

## 지표 부근에서의 노멀전기검층 수치 모델링

남명진<sup>1</sup> · 황세호<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 에너지자원공학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원 지하수연구실

## Numerical Simulation of Normal Logging Measurements in the Proximity of Earth Surface

Myung Jin Nam<sup>1</sup> and Seho Hwang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, Korea

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Korea

Resistivity logging instruments were designed to measure electrical resistivity of formation, which can be directly interpreted to provide water-saturation profile. Short and long normal logging measurements are made under groundwater level. In some investigation sites, groundwater level reaches to a depth of a few meters. It has come to attention that the proximity of groundwater level might distort short and long normal logging readings, when the measurements are made near groundwater level, owing to the proximity of an insulating air. This study investigates the effects of the proximity of groundwater level (and also the proximity of earth surface) on the normal by simulating normal logging measurements near groundwater level. In the simulation, we consider all the details of real logging situation, i.e., the presence of wellbore, the tool mandrel with current and potential electrodes, and current-return and reference-potential electrodes. We also model the air to include the earth's surface in the simulation rather than the customary choice of imposing a boundary condition. To obtain apparent resistivity, we compute the voltage, i.e., potential difference between monitoring and reference electrodes. For the simulation, we use a two-dimensional, goal-oriented and high-order self-adaptive  $hp$  finite element refinement strategy ( $h$  denotes the element size and  $p$  the polynomial order of approximation within each element) to obtain accurate simulation results. Numerical results indicate that distortion on the normal logging is greater when the reference potential electrode is closer to the borehole and distortions on long normal logging are larger than those on short normal logging.

**Key words :** earth surface, groundwater level, normal logging

국내에서 노멀전기검층은 지반조사, 지하수·환경조사, 지열조사, 지질조사, 광물자원 평가 등의 다양한 분야에서 널리 이용되고 있다. 노멀전기검층은 지표 전기비저항탐사법과는 달리 완전공간에 대한 자료를 취득하기 때문에 지표 부근에 수위가 위치하는 시추공에서 자료를 취득하는 경우, 수위 및 지표에 대한 영향을 고려해야 한다. 이 연구는 노멀전기검층 존재, 전류리턴전극, 기준점전위전극, 시추공내 지하수위 등을 포함하는 실제 물리검층 환경과 동일한 조건에서 노멀전기검층을 시뮬레이션하여 지표 및 지하수 수위가 노멀전기검층에 미치는 영향을 분석하였다. 수치 모델링은 2차원 목표지향 자기적응 고차  $hp$  유한요소법(2D goal-oriented high-order self-adaptive  $hp$  finite element method)을 이용하였다(여기서  $h$ 는 요소의 크기,  $p$ 는 노드에서의 근사 차수). 이 알고리즘을 이용하여 측정한 결과, 지표와 수위의 오차가 1%보다 작도록 계산할 수 있는 최적  $hp$  격자를 구성함으로써 매우 정밀한 결과를 얻었다. 수치실험 결과, 지표부근에서 취득한 노멀전기검층 자료는 기준점전위전극이 시추공에 가까울수록 자료의 왜곡이 증가하며 장 노멀전기검층에서의 왜곡이 단노멀전기검층에서 보다 심함을 알 수 있었다.

**주요어 :** 노멀전기검층, 지표, 지하수위

\*Corresponding author: hwangse@kigam.re.kr

## 1. 서 론

국내에서 노멀전기검층은 지반조사, 지하수·환경조사, 지열조사, 지질조사, 광물자원평가 등에 널리 이용되고 있다. 1927년 프랑스 Alsace 지방의 Pechelbrone에서 광물자원 탐사 목적으로 전기검층이 처음으로 수행된 이래 노멀전기검층은 1930년 말부터 1960년 초까지 석유검층에 많이 이용되었으며 현재 존재하는 물리검층 자료의 45%를 차지할 정도로 많이 적용되었다 (Allaud and Martine, 1979; Frank, 1986). 노멀전기검층은 전기검층법의 하나로 Fig. 1a와 같이 전위를 측정하는 전위전극( $M$ ), 전기비저항 측정을 위해 전류를 흘려 보내는 전류전극( $A$ )이 존재에 위치한다. 전류전극  $A$ 에서 16인치 아래에 있는  $M$ 을 이용하여 전압을 측정하면 단노멀, 64인치 위에 있는  $M$ 을 이용하면 장노멀이라 한다.

노멀전기검층에서 전압을 측정하기 위해서, 전위전극( $M$ )과 존재에서 멀리 떨어진 곳에 위치하는 기준점 전위전극( $N$ , 접지 전위전극)에서의 전위를 측정하여 그

차이를 계산한다. 또한, 전류가 흐르기 위해서는 하나의 완성된 회로가 있어야 하므로 전압 측정을 위해 전류를 흘려 보내는 전류전극( $A$ )에서 나온 전류가 흘러서 들어갈 수 있도록 장비 존재에서 멀리 떨어진 위치에 전류리턴전극( $B$ )이 Fig. 1b와 같이 위치한다. 이때,  $N$ 과  $B$ 는 검층기 존재에서 멀리 떨어져 위치하므로 원거리 전극이고  $A$ 와  $M$ 은 검층기 존재 내에 위치한다. Fig. 1b와 같이  $B$ 가 시추공 내에 있고  $N$ 이 지표에 있는 경우(MABN) 이외도  $N$ 이 시추공 내에 위치하고  $B$ 가 지표에 위치하는 경우(MANB)도 있다.

이 연구에서는 지표 및 지하수 수위가 노멀전기검층에 미치는 영향을 분석하기 위해 지표 및 지하수 수위를 고려한 노멀전기검층 반응의 수치 모델링을 수행하였다. 지표 부근에서 노멀전기검층을 수행하기 때문에 원거리전극들 또한 지표 부근에 위치하게 됨으로써 원거리 전극 가정에 위배되어 기준점전위전극에서 전위가 "0"이라는 가정에 왜곡이 일어날 수 있다.

