

소형루프 전자탐사법을 이용한 매설물 탐지 및 지하 전기비저항 영상화

설순지¹⁾ · 송윤호²⁾ · 조성준²⁾ · 손정술²⁾ · 정승환²⁾

Detection of Buried Objects and Imaging of Subsurface Resistivity Structure using Loop-Loop EM Methods

Soon Jee Seol¹⁾, Yoonho Song²⁾, Seong-Jun Cho²⁾, Jeong-Sul Son²⁾ and Seung-Hwan Chung²⁾

요약 : 소형 송수신기를 이용하는 전자탐사 방법은 이제까지 주로 금속탐지기와 같이 지하전도체의 매립위치 탐지 및 전기전도도의 정성적인 변화를 해석하는데 사용되어 왔다. 그러나 최근 들어 토목, 환경분야에서 전기전도도가 비교적 높은 지역에서의 매설물의 탐지 및 전기전도도 분포를 영상화하는 기술의 수요가 늘어남에 따라 이러한 전자탐사의 적용 및 정량적인 해석방법에 대한 연구가 활발해지고 있다. 이 연구에서는 이러한 전자탐사법의 탐사 기초원리를 간략히 소개하고, 실증 시험 지역에서 얻어진 자료를 토대로 전도성 매설물의 탐지 및 지하 전도도 분포 영상화의 실 예를 보여주었다. 이 연구를 통하여 향후 이러한 소형루프를 이용하는 다중주파수 전자탐사 장비가 전도성 매질이 존재하는 탐사 지역에서 신속하고 정확한 탐사 방법으로 활용될 수 있음을 보여주고자 하였다.

주요어 : 소형루프, 전자탐사, 매설물 탐지, 전도도 분포 영상화

Abstract : Conventional electromagnetic (EM) method using small loops as a source and receiver has been used in detection of conductive buried objects like a metal detector or in qualitative estimation of the subsurface conductivity variation. Recently, however, since detection of buried objects and imaging of the subsurface conductivity distribution in a relatively conductive area are in a high demand for environmental and engineering purposes, the quantitative interpretation technique of EM data is actively studied. In this regard, we introduce a brief principle of EM survey and show an example of the detection of buried conductive material and imaging of the subsurface conductivity distribution based on data measured at a test survey area. Through this study, we show that multi-frequency EM surveys using small loops may be a good solution to give quick and detail information of subsurface in a conductive survey area.

Keywords : small loop, EM survey, detection of buried object, resistivity distribution imaging

서론

전자탐사는 지표 혹은 시추공내에서 전기장 또는 자기장을 측정하여 지하 지질구조의 위치, 크기, 형상 및 물성 등에 관한 정보를 탐지하는 물리탐사 기술로, 송신원의 유무, 전자기장의 측정방식, 탐사대상의 심도 등에 따라 매우 다양한 방법론이 개발되어 사용되고 있다. 그러나 전자탐사는 다른 물리탐사방법들에 비해 그 이론이 복잡하여 현장자료를 쉽게 해석할 수 있는 기법을 개발하는데 많은 어려움이 있었다. 따라서 과거에는 주로 평면파 가정을 이용하는 다소 이론이 간단한 MT(magnetotelluric) 탐사의 해석 기법만이 주로 연구되어 왔다(e.g., Rodi and Mackie, 2001).

그 외의 송신원을 이용하는 여러 전자탐사 방법은 주로 지하 전도체의 매립위치 탐지 및 지하 전도도의 정성적인 변화

만을 제공하는 방법으로 이용되어 왔다(Frischknecht *et al.*, 1991). 그러나 최근들어 토목이나 환경 분야에서 천부 지하구조의 정확한 영상을 얻기 위한 수요가 급증함에 따라 고주파 송신원을 이용한 전자탐사 자료의 정량적 해석 방법에 대한 연구가 시도되고 있다(Hwang and Won, 2000).

이 연구에서는 이러한 송신원이 있는 전자탐사의 정성적인 해석뿐만이 아닌 정량적인 해석 기법을 적용시킨 실 예 및 그 결과를 소개하고자 한다. 탐사기기로는 다중주파수의 송신원과 송신원으로부터 1.66 m 되는 위치에 수신원이 고정되어 있는 GSSI사의 전자탐사 기기인 GEM300을 사용하였다. 또한 현장 자료는 90 m × 90 m의 실증 시험 구간을 선정하여 획득하였고, 탐사 자료의 정량적 해석을 위한 1차원 전자탐사 역산법을 개발하여 현장 자료에 적용시켰다.

