The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 29, No. 3, September, 2019, pp. 223-236
https://doi.org/10.9720/kseg.2019.3.223

RESEARCH ARTICLE

변형 쌍극자배열법을 적용한 울릉도 나리 칼데라 주변 조면안산암 지역의 비저항분포 특성 분석

김기범[1] · 김만일[2*]

[1]안동대학교 지구환경과학과 겸임교수, [2]산림조합중앙회 산림공학연구소 책임연구원

Distribution of Resistivity Zones Near Nari Caldera, Ulleung-do, Korea, Inferred from Modified Dipole Arrays

Ki-Beom Kim[1] · Man-Il Kim[2*]

[1]Adjunct Professor, Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University
[2]Principal Researcher, Forest Engineering Research Institute, National Forestry Cooperative Federation

Abstract

Resistivity surveys can identify the distribution of geological units and structures (including fragmented fault zones), the extent of weathered and modified geological strata, and the characteristics of groundwater. This study aims to analyze the underground sedimentary layers and geological structures near the Nari and Albong Basins of Ulleung-do, Korea, focusing on six survey lines to identify the spatial trends in subsurface resistivity. A modified dipole array method (D method) was employed, combining resistivity results obtained by existing dipole array methods (A and C methods). The modified method provides optimal analysis of the cross-section of underground resistivity, and shows a clear boundary between a low-resistivity zone (≤500 Ω · m) of sedimentary layers and weak zones, and a high-resistivity zone (≥5,000 Ω · m) of volcanic rock (trachyandesite). The estimated average thickness of the sedimentary layers is 50~100 m for the Albong Basin and 100~200 m for the Nari Basin. An anomaly zone, different from the weak zone in the bedrock, is identified as a caldera fault, and the low-resistivity zone extends from the surface down to the lowest survey depths.

Keywords: modified dipole array method, low-resistivity zone, sedimentary layer, trachyandesite, caldera

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Man-Il Kim
E-mail: mikim@nfcf.or.kr

Received: 6 August, 2019
Accepted: 16 August, 2019

Ⓒ 2019 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

전기비저항탐사는 지질 분포나 단층 파쇄대의 유무 등의 지질 구조, 지층의 풍화 및 변질 정도, 지하수 등을 파악하기 위하여 광범위하게 활용되는 탐사기법이다. 본 연구에서는 지하 전기비저항의 분포특성을 분석하기 위하여 총 6개 측선을 중심으로 울릉도 나리분지와 알봉분지 주변 지하 칼데라 퇴적층과 지질 구조를 파악하기 위하여 기존의 쌍극자배열법(A 방법과 C 방법)의 탐사결과와 함께 변형된 쌍극자배열법(D 방법)을 적용하여 연구를 수행하였다. 본 연구결과, 변형된 쌍극자배열법을 적용하여 최적의 지하 비저항 분포단면 분석을 통해 퇴적층과 연약대가 분포하는 구간인 500 ohm-m 이하의 저비저항대와 화산암체인 조면안산암질 암류가 분포하는 5,000 ohm-m 이상의 고비저항대의 경계를 명확하게 파악할 수 있었다. 알봉분지의 퇴적층은 평균 50~100m 내외, 나리분지의 퇴적층은 평균 약 100~200m 내외의

두께로 분포하는 것으로 추정되며, 칼데라 단층으로 추정되는 이상대는 지표부근에서 탐사심도 하부까지 500 ohm-m 이하의 저비저항대가 수직으로 연장성을 가지면서 암반 내 연약대와 구분되는 것으로 분석되었다.

주요어: 변형 쌍극자배열법, 저비저항대, 퇴적층, 조면안산암, 칼데라

서 론

전기비저항탐사는 전류에 의해 야기되는 전위 변화를 감지하는 전통적인 전기탐사법 중의 하나로 조사 매체의 전기적인 물성 특징인 전기비저항 등을 기본적으로 이해하여야 한다. 전기비저항이란 주어진 전압에 대해 얼마나 많은 전류를 흘려 줄 수 있는가 하는 저항을 결정지어 주는 물성으로 저항에 대해 기하학적인 형태의 보정을 수행하여 동일 물질인 경우 형태 및 전류의 방향에 따라 변화되는 저항과는 달리 항상 일정한 값을 보이는 물질 특성이다. 전기비저항탐사의 대상이 되는 지질 특성은 지질 분포나 단층 파쇄대의 유무 등의 지질 구조, 지층의 풍화 및 변질 정도, 지하수 등이 있으며 이들을 판단할 목적으로 이용한다(Im et al., 2006; Yi et al., 2011; Park et al., 2017; Lim et al., 2018).

이미 여러 연구자들에 의해 다양한 기법 적용으로 울릉도 지역의 화산활동에 따른 지질구조의 형성 양상을 분석하였다(Kim, 1996; Song et al., 2006; Park, 2007; Kim and Kim, 2018). 특히, 울릉도에 수행된 자력탐사 결과는 염기성암인 현무암질암류가 높은 자기이상을 갖는 것으로 나타났으며, 이에 반하여 산성암인 조면암질암류는 낮은 자기이상을 갖는 것으로 분석되었다. 이는 울릉도의 암상에 대해 자기이상의 양상변화가 대체로 일치하는 것으로 울릉도 화산암체의 지역적 분포를 파악할 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 지하 전기비저항의 수직 및 수평적인 분포 특성을 분석하여 울릉도 칼데라 퇴적층과 지질구조를 파악하기 위한 목적으로 전기비저항탐사 쌍극자배열법을 연구지역에 적용하였다. 탐사방법은 일반적으로 사용하는 쌍극자배열법으로 우선 측정하고 이 측정결과의 단점을 보완하기 위해 변형된 쌍극자배열법을 적용하여 중복 측정을 실시하여 울릉도 나리 칼데라 지역의 암석학적 성인과 지질구조를 분석하였다.

연구지역

울릉도는 동경 130° 47' 37"~130° 56' 36", 북위 37° 27' 14"~37° 33' 09"에 위치하는 동해상의 화산섬으로 울릉도 생성초기의 화산체는 풍화에 의해 초기 원형이 거의 파괴 되었으나, 화산활동 후기에 형성된 칼데라와 용암 분출로 형성된 알봉은 원형을 그대로 가지고 있다(Kwon et al., 1995). 울릉도의 규모는 북동-남서방향의 장축이 약 12 km, 북서-남동방향의 단축이 약 8 km, 섬의 둘레는 약 53 km 정도이다. 특히, 화구 함몰로 형성된 칼데라의 외륜산은 성인봉(△983.6 m), 천두산(△967.8 m), 미륵산(△900.8 m), 나리봉(△780 m), 형제봉(△713 m), 송곳산(△605.6 m)으로 이어지는 능선을 이루고 있다.

