

소형루프 전자탐사에 의한 논 토양분석

용환호¹⁾ · 송성호¹⁾ · 김진호¹⁾ · 조인기²⁾

Analysis of Soil Properties in a Rice Field Using Small Loop EM Method

Hwan-Ho Yong¹⁾, Sung-Ho Song¹⁾, Jin-Ho Kim¹⁾ and In-Ky Cho²⁾

요 약 : 논 토양의 심도별 물리적 특성 분석을 목적으로 토양시료의 분석에 의한 전기비저항과 소형루프 전자탐사 자료의 1차원 역산에 의한 전기비저항 자료를 비교하였다. 비록 두 결과가 정확히 일치하지는 않았지만, 토양시료분석에서 나타난 저비저항대는 소형루프 전자탐사 결과에서도 저비저항 이상대로 나타났다. 따라서 소형루프 전자탐사법은 염류집적과 같은 토양 특성 파악에 사용 가능할 것으로 생각된다. 향후, 불포화대 토양특성과 전자탐사에 관한 연구가 지속된다면, 소형루프 전자탐사법은 농업용 토지의 염류 분포 파악에 매우 효과적일 것으로 기대된다.

주요어 : 소형루프 전자탐사, 전기비저항, 염류집적

Abstract : To analyze soil properties with depth in rice field, we compared resistivity distributions obtained from soil analysis with one dimensional inversion of small loop electromagnetic (EM) data. Although it didn't show consistency exactly between the two resistivity distributions, low resistivity zones in soil analysis, appeared to agree with low resistivity zones in EM result. Therefore, small loop EM method can be applied to obtain rapidly the soil properties such as salt accumulation in a rice field. If research on soil property and EM responses of unsaturated zone would be conducted consistently, small loop EM method can be used effectively to detect salt accumulated zone in agricultural area.

Keywords : small loop EM method, resistivity, salt accumulation

서 론

최근 토목 현장이나 지하수, 토양환경 분야에 대하여 천부 지하구조 및 상태를 정량적으로 해석할 목적으로 송수신 코일 간의 거리가 짧고, 다중주파수를 사용하는 소형루프 전자탐사법을 활용하는 사례가 증가하고 있다(설순지 등, 2002; 송운호 등, 2001). 이러한 기법은 지하매장물, 쓰레기매립지, 오염원(contaminant plume) 및 UXO(unexploded ordnance)의 위치나 분포범위 등을 파악하기 위한 응용부분에서도 매우 유용한 방법으로 알려져 있다(Won *et al.*, 1996). 그러나, 이러한 시도들은 주로 지하 전도체 등의 매립위치 탐지나 토양 유류오염 범위 추적을 목적으로 한 이상대의 분포만을 파악하는데 이용되었을 뿐, 토양 자체의 특성에 따른 영향을 고려하지 않는 단점이 있다. 따라서 소형루프를 이용한 고해상도 전자탐사가 천부 토양의 전기전도도 등의 특성파악과 관련되는 경우, 농작물 재배에서의 염류집적 등과 같은 토양분석에 유용한 방법으로 판단되며, 최근 정영상 등(2003)은 간척지에 대하여 염류토 관리를 위해 전자탐사법을 적용한 사례가 있다. 토양의 염류집적

을 규명하는 것은 친환경적인 토양 이용에 매우 중요한 요소이다.

이 연구에서는 우리나라 농지의 대부분을 차지하는 논토양에 소형루프 전자탐사법의 적용성을 파악하기 위하여 일차적으로 실증시험 구역을 설정한 후, 총 18개 지점에 3.5 m 깊이의 시추자료로부터 토양단면도를 작성하였으며, 심도별로 채취한 토양시료의 전기전도도를 분석하였다. 또한 동일 구역에서 획득한 소형루프 전자탐사 자료의 1차원 역산을 통하여 심도별 전기전도도 분포를 파악하고, 이를 전기비저항 수직탐사의 1차원 역산 결과 및 토양시료 분석자료와 상호 비교함으로써 소형루프 전자탐사의 적용성을 비교분석 하였다.

토양시료 분석

연구지역은 경기도 이천시 장호원읍으로부터 북서쪽 약 4.5 km 거리에 위치한 곳으로 장호원-이천간 3번 국도 우측에 위치한 풍계리에 속하며, 이 지역의 기반암은 중생대 주라기의 흑운모 화강암으로 침식 윤희과정 상 장년기말에 해당한다. 상

