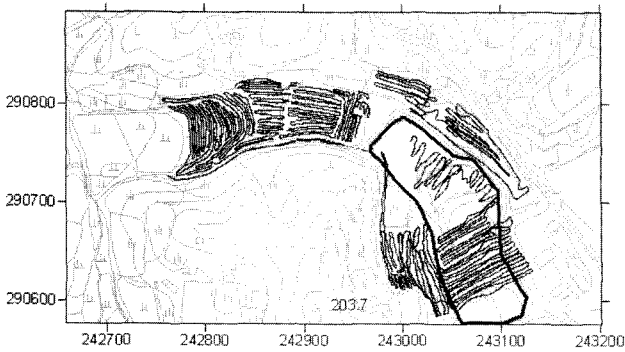
전자탐사

전자탐사는 미국의 Geophex사에서 제작한 다중주파수 소형 루프 전자탐사 장비인 GEM-2H 센서를 이용하여 수행되었다. GEM-2H는 주어진 주파수 대역 내에서 다수의 송신주파수를 이용하여 수직적인 전기전도도의 변화양상을 탐지할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 송수신기간의 거리가 2.05 m로 고정되어 있어 탐사환경에 따라 차이가 있으나 가탐삼도가 대략 10 m 이내로 제한되는 한계점을 가지고 있다(송윤호, 정승환, 2002). 이 연구에서는 전자탐사의 효율을 극대화하기 위하여 정밀 GPS 장비인 Trimble 5700을 이용하였다. 자료의 측정과 동시에 위치정보가 기록되며, 차후의 자료처리 과정에서 전자탐사 자료의 위치로 보간을 통해 변환된다. GPS는 탐사의 효율을 극대화 시키나, GPS 장비의 본체, 안테나 및 연결 케이블 등은 모두 자체적으로 전기전도도가 높은 금속성의 물질을 포함하므로 전도성 물체에 강하게 반응하는 전자탐사의 특성상 필연적으로 탐사자료에 영향을 주므로, 정확한 자료의 해석을 위해서는 이에 대한 보정이 필요하다. GPS 장비에 의한 영향은 측정위치에 관계없이 동일하게 나타나므로, 고정된 위치에서의 GPS 장비를 사용할 때와 사용하지 않았을 경우의 자료 차이를 이용하여 보정값을 계산한 후 이를 일괄적으로 적용하여 GPS 장비의 영향을 제거하고자 하였다.

전자탐사는 조사대상지역에 쓰레기 매립장 상부와 그 하부의 논에서 집중적으로 수행되었다. 쓰레기 매립장은 탐사가 수행된 시기에도 계속적으로 매립이 진행되어, 대형 쓰레기 트럭들이 계속적으로 매립장으로 이동하고 있었으며, 매립을 위한 중장비가 운용중이어서 매립지 상부 지역 전부를 탐사하지는



(a)



(b)

Fig. 1. Photo of GEM-2H survey (a) and GEM2H profile (b). GEM-2H sensor and GPS were carried by field crew. GPS positions for a single data are plotted in this figure. Coordinate of GPS' Lat/Long is converted to KTM and plotted on the map. Lower right part enclosed by solid line is landfill area and left part outside this boundary is at rice fields.

못하였다. Fig. 1는 매립지 및 매립지 주변에서 전자탐사를 수행하고 있는 장면과 탐사측선도이다. 측선도의 각각의 위치는 GPS에 저장된 좌표로 탐사자의 이동경로를 도시하고 있다.

Fig. 1(a)의 전자탐사 수행장면에서 볼 수 있듯이 탐사자는 어깨끈을 이용하여 GEM-2H 센서를 들고 이동하며, 등에는 GPS를 메고 탐사를 수행하게 된다. 등에 맨 가방의 상부에 보이는 원형의 안테나가 GPS 안테나이며, 탐사자는 센서를 최대한 수평으로 유지하면서 탐사를 수행하게 된다. 매립지 상부의 경우에는 매립이 완료되어 표토층의 성토가 이루어져 있는 부분이 많아 탐사가 원활하게 수행되었으나, 하부의 눈에서는 눈에 물이 그대로 남아있어 이동이 매우 어려웠으며 발이 푹푹빠지는 경우가 많아 이동 및 센서의 수평을 유지하는 것이 매우 힘들어 자료획득에 많은 시간이 소요되었다.