*2002년 10월 19일 접수

1) 부경대학교 환경탐사공학과(Pukyung National University, Department of Exploration Engineering)

2) 한국지질자원연구원 탐사개발연구부(Geophysical Exploration and Mining Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource)

탐사 기초 원리

송신코일에 교류 전류를 흘려주면 암페어의 법칙에 의해 코 일 주변에 1차 자기장이 발생하며, 이 자기장이 지하매질 또는 이상대를 통과하면서 렌츠의 법칙에 의해 전기전도도가 달라지는 이상대 내부에서 유도전류(induction current)를 발생시키게 된다. 이상대 내부에서 발생된 유도전류는 2차 자기장과 전기장을 발생시키며, 전자탐사는 이러한 2차장을 수신기에서 측정하여, 이의 해석을 통해 지하매질의 전기전도도 분포를 규명하는 방법이다(Fig. 1). 지하에 전기전도도 이상체가 존재할 경우 유도전류는 전자기 유도에 의해 이상체 내부에 발생하는 맴돌이 전류(vortex current) 및 이상체와 주변 매질이 전기적으로 접촉됨으로써 존재하는 전도전류(conduction current)가 복합된 산란전류(scattering current)로 나타난다. 이러한 산란전류는 적용 주파수, 이상체의 형상과 전기전도도 차이에 따라 복잡한 양상을 띠어 전자탐사의 정확한 모델링과 해석을 상대적으로 어렵게 하는 요인이 된다. 그러나, 일반적으로 지하에 유도되는 유도전류의 크기는 지하 매질의 전기전도도에 크게 좌우되므로 전자탐사는 원리적으로 전기전도도가 높은 양도체의 탐지에 유리하다.

이 연구에서 사용된 GEM300은 일정 주파수를 갖는 교류전류를 원형루프 형태의 송신원에 공급하여 1차장을 생성시킨 후, 이로 인해 발생하는 이상체에서의 2차 자기장을 수신기에서 측정하여 지하의 지질구조를 해석하는 주파수 영역 전자탐사 장비로서, 특정 주파수를 사용하므로 필터링 기법 등에 의하여 신호대 잡음비를 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

전자기파는 사용주파수와 지하 매질의 전기비저항 값에 따라 침투할 수 있는 침투심도 또는 표피심도(skin depth)가 달라지며 이는

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (m) \quad (1)$$

로 주어지는데, 여기서 ω 는 각 주파수(Hz), μ 는 투자율(H/

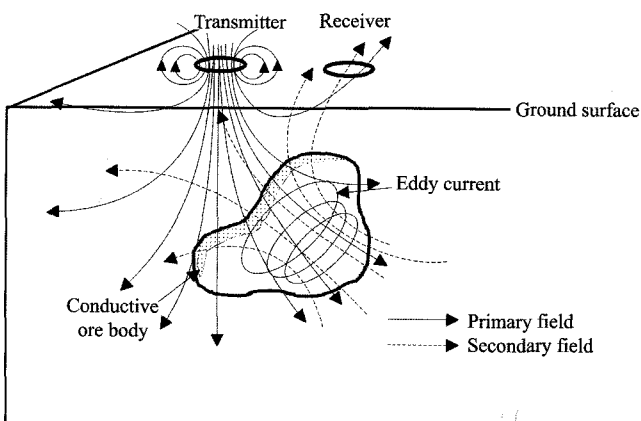


Fig. 1. A conceptual diagram of EM survey by induction phenomena.

m), ρ 는 전기비저항(ohm-m), f 는 사용주파수(Hz)이다. 전기전도도가 일정하다고 가정하는 경우 주파수가 높아짐에 따라 침투심도가 작아지는 것을 알 수 있으며, 이와 반대로 주파수가 낮아지면 침투심도가 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 원리로부터 고주파의 자료는 천부의 정보를, 저주파의 자료는 보다 심부의 정보를 주로 의미하는 것을 알 수 있으며, 광대역에 걸친 주파수영역에서 탐사를 수행하는 경우에는 지하의 심도별 전기전도도의 변화에 대한 정보를 얻어낼 수 있다. 그러나, 심부의 정보를 얻기 위해서는 주파수를 낮추는 것 외에도 송수신기간의 거리를 충분히 떨어뜨려야 하는 제약이 있어 대부분의 상용화된 장비는 송수신기간의 거리와 사용 주파수에 따라 탐사 가능 심도가 제한되어 있다(송윤호와 정승환, 2002). 이 연구에서 사용된 GEM300의 경우도 330~19,950 Hz 사이의 광대역의 주파수 대역을 사용하지만 탐사의 편의를 위하여 송

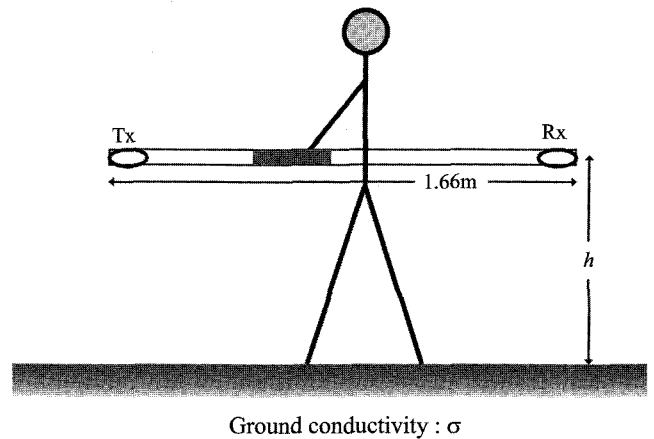


Fig. 2. A schematic diagram of EM survey using GEM300. Tx and Rx indicate transmitter and receiver coils, respectively, and h represents the distance from the equipment to the surface.