*2003년 11월 4일 접수

1) 농업기반공사 농어촌연구원 지하수연구실

2) 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

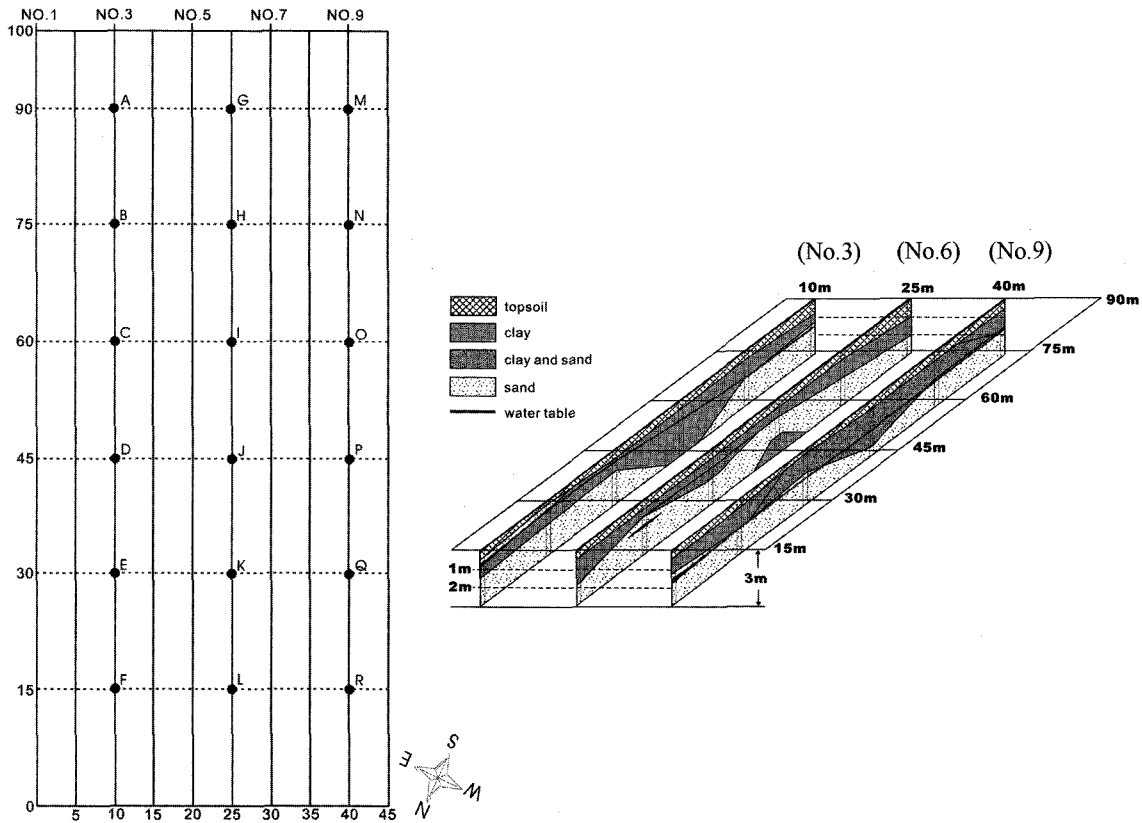


Fig. 1. (a) Soil sampling points and small loop electromagnetic survey lines (A~R: soil sampling point, —: EM survey line) and (b) soil profiles in the study area.

부는 논농사를 위주로 한 농업용 토지 최상부의 표토를 포함하여 점토 및 모래가 부분적으로 분포되어 있는 곳으로 조사면적은 4,500 m² 영역을 선정하였다. Fig. 1(a)는 연구지역에 대한 탐사측선과 토양시료 채취를 위한 시추지점을 표시한 것으로 각 시추공의 깊이는 3.5 m이다. Fig. 1(b)는 이들 시추자료를 이용하여 본 조사지역의 토양분포 상황을 입체적으로 나타낸 것으로 표토, 점토, 사질점토, 모래(sand)의 층서구조를 보이고 있다. 10개의 측선에 대하여 소형루프 전자탐사는 측선간격 5 m, 측정간격 1m로 자료를 획득하였다. 이 지역은 사질토가 대부분을 차지하는 가운데, No. 3 측선의 경우, 상대적으로 다른 측선보다 점토의 성분이 많이 포함되어 있는 것으로 나타나며, 45 m 부분인 중간 지점의 경우, 다른 지점보다 점토가 넓게 분포하는 것으로 나타났다.

Fig. 2는 각 시추지점에서 심도별로 채취한 토양시료 중 대표적인 토양에 대한 토성분석 결과로, 대부분 Loamy sand, Sandy loam 및 Loam에 해당되므로 상대적으로 사질함량이 높은 것으로 나타났다. 특히, No. 9 측선에 해당하는 부분에서 사질함량이 보다 많았으며, 이는 토양단면의 결과에서도 확인할 수 있다. 지하수위는 평균적으로 심도 1.6m 정도로 No. 3 측선의 경우는 점토구간에 해당되며, No. 9 측선의 경우는 점토와 사질토가 혼합된 구간과 사질토 구간의 경계부에 해당된다. 또한 심도가 깊어질수록 sand의 함량이 증가하는 특성을

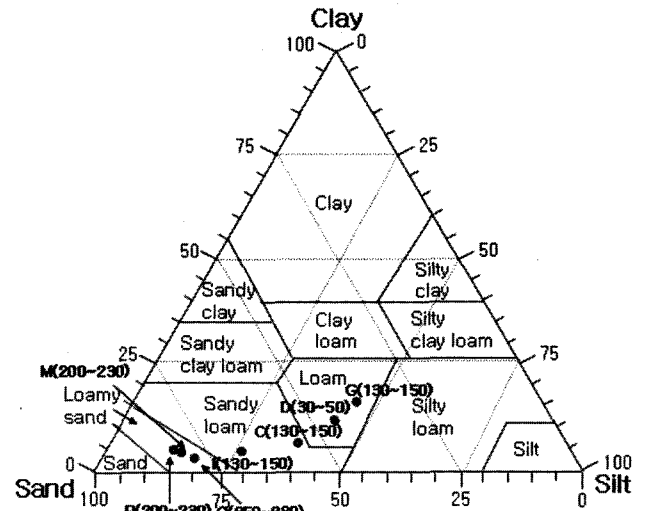


Fig. 2. Particle-size distribution of each soil in the study area according to U.S. Department Agricultural texture classification (clay: <0.002 mm, silt: 0.002 (0.05 mm), sand: 0.05 (2.0 mm)).