Fig. 1(b)에서 굵은선으로 표시된 부분이 매립지의 경로를 대략적으로 표시한 것이다. 쓰레기 매립은 남쪽에서 시작하여 북서방향으로 진행되었으며, 매립지 전체는 2차에 걸쳐서 형성된 것으로 파악되며, 1차 매립지는 매립지 경계의 남쪽에 위치하고 있을 것으로 추정되었다. 1차와 2차 매립지의 경계는

매립이 완료된 후 그 상부가 토양층으로 피복되어 있어 구분이 어려웠으나, 2차 매립지 일부 경계는 침출수 차수막 고정을 위한 볼트와 차수막이 지표면에 노출되어 어느 정도 유추하는 것이 가능하였다.

매립지 상부에는 TV, 냉장고 등의 대형 금속성 쓰레기들이 방치되어 있었으며, 매립을 위한 중장비가 운용되고 있어 탐사를 진행하기가 어려웠으며, 일부 지역에서는 매립 후 성토한 지역에 원예를 위한 묘목이 심어진 부분도 있어 상부의 상당 부분에 대한 탐사가 불가능하여 다른 지역에 비해 상대적으로 탐사밀도가 낮다. 같은 이유로 인하여 자력탐사의 측선도 상에서도 매립지 상부에서 탐사밀도가 낮게 나타난다.

전자탐사를 위한 자료획득 변수로는 330~20,010 Hz 사이의 지수적으로 증가하는 10개의 주파수를 선택하였으며, 초당 3개씩의 자료를 얻도록 하였다. 탐사에 사용된 GEM-2H는 장비의 특성상 연속적으로 자료의 측정만이 가능하며, 이번 조사에서는 회당 10회의 자료를 평균하도록 설정하였다. 탐사는 초당 3개의 자료를 얻는 반면, GPS 자료는 초당 1개씩의 위치정보를 제공하므로 위치정보가 없는 2개의 자료에 대해서는 보간을 통해서 위치를 계산하였다. Fig. 1의 측선도는 각각의 측정에서의 보간된 위치정보를 이용하여 작성된 측선도이다.

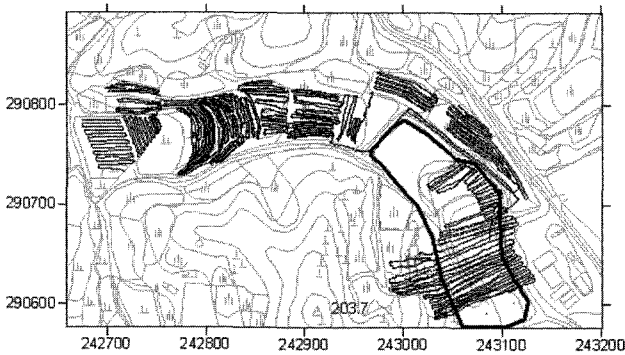
전자탐사 자료의 해석을 위한 자료처리로는 FIR (Finite Impulse Response) 필터를 이용한 공간저주파 통과 필터링을 수행한 후, 필터링 된 자료에 대해서 걸보기 비저항 변환을 수행하였다. 일반적으로 금속성 이상체에 의한 전자탐사의 반응은 공간적으로 급격한 양상의 변화를 보이는 특징을 가지며, 이는 공간주파수상에서 고주파수의 특성을 가지게 된다. 지층의 전기전도도 분포를 파악하는 목적으로 탐사를 수행하는 경우에는 이러한 고주파수 반응은 지층의 반응을 가리는 잡음의 역할을 하게 되므로, 이를 제거하기 위한 목적으로 FIR 필터를 이용한 공간저주파 통과 필터링을 적용하였다. 걸보기비저항 변환은 송신주기 거리를 고려하여 계산하였으며(송윤호 등, 2001), GPS의 위치정보를 이용하여 공간상의 걸보기 전기비저항 분포로 보간 후 이를 이용하여 해석을 수행하였다. 걸보기 비저항은 각각의 주파수에서의 일정심도까지의 전기적 인 물성의 영향을 총체적으로 반영하는 값으로 땅의 실제 전기비저항을 의미하는 것은 아니나, 지층의 전기적 특성을 전반적으로 반영하는 값으로 계산이 손쉬워 전자탐사 해석에 많이 활용되는 방법이다.

자력탐사

미국 Geometrics 사의 G-858 자력계를 이용하여 동일지역에 대해 자력탐사를 수행하였다. G-858 자력계는 핵자력계의 하나로 세습자력계로 총자기장을 측정한다. G-858 자력계를 이용하여 매립장 및 주변지역에서 탐사를 수행하였으며, 2개의 센서를 수직으로 배열하는 방법을 통해 수직구배 탐사를



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Photo of magnetic survey and (b) its profiles in landfill area. Data acquisition positions were plotted in this figure.

