

## 물리탐사를 이용한 독도 지반조사

김창렬<sup>1)</sup>, 박삼규<sup>1)</sup>, 방은석<sup>1)</sup>, 김복철<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한국지질자원연구원 지반안전연구부, [ryol1102@kigam.re.kr](mailto:ryol1102@kigam.re.kr)

<sup>2)</sup>한국지질자원연구원 지질기반정보연구부

## Geophysical Investigation of the Subsurface in the Dok-do Island

Changryol Kim<sup>1)</sup>, Sam-Gyu Park<sup>1)</sup>, Eun-Seok Bang<sup>1)</sup>, Bok-Chul Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Geotechnical Engineering Div., KIGAM

<sup>2)</sup>Geology & Geoinformation Div., KIGAM

**요약** : 독도의 지반의 지질구조 및 지반공학적 암반 특성 파악을 위하여 전기비저항 및 굴절법 탄성과 탐사를 실시하였다. 또한, 물리탐사자료의 해석을 위한 기초 자료로서 독도 구성 암석의 전기적/역학적 물성을 측정하였다. 서도에서의 전기비저항탐사 결과, 어민숙소에서 북서 방향으로 발달하고 있는 고각도 단층의 연장성이 확인되었으며, 단층상반이 상대적으로 아래로 이동한 정단층임이 조사되었다. 서도에서 굴절법 탄성과 탐사 결과, 탐사 지역 하류부를 구성하고 있는 층상 라필리 응회암은 상류부의 조면안산암 II보다 풍화 및 침식에 영향을 상당히 많이 받아 표토층을 포함한 풍화암 및 연암이 심도 10m 이상으로 깊게 발달하고 있다. 조사 지역 상류부의 풍화암 및 연암은 심도 약 7m 내외로 보다 얇게 발달하고 있으며, 심부에는 암석 강도가 상당한 수준의 보통암이 분포하고 있다. 암석 물성 측정 결과, 독도에 분포하는 암석은 풍화 및 침식에 오랜 기간 노출되어 전기비저항 또는 탄성과 속도 등의 물성 값의 범위가 매우 다양하고 넓게 나타난다. 암석의 강도는 조면암 및 조면안산암 계열의 암석이 가장 높고, 그 다음은 괴상응회각력암, 끝으로 응회암 계열이 가장 낮은 강도를 갖는 연약한 암석으로 조사되었다.

**주요어** : 전기비저항 탐사, 굴절법 탄성과 탐사, 암석 물성, 공극률, 정단층

**Abstract** : Electrical resistivity and seismic refraction surveys were conducted to investigate geologic structures and geotechnical characteristics of the subsurface in Dok-do island, along with rock physical properties. The resistivity results in Seo-do island show that the fault adjacent to the fisherman's shelter is a normal fault and extended towards the NW direction. Bedded Rapilli Tuff in the downstream was more severely influenced in depth by weathering and erosion than Trachy Andesite II in the upstream area. The physical properties of the rocks illustrate that Trachyte and Trachy Andesite are hardest, Massive Tuff Breccia is next, and Tuffs are the most soft rocks in Dok-do island.