보이며, 이 지역의 토양이 주로 사질 토양으로 구성되어 조직이 영성하며, 배수 및 통기가 양호한 것으로 나타났다.

연구지역 토양에 대한 전기전도도 측정은 각 지점별로 0.3~0.5 m, 1.3~1.5 m, 2~2.3 m의 심도구간에서 채취한 토양시료의 간극수를 추출하는 포화침출법을 이용하여 분석하였다

(Table 1). 이 방법은 수분을 함유한 토양시료에 증류수를 이용하여 포화시킨 후, 일정시간이 지난 다음 간극수를 추출하여 간극수의 전기전도도를 측정하는 방법이다. 분석 결과 몇몇 지점으로 제외하고는 지표부근 전기전도도값이 높게 나타나는데, 토양단면에서는 별다른 변화가 나타나지 않는 것으로 보아 농업용 토지의 특성에 기인한 부분적인 염류 집적에 의한 것으로 판단된다. 논 토양의 경우, 농사기간 중에 비료 등의 사용으로 인한 염류 집적이 이루어질 수 있으며, 토양을 뒤엎는 경우, 염류가 집적된 토양이 수 m 하부까지 영향을 미칠 수 있

Fig. 3은 각 지점에서 토양시료 분석에 의해 구한 심도별 전기비저항 분포영상이다. 0.5 m 심도에서의 전기비저항 분포를 나타내는 Fig. 3(a)에서는 우측 상단부와 좌표 (25, 30) 지점을 중심으로 저비저항대가 분포하고 있다. Fig. 3(a)의 우측 상단부에 나타나는 저비저항대는 심도 1.5 m와 2.3 m의 영상인 (b)와 (c)에서도 저비저항 이상대를 형성하고 있다. Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 이 지역은 거시적으로 수평적 층서구조를 보이고 있으므로 모든 심도에서 우측 상단부에 나타나는 저비저항 이상대는 염류집적에 의한 영향으로 보이며, 상당히 심부

Table 1. Electrical conductivity of soil using the saturated-paste extract method

Point	Depth (cm)	ECe (dS/m)	Point	Depth (cm)	ECe (dS/m)	Point	Depth (cm)	ECe (dS/m)
A	30~50	0.30	B	30~50	0.18	C	30~50	0.35
	130~150	0.33		100~130	0.16		130~150	0.30
	200~230	0.26		200~230	0.28		200~230	0.22
D	30~50	0.21	E	30~50	0.21	F	30~50	0.21
	130~150	0.20		130~150	0.21		100~130	0.21
	200~230	0.15					160~180	0.26
G	30~50	0.28	H	30~50	0.39	I	30~50	0.22
	130~150	0.22		100~130	0.16		130~150	0.22
	200~230	0.22		200~230	0.28		200~230	0.41
J	30~50	0.20	K	30~50	0.55	L	30~50	0.45
	100~130	0.19		120~140	0.26		130~150	0.35
	200~230	0.24		200~230	0.26		200~230	0.19
M	30~50	0.89	N	30~50	0.37	O	30~50	0.22
	130~150	0.42		130~150	0.46		130~150	0.20
				200~230	0.43		250~280	0.23
P	30~50	0.36	Q	30~50	0.34	R	30~50	0.14
	130~150	0.19		130~150	0.15		130~150	0.25
	200~230	0.22		200~220	0.15		200~230	0.15

다. 특히 M과 N 지점의 경우는 이러한 원인과 지표에서의 물 공급에 따른 염류 확산이 진행되어 모든 심도에서 전기전도도가 높게 나타나는 것으로 보인다. 이와는 반대로, B, D, E, F, G, J, O, R 지점은 염류에 의한 영향을 덜 받은 것으로 보이며, 순수한 사질토가 존재하는 구간에서의 전기전도도가 더 낮게 나타나는 것으로 보아 토양특성을 잘 반영하는 것으로 보인다. I 지점의 경우는 심도 2 m 하부에서 전기전도도가 높게 나타나는데, 이는 지하수면 하부의 사질토 아래에 존재하는 수분을 많이 포함한 점토의 영향으로 판단되며, 점토가 존재하는 지점의 전기전도도는 수분함량과 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다. 또한 토성분석이 이루어진 지점에 대한 전기전도도 값은 0.2~0.3 dS/m의 적은 범위에 해당하는 것으로 보아 상대적으로 사질함량이 높은 구간에서 대체적으로 낮은 전기전도도를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

까지 염류의 확산이 진행된 것으로 해석된다. 반면 좌표 (25, 30) 지점의 저비저항 이상대는 Fig. 3(b)에서 조금 약해지다가 심도 2.0 m의 (c)에서는 거의 사라지고 있으므로 천부에 집적된 염류가 아직 심부까지 확산되지는 않았을 것으로 판단된다.

소형루프 전자탐사

소형루프 전자탐사는 주파수영역 전자탐사에 속하며, 탐사 방법은 송신루프에 교류전류를 흘려주어 발생하는 전자장(1차장)이 지하로 전파하면서, 전도체를 만나게 되는 경우 전도체에서 발생하는 유도전류에 의해 2차장이 발생하며 이를 측정하여 해석하게 된다.

