

제주도 해안지역의 전기비저항 탐사

Electrical Surveys in coastal areas of the Cheju Island

이기화 (Kichwa Lee)* · 김형수 (Hyoung-Soo Kim)**

요 약 : 제주도 해안지역에서의 지하 비저항 구조를 밝혀내기 위한 목적으로 광지리 지역과 신평-신천리 지역에서 수직 및 수평 전기 탐사가 수행되었다. 일반적으로 이 지역들의 지전기적 구조는 수리지질학적인 구조와 가장 밀접하게 연관되어 있으며 지하의 비저항구조의 파악은 지하수 수급 문제의 해결을 위해서도 매우 중요하다. 해안 지역에서 얻어진 전기 탐사의 결과는 비록 지역적인 차이를 보이고 있기는 하지만 지하심부로 내려갈수록 그 비저항치가 감소하는 현상, 평균해수면 부위의 비저항치가 대부분 지하수에 의해 영향을 받는 지층의 비저항치를 나타내는 현상, 그리고 지하의 저 비저항대가 보고된 지하수위와 매우 좋은 상관성을 보인다는 점등의 특징을 지니고 있다. 본 전기 탐사 연구를 통해 제주지역 지층의 비저항을 다음과 같은 몇 개의 범주로 구분할 수 있다. 지하수에 포화되지 않은 지층의 비저항은 1000 ohm-m 이상이며 지하 담수에 의해 포화된 지층의 경우는 수백 ohm-m 정도로 간주된다. 또한 해수에 의해 포화된 지층의 비저항은 수십 ohm-m 정도의 값을 갖는다. 일반적으로 제주지역의 지하 비저항 분포는 지표의 지질보다는 주로 지하 지층의 수리지적 특성과 지하수의 성분 등에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

Abstract : Electrical soundings and mappings were conducted to elucidate the geoelectrical structures of the local areas of Cheju Island. The areas of the electrical surveys are coastal areas of Cheju Island, Gwagji, Sinpung-Sincheon. Generally, the geoelectrical structures of these areas are closely related with hydrogeological structures and it is very important to elucidate the geoelectrical structures for the water supply problems. Even though the results of electrical surveys in coastal areas of Cheju Island differ from place to place, there exists a general tendency of resistivity decrease with depth and the zone in the vicinity of mean sea level has low resistivity value. Also, there is good correlation between the low resistivity zone and the ground water distribution in the survey areas. A careful examination of the results of this study enabled resistivities of the rocks in Cheju Island to be divided in some categories. The resistivities of rocks unsaturated with ground water are greater than about 1000 ohm-m. The rocks saturated with fresh water have the resistivity value of about few hundreds ohm-m. Last, the rocks saturated with saline and/or brackish water have the resistivity value of about few tens ohm-m. The subsurface resistivity distribution of Cheju Island seems to be strongly dependent on the hydraulic characteristics of the rocks, and the amount and the salinity of the ground water in the rocks rather than the surface geology of the area.

서 론

제주도는 한반도 남단에 위치한 국내 최대의 섬으로 제 3기와 제 4기의 화산 활동에 의해서 형성된 것으로 알려진 화산도이다 (Won, 1976; Lee, 1982; Lee *et al.*, 1988). 제주도는 동경 126도 9분 47초부터 126도 56분 57초, 북위 33도 11분 27초부터 33도 33분 50초에 걸쳐서 위치하며 (Figure 1) 섬의 형태는 N80E 방향의 길이 74 km 장축과 N20W 방

향의 길이 32 km 단축을 지닌 타원형체로 섬의 중심부에는 화산 분화구인 한라산이 해발 1950 m 높이로 솟아있다.

1960년도 중반부터 제주도에서는 지하수 개발을 주목적으로 전기탐사가 수행되기 시작했으며 특히, 1970년대 이후, 농촌진흥공사 (현 농어촌진흥공사)를 비롯한 여러 기관들이 제주도 지하수와 관련하여 많은 지전기탐사 연구를 수행하였다 (Nahm and Kim, 1965; KMSC, 1965; Nahm, 1966; KMSC, 1967; Lee *et al.*, 1968; Cho *et al.*, 1988; KADC, 1989; Um, 1991; Cheon, 1992; Lee and Kim, 1993). 이 중, Lee and Kim (1993)의 탐사는 제주도에서 행해진 전기 비저항 탐사중 가장 깊은 심도까지의 비저항 분포를 보여주는 탐사로 이 연구를 통해 제주도의 개괄적인 지하수 분포가 밝혀졌다. Lee and Kim (1993)의 심부 전기 탐사 결과에서 제주

*서울대학교 지질학과 (Department of Geological Sciences, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea)

**한국해양연구소 극지센터 (Polar Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

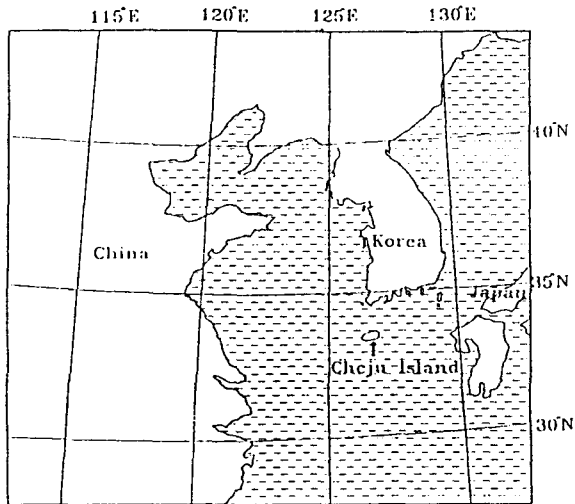


Figure 1. Map showing location of Cheju Island, Korea.

