

소형루프 전자탐사를 이용한 폐기물 오염범위 탐지

송성호^{1*} · 엄재연¹ · 조인기² · 정차연³

¹한국농어촌공사 농어촌연구원
²강원대학교 지구물리학과,
³한국농어촌공사 경남지역본부

Investigation of Contamination Area from Landfill Using the Small-loop Electromagnetic Survey

Sung-Ho Song^{1*}, Jae-Yeon Um¹, In-Ky Cho², and Cha-Youn Jung³

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

²Department of Geophysics, Kangwon National University

³Kyongnam Provincial Office, Korea Rural Community Corporation

요 약: 소형루프 전자탐사는 폐기물 매립지로부터 발생하는 오염원의 범위 및 경로를 추적하기 위한 개략적인 조사에 효과적인 방법이다. 본 연구에서는 매립물 분포 범위 및 침출수 발생 범위 파악을 위하여 다중주파수를 이용한 소형루프 전자탐사를 수행하였으며, 탐사 결과를 24곳의 트렌치 조사와 12개소의 시추조사에서 확인된 오염범위와 비교한 결과 매립지의 규모 및 침출수 범위 추정이 가능한 것으로 밝혀졌다. 그러나 본 매립지가 해안지역 삼각주에 위치함에 따라 약 10 m 이하 심도에서 나타나는 10 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항의 원인을 규명하기 위해서는, 10 m 이하 심도까지 시추조사를 병행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

주요어: 소형루프 전자탐사, 매립지, 침출수, 전기비저항

Abstract: The small-loop electromagnetic (EM) survey is an effective method to delineate contamination areas and pathways of contaminant plumes from landfill. A multi-frequency small-loop EM survey was applied to find them at landfill area, located in delta region, and checked the results with in-situ surveys including 24 trench excavations and 12 drilling boreholes. The correlation between these two results indicates this survey would be suitable to investigate the contamination area. However, it would be difficult to analyze low resistivity less than 10 ohm-m below 10 m depth in delta area without drilling survey because of a limitation to expand the penetration depth lower than 10 m depth due to the separation of 1.66 m between the two coils of GEM-2.

Keywords: small-loop electromagnetic survey, landfill, leachate, resistivity

서 론

지반환경문제 중 폐기물로부터 발생하는 환경오염 물질이 지하수면 상부의 천부 지하환경을 통해 유출되는 경우에는 오염 범위 및 오염 경로를 예측하기 어렵다. 이러한 오염 범위 및 경로를 예측하기 위해서는 시추 또는 굴착을 통한 직접적인 조사가 필요하지만, 조사지역이 넓은 경우에는 비용이나 시간적인 면에서 이를 적용하기 어려운 단점이 있다. 따라서 오

염원 및 오염범위를 효과적으로 파악하기 위해서는 비파괴적인 조사 방법이 필수적이다. 이러한 문제점을 해결하면서 폐기물 매립지에 대한 공간적인 범위 및 매립지로부터 발생하는 침출수의 오염 영역을 효과적으로 탐지하기 위하여, 전기 및 전자탐사 등 다양한 지구물리학적 접근 방식이 최근 시도되고 있다.

개략적인 오염 범위 및 경로 추적을 위해 광범위한 지역에 효과적으로 적용되는 전자탐사 방법 중 소형루프 전자탐사법은 가탐심도가 10 m 내외의 천부로 한정되는 것에도 불구하고 조사 방법이 비교적 쉽고 간편해 최근 쓰임새가 증가하는 물리탐사 기법이다(송윤호 등, 2001). 그러나 탐사 방법에 간단한 장점이 있는 반면 해석이론이 복잡해, 2000년대 초반까지는 주로 단순한 겉보기 전도도 분포 제시 등의 정성적 단계

