



HAL
open science

Analysis of Response Characteristics in Borehole Electrical Resistivity Surveys and Their Applications

Cho Ahyun, Song Seo Young, Kim Bitnarae, Son Jeong-Sul, Nam Myung Jin

► **To cite this version:**

Cho Ahyun, Song Seo Young, Kim Bitnarae, Son Jeong-Sul, Nam Myung Jin. Analysis of Response Characteristics in Borehole Electrical Resistivity Surveys and Their Applications. Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 2023, 60 (5), pp.377 - 394. 10.32390/ksmer.2023.60.5.377 . hal-04371374

HAL Id: hal-04371374

<https://brgm.hal.science/hal-04371374v1>

Submitted on 3 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

기술보고

시추공 연계 전기비저항 탐사의 반응 특성 및 적용 사례 분석

조아현¹ · 송서영² · 김빛나래³ · 손정술⁴ · 남명진^{1,5*}¹세종대학교 에너지자원공학과, ²한국과학기술연구원, ³BRGM, French Geological Survey, Geo-Resources Direction, Orleans, France, ⁴한국지질자원연구원, ⁵세종대학교 지구자원시스템공학과

Analysis of Response Characteristics in Borehole Electrical Resistivity Surveys and Their Applications

AHyun Cho¹, Seo Young Song², Bitnae Kim³, Jeong-sul Son⁴ and Myung Jin Nam^{1,5*}¹Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, South Korea²Korea Institute of Science and Technology, South Korea³Post-doctoral Fellow, BRGM, French Geological Survey, Geo-Resources Direction, Orléans, France⁴Korea institute of Geoscience and mineral resources, South Korea⁵Department of Energy Resources and Geosystems Engineering, Sejong University, South

*Corresponding Author. Myung Jin Nam, nmj1203@gmail.com/nmj1203@sejong.ac.kr, Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, South Korea

Received

8 August 2023

Final version Received

13 September 2023

Accepted

26 October 2023

Abstract

The direct current electrical resistivity survey or electrical resistivity tomography (ERT) is a geophysical exploration technique employed in various fields, including mineral exploration, environmental studies, and subsurface safety assessments. ERT, primarily conducted at the surface, can also be conducted between adjacent boreholes to yield high-resolution subsurface images at greater depths. Compared to surface exploration methods, cross-hole ERT employs distinct electrode configurations with varying sensitivities, making it crucial to consider these differences in electrode configuration or measurement environment conditions. This study elucidates electrode configurations and subsequently analyzes the characteristics of cross-hole ERT data for each electrode configuration. Following this, we explore the peculiarities stemming from borehole ERT data. We also describe distortions in ERT data caused by survey geometry and provide an examination of potential solutions to mitigate these distortions. Additionally, we introduce several case studies involving borehole ERTs.

Key words : electrical resistivity tomography, crosshole electrical resistivity tomography, surface-to-borehole electrical resistivity tomography

요약

전기비저항 탐사법은 광물탐사, 환경, 지하 안전 분야 등에서 중요한 물리탐사법으로 활용된다. 주로 지표에서 수행하지만, 깊은 심도의 매질에 대한 고해상도 정보를 얻기 위해 시추공 간 또는 지표와 시추공 사이에 토모그래피를 수행하기도 한다. 이러한 시추공 연계 탐사법은 지표 탐사법과 전극 배열법 및 민감도가 다르기 때문에, 전극 배열법이나 측정 환경의 차이로 인해 발생하는 문제점들을 고려해야 한다. 본 연구에서는 기존 시추공 연계 전기비저항 탐사법의 다양한 전극 배열법에 대해서 정리하고 이에 따른 자료 특성을 분석하였다. 또한, 시추공 전기비저항 탐사 자료에서 발생하는 왜곡과 이 영향을 감소시킬 수 있는 해결 방안을 분석하였다. 시추공 전기비저항 탐사를 활용한 연구 사례를 소개하고자 한다.

주요어 : 전기비저항 토모그래피, 시추공-시추공 전기비저항 탐사, 지표-시추공 전기비저항 탐사

서 론

전기비저항(Direct current electrical resistivity, DC) 탐사 혹은 전기비저항 토모그래피(electrical resistivity tomography)는 지하 매질의 종류 및 분포, 지하수의 분포, 지하 매질의 공극률, 오염원 등의 분포에 따라 반응이 달라진다(Guo *et al.*, 2014). 가장 보편적으로 적용되고 있는 지표 DC 탐사는 다양한 분야에서 많이 수행되고 있지만, 탐사 심도 및 분해능의 한계로 깊은 심도의 정밀 영상화에 한계점이 있다(Cho, 2020). 이러한 탐사 심도의 한계를 극복하기 위해서는 시추공 연계 DC 탐사를 수행할 수 있다(Daniels and Dyck, 1984; Shima, 1992; Greenhalgh *et al.*, 2000). 또한 건물 등의 인공구조물이 지표에 있을 때는, 지표 DC 탐사는 인공구조물 주변을 둘러 탐사를 수행할 수밖에 없지만 시추공 연계 탐사를 수행하면 구조물의 하부 또한 세밀하게 확인할 수 있다(e.g. Goes and Meekes, 2004; Kim *et al.*, 2006; Tsokas *et al.*, 2011).

시추공과 연계하여 수행하는 DC 탐사에는 크게 단일 시추공 탐사(single-hole electrical resistivity survey), 지표-시추공(surface-to-borehole) DC 탐사, 시추공-시추공(cross-hole) 탐사가 있으며, 탐사 대상체의 특성 또는 타겟 심도, 부지 특성에 따라 적절한 방법을 선택하여 탐사를 수행하여야 한다(LaBrecque *et al.*, 1996; Müller *et al.*, 2010; Nimmer *et al.*, 2007; LaBrecque and Ward, 1990). 시추공 DC 탐사는 석유 및 자원 탐사, 이산화탄소 지중저장(carbon capture and sequestration, CCS) 등을 위한 심부 탐사에 활용되었다(e.g. Chambers *et al.*, 2007; Schmidt-Hattenberger *et al.*, 2011; Schmidt-Hattenberger *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2015; Schmidt-Hattenberger *et al.*, 2016).

최근 시추공 연계 ERT는 콘크리트 및 아스팔트 하부 지질조사, 지반 안정성, 환경 오염 등에 대한 관심이 높아지면서 천부 도심지 탐사에도 적용이 확대되고 있다. 천부의 시추공 DC 탐사 사례의 경우 주로 지하수위 및 지하수 유동 탐사(Binley *et al.*, 2002; Deiana *et al.*, 2007; Oldenborger *et al.*, 2007; Yi *et al.*, 2009), 특정한 지질 구조(점토층, 모래 대수층 등) 탐사(Kim *et al.*, 2006; Coscia *et al.*, 2011; Almpanis *et al.*, 2022), 공동 등에 대한 지반 안정성 조사(Kim *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2014), 오염지 탐사(Goes and Meekes, 2004; Bauer *et al.*, 2006; Tsourlos *et al.*, 2011; Palacios *et al.*, 2020)에 적용하고 있다. 중요한 것은 오염원이나 이산화탄소, 방사성 물질이 지하수와 상호작용하며 물성을 변화시키므로, 지하수 분포와 오염 경과 시간의 파악이 필요하다(e.g. Bauer *et al.*, 2006; Chambers *et al.*, 2007; Palacios *et al.*, 2020).

지표 DC 탐사와 비교했을 때, 시추공을 활용한 DC 탐사

는 거리계수와(Guo *et al.*, 2014), 전극 배열(Zhou and Greenhalgh, 2000)이 다르고, 자료의 견지에서도 무결합(null coupling) 영역의 발생이나 대칭 효과(symmetrical effect) 등이 나타나는 등 여러 차이가 있다. 탐사 상황에 있어서도, 시추공 연계 ERT는 시추공 내에 위치한 전극의 경우 정확한 위치를 파악해야 한다는 어려움이 있고(Oldenborger *et al.*, 2005), 시추공 케이싱 외부에 전극을 설치하게 되는 경우 시추공 케이싱에 의한 영향이 발생하기도 하며(Almpanis *et al.*, 2022), 공내수에 의한 영향 또한 발생한다(Lee *et al.*, 2016; Doetsch *et al.*, 2010).

이 연구에서는 적절한 시추공 탐사를 탐사 목적에 따라 효과적으로 수행할 수 있도록 먼저 지표-시추공 탐사와 시추공-시추공 탐사의 일반적인 적용 특성을 분석하였다. 또한 시추공 DC 탐사의 자료 특징을 분석한 뒤, 시추공 DC 탐사에서 발생하는 문제점을 해결할 수 있는 방법에 대해 기술하였다. 이후 시추공 DC 탐사를 수행한 사례들을 분석하여 현재의 연구 동향을 살피고, 시추공 DC 탐사의 향후 연구 과제를 분석하였다.

본 론

시추공 연계 DC 탐사 거리계수

DC 탐사는 한 쌍의 전류 전극(current electrode)에서 전류를 주입해 다른 한 쌍의 전위 전극(potential electrode)에서 전위차를 측정해 거리계수(geometric factor, K)를 곱한 겐보기전기비저항을 취득하는 탐사 방법이다. 전위 전극에서 측정된 전위차(δV_{MN})에 거리계수를 곱하면 DC 탐사 자료의 반응인 겐보기비저항(ρ_a)을 얻을 수 있다.

$$\rho_a = \frac{\delta V_{MN}}{I} K \quad (1)$$

지표 DC 탐사에서는 지표에서 송수신하므로 반무한 공간에 기초하여 다음과 같이 거리계수를 정의한다(Guo *et al.*, 2014).

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (2)$$

여기서 M은 모니터링 전극이고 N은 기준점 전위전극(reference potential electrode), A는 전류 주입 전극(current injecting electrode)이며, B는 전류 리턴 전극(current return electrode)이다. 지표 탐사와는 달리, 시추공 DC 탐사의 거리계수를 계산할 때는 반무한매질과 무한매질의 전

위값을 모두 고려하여야 되므로, 지상에 가상의 전류 샘이 있다고 가정하여 거리계수를 계산한다(Guo *et al.*, 2014).

$$K = 4\pi \left[\frac{1}{AM} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{B'M} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{A'N} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{B'N} \right]^{-1} \quad (3)$$

이 때 지상의 가상의 전류 샘 A'과 B'은 전극 A와 B를 지표면에 수직하게, 지표면과의 거리만큼 지상에 있다고 가정한다(Fig. 1).

시추공 연계 DC 탐사의 종류와 특징

시추공과 연계하여 수행하는 DC 탐사는 단일 시추공 탐사, 지표-시추공 탐사, 시추공-시추공 탐사가 있다. 단일 시추공 탐사에서 시추공이 하나 밖에 없을 때도 수행할 수 있는데, 시추공이 하나만 있어도 되어 경제적이고, 동일한 이유로 지하 매질을 교란시키는 정도가 적다는 장점이 있으나, 방향에 대한 정보가 없어 이상체의 정확한 위치를 알 수 없다는 한계가 있다(Tsourlos *et al.*, 2003). 반면 지표-시추공 DC 탐사는 단일 시추공 탐사에 비해 더 넓은 영역에서 높은 민감도를 보이며, 특히 지표 측선과 시추공 전극 사이의 삼각형에 가까운 영역대에서 가장 높은 민감도를 보이거나 이상체가 위치하는 반대방향에서도 나타나는 대칭 효과가 나타나기도 한다(Tsourlos *et al.*, 2011; Wang and Lin, 2018).