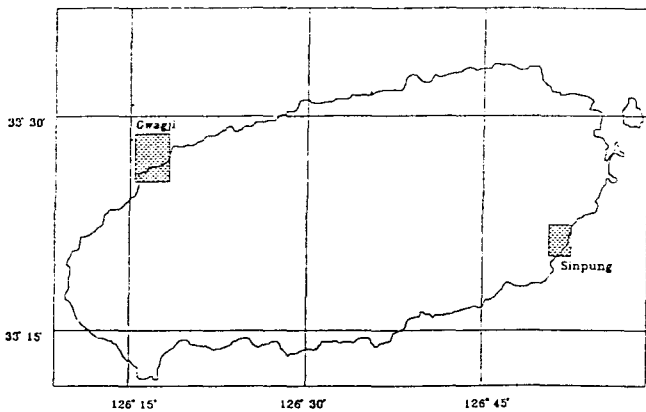


Figure 2. Map showing study areas in Cheju Island.

도의 기저지하수와 연관시킬 수 있는 낮은 비저항대가 지표 부근의 높은 비저항층 하부에 광범위하게 존재함이 밝혀졌다. 또한 제주도의 부존 가능한 지하수량을, 제주도 관정의 수위 자료를 분석한 결과와 Ghyben-Herzberg 이론을 기초로 하여, 약 200 내지 300 km³ 에 달할 것으로 Lee (1992)는 추정하였다.

본 연구는 1989년에서 1991년에 걸쳐 제주도의 해안 지역에서 수행한 전기 비저항 탐사결과를 분석하여 제주도 해안 지역 지하수의 부존 상태를 규명하는데 그 목적을 두고 있다. 전기 비저항 탐사가 수행된 지역은 제주도 해안의 북제주군 애월읍 광지리 지역과 남제주군 성산읍 신흥-신천리 지역이다 (Figure 2). 이들 연구 지역에서 수직 탐사와 수평 탐사가 수행되었으며 사용된 장비는 ABEM사의 SAS 300B 전기 탐사기이며 수직 탐사의 경우는 Schlumberger 배열법이, 수평 탐사의 경우는 Wenner 배열법이 사용되었다. Schlumberger 배열의 수직 탐사는 1차원 층상구조 대화식 해석법 (Kim and Lee, 1993)을 이용하여 그 정량적인 해석이 이루어졌으며 Wenner배열을 이용한 수평탐사는 정성적인 해석이 수행되었다.

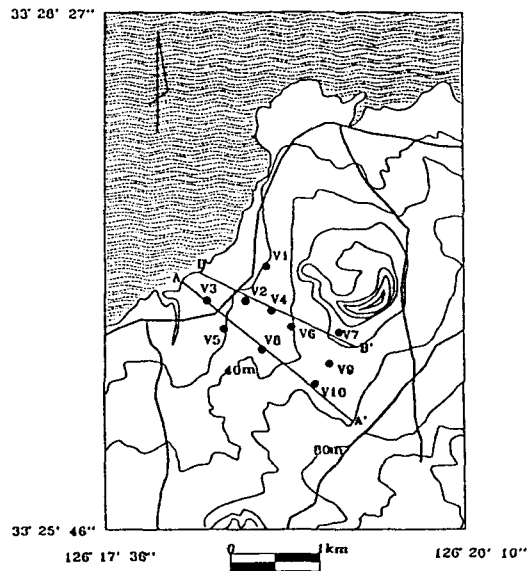


Figure 3. Map showing locations of vertical electrical soundings and profiles of geoelectric sections in Gwagji area.

탐사 및 해석

광지 지역

광지 지역은 제주의 북서부에 위치하고 있다. 이 지역은 지구물리 탐사를 수행하기에는 지형적으로 다소 기복이 있으나 제주도 해안지역에 존재하는 용천수층 1일 지하수 용출량이 최대인 지역이다 (KADC, 1989).

광지에서는 총 10 점의 Schlumberger 수직 탐사와 3개 축선의 Wenner 수평 탐사가 수행되었다. Schlumberger 수직 탐사의 위치도는 Figure 3에 보여지며 관측치와 그 해석 결과는 Figure 4에 주어져 있다. 또한 이 지역의 수평 탐사의 축선 위치도는 농어촌진흥공사(KADC)에서 시추한 광지지역의 6개 관정 (D-119, D-14, D-141, 87원예-남읍, 86원예-애월, 86원예-광지)의 위치와 함께 Figure 5에 보여진다.

대부분의 이 지역 수직 탐사 결과는 지표의 낮은 비저항을 갖는 얇은 표토층 하부에 상대적으로 높은 값을 보이는 비저항층이 존재하며 그 하부에 다시 낮은 비저항층이 존재하는 형태를 보여주고있다. 농어촌진흥공사의 관정 자료는 이 지역의 지하수위가 평균해수면으로 부터 3 내지 14 m 높이에 형성되어있는 것으로 보고되어있으며 이들 관정의 시추 자료는, 이 지역 지하 지질이 장석감람석현무암(Feldspar Olivine Basalt, FOB)과 화성쇄설성 (pyroclastic) 암석들이 서로 교호하는 형태로 되어있으며 장석감람석현무암은 질리가 매우 잘 발달되어있다고 보고하고 있다. 이러한 지하 지질을 참조해 볼 때 이 지역의 지하수 대수층은 질리가 발달된 장석감람석현무암과 화성쇄설성 암석으로 형성되어져 있음을 알 수 있다.

