

전기비저항 탐사에서 전위감쇠곡선의 거동특성

조인기* · 이근수

강원대학교 지구물리학과

Behavior of Normalized Voltage Curves in the Resistivity Method

In-Ky Cho* and Keun-Soo Lee

Department of Geophysics, Kangwon National University

요 약: 전기비저항 탐사자료는 각종 잡음에 노출되어 있으므로 역산에 앞서 적절한 자료편집과정이 요구된다. 전기비저항 탐사자료의 편집은 주로 겹보기 비저항 가단면도상에서 지나치게 높거나 낮은 값을 보이는 자료나 쌍극자배열의 팔자형 효과를 위배하는 자료를 제거하는 방법이 널리 사용되고 있다. 또한 보다 정밀한 편집을 위하여 전위감쇠곡선을 이용하기도 한다. 본 연구에서는 3차원 이상체가 존재할 때, 전기비저항 탐사에서 널리 사용되는 단극배열, 단극-쌍극자 배열 및 쌍극자배열에 대한 전위감쇠곡선의 거동 특성을 분석하고, 그 정당성에 대하여 재검토하였다.

주요어: 전기비저항 탐사자료, 자료의 편집, 전위감쇠곡선

Abstract: Resistivity data should be edited before the inversion because resistivity data are contaminated by a lot of noise. Generally, outlier or data violating pants-leg effect in dipole-dipole array were used to be rejected in the apparent resistivity pseudo-section. For more precise data editing, normalized voltage curves are used. In this study, we analyzed the behavior of normalized voltage curves for pole-pole, pole-dipole and dipole-dipole arrays in the presence of three-dimensional inhomogeneities, and finally re-examined the validity of normalized voltage curves in the editing process of resistivity data.

Keywords: resistivity data, data editing, normalized voltage curve

서 론

전기비저항 탐사는 한 쌍의 전류전극을 통하여 지하에 전류를 주입하고, 다른 한 쌍의 전위전극에서 전위를 측정하여 지하의 전기비저항 분포 영상을 획득하는 물리탐사법이다. 전기비저항 탐사에서 얻어진 측정전위는 각종 잡음에 영향을 받으므로, 적절한 기준을 설정하고 잡음에 오염된 자료를 제거하는 편집과정이 요구된다. 이러한 자료의 편집은 대개 겹보기 비저항 가단면도상에서 지나치게 높거나 낮은(음의 값 등) 겹보기 비저항 값의 제거, 쌍극자배열에서의 팔자형 효과(pants-leg effect)를 고려하여 이루어지며, 일부 해석자는 전위감쇠곡선을 작성하여 자료의 편집을 수행하기도 한다. ‘물리탐사 실무지침’(한국지구물리탐사학회, 2002)에서는 측정전위는 어떤 전극배열에서도 전극간격이 클수록 작아진다는 원칙에 근거하여 자

료의 편집을 권고하고 있으며, 일본물리탐사학회의 경우도 동일하게 주장하고 있다(SEGI, 2004). 즉 ‘물리탐사실무지침’에서는 측정값의 이상을 조기에 검사하는 방법으로 전위감쇠곡선을 작성하고 전극간격에 따라 측정전위가 오히려 증가하는 자료를 제거하는 방법을 추천하고 있다. 또한 인접한 전위감쇠곡선이 상반성에 의하여 서로 교차하지 않아야 한다고 서술하고 있다(Fig. 1 참조).

본 연구에서는 전위감쇠곡선의 의미를 재검토하고, 과연 측정전위가 송신원으로부터 거리에 따라 항상 감소하는지, 또한 전위감쇠곡선이 과연 서로 교차하지 않는지를 알아보고자 한다. 한편 본 연구에 사용된 모델은 3차원 이상체이며, 2차원 이상체의 경우에 표면전하의 분포양상이 달라지나(조인기와 최경화, 1998; 송영수 등, 2000) 전위감쇠곡선은 유사한 양상을 보일 것으로 예상된다.

