

## 불량 매립지 오염평가를 위한 지구물리 탐사 사례연구

이성순 · 이진용<sup>†</sup>\* · 윤희성 · 이강근 · 김창균\*\* · 유영철\*\*\*

서울대학교 지구환경과학부 · \*지오그린21 · \*\*인하대학교 환경공학과 · \*\*\*동아건설턴트

(2006년 2월 20일 접수, 2006년 4월 9일 채택)

### Environmental Geophysical Survey of Abandoned Landfills for Contamination Evaluation : A Case Study

Sung-Soon Lee · Jin-Yong Lee<sup>†</sup>\* · Hee-Sung Yoon · Kang-Kun Lee · Chang-Gyun Kim\*\* · Young-Chul Yu\*\*\*

SEES, Seoul National University · \*GeoGreen21 Co., Ltd.

\*\*Department of Environmental Civil Engineering, Inha University · \*\*\*Dong-A Consultant Co., Ltd.

**ABSTRACT** : Electrical resistivity surveys were conducted at areas of abandoned landfills in Cheonan and Wonju. Geology and extent of leachate migration around the landfills were evaluated with collected resistivity data by 2-D and 3-D resistivity inverse modeling. The Cheonan landfill is located above the paddy fields and the resistivity survey lines were crossed to examine possible pollution at the paddy fields by leakage of the landfill leachate. In Wonju, the landfill and the downgradient paddy fields are divided by a concrete barrier wall. At the bottom of the landfill, there is a leachate settlement system, which has not been in operation. To evaluate leachate leakage into the paddy fields, a total of 4 survey lines were used. According to the resistivity survey results, the landfill leachate in Cheonan appeared to be restricted only within the interior of the landfill, not to migrate into the subsurface of the paddy fields. These results are well consistent with electrical conductivity values of groundwaters obtained from a periodic analysis of water qualities. In Wonju, however, it was inferred that the leachate emanating from the landfill migrated beneath the abandoned leachate settlement system and the leachate would reach the down-gradient paddy fields. Low resistivity area was observed in the old reservoir area and it appeared to be derived from convergence of groundwater flows from the surrounding valley and the moist wet land. In addition, groundwater flow into the paddy fields occurs beneath the old reservoir embankment at depths of 7~8 m. This paper reports details of the resistivity surveys for the uncontrolled landfills.

**Key Words** : Abandoned Landfills, Leachate, Electrical Resistivity, Electrical Conductivity, Dipole-dipole Array

**요약** : 본 연구에서는 충남 천안시와 강원도 원주시에 위치한 불량매립지 일대에 대해 지구물리 탐사 중 전기비저항 탐사를 실시하였으며, 수집된 자료를 이용하여 2차원과 3차원 비저항 역산 모델링을 수행하여 매립지 주변 지질구조와 침출수 오염영역, 침출수 유동을 평가하였다. 천안 직산매립지는 매립지가 논 상부에 위치하고 있으며 매립지로부터 침출수로 인한 농지 오염의 가능성이 있어 물리탐사 축선 배열을 매립지를 기준으로 서로 교차하는 축선배열을 수행하였다. 원주 매립지의 경우 매립지와 주변 논밭의 경계가 매립지 옹벽으로 나뉘며, 매립지 경계로부터 침출수 침전시설이 위치하고 있으나 현재는 방치된 상태로 침출수 누출로 인한 농지 오염의 가능성이 있다. 이에 총 4개 축선에 대해 3개 축선은 매립지 경계로부터 일정거리를 두고 평행하게 배열을 하였으며, 나머지 한 개 축선은 이 3개 축선을 교차하도록 배열하였다. 2차원 비저항 역산모델을 수행한 결과 천안매립지의 경우 침출수가 외부 논으로 확대되지 않고 매립지 내부에 정체된 형태로 존재하는 것으로 평가되었다. 이는 지하수 관측정 정기 수질분석시 측정된 지하수의 전기전도도 값의 분포에서도 확인할 수 있다. 원주 매립지의 경우는 매립지로부터 유래된 침출수가 매립지 경계 부근 폐기된 침출수 처리시설 밑으로 흐르는 것으로 평가되었고, 매립지 주변 기존 저수지였던 곳에서는 매립지 주변에 위치한 계곡의 영향으로 계곡에서 흘러드는 지하수에 의한 흐름과 과거 저수지의 영향으로 지표 근처에서 낮은 비저항대를 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 저수지 제방에서는 하부 7~8 m 심도에서 지하수가 논으로 유입되는 것으로 추정되었다.

**주제어** : 불량매립지, 침출수, 전기비저항, 전기전도도, 쌍극자 배열

## 1. 서론

오늘날 산업 및 도시의 발달로 대량생산 및 대량소비가 활성화되었고 이로 인한 쓰레기의 발생 또한 폭발적으로 증가

하고 있다. 생활 및 산업쓰레기의 처리는 최근에는 일반적으로 마다차수재, 침출수 집수 및 처리시스템을 갖추는 등 위생적으로 매립되지만 과거에는 환경에 대한 관심 부족과 행정적·경제적 한계로 비위생적이거나 불량으로 매립된 것은 주지의 사실이다. 이로 인해 매립지 주변 환경오염 또한 가중되고 있다.

매립장 내부에서 기인한 침출수는 매립장 주변의 지하수와 토양 및 생태계를 오염시킨다.<sup>1)</sup> 따라서 매립장에서 발생

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: hydrolee@empal.com

Tel: 02-875-9491

Fax: 02-875-9498

하는 침출수의 분포 및 거동을 예측하는 것은 매립장을 보다 효율적으로 관리하는데 기초가 될 수 있다.<sup>2)</sup> 산업 및 생활폐기물이 매립된 경우, 폐기물에 함유된 위해성 물질이나 생활쓰레기가 썩는 과정에서 발생한 오염물질이 매립지 내로 유입된 우수와 함께 지하수에 유입되어 매립지 주변 환경으로 흘러 나간다면, 심각한 환경문제를 야기할 수 있다. 또한 위생매립지로서 갖추어야 할 저류, 차수, 처리기능을 갖지 않는 불량 매립지의 경우에는 이러한 문제가 더욱 심각하게 부각된다. 특히 매립종료 후 경과기간이 10년 이상 지난 불량 매립지의 경우는 침출수가 일반 매립지보다 더 확산될 가능성이 높다.<sup>3)</sup>

