

소형루프 전자탐사법에 의한 지하 영상화

임진택¹⁾ · 조인기¹⁾

Subsurface Imaging by a Small-loop EM Survey

Jin-Taik Lim¹⁾ and In-Ky Cho¹⁾

요 약 : 다중 주파수 소형루프 전자탐사법은 가탐심도의 한계에도 불구하고 조사가 신속하고 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 이 방법은 각종 지반조사 및 환경문제의 해결을 위하여 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 소형루프 전자탐사 자료를 이용하여 지하의 2차원 영상화 기법을 개발하였다. 지하의 전기비저항 분포를 영상화하기 위하여 주파수 수직탐사 자료에 대한 1차원 역산법을 사용하였다. 이론 자료에 대한 역산결과 지하의 전기비저항 구조에 대한 양호한 영상을 구현할 수 있었다. 또한 강원도 춘천에 위치한 농장에서 획득한 현장자료를 사용하여 전기비저항 2차원 단면을 작성하고, 이를 쌍극자 배열 전기비저항 탐사 결과와 비교, 검토하였다.

주요어 : 소형루프 전자탐사, 1차원 역산, 지하 영상화

Abstract : A small-loop electromagnetic (EM) system using multiple frequencies has advantages in survey speed and cost despite of limitation on its depth of investigation. Therefore, small-loop EM surveys have been frequently used on various site investigations involving engineering and environmental problems. We have developed a subsurface imaging technique using small loop EM data. We used a one-dimensional (1D) inversion method to reconstruct a subsurface image from frequency EM sounding data. Tests using simulated data show that the method can reasonably recover the subsurface resistivity structure. Also, the method was tested on field data obtained with multiple frequency small loop EM system at a farm in Chuncheon, Korea. The resistivity image obtained from field data compares favorably with the image from the dipole-dipole resistivity survey.

Keywords : small-loop EM, 1D inversion, subsurface imaging

서 론

소형루프 전자탐사법은 비접촉식으로 신속하게 넓은 지역을 조사할 수 있다는 장점으로 인하여 최근 문제가 되고 있는 환경 오염대의 조사에 매우 효과적인 탐사법이다. 현재 대부분의 물리탐사법은 지하의 물성분포에 대한 2차원 나아가서는 3차원 영상을 제공하는 영상화 기법이 각광을 받고 있으며, 국내의 경우 전기비저항 탐사나 탄성파 굴절과 탐사 등이 효과적으로 지하 영상을 제공하여 호평을 받고 있다. 한편 소형루프 전자탐사법의 경우에는 동상과 이상성분 또는 이로부터 얻어진 겹보기 전도도의 등고선도 위주로 해석이 이루어져 왔으며 (장현삼 등, 1998), 최근에 이르러 1차원(설순지 등, 2002; 송성호 등, 2003; Huang and Fraser, 2003; Huang and Won, 2003) 및 2차원 역산(Song *et al.*, 2001)에 의한 지하 영상화가 시도된 바 있다. 또한 조인기와 임진택(2003b)은 소형루프 전자탐사 이론자료의 1차원 역산에 관한 연구를 통하여 역산방법에 관한 구체적 지침을 제시하였다. 본 연구에서는 조인기와

임진택(2003b)의 1차원 역산에 관한 연구결과를 바탕으로 소형루프 전자탐사 자료의 1차원 역산에 의한 지하의 2차원 영상 구현 가능성을 모색하였다. 또한 이 방법을 현장자료에 적용하고 전기비저항 탐사를 통하여 얻은 2차원 영상과 비교하여 그 적용성을 검토하였다.

이론자료의 영상화

다중 주파수를 사용한 소형루프 전자탐사, 즉 주파수 수직탐사(frequency sounding) 자료의 해석은 주로 겹보기 전도도의 평면적 변화를 등고선도로 작성하여 전기전도도의 수평적 변화를 조사하는 정성적 해석이 주류를 이루고 있다. 그러나 주파수 수직탐사는 말 그대로 전기전도도의 수직적 변화 양상을 파악할 수 있는 방법이다. 따라서 측선에 대하여 주파수 수직탐사를 수행한다면 지하의 전기전도도 분포에 관한 2차원 단면을 얻을 수 있다. 한편 주파수 수직탐사의 자료해석은 주로 1차원 역산에 바탕을 두고 있다. 여기서는 간단한 2층 및 3층

*2003년 11월 14일 접수

1) 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

구조에 대한 1차원 역산을 통하여 각 측정점에서의 전기비저항 및 그 두께를 추정하고 이를 내삽하여 측선 하부의 2차원 전기비저항 분포 단면을 구성하였다. 물론 정확한 해석을 위해서는 적어도 2차원 역산을 수행해야 하나, 소형루프 전자탐사법의 조사심도가 낮으므로 1차원 모델을 간주하여도 큰 문제는 없다고 가정하였다. 이 방법의 효율성을 검증하기 위하여 제 1층의 두께가 점진적으로 증가하는 경사 모델에 대한 이론자료에 대하여 역산을 수행하였다. 사용된 주파수 대역은 300 Hz ~ 30,000 Hz이며, 로그 스케일로 균등한 간격으로 21개의 주파수 자료를 사용하였다. 송수신 간격은 GEM2H 장비를 고려하여 2.05 m로 하였으며, 지표에서 측정이 이루어진 것으로 가정하였다.

Fig. 1(a)는 제 1층과 2층의 전기비저항이 각각 10과 100 ohm-m이고, 제 1층의 두께가 원점으로부터 점진적으로 증가하는 경사 모델로 측선의 길이는 60 m이고 매 2 m 마다 제 1층의 두께가 1 m 씩 증가한다. 이러한 모델에 대하여 이론값을 계산하기 위해서는 2차원 모델링이 수행되어야 하나, 본 연구에서는 각 측정점에서 1차원으로 가정하여 이론자료를 획득하였다. 이와 같이 1차원 모델링을 통하여 얻어진 이론자료에 대하여 역산을 수행하여 경사 모델의 영상을 제대로 구현할 수 있는가를 검토하였다. Fig. 1(b)는 동상성분, (c)는 이상성분, (d)는 동상과 이상성분을 모두 사용하여 역산을 수행한 결과이다. 역산방법은 Marquardt 법으로 모델변수는 제 1층과 2층의 전기전도도 및 제 1층의 두께이다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 경우에 경사모델의 영상을 비교적 정확하게 구현하고 있다.