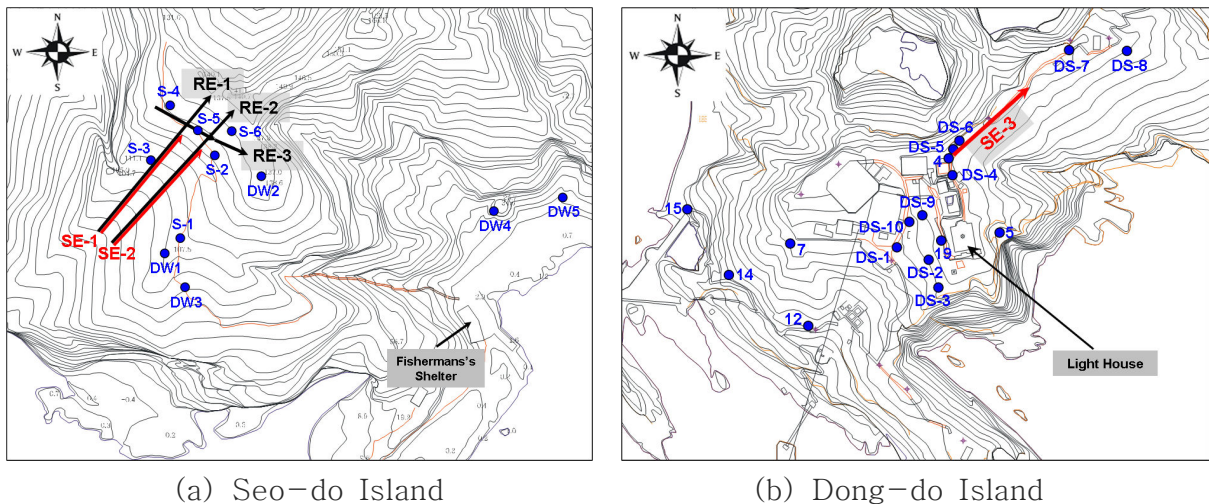
**Keywords** : electrical resistivity, seismic refraction, rock physical properties, porosity, normal fault

## 1. 서론

독도는 우리나라 영토의 동쪽 끝에 위치하는 소규모의 화산섬으로 동도와 서도로 구성되어 있다. 독도는 비록 규모는 작지만 동해의 형성 및 진화와 연관된 지체구조적 의미, 그리고 울릉도와 함께 동해의 알칼리 화산암류 성인 연구 등의 지질 과학적 중요성 외에 그 주변 해역이 갖고 있는 자원적, 생태적 가치 측면에서 무한한 잠재성과 의미를 갖고 있는 지역이다.

독도는 약 300-220만년 전(플라이오세에 해당)에 형성된 해양 기원의 화산체로 독도의 화산암류는 각각 3회에 걸친 용암분출과 화산쇄설성 분출 의해 형성된 조면안산암과 응회암층이 서로 교호하여 분포하고 있는 것이 특징이다. 독도에 분포하는 지층들은 하부로부터 괴상응회각력암, 조면안산암 I, 층상 라필리 응회암, 층상 회질 응회암, 조면안산암 II, 스코리아성 층상 라필리 응회암, 조면안산암 III, 각력암, 조면암 등 총 9개 화산암층 단위로 구성되어 있다. 독도에는 전반적으로 60° 이상의 고각을 이루고 있는 많은 정단층들이 분포하고 있으며, 대부분 암층들이 단층에 의해 절단되거나 변위되어 있고, 단층의 주향은 서북서 내지 북서 방향이 우세하게 발달하고 있다(한국지질자원연구원, 2006).

본 논문은 독도 지반조사의 일환으로 천부지질구조 및 지반 공학적 암반 특성 파악을 위해 수행한 지구물리탐사 결과의 일부이다. 본 연구에서는 물리탐사와 함께 암석 시료의 전기적/역학적 물성을 측정하여 탐사자료 해석의 기초 자료로 사용하였다. 물리탐사에 사용된 탐사기법은 전기비저항 탐사와 굴절법 탄성과 탐사의 2 종류를 사용하였다. 전기비저항 탐사는 단층 및 균열대 등의 천부 지질 구조 파악 및 연약대 조사, 그리고 굴절법 탄성과 탐사는 지반 공학적 암반 특성 파악에 역점을 두었다. 조사 지역에서의 물리탐사 측선 위치는 서도 및 동도 지역을 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 도시하였으며, 물성측정을 위한 암석 시료 채취 위치도 함께 나타내었다.