이 연구에서는 기준점전위의 왜곡을 정확히 구현하기 위해 지표 및 지하수 수위 뿐 아니라  $A$ 와  $M$ 을 포

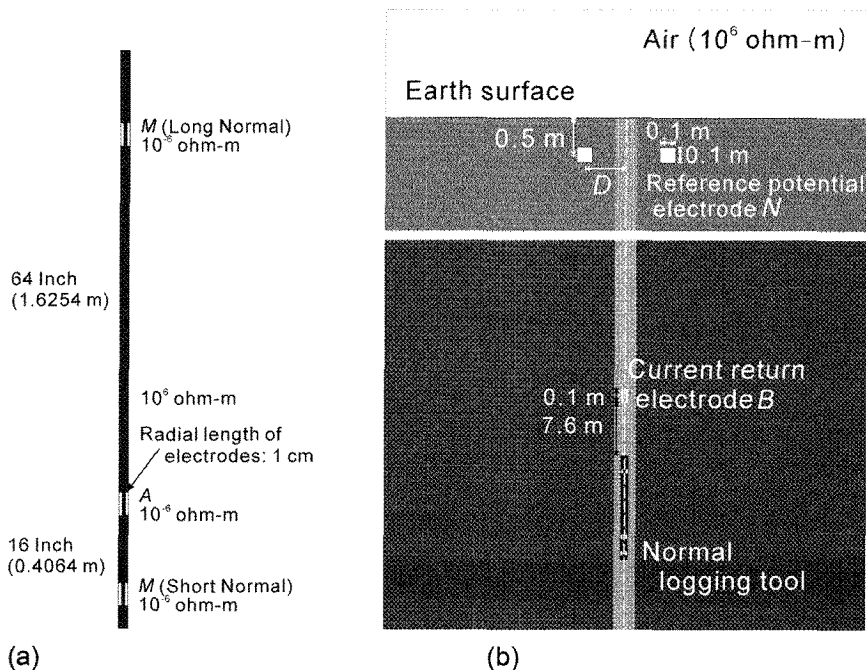


Fig. 1. (a) Configuration of a commercial normal logging tool with one current electrode  $A$ , and two potential electrodes,  $M_L$  and  $M_S$ , for long and short normal measurements, respectively. (b) Configuration of the spatial modeling domain, including the normal logging tool, a reference potential electrode located 0.5 m below the earth's surface, and a current return electrode 7.6 m above the tool. The reference potential electrode is a ring electrode with a radius ( $D$ ) of 10 m, a cross section with dimensions of 0.1 m by 0.1 m.

함한 검층기 존데 및 원거리 전극  $N, B$ 까지 모두 고려하여 수치 모델링을 수행하였다. 수치 모델링에서 이용한 노멀전기검층 존데는 한국지질자원연구원에서 사용하고 있는 장비 규격을 참조했으며(장비의 제작업체의 동의가 없으므로, 이 논문에서는 규격을 명시하지 않음) 검층 존데의 물성은 실제와 비슷한 값으로 설정하였다.

노멀전기검층의 수치 모델링을 위해서는 2차원 목표지향 자기적용 고차 유한요소법(2D goal-oriented self-adaptive high-order  $hp$  finite element method) 알고리즘을 이용하였다(여기서  $h$ 는 요소의 크기,  $p$ 는 노드에서의 근사 차수) (Nam, 2010; Pardo *et al.*, 2006). 이 알고리즘은 사용자가 원하는 오차 범위(이 연구에서는 1%) 내의 해를 계산하기 위해, 자동적으로 최적의 격자를 형성한다. 이때, 오차란 계산 영역 전체가 아닌 해에서의 오차를 의미한다. 즉, 이 연구에서는 2차원 목표지향 자기적용 고차 유한요소법 알고리즘을 이용하여 기준점 전위전극  $N$ 과 전위전극  $M$ 에서의 전위차에 기초하여 계산한 겐보기비저항의 오차가 1%보다 작도록 격자를 생성한다. 이때, 오차의 정의는 현재 격자에서 구한 '전위차'와 현재 격자 내의 모든 요소들 네 개의 요소로 분할하고, 각각의 노드에서의 근사차수를 한 차수씩 높은 세밀한 격자에서 구한 '전위차' 사이의 오차이다.

## 2. 노멀전기검층 수치 모델링

지표 부근까지 노멀전기검층 자료를 취득할 경우, 원거리 전극인 기준점전위전극  $N$ 과 전류리턴전극  $B$ 는 지표 부근에 위치하게 되어, 기준점전위전극에서 전위값이 "0"이라는 가정에서 벗어날 수 있다. 이러한 왜곡을 정확히 평가하기 위하여 전극  $A$ 와  $M$ 을 포함하는 노멀전기검층 존데와 원거리 전극  $N, B$ 까지 고려하여 수치 모델링을 수행하였다.

겐보기전기비저항( $\rho_a$ )은 전위전극에서 전위값( $V_M$ )과 기준점전위에서의 전위( $V_N$ )의 차이인 전압( $V_M - V_N$ )을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\rho_a = 4\pi L \frac{(V_M - V_N)}{I_0} \quad (1)$$

위 식에서,  $L$ 은 전류전극과 전위전극 사이의 간격,  $I_0$ 은 전류전극에서 흘러 보내는 전류의 강도로 이 연구에서는 1 A이다.