Fig. 2는 Fig. 1과 같은 경사모델에 대하여 구해진 이론자료를 평활화 제한법을 사용하여 역산을 수행한 결과이다. 층의 수는 12개로 고정하였으며, 각 층의 두께는 심도가 증가함에 따라 지수함수적으로 증가하도록 설정하였다. Fig. 1과 마찬가지로 (b)는 동상성분, (c)는 이상성분, (d)는 동상과 이상성분을 모두 사용하여 역산을 수행한 결과이다. 평활화 제한법의 경우에는 주어진 모델의 제 1층의 심도와 역산을 위하여 분할한 층의 심도가 정확히 일치할 수 없으므로 이에 의한 오차를 피할 수 없다. 따라서 얻어진 결과는 Fig. 1의 Marquardt 법의 결과에 비하여 주어진 모델과는 상당한 차이를 보이고 있으며 제 1층과 2층의 경계를 정확하게 구분하지 못한다. 특히 이 경우 1층의 전기비저항이 주어진 모델보다 작게 나타나며 제 2층의 전기비저항 값도 모델의 참값과는 상당한 차이를 보인다. 하지만 전반적으로 경사모델에 대한 양호한 영상을 제시하고 있어, 정확한 전기비저항의 추정은 어렵지만 전반적인 지질구조의 파악에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 3은 Fig. 1과 경사모델에서 제 1층과 2층의 전기비저항이 역전된 경우, 즉 제 1층의 전기비저항이 100 ohm-m, 제 2층의 전기전도도가 10 ohm-m인 경우이다. 적용된 역산방법은 Marquardt 법으로 앞의 Fig. 1의 경우와 마찬가지로 매우 정확하게 경사모델을 추정하고 있다. Fig. 4는 동일모델에 대하여 평활화 제한법을 적용한 결과로 Fig. 2의 경우와 유사하게 전반적으로는 경사모델을 추정하고 있으나 그 정확성에서는 한계를 보이고 있다. 하지만 이 경우에 Fig. 2에서 보다는 비교적 제 2층의 참 전기비저항에 근접한 값을 보이는데 이는 제

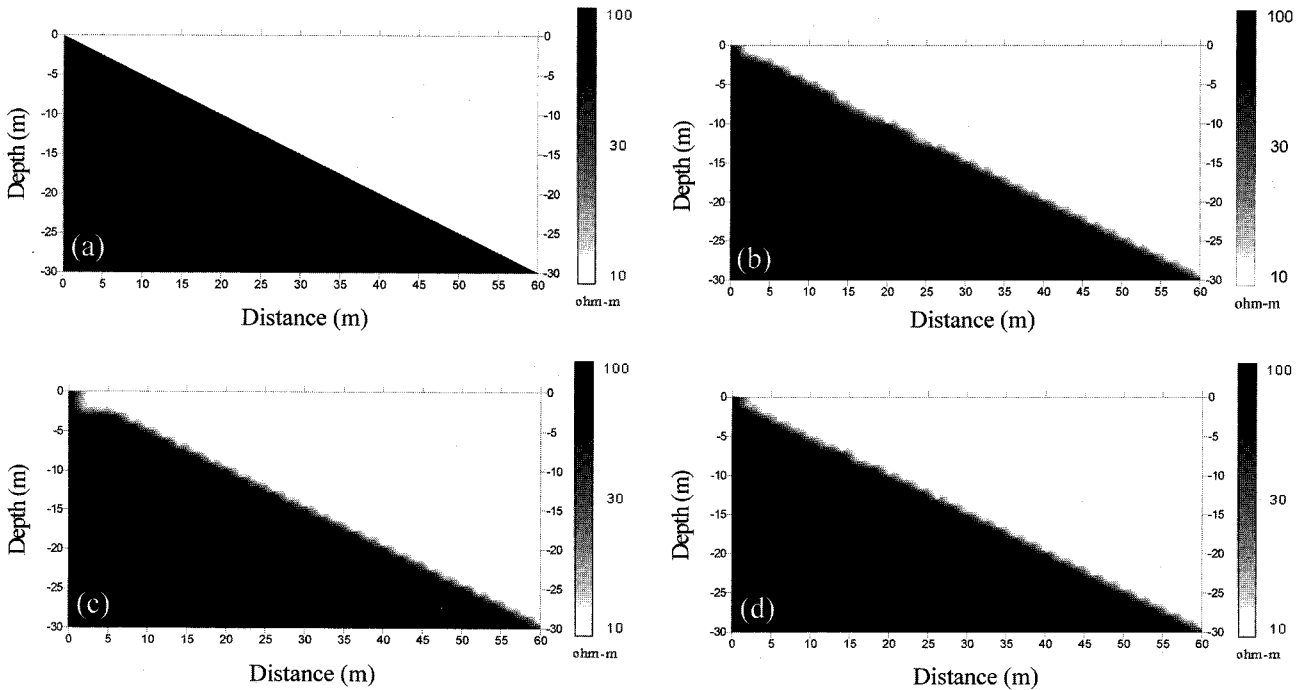


Fig. 1. (a) A two layer model and inverted images obtained from the Marquardt's 1D inversion of (b) real, (c) imaginary and (d) both real and imaginary components. Resistivities of the first and second layer are 10 and 100 ohm-m, respectively and thickness of the first layer linearly varies from 0 to 30 m.