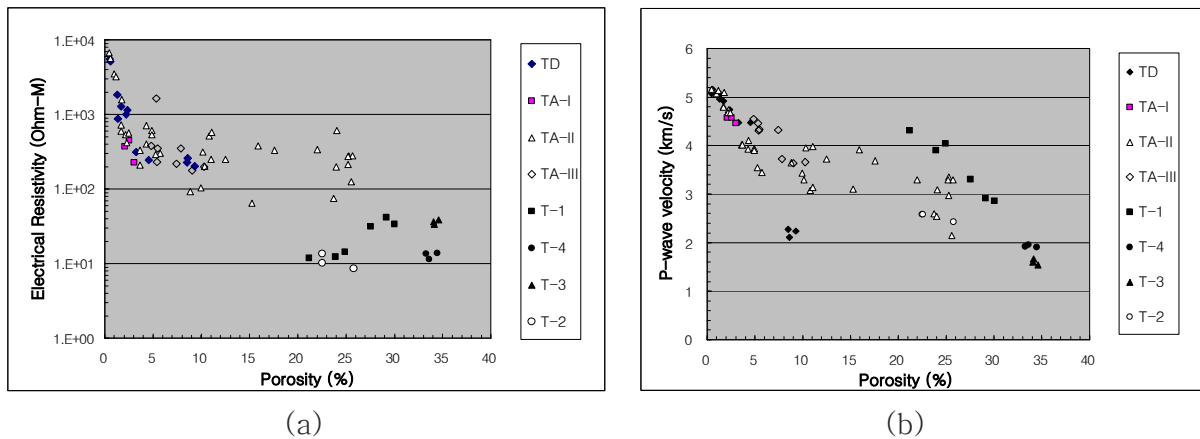
**Fig. 1.** Locations of geophysical survey lines and rock sample in (a) Seo-do Island and (b) Dong-do Island. Black lines: resistivity survey lines, red lines: refractive seismic survey lines, blue solid circles: rock sampling locations.

## 2. 암석 물성 측정

독도에서의 암석 시료는 8개 암층에서 총 28 개 지점에서 채취하였으며, 채취한 암석은

76개의 원통형 시료로 성형되어 공극률, 포화상태의 전기비저항 및 탄성과 P파의 속도를 측정하였다. 76개 암석 시료에 대한 전기비저항과 공극률 관계 및 탄성과 속도와 공극률 관계를 Fig. 2에 도시하였다.

Fig. 2에에서 공극률에 대한 전기비저항 및 탄성과 속도의 변화가 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 전체 암석 시료의 공극률은 약 0.5에서 35 %로 매우 범위가 넓으며, 일반적으로 공극률이 증가할수록 포화 상태 암석의 전기비저항 및 탄성과 속도가 감소하고 있다. 이는 공극률이 증가할수록 포화된 암석 내의 간극수의 양이 증가, 전기를 잘 통하게 하여 전기비저항이 감소하고 있음을 시사한다. 또한, 공극률이 증가함에 따라 암석의 탄성 계수는 감소하게 되며 이는 탄성과 속도의 감소를 야기한 결과이다.



**Fig. 2.** Rock physical properties of Dok-do Island: (a) electrical resistivity vs. porosity (b) p-wave velocity vs. porosity. TD: 조면암, TA-I: 조면안산암 I, TA-II: 조면안산암 II, TA-III: 조면안산암 III, T-1: 괴상 응회 각력암, T-2: 층상 라필리 응회암, T-3: 층상 회질 응회암, T-4: 스크리아성 층상 라필리 응회암.

독도에 분포하는 조면안산암 계열의 암석은 생성 시기에 차이가 있을 뿐 암석학적으로 거의 차이 없어 물성이 거의 같은 암종으로 간주할 수 있다. 조면안산암 계열 암석 자료는 전체 암석 시료의 65 %를 차지하며, 그 공극률 범위도 약 0.5-25%로 매우 넓고, 이에 따른 전기비저항 및 탄성과 속도 값의 범위도 각각 65-6,600 ohm-m, 2.2-5.2 km/s로 매우 넓게 분포하고 있다. 이는 독도 형성 시 분출한 용암이 지표에서 식어가는 과정이 암석 시료 위치별로 차이가 있고, 용암 속에서 기포가 빠져나오는 정도가 다양하여 각 암석 시료의 1차 공극이 서로 다르게 발달한 데 기인하고 있다고 해석할 수 있다. 또한, 채취된 암석 시료가 풍화암에서 신선한 암석까지 다양하고, 육안으로는 관찰되지 않는 매우 작은 미세한 규모의 파쇄면이 암석 시료 별로 다양하게 발달하여 이들에 기인한 2차적인 공극이 넓은 범위의 물성을 유발한 것으로도 해석할 수 있으며, 상기 설명한 두 가지 원인이 모두 복합적으로 작용했을 가능성도 존재한다.

