

전기비저항탐사에서 음의 겉보기 비저항

조인기¹⁾ · 김정호²⁾ · 정승환²⁾ · 서정희³⁾

Negative Apparent Resistivity in Resistivity Method

In-Ky Cho, Jung-Ho Kim, Seung-Hwan Chung and Jung-Hee Suh

요 약 ; 전기비저항 탐사에서 측정되는 양은 두 전위전극 사이의 전위차이다. 이 전위차가 양일 경우에는 겉보기 비저항도 양의 값을 가지며, 음일 경우에는 겉보기 비저항도 음의 값을 나타낸다. 또한 측정되는 전위차의 부호는 전기장의 방향에 따라 좌우된다. 만약 측정방향과 전기장의 방향이 같다면, 전위차와 겉보기 비저항은 양의 값을 보이게 되며, 그 반대의 경우에는 음의 값을 나타낸다. 일반적으로 지표 전기비저항 탐사에는 측정방향과 1차 전기장의 방향이 같은 전극 배열을 사용하며, 이 방향의 1차 전기장은 2차 전기장에 비하여 항상 크다. 따라서 일반적인 전극배열을 사용하는 지표 전기비저항 탐사의 경우에는 지형이 평탄하고 잡음이 없다면 음의 겉보기 비저항은 나타나지 않는다. 그러나 시추공-시추공 전기비저항 탐사의 경우에는 1차 전기장의 방향과 측정방향이 일치하지 않으며, 경우에 따라서는 1차 전기장의 측정방향 성분이 2차 전기장의 측정방향 성분 보다 그 크기가 작을 수 있다. 이 경우 2차 전기장의 방향과 측정방향이 서로 반대일 경우에는 음의 겉보기 비저항이 나타날 수 있다. 따라서 음의 겉보기 비저항은 측정방향의 1차 전기장이 매우 작은 영역에서 발생할 가능성이 높다.

주요어 : 전기비저항탐사, 음의 겉보기 비저항, 1차 전기장, 2차 전기장

Abstract : In the resistivity method, the potential difference between two grounded electrodes is measured and this can be positive or negative. The apparent resistivity and the potential difference have the same polarity. Since the electric field is the gradient of the potential, the polarity of the potential difference depends on the direction of the electric field. If the direction of the vector connecting two grounded electrodes is the same to that of the electric field, the measured potential difference and the apparent resistivity become positive. If the opposite is the case, they become negative. In general, the primary electric field and the vector connecting two potential electrodes have the same direction in a surface resistivity method. In this case, the measured potential difference is always positive because the primary electric field is greater than the secondary field. Therefore, the apparent resistivity is always positive if noise is free and topography is flat. The secondary field component, however, can be greater than the primary field component along the vector connecting two potential electrodes in the cross-hole resistivity method. Furthermore, if the secondary electric field and the vector connecting two potential electrodes have an opposite direction, the apparent resistivity become negative. Consequently, the apparent resistivity may be negative in the region where the primary electric field component along the vector connecting two potential electrodes is very small.

Keywords : resistivity method, negative apparent resistivity, primary electric field, secondary electric field

서 론

전기비저항 탐사법은 최근 토목 및 환경물리탐사 분야에 가장 널리 적용되는 물리탐사법의 하나로 자리를 잡아가고 있다. 이는 근본적으로 전기비저항 탐사법이 토목이나 환경분야에 원하는 정보를 제공해 준다는 점에 기인하지만, 국내의 경우 대지의 전기비저항이 높아 비교적 안정적 자료획득이 용이하

고, 각종 잡음에 강하며, 현장 자료획득이 다른 탐사법에 비하여 상대적으로 간편하다는 점 또한 빼놓을 수 없는 이유이다. 물론 지난 20여 년간의 지속적인 연구 및 풍부한 현장경험을 통하여 효과적인 자료획득 및 해석방법을 개발하고 이를 적극적으로 보급한 점 또한 전기비저항 탐사의 적용성을 확장하는데 기여한 바 크다. 특히 최근에 개발된 지형보정(김정호외, 1997a) 전기비저항 토모그래피(김정호외, 1997b), 각종 역산기법 등은 정밀탐사법으로서의 전기비저항법의 위치를 크게 향

*2002년 7월 31일 접수

1) 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

2) 한국지질자원연구원 탐사개발연구부

3) 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부

상시킨 주된 원동력이 되고 있다.

이상과 같이 전기비저항 탐사법은 토목 및 환경분야에 널리 적용되고 있으며, 자료획득, 처리 및 해석기술이 급속하게 발전하고 있지만 아직도 해결해야 할 문제점이 산적해 있다. 특히 현장 자료획득 시에 자주 발생하는 음의 겉보기 비저항에 관해서는 논란이 계속되고 있다(정현기와 정호준, 1999). 본 연구에서는 지형이 평탄하다는 가정하에 전기비저항 탐사에서 널리 사용되는 단극배열, 단극-쌍극자배열 및 쌍극자배열에 대하여 음의 겉보기 비저항을 유발시키는 원인을 이상체와 그 주변에서의 전하, 전기장 및 전위의 분포상황을 통하여 분석하고, 과연 음의 겉보기 비저항을 해석에 사용해야 하는지 아니면 버려야 하는가에 대한 이론적 지침을 제공하고자 한다.