수직 탐사결과 상대적으로 높은 비저항층 하부에 나타나는 낮은 비저항층은 지하 대수층을 지시하고 있는 것이 확실

제주도 해안지역의 전기비저항 탐사

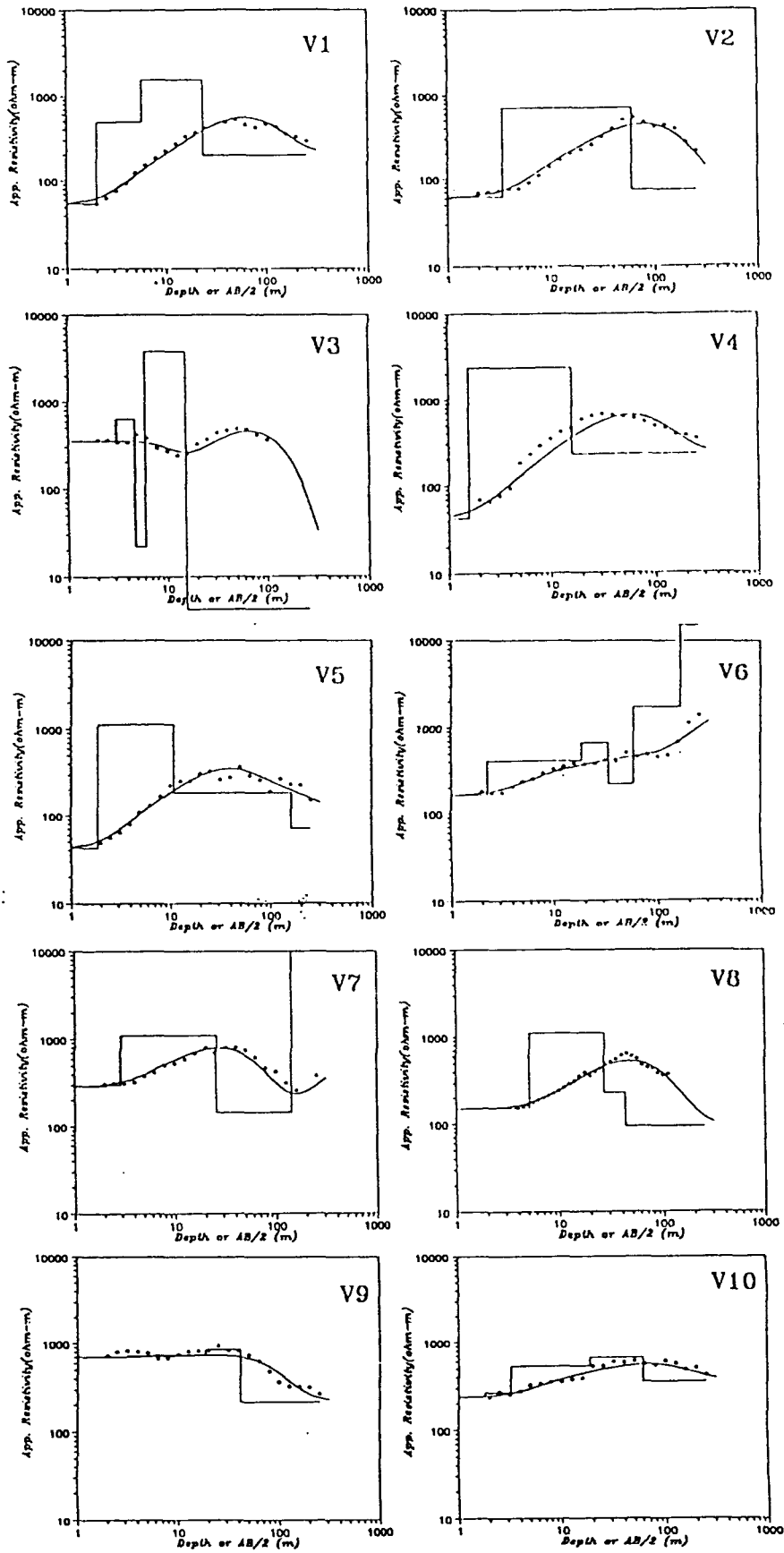


Figure 4. Resistivity sounding curves and interpretations in Gwagji area.(point = observed value, curve = calculated value)

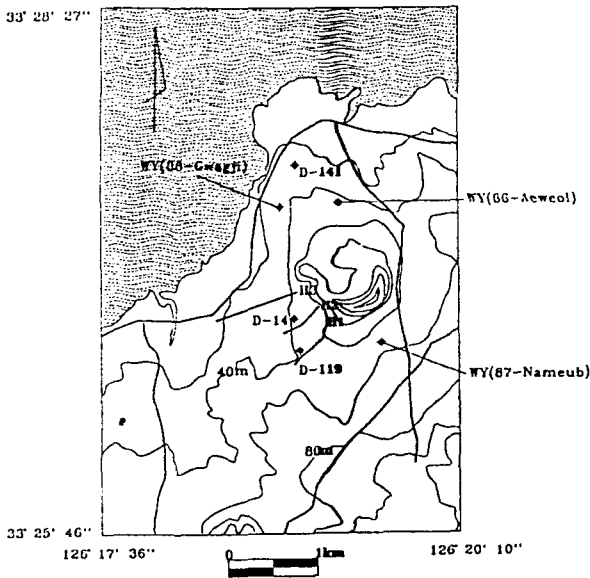


Figure 5. Map showing locations of public wells and profiles of horizontal electrical mapping in Gwagji area.