시추공 연계 탐사법 중에서 가장 널리 활용되는 시추공-시추공 DC 탐사법은, 시추공을 이용한 DC 탐사 방법 중 가장 깊은 심도까지 탐사가 가능하다(Zhou and Greenhalgh, 2000). 그러나, 시추공 사이의 거리와 시추공 내에서의 송수신 수직 벌림 길이 비가 일정 값 미만인 경우에서만 적정

해상도의 결과를 얻을 수 있기 때문에 시추공 사이 거리가 너무 크게 되면 해상도가 떨어질 수 있는데(Tsourlos *et al.*, 2011), 두 시추공 사이의 거리와 시추공의 깊이(지표 시추공 심도까지 전극을 배열하지 않을 경우엔, 시추공 내 수직 전극 전개 거리)의 비가 0.75(LaBrecque *et al.*, 1996; Li *et al.*, 2021), 1(Chambers *et al.*, 2007; Tsourlos *et al.*, 2011) 혹은 1.5가 넘으면 안된다는 다양한 주장이 있다. 일반적으로, 시추공의 깊이가 시추공 사이 거리의 한 배 이상이 되지 않는 경우 중앙의 이상체를 확인하기 어려울 수 있고(Ramirez *et al.*, 1995), 이 비율이 작을수록 해상도가 더 높다.

전극 배열 및 배열별 민감도

시추공 DC 탐사 시의 전극배열은 대표적으로 2극 배열, 3극 배열, 4극 배열로 나눌 수 있는데(Loke, 2022), 단일 시추공과 지표-시추공 DC 탐사의 경우 지표 DC 탐사와 동일한 배열법을 사용한다. 반면 시추공-시추공 DC 탐사에서, 두 시추공에 나누어 위치하는 전극들은 하이핀(-)을 넣어 구분한다(Zhou and Greenhalgh, 2000). 즉, 첫 번째 시추공에 위치한 전극이 위에서부터 전류전극 A와 B이고, 다른 시추공에 위치한 전극이 위에서부터 전위전극 M과 N일 때, 이 전극 배열은 AB-MN이라 표기할 수 있다.

설치 전극이 많더라도, 상반성에 의해 같은 결과를 보이는 자료 쌍들을 제외하면 자료 수는 줄어들게 된다. 즉, 시추공-시추공 탐사의 2극 배열의 경우 존재할 수 있는 전극 배열의 경우의 수는 A-M 과 M-A 로 총 2가지 경우가 되지만, 상반성에 의해 두 반응은 같아야 하므로 하나의 자료로 간주할 수 있다(Table 1).

민감도(S_{ij})는 전기비저항 반복계산 시 전기비저항의 현재 모델을 겹보기비저항의 현재 모델로 나눈 값으로, 민감

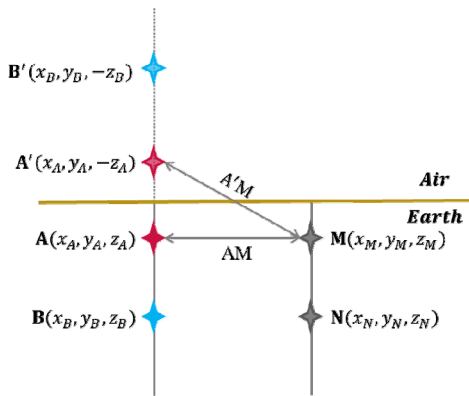


Fig. 1. Virtual source for geometry factor calculation.

Table 1. Cross-hole measurement configurations for different electrode arrays (Zhou and Greenhalgh, 2000)

Electrode array	Total no.	No. of independent configurations	Independent configurations
Pole-pole	2	1	A-M
Pole-bipole	12	6	AM-N, MA-N, MN-A, N-AM, N-MA, A-MN
Bipole-pole	12	6	AM-B, MA-B, AB-M, B-AM, B-MA, M-AB
Bipole-bipole	24	3	AM-BN, AM-NB, AB-MN

도 행렬의 i 행 j 열 항은 전기비저항 역산의 반복계산 시, 현재의 전기비저항 모델의 j 번째 역산 블록의 전기비저항 값이 변화할 때 i 번째 겹보기비저항 값이 얼마나 변화하는지를 보여주는 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$S_{ij} = \frac{\partial d_{ij}}{\partial \rho_{ij}} \quad (4)$$

민감도 행렬에서 특정 항(i, j)이 음의 값을 갖는다는 것은 j 번째 역산 블록의 전기비저항이 증가하게 되면 i 번째 겹보기 전기비저항 값이 감소한다는 것을 의미한다. 시추공 연계 탐사에서는 음의 민감도 값이 지표 탐사에 비해 크게 또 많이 나타난다. 특히, 시추공-시추공 탐사의 경우 탐사 영역 내부에 음의 민감도 영역이 존재할 수도 있다(Loke, 2022).

일반적으로 AM-BN, AB-MN 등(Fig. 2) 4극 배열이 다른 배열에 비해 높은 해상도가 높아 4극 배열이 가장 널리 적용되는 편이지만, 시추공 DC 탐사 시 전극 수가 제한적일 때에는 단극-쌍극자 배열이나 쌍극자-단극 배열 등(Fig. 2)을 사용하기도 한다(Mishra and Shalivahan, 2015).

- 2극 배열

2극배열은 A, M 전극이 한 시추공에 있는 경우(in-hole)

와 두 시추공에 각각 있는 A-M 배열로 나눌 수 있는데, 이 배열들의 경우 두 전극 사이는 음의 민감도가 되어 해상도가 높지 않다(Loke, 2022; Fig. 3). A-M 배열은 수치적으로는 안정적이거나 잡음에 취약하며, 다른 배열에 비해 분해능이 현저히 떨어진다(Cho *et al.*, 2002). 20세기 들어, A-M 배열을 이용한 연구가 다수 이루어졌으나(Shima, 1992; Spies and Ellis, 1995), 3극이나 4극 배열에 비해 해상도가 확연하게 낮기 때문에 잘 쓰이지 않고 있다(Sasaki, 1992; Zhou and Greenhalgh, 2000). 이러한 A-M 배열은 지표 탐사에서의 단극-단극 배열에서와 같이, 원격 전극(remote electrode)인 B와 N을 A, M 이격 거리의 최소 20 배 이상 되는 곳에 설치해야 하기 때문에 탐사가 어려울 수 있다.

- 3극 배열

AM-N, MA-N, MN-A, N-AM, N-MA, A-MN 배열 중 AM-N 배열이, 3극 배열 중에서도 두 시추공 사이의 양의 민감도 영역이 가장 넓어, 시추공 사이 매질에 대한 정보 획득이 우수할 수도 있다(Zhou and Greenhalgh, 1997). 그러나 A-MN 배열은 A-M 사이에 큰 음의 민감도 영역, A-N 사이에 큰 양의 민감도 영역이 발생해 해상도가 떨어지게 된다는 단점도 있다(Loke, 2022; Fig. 4). 또한, AM-N, AN-M 배열에 비해 신호대잡음비가 낮아 탐사 해석에 어려움이 있을 수 있다(Zhou and Greenhalgh, 2000).

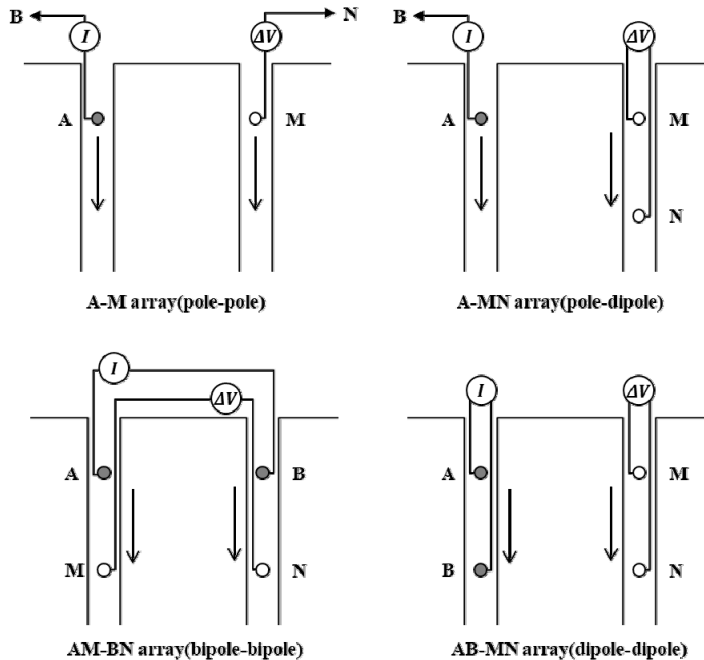


Fig. 2. The types of cross-hole electrode arrays.

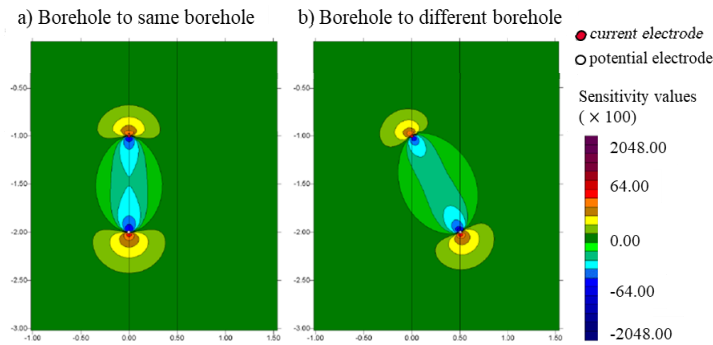


Fig. 3. The possible arrangements of the electrodes for the pole-pole array in the cross borehole survey and the 2-D sensitivity sections. The locations of the two boreholes are shown by the vertical black lines (Loke, 2022).

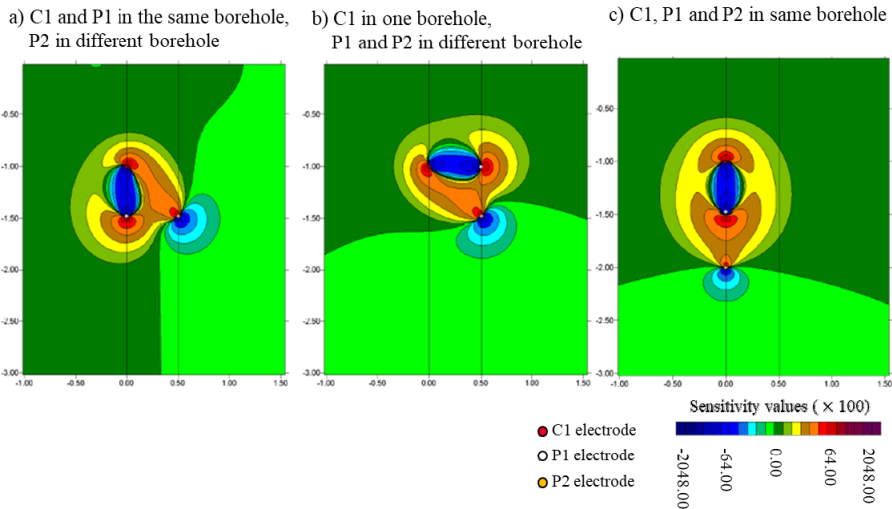


Fig. 4. The 2-D sensitivity patterns for various arrangements with the pole-bipole array. The arrangement with (a) C1 and P1 in the first borehole and P2 in the second borehole, (b) C1 in the first borehole and both P1 and P2 in the second borehole, and (c) all three electrodes in the first borehole (Loke, 2022).

