전기비저항 탐사를 이용한 가축사체 매몰지 특성 분석

고진석¹ · 김봉주¹ · 최낙철² · 김성배² · 박정안² · 박천영^{1*}

¹조선대학교 에너지자원공학과, ²서울대학교 지역시스템공학과

Characterization of an Animal Carcass Disposal Site using Electrical Resistivity Survey

Jin-Suk Ko¹, Bong-Ju Kim¹, Nag-Choul Choi², Song-Bae Kim²,
Jeong-Ann Park², and Cheon-Young Park^{1,*}

¹Department of Energy and Resource Engineering, Chosun University

²Environmental Functional Materials & Biocolloids Laboratory,
Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

가축사체 매몰지로부터 유출되는 침출수는 환경적으로 치명적인 영향을 주는 고농도 오염폐수의 일종이다. 본 연구에서는 효율적인 가축사체 매몰지의 특성을 파악하기 위하여 전기비저항 탐사와 함께 시추조사를 실시하였다. 또한, 가축사체 매몰지에서 샘플링한 침출수의 화학적 분석을 실시하였다. 매몰지 내부에서 5측선의 쌍극자 전기비저항 탐사와 3지점의 시추조사를 실시하였으며, 매몰지 주변의 11지점에서 시추조사를 수행하였다. 전기 비저항 탐사에 의하여 수집된 자료를 이용하여 2차원 역산 모델링을 수행하여 매몰지의 특성(크기, 심도, 형태 등)을 평가하였다. 침출수 분석결과, pH는 7.4에서 6.7로 감소하였고, Eh는 -358 mV에서 -48 mV로 변화하였다. 또한, 가축사체 부패에 의하여 용존 이온이 증가하였다. 전기비저항 탐사 자료의 해석결과, 지표에서 심도 8 m 이내에서 최소 0.64 Ωm의 낮은 비저항값을 가지는 영역이 나타났다. 이 지역의 기반암 위치와 가축사체의 매립 깊이를 고려할 때, 매립지 내부에서는 침출수에 의한 기반암의 오염은 진행되지 않은 것으로 나타났다. 전기비저항 탐사의 결과는 시추조사의 결과와 잘 일치 하였으며, 이는 전기비저항 탐사가 가축매몰지의 특성을 효과적으로 묘사한다는 것을 보여주었다. 본 연구에 의하면, 전기비저항 탐사가 가축사체 매몰지의 현황을 조사하는데 적합한 기술로 판단된다.

주요어 : 가축사체 매몰지, 전기비저항 탐사, 침출수, 시추조사

In this study, an electrical resistivity survey and a drilling investigation were conducted at an animal carcass disposal site. Chemical analysis of leachate collected from the site was also performed (sampling times: May 2011 and June 2012). Five lines of dipole-dipole electrical resistivity surveys were carried out, along with drilling investigations at 3 points within the disposal areas and 11 points near the disposal site. Two-dimensional inverse modeling of the collected resistivity data was performed to evaluate the properties (size, depth, and form) of the disposal site. Leachate analysis showed that pH of leachate decreased from 7.4 to 6.7, while Eh changed from -358 mV to -48 mV over time. In addition, dissolved ions increased due to the progression of carcass decomposition. Results of the electrical resistivity survey indicated that low resistivity zones (minimum value, 0.64 Ωm) existed at a depth of 8 m from the surface. Considering the bedrock location and carcass disposal depth, there was no evidence of bedrock contamination by leachate. The results of the electrical resistivity survey are consistent with those of the drilling investigation, which indicates that electrical resistivity effectively depicted the properties of the disposal site. This study demonstrates that electrical resistivity survey is a suitable technique for investigation of animal carcass disposal sites.