전기장의 거동특성

지하 전도성 매질내의 한 점에서 전기장은 송신 전류원에 의한 1차 전기장과, 이상체에 의한 2차 전기장의 합으로 주어진다 (West and Macnae, 1990; Kaufman, 1992).

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_p + \mathbf{E}_s \tag{1}$$

전기비저항 탐사에서 이 2차 전기장이 겉보기 비저항 값을 변화시키는 근본적인 원인이다. 이상체에 1차 전기장이 가해지면, 경계조건을 만족시키면서 이상체의 표면에 표면전하를 유도하고, 이 표면전하에 의하여 2차 전기장이 생성된다. 만약 이상체가 주변 매질보다 전기전도도가 높을 경우에는, 즉 전도성 이상체일 경우에는 표면전하는 1차 전기장을 감소시키는 형태로 분포하게 되며, 총 전기장은 1차 전기장에 비하여 작은 값을 보이게 된다 (Kaufman, 1992). 그러나, 이상체의 전도도가 아무리 높다고 해도 2차 전기장이 1차 전기장 보다 클 수는 없다 ($|\mathbf{E}_p| \geq |\mathbf{E}_s|$). 이상체가 완전 전도체(ideal conductor) 일 경우에는 2차 전기장은 1차 전기장과 부호는 반대이고 크기는 같게 되므로, 완전 전도체 내부의 총 전기장이 0이 된다. 한편 이상체가 부도체일 경우에는 전도성 이상체의 경우와는 반대현상이 발생한다. 즉 표면전하는 이상체내에서의 총 전기장을 증가시키는 방향으로 배열된다.

한편 이상체 외부의 경우에도 총 전기장은 송신 전류원에

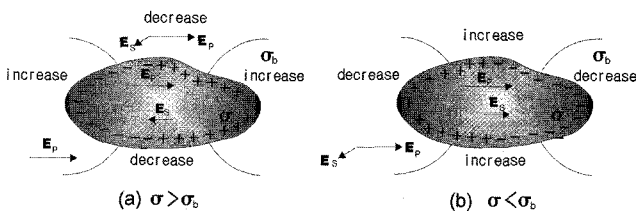


Fig. 1. Behavior of the electric field in the inhomogeneity and in the surrounding medium, where σ_b and σ are the conductivities of the background and the anomalous body, respectively (Kaufman, 1992, p.327).

의한 1차 전기장과 이상체의 의한 2차 전기장의 합으로 표현된다. 이 경우에도 2차 전기장이 1차 전기장 보다 클 수는 없다. 그러나 전류전극과 이상체의 위치에 따라서 1차 전기장과 2차 전기장의 방향은 같지 않음에 유의해야 한다.

Fig. 1에 도식적으로 나타낸 바와 같이 이상체가 전도체일 경우에는 표면전하는 이상체 내부의 전기장을 감소시키는 형태로 분포하게 되므로 전류전극 쪽의 표면에는 음의 전하가 그 반대쪽에는 양의 전하가 분포하게 된다. 따라서 음의 전하가 집중적으로 분포하는 이상체 전면 근처와 양의 전하가 집중되는 이상체의 후면 근처에서는 전기장이 증가하게 된다. 이는 전도성 이상체가 있을 경우 전류가 이상체로 집중되는 현상을 잘 설명해 준다. 반대로 부도체의 경우에는 전류원 쪽의 이상체 표면에 양의 전하가 분포하고, 그 반대쪽에 음의 전하가 분포하므로 이상체 내부에서의 전기장은 증가하지만, 그 외부에서는 전기장이 감소하게 되고, 이상체 주변에서 전류는 이상체가 없을 경우에 비하여 그 크기가 감소하게 된다. 한편 이상체 내, 외부에서의 2차 전기장의 방향은 이상체의 크기, 물성 및 기하학적 형태 등에 좌우되며 1차 전기장의 방향과 같지는 않다.

겉보기 비저항

한편 전기비저항탐사에서 측정되는 양은 두 전위전극사이의 전위차이며, 해석시에는 이를 겉보기 비저항으로 환산하여 사용한다. 일반적으로 전기비저항탐사에서 사용하는 겉보기 비저항은

$$\rho_a = \rho_g \frac{\Delta V}{\Delta V_p} = \rho_b + \rho_b \frac{\Delta V_s}{\Delta V_p} \tag{2}$$

로 정의된다 (조인기의, 1997). 여기서 ρ_a 는 겉보기 비저항, ρ_b 는 배경 매질의 전기비저항, ΔV 는 측정된 총 전위차, ΔV_p 는 지하에 이상체가 없다고 가정할 경우의 1차 전위차(primary potential difference), ΔV_s 는 이상체에 의한 2차 전위차(secondary potential difference)이다. 따라서 $\Delta V = \Delta V_p + \Delta V_s$ 의 관계식을 만족한다. (2)식은 전기비저항탐사에서 사용되는 모든 배열에 관해 적용되는 겉보기 비저항의 일반식이라 할 수 있으며, $\rho_b/\Delta V_p$ 는 거리계수(geometric factor)와 같은 의미를 갖는다.