독도에 분포하고 있는 암석층은 상기 기술한 용암분출에 의해 형성된 조면암 및 조면안산암 계열 암석 이외에 화산쇄설성 분출에 의해 형성된 응회암 계열 암층이 분포하고 있다. 물성 측정 결과를 보면, 화산쇄설성 분출에 의해 형성된 응회암 계열 암층의 물성은 상기 기술한 조면암 및 조면 안산암류의 물성과 상당히 대별된다. 이들 응회암 계열의 암층은 공극률이 약 21-35% 정도로 상당히 높고, 전기비저항은 20-35 ohm-m로 매우 작은 분포를 보인다. 괴상응회각력암을 제외한 응회암류의 탄성과 속도 값은 약

1.6-2.6 km/s로 상당히 작은 값을 보이는 암석 강도가 매우 연약한 물성을 갖는 암석으로 구성되어 있다.

암석 물성 조사 결과, 암석의 강도는 조면암 및 조면안산암류 암석이 가장 강도가 높으며, 그 다음이 괴상 응회 각력암, 층상 라필리 응회암 순서로 강도가 감소하여 층상 회질 응회암이 강도가 가장 낮은 암석으로 판단된다.

### 3. 전기비저항 탐사 결과

서도 지역에서의 전기비저항탐사는 어민숙소에 인접한 계곡을 따라 북서쪽으로 발달한 고각도 단층의 연장성을 조사하기 위하여 수행하였다. 그림 Fig. 3에 탐사 측선 RE-2에 대한 전기비저항탐사 자료의 2차원 해석 단면도를 도시하였다.

탐사 측선 중앙부 및 측선 상류부에 분포하고 있는 40 ohm-m 이하의 저비저항 이상대는 조면안산암 II 층 하부에 분포하고 있는 층상회질 응회암이 영상화된 것으로 암석 물성 측정 결과와 상당히 잘 일치하고 있다. 독도에 발달하고 단층대의 특징은 단층대의 폭이 매우 좁은 편이고, 현재는 단단하게 고화된 단층각력암 또는 단층비지의 혼합체로 산출되고 있는 것으로 조사되었다(한국지질자원연구원, 2006). 탐사 지역의 단층대도 단단하게 고화되어 있어 전기적으로 높은 전기비저항을 보일 것으로 판단되나 단층대의 폭이 매우 얇아 단층대 자체의 물리적 성질에 의한 전기비저항 이상대는 전기비저항 단면에서 나타나지 않은 것으로 판단된다.

탐사 측선 중앙부에 분포하고 있는 층상회질 응회암의 왼쪽에 상대적으로 고비저항으로 영상화된 암층은 층상 라필리 응회암으로 이 암층은 독도 암층의 지질학적인 층서에서 층상회질 응회암의 하부에 발달하고 있는 암층이다. 따라서 층상 라필리 응회암 층은 탐사 측선 RE-2에서는 가탐 심도가 충분히 깊지 않아 탐지되지 않았지만 층상회질 응회암층 하부에 발달하고 있다. 이러한 층서를 갖는 층상 라필리 응회암층이 지질단면도와 유사한 개념의 2차원 전기비저항 단면도 상에서 층상회질 응회암층의 하부층과 단절되고 수직적인 변위를 일으켜 나란히 인접하여 분포하고 있는 것은 일반적인 지질 층서에 어긋나는 경우이다. 이러한 현상을 설명할 수 있는 유일한 지질학적인 해석은 구조 지질학적으로 전기비저항 단면도에서 층상회질 응회암층과 층상 라필리 응회암층 사이에 단층면이 존재하고, 단층면의 오른쪽 암층인 단층 상반이 아래로 이동한 정단층의 경우이다. 따라서 전기비저항탐사 결과, 탐사 지역에서 발달하고 있는 단층에 의한 직접적인 전기비저항 이상대는 탐지되지 않았지만 탐사 자료의 구조 지질학적인 해석을 통해 단층이 발달하고 있는 것을 추론할 수 있다.

