

전기비저항 깊이분해능 및 감도분포: 풍화층 및 땅밀림 모델에 대한 적용

김정인¹ · 김지수² · 안영돈³ · 김원기^{4*}

¹충북대학교 지구환경과학과 석사, ²충북대학교 지구환경과학과 교수, ³보민글로벌(주) 대표이사, ⁴국방과학연구소 해양기술연구원 선임연구원

Application of Depth Resolution and Sensitivity Distribution of Electrical Resistivity Tomography to Modeling Weathered Zones and Land Creeping

Jeong-In Kim¹ · Ji-Soo Kim² · Young-Don Ahn³ · Won-Ki Kim^{4*}

¹Master, Department of Earth & Environmental Science, Chungbuk National University

²Professor, Department of Earth & Environmental Science, Chungbuk National University

³CEO, BOMIN Global Co., Ltd.

⁴Senior Researcher, Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development

Abstract

Electrical resistivity tomography (ERT) is a traditional and representative geophysical method for determining the resistivity distributions of surrounding soil and rock volumes. Depth resolution profiles and sensitivity distribution sections of the resistivities with respect to various electrode configurations are calculated and investigated using numerical model data. Shallow vertical resolution decreases in the order of Wenner, Schlumberger, and dipole-dipole arrays. A high investigable depth in homogeneous medium is calculated to be 0.11-0.19 times the active electrode spacing, but is counterbalanced by a low vertical resolution. For the application of ERT depth resolution profiles and sensitivity distributions, we provide subsurface structure models for two types of land-creeping failure (planar and curved), subvertical fracture, and weathered layer over felsic and mafic igneous rocks. The dipole-dipole configuration appears to be most effective for mapping land-creeping failure planes (especially for curved planes), whereas the Wenner array gives the best resolution of soil horizons and shallow structures in the weathered zone.

Keywords: electrical resistivity array, depth resolution, sensitivity distribution, land creeping, weathered layer

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Won-Ki Kim
E-mail: konekee@add.re.kr

Received: 28 January, 2022

Revised: 4 March, 2022

Accepted: 11 March, 2022

© 2022 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

전기비저항 토모그래피는 지하의 토양이나 암석 매질의 전기비저항 분포를 결정하는 대표적인 지구물리탐사법이다. 전극 배열에 따른 비저항의 깊이 분해능과 감도분포를 수치모델 자료를 대상으로 계산하고 해석한 결과 균질 매질에서의 천부 분해능은 웨너, 슬럼버저, 쌍극자 배열순으로 감소하며 깊이에 따른 최대 탐지능은 그 역순으로서 0.11-0.19 L (L: 전극사이의 간격) 깊이범위에서 계산되어 쌍극자 배열이 가장 좋았다. 전극 배열에 따른 비저항의 깊이 분해능과 감도분포의 효과를 살펴보기 위해 땅밀림 파

괴면의 두 가지 형태(평면, 곡선), 수직 파쇄대, 규장질 및 고철질 화성암의 풍화층에 대한 수치 모델링 자료를 사용하였다. 표토층 하부의 수직 파쇄대와 땅밀림 특히 원호 파괴면의 영상화 결과에서는 쌍극자 배열법이 효과적이었으며 천부의 불연속면과 풍화층의 분해능은 웨너법에서 상대적으로 좋게 나타났다.

주요어: 전기비저항 배열, 깊이 분해능, 감도분포, 땅밀림, 풍화층

서론

토목지질 현장에서 2차원 전기비저항 탐사는 여러 지표물리탐사 방법 중에서도 가장 오래되고 전통적인 방법에 속한다. 국내에서도 지난 20년간에 걸쳐 지반조사, 저수지 누수 탐지(Yi et al., 2000; Song et al., 2002), 저수지 전기비저항 모니터링(Kim et al., 2018; Lim, 2018), 3차원구조에 대한 저수지 체제 안정성분석(Cho and Yong, 2019; Song et al., 2019), 산사태 땅밀림 조사(Lee et al., 2020; Kim et al., 2021a) 제방의 안전진단(Yoon et al., 2005; Cho et al., 2021), 영구동토의 활동층 영상화(Kim et al., 2021b)와 같은 대부분의 지반환경 조사에 기본적인 탐사항목으로 사용되고 있다.

1970년대부터 시작된 각종 전극배열에 대한 측정곡선 및 겹보기단면의 비교(Roy and Apparao, 1971; Dey et al., 1975; Baker, 1979)는 전기비저항이 높은 국내 지반조사에 가장 많이 활용되는 쌍극자배열을 중심으로 한 각 배열의 2차원 비저항 영상의 반응효과 연구(Kim et al., 2001, 2014; Min et al., 2008)로 이어졌다.

이 연구에서는 국내에서 가장 많이 적용되는 웨너, 쌍극자, 솔럼버저 배열에 대한 깊이 분해능(depth resolution)을 Roy and Apparao(1971)와 Baker(1979)를 참조하여 전극거리에 대한 함수로 계산하고 이를 바탕으로 감도분포 단면(sensitivity section)을 작성하였다. 깊이 분해능 프로파일 및 감도분포 단면에서 해석된 각 배열에 대한 반응 특성을 땅밀림(land-creeping) 모델자료에서 인장균열(tension cracks)과 관련된 수직 파쇄대, 조암 점토광물(rock-forming clay minerals)에 따른 산성(felsic)과 염기성(mafic) 화성암환경의 풍화층 구조, 평면/원호 파괴면(planar/circular failure plane)의 영상화를 통해 파악해 보았다.

풍화 단계 및 풍화층 모델

지반 환경조사에서 전기비저항은 지반의 전기적 성질에 관계되는 물성이므로 탐사 반응은 암종, 파쇄대 및 균열에 의한 공극률, 포화도, 간극수 및 지하수의 전기비저항, 온도, 풍화 및 변질에 따른 점토광물의 함유량에 따라 달라진다(Park et al., 2004). 산사태가 일어난 지역과 징후 지역들을 대상으로 지질학·지구물리학적으로 해석한 결과 서서히 일어나는 땅밀림 현상은 지질암석 환경에서 주로 풍화층에 분포하는 수분과 점토에 기인한다.

풍화작용은 암석이 형성될 당시의 온도, 압력 조건과 지표에서의 온도, 압력 조건이 다르므로 지표의 환경과 평형을 이루기 위하여 일어나는 자연적인 과정이다. 따라서 마그마에서 먼저 정출된 광물일수록 생성 당시의 환경과 지표의 환경의 차이가 크므로 불안정한 상태로 풍화에 더 취약하다(Keller, 2008). 풍화에 대한 조암광물의 취약성을 보여주는 보웬의 반응계열에서 아래쪽으로 갈수록 해당 광물이 풍화에 취약하다(Fig. 1a). 화성암의 전통적인 암석학적 분류는 실리카의 함량에 기초한다(Fig. 1b). 암석 내의 SiO_2 함량이 적을수록 화학적인 반응에 더 민감해지고, 전도성 점토가 더 많이 수반된다. 이 화학적 활동은 주로 물로 포화된 영역 즉 사프로라이트(saprolite)에서 발생한다. 기후나 지형 등의 다른 환경 인자들이 비슷할 때 고철질 암석 위에 형성된 사프로라이트 층은 상대적으로 두껍고 규장질 암석 위의 사프로라이트 층보다 더 높은 전도성을 띤다.