전기비저항탐사에서 거리계수는 항상 양의 값으로 정의되므로 $\rho_b/\Delta V_p$ 는 양의 값을 보이며, 따라서 ΔV_p 는 항상 양의 값을 갖도록 전극을 배열해야 한다. 이는 쌍극자배열 탐사에서 전류전극과 전위전극의 배열순서가 C_1-C_2, P_2-P_1 의 순서로 배열되는 이유이다. 따라서 (2)식에 정의된 겉보기 비저항이 음의 값을 보이기 위해서는

$$\Delta V = \Delta V_p + \Delta V_s < 0 \tag{3}$$

의 조건을 만족해야 한다. 즉 $\Delta V_p < -\Delta V_S$ 인 경우에는 음의 겹보기 비저항을 나타내게 되며, 이러한 경우에는 1차 전기장의 방향과 2차 전기장의 측정방향 성분이 서로 반대가 된다. 즉 $\Delta V_p < -\Delta V_S$ 는 1차장과 2차장의 측정방향 성분의 부호가 서로 다를 뿐만 아니라 2차장의 측정 방향 성분의 크기가 1차장보다 크음을 의미하며, 결과적으로 음의 겹보기 비저항이 계산된다. 그러나 현장측정에서는 항상 잡음이 내포되므로 잡음을 고려하지 않을 수 없다. 따라서 (3)식에 잡음을 고려하면 실질적으로 현장에서 측정 총 전위차는

$$\Delta V = \Delta V_p + \Delta V_S + \Delta V_N \quad (4)$$

이며, 여기서 ΔV_N 은 잡음에 의한 전위차이다. 따라서 잡음이 존재하는 지역의 경우 음의 겹보기 비저항은 측정 총 전위차 $\Delta V < 0$ 인 경우, 즉 $\Delta V_p + \Delta V_S < -\Delta V_N$ 인 경우에 발생하게 된다. 전위는 전류원으로부터의 거리에 반비례하므로 잡음원에서 가까운 지점에서는 음의 겹보기 비저항이 자주 발생하게 된다.

전극배열에 관한 고찰

단극배열(pole-pole array)

단극배열을 이용하는 전기비저항 탐사에서 1차 전기장은 항상 송신 전류원을 중심으로 방사형을 보이며, 측정되는 1차 전위는 항상 양의 값을 갖는다. 또한 이 경우 전기장과 마찬가지로 1차 전위는 2차 전위보다 항상 큰 값을 보이며, 측정되는 전위는 항상 양의 값을 보인다. 측정전위가 음이 되기 위해서는 2차 전위가 음의 값을 보이고, 그 절대값이 1차 전위보다 커야한다. 이는 원거리 접지점을 0 전위로 가정할 경우 측정점의 전위가 음의 값을 보이는 경우이며, 측정점에서 전기장의 방향이 전류전극 쪽으로 향하는 것과 같다. 즉 총 전기장의 방향이 역전되어야 한다. 그러나 전기비저항 탐사에서는 모든 지점에서 1차 전기장의 크기가 2차 전기장의 크기보다 항상 크므로 이러한 현상은 일어날 수 없다. 따라서 단극배열 전기비저항 탐사에서 $\Delta V_p + \Delta V_S > 0$ 이므로 겹보기 비저항은 항상 양의 값을 보인다. 결과적으로 잡음이 없고 지형이 평탄할 경우, 단극배열 전기비저항 탐사에서는 전류와 전위전극의 위치에 관계없이 항상 양의 겹보기 비저항을 나타낸다. 즉, 단극배열법을 이용하여 얻어진 자료가 음의 겹보기 비저항을 보인다면, 이는 잡음에 의한 영향, 원거리 전극의 부적절한 설치, 또는 측정상의 오류로 판단하여야 한다.

단극-쌍극자 배열(pole-dipole array)

단극-쌍극자배열의 경우, 송신원이 앞의 단극배열과 동일하므로 지하에 분포하는 전기장 및 전위는 단극배열과 같다. 그러나 단극-쌍극자배열의 경우 측정되는 양은 서로 인접한 두 전위전극 사이의 전위차(ΔV)이므로, 단극배열과는 다른 특성

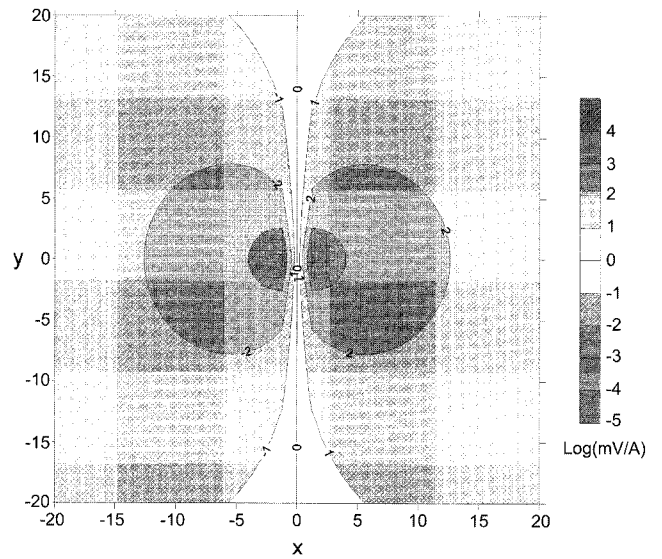


Fig. 2. The primary potential difference distribution on the surface for a pole-dipole array. A current source is at the point of (0, 0, 0) and x -directed receiver dipole length is 1 unit. The positive and negative potentials are plotted in the same logarithmic gray scale.