### 2.1. 검층기 존데

노멀전기검층의 수치 모델링을 위해서 한국지질자원연구원에서 사용하고 있는 노멀전기검층기를 기준으로 검층기를 수치 모형화하였다(Fig. 1a). 검층기 존데의 직경과 길이는 실제와 동일하다(장비제작 업체의 동의가 없으므로, 정확한 정보는 제공하지 못함). 또한, 장노멀전기검층의 전위전극은 전류 전극의 위쪽에 위치하며 전류전극과 전위전극의 간격( $L$ )은 64인치(1.6254 m)이고 단노멀전기검층의 전위전극은 전류 전극의 아래쪽 16인치(0.4064 m)의 거리에 위치한다(Fig. 1a). 전류전극 및 전위전극의 수평 너비는 0.2 cm로 가정하였고 전기비저항은  $10^{-6}$  ohm-m하였으며 전극을 제외한 존데는 모두 절연체라 가정하고 전기비저항을  $10^6$  ohm-m로 설정하여 실제 장비의 물성에 가깝게 근사하였다. 전류전극에서는 1 A의 전류를 출력하는 것으로 가정하였다.

### 2.2. 원거리 전극

이 연구에서 고려하고 있는 수치모형은 Fig. 1b와 같이 전류리턴전극  $B$ 가 시추공 내의 케이블에 위치하고 원거리전위전극  $N$ 이 지표에 있는 경우로 MABN이다. 원거리전위전극을 실제와 비슷하게 모사하기 위해서는 점전극에 가깝게 설정하여 모사해야 하지만, 이 경우 수치 모델링의 구조가 3차원이 되어 수치 모델링이 복잡해진다. 원통좌표계 내에서 Fourier 전개에 기초하면 이러한 3차원 문제를 2.5차원 문제로 변환하여 Nam *et al.* (2010)의 알고리즘을 이용하면 계산이 가능하지만, 이 연구에서는 2차원 문제로 단순화하여 Pardo *et al.* (2006)의 알고리즘을 적용하여 수치 모델링을 수행한다. 이를 위해 Fig. 1b와 같이 기준점전위전극을 반지름이  $D$ (1 m 혹은 10 m)인 링 모양의 전극으로 가정하였다. 이때 링의 단면적은 0.1 m x 0.1 m이며 이 단면적의 중심이 지하 0.5 m 깊이에 있다고 가정했다.

실제 장비에서는 전류전극에 의해 지층으로 주입된 전류는 존데를 연결하는 케이블로 흘러 들어가도록 설계되어있다. 노멀전기검층 존데의 연결부분부터 7.6 m까지는 절연이 되어 있어 실제로는 존데의 7.6 m 상부에서부터 전류가 케이블로 흘러 들어간다. 즉, 전류리턴전극은 검층 구간이 깊어지면 더욱 길어지는 형상이 된다. 이 연구에서는 실제와 비슷하게 선전극 형태 전체를 전류리턴전극을 모사하기 보다는 수직 길이 10 cm인 링타입의 전류리턴전극으로 단순화하여 존데에서

7.6 m 떨어진 위치에 위치시켰다. 전류리턴전극은 수직 길이를 제외하고는 모든 면에서 전류전극과 동일하다. 존데 내에 위치한 전류전극에서 1 A의 전류가 지층으로 주입되므로, 전류리턴전극에서도 1 A의 전류가 흘러 들어오는 것으로 가정하였다. 그러므로, 전류리턴전극에서의 출력은  $-1A$ 이다.

지표 부근에서의 노멀전기검층을 수치 모델링하기 위해서는 지표 역시 수치모형에 포함시켜야 한다. 지표는 경계조건을 이용하기 보다는 공기 층을 그대로 수치모형에 입력하여 좀더 현실성 있는 수치 모델링을 수행하였다. 이때 공기층의 전기비저항은 자기지전류 탐사(magnetotelluric survey)의 모델링에서처럼(Nam *et al.*, 2007)  $10^6$  ohm-m으로 가정하였다.

### 3. 수치실험

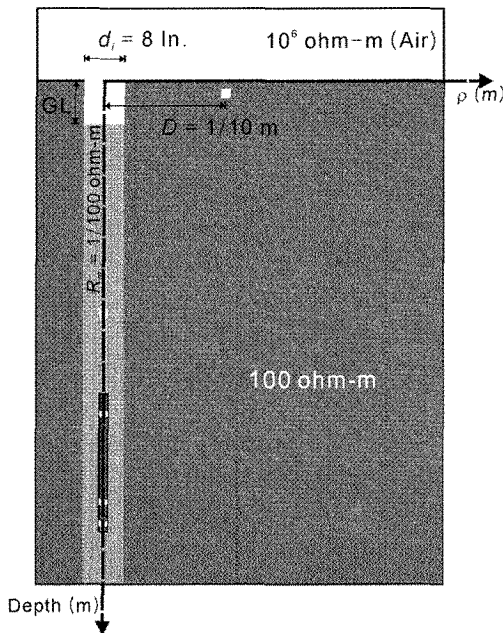
지표 부근에서의 단노멀전기검층 결과에 대해 자세히 분석한 후, 단노멀전기검층과의 비교에 초점을 두

어 장노멀전기검층 결과를 간략히 분석한다.