소형루프 전자탐사에서 측정되는 2차장은 유도상수(induction number; B)의 함수로서, 유도상수는 다음의 (1)식과 같이

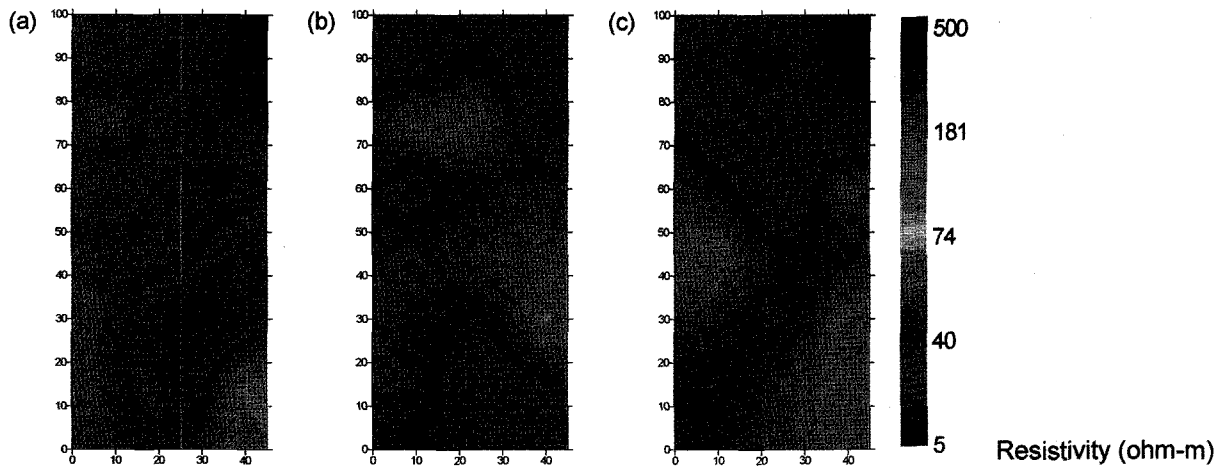


Fig. 3. Plan views of resistivity distribution at the depth of (a) 0.5 m, (b) 1.5 m and (c) 2.3 m, respectively.

주어진다(McNeill, 1980).

$$B = \frac{r}{\delta} = r \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma}{2}} \quad (1)$$

여기에서, r 은 송신기와 수신기간의 간격, δ 는 침투심도, ω 는 각주파수, μ_0 는 진공상태에서의 투자율, σ 는 전기전도도를 나타낸다. 유도상수가 매우 작은 근접장의 경우에 지하가 균질한 반무한 공간이라고 가정하면 수평 동일면 배열(horizontal coplanar; HCP)의 경우 1차장에 대한 2차장의 비는 (2)식과 같이 근사된다.

$$\frac{H_s}{H_p} \approx -\frac{jB^2}{2} = -\frac{j\omega\mu_0\sigma r^2}{4} \quad (2)$$

여기에서, H_s 는 2차장을 나타내며, H_p 는 1차장을 나타낸다. (2)식에서 반무한 공간의 전기전도도는 H_s/H_p 의 이상성분에 비례함을 알 수 있으며, 겉보기 전기전도도(apparent conductivity)는 다음과 같이 주어진다 (McNeill, 1980).

$$\sigma_a = \frac{4}{\mu_0 \omega r^2} \text{Im} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad (3)$$

(3)식에서, σ_a 는 겉보기 전기전도도, 'Im'은 이상성분을 의미한다. 소형루프 전자탐사에서 (3)식의 겉보기 전기전도도를 이용하기 위해서는 저유도 상수를 만족해야만 하며, 이를 위해서는 송수신 간격이 짧고 주파수가 낮으며 조사지역의 전기전도도가 낮아야만 한다. 하지만 (2)식에 주어진 바와 같이 전기전도도가 낮을 경우에는 측정값 H_s/H_p 가 작아지므로 양질의 자료획득이 어렵게 된다. 또한 전기전도도가 낮을 경우에는 침투심도가 깊어져 본 연구에서와 같이 지하 수 m 이내의 천부에 대한 정보를 목적으로 하는 경우에는 천부의 해상도가 떨어지게 된다(송윤호와 정승환, 2002). 저유도상수 조건을 만족하는 주파수 대역에서 동상성분을 이용하는 것이 유리하지만, 절대적인 반응값이 너무 작아 양질의 자료획득이 쉽지 않다(조인기