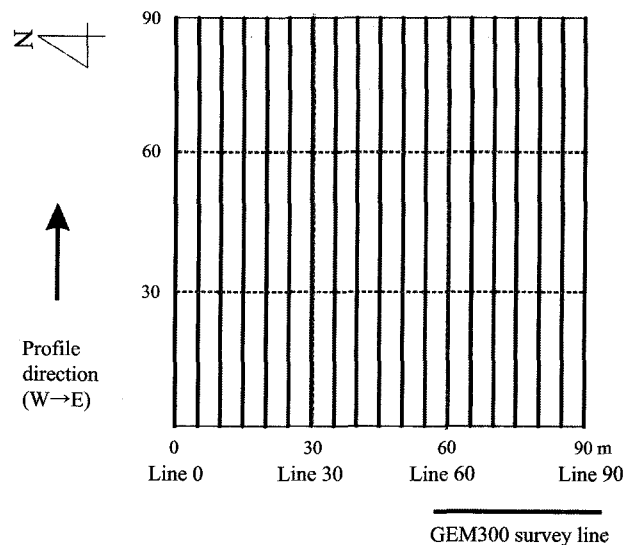


Fig. 3. EM survey lines over a test survey area. The 19 survey lines running West-East are 5 m apart each other.

수신기 사이의 거리가 1.66 m로 고정되어 있어 3 m 내외의 천부의 정보만이 획득 가능하다는 제약이 있으나, 다수의 주파수를 사용하므로 비교적 고분해능을 갖는 양질의 영상을 제공하여 주는 특징을 가진다. Fig. 2는 GEM300의 개략적인 측정 모식도이다.

한편 탐사를 통해 얻어지는 자료는 2차장의 동상성분(in-phase)과 이상성분(quadrature)을 1차장으로 나눈 값으로서 그 단위는 ppm 이다. 이로부터 지하매질에 대한 정보를 획득 할 수 있는 가장 간단한 방법은 겉보기 비저항(apparent resistivity; 겉보기 전기전도도의 역수)으로의 변환이다(송윤희 등, 2001). 겉보기 비저항은 지하하부에 존재하는 모든 매질에 대한 영향이 반영되어 나타나는 값으로서, 지하매질의 참 전기비저항을

의미하지 않으나 그 계산이 간단하여 지하구조의 변화나 이상체의 존재 유무를 겉보기 비저항 이상으로 손쉽게 확인할 수 있는 장점을 가진다. 보다 정밀한 이상체의 위치나 정확한 전기전도도 분포를 알아내기 위해서는 적절한 자료처리와 역산의 해석과정이 요구된다.

이 연구에서는 얻어진 전자탐사 자료를 이용한 음영도를 작성하여 매설된 파이프 등의 고립된 이상체의 대략적인 위치를 확인하였다. 다음으로, 지하구조의 규명을 위해서는 얻어진 자료에서 천부 매설물에 의한 반응을 푸리에 변환을 이용한 고주파차단 필터(high-cut filter)로 제거한 후 겉보기 비저항을 계산하여 주파수별 단면도를 작성하고, 1차원 역산 또한 수행하여 심도별 전기비저항 분포를 해석하였다.

