

# 제주도 지하수 문제에서 물리탐사의 역할

이상규 (한국자원연구소)

## 요 약

제주도의 지하수는 상위지하수, 기저지하수, 연안용출수, 심부지하수 등으로 분류될 수 있다. 이들을 효율적으로 활용하고 또 보존, 관리하기 위하여는 탐사가 선행되어야 한다. 구성물질의 물성대비를 탐사의 원리로 하는 물리탐사는 간접적 정보를 제공한다는 점에서 조사단계에서 흔히 간과되어 왔으나, 지표 상부에서 지하 심부까지의 정보를 제공할 수 있는 유일한 탐사방법이라는 점에서 그 중요성이 재인식되어야 한다. 물리탐사는 비파괴적인 탐사방법일 뿐 아니라 넓은 탐사범위를 상대적으로 짧은 기간에 탐사할 수 있는 경제성을 갖고 있기 때문에 결과적으로 조사단계에서 소요되는 총비용을 현저히 줄일 수 있기 때문이다. 필자는 여기서, 제주도의 지하수문제에 대하여 물리탐사가 담당할 수 있는 역할에 대하여 최근의 탐사실례들을 통하여 기술하고자 한다. 이들 중에는 '복합 물리탐사방법에 의한 지하수탐사', '항공원격탐사에 의한 해안 용출수 탐사', '물리탐사에 의한 해수침입영역 조사' 그리고 지하수 부존과 밀접한 관련이 있는 '지질구조선 탐사' 등이 포함되어 있다. 후속의 지질조사와 시추조사에서 얻은 직접적 정보들이 물리탐사에 의한 해석에 feedback 될 수 있는 조사체계를 갖춘다면 향후 제주도의 지하수와 관련한 문제에 물리탐사가 보다 효과적으로 사용될 수 있을 것임을 강조한다.

## 1. 복합 물리탐사에 의한 지하수탐사

축적 1:25,000 지형도의 귀일도폭에 해당하는 제주도 북제주군 애월읍의 수산리 및 장전리 일원에서 지하수탐사를 목적으로 하는 물리탐사를 수행한(정승환, 조진동, 이상규 외, 1992) 바 있다. 사용된 물리탐사는 쌍극자배열 전기비저항탐사, 솔럼버저배열의 전기비저항 수직탐사 및 TEM 수직탐사 등 3종의 전기, 전자탐사방법들이었다. 이들 물리탐사의 궁극적 목표는 함수대와 관련된 저비저항대의 지하분포를 밝히고 지하수 부존을 확인하기 위한 시추위치를 추천하고자 함이었다.

### 쌍극자배열 전기비저항탐사

쌍극자배열 전기비저항탐사는 측선 하부 절단면 상에서의 2차원적 전기비저항 분포를 정량적으로 확인하기 위하여 수행되었다. 전극 간의 단위길이( $a$ )는 50m로 하였으며 전류전극과 전위전극간의 최대거리( $na$ )는  $n$ 을 10으로 함으로써, 500m가 되게하여 가탐심도를 250m 내외로 기대하였다. 탐사자료에 대한 2차원 자동역산을 수행하고 측선 하부 절단면 상의 2차원 진비저항 분포를 확인하였다. 수산리 지역의 대체로 평행한 두개의

남북측선 하부의 진비저항분포 양상은 두 측선 간 거리가 약 1.2Km 떨어져 있음에도 불구하고 상호 유사한 양상을 보이며 양측선 중앙부에서의 저비저항대가 동서주향을 갖고 있음을 나타낸다. 가상 구조선의 남측이 북측에 비하여 상대적으로 상위에 있는 것으로 보이며 양 측선의 북측 최하단의 저비저항대는 기저지하수일 가능성이 있다. 장전리 지역에서 상호 교차하는 두개의 측선 하부 진비저항분포는 상부에 기복이 있는 저비저항층이 측선 전반에 분포하며 그 하부에 고비저항층이 광범위하게 분포한다. 양 측선의 중앙부에 천부까지 발달한 고비저항층은 그 중앙에서 저비저항대에 의하여 단절되고 있다. 본 저비저항대는 북서-남동 주향의 소규모 구조선 또는 고립된 천부 고비저항대일 수 있다.