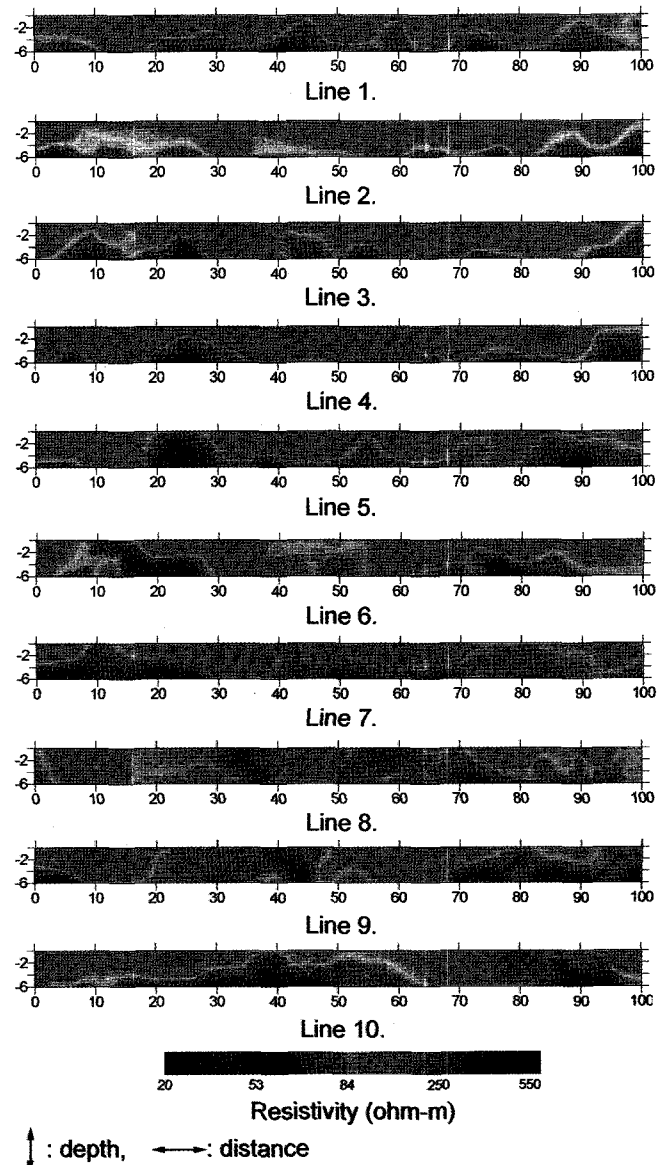


Fig. 4. Resistivity sections obtained from the inversion of small loop EM data.

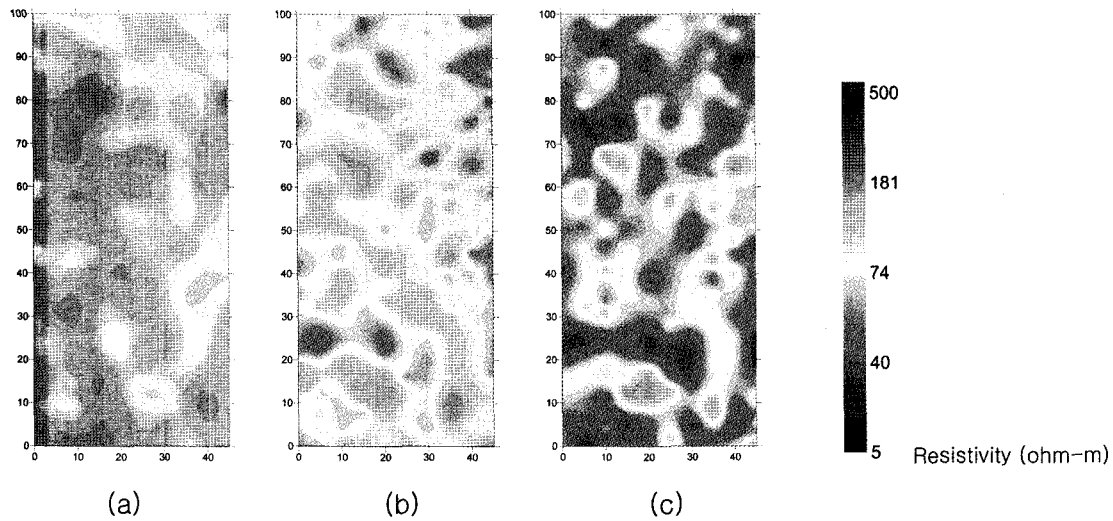


Fig. 5. Plan views of resistivity distribution obtained from one-dimensional inversion of small loop EM data at the depth of (a) 1.5 m, (b) 3.0 m and (c) 6.0 m, respectively.

와 임진택, 2003). 따라서 본 연구에서는 측정 가능한 주파수 및 전기전도도 범위가 크며, 신호의 크기가 상대적으로 큰 이상성분의 자료를 주로 사용하였다. 탐사에 사용된 주파수는 810 Hz에서 20010 Hz까지 총 8개의 주파수를 사용하였으며, 장비로는 미국 Geophex 사의 GEM2를 이용하였다. 또한 10 m 하부 심도까지 지질조건을 파악하기 위해 슬림버저 배열 전기비저항 수직탐사를 수행하였으며, 시료채취 지점 중에서 A, C, F, G, I, L, M, O, R 지점에 대해 소형루프 전자탐사의 결과와 비교, 검토하였다.

자료처리 단계에서는 소형루프 전자탐사의 현장자료에 대한 잡음 제거를 위하여 공간저주파 필터링을 수행한 후, 각 층의 두께와 전기비저항을 모델변수로 하는 1차원 Marquardt 역산을 수행하였다. 역산에 있어서 층의 수의 결정은 토양단면도 (Fig. 1(b))에 나타난 바와 같이 층의 수가 각 지점마다 차이가 있으므로 대상 지점의 토양단면 결과에 따라 3층 혹은 4층으로 결정하였다.

Fig. 4는 측선 No. 1부터 측선 No. 10 까지의 소형루프 전자탐사 자료 중 상대적으로 자료의 질이 양호한 이상성분만을 이용하여 역산을 수행한 후, 획득한 각 측선 하부의 전기비저항 분포 단면이다. 전체적으로 수십 ohm-m에서 약 100 ohm-m의 전기비저항 값을 보이며, 천부의 전기비저항이 하부보다 높은 값을 보이고 있다. 이는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 이 지역의 지하수위가 약 1.5 m인 점을 고려할 때, 지하수면 상부의 마른 표토층이 상부에 나타나는 고비저항층을, 하부에 나타나는 저비저항층은 지하수면 하부의 포화된 sand 층을 대변하는 것으로 해석된다. 한편 소형루프 전자탐사의 가탐심도와 Fig. 1(b)에 주어진 토양단면을 고려할 때, 이 지역은 거시적으로 수평다층구조로 가정할 수 있으며, 이 경우 전기비저항의 수평적 변화는 작게 나타나야 한다. 그러나 Fig. 5에 나타난 바와 같이 위치에 따라서 전기비저항의 수평적 변화가 나타남을

알 수 있으며, 이는 토양자체의 특성이라기 보다는 토양내에 집적된 염류 등의 영향을 크게 받은 것으로 예상된다.