2011년 5월 3일 접수; 2011년 5월 23일 수정; 2011년 5월 26일 채택
*Corresponding author

E-mail: shsong84@hanmail.net

Address: Rural Research Institute, KRC, 1031-7 Sa-dong, Ansan
425-170, Korea

에 머물러 적용성이 제한적이었다. 그러나 최근 토목이나 환경 분야에서의 수요증가로 인해 보다 정량적 해석의 필요성이 증가함에 따라, 이에 대한 다양한 연구와 이를 통한 현장적용이 시도되고 있다(설순지 등, 2002; 송성호 등, 2003; 조인기와 임진택, 2003). 이 중 다중주파수 소형루프 전자탐사법은 신속하게 지반 하부의 전기전도도(전기비저항의 역수)의 공간적 분포를 파악할 수 있어, 지표 하부 약 10 m 이내의 토양층에 대한 전도성 침출수의 분포 범위를 규명하는데 현장 적용성이 높은 것으로 알려져 있다(송윤호와 정승환, 2002; 송성호 등, 2003; 김기주 등, 2010). 이 연구에서는 군부대 내부 폐기물매립지를 대상으로 매립물의 분포범위 및 이로부터 발생할 수 있는 침출수 오염범위를 효율적으로 규명하기 위하여 다중주파수를 이용한 소형루프 전자탐사를 수행하였다. 탐사 결과는 트렌치 조사 및 시추조사 결과에서 나타난 오염 범위와 상관시켜 본 탐사의 현장 적용성을 검증하였다.

연구지역 현황

본 연구지역은 OO강 하류부 삼각주 지역에 위치하며, 시추조사 결과 층서는 하부로 갈수록 모래층, 점성토층, 모래층, 사력층으로 구분되며, 사력층 하부에는 자갈이 혼재된 전석층과 기반암으로 구성되어 있다. 연구지역 내의 매립지는 1980년대 중반까지 생활폐기물 및 건축폐기물을 매립하여 조성된 군부

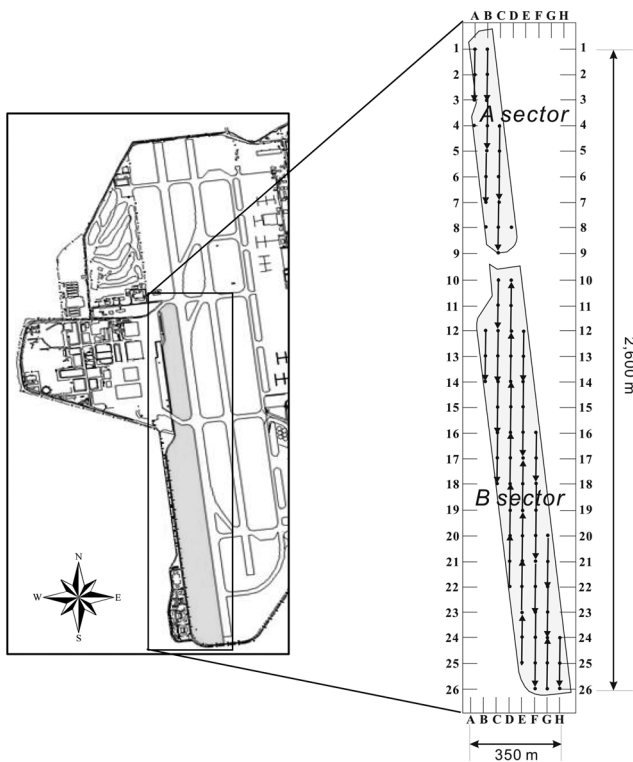


Fig. 1. Map of the study area with electromagnetic survey lines with arrow for direction and points for each line.

대 시설로, 전체적으로 매우 평탄한 지역에 초지와 도로가 위치하고 있다. Fig. 1은 북북서-남남동 방향의 매립지 예상 분포지역(A와 B 구역)으로, 본 구역 밖의 다른 부분은 시멘트지표가 피복된 상태이다. 특히 시멘트 피복 부분 하부는 도로의 강도 증진을 목적으로 철근 등을 사용한 상태로 전자탐사의 적용이 불가능하였다. 대상 지역은 탐사가 가능한 A와 B구역 전체를 동서방향의 50 m, 남북방향의 100 m 간격으로 세분하였다. 또한 매립지의 공간적인 위치 및 위치별 매립물의 성상 등 매립당시의 자료 확보가 불가능함에 따라 트렌치 및 시추조사 자료와의 상관성을 검토하기 위하여, 탐사 축선을 격자망으로 배치하였다.

소형루프 전자탐사 방법

소형루프 전자탐사 원리

지표에서 수행하는 전자탐사는 탐사 위치에서 전기장이나 자기장을 측정하여 지하 매질 이상체의 위치, 형태 및 전기 전도도에 대한 정보를 알아내는 탐사법으로, 송신원, 수신원의 종류와 배열 등에 따라 매우 다양한 기법이 개발되어 사용되고 있다. 전자탐사의 원리는 교류 전류를 송신코일에 흘려주면 암페어의 법칙에 의해 1차장이 발생되며, 1차장이 지하 매질을 통과하면서 이상체 내부에 발생하는 유도전류에 의해 2차장이 발생된다(Fig. 2). 전자탐사는 이러한 1차장과 2차장의 합인 합성장 또는 합성장에서 1차장의 영향을 배제한 2차장의 크기 및 위상으로부터 이상체의 위치, 형태 및 전기전도도 등의 지반 하부의 정보를 얻는 탐사법이다. 따라서 전자탐사는 전도성 이상체의 탐지에 효과적인 장점이 있지만, 측정하고자 하는 2차장의 크기가 일반적으로 매우 작아 전자기적 잡음이 강한 지역에서는 적용이 어렵다는 단점이 있다.