수행하였다. 자력센서가 고정된 탐사장비를 들고 탐사자가 조사지역을 이동하면서 탐사를 수행하였으며, 위치정보의 기록을 위하여 당 연구진이 보유하고 있는 또 다른 GPS 장비인 Trimble Pathfinder를 이용하였다. Trimble Pathfinder는 비컨 신호의 보정정보를 이용한 실시간 DGPS 장비로 1 m 이내의 정확도를 가진다.

GPS의 위치정보는 자력탐사기의 센서의 총자기장 값과 동시에 저장되어 자료처리 과정에서 총자력 분포를 계산하는데 이용된다. Fig. 2(a)는 자력탐사를 수행하는 장면으로 수직으로 배열된 자기장 센서와 GPS를 메고 탐사자가 이동하게 되며, 손에 들고 있는 GPS 콘솔을 통해 현재의 위치를 확인하면서, 일정 간격으로 조사지역을 이동하면서 탐사를 수행하게 된다. 전자탐사의 측선도에서와 마찬가지로 매립지 상부에서의 탐사가 수행되지 못한 지역이 보이는데, 이는 매립지 상부에 방치된 금속제 폐기물 및 매립을 위한 중장비의 이동 및 원예를 위한 묘목지 등의 이유로 인하여 탐사가 불가능한 지역이 많았기 때문이다. 이와 더불어 탐사도중에 GPS의 전원부족으로 인한 위치정보가 기록되지 못한 지역이 있어 매립지 상부에서 탐사자료가 일부 비어있는 것이 확인된다(Fig. 2(b)).

전자탐사와 마찬가지로 자력탐사도 공간적으로 그 탐사밀도

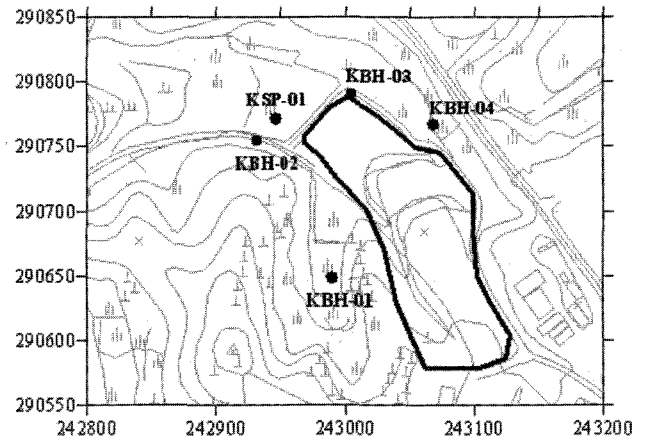


Fig. 3. Water sampling positions. KBH-01 ~ KBH-04 were sampled in the borehole, and KSP-01 was sampled in a small pond near the landfill.

가 매우 높아 자료획득에만 3~4일 정도의 오랜 시간이 소요되어 지하장에 의한 영향을 보정하는 것이 필요하였으며, 이를 위해 기준점의 자기장을 이용한 일변화 보정을 수행하였다. 일변화 보정을 위한 기준 자료로는 한국지질자원연구원에 설치된 지자기 관측소에서 측정된 자기장 변화자료를 활용하였다. 자력탐사의 자료처리에는 일변화 보정만을 수행하였으며, 여타의 다른 자료처리 기법은 적용하지 않았다.

지하수 분석 및 토양 가스 탐사

침출수로 인한 오염에 대한 정확한 파악을 위하여 매립지 주변에서 지표수 및 지하수 샘플을 채취하여 물리 화학적인 성질과 성분분석을 수행하였다. Fig. 3에 매립지 주변에서 지하수 샘플링을 수행한 위치를 표시하였다. 매립지 주변의 모니터링을 위한 관정과 농업용수를 위한 지하수공에서 시료를 채취하였으며, 그림상의 KBH-01~04의 위치로 표시되어 있다. KSP-01은 지표수를 채취한 위치를 표시한 것으로 매립지 하부에서 유출되는 지하수가 작은 웅덩이를 이루는 곳이다. KBH-01~04의 모니터링 관정은 대략 10 m 이내의 심도를 가진다. 대상 지역의 지하수위는 대부분 거의 지표면과 인접하여 형성되어 있는 것으로 확인되어, 지하수의 오염을 천부 토양오염의 지표로 간주하였다. 한편, 지하수 시료 분석과 동시에 매립지 상부의 몇 개의 측선에 대하여 토양 가스 탐사를 수행하였다. 매립지 상부에 오거를 이용하여 천공을 하고, 그 곳을 통해 확산되는 토양가스의 농도를 측정하는 방식으로 탐사가 수행되었으며, CH₄와 CO₂ 가스에 대한 탐사가 수행되었다.