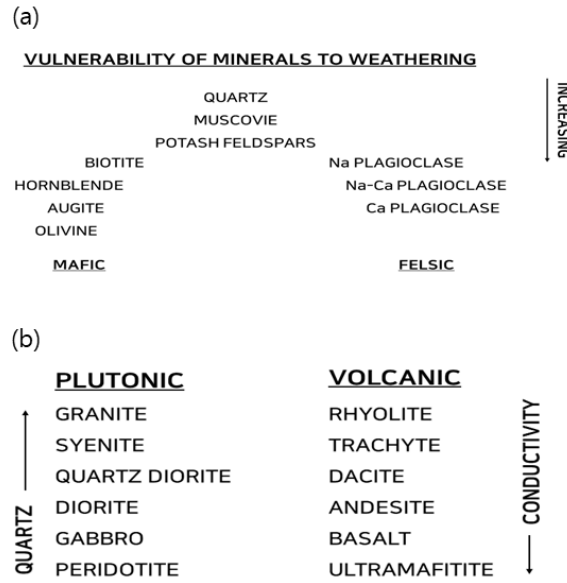


Fig. 1. (a) Vulnerability to weathering of igneous rock-forming minerals in Bowen's reaction series. (b) Standard classification of igneous rocks based on their silica content. The susceptibility of rocks to weathering and saprolite conductivity inversely increase with the quartz content.

모든 암석은 풍화작용을 똑같이 받지 않는다(Fig. 2). 편마암이나 화강암은 각섬암이나 다른 화산암에 비해 풍화에 강하다. 화성암의 경우 풍화의 강도는 암석의 구성 광물에 따라 다르게 나타나는데, 고철질암 및 초고철질암은 석영, 백운모와 같이 저항성이 높은 광물을 많이 함유하는 규장질암보다 화학적 풍화에 더 취약하다. 일반적인 환경에서 감람석, 보통 휘석 각섬석과 같은 고철질 광물들은 풍화작용을 통해 녹니석(chlorite), 일라이트(illite), 스멕타이트(smectite), 버미큘라이트(vermiculite), 몬모릴로나이트(montmorillonite)와 같은 점토광물로 변화된다(Plummer and McGeary, 1996).

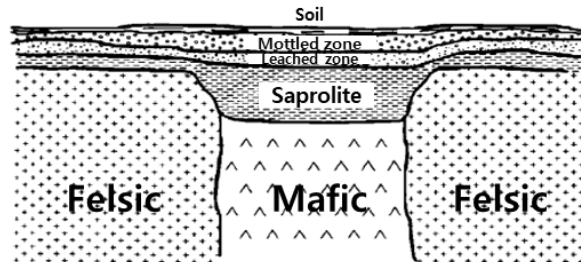


Fig. 2. Schematic geologic section of the weathered layer and its composition as a function of the underlying rock type (after Nabighian, 1994).

Butt(1982)는 화학적 풍화의 과정을 도식하였다(Fig. 3a). 초기 지하수면은 지표에 있으며, 암석은 풍화되지 않은 상태이다(단계 a). 시간이 지남에 따라 지하수면 바로 밑에 사프로라이트 층이 발달하기 시작하고, 지표에 얇은 모래층이 생긴다(단계 b). 사프로라이트는 안정한 1차 광물(기존 광물)들에 의한 원암의 조직이 보존되며, 새로 형성된 점토를 포함하는 물질로서 일명 녹니석화작용대(chloritization zone)라고도 한다. 이 사프로라이트 층의 위에는 반문대(mottled zone)가 형성된다(단계 c). 반문대에는 대부분 크롬철석(chromite)이나 저어콘(zircon)과 같은 저항성이 강한 1차 광물만이 남게 되며 사프로라이트 층을 이루고 있던 몇몇 점토는 새로운 점토로 교체되는데 특히 카올리나이트(kaolinite)가 대표적이다.

사프로라이트의 상부는 지하수면 근처에서 기존 조직이 상실되어 형성된다. 풍화가 진행되며 반문대에서 전이된 함철대 (ferruginous zone)의 발달은 두석 결핵체(pisolithic concretions)의 존재로 확인된다(단계 d). 단단한 함철대에는 산화철, 그 중에서도 적철석이 풍부하다. 산성 및 산화 환경에서의 용탈작용은 주로 석영으로 구성된 잔류 모래층을 지표에 형성할 수 있다. 단계 e는 앞에서 설명한 풍화과정의 발달단계들을 종합적으로 보여준다. 풍화작용에 수반되는 침식작용이 서서히 일어나 지형이 낮아지고 기복이 줄어들는다. 만약 지역이 점차 건조해지거나 용기하는 경우의 풍화 과정에 대한 모식도는 Fig. 3b로 나타낼 수 있다. 즉 지하수면이 내려가면 사프로라이트 층 상부가 용탈되어 빈곤-용탈대(pallid leached zone)를 형성하면서 원암의 조직을 갖는 사프로라이트의 두께는 매우 얇아진다. 지하수면이 낮아짐에 따라 상부층은 점차 산화 환경에 노출되어 최상부의 함철층은 탈수되면서 단단해지고, 각(duricrust)이 형성된다. 결과적으로 풍화 단계 d는 높은 지하수면에서의 라테라이트화 작용과 지하수면의 점진적 하강에 의한 용탈작용으로 구성되는 화학적 과정의 결과이다.

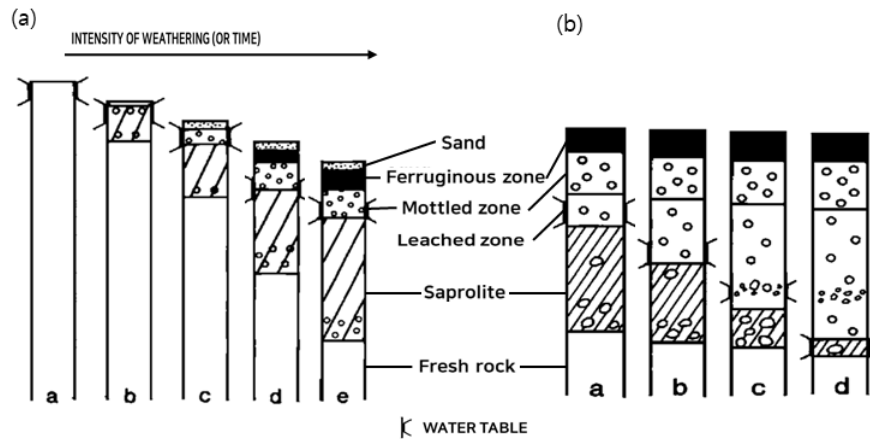


Fig. 3. (a) Development of a complete weathering profile with respect to time or weathering intensity and (b) modification of the weathering profile due to declining water tables resulting from tectonic uplift (modified from Butt, 1982).

앞에서 설명한 풍화 단면 모형을 규장질과 고철질 화성암으로 구분하여 주된 점토광물들과 함께 Fig. 4에 도시하였다. 전기비저항탐사 관점에서 볼 때 사프로라이트는 규장질 화성암보다 고철질 화성암에서 두껍게 나타나며 일라이트와 스멕타이트 등의 조암광물로 전기전도도가 큰 것이 특징이다.