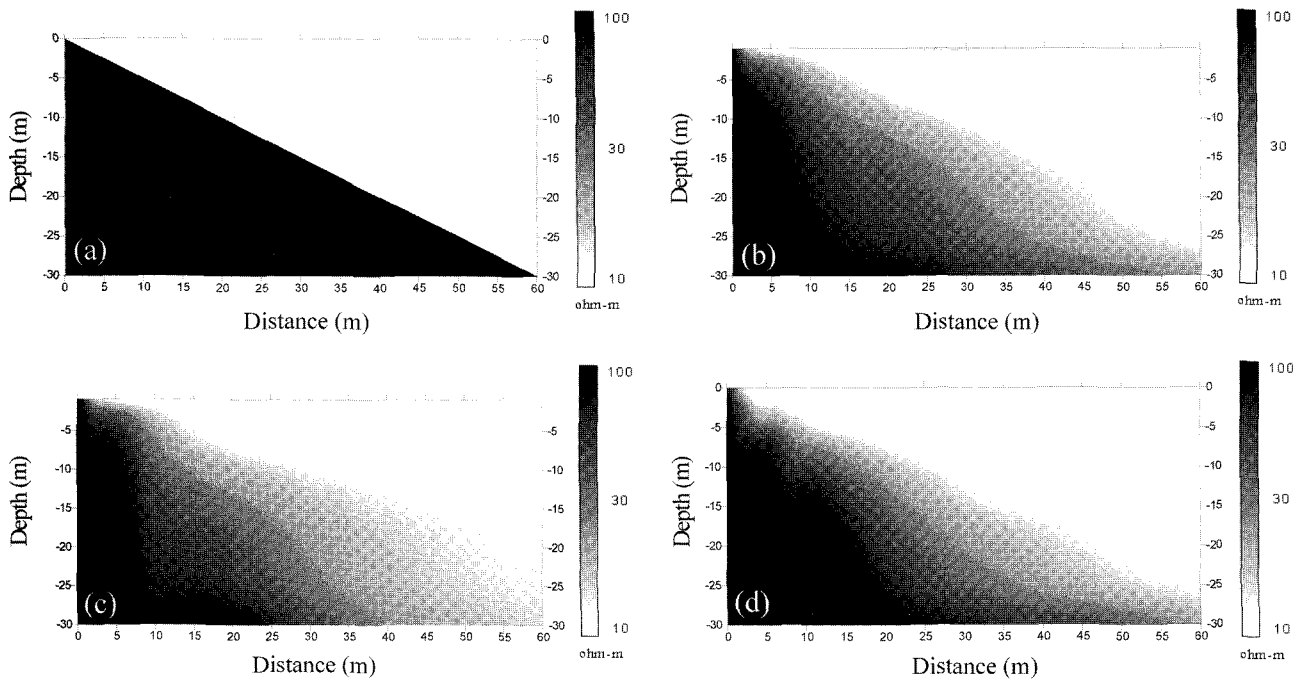


Fig. 2. (a) A two layer model and inverted images obtained from the Occam's 1D inversion of (b) real, (c) imaginary and (d) both real and imaginary components. The true model parameters are the same as those in Fig. 1.

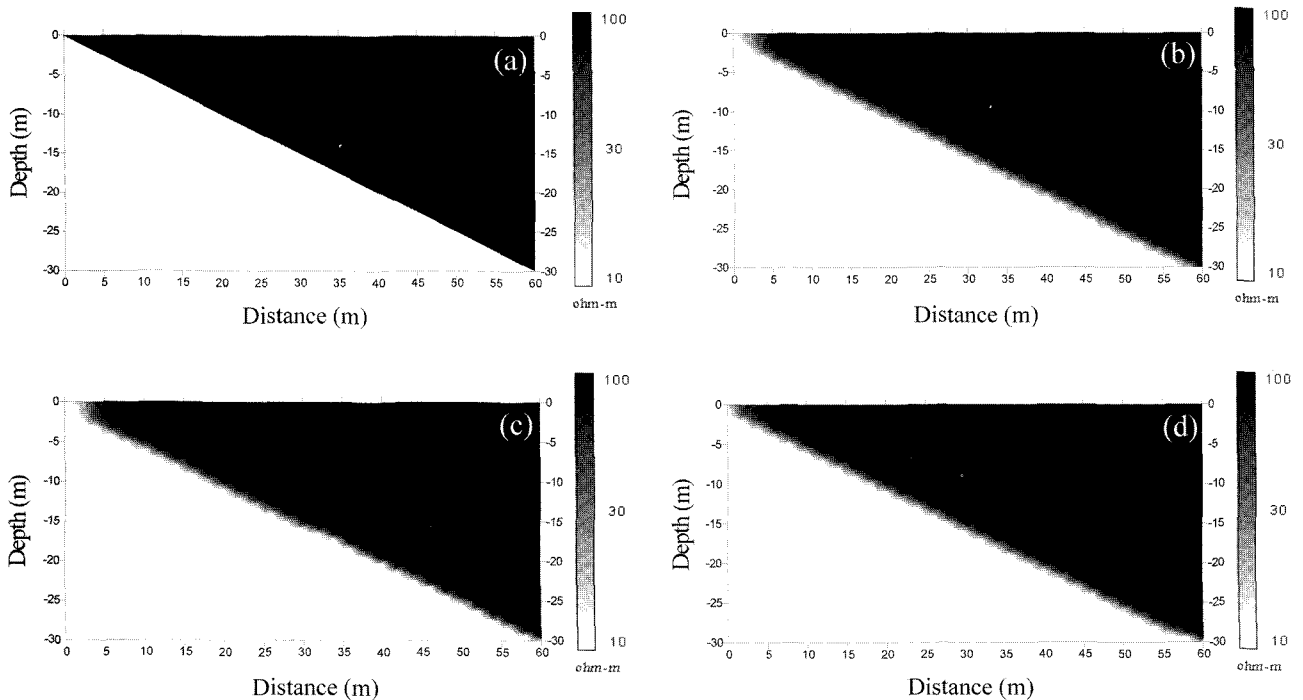


Fig. 3. (a) A two layer model and inverted images obtained from the Marquardt's 1D inversion of (b) real, (c) imaginary and (d) both real and imaginary components. Resistivities of the first and second layer are 100 and 10 ohm-m, respectively and thickness of the first layer linearly varies from 0 to 30 m.