### 수직 비저항탐사

탐사구역 전역에 고루 분포하도록 배치한 11개 측정점에서 슬럼버저 전극배열에 의한 수직비저항탐사를 전류전극 간격의 반 (즉, AB/2)의 길이를 350 - 500m 까지 전개하여 수행하고 탐사결과를 7개 층으로 강제 분층하는 1차원 자동역산을 수행한 후, 이를 다시 (1) 10ohm.m 이하 (2) 10 - 35 ohm.m (3) 35 - 100 ohm.m (4) 100 - 350 ohm.m (5) 350 - 1000 ohm.m (6) 1000 - 3500 ohm.m (7) 3500 ohm.m 이상 등 7등급으로 구분하는 진비저항 주상도(그림 1 참조)를 작성, 해석하였다. 측정점 별 진비저항 주상도에서 특기할 점은 최하위층의 비저항이 1000ohm.m 이상의 고비저항인 측정점들이 모두 장전리의 장전국교 주변에 모여 있다는 점이다. 진비저항 주상도상에 흑색 수평실선은 각 측정점의 표고로부터 환산한 해수면 수준의 위치를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 측정점 #1, #2, #5, #7, #8, #11 들에서, 해수면 수준 부근(측점 #1 이외에는 모두 상부) 약 20m 이내에 비저항층의 경계를 갖고 있으며 그 경계 하부층의 비저항은 측정점 #1, #2, #5, #7, #8, #11 의 순으로 각각 356ohm.m, 18ohm.m, 398ohm.m, 396ohm.m, 393ohm.m, 264ohm.m 를 보이고 있어, 측정점 #2를 제외하고는 250 - 400ohm.m 의 범위 내에 있음을 볼 수 있다. 과거, 제주도에서 수행되었던 전기비저항 수직탐사의 결과로서, 담수에 의하여 침윤된 암석의 비저항이 대략 300 - 700ohm.m 이었던 경험(조진동 외, 1988)과 하와이섬에서 얻은 암석유형별 비저항자료(Zodhy and Jackson, 1969)를 참고할 때, 상기 측정점들의 해수면 수준 20m 이내에 있는 비저항 경계면은 각 측정점에서의 자연수위를 나타내고 있는 것으로 해석하였다. 본 탐사구역 부근에 있는 두개공의 시추주상도(농진공, 1971, 1973)에 의하면 장전지구 D-34공에서의 자연수위가 해수면 상부 10.5m 수준에 있고, 귀일지구 W-13공에서의 자연수위가 10.4m 수준에 있는 것은 상기 해석의 신뢰성을 높이고 있다. 앞서 언급한 장전국교 주변에 분포하는 측정점 #3, #4, #6, #9, #10 들, 특히 심부로 부터 지하 50m 내외까지 3500ohm.m 이상의 고비저항치를 보이고 있는 측정점 #3, #6, #10의 지하에는 국부적으로 고비저항의 불투수층이 존재할 가능성이 매우 높으며 따라서 이지역에서의 지하수는 지하수의 유로가 되는 파쇄대 부근에서 기대하여야 할 것이다.

