물리탐사
Vol. 5, No. 1, 2002, p. 23~32

비접지식 전기비저항 탐사 - 적용성과 한계

이성곤[1] · 조성준[1] · 송윤호[1] · 정승환[1]

Capacitively-coupled Resistivity Method - Applicability and Limitation

Seong Kon Lee[1], Seong-Jun Cho[1], Yoonho Song[1] and Seung-Hwan Chung[1]

요 약 : 비접지식 전기비저항 탐사는 땅에 접지전극을 설치하기 어려운 곳에서 전기비저항 탐사를 수행할 수 있는 방법으로 국내에서도 관심이 높아지고 있는 방법이다. 이 방법의 기본원리는 땅과 송수신 안테나의 용량결합(capacitive coupling)에 의하여 지하로 전류를 주입하고 이에 의한 전위차를 측정하여 자료를 획득하는 것이다. 본 연구에서는 쌍극자 및 단극 형태의 송수신 안테나를 일렬로 배치하는 방사 배열(radial array)에 대한 기하학적 상수를 유도하였다. 또한, 기존의 접지식 전기비저항 해석 알고리듬을 이용하여 비접지식 전기비저항 자료를 해석하기 위한 자료 전처리 및 변환 과정을 제시하였다. 즉, 획득된 탐사 자료를 기하학적 상수를 이용하여 일단 겉보기 비저항으로 변환한 후 쌍극자 배열이나 변형된 쌍극자 배열 자료로 보간 혹은 재샘플링함으로써 기존의 접지식 전기비저항 역산 알고리듬을 이용하여 해석하였는데, 동일 측선에서 수행한 접지식 및 비접지식 탐사 자료와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 비접지식 전기비저항 탐사법은 전류를 많이 주입할 수 없는 기기 상의 단점을 갖고 있음을 알 수 있었는데, 특히 전기비저항이 낮은 곳이나, 전기적 잡음이 심한 곳, 그리고 송수신 안테나의 접촉이 좋지 않은 지역에 적용함에 있어 세심한 주의가 요구된다. 그러나, 송수신 안테나를 일렬로 배열하여 견인함으로써 연속적으로 탐사 자료를 획득할 수 있고 전극 설치가 불가능한 지역에서 전기비저항 탐사를 수행할 수 있으므로, 신속하게 지하 천부에 대한 전기비저항 분포를 알고자 할 때 유용하게 쓰일 것으로 생각된다.

주요어 : 비접지식 전기비저항 시스템, 기하학적 상수, 연속 측정, 신호대 잡음비, 용량결합

Abstract : Capacitively-coupled resistivity (CCR) system is known to be very useful where galvanic contact to earth is impossible, such as the area covered with thick ice, snow, concrete or asphalt. This system injects current non-galvanically, i.e., capacitively to earth through line antenna and measures potential difference in a same manner. We derived geometric factor for two types of antenna configuration and presented the method of processing and converting the data obtained with CCR system suitable to conventional resistivity inversion analysis. The CCR system, however, has limitations on use at conductive area or electrically noisy area since it is very difficult to inject sufficient current to earth with this system as with conventional resistivity system. This causes low S/N ratio when acquiring data with CCR system and great care must be taken in acquiring data with this system. Additionally the uniform contact between line antennas and earth is also crucial factor to obtain good S/N ratio data. The CCR method, however, enables one to perform continuous profiling over a survey line by dragging entire system and thus will be useful in rapid investigation of conductivity distribution in shallow subsurface.

Keywords : capacitively-coupled resistivity (CCR), geometric factor, continuous profiling, S/N ratio, data acquisition

서 론

일반적으로 전기비저항 탐사는 땅에 접지 전극을 설치하고 전류 전극에서 직류 혹은 매우 낮은 주파수의 전류를 흘려준 후 전위 전극에서 전위차를 측정함으로써 지하의 전기비저항 구조를 규명하는 방법이다. 전기비저항 탐사는 이미 국내에서도 자원탐사, 지반 조사 및 환경 등 여러 분야에서 슐럼버저 배열 등의 수직탐사나 쌍극자 배열을 이용한 수평 탐사 등이 보편화되었고, 최근에는 토모그래피 및 3차원 탐사 등으로 그 적용 기술 및 분야가 발전되고 있다(이명종, 2000). 그러나, 최근에는 물리탐사의 적용분야가 확대됨에 따라 아스팔트 혹은 콘크리트가 덮여 있어 접지전극 설치가 불가능한 지역에서의 전기비저항 탐사에 대한 수요가 발생하고 있으며, 이에 대한 대안으로 접지전극을 설치하지 않고 전기비저항 탐사를 수행

*2001년 10월 26일 접수
1) 한국지질자원연구원, 탐사개발연구부 (Geophysical Exploration and Mining Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

할 수 있는 비접지식 전기비저항 탐사법에 대한 관심이 높아지고 있다. 비접지식 전기비저항 탐사 시스템은 지표에 빙하, 눈, 혹은 아스팔트가 덮여 있어 접지전극의 설치가 어렵거나, 접지저항이 매우 높은 곳에서 전기비저항 탐사를 수행할 수 있는 장점을 가지고 있으며(Douma, *et al.*, 1994; Timofeev, 1994), 둑이나 방조제와 같이 매우 길게 연장된 지역에서 신속하게 탐사하고자 하는 경우 탐사 작업이 용이하고 작업 소요 시간이 적기 때문에 적합한 방법이며(Grard and Tabbagh, 1991; Shima *et al.*, 1995), 또한 고고학 분야에도 응용되고 있다(Tabbagh *et al.*, 1993).

이러한 수요에 맞추어 국내에서도 비접지식 전기비저항 탐사법에 대한 관심이 높아지고 있으며, 앞으로도 많이 도입될 것으로 전망된다. 그러나, 국내에서 아직 현장 적용성을 시험하는 단계일 뿐 본격적인 적용 사례는 많지 않은 편이며, 비접지식 전기비저항 기기의 현장 적용에 대한 높은 관심에도 불구하고 그 기본적인 원리에 대하여 국내에서는 발표된 연구 결과가 없는 등 올바른 적용에 어려움이 많은 실정이다. 이와 더불어 국내 물리탐사 기기의 시장 여건상 비접지식 전기비저항 탐사 기기는 외국산에 의존할 수 밖에 없는 실정이기 때문에 비접지식 탐사 자료 획득 및 해석 또한 이러한 기기에 종속될 가능성이 높아지는 등 이미 국내에서 개발된 우수한 전기비저항 해석 기술을 적용하지 못할 우려도 제기되고 있다.

따라서, 이 연구에서는 국내에 현재 도입되어 있는 미국 Geometrics사의 OhmMapper®를 기본으로 비접지식 탐사 방법의 원리 및 현장 탐사 자료 획득 과정을 소개하고, 이로부터 얻어진 연속된 비접지식 전기비저항 탐사 자료를 쌍극자 배열 또는 변형된 쌍극자 배열(김정호 등, 2001)의 접지식 탐사 자료로의 변환 처리 과정을 거침으로써 기존의 전기비저항 탐사 자료 역산 알고리듬을 이용하여 해석하는 방법을 제시하고자 한다. 이와 아울러 현재까지 현장에서 획득한 탐사 자료를 통하여 비접지식 전기비저항 탐사법의 현장 적용상의 문제점 및 이 시스템의 한계점도 함께 논의하고자 한다.