- 4극 배열

4극 배열의 경우 주로 쌍극자 배열을 사용하는데, 쌍극자 배열의 경우 편의상 AM-BN 배열을 양극-양극(bipole-bipole), AB-MN 배열을 쌍극-쌍극(dipole-dipole), AM-NB 배열을 쌍극-쌍극 교차(dipole-dipole cross)로 표기하기도 한다(Schmidt-Hattenberger, 2011). 쌍극자 배열 외에도 A-BMN, ABM-N 배열 등의 단극-삼극 배열에 대한 연구도 수행된 바 있지만(Goes and Meekes, 2004; Leontarakis and Apostolopoulos, 2012), 쌍극자 배열이 다른 배열에 비해 해상도가 가장 높고 잡음에도 안정적인 편이다(Sasaki, 1992). AM-BN 배열은 가장 안정적인 반면 분해능이 떨어진다는 단점이 있는 반면(Cho *et al.*, 2002), AB-MN 배열

은 신호 세기가 커 신호대 잡음비가 높다는 장점이 있다 (Zhou and Greenhalgh, 2000).

가장 일반적으로 사용하는 쌍극자 배열인 AM-BN 배열과 AB-MN 배열은 모두 두 시추공 사이에서 양의 민감도가 넓게 분포한다. AB-MN 배열은 음의 민감도도 발생할 수 있다는 단점이 있어(Loke, 2022; Fig. 5), 송신쌍과 수신쌍의 각 두 전극 사이의 거리가 적절히 넓을 필요가 있다(Fig. 5). AM-BN 배열은 하나의 시추공 안에 있는 전극 사이의 거리가 좁아질수록 양의 민감도 영역이 커지는 장점이 있고(Zhou and Greenhalgh, 1997 and 2000), 4극 배열은 해상도가 2극이나 3극 배열에 비해 높다(Sasaki, 1992).

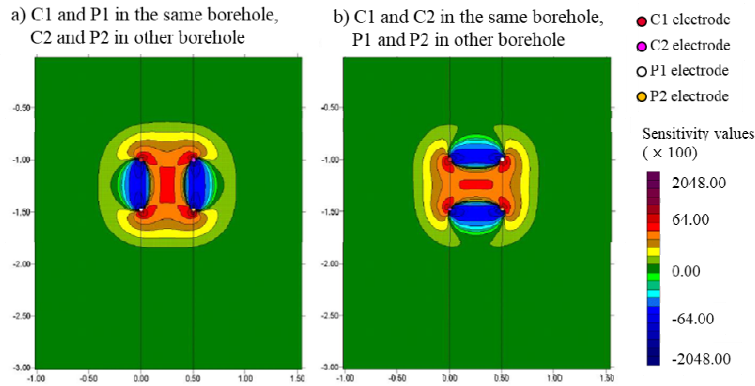


Fig. 5. The 2-D sensitivity patterns for various arrangements of the bipole-bipole array. (a) C1 and P1 are in the first borehole, and C2 and P2 are in the second borehole. (b) C1 and C2 are in the first borehole, and P1 and P2 are in the second borehole. In both cases, the distance between the electrodes in the same borehole is equal to the separation between the boreholes (Loke, 2022).

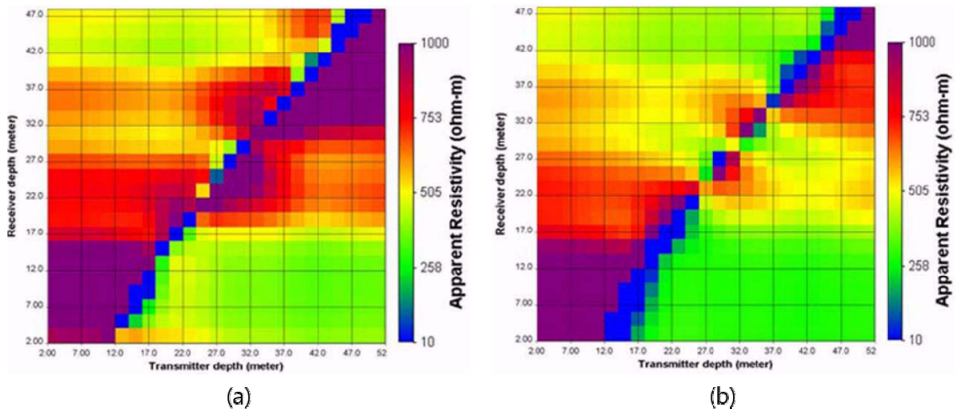


Fig. 6. Comparison of the cross-hole data set: Borehole deviations are ignored in the calculation of apparent resistivity data (a), and cross-hole data when boreholes are vertical without deviation are also shown for comparison (b) (Yi *et al.*, 2009).

시추공 연계 DC 탐사 자료 특징

- 전극 위치 오류

시추공을 수직으로 천공하더라도 완벽하게 수직을 유지하기엔 어려움이 있어, 시추공 내 전극 위치가 수직에서 벗어나는 오류가 존재할 수 있다(Oldenborger *et al.*, 2005). 특히, 2차원 탐사를 수행할 때에 이러한 오류는 해석에 영향을 미쳐 해상도가 크게 저하 시킬 수 있다(Yi *et al.*, 2009). 시추공 편차 영향을 고려하지 않고 시추공 공곡변화(borehole deviation)를 무시하면(Fig. 6(a)) 공곡변화를 고려하였을 때보다(Fig. 6(b)) 겉보기 전기비저항이 감소하는 경향을 보인다(Yi *et al.*, 2009).

- 케이싱 영향

탐사 시추공 천공 시 일반적으로 케이싱을 하지 않아야

하지만(Slater *et al.*, 1997; Osiensky *et al.*, 2004; Wilkinson *et al.*, 2010; Tsokas *et al.*, 2011) 케이싱을 해야만 하는 하는 경우엔(Ogilvy *et al.*, 2009; Karaoulis *et al.*, 2011; Tsourlos *et al.*, 2011; Wagner *et al.*, 2015), 자료 해석 시 케이싱의 영향을 고려해야 한다. 케이싱은 주로 PVC나 금속 재인데, PVC 케이싱의 경우에는 케이싱 외부에 전극을 설치하여 탐사를 수행하여야 한다. PVC의 전기비저항은 높기 때문에 탐사 결과가 실제 지하 매질의 전기비저항 값보다 높게 나타날 수 있다(Almpanis *et al.*, 2022). 금속 케이싱은 전기비저항이 약 $10^{-3} \sim 10^{-2} \Omega \cdot m$ 로 전기전도도가 매우 높기 때문에, 전극 설치에 기초한 시추공 탐사를 수행하기엔 적합하지 않고 철재 케이싱 자체를 전극으로 활용하여 탐사할 수는 있다(Newmark *et al.*, 1999; Newmark *et al.*, 2001; Ramirez *et al.*, 2003).

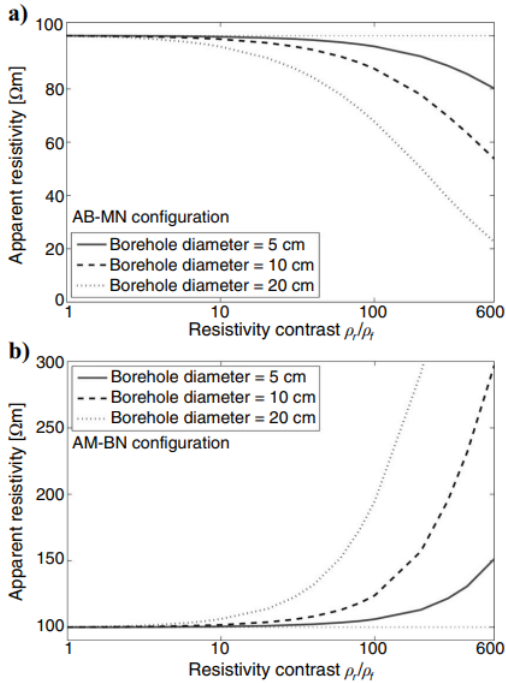


Fig. 7. Apparent resistivity as a function of contrast (log scale) for electrode configurations (a) AB-MN and (b) AM-BN: Resistivity contrast ρ_r/ρ_f is defined as the contrast between the saturated gravel and a water-filled borehole. Depths to the upper and lower electrodes are kept constant at 1 m and 6 m. The three curves shown in each diagram correspond to borehole diameters of 5 cm, 10 cm, and 20 cm (Doetsch *et al.*, 2010).

- 공내수 영향

공내수의 비저항이 기반암의 비저항보다 낮을 때에 공내수의 영향이 탐사자료에 현저히 나타나며(Lee *et al.*, 2016), 이때 공내수의 영향은 다양한 시추공 직경, 전극 배열, 전극 간격 등에 의해 변화한다. 시추공의 직경이 커질수록 공내수의 영향이 더 커지는데(Doetsch *et al.*, 2010), 예를 들어 AM-BN과 AB-MN 배열 모두에서 직경이 5 cm 인 시추공에서는 그 영향이 미미하지만 직경이 20 cm 인 시추공에서는 영향이 크다(Fig. 7). 또한 전위전극과 전류전극이 한 시추공 내에 위치할 때 AM-BN 배열일 때 공내수의 영향은 더 크며 시추공 내의 전극간격이 커질수록 영향은 작아진다(Fig. 8).

시추공-시추공 DC 탐사: 무결합 영역

시추공-시추공 DC 탐사 시, 전류전극과 전위전극이 서로 평행한 위치에 놓일 경우 두 전극 사이의 전위차가 0이 되어 겹보기 비저항이 발산하는 무결합 영역이 발생할 수

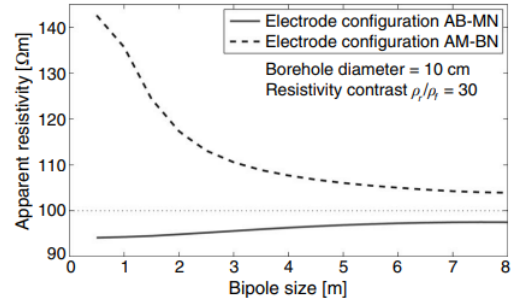


Fig. 8. Apparent resistivity versus bipole length (the same in each borehole) for a 10 cm borehole diameter and =30:1. The bipoles are centered at a depth of 5 m in each hole. Results are given for the two recording configurations, AB-MN and AM-BN (Doetsch *et al.*, 2010).

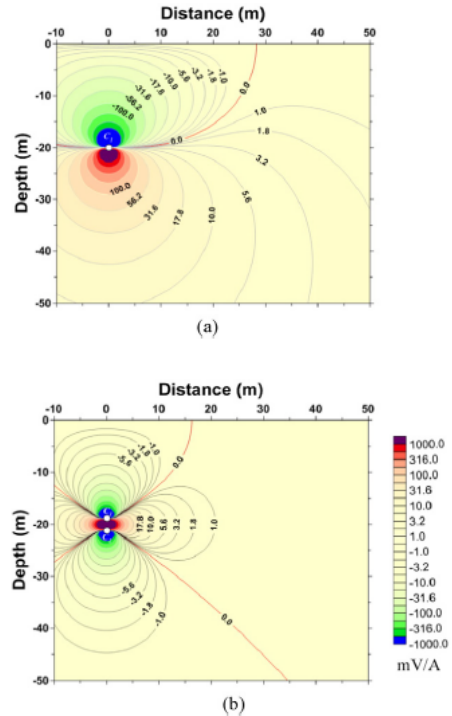


Fig. 9. Distributions of the primary potential difference: (a) the pole-dipole and (b) dipole-dipole configurations in the $100 \Omega \cdot m$ uniform half-space. The red contour lines indicate the null coupling zones where the primary potential differences are zero (Lee *et al.*, 2016).