울릉도 일주도로를 따라 노두를 파악해 보면, 일부 지역에 현무암질 집괴암 또는 조면현무암질 집괴암이 피복하고 있으며, 그 상부에 조면암질 집괴암이 분포해 있으며, 집괴암 상부에 조면암질 용암층이 급경사의 지형을 이루면서 그 상부에 조면암질 미고결 분출물인 부석층이 광범위하게 피복되어 있다(Kim and Kim, 1977). 울릉도의 주요 수원 함양지로 알려진 칼데라 내 퇴적분지인 나리분지와 알봉분지는 조면암질 분출물의 생성 이후에 남북을 경계로 양분된 것으로 추정된다. Fig. 1에 울릉도의 지질 및 단층 현황 자료를 함께 도시하였다. 울릉도 화산체의 단층은 Kim and Kim(1977)에 의해 조사된 단층 자료와 현장 지질조사 자료를 추가한 것으로 단층 중에서 현장조사에서 확인된 것은 실선 표기, 연장성이 있을 것으로 추정되는 것은 점선 표기하였다. 여기서, 알봉분지와 나리분지에서의 단층선을 일부 확인 및 분석한 결과를 종합해 보면, 화구 함몰 시 역삼각형의 단층이 발생하여 현재의 칼데라를 형성한 것으로 추정된다(Kim and Kim, 2018).

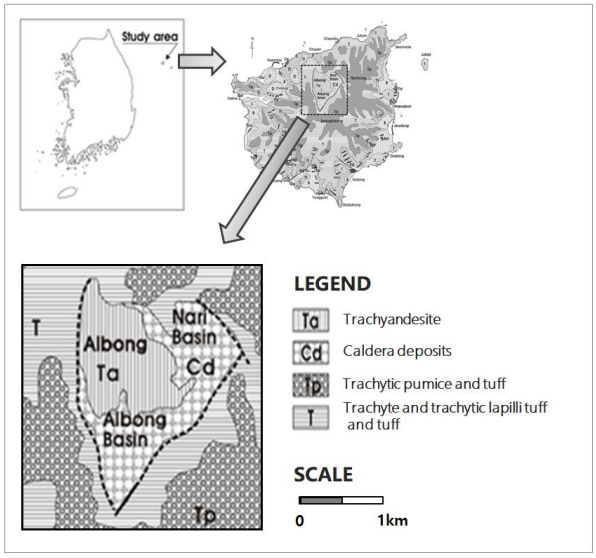


Fig. 1. Detailed geological map of the Nari and Albong Basins, Ulleung-do (modified after Kim and Kim, 1977; Kim and Lee, 2008; Hwang et al., 2012; Kim and Kim, 2018).

연구방법

변형된 쌍극자배열 전기비저항탐사

쌍극자배열 전기비저항탐사는 국내에서 지하수 탐사 및 지질구조, 지질환경조사에 활용하는 대표적인 탐사기술로 수평 및 수직탐사를 동시에 수행함으로써 탐사 측선 하부의 2차원적인 구조를 파악할 수 있다. 쌍극자배열법의 겉보기 전기비저항 식은 다음과 같다.

$$\rho_a = n(n+1)(n+2)\pi a \frac{\Delta V}{I} \tag{1}$$

여기서, ρ_a는 겉보기 전기비저항(ohm-m), n은 거리계수, a는 측선간격 거리(m), I는 전류(mA), V는 전위차(mV) 이다.

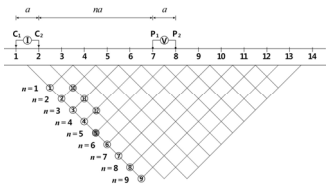
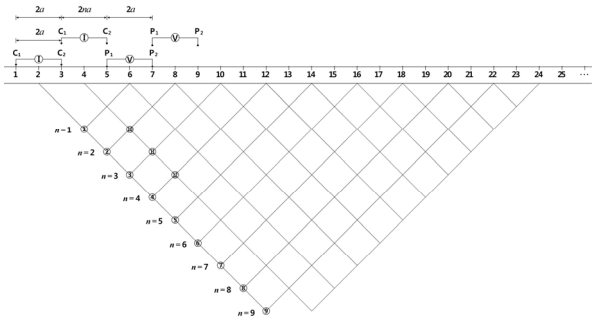
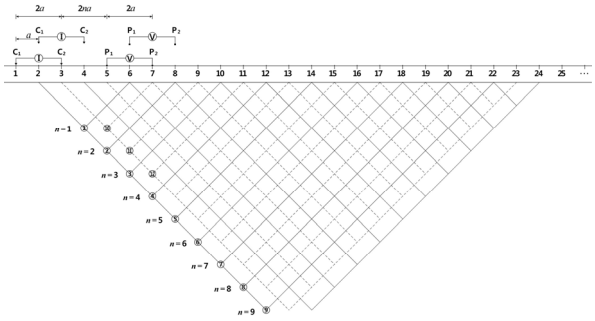
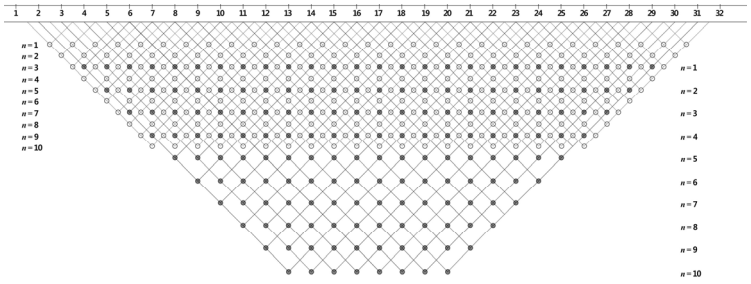
a는 지하구조에 대한 분해능과 밀접한 관계가 있으므로 탐사목적 및 정밀도 등을 고려하여 결정해야 한다. 만약, 전극간격 a의 길이가 너무 크게 될 경우 그보다 얕은 심도에 존재하는 이상체와 깊은 심도에 존재하는 규모가 작은 이상체를 구별해 낼 수 없게 되며, 반대로 너무 작을 경우 측정되는 전위차가 미약하여 심부에 대한 정보를 얻을 수 없게 된다.

따라서 본 연구에서는 나리칼데라의 퇴적구조에 대한 쌍극자배열법 전기비저항탐사의 다양한 해석을 위해 같은 측선에서 좁은 전극간격으로 측정한 후, 전극간격을 2배로 넓혀 중복 측정하였다. 또한, 넓은 전극간격으로 측정한 쌍극자배열법을 변형하여 전류전극 1쌍과 전위전극 1쌍을 동시에 이동할 경우 전극간격의 1/2만 이동하는 쌍극자배열법을 적용하여 깊은 심도에 분포하는 작은 규모의 전기비저항 이상체가 감지될 수 있도록 측정하였다. 이렇게 세 가지 방법의 쌍극자배열법을 적용한 것은 전극간격에 따라 지하 전기비저항 이상대의 규모와 심도가 어떻게 변화하는지 분석하기 위해서이다.