### TEM 수직탐사

한변이 150m 인 정사각형의 동위치 송.수신루프(coincident loop) 배열을 이용하여 약

1.6Km의 거리를 두고 조사지역을 평행하게 남북으로 종단하는 두개의 축선상, 22개 축점에서 TEM 수직탐사를 수행하였다. 탐사자료를 1차원 자동역산(이상규, 황학수, 1988)하고 그 결과를 축선 별로 모아 축선 별 진비저항분포를 해수면 위치와 함께 그림 2, 3과 같이 나타내었다. 축선 별 TEM 탐사자료에서 가장 뚜렷한 특징은 수산봉으로부터 남쪽으로 직선거리 2.6Km 지점에 공통적으로 발달한 저비저항 이상대와 서부 축선의 북쪽 끝 부분에 천부까지 발달한 저비저항대 이다. 전자는 동서 주향을 갖는 대규모 지질구조선(예: 단층파쇄대)으로 해석되며, 후자는 수산봉에 의한 영향으로 보인다. 동위치 송.수신루프배열을 이용하는 TEM탐사에서 통상적인 탐사가능 심도는 정방형 루프 한변의 길이의 약 2.5 - 3배로 알려져 있음을 상기할 때, 본역에서의 탐사가능 심도를 지표로부터 400m 내외로 보는 것이 타당할 것이며, 또한 한변이 150m 인 대형루프를 사용하여 3개층으로 강제 분층한 자동역산으로는 지하 수십m까지의 천부구조는 분해할 수 없음을 감안하여야 한다. 따라서 본역의 물리탐사 자료 중에서 천부의 진비저항 분포는 전기비저항탐사자료를 더욱 신뢰하여야 하며, 400m까지의 심부 진비저항 분포는 TEM 수직탐사 결과를 보다 더 신뢰하여야 한다. 이러한 관점에서 볼 때, TEM 수직탐사의 축선별 진비저항 단면도에서의 제2 및 제3층의 경계 심도 중, 400m가 넘는 경계면은 수치 그대로 받아들이기 보다 축점에 따른 상대적인 심도변화를 반영하는 것으로 해석함이 타당할 것이지만 제1층과 제2층의 경계는 정량적으로 신뢰할 만 하다. 제1층의 진비저항이 수백 ohm.m이고 제2층의 진비저항이 10ohm.m 내외인 점으로 미루어, 이 경계는 평균 10배 이상의 진비저항 차이를 보이는 상부 고비저항 - 하부 저비저항층의 경계임이 분명하다. 여기서, 제1층 - 제2층의 경계면과 해수 수준면과의 심도관계를 볼 때, 경계면 상부를 담수대로 해석하는 것은 받아들일 만 하나 10ohm.m 내외의 제1 경계면 하부층, 즉 제2층을 어떻게 해석하느냐 하는데는 어려움이 있다. 제2층에 대한 지질학적 해석에는 몇가지 가능성이 있을 수 있는 바, 그 첫째는 염분이 함유된 해수침입 층으로 해석하는 것이며, 두번째 가능성은 해성퇴적층(실트층)으로 해석하는 것이다. 어떤 경우이던 제1층과 제2층의 경계면은 본역에서 담수대의 하한을 의미하는 것으로 해석하고자 한다. 그러나 이와 같은 축선 별 지질학적 분포는 동측축선의 T8과 서측축선의 T16의 남단을 잇는 구조선(계수형 지형음영도에서도 그 징후의 확인이 가능)에 의하여, 또 서측축선에서는 T5와 T4 사이를 지나는 또다른 구조선에 의하여 국지적으로 단절, 교란되고 있다고 해석된다. 후자는 쌍극자배열 전기비저항탐사에서 얻은 동서주향의 저비저항 구조선의 연장선 상에 있음도 확인된다. 아울러 본역의 담수대의 상한은 수직 비저항탐사에서 서술한 바와 같이 국지적으로 차이는 있으나 대체적으로는 예상 해수 수준면의 10 - 20m 상부에 위치하고 있다고 본다.

## 2. 해안 용출수 탐사와 지하수 유로 추정

제주도의 해안 및 연안에 존재할 수 있는 고, 저온의 용출수 분포를 파악하면 향후 제주도의 용출수 개발에 효과적으로 활용될 수 있을 뿐 아니라 육상 구조선의 연장성을 파악하는데 도움이 될 것으로 판단되어 미국 Daedalus Enterprise, Inc. 사의 항공다중분광주사시스템(모델 AA3600)으로 항공원격탐사가 수행되었다(이상규 외, 1994).