### 4. 굴절법 탄성파 탐사 결과

서도에서 탐사 측선 SE-1를 따라 실시한 굴절법 탄성파 탐사 결과를 Fig. 4에 탄성파 속도 단면으로 나타내었다. 탄성파 속도 단면에서 측선 왼쪽의 낮은 표고를 갖는 하류부의 표토층은 상류부에 비하여 낮은 속도대를 보이고 있다. 이 탄성파 저속도대는 조사 지역의 경사가 매우 급하여 상류부에서 흘러 내려온 암편 및 토사가 하류부 지역의 사면에 쌓여 표토층이 상대적으로 두터운 것에 기인한 것으로 판단된다. 또한 탐사 측선의 하류부는 암석 물성 측정 결과에서 나타난 바와 같이 암석의 강도가 매우 약한 층상회질 응회암 및 층상 라필리 응회암으로 구성되어 있고, 그 상부가 다른 암층보다 훨씬 더 풍화 및 침식에 영향을 받아 암석의 탄성 강도가 상당히 감소되어 낮은 탄성파 속도를 나타내는 것으로 해석된다. 반면에 측선 상류부의 표고가 높은 지역은 조면안산암 II로 구

성되어 있으며, 지표면에 암반 노두가 상대적으로 많이 드러나 있고 상대적으로 높은 탄성과 속도를 보이고 있다.

탄성과 속도 단면으로부터 조사 지역 구성 암층은 풍화암(700-1,200 m/s), 연암(1,200-1,900 m/s), 보통암(1,900-2,900 m/s) 등으로 심도에 따라 지반 공학적 암층 구분(건설부 표준품셈 기준)을 할 수 있다. 사면 하류부는 낙석 및 토사가 퇴적되어 있고 암반의 풍화가 사면 상단부보다 심한 것으로 판단된다. 하지만 측선 전체를 살펴보면 심부로 갈수록 암반의 탄성과 속도가 증가함에 따라 풍화암, 연암, 보통암의 강도를 보이는 암반이 분포하고 있으며, 측선 상류부에서 심부의 보통암은 암석 강도 측면에서 상당한 수준을 유지하고 있는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

독도 서도 경사면에서의 전기비저항탐사 결과, 서도 어민숙소 인접 계곡에서 북서 방향으로 발달하고 있는 고각도 단층의 연장성이 확인되었으며, 단층 상반이 상대적으로 아래로 이동한 정단층임이 조사되었다. 굴절법 탄성과 탐사 결과, 탐사 지역 하류부를 구성하고 있는 층상 라필리 응회암은 상류부의 조면안산암 II 보다 풍화 및 침식에 영향을 상당히 많이 받아 표토층이 상당히 두껍게 분포하고 있으며, 지반공학적인 암석 분류에 의한 풍화암 및 연암이 심도 10m 이상으로 깊게 발달하고 있다. 조사 지역 상류부의 풍화암 및 연암은 심도 약 7m 내외로 보다 얇게 발달하고 있으며, 심부에는 암석 강도가 상당한 수준의 보통암이 분포하고 있다.

