

## 모형조 내의 수평 경계면 탐지를 위한 수직 전극배열

김진후\*, 김현도

\* 동아대학교 공과대학 토목해양공학부, [jkim@donga.ac.kr](mailto:jkim@donga.ac.kr)

### 1. 서론

전기비저항 탐사법은 가장 역사가 깊은 탐사법 중의 하나로 지하수 탐사 및 지반조사를 위한 기본적인 항목으로 널리 사용되고 있으며, 지하의 오염영역 탐지에도 적용되고 있다. 최근에 들어 해수 침투에 따른 해안지역 지하수의 오염영역의 분포와 깊이를 모니터링 하기 위해 전기비저항 탐사법 및 전기검층을 비롯한 다양한 지구물리학적 방법이 사용되고 있다 (황학수 외, 2000; Newhouse and Hanson, 2000).

전기비저항 탐사에서는 여러 종류의 다양한 전극배열이 사용될 수 있으며, 각 전극배열에 따라 지층 구조의 분해능과 S/N 비, 그리고 작업의 효율성 등에 차이가 있다 (김정호 외, 2001a; 2001b). 전기비저항 검층에는 주로 단노말, 장노말, 래터럴 배열법 등이 사용되어 왔으며, 이들의 자료를 이용해 지층의 분해능과 탐사심도를 증진시킬 수 있는 분석 방법 (김진후, 1988) 및 새로운 배열법 등이 제시되고 있다 (Weller et al., 2003).

해수 침투나 오염물질의 확산 등을 시뮬레이션 하기 위한 모래 모형조 (sand tank)를 이용한 축소 모형실험에 있어서 오염영역의 분포와 깊이를 모니터링하기 위해서는 전기비저항 탐사 및 전기검층을 고려해볼 수 있다. 이 때 전기검층과 같이 수직적으로 전극을 배열한 경우 정확한 수평층의 경계를 파악할 수 있을 것으로 보인다. 본 연구에서는 모래 모형조에 수직으로 매설한 다중 전극을 이용하여 기존 및 변형된 전극배열들을 비교·검토하여 수평 경계면 탐지에 효과적인 전극 배열을 수치모델링을 통하여 찾아보고자 한다.

### 2. 결보기 전기비저항 계산

모래 모형조 내에 수직으로 매설된 다중 전극이 수평 다층구조 내에 있는 경우, 임의의 층  $i$ 에서 관측되는 전위 분포를 이용하여 노말 배열에 대한 결보기 전기비저항을 다음과 같이 구할 수 있다 (Yang and Ward, 1984).

$$\rho_a = \rho_0 \left[ 1 + L \int_0^x (\alpha_i e^{-\lambda z_i} + \beta_i e^{-\lambda z_i}) d\lambda \right] \quad (1)$$

여기서  $\alpha_i$ 와  $\beta_i$ 는 각 층의 전기비저항과 전류전극에서 각 층의 경계면까지의 거리와 관

려된 계수이며,  $L$ 은 전류전극 A와 전위전극 M 간의 거리이다. 래터럴 배열을 비롯하여 다양한 전극 배열법에 대한 겉보기 전기비저항은 전위 중첩의 원리에 의하여 식(1)을 이용하여 구할 수 있다.

본 연구에서는 수평 분해능을 비교하기 위하여 래터럴 배열, 슬럼버저 배열, 리 배열, 그리고 차분 래터럴 배열 등 4가지 배열법을 고려하였다. 노말 배열을 비롯한 각 배열법에 따른 전극 배열의 모식도를 Fig. 1에 도시하였다. 그림에서 1 unit란 등 간격으로 배열되어 있는 각 전극간의 단위 거리이다.