그리고 이들 세 가지 방법의 쌍극자배열법들은 각각 지하 전기비저항 분포단면으로 분석하여 장단점을 파악하였고, 높은 해상도의 지하 전기비저항 분포단면의 분석을 위해 이들 세 가지 방법에 의한 전기비저항 자료 중 일부를 한꺼번에 역산하는 방법을 시도하였다.

Table 1에서와 같이 A 방법은 각 측선의 길이와 탐사심도에 따라 결정된 전극간격(a)인 10 m 또는 20 m를 기본 간격으로 하여 측정하는 전기비저항탐사의 일반적인 쌍극자배열법으로 측선 단면의 지하 전기비저항의 정밀한 측정은 가능하나 가탐심도가 얕은 단점이 있다. 이와 같이 얕은 가탐심도를 보완하기 위한 B 방법은 기본 전극간격인 a를 2배로 확장하여 전극간격을 $2a$로 하여 기본 배열보다 전극간격이 넓어짐으로 인해 지하 전기비저항의 가탐심도가 증가되는 효과가

Table 1. Various types of dipole-dipole array and their expected effects

Method	Applying method	Expectation effect
A	• Basic dipole-dipole array 	• Accurate measurement of resistivity in basic depth. Apparent resistivity pseudosection in dipole-dipole electrical resistivity survey (electrode distance = a, distance between potential electrode and current electrode = na, travel distance of all electrode = a).
B	• Wide dipole-dipole array 	• Increase of survey depth by wide electrode distance. Apparent resistivity pseudosection in wide dipole-dipole electrical resistivity survey (electrode distance = $2a$, distance between potential electrode and current electrode = $2na$, travel distance of all electrode = $2a$).
C	• Modified dipole-dipole array 	• Complement of small anomaly in B. Apparent resistivity pseudosection in modified dipole-dipole electrical resistivity survey (electrode distance = $2a$, distance between potential electrode and current electrode = $2na$, travel distance of all electrode = a).
D	• Basic dipole-dipole array (A) and Modified dipole-dipole array (C) 	• Accurate measurement and high resolution. Apparent resistivity pseudosection with A method and B method (○: measurement point of A method, ●: measurement point of C method).

있으나, A 방법에 비해 얕은 심도에 존재하는 이상체와 규모가 작은 이상체를 구별할 수 없어 정밀도가 낮아지는 단점이 있다. C 방법은 전극간격이 $2a$ 이지만 4개 전극(2개의 전류전극과 2개의 전위전극)의 이동간격을 전극간격과 같은 $2a$가 아닌 a(전극간격의 1/2)로 하는 방법이다. 이동간격이 a인 점선으로 표시된 위치가 추가로 측정되기 때문에 측점 위치를 촘촘히 측정하여 정밀도를 높이는 효과가 있으므로 작은 이상체를 구별할 수는 있으나 A 방법에 비해서는 전극간격이 넓기 때문에 얕은 심도에 존재하는 이상체는 파악할 수 없는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 Table 1의 A와 C 방법에 의한 지하 전기비저항 분포 해석의 단점을 보완하기 위해서 D 방법을 활용하여 지하 전기비저항 분포를 해석하였다. 실제 본 연구결과 분석에 적용된 D 방법은 얕은 심도와 작은 규모의 전기비저항 이상체 파악에 유리한 A 방법과 깊은 심도와 작은 규모의 전기비저항 이상체 파악에 유리한 B 방법에 의해 측정된 지하 전기비저항치를 복합적으로 분석한 것으로 얕은 심도와 깊은 심도의 정밀한 전기비저항 측정 자료를 동시에 해석함으로써 보다 높은 해상도의 지하 전기비저항이 분석이 가능한 장점을 가진다.

측선 설정 및 측정

나리칼데라 퇴적분지는 알봉분지와 나리분지로 나누어지며 각 분지의 퇴적층과 퇴적층 하부 암반의 지질구조를 파악하기 위하여 총 6개 측선에 대해 Table 1에서 기술한 바와 같이 전기비저항탐사 배열법을 적용하여 실시하였다. 쌍극자배열 전기비저항탐사는 주향방향으로는 물성의 변화가 없는 지하구조를 2차원 구조로 가정하여 해석된다. 따라서 슐럼버저 배열법 수직탐사와는 달리 측선이 주향에 수직하게 설정되어야 한다. 그러나 대부분의 경우 지표에서 지하구조의 주향을 정확히 인지할 수 없기 때문에 현지지형 등을 관찰하여 측선을 설정한다. 만약, 동일지역에서 여러 측선을 설정할 경우에는, 가능하면 직교하는 측선을 추가로 설정하여 탐사를 수행한 후 결과를 상호 비교함으로써 지하구조에 대한 정확한 정보를 획득할 수 있다.

본 연구에서도 가능한 나리칼데라 단층이 예상되는 주향방향의 수직으로 측선을 설정하였고, 기본 측선의 직각방향으로도 측선을 설정하여 비교하였다. 각 측선은 알봉분지에서 Line 1과 Line 3을 설정하였고, 나리분지에서 Line 2와 Line 4를 설정하였다. 그리고 울릉도 화산체의 최후기 분출암인 조면안산암질암과 알봉분지 퇴적층과의 관계를 규명하기 위해 Line 1에 직각방향으로 Line 5를 설정하였고, 추가로 Line 6을 설정하였다(Fig. 2).

나리칼데라 내에서 설정된 측선은 총 6개 line이며, 총 연장 4.76 km를 수행하여 지하 전기비저항 분포를 측정하였다. 각 측선에서 전극간격이 10 m인 경우에는 10 m 간격(A 방법)과 20 m 간격(B, C 방법)으로 측정하였고 전극간격이 20 m인 경우에는 20 m 간격(A 방법)과 40 m 간격(B, C 방법)으로 측정하였다. 전극 전개수(n)은 현장 여건에 따라 9~13까지로 하였다(Table 2).

본 연구에 사용된 전기비저항 탐사장비는 현재, 국내에서 가장 많이 이용되고 있는 스웨덴 ABEM사의 SAS4000이다. 본 장비의 최대 출력 전압은 특별한 부가 장치의 부착이 없는 경우, ±400 V의 순간 출력 전압을 생성할 수 있다. 사용 가능 전류는 1부터 1,000 mA 사이의 값 중에서 선별이 가능하다.

본 장비는 지하에 존재하는 이온들이 전극에 달라붙는 분극현상이 발생되지 않도록 특정 전류 전극이 양 또는 음으로 고정되지 않고 시간적인 주기로 극을 바꾸면서 매 순간 전압을 측정한다. 이들의 변화 양상을 통해 자연 전위에 의한 효과를 제거하면서 측정의 정확도를 향상시키는 방법을 사용하였다. 따라서 매 1회 측정 시의 값은 양, 음, 양, 음의 4회의 전극 교대를 통해 측정되는 값의 평균치를 측정하였다.