있다(Yi *et al.*, 2009; Cho, 2020). 이는 전류전극 쌍이 동일 시추공 내에 위치할 때 발생하는 문제로, 단극배열(A-M)과 쌍극자-쌍극자 배열 중 AM-BN 배열에서는 발생하지

않는다(Cho *et al.*, 1997; Nimmer *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2016; Cho, 2020). 그러나 가장 널리 사용되고 있는 A-MN과 AB-MN 배열에서 이러한 문제가 발생하기 때문에 자료 처리 시에 해당 위치의 전기비저항 값을 제거 후 역산을 수행하여야 한다(Lee *et al.*, 2016). A-MN 배열에서는 전류원과 유사한 깊이에서 발생하며, 전류원과의 수평거리가 증가함에 따라 점차 상향 이동한다(Fig. 9(a)). AB-MN 배열의 경우 이러한 영역이 더 많이 발생하며(Fig. 9(b)), 이에 따라 안정적인 측정이 가능한 영역이 다른 배열에 비해 좁아지게 된다.

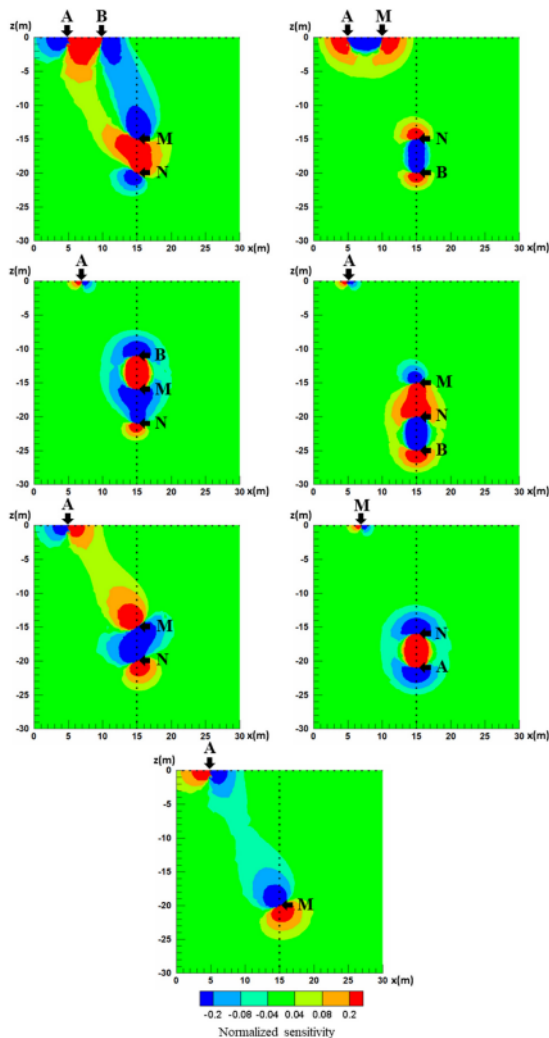


Fig. 10. Normalized sensitivity pattern of the seven possible arrays (Wang and Lin, 2018).

지표-시추공 DC 탐사: 대칭 효과

지표-시추공 배열 자료 역산 시, 평활화 제약조건을 주고 역산을 수행하면 배열에 상관없이 거울 이미지(mirror image) 또는 ‘대칭’ 아티팩트가 나타나게 된다(Tsourlos *et al.*, 2011). 이러한 거울 이미지는 동일 시추공 내에 전류전극과 전위전극이 동시에 존재하는(단일 시추공 탐사와 같은 조건일 때) 경우에 주로 발생하게 되며(Tsourlos *et al.*, 2011), 지표-시추공 탐사에서도 발생할 수 있다. 이러한 대칭 현상의 주 원인은 한 시추공 내에 전류전극과 전위전극이 동시에 존재하는 경우에는 방위각에 대한 정보가 결여

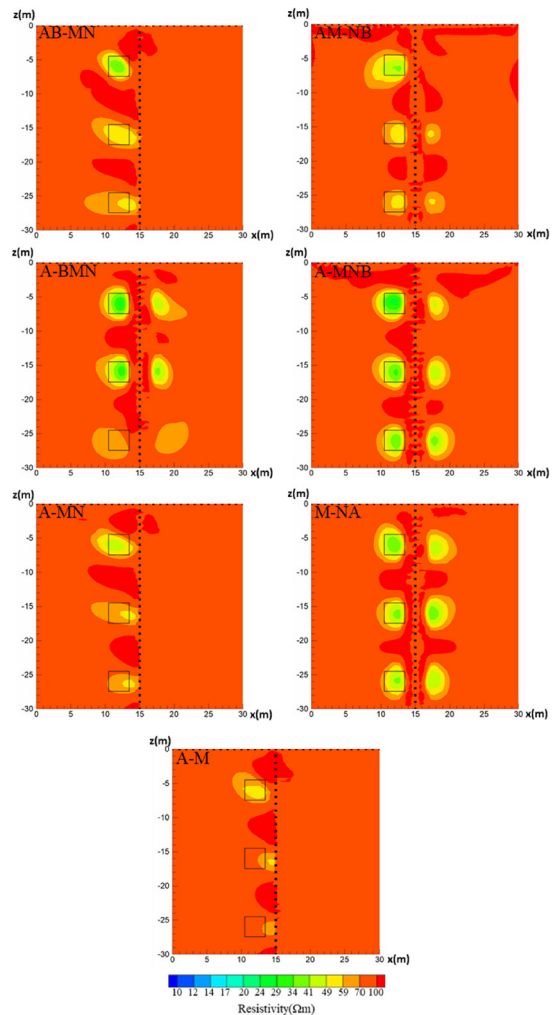


Fig. 11. Inversion models of different configurations: A dotted line draws the real position of the anomaly, and artifacts appear on the opposite side caused by the symmetric effect (Wang and Lin, 2018).

되어 이상체가 존재하는 위치를 정확히 파악하지 못할 수 있기 때문이다(Tsourlos *et al.*, 2003). 지표-시추공 탐사 시 발생하는 대칭 효과는 배열의 민감도가 AM-NB, A-BMN, A-MNB, M-NA 배열(Fig. 10)과 같이 시추공을 기준으로 대칭일 때 발생한다(Fig. 11; Wang and Lin, 2018).

시추공 전기비저항 자료 해석

- 전극 위치 오류

최근 측량 장비의 발달로 인해 시추공의 정확한 구조를 파악하는 것이 용이해짐에 따라 실제 전극 위치를 정확하게 파악하여 3차원 역산을 수행하는 것이 가능하다. 그러나 AB-MN 배열과 같이 송, 수신 전극이 한 시추공에 있는 경우가 AM-BN 배열처럼 송, 수신 전극이 서로 다른 시추공에 있는 경우보다 전극 위치 오류에 더 민감하다(Oldenborger *et al.*, 2005). 따라서 전극 위치를 명확히 알기 힘든 경우에는 송, 수신 전극이 서로 다른 시추공에 있는 배열을 선택하는 것이 바람직하다.

- 케이싱 영향

케이싱 제작 시 시추공 안과 밖의 유체 유동을 위해 뚫어 두는 구멍인 PVC 케이싱 슬롯의 개수가 늘어날수록, 공내수와 지중 유체의 혼합이 활발히 이루어져 케이싱의 영향이 작아진다(Fig. 12; Almpanis *et al.*, 2018; Almpanis *et al.*, 2022). AB-MN, A-BMN, A-MN 배열을 적용하여 전

극 사이의 슬롯 개수 2개(no. 1), 4개(no. 2), 6개(no. 6)로 점차 늘려가며 전기비저항을 측정한 실내실험에서는 A-MN (단극 쌍극자) 배열이 케이싱이 있을 때와 없을 때의 차이가 5% 이하로 가장 작게 나타났다(Fig. 12, Almpanis *et al.*, 2022).

- 무결합 영역

무결합 영역에 의한 영향을 줄이기 위해서는 전위차가 0에 가까운 값이 나오지 않는 배열인 AM-BN 배열, 변형 A-MN 배열(B 전극을 두 시추공 사이 지표에 위치하게 하는 배열; Kim *et al.*, 2006) 등을 이용하는 것이 바람직하다. 무결합 영역이 크게 나타나는 배열을 이용한 탐사 자료인 경우라면, 전위차가 0에 가까워지면 거리계수 값과 전기비저항 값이 지나치게 크거나 작아지는 점에 기초하여 거리계수 또는 전기비저항 값을 기준으로 자료를 제거한다. 이 기준은 각자가 설정한 기준에 따라 다를 수 있으며, 지표 DC 탐사 시 수행하는 자료처리와 유사하다. 예를 들어, 거리계수가 1000 이상인 값을 제거한(e.g., Doetsch *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2016) 경우도 있고 3000 이상인 값들을 제거하여 역산한 연구도 있다(e.g., Demirel and Candansayar, 2017).

- 대칭 효과

지표-시추공 탐사 시 발생하는 대칭 효과를 해결하기 위

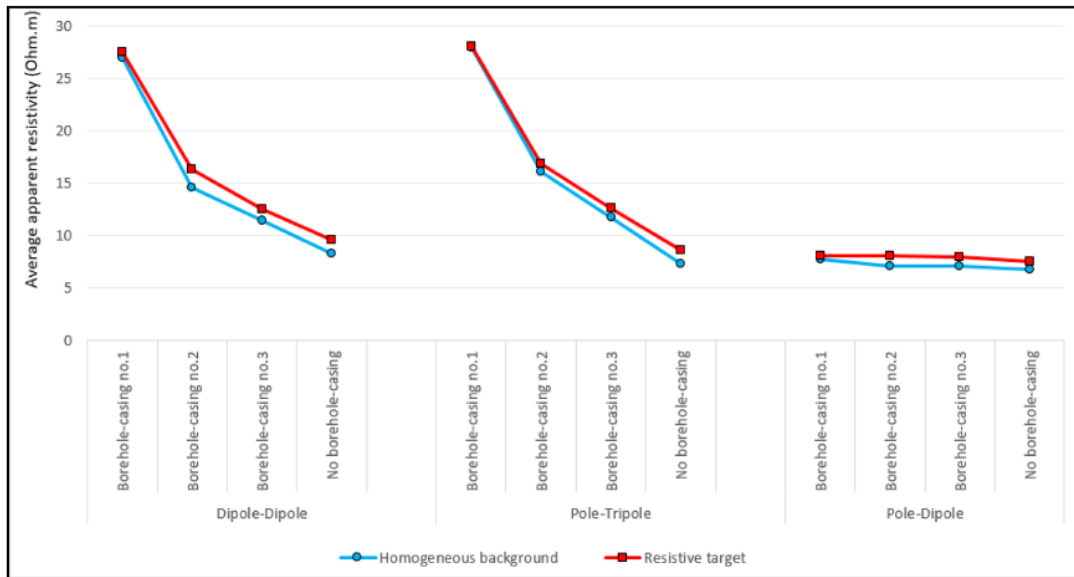


Fig. 12. Plots of the average apparent resistivity for the different measurement environments for all examined arrays and the different borehole-casings: The number of slots between two electrodes is 2 at borehole-casing no. 1, 4 at borehole-casing no.2, and 6 at borehole-casing no.3 (Almpanis *et al.*, 2022).