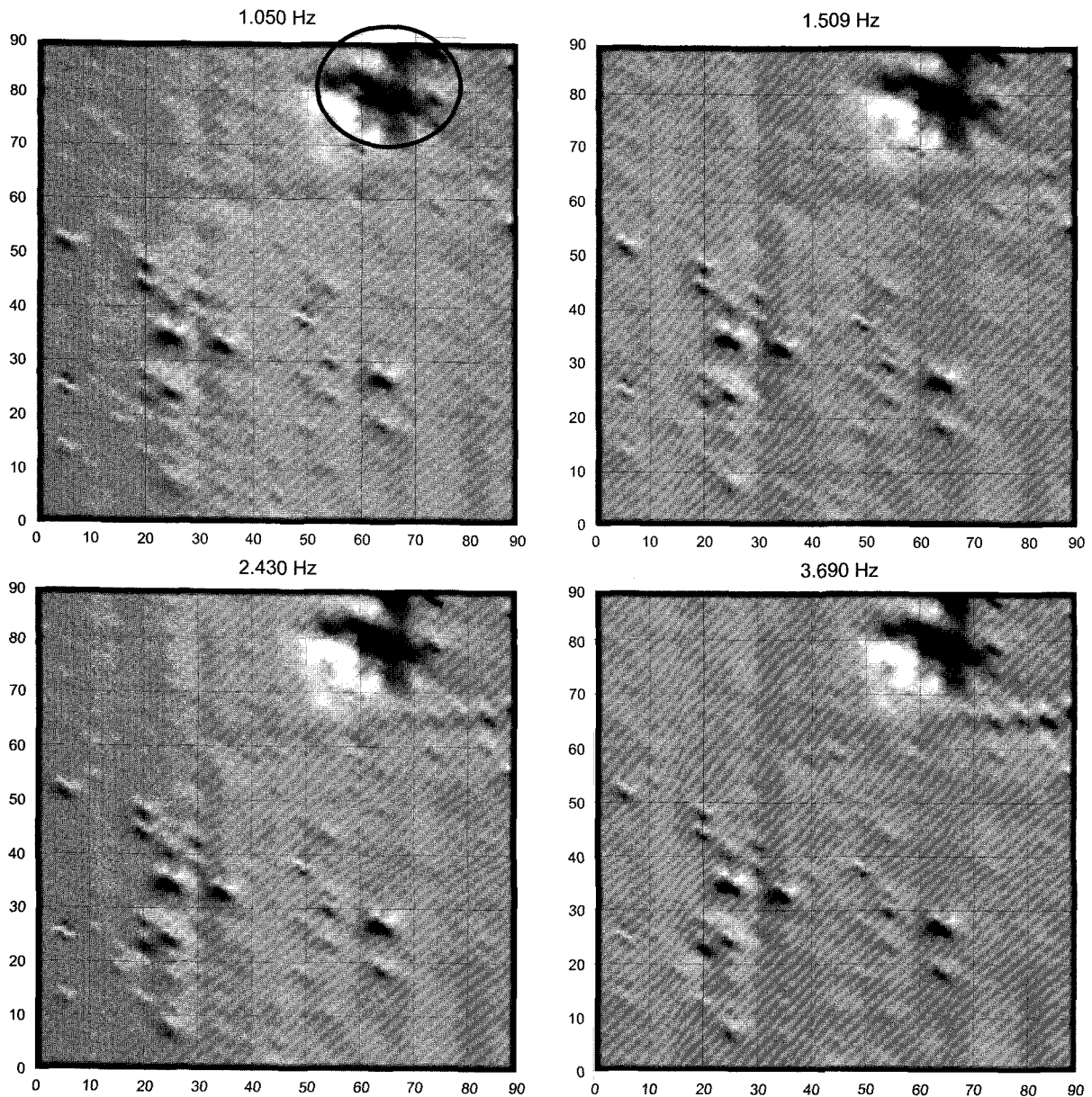


Fig. 4. Shadow maps of the quadrature components of GEM300 responses. As frequency increases, linear features corresponding to buried metal pipes become clear.