소형루프 전자탐사법은 송수신 간격을 고정한 후 주파수를 변화시켜 탐사하는 주파수 영역 수직탐사(frequency sounding)와 송수신 간격을 변화시키는 기하학적 수직탐사(geometry sounding)로 구분되는데, 본 연구에서는 송신원 간격을 고정시킨 소형루프를 사용하는 주파수 영역 수직탐사 방법을 이용하

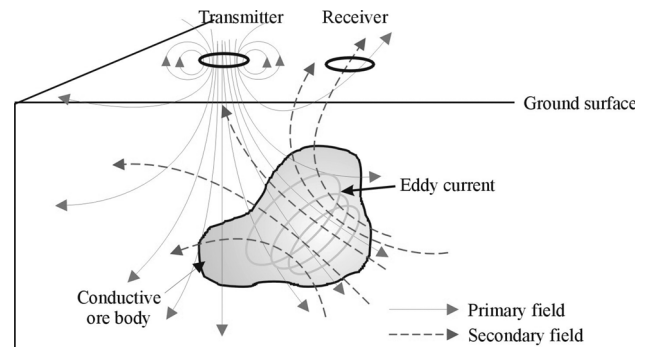


Fig. 2. Schematic diagram of induced electromagnetic survey (Grant and West, 1965).

였다. 본 연구에 사용된 장비인 Geophex사의 GEM-2의 경우 송수신 간격은 1.66 m로 고정되어 있으며, 330~20,100 Hz 사이의 광대역 주파수를 사용하여 지하 매질에 대한 정보를 얻을 수 있다(Fig. 3). GEM-2를 이용한 탐사는 송수신 간격이 일정하고 광대역 주파수를 사용하므로 상대적으로 정확하고 분해능이 높은 영상을 제공하지만, 송수신기 사이의 거리가 짧기 때문에 일반적인 수평루프 탐사법에 비해 가탐침도가 낮은 단점이 있다. 그러나 이러한 제약에도 불구하고 탐사 방법이 비교적 신속, 간편하기 때문에 최근 지반 조사나 환경 토목 분야에서 천부 탐사법으로 활용이 증가하고 있다(설순지 등, 2002; 송성호 등, 2003; Song, 2006; 조인기 등, 2007; 김기주 등, 2010).

소형루프 전자탐사 자료처리 및 역산

소형루프 전자탐사는 탐사방법이 편리함에도 불구하고 자료 해석 방법이 복잡하기 때문에, 개략 탐사를 수행하는 경우에는 각 주파수별로 획득된 2차 자기장을 겹보기 전도도(apparent conductivity)로 변환하여 측선 하부의 전기비저항 분포를 정성적으로 해석하는 경우가 많다(Song, 2006). 그러나 지반 하부의 정보를 정량적으로 파악하기 위해서는 역산에 의한 심도별 비저항의 분포를 파악하는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 획득한 원시자료 중 동상성분과 이상성분을 각 주파수별로 도식한 후 상대적으로 높은 5개 주파수 대역(9,750 Hz, 13,650 Hz, 17,490 Hz, 22,500 Hz 및 25,500 Hz)을 선택하여 해석에 이용하였다. 이때 사전 자료처리로 각 측정점에서 얻어진 자료를 각 주파수별로 분류하여 프로파일을 작성한 후 잡음을 제거하는 평활화 필터를 적용하였다. 또한 역산 수행 이전 단계에서 공간 필터링과 내삽을 통하여 4 m 간격으로 자료를 재선택(resampling)하는 과정을 거쳤는데, 이는 샘플링 간격이 증가할수록 프로파일이 부드러운 반면 간격이 너무 커지는 경우 공간적인 알리아싱(aliasing)에 의한 수평적인 분해능이 낮아지는 단점을 고려하여 최적의 간격을 선택한 결과이다. 마지막으로 자료처리 과정을 거친 후 각 측정별로 1