결과 및 고찰

Fig. 4는 전자탐사 자료로부터 계산된 길보기 전기비저항 분포도이다. 이전에 서술한 바와 같이 총 10개의 주파수 자료로

부터 해석이 가능한 9,210 Hz, 14,850 Hz, 20,010 Hz 세 개의 고주파수 자료만을 도시하였다. 전자탐사 자료에서 주파수가 높아질수록 천부의 영향을, 주파수가 낮아지는 경우에는 보다 심부의 영향을 반영하므로 Fig. 4에 도시한 세 개의 고주파수의 자료는 비교적 천부의 전기비저항 분포를 나타낸다. 그림에서 경계선으로 표시된 매립지 내부(C)에서는 저비저항 값을 보이고 있는 반면, 매립지 하부의 논(A) 지역의 경우에는 비교적 고비저항 값으로 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 매립지 북부 지역(B)의 경우에도 매우 낮은 전기비저항을 보이고 있으며, 매립지 외부의 남쪽 지역(D)의 경우에는 고비저항대로 나타나고 있다. 전체적으로 매립지 내부와 북쪽 지역인 경우에는 저비저항대로 나타나고 있으며, 매립지 하부의 논지역과, 매립지 경계 외부 남쪽 지역은 고비저항대로 나타나고 있다.

낮은 전기비저항 값을 보이는 매립지 경계 안쪽 C 지역의 경우에는 쓰레기 매립에 의한 영향으로 생각된다. 매립장의 북쪽 지역(B 지역)의 낮은 전기비저항 값은 쓰레기 매립장에서 발생한 침출수로 인한 오염으로 인해 나타나는 것으로 생각된다. 이 지역이 매립지로 형성되기 전에는 매립지 남쪽 경계 외부인 D 지역과 매립지 사이에 지형의 기복이 있었던 것이 관찰되며, D 지역의 경우에는 매립으로 형성된 지역이 아닌 원지반이 그대로 남아 있는 것으로 확인된다. 또한, 개곡부의 상부에서 하부의 저지대로 매립이 진행되었으며 논방향의 매립장이 주변과 매우 높은 고저차를 보이는 것으로 보아, 원지반 지형의 차이는 쉽게 유추할 수 있다. 이러한 사실로 유추하여 보면, 매립지의 바닥의 지형이 남쪽이 높고, 북쪽으로 낮아지는 경사면으로 이루어져 있을 것으로 생각되며, 이러한 지형을 따라 지하수가 이동할 가능성이 높으므로 매립장내의 침출수가 북쪽방향으로 흐를 것으로 판단된다. 또한 매립지 하부의 침출수 차수막을 고정시키기 위한 콘크리트 구조물과 철제 볼트가 D 지역과 매립지와외의 경계면에서 관찰되며, 지형을 따라서 북쪽방향으로 경사져서 설치되어 있는 것이 지표면에서 확인되었다. 이러한 차수막은 하부 원지반 지형위에 설치되어 있을 가능성이 높으므로 침출수의 흐름을 매립지 북쪽으로 향하게 하였을 것으로 생각된다. 이러한 침출수의 흐름에 대한 추정은 전자탐사에서 해석된 저비저항대 분포 양상과 일치하는 것으로 보아, 타당성이 높을 것으로 생각된다.

Table 1. Results from geochemical analysis of ground water sample.

No.	pH	EC*	Cl	SO4	Mg	Ca	Na	K
KBH-01	6.30	227	13.8	17.3	2.2	25.9	12.9	2.1
KBH-02	6.76	738	93.9	35.6	7.8	71.5	57.0	8.7
KBH-03	7.44	1118	76.6	191.8	19.0	119.0	58.2	14.1
KBH-04	7.10	461	34.6	33.6	5.0	61.4	28.0	4.6
KSP-01	7.94	527	71.6	25.9	5.9	38.7	44.8	24.5

**EC (electrical conductivity): $\mu\text{S}/\text{cm}$, other components: mg/L

이와 같은 침출수의 이동양상은 지하수 시료 분석결과와도 일치하고 있다. Table 1은 Fig. 3의 각각의 샘플링 위치에서의 지하수 시료 분석결과를 정리한 것이다. 매립지 남부의 고비저항 지역(D 지역)에 위치한 KBH-01 시추공에서의 지하수 시료는 전기전도도나 기타 성분분석 결과로부터 오염이 되지 않은 상태인 것으로 해석되며, 화학적 성분 분석 결과가 이 지역의 배경값으로 생각된다. 조사 지역 매립장은 차수막이 설치되어 있어 침출수가 매립장 주변 전 지역으로 누출되지는 않았을 것으로 판단된다. D 지역이 C 지역과 달리 침출수의 영향이 나타나지 않는 것은 매립이전의 원지형에서 C와 D 지역이 지하수의 흐름이 나누어지기 때문인 것으로 생각된다. 성분분석 결과를 살펴보면, KBH-01 시추공을 제외한 나머지 샘플에서