단극배열

단극배열은 음의 전류 및 전위전극을 무한 거리에 접지하고 양의 전류 및 전위 전극만을 사용하는 방법이다. 이 경우 지표

2010년 6월 9일 접수; 2010년 6월 30일 수정; 2010년 10월 19일 채택
*Corresponding author

E-mail: choik@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University,
Chunchon, Kangwondo, 200-710, Korea

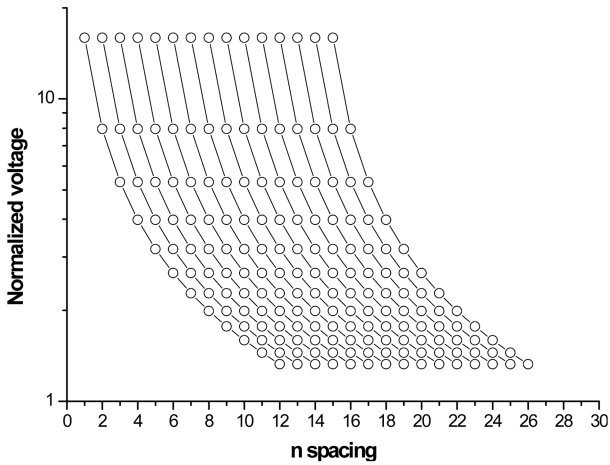


Fig. 1. Example of normalized voltage curves for pole-pole array over a homogeneous half-space.

상에서 1차전위는 전류전극을 중심으로 동심원을 형성하게 되며, 전기장은 축선방향과 일치한다. 단극배열의 경우 음의 전위전극이 무한 거리에 위치하므로 측정전위는 양의 전위전극 위치에서의 절대전위이다. 만약 전류전극과 전위전극 사이의 거리를 na , 매질의 비저항을 ρ , 주입된 전류의 크기를 I 라고 하면 1차전위는

$$V_p = \frac{\rho I}{2\pi na} \quad (1)$$

가 되며, 축선상에서 1차전기장 \mathbf{E}_p 는

$$\mathbf{E}_p = \frac{\rho I}{2\pi(na)^2} \mathbf{a}_x \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서 x -방향은 축선방향이다. 만약 지하에 이상체가 존재할 경우 총전기장 \mathbf{E} 는 1차전기장과 이상체에 의한 2차전기장 \mathbf{E}_s 의 합으로 주어진다. 즉

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_p + \mathbf{E}_s \quad (3)$$

2차전기장은 1차전기장과 그 방향과 크기가 다르지만, 그 절대적인 크기는 1차전기장보다 작다. 한편 측정전위도 1차전위 V_p 와 2차전위 V_s 의 합으로 주어진다. 즉

$$V = V_p + V_s = - \int_{\infty}^{na} \mathbf{E} \cdot \mathbf{a}_x dx \quad (4)$$

이 된다.

지하에 이상체가 존재할 경우 이상체 표면에 생성된 표면전하에 의해 2차전기장이 형성된다. 이 표면전하는 1차전기장의 크기 및 방향, 이상체와 배경매질간의 물성차, 이상체의 형상, 크기 등에 의해 결정된다. 또한 측정이 이루어지는 지표면에서의 측정전위는 1차전위와 2차전위의 합으로 주어지므로, 표면전하의 분포에 따라 달라진다. 직선 축선에서 이루어지는 일반

적인 2차원 전기비저항 탐사를 가정할 경우, 1차전기장의 방향은 항상 축선방향과 같다. 비록 2차전기장에 의해 총전기장의 크기 및 방향이 달라질 수 있지만, 2차전기장의 크기는 1차전기장의 크기보다 작으므로 총전기장의 축선방향 성분은 항상 양의 값을 보인다. 물론 완전도체상에서 측정이 이루어진다면 전기장은 0, 측정전위는 일정한 값을 보이게 된다. 따라서 단극배열에서 전극전개수가 n 일 경우의 측정전위 $V^{(n)}$ 과 인접한 전위감쇠곡선에서 전극전개수가 $n+1$ 일 경우의 측정전위 $V^{(n+1)}$ 은