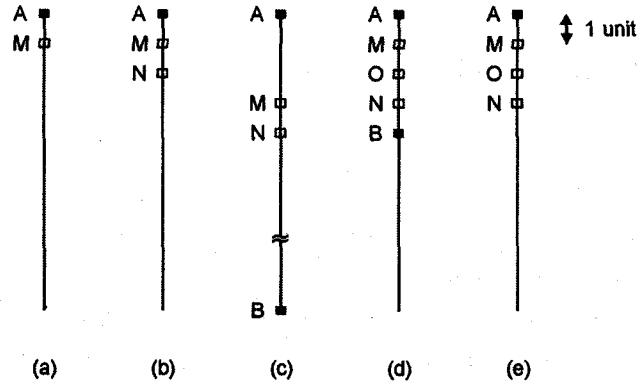


Fig. 1. Schematic view of the electrode arrays: (a) Normal array, (b) Lateral array, (c) Schlumberger array, (d) Lee array, and (e) Difference lateral array.

### 2.1. 래터럴 배열

전기점층의 기본적인 배열법 중의 하나인 래터럴 배열은 노말 배열에 비해 수평 분해능이 좋은 것으로 알려져 있다. 래터럴 배열에 대한 겉보기 전기비저항은 노말 배열에서 얻은 겉보기 전기비저항을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_a = k \left( \frac{\rho_{AM}}{AM} - \frac{\rho_{AN}}{AN} \right) \quad (2)$$

여기서  $k = \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right)^{-1}$ 이고,  $\rho_{AM}$ 과  $\rho_{AN}$ 은 송신 전류전극 A와 전위전극 M 및 N으로 측정된 노말 배열의 겉보기 전기비저항이다.

### 2.2. 슬럼버저 배열

전기비저항 탐사에서 수직 경계면이 있는 경우 슬럼버저 배열이 웨너 배열에 비해 수직 분해능이 탁월한 것으로 알려져 있다 (Parasnis, 1975). 슬럼버저 배열에 대한 겉보기 비저항을 노말 배열의 겉보기 비저항을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\rho_a = k \left( \frac{\rho_{AM}}{AM} - \frac{\rho_{AN}}{AN} - \frac{\rho_{BM}}{BM} + \frac{\rho_{BN}}{BN} \right) \quad (3)$$

여기서  $k = \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$  이고,  $\rho_{BM}$ 과  $\rho_{BN}$ 은 수신 전류전극 B와 전위전극

M 및 N으로 측정된 노말 배열의 겹보기 전기비저항이다.

### 2.3. 리 배열

요즈음 거의 사용되지 않고 있는 전극 배열법이지만 Van Norstrand and Cook (1966)은 Lee-Hemberger 도시법을 이용하여 전기비저항 탐사에서 수직 경계면이 있는 경우 경계면의 위치를 파악하는 방법을 제시하였다. 전위 전극 M과 O를 이용하여 구한 겹보기 전기비저항을  $\rho_{a1}$ , 전위 전극 N과 O를 이용하여 구한 겹보기 전기비저항을  $\rho_{a2}$ 라 할 때 각각의 겹보기 전기비저항은 다음과 같다.

$$\rho_{a1} = k_1 \left( \frac{\rho_{AM}}{AM} - \frac{\rho_{AO}}{AO} - \frac{\rho_{BM}}{BM} + \frac{\rho_{BO}}{BO} \right) \quad (4)$$

$$\rho_{a2} = k_2 \left( \frac{\rho_{AO}}{AO} - \frac{\rho_{AN}}{AN} - \frac{\rho_{BO}}{BO} + \frac{\rho_{BN}}{BN} \right) \quad (5)$$

여기서  $k_1 = \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AO} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BO} \right)^{-1}$  이고,  $k_2 = \left( \frac{1}{AO} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BO} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$  이다.

### 2.4. 차분 래터럴 배열

차분 래터럴 배열은 Hakvoort et al. (1998)에 의해 처음 소개되었다. 래터럴 배열이 전위 분포의 기울기 이용하는 것에 비해서 차분 래터럴 배열은 전위 분포의 2차 미분을 이용한다. 차분 래터럴 배열에 대한 겹보기 비저항을 노말 배열의 겹보기 비저항을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\rho_a = k \left( \frac{\rho_{AM}}{AM} - \frac{2\rho_{AO}}{AO} + \frac{\rho_{AN}}{AN} \right) \quad (6)$$

여기서  $k = \left( \frac{1}{AM} - \frac{2}{AO} + \frac{1}{AN} \right)^{-1}$  이다.