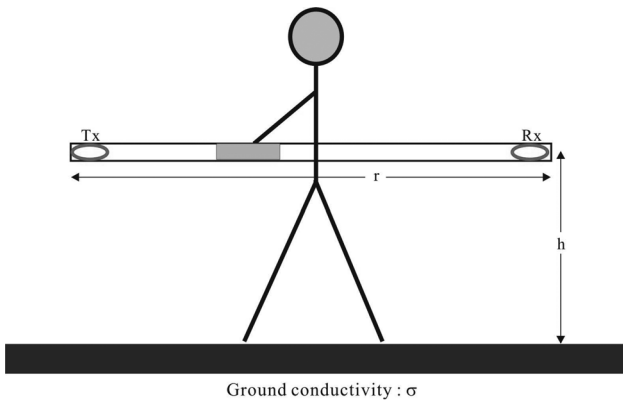


Fig. 3. Schematic view of electromagnetic survey using GEM-2.

차원 역산을 수행하였으며, 이때 평활화 제한법(smoothness constraint) (Constable et al., 1987)과 ACB (Active constraint balancing method)법 (Yi et al., 2003)을 이용한 역산기법을 적용하였다.

결과 및 토의

매립된 폐기물의 심도, 분포 범위, 침출수에 의한 주변 환경 영향 가능성, 오염물질의 이동 가능한 경로 파악, 지하수 및 침출수 시료 채취 등 환경수리지질학적 특성 파악을 위한 소형 루프 전자탐사의 적용성 파악을 위하여, 연구지역의 매립지 및 주변 지역에 대해 트렌치 굴착 및 시추조사 수행 결과를 비교하였다.

트렌치 및 시추조사 결과

트렌치 굴착은 Fig. 1에서 제시된 A와 B 구역에 대해 총 26

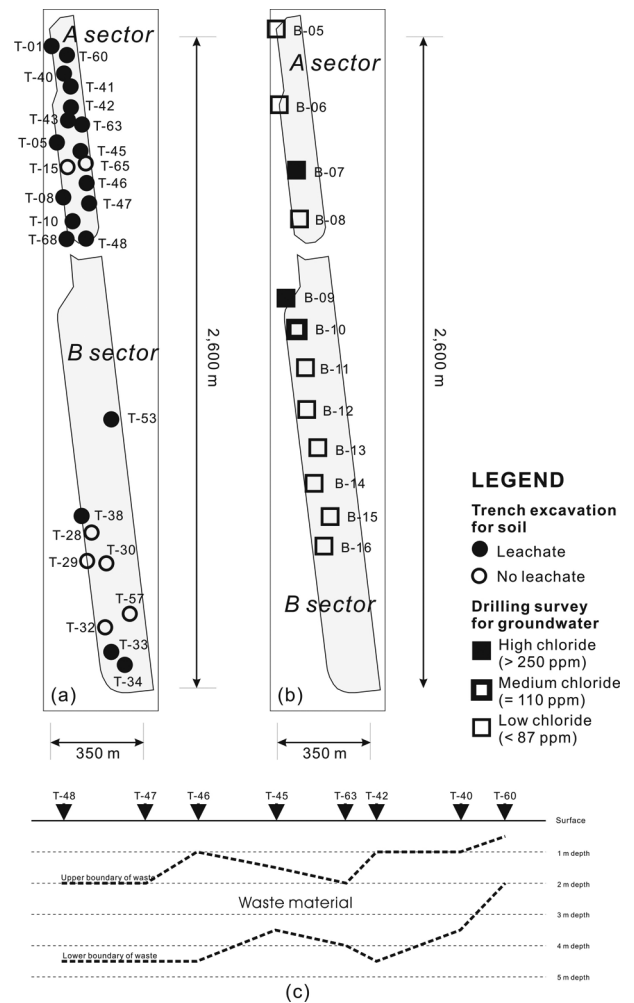


Fig. 4. Results of trench excavations for soil (a) and drilling survey for groundwater (b) to investigate contamination areas with cross section of waste material (c) for A sector.