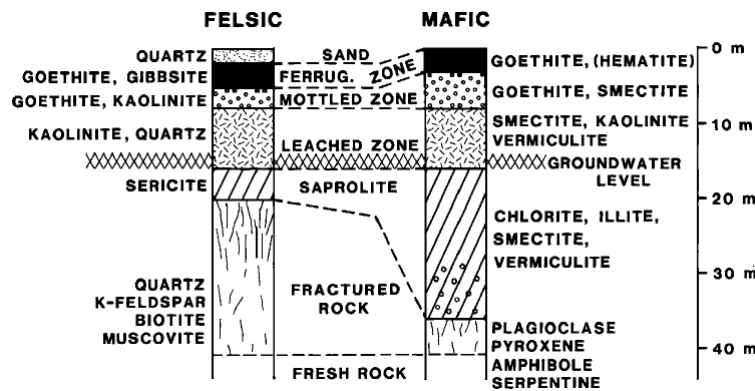


Fig. 4. Schematic weathering profiles over felsic and mafic igneous rocks. The minerals most common to each horizon are labeled next to each column. The fresh rock and fractured rock zone have the same mineral content (after Palacky, 1986).

깊이 분해능 특성

전기비저항탐사는 현장조건, 분해능, 탐사 대상체의 폭과 깊이, 주변 매질과의 물성대비 등을 충분히 고려하여 목적에 맞는 적합한 배열법을 선정해야 한다. 따라서 대표적인 전극배열의 반응을 깊이분해능 특성(depth resolution characteristic, *DRC*)과 감도분포(sensitivity distribution)의 분석으로 알아보았다.

웨너, 슬림버저 배열의 경우 가장 바깥쪽에 위치한 전류전극 C_1 - C_2 사이의 거리를 L 로 설정하였으며, 쌍극자 배열의 경우 쌍극자 중심점 사이의 거리를 L , 쌍극자 사이의 거리 l 을 $0.1L$ 로 설정하였다(Fig. 5).

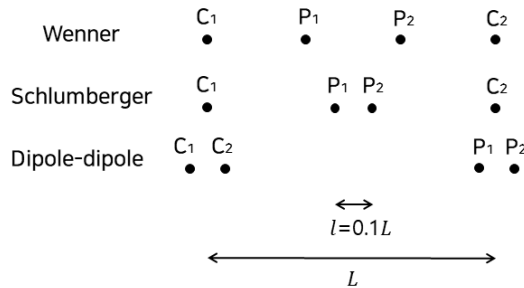


Fig. 5. Electrode systems and definition of L for the investigation of the depth resolution characteristic (*DRC*) and sensitivity distribution (modified from Roy and Apparao, 1971).

균질한 매질에서 xy 평면은 지표면을 나타내고 z 축이 지표 아래로 향하는 방향을 나타낼 때 각 전극의 위치는 $C_1(0, 0, 0)$, $P_1(a, 0, 0)$, $P_2(a+b, 0, 0)$, $C_2(a+b+c, 0, 0)$ 으로 설정하였다. 이때 y 축은 $-\infty$ 에서 $+\infty$ 까지 연장된 것으로 가정한다(Fig. 6).

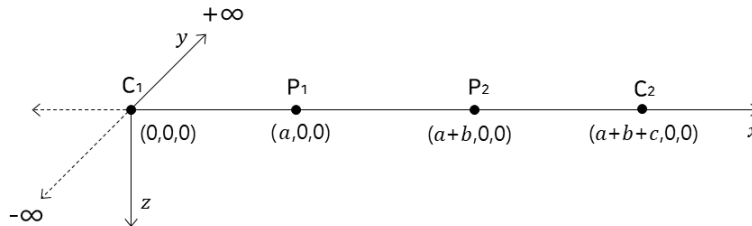


Fig. 6. Geometry of current and potential electrodes for computing the depth resolution characteristics (*DRC*).

적분식에서 x, y 의 범위가 무한대로 나타나는 *DRC*는 z 만의 함수로 표현된다(Roy and Apparao, 1971).

$$DRC = \int_{x,y=-\infty}^{x,y=+\infty} dV_{P_1P_2} = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{8\pi z}{(a^2 + 4z^2)^{3/2}} - \frac{8\pi z}{\{(b+c)^2 + 4z^2\}^{3/2}} \right. \\ \left. - \frac{8\pi z}{\{(a+b)^2 + 4z^2\}^{3/2}} + \frac{8\pi z}{(c^2 + 4z^2)^{3/2}} \right] \cdot dz \tag{1}$$

식 (1)을 z 에 대해 0에서 ∞ 까지 적분하여 지하 반구에 대한 총 반응 값을 얻으며,

$$V_{P_1 P_2} = \int_{z=0}^{z=\infty} DRC = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b+c} - \frac{1}{a+b} + \frac{1}{c} \right) \quad (2)$$

이로부터 정규화 인자(normalizing factor)가 결정된다.

웨너 배열

웨너 배열에서 배열의 특성($a = b = c = L/3$)을 고려하여 식 (1)을 지하 반구의 총 반응(total response, $3 \rho I / 2 \pi L$)으로 나누어 계산된 정규화된 깊이분해능 특성은 다음과 같다.

$$DRC(N)_{wenner} = dz \cdot \frac{8Lz}{3} \cdot \left[\frac{1}{(L^2/9 + 4z^2)^{3/2}} - \frac{1}{(4L^2/9 + 4z^2)^{3/2}} \right] \quad (3)$$

슬럼버저 배열

슬럼버저 배열에서는 $a = c = 0.45L$, $b = 0.1L$ 로 가정할 경우 정규화 인자는 식 (2)에서 $\rho I / 2.475 \pi L$ 이고 따라서 DRC 는 다음 식으로 표현된다.

$$DRC(N)_{schl} = dz \cdot 9.9Lz \cdot \left[\frac{1}{((0.45L)^2 + 4z^2)^{3/2}} - \frac{1}{((0.55L)^2 + 4z^2)^{3/2}} \right] \quad (4)$$

쌍극자 배열

쌍극자 배열에서 4개 전극의 위치는 Fig. 7에서 각각

$$\begin{aligned} C_1(-l/2, 0, 0), C_2(l/2, 0, 0), \\ P_1[(L \cos \theta_1 - l \cos \theta_2 / 2), (L \sin \theta_1 - l \sin \theta_2 / 2), 0] = (A, B, 0) \\ P_2[(L \cos \theta_1 + l \cos \theta_2 / 2), (L \sin \theta_1 + l \sin \theta_2 / 2), 0] = (C, D, 0) \end{aligned} \quad (5)$$

이며 이에 대한 DRC 는 식 (6)으로 정리된다.

$$DRC(N)_{dipole-dipole} = \frac{4z}{M} \left[\frac{1}{((A+l/2)^2 + B^2 + 4z^2)^{3/2}} - \frac{1}{((A-l/2)^2 + B^2 + 4z^2)^{3/2}} \right. \\ \left. - \frac{1}{((C+l/2)^2 + D^2 + 4z^2)^{3/2}} + \frac{1}{((C-l/2)^2 + D^2 + 4z^2)^{3/2}} \right] \cdot dz \quad (6)$$

여기서, M 은 식 (7)을 만족한다.

$$M = \left[\frac{1}{((l/2 + A)^2 + B^2)^{1/2}} - \frac{1}{((l/2 - A)^2 + B^2)^{1/2}} - \frac{1}{((l/2 + C)^2 + D^2)^{1/2}} + \frac{1}{((l/2 - C)^2 + D^2)^{1/2}} \right] \quad (7)$$

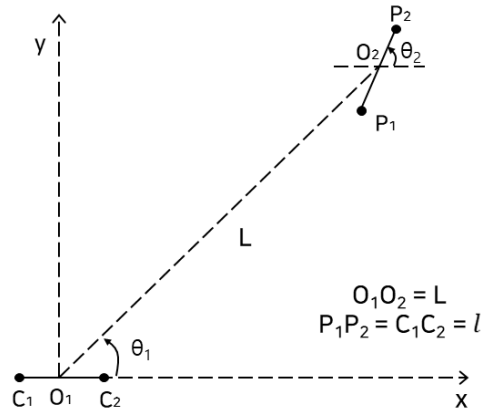


Fig. 7. Plane geometry of dipole-dipole arrangements (modified from Roy and Apparao, 1971).