$$V^{(n)} \geq V^{(n+1)} \quad (5)$$

을 만족한다. 결국 단극배열의 경우 측정전위는 전류전극으로부터 거리가 증가함에 따라 항상 감소한다. 한편 전위감쇠곡선에서 서로 인접한 전류전극에 의한 감쇠곡선은 교차하지 않는다는 사실은 상반성을 이용하여 쉽게 설명할 수 있다. 즉 전위전극이 고정되어 있고 전류전극을 이동한다고 가정해도 (5)식을 만족해야 하므로 전위감쇠곡선은 서로 교차할 수 없음을 알 수 있다. 이상에서 단극배열의 경우 전위감쇠곡선을 이용한 자료의 편집은 매우 유효한 수단임을 알 수 있다.

Fig. 2는 전위감쇠곡선의 변화양상을 알아보기 위하여 제안된 3차원 지하모델이다. 모델링은 적분방정식법(Beasley and Ward, 1986; 조인기, 1989)을 사용하였다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 측정간격은 1 m, 이상체와 배경매질의 전기비저항은 각각 1 ohm-m와 100 ohm-m이며, 최대 전극전개수는 12이다. 모델링의 정확성을 확보하기 위하여 이상체는 각각 $8 \times 8 \times 8$ 의 정육면체로 분할하였으며, 이상체는 2차전위차를 극대화하기 위하여 지표면 가까이 위치시켰다.

Fig. 3은 Fig. 2에 주어진 단일 이상체 및 복수 이상체 모델에 대한 단극배열의 전위감쇠곡선을 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이 전위감쇠곡선은 전극전개수가 증가함에 따라 항상 감소하는 양상을 보이고 있으며, 서로 교차하지 않고 있다. 비록 이는 하나의 예에 지나지 않지만 단극배열의 경우 전위감쇠곡선의 전제조건을 잘 따르고 있음을 대변해 주고 있으며, 다음 절에서 설명할 단극-쌍극자나 쌍극자배열의 전위감쇠곡선과

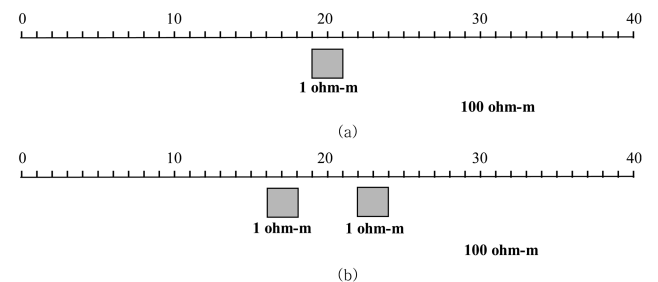


Fig. 2. Earth models with (a) a single and (b) double conductive anomalous bodies in the homogeneous half-space of 100 ohm-m. The size of the body is 2 m × 2 m × 2 m and the depth to the top of the body is 1.1 m.