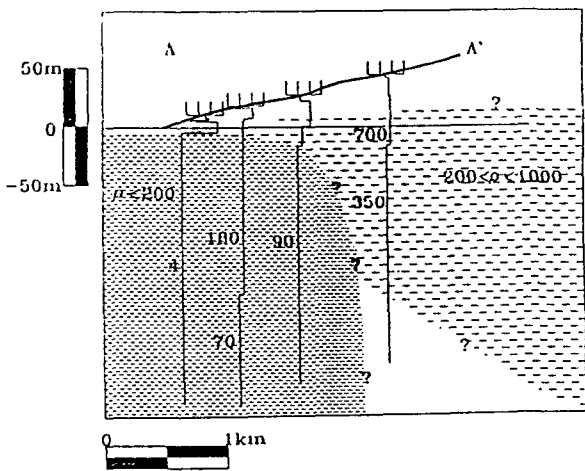


Figure 6. Geoelectric section of profile AA' in Gwagji area.

하며 이 낮은 비저항층은 관정의 시추 자료로부터 추정되는 지하 대수층과 매우 잘 부합된다. 수직 탐사자료의 결과는 V7과 V6을 제외하고는 평균 해수면부터 그 이하 상당한 깊이까지 모두 500 ohm-m 보다 낮은 비저항치의 층을 보여주고 있으며 이 저비저항대가 이 지역의 지하 대수층임을 시사하고 있다. V7과 V6의 지하심부의 상대적으로 높은 비저항층은 이 지점의 지하가 불투수 지층으로 형성되어 있음을 시사하며 이러한 결과는 이 탐사 지점에 인접한 과오름(기생화산)의 영향으로 사료된다. 또한 가장 해변에 인접한 V3 지하의 매우 낮은 전기 비저항층은 이 탐사지점 지하가 해수의 영향을 받고 있음을 보여주고 있다. Figure 6과 Figure 7은 해석용 축선 AA'와 BB'를 따라 작성된 지하 비저항 분포의 개괄도이다. 이 해석용 축선들은 Figure 3에 수직 탐사지점과

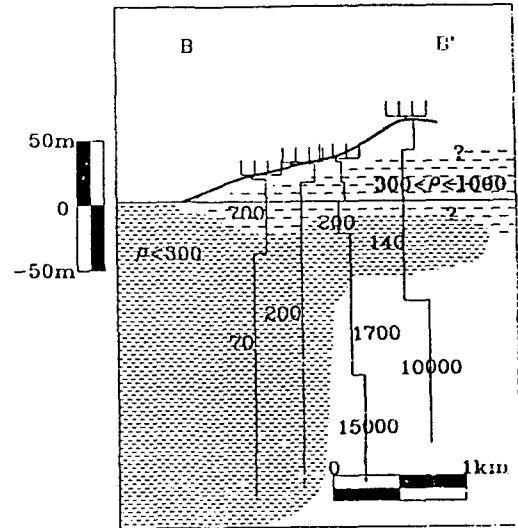


Figure 7. Geoelectric section of profile BB' in Gwagji area.

함께 주어졌다. 이러한 일차원 수직 탐사결과를 기초로한 2차원적 해석은 지하의 실제적인 2차원 구조를 정확하게 보여주지는 못하지만 매우 의미 있는 해석방법임이 기존의 수치계산 연구결과 알려져있다 (Beard and Morgan, 1991; Yoon, 1993). 축선 AA'의 경우 200 ohm-m 보다 낮은 비저항층이 해변 쪽에 위치하고 있음을 보여준다. 이 200 ohm-m 이하의 낮은 비저항층은 이 지역에 형성된 해수의 영향권을 보여주고 있다. 이러한 현상은 축선 BB'에서도 역시 관측되고 있으며 축선 BB'의 V6과 V7의 지하의 매우 높은 비저항층이 존재하며 이 지점들은 지하수를 함유할 수 없는 불투수성 물질로 형성되어 있음을 보여준다.

수평 탐사는 Wenner배열을 사용하여 이루어졌다. 이때 각 전극간의 간격은 60 m 이며 탐사의 중심점을 20 m 씩 이동시키면서 탐사가 수행되었다. Figure 8은 광지에서 수행된 수평 탐사의 탐사 결과를 보여주고있다. 이들 결과는 겉보기 비저항의 불규칙한 변화양상을 보여주고 있으며 이것은 이 탐사지역의 기복이나 불균질한 지층에 기인한다고 믿어진다. 그러나 이러한 복잡한 변화 형태를 보이고 있음에도 불구하고 축선 H3의 겉보기 비저항치는 H1이나 H2의 겉보기 비저항치에 비해 약 200 ohm-m 정도의 낮은 평균치를 보여주고 있으며 이는 지하의 비저항이 해안 쪽으로 가면서 해수의 영향으로 일반적으로 낮아지는 경향을 뚜렷이 보여주고 있다.

광지 지역에서의 수직 탐사 해석 결과와 수평 탐사 결과치로부터 이 지역 지질의 비저항치에 대한 잠정적 평가는 다음과 같이 이루어졌다. 1000 ohm-m 이상의 비저항을 보이는 암석은 장석암석현무암 또는 화성쇄설성 암석이 지하수에 의해 포화되어 있지 않는 경우의 값이며 그 이하의 수백 ohm-m의 값을 보이는 지층은 이들 층이 담수층에 의해 포화되어 있는 경우의 비저항치로 여겨진다. 마지막으로 100 ohm-m 보다 낮은 비저항의 값을 보이는 층은 해수에 의해 영향을 받고 있는 지층으로 생각된다.