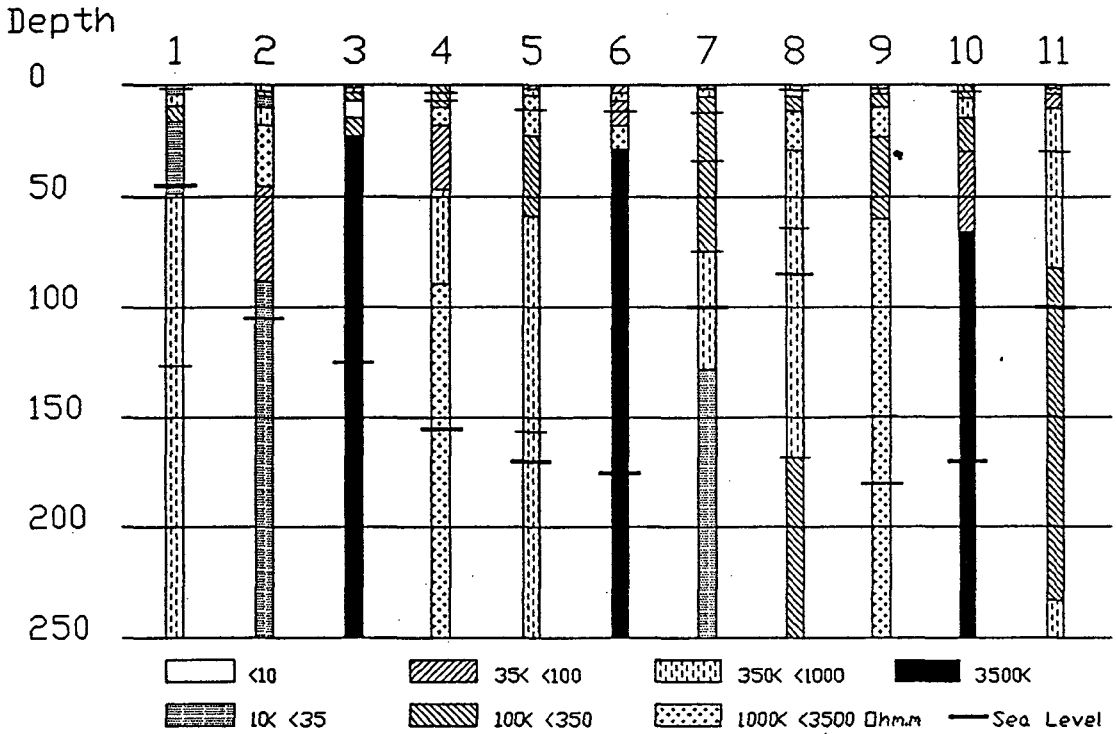


그림 1. 수직 비저항탐사에 의한 진비저항 주상도.

### Jeju East-Line

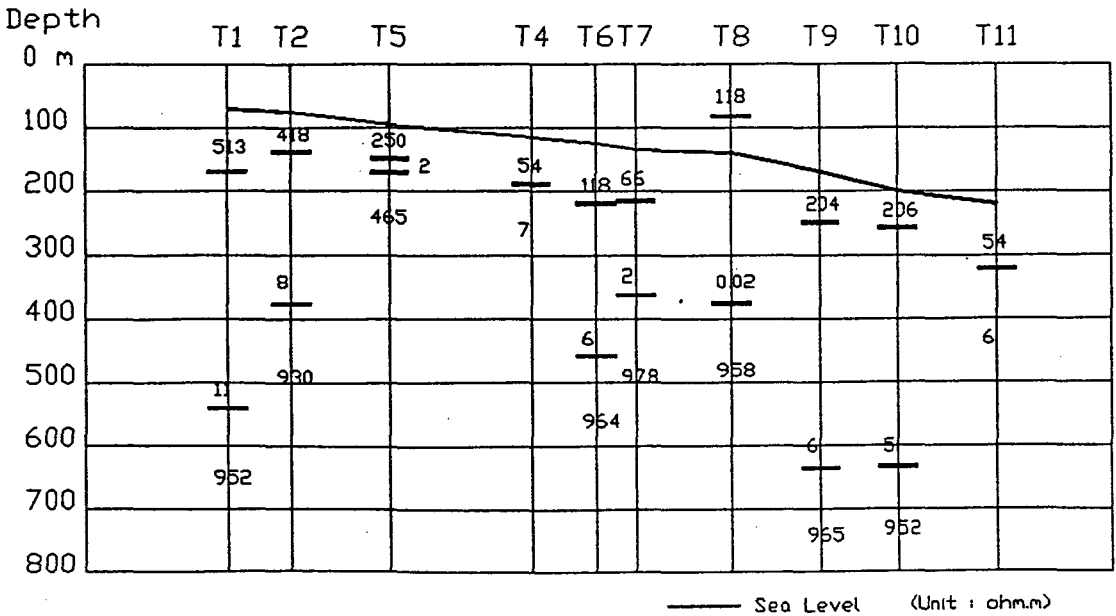


그림 2. TEM 수직탐사에 의한 동측측선 진비저항 단면도.

## 항공원격탐사

제주도의 전 해안지역에 대한 항공원격탐사자료의 획득은 1993년 3월 22일부터 3월 26일까지 4일간에 걸쳐 이루어졌다. 연구의 목적상, 요구되는 지상해상력과 자료의 폭등을 고려하여 비행고도는 8000feet, 비행속도는 140 knot로 하였다. 이에 따라 주사속도는 12.5 scan/sec로 하여 약간의 비행방향 중첩이 존재하도록 하였다. 이와 같은 자료획득 조건에서는 지상해상력이 6m x 6m 정도가 되고, 한번의 주사에 의하여 얻어지는 자료의 폭은 4.6Km 가 된다. 제주도의 전 해안지역에 대한 자료의 획득은 총 22개 축선으로 이루어졌다. 본 연구에서는 연안 해수면의 온도분포를 알고자 하였으므로, 시간에 따른 해류변화에 의한 영향을 최소화하기 위하여 전축선에 대하여 가능한 한 동일 시간대에 자료를 획득하는 것이 해석에 유리하다. 그러나 본 연구에서는 자료를 획득하여야 할 축선이 너무 많고 현장탐사시 기상조건이 매우 불량하여 부득이 서-북쪽 해안과 동-남쪽 해안에 대한 자료획득이 서로 다른 날짜 및 시간에 이루어졌다.