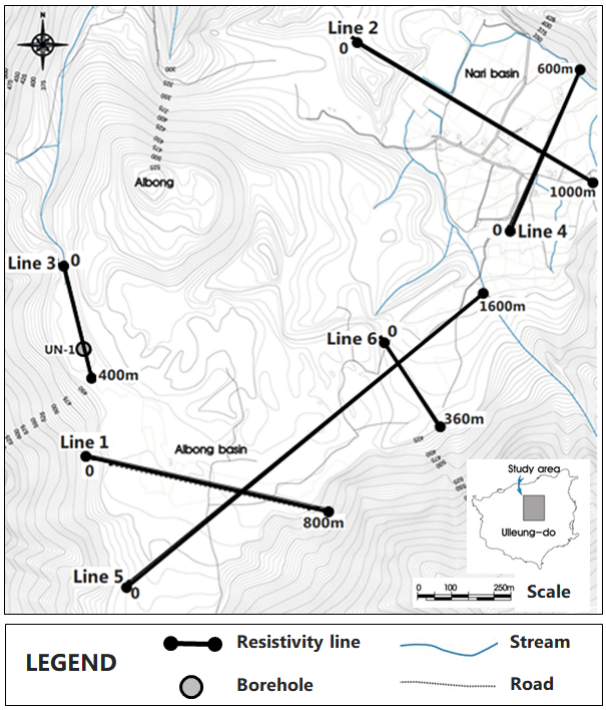


Fig. 2. Map showing the electrical resistivity survey lines (Nari caldera).

Table 2. Details of the resistivity survey for each of the survey lines at Nari Basin, Ulleung-do

Line No.	Strike of line	Line length (m)	Electrode interval (m)	Number of the electrode spread	Points	General survey depth (m)	The application method of Table 1
Line 1	N77W	800	20	$n = 9$	306	100	A
			40	$n = 9$	126	200	B
			40	$n = 9$	243	200	C
Line 2	N59W	1,000	20	$n = 9$	396	100	A
			40	$n = 9$	171	200	B
			40	$n = 9$	333	200	C
Line 3	N14W	400	10	$n = 10$	335	50	A
			20	$n = 11$	142	100	B
			20	$n = 11$	275	100	C
Line 4	N24W	600	10	$n = 13$	676	50	A
			20	$n = 9$	216	100	B
			20	$n = 9$	423	100	C
Line 5	N51E	1,600	20	$n = 13$	936	100	A
			40	$n = 13$	416	200	B
			40	$n = 13$	819	200	C
Line 6	N33W	360	10	$n = 13$	364	50	A
			20	$n = 10$	115	100	B
			20	$n = 10$	220	100	C

자료처리 및 분석 결과

Line 1 측선

Line 1의 지하 전기비저항 분포단면은 Fig. 3에서와 같이 4개 구간(A, B, C, D)의 저비저항 이상대가 분포하는 것으로 분석되었다.

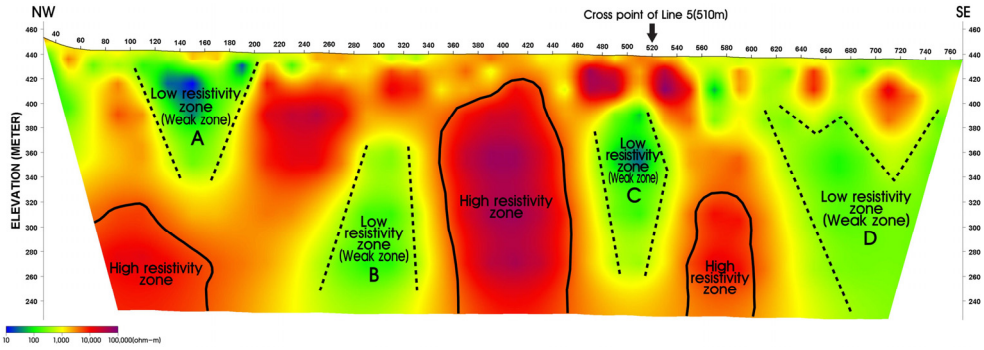


Fig. 3. Analysis results for inverted resistivity section and anomaly zone of Line 1. The point at 620 m on Line 1 coincides in terms of horizontal distance with the point at 510 m on Line 5. The section of Line 1 from 460 to 540 m is a high-resistivity zone. Both sides have a low-resistivity zone at 400 m elevation or lower.

A 저비저항대가 위치하는 100~200 m 구간은 강우 시 측선의 남측에 위치하는 성인봉에서 내려오는 지표수가 유하하는 하천 형태의 지형으로 평상시에는 바닥이 노출되는 건천과 인접해 있다. 그러나 하천 유로상에 퇴적된 투수성이 좋은 퇴적층에 의해 하천수가 남에서 북으로 복류하고 있으며 이 복류수는 북측의 계곡에서 용출하여 천부리로 유출되고 있다. 따라서 A 저비저항대는 퇴적층 내 복류수에 의한 것이며 유로형성 원인을 칼데라 단층으로 추정할 수도 있다. Line 5와 교차되는 510 m 구간을 포함하는 약 460~540 m 구간이 위치한 EL.400 m 이하 심도의 C 저비저항대는 좌우의 고비저항대 사이에 위치해 있고, 지표에서 약 30 m 아래 심도에 분포해 있다. 이는 암반의 파쇄대 또는 절리에 의한 영향의 특징을 보이지만 얕은 심도에서 분포하므로 저비저항대의 상부는 지하수를 함양하고 있는 퇴적층에 의한 이상대로 판단되며 하부는 풍화대 또는 암반의 파쇄대로 추정된다.

D 저비저항대는 본 측선에서 가장 큰 규모로 나타나는 이상대로 지표부근에서는 약 600~760 m의 넓은 구간에 분포하고 하부에서는 좁은 구간에 분포하고 있다. 지표 가까이에 나타나는 넓은 저비저항대는 퇴적층에 함양된 지하수 또는 복류수에 의한 것으로 사료된다. 또한 지하 하부까지 연결된 저비저항대는 칼데라를 형성한 단층에 의해 투수가 양호한 구간으로 추정할 수 있다.

Line 2 측선

나리분지에서 실시한 Line 2의 지하 전기비저항 분포단면은 Fig. 4와 같이 천부의 소규모 저비저항대를 제외하면 5개 구간(A, B, C, D, E)의 저비저항대가 분포한다.