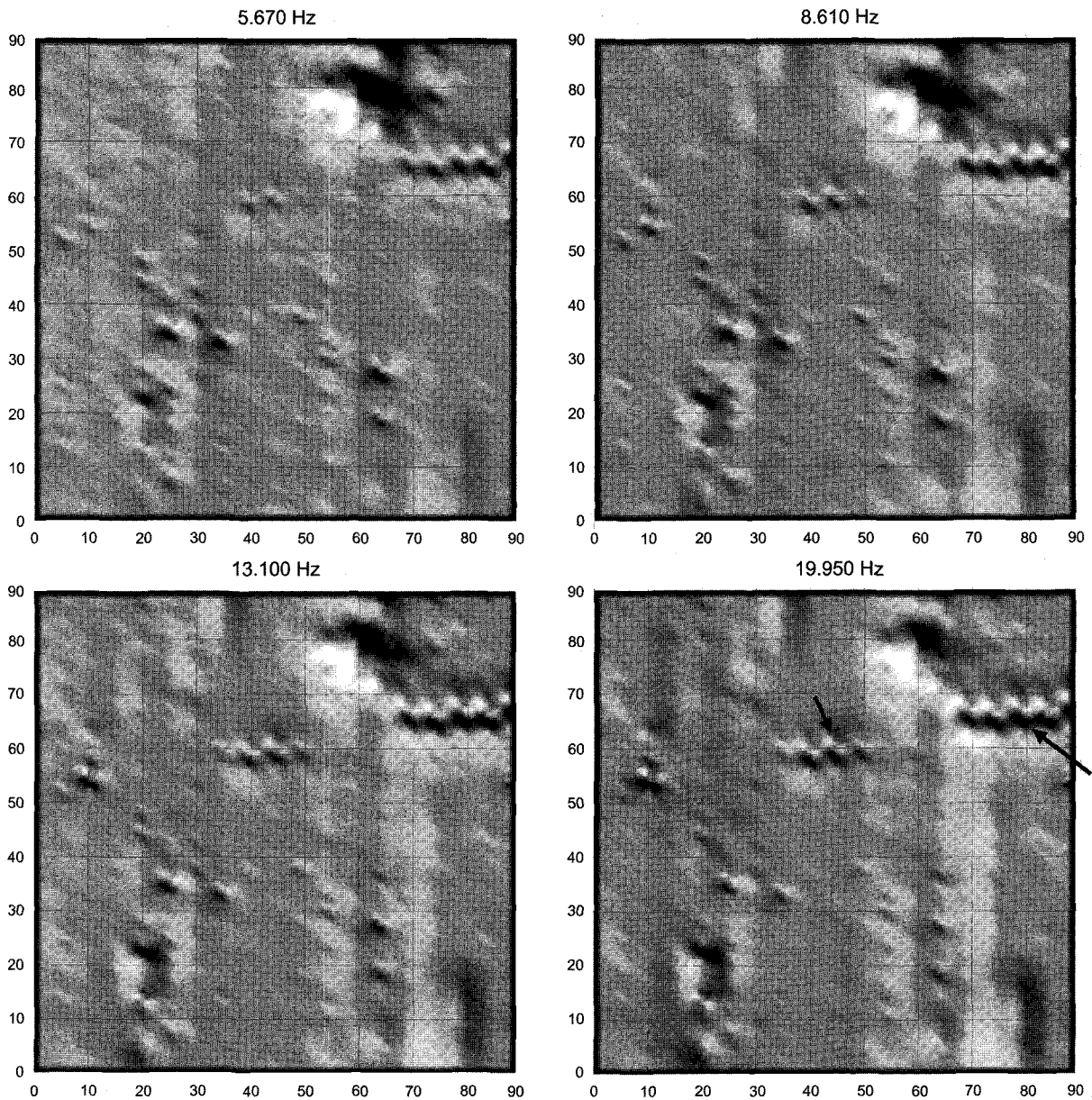


Fig. 4. Continued.

현장 탐사

Fig. 3에 90 m×90 m 실증시험 구역내의 탐사 측선도를 나타내었다. 탐사측선은 동서방향을 갖는 5 m 간격의 19개로 이루어져 있으며, 측정은 동쪽에서 서쪽으로 1 m씩 이동하면서 수행하였다. 탐사자료 중 천부 매설물 탐지와 전기비저항 분포를 알아내기 위한 탐사목적에 맞고 잡음이 비교적 적어 자료의 질이 좋은 1,050~19,950 Hz 사이의 8개 주파수의 결과를 해석하였다. 실증시험 구역내에서 수행한 전자탐사 결과는 먼저 매설물에 의한 반응 파악을 위하여 음영도로 작성되어 해석되었다.

Fig. 4에 나타낸 음영도는 N45°W 방향에서 조명한 것으로

작성하였다. 음영도는 여러 각도에서 작성할 수 있으므로 조명한 각도에 따라 구별될 수 있는 이상대의 연장성이 달라지는데, 이 조사결과에서는 여타 각도에서의 결과도 대동소이하였으며 또한 이상성분이 아닌 동상성분의 결과도 유사하였다. 그림에서 보면 고주파로 갈수록 남북 방향으로 매설되어 있는 두 조의 매설관로가 뚜렷이 관찰되는데(19,950 Hz 자료에 화살표로 표시), 특히 Line 70~Line 90의 66 m 부근이 매우 뚜렷하며 이는 터파기로도 확인되었다. 또한 측선 Line 35~Line 50에 이르는 도로상에서 60 m 부근에도 그 길이는 짧지만 매설관로가 묻혀있는 것을 볼 수 있다. 한편 측선 Line 55~Line 75의 동쪽 끝부분인 70 m 이상에서 매우 큰 이상체가 관찰되는데(1,050 Hz 자료에 원으로 표시) 이는 그 크기로 보아 급속