을 보이게 된다. 각각의 전위전극 위치에서는 단극배열과 마찬가지로 항상 양의 절대 전위를 보이지만, 두 전위전극 사이의 전위차는 음이 될 수도 있다. 즉 전기장의 분포양상은 단극배열과 동일하지만, 단극-쌍극자배열에서 측정되는 두 전위전극 사이의 전위차는 음의 값을 보일 수도 있다. 전기탐사에서 측정되는 전기장(전위차)은 벡터장(vector field)이며 지하가 완전히 균질한 매질이 아닌 한 1차 전기장과 2차 전기장의 방향은 같지 않다. 그러므로 비록 2차 전기장의 크기가 1차 전기장의 크기보다 항상 작지만, 2차 전기장의 측정방향 성분 크기는 1차 전기장의 동일 방향 성분보다 더 큰 경우도 발생할 수 있다. 극단적으로 1차 전기장과 2차 전기장의 방향이 거의 수직이고, 측정 전위전극의 방향이 2차 전기장과 동일하다면, 측정되는 전기장은 2차 전기장의 크기 및 방향에 좌우된다. 이 경우 측정되는 전기장 즉 전위차(ΔV)가 음의 값을 보일 수 있으며, 겹보기 비저항도 음의 값을 나타낼 수 있다.

한편, 단극-쌍극자배열의 경우에는 1차 전위차 $\Delta V_p = 0$ 인 영역이 존재하며, 이 경우에는 (2)식에 의한 겹보기 비저항의 정의가 불가능해진다. 이는 영상에 의한 효과를 무시할 경우 전류전극으로부터 두 개의 전위전극까지의 거리가 같은 경우에 해당된다. 따라서 측정되는 양은 2차 전기장의 크기 및 방향에 좌우되며, 만약 이 2차 전기장 및 전위차가 음의 값을 보인다면 음의 겹보기 비저항을 나타내게 된다. Fig. 2는 1차 전기장과 측정방향이 직교하는 y -축을 따라 1차 전위차가 0이 되는 궤적을 뚜렷하게 보여주며 이러한 가능성을 잘 설명하고 있다. 즉 이 영역 근처에서는 지하 이상체에 의한 2차 전위차의 부호에 따라 대단히 높은 양 또는 음의 겹보기 비저항을 나타내게 될 것이다.

그러나 여기서 유의해야할 점은 일반적으로 지표탐사의 경우에는 전류전극과 두 개의 전위전극은 동일 직선상에서 이동하게 된다는 점이다. 이러한 경우에는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 1차 전위차가 0에 근접하지 않는다. 대개 지표 전기비저항 탐사에서는 측정방향과 1차 전기장의 방향이 같은 전극배열을 사용하며, 이 방향의 1차 전기장은 2차 전기장에 비하여 항상 크다. 따라서 일반적인 전극배열을 사용하는 지표 전기비저항 탐사의 경우에는 지형이 평탄하고 잡음이 없다면 음의 겉보기 비저항은 나타나지 않는다.

한편 시추공을 이용하는 시추공-시추공 전기비저항 탐사의 경우에는 지표탐사에서는 발생하지 않는 음의 겉보기 비저항이 발생할 수도 있다. 이 경우 측정점의 위치에 따라서는 1차 전기장과 측정되는 전기장의 방향이 거의 수직에 가까워질 수 있게 되고, 2차 전기장의 방향에 따라 음의 전기장 및 겉보기 비저항을 나타낼 수 있으며, 일반적으로 측정방향으로의 1차 전기장의 크기가 매우 작은 영역, 즉 1차 전위차 $\Delta V_p \approx 0$ 인 영역에서 발생하기 쉽다. 따라서 시추공-시추공 전기비저항 탐사에서 단극-쌍극자 배열을 사용할 경우에는 이상체의 위치에 따라서는 음의 겉보기 비저항이 나타날 수 있으며, 잡음이 없다고 가정할 경우 이 음의 값은 물리적으로 의미를 갖는다고 볼 수 있다. 그러나 이 경우에는 크기가 매우 작은 2차 전기장만을 측정하게 되므로 측정장비의 정확성이 확보되어야만 의미 있는 자료가 됨에 유의해야 한다.