Key words : animal carcass disposal site, electrical resistivity survey, leachate, drilling investigation

*Corresponding author: cybpark@chosun.ac.kr

© 2012, The Korean Society of Engineering Geology
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

2010년 11월 가축전염병 중 하나인 구제역(foot and mouth disease)이 경북 안동에서 최초로 발병 보고된 후, 전국적으로 약 4,600개소에서 돼지 213만 마리, 소 14

만 마리, 조류 380만 마리가 매몰되었다. 가축전염병 예방법에 따르면, 정부는 살처분 할 가축사체를 신속히 소각 또는 매몰하게 되어 있지만, 국내 여건상 소각의 어려움 때문에 거의 대부분 매몰에 의한 처리방법을 택하고 있다. 또한, 체계적 조사와 대책이 부족한 상태에서 긴급 조치로 가축을 처분한 곳이 많아서, 안전성이 불명확한 장소에 매립되어 있는 경우가 많다. 따라서, 주변 환경의 2차 및 3차 오염을 유발할 가능성이 높다. 가축 사체는 약 70% 수분을 함유한 부패성 유기물질이고, 매몰된 가축사체에는 병원성 전염균이 존재할 수 있다. 사체매몰 후 부패과정에서 발생하는 침출수와 여기에 함유되어 있는 오염물질의 영향으로, 가축 매몰지 주변의 토양 및 수계 환경의 오염 위험성이 증가된다. 침출수의 유출로 인한 주변 생태계 오염을 사전에 예방하기 위해서는, 매몰지를 체계적으로 관리하고 침출수의 근원이 되는 매몰지를 직접적으로 복원하는 것이 가장 바람직하다.

일반적으로, 매몰지 정화 및 침출수에 의해 오염된 부지의 복원을 위해서는 대상 부지의 지질학적 특성, 침출수 양, 침출수 오염정도, 주변 지하수 현황 등의 수리환경학적 특성, 그리고 매몰지의 규모에 대한 정밀조사가 선행되어야 한다. 하지만, 일반적인 지질조사 중 하나인 시추조사(drilling investigation)는 그 자체가 가지는 한계로 인하여 매몰지에 대한 전반적인 특성 파악이 힘들다. 매몰지와 침출수로 인해 오염된 주변 지역을 파악하는데 있어서, 지구물리학적 이론을 응용한 기술로써 국내외에서 불량매립지에 효과적으로 적용되는 물리탐사법(geophysical survey)이 요구되어진다. 특히, 전기비저항 탐사(electrical resistivity survey)를 포함한 물리탐사법은 주변 환경에 변화를 주지 않기 때문에, 비파괴적이고 환경 친화적인 장점이 있다. 최근 들어 부각되고 있는 환경공학적인 문제의 해결이나 지하공간 활용을 위한 기초 물리탐사를 위하여 그 응용성이 크게 증대되고 있다(Lowry and Shive, 1990).

전기비저항 탐사는 일반적으로 지층 및 암석, 광물 등이 서로 다른 전기적인 특성을 가지고 있으므로 이러한 전기적 특성 등을 이용하여 전류가 흐르는 통로나 암석, 광물의 전기전도도의 차이에 따라서 전위차를 측정함으로써 지하에 대한 정보를 획득할 수 있는 탐사법이다.

전기비저항 탐사법은 매립 폐기물 및 시설탐지, 오염원 및 오염형태 파악, 지하수의 오염정도 파악, 암반 및 흙의 공학적 특성 파악, 대상지역의 수리 지질조건 판단, 해안지역에서 염수와 담수의 경계구분, 점토로 충전

된 웅덩이 및 지하 매설수로의 발견 등에 적용된다.

전기비저항은 공극률, 유체 포화도, 공극수의 전기비저항, 입도 조성, 조암광물의 전도성, 온도 및 압력조건 등 다양한 조건에 영향을 받으며(Archie, 1942), 만약 공극수내 침출수 등의 오염물질이 존재시 전기비저항에 영향을 미치게 된다. 이러한 전기적인 성질을 이용하여 국내에서는 전기비저항 탐사를 이용하여 매립지내 침출수에 의한 주변 오염현황에 관한 연구가 여러 연구자들에 의하여 수행되었다. Kim et al. (1995)은 전기비저항 탐사를 이용하여 난지도 일대에서 지하수 오염에 대한 성공적인 모니터링에 대해 보고하였다. Kim and Shon (1995)은 전기 비저항 탐사를 이용하여 매립지내 침출수의 배출에 의한 오염물질의 이동에 관하여 연구를 성공적으로 수행하였다. Lee and Kim (1996)는 불량 쓰레기 매립지에서 매립지의 규모 파악을 위하여 연구를 수행한 결과, 전기비저항 탐사는 지하레이더 탐사(ground penetrating radar survey)가 갖지 못하는 물성에 대한 정보제공이 가능하다고 보고하였다. 또한, Song et al. (2003)은 쓰레기매립장의 경계면과 침출수 누출영역을 파악하기 위하여 전기비저항 탐사를 수행하였으며, 도출된 탐사결과를 동일 축선상에서 수행된 자연전위 탐사(spontaneous polarization survey)를 이용하여 효과적으로 뒷받침 하였다. 그러나, 국내에서 물리탐사법을 이용하여 가축 매몰지에 대한 침출수 누출탐지 및 매몰지 규모 등의 특성을 파악 하는 연구는 거의 수행된바 없으며, Park and Ko (2011)이 전기비저항 탐사를 이용하여 가축 매몰지 침출수 유출 탐지 관련 기초연구를 수행한 것이 전부이다.