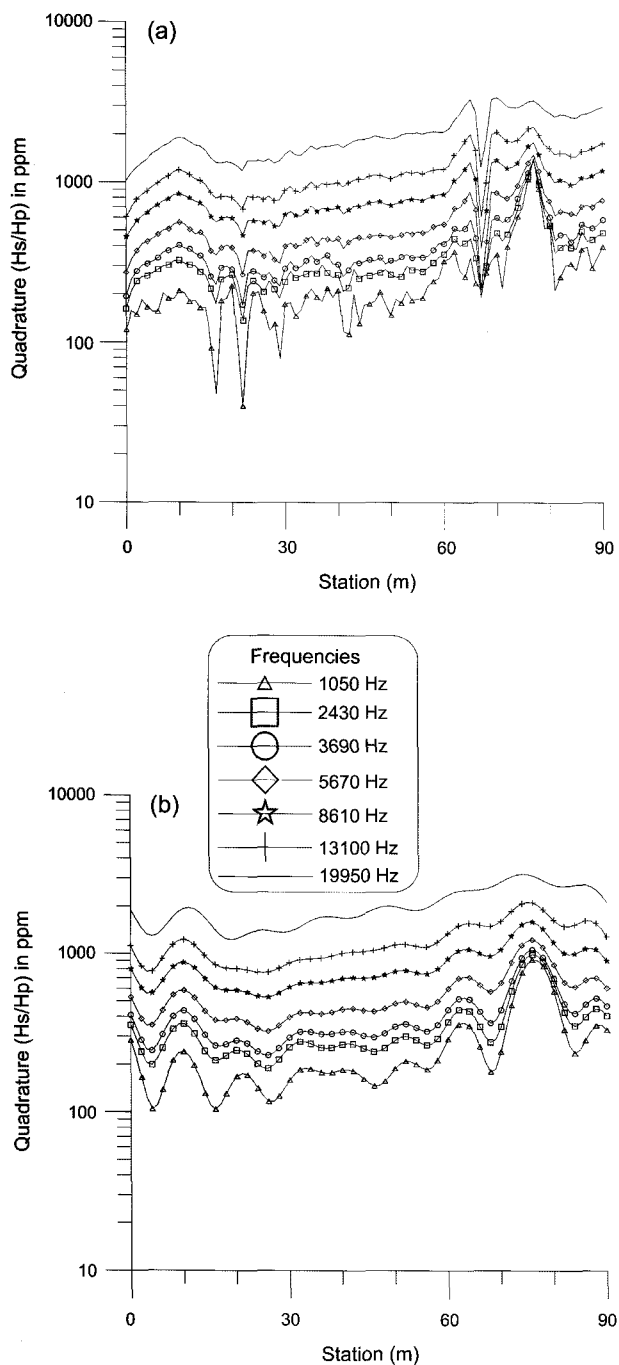


Fig. 5. Before (a) and after (b) spatial low-pass filtering of quadrature components at Line 70 to remove spatially high-frequency noises associated with a buried pipe and other shallow conductors.

성 폐기물의 집단매립 등에 의한 반응으로 판단된다. 그외에 측선 Line 20의 10~25 m 부근에도 고주파 대역에서 연결성이 뚜렷하진 않으나 이상대가 관찰되고, 또 저주파에서는 측선 Line 25와 Line 35의 측선의 35 m 부근에서 국부적인 이상대가 보이는데 Line 30에서는 뚜렷한 이상대가 관찰되지 않아 그 연결성이 부족하다 하겠다. 어쨌든 이 결과는 지하의 금속

성 매설물에 대해 전자탐사가 뚜렷한 반응을 보여줌을 다시 한번 확인하게 한다. 물론 금속성 매설물의 크기와 탐사측선의 방향에 따라 탐지 가능성이 변화하겠지만 특히 측선 Line 70~Line 90의 66 m 부근의 뚜렷한 철재 파이프는 이 지역의 전체적 전기비저항이 낮아 GPR 탐사결과에서도 매우 미약하여 그 신호를 구별하기 어려웠던 매설물이었다. 이로 미루어보아 이 결과는 매설물의 신속한 탐지 도구로서의 전자탐사의 성능을 잘 보여주고 있다.

다음으로 얻어진 자료로부터 지하의 전기비저항 분포를 구하여야 하는데, 이 때에는 앞서서와 같은 천부 전기전도성 매설물에 의해 공간적으로 급격히 변하는 반응은 지하의 전기비저항 분포에 의한 반응을 가리는(masking) 잡음으로써 작용하게 된다. 따라서 얻어진 탐사자료에 공간적으로 고주파 형태로 나타나는 매설물에 의한 반응을 제거하는, 공간파수영역(wavenumber domain)에서의 저주파 통과 필터링 작업을 먼저 수행하였다. Fig. 5에 Line 70에서 측정된 각 주파수별 자료의 필터링 전과 후의 모습을 나타내었다. 그림에서 보듯이 전도성 매설물이나 지표에 존재하는 소규모 전도성 물질들에 의한 고주파 잡음이 제거되어 필터링 후에는 지하의 특성을 반영하는 전체적으로 부드러운 변화를 보인다. 단 자료의 양끝 부분에는 필터링에 의한 자료의 왜곡이 보이므로 조사구역 내의 모든 전기전도도 분포를 얻기 위해서는 탐사측선보다 양 끝부분으로 다소 연장된 지역에서의 탐사가 필요함을 알 수 있다.