개소에 대해 수행되었다. 트렌치 굴착 결과, A 구역에서는 17 개소 중 15개소에서 주로 산업폐기물이 매립된 상태에서 침출수가 확인되었으며, B 구역의 경우에는 9개소의 트렌치 중 4개소에서 생활폐기물 및 산업폐기물이 나타났다 (Table 1)(Fig. 4(a), (c)). 폐기물의 물리적 조성은 상대적으로 비중이 큰 토사류가 84.2% 이상으로 분석되었으며, 나머지는 금속류, 생분해성 물질인 목초류와 섬유류 및 난분해성인 비닐과 플라스틱류로 구성되어 있다. A 구역의 경우 2개소인 T-15와 T-65 지점의 경우에 각각 매립물이 나타나지만 침출수가 없는 지점과 매립물과 침출수 모두 없는 지점으로 밝혀졌다. B 구역의 경우에는 T-29와 T-32 지점에서 폐기물 매립이 확인된 상태에서 침출수가 없는 것으로 나타났으며, T-28, T-30 및 T-57 지점의 경우에는 매립물과 침출수 모두 없는 지점으로 밝혀졌다. 따라서 전체적으로 B 구역이 A 구역에 비해 상대적으로 폐기물의 양과 침출수의 누출이 적은 것으로 나타났다.

시추조사는 A와 B 구역을 전체적으로 포함할 수 있도록 100~150 m 간격으로 일직선 상으로 배열하였으며, 각 시추공의 깊이는 8 m로 설치하였다(Table 2)(Fig. 4(b)). 시추조사 결과 표토는 지표 하부 2.1~3.1 m 심도까지 분포하였으며, 실트질 모래로 구성된 퇴적층이 표토층 하부에 분포하고 있는 것으로 나타났다. 지하수위는 지표면 하부 0.9~1.5 m 깊이로 나타났는데, 매립지로부터의 침출수로 인한 염분 상승을 지시하는 염소이온 농도는 B-07과 B-09지점에서 각각 270.0 ppm과 786.3 ppm으로 생활용수 기준인 250 ppm에 비해 매우 높

은 것으로 나타났다. 또한 B-09에 인접한 B-10의 경우에는 109.8 ppm으로 다른 지역에 비해 상대적으로 높으며, A 구역과 B 구역 경계부로부터 멀어짐에 따라 염소이온 농도가 급격하게 낮아지는 경향이 나타났다. 그러나 트렌치 조사 결과 침출수가 발생하는 지역에 인접한 B-08 관측정의 지하수에 대한 염소이온 농도는 8.8 ppm으로 주변 트렌치에서 관측된 침출수의 영향이 없는 것으로 나타났는데, 이는 관측정의 위치가 A 구역 매립지의 서측 경계부에 설치되어 침출수의 직접적인 영향이 없었기 때문으로 판단된다.

2차원 단면 분석(profiling) 결과

연구지역인 폐기물 매립지역은 초지지역으로 평탄한 지형을 이루고 있으며, 매질이 주로 사질로 구성되어 있어서 수리지질학적으로 등방체에 가까운 것으로 판단된다. 따라서 소형루프 전자탐사는 Fig. 1에서 제시한 지점들을 연결하여 A와 B 구역 전체를 포함하도록 각 측선을 200~300 m 간격으로 나누어 평균 1 m의 측정 간격으로 수행하였다. 이때 주변 지형표고의 변화가 거의 없기 때문에 모든 방향에 대하여 수평 무한대로 일정하다는 가정을 사용하는 1차원 탐사에 적합한 현장 여건으로 판단된다. 따라서 탐사 자료의 해석을 위해서 각 측정별로 얻어진 탐사 결과를 1차원 역산과정(inversion)을 거쳐 전기전도도를 획득하여 측선방향으로 2차원 단면을 작성하는 방법을 이용하였다(조인기 등, 2007). 자료처리 순서는 5개의 주파수 대역별로 원시자료의 동상 및 이상성분의 주파수별로 그래

Table 1. Summary of trench survey for soil to delineate the leachate

No	Disposal depth (m)	Waste/Leachate	No	Disposal depth (m)	Waste/Leachate	No	Disposal depth (m)	Waste/Leachate
T-01	1.0~3.0	○	T-33	0.5~1.5	○	T-47	2.0~4.5	○
T-05	1.5~2.5	○	T-34	1.0~1.5	○	T-48	2.0~4.5	○
T-08	1.0~3.0	○	T-38	-	○	T-53	-	○
T-10	1.0~3.5	○	T-40	1.0~3.5	○	T-57	-	××
T-15	0.8~2.0	×	T-41	-	○	T-60	0.5~2.0	○
T-28	-	××	T-42	1.0~4.5	○	T-63	0.2~4.0	○
T-29	0.5~1.0	×	T-43	1.0~4.0	○	T-65	-	××
T-30	-	××	T-45	1.5~3.5	○	T-68	1.0~4.0	○
T-32	0.7~2.0	×	T-46	1.0~4.5	○			