일반적인 쌍극자 배열은 Fig. 7에서 모든 전극들이 일직선상에 있으므로($\theta_1 = 0, \theta_2 = 0$) 식 (5), (7)에서 $A = L - l/2, B = 0, C = L + l/2, D = 0, M = -0.02, L = 1, l = 0.1$ 이고 이를 정리하면 다음과 같다.

$$DRC(N)_{dipole-dipole(\theta_1=0)} = dz \cdot \frac{4z}{M} \left[\frac{2}{(1 + 4z^2)^{3/2}} - \frac{1}{(0.81 + 4z^2)^{3/2}} - \frac{1}{(1.21 + 4z^2)^{3/2}} \right] \quad (8)$$

앞에 설명된 식 (3), (4), (8)을 이용해 작성한 균질 매질에서의 깊이에 따른 정규화된 DRC곡선(Fig. 8)에서 깊이가 얇은 곳(약 $\sim 0.12 L$)에서는 웨너 배열과 슬럼버저 배열의 감도가 높게 나타나지만 이보다 깊은 경우 분해능이 급격히 감소하는

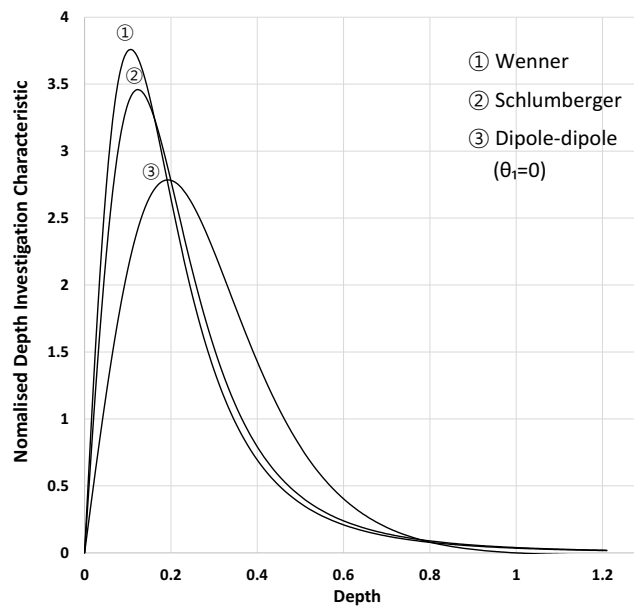


Fig. 8. Depth resolution characteristics (DRC) for the Wenner, Schlumberger, dipole-dipole ($\theta_1 = 0$) arrays.

반면 쌍극자 배열은 감소폭이 작아 상대적으로 심부 분해능이 양호한 것으로 해석된다. 그러나 불균질한 매질과 배열 별 깊이에 따른 감도(sensitivity distribution)가 다르게 나타나기 때문에 현장에서는 대상체의 깊이와 규모에 따라 분해능을 고려하여 적합한 배열을 선택해야 한다. Table 1은 DRC 특성곡선(Fig. 8)에서 최대 진폭을 보이는 깊이를 나타낸 것으로, 쌍극자 배열의 최대 진폭을 보이는 깊이는 $0.20 L$ 로서 웨너 및 슬럼버저 배열에 비해 약 $0.1 L$ 높다. 쌍극자 배열의 천부 분해능은 웨너 배열에 비해 떨어지지만 깊이에 따라 분해능이 좋아진다.

Table 1. Absolute depths of investigation in homogeneous ground (L is the distance in any array between the two active electrodes)

Electrode array	Depth of maximum vertical resolution
Wenner	$0.11 L$
Schlumberger	$0.12 L$
dipole-dipole	$0.20 L$

감도분포

주요 전극배열(웨너, 슬럼버저, 쌍극자)의 반응을 감도분포(sensitivity distribution) 단면으로 작성해보았다(Fig. 9). 여기서 감도는 지하의 단위부피($dx dy dz = 1$)가 지표에서 측정되는 전위(V)에 얼마만큼 반응하는가를 나타내는 상대적인 민감도를 의미한다.

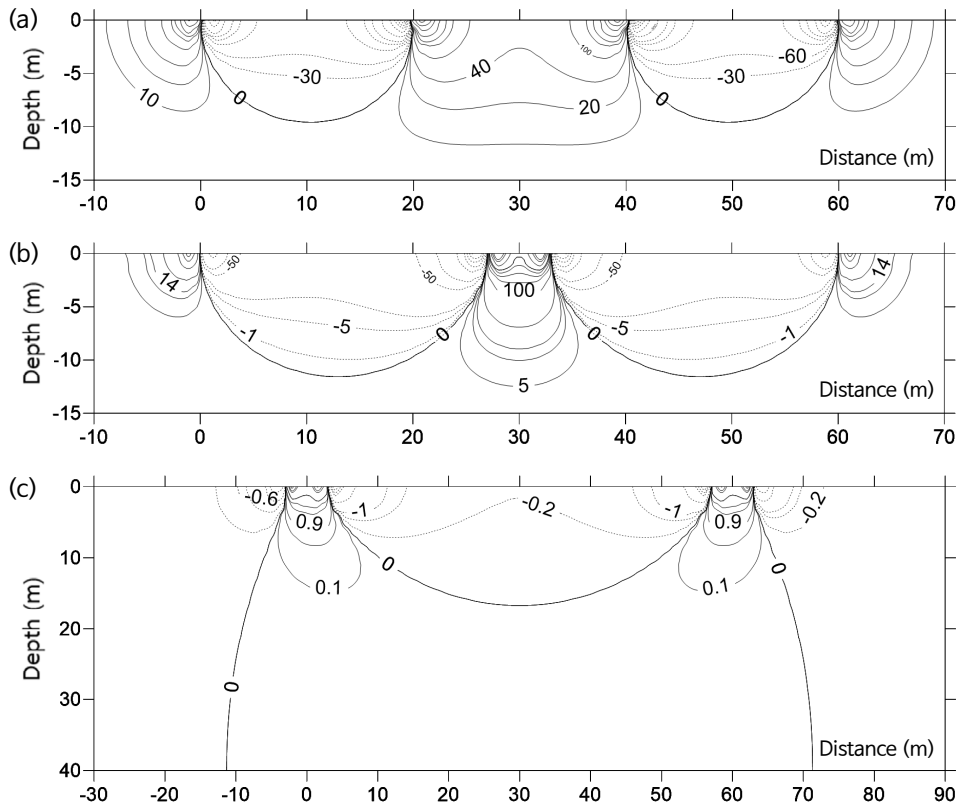


Fig. 9. Sensitivity distribution of the (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, and (c) dipole-dipole array. The Wenner array shows a high vertical resolution, whereas dipole-dipole array particularly sensitive to deep lateral resistivity variations.