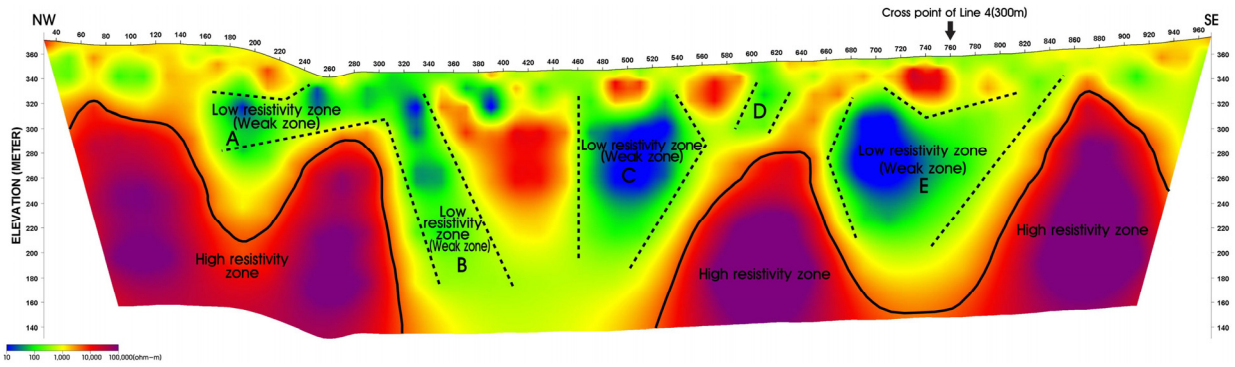


Fig. 4. Analysis results for inverted resistivity section and anomaly zone of Line 2, showing 1000 m of the survey line. The point at 760 m on Line 2 crosses Line 4 at 300 m. Low-resistivity zones B, C, and D are inferred to be sedimentary layers and weathered bedrock; they extend to 150 m elevation.

천층부에 분포하는 A 저비저항대(160~300 m 구간의 EL. 340~300 m 심도)와 D 저비저항대(590~630 m 구간의 EL. 340~300 m 심도) 역시 소규모 이상대와 마찬가지로 퇴적층 중에서 지하수가 함양되어 있어 투수가 양호한 구간으로 판단된다. Fig. 4에서 실선으로 구분된 붉은색의 고비저항대 중 측선 40~300 m 구간의 심부에 분포하는 고비저항대는 알봉과 그 주변에서 분출한 울릉도의 최후기 화산 분출물인 조면안산암질암에 의한 것으로 보이며 측선 약 540~960 m 구간 하부에 분포하는 고비저항대는 칼데라 형성시 함몰된 큰 화산암체 또는 최후기 분출암에 기인한 것으로 판단된다.

이들 B, C, E 저비저항 이상대는 고비저항대인 암반 내 파쇄대로 보기에는 규모가 크기 때문에 퇴적층 또는 암반 풍화대로 해석하는 것이 바람직하며 퇴적층과 암반 풍화대의 경계를 구분할 수는 없으나 약 GL. -150 m 심도까지 연장성을 보이고 있는 것으로 보아 적어도 약 100 m 이상의 퇴적층이 분포할 것으로 판단된다.

Line 3 측선

Line 3의 지하 전기비저항 분포단면은 4개 구간(A, B, C, D)의 저비저항대가 분포하는 것으로 분석되었다(Fig. 5). 해당 측선 300 m 지점에 시추공 UN-1이 위치해 있어 이에 대한 상세한 시추주상도 결과를 참조하여 함께 도시하였다(Kang, 1989). 해당 시추공 UN-1은 부석, 점토, 모래로 구성된 퇴적층이 지표아래 약 24 m 심도까지 분포하고, 풍화된 조면안산암(풍화대)이 24~90 m 심도에 분포하며 조면안산암질암 분출시 발생된 화산재 퇴적층이 심도 90~96.5 m, 초기 분출된 조면안산암이 96.5 m에서 시추 종료심도인 120 m까지 분포해 있다.

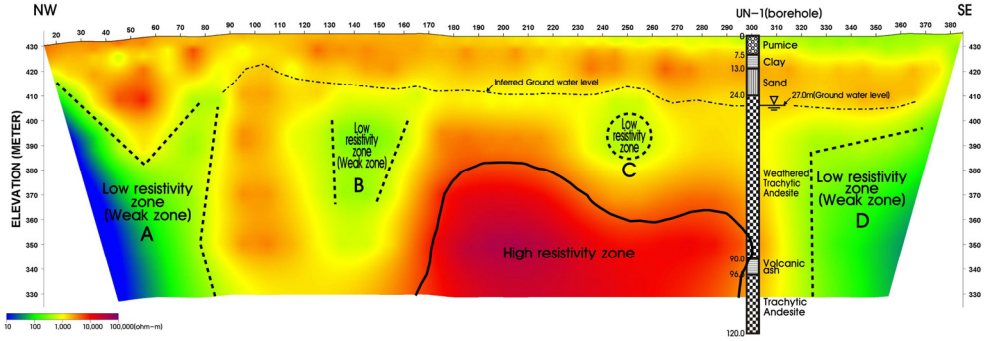


Fig. 5. Analysis results for inverted resistivity section and anomaly zone of Line 3, surveyed for 300 m, including borehole UN-1. Low-resistivity zones extend on both sides of the survey line, and there is a high-resistivity zone at the center.

UN-1 시추 당시 측정된 지하수위는 GL. -27.0 m로 Fig. 5에 표시된 바와 같고 지하수위와 전기비저항을 비교한 결과, 지하수위를 경계로 상부는 1,500 ohm-m 이상의 전기비저항 분포를 보이고 하부는 1,500 ohm-m 이하의 전기비저항 분포를 보이고 있다. 따라서 약 1,500 ohm-m를 경계로 하여 지하수위를 표시하면 전체적으로 약 GL. -20~-30 m 내외로 지하수위를 추정할 수 있다. 그리고 풍화대와 암반 사이에는 경계로 구분되는 화산재 퇴적층이 분포하고 있으나 6.5 m의 얇은 두께로 인하여 전기비저항 분포 단면에서는 명확하게 구분되지 않는다. 다만 약 5,000 ohm-m의 전기비저항을 기준으로 풍화대와 암반을 구분할 수 있을 것으로 판단되며 Fig. 5의 실선으로 표시된 5,000 ohm-m 이상의 고비저항대가 측선 160~300 m 심부에 분포하고 있고 시추공 UN-1의 풍화대와 암반 경계선과 일치하지는 않지만 대체로 유사한 분포를 보이고 있다. 이들이 일치하지 않는 것은 규모가 큰 D 저비저항대의 영향에 의한 것으로 판단된다.

D 저비저항대는 남측에서 북측으로 유동하는 복류천에 의한 영향으로 나타나는 이상대로 판단되며 측선 300 m 내외의 심부에 분포하는 고비저항대, 즉 암반에 의해 복류되는 지하수의 일부가 저장되어 규모가 큰 저비저항대를 보이는 것으로 사료된다. 그리고 A 저비저항 이상대는 북측의 천부리로 연결되는 계곡의 시작부분으로 주변에 비해 해발고도가 낮기 때문에 지형적으로 지하수가 합류되는 지점이므로 풍화대 및 암반 파쇄대 내에 함양된 지하수가 이곳으로 유입되어 규모가 큰 저비저항대를 보이는 것으로 판단된다.