## 3. 수평 분해능 비교

각 배열법에 대한 수평 경계면 분해능을 비교하기 위하여 10~30 unit의 두께를 갖는 5개의 수평 층으로 구성된 수치모델을 고려하였다 (Fig. 2). 슬럼버저 배열을 제외하고 각 배열법에서 전류전극-전위전극, 전위전극-전위전극 간의 거리는 1 unit로 하여 시추공이 없는 환경에서 수평 분해능이 최대가 되도록 하였다.

### 3.1. 래터럴 배열

전극 간격  $AM=MN=1$  unit인 경우 래터럴 배열에 의한 겹보기 전기비저항은 Fig. 3a에서 보는 바와 같다. 전기비저항이 바뀌는 층의 경계에서 음 또는 양 방향의 피크가 나타나고 있다. 피크의 위치와 방향을 이용하면 층의 경계와 전기비저항의 변화 방향을 파악할 수 있을 것으로 보이며, 고비저항에서 저비저항으로 바뀌는 경계를 파악하는 것이 반대의 경우에 비해 상대적으로 정확할 것으로 판단된다.

### 3.2. 슬럼버저 배열

전류전극이 전극 배열의 양 끝에 고정되어 있고 전극 간격  $MN=1$  unit인 전위전극이 전류전극 사이를 움직이는 경우의 겹보기 전기비저항이 Fig. 3b에 도시되었다. 층의 경계에서 음 또는 양 방향의 피크가 나타나고 있으나 피크의 폭이 큰 편이며, 겹보기 전기비저항이 진비저항과 큰 차이를 보이고 있다.

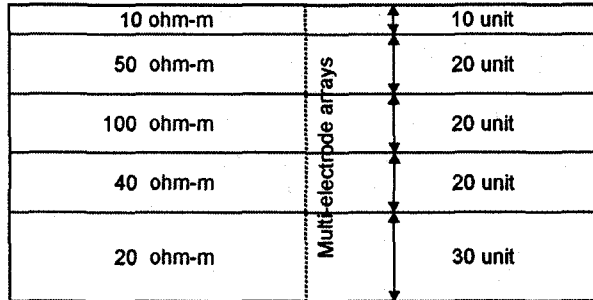


Fig. 2. Horizontal layer model for calculating apparent resistivities with various electrode arrays.