국내의 오염 지역에 대한 평가를 위해 물리탐사의 사례로서 지층투과레이더(GPR) 및 전기비저항탐사,<sup>4)</sup> 전기비저항 및 굴절법 탐사,<sup>5)</sup> 전기비저항 및 전자탐사<sup>6-8)</sup>의 이중탐사를 적용한 경우가 있으며, 단일적용 탐사로 전기비저항탐사, 시추공 물리탐사, 탄성과 탐사, GPR, 자력탐사,<sup>9)</sup> 전자탐사가 적용되었다. 특히 국내 매립지에 대한 물리탐사의 적용은 난지도 매립지 침출수 및 주변 환경에 대한 연구에 최초로 적용되었다.<sup>10-12)</sup>

이러한 쓰레기 매립지에 대한 오염평가 방법인 물리탐사는 오염 범위 및 오염 경로 등에 대한 정보체시가 가능하며 비파괴 및 비굴착 방법으로 주변환경에 변화를 주지 않아 국내의 적용이 증가되는 추세이다.<sup>13,14)</sup> 일반적으로 쓰레기 매립장에서의 물리탐사의 적용은 매립지와 주변의 오염운(plume) 및 지질구조 파악, 지하수의 오염정도 평가가 가능하며, 매립지의 수평적 크기 및 수직적 깊이 결정, 매립지내 폐기물이 들어 있는 용기 및 대규모 불균질대의 위치 파악에 주로 이용되고 있다.<sup>15)</sup>

본 연구에서는 불량 매립지 주변 오염평가를 위해서 환경오염과 매립지 침출수 분포에 대한 적용성이 매우 양호한 전

기비저항탐사와 전자탐사 중 가장 간단하며 광역적인 조사에 효율적인 방법으로 알려진 전기비저항 탐사를 수행하였다.

## 2. 대상 매립지 및 방법

### 2.1. 대상 매립지

본 연구의 대상인 두 불량매립지는 서울에서 남쪽과 서쪽으로 약 100 km 떨어진 천안시와 원주시에 위치한다. 천안에 위치한 매립지는 상대적으로 평지위에 있으며 주변에 논과 작은 나무 숲이 있다(Fig. 1(a)). 주로 생활쓰레기가 매립되어 있으며 매립깊이는 약 4 m이고 상부복토는 1~3 m이고 평균 1 m 내외이다.<sup>16)</sup> 매립면적은 약 6,000 m<sup>2</sup>이고 부피는 41,000 m<sup>3</sup>이다(Table 1). 그러나 관련 보고서에 나타난 매립지의 경부 바깥에서도 일부 쓰레기들이 발견된다. 이 매립지는 1991년과 1998년 사이에 쓰레기를 매립하였으며 매립지 내외부에 5개의 가스감시정이 존재한다. 매립지 바닥 차수재나 침출수 침출수 집수시설은 없다. 매립지의 일부는 쓰레기 재활용 부지로 활용되고 있다. 매립지 상부 일부는 옥수수, 콩을 재배하며 좌측과 하부는 전부 논이다. 이 지역의 지난 10년간 강수량은 838~1,623 mm 범위이며 평균은 1,332 mm이다. 몬순기후의 영향으로 강수량의 약 60% 이상이 우기(6~8월)에 집중된다.<sup>17)</sup> 본 지구물리탐사는 불량매립지 침출수의 분자생태학적 자연저감 연구의 일환으로 수행된 것으로 이 연구를 위해 매립지의 내외부에 내경 2.5 cm의 12개의 지하수관측정이 설치되어 있다.

원주매립지는 다소 급경사의 산으로 둘러싸인 계곡에 위치한다(Fig. 1(b)). 매립깊이는 약 50 m이며 복포는 1.5 m 정도이다(Table 1). 쓰레기를 매립한 기간은 1982~1995년이며 매립면적은 81,000 m<sup>2</sup>이고 매립부피는 322,000 m<sup>3</sup>이다. 본 매립지도 하부 차수시설은 없으나 비교적 최근에 만든 것으

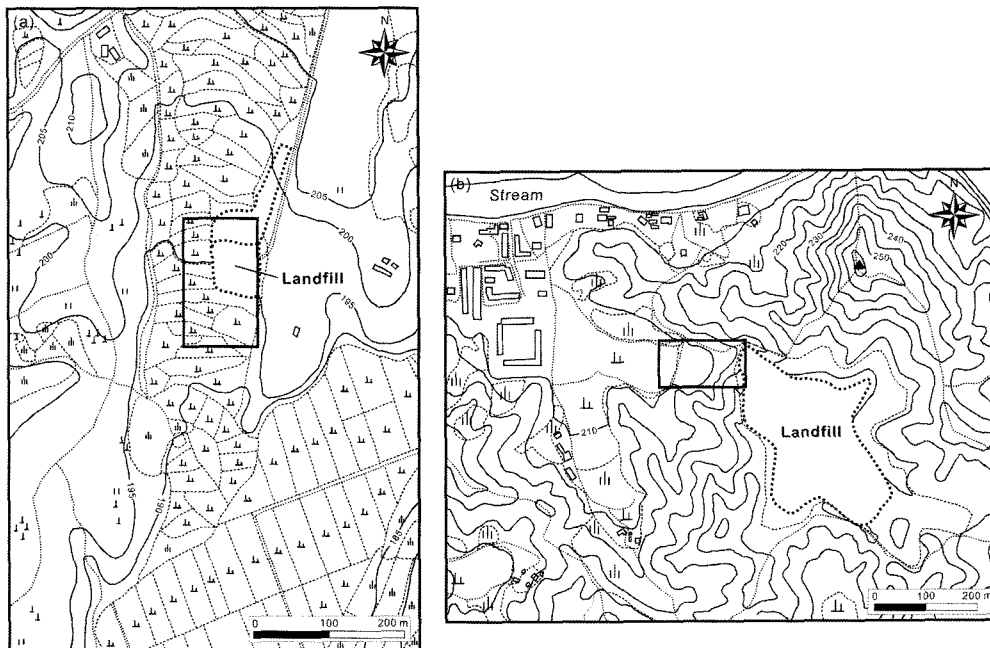


Fig. 1. Locations of the studied landfills in (a) Cheonan and (b) Wonju.