기초 이론 및 자료 획득

비접지식 전기비저항 시스템은 capacitively-coupled resistivity(CCR) system이라고도 불리는데, 이는 지하에 주입되는 전류가 땅과 전극의 용량결합에 의하여 이루어지기 때문이다. 지구물리탐사 분야에서는 Grard and Tabbagh(1991)에 의하여 점(point) 전극의 여러 배열에 대한 비접지식 전기비저항 시스템의 기초 원리가 제안되었고, 또한 Timofeev(1994)에 의하여 선형 안테나 배열에 대한 기초 원리가 제안되었다. 전자는 현재 프랑스의 IRIS사 시스템의 기본이 되었고, 후자는 캐나다 지질조사소에서 RUSCAN이라는 이름으로 처음으로 그 원형이 개발된 이후 현재 미국의 Geometrics사 시스템의 기본이 되었다. 이상의 각 시스템은 용량결합에 의하여 전류를 주입하는

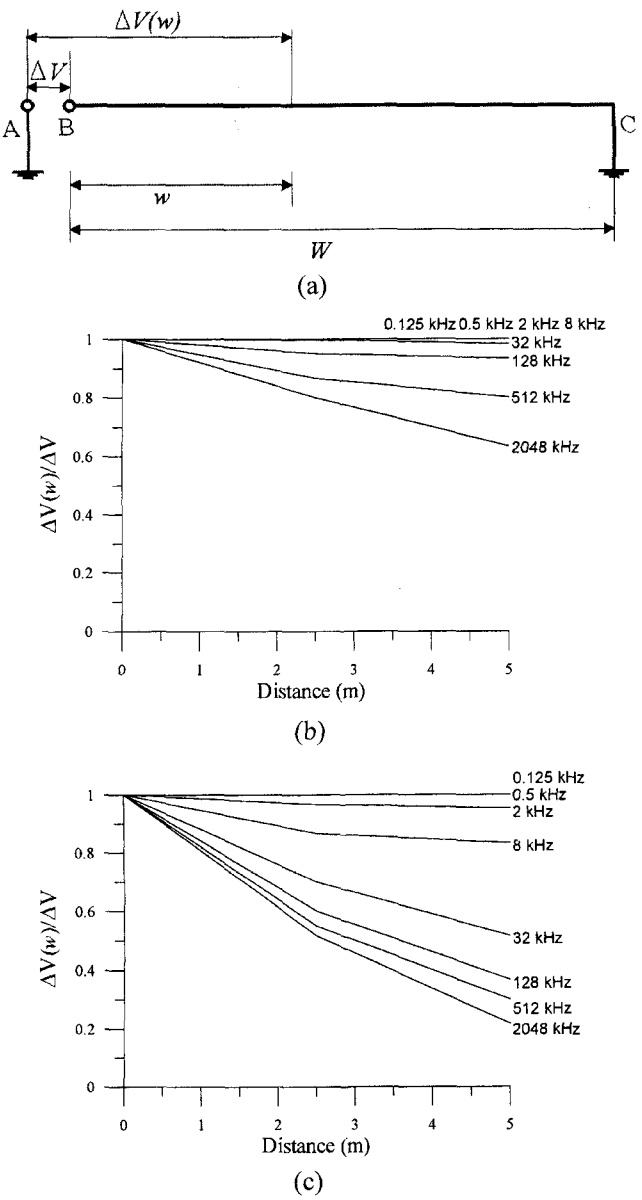


Fig. 1. The ratio of the potential difference between terminals A, B to the potential between A and internal point w apart from B with frequencies and contact resistances (After Timofeev, 1994). (a) Schematic sketch of grounded cable. C is grounded position and the cable is extended by W to B. (b) When contact resistance is 2.5 kohm and the length of cable W is 5 m. (c) When contact resistance is 250 kohm and the length of cable W is 5 m.

면에서는 원리적으로 동일하나, 기하학적 상수 등에서는 서로 다른 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 선형 안테나를 이용하는 Geometrics사의 OhmMapper®를 기본으로 서술하고자 한다.

비접지식 전기비저항 시스템의 기본적인 원리는 다음과 같은 실험적 결과에 기초하고 있다. Fig. 1(a)는 A 지점으로부터 길이 W만큼 떨어진 C 지점에 접지되어 있고 B 지점까지 연장한 도체 전선을 나타내고 있다. 이때 A, B 지점의 전위차를 ΔV, A지점과 B로부터 w만큼 떨어진 지점과의 전위차를 $\Delta V(w)$

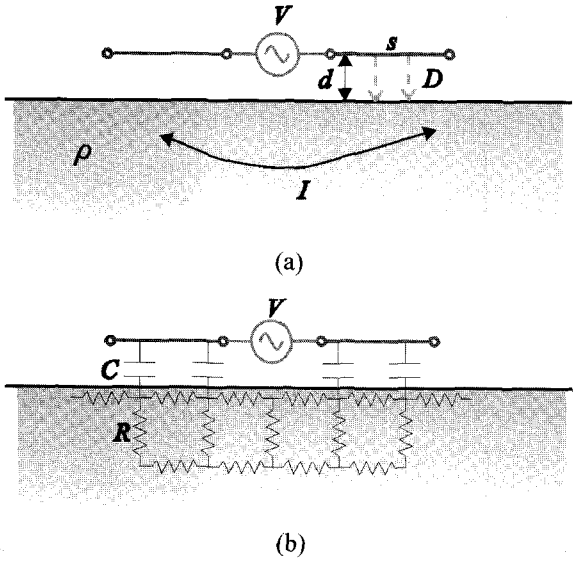


Fig. 2. Schematic sketch of (a) fundamental principle of CCR system and (b) its circuit analogy.

라 하면, 직류 전압이거나 혹은 교류라 하여도 접지저항이 낮은 경우 ΔV와 $\Delta V(w)$는 항상 같을 것이다. 그러나, C 지점의 접지저항이 커지거나 혹은 인가되는 교류 전압의 주파수가 커지는 경우 $\Delta V(w)/\Delta V$ 비율은 선형적으로 감소함이 실험적으로 알려져 있으며, 이에 대한 한 예로 C지점의 땅에 대한 접지 저항이 각각 200, 2 kohm이고, 길이 $W = 5$ m일 때 양단에 걸리는 교류 전압의 주파수에 따라 양단 전위차 ΔV와 접지전선 내에서의 전위차 $\Delta V(w)$의 비 $\Delta V(w)/\Delta V$ 가 Fig. 1(b), (c)에 나타나 있다(Timofeev, 1994). 이는 전압 인가점으로부터 접지 전선 내부에서 접지 지점까지의 거리에 따라 전류 분포가 달라짐을 의미하는데, 즉 전류가 접지를 통해서 뿐만 아니라 접지 전선 중간에서 변위전류 형태로 땅으로 흐르기 때문으로, 접지 저항이 무한대인 경우 원리적으로는 지표 위에 설치된 전자기파를 방사하는 단극 안테나와 같게 된다(King and Smith, 1981).