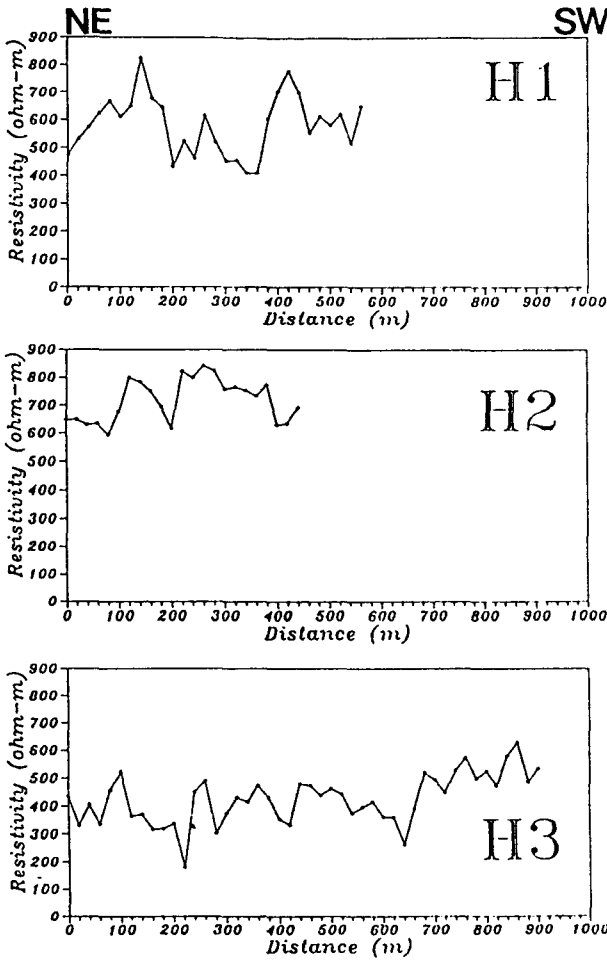


Figure 8. Horizontal resistivity profiles in Gwagji area.

신평-신천 지역

신평-신천 지역은 제주도 남동부에 위치한 해안지역으로 이 지역 지표는 모두 표선리 현무암으로 덮여있으며 지형은 거의 평탄한 양상을 지니고 있다. 표선리 현무암은 제주도에 동부와 서부에 걸쳐 가장 넓게 분포하는 암석이며 낮은 점성을 지닌 이유로 용암동굴을 형성하거나 넓고 평탄한 용암 대지를 형성하는 특징을 지니고 있다. 이 표선리 현무암의 실험실에 관측된 공극률의 평균은 23%이며 전기비저항의 평균은 1016.6 ohm-m로 알려져있다 (Jeong, 1993). 그러나 이들 물성치는 매우 큰 표준편차를 가지고 있으며 실제 야외 상태에서의 이들 암석의 물성은 실험실에서 측정된 물성치와는 상당한 차이를 보일 것으로 생각된다.

총 11점의 Schlumberger 수직 탐사와 2개 측선의 Wenner 수평 탐사가 이 지역에서 수행되었다. 수직 탐사의 탐사 위치도는 Figure 9에 주어졌으며 수직 탐사의 결과는 Figure 10에 보여진다. 비록 탐사가 수행된 본 지역에는 지하 지질의 정보를 직접적으로 사용할 수 있는 관정이나 시추공이 존재하지 않으나 탐사 지점의 중앙으로부터 약 서쪽으로 4 km 떨어진 지점에 관정 D-31과 W-12가 위치하고 있다. 이 두 관정의 시추 자료에는 이들 관정의 지하수위가 평균해수

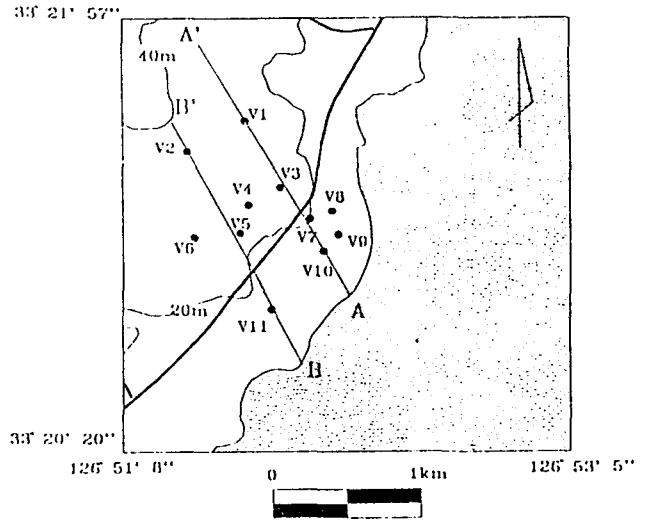


Figure 9. Map showing locations of vertical electrical soundings and profiles of geoelectric sections in Sinpung Sincheon area.

면으로부터 약 10 m 높이에 형성되어 있으며 지하의 지질은 주로 표선리 현무암 (장석감람석현무암으로 표기되어 있음), 박층의 이암층 그리고 화성쇄설성암들로 구성되어 있다고 보고 되어있다.

이 지역의 수직 탐사들 결과에서 가장 특징적인 점은 지표 부위에 상대적으로 높은 비저항층이 존재하는데 반해 20 ohm-m 이하의 매우 낮은 비저항층이 심부에 매우 뚜렷하게 존재한다는 것이다. 이 매우 낮은 비저항층은 해수의 침입양상을 확연하게 보여주는 것이다. 2차원적인 해석 단면인 Figure 11와 Figure 12에는 이러한 현상이 더욱 뚜렷하게 드러나고 있다. 이러한 해수의 침입현상은 이 지역 지하의 표선리 현무암에 공극이나 절리 또는 지하동굴들이 발달하여 해수의 침입을 매우 용이하게 하고 있는 것으로 생각된다. 이 탐사 지역의 지층중 비저항치가 수십 ohm-m 이하인 층은 해수에 의한 침투를 받은 지층으로 생각되며 그 이상으로 대략 1000 ohm-m 까지의 지층은 담수지하수로 포화되었다고 생각된다.