**Table 1.** General conditions of the study landfills

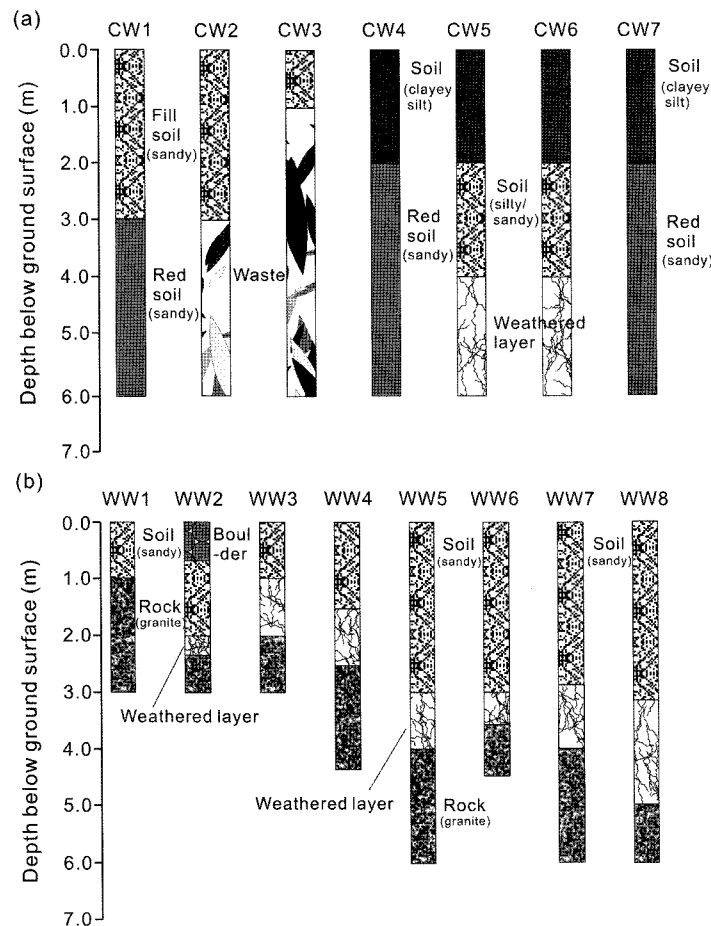
Landfills	Cheonan	Wonju
Location	Jiksan, Cheonan	Taejang, Wonju
Period of landfilling	1991 ~ December 1998 (7 years)	May 1982 ~ August 1995 (13 years)
Landfill type	General landfilling	Valley landfilling
Landfilling volume	41,000 m <sup>3</sup>	322,000 m <sup>3</sup>
Waste type	Household wastes	Household wastes
Landfilling area	6,000 m <sup>2</sup>	81,000 m <sup>2</sup>
Landfilling depth	~ 4 m	~ 50 m
Thickness of cover soil	1 m	1.5 m
Landfill land use	Bare or barren land	Public sports facility

로 추정되는 매립지 말단부의 콘크리트 장벽과 이를 통해 배출되는 일부 침출수를 모아 부유물을 침전시키는 시설이 있다. 그러나 이 시설은 건설초기 외에는 거의 운영되지 않은 것으로 알려지며 현재도 폐기되어 있다. 계곡 상부 매립지 일부는 현재 모터사이클 경기장으로 활용되고 있다. 나머지 대부분의 매립지 상부는 나대지로 나무와 식물들이 자란다. 이 지역의 평균 강수량은 1,353 mm이다(범위 = 776~1,745 mm). 대부분은 천안매립지와 마찬가지로 6~8월 우기에 집중된다. 매립지로부터 약 400 m 하부에 동에서 서로 흐르는 폭 50 m

의 하천이 있다. 매립지 방벽 하부에는 논과 밭이 분포하며 일부 지하수 이용관정이 발견된다. 논밭과 하천사이에 주택 지역이 있다. 만약에 지하수가 침출수에 오염된다면 이들 지역의 건강우려가 발생할 수 있다. 매립지의 상하부에 깊이 3~6 m의 지하수 관측정이 13개 설치되었다.<sup>16)</sup>

매립지 내외에 지하수 관측정을 설치하면서 획득한 로깅자료를 근거로 구성된 지질단면은 Fig. 2와 같다. 천안 매립지의 경우 위치에 따라 수리지질 층서의 변화가 상대적으로 크다(Fig. 2(a)). 상부 밭 작물 재배지역의 경우 최초 3 m는 모래질 복토층이고 그 하부는 황토층이다. 매립지 내부는 1~3 m의 복토층 하부에 대부분의 쓰레기층이 나타난다. 하부논의 경우 최초 2 m는 점토질 실트로 구성되어 있어 비경작을 위한 저수역할을 한다. 실트층 하부에는 모래질 토양이 나타나며 그 하부에는 편마암의 풍화대가 4 m 이하에서 나타난다. 지하수위는 지하수 1~4 m에 나타나고 연중 지하수위 변동은 평균 1.23 m이다.<sup>18)</sup> 전체적인 지하수 흐름방향은 남서쪽이다.

원주매립지의 경우 콘크리트방벽 아래(WW1~WW2) 지질단면은 매우 불규칙하다(Fig. 2(b)). 최초 1~2 m에는 모래질 토양과 자갈질 역들이 발견된다. 그 하부는 풍화암 혹은 신선한 화강암대가 나타난다. 이후부터는 수리지질단면이 매우 단순하다. 세 개의 주요 층들이 발견되는데 모래질 토양,



**Fig. 2.** Simplified geologic sections in (a) Cheonan and (b) Wonju.

풍화대 및 신선한 화강암층이 그것이다. 이들의 두께는 매립지와 거리의 거리에 따라 일정 정도 변화한다. 모래질 토양층은 WW3에서 WW8로 가면서 두꺼워지며 그 하부 심도도 깊어진다. 또한 풍화대 및 화강암층이 나타나는 깊이도 증가한다. 지하수 흐름은 대부분 상부 토양층과 풍화대에서 발생한다. 최하부(WW12~WW13)는 지역은 최초 1~2 m 지하에는 천안매립지와 마찬가지로 점토질 실트층이 그리고 이들 실트층 하부는 7 m까지 모래질 토양이 나타난다. 대체적인 지하수 흐름방향은 매립지에서 하부 주거지역과 하천 방향이다. 매립지가 계곡에 있어 지하수 흐름이 수렴하는 경향이며 지하수위는 WW0(지하 4~6 m)를 제외하고는 대체적으로 1~2 m에 형성되어 있다. 지하수위의 연평균 변동은 0.3~1.0 m이며 평균 0.57 m이다. 콘크리트 방벽의 배출 파이프 및 균열로부터 침출수가 연중 새어나오고 있다.