전기비저항 토모그래피 탐사에서 1차 전기장의 방향과 측정 방향이 거의 수직인 경우는 전류전극과 전위 쌍극자 전극이 비슷한 심도에 위치할 때에 해당한다. 현장 탐사자료 Fig. 3은

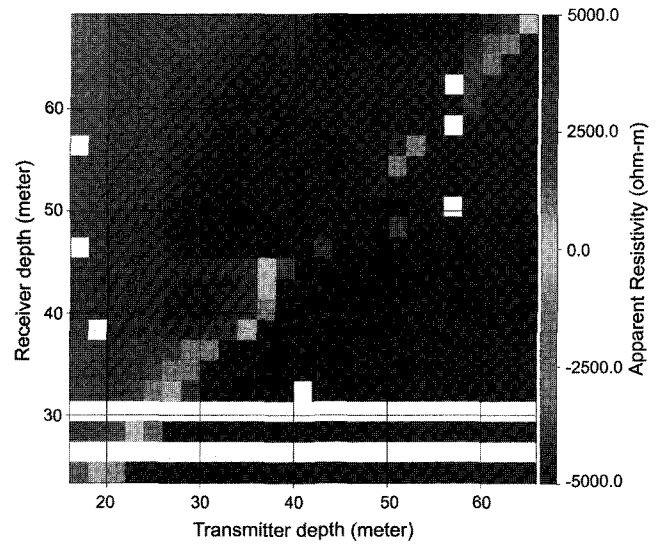


Fig. 3. Field apparent resistivity data of a cross-hole survey adopting pole-dipole array, where the potential dipole length was 6 m and the measurement interval 2 m. Transmitter depth means the depth of a current electrode, while receiver depth denotes that of a positive potential electrode.

전위 쌍극자와 전류전극의 심도가 거의 비슷할 때에 음의 겉보기 비저항이 측정되고 있다는 사실을 잘 보여주고 있으며, 여기서 흰색으로 표시된 부분은 자료가 측정되지 않은 부분을 나타낸다.

쌍극자배열(dipole-dipole array)

현재 전기비저항 탐사에서 가장 널리 사용되고 있는 쌍극자

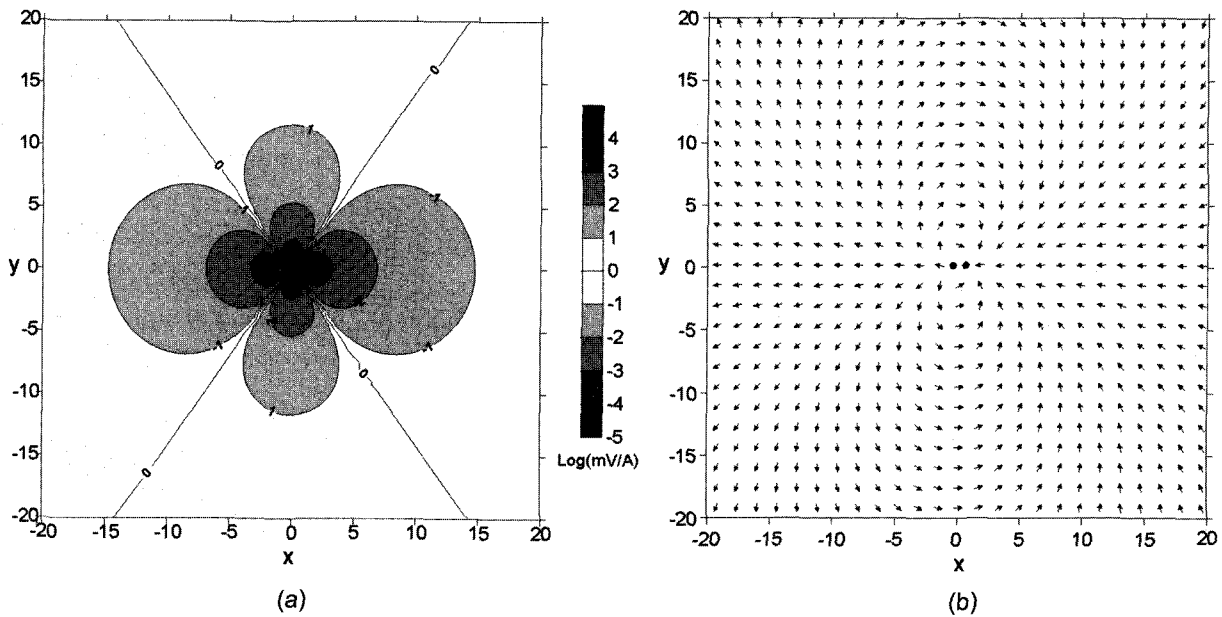


Fig. 4. (a) The primary potential difference pattern on the surface for a dipole-dipole array and (b) direction of electric fields around a current dipole. A current dipole source is located at the origin. Both the x-directed source and receiver dipole length are 1 unit, respectively. The positive and negative potential differences are plotted in the same logarithmic gray scale.