암석 물성 측정 결과, 독도에 분포하는 암석은 풍화 및 침식에 오랜 기간 노출되어 전기비저항 또는 탄성과 속도 등의 물성 값의 범위가 매우 다양하고 넓게 나타난다. 암석의 강도는 조면암 및 조면안산암 계열의 암석이 가장 높은 견고한 암석으로 판단되며 그 다음은 괴상응회각력암, 끝으로 응회암 계열의 암석, 특히 층상회질 응회암이 가장 낮은 강도를 갖는 연약한 암석으로 조사되었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부의 지원과 한국지질자원연구원 전문연구사업인 ‘지하 정밀 영상화 융합기술 개발’ 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

한국지질자원연구원, 2006, 독도 균열발생에 따른 지반안정성 조사 연구, 해양수산부, 436 p.

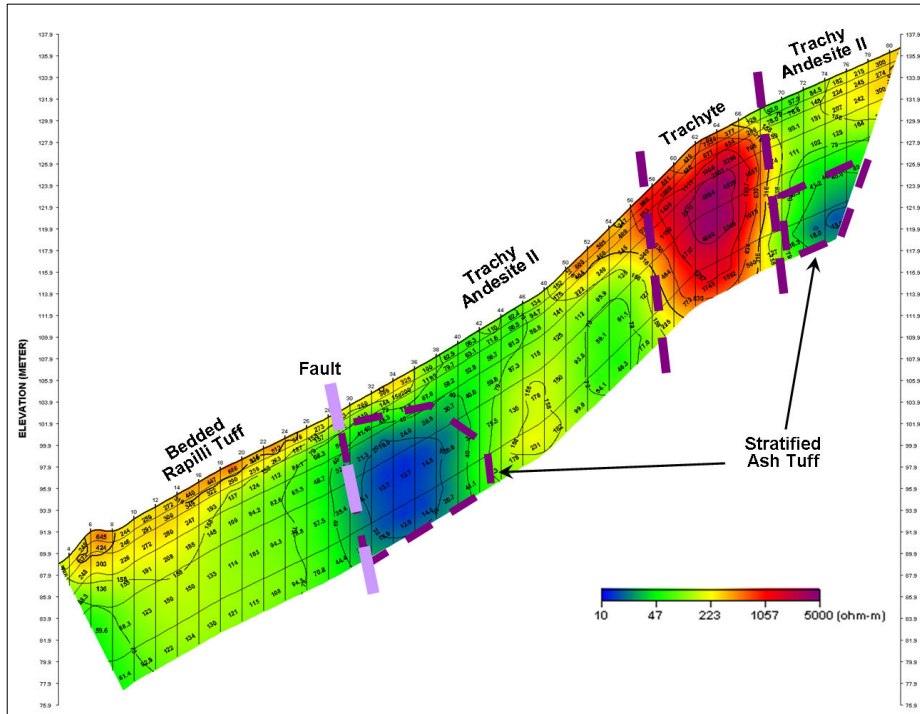


Fig. 3. 2-D resistivity data of the survey line RE-2.

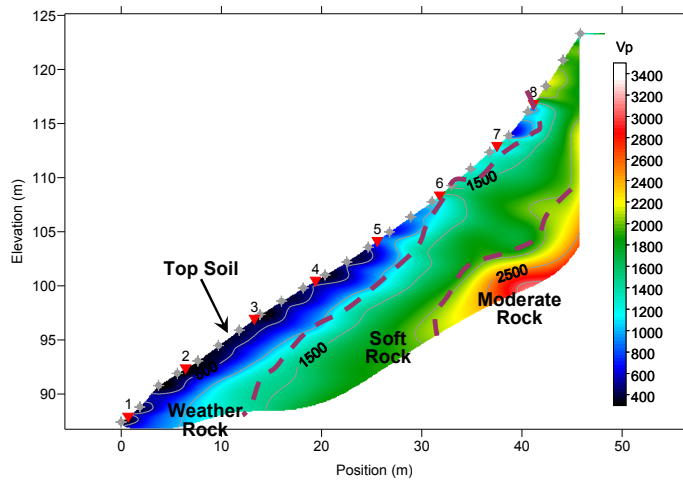


Fig. 4. 2-D refraction seismic data of the survey line SE-1.