

쓰레기 매립장의 토양오염 조사를 위한 전자탐사 및 전기탐사

장현삼 · 임해룡 · 홍재호¹⁾

Application of Electromagnetic and Electrical Survey for Soil Contamination in Land-Fill Area

Chang, Hyun-Sam, Lim, Hae-Ryong and Hong, Jae-Ho

요 약 : 쓰레기 매립장 부근지역에 대해 전자탐사, GPR 탐사, 전기탐사 등 물리탐사를 실시하여 이들을 통한 토양오염의 조사 및 평가에 대한 적용가능성을 연구하였다. 연구결과 전자탐사법은 오염지역의 수평적 분포현황 및 오염경로 파악에 탁월한 효과를 보이며 그 방법의 간편성 및 신속성에 비추어 볼 때 최우선적으로 적용해야 할 탐사법으로 판단된다. 전기탐사법은 오염지역의 수직적 분포 현황 파악에 효과적이다. 경계면의 정량적 해석 및 기초 지질구조, 지하수면 등의 파악 가능성, 탐사수행의 간편성 등을 고려할 때 천부조사에는 GPR 탐사법이 유리할 것으로 판단되나 심부 정보를 얻기 위해서는 두 탐사법을 동시에 적용하면 좋을 것이다.

Abstract : Geophysical survey techniques, such as electromagnetic(EM), GPR, and electrical method, have been tested in the landfill area to evaluate the applicability of these methods to soil contamination measurement. The EM method has proven to be excellent on mapping the areal distribution of contaminants and the migration path for leachate. Since the field operation of EM technique is simple as well as fast, we think the EM method must be the first choice for these purposes. Electrical survey techniques have proven to be very effective on mapping sectional distribution of contaminants. Generally, the GPR method is very good on high resolution survey of shallow depth, and field data acquisition is simple, too. But the resistivity method gives better information on deep area, for example, deeper than the depth of 20 m.

Keywords : 쓰레기 매립장, 토양오염, 전자탐사, 전기탐사, GPR 탐사

서 론

현재 우리 나라는 좁은 국토면적과 과중한 인구밀도에 의하여 효과적인 산업 및 일반 폐기물 처리가 심각한 문제로 대두되고 있으며, 이러한 폐기물의 양은 산업활동 및 경제수준의 향상으로 점점 더 증가하는 추세에 있다. 유해 폐기물이나 각종 지하탱크 등에서 유출되는 유류 및 용제류는 그 자체로서 토양을 오염시켜 각종 환경문제를 야기시킬 뿐만 아니라, 점진적으로 지하수를 오염시켜 심각한 문제를 야기시킨다. 따라서 토양오염의 정확한 진단 및 정화기술의 개발은 국가적 차원에서 그 중요성을 인식하여 장기적이고 체계적으로 연구하여야 할 과제중의 하나이다.

효과적인 오염토양의 정화 및 방지를 위해서는 우선 토양오염의 상태와 그 진행상황을 정확히 규명하는 것이 필요하다. 오염토양의 분포와 그 진행상황의 측정을 위해서는 여러 가지 방법이 사용될 수 있다. 토양샘플이나 시추공 조사를 통한 측정은 직접적인 방법으로 그 조사기간 및 비용면에서 광역적 지역에 대한 조사로는 한계성이 있다고 볼 수 있다. 반

면, 물리탐사법은 비접촉, 비파괴적인 방법으로 넓은 지역에 대하여 신속하게 조사를 할 수 있다는 이점이 있다. 현재까지 물리탐사법은 주로 지질구조 파악이나 광물자원의 조사를 위하여 사용되어 왔으며, 최근에 와서야 토양오염 조사 등의 환경공학적 문제로의 접근에 사용되기 시작하였다.