배열법의 경우에도 단극-쌍극자 배열의 경우와 유사한 특성을 갖는다. 단지 송신 전류원이 쌍극자원이므로 1차 전기장 및 전위의 분포양상이 단극배열 및 단극-쌍극자배열과는 다른 특성을 보이게 된다. 그러나 송신원이 달라진다 해도 지하 전도성 매질내에서는 1차 전기장의 크기가 2차 전기장의 크기에 비하여 항상 큰 값을 갖는다. 그러나 이 경우에도 측정되는 양이 두 전위전극간의 전위차 즉 두 전극사이에서의 전기장에 해당하므로 단극-쌍극자배열에서와 같이 전극의 공간적 위치에 따라서는 음의 겉보기 비저항이 나타날 수 있다.

Fig. 4(a)는 지표 쌍극자배열 전기비저항 탐사에서 1차 전위차(ΔV_p)의 분포양상을, (b)는 x-축 방향의 쌍극자 전류원에 의한 전기장의 방향을 나타낸 것이다. 송, 수신 쌍극자의 방향은 x-축 방향이며, 길이는 1 단위이다. 전류 쌍극자원을 중심으로 쌍곡선상에 1차 전위차가 0이 되는 궤적이 나타나고 있다. 이 궤적 근처에서는 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 1차 전기장의 방향과 측정 방향(x-축 방향)이 거의 수직에 가까운 영역이 되며, 측정된 전위차는 거의 2차 전기장의 측정 방향 성분에 좌우된다. 따라서 이 궤적 부근에서는 2차 전기장의 방향과 측정 방향이 반대가 되면 음의 겉보기 비저항이 나타나게 된다.

한편 일반적으로 지표에서 수행되는 쌍극자배열 전기비저항 탐사 역시 전류 및 전위전극이 모두 동일 직선상에 놓이게 된다. 따라서 이 경우에는 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 1차 전기장의 방향과 측정 방향이 동일하며, 어떠한 경우에도 2차 전기장이 1차 전기장보다 클 수는 없으므로 잡음이 없다면 항상 양의 겉보기 비저항을 나타낸다. 그러나 시추공-시추공 탐사의 경우에는 단극-쌍극자배열에서와 동일하게 1차 전기장과 측정되는 전기장의 방향이 일치하지 않게 되며, 이상체의 위치에 따라서는 2차 전기장이 측정되는 전기장에 더 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 경우에는 2차 전기장의 방향에 따라 측정되는 전기장 및 겉보기 비저항이 음의 값을 보일 수 있게 된다. 이와 같이 음의 겉보기 비저항은 앞의 단극-쌍극자 배열에서와 마찬가지로 1차 전위차가 0이 되는 영역 주변에서 나타날 가능성이 높다.

잡음(noise)

전기비저항 탐사에서 측정되는 양은 두 전위전극 사이의 전위차이다. 만약 잡음이 없는 지역에서라면, 전극배열 및 이상체의 특성에 의하여 전위차가 결정되며, 이를 겉보기 비저항으로 환산하여 해석에 사용한다. 그러나 현장 조사자료에는 항상 잡음이 내포되어 있으며, 이 잡음은 겉보기 비저항에 결정적인 영향을 미치게 된다. 여기서는 간단한 형태의 잡음원인 점 잡음원(point noise source)이 겉보기 비저항 자료에 미치는 영향, 특히 음의 겉보기 비저항을 나타내는 발생구조에 관하여 살펴보기로 한다.

잡음에 의한 전위는 잡음원로부터 측정점까지의 거리와

잡음의 크기에 좌우된다. 이 때 잡음의 크기는 송신 전류원에 대한 상대적인 크기가 중요하다. 만약 송신 전류원이 매우 크다면 잡음에 의한 영향은 큰 문제가 되지 않는다. 이는 해석에 사용되는 겉보기 비저항이 (2)식에 주어진 바와 같이 측정 전위차를 송신원에 의한 1차 전위차로 나누어준 값이기 때문이다. 따라서 현장에서 잡음의 영향을 적게 하기 위해서는 송신 전류를 크게 하는 것이 가장 효과적이다.

전기비저항 탐사에서 잡음은 크게 자연적인 잡음과 인공적인 잡음으로 나눌 수 있다. 대표적인 자연잡음으로는 자연전위(self-potential; SP)를 들 수 있다. 인공잡음은 조사지역 주변에 산재하는 전력선, 접지선 등에 의한 잡음과, 측정기기의 내부잡음으로 나눌 수 있다. 그러나 자연잡음 및 장비의 내부잡음은 여기서는 고려하지 않고 단지 지하에 존재하는 인공잡음에 관해서만 기술하기로 한다. 또한 인공잡음은 대개 지표 근처에 존재하므로 지표탐사의 경우에 국한하고, 잡음이 점 전류원에