Fig. 5는 연구지역에 대한 소형루프 전자탐사의 역산결과에 의해 얻어진 전기비저항 분포를 심도별로 나누어 영상화한 결과다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 천부인 심도 1.5 m에서는 비교적 전기비저항이 높게 나타나고 있으며, 하부로 갈수록 낮은 전기비저항 분포를 보이고 있다. 이는 앞서 제시된 바와 같이 지하수위의 영향이 크게 반영된 결과로 해석되는데, 지하수면 상부의 마른 표토층은 높은 전기비저항을 보이며, 심부로 갈수록 sand의 함유량과 함께 지하수 함유량이 증가되어 더 낮은 전기비저항을 보이는 것으로 판단된다. 또한 전기비저항의 수평적 변화가 나타나는데, 이는 농업용지의 특성상 염류집적과 상부 토양의 뒤섞임에 의해 전기비저항의 수평적 변화가 반복되어 나타나는 것으로 해석된다. 그러나 본 연구지역과 같이 층에 따라 전기비저항의 차이가 크지 않을 경우에도 소형루프 전자탐사 결과가 과연 이 정도의 해상도를 뒷받침해 줄 수 있는가는 더 많은 연구가 있어야만 할 것이며, 본 연구에서는 전반적인 전기비저항의 분포 양상을 대상으로 비교, 분석하였다.

비교 분석 및 고찰

소형루프 전자탐사에서 얻어진 전기비저항 값과 토양에서 추출된 간극수의 전기전도도 값으로 구한 토양의 전기비저항 값을 비교, 분석함으로써 소형루프 전자탐사를 사용하여 효과적으로 천부 토양층의 전기전도도 분포에 대한 정보를 얻어낼 수 있는가를 확인하고자 하였다. 또한 추가적으로 슬림버저 배열 전기비저항 수직탐사 자료와 시추자료, 토양시료의 전기비저항 값을 상호 비교함으로써 각 방법에서 얻어진 전기비저항의 특성을 분석하였다.

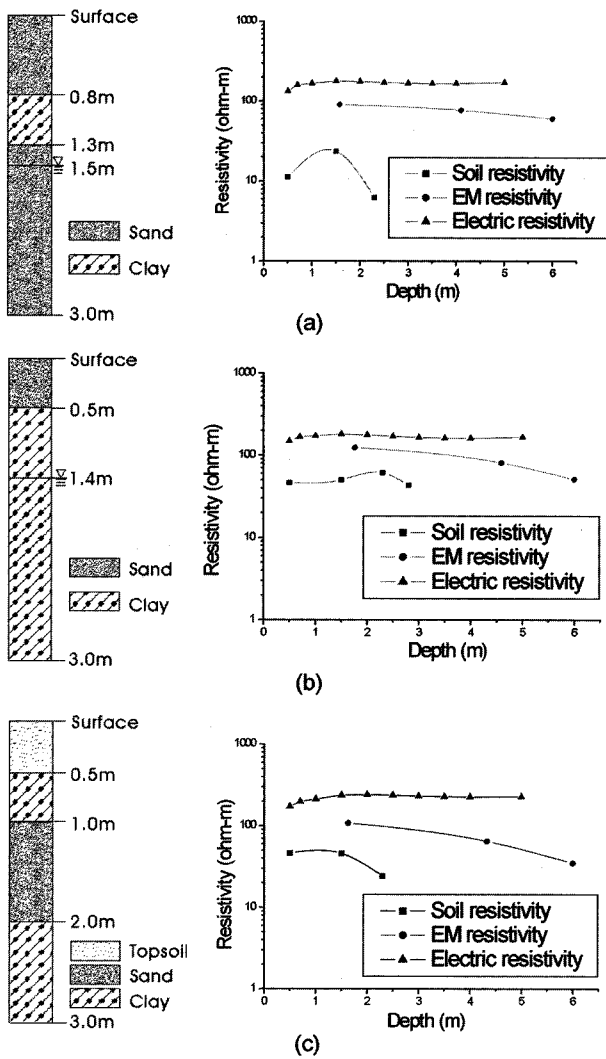


Fig. 6. Comparison results of resistivities by Schlumberger sounding, small loop EM, and analysis of saturated-paste extracted from soil samples at points (a) A, (b) C and (c) I.