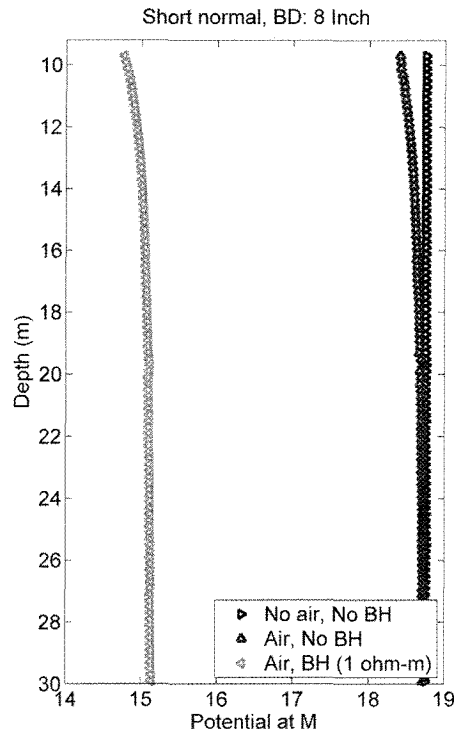
## 4. 단노멀전기검층

### 4.1. 지표면의 영향

노멀전기검층에 대한 지표면의 영향을 알아보기 위해 가장 간단한 수치모형을 설정하였다. 지하 매질은 Fig. 2와 같이 전기비저항이 100 ohm-m인 반무한 공간으로 가정하였다. 시추공의 지름은 8인치이며 시추공 이수의 전기비저항은 1 ohm-m 또는 100 ohm-m로 가정하였다. 시추공 이수의 전기비저항이 100 ohm-m인 경우는 지하 매질과 동일한 전기비저항 값이기 때문에 시추공이 없는 경우라고도 할 수 있다. 시추공 내의 지하수 수위(Groundwater Level, GL)는 0 m 즉, 지표면과 동일한 높이 이거나 10 m로 가정하였다. 링 형태의 기준점전위 전극의 반지름( $D$ )이 1 m인 경우와 10 m인 경우에 대해 노멀전기검층의 반응을 분석하기로 한다.



**Fig. 2.** Model for numerical tests of this study consisting of air ( $10^6$  ohm-m) and a homogeneous formation whose resistivity is 100 ohm-m. In the formation, a borehole is penetrating with a diameter of 8 inches. The resistivity of the borehole mud ( $R_m$ ) is either 1 or 100 ohm-m. When  $R_m = 100$  ohm-m, no borehole is considered since  $R_m$  is the same as that of formation. The diameter of the reference potential electrode ( $D$ ) is either 1 or 10 m. The level of groundwater (GL) is either 0 or 10 m.



**Fig. 3.** Potential measured at potential electrode  $M$  of short normal logging for a homogeneous medium with a resistivity of 100 ohm-m ( $\blacktriangleright$ ), and a half-space model with ( $\blacktriangle$ ; 100 ohm-m borehole) and without a 1 ohm-m borehole ( $\blacktriangleleft$ ), as depicted in Fig. 2.

Fig. 3은 지표의 영향을 분석하기 위해 공기층을 고려하지 않은 수치모형(▶), 공기층만 있고 시추공이 없는 반무한 매질의 수치모형(▲), 그리고 1 ohm-m시추공이 있는 수치모형(◄)에 대한 전위전극  $M$ 에서의 전위값을 수치 모델링한 결과를 구간 10 m에서부터 30 m까지 비교한 것이다. 측정 구간이 심도 10 m 하부부터 시작한 것은 전류리턴전극과 존재 내의 전극과의 거리를 고려했기 때문이다.

공기가 없는 경우, 예견된 것처럼 측정 심도와 관계 없이 일정한 전위값을 보이지만 공기층이 존재하는 경우는 심도 10 m 부근에서 공기층의 영향으로 공기가 없는 수치모형의 반응에 비해 전위 값이 약 1.8% 정도 감소하였다. 이러한 차이는 측정 심도가 깊어지면서 점차 감소하여 공기층이 있는 수치모형의 전위는 공기층이 없는 수치모형에 대한 전위와 동일해지는 것을 알 수 있다. 공기층과 함께 시추공 이수의 전기전도도가 1 ohm-m인 시추공이 있는 경우도 공기층만 있는 수치모형과 같이 지표의 영향이 나타난다. 공기층의 영향이 거의 없는 심부에 비해 10 m 깊이에서는 지표면의 영향으로 전위가 약 2.5% 정도 감소했다. 한편 공기층과 함께 시추공 이수의 전기비저항이 1 ohm-m인 시추공이 존재하는 수치모형의 전위전극  $M$ 에서의 전위는 시추공이 없는 수치모형과 비교 할 때 전체적으로 약 20% 감소하였다.

4.2. 전류리턴전극의 영향

-1 A의 전류가 들어오는 전류리턴전극의 영향을 파악하기 위해 전류리턴전극  $B$ 를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 전위전극  $M$ 에서의 전위 변화 특징을 알아보고자 한다. 공기층과 시추공이 없는 반무한 공간의 경우, 앞서 논의한 바와 같이 지표의 영향이 없기 때문에 모든 측정 구간에서 동일한 전위를 보이지만, 전류리턴전극  $B$ 가 없는 경우에 비해 전류리턴전극이 있는 경우는 19.54 V에서 18.75 V로 약 4% 정도 감소하였다(Fig. 4).

한편 공기층과 시추공 이수의 전기비저항이 1 ohm-m인 시추공이 있을 때,  $B$ 를 고려하지 않은 경우에 비해  $B$ 를 고려한 경우 전위가 5.9% 정도 감소했다. 즉 지표의 영향이 없는 심부 구간은 약 16.09 V에서 15.14 V로 감소하였다. 한편, 앞서 논의한 바와 같이  $B$ 를 고려한 경우는 지표면의 영향으로 전위가 감소하였다가 심부 구간으로 가면서 차이가 줄어들어 반면,  $B$ 를 고려하지 않은 경우에는 지표부근에서 지표의 영향으로 전위가 약 2% 증가했다가 심부 구간으로 가면서