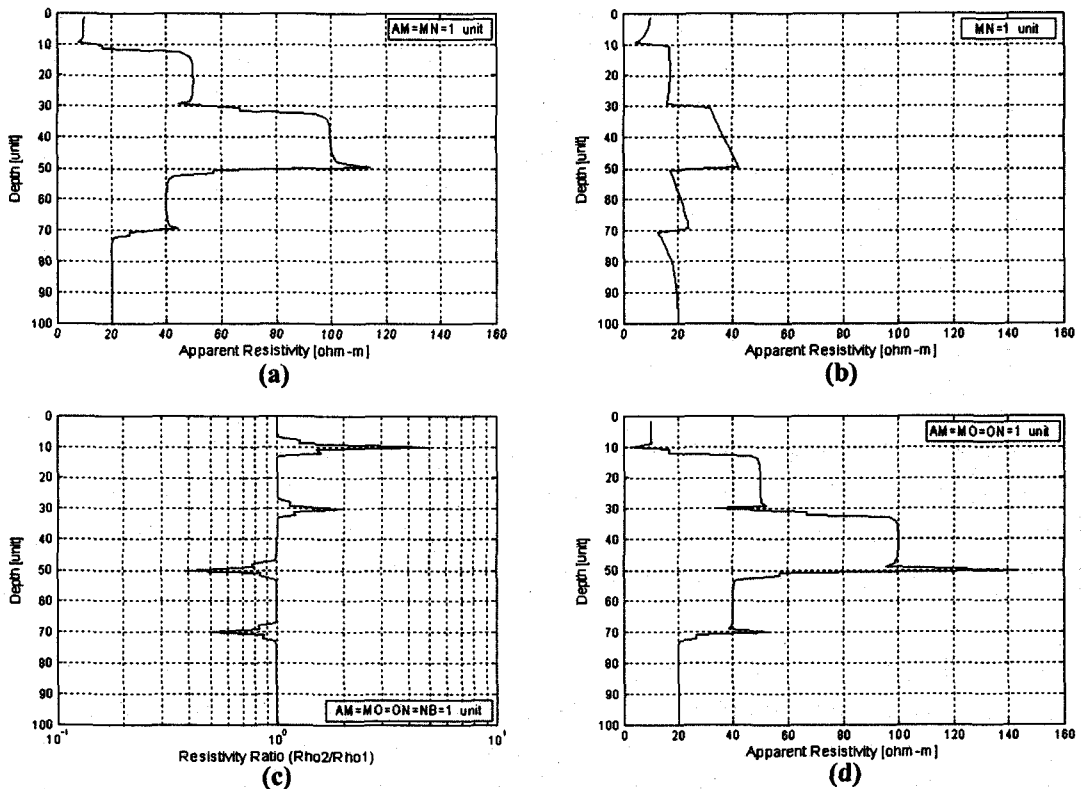


Fig. 3. Apparent resistivities and resistivity ratio obtained by various electrode arrays over the model shown in Fig. 2: (a) Lateral array, (b) Schlumberger array, (c) Lee array, and (d) Difference lateral array.

### 3.3. 리 배열

전극 간격  $AB=4$  unit인 전류전극 AB 내에 3개의 전위전극이  $MO=ON=1$  unit로 배열되어 있는 경우 얻어지는 두 걸보기 전기비저항의 비  $\rho_{a2}/\rho_{a1}$ 를 Fig. 3c 에 도시하였다. 경계면에서 피크를 보이고 있다.

### 3.4. 차분 래터럴 배열

전극 간격  $AM=MO=ON=1$  unit인 경우 차분 래터럴 배열에 의한 걸보기 전기비저항은 Fig. 3d에서 보는 바와 같다. 층의 경계에서 음 또는 양 방향의 피크가 나타나고 있으며, 피크의 폭이 다른 배열들에 비해 가장 작게 나타나고 있으며, 피크의 상대적 크기는 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

## 4. 우연오차의 크기 비교

우연 오차의 크기를 상대적으로 비교하기 위하여 전극 간격  $AM=1$ 인 노말 배열의 오차를 1이라 할 때 다른 배열의 오차를 계산하였다. 측정치의 분산은 무게와 반비례 관계가 있고, 총 분산은 각 분산의 합으로 표현되므로 오차는 다음과 같이 표현된다.

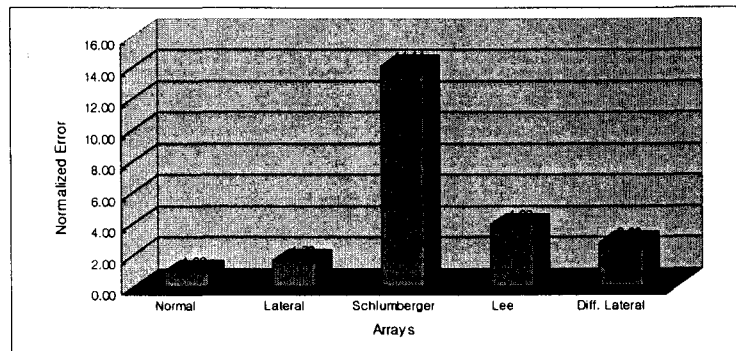


Fig. 4. Comparison of normalized random errors for various electrode arrays in the homogeneous medium. The number on the bar denotes ratio of random error expected in each array to that of normal array.

$$\sigma_r = \pm \sqrt{\sum_i \sigma_i^2} = \pm \sqrt{\sum_i r_i} \quad (7)$$

여기서  $r_i$ 는 전극 간 거리이다. 식 (7)에서 보듯이 오차는 거리 합의 제곱근에 비례함을 알 수 있다.