Fig. 6은 연구지역내에서 대표적으로 층서를 달리하는 A, C, I의 3개 지점에 대하여 소형루프 전자탐사, 전기비저항 수직탐사 및 토양시료 분석에 의한 전기비저항을 비교한 결과이다. 심도별 토양특성은 A 지점의 경우 점토층이 지하수위 상부의 모래층 사이에 50 cm의 두께로 협재하고, C 지점의 경우 상부에 50 cm 두께의 모래층이 나타나고 그 하부에는 점토층이 분포하며, I 지점의 경우는 모래층이 점토층 사이에 약 1m의 두께로 상대적으로 두껍게 존재하고 있다. Fig. 6에 나타난 가장 뚜렷한 특징은 각 방법에 의해 얻어진 전기비저항 값이 서로 다른 양상을 보이며, 전기비저항 수직탐사, 소형루프 전자탐사, 토양시료의 순으로 전기비저항이 낮은 값을 보인다는 점이다. 이중 전기비저항 수직탐사와 전자탐사의 경우는 이론적으로 동일한 값을 보여야 함에도 불구하고 서로 다른 값을 보이는 바, 이는 측정시의 잡음에 의한 영향과 역산 및 해석방법에 의한 차이일 것으로 생각된다. 한편 토양시료의 전기비저항은 측

정방법이 간극수만을 추출하여 측정하므로 지하수면 상부의 토양시료의 경우에는 당연히 전기, 전자탐사에서 얻어진 전기비저항 값보다 월등히 낮은 값을 보일 것이다. 또한 지하수면 하부의 경우에도 전기, 전자탐사의 결과가 지하수는 물론 매질의 광물학적 특성과 그 입자의 분포양상 등에 종합적으로 영향을 받는데 반하여, 토양시료의 분석결과는 간극수에 의해서만 결정되므로 낮은 전기비저항 값을 보이게 된다. 그러나 간극수의 전기비저항도 전기, 전자탐사자료에 일정부분 영향을 미치므로, 간극수의 전기비저항과 소형루프 전자탐사의 결과는 상관관계를 가질 것이다.

본 연구에서는 전자탐사 결과 해석된 전기비저항과 토양 간극수를 이용한 전기비저항과의 상관관계를 분석하였다. Rhoades *et al.*(1999)은 현장에서 채취한 불교란시료에 대하여 전극을 이용하여 구한 전기전도도와 토양에서 추출한 간극수의 전기전도도 사이의 상관관계를 분석하였으나, 이 경우 현장에서 심도별로 토양을 채취하는데 어려움이 있다는 단점이 있다. 따라서 이 연구에서는 현장에서 신속하게 전기비저항을 측정할 수 있는 소형루프 전자탐사의 역산결과를 상관시켜서 해석하였다. 지하수면 상부의 값은 측정방법의 차이로 인하여 상관관계수가 낮을 수밖에 없으므로 분석에 사용된 자료는 모두 지하수면 하부의 값을 사용하였다. Fig. 7은 지하수면 하부의 모래층 구간에 대한 전자탐사의 1차원 역산결과와 토양시료 분석에 의한 결과의 상관관계를 분석한 것으로 상관관계가 매우 높은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 높은 상관관계를 이용하면, 소형루프 전자탐사로 토양내 간극수 전기비저항의 대략적인 추정이 가능할 것으로 생각된다. 또한 소형루프 전자탐사를 이용할 경우 토양시료의 채취 및 분석에 들어가는 시간과 노력을 절감할 수 있으며, 특히 토양 간극수의 전반적인 전기비저항 분포 영상을 제공해줄 수 있으므로 토양의 특성과 염류 등의 분포 양상을 파악하는데 효과가 있을 것으로 기대된다.

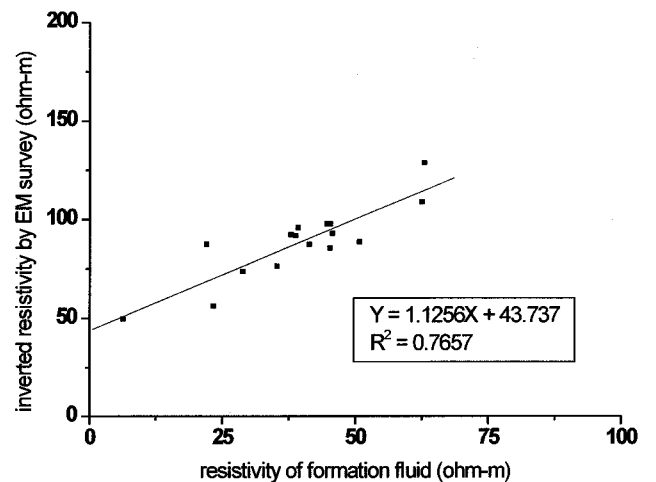


Fig. 7. Correlation of resistivities obtained from small loop EM method and soil analysis.

Fig. 8은 심도 1.5 m에서의 토양시료 분석결과와 소형루프 전자탐사 결과를 Fig. 7에서 얻어진 상관관계식을 사용하여 간극수의 전기비저항으로 변환하여 비교한 것이다. 토양시료 분석은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 18개의 점에서 이루어져, 전자탐사에 비하여 측정빈도(sampling density)가 상대적으로 낮으므로 분석된 전기비저항은 부드럽게 변화하는 양상을 보이는데 비하여, 전자탐사 결과는 국지적인 변화가 큰 양상을 보이고 있다. 토양시료 분석에 의한 결과에서 나타나는 상부의 저비저항대와 좌표 (30, 10) 부근의 저비저항대는 전자탐사결과에서 얻어진 저비저항대와 일치하고 있으나, 전자탐사 결과에서 강하게 나타나는 좌표 (40, 35) 부근의 저비저항대는 토양시료 분석결과에서는 나타나고 있지 않다. 상부의 저비저항대와 좌표 (30, 10) 부근의 저비저항대는 토양특성보다는 염류 집적에 의한 가능성이 높아 보이며, 전자탐사 결과에만 나타나는 좌표 (40, 35) 부근의 저비저항 이상대의 원인은 현재의 자료만으로 규명하기는 쉽지 않다. 다만 Fig. 1(b)의 토양단면을 고려할 때 지하수면 하부의 공극률이 높은 모래층과 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 따라서 토양시료분석과 전자탐사를 통하여 얻어진 전기비저항 분포는 부분적으로 일치하는 부분과 그렇지 못한 부분이 혼재되어 나타나고 있어 정밀한 해석은 쉽지 않을 것으로 보인다. 이러한 차이에도 불구하고 토양시료 분석결과에서 염류집적에 의한 저비저항대로 해석되는 부분은 전자탐사 결과에서도 저비저항대로 나타나고 있기 때문에 전자탐사 결과에 나타난 저비저항 이상대는 염류 집적의 가능성이 높은 지점으로 판단되며, 향후 이들 저비저항 이상대의 토양시료를 채취하여 보다 다양한 분석이 이루어진다면 시간과 경비를 절약할 수 있으므로, 소형루프 전자탐사법은 논 토양 특성 파악을 위한 선행조사에 효과적인 것으로 기대된다.