모든 측선의 이상성분 자료에 공간 저주파 통과 필터링을 적용한 후, 송수신 거리를 고려하여 겹보기 비저항을 구하였다. 송수신 거리를 고려한 겹보기 비저항의 계산은 송윤호 등(2001)에 의해 자세히 기술된 바 있다. Fig. 6은 이러한 과정을 거쳐 작성된 주파수별 겹보기 비저항 분포 영상을 보여주고 있다. 고주파 자료가 천부를, 저주파 자료가 심부의 정보를 제공하므로 영상은 고주파에서 저주파로의 순서로 배열하였다. 공간 저주파 통과 필터링을 적용하였어도 제거되지 않은 고립 이상체들에 의한 반응이 고비저항으로 약간 남아있긴 하나 Fig. 4의 음영도에서 관찰되는 매설관로에 의한 반응은 효과적으로 제거되었다. 한편 그림에서 보면 중앙부인 측선 Line 40~Line 70 구간이 비저항이 높게 나타나고 있는데 특히 고주파로 갈수록 고비저항 반응이 뚜렷해지므로, 이 부분의 천부에 비저항이 높은 매질이 존재함을 알려준다. 또한 측선 Line 50~Line 70의 70 m 지점 동쪽으로 비저항이 낮은 이상대가 존재하며 저주파로 갈수록 그 반응이 뚜렷하고 넓어지므로 수 m 심도까지 연장되고 있음을 말해준다. 이러한 저비저항대는 앞서 서술한 매설물에 의한 반응에서 전기전도도가 높은 금속성 폐기물의 집단 매립지로 해석된 부분으로 그 해석의 타당성을 입증해주고 있다.

주파수별 겹보기 비저항은 신속하게 지하 비저항 분포에 대한 정보를 준다는 큰 장점이 있지만 심도별 참 전기비저항 값

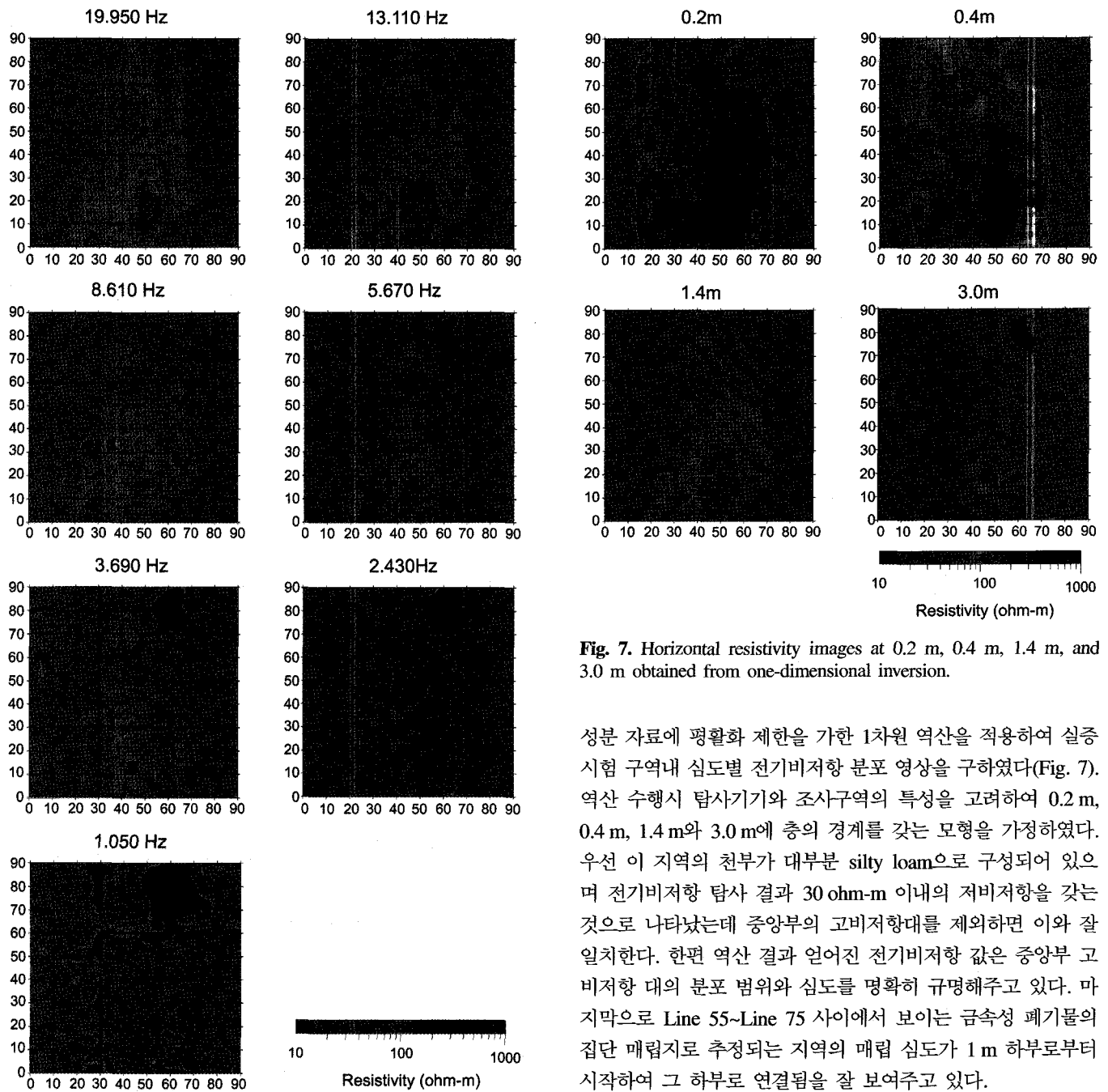


Fig. 6. Apparent resistivity maps at 1,050 to 19,950 Hz obtained from spatially low-pass filtered data.