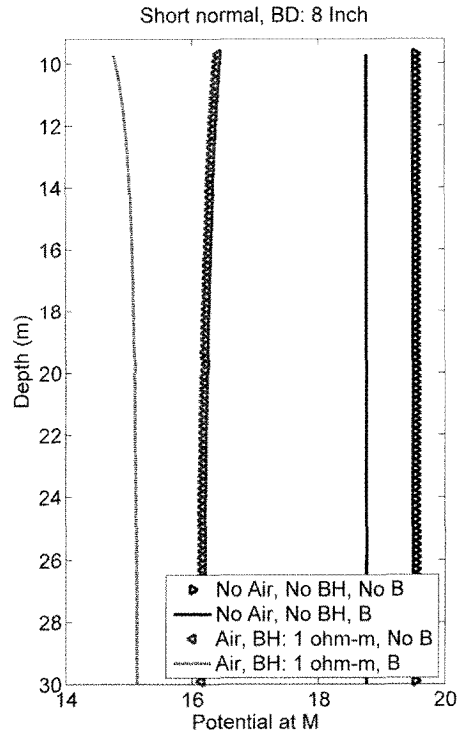


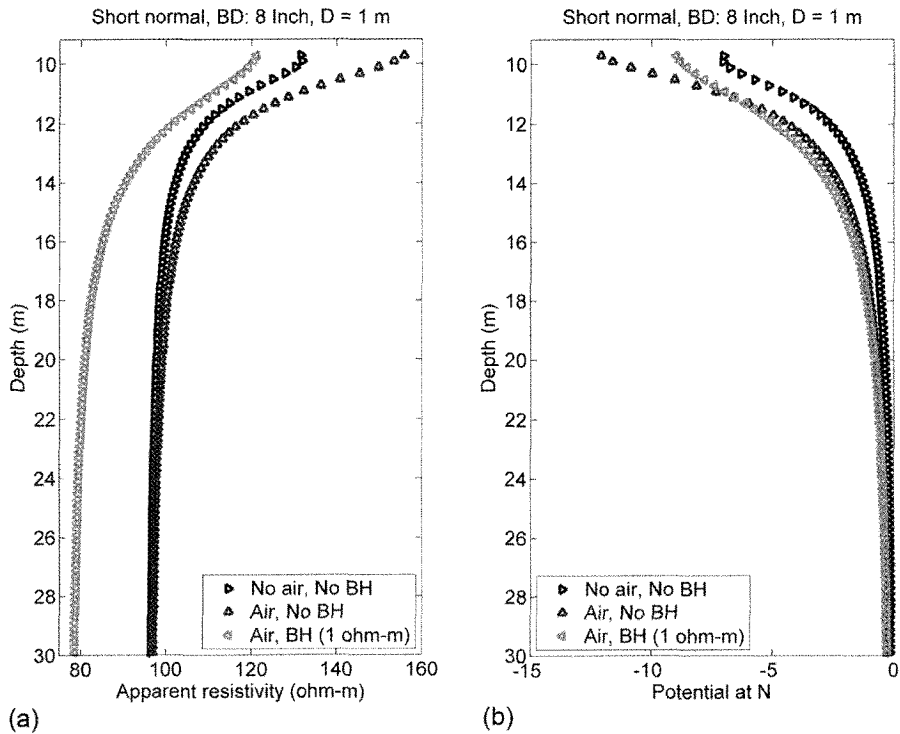
Fig. 4. Potential measured at potential electrode  $M$  of short normal logging for a homogeneous medium with a resistivity of 100 ohm-m with  $B$  (▶) and without  $B$  (solid line), and for a half-space model having a 1 ohm-m borehole with  $B$  (◄) and without  $B$  (dashed line).

이러한 증가는 감소한다.

4.3. 기준점전위전극의 직경이 1 m 인 경우의 겉보기비저항 왜곡

기준점전위전극의 직경이 1 m인 경우 ( $D=1$  m), 겉보기비저항은 Fig. 5a와 같이 모든 경우, 즉 균질한 수치모형, 공기층이 있는 반무한 수치모형, 그리고 시추공 이수의 전기비저항이 1 ohm-m인 시추공이 있는 수치모형에 대한 수치 모델링 결과로 심부에서 천부로 가면서 겉보기전기비저항의 왜곡이 증가하는 추세를 볼 수 있다. 식 (1)을 고려하면, 전위전극에서 전위의 변화가 없다고 가정하면 기준점전위전극에서의 전위가 줄어들면 상대적으로 겉보기비저항은 증가하게 된다. Fig. 5b에 도시된 기준점전위전극에서의 전위 변화 곡선을 보면 천부로 갈수록 전위가 감소하는 형태임을 알 수 있다.

공기층과 시추공이 없는 균질 수치모형(▶)의 경우 왜곡의 영향이 거의 사라진 심도 30 m에서의 겉보기



**Fig. 5.** (a) Apparent resistivities from short normal logging for a homogeneous medium with a resistivity of 100 ohm-m (▶), and a half-space model with (▲; 100 ohm-m borehole) and without a 1 ohm-m borehole (◀), as depicted in Fig. 2. The radius of  $N$  is 1 m. (b) Potential at  $N$  for each of the corresponding models. The apparent resistivities are computed based on the differences of potential between  $M$  (Fig. 3) and  $N$ .

비저항은 약 96.4 ohm-m이지만, 지표 혹은 기준점전위전극에 가장 가까운 검층 위치인 심도 10 m에서는 131.6 ohm-m로 약 36.5% 증가하였다. 이러한 증가는 Fig. 5b에 도시한 기준점전위전극에서의 전위 값으로 설명할 수 있다. 기준점전위전극에서의 전위는 검층 깊이가 30 m일 때 즉, 전류전극과 단노멀전기검층 전위전극의 중간점이 30 m일 때, 전류리턴전극은 이 중간점보다 약 9.2 m 상부인 20.8 m 정도에 위치해 있으므로(Fig. 1 참조) 충분히 멀리 위치하고 있어 -0.13 V이다. 그러나, 검층 심도가 천부인 10 m일 때는, 전류리턴전극은 약 0.8 m 심도에 위치하기 때문에 기준점전위전극  $N$ 과 가까워  $N$ 에서의 전위는 검층 심도가 30 m일 때에 비해 6.89 V 감소한 -7.02 V가 되었다.  $N$ 에서의 전위 값의 왜곡은 전위전극  $M$ 에서의 전위가 약 2% 변화한 것에 비하면 무척 크기 때문 전위전극에서의 변화는 ( $D=1$  m인 경우) 무시할 수 있다. 또한,  $M$ 에서는 전위가 감소하므로 겉보기비저항이 작아지는 방향으로 왜곡이 일어나지만  $N$ 에서는 (Fig. 5a에