한 방법으로는 (1) 단일 시추공 탐사 자료 제거, (2) 역산 시 단일 시추공 데이터와 지표-시추공 데이터에 각각 다른 가중치 적용, (3) 서로 다른 전극배열을 함께 적용 후 역산, (4) 가중 모델 겹쌓기(weighted model stacking technique; WMOST, Wang and Lin, 2018), (5) 민감도가 대칭적이지 않은 배열을 사용하는 방법이 있다. 먼저, 단일 시추공 탐사 자료를 제거하는 방법은 적용이 간단하나, 시추공의 깊이가 깊어질수록 해상도가 저하되며, 대칭성을 보이는 민감도를 갖는 배열의 경우에는 효과가 없을 수 있다. 해상도 저

하를 해결하기 위해 역산 시 자료 가중치를, 단일 시추공 탐사 자료의 경우 시추공 깊이가 깊어질수록 더 크게, 지표 탐사 자료는 지표에서 더 높은 가중치를 주었을 때(Fig. 13 (d)) 가장 적합한 해석을 수행할 수 있다(Tsourlos *et al.*, 2011). 또한 단일 유형의 전극 배열을 사용하는 대신, 해상도와 대칭 효과 사이의 균형을 맞추기 위해 IOS(d In-panel/Off-panel Sensitivity) 분석에 기반한 통합 역산을 수행한 사례에서는(Wang and Lin, 2018), 배열의 전극 간격이 작거나 중간 정도의 값을 갖는 AB-MN 배열과 더

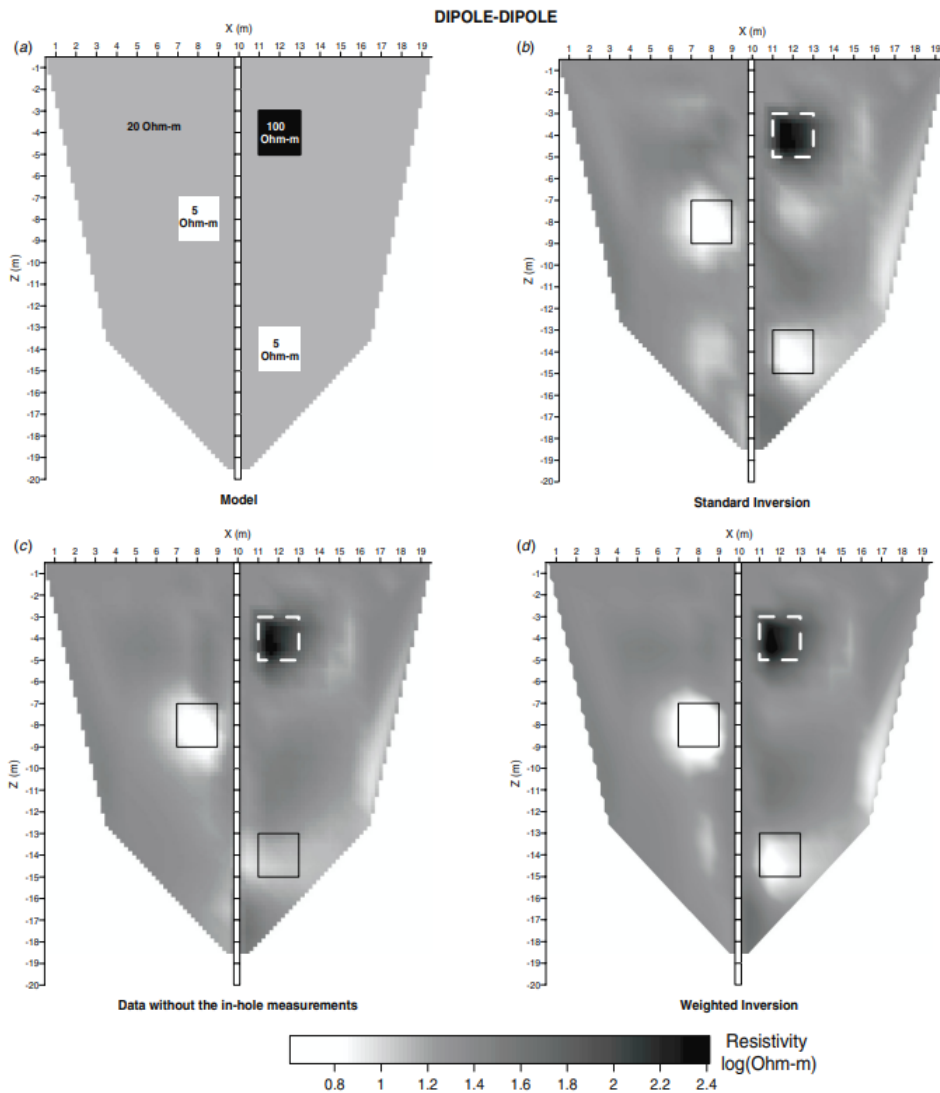


Fig. 13. (a) The model used to produce the borehole-to-surface dipole-dipole synthetic datasets; (b) results using standard inversion; (c) inversion results using standard inversion but with the in-hole measurements excluded; (d) results of the inversion (with in-hole measurements included) using the modified scheme (Tsourlos *et al.*, 2011).

큰 전극 간격을 갖는 A-MNB 배열을 조합하는 것이 적합함을 보였다. 이 연구에서는 시추공의 좌측에 이상체가 위치할 때(ρ_{in})와 시추공의 우측에 이상체가 위치할 때(ρ_{off})의 겘보기비저항을 통해 대칭 효과를 분석하고자 하였으며, 분석을 위해 사용한 IOS 값은 다음과 같다.

$$IOS = \left| \frac{2(\rho_{in} - \rho_{off})}{\rho_{in} + \rho_{off}} \right| \quad (5)$$

또한 가중 모델 겹쌓기 방법을 이용해 향상된 해상도와 감소된 대칭 효과 사이의 균형을 잡는 것이 바람직하며, WMOST에서 가중치를 할당할 때 일반적으로 A-MNB 배열의 데이터보다 AB-MN 배열의 데이터에 더 높은 가중치를 주어야 한다.

시추공 전기비저항 적용 사례 분석

- 대수층 모니터링

건조한 지반에 물을 주입하며 담수의 이동을 모니터링한 사례에서, 시간경과 모니터링한 결과(Deiana *et al.*, 2007)를 통해 주입 직후 상부에서 급격한 전기비저항의 감소가 나타나며, 이후 담수가 전체적으로 확산되며 대부분의 지하 공간이 저비저항을 보였다. 전극 배열은 AM-BN 배열을 사용하였으며, 전극 간격은 0.8 m, 시추공 사이의 거리는 7m로 전극간격을 촘촘히 두어 더욱 해상도가 높은 탐사를 수행하고자 하였다. 점토층에 대한 탐사 시에는 DC 탐사만으로는 정확한 점토의 위치를 파악하기 어렵기 때문에 유도분극(induced polarization, IP) 탐사도 함께 수행할 수 있다. 점토층 조사를 위한 시추공-시추공 DC-IP 탐사 사례에서는 얇은 점토층에 대해 전기비저항의 반응은 명확하지 않으나, IP의 위상 이상대가 낮은 값으로 명확하게 나타났다(Kemna *et al.*, 2004). 이 탐사에서는 시추공 간의 거리는 15m로 넓은 편이나, 시추공 심도를 40 m로 두어 충분한 해상도를 확보하고 전극 배열 또한 0.8 m로 좁게 두어 각 층서 구조에 대한 구분을 보다 상세하기 위해 노력하였다.

국내 균열 암반 대수층에서는 단극-쌍극자 배열 시추공-시추공 DC 탐사가 수행되었다. 이때, 시추공의 공극변화에 의한 전기비저항 영향을 고려하여 모델링 및 역산을 진행하였다. 공극변화를 고려하지 않았을 때와 겘보기비저항 계산 시에만 공극변화를 고려했을 때 그리고 역산 수행 시에도 공극변화를 고려한 세 가지 경우로 나누어 자료의 결과를 비교하였다(Yi *et al.*, 2009). 탐사 자료 획득은 심도 32 - 90 m 까지 수행하였으며, 시추공 사이 간격은 약 13 m 이나 공극에 따라 최대 5 m 정도의 차이가 있어 공극변화를 고려하지 않으면 저비저항대로 넓게 해석하게 된다. 모든 결과에서 파쇄대로 인한 저비저항대를 확인할 수 있으나,

공극변화를 제대로 고려하지 않은 경우에는 전기비저항 변화가 뚜렷하지 않은 경우가 있으며 전기비저항 값이 전반적으로 낮은 결과를 보인다. 반면 겘보기비저항 계산 및 역산 수행 시에 모두 전극 위치를 보정해준 결과 영상의 왜곡 없이 적절한 결과를 보인다.

- 지반 안정성 조사

그리스 Thessaloniki 지하철 노선에서는 A-MN 배열, AM-BN 배열, A-BMN 배열을 사용해 지표-시추공 탐사와 시추공-시추공 탐사를 수행하기 위해 PVC 파이프의 슬롯 개수에 따른 영향을 평가·분석한 뒤 점토 미사(clay-silt) 층과 점토층의 분포를 파악하고 하였다(Fig. 14, Almpanis *et al.*, 2022). 특히 시추공 P2는 전극 간격당 2-3 개의 슬롯이 있는 PVC 파이프가 설치되어 있어 전반적으로 고비저항을 띠었고, 전류전극과 전위전극이 모두 위치하는 배열(AM-BN, A-BMN)의 경우 PVC 케이싱의 영향을 많이 받았다. 시추공 사이의 간격이 약 25 m인 구간에서는 전극 간격은 1 m로 두어 시추공-시추공 탐사를 수행하였으나 시추공 사이의 간격이 50 m로 넓은 경우 지표-시추공 탐사와 지표 탐사를 수행하여 함께 역산을 수행하였다. 지표 역산, 지표-시추공 역산을 단독 역산했을 때보다 모든 자료를 복합 역산 시 주상도와의 정확도가 커져 역산의 품질을 향상시키는 데 기여함을 확인하였다.

카르스트로 인한 지하 공동에 대한 탐사를 수행하기 전에 적합한 전극 배열을 찾기 위해 A-M, AB-MN, A-MN, AB-M 배열의 위해 싱크홀 공동 모델과 습곡 모사 모델에 대한 수치 실험을 수행한 결과를 살펴보면(Park *et al.*, 2014), 저비저항 이상체에 대한 모델링 결과 A-MN 배열이 저비저항 이상체를 가장 잘 보여주는 것을 알 수 있다. 일반적으로 AB-MN 배열은 A-MN 배열보다 해상도가 높지만, 시추공에서 전류 전극의 거리가 좁아 해당 수치실험에서는 해상도가 더 낮아 자료 획득 시간을 고려해 현장에서는 A-M 배열과 A-MN 배열을 사용하였다. 현장 데이터 역산 결과 석회암 공동 중 기울어진 습곡 구조의 공동의 존재를 파악하였다.

콘크리트로 덮인 지반 하부의 붕괴 성벽 유적을 보기 위한 탐사 사례에서는(Tsokas *et al.*, 2011) 붕괴 성벽 부근의 콘크리트로 덮인 지반에서 지표 DC 탐사와 시추공-시추공 DC 탐사를 함께 수행하여 그 결과를 비교하였다. 시추공-시추공 DC 탐사의 전극 배열은 A-MN 배열을 사용하였으며, 전극 간격은 1 m, 시추공 사이의 거리는 7 m로 두어 탐사를 수행하였다. 파묻힌 성벽은 배경 지하매질에 비해 고비저항 형태로 나타나는데, 지표 DC 탐사 결과 성벽의 심도를 과소평가하는 경향을 보이며, 정확한 성벽의 위치를 구분해내지 못하였다. 반면 시추공-시추공 전기비저항 역

산 결과 붕괴 성벽의 정확한 심도를 파악하였다.