그러므로 본 연구에서는 가축 전염병으로 조성된 가축 매몰지의 효과적인 복원을 위한 매몰지 현황(규모 및 침출수 누출여부 등) 조사에 있어 전기비저항 탐사법의 적용 가능성을 알아보는 것이다. 또한, 탐사결과에 대한 신뢰도를 높이기 위하여 매몰지 내 침출수에 대하여 매몰시간에 따른 성상의 변화와 매몰지 내의 각에서 시추조사를 병행하였다.

연구방법

대상 가축 매몰지

연구대상 가축 매몰지는 2011년 1월 17일 구제역으로 인하여 폐사된 가축을 대상으로 조성되었으며, 매몰지 외부로의 침출수 유출이 의심됨에 따라 같은 해 6월 20일부터 6월 22일까지 인근 지역(기존 매몰지로부터 직

선거리 약 100 m 이내)으로 이설된 매몰지이다. 매몰지 크기는 2010년 11월 환경부가 고지한 “가축 매몰지 환경관리지침”을 기반으로 조성되었다. 매몰지의 크기는 상부길이와 폭은 각각 40 m, 15 m이고, 하부길이와 폭은 각각 30 m, 7 m이며, 깊이는 7 m이다(Fig 1). 인근 하천과의 이격거리(separation distance)는 30 m 이상 확보되었으며, 임야철거 후 평탄화 작업이 수행되었고, 침출수 유출을 방지하기 위하여 매몰지 바닥에 차수막 시트 설치한 후 이설되었다. 가축 사체를 매몰한 후 주변 토양으로 약 2 m를 복토한 후, 강우 등에 의한 상부로 부터의 지표수 유입을 방지하기 위하여 차수막을 설치하였다(Fig. 1(a)). 매몰지에 매몰된 가축의 두수는 총 6,079두이며, 축종은 소 571두, 돼지 5,508두 이었다. 복토에 사용된 토양을 실내에서 레이저 입도분석기(laser particle size analyzer)를 이용하여 분석한 결과, 평균입경은 123.34 μm 로 나타났다.

침출수 채취 및 분석

대상 가축 매몰지내 침출수의 물리·화학적 특성을 파악하기 위하여, 매몰지에 설치되어 있는 관측공에서 매몰 초기인 2011년 5월과 이설 후인 2012년 6월에 총 2회에 걸쳐, 지하수 채수에 사용되는 베일러(bailer)를 이용하여 침출수를 채취하였다. 채취된 침출수는 현장에서 0.45 μm 기공 크기를 가지고 있는 필터를 이용하여 부유물질을 제거한 후, 수소이온농도(pH, TOA HM-14P), 산화환원전위(Eh, TOA HM-12P), 전기전도도(EC, TOA CM-14P), 용존산소(DO, YSI 95), 그리고 총고용물질(TDS, HACH COS50)을 측정하였다. 그리고 침출수 시료는 화학분석을 위해 4°C 이하로 냉장 보관 하였다. 양이온 주성분 원소인 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 에 대한 화학분석은 유도결합플라즈마(inductively coupled plasma)를 이용하였고, $\text{PO}_4\text{-P}$, SO_4^{2-} , Cl^- , $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 같은 음이온 분석은 이온크로마토그래피(ion chromatography)를 이용하였다. 그리고 총유기탄소(total organic carbon) 함량은 총유기탄소 분석기(TOC analyzer)를 이용하여 측정하였다.