웨너, 슐럼버저 배열에 대한 감도의 계산은 Roy and Apparao(1971)의 식을 사용하였다.

$$dV_{P_1P_2} = \frac{\rho I}{4\pi^2} \left[\begin{aligned} & \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2} ((x-a)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ & - \frac{(x-a)(x-a-b-c) + y^2 + z^2}{((x-a)^2 + y^2 + z^2)^{3/2} ((x-a-b-c)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ & - \frac{x(x-a-b) + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2} ((x-a-b)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ & + \frac{(x-a-b)(x-a-b-c) + y^2 + z^2}{((x-a-b)^2 + y^2 + z^2)^{3/2} ((x-a-b-c)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \end{aligned} \right] dx dy dz \quad (9)$$

여기서, a, b, c 는 DRC를 계산할 때 활용한 전류전극과 전위전극의 좌표(Fig. 6)를 사용하였고, 배열 사이의 거리 L 은 60 m로 정하였다.

쌍극자 배열에서는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$dV_{P_1P_2} = \frac{\rho I}{4\pi^2} \cdot \left[\begin{aligned} & \frac{(x-A)(x+l/2) + y(y-B) + z^2}{((x-A)^2 + (y-B)^2 + z^2)^{3/2} ((x+l/2)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ & - \frac{(x-A)(x-l/2) + y(y-B) + z^2}{((x-A)^2 + (y-B)^2 + z^2)^{3/2} ((x-l/2)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ & - \frac{(x-C)(x+l/2) + y(y-D) + z^2}{((x-C)^2 + (y-D)^2 + z^2)^{3/2} ((x+l/2)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ & - \frac{(x-C)(x-l/2) + y(y-D) + z^2}{((x-C)^2 + (y-D)^2 + z^2)^{3/2} ((x-l/2)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \end{aligned} \right] dx dy dz \quad (10)$$

여기서, A, B, C, D 는 쌍극자 좌표계에서의 DRC 계산에서 사용한 전류전극과 전위전극의 좌표(Fig. 7)를 적용하였다.

Fig. 9a는 식 (15)를 사용하여 계산한 웨너 배열의 감도분포 단면이다. 지표 근처에서는 양(+)의 영역(실선부분)과 음(-)의 영역(점선부분)이 서로 상쇄되고, 하부로 갈수록 주요 반응은 상당히 평평해져 이는 수평 층서 구조에서 웨너 배열의 수직 분해능이 높다는 것을 의미한다. 슐럼버저 배열(Fig. 9b)도 거의 같은 정도의 수직 분해능을 가지고 있지만 깊은 곳에서 감도분포의 형태가 아래로 볼록한 점이 다르다. 쌍극자 배열의 경우 날개 형태를 나타내는데(Fig. 9c), 이는 수직 분해능이 낮고 상대적으로 깊은 곳의 수평적 전기비저항 변화에는 민감하여 수평 탐사에 잘 적용될 수 있다는 것을 의미한다.

모델 자료에 대한 분해능 고찰

땅밀림 산사태 지역의 탐사에서는 지하매질과 배열의 특성과 분해능을 고려하여 적절한 배열법을 선택해야한다. 본 연구에서는 각 배열법에 따른 분해능 특성을 파악하기 위해 상용프로그램(Diprowin, 2000)을 이용하여 전기비저항 역산을

수행하였다. 먼저 파괴면의 지시자가 되는 인장균열(tension crack) 구조에 상응하는 표토층과 수직 파쇄대(vertical fracture)를 포함한 모델을 설정하여 각 배열에 따른 깊이 분해능을 살펴보았다. 아울러 규장질 화성암과 고철질 화성암의 조암점토광물 환경에 따라 달라지는 풍화층 모델에 대한 전기비저항 반응을 해석하고, 땅밀림 산사태에서 일반적으로 관찰되는 평면파괴(planar failure)와 원호파괴(circular failure) 모델에 대한 각 배열의 분해능을 비교하였다.

인장균열 모델(수직 파쇄대)

인장균열에 대한 특성을 파악하기 위해 Fig. 10a와 같이 20 m 두께의 풍화층이 존재하고 그 하부에 기반암이 존재하는 2층 구조에 심도 50 m까지 발달한 2개의 인장균열을 설정하여 웨너, 슬럼버저, 쌍극자 각 배열에 따른 분해능을 살펴보았다. 해당 모델은 22개의 전극을 19 m 간격으로 설정하여 $n = 8$ 까지 측정하였다. 웨너 배열에서는 표토층이 잘 구분되었으나 수평탐사에 부적합하여 두 개의 수직 이상체를 구분해내지 못하였고(Fig. 10b) 슬럼버저 배열에서는 두 개 이상체의 반응은 확인할 수는 있으나 이상체의 자세한 정보는 얻을 수 없었다(Fig. 10c). 반면에 쌍극자 배열은 표토층의 수직분해능은 다소 약하지만 두 개의 이상체와 그 깊이를 파악할 수 있다. 따라서 주어진 전극배열 조건하에서는 쌍극자 배열이 수직 파쇄대가 발달해 있는 심도에서 더 적합한 것으로 나타났다(Fig. 10d). 이와 같은 현상은 깊이분해능 특성곡선(Fig. 8)과 감도분포곡선(Fig. 9)에서 웨너 및 슬럼버저 배열의 분해능이 각각 깊이 $0.11L$ $0.12L$ 에서 최고값을 보이고 $0.2L$ 보다 깊은 곳에서는 쌍극자 배열법이 더 높은 분해능을 보이는 것과 잘 부합되고 있다.

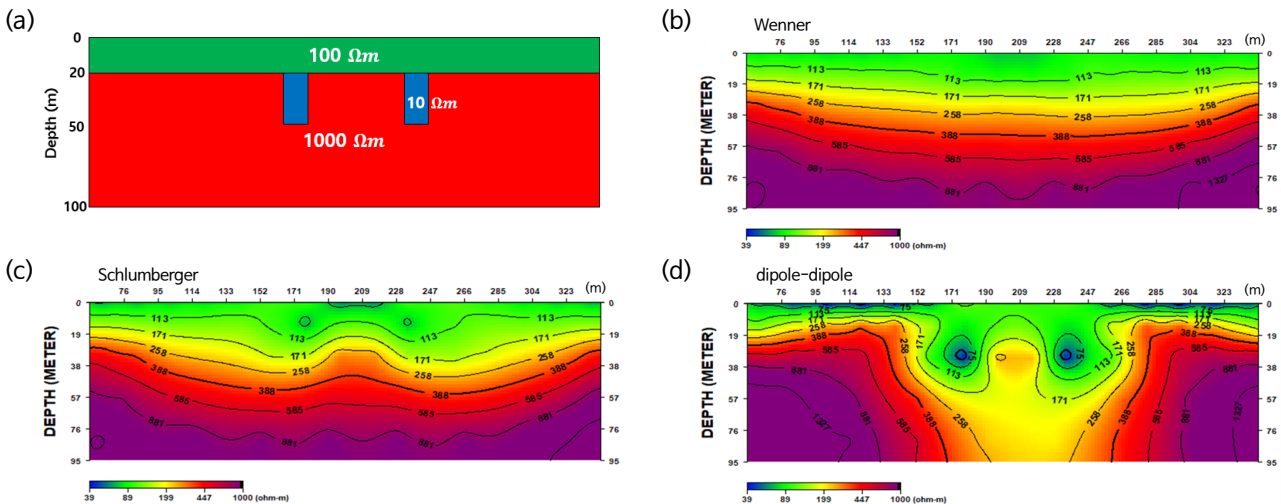


Fig. 10. (a) Soil layer and vertical fracture model (tension cracks), (b) inversion results with the Wenner array, (c) Schlumberger array, and (d) dipole-dipole array. The Wenner configuration provides the best resolution of shallow soil layer, whereas the dipole-dipole array identifies two vertical fracture zones.