수평 탐사의 탐사도는 Figure 13에 보여진다. 이 지역의 수평 탐사는 Wenner 배열을 사용하였으며 전극 간격은 측선 H1의 경우 30 m, 측선 H2의 경우는 60 m로 설정되었으며 탐사의 중심점 이동은 측선 H1과 측선 H2 모두 동일하게 20 m 씩으로 설정되어 탐사가 수행되었다. 이 지역의 수평 탐사의 결과는 Figure 14에 주어졌 있다. 수평탐사의 결과는 매우 불규칙한 겹보기 비저항치를 보이고 있으며 그 값들이 광지 지역에서의 겹보기 비저항치에 비해 현저히 높은 것을 보여주고 있다. 이러한 원인은 이 지역의 지표가 광지 지역과는 달리 거의 풍화를 받지 않은 매우 치밀한 상태의 표선리 현무암으로 이루어져 있고 이러한 지표 현무암의 높은 비저항이 수평탐사의 겹보기 비저항치에 지하 심부의 해수보다 더 크게 영향을 미치고 있음을 보여준다. 또한 상대적으로

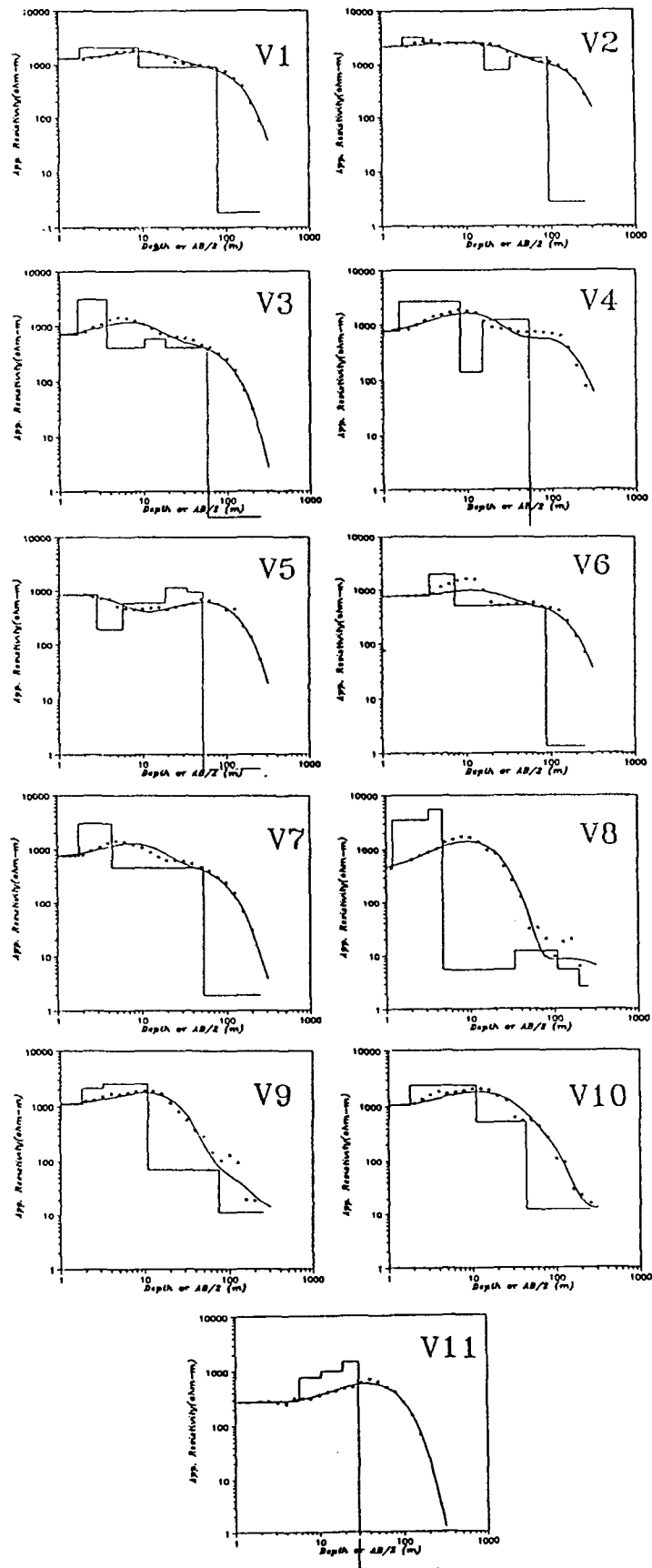


Figure 10. Resistivity Sounding curves and interpretations in Sinpung Sincheon area.(point=observed value, curve= calculated value)

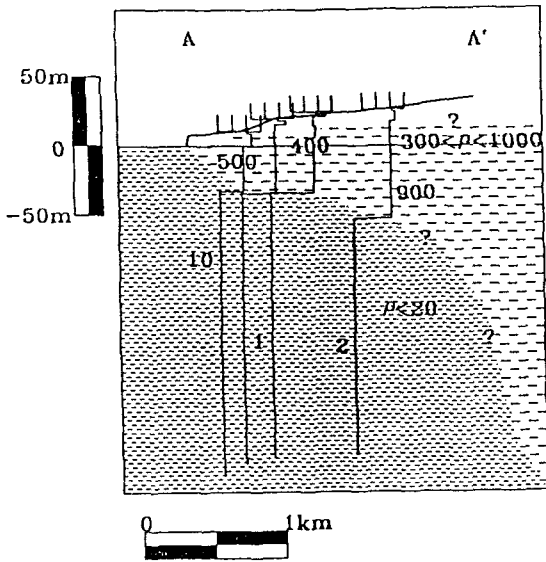


Figure 11. Geoelectric section of profile AA' in Sinpung-Sincheon area.