본 연구에서의 자료처리는 주로 열적외영역 파장대인 밴드 10의 자료를 이용하여 해수면 온도를 계산해내는 과정으로 이루어졌다. 모든자료에는 시스템 기하보정이 적용되어 주사각 영향과 중첩에 의한 영향은 제거되었으나 GCP선정의 어려움으로 GCP 기하보정은 수행되지 못하였다. AA3600 시스템에는 두개의 참고용 흑체(reference blackbody)가 있어 이들의 설정온도와 이들에 대하여 주사된 자료값을 이용하여 측정된 수치자료를 겉보기 방사온도(radiance temperature)로 변환할 수 있다. 이렇게 하여 작성된 제주 전해안에 대한 겉보기 방사온도분포도를 그림 4에 나타냈다. 실제 온도를 계산하기 위해서는 대기의 영향과 해수의 방사율에 의한 영향을 보정해야 하나 본 연구에서는 상대적인 온도분포만을 알고자 하였으므로 이를 실시하지 않았다. 본 자료의 겉보기 방사온도는 실제 해수면 온도보다 약 3°C 정도 낮은 것으로 나타났다. 그림에서, 자료획득 날짜가 서로 다른 동-북쪽 해안과 서-남쪽 해안의 온도분포가 상이함을 볼 수 있다. 이를 면밀히 검토한 결과, 비교적 온도차이가 큰 12개의 이상온도지점들을 추출하였다. 이들 중 3지점은 상대적 고온 이상지점이며 9개는 상대적 저온 이상지점들이다. 이 이외에 대부분의 해안가에서는 내륙에서 바다로 흘러나오는 해안 용출수가 보였으며 이들은 해수온도보다 낮은 온도로 나타남으로 쉽게 판별할 수 있었다. 서귀포 부근, 숲섬 서쪽에서 포착된 이상대는 그 폭이 약 10m 정도이며 길이는 약 30m 정도로서 해저에서 용출되는 지하수일 가능성이 제법 크다고 여겨진다. 대포동 부근의 이상대는 주변의 해수온도 보다 약간 높은 온도로 나타나고 있으나 해안 및 해저지형의 영향에 의한 난류의 갇힘현상인지 아니면 해저에서 용출되는 고온의 용출수인지는 확인되지 않았다.

해수면 온도의 저온 이상대에 대한 확인을 위하여 1993년 11월에 소형선박을 임대하여 몇군데에서 직접 해수면 온도를 측정하였다. 온도측정을 위해서 0.1°C 정밀도의 소형 디지털 온도계를 사용하였으며 측정 위치는 선박에 장착되어 있는 0.01분 정밀도의 소형 GPS 시스템을 이용하여 확인하였다. 그림 5는 숲섬 서쪽 이상대를 가로지르는 축선