2.2. 전기비저항 탐사

전기비저항탐사(Electric resistivity survey)는 대수층의 두께와 기반암의 깊이를 결정지을 수 있는 지하수 탐사를 위한 가장 일반적인 응용 지구물리학적 방법이다. 이 방법은 지하수 성질이 염수, 반염수, 담수 혹은 오염된 물인지를 결정지을 수 있는 장점도 갖고 있다.<sup>19)</sup> 김형수 등<sup>11)</sup>은 전기비저항 탐사를 이용하여 난지도 일대에서 지하수 오염에 대한 성공적인 모니터링에 대해 보고한 바 있다. 또한, 비저항 이미지 자료들은 환경조사 분야에서 지하수 오염을 도식화하는데 사용되어 왔다.

한쪽의 접지전극(C2)과 측선상의 한 전극(C1)에 전류를 흐르게 하며, 전류에 의해서 생긴 전위의 크기를 측선상의 한 전극(P1)에서 측정하여 전기비저항 이상대에 의한 이상 전위차를 측정, 해석하여 지질구조, 단층, 파쇄대 등의 분포를 확인한다. 전기비저항 탐사는 그 전극 배열 방법에 따라 웨너 배열, 슬럼버저 배열, 쌍극자 배열, 단극자 배열 탐사방법

으로 구분된다. 본 연구 지역에서는 수평탐사 중에서 수직 전도체에 반응성이 좋은 Dipole-Dipole(쌍극자) 배열방법에 의한 2차원 전기비저항 탐사를 실시하였다.

쌍극자배열법(Dipole-dipole array)은 한 쌍의 전위전극(P1, P2)을 다른 한 쌍의 전류전극(C1, C2) 밖에 설치하고 전위전극 사이나 전류전극 사이의 간격은 동일 거리 L로 하고, 이들 두 쌍간의 거리는 L의 정수배로 단계적으로 이동하면서 전위차를 측정하여 겹보기 전기 비저항값을 계산한다. 여기서 전극간격 L은 탐사목적, 정밀도 등을 고려하여 결정하며, n은 탐사심도를 고려하여 결정한다. 이 배열에서 겹보기 전기 비저항식은 다음과 같다.<sup>20)</sup>

$$\rho_a = -2\pi(n-1)n(n+1)L \frac{\Delta V}{I} \tag{1}$$

수치해석법은 비저항을 역산하는 방법으로서 겹보기 비저항치로부터 수치해석에 의해 지하의 단위체적당의 비저항을 계산하는 기법이다. 현장에서 측정된 자료는 유한차분법(FDM) 또는 유한요소법(FEM)을 이용한 비저항 역산 모델링에 의하여 2차원 영상으로 표현되며 지질구조에 의해 고비저항이나 저비저항의 이상대가 나타나게 된다. 역산 기법은 2차원 전기비저항 자료에 대한 Smoothness-Constrained Least-Squares Method<sup>21)</sup>을 사용하였다. 또한 Quasi-Newton Optimization Technique에 기초한 새로운 Least-Square Method가 적용되며, 블록의 분포와 크기는 블록의 수가 측정의 수를 초과하지 않도록 프로그램에 의해 자동적으로 생성되어 2차원 영상단면화가 된다. 수평전기비저항 탐사의 경우 전기 Imaging 탐사로부터 얻은 자료를 이용하여 지하 지질구조에 대한 2차원 비저항 모델을 결정하기 위하여 개발된 DiproWin ver 4.0<sup>22)</sup>를 이용하여 지형의 영향을 유한차분(FDM) 기법에 의해 보정한 후 진비저항 단면도를 산출할 수 있다.

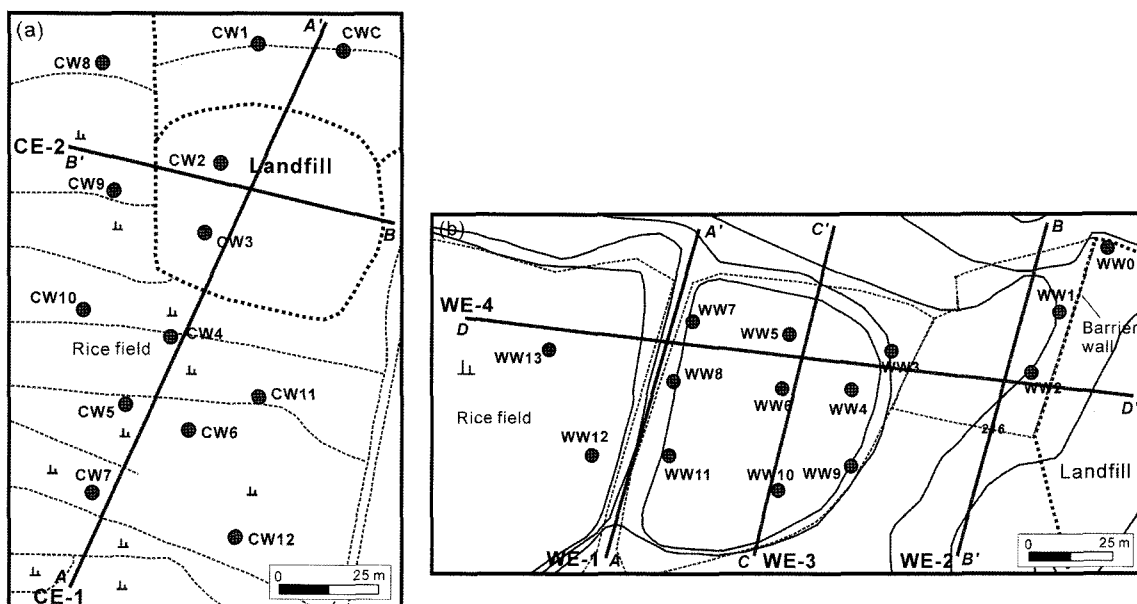


Fig. 3. Geophysical survey lines in (a) Cheonan and (b) Wonju.