오염토양의 조사를 위해서는 여러 가지 물리탐사법이 사용될 수 있는데, 이는 근본적으로 매립물질이나 이로부터의 침출수 자체가 주위 토양 또는 암반과는 다른 물리적 성질을 가지고 있다는 사실에 기초하고 있다. 침출수나 기타 유류, 용제류 등은 일반적으로 주위 지하수에 비교하여 현저한 전기적 성질의 차이를 보이게 되고, 매립물질 자체도 주위 환경과는 다른 물리적 혹은 전기적 성질을 보이게 된다. 또한 매립지 주변 또는 하부의 지질구조나 암석, 토양의 성질에 따라 오염물질의 이동경로가 결정되므로 이의 파악 또한 매우 중요하다 할 수 있다. 이에 물리탐사를 실시함으로써 토질 오염 정도 및 분포상황을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 주변 지질구조 파악을 통하여 오염의 원인 규명 및 향후 오염분포의 예측이 가능하며 일정기간의 정기적인 측정을 통하여 오염

*1998년 6월 3일 접수

1) 삼성물산 건설부문 종합기술연구소

진행상황을 파악할 수도 있다.

본 연구는 한국의 대표적 폐기물 처리방법인 매립지, 주변의 토양오염조사 사례연구로써 전자탐사, 전기탐사, GPR 탐사를 실시하고 그 결과를 분석 검토하는 과정에서 이들 방법의 특성 및 적용성을 파악하고자 하였다.

조사지역 및 적용방법

조사지역

현장적용 대상지역은 ○○시 광역 쓰레기 매립장으로서 연면적은 약 4만 6천평이다. 천연계곡을 매립하여 사용하고 있으며 1985년에 매립을 시작하여 1994년 1월에 매립이 완료되었고 1987년부터 1개소의 침출수 처리장을 운영중이다. 매립장의 위치 및 주변지형도는 Fig. 1에 나타나 있으며 Pic. 1은 탐사지역을 나타내는 사진으로 가운데 보이는 제방 위가 매립장이며 제방 밑의 왼쪽에 보이는 건물이 침출수 처리장이며 조사지역인 논 중간에 전봇대들이 보이고 있다.

적용방법

우선 광역적인 오염지역의 Mapping 및 경로파악을 위하여 전자탐사를 실시하였다. 사용된 전자탐사법은 수평루프 전자탐사법(Horizontal Loop Electromagnetic Method)으로써 전자파의 송수신은 두 개의 루프형 수평 코일을 통하여 하게 되고, 송수신 코일 사이의 간격은 고정되어 있다. 일차 전자장에 의해 유기된 이차 전자장의 크기 및 위상차를 측정하여 오염도양의 수평적 분포 규명이나 오염의 정도 측정을 위하여

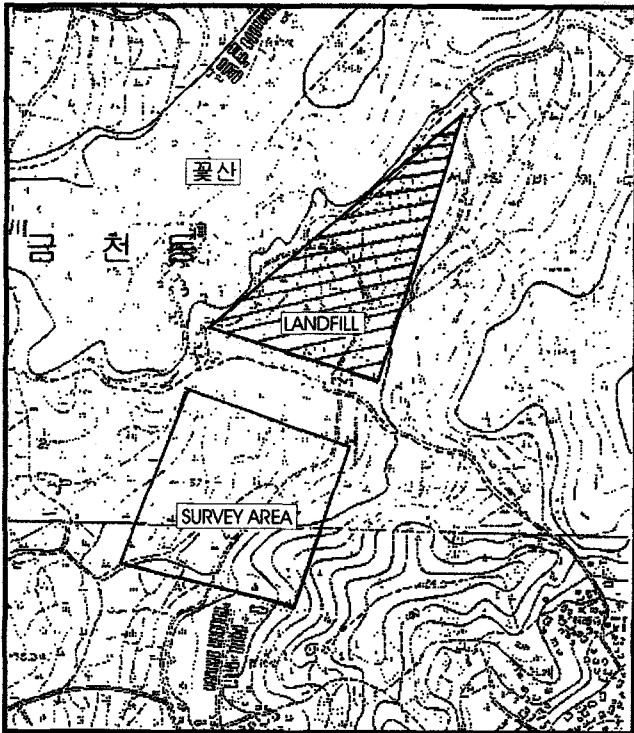
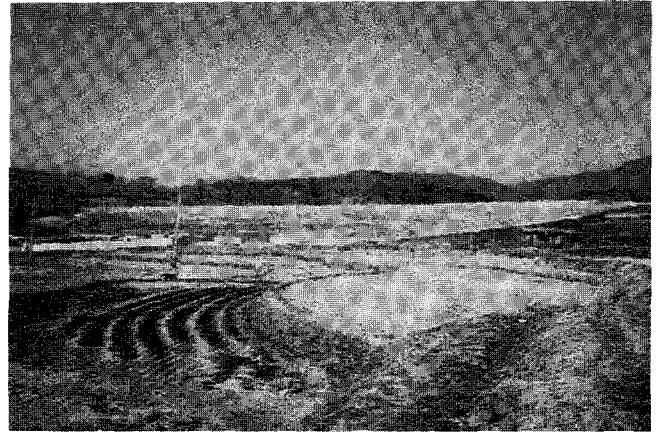