전기비저항 탐사와 시추조사

전기비저항 탐사는 그 전극 배열방법에 따라 웨너 배열, 슬립버저 배열, 쌍극자 배열 그리고 단극자 배열 탐사 방법으로 구분된다. 본 연구에서는 쌍극자 배열을 사용하였다. 쌍극자 배열은 웨너 배열이나 슬립버저 배열과는 달리 신속하게 2차원적 수직-수평탐사를 수행할 수

있어서, 비교적 광역적으로 지하 2차원 구조, 특히 전기전도성 구조를 파악할 수 있는 장점이 있다. 또한, 쌍극자 전극간격을 원하는 가탐심도나 지질학적 조건에 따라서 변경하여 조사할 수 있으며, 전극간격과 전개수를 조정함으로써 수직변화 양상을 신속하게 탐지할 수 있다.

연구대상 가축 매몰지의 현황을 파악하기 위해서 실시한 전기비저항 탐사는, 매몰지를 중심으로 총 측선 길이는 60 m이며, 수평 및 수직 해상력을 고려하여 탐사심도(설계 매립지 심도)의 2배인 약 15 m 심도에 맞추어 쌍극자 간격은 3 m이고, 전극 전개수는 7로 하여 총 5개 측선(측선 간격 5 m)을 탐사하였다 (Fig. 1(b)). 취득된 현장자료에 대하여 주변 환경을 고려한 노이즈 제거와 지형보정을 실시하였다. 역산은 범용해석 프로그램인 DIPRO (Ver 4.0)를 이용하였으며, 현장에서 측정된 외견 비저항치(apparent resistivity)를 이용하여 야외자료 가단면도(FDP : Field Data Pseudosection), 이론자료 가단면도(TDP : Theoretical Data Pseudosection)를 작성하여 역산해석을 시행하였다.

탐사결과에 대한 신뢰도를 높이기 위하여, 매몰지내 3공과 매몰지 주변의 11공에 대하여 시추조사를 실시하였다(Fig. 1). 시추공의 심도는 지표하 약 10 m이며, 구경은 NX(76 mm) 규격이다. 시추공내 지하수위는 확인되지 않았으며, 시추를 통하여 얻어진 시추코어를 이용하여 매몰지 내외각의 수직적 지질특성을 파악하였다.

결과 및 토의

Table 1. Chemical analysis of leachate collected from the animal carcass disposal site.

Sampling date	20 May 2011	1 June 2012
Precipitation (mm)	216.8	34.7
pH	7.4	6.7
Eh (mV)	-358.0	-48.0
EC (ms/m)	0.6	1.9
DO (mg/L)	0.7	1.0
TDS (mg/L)	6.5	1,280.0
TOC (mg/L)	2,360.0	23,572.2
$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)	9.9	64.0
$\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/L)	0.1	14.2
SO_4^{2-} (mg/L)	36.9	538.8
HCO_3^- (mg/L)	21.0	58,000.0
Cl^- (mg/L)	185.8	608.9
Na^+ (mg/L)	174.4	558.0
K^+ (mg/L)	139.9	622.2
Ca^{2+} (mg/L)	33.6	712.0
Mg^{2+} (mg/L)	1,142.2	257.1

Fig. 1. Geophysical survey line and sampling points in the study area: (a) ground view; (b) side view.

침출수 화학적 분석

본 연구지역의 가축 매몰지내 매몰기간에 따른 침출수의 물리화학적 특성을 파악하고, 전기비저항 탐사의 가능성을 알아보았다(Table 1). 매몰시간이 경과함에 따라 pH는 7.4에서 6.7로 약간 감소하였고, 산화환원전위(Eh)는 -358 mV에서 -48 mV로 환원환경에서 산성환경으로 변화하였다. 이는 가축 매몰 시 산성화 방지를 목적으로 생석회(CaO)를 넣었음에도 불구하고, 가축사체의 분해과정에서 매몰지 내부조건이 거의 혐기성 상태(평균 DO=0.85 mg/L)로 유지됨으로써, 유기산 생성균이나 자체 효소에 의해 유기산이 생성되었기 때문으로 판단되어진다.