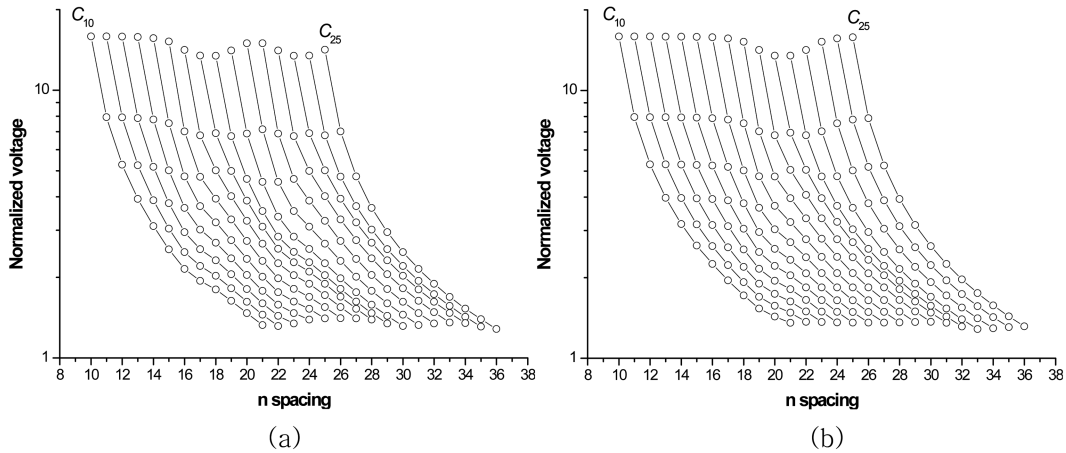


Fig. 3. Normalized voltage curves of a pole-pole array for the models given in Fig. 2. (a) A single body and (b) double bodies.

는 확실한 대조를 보인다.

단극-쌍극자 배열

단극-쌍극자 배열은 음의 전류전극을 무한 거리에 위치시키고, 한 쌍의 전위전극을 사용하여 전위차를 측정하는 배열법이다. 단극배열의 경우 측정값이 절대전위인 점에 반하여, 단극-쌍극자 배열의 경우는 전위차 즉 전기장을 측정하는 방식에 가깝다. 이 경우 형성되는 1차전기장 및 전위분포는 단극배열의 경우와 동일하지만, 측정값인 전위차는 매우 다른 특성을 보인다. 앞서 단극배열의 경우에 설명한 것처럼, 지하 이상체의 분포에 무관하게 전류전극으로부터 거리가 증가함에 따라 절대전위는 항상 감소하지만, 전위차 및 전기장은 항상 감소한다고 말할 수 없다. 예를 들어 단극-쌍극자 배열에서 한 쌍의 전위전극이 지표에 노출된 완전도체상에 위치한다고 가정하자. 이 경우 측정되는 전위차 혹은 전기장은 0이 되며, 전위전극이 완전도체를 벗어나게 되면 오히려 그 값이 증가하게

된다. 반대로 부도체의 경우에는 전기장이 증가하는 양상을 보이게 된다. 즉 전류전극으로부터 전위전극까지의 거리가 증가해도 이상체에 의하여 측정 전위차가 증가 혹은 감소할 수 있음을 의미한다.

한편 전위감쇠곡선의 교차여부는 측정 전위차의 감소 혹은 증가 양상만으로 단정하기는 어렵다. 예를 들어 특정 전위감쇠곡선이 증가 혹은 감소한다고 해도 인접한 전위감쇠곡선도 함께 증가 혹은 감소하게 되면 전위감쇠곡선은 서로 교차하지 않는다. 이러한 현상은 지표면 부근에 위치한 이상체 직상부에 전류 혹은 전위전극쌍이 존재할 경우 흔히 나타나게 된다. 또한 이상체가 송신전류원 부근과 측정 전위전극쌍 근처에 모두 존재할 경우, 생성되는 표면전하는 간섭현상에 의하여 매우 복잡한 분포양상을 보이게 되므로 전위감쇠곡선의 교차여부를 판단하기 어려워진다. 결과적으로 전위차를 측정하는 단극-쌍극자 배열의 경우 전위감쇠곡선은 항상 감소하지 않으며, 전위감쇠곡선의 교차 가능성을 완전히 배제할 수 없다.