○: Waste disposal with leachate
 ×: Waste disposal without leachate
 ××: No waste disposal and leachate

Table 2. Summary of well survey for groundwater to delineate the leachate

No	GW* (m)	Chloride (ppm)	No	GW (m)	Chloride (ppm)	No	GW (m)	Chloride (ppm)
B-05	1.2	38.9	B-09	1.4	786.3	B-13	1.5	49.1
B-06	1.3	6.7	B-10	1.3	109.8	B-14	1.2	5.2
B-07	0.9	270.0	B-11	1.4	25.3	B-15	1.4	16.6
B-08	1.0	8.8	B-12	1.2	87.0	B-16	1.1	6.2

*Groundwater depth from the ground surface

프 작성한 후, 탐사 장비로부터 얻어진 각 주파수별 자료는 잡음의 제거와 평활화를 위한 필터링(Savitzky-Golay smoothing filter)을 수행하였다. 이 후 필터링된 자료에 평활화 제한을 가한 역산기법을 적용하였다.

Fig. 5는 Fig. 1에서 제시한 A 구역과 B 구역 북쪽지역 일부에 대해 남북방향으로 전개한 5개의 측선별 소형루프 전자탐사의 1차원 역산 결과로, 각 측선별로 심도 10 m까지의 깊이에 대해 전기비저항 분포를 영상화한 결과이다. 이때 측선번호는 가로축의 문자와 세로축의 숫자를 조합하여 시점부와 종점부를 표시하였다. 5개 측선의 경우 전체적으로 지하 10 m 지점까지 10 ohm-m 이하의 낮은 비저항이 분포하는 것으로

나타났다. 그러나 가장 남쪽 측선인 C10에서 C12지점까지의 200 m 측선(C10toC12)의 경우 A01부터 C09까지의 4개 측선(A01toA03, B03toB05, B05toB07 및 C07toC09)에 비해 단면 전체적으로 전기비저항이 높은 것으로 나타났으며, 특히 단면 내에서도 남쪽으로 갈수록 전기비저항이 20 ohm-m 이상으로 높아지는 경향이 나타났다. Fig. 6은 B 구역 일부에 대해 남북방향으로 전개한 4개 측선(C12toC14, C14toC16, C16toC18 및 D22toD20)에 대한 1차원 역산 결과로, 전기비저항은 15~25 ohm-m 범위로 A 구역에 비해 전체적으로 높은 것으로 나타났다. A와 B 구역에 대한 이러한 비저항 분포는 트랜치 굴착 및 시추조사 결과로 밝혀진 매립물 및 침출수의 영향

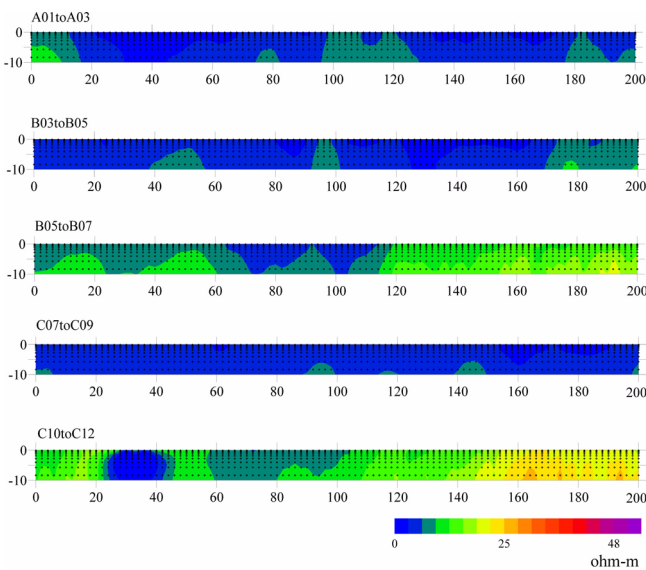


Fig. 5. 1D inversion results of survey lines for A sector and northern part of B sector. Line numbers at upper left for each section are composed of the combination of X-axis characters and Y-axis numbers. Dots on each section indicate inversion depths.