Fig. 1. Location map of ○○ landfill area.



Pic. 1. Panoramic view of the survey area.

사용하였으며, 사용된 기기는 캐나다 Geonics사의 EM31 기종이다. 사용된 방법은 주파수 영역 전자탐사법이고 사용 주파수는 9.75 KHz, 송수신 간격은 3.75 m이며 대략 심도 6 m 까지의 평균적인 전기전도도를 측정할 수 있다고 알려져 있다.

Pic. 2는 현장에서 탐사를 하고 있는 사진으로서 1명만으로 간편하게 넓은 지역의 탐사가 가능하며 1측정에 대한 측정시간은 5초 내외이다. 탐사측선은 Fig. 2의 실선으로 측선 간격 20 m인 남동 방향 측선 7개와 중앙의 남서방향 측선 1개로 측점 간격은 1 m이다.

다음으로 수직적인 오염 plume의 위치, 형상 파악 및 기초 지질조사를 위하여 전기탐사 및 GPR탐사를 실시하였다.

전기탐사의 경우 본 현재 가장 널리 사용되는 스웨덴 ABEM사의 Terrameter SAS 300C 기종을 사용하였으며 전극 배열은 쌍극자(dipole-dipole)법이고 전극간격은 5 m이다. 탐사측선은 Fig. 2에 일점 쇄선으로 표시된 바와 같이 남동방향 2 측선, 남서방향 3 측선이다. 참고로 전기탐사법의 경우 4~5 명이 필요하며 1 측정의 측정시간은 평균적으로 1분 내외



Pic. 2. Field data acquisition with electromagnetic method (EM 31).

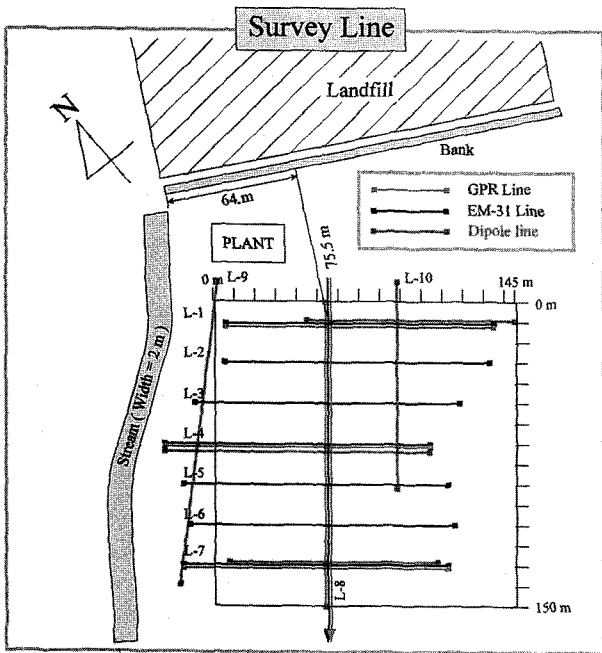


Fig. 2. A plan map of landfill area showing survey lines.

이다.