1층의 전기전도도가 높을 때보다 낮은 경우에 전자파의 침투 심도가 증가하며, 2층의 전도성 지층에 의한 반응값이 크기 때문으로 보인다.

Fig. 5(a)는 1층부터 3층까지의 전기비저항이 100, 10, 1000

ohm-m이고 2층의 두께가 5m인 경사모델이며, (b)는 동상성분, (c)는 이상성분, (d)는 동상 및 이상성분을 모두 사용하여 Marquardt 법을 적용한 역산 결과이다. 동상성분만을 사용하였을 경우에는 각 층의 전기비저항은 비교적 정확하게 추정하

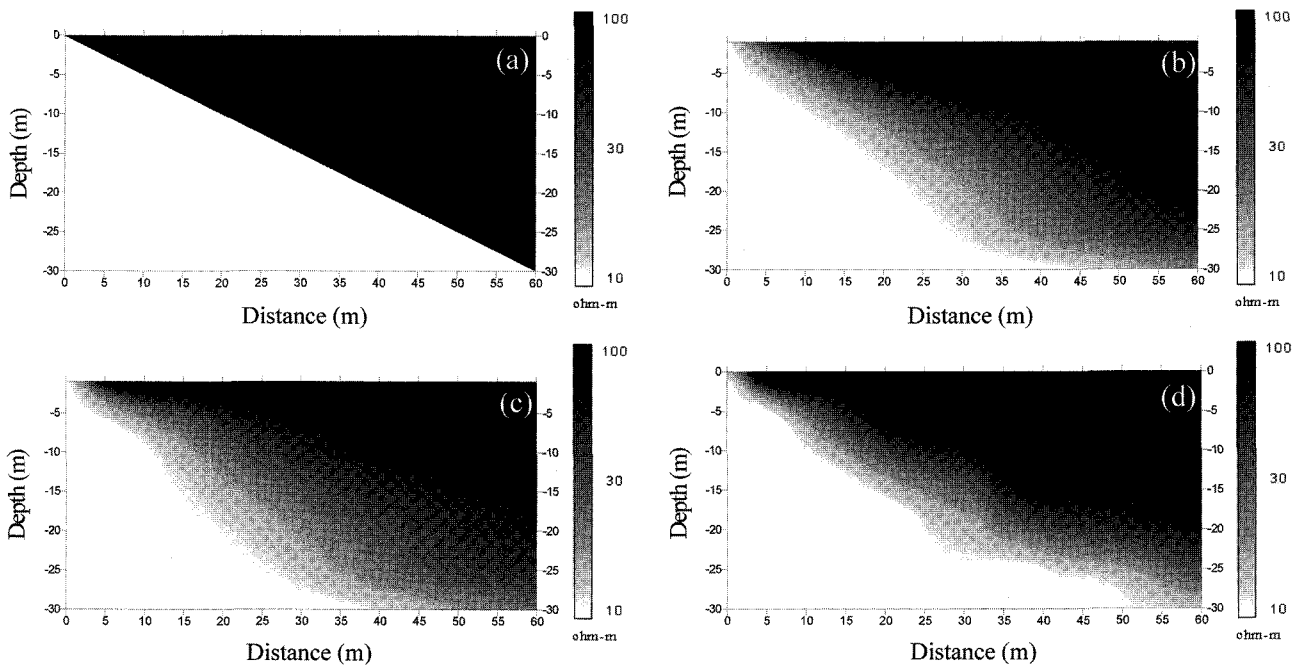


Fig. 4. (a) A two layer model and inverted images obtained from the Occam's 1D inversion of (b) real, (c) imaginary and (d) both real and imaginary components. The true model parameters are the same as those in Fig. 3.