풍화층 모델

주된 점토광물들과 함께 규장질 화성암과 고철질 화성암으로 구분하여 설명한 풍화 단면(Fig. 4)을 참조하여 설정한 비저항 모델(Fig. 11a)을 대상으로 쌍극자 배열을 적용시켜 보았다. 전기비저항탐사 관점에서 볼 때 고철질 화성암 환경에서의 사프로라이트는 규장질 화성암에 비해 두껍게 나타나며(Fig. 2) 일라이트와 스멕타이트 등의 조암광물로 전기전도도가 크다는 점이 특징이다. 화성암 환경의 규장질(felsic)-고철질(mafic) 전이구간에 대한 반응 효과를 보다 자세히 관찰하기 위해 간격이 10 m인 전극을 총 101개 사용하여 측선거리 총 1 km가 되도록 최대한 멀리 전개하였다. 지하수면 상부에

위치한 풍화층의 포화도를 20%, 40%로 변화시켜가며 설정하여 수집된 자료의 역산을 거친 단면에서 지하수위 하부의 사프로라이트층의 저비저항대는 고철질 환경에서 두꺼워지고 있다(Fig. 11b).

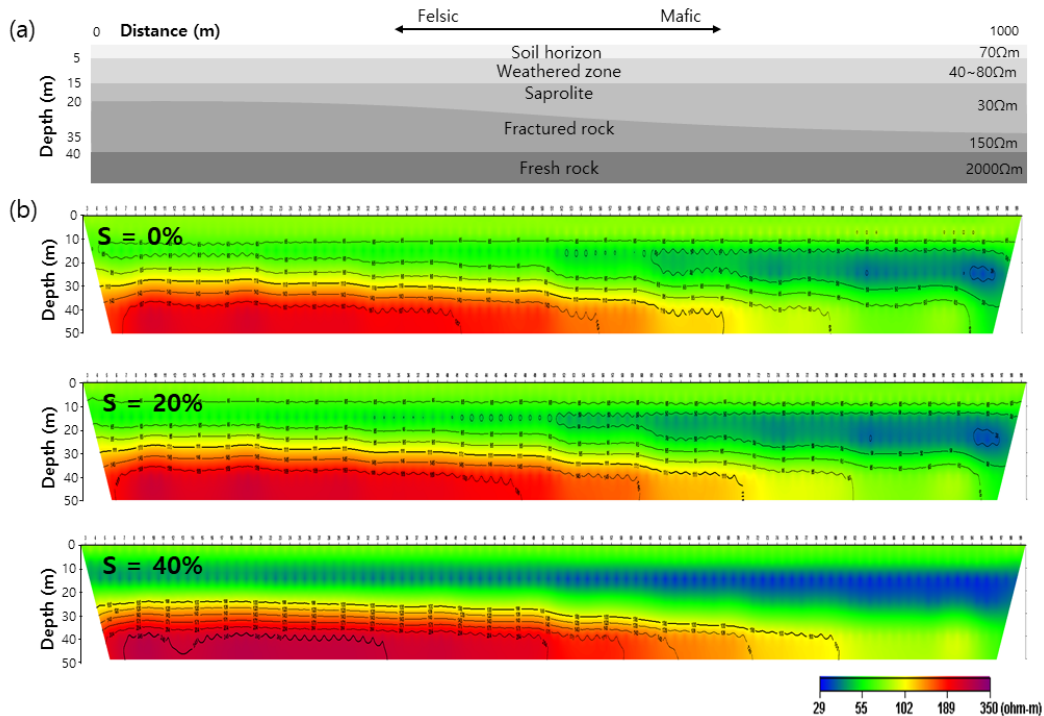


Fig. 11. (a) Felsic/Mafic model and (b) inverted resistivity structure with respect to the saturation degree (S) in the weathered layer.

사면 모델(평면파괴)

평면 및 원호파괴 사면에 대한 웨너 배열과 쌍극자 배열의 적용성을 살펴보았다. 평면파괴(plane failure)의 입력 모델은 경사 15°의 3층구조 사면(Fig. 12a)으로서 상부의 표토층은 80 Ωm, 하부의 기반암은 1,000 Ωm, 5 m 간격의 측점은 모두 21개, 측정계수 $n = 8$ 이다. 가운데 풍화대의 값을 점토의 일반적인 전기비저항 값 30 Ωm로 설정하여(Fig. 12a) 모델링한 결과, 웨너 배열(Fig. 12b)에서 풍화대는 중간의 저비저항대가 상하부층과 충분히 구분되어 보이지만 층이 중앙부근에서 단락된 형태로 나타나며 층의 두께 또한 다소 깊게 계산되었다. 반면, 쌍극자 배열(Fig. 12c)에서는 입력 모델과 유사하게 파괴면을 포함한 모든 층의 경계가 수평으로 나타나고 있다.

사면 모델(원호파괴)

토층 사면 및 파쇄가 심하고 뚜렷한 구조적 특징이 없는 풍화암반에서 발생하는 원호파괴면(circular failure surface)을 파악하기 위한 각 배열의 적용 효과를 알아보았다. 수치모델링 및 역산은 실제로 지표에서 관찰된 인장균열(tension crack)의 흔적을 포함시켜 원호파괴면을 추정할 수 있었던 경남 하동의 땅밀림 지역에 대한 전기비저항 단면(Lee et al., 2020)을 참조하여 수행하였다. 붕적층 없이 풍화암반이 직접 노출된 지표 환경을 고려하여, 입력모델은 인장균열의 왼쪽에 깊숙이 분포하는 100 Ωm의 풍화암, 미끄럼이 발생한 점토를 포함한 30 Ωm의 풍화층과 그 하부 2,000 Ωm의 기반암으로 설정하였다(Fig. 13a). 모의 탐사는 10 m 간격의 25개 측정점과 측정 계수 $n = 8$ 로 설정한 모델에서 수행하였다. 역산

결과 두 개의 배열은 비슷한 분해능을 보이지만, 웨너법(Fig. 13b)에 비해 쌍극자법은 원호파괴면의 받침대가 되어 사면 활동의 심부진행을 막고 상부로 회전시키는 받침대의 역할을 하는 기반암 표면의 돌출 부분을 보다 뚜렷이 보여주고 있다 (Fig. 13c).