Line 4 측선

나리분지에서 실시한 Line 4의 지하 전기비저항 분포단면은 Fig. 6과 같이 측선방향이 Line 2의 760 m 지점을 기준으로 직각방향이다. 측선 Line 4에 나타나는 GL. -10 m 이내의 소규모 저비저항대를 제외하면 5개 구간(A, B, C, D, E)의 저비저항대(500 ohm-m 이하)가 분포한다. Fig. 6에서 표기되지 않은 천부 소규모 저비저항대는 천부 퇴적층 중에서 지하수 함양이 많은 투수가 양호한 구간이며 Line 2에서와 같이 대부분 경작지로 이용되고 있는 지역이다.

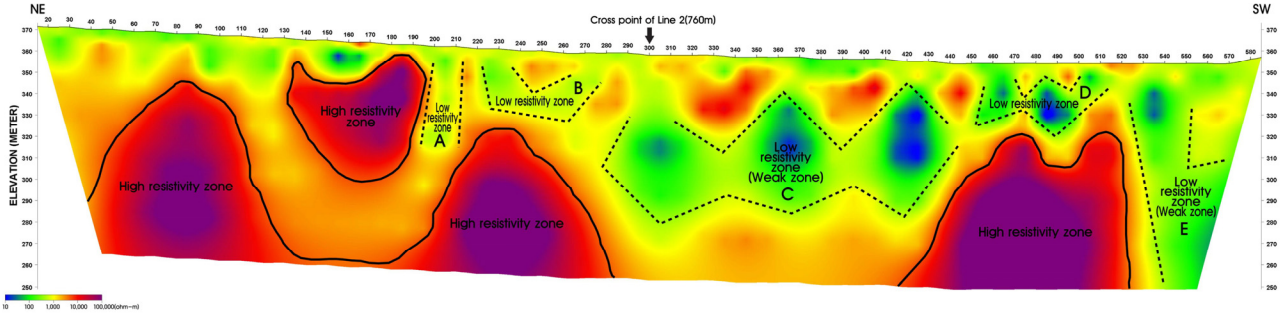


Fig. 6. Analysis results for inverted resistivity section and anomaly zone of Line 4, surveyed for 600 m. The high-resistivity zone (5000 Ω·m) shown as a solid line is assumed to correspond to volcanic products (trachyandesite or volcanic rocks). The low-resistivity zones C and D are assumed to be sedimentary layers and weathered bedrock.

규모는 작지만 좀 더 깊은 심도에 분포하는 A 저비저항대(200~215 m 구간의 EL. 360~330 m 심도)와 B 저비저항대(220~280 m 구간의 EL. 360~340 m 심도), D 저비저항대(450~510 m 구간의 EL. 350~320 m 심도) 역시 소규모 이상대와 마찬가지로 비교적 얕은 심도에 위치하는 퇴적층 중에서 지하수가 함양되어 있는 투수가 양호한 구간으로 판단된다.

Fig. 6에서 실선으로 구분된 5,000 ohm-m 이상의 붉은색으로 표시된 고비저항대는 알봉 주변에서 소규모로 분출한 울릉도 최후기 화산 분출물인 조면안산암질암 내지 칼데라 형성 시에 함몰된 큰 화산암 전석에 기인한 것으로 판단된다.

고비저항대 사이에 분포하고 있는 C 저비저항대(280~440 m 구간의 EL. 340~280 m 심도)는 규모가 크고 깊은 심도까지 연장되어 있다. 이 저비저항대는 5,000 ohm-m 이상의 고비저항대 사이에서 넓은 구간에 분포하고 있고 D 저비저항대

와도 수평으로 연장성을 보이므로 고비저항대인 암반 내 파쇄대로 보기에는 규모가 크기 때문에 퇴적층 또는 암반 풍화대로 해석하는 것이 바람직하다.

Line 5 측선

Line 5는 알봉분지 남서측 가장자리에서 북동방향으로 총 측선 길이는 1,600 m이다. Line 1의 520 m 지점을 교차하는 Line 5의 지하 전기비저항 분포단면은 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 500 ohm-m 이하의 저비저항대는 총 12개 구간(A~L)이며 이중 큰 규모의 저비저항대는 7개 구간(A, B, C, D, E, F, G)이며 작은 규모의 저비저항대는 5개 구간(H, I, J, K, L)이다.

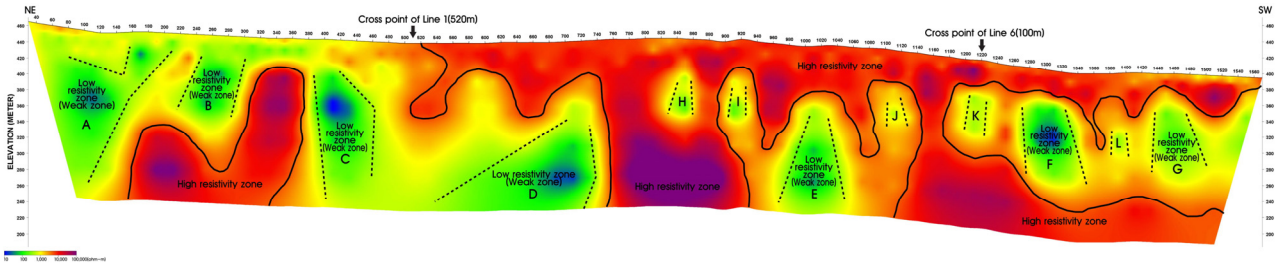


Fig. 7. Analysis results for inverted resistivity section and anomaly zone of Line 5, surveyed for 1600 m. The line appears divided into two sections about the point at 780 m. At 510 m it crosses Line 1, and at 1220 m it crosses Line 6. The section at survey distances of 30~780 m includes widely distributed low-resistivity zones attributed to layers of volcaniclastic sediment.

Line 5의 고비저항대 분포범위는 다른 측선에 비해 넓고 지표부근에서도 분포하는 특징이 있다. 측점 700~1,560 m의 긴 구간에서 나타나는 이 특징은 울릉도 최후기 화산암체인 조면안산암질암이 소규모 화도를 통해 분출한 구간임을 전기비저항 분포단면으로 잘 보여주고 있다. 이 구간은 나리칼데라 퇴적분지인 알봉분지와 나리분지의 경계에 해당하며 두 곳의 퇴적분지보다 높은 지형을 형성하고 있으면서 나리칼데라를 양분하고 있다.

수직형태의 저비저항대 중 규모가 큰 이상대(E, F, G)는 이 구간에서 분출한 조면안산암질암의 소규모 화구가 함몰되어 나타나는 현상으로 사료되며 5개 구간(H, I, J, K, L)의 소규모 저비저항대는 소규모 화구 함몰 시 주변 화산암체에 균열이 발생하면서 생성된 파쇄대로 판단된다.