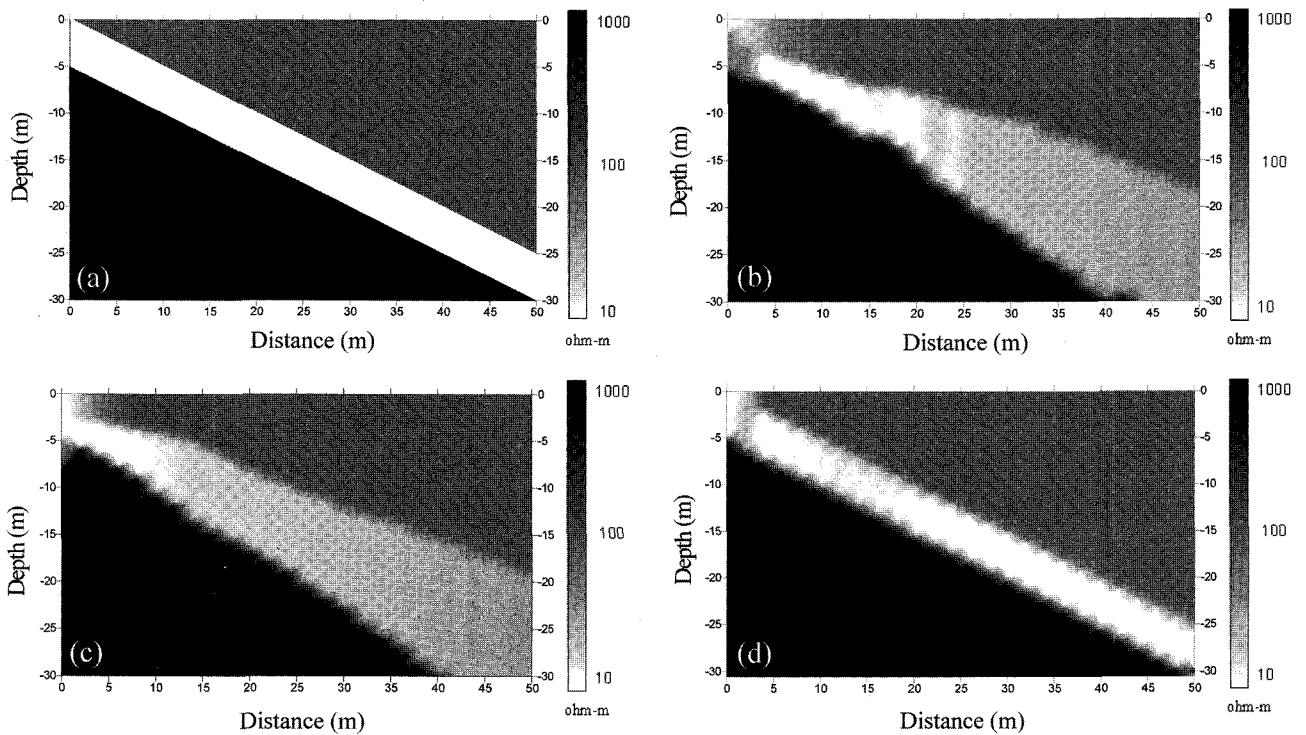


Fig. 5. (a) A three layer model and inverted images obtained from the Marquardt's 1D inversion of (b) real, (c) imaginary and (d) both real and imaginary components. Resistivities of the first, second and third layer are 100, 10 and 1000 ohm-m, respectively. Thickness of the second layer is 5 m and that of the first layer linearly varies from 0 to 30 m.

고 있으나 제 1층의 두께가 증가함에 따라 제 2층의 두께가 점차 증가하는 양상을 보이고 있다. 이는 제 2층의 전기비저항이 매우 낮은 10 ohm-m이기 때문에 소형루프 전자탐사법의

가탐심도의 한계로 인한 분해능 저하 때문인 것으로 생각된다. 이상성분만을 사용한 (c)의 경우에도 동일한 현상이 발생하며, 동상성분만을 이용한 (b)의 경우에 비하여 3층의 전기비저항

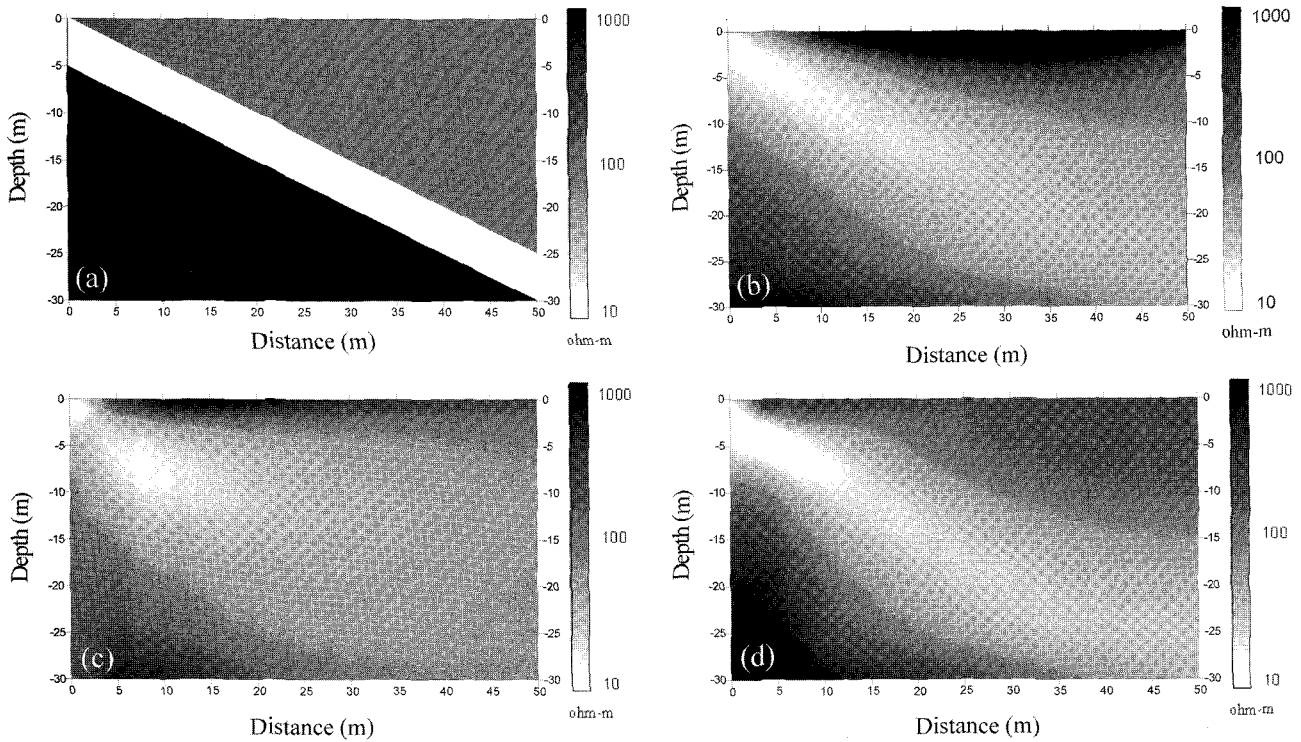


Fig. 6. (a) A three layer model and inverted images obtained from the Occam's 1D inversion of (b) real, (c) imaginary and (d) both real and imaginary components. The true model parameters are the same as those in Fig. 5.