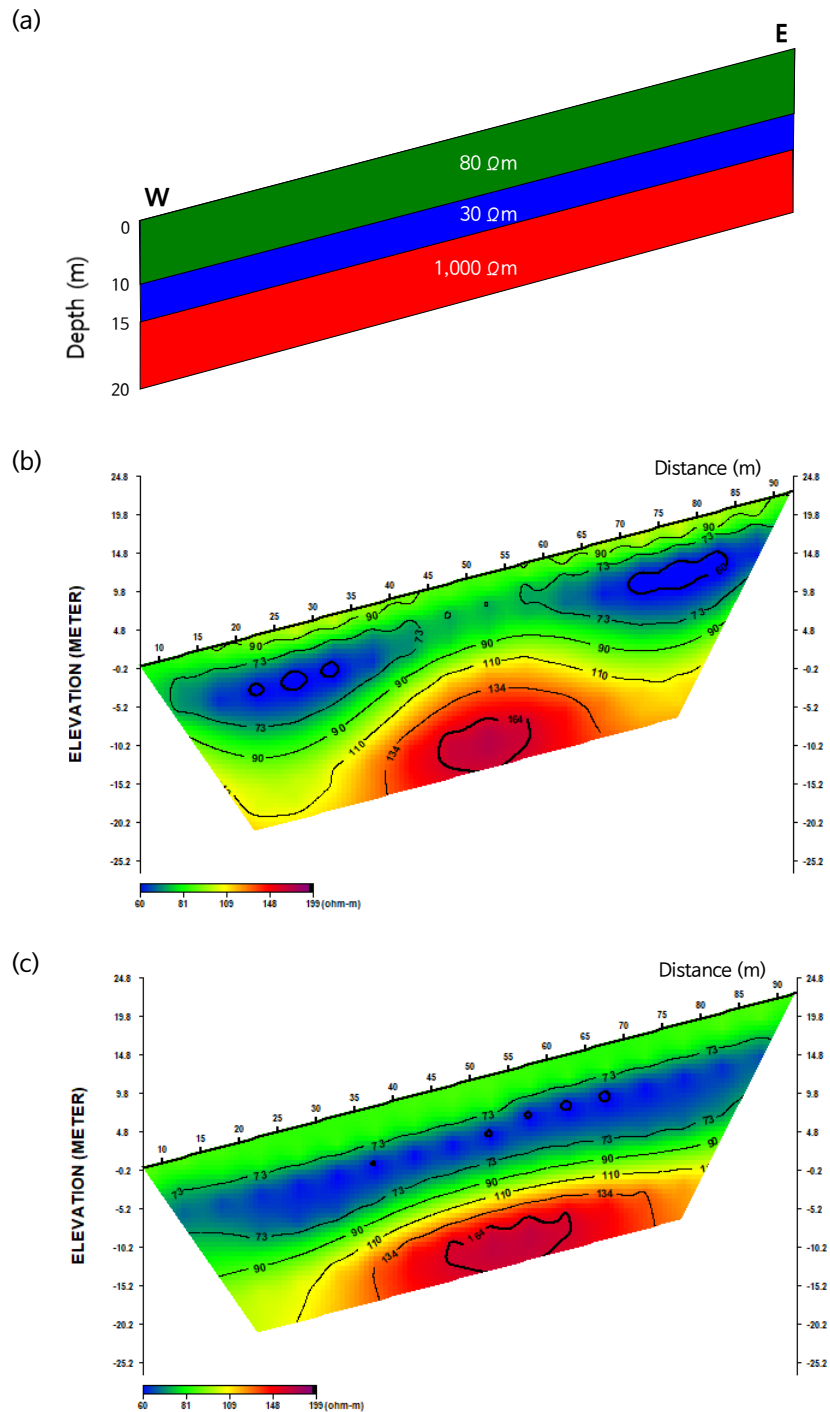


Fig. 12. (a) Three inclined layer model (80/30/1,000 Ωm) for mapping planar failure surface, and inversion results with the (b) Wenner array, and (c) dipole-dipole array. The dipole-dipole method recovers three parallel layers, whereas the Wenner method showing the upward convexed shape.

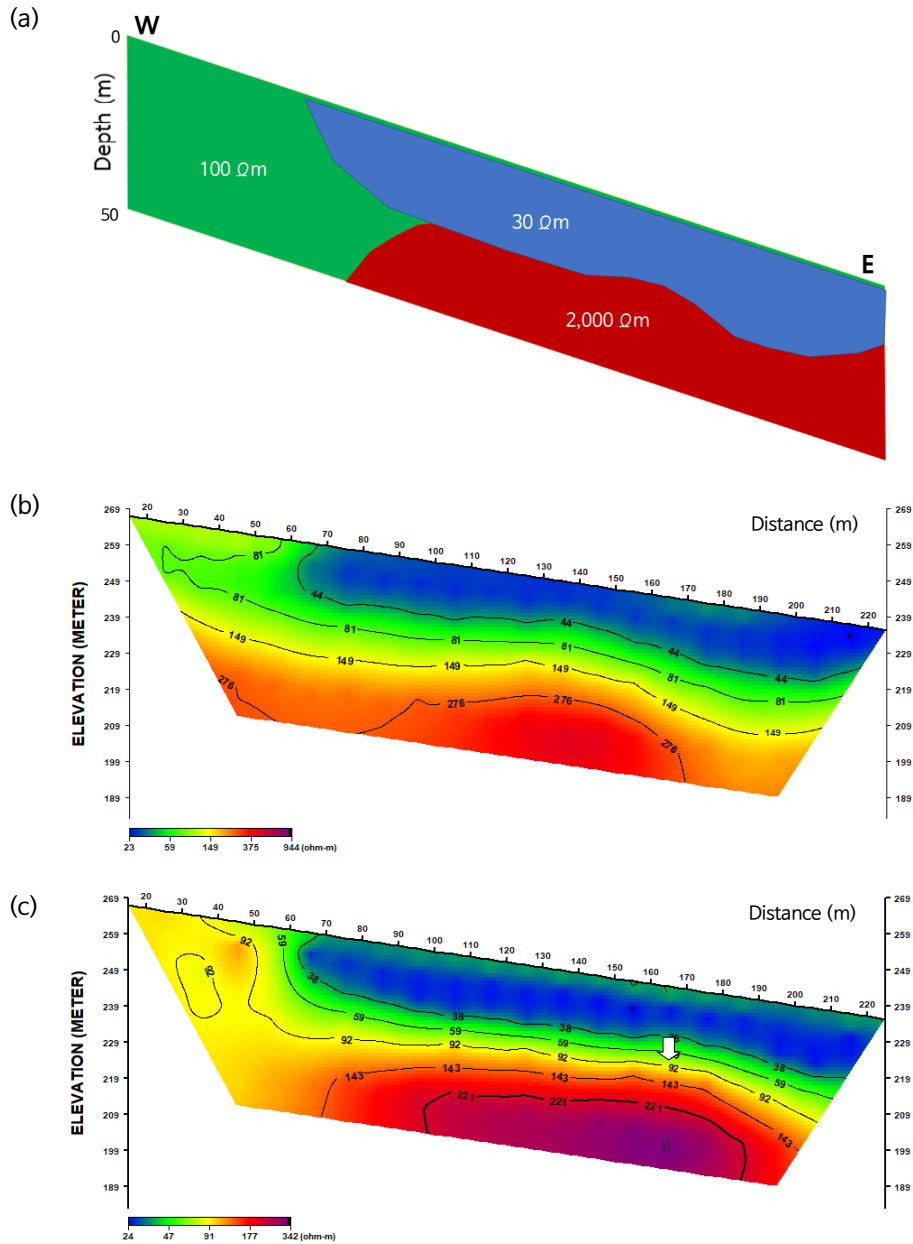


Fig. 13. (a) Curved layer model for mapping the circular failure plane, (b) inversion results with the Wenner array, and (c) dipole-dipole array. The dipole-dipole method represents the natural toe abutment (indicated by the white arrow) of preventing the downward development of slip weak zone.