Fig. 4는 Fig. 2에 주어진 모델에 대한 단극-쌍극자 배열의

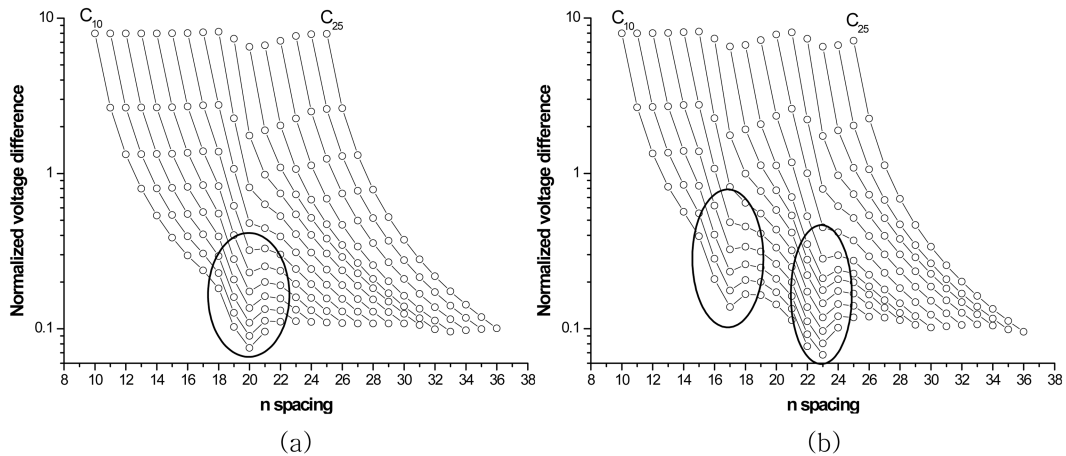


Fig. 4. Normalized voltage difference curves of a pole-dipole array for the models given in Fig. 2. Some curves increase as the n spacing increases and those curves are marked as an ellipse. (a) A single body and (b) double bodies.

전위감쇠곡선을 나타낸 것이다. 이상체의 영향이 미약한 대부분의 전위감쇠곡선은 대개 전극전개수가 증가함에 따라 측정 전위가 감소하는 양상을 나타내고 있다. 그러나 전도성 이상체 부근에서는 측정전위가 증가, 감소하는 복잡한 양상을 보인다. 그러나 전위감쇠곡선이 서로 교차하는 현상은 나타나지 않고 있으며, 이에 대한 분석은 다음의 전위감쇠곡선의 분석 부분에서 다시 기술하기로 한다.

쌍극자배열

쌍극자배열은 한 쌍의 전류전극과, 다른 한 쌍의 전위전극을 사용하는 배열법으로, 뛰어난 분해능으로 인하여 현재 전기비저항 탐사에서 가장 널리 사용되고 있는 전극배열법이다. 특히 이 배열법의 경우 측정되는 신호의 크기가 다른 배열법에 비하여 작기 때문에 잡음에 취약하므로, 적절한 자료의 편집이 매우 중요한 배열법이다. 쌍극자배열의 경우도 앞의 단극-쌍극자 배열에서와 마찬가지로 전위차 혹은 전기장을 측정하므로, 전류전극으로부터 전위전극까지의 거리가 증가해도 전위가 항상 감소하지는 않는다. 또한 전위감쇠곡선이 서로 교차하지 않는다고 단정할 수 없다.

Fig. 5는 쌍극자배열 전기비저항 탐사에서 전위감쇠곡선을 나타낸 것으로, 사용된 모델은 Fig. 2에 주어진 3차원 단일 및 복수 이상체 모델이다. 단극-쌍극자배열의 경우와 유사하게 이상체의 영향이 미약한 대부분의 전위감쇠곡선은 대개 전극전개수가 증가함에 따라 측정전위가 감소하는 양상을 나타내고 있다. 그러나 전위전극쌍이 전도성 이상체 부근에 위치할 경우 측정전위가 증가, 감소하는 복잡한 양상을 보인다. 또한 전류전극쌍이 이상체 상부 좌측인 19, 20 m 지점에 위치한 C₁₉와 C₂₀ 전위감쇠곡선은 n=8 지점에서 서로 교차하는 것을 확인할 수 있다. 복수 이상체 모델에 대한 전위감쇠곡선의 경우에도 단일 이상체와 유사한 현상을 나타내고 있음을 확인할

수 있다. 이상에서 그 차이가 크지 않지만 쌍극자배열의 전위감쇠곡선이 서로 교차할 수 있다는 점을 보이는 데는 충분한 것으로 판단된다. 마지막으로 전위감쇠곡선이 교차한다고 해도 음의 겹보기 비저항은 나타나지 않으며, 비록 여기에 제시하지는 않았지만 실제 교차하는 전위감쇠곡선에 해당하는 겹보기 비저항은 수 10 ohm-m 이상을 보이고 있다.