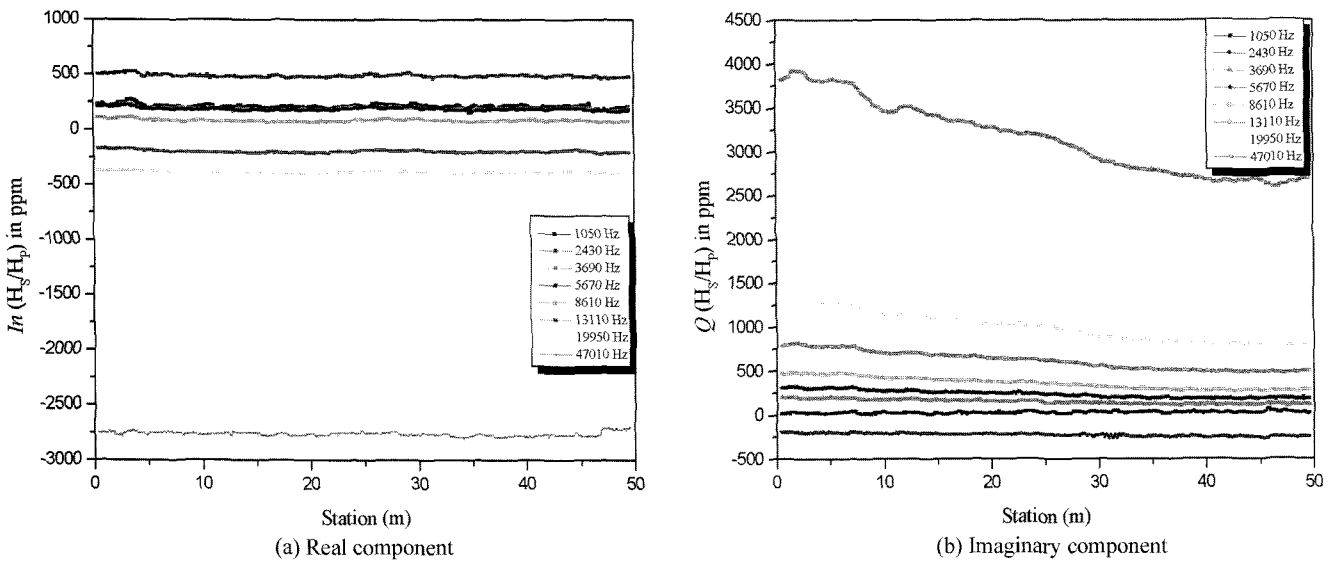


Fig. 7. Multiple frequency EM data obtained at a farm in Chuncheon, Korea. Data are acquired at discrete 8 frequencies, ranging from 1,050 to 47010 Hz. Source and receiver separation is 2.05 m and the height of sensor is 1 m. Median filter was applied to suppress noise.

이 더 낮게 나타나고 있어, 이상성분만을 사용할 경우가 동상 성분만을 사용할 경우보다 분해능이 더 낮음을 시사하고 있다. 이는 잡음이 없을 경우 이상성분은 주로 상부층의 전기전도도에 좌우되며, 동상성분은 하부층의 전기전도도를 반영한다는 Kaufman(1994)의 주장과 일치한다. 한편 동상과 이상성분을 모두 사용하여 역산을 수행한 (d)의 경우에는 가장 정확하게 모델변수를 추정하고 있어 가능하면 두 성분을 모두 사용하는

것이 가장 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 3층 경사 구조 모델에 대하여 평활화 제한법을 사용하여 역산을 수행한 결과이다. 동상성분만을 이용한 (b)의 경우에는 3층 경사 구조를 나타내기는 하지만 각 층의 전기비저항은 실제값과 상당한 차이를 보인다. 특히 제 1층의 두께가 증가할수록 그 전기비저항이 참값에 비하여 매우 큰 값을 보이며, 3층의 전기비저항은 참값보다 낮은 값

을 보인다. 또한 제 2층의 전기비저항도 참값보다 높은 전기비저항을 나타내고 있다. 한편 (c)의 이상성분만을 사용한 역산 결과에서는 거의 3층 구조로 해석하기에는 어려운 구조를 나타내고 있어, 이상성분만을 사용할 경우 역산결과에 오류가 발생할 가능성이 큼을 알 수 있다. 이 경우에도 동상과 이상성분을 모두 사용한 (d)가 가장 양호한 결과를 보이고 있으며, 동상성분만을 사용할 경우 나타나는 제 1층의 높은 전기비저항도 나타나지 않고 있다.

이상의 이론자료에 대한 분석에서 2층 및 3층구조의 경우에는 Marquardt 법이 평활화 제한법 보다는 비교적 양호한 결과를 보이는 것을 알 수 있었으며, 이는 평활화 제한법이 각 지층의 두께를 고정하기 때문에 나타나는 오차인 것으로 판단된다. 측정자료의 측면에서는 이상성분보다는 동상성분을, 그 보다는 동상과 이상성분을 모두 사용하는 것이 보다 효과적인 것으로 나타났다. 하지만 현장자료의 경우에는 동상성분이 이상성분에 비하여 매우 작기 때문에 주변의 잡음수준에 따라서는 동상성분을 사용하기 어려울 수 있으며, 이 경우에는 어쩔 수 없이 신호가 큰 이상성분을 사용해야 할 것이다. 특히 국내에서는 지하 매질의 전기전도도가 낮기 때문에 소형루프 전자탐사 반응의 크기가 작아질 수밖에 없으며, 이 경우 동상성분은 음의 값을 보이는 등 이상성분보다 잡음에 보다 취약한 특성을 보인다. 한편 이상성분은 동상성분에 비하여 대부분의 주파수 대역에서 상당히 큰 값을 보이므로 상대적으로 잡음에 강하다는 장점이 있다. 물론 Kaufman(1994)과 조인기와 임진택(2003a)에 의해 제기된 바와 같이 이상성분은 제 2층의 전기전도도에 민감하지 못하다는 약점이 있으나, 앞의 이론자료에 대한 역산결과에서 나타난 바와 같이, 간단한 층서 모델의 경우 비록 그 정확도는 떨어지지만 전반적인 지질구조에 대한 영상을 제시하는 데는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 즉 이상성분이 동상성분이나 두 성분을 모두 사용할 경우에 비하여 분해능이 떨어지기는 하지만, 동상성분이 잡음에 오염되어 있을 경우에는 이상성분만을 사용하여 해석하는 것이 하나의 대안이 될 수 있으며, 이 경우에도 실제 모델과 아주 동떨어진 결과를 제시하지는 않는다.