Fig. 2는 위의 실험적 사실에 기초하여 비접지식 전기비저항 시스템을 이용하여 지하에 전류가 주입되는 원리를 나타내고 있는 모식도이다. ρ 의 전기비저항을 갖는 땅을 저항 R을 갖는 회로라 할 때 땅과 절연되어 있는 금속판에 교류 전압 V를 인가하면, 땅과 금속판간의 용량적 결합(capacitively coupling)에 의하여 금속판과 땅 사이에는 변위전류(D)의 형태로, 땅 속에서는 전도 전류의 형태(I)로 전류가 흐르게 되는데 이 때 발생하는 전위차를 같은 원리를 이용하여 측정함으로써 땅의 전기비저항을 측정하게 된다. 이 때 송수신 케이블과 땅은 각각 하나의 capacitor 시스템이라 할 수 있다. 따라서, 비접지식 전기비저항 탐사기로 지하를 탐사하는 것을 전기회로적인 관점에서 본다면, 비접지식 전기비저항 탐사기의 안테나와 땅 사이에는 여러 개의 capacitor가 연결되어 있고, 이를 통하여 여러 개의 저항으로 연결되어 있는 지하로 전류를 주입하고 이에 의한 전위차를 측정하는 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 비접지식 전기비저항 시스템이나 접지식 전기비저항 시스템은 전류를 지하에 주입하는 방법의 차이일 뿐 전류를 주입하고 전위차를 측정하는 전기비저항 탐사의 근본 원리는 동일하다고 볼 수 있다.

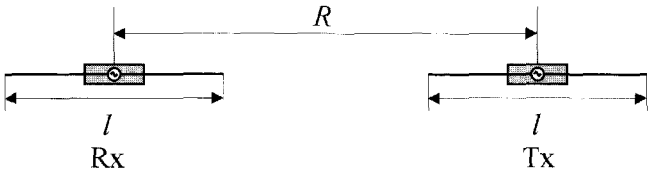


Fig. 3. Linear radial array of two dipole antennas.

Fig. 3은 비접지식 전기비저항 시스템에서 일반적으로 많이 쓰이고 있는 쌍극자 안테나를 일렬로 배열한 방사배열(linear radial array) 송수신 안테나를 모식적으로 나타낸 것이다. 이외에 송수신 안테나 배열로 단극 형태를 이용하거나 평행하게 배치하는 등의 여러 기하학적 배열 방법이 있을 수 있다. 그러나, 견인 등 현장 작업의 편리성과 사용 기기의 지원 여부 때문에 주로 쌍극자 형태의 송수신 안테나 케이블을 일렬로 배치하는 방사배열을 이용하고 있으며, 본 연구에서 사용된 기기인 OhmMapper® 또한 이 배열을 이용하고 있다. 이 배열은 Fig. 3과 같이 각각의 안테나의 중간 부분에 전압을 인가하고 측정하는 제어부가 있고, 각각의 제어부에는 양쪽으로 안테나 역할을 하는 $l/2$의 길이를 갖는 2조의 케이블이 부착되어 있어 전체 길이는 l이며, 두 개의 송수신 안테나는 중심간 거리가 R 만큼 떨어져 있다.

Fig. 4는 비접지식 전기비저항 기기로 현장 탐사를 하고 있는 사진으로, 사용한 기기는 미국 Geometric사의 OhmMapper TR 1®이다. 이 시스템은 측정의 시작과 종료를 제어하고 측정 자료를 저장하는 콘솔과, 수신 제어기와 수신 케이블, 송신 제

Fig. 4. A picture showing continuous data measurement with CCR system.

어기와 송신 케이블로 구성되어 있다. 송수신 케이블은 각각의 제어기에 각각 2개씩 부착되는데, 하나의 길이가 각각 2.5 m와 5 m로서 5 m 및 10 m 길이의 쌍극자로 사용할 수 있으며, 송신 안테나 신호의 주파수는 16.5 kHz이다. 송신안테나에서부터 주입되는 전류량의 크기는 송신기에서 모니터링하여 무선통신을 통해 수신기로 보내주고, 수신기에서는 측정된 전위차를 전류량으로 정규화시켜 콘솔로 보내주어 자료를 저장하게 되는데, 이 때 측정값의 단위는 μV/mA이다. 측정이 시작되면 송신제어기에서는 일정 시간 간격마다 지속적으로 측정할 수 있으며 탐사 기기 시스템을 견인함으로써 연속적으로 자료를 취득할 수 있다. 따라서, 정확한 탐사위치를 알기 위해서는 탐사 측선 상에서 측정값의 위치를 기록하여야 하고, 자료 취득 후 일정 시간마다 획득된 자료를 적절한 위치로 바꾸어 주어야 한다. 위치에 대한 정보는 측선 시작점으로부터 일정 거리마다 수동으로 "MARK" 신호를 콘솔로부터 보내거나, GPS(Global Positioning System)를 이용하여 일정 시간마다 측정점의 위치 정보를 기록하고 후처리(post-processing)할 수도 있다.

이와 같은 현장 작업을 통하여 얻은 측정값은 기하학적 상수를 곱하여 겉보기 전기비저항 ρ_a으로 변환할 수 있다.

$$\rho_a = K\frac{\Delta V}{I} \tag{1}$$

여기서 K는 기하학적 상수로서 송수신 안테나의 길이와 송수신 안테나 사이의 거리에 따라 정해지게 된다. 이 값은 송수신 안테나 내에서의 전류분포를 각각 $I_{Tx}(x)$, $I_{Rx}(y)$라 하면 식 (2)와 같은 적분 형태로 나타낼 수 있으며(Timofeev, 1994), 각 송수신 안테나의 위치 및 사용된 안테나의 종류 등에 의해 달라지는 전류 분포에 따라 K값을 구하여야 한다.

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\pi}\int_{Tx}\int_{Rx}\frac{I_{Tx}(x)I_{Rx}(y)}{I_{Tx}(x=0)I_{Rx}(y=0)(R-x+y)^3}dxdy \tag{2}$$

비접지식 전기비저항 시스템에 대한 기하학적 상수의 유도

비접지식 전기비저항 탐사는 위에서 언급한 바와 같이 안테나의 길이와 두 안테나의 거리를 달리하면서 송수신 안테나를 일렬로 배치하여 자료를 획득하는 방법 이외에 안테나 한쪽을 접지하여 단극 안테나를 이용하거나, 송수신 안테나를 평행하게 배치하는 등의 여러 방법을 이용하여 탐사를 수행할 수도 있다(Timofeev, 1994; Shima, 1995). 각각의 경우 안테나 배열 및 접지 여부에 따라 송수신 안테나 내부에서의 전류 분포는 달라진다고 알려져 있으며(King and Smith, 1981), 이에 따라 식 (2)에서 알 수 있듯이 기하학적 상수도 달라짐을 알 수 있다.

그러나, 송수신 안테나 배열들은 사용 시스템의 지원 여부에 종속적이므로, 본 연구에서 사용된 OhmMapper®로 유일하게 구현할 수 있는 쌍극자 형태의 안테나를 일렬로 배열하는 방사형태의 송수신 배열에 대한 기하학적 상수에 그 초점을 맞추고자 하며, 이에 추가하여 이 시스템으로는 구현이 쉽지 않으나 이론적으로 가능한 배열인 단극 안테나 배열에 대한 기하학적 상수에 대하여도 논의하고자 한다. 앞에서 언급한 바와 같이 비접지식 전기비저항 시스템의 송수신 안테나 내부에서의 전류분포는 전압 인가점으로부터 선형적으로 감소함이 실험적으로 알려져 있으며, 송수신 안테나의 길이를 같게 하는 것이 작업 및 자료 해석에 용이하므로 일반적이다. 송수신 안테나가 각각 $l/2$의 길이를 갖는 2개의 케이블로 이루어져 있어, 전체 길이가 l로 동일하고, 이 두 안테나 내부에서의 전류분포가 가운데 전압 인가점으로부터 양끝으로 가면서 Fig. 1과 같이 선형적으로 감소한다고 가정하면, 송수신 안테나 내부에서의 전류분포 $I_{Tx}(x)$, $I_{Rx}(y)$는 각각 식 (3)과 같은 함수로 표현할 수 있다.