미국이나 영국에서 가축 매몰지 환경영향평가의 지표로 사용되는 염소이온(Cl⁻)은 매몰시간이 지남에 따라 약 3.3배 증가하였으며, 국내 음용수 기준의 약 6배에 해당

하는 608.9 mg/L으로 나타났다. 다른 음이온성 이온의 경우(NO₃-N, PO₄-P, SO₄²⁻, HCO₃⁻)에도 7~2,762배 증가하였다. 양이온(Na⁺, K⁺, Ca²⁺)의 경우에도 매몰시간이 지남에 따라 3~21배 증가한 반면, Mg²⁺의 경우 1,142.2 mg/L에서 257.1 mg/L으로 오히려 4배 정도 감소하였다.

Ritter and Chirside (1990, 1995)는 여섯 지역에 죽은 가금류를 매몰한 후, 매몰시간 경과에 따른 주변 지하수 수질의 변화를 연구한 결과, 여섯 개의 매몰지 중 세 개 지역의 주변 지하수에서 질소에 의한 오염이 박테리아 오염보다 더 심각하게 나타난 것으로 보고하였다. 본 연구에서도 이와 유사하게 T-N의 농도가 매몰 초기에 2,358 mg/L의 매우 높은 값을 보였으며, 매몰시간이 지남에 따라 6,322.2 mg/L으로 상승함을 알 수 있었다. 가축사체 부패에 따른 총유기탄소(TOC)의 농도

또한 2,360 mg/L에서 23,572.2 mg/L로 약 10배 증가한 것으로 나타났다.

전기 비저항과 밀접한 관계가 있는 전기전도도(EC)는 0.6 mS/m에서 1.9 mS/m으로 증가하였고, 총고용물 질(TDS)은 6.5 mg/L에서 1280 mg/L로 증가하였다. Park and Ko (2011)은 가축매몰지 침출수에 대하여 전기전도도를 측정된 결과, 약 6.53 mS/m로 나타나 가축 매몰지 기원의 침출수에는 상당히 많은 전해질 이온이 용존해 있음을 알 수 있었다. 지층내 전기 비저항은 지층을 구성하는 대부분의 조암광물이 부도체인 특성을 띄고 있어 주로 지층의 공극율과 공극을 채우고 있는 유체의 염도에 의하여 결정이 된다. 본 연구에서 침출수의 높은 전기전도도는 매몰지 기원의 HCO_3^- 등으로 판단되어진다.

전기비저항 탐사 및 시추조사 분석

연구대상 가축 매몰지 주변 지질에 대한 시추조사 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 지층은 성토층, 풍화대인 풍화잔류토와 풍화암 및 기반암의 층서로 이루어져 있었고, 지하수위는 확인되지 않았다(Fig. 2a). 성토층은 모든 공에서 확인되며, 토층의 두께는 0.6~3.0 m로 암편이 섞인 실트질 모래로 구성되어 있었다. 함수상태는 약간 습윤한 상태였고, 담갈색 색조를 띄었다. 풍화잔류토는 기반암의 상부풍화대로 0.5~5.8 m의 두께로 암편이 섞인 실트질 모래로 구성되어 있었고, 모암의 조직은 잔존하나 완전히 풍화된 토층으로 담갈색의 색조를 띄고 있었다. 매몰지가 조성된 지역의 지질구조를 시추조사 결과를 기반으로 3차원으로 도시한 결과(Fig. 2b), 상부에서 하부 쪽으로 풍화잔류토와 풍화암이 경사를 이루고 있었으며, 기반암이 오른쪽에 존재하고 있음을 알 수 있었다. 매몰지내 시추조사를 실시한 결과, 심도 약 3 m까지 토양은 마사토 재질의 복토층임을 확인하였으며,

Fig. 2. Results of the drilling investigation near the disposal sites: (a) 2-dimensional; (b) 3-dimensional.

복토층은 모세관현상에 의한 토양수에 의한 습도가 증가하여 부분적으로 색이 차이가 난 것으로 사료된다(Fig. 3a). 심도 4~6 m 구간의 토양에는 일부 미분해된 사체가 관찰되었으며, 완전한 사체층은 아니고 재이설로 인하여 토양과 혼재되는 양상이었다(Fig. 3b).