결론

이 연구에서는 웨너 배열, 솔럼버저 배열, 쌍극자 배열의 깊이분해능과 감도를 계산하여 각각 프로파일과 단면으로 작성하여 비교하였다.

웨너 배열은 신호대잡음비(S/N)가 높은 장점이 있으나 전류전극 간격의 0.2배($0.2L$)보다 깊은 곳에서는 분해능이 현저히 떨어진 것으로 나타났다. 깊이분해능 곡선에서 쌍극자 배열의 S/N은 웨너 배열에 비해 수직분해능은 다소 떨어지지만 최대 전극간격의 약 0.2배($0.2L$) 이상의 깊이에서는 수직 및 수평 분해능이 더 양호한 것으로 나타났다.

땅밀림에 수반되는 파괴면의 지시자가 되는 인장균열(tension crack) 구조에 상응하는 수직 파쇄대 모델을 설정하여 각 배열에 따른 깊이 분해능을 살펴본 결과 웨너법은 천부의 토층, 심부에서는 쌍극자배열이 파쇄대를 잘 보여주었다.

규장질 화성암과 고철질 화성암의 점토광물의 분포에 따라 달라지는 풍화층 모델에 대한 전기비저항 반응은 고철질 환경으로 갈수록 저비저항대의 사프로라이트가 두꺼워지는데 이와 같은 현상은 풍화층의 수분 포화도 증가 및 일라이트, 스펙타이트, 버미쿨라이트와 같은 점토광물의 비표면적과 양이온교환능력의 증대 효과로 해석된다.

땅밀림 산사태에서 일반적으로 관찰되는 평면파괴와 원호파괴 모델에 대한 미끌림면(sliding surface)의 분해능은 쌍극자배열에서 효과적으로 나타났다. 따라서 평면파괴뿐만 아니라 원호파괴면의 2차원 영상을 다루고 있는 이 연구에서는 전극배열의 효율성 측면, 신호대잡음비, 수직 및 수평 분해능 등을 고려할 때 쌍극자배열이 점토광물이 많이 분포하는 풍화층 및 풍화암 하부의 불연속면들을 파악하는데 적합한 방법으로 평가된다.

References

- Baker, R.D., 1979, Signal contribution sections and their use in resistivity studies, *Geophysical Journal International*, 59(1), 123-129.
- Butt, C.R.M., 1982, History and characteristics of weathering in australia, *Geochemical Exploration in Deeply Weathered Terrain*, CSIRO Division of Mineralogy Short Course, 9-18.
- Cho, I.K., Yong, H.H., 2019, 3D resistivity survey for dam safety inspection, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 22(3), 99-106 (in Korean with English abstract).
- Cho, K.S., Kim, J.I., Kim, J.W., Kim, J.S., 2021, Crossplot interpretation of electrical resistivity and seismic velocity values for mapping weak zones in levees, *The Journal of Engineering Geology*, 31(4), 507-522 (in Korean with English abstract).
- Dey, A., Meyer, W.H., Morrison, H.F., Dolan, W.M., 1975, Electric field response of two-dimensional inhomogeneities to unipolar and bipolar electrode configurations, *Geophysics*, 40(4), 630-640.
- Diprowin, 2000, *Electrical resistivity dipole-dipole processing software*, Hisong Ltd., Korea.
- Keller, E.A., 2008, *Introduction to environmental geology*, Pearson, Prentice Hall, Dubuque, 661p.
- Kim, E.M., Cho, I.K., Kim, K.S., Yong, H.H., 2018, Temperature effects in the resistivity monitoring at embankment dams, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 21(2), 82-93 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H., Yi, M.J., Song, Y.H., Chung, S.H., 2001, A comparison of electrode arrays in two-dimensional resistivity survey, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 38(2), 116-128 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.I., Kim, J.S., Lee, S.J., Cho, K.S., Kim, J.W., 2021a, Interpretation of electrical resistivity tomogram with contents of clay minerals for the land creeping area, *The Journal of Engineering Geology*, 31(2), 187-197 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.S., Lee, J.H., Ju, H.T., Jung, J.Y., Chae, N.Y., Chi, J.H., Kwon, M.J., Lee, B.Y., Wegener, J., Kim, J.S., 2021b, Time-lapse electrical resistivity tomography and ground penetrating radar mapping of the active layer of permafrost across a snow fence in Cambridge Bay, Nunavut Territory, Canada: Correlation interpretation using vegetation and meteorological data, *Geosciences Journal*, 25(6), 877-890.
- Kim, S.W., Moon, S.J., Kim, W.K., Min, D.J., Jung, H.K., Cho, S.I., Lee, H.S., 2014, Numerical analysis on feasibility of electrical and electromagnetic methods for detection of an anomalous body in seawater, *Proceedings of the Spring Symposium, KAIS, Daejeon*, 759-761.
- Lee, S.J., Kim, J.S., Kim, K.S., Kwon, I.R., 2020, Delineation of the slip weak zone of land creeping with integrated

- geophysical methods and slope stability analysis, *The Journal of Engineering Geology*, 30(3), 289-302 (in Korean with English abstract).
- Lim, S.K., 2018, Analysis of a weak zone in embankment close to a drainage using resistivity monitoring data, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 21(1), 8-14 (in Korean with English abstract).
- Min, D.J., Jung, H.K., Park, S.G., Chon, H.T., Kwak, N.E., 2008, A study of feasibility of dipole-dipole electric method to metallic ore-deposit exploration in Korea, *Mulli-Tamsa*, 11(3), 250-262 (in Korean with English abstract).
- Nabighian, M.N., 1994, *Electromagnetic methods in applied geophysics: Volume 1, Theory (Investigations in Geophysics No.3)*, Society of Exploration Geophysicists, 513p.
- Palacky, G.J., 1986, Geological background to resistivity mapping, In: Palacky, G.J. (Ed.), *Airborne Resistivity Mapping*, Geological Survey of Canada, 86-22, 19-27.
- Park, S.G., Kim, J.H., Cho, S.J., Yi, M.J., 2004, Electrical resistivity characteristic of soil, *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Spring Conference*, Seoul, 847-854.
- Plummer, C.C., McGeary, D., 1996, *Physical geology*, 7th ed., WCB, Upper Saddle River, 539p.
- Roy, A., Apparao, A., 1971, Depth of investigation in direct current methods, *Geophysics*, 36(5), 943-959.
- Song, S.H., Kwon, B.D., Yang, J.M., Chung, S.H., 2002, Application of SP survey and numerical modeling to the leakage problem of irrigation facilities, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 5(4), 257-261 (in Korean with English abstract).
- Song, S.H., Yong, H.H., Lee, G.S., Cho, I.K., 2019, Safety analysis of reservoir dikes in South Korea through the interpretation of the electrical resistivity data considering three-dimensional structure, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 22(3), 160-167 (in Korean with English abstract).
- Yi, M.J., Kim, J.H., Song, Y.H., Chung, S.H., 2000, Dam seepage investigation using two- and three-dimensional resistivity surveys, *Proceedings of the 2nd Special Symposium, KSEG*, Daejeon, 41-53.
- Yoon, J.R., Kim, J.M., Choi, B.H., 2005, Assessment of levee safety using electrical surveys, *Journal of the Korean Geophysical Society*, 8(2), 53-61 (in Korean with English abstract).