서와 같이) 겉보기비저항이 커지는 방향으로 왜곡이 일어난다.  $D=1$  m인 경우, 기준점전위전극에서의 전위의 감소로 인해 겉보기비저항이 36.5% 증가한 것이다 (Fig. 5a). 이때, 전류리턴전극  $B$ 의 위치는 약 0.8 m 이고 링 형태의 기준점전위전극  $N$ 은 전극의 0.1 m × 0.1 m 단면적 중심이 0.5 m 깊이에 위치하고 시추공 중심에서 1 m 떨어진 거리에 있기 때문에  $N$ 과  $B$ 의 거리는 약 1 m 이다.

공기층이 있는 반무한 매질의 경우(▲), 30 m 깊이에서 겉보기비저항이 96.9 ohm-m이며 지표에 가장 가까운 10 m에서는 60.8% 증가한 155.8 ohm-m 이다. Fig. 5b에서 기준점전위전극에서의 전위는 30 m 인 경우 0.2406 V이고 10 m 인 경우는 12.1 V이다. 이러한 증가 폭은 균질매질에서 살펴본 바와 같이, 전류리턴전극과 기준점전위전극이 가깝기 때문에 일어난 왜곡인 36.5%에 비해 추가적으로 24.3% 더 증가한 것이며 이 추가적인 증가는 지표의 영향이라고 할 수 있다. 한편, 전기비저항이 1 ohm-m인 시추공 이수로 채워

진 시추공이 있는 반무한 매질의 경우(◀), 20 m 심도에서의 겉보기비저항은 78.5 ohm-m 이지만 10 m 심도에서는 121.1 ohm-m 로 약 54.27% 증가하였다.

4.4. 기준점전위전극의 직경이 10 m 인 경우의 겉보기비저항 왜곡

기준점전위전극의 직경이 10 m 인 경우, 즉 기준점전위전극이 시추공에서 떨어진 경우에는 Fig. 6a에서 볼 수 있는 바와 같이  $D=1$  m인 경우에 비해 겉보기비저항의 왜곡 정도가 많이 줄어든 것을 알 수 있다.  $D=1$  m인 경우 보다 9 m나 더 멀리 떨어져 있기 때문에 왜곡형태 또한 다르다. 즉, 완만한 굴곡의 형태로 심도가 알아지면서 겉보기비저항 값이 증가하다가 다시 감소한다. 균질한 경우는 다른 경우보다 변화폭이 작기 때문에 직선처럼 보이나 값을 자세히 비교하면 동일한 양상을 보인다. 이러한 변화 양상은 기준점전위에서의 변화양상을 보면 더욱 확실하게 나타난다. 기준점전위전극에서는 겉보기비저항과는 대칭의 형태

로 심부에서 천부로 가면서 전위가 감소하다가 다시 증가하는 추세를 보인다. 그러나  $D=1$  m인 경우는  $N$ 에서의 전위 값 변화와 겉보기비저항의 변화 폭은 형태와 값에 있어서 거의 대칭에 가까웠지만,  $D=10$  m 경우는  $N$ 에서의 전위변화 폭이 겉보기비저항의 변화 폭 보다는 훨씬 크다는 것을 쉽게 파악할 수 있다. 이는  $N$ 에서의 전위의 변화값이  $D=1$  m에 비해 매우 작기 때문에  $M$ 에서 전위변화의 영향( $N$ 에서는 반대로 겉보기비저항을 증가시키는 방향)에 의해 겉보기비저항의 변화폭이 줄어들었기 때문이다. 또한,  $N$ 에서의 전위의 절대값이 증가하다가 감소하는 것은 하나의 송신원에 의한 등전위면은 (이상체가 존재하는 경우 구의 형태가 이상체에 의한 영향만큼 찌그러지지만) 기본적으로 구의 형태에 기초한다는 것을 감안하면 자명해진다. Fig. 5b에서도 검층 심도 10 m에 가까워지면서 전위의 절대값의 증가 추세는 감소 추세로 바뀌려고 한다는 것을 알 수 있다. Fig. 6b의 경우는 전위 측정 거리가 멀기 때문에 Fig. 5b에서 보다 증가 추세