토의 및 결론

농업분야에서 토양의 전기전도도를 포함한 이화학적 특성을 공간적, 시간적으로 밝히는 것은 매우 중요하며, 지구물리학적 기법을 적용하면 이러한 분야에 매우 효과적으로 적용이 가능하다. 이 연구에서는 토양의 전기전도도 분포를 파악하기 위한 소형루프 전자탐사를 적용하였으며, 적용 결과 토양단면과 어느 정도 일치하는 전기비저항 분포 영상을 얻을 수 있었다. 소형루프 전자탐사 결과와 토양시료 분석결과는 지하수면 상부에서는 측정방법의 근본적인 차이로 인하여 상당한 차이를 보이지만, 지하수면 하부의 경우에는 상관관계가 높게 나타나는 것으로 보아 이러한 높은 상관관계를 이용하여 토양 간극수의 전기비저항을 추출하는 경우 토양시료를 채취할 수 없는 심도 6 m 이내의 토양특성 분석은 물론 전부 토양의 토양특성과 염류 집적에 관한 정보를 소형루프 전자탐사를 이용하여 저렴하고 신속하게 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한 소형루프 전자탐사법은 GPS를 활용하면 광범위한 지역에 대한 정보를 신속하게 얻을 수 있으므로 기계화 영농이 수행되는 대규모 농장의 토양 특성 파악에 적용 가능할 것으로 생각된다. 그렇지만 토양의 성질에 따른 이온함량, 공극률, 함수량 등의 분석결과와의 종합적인 해석이 부족함에 따라 향후 불포화대의 토양 특성과 연관된 전부 물리탐사에 대한 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 21세기 프론티어연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호 3-3-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

설순지, 송윤호, 조성준, 손정술, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사법을 이용한 매설물 탐지 및 지하 전기비저항 영상화: 물리탐사, 5, 309-315.
 송윤호, 박삼규, 설순지, 조성준, 정승환, 2001, 물리탐사를 이용한 국내 유류오염지역 조사 사례: 환경오염지역 평가를 위한 물리탐사 기술, 한국지구물리탐사학회 2001 정기총회 및 제3회 특별 심포지움, 122-140.
 송윤호, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사의 감도분석 및 가탐심도 추정: 물리탐사, 5, 299-308.
 정영상, 류순호, 이원호, 주진호, 신완식, 유일호, 안열, 2003, 전자장 유도 장치를 이용한 간척지 토양의 염농도 측정: 한국토양비료학회, 2, 57-65.
 조인기, 임진택, 2003, 소형루프 전자탐사법에서의 주파수 수직탐사: 물리탐사, 6, 119-125.
 McNeill, J. D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers, Technical Notes

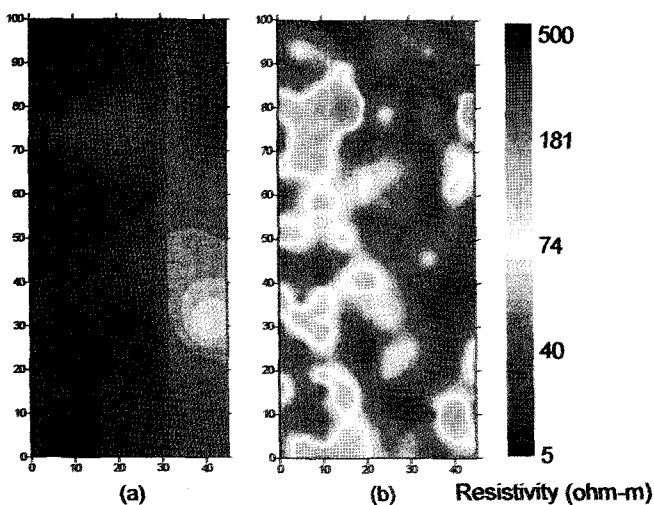


Fig. 8. Comparison of resistivity distribution at the same depth, 1.5 m. (a) Resistivity from soil analysis. (b) Transformed EM resistivity with the formula given in Fig. 7.

TN-6, Geonics Ltd., Mississauga, Ontario, Canada.
Rhoades, J. D., Chanduvi, F., and Lesch, S., 1999, Soil salinity assessment; Methods and interpretation of electrical conductivity measurements: *Irrigation and drainage paper*,

57, 15-62.
Won, I. J. Keiswetter, D. A., Fields, G. R. A., and Sutton, L. C., 1996, Gem-2: A new multifrequency electromagnetic sensor: *J. Environ. Eng. Geophys.*, 1, 129-137.