# Jeju West-Line

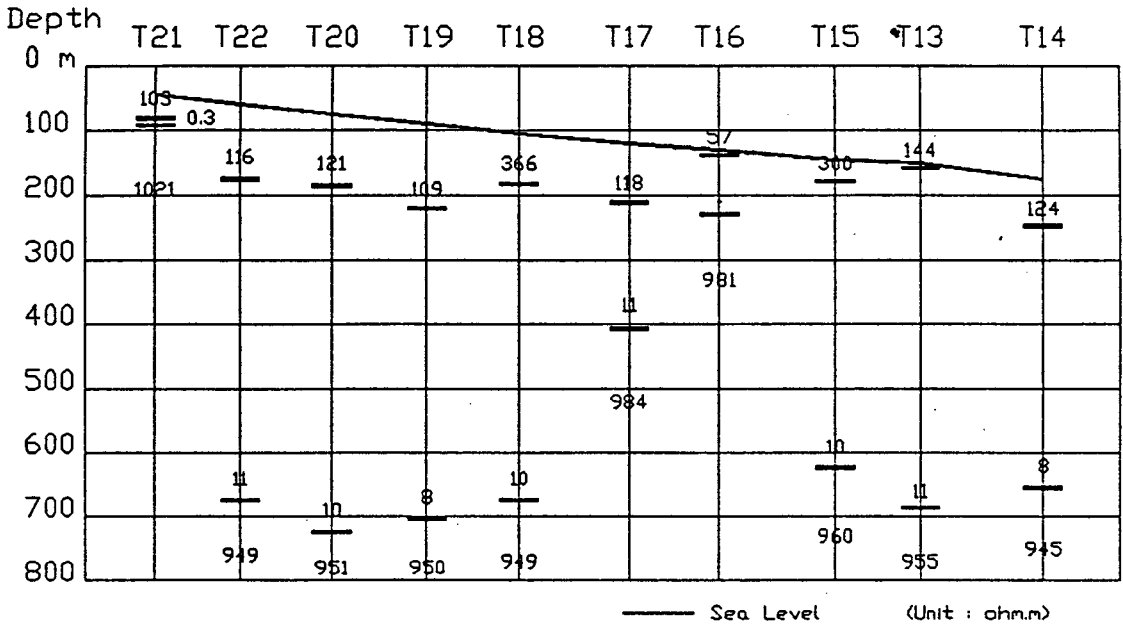


그림 3. TEM 수직탐사에 의한 서측측선 진비저항 단면도.

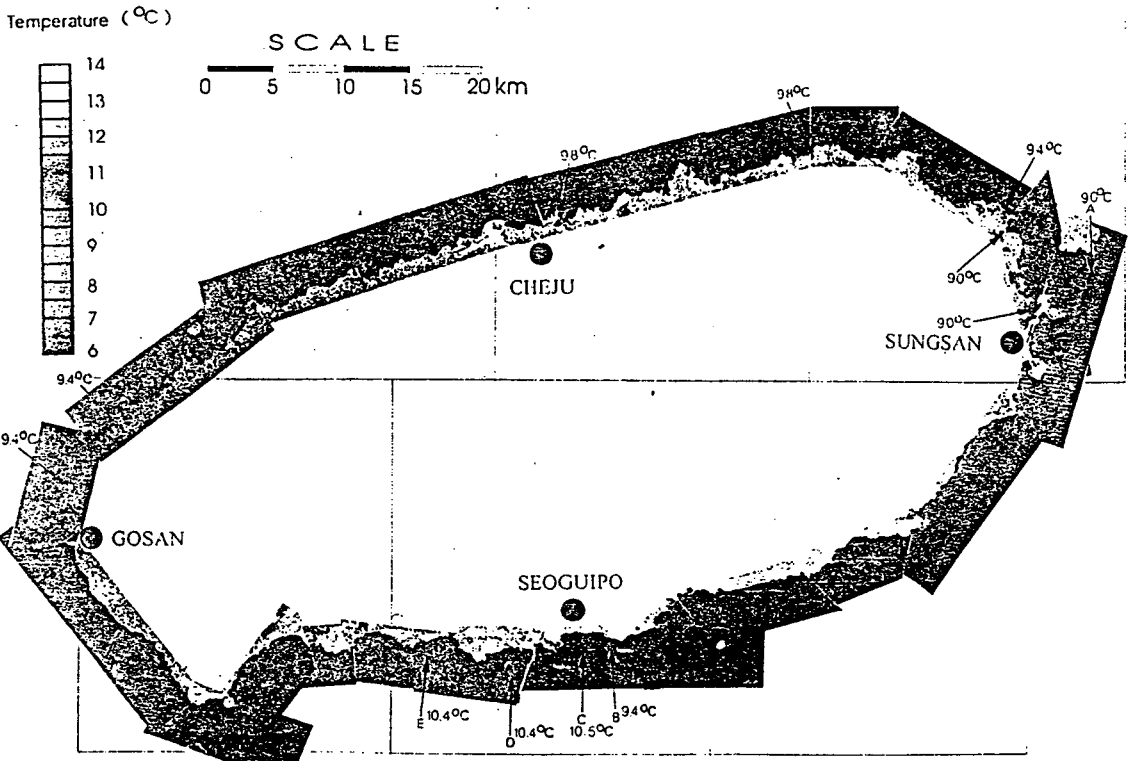


그림 4. 항공원격탐사 자료로부터 계산된 제주도 전 연안의 겉보기 방사온도와 해수면온도 이상지점(화살표 끝).