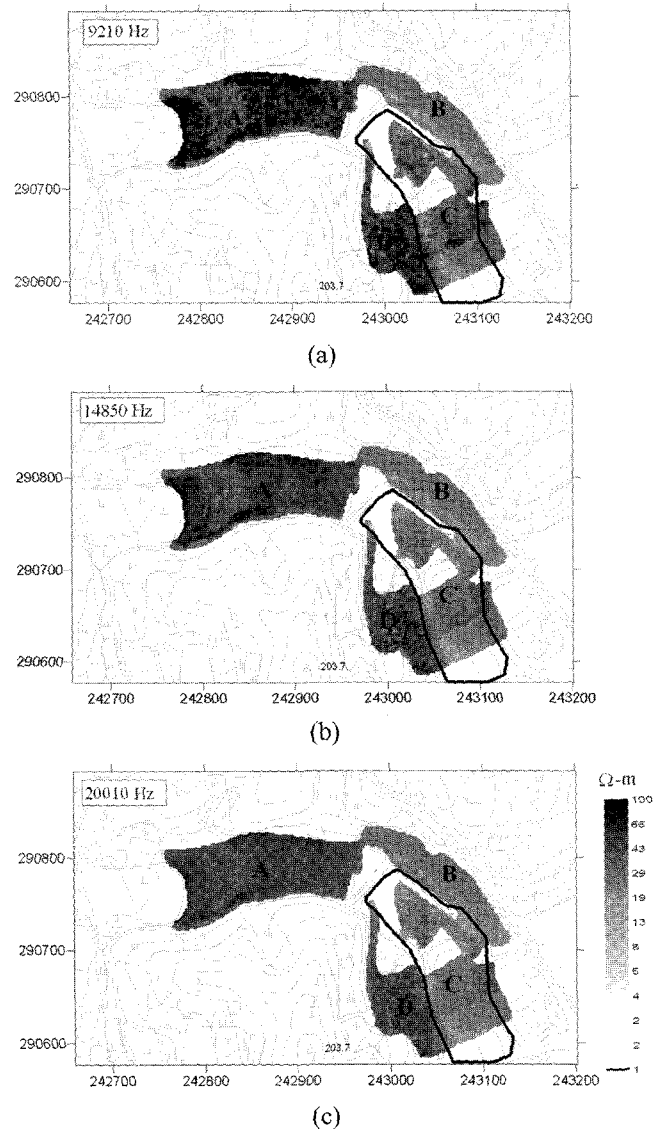


Fig. 4. Apparent resistivity map calculated from GEM-2H. Only higher 3 frequency data were converted and given in this figure. (a) 9,210 Hz, (b) 14,850 Hz, and (c) 20,010 Hz data are shown. Solid line indicates the boundary of landfill.

의 지하수는 모두 침출수에 의해 오염된 것으로 판단된다. 일반적으로 K의 경우에는 자연적인 원인으로 거의 나타나지 않는 성분으로서, 성분 분석함량 값이 크게 나타나는 경우에는 인위적인 원인으로 기인한 것으로 생각되며 이 지역에서의 K의 함량이 높게 나타나는 것은 침출수로 인한 오염에 의한 것으로 여겨진다.

성분 분석 결과 침출수로 인한 지하수 오염이 어느 정도 진행된 것으로 보이며, 전자탐사 결과에서 보이는 저비저항대의 위치와 남쪽에서 북쪽으로 경사져있는 지형상의 특징을 고려하여 본다면 매립지의 주로 북쪽방진행된 것으로 판단된다. 다만 하부의 눈에 위치한 지하수 관정 KBH-02의 시추공에서의 지하수 분석결과가 오염이 된 것으로 분석되나 전자탐사의 결과상에는 고비저항대로 나타나는 결과상의 차이점을 보이는데, 이는 해석에 사용된 전자탐사 고주파수 자료가 대략 1 m 이내의 천부의 전기비저항 변화만을 반영하며, KBH-02 관정에서 지하수 오염은 비교적 깊은 심도에서 나타나고 있는 이유로 인한 것으로 생각된다. KBH-02 시추공에서 지하수 오염은 비교적 깊은 심도에서 확인되므로, 침출수로 인한 지하수 오염이 심부에서 주로 나타나 전자탐사 자료에서 보이지 않는 것으로 생각된다. 해석에 사용된 탐사 자료 중 저주파수 자료도 같이 활용할 수 있었다면, 이에 대한 보다 정확한 해석이 가능하였을 것으로 생각되나 탐사기 운용상의 문제점으로 저주파수 성분을 활용하지 못함으로 인하여, 심부 오염 해석은 불가능하였다.