**Table 2.** Summary of geophysical survey lines

Line number	Starting point		Ending point		Pole distance (m)	Length (m)	
	X	Y	X	Y			
Cheonan	CE-1	212807.069	377021.374	212918.976	377249.413	10	250
	CE-2	212935.558	377103.601	212814.028	377135.964	10	250
Wonju	WE-1	285065.101	431338.748	285098.417	431469.572	5	125
	WE-2	285164.807	431356.531	285208.607	431484.229	5	125
	WE-3	285101.063	431347.064	285155.136	431466.484	5	125
	WE-4	285029.514	431421.773	285249.514	431391.773	5	220
Total						-	1,095

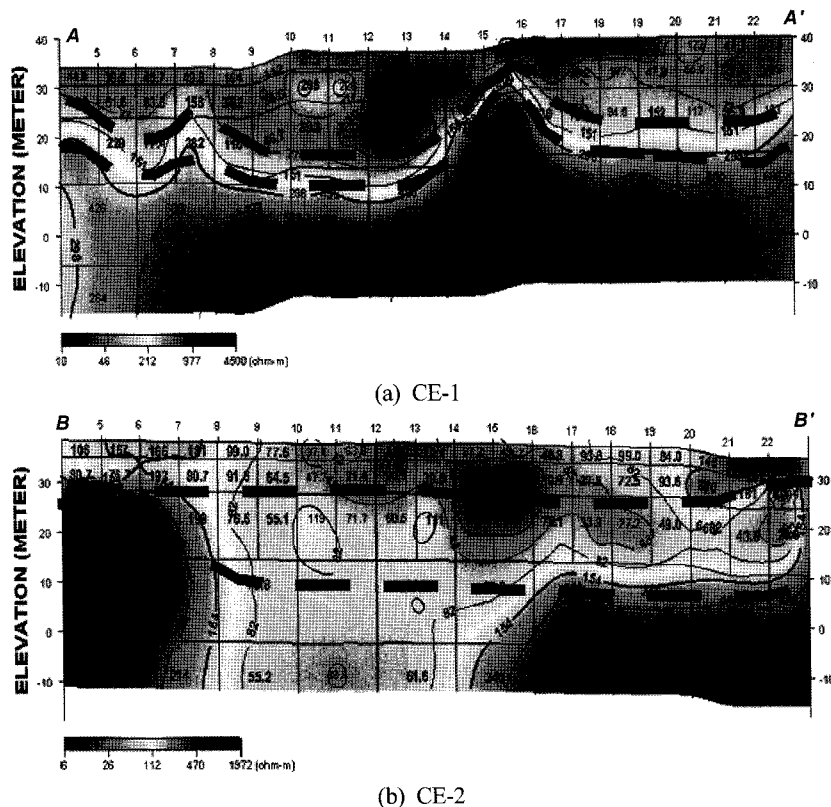
Fig. 3은 본 연구에서 적용한 탐사측선을 보여준다. 천안 매립지는 두 개의 측선을 그리고 원주매립지는 4개의 측선을 적용하였으며, 총연장 길이는 1,095 m이었다(Table 2). 탐사기는 OYO사의 Mc-ohm profiler를 이용하였고 수평탐사로 5~10 m 등간격으로 전극을 설치하였다. 이때 전류 주입량은 20~50 mA였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 천안 매립지

천안 매립지 지역의 탐사 결과는 Fig. 4와 같다. CE-1 측선은 3개 층으로 나눌 수 있으며 1층은 평균 저항값이 150 ohm-m 이하의 값을 갖는 풍화대로 간주된다(Table 3). 또한 탐사측점 10번에서 16번이 매립지에 해당하는 지점으로

13번 지점 하부로 저 비저항대가 존재하는 것으로 나타나는데, 이는 매립지내 존재하는 침출수로 추정된다. 또한 16번부터 19번까지 지표근처의 저 비저항대는 일반적인 지하수 존재를 나타내며 이런 지하수의 존재는 지형구배나 수리 구배의 영향으로 매립지내 침출수 생성의 기원이 될 것으로 사료된다. 2층은 평균 저항값이 150~1,000 ohm-m에 해당하는 층으로 이 층을 기준으로 지하수의 연직방향 이동이 제한되며 수평방향의 지하수 흐름의 일어날 것으로 사료된다. 또한 매립지내의 침출수가 10번, 12번에 하부 약 4 m에 존재하는 매립된 쓰레기의 영향으로 형성된 중 비저항대로 인한 지형구배로 지하수의 흐름에 장애가 생겨 12번~14번 하부에 정류되어 있는 형태를 볼 수 있다. 이로 인해 기존 양수시험에서 시간경과에 따른 수위강하가 쉽게 일어나지 않는 것을 볼 수 있다.<sup>23)</sup>



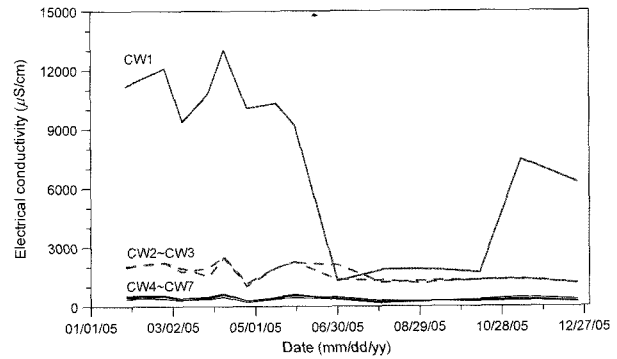
**Fig. 4.** Distribution of electrical resistivity along the lines (a) CE-1 and (b) CE-2 in Cheonan.

**Table 3.** Results of geophysical survey in the Cheonan landfill

Line number	CE-1	CE-2
Line length (m)	250	250
Mean resistivity (ohm-m)	Layer 1	< 150
	Layer 2	150 ~ 1,000
	Layer 3	> 1,000
Mean depth (G.L., m)	Layer 1	13.2
	Layer 2	4.3
	Layer 3	28.5