$$I(x) = \begin{cases} I_0\left(1+\dfrac{2x}{l}\right), & -l/2 \le x < 0 \\ I_0\left(1-\dfrac{2x}{l}\right), & 0 < x \le l/2 \\ I_0, & x=0 \end{cases} \tag{3}$$

Fig. 3과 같이 R을 송수신 안테나의 중심간의 거리, l은 송수신 안테나의 길이라 하고, 식 (2)의 적분을 수행하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{\pi l^2}{K} &= l\ln\left(\frac{R+l}{R}\right)+2(R+l/2)\ln\left(\frac{R(R+1)}{(R+l/2)^2}\right)+l\ln\left(\frac{R}{R-1}\right) \\ &\quad +2(R-l/2)\ln\left(\frac{R(R-1)}{(R-l/2)^2}\right) \\ &\quad -2\left[l\ln\left(\frac{R+l/2}{R-l/2}\right)+2R\ln\left(\frac{(R+l/2)(R-l/2)}{R^2}\right)\right]\end{aligned} \tag{4}$$

안테나 간의 거리와 안테나의 길이의 비율에 따라 값의 변화를 살펴보기 위하여 아래의 식 (5)와 같이 새로운 변수 b를 도입하면,

$$b = \frac{2R}{l} \tag{5}$$

기하학적 상수는 다음과 같이 유도할 수 있다(부록 A).

$$K = \frac{l\pi}{\ln\left[\left(\dfrac{b^2}{b^2-1}\right)^{2b}\left(\dfrac{b^2+2b}{(b+1)^2}\right)^{b+2}\left(\dfrac{b^2-2b}{(b-1)^2}\right)^{b-2}\right]} \tag{6}$$

한편, Fig. 5와 같이 송수신 안테나 모두 한쪽 끝이 접지되어

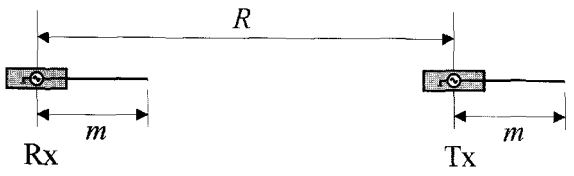


Fig. 5. Linear radial array of two monopole antennas.

있는 경우, 즉 전압 인가점으로부터 한쪽 방향으로만 케이블이 펼쳐져 있는 단극 형태의 안테나를 이용하는 경우는 앞에서와 마찬가지로 안테나 내부에서의 전류 분포가 인가점으로부터 선형적으로 감소한다고 가정하면 전류분포는 다음과 같이 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$I(x) = I_0\left(1 - \frac{x}{m}\right), \quad 0 \le x \le m \tag{7}$$

이를 이용하여 앞에서와 같이 식 (7)을 식 (2)에 대입하여 적분을 수행하고 아래의 식 (8)를 이용하여 정리하면 기하학적 상수는 식 (9)와 같이 유도된다(부록 B).

$$b = \frac{2R}{m} \tag{8}$$

$$K = \frac{m\pi}{\ln\left(\frac{b^2}{b^2-4}\right)^{b/4} - \frac{1}{b}} \tag{9}$$

자료 전처리와 접지식 전기비저항 자료로의 변환, 해석

Fig. 6은 한국지질자원연구원 내 잔디밭에서 비접지식 전기비저항 탐사를 수행한 결과 획득된 자료를 보여주고 있다. 본 연구에서는 5 m 길이를 갖는 쌍극자 안테나를 이용하여 연속적으로 자료를 획득하였으며, 전극전개수 n=5 까지 자료를 획득하였다.

Fig. 6(a)는 획득된 원시 자료를 나타내고 있다. Fig. 6(a)에서 보듯이 지표와 송수신 안테나의 접촉불량, 주위의 전기적 잡음 등에 의하여 무작위적인 스파이크 형태의 전기적 잡음이 포함되어 있는데 일반적으로 거의 모든 비접지식 전기비저항 자료에는 이러한 전기적 잡음 등이 포함되어 있다. 따라서, 우선적으로 탐사 자료에 포함되어 있는 무작위적인 잡음을 제거하여야 하며 본 연구에서는 이를 위하여 이동평균을 적용하였다. 경우에 따라서는 중간값 필터를 이용하거나 자료의 질을 높이기 위하여 같은 전개수 n에 대하여 중복 측정하여 중합을 실시할 수도 있다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 자료에 3점 이동평균을 취한 자료로서 Fig. 6(a)에 비하여 잡음이 많이 제거된 것을 볼 수 있다.

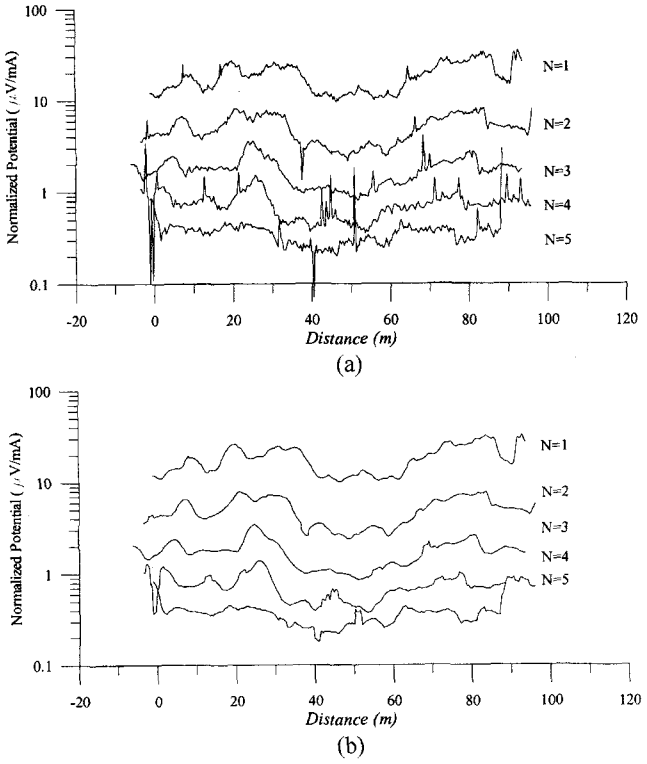
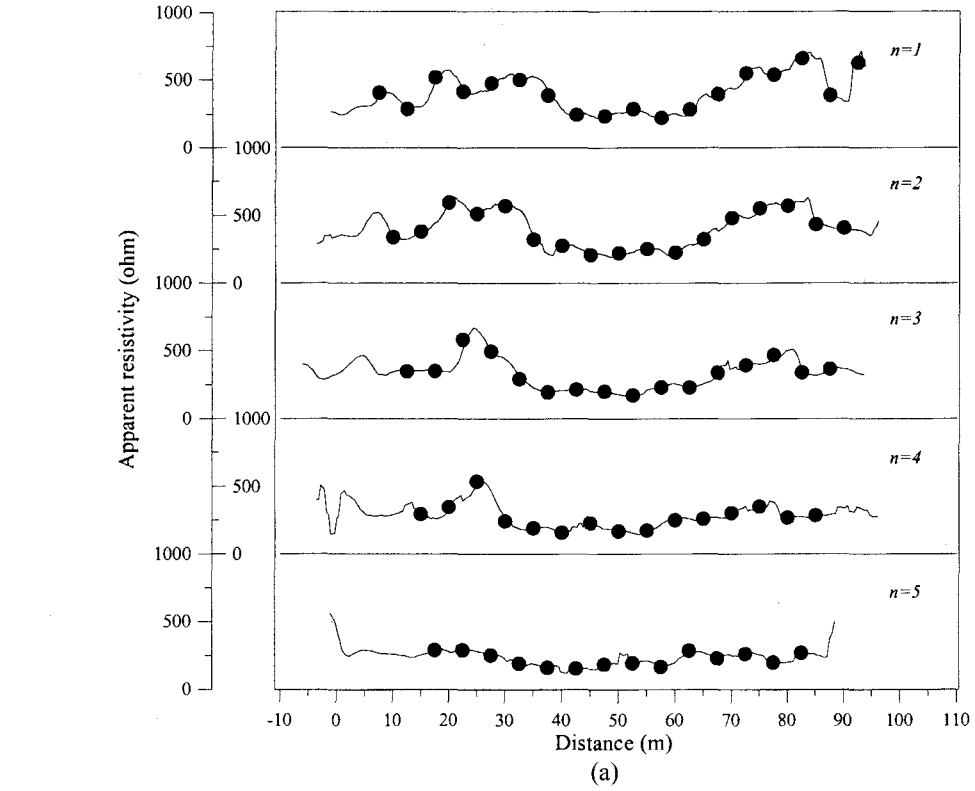