GPR 탐사의 경우 현장 탐사에 사용된 장비는 캐나다 Sensors & Software사의 pulseEKKO IV로서 사용주파수는 100 MHz, 송수신 간격은 1 m로서 지하 약 20 m까지의 지하구조를 탐사할 수 있는 것으로 알려져 있다. Pic. 3이 탐사장면을 보여주는데 2-3명이 필요하며 1 측점에서 측정시간은 20초 내외이다. 탐사측선은 Fig. 2에서 점선으로 남동방향 3 측선, 남서방향 1 측선이다.

탐사결과 및 해석

전자탐사 결과

Fig. 3이 이들 7개 측선의 결과로부터 얻어진 전기전도도 분포도이다. Fig. 3에서 보면 이 지역의 전기전도도 배치는

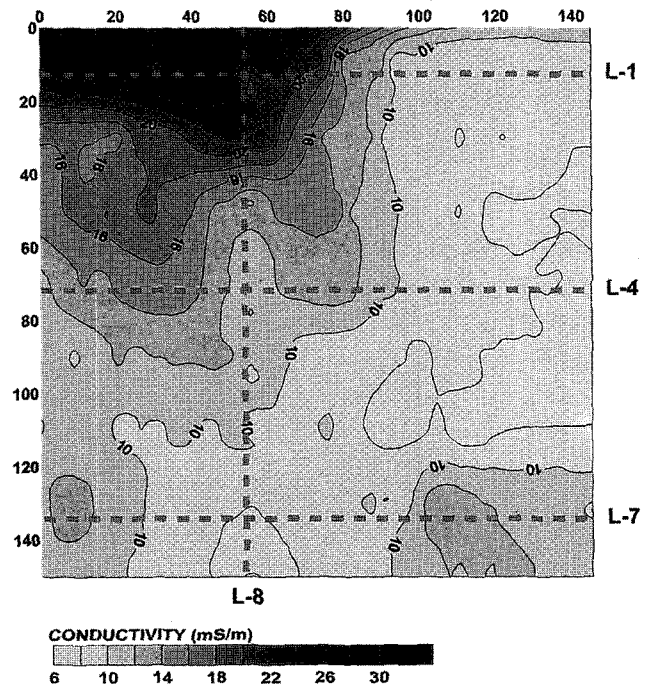


Fig. 3. Conductivity map of landfill area.

약 10 mS/m로 판단되며 20 mS/m 이상인 지역(Fig. 3에서 좌상부 지역, 가로좌표 0~80 m, 세로좌표 0~60 m)은 침출수에 의해 오염이 상당히 진행된 지역으로 판단되며 그中间的 10~20 mS/m 지역은 전이대로 판단된다. 또 침출수에 의한 오염이 좌상부의 매립지(침출수 처리장)에서부터 시작되어 우하부로 진행되다가 두 방향으로 갈라져서 진행되고 있는 것으로 해석되며 이는 이 지점에서 오염 지하수의 이동을 방해하는 지질구조가 존재함을 시사한다고 할 수 있다. 이상에서 주파수영역 전자탐사결과는 그 방법의 신속, 간편성에 비추어 볼 때 오염지역의 광역적, 수평적 분포현황 파악에 탁월한 효과를 보이며 오염의 진행경로의 파악도 가능할 것으로 사



Pic. 3. Field data acquisition with GPR method (pulseEKKO IV).

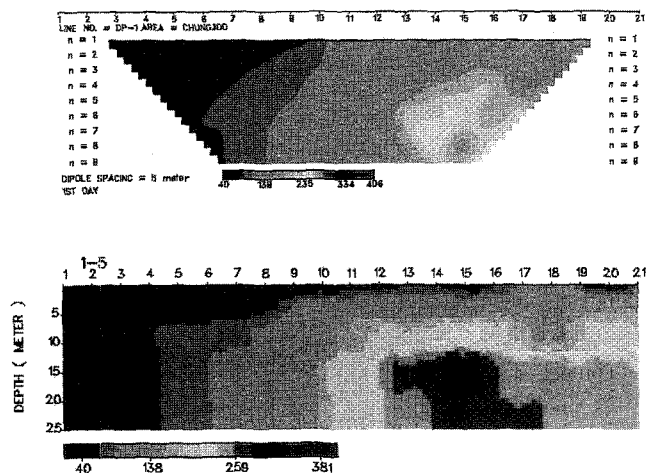


Fig. 4. Field data pseudosection and its inversion result for the line L-1 (dipole spacing=5 m).