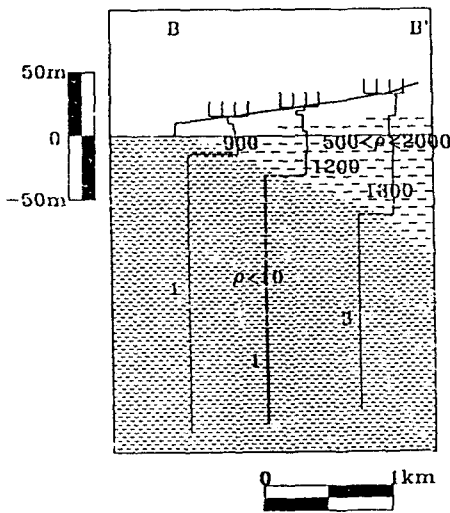


Figure 12. Geoelectric section of profile BB' in Sinpung-Sincheon area.

로 해안 쪽에 위치한 측선 H2의 전기비저항이 측선 H1의 전기비저항치에 비해 상대적으로 높게 나타나고 있다. 이러한 현상의 원인은 측선 H2 지하에 존재하는 소규모 공동들과 해안을 따라 발달되어있는 절벽의 영향등으로 추정된다. 또한 측선 H1 과 측선 H2의 150 m 지점 근처부터 500 m 지점부위 까지에 나타나는 상대적으로 높은 비저항치는 이 지점 지하의 공동이나 또는 지표의 풍화되지 않고 드러나 있는 현무암의 분포 양상과 일치되고 있다.

신천-신평 지역의 지하 비저항 분포는 지표부근의 매우 높은 비저항층과 그 하부의 매우 낮은 비저항층으로 확연하게 구분되는 특성을 보여주고 있으며 이는 지하가 해수의 영향을 직접적으로 받는 경우와 그렇지 않은 경우로 대분되고 있

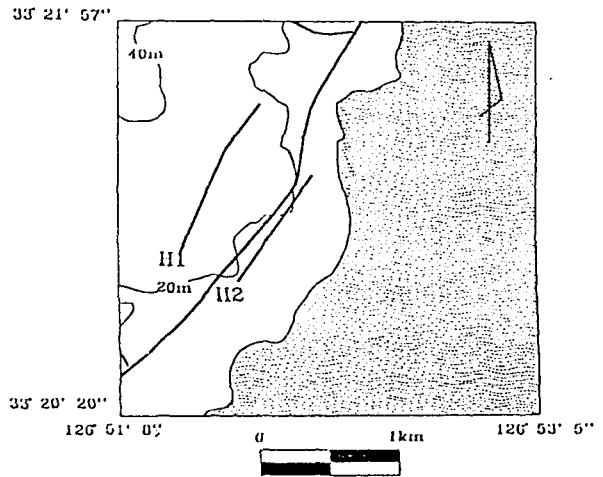


Figure 13. Map showing locations of profiles of horizontal electrical mapping in Sinpung-Sincheon area.

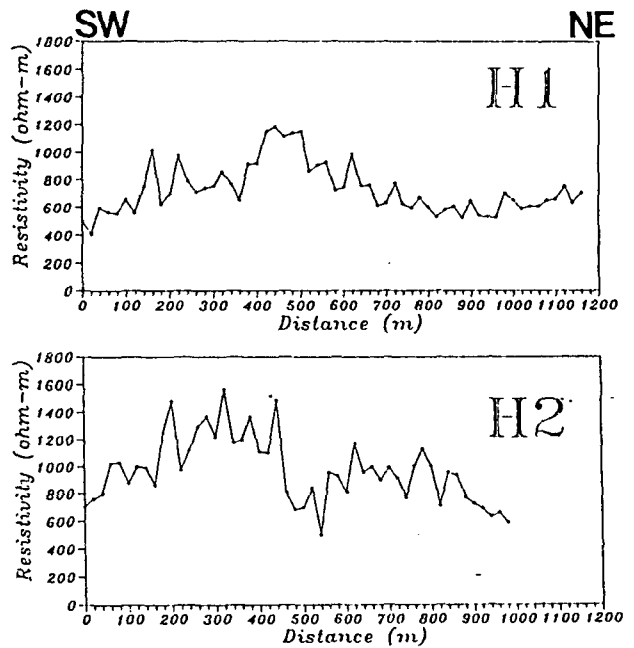


Figure 14. Horizontal resistivity profiles in Sinpung-Sincheon area.

음을 보여주며 상대적으로 담수를 지니고 있는 대수층의 발달은 미약하다고 여겨진다. 특히 이 지역의 지층 중 그 비저항이 20 ohm-m 이하의 매우 낮은 비저항치를 갖는 지층은 해수의 침입이 상대적으로 광지 지역보다 매우 심각함을 반영한다.

결론

제주도 해안 지역에서 행해진 전기 탐사의 결과는 탐사 지역에 따라 다른 전기비저항 구조를 보여준다. 그러나 광지와 신천-신평 해안 지역에서 행해진 전기 탐사의 결과는 이들

지역의 전기 비저항구조가 크게 3개의 전형적인 층으로 나누어질 수 있음을 시사한다. 그 첫번째 층은 상대적으로 높은 비저항을 보이는 지표부위의 풍화되지 않은 암층이나 또는 지하 심부에 존재하지만 지하수를 포함하지 않는 불투수성 암층이다. 두번째 층은 담수에 의해 포화된 것으로 간주되는 암층이며 마지막 층은 해수에 의해 포화된 층이다. 그러나 두번째 층과 세번째 층의 경계는 그 층의 구분이 명확하게 나타난다기 보다는 점이적인 변화가 이루어지고 있는 것으로 추정된다. 또한 광지 지역에서는 지표에 발달한 토양층의 영향이 매우 얇은 낮은 비저항층으로 나타나있으며 상대적으로 토양층의 존재가 빈약한 신천-신평지역은 지표부위가 매우 높은 비저항을 보이고 있다.