Fig. 6. Typical readings obtained with CCR system. (a) Raw data (b) Filtered data by moving average.

이와 같은 필터링을 거친 자료는 식 (1)과 식 (6)을 이용하여 겉보기 전기비저항 자료로 변환할 수 있으며, 변환된 겉보기 비저항 자료에 대하여 일반적인 접지식 전기비저항 탐사 자료 역산 알고리듬을 적용하여야 하는데 이렇게 접지식 전기비저항 역산 알고리듬을 이용하는 이유는 아직까지 비접지식 전기비저항 시스템을 정확히 모델링할 수 있는 연구는 발표된 바가 없고 겉보기 비저항으로 변환한 후에는 원리적으로 접지식 전기비저항 시스템과 동일하기 때문이다. 그러나, 이를 위해서는 접지식 전기비저항 탐사자료 역산 알고리듬에 적합하도록 적절하게 탐사 자료를 변환하여야 한다.

Fig. 7은 이러한 변환 과정을 나타내고 있다. Fig. 7(a)는 Fig. 6(b)를 겉보기 비저항으로 변환한 자료를 나타내고 있으며, Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 연속된 겉보기 비저항 자료로부터 원형으로 표시한 점에서 보간(interpolation) 혹은 재샘플링함으로써 쌍극자 배열 전기비저항 자료로 변환하여 나타낸 전기비저항 가단면도이다. 이 때 송수신 케이블이 쌍극자 안테나 형태일 때 안테나의 길이는 기존의 접지식 전기비저항 탐사에서의 쌍극자 길이와 같은 의미로, 송신 케이블과 수신 케이블의 간격과 송수신 안테나 길이의 비율은 접지식 전기비저항 탐사에서의 전극전개수 n으로 생각할 수 있으며, 전극전개수 n은 송신케이블과 수신케이블의 간격을 늘려서 구현할 수 있다. 따



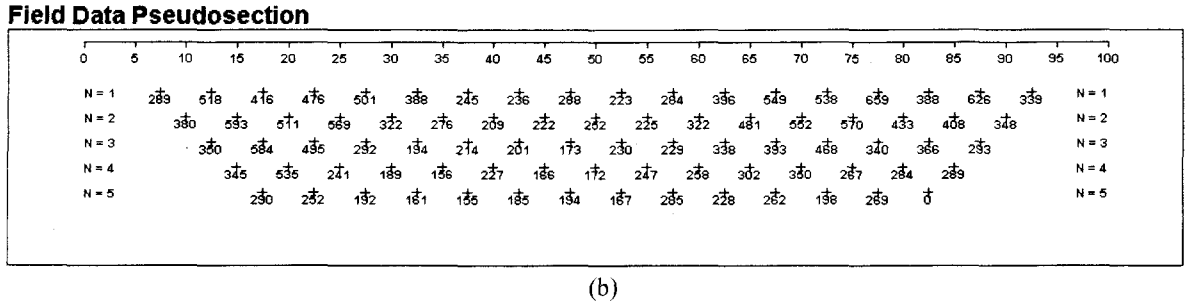


Fig. 7. The conversion process to obtain pseudo-section with apparent resistivity data acquired with CCR system. Each circle denotes sampling point and corresponds to each point in the pseudo-section.
(a) Apparent resistivity curves converted from the data in Fig. 6(b). Solid circles denote sampling points at which apparent resistivity are interpolated for conventional inversion analysis.
(b) Apparent resistivity pseudo-section from data in (a).

라서, 식 (5)의 b는 접지식 비저항 시스템에서 쌍극자 배열에서의 전극전개수 n과

$$b = 2(n+1) \tag{10}$$

관계를 갖는다.

한편, 신호대 잡음비를 높이기 위하여 사용되는 변형된 쌍극자 배열 또한 비접지식 전기비저항 시스템의 송수신 안테나의 거리를 조절하여 구현할 수 있는데, 후에 언급할 현장 자료들은 신호대 잡음비를 높이기 위하여 5 m 길이의 송수신 안테나를 이용하여 2.5 m의 정수 배수로 송수신 안테나 거리를 달리하여 획득하였으며, 이를 변형된 쌍극자 배열 자료(김정호 등, 2001)로 변환, 해석하였다. 이와 같은 필터링과 변환 과정을 거친 후 비접지식 전기비저항 탐사 자료를 해석하기 위해서는 국내에서 널리 이용되고 있는 접지식 전기비저항 역산 해석 프로그램을 이용할 수 있으며, 본 연구에서는 Dipro for Windows®를 이용하였다.

Fig. 8은 한국지질자원연구원 내 잔디밭 내에서 동일 측선에 대하여 얻은 비접지식 및 접지식 전기비저항 자료를 나타내는 가단면도이다. 사용된 기기는 각각 Geometrics사의 OhmMapper®와 AGI의 Sting R1®이다. Fig. 8(a)의 위에 보이는 자료는 앞에서 설명한 변환 과정 결과 얻어진 비접지식 시스템의 자료이며, 이에 대한 역산 결과가 아래에 나타나 있다. 또한, Fig. 8(b)는 동일한 측선에서 얻은 접지식 전기비저항 탐사 결과를 나타내고 있는데 앞에서와 마찬가지로 위에 보이는 자료는 측