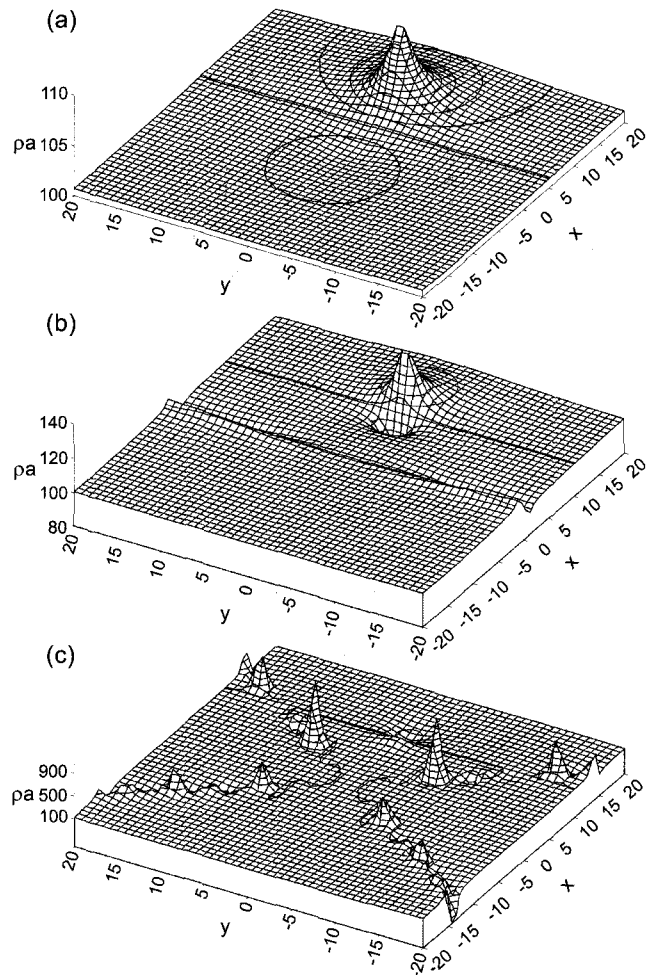


Fig. 5. The apparent resistivity distribution on the surface for (a) pole-pole, (b) pole-dipole and (c) dipole-dipole array. A source pole or dipole is located at the origin. An x-directed source and receiver dipole length are 1 unit, respectively. A noise source is located at the point of (10, 0, 1) and its magnitude is 1% of the source current.

의하여 발생한다고 가정하여 잡음이 탐사자료에 미치는 영향에 관하여 논의한다.

Fig. 5는 점 잡음원이 존재할 경우의 전기비저항 탐사에서 얻어진 겹보기 비저항 분포양상을 2차원 등고선도로 나타낸 것이다. 잡음원의 크기는 송신전류의 1%로 가정하였다. 이 때 전류전극은 원점 (0, 0, 0)에 존재하고 점 잡음원의 공간좌표는 (10, 0, 1)으로 설정하였다. 여기서 전기비저항 100 ohm-m 인 반무한 균질 매질을 가정하였으므로 잡음이 없을 경우에는 겹보기 비저항은 모든 영역에서 100 ohm-m가 되어야 한다. 우선 Fig. 5(a)에 주어진 바와 같이 단극배열의 경우에는 잡음원 주위에서 겹보기 비저항값이 상당히 왜곡되어 나타나고 있으나, 대부분의 영역에서는 거의 모양의 비저항인 100 ohm-m에 수렴하고 있다. 또한 겹보기 비저항도 양의 잡음원을 가정하였으므로 항상 양의 겹보기 비저항을 보이고 있다. 한편 Fig. 5는 배열방법에 따라 겹보기 비저항이 매우 큰 차이를 보이므로 이해를 돕기 위하여 서로 다른 스케일을 사용하였다.

Fig. 5(b)는 단극-쌍극자배열에 대한 겹보기 비저항 분포양상이다. 여기서 전위전극의 간격은 1 단위, 방향은 x -축 방향이다. 우선 단극배열에서 나타나지 않는 현상으로 1차 전위차, 즉 1차 전기장에 의한 측정 전위차가 0이 되는 궤적($x=0$)을 중심으로 양쪽에 배경 매질의 전기비저항보다 높거나 낮은 겹보기 비저항이 교대로 나타나고 있다. 실질적으로 정확히 $x=0$ 인 경우에는 겹보기 비저항을 계산할 수 없으며, $x=0$ 부근에서는 1차 전위차가 거의 0에 가까우므로 겹보기 비저항은 잡음원에 의한 전위차에 의하여 좌우되며, 잡음원에 의한 전기장의 측정 방향 성분이 1차 전기장의 측정 방향 성분과 부호가 같거나 혹은 그 반대인가에 따라 배경 매질의 전기비저항보다 높거나 낮은 값을 보이게 된다. 즉 $x=0$ 에 인접한 $x<0$ 인 영역에서 1차 전기장의 x 성분과 잡음에 의한 전기장의 x 성분의 부호는 동일하게 $-x$ 방향이기 때문에 측정 전위차는 1차 전기장에 의한 것보다 높은 값이 측정되어 겹보기 비저항은 배경 매질의 전기비저항보다 높게 나타난다. 이에 반해 $x>0$ 인 영역에서는 1차 전기장의 x 성분의 부호(양)와 잡음에 의한 전기장의 x 성분의 부호(음)가 서로 반대이기 때문에 전위차는 1차 전기장에 의한 것보다 낮은 값이 측정되어 겹보기 비저항은 배경 매질의 전기비저항보다 낮은 값이 계산된다. 더욱이 $x=0$ 에 인접한 부분에서의 1차 전기장의 x 성분 값은 매우 작으므로 음의 겹보기 비저항 또한 계산될 수 있다. 한편, 잡음원 근처에서도 1차 전기장과 잡음에 의한 전기장의 방향과 그 크기에 따라 음 및 양의 겹보기 비저항이 나타난다.