Fig. 3. Digital images of the drilling investigation at the carcass disposal sites: (a) surface soil; (b) subsoil.

Fig. 4. Distribution of electrical resistivity along the line in the study area: (a) array #1; (b) array #2; (c) array #3; (d) array #4; (e) array #5.

전기비저항 탐사 결과를 유한차분법(FDM: Finite Difference Method)을 이용하여 역산한 결과, 매몰지 중앙에 설치한 3번 측선 기준으로 침출수로 판단되어지는 저비저항대($1.47 \Omega\text{m} \sim 735 \Omega\text{m}$)이 탐지되었다(Fig. 4). 전기비저항은 전기전도도와 역수의 관계로 비추어 보았을 때, 침출수의 전기전도도(1.9 mS/m)가 시료 채취한 지점에서 약 $0.52 \Omega\text{m}$ 의 비저항치가 추정되어 약 $2 \sim 10 \Omega\text{m}$ 탐사결과치의 범위내의 값을 나타내고 있었다. 본 연구에서 탐지된 저비저항대는 오염도가 매우 높은 지하수임을 보여주는 것으로 침출수나 염수에 의하여 오염된 지하수는 오염되지 않은 지하수에 비하여 비저항치를 보이게 되는 기존의 선행연구결과와 일치하였다(Zhody et al., 1974). 일반적으로 해수의 비저항치가 평균 $0.2 \Omega\text{m}$ 임을 감안하였을 때, 해수와 유사한 전기전도도를 가지고 있는 지질구조가 본 탐사지역에 존재하고 있었으며, 이는 매몰지내 침출수로 판단되어진다. Lee et al. (2006)은 불량 매립지 오염평가를 위하여 전기비저항 탐사를 실시한 결과, 매립지내 침출수 생성의 기원으로 사료되는 지층의 평균 전기비저항 값이 $150 \sim 1,000 \Omega\text{m}$ 의 범위를 보임으로써 본 연구의 침출수 비저항치보다 더 높게 나타났다. 이는 매몰 기간 차이, 침출수내 전해질의 농도 차이, 매몰층의 지층구조 및 매몰시 복토층의 혼입에 의한 것으로 판단되어진다.

침출수는 전 측선구간 5번에서 17번 구간까지 측선방향과 평행하게 총 36 m 정도 존재하고 있으며, 상부 성토층은 약 1.5~3 m의 심도를 보이고 있었다. 침출수는 약 7~8 m 심도 구간까지 탐지되었으며, 이는 매몰지내 침출수가 매몰지 조성 시 매몰지 하부에 설치된 차수막에 의하여 정체됨을 나타내는 것으로 판단되어진다. 탐사 2번과 4번의 상부에 존재하는 고비저항대는 PVC재질로 되어 있는 추출정과 추출정내 비어있는 공간으로 판단되며, 전 측선구간에서 침출수의 유출은 확인되지 않았다. 또한 전극 16번부터 18번 구간, 심도 12 m 부분에 관측되는 저비저항값은 시추조사 결과와 함께 비교분석한 결과, 기반암의 영향으로 판단되어진다.

결 론

가축 매몰지의 부지특성(매몰지 규모 및 침출수 존재 형태 등)을 파악하기 위하여 전기비저항 탐사를 수행하였으며, 매몰지 내외곽에 시추조사를 병행으로 실시하였다. 침출수에 대한 분석 결과, 매몰시간이 경과함에 따라 침출수의 pH는 감소하였고, 산화환원전위는 혐기성

환원 환경으로 변화였다. 또한 가축사체의 부패와 생석회 등의 영향으로 높은 전기전도도의 특성을 띄고 있어 전기 비저항탐사의 가능성을 간접적으로 보여 주었다. 전기비저항 탐사 결과, 침출수로 판단되어 지는 저비저항대의 감지가 가능하였으며, 매몰지의 위치 및 규모를 간접적으로 파악할 수 있었다. 본 연구를 통해, 가축 매몰지의 효율적인 관리 및 복원을 위한 부지특성조사에 전기비저항 탐사의 적용이 효율적임을 알 수 있었다.