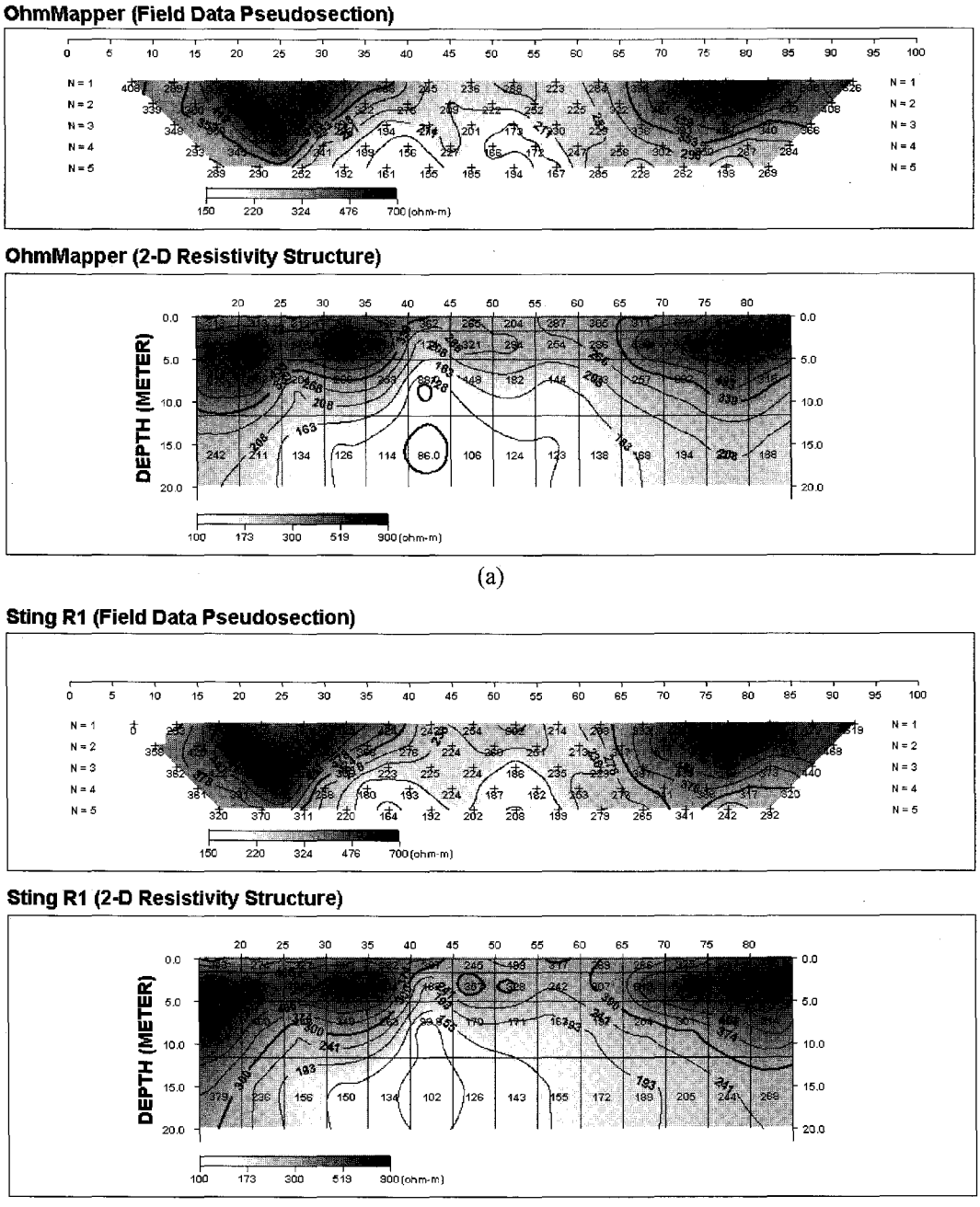


Fig. 8. Comparison of the results obtained from galvanic and capacitively-coupled resistivity system.
(a) capacitively-coupled resistivity system.
(b) galvanic resistivity system

정 결과 얻어진 겉보기 비저항 가단면도이며, 이에 대한 역산 결과가 아래에 나타나 있다. Fig. 8(a), (b)를 비교하여 보면 두 기기로부터 얻은 겉보기 비저항 가단면도 및 이에 대한 역산 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 수행된 비접지식 전기비저항 자료의 쌍극자 자료로의 변환과 이에 대한 접지식 전기비저항 역산 알고리듬의 적용은 타당성을 갖음을 알 수 있다.

비접지식 전기비저항 탐사법의 적용상의 한계

현장에서 일반적인 전기비저항 탐사를 수행하여 양질의 자료를 얻기 위해서는 전기적 잡음을 극복하기 위하여 신호대 잡음비를 높이는 것이 매우 중요한데, 이를 위하여 송신전류를 증가시키거나 변형된 전극 배열을 이용하기도 한다. 이와 마찬가지로 비접지식 전기비저항 시스템을 이용하여 안정적으로

양질의 자료를 얻기 위해서는 주입되는 전류의 크기가 클수록 신호대 잡음비 면에서 유리하다.

앞의 현장 실험 결과인 Fig. 6에서 보면 n=5까지 안정적인 측정값을 보인 것을 알 수 있다. 그러나 다른 탐사지역에서의 측정 결과 신호대 잡음비가 상당히 낮은 결과를 얻을 때도 있는데, 특히, 해안지역과 같은 전기비저항이 매우 낮은 지역에서는 변형된 쌍극자 배열로도 n=1.5 이상의 자료를 얻을 수 없었으며, 이에 따라 해석이 곤란한 경우도 종종 발생하였다. 때로는 현장 자료 획득 시 송신안테나로부터의 신호가 수신안테나에 전혀 도달하지 못하는 경우도 발생하기도 한다. 따라서, 전기비저항이 매우 낮은 지역에서 비접지식 전기비저항 시스템을 적용하기는 쉽지 않을 것으로 생각된다. 또한, 도심지 내에서도 변형된 쌍극자 배열의 n=2 내지 n=2.5 정도밖에 자료를 획득하지 못하였는데, 특히 도심지의 경우 전기적 잡음 및 지하의 배관망의 영향으로 획득된 자료의 신호대 잡음비는 매우 낮은 수준이었다.

이렇게 획득된 자료의 질이 좋지 못한 이유 중의 가장 근본적인 원인은 비접지식 전기비저항 시스템이 기기 특성상 많은 양의 전류를 지하로 흘려줄 수 없기 때문으로 분석된다. 비접지식 전기비저항 시스템을 이용하여 지하에 흘릴 수 있는 전류의 양을 근사적으로 알아보기 위하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 전압 인가점과 가는 금속판과의 전압차를 인가점의 거리에 관계없이 V로 일정하고 ω의 주파수를 갖는 교류 전압을 인가한다고 가정하자. s를 가는 금속판의 면적, d를 금속판과 땅 간의 거리라고 하면, ρ의 전기비저항을 갖는 땅의 저항이 R일 때 전류 I는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I = \frac{V}{R + 1/(i\omega C)} \tag{11}$$