국내 지반안정성 조사 사례로는 폐광 지역에서의 사례가 있다(Kim *et al.*, 2006). 해당 지역에서는 폐광 위 아파트가 건설되어 이 25층 높이의 아파트를 둘러싼 시추공에서 탐사를 수행하였으며, 탐사 심도는 약 100 m 심도이다. 갯도가 공기층에 의해 고비저항, 기반암이 저비저항 형태로 나타나 전기비저항 역산 단면이 줄무늬 형태로 환연하게 나타나며, 암석역학적 수치해석을 함께 수행하여 페터널 3개가 위치하고 있음에도 고층건물이 안전한 것을 확인하였다.

- 오염지 특성화 및 오염 정화 모니터링

영국 Thriplow 매립지에서 지표-시추공 DC 탐사 사례에서는 지표-시추공 DC 탐사의 단점인 대칭 아티팩트를 해결하기 위해 가중치 알고리즘을 도입하여 역산을 수행하였다(Tsourlos *et al.*, 2011). 현장 시추공의 pvc 케이싱 외부에 전극을 설치하여 케이싱의 영향을 최소화하고자 하였다. 탐사는 1999년 12월부터 2000년 11월까지 매달 수행하였는데, 당시에는 웨너-슬럼버저 배열이 신호 대 잡음비에 이점이 있다고 판단하여 웨너-슬럼버저 전극배열을 사용하

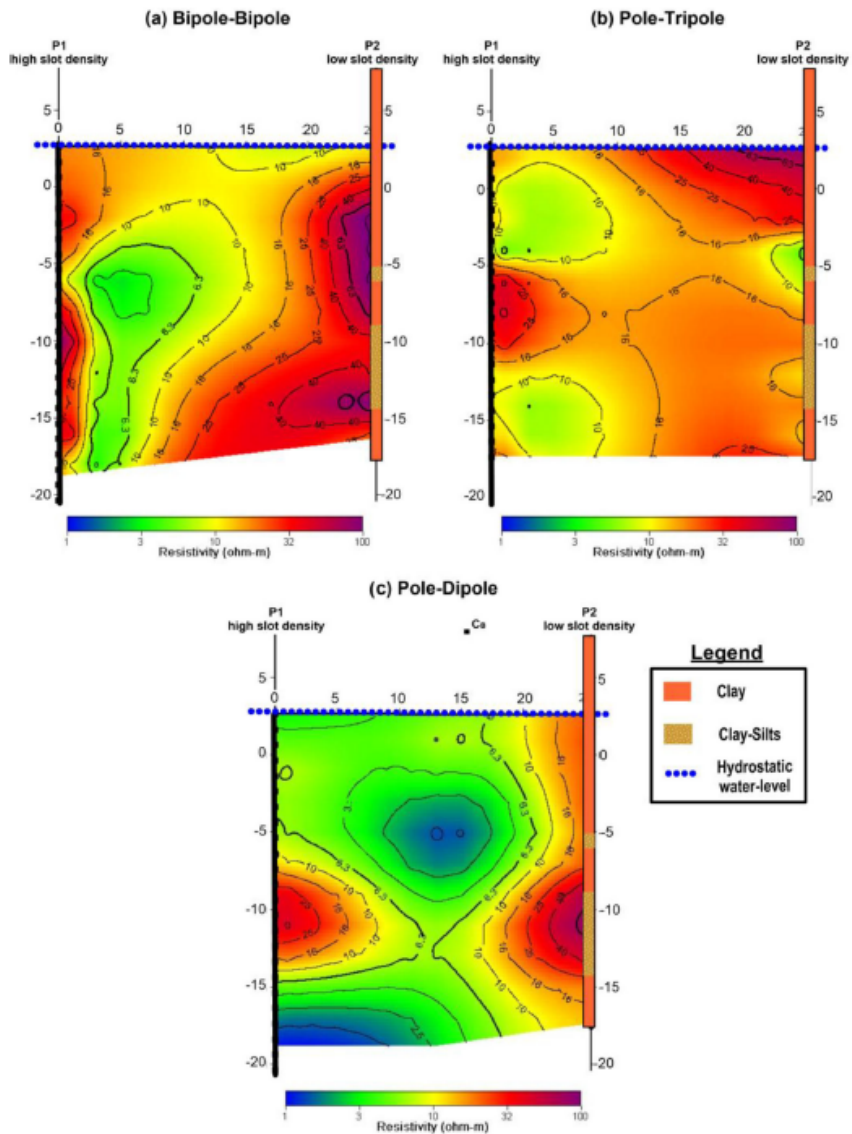


Fig. 14. 2D cross-hole ERT inversion results for a) A-MN, b) A-BMN, and c) A-MN arrays that were obtained in location A. The P2 borehole log is also depicted (Almpanis *et al.*, 2022).

여 탐사를 수행하였으나 웨너-슬림버저 배열은 대칭적인 민감도를 가지고 있어 대칭 아티팩트를 해결하기에는 적합하지 않은 배열이기 때문에 가중치 알고리즘을 사용하였음에도 불구하고 완전히 대칭 아티팩트를 해결하지는 못하였다. 가중치를 따로 지정하지 않고 역산을 수행하였을 때, 역산 결과 약 11 ~ 16 m 깊이에서 대칭 아티팩트를 보이는 문제가 발생하였는데, 단일 시추공 자료를 제거하였을 때 이러한 영향이 감소하나 단일 시추공 자료를 모두 제거하게 되면 지표-시추공 배열의 민감도가 낮은 10 m 이하의 깊이에서는 이상체를 찾아낼 수 없다는 문제가 있어 가중치 알고리즘을 적용하는 것이 바람직하다. 또한 역산 수행 시에는 단일 시추공 자료를 함께 역산했을 때 비교적 더 적합한 역산 결과를 보인다.

염수에 대한 탐사를 수행하는 경우, 염수와 담수는 둘 다 낮은 전기비저항 값을 가지기 때문에 보다 정확한 파악을 위해서는 로깅 등 다른 탐사와 복합 해석을 수행하거나, 시간 경과 모니터링(Palacios *et al.*, 2020) 그리고 공간적인 분포를 파악하는 것(Bauer *et al.*, 2006)이 바람직하다. 바르셀로나 지역의 해수침투 모니터링을 위해 4 종류의 전극 배열을 사용해 모니터링을 수행한 연구(Palacios *et al.*, 2020)에서는 AM-BN, AB-MN, AMN-B, A-BMN, AMNB 배열에 기초하여 2015년 7월부터 2017년 9월까지 장기적으로 탐사를 수행하였다. 시추공-시추공 DC탐사와 지표 DC 탐사를 함께 사용하는 것은 표면 전기비저항 탐사만을 적용한 것에 비해 초기 모델의 해상도를 높일 수 있으며, 전자기유도 검증과 시추공-시추공 전기비저항 역산 결과 또

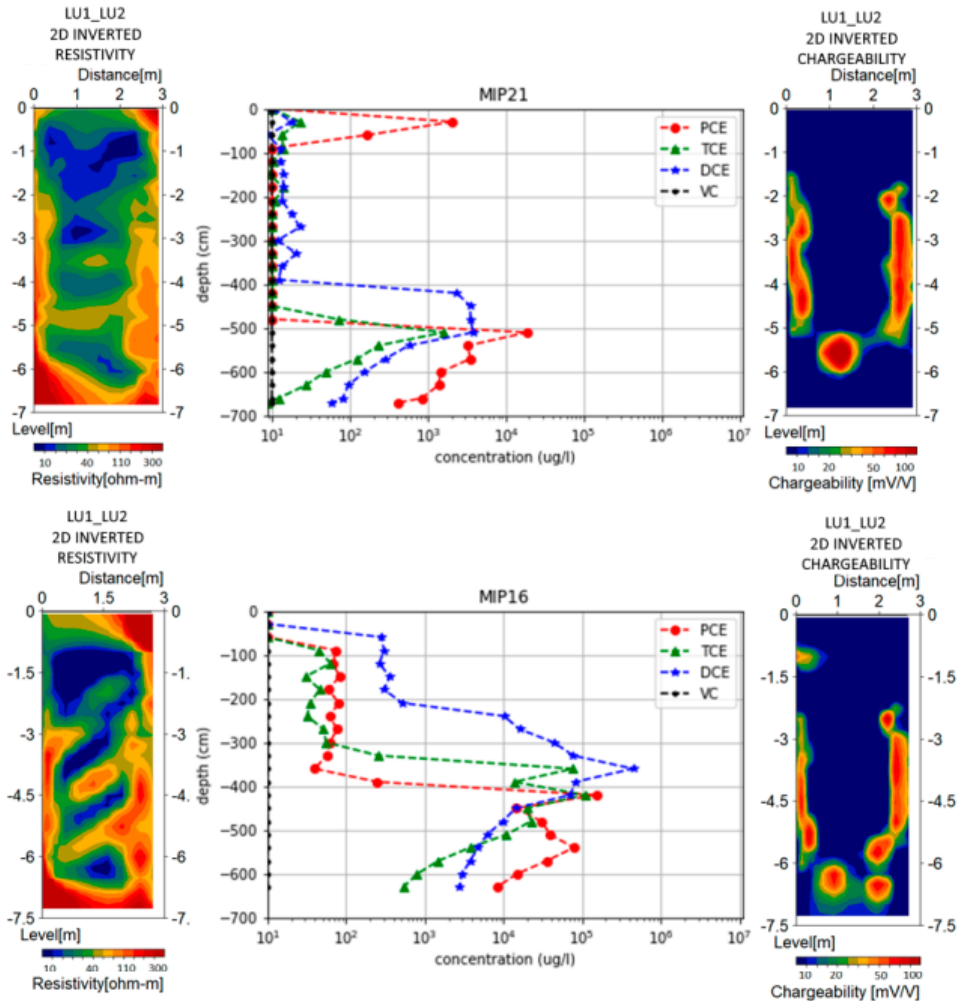


Fig. 15. Cross-hole tomography results for resistivity (left) and time-domain charge-ability (right) in comparison with the respective concentrations from the MIP sounding for LU1-LU2 (top) and LU6-LU7 (bottom; Nivorlis *et al.*, 2019).

한 유사함을 확인하였다. 시간경과 시추공-시추공 DC 탐사를 통해 장기 및 단기 전기전도도 변화를 확인하였는데, 장기적인 변화로는 해수-담수의 경계면이 계절에 따라 변동하는 것과 모니터링 기간 중 연구 지역의 가뭄으로 인한 하부 대수층의 장기 염분화를 파악할 수 있었고, 단기 모니터링에서는 220 mm의 큰 강우량에 의한 전기전도도 저하와 파도의 움직임을 증가시킨 폭풍에 의해 해변 지역의 전기전도도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

유류의 경우 넓게 퍼진 형태로 존재하며, 누출 초 생분해가 일어나기 전에는 전기비저항 높지만 시간이 지나 생분해가 일어나면 전기비저항이 낮아지고 IP 현상도 야기한다. 아스팔트로 덮인 지역에서의 생분해 전, 즉 고비저항의 소수성액체(non-aqueous phase liquid, NAPL) 오염영역 탐사 사례(Goes and Meekes, 2004)에서는 탐사 전 DC 탐사 수치실험을 통해 NAPL에 대한 AM- BN, AM-NB, ABM-N 배열의 적용성을 평가하였다. 수치실험 수행 결과 ABM-N 배열이 다른 배열에 비해 절반 혹은 그 이하의 자료 수로도 비교적 정확한 전기비저항 값을 보이고, 시추공 사이에 고비저항의 얇게 수평으로 퍼진 NAPL이 존재하는 모델에서도 해상도의 영향을 크게 받지 않아 가장 효과적인 전극배열로 보이나, 이상체의 크기가 작은 경우와 PCE의 오염 농도가 0.1 % 이하로 검출된 영역에서는 DC 탐사로는 오염 영역 특성화가 어려울 수 있다.