사 사

이 논문은 환경부의 재원으로 환경기술진흥원의 지원(토양·지하수오염방지기술개발사업)을 받아 수행된 연구입니다 (과제번호 G112-00056-0004-1).

참 고 문 헌

- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Transactions of the AIME., 146(1), 54-62.
- Kim, H. S., Lee, K. H., and Han, J. S., 1995, Electrical Surveys for Mapping Leachate in Nanji-Do Landfill Site, The Journal of Engineering Geology, 5, 259-276 (In Korean with English abstract).
- Kim, K. W. and Shon, H. W., 1995, A geochemical and geophysical study on the environmental contamination in the vicinity of waste disposal site, The Journal of Natural Science, Paichai University, Korea, 8, 87-92 (In Korean).
- Lee, J. Y. and Kim, H. S., 1996, A study of geophysical surveys for the open waste dumping landfill(I), J. of KoSES, 1(1), 29-38.
- Lee, S. S., Lee, J. Y., Yoon, H. S., Lee, K. K., Kim, C. G., and Yoon, Y.C., 2006, Environmental Geophysical Survey of Abandoned Landfills for Contamination Evaluation: A Case Study, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 28(5), 463-471 (In Korean with English abstract).
- Lowry, T. and Shive, P. N., 1990, An evaluation of subsurface cavities, Geophysics, 55, 514-520.
- Park, S. G. and Ko, K. S., 2011, Application of resistivity survey to detect leachate of livestock burial site, 2011 Annual Meeting of the Korean Society of Earth and Exploration Geophysics (Expanded abstract), Daejeon, Oct. 6-7, 15-16 (In Korean).
- Ritter, W. F. and Chirnside, A. E. M., 1990, Dead bird disposal and ground-water quality, Proceedings of the 6th International Symposium on Agricultural and Food Processing Wastes, Chicago, Illinois, 414-423.
- Ritter, W. F. and Chirnside, A. E. M., 1995, Impact of dead bird disposal pits on ground-water quality on the Delmarva Peninsula, Bioresour Technol, 53, 105-110.
- Song, S. H., Yong, H. H., An, J. G., and Kim, K. P., 2003, Application of electrical and small-loop EM survey to

the identification of the leachate at a waste landfill in Jeju island, Geophysical Exploration, 6(3), 143-152 (In Korean with English abstract).
 Zhody, A. A. R., Eaton, G. P. and Mabey, D. R., 1974, Application of surface geophysics to groundwater, investigations: techniques of water-resources investigation of the United States Geological Survey, USGS, 116p.

원고접수일 : 2012년 11월 23일
 수정본채택 : 2012년 12월 24일(1차)
 2012년 12월 26일(2차)
 게재확정일 : 2012년 12월 26일

고진석

501-759 광주광역시 동구 서석동 375
 조선대학교 에너지 · 자원공학과
 Tel: 062-230-7118
 Fax: 062-230-2110
 E-mail: jsgo@chosun.ac.kr

김봉주

501-759 광주광역시 동구 서석동 375
 조선대학교 에너지 · 자원공학과
 Tel: 062-230-7878
 Fax: 062-230-2110
 E-mail: nega6495@hanmail.net

최낙철

151-921 서울시 관악구 대학동 농업생명과학대학 3217호
 서울대학교 지역시스템공학과
 Tel: 02-880-4595
 Fax: 02-873-2087
 E-mail: nagchoul@empas.com

김성배

151-921 서울시 관악구 대학동 농업생명과학대학 3217호
 서울대학교 지역시스템공학과
 Tel: 02-880-4595
 Fax: 02-873-2087
 E-mail: songbkim@snu.ac.kr

박정안

151-921 서울시 관악구 대학동 농업생명과학대학 3217호
 서울대학교 지역시스템공학과
 Tel: 02-880-4595
 Fax: 02-873-2087
 E-mail: pjaan720@snu.ac.kr

박천영

501-759 광주광역시 동구 서석동 375
 조선대학교 에너지 · 자원공학과
 Tel: 062-230-7119
 Fax: 062-230-2110
 E-mail: cybpark@chosun.ac.kr