여기서, C는 커패시턴스 (capacitance)로

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_o \frac{S}{d} \tag{12}$$

이고, ε_r은 금속판과 땅 사이에 존재하는 절연체의 유전상수, ε_0는 공기의 유전율이다. 이때, 비접지식 전기비저항 시스템의 주파수를 10 kHz, 안테나 역할을 하는 금속판의 면적을 s = 0.01 m^2, 그리고 땅과 금속판과의 거리는 d = 0.01 m라면

$$1/\omega C = 10^6/\varepsilon_r \tag{13}$$

이 되므로, 일반적으로 R<<$1/\omega C$이라 할 수 있고 따라서 전류 I는

$$I \approx 10^{-6} V \varepsilon_r \tag{14}$$

로 근사할 수 있다. 이는 양단에 1 kV 정도의 고압을 인가하였을때 유전체의 유전상수를 고려하여도 땅에는 매우 적은 수

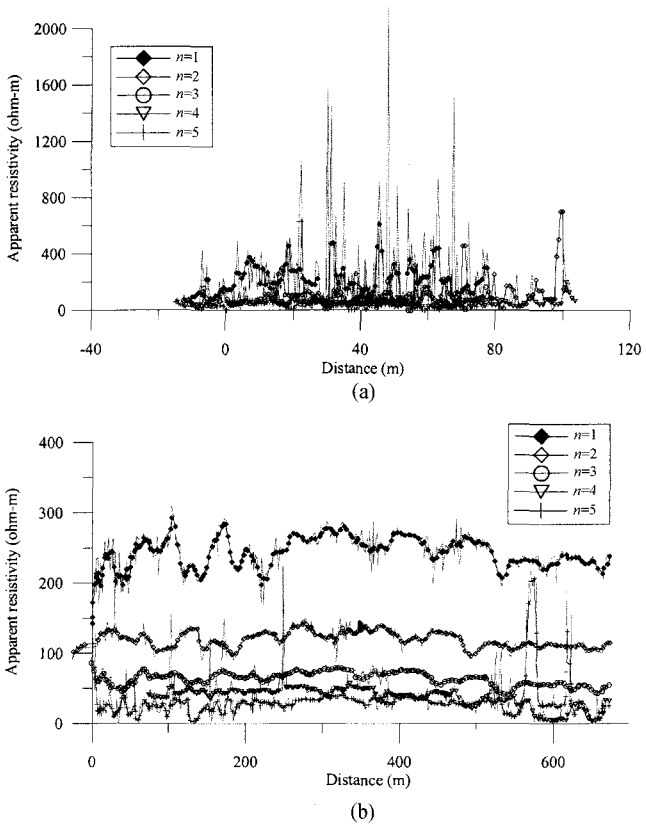


Fig. 9. An example of field data acquired with CCR system with different surface condition. (a) An example of field data which is contaminated by noise due to incomplete contact of antennas with rugged surface. (b) An example of field data which is acquired at flat asphalt surface. This data set is of high S/N ratio compared with (a).

mA정도의 전류밖에는 흐르지 않음을 의미하며, 현재 사용되고 있는 접지식 전기비저항 시스템을 이용하여 신호대 잡음비가 높은 자료를 얻기위해 최소 20 mA 이상을 흘려 주는데 비해 매우 적은 양임을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 기기인 Geometrics사의 OhmMapper®는 8 mA, 4 mA, 그리고 2 mA의 3가지 단계의 전류를 주입함이 알려져 있다. 따라서, 고압 인가에 따른 송신 배터리 전력, 전자 회로 요소의 내구성 및 기기 운영등을 고려하면 비접지식 전기비저항 탐사 기기는 접지식 탐사기기에 비하여 주입되는 전류의 양이 매우 작을 수 밖에 없는 기기적인 성능의 한계가 있으며, 따라서 잡음이 심한 도심지나, 바닷가에 연해 전기전도도가 높은 환경에서의 비접지식 전기비저항 탐사는 가탐심도에 큰 제약이 따르게 된다.

또한, 지표와 송수신 안테나 케이블의 접촉 상태는 매우 중요한 요소로 작용함을 현장 실험으로 알 수 있는데, Fig. 9의 (a), (b)에 나타난 두 자료는 이를 보여주고 있다. Fig. 9는 땅의 전기비저항이 수십 ohm-m로 비슷한 국내의 서로 다른 두 지역에서 획득한 비접지식 전기비저항 자료를 나타내고 있다. 측정된 전위에 이동평균을 취하여 잡음을 제거한 후 겉보기 비저항으로 변환하였는데, 필터링 이전의 자료는 실선으로, 필

터링 후의 자료는 도형으로 표시하였다. Fig. 9(a)는 현장 자료에 많은 잡음이 포함되어 있어, 필터링을 거친 자료에도 지하로부터의 신호가 잡음에 의해 심하게 왜곡되어 있다. 이는 이 지역의 거의 모든 측선에서 볼 수 있는 공통된 것으로, 다른 탐사에 의한 해석 결과와는 잘 일치하지 않는다. 이러한 현상은 불규칙한 현장 노면 상태에 의하여 송수신 안테나와 지표면의 접촉상태가 불량했기 때문이다. Fig. 9(b)는 아스팔트 포장 도로에서 얻어진 자료인데, 비교적 노면 상태가 고르기 때문에 송수신 안테나가 표면에 접촉이 잘 유지되어 있었으며 이 지역에서는 땅의 전기비저항이 수십 ohm-m이내임에도 불구하고 변형된 쌍극자 기준으로 거리계수 n=2-2.5 정도까지는 비교적 양질의 자료를 얻을 수 있었다. 따라서, 지표와 송수신 안테나 케이블의 접촉은 자료의 질을 좌우하는 매우 중요한 요소임을 알 수 있으며, 이는 앞의 식 (11), (12)와 같이 지표와 송수신 안테나 사이의 있는 유전체의 실질적인 거리 변화로 인하여 정전용량의 변화가 있기 때문으로 분석된다. 따라서, 전류를 안정적으로 흘릴 수 있게 하기 위해서는 땅과의 접촉이 잘 되도록 유지하여야 하며, 또한 자료 획득시 송수신 안테나가 지표에 고여있는 물에 잠기지 않게 하는 것(Timofeev, 1994)도 양질의 자료를 얻기 위하여 주의하여야 할 점이다.

결 론

이상에서 비접지식 전기비저항 시스템의 기초 원리를 소개하고, 접지식 전기비저항 시스템에 비해 중요한 다른 점 중의 하나인 기하학적 상수를 쌍극자 및 단극 안테나의 방사 배열에 대하여 유도하였다. 또한, 연속적으로 얻은 비접지식 탐사 자료의 해석을 위하여 무작위적인 잡음을 제거한 후 기하학적 상수를 곱하여 겉보기 비저항으로 변환하고, 이에 대하여 기존의 접지식 전기비저항 역산 해석을 적용하는 과정을 제시하였다. 또한 현재까지 현장 적용을 통하여 비접지식 전기비저항 시스템이 갖는 적용상의 한계점을 분석하였으며, 현장 적용에서의 난점에 대하여 토의하였다. 비접지식 전기비저항 시스템은 땅에 접지전극을 설치하기 어려운 곳에서 땅과 수신 안테나의 용량결합에 의하여 지하로 전류를 주입하고 이에 의한 전압차를 측정함으로써 전기비저항 탐사를 수행할 수 있고, 신속히 연속적으로 탐사 자료를 획득할 수 있는 장점을 가진다. 그러나, 많은 양의 전류를 땅으로 주입하기 어렵고 이에 따라 신호대 잡음비가 낮은 기기상의 단점을 갖고 있어 땅의 전기비저항이 수십 ohm-m 이내의 낮은 지역에의 적용에는 신중한 판단이 요구되며, 기기상의 특성을 정확히 이해하고 적용하는 것이 매우 필요하다고 생각된다. 또한 현장 작업시 땅과 송수신안테나의 접촉은 양질의 자료를 얻는데 중요한 요소이다. 이러한 한계에도 불구하고 현장 조건에 따라 접지식 전기비저항 자료가 적용될 수 없는 환경에서 비록 탐사 심도는 깊지 않지만 얕은 심도의 지하 전기비저항 분포를 빠른 시간 내에 조사하는데는 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 과학기술부 "국가지정연구실" 사업에서 일부 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

김정호, 이명종, 송윤호, 정승환, 2001, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극배열법에 관한 연구: 물리탐사, **4**, 59-69.