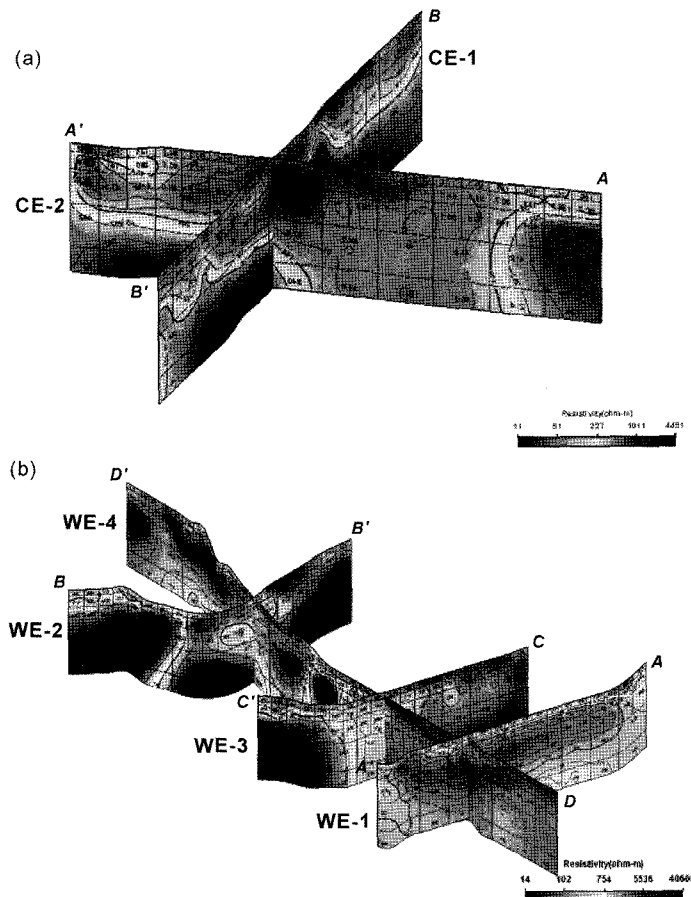
또한 Fig. 5에서 보듯이 매립지내 CW2, CW3 두 개의 관정에서 측정된 지하수의 전기전도도(EC)값이 CW4~CW7보다 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다. 이는 위의 내용을 뒷받침 해주는 결과로서 지형구배에 의한 지하수의 흐름이 있다면 CW4, CW5도 EC값이 침출수에 의해 일반 지하수보다 높은 값을 나타낼 수 있는데, CW3 이후의 관정들은 배경값에 해당하는 값으로 침출수의 영향이 적은 것으로 사료된다.<sup>16)</sup> 이는 전기탐사 결과에서 나온 지하수 흐름의 정체된 현상과 부합한다. 3층은 평균 저항값이 1,000 ohm-m 이상인 층으로 기반암에 해당한다. 3층의 특이한 점은 15~16번 지점에서 지표로부터 10 m 하부에 존재하는 양상을 보인다.

CE-2 축선은 측점 9번부터 20번까지가 매립지에 해당하며 측점 15번과 16번 하부로 4~5 m 지점에 저 비저항대가 나



**Fig. 5.** Electrical conductivities of groundwaters at selected monitoring wells in the Cheonan landfill(see well locations in Fig. 3(a)).

타고 있다. 이는 비저항값이 매우 낮은 것으로 보아 침출수로 사료되며 이 침출수 위치 지점이 CE-1 축선의 침출수 존재 위치와 일치함을 3D Fence 다이어그램으로 확인할 수 있으며(Fig. 6(a)), 여기서도 지하수의 흐름이 지형구배에 의해 흐르다가 측점 15~16 지점에서 정류상태로 머물고 있는 것으로 사료된다. 비저항값에 의한 각층 평균심도는 CE-1 축선은 제 1층이 13.2 m, 제 2층이 4.3 m, 제3층은 28.5 m 이상이고, CE-2 축선은 제 1층이 7.5 m, 제 2층이 21.5 m, 제 3층은 22.0 m 이상으로 추정되었다.



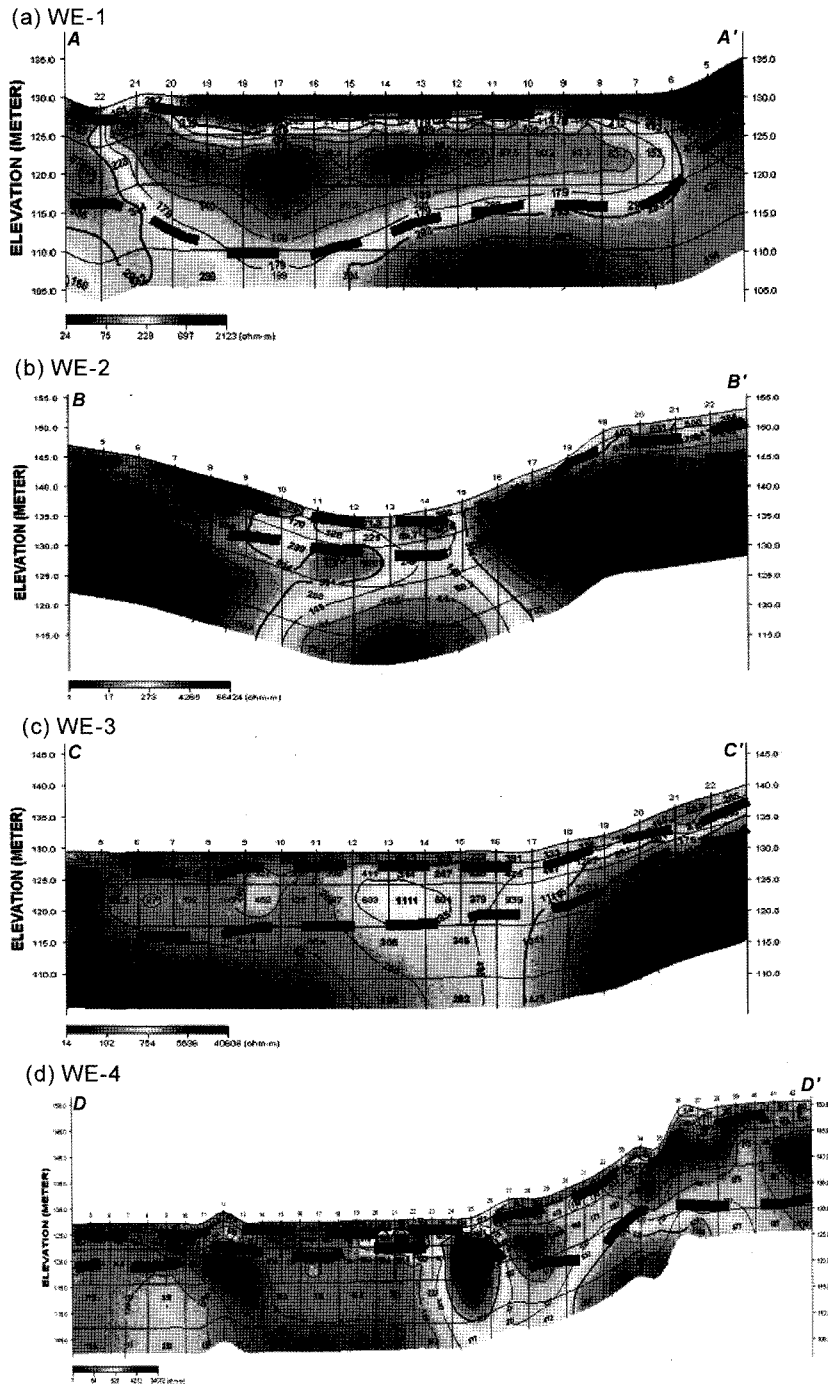
**Fig. 6.** Three-dimensional diagrams of electrical resistivities in (a) Cheonan and (b) Wonju.