에서 온도계로 측정된 온도 프로파일이다. 항공원격탐사가 수행된 시점과 해수온도를 측정된 시점에 차이가 있어 양자의 온도변화양상이 일치하지는 않으나 위도가 13.6분인 지점, 즉 위도 33°13.6'인 지점에서 다른곳보다 약 0.1°C 이상 낮은 온도로 나타나며 이는 이상대 지점과 일치하는 곳이다.

### 지하수 유로 추정

그림 6은 제주도의 자연수위(농림수산부 외, 1989) 등고선도를 나타낸 것이다. 그림에서 내륙의 지하수 유입지역에서는 자연수위가 낮아질 것이며 해안의 용출지점 부근에서는 자연수위가 주변보다 높아질 것이라고 생각할 수 있다. 또한 만일 해안에서도 그 수위가 높아지지 않고 계속 낮아진다면 해안에서 멀리 떨어진 연안 해저에서 용출될 가능성이 있다는 가정을 할 수 있다. 이러한 가정하에 추정된 지하수 유로를 그림 4의 이상온도 지점들과 비교하면 상당한 연관성을 보이고 있음을 알 수 있어 향후 지하수 개발시에 참고자료가 될 것이다.

### 3. 지하 해수침투 확인을 위한 물리탐사

지하수가 해수침투에 의하여 오염되어 있는 제주도 남제주군 성산리 일부지역에서 시간영역 전자탐사(Time-domain EM)를 수행하고 해수침투 영역 mapping 을 위한 TEM sounding의 적용성을 검토한 바 있다(이상규 외, 1988). 탐사지역에서 대부분의 지하수 개발은 해수면에 근접한, 또는 해수면 하에서 100m 내외의 표고(level)에 형성 발달하고 있는 서귀포층(?) 또는 성산층 내에서 이루어지고 있다. 기 시공된 관정으로 부터 얻은 자료에 의하면 담수렌즈가 서부권에 비하여 상당히 얇으며 그나마 해안에 인접할수록 담수와 해수가 혼합된 점이대로 화하고 있다(농수산부, 농업진흥공사, 1985).

#### TEM sounding 이론

펄스 입력을 사용함으로써 넓은 대역의 주파수를 동시에 사용하는 것과 같은 효과로 심도에 따른 전기비저항(또는 전기전도도) 분포를 시간영역에서 얻을 수 있다. 대부분의 TEM 수직탐사에서 송신장치로는 폐쇄된 루프를, 수신장치로는 코일 또는 루프를 사용한다. 송신루프에 전류를 흘리다가 갑자기 끊으면 자장의 급격한 변화로 유도기전력이 생기고 따라서 대지에는 유도전류가 생기며 이때, 대지의 전기전도도가 높을수록 강한 유도전류가 유기된다. 이로부터 지표의 수신장치로 감지할 수 있는 제2차 자장이 발생한다. 송신루프에 근접한 지표에 처음 유기된 유도전류는 시간이 경과함에 따라 감쇄한다. TEM 전자유도의 실효과는 송신전류를 단락한 직후에 송신루프 직하부의 지표에서 최대전류밀도를 갖는 유도전류의 링(ring)이 시간이 지남에 따라 마치 담배연기의 링(smoke ring)과 같이 대지에서 하부와 주변으로 퍼져나간다. TEM 수직탐사에서 이 smoke ring의 투과심도는 대지의 물리적성질과 송신전류 단락 이후로부터의 시간의 함수이며 따라서 시간이 경과함에 따라 수신코일로 반응을 감지하는 것은 서로 다른 심도에 유기되어 있는 최대전류밀도의 유도전류링을 측정하는 것과 같다.