A 저비저항대(40~200 m 구간의 EL. 440~260 m 심도)는 본 측선에서 가장 큰 규모로 나타나는 이상대 중의 하나이며 B 저비저항대(240~300 m 구간의 EL. 430~340 m 심도) 하부에 위치하는 5,000 ohm-m 이상의 고비저항대는 칼데라 단층에 의해 분리된 규모가 큰 화산암체 전석으로 여겨지며 이 화산암체 상부에 퇴적층이 퇴적된 것으로 보인다. 그리고 C 저비항대(380~460 m 구간의 EL. 410~260 m 심도)와 D 저비저항대(540~720 m 구간의 EL. 340~240 m 심도)는 칼데라 함몰 후 알봉분지에 퇴적된 퇴적층으로 D 저비저항대 퇴적층 상부에 최후기 분출물인 조면안산암질암이 피복하여 고비저항대를 형성한 것으로 판단된다.

Line 6 측선

Line 6은 Line 5의 측점 1,220 m 지점을 북서방향으로 교차하며 총 측선 길이는 360 m로 울릉도 최후기 화산암체인 조면안산암의 분포 범위를 확인하기 위한 측선으로 전기비저항 분포단면은 Fig. 8과 같다. Line 6에 나타나는 500 ohm-m 이하의 저비저항대는 총 4개 구간(A, B, C, D)이고 이중 큰 규모의 저비저항대가 2개 구간(A, D)이며 작은 규모의 저비저항대도 2개 구간(B, C)으로 분포하는 것으로 분석되었다.

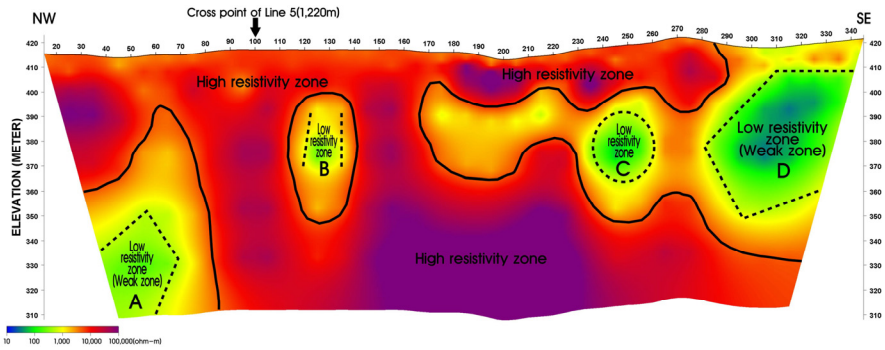


Fig. 8. Analysis results for inverted resistivity section and anomaly zone of Line 6, surveyed at the 100 m distance point, where the line crosses Line 5. Ejected trachyandesite volcanic rocks occur near small-scale vents to create a low-resistivity zone. In particular, Zone D, which has low resistivity, is attributed to caldera sedimentary layers or caldera faults.

본 측선은 Line 5와 마찬가지로 고비저항의 분포범위가 넓고 지표부근에서도 분포하는 특징이 있으므로 울릉도 최후기 화산암체인 조면안산암질암이 소규모 화도를 통해 분출한 구간을 전기비저항 분포단면으로 명료하게 분석되었다. 저비저항 이상대 중 A, B, C는 이 구간에서 분출한 조면안산암질암의 소규모 화구가 함몰되어 나타나는 것으로 사료되며 D 저비저항대는 칼데라 퇴적층 또는 칼데라 단층에 의한 것으로 판단된다.

토 의

나리칼데라 내에서 칼데라 단층과 분지 퇴적층의 심도 및 지질구조 분석을 목적으로 총 6개 측선인 총 4.76 km에 대해 쌍극자배열법 전기비저항탐사를 실시하여 분석하였다. 본 연구에서 실시한 쌍극자배열법은 일반적인 쌍극자 배열법을 기본으로 적용하였고, 추가로 전극간격을 기본 쌍극자배열법의 2배로 하고 4개 전극 이동시에는 전극간격의 1/2로 이동하여 측점 간격을 좁히고 측점수를 증가시켜 가탐심도 하부의 정밀도를 높이는 변형된 쌍극자배열법을 적용하여 최적의 지하 비저항 분포단면을 선택하여 분석하였다(Table 1).

일반적인 쌍극자배열법으로 측정된 자료와 변형된 쌍극자배열법에 의해 측정된 자료를 중합, 역산하여 각 측선의 전기비저항 분포단면(Figs. 3~8)을 작성하였다. 이들 분포단면을 서로 비교하여 공통적으로 적용할 수 있는 등전위선을 분석한 후 6개 측선에 대해 이상대로 판단되는 500 ohm-m 이하의 저비저항대와 5,000 ohm-m 이상의 고비저항대를 분류하였다.

각 측선의 전기비저항 분포단면에서 각 이상대의 분포심도 및 분포범위 등을 고려하여 이상대를 분석하고 UN-1 시추자료를 적용하여 분석한 결과를 종합하여 Fig. 9와 같이 3D fence diagram으로 시각화 한 후 칼데라 단층 위치와 퇴적층의 분포심도 및 위치를 추정하여 도시하였다. 그 결과 알봉분지의 퇴적층은 평균 50~100 m 내외의 두께로 분포하며 나리분지의 퇴적층은 평균 약 100~200 m 내외의 두께로 분포하는 것으로 추정된다.

또한, 칼데라 단층으로 추정되는 이상대는 대부분 지표 부근에서 탐사심도 하부까지 500 ohm-m 이하의 저비저항대가 수직으로 연장성을 가지고 분포해 퇴적층 또는 암반내 연약대와는 구분 가능한 것으로 보인다. 특히, Fig. 9의 칼데라 단층 이상대의 위치를 Fig. 10의 쌍극자배열법 측선위에 표기하여 문헌자료 및 야외에서 측정된 자료(Fig. 1)에 의한 추정 단층 위치와 비교한 결과, 정확히 일치하지는 않지만 지표에서 조사된 단층 위치와 지하에 분포할 것으로 추정되는 단층 위치의 차이를 감안하면 양호한 결과라고 할 수 있다.

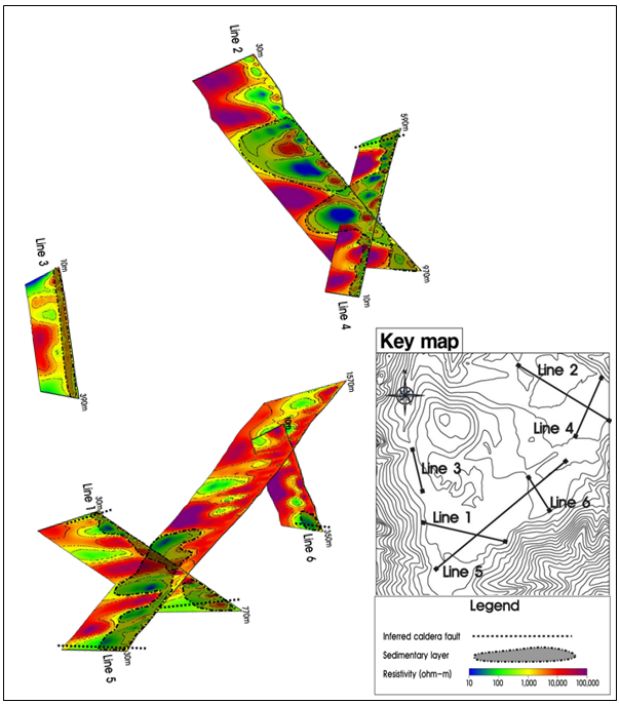


Fig. 9. 3D fence diagram showing optimal analysis results for the cross-sectional resistivity distribution. A survey was conducted along four survey lines crossing Line 1 for the Albong Basin and Line 2 for the Nari Basin. The survey revealed low-resistivity zones (500 Ω·m) comprising sedimentary layers or weak zones, and high-resistivity zones of trachyandesite.