**Table 4.** Results of geophysical survey in the Wonju landfill

Line number	WE-1	WE-2	WE-3	WE-4	
Line length (m)	250	250	250	220	
Mean resistivity (ohm-m)	Layer 1	160~2,100	<2,500	<100	<100
	Layer 2	<300	2500~30,000	100~4,000	100~3,000
	Layer 3	160~1,100	30,000~66,000	>4,000	>3,000
Mean depth (G.L., m)	Layer 1	4.1	2.5	4.5	3.4
	Layer 2	11.1	5.0	9.5	6.4
	Layer 3	13.3	21.5	14.5	17.2

**3.2. 원주 매립지**

원주 매립지 지역의 전기탐사 결과는 Table 4와 Fig. 6(b)와 같다. 원주 매립지 주변은 기존에 저수지로 쓰였던 곳으로 저수지 제방과 여수로가 현재까지도 남아 있으며, WE-1 측선은 저수지 제방 위에 위치하고 있어 역산 단면에서도 측점 6~21번까지는 지표로부터 하부로 4 m까지는 고 비저항층이 존재하는 것으로 나타난다(Fig. 7(a)). 또한 여수로에 해당하는 21~23번까지는 상대적으로 저 비저항이 나타난다. 또한 측점 11~21번 하부로 7~8 m 지점에는 지하수로



**Fig. 7.** Distribution of electrical resistivity along the lines (a) WE-1, (b) WE-2, (c) WE-3 and (d) WE-4 in Wonju.

사료되는 저 비저항층이 존재하는 것으로 나타나며 측선 좌우측으로 나타나는 고 비저항은 지형이 계곡인 곳에서 탐사를 수행한 결과이다. 주된 지하수의 흐름은 17번 측점 하부를 중심으로 흘러가는 것으로 추정된다. WE-2측선은 매립지 경계벽으로부터 5 m 거리를 두고 측선을 설치하였으며, 지형상 계곡부에 해당하므로 측점 11~15번을 제외하고는 고 비저항대를 이루고 있다(Fig. 7(b)). 또한 측점 11~15번 지역은 매립지 침출수를 관리하기 위한 침전 처리시설 배수관이 놓여 있고, 전석이 주변에 산재해 있어 역산단면에 고 비저항대의 분포가 많은 것으로 나타났다.

WE-3 측선은 기존 저수지 중앙부를 가로지르도록 측선 배열을 하였으며, 측점 4~12번까지는 과거에 저수지였다는 것을 감안한다면 지표부근이 비교적 비저항이 낮게 측정되었다(Fig. 7(c)). 또한 측선 16번부터는 산에 해당하므로 지표보다 높은 비저항치가 측정되었다. 지하수의 흐름은 역산단면에서 왼편으로 비저항대가 분포하는 것으로 보아 주된 지하수의 흐름이 왼편으로 치우쳐 흐른다는 것을 보여준다. 이런 저 비저항대가 왼편에 많이 분포하는 이유 중 하나는 WE-3 시작점이 지형상 계곡부에서 시작되므로 계곡에서 발원한 지하수의 흐름의 영향으로도 판단할 수 있다. 실제 현장에서 시작점 부근이 다른 곳보다 습한 환경임을 관찰할 수 있었다.

WE-4 측선은 매립지 옹벽을 가로지르는 측선이며 각 층의 평균 저항값은 1층이 100 ohm-m 이하이며, 2층은 100~3,000 ohm-m, 3층은 3,000 ohm-m 이상의 값을 나타낸다(Fig. 7(d)). 측점 11~13번 부근은 WE-1 측선과 교차하는 부분으로 저수지 제방에 해당하는 곳인데 WE-1 측선에서 본 것과 같이 제방으로부터 7~8 m 하부에 지하수 흐름이 관측되고 있으며 또한 측점 14~21번 하부에서 저 비저항대가 존재하는 것으로 나타나는데 이는 WE-3 측선의 시작점 부근의 하부에서의 저 비저항대 존재와 일치하는 것으로 나타났다(Fig. 6(b) 참조). 또한 측점 20부터 35번 부근에는 지표에 전석이 많이 산재해 있고 침출수 처리시설로 인해 전극의 위치 선정이 어려웠으며, 전극의 접지 불량으로 지표부근에는 고 비저항대가 하부심도에서는 저 비저항대가 나타났다. 또한 측점 27~29번 사이 하부에 존재하는 저 비저항대와 측점 34번 이후로의 지반에서 저 비저항대가 존재한다. 이는 측점 34번이 매립지와 주변과의 경계인 옹벽에 위치하므로 매립지로부터 발원한 침출수가 역산단면에 나타난 저 비저항대의 위치를 따라 흐르는 것으로 추정된다.

비저항값에 의한 각층 평균심도는 WE-1 측선은 제 1층이 4.1 m, 제 2층이 11.1 m, 제 3층은 13.3 m 이상, WE-2 측선은 제 1층이 2.5 m, 제 2층이 5.0 m, 제 3층은 21.5 m 이상, WE-3 측선은 제 1층이 4.5 m, 제 2층이 9.5 m, 제 3층이 14.5 m 이상, WE-4 측선은 제 1층이 3.4 m, 제 2층이 6.4 m, 제 3층은 17.2 m 이상으로 추정되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 충남 천안시 불량매립지와 강원도 원주시

불량매립지 일대에 대해 지구물리 탐사 중 전기비저항 탐사를 실시하였으며, 수집된 자료를 이용하여 2차원과 3차원 비저항 역산 모델링을 수행하여 매립지 주변 지질구조와 침출수 오염영역, 침출수 유동을 평가하였다. 천안 매립지와 원주 매립지는 매립지가 갖는 기능인 매립폐기물의 저류, 차수, 처리기능을 갖고 있지 않으며, 일일복토, 중간복토 및 최종복토를 적절히 하지 않은 불량매립지이다. 천안 직산매립지의 경우 매립지가 논 상부에 위치하고 있으며 매립지로부터 침출수로 인한 농지 오염의 가능성이 높아 물리탐사 측선 배열을 매립지를 기준으로 총 2개 측선에 대해 서로 교차하는 측선배열을 수행하였다. 원주 매립지의 경우 매립지와 주변 논밭의 경계가 매립지 옹벽으로 나뉘며, 매립지 경계로부터 침출수 침전시설이 위치하고 있으나 현재는 방치된 상태로 침출수 누출로 인한 농지 오염의 가능성을 감지하여 총 4개 측선에 대해 3개 측선은 매립지 경계로부터 일정거리를 두고 평행하게 배열을 하였으며, 나머지 한 개 측선은 이 3개 측선을 교차하도록 배열하였다.