전위감쇠곡선의 분석

단극-쌍극자 배열의 경우 나타나지 않던 전위감쇠곡선의 교차현상이 쌍극자배열의 경우에는 나타나고 있다. 여기서는 그 이유에 대하여 분석하기로 한다. 문제를 단순화하기 위하여, 상반성을 이용하여 전류전극과 전위전극쌍의 위치를 서로 바꾸어 수신점 모음(Rx gather) 자료로 설명한다. 즉, Fig. 3과 4에서 수평축상의 동일한 n값에 대응하는 수직축 방향 자료가 이에 해당한다. 전극전개수가 n일 때 측정전위차를 ΔV⁽ⁿ⁾, 인접한 전위감쇠곡선에서 전극전개수가 n+1일 때 측정전위차를 ΔV⁽ⁿ⁺¹⁾라 하자. 측정전위차는 1차전위차와 2차전위차의 합으로 주어지므로

$$\Delta V^{(n)} = \Delta V_p^{(n)} + \Delta V_s^{(n)}, \text{ and } \Delta V^{(n+1)} = \Delta V_p^{(n+1)} + \Delta V_s^{(n+1)}. \quad (6)$$

또한 전극전개수가 n에서 n+1로 증가할 경우 1차전위차의 변화량을 δV_p, 2차전위차의 변화량을 δV_s라 하자. 즉

$$\delta V_p = \Delta V_p^{(n+1)} - \Delta V_p^{(n)}, \text{ and } \delta V_s = \Delta V_s^{(n+1)} - \Delta V_s^{(n)}. \quad (7)$$

인접한 전위감쇠곡선이 서로 교차하기 위해서는 ΔV⁽ⁿ⁾ < ΔV⁽ⁿ⁺¹⁾을 만족해야 하며, 이는 곧 1차전위차의 감소량(-δV_p)보다 2차전위차의 변화량(δV_s)이 더 커야 함을 말한다. 즉

$$\delta V_s > -\delta V_p \quad (8)$$

을 만족해야만 전위감쇠곡선이 서로 교차하게 된다.

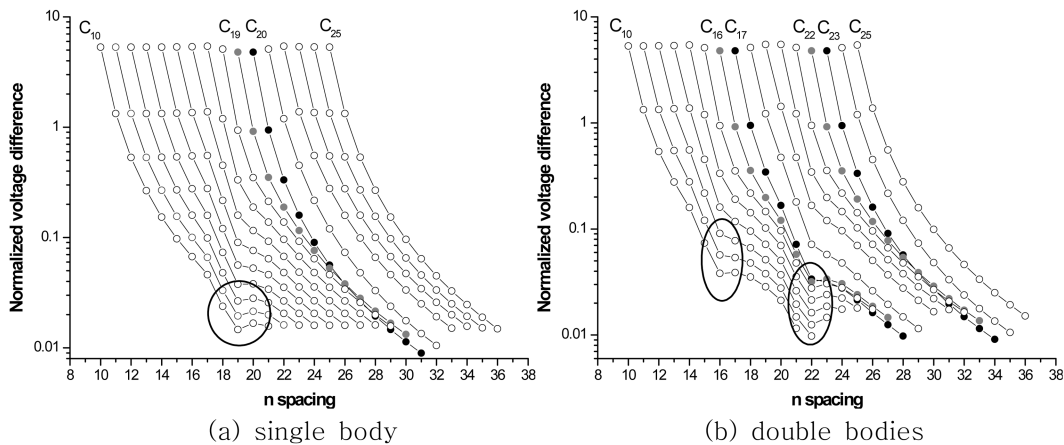


Fig. 5. Normalized voltage curves of a dipole-dipole array for the models given in Fig. 2. Some curves increase with the increase of n-spacing as in the circle. Also, some curves intersect each other, which are represented bold lines.