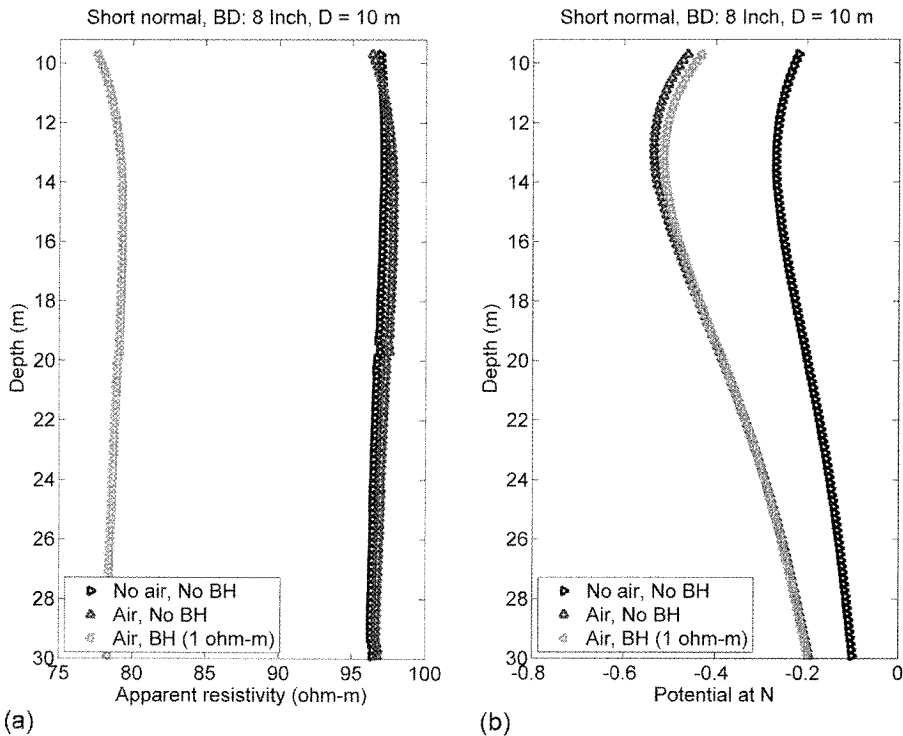


Fig. 6. (a) Apparent resistivities from short normal logging for a homogeneous medium with a resistivity of 100 ohm-m (▶), and a half-space model with (▲; 100 ohm-m borehole) and without a 1 ohm-m borehole (◀), as depicted in Fig. 2. The radius of  $N$  is 10 m. (b) Potential at  $N$  for each of the corresponding models. The apparent resistivities are computed based on the differences of potential between  $M$  (Fig. 3) and  $N$ .

가 감소 추세로 바뀌는 현상이 좀더 심부에서 나타나게 된다. 송신원의 위치와 전위 측정 위치와의 관계를 고려한다면  $N$ 에서의 전위 변화 양상은 물리적으로 타당한 결과라 할 수 있다.

심도 30 m와 10 m에서 각 수치모형에 대한 겉보기비저항과  $N$ 에서의 전위 변화를 좀더 자세히 살펴보자. 균질한 수치모형의 경우, 심도 30 m에서 96.3 ohm-m 로  $D=1$  m 인 경우의 96.4 ohm-m와 거의 동일하였지만, 심도 10 m에서는 96.9 ohm-m 로, 약 1% 이내의 증가만을 보였으며  $N$ 에서의 전위는 -0.0991 V 에서 -0.2185 V로 0.1194 V 감소하였다. 한편 공기층이 있는 반무한 공간의 30 m 심도의 전기비저항 값은 96.4 ohm-m로  $D=1$  m인 경우의 96.9 ohm-m와 매우 근사하지만 10 m 심도에서는 96.6 ohm-m로 역시 1% 이내의 증가를 보였으며  $N$ 에서의 전위는 -0.1919 V 에서 -0.4618 V로 0.2699 V 증가하였다. 마지막으로, 전기비저항 1 ohm-m의 시추공 이수가 있는 시추공의 경우, 겉보기비저항은 77.6 ohm-m 에서 78.2 ohm-m 로 역시 1% 이내로 증가하였으며 전위는 -0.1945 V 에서 -0.4316 V로 0.2371 V 감소하였다. 지표의 영향 및 전류리턴전극과 기준점전위전극의 근접에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 기준점전위전극의 위치를 시추공에서 멀리하는 것이 좋다.

#### 4.5. 지하수면의 영향

매질의 전기비저항은 매질 내 공극의 유체에 의해 결정이 되므로 지하수면의 변화는 매질의 전기비저항에도 영향을 주지만 이 연구에서는 지하수면이 시추공 내의 이수의 수위 변화에만 영향을 주는 것으로 가정하였다. 전기비저항이 100 ohm-m인 시추공 이수나, 1 ohm-m인 시추공 이수가 있는 두 경우 모두 지하수면이 0 m에서 10 m로 변화해도 Fig. 7과 같이 겉보기비저항의 증가는 4% 이내이다(Fig. 7).

### 5. 장노멀전기검층

#### 5.1. 기준점전위전극의 직경이 10 m 인 경우의 겉보기비저항 왜곡

단노멀전기검층에서 지표면 근처에서의 왜곡에 대해 자세히 분석하였으므로 장노멀전기검층에 대해서는  $D=10$  m 인 경우에 대해서만 그리고 단노멀과의 비교에 기초하여서만 설명하고자 한다. Fig. 8은 균질한 매질, 공기층이 있는 100 ohm-m의 반무한 매질, 그리고 전기비저항 1 ohm-m의 시추공 이수로 채워진 시추공

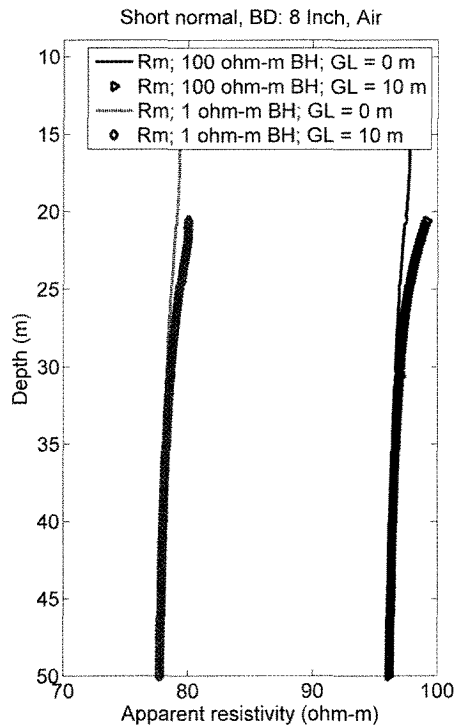


Fig. 7. (a) Apparent resistivities from short normal logging for half space models (Fig. 2) with borehole with a resistivity of 100 ohm-m ( $\blacktriangleright$  and solid line) or of 1 ohm-m ( $\blacklozenge$  and dashed line). Groundwater Level (GL) is either 0 m (solid and dashed lines) or 10 m ( $\blacktriangleright$  and  $\blacklozenge$ ).