Fig. 7. Horizontal resistivity images at 0.2 m, 0.4 m, 1.4 m, and 3.0 m obtained from one-dimensional inversion.

을 구하기 위해서는 역산 기법이 적용되어야 한다. 조사 지역의 자료는 각 측선별로 2차원적인 자료획득이 이루어졌으나 앞서 이론부분에 기술한 것과 같이 송수신 거리가 1.66 m로 고정되어 한 측점에서 측정된 자료는 그 직하부의 3 m 내외의 천부의 정보만을 포함한다. 따라서 자료 해석 기법이 복잡하고 시간이 많이 걸리는 2차원 역산 기법(Song et al., 2001)을 적용하여도 1차원 역산 기법의 적용결과와 크게 다른 결과를 얻지 못한다. 따라서 이 연구에서는 공간 저주파 필터링된 이상

성분 자료에 평활화 제한을 가한 1차원 역산을 적용하여 실증 시험 구역내 심도별 전기비저항 분포 영상을 구하였다(Fig. 7). 역산 수행시 탐사기기와 조사구역의 특성을 고려하여 0.2 m, 0.4 m, 1.4 m와 3.0 m에 층의 경계를 갖는 모형을 가정하였다. 우선 이 지역의 천부가 대부분 silty loam으로 구성되어 있으며 전기비저항 탐사 결과 30 ohm-m 이내의 저비저항을 갖는 것으로 나타났는데 중앙부의 고비저항대를 제외하면 이와 잘 일치한다. 한편 역산 결과 얻어진 전기비저항 값은 중앙부 고비저항 대의 분포 범위와 심도를 명확히 규명해주고 있다. 마지막으로 Line 55~Line 75 사이에서 보이는 금속성 폐기물의 집단 매립지로 추정되는 지역의 매립 심도가 1 m 하부로부터 시작하여 그 하부로 연결됨을 잘 보여주고 있다.

결 론

이 연구에서는 소형루프를 사용하는 다중주파수 전자탐사기기의 간략한 탐사원리의 소개, 그 적용 및 해석의 실예를 보여 주었다. 우선 실증시험 구역의 19개 측선에서 얻어진 자료로부터 음영도를 작성하여 전도성 매질물을 해석하였다. 특히 이 조사지역은 배경매질의 전기전도도가 높아 지장물 탐지에 가장 많이 쓰이는 GPR탐사 장비로도 매설관로의 위치를 탐지하기 어려웠는데 전자탐사 결과 신속하게 위치 및 그 연결성을 탐지 할 수 있었다. 다음으로 천부나 지표에 존재하는 전도체

에 의한 반응을 공간 저주파 통과 필터링을 통하여 제거한 뒤 각 주파수별 자료를 겹보기 비저항으로 변환시켜 조사지역내의 전기전도도 분포를 신속하게 영상화시켰다. 마지막으로 1차원 역산 기법을 적용시켜 각 심도별 전기전도도분포를 알아냄으로써 조사지역내의 고비저항대의 공간적인 분포를 명확히 규명하였으며, 전도성 매질의 집단 매립지역으로 추정되는 위치의 매립심도도 예측할 수 있었다.

이러한 실증시험을 토대로 한 연구 결과, 소형 루프를 이용한 전자탐사 방법이 환경문제와 관련된 탐사지역과 같이 전기전도도가 높은 환경을 주로 갖는 탐사지역에서의 전도성 매립물의 탐지나 지하 전기전도도 분포 영상화에 효과적으로 사용될 수 있음을 보여주었다.

사 사

이 연구는 과학기술부 “국가지정연구실” 사업에서 일부 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 송윤호, 정승환, 이상규, 김정호, 황세호, 황학수, 이성곤, 조성준, 이명중, 설순지, 박인화, 2001, 지반물리탐사연구, 1999-R-T102-P-01, 산업자원부.
- 송윤호, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사의 감도분석 및 가탐심도 추정: 물리탐사, **5**, 이번호.
- Frischknecht, F. C., Labson, V. F., Spies, B. R., and Anderson, W. L., 1991, Profiling methods using small sources in Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Applications: Soc. Expl. Geophys.*, 105-270.
- Hwang, H., and Won, I. J., 2000, Conductivity and susceptibility mapping using broadband electromagnetic sensors: *J. Environ. Eng. Geophys.*, **5**, 31-42.
- Rodi, W., and Mackie, R. L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion: *Geophysics*, **66**, 174-187.
- Song, Y., Kim, J.-H., and Chung, S.-H., 2001, An efficient 2.5-D inversion of loop-loop EM data: *Proc. 5th SEGJ Internat. Symp.*, 153-160.