우선 쌍극자배열에서 전위감쇠곡선이 서로 교차하는 이유를 분석해 보면 다음과 같다. 지표면에서 전류전극에 의해 발생한 1차전기장의 방향은 축선방향과 일치하며, 3차원 이상체 부근에서는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 이상체 우측에는 음의 표면전하가, 좌측에는 양의 표면전하가 생성된다. 따라서 이상체에는 1차전기장과 반대방향의 2차전기장이 생성된다. 한편, 쌍극자배열의 경우 1차전위차 및 그 변화량은

$$\Delta V_p^{(n)} = \frac{\rho I}{\pi n(n+1)(n+2)a} \quad \text{and}$$

$$\delta V_p = -\frac{3\rho I}{\pi n(n+1)(n+2)(n+3)a} \quad (9)$$

로 주어진다. 2차전위차의 변화량은 표면전하의 분포와 전류전극의 위치에 의해 결정된다. 표면전하 분포는 전류전극이 고정되어 있으므로 변화가 없으며, 2차전위차의 변화량은

$$\delta V_s = (V_{s,p2}^{(n+1)} - V_{s,p1}^{(n+1)}) - (V_{s,p2}^{(n)} - V_{s,p1}^{(n)}) \quad (10)$$

로 쓸 수 있다. 표면전하의 분포로부터 $V_{s,p1}^{(n)}$ 은 음의 전하에 의해 영향을 크게 받으며, $V_{s,p2}^{(n+1)}$ 는 양의 전하에 의한 영향이 지배적이다. 반면 $V_{s,p1}^{(n+1)}$ 과 $V_{s,p2}^{(n)}$ 는 동일한 위치에서의 절대전위이므로 같은 값을 보인다. 또한 그 크기는 좌우에 위치한 양과 음전하의 영향을 모두 받아 $V_{s,p1}^{(n)}$ 이나 $V_{s,p2}^{(n+1)}$ 에 비하여 매우 작으며, (10)식에 의해 상쇄된다. 결과적으로 주어진 모델에서 2차전위차의 변화량은 양의 값을 보이게 되며, 이는 전극전개수가 n 에서 $n+1$ 로 증가하면 측정되는 2차전위차가 증가함을 의미한다. 전위감쇠곡선이 교차하기 위해서는 이 2차전위차의 증가량이 1차전위차의 감소량보다 커야한다. (9)식에 주어진 바와 같이 n 값이 클 경우 1차전위차의 감소량은 매우 작아지므로 전위감쇠곡선의 교차는 n 값이 클 경우에 발생 가능성이 높아지게 된다.

한편 단극-쌍극자 배열의 경우에도 동일한 현상이 발생할 것으로 해석된다. 단극-쌍극자 배열의 1차전위차와 그 감소량은

$$\Delta V_p^{(n)} = \frac{\rho I}{2\pi n(n+1)a} \quad \text{and} \quad \delta V_p = -\frac{\rho I}{\pi n(n+1)(n+2)a} \quad (11)$$

로 주어진다. 따라서 쌍극자배열에 비하여 1차전위차 변화량이 훨씬 더 큼을 알 수 있다. 단극-쌍극자 배열의 경우에도 전위감쇠곡선이 서로 교차하기 위해서는 $\delta V_s > -\delta V_p$ 의 조건을 만족해야 하는데, 1차전위차 감소량($-\delta V_p$)이 너무 크기에 쌍극자배열에 비하여 그 가능성은 낮은 것으로 판단된다. 물론 1차전위차 자체가 쌍극자배열에 비하여 크기 때문에 이에 의한 2차전위차의 크기도 함께 일정부분 증가하겠지만 본 연구에서는 1차전위차의 감소량보다 커지는 지하 모델을 확인하는 데는 실패하였다. 결과적으로 단극-쌍극자 배열의 경우 개념적으로 전위감쇠곡선의 교차 가능성을 배제할 수 없으나,