조사지역에서 하부의 눈 지역은 대부분 지표면이 점토층으로 구성되어 있어, 심부 지하수 오염에 의한 영향이 천부 또는 지표까지 나타나지 못한 것으로 보여진다. 매립지 경계 외부의 B 지역의 경우에는 A 지역의 눈과는 달리 사립질의 토양이었으며, 상부의 토양을 일정정도 깎아내 침출수로 오염된 하부의 토양층이 지표면에 노출되므로 인해 오염에 의한 영향이 전자탐사에 더 크게 반영되어 나타난 것으로 생각된다.

한편, 전자탐사와 마찬가지로 동일한 지역에 대하여 자력탐사를 수행한 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 이번 조사에서도 자력탐사는 두개의 센서를 수직으로 배열하여 수직구배 탐사를 실시하여, 각각의 센서에서의 총 자기장과 그 차이인 수직구배 자료의 총 3개의 자력 분포를 얻을 수 있었으며 이를 Fig. 5에 도시하였다.

자력 분포도를 살펴보면, 하부의 눈의 경우에는 몇 개의 고립형 이상대가 관찰되나 전반적으로 변화가 없는 평탄한 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나, 매립지 상부의 경우에는 하부에서와는 달리 큰 값의 자력이상을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 그 변화 양상도 복잡하게 나타나고 있음이 확인된다. 매립지 하부의 눈의 경우에 보이는 자력 이상값들은 전주나 펌프 등 지표에 노출된 이상체에 의한 것으로 손쉽게 확인되었으며, 매립지와 눈의 경계부의 큰 자력 이상값은 침출수 처리를 위한 시설물 등에 의한 것으로 보인다. 매립지 상부의

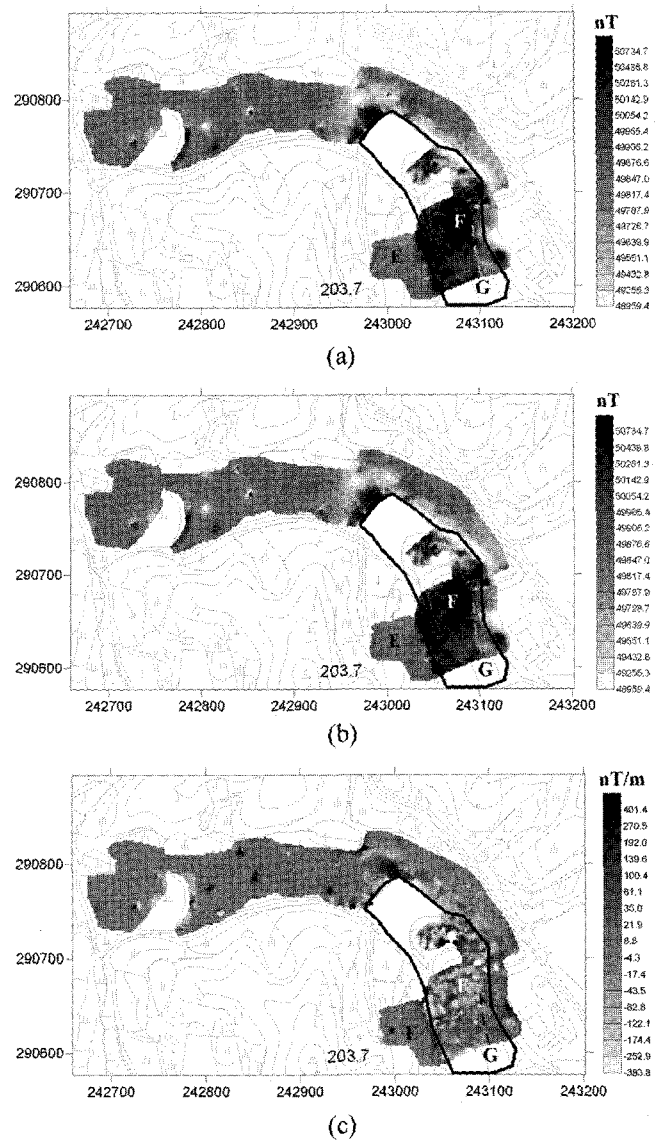


Fig. 5. Magnetic map of survey area. Image map of (a) upper sensor, (b) lower sensor, and (c) vertical gradient map were plotted in this figure.