생분해 이후의 유류오염영역 특성화를 위한 탐사에서는 Nivorlis *et al.* (2019)이 시추공 사이의 거리는 3 m로 좁게 두어 해상도를 높인 후 탐사를 수행하였다(Fig. 15). AB-MN 배열을 사용하여 보다 해상도가 높은 탐사를 수행하고자

하였으며, 전극 간격은 0.25 m로 두었다. 이 경우에는 전기비저항 결과만으로는 오염지를 특정하기 어려운 결과를 보이지만, 유류오염물이 많이 검출된 구간에서 높은 충전율 값을 보였다.

오염원을 정화하기 위한 추적자 및 오염 산화제의 경우 이온에 의해 일반적으로 저비저항 특성을 보이는데(Perri *et al.*, 2020), 산화제가 제대로 오염지역으로 가고 있는지에 대한 모니터링을 수행하기도 한다. Perri *et al.* (2020)은 AM-BN 및 AB-MN 배열을 이용하여 추적자 시험의 모니터링을 수행하였으며, 포화된 이후에 기존 담수에 비해 높은 전기비저항 값을 보여 확인하게 구분된다.

- 이산화탄소 누출 모니터링

이산화탄소 저류층의 모니터링 시, 저류층 심도가 깊어 높은 해상도의 자료를 얻기 위해 시추공 DC 탐사 수행이 필수적이다(Schmidt-Hattenberger *et al.*, 2011). 현재는 실제 누출 현장보다는 누출 모사 실험 모니터링에서 주로 활용하고 있으며, 주로 전기비저항 값 자체보다는 전기비저항 값의 변화에 대한 모니터링을 수행한다(Fig. 16, Yang *et al.*, 2015). 독일 Ketzin CCS 부지에서는 이산화탄소 주입 후 약 2달 간격으로 탐사를 수행해 주입 전의 DC 탐사 수행 결과와 비교하여 전기비저항의 변화량을 파악해 이산화탄소의 확산 및 이동경로를 파악하고자 하였다(Kiessling *et al.*, 2010). 세 개의 시추공에서 탐사를 수행하였는데, 이 때 전극 배열은 AB-MN과 AM-BN을 사용하였으며 시추공 사이 간격은 각 50 m, 100 m이다. 탐사 수행 전 현장 모사 수치모델을 통해 이산화탄소 주입 전후의 전기비저항 변화

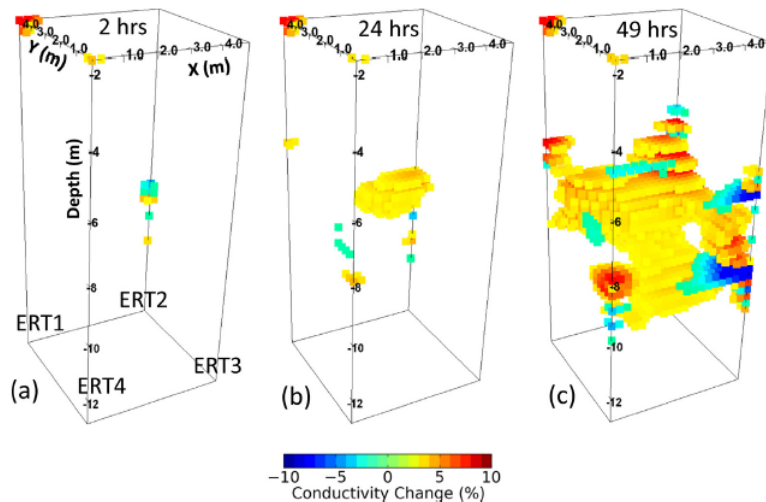


Fig. 16. 3D Time-lapse electrical conductivity (EC) changes from combined horizontal cross-hole and vertical cross-hole data. The bulk EC changes within 3%~5% were turned transparent (Yang *et al.*, 2015).

를 파악하였을 때, 이산화탄소가 주입된 영역의 전기비저항이 약 150 % 증가하는 것을 확인할 수 있다. 현장에서는 이보다 더 작은 변화율을 보이며(약 100 %), 시추공 사이의 거리가 100 m로 클 때는 시추공 부근의 전기비저항 변화 파악만이 가능하다는 한계가 있었다. 시추공의 수가 제한적이어서 확산 방향을 파악하기에는 무리가 있었기 때문에 이를 보완하기 위해 주입정을 기준으로 지표-시추공 탐사를 수행하여 북쪽과 동쪽에서의 전기비저항 증가 추세, 즉 이산화탄소의 확산 경로를 파악하였다.

- 방폐장 및 지하연구시설(underground research laboratory, URL)

미국 Yucca 산 방폐장에서의 히터 테스트 수행 시 DC 탐사를 수행한 후, Waxman Smits 모델과 Archie 식을 사용하여 함수비를 추정하였다(Ramirez *et al.*, 1997). 이 연구에서는 열이 가해지는 지점을 둘러싸는 정사각형 형태의 측선을 설계하였으며, 온도 및 함수비의 증가로 인해 전기비저항 값이 감소하는 것을 모니터링하였다.

프랑스 Tournemire URL에서도 열유압반응에 대한 DC 탐사의 잠재력을 조사하기 위해 히터 실험을 수행하였다(Lopes *et al.*, 2018). 실험 전 시추과정에서 코어 표본에 대한 실내실험을 통해 모암의 전기비저항 값이 100 ohm-m로 균일하다는 것을 확인한 후에 연구를 수행하였으며, AM-BN 배열을 사용하여 모니터링을 수행하였다. 시추공의 간격은 방사성폐기물 처분 용기의 크기를 고려하여 1.4 m의 좁은 폭에서 모니터링을 수행하였는데, 열에 의해 균열의 공극수가 사라진 곳에서는 고비저항 값을 보이고, 연결되지 않는 균열에서는 저비저항 값을 보임을 알 수 있다.

결 론

본 논문에서는 지표-시추공 및 시추공-시추공 DC 탐사의 문제점과 이에 따른 적절한 해석 방법 그리고 현장 적용 사례를 정리하였다. 시추공-시추공 탐사의 경우 전위차가 0에 가까워지는 값을 필수적으로 제거하여 역산을 수행해야 하며, 지표-시추공 탐사의 경우 대칭 효과가 나타나지 않도록 시추공 내에 송신전극과 수신전극이 모두 위치하게 되는 데이터의 가중치에 대해 가장 먼저 고려해야 한다. 공통적으로는 전극 위치의 정확한 정보를 파악하여 역산을 수행해야 하며, 시추공의 케이싱에 의한 영향과 공내수의 영향을 파악하여 해석해야 한다. 또한, 시추공-시추공 DC 탐사 중 흔히 나타나는 전위차가 0에 가까워지는 자료들의 경험적 접근법의 한계를 인식하고, 이를 넘어서는 새로운 정량적 해석 기준에 대한 필요성을 지적하였다. 특히 지표-시추공 탐사의 경우 지표 전극과 시추공 전극 사이의 거리

에 대한 적절한 비에 대한 연구가 미비한 상태로, 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지중환경 오염위해관리기술개발사업(RS-2023-00230833) 및 2022년도 세종대학교 교내연구비 지원을 받아 연구되었습니다.

References

Alpanis, A., Tsourlos, P., Vargemezis, G., and Papazachos, C., 2018. Cross-Hole ERT Measurements in Slotted PVC Cased Boreholes-A New Perspective in Geoelectrical Prospection. In *24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, European Association of Geoscientists & Engineers, 2018(1), p.1-5.

Alpanis, A., Tsourlos, P., Vargemezis, G., and Papazachos, C., 2022. Application of crosshole electrical resistivity tomography measurements under the influence of horizontally slotted plastic cased boreholes, *Near Surface Geophysics*, 20(1), p.46-63.

Bauer, P., Supper, R., Zimmermann, S., and Kinzelbach, W., 2006. Geoelectrical imaging of groundwater salinization in the Okavango Delta, Botswana, *Journal of Applied Geophysics*, 60(2), p.126-141.

Binley, A., Cassiani, G., Middleton, R., and Winship, P., 2002. Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging, *Journal of Hydrology*, 267 (3-4), p.147-159.

Chambers, J.E., Wilkinson, P.B., Weller, A.L., Meldrum, P.I., Ogilvy, R.D., and Caunt, S., 2007. Mineshaft imaging using surface and crosshole 3D electrical resistivity tomography: a case history from the East Pennine Coalfield, UK, *Journal of Applied Geophysics*, 62(4), p.324-337.

Cho, I.K., 2020. Recent Trend in Electrical Resistivity Method, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 57(5), p.506-526.

Cho, I.K., Chung, S.H., Kim, J.H., and Song, Y., 1997. Comparison of Electrode Arrays in Resistivity Tomography, *The Korea Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 34, p.18-26.

Cho, I.K., Han, S.H., and Kim, K.J., 2002. The Crosshole Resistivity Method Using the Mixed Array, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 5(4), p.250-256.

Coscia, I., Greenhalgh, S.A., Linde, N., Doetsch, J., Marescot, L., Günther, T., Vogt T., and Green, A.G., 2011. 3D crosshole