이명종, 2000, 전기비저항 탐사자료를 이용한 지하구조의 3차원 영상화 : 공학박사 학위 논문, 서울대학교.

Douma, M., Timofeev, V. M., Rogozinski, A. W., and Hunter, J. A., 1994, A capacitive-coupled ground resistivity system for engineering and environmental applications : Results of two Canadian field tests: *65th Ann. Internat. Mtg., Soc Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 559-562.

Grard, R., and Tabbagh, A., 1991, A mobile four-electrode array and its application to the electrical survey of planetary grounds at shallow depths: *J. of Geophysical Research*, **96**, 4117-4123.

King, R. W., and Smith, G. S., 1981, Antennas in matter: Fundamentals, theory, and application: The MIT Press.

Shima, H., Texier, B., Kobayashi, T., and Hasegawa, N., 1995, Fast imaging of shallow resistivity structures using a multichannel capacitive electrode system: *65th Ann. Internat. Mtg., Soc Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 377-380.

Tabbagh, A., Hesse, A., and Grard, R., 1993, Determination of electrical properties of the ground at shallow depth with an electrostatic quadrupole: Field trials on archaeological sites: *Geophysical Prospecting*, **28**, 579-597.

Timofeev, V. M., 1994, A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics: *Symposium on the application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), Proceedings, Environ. Eng. Geophys. Soc.*, 701-715.

부 록

부록 A. 쌍극자 송수신안테나의 방사배열에서의 기하학적 상수 유도

본 연구에서 사용된 비접지식 전기비저항 시스템에 가장 많이 이용되는 방사형태의 송수신 배열에 대한 기하학적 상수는 송수신안테나 내부에서의 전류분포가 전압 인가점으로부터 선형적으로 감소한다는 가정 하에서 다음과 같이 유도될 수 있다.

송수신 안테나의 길이가 l로 동일하고 이 두 안테나 내부에서의 전류분포가 인가점으로부터 선형적으로 감소한다는 가정하에, 식 (3)을 이용하여 식 (2)를 적분하면 식 (A-1)를 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{K}=\frac{1}{\pi}\int_{-l/2}^{l/2}\int_{-l/2}^{l/2}\frac{I(x)I(y)}{I(x=0)I(x=0)}\frac{1}{(R-x+y)^3}dxdy$$

$$=\frac{1}{\pi l}\int_{-l/2}^{l/2}I(y)\underbrace{\left[\int_{-l/2}^{0}\frac{(l+2x)}{(R-x+y)^3}dx+\int_{0}^{l/2}\frac{(l-2x)}{(R-x+y)^3}dx\right]}_{A}dy \tag{A-1}$$

여기서, 괄호 안의 적분 A는 다음과 같이

$$A=\int_{-l/2}^{0}\frac{(l+2x)}{(R-x+y)^3}dx+\int_{0}^{l/2}\frac{(l-2x)}{(R-x+y)^3}dx \tag{A-2}$$

$$=\frac{1}{(R+y+l/2)}+\frac{1}{(R+y-l/2)}-\frac{2}{R+y} \tag{A-3}$$

로 유도되며, 이를 다시 식 (A-1)에 대입하여 적분하면

$$\frac{1}{K}=\frac{1}{\pi l}\int_{-l/2}^{l/2}I(y)\left[\frac{1}{(R+y+l/2)}+\frac{1}{(R+y-l/2)}-\frac{2}{R+y}\right]dy \tag{A-4}$$

이 된다.

위와 마찬가지로 $I_{Rx}(y)$를 식 (A-4)에 대입하여 적분을 수행하면,

$$\frac{1}{K}\cdot\pi l^2=l\ln\left(\frac{R+l/2}{R}\right)+2(R+l/2)\ln\left(\frac{R}{R+l/2}\right)+l\ln\left(\frac{R+l}{R+l/2}\right)$$
$$+2(R+l/2)\ln\left(\frac{R+l}{R+l/2}\right)+l\ln\left(\frac{R-l/2}{R-l}\right)+2(R-l/2)\ln\left(\frac{R-l}{R-l/2}\right)$$
$$+l\ln\left(\frac{R}{R-l/2}\right)+2(R-l/2)\ln\left(\frac{R}{R-l/2}\right)$$
$$-2\left[l\ln\left(\frac{R+l/2}{R-l/2}\right)+2R\ln\left(\frac{(R+l/2)(R-l/2)}{R^2}\right)\right] \tag{A-5}$$

가 되고, 이를 정리하면 다음과 같은 식 (A-6)를 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{K}\cdot\pi l^2=l\ln\left(\frac{R+l}{R}\right)+2(R+l/2)\ln\left(\frac{R(R+l)}{(R+l/2)^2}\right)+l\ln\left(\frac{R}{R-l}\right)$$
$$+2(R-l/2)\ln\left(\frac{R(R-l)}{(R-l/2)^2}\right)$$
$$-2\left[l\ln\left(\frac{R+l/2}{R-l/2}\right)+2R\ln\left(\frac{(R+l/2)(R-l/2)}{R^2}\right)\right] \tag{A-6}$$

기하학적 상수의 값은 안테나 사이의 거리와 안테나의 길이의 비율에 의해서 결정되므로, 식 (5)를 이용하여 정리하면 다음과 같은 식 (A-7)을 얻을 수 있으며

$$\frac{1}{K}\cdot\pi l^2=l\ln\left(\frac{b+2}{b}\right)+l(b+1)\ln\left(\frac{b(b+2)}{(b+1)^2}\right)+l\ln\left(\frac{b}{b-2}\right)$$
$$+l(b-l)\ln\left(\frac{b(b-2)}{(b-1)^2}\right)-2l\ln\left(\frac{b+1}{b-1}\right)-2bl\ln\left(\frac{(b+1)(b-1)}{b^2}\right) \tag{A-7}$$

이를 정리하면 기하학적 상수에 대한 식 (6)을 얻을 수 있다.

부록 B. 단극 송수신안테나의 방사배열에서의 기하학적 상수 유도

단극 안테나, 즉 한쪽만 접지되어 있는 경우 역시 인가점으로부터 선형으로 감소하는 전류분포를 가정하여, 식 (8)을 식 (2)에 대입하면

$$\frac{1}{K}=\frac{1}{\pi}\int_{0}^{m}\int_{0}^{m}\frac{I(x)I(y)}{I(x=0)I(x=0)}\frac{1}{(R-x+y)^3}dxdy \tag{B-1}$$

이 된다.

이 때 괄호 안의 B는 적분을 수행하면,

$$B=\left[\frac{1}{R+y-m}-\frac{1}{R+y}-\frac{m}{(R+y)^2}\right] \tag{B-2}$$

이 된다 이를 다시 식 (B-1)에 대입하고 $I_{Rx}(y)$도 식 (8)로 가정하면

$$\frac{1}{K}\cdot\pi m^2=\frac{1}{2}\left[R\ln\left(\frac{R}{R-m}\right)+R\ln\left(\frac{R}{R+m}\right)-\frac{m}{R^2}\right] \tag{B-3}$$

이 된다. 마찬가지로 식 (9)를 이용하여 다시 정리하면,

$$\frac{1}{K}\cdot\pi m^2=m\frac{b}{4}\ln\left(\frac{b}{b-2}\right)+m\frac{b}{4}\left(\frac{b}{b+2}\right)+m\left(\frac{1}{b}\right) \tag{B-4}$$

이 되어, 최종적으로 식 (10)을 얻을 수 있다.