2차원 비저항 역산모델을 수행한 결과 천안매립지의 경우 매립지 내부에 침출수의 존재를 파악할 수 있었으며, 특이한 점은 침출수의 유동이 매립된 쓰레기의 영향으로 지형구배에 의해 계속 이동하지 않고 매립지내에 정체된 형태로 존재하는 것으로 관찰되었다. 이는 지하수 관측정 정기 수질분석시 측정된 지하수의 전기전도도 값의 분포에서도 매립지 내부에서의 EC 값과 주변 지하수의 EC 값이 큰 차이를 보이는 것에서도 확인할 수 있다. 원주 매립지의 경우는 매립지로부터 유래된 침출수가 매립지 경계 부근 폐기된 침출수 처리시설 밑으로 흐름을 관찰할 수 있었고, 매립지 주변 기존 저수지였던 곳에서는 매립지 주변에 위치한 계곡의 영향으로 계곡에서 발원한 지하수에 의한 흐름과 과거 저수지의 영향으로 지표 근처에서 낮은 비저항대를 형성하는 것도 확인할 수 있었다. 또한 저수지 제방에서는 하부로 약 7~8 m 심도에서 지하수가 논으로 유입되는 것으로 추정할 수 있었다.

#### 사 사

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)”으로 지원받은 과제입니다. 좋은 수정의견을 주신 세 분의 심사위원님께서도 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참고문헌

1. 한정상, 환경 수리지질학, 신우사(1988).
2. U.S. EPA, Subsurface Characterization and Monitoring Techniques: A Desk Reference Guide, EPA/625/R-93/003a, Washington DC(1993).
3. 이철효, 박삼규, “매립지 오염평가를 위한 물리탐사의 적용사례,” 환경오염지역 평가를 위한 물리탐사 기술, 한국 지구물리탐사학회, pp. 104~121(2001).



4. 이재영, 김학수, “불량쓰레기 매립지에 대한 물리탐사 적용사례 연구(I),” 한국토양환경학회지, **1**(1), 29~38(1996).
5. Carpenter, P. J., Calkin, S. F., and Kaufmann, R. S., “Assessing a fractured landfill cover using electrical resistivity and seismic refraction techniques,” *Geophysics*, **56**, 1896~1904(1991).
6. Barker, R. D., “Improving the quality of resistivity sound ing data in landfill studies,” *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 2, Ward, S. H. (Ed.), Soc. Expl. Geophys., pp. 245~252(1990).
7. Buselli, G., Barber, C., Davis, G. B., and Salama, R. B., “Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods,” *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 2, Ward, S. H. (Ed.), Soc. Expl. Geophys., pp. 27~39(1990).
8. Van, G. P., Park, S. K., and Hamilton, P., “Monitoring leaks from storage ponds using resistivity methods,” *Geophysics*, **56**(8), 1267~1270(1991).
9. Roberts, R. L., Hinze, W. I., and Leap, D. I., “Data enhancement procedure on magnetic data from landfill investigation,” *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 2, Ward, S. H. (Ed.), Soc. Expl. Geophys., pp. 261~266(1990).
10. 권병두, 김차섭, 정호준, 오석훈, “난지도 매립지 및 그 주변의 지질환경연구,” *자원환경지질*, **28**, 469~480(1995).
11. 김형수, 이기화, 한정상, 1995, “난지도 일대의 침출수 양태조사를 위한 전기비저항 탐사,” *지질공학*, **5**, 259~276(1995).
12. 이철효, 난지도매립지 침출수에 의한 지하수오염특성 분석, 석사학위논문, 서울대학교 환경대학원(1994).
13. LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., and Evans, J. C., *Hazardous Waste Management*, McGraw-Hill, New York (1994).
14. Ward, S. H., “Resistivity and induced polarization methods,” *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 2, Ward, S. H. (Ed.), Soc. Expl. Geophys., pp. 147~189(1990).
15. Whitely, R. J. and Jewell, C., “Geophysical technique in contaminated lands assessment - Do they deliver?,” *Exploration Geophysics*, **23**, 557~565(1992).
16. Lee, J. Y., Cheon, J. Y., Kwon, H. P., Yoon, H. S., Lee, S. S., Kim, J. H., Park, J. G., and Kim, C., “Comparison of hydrogeologic and hydrochemical conditions between two uncontrolled landfills,” *Water International*(submitted).
17. Lee, J. Y. and Lee, K. K., “Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system,” *J. Hydrology*, **229**, 190~201(2000).
18. 이진용, 천정용, 권형표, 윤희성, 이성순, 김종호, 박정구, 김창균, “불량매립지의 침출수 누출에 의한 지하수 오염 및 자연저감 평가,” *지하수토양 워크샵: 지하수토양 환경분야의 정책동향 및 연구방향*, 고려대학교, pp. 123~134(2005).
19. Mukhtar, A. L., Sulaiman, W. N., Ibrahim, S., Latif, P. A., and Hanafi, M. M., “Detection of groundwater pollution using resistivity imaging at Seri Petaling Landfill, Malaysia,” *J. Environ. Hydrology*, **8**, 1~7(2000).
20. 손호웅, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, *지반환경물리탐사*, 시그마프레스(1999).
21. deGroot-Hedlin, C. and Constable, S. C., “Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data,” *Geophysics*, **55**, 1613~1624(1990).
22. 김정호, (주)희송, DIPRO(프로그램 등록번호 96-01-12-0102), 대한민국, 한국지질자원연구원(1996).
23. 인하대학교, 불량매립지의 분자생태학적 장기모니터링 기술개발 연차보고서, 한국기술진흥원(2006).