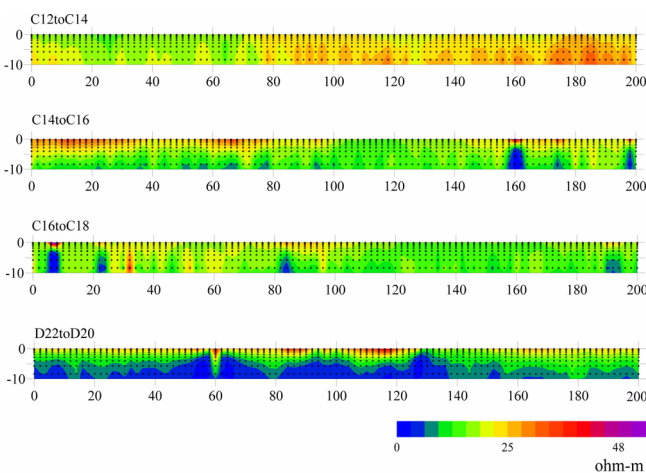
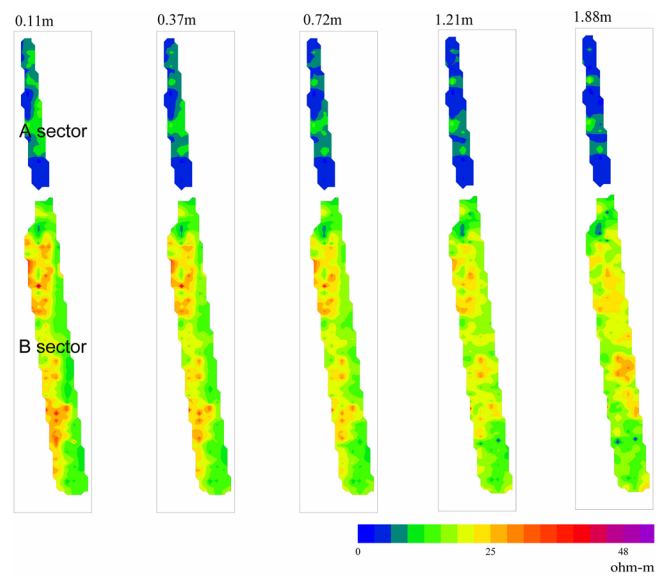
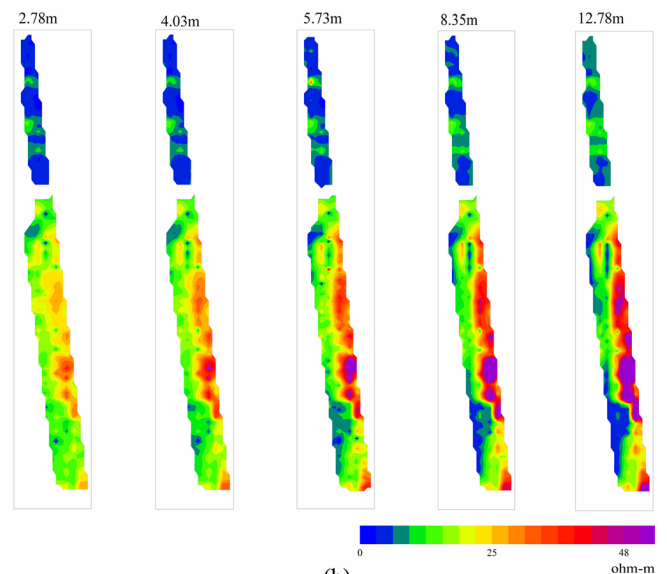


Fig. 6. 1D inversion results of survey lines for B sector. Line numbers at upper left for each section are composed of the combination of X-axis characters and Y-axis numbers. Dots on each section indicate inversion depths.



(a)



(b)

Fig. 7. Calculated resistivity distributions obtained from the small-loop EM survey with the depths for A and B sector as shown in Fig. 1.

이 A 구역에 집중된 결과와 일치된다.

심도별 전기비저항 분포(mapping) 결과

지반하부의 매립지 및 침출수의 공간적인 분포 특성을 파악하기 위해서는 전기비저항의 분포도 작성이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 앞서 분석된 1차원 역산 결과를 이용하여 단순 크리깅(kriging) 방법으로 공간 분석(spatial analysis)을 실시하였다.