자력이상 값은 하부 지역의 값들보다 매우 큰 값으로 나타나고, 그 변화 또한 매우 크며 이는 수직구배를 도시한 Fig. 5(c)에서 보다 명확하게 나타난다. 매립에 따른 지층의 교란으로 인해 매우 복잡한 양상을 보이는 것으로 보여진다. 반면, 하부 눈의 경우에는 수직구배 영상에서도 총자력도와 마찬가지로 변화의 양상이 작게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5의 자력도에서 특기할 점은 매립지 상부의 영상에 E와 F 지역으로 표시된 지역에서 경계부가 뚜렷하게 확인되는 부분이다. 전자탐사의 결과에서도 마찬가지로 확인되는 부분으로 이를 경계로 하여 매립지 외부와 내부가 뚜렷한 차이를 보이는 것이 확인된다. 원지반과 매립을 통해서 형성된 지반과의 물성의 차이로 인하여 전자탐사나 자력탐사에 그 경계가 명확히 나타나는 것으로 생각된다. 또한, G로 표시된 선의 경계로

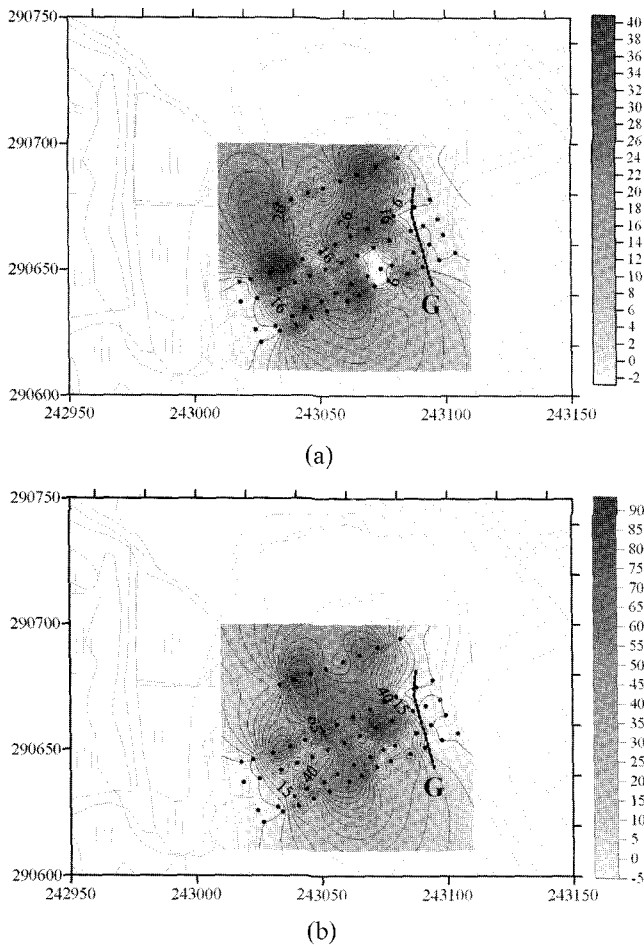


Fig. 6. Results of soil gas detection survey. (a) CH₄, (b) CO₂ gas.

하여 좌우측의 자력값이 차이를 보이는데, 이 또한 매립지의 경계로 추정되는 부분이다. 그림상의 굵은 선으로 표시된 매립지의 경계는 수치지도상에 확인되는 부분과 매립지에서 육안으로 관찰된 결과를 이용하여 추정된 경계로 실제 경계와는 다를 수 있으며, 이는 매립 완료 후에 매립지 상부를 토양층으로 피복하여 원지반과 매립지와의 정확한 경계를 구분하는 것이 불가능하였기 때문이다. 매립 시작 때부터 인근에 거주하였던 주민들이 매립은 수치지도상의 길에서 조금 떨어진 곳(경계로 표시한 G 부근)으로부터 시작했다고 하는 이야기와도 일치하고 있어 매립지의 경계라는 추정에 신빙성을 더하고 있다. 총자기장 뿐만 아니라 수직구배 자료에서도 경계(G)를 중심으로 그 변화의 양상이 차이가 보이는 사실 또한 이 부분이 매립지의 경계일 가능성이 높다고 추정된다.

이러한 자력탐사를 통한 매립지의 경계는 이 경계를 수직으로 가로지르는 측선에 대해 수행한 토양가스 탐사 결과에서도 확인된다. 토양가스를 측정된 결과를 도시한 Fig. 6에서도 자력탐사의 결과에서와 유사하게 토양가스의 농도가 변하는 경계면 G가 확인된다. 또한, 반대쪽의 매립지 경계면에서 토양가스의 농도에서 확연히 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다.