이 있는 수치모형에서 측정된 겉보기비저항 값으로, 동일한 조건에서 단노멀전기검층에서 얻은 Fig. 6의 겉보기비저항 값에 비해 그 왜곡의 형태는 동일하지만 왜곡된 정도가 크다. 장노멀전기검층의 전위전극  $M$ 에서 그 절대값은 차이가 있지만 Fig. 8b의 왜곡은 Fig. 3의 단노멀전기검층의 왜곡과 거의 동일한 양상이다. 그러므로, 장노멀전기검층에서의 겉보기비저항의 왜곡이 단노멀전기검층에 비해 커진 이유는  $N$ 에서의 전위 값의 변화 폭이 Fig. 6에 도시된 단노멀전기검층에서의 전위 값보다 훨씬 크기 때문임을 알 수 있다.

### 6. 결 론

노멀전기검층에 대한 지표의 영향을 분석하기 위해 전류전극 및 전위전극을 포함한 존데, 전류리턴전극, 기준점전위전극, 공기 등 실제 검층 환경에 가깝게 수치모형을 설정하여 노멀전기검층의 수치 모델링을 수행하였다. 지표 근처인 천부에서 노멀전기검층을 수행



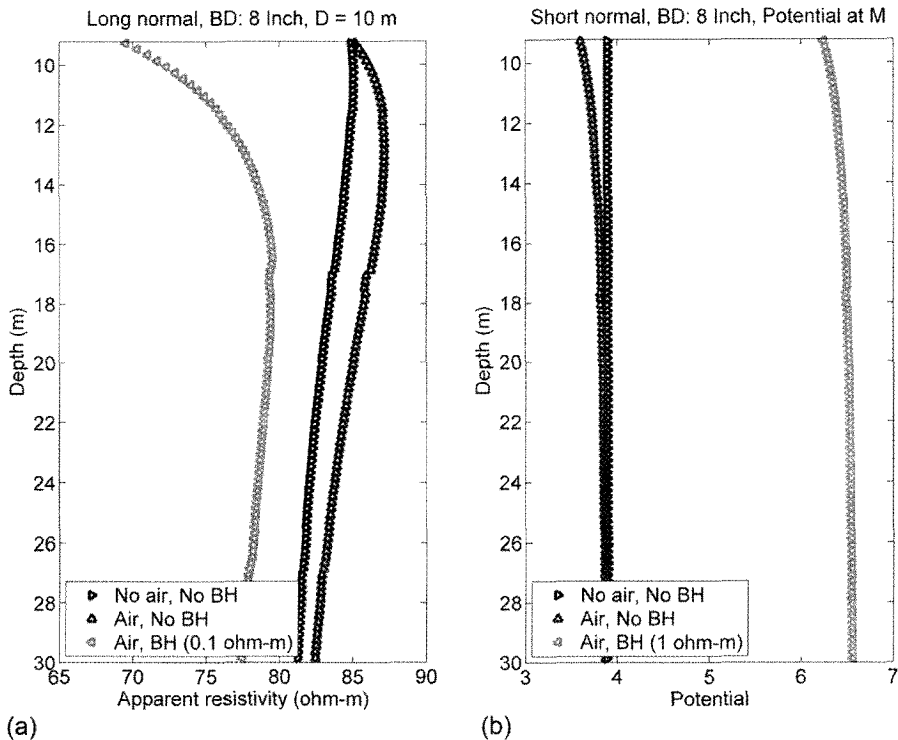


Fig. 8. (a) Apparent resistivities from long normal logging for a homogeneous medium with a resistivity of 100 ohm-m (▶), and a half-space model with (▲; 100 ohm-m borehole) and without a 1 ohm-m borehole (◀), as depicted in Fig. 2. (b) Potential at M for each of the corresponding models.

가는 경우, 기준점전위전극이 충분히 멀리 있다는 기본 가정이 어긋나게 되어 기준점전위전극에서의 전위 값이 (전류리턴전극이 가까이 있기 때문에) 음의 전위를 갖게 된다. 이로 인해 겉보기비저항 값은 심부에서 천부로 갈수록 증가하는 추세를 보인다. 기준점전위전극이 시추공에 가까운 거리에 위치할수록 전위의 절대값의 증가 추세는 지표에서 감소추세로 바뀌고 거리가 시추공에서 멀어질수록 심부에서 증가추세가 감소추세로 바뀐다. 지표의 영향은 장노멀전기검층에서 단노멀보다 크다. 지표부근에서 노멀전기검층을 수행할 때에는 지표의 영향으로 인해 겉보기비저항의 왜곡이 일어나므로, 지표에 대한 영향을 반드시 고려하여야 한다.

사 사

한국지질자원연구원 지식경제부 기본사업인 '지구환경변화 대응 지하수 확보 통합솔루션 개발' 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

Allaud, L. and Martin, M. (1979) Schlumberger, The history of technique. John Wiley & Sons Inc., 333p.  
 Frank, R.W. (1986) Prospecting with old E-logs. Schlumberger Education Surveying Corp., Document No.4.  
 Nam, M.J., Kim, H.J., Song, Y., Lee, T.J., Son, S.-J. and Suh, J.H. (2007) Three-dimensional magnetotelluric modeling including surface topography, Geophysical Prospecting, v.55, p.277-287.  
 Nam, M. J. (2010) An introduction to a goal-oriented self-adaptive high-order *hp* finite element method, Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering, v.4 (in press).  
 Nam, M. J., Pardo, D., Torres-Verdin, Hwang, S., Park, K. G. and Lee, C. (2010) Simulation of eccentricity effects on short- and long-normal logging measurements using a Fourier-*hp*-finite-element method. Exploration Geophysics, v.63, p.118-128.  
 Pardo, D., Demkowicz, L., Torres-Verdin, C. and Tabarovsky, L. (2006) A goal-oriented *hp*-adaptive finite element method with electromagnetic applications, Part I: electrostatics. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v.65, p.1269-1309.