현장자료의 영상화

앞 절의 이론자료에 대한 역산 결과를 근거로 현장자료에 대한 역산을 시도하였다. 자료는 강원도 춘천시 강원대학교 농장 내에 있는 호밀밭에서 획득하였다. 측정 장비는 GEM2H로 송수신 간격은 2.05 m, 송수신기의 고도는 1 m, 측정주파수는 1050 Hz, 2043 Hz, 3690 Hz, 5670 Hz, 8610 Hz, 13110 Hz, 19950 Hz 및 47010 Hz의 8개를 사용하였으며, 배열방식은 수평동일면(HCP) 배열, 축선의 길이는 50 m 이다. Fig. 7은 현장에서 얻어진 원자료에 median filtering을 수행한 결과이다.

동상성분은 예상한 바와 같이 모두 500 ppm 이하의 작은 반응값을 보이며, 여러 개의 주파수 대역에서 음의 값을 나타내고 있다. 한편 이상성분의 경우에는 동상성분에 비하여 매우 큰 반응값을 보이며 2043 Hz 자료를 제외하면 모두 양의 값을 보이고 있으며, 전체적으로 주파수가 증가할수록 반응값의 크기가 커지는 1차원 모델의 반응양상과도 잘 일치하고 있다. 특히하게 음의 값을 나타내는 2043 Hz 자료는 이 지역에 나타나는 인공잡음에 의한 영향으로 생각되며 이는 동상성분에서 이 주파수의 반응값이 유독 크게 나타난다는 점도 이 주파수 자료가 잡음에 오염되었음을 간접적으로 시사하고 있다.

따라서 2043 Hz 제외한 이상성분을 측정자료로 역산을 수행하였다. 역산법은 앞 절의 이론자료 분석에서 비교적 양호한 결과를 나타낸 Marquardt 법을 사용하였으며, 지층의 수는 4로 고정하였다. GEM2H에서 얻어지는 자료는 연속자료이므로 매 1 m 측정 자료마다 역산을 수행하고, 내삽과정을 거쳐 2차원 단면을 작성하고 그 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 결과를 살펴보면 축선의 0~25 m 구간에서는 상부에 5 m 정도의 두께를 갖는 100 ohm-m 이하의 상대적 저비저항대가 분포하고 있으며 28~50 m 구간에서는 고비저항대가 분포하는 양상을 보이고 있다. 이 지역에 넓게 분포하는 춘천 화강암은 별다른 변형을 받은 적이 없으며 상당히 심부까지 풍화가 진행된 매우 균질한 매질에 해당된다. 단지 축선의 시작점(0 m 지점)에서 10 m 쯤 떨어진 지점에 강원대에서 운영하는 대형 우사가 있으므로 0~25 m 구간에 나타나는 천부의 저비저항대는 우사에서 방출된 축산폐수의 영향일 수도 있는 것으로 해석된다.

한편 Fig. 8은 소형루프 전자탐사 자료의 1차원 역산을 통하여 2차원 단면을 구성한 것이므로 근본적인 한계를 가질 수밖에 없다. 따라서 얻어진 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 동일축선에 대하여 쌍극자 배열 전기비저항 탐사를 수행하고 그 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 측정간격은 3 m이며, 축선의 길이는 전자탐사가 수행된 50 m 축선의 전구간이 역산단면에 포함되도록 하였다. 즉 전자탐사의 시작점(0 m 지점)이 전기비저항 단면에서는 5 m 지점에, 전자탐사 50 m 지점은 55 m 지점에 해당된다. 전기비저항 탐사결과와 경우에도 5~30 m 구간(전자탐사 0~25 m 구간)에 저비저항 이상대가 나타나고 있으며 그 이상의 구간에서는 고비저항대가 분포하고 있어 전반적인 양상은 전자탐사의 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 단지 전기비저항 탐사 결과에서는 지표 근처에 약 200 ohm-m 정도의 박층이 나타나고 그 하부에 수 10 ohm-m 대의 저비저항층이 나타나는데 반하여, 전자탐사 결과에서는 지표근처의 얇은 고비저항층이 나타나고 있지 않다. 이는 소형루프 전자탐사에서 사용된 배열이 HCP 배열로 지표근처의 감도가 VCP 배열에 비하여 떨어지기 때문에 나타난 현상으로 보이며(McNeill, 1980). 이를 극복하기 위해서는 VCP 배열을 함께 적용하면 해결 가능할 것으로 판단된다.