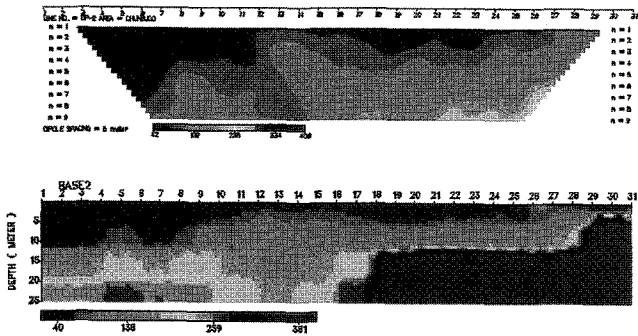


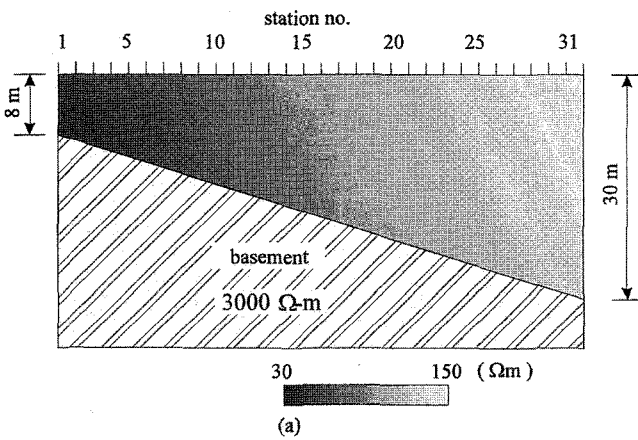
Fig. 5. Field data pseudosection and its inversion result for the line L-8 (dipole spacing=5 m).

료된다.

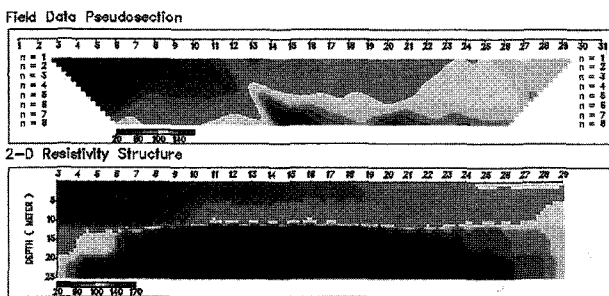
전기탐사 결과

Fig. 4는 측선 L1에 대한 전기탐사 결과로 측정자료 및 2차원 역산결과 얻은 전기비저항 단면도로서 오염지역의 수직적 분포를 나타낸다고 할 수 있다. 측점 9(85 m 지점)의 좌측이 오염지역을 나타내며 이는 앞의 전자탐사 결과와 일치하고 있다. 또 오염이 진행된 심도는 측점 9부터 좌측으로 갈수록 깊어지며 평균적으로 약 7~8 m로 추정된다.

Fig. 5는 측선 L8에 대한 전기탐사 결과이다. 1번 측점에서



(a)



(b)

Fig. 6. 2-D resistivity modeling. (a) synthetic model with gradually increased soil resistivity and dipping basement. (b) the pseudosection and inversion results for the model (a).

10번 측점까지의 저비저항지역이 오염지역으로 판단되며 우측으로 갈수록 오염농도가 낮아짐을 알 수 있다. 여기서 10번 측점은 45 m 지점으로 앞의 전자탐사 결과와 잘 일치하고 있다. 오염 깊이는 측점 1에서 약 10 m, 측점 10에서 약 2 m 정도로 판단된다.

이상의 결과를 확인하기 위해 L8 측선 상의 3점에서 시추 조사를 실시하였다. 그 결과 기반암 심도는 측점 1에서 8 m, 측점 31에서 30 m로 선형으로 증가하고 있는 것으로 나타났으며 토양시료의 확인에서도 위의 탐사결과의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

따라서 배경치를 나타내는 L7측선의 전기탐사 결과와 전자탐사결과 그리고 오염 지하수의 용액 전기전도도 등을 고려하여 Fig. 6(a)와 같은 모형을 가정하였다. 기반암 심도는 8 m에서 30 m로 증가하며 기반암의 전기비저항은 3000 Ohm, 풍화대의 비저항은 30 Ohm~150 Ohm까지 점진적으로 변화는 모형이다.