Fig. 5(c)는 쌍극자배열 전기비저항 탐사의 경우 계산된 겹보기 비저항 분포양상이다. 이때 송, 수신 쌍극자의 방향은 모두 x -축 방향이며, 길이는 1 단위이다. 단극-쌍극자배열에서와 마찬가지로 1차 전위차가 0이 되는 쌍곡선 상에서 겹보기 비저항이 발산하는 양상을 보이고 있으며, 1차 전위차가 매우 작으므로 실질적으로 의미가 없는 자료가 된다. 한편 잡음원 근

처에서는 단극-쌍극자배열과는 반대현상이 나타나고 있는데 이는 단극-쌍극자배열과 쌍극자 배열에 의한 1차 전기장의 방향이 서로 반대이기 때문에 나타나는 현상이다.

이상 각 배열에 대한 잡음의 영향을 비교해 보면 단극배열이 잡음에 가장 강하며, 쌍극자 배열이 잡음에 가장 취약함을 Fig. 5에서 알 수 있으며, 이는 김정호 등(2001)의 연구 결과와도 일치한다. 특히 단극-쌍극자와 쌍극자배열의 경우에는 지표 탐사임에도 불구하고 전극들이 동일 직선상에 놓여있지 않을 경우에는 겹보기 비저항이 정의되지 않는 영역이 존재한다는 점에 유의해야 한다.

결 론

전기비저항은 물질 자체의 고유물성으로 항상 양의 값을 갖는다. 그러나 전기비저항 탐사에서 획득되는 자료는 암석의 전기비저항이 아니라 소위 겹보기 비저항이고 이는 전극배열, 이상체의 유무, 잡음 등에 의하여 영향을 받게 된다. 특히 전기비저항 탐사현장에서 빈번히 발생하는 음의 겹보기 비저항에 관하여 수많은 논란이 지속되고 있다. 본 논문에서는 이러한 음의 겹보기 비저항이 과연 물리적으로 타당한가에 대하여 이론적 고찰을 통하여 규명하고자 하였다.

지표 전기비저항 탐사에서 많이 사용되는 전극배열법은 거의 모두 1차 전기장과 측정방향이 서로 일치한다. 따라서 이러한 경우에는 지하 이상체의 물성, 크기 및 위치에 관계없이 항상 양의 겹보기 비저항을 보이며, 이는 2차 전기장에 비하여 1차 전기장의 크기가 상대적으로 매우 크기 때문이다. 그러나 시추공-시추공 전기비저항 탐사의 경우에는 전극배열 방법에 따라서는 1차 전위차가 0에 근접하는 영역에서 측정을 수행해야 하며, 이상체의 특성에 따라서는 음의 겹보기 비저항이 나타날 수도 있다. 이상에서 평탄한 지역에서 수행되는 통상적인 지표 전기비저항 탐사에서는 음의 겹보기 비저항이 나타날 수 없음을 알 수 있으며, 현장에서 발생하는 음의 겹보기 비저항은 잡음 또는 측정장비의 오류로 판단해야 할 것이다. 한편 단극-쌍극자배열과 쌍극자배열을 사용하는 시추공-시추공 탐사의 경우에는 음의 겹보기 비저항이 나타날 수 있으며, 이들 음의 겹보기 비저항은 자료가 매우 안정적이고 신호대 잡음비가 높을 경우에는 의미를 갖게 되지만, 그렇지 못할 경우에는 의미를 부여할 수 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김정호, 정승환, 조성준, 이명중, 신인철, 조인기, 1997a, 전기비저항 영상화기법 및 토목/환경분야 적용성 연구: 현대건설주식회사 기술연구소.
김정호, 이명중, 송윤호, 정승환, 2001, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 전극배열법의 비교: 한국자원공학회지, 38(2), 116-128.

- 김정호, 이명중, 조성준, 정승환, 송윤호, 1997b, 전기비저항 토모그래피의 분해능 향상에 관한 연구: 전기, 전자탐사법에 의한 지하영상화 기술연구, KR-97(C)-16. p. 3-54.
- 정현기, 정호준, 1999, 쌍극자 전기탐사에서 음의 비저항: 대한 자원환경지질학회, 한국자원공학회, 한국지구물리탐사학회 춘계공동학술발표회 논문집, 59-62.
- 조인기, 정승환, 김정호, 송윤호, 1997, 전기비저항 토모그래피에
서의 전극배열비교: 한국자원공학회지, **34**, 18-26.
- Kaufman, A. A., 1992, Geophysical field theory and method, Part A: Academic press, Inc. p.327.
- West, G. F. and Macnae, J. C., 1990, Physics of the electromagnetic induction exploration method in Nabighian, M.N. Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics-Applications, vol. 2, part A: *Soc. Expl. Geophys.*, 5-44.