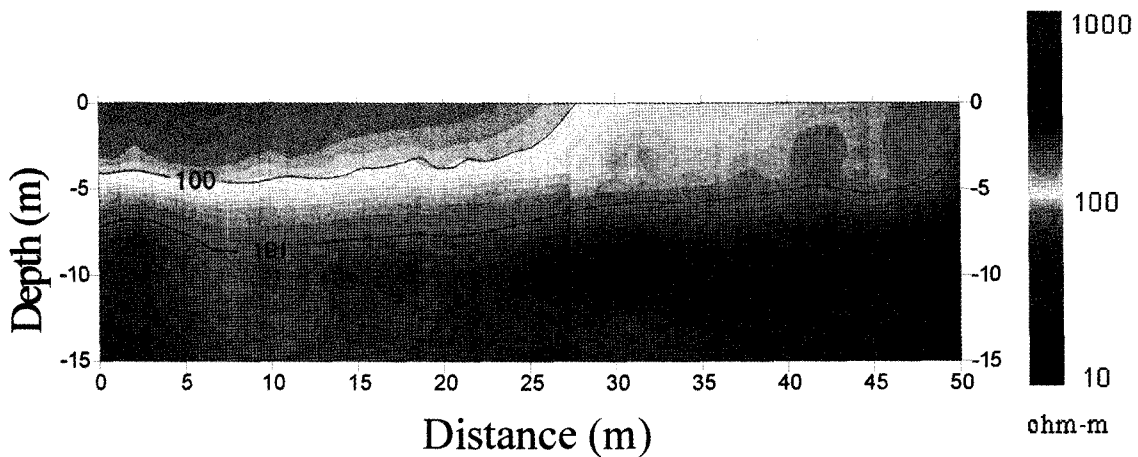


Fig. 8. 2D resistivity image reconstructed from the 1D Marquardt's inversion of imaginary data acquired at a farm in Chunchon, Korea. Number of layers is fixed at 4 in all the inversion.

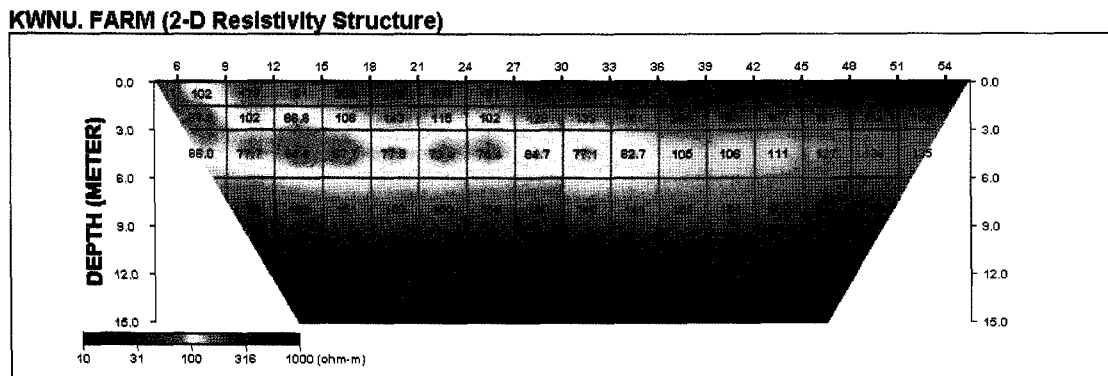


Fig. 9. 2D resistivity image from the dipole-dipole resistivity survey along the same survey line of Fig. 8.

결론 및 토의

소형루프 전자탐사 자료의 1차원 역산을 통한 2차원 영상화의 가능성을 타진하기 위하여 2층 및 3층 구조를 가정한 경사 모델에 대하여 얻어진 이론자료에 대하여 역산을 수행하고 그 결과를 사용하여 2차원 단면을 구성하였다. 이론자료에 대한 분석결과 동상성분과 이상성분을 모두 사용하는 것이 가장 정확한 결과를 보이는 것으로 나타났으며, 하나의 성분만을 사용할 경우에는 이상성분보다는 동상성분이 유리한 것으로 나타났다. 하지만 전반적으로 볼 때 모든 방법이 모두 비교적 정확하게 지하의 참 추정하였다. 역산법은 각 지층의 두께를 고정하는 평활화 제한법보다는 이를 모델변수로 하는 Marquardt 법이 보다 양호한 결과를 보이는데, 이는 평활화 제한법에서 층의 두께를 고정하는데서 오는 오차 때문인 것으로 판단된다.

이러한 결과를 바탕으로 춘천에 위치한 강원대학교 농장에서 얻어진 현장자료에 대하여 역산을 수행하고 이를 처리하여 2차원 영상을 구성하였다. 현장자료의 경우 동상성분은 그 크기가 작고 잡음에 오염된 것으로 판단되어, 이상성분만을 사용

하여 역산을 수행하였다. 역산방법은 Marquardt 법을 사용하였으며 층의 수는 4로 고정하였다. 동일측선에서 수행된 전기비저항 탐사 결과와 전자탐사로부터 얻어진 2차원 영상을 비교한 결과 전반적으로 잘 일치하는 양호한 결과를 나타내었다. 따라서 소형루프 전자탐사법은 잡음에 취약하다는 단점은 있으나, 탐사작업의 편의성이 뛰어나고 신속한 측정이 가능하다는 장점을 지니고 있으므로, 향후 평면적 전기비저항 분포 파악을 위한 mapping은 물론 지하의 2차원 전기비저항 영상을 제공해줄 수 있는 효과적인 방법으로 자리 잡을 것으로 기대된다.

참고문헌

설순지, 송윤호, 조성준, 손정술, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사법을 이용한 매설물 탐지 및 지하 전기비저항 영상화: 물리탐사, 5, 309-315.
 송성호, 용환호, 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.
- 장현삼, 임해룡, 홍재호, 1998, 쓰레기 매립장의 토양오염 조사를 위한 전자탐사 및 전기탐사: 물리탐사, **1**, 87-91.
- 조인기, 임진택, 2003a, 소형루프 전자탐사법에서의 주파수 수직탐사: 물리탐사, **6**, 119-125.
- 조인기, 임진택, 2003b, 주파수 수직 전자탐사 자료의 1차원 역산: 물리탐사, 심사중.
- Huang, H. and Fraser D. C., 2003, Inversion of helicopter electromagnetic data to an magnetic conductive layered earth: *Geophysics*, **68**, 1211-1223.
- Huang, H. and Won, I. J., 2003, Real-time resistivity sounding using a hand-held broadband electromagnetic sensor: *Geophysics*, **68**, 1224-1231.
- Kaufman, A. A., 1994, Geophysical field theory and method, Part C: Academic Press, Inc. 41-57.
- McNeill, D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers: Technical Note TN-6, Geonics Ltd, Toronto.
- 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.