- ERT for aquifer characterization and monitoring of infiltrating river water, *Geophysics*, 76(2), p.G49-G59.
- Daniels, J.J. and Dyck, A.V., 1984. Borehole resistivity and electromagnetic methods applied to mineral exploration, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22(1), p.80-87
- Deiana, R., Cassiani, G., Kemna, A., Villa, A., Bruno, V., and Bagliani, A., 2007. An experiment of non-invasive characterization of the vadose zone via water injection and cross-hole time-lapse geophysical monitoring, *Near Surface Geophysics*, 5(3), p.183-194.
- Demirel, C. and Candansayar, M.E., 2017. Two-dimensional joint inversions of cross-hole resistivity data and resolution analysis of combined arrays, *Geophysical Prospecting*, 65(3), p.876-890.
- Doetsch, J.A., Coscia, I., Greenhalgh, S., Linde, N., Green, A., and Günther, T., 2010. The borehole-fluid effect in electrical resistivity imaging, *Geophysics*, 75(4), p.F107-F114.
- Goes, B.J.M. and Meekes, J.A.C., 2004. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography, *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 9(3), p.127-141.
- Greenhalgh, S., Zhou, B., and Zhe, J., 2000. Crosshole resistivity imaging of aquifer properties, *Exploration Geophysics*, 31(2), p.315-320.
- Guo, K., Milkreith, B., and Qian, W., 2014. Geometry factor for near surface borehole resistivity surveys: a key to accurate imaging and monitoring, *GeoConvention 2014*.
- Karaoulis, M.C., Kim, J.H., and Tsourlos, P.I., 2011. 4D active time constrained resistivity inversion, *Journal of Applied Geophysics*, 73(1), p.25-34.
- Kemna, A., Binley, A., and Slater, L., 2004. Crosshole IP imaging for engineering and environmental applications, *Geophysics*, 69(1), p.97-107.
- Kiessling, D., Schmidt-Hattenberger, C., Schuett, H., Schilling, F., Krueger, K., Schoebel, B., Danckwardt, E., and Kummerow, J., 2010. Geoelectrical methods for monitoring geological CO₂ storage: First results from cross-hole and surfacedownhole measurements from the CO₂SINK test site at Ketzin (Germany), *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(5), p.816-826.
- Kim, J.H., Yi, M.J., Cho, S.J., Son, J.S., and Song, W.K., 2006. Anisotropic crosshole resistivity tomography for ground safety analysis of a high-storied building over an abandoned mine, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 11(4), p.225-235.
- LaBrecque, D.J. and Ward, S.H., 1990. Two-dimensional cross-borehole resistivity model fitting. In *Geotechnical an Environmental Geophysics: Volume III: Geotechnical, Society of Exploration Geophysicists*, p.51-74.
- LaBrecque, D.J., Miletto, M., Daily, W., Ramirez, A., and Owen, E., 1996. The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data, *Geophysics*, 61(2), p.538-548.
- Lee, K.S., Cho, I.K., and Kim, Y.J., 2016. Borehole effect in 2.5 D crosshole resistivity tomography, *Journal of Applied Geophysics*, 135, p.212-222.
- Leontarakis, K. and Apostolopoulos, G.V., 2012. Laboratory study of the cross-hole resistivity tomography: The Model Stacking (MOST) Technique, *Journal of Applied Geophysics*, 80, p.67-82.
- Li, Y., Weng, A., Xu, W., Zou, Z., Tang, Y., Zhou, Z., Li, S., Zhang, Y., and Ventura, G., 2021. Translithospheric magma plumbing system of intraplate volcanoes as revealed by electrical resistivity imaging, *Geology*, 49(11), p.1337-1342.
- Loke, M.H., 2022. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*.
- Lopes, B.D.C.F.L., Sachet, C., Sentenac, P., Beneš, V., Dick, P., Bertrand, J., and Tarantino, A., 2018. Preliminary non-intrusive geophysical electrical resistivity tomography surveys of a mock-up scale monitoring of EBS at URL Tournemire, *Geological Society Special Publications*.
- Mishra, D. and Shalivahan, A., 2015. Sensitivity plots using comsol 5.1 multiphysics; a tool for optimizing geophysical field survey. In *Proceedings of 2015 COMSOL Conference*.
- Müller, K., Vanderborght, J., Englert, A., Kemna, A., Huisman, J.A., Rings, J., and Vereecken, H., 2010. Imaging and characterization of solute transport during two tracer tests in a shallow aquifer using electrical resistivity tomography and multilevel groundwater samplers, *Water Resources Research*, 46(3), W03502.
- Newmark, R.L., Daily, W., and Ramirez, A., 1999. Electrical resistance tomography using steel cased boreholes as electrodes. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999, Society of Exploration Geophysicists*, p.327-330.
- Newmark, R.L., Ramierz, A.L., and Daily, W.D., 2001. Monitoring carbon dioxide sequestration using electrical resistance tomography (ERT): Sensitivity studies (No. UCRL-JC-140527). Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States).
- Nimmer, R.E., Osiensky, J.L., Binley, A.M., and Williams, B.C., 2008. Three-dimensional effects causing artifacts in two-dimensional, cross-borehole, electrical imaging, *Journal of Hydrology*, 359(1-2), p.59-70.
- Nimmer, R.E., Osiensky, J.L., Binley, A.M., Sprende, K.F., and Williams, B.C., 2007. Electrical resistivity imaging of conductive plume dilution in fractured rock, *Hydrogeology Journal*, 15(5), p.877-890.
- Nivorlis, A., Dahlin, T., and Rossi, M., 2019. Geophysical

- monitoring of initiated in-situ bioremediation of chlorinated solvent contamination. In *25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, 2019(1), p.1-5, EAGE Publications BV.
- Ogilvy, R.D., Meldrum, P.I., Kuras, O., Wilkinson, P.B., Chambers, J.E., Sen, M., Pulido-Bosch, A., Gisbert, J., Jorreto, S., Frances, I., and Tsourlos, P., 2009. Automated monitoring of coastal aquifers with electrical resistivity tomography, *Near Surface Geophysics*, 7(5-6), p.367-376.
- Oldenborger, G.A., Routh, P.S., and Knoll, M.D., 2005. Sensitivity of electrical resistivity tomography data to electrode position errors, *Geophysical Journal International*, 163(1), p.1-9.
- Oldenborger, G.A., Routh, P.S., and Knoll, M.D., 2007. Model reliability for 3D electrical resistivity tomography: Application of the volume of investigation index to a time-lapse monitoring experiment, *Geophysics*, 72(4), F167-F175.
- Osiensky, J.L., Nimmer, R., and Binley, A.M., 2004. Borehole cylindrical noise during hole-surface and hole-hole resistivity measurements, *Journal of Hydrology*, 289(1-4), p.78-94.
- Palacios, A., Ledo, J.J., Linde, N., Luquot, L., Bellmunt, F., Folch, A., Marcuello, A., Queralt, P., Pezard, P.A., Martínez, L., del Val, L., Bosch, D., and Carrera, J., 2020. Time-lapse cross-hole electrical resistivity tomography (CHERT) for monitoring seawater intrusion dynamics in a Mediterranean aquifer, *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), p.2121-2139.
- Park, M.K., Park, S., Yi, M.J., Kim, C., Son, J.S., Kim, J.H., and Abraham, A.A., 2014. Application of electrical resistivity tomography (ERT) technique to detect underground cavities in a karst area of South Korea, *Environmental Earth Sciences*, 71, p.2797-2806.
- Perri, M.T., Barone, I., Cassiani, G., Deiana, R., and Binley, A., 2020. Borehole effect causing artefacts in cross-borehole electrical resistivity tomography: a hydraulic fracturing case study, *Near Surface Geophysics*, 18(4), p.445-462.
- Ramirez, A., Daily, W., Buettner, M., and LaBrecque, D., 1997. Electrical resistivity monitoring of the thermomechanical heater test in Yucca Mountain. In 10th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, *European Association of Geoscientists & Engineers*, p.cp-204.
- Ramirez, A.L., Daily, W.D., and Newmark, R.L., 1995. Electrical resistance tomography for steam injection monitoring and process control, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1(A), p.39-51.
- Ramirez, A.L., Newmark, R.L., and Daily, W.D., 2003. Monitoring carbon dioxide floods using electrical resistance tomography (ERT): Sensitivity studies, *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 8(3), p.187-208.
- Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical SIMULATION1, *Geophysical prospecting*, 40(4), p.453-463.
- Schmidt-Hattenberger, C., Bergmann, P., Bösing, D., Labitzke, T., Möller, M., Schröder, S., Wagner F., and Schütt, H., 2013. Electrical resistivity tomography (ERT) for monitoring of CO₂ migration-from tool development to reservoir surveillance at the Ketzin pilot site, *Energy Procedia*, 37, p.4268-4275.
- Schmidt-Hattenberger, C., Bergmann, P., Kießling, D., Krüger, K., Rucker, C., Schütt, H., and Group, K., 2011. Application of a Vertical Electrical Resistivity Array (VERA) for monitoring CO₂ migration at the Ketzin site: First performance evaluation, *Energy Procedia*, 4, p.3363-3370.
- Schmidt-Hattenberger, C., Bergmann, P., Labitzke, T., Wagner, F., and Rippe, D., 2016. Permanent crosshole electrical resistivity tomography (ERT) as an established method for the long-term CO₂ monitoring at the Ketzin pilot site, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 52, p.432-448.
- Shima, H., 1992. Vertical electric imaging: a new technique to image electric reflectivity near borehole. In *54th EAEG Meeting*, European Association of Geoscientists & Engineers, p.cp-45.
- Slater, L.D., Binley, A., and Brown, D., 1997. Electrical imaging of fractures using ground-water salinity change, *Groundwater*, 35(3), p.436-442.
- Spies, B.R. and Ellis, R.G., 1995. Cross-borehole resistivity tomography of a pilot-scale, in-situ vitrification test, *Geophysics*, 60(3), p.886-898.
- Tsokas, G.N., Tsourlos, P.I., Vargemezis, G.N., and Pazaras, N.T., 2011. Using surface and cross-hole resistivity tomography in an urban environment: an example of imaging the foundations of the ancient wall in Thessaloniki, North Greece, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(16), p.1310-1317.
- Tsourlos, P., Ogilvy, R., Meldrum, P., and Williams, G., 2003. Time-lapse monitoring in single boreholes using electrical resistivity tomography, *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 8(1), p.1-14.
- Tsourlos, P., Ogilvy, R., Papazachos, C., and Meldrum, P., 2011. Measurement and inversion schemes for single borehole-to-surface electrical resistivity tomography surveys, *Journal of Geophysics and Engineering*, 8(4), 487p.
- Wagner, F.M., Bergmann, P., Rucker, C., Wiese, B., Labitzke, T., Schmidt-Hattenberger, C., and Maurer, H., 2015. Impact and mitigation of borehole related effects in permanent crosshole resistivity imaging: An example from the Ketzin CO₂ storage site, *Journal of Applied Geophysics*, 123,

p.102-111.

- Wang, H. and Lin, C.P., 2018. Cause and countermeasures for the symmetric effect in borehole-to-surface electrical resistivity tomography, *Journal of Applied Geophysics*, 159, p.248-259.
- Wilkinson, P.B., Meldrum, P.I., Kuras, O., Chambers, J.E., Holyoake, S.J., and Ogilvy, R.D., 2010. High-resolution electrical resistivity tomography monitoring of a tracer test in a confined aquifer, *Journal of Applied Geophysics*, 70(4), p.268-276.
- Yang, X., Lassen, R.N., Jensen, K.H., and Looms, M.C., 2015. Monitoring CO2 migration in a shallow sand aquifer using 3D crosshole electrical resistivity tomography, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 42, p.534-544.
- Yi, M.J., Kim, J.H., and Son, J.S., 2009. Borehole deviation effect in electrical resistivity tomography, *Geosciences Journal*, 13(1), p.87-102.
- Zhou, B. and Greenhalgh, S.A., 1997. A synthetic study on crosshole resistivity imaging using different electrode arrays, *Exploration Geophysics*, 28(1-2), p.1-5.
- Zhou, B. and Greenhalgh, S.A., 2000. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations, *Geophysical prospecting*, 48(5), p.887-912.

**조 아 현**

2019년 세종대학교 공과대학 에너지자원 공학과 공학사

현재 세종대학교 에너지자원공학과 석박사통합과정
(E-mail; ahyunc1223@gmail.com)**송 서 영**

2023년 세종대학교 공과대학 에너지자원 공학과 공학박사

현재 한국과학기술연구원 박사후연구원
(E-mail; sseoyoung90@kist.re.kr)**김 빛 나 래**

2022년 세종대학교 공과대학 에너지자원 공학과 공학박사

현재 BRGM 박사후연구원
(E-mail; bitnr730@gmail.com)**손 정 술**

2001년 서울대학교 지구시스템공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
(E-mail; jsson@kigam.re.kr)**남 명 진**

2006년 서울대학교 공과대학 대학원 지구 환경시스템공학부 공학박사

현재 세종대학교 에너지자원공학과 정교수
(E-mail; nmj1203@gmail.com, nmj1203@sejong.ac.kr)