Fig. 4에 균질 매질 내에서 노말 배열의 우연오차에 대해 정규화한 각 배열의 우연오차를 비교하였다. 슬럼버저 배열의 경우 AB의 거리가 100 unit인 경우 우연오차는 노말 배열에 비해 14배 정도 크게 나타날 것으로 예상된다. 모래 모형조에서 AB의 거리가 최소한 18 unit 이상이라고 가정할 때, 우연오차는 노말 배열에 비해 6배 이상 크게 나타날 것으로 보인다. 결국 4가지 배열 중 슬럼버저 배열에 의한 관측치가 가장 오차가 크며, 차분 래터럴 배열은 중간 정도의 오차 수준을 보인다.

## 5. 결 론

모래 모형조에서 수평 경계면을 정확하게 파악할 수 있는 전극 배열을 찾기 위하여 수평 경계면 분해능이 좋은 것으로 알려진 4 개의 수직 전극 배열에 대한 걸보기 전기비저항을 비교하였다. 수평 분해능은 차분 래터럴 배열과 리 배열이 우수한 것으로 보이며, 슬림버저 배열이 가장 낮게 나타나고 있다. 리 배열의 경우 비저항이 바뀌는 경계에서는 층의 전기비저항 비에 해당하는 크기를 갖는 피크가 형성되므로 전기비저항 비를 로그 스케일로 표현할 경우 지층 경계를 파악하기가 용이하다. 그러나 리 배열의 경우 층의 전기비저항을 파악하기 위해서는 별도의 걸보기 전기비저항 곡선이 필요하다.

걸보기 전기비저항 측정에 내포되는 우연오차를 노말 배열에서의 우연오차와 비교해 볼 때 래터럴 배열, 차분 래터럴, 리 배열, 슬림버저 배열의 순으로 오차가 증가하는 것을 알 수 있다. 층의 수평 분해능과 측정값에 대한 우연오차를 종합해 볼 때 차분 래터럴 배열과 리 배열이 모래 모형조 내에서 수평 경계층을 확인하는데 적합한 배열법으로 판단된다.

## 참고문헌

- 김정호, 이명중, 송윤호, 정승환, 2001a, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 전극배열법의 비교, 한국자원공학회지, Vol. 38, No. 2, p. 116-128.
- 김정호, 이명중, 송윤호, 정승환, 2001b, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극배열에 관한 연구, 물리탐사, Vol. 4, No. 3, p. 59-69.
- 김진후, 퍼스널 컴퓨터를 이용한 비저항 물리검층자료의 자동해석, 한국해양공학회지, Vol. 2, No. 2, p. 251-260.
- 황학수, 이상규, 고동찬, 김양수, 박인화, 2000, 전기비저항 모니터링을 이용한 해수침투 파악, 물리탐사, Vol. 3, No. 1, p. 1-6.
- Hakvoort, R. G., Fabris, A., Frenkel, M. A., Koelman, J.M.V.A., and Loermans, A. M., 1998, Field measurements and inversion results of the high- definition laterolog, 39th Ann. SPWLA meeting, Society of Professional Well Log Analysts.
- Newhouse, M. W. and Hanson, R. T., 2000, Application of three-dimensional borehole flow measurements to the analysis of sea water intrusion and barrier injection systems, Los Angeles, California, Proceedings of the Seventh International Symposium on Borehole Geophysics for Minerals, Geotechnical, and Groundwater Applications, p. 281~292.
- Parasnis, D. S., 1975, Mining Geophysics, 2nd ed., Elsevier, 395p.
- Van Norstrand, R. G. and Cook, K. L., 1966, Interpretation of resistivity data, U.S.G.S. Professional Paper 499, 310p.
- Weller, A., Furche, M., and Schön, J. H., 2003, Detection of layer boundaries in wells using multi-electrode resistivity data, Geophys. J. Int., Vol. 153, p. 175-186.
- Yang, F. W. and Ward, S. H., 1984, Inversion of borehole normal resistivity logs, Geophysics, Vol. 49, No. 9, p. 1541-1548.