Fig. 6(b)에 이론적인 계산자료와 이를 이용한 역산결과가 보여지는데 전체적으로 현장에서 측정된 자료와 유사함을 보이고 있으며 이는 본 모형의 타당성을 입증해 준다고 할 수 있다.

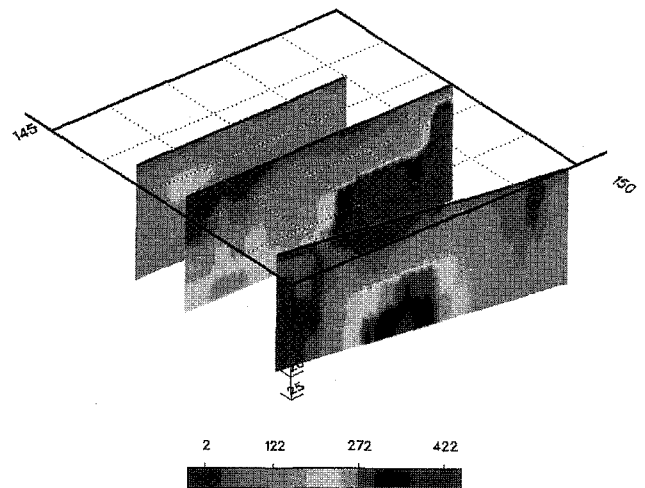


Fig. 7. 3-D view of inversion results for L-8, L-9, L-10 lines plotted by program "DP3DView".

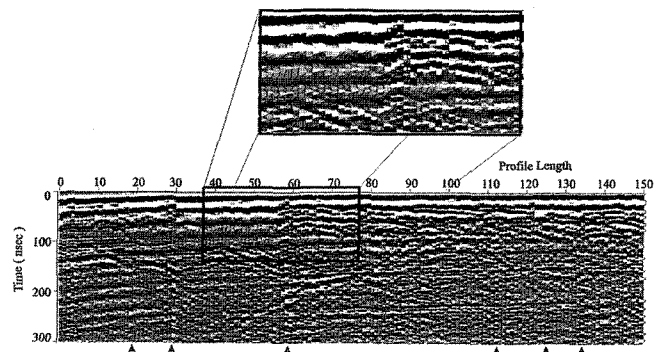


Fig. 8. Bandpass filtered and gained radar reflection image for L-8, L-9, L-10 lines.

Fig. 7은 L8, L9, L10 축선의 역산결과를 3차원으로 나타낸 것으로 이러한 3차원 도면을 이용하면 오염된 지역의 형태를 정밀하게 판단하고 표현하는데 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

GPR탐사 결과

Fig. 8은 L8 축선에 대한 GPR탐사 결과도이다. 지표의 전기전도도가 높은 수준이므로 기반암의 경계면을 보여줄 정도로 레이더파가 전파하고 있지는 않으며 40~80 m, 150~250 nsec 구간에 나타나는 event들은 지하구조의 반응이 아니고 지표 방해물(전봇대)에 의한 지표 반사파로 판단된다. 그러나 초기 시간대(0~100 nsec)의 파형과 진폭에 오염지역에서의 레이더파 반응이 확인된다. 즉 전기전도도가 높은 오염지역에서는 파의 분산이 일어나 진폭이 급격히 감소하고 파형도 저주파수대의 양상을 띠게 되는데 이는 55 m 지점을 경계로 하여 좌우의 레이더파 파형에서 확인할 수 있다. Fig. 8에는 이 부분을 확대 표시하여 구분이 쉽도록 하였다.

결과 토의 및 전망

본 연구의 목적은 환경오염 지역의 조사에 지구물리학적 방법론을 적용하여 오염지역을 탐지하는데 효과적인 각종 물리탐사기법을 평가하고 현장에서의 응용을 통하여 현장 적용성의 확립 및 그 지침을 제공하는데 있다.