Fig. 7은 0.1~12.8 m 범위 내 10개 심도에 대한 심도별 전기비저항 분포도이다. Fig. 6의 전기비저항 2차원 단면도에 나타난 바와 같이 일부 구역의 전기비저항은 약 10 ohm-m 이하의 낮은 값을 보이며, 심도가 증가해도 전기비저항의 변화는 크지 않은 것으로 분석되었다. 또한 조사지역의 남북방향으로 약 0~800 m 구간, 즉 A구역(Fig. 1 참조)은 약 10 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항 분포를 보이는데 반하여, B구역(Fig. 1 참조)은 전반적으로 20 ohm-m 이상의 높은 전기비저항 분포를 보이고 있다. 따라서 전체적인 매립지의 분포는 연구지역의 북쪽지역에 집중되는 것으로 판단된다. 한편 시추조사 결과 매립지의 영향은 약 10 m 이하이다. 따라서 A구역 심부에 나타나는 저비저항대는 침출수의 누출이나 연구지역 하부 해상 퇴적물의 낮은 전기비저항의 영향인 것으로 해석된다. 반면 B구역 심부에 나타나는 저비저항대는 염소 이온 농도의 분석결과를 볼 때, 해상 퇴적물의 영향일 가능성이 큰 것으로 판단된다. 물론 두 지역 모두 이들 심부의 저비저항 이상대는 소형루프 전자탐사법의 가탐심도 한계에 의한 artifact일 가능성도 배제할 수 없으므로 추가적인 시추조사가 필요한 것으로 판단된다.

결 론

군부대 조성을 위하여 매립된 것으로 추정된 지역에 대하여 폐기물의 분포범위 및 침출수의 범위를 효율적으로 규명하기 위하여, 트렌치 및 시추조사 결과와 더불어 다중주파수를 이용한 소형루프 전자탐사를 추가하여 본 탐사법의 현장 적용성을 검증하였다. 본 연구에서는 소형루프 전자탐사로부터 획득된 자료를 이용하여 1차원 역산을 수행한 후, 심도별 전기비저항 분포도를 작성하였다. 이 결과를 트렌치 굴착 및 관측공의 지하수 시료에 대해 분석된 폐기물 및 침출수 발생 지역과 비교한 결과, 폐기물 및 침출수 발생 지점에서 전체적으로 10

ohm-m 이하의 낮은 비저항이 나타났으며, 침출수의 발생이 미약한 구간의 경우 15~25 ohm-m 범위의 상대적으로 높은 비저항이 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서 매립장으로부터 발생하는 침출수의 공간적인 범위를 효과적으로 파악하기 위해서는, 본 연구에서 제시한 소형루프 전자탐사를 이용한 자료 획득 및 역산 방법이 적합한 것으로 밝혀졌다. 그러나 10 m 이하 심도에서 나타나는 10 ohm-m 이하 낮은 비저항대의 경우는 침출수와는 삼각주 하부 해상퇴적물의 영향이 동시에 나타날 수 있다. 따라서 해안지역의 매립장에 대하여 소형루프 전자탐사 자료의 정확한 해석을 위해서는 10 m 이하의 심도까지 시추조사를 병행하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김기주, 안동국, 조인기, 김봉찬, 경규하, 홍재호, 2010, 소형루프 전자탐사법에 의한 간척지 지반 조사, 물리탐사, **13**, 175-180.
- 설순지, 송윤호, 조성준, 손정술, 정승환, 2002, 소형 루프 전자탐사법을 이용한 매설물 탐지 및 지하 전기비저항 영상화, 물리탐사, **5**, 309-315.
- 송성호, 옹환호, 안중기, 김기표, 2003, 제주도 쓰레기매립장 침출수 조사를 위한 전기 및 소형루프 전자탐사의 적용, 물리탐사, **6**, 143-152.
- 송윤호, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사의 감도분석 및 가탐심도 추정, 물리탐사, **5**, 299-308.
- 송윤호, 정승환, 이상규, 김정호, 황세호, 황학수, 이성곤, 조성준, 이명종, 설순지, 박인화, 2001, 지반물리탐사연구: 1999-R-T102-P-01, 산업자원부.
- 조인기, 강미경, 김기주, 2007, 주 대상체 강조법에 의한 소형루프 전자탐사 자료의 역산, 물리탐사, **9**, 299-303.
- 조인기, 임진택, 2003, 주파수 수직 전자탐사 자료의 1차원 역산, 물리탐사, **6**, 180-186.
- Constable, S. C., Parker, R. L., and Constable, C. G., 1987, Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data, *Geophysics*, **52**, 289-300.
- Grant, F. S., and West, G. F., 1965, Interpretation theory in applied geophysics, McGraw-Hill, p.445.
- Song, S. H., 2006, Spatial analysis of small-loop electromagnetic survey data in a seawater intrusion region. *Exploration Geophysics*, **37**, 114-120.
- Yi, M. J., Kim, J. H., and Chung, S. H., 2003, Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, **68**, 931-941.