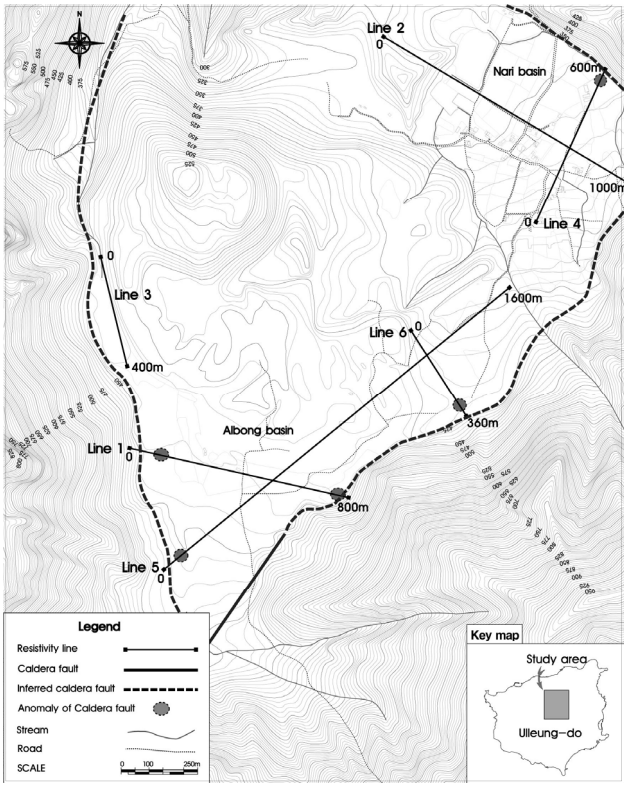


Fig. 10. Map showing the electrical resistivity survey lines with the inferred caldera fault and its anomaly zone.

결 론

알봉분지와 나리분지에서 실시한 쌍극자배열법 전기비저항탐사 Line 1과 Line 2를 이용하여 Table 1에서 제시한 전극배열과 전극 이동간격에 따른 4가지의 전기비저항 분포단면(A, B, C, D에 의한 방법)을 비교 분석하였다. 나리 칼데라의 지하 지질구조 파악을 목적으로 최적의 지하 비저항 분포단면을 분석하기 위하여 본 연구에서는 변형된 쌍극자배열법을 적용한 전기비저항탐사가 수행되었다. 그 결과 D 방법으로 역산된 지하 전기비저항 분포단면이 이외의 방법으로 분석된 전기비저항 분포단면에 비해 얕은 심도와 깊은 심도 모두에서 높은 해상도의 분석 결과를 보여주는 것으로 나타났다.

이러한 분석 결과로 알봉분지와 나리분지 주변부에서 측정된 500 ohm-m 이하의 퇴적층 내지 연약대로 이루어진 저비저항대와 화산암체인 조면안산암질로 이루어진 5,000 ohm-m 이상 고비저항대의 경계를 명료하게 파악되었다. 따라서 정밀하고 효율적인 쌍극자배열법 적용방법은 Table 1의 기본 전극간격의 쌍극자배열법인 A 방법과 넓은 전극간격이면서 조밀하게 측정하는 변형된 쌍극자배열법인 C 방법을 합친 D 방법인 것으로 판단되며, 이들 분석 결과를 통해 나리 칼데라 내에서의 퇴적층과 지질구조를 세부적으로 파악할 수 있었다.

사 사

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(비탈면 대상 조사·점검 개선 및 보강시설 노후화 대응 기술 개발, 19SCIP-C151408-01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

Hwang, S.K., Hwang, J.H., Kwon, C.W., 2012, Geological report of the Ulleungdo sheet: Scale 1:50,000, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 84p (in Korean with English abstract).

Im, E.-S., Oh, S., Kim, Y.-K., Oh, B.-H., 2006, Electrical resistivity survey for evaluation of grouting effect in earth dam, Journal of the Korean Geophysical Society, 9(4), 455-462 (in Korean with English abstract).

Kang, G.W., 1989, A feasibility study for the development of water resources in Jeju-Do and Ulleung-Do, Korea Water Resources Corporation, 272p.

Kim, K.-B., Kim, M.-I., 2018, Analysis of geological structure of volcanic rock mass in Ulleung-do using variations of magnetic anomaly, The Journal of Engineering Geology, 28(4), 619-630 (in Korean with English abstract).

Kim, K.-B., Lee, G.-D., 2008, A study on volcanic stratigraphy and fault of Ulleung-do, Korea, The Journal of Engineering Geology, 18(3), 321-330 (in Korean with English abstract).

Kim, K.H., 1996, Naming a quaternary Jeodong formation in the Jeodong area from the Ulreung volcanic island of the east sea, Journal of the Korean Earth Science Society, 17(5), 383-390 (in Korean with English abstract).

Kim, Y.G., Kim, S.W., 1977, Applied geology of Ulleung-do, Gyeongsangbuk-do, 59p.

Kwon, B.-D., Kim, K.-J., Kim, S.-R., 1995, Gravity and magnetic investigation of Ulleungdo, Korea, Journal of the Geological Society of Korea, 31(2), 138-150 (in Korean with English abstract).

Lim, W.-R., Hamm, S.-Y., Hwang, H.-S., Kim, S.-W., Jeon, H.-T., 2018, Detection of potential flow paths of leaked CO_2 from underground storage using electrical resistivity survey, The Journal of Engineering Geology, 28(1), 69-79 (in Korean with English abstract).

Park, B.S., Cho, H., Park, D.I., Kim, J.H., Choi, J.H., 2017, Case study on rock slope failures caused by geologic structures, The Journal of Engineering Geology, 27(4), 417-427 (in Korean with English abstract).

Park, C.H., 2007, The technical solution for various array methods in resistivity survey, The Journal of Engineering Geology, 17(1), 49-55 (in Korean with English abstract).

Song, Y.-S., Park, M.-E., Park, K.-H., 2006, Ages and evolutions of the volcanic rocks from Ulleung-do and Dok-do, Journal of Petrological Society of Korea, 15(2), 72-80 (in Korean with English abstract).

Yi, M.J., Kim, J.H., Son, J.S., 2011, Three-dimensional anisotropic inversion of resistivity tomography data in an abandoned mine area, Exploration Geophysics, 42, 7-17; Butsuri-Tansa, 2011, 64, 7-17; Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa, 2011, 14, 7-17.