이와 같은 목적을 위해 먼저 적용할 물리탐사법으로는 선진 외국에서 최근 연구가 활발한 전자탐사법, GPR 탐사법, 전기탐사법을 선택하여 이들 탐사장비를 구입, 확보하였고 1차로 ○○쓰레기 매립장 지역에 대한 탐사를 실시한 뒤 본 방법들에 의한 매립장부근의 토양오염조사 및 평가의 적용가능성에 대한 연구를 실시하였으며 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 당 조사지역은 매립장의 침출수 유출로 인해 상당부분 토양오염이 진행되어 있으며 오염 침출수는 침출수 처리장이 위치하는 측점 40 m 주변에서 유출되었고 지하수 흐름과 지질구조에 따라 확산되었다.

2. 오염지역의 경계는 축선도상에서 가로방향은 약 80 m까지, 세로방향은 지역에 따라 약 40~60 m까지로 판단되며 심도는 최대 10 m 정도이다.

3. 전자탐사법은 오염지역의 수평적 분포현황 및 경로파악에 탁월한 효과를 낼 수 있음을 확인하였고 그 방법의 간편성 및 신속성에 비추어 볼 때 최우선적으로 적용해야 할 탐사법으로 판단된다.

4. GPR 탐사법 및 전기탐사법은 전자탐사자료에 기초하여 오염지역의 수직적 분포현황 파악에 효과적이며 경계면의 정

량적인 해석 및 기초 지질구조, 지하수면 등의 파악 가능성, 탐사방법의 간편성 등에 비추어 볼 때 GPR 탐사방법이 유리할 것으로 판단되나, 20 m 이상 심부의 정보를 얻기 위해서는 두 방법이 동시에 적용되면 좋을 것이다. 또한 지질구조나 지층조건에 따른 침출수의 이동경로 파악을 위해서는 탄성과 탐사법, 물리검층과 같은 조사기법의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

이상과 같은 연구결과를 바탕으로 하여 향후에는 우선 1차 연구대상 지역인 ○○매립지 지역에 대하여 시추조사, 지구화학적 시료분석, 탄성과탐사 등 보다 정량적인 탐사를 실시하여 종합적인 제 방법들의 검토 및 해석을 실시하며 매립지 지역 뿐만 아니라 폐광지역, 유류오염지역, 해수오염지역 등 다양한 오염환경에 대해 적용성을 검토하게 될 것이다. 또 향후에는 각종 오염환경에 대한 광역적 오염조사 방법 및 지침의 개발, 그리고 오염지역 정화처리 방법의 설계를 위한 자료 제공, 정화처리 전후의 조사와 비교를 통한 정화처리 정도의 평가연구 등에 그 초점을 맞출 계획이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 G7과제 "오염토양/지하수 정화 기술개발"의 일부로써 수행되었으며 당 기관에 사의를 표합니다. 또, 본 연구의 자료취득 및 처리를 위하여 수고를 아끼지 않으신 한국자원연구소의 조성준, 이명중 연구원과 서울대학교 자원공학과 권형석씨에게 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 이태섭, 서정희, 전효택, 1995, 지구물리·지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술개발연구(I): 과학기술처, KR-95(T)-3.
2. Buselli, G., Barber, C., Davis, G. B. and Dalama, R. B., 1990, Detection of ground water contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods: in Geotechnical and Environmental Geophysics, Ward, S. H. ed.: SEG, 3, 27-39.
3. Lanz, E., Jemmi, L., Muller, R., Green, A., Pugin, A. and Huggenberger, P., 1994, Integrated studies of Swiss waste disposal sites: Results from georadar and other geophysical surveys: Proc. of the 5th international conference on GPR, 1, 1261-1274.
4. Lawton, D. C., Jol, H. M. and Smith, D. G., 1994, GPR surveys for near-surface characterization and contaminant mapping: Examples from the Canada Creosote Site, Calgary: Proc. of the 5th international conference on GPR, 3, 1275-1282.