이러한 두 가지 서로 다른 탐사를 통해 유추된 매립지의 경계가 서로 일치하는 사실로 미루어 보아 이 부분이 매립완료 후의 토양층 피복에 의해 감추어진 매립지의 실제 경계면으로 추정된다.

결론

매립지 주위에 전자탐사를 통한 토양의 전기전도도 분포 양상을 통하여 침출수로 인한 토양오염의 범위를 파악하고자 하였으며, 전자탐사 결과상의 저비저항대의 분포와 동일한 지역에 설치된 시추공에서 채취한 지하수 시료의 지화학 분석결과를 통해 침출수로 인한 지하수 오염의 상황을 확인할 수 있었다. 조사 대상지역인 쓰레기 매립장은 침출수로 인하여 지하수 오염이 발생한 사실은 지하수 성분분석결과를 통해 확인되었으며, 매립지의 지형상의 특징으로 인하여 주로 매립지 북쪽방향으로 오염이 진행된 것으로 판단되었다. 전자탐사의 낮은 전기비저항으로 나타나는 오염지역에서 지하수 분석 결과 전기전도도가 높게 나타나고 K의 함량이 높게 나타나 전자탐사를 통한 오염지역과 실제 오염상황과 연관성을 유추할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이번의 연구를 통하여 전자탐사 기법이 GPS와 결합하여 짧은 시간에 효과적으로 토양오염의 분포를 확인할 수 있는 방법으로 환경오염 조사의 목적으로 충분히 활용될 수 있음을 확인하였다. 자력탐사의 경우에는 그 탐사의 대상이 되는 물리적 성질이 지하수나 토양오염과는 직접적인 연관성을 가지지 못하므로 오염 파악을 위한 조사방법으로 적합하지 않으나, 매립이 완료된 후의 지표면에 드러나지 않은 매립지의 경계에 대한 정확한 정보를 제공할 수 있으므로 인하여 매립지 규모 파악을 위하여 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 생각된다. 자력탐사를 통해 유추된 경계의 경우에는 경계를 가로지르는 측선에 대한 토양가스 탐사에서도 동일하게 나타나며, 탐문을 통한 다양한 정보도 이러한 경계의 타당성을 뒷받침하고 있다.

전자탐사나 자력탐사와 같은 지구물리화학적 방법을 통해 유추된 결론은 지하수 성분 분석 및 토양가스 탐사의 지구화학 조사의 결과와도 일치하고 있어 침출수 오염을 포함한 매립지 특성파악에 효과적인 방법으로 생각된다. 그러나, 탐사 결과의 해석이 오염의 범위 파악이나 매립지 경계 파악 등의 정성적인 해석으로 제한되는 한계점으로 나타나 보다 정밀한 오염 해석을 수행하기 위해서는 물리탐사 자료를 통해 해석된 이상대와 지구화학 분석 자료를 통한 지하수 및 토양 오염상황과의 연관성에 대한 보다 심도있는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

송윤호, 정승환, 이상규, 김정호, 황세호, 황학수, 이성곤, 조성준.

- 이명중, 설순지, 박인화, 2001, 지반물리탐사연구, 1999-R-T102-P-01, 산업자원부.
- 송윤호, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사의 감도분석 및 가탐심도 추정, 물리탐사, **5**, 299-308.
- 송성호, 용환호, 안중기, 김기표, 2003, 제주도 쓰레기 매립장 침출수 조사를 위한 전기 및 소형루프 전자탐사의 적용, 물리탐사, **6**, 143-152.
- 이기화, 권병두, 정호준, 1996, 난지도 매립장 전기, 전자탐사, 지하수환경, **3**, 95-100.
- Abbaspour, K., Matta, V., Huggenberger, P., and Johnson, C. A., 2000, A contaminated site investigation: comparison of information gained from geophysical measurement and hydrogeological modeling, *Journal of Contaminant Hydrology*, **40**, 365-380.
- Abu-Zeid, N., Bianchini, G., Santarato, G., and Vaccaro, C., 2004, Geochemical characterization and geophysical mapping of landfill leachates: the Marozzo canal case study (NE Italy), *Environmental Geology*, **45**, 439-447.
- Hinze, W. J., Roberts, R. L., and Leap, D. I., 1990, Combined analysis of gravity and magnetic anomaly data in landfill investigation, *Geotechnical and environmental geophysics*, Vol. 2, Soc. Expl. Geophys., 267-271.