탐사 지역간의 지역적인 전기 비저항구조의 차이에도 불구하고 제주도 해안 지역의 전기비저항구조는 지하심부로 내려갈 수록 그 비저항치가 감소하는 특징을 보이고 있고 이 낮은 비저항층이 보고된 지하수면과 잘 일치되어 시작되며 상당한 깊이까지 연장됨을 보여준다. 이는 낮은 비저항의 대수층이 대체로 Ghyben-Herzberg 관계를 유지하고 있음을 시사한다.

본 연구 지역의 전기탐사 결과는, 지하수에 의해 포화되지 않은 층의 비저항치는 1000 ohm-m 이상을, 지하담수에 의해 포화된 암층의 비저항치는 수백 ohm-m 정도를, 그리고 해수에 의해 포화된 지층의 비저항은 수십 ohm-m 정도의 값을 가짐을 보여준다. 그러나 해수와 담수의 접촉은 점이적이며 이 접촉지역의 비저항값도 수백 ohm-m에서 수십 ohm-m까지 점이적으로 변한다고 생각된다. 또한 제주도 지역의 전기 비저항 값은 지표지질이나 지층자체의 암석성분보다는 수리적 특성, 즉 지하수의 성분이나 포화정도등에 의해 더 크게 좌우되는 것으로 보이며 제주도의 해안지역의 지하수 분포는 주로 해수와 담수의 상호 관계와 지역적인 수리지질 특성에 의해 결정된다고 사료된다. 또한 앞으로 제주도 지역에서 비저항탐사의 정확한 수리지질학적 해석을 위해서는 관정 또는 시추자료와 암석의 물성측정 자료등과 연관하여 연구함이 필요하다.

사 사

본 연구는 과학재단의 지원 (과제 89-06-16-04)에 의하여 수행되었으며 연구비를 지원해준 과학재단에게 감사한다.

참고문헌

Beard, L. P. and Morgan, F. D., 1991, Assessment of 2-D resistivity structures using 1-D inversion, *Geophysics*, v. 56, p. 874-883.
 Cheon, K. H., 1992, Dipole-dipole array geoelectric surveys for

groundwater detection in Jeju Island, M. Sc. Thesis, Seoul Nat'l Univ., Korea.
 Cho, J. D., Koo, S. B., Seong, N. H. and Seong, G. S., 1988, A study on seawater affection zone in the eastern part of Cheju area (2), Korea Inst. of Energy and Resources Research Report KR-88-1B, p. 315-348.
 Jeong, H. J., 1993, The physical properties of volcanic rocks distributed over Cheju Island, M. Thesis, Seoul, Nat'l Univ., Korea.
 KADC, 1989, Reports on long-term planning of ground-water development on Jeju Island, Agricultural Development Corporation, Korea.
 Kim, H-S and Lee, K., 1993, Interactive interpretation methods for one-dimensional Schlumberger electrical sounding and Magnetotelluric data, *J. geol. Soc. Korea*, v. 29, p. 493-506.
 KMSC (Korea Minerals Survey Company), 1965, Geology and ground-water resources of Cheju-Do, Korea, Ministry of Construction.
 KMSC, 1967, Geology and ground-water resources of the northeastern parts of Cheju Island, Korea, Ministry of Construction.
 Lee, D. H., Kim, C. M., Han, D. R. and Kim, C. K., 1968, The report of electric exploration on groundwater of Cheju Island, *Geol. Sur. of Korea., Report of Geophysical Exploration*, v. 2., p. 65-91.
 Lee, D. Y., Yun, S. K., Kim, J. Y. and Kim, Y. J., 1988, Quaternary geology of the Jeju Island, Korea Inst. Energy and Resources Rpt., KR-87-29, p. 233-278.
 Lee, K., 1992, On the hydrodynamic balance of fresh and salts waters in the Cheju Island, *J. Geol. Soc. Korea*, v. 28, p. 649-664.
 Lee, K. and Kim, H., 1993, Deep electrical sounding in the Cheju Island, *J. geol. Soc. Korea*, v. 29, p. 30-38.
 Lee, M. W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju Volcanic Island, Korea, *Tohoku Univ., Sci. Rep., Ser.*, 3, 13 p.
 Nahm, G. Y. , 1966, Geology and groundwater resources of volcanic island, Cheju-Do, *Geol. Sur. of Korea, Geology and Ground-water Resources*, p.109-115.
 Nahm, G. Y. and Kim, D. S., 1965, Geology and Groundwater resources of west-eastern part of Cheju Island. *Geol. Sur. of Korea, Geology and Ground-water Resources*, p.33-64.
 Um, C. R., 1991, A geoelectrical survey in Gwagjiri and Sincheonri of Cheju Island, M. Sc. Thesis, Seoul Nat'l Univ., Korea.
 Won, J. K., 1976, Study of petrochemistry of volcanic rocks in Jeju Island, *J. geol. Soc. Korea*, v. 12, p. 207-220.
 Yoon, J. R., 1993, A study on characteristics of the electrode configurations for 2-D underground structure, M. Sc. Thesis, Seoul Nat'l Univ., Korea.