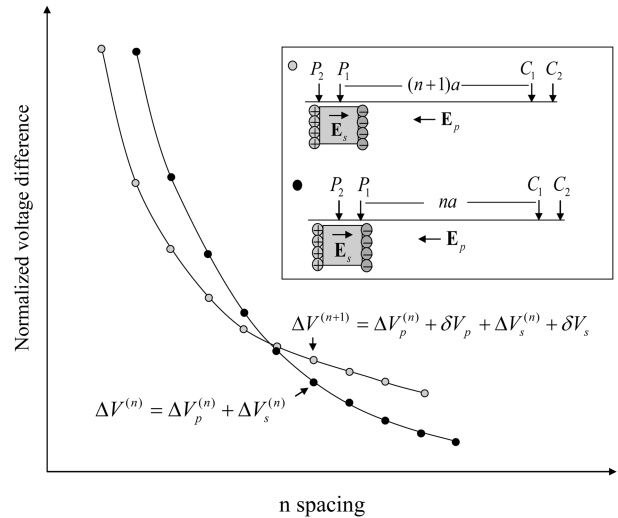


Fig. 6. Example of normalized voltage difference curves intersecting each other over a three dimensional conductive body for dipole-dipole array.

실제로 확인하지는 못하였다.

결론

전위감쇠곡선을 이용하는 자료 편집 방법은 전류원로부터 측정점까지의 거리가 증가하면 측정전위가 감소해야 한다는 대 전제를 바탕으로 하고 있다. 그러나 단극-쌍극자 배열이나 쌍극자배열의 경우 이러한 전제조건을 만족하지 못한다. 즉 이상체의 전기비저항이 매우 낮거나 혹은 높은 경우 측정전위차 혹은 전기장은 감소하지 않을 수도 있다. 따라서 ‘물리탐사실무지침’에 표현된 내용은 당연히 수정되어야 할 것으로 판단된다. 또한 전위감쇠곡선이 서로 교차하지 않는다는 기준도 항상 성립한다고 말할 수 없다. 단극배열의 경우는 전위감쇠곡선은 당연히 서로 교차할 수 없으나, 3차원 이상체에 대해 쌍극자배열의 경우에는 교차 가능성이 있는 것으로 확인되었다. 단극-쌍극자 배열의 경우는 전위감쇠곡선이 교차하는 모델을 확인하지 못하였으나 항상 교차하지 않는다고 단정할 수는 없는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 3차원 이상체에 대한 반응을 기초로 고찰하였으나, 2차원 이상체에 대해서도 표면전하의 축적 양상은 다르나 전체적인 감쇠양상에 대한 고찰은 유사할 것으로 생각된다.

물론 전위감쇠곡선은 단극배열의 경우 매우 유효한 방법이며, 대부분의 단극-쌍극자, 쌍극자배열 탐사법에서 자료의 편집에 제한적이긴 하지만 효과적인 방법이다. 이는 이상체가 존재한다고 해도 물성대비가 지나치게 크지 않고, 특히 지표면이 토사로 덮혀 있는 상태라면 측정전위차는 대개 전류원로부터 거리에 따라 감소하는 경향을 보이기 때문이다. 또한 단극-쌍극자 및 쌍극자배열의 전위감쇠곡선은 항상 감소하지 않지

만, 나름대로 일관된 경향을 보이므로 효과적인 자료 편집 수단임에 틀림없다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0002440).

참고문헌

조인기, 1989, 전기 및 자기 비저항법의 3차원 모델링 및 해석, 공학박사학위논문, 서울대학교.

송영수, 홍인귀, 이태중, 윤광진, 2000, 2차원 및 3차원 모델에 대한 전기비저항 토모그래피 축소모형실험, 한국자원공학회지, **37**, 26-37.

조인기, 최경화, 1998, 단극배열을 이용한 시추공-시추공 전기비저항 탐사법의 문제점, 지구물리, **1**, 51-58.

한국물리탐사학회, 2002, 물리탐사 실무지침. p.120.

Beasley, C. W., and Ward, S. H., 1986, Three dimensional mis-e-la-masse modeling applied to mapping fracture zones, *Geophysics*, **51**, 98-113.

Kaufman, A. A., 1992, *Geophysical field theory and method*, Academic Press, Inc.

The society of Exploration Geophysicists of Japan (SEGJ), 2004, Application of geophysical method to engineering and environmental problems, p. 116. [in Japanese]