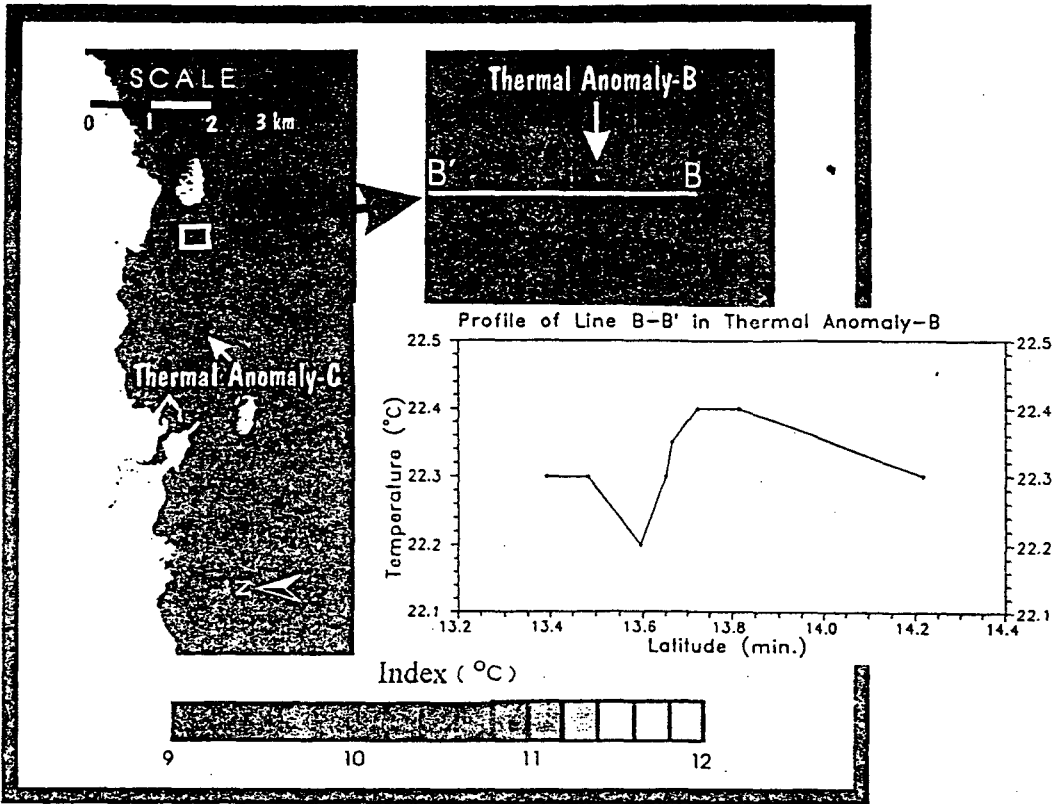


그림 5. 숲섬 서쪽 해수면 온도 이상지점을 가로지르는 축선의 실측온도 프로파일.

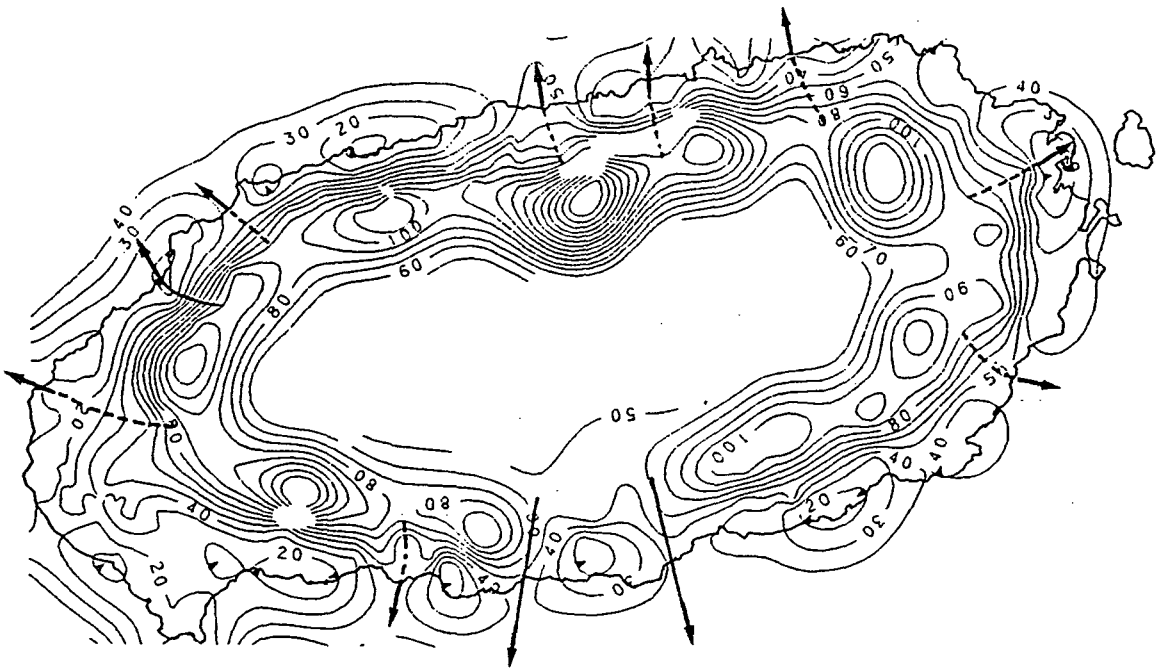


그림 6. 제주도의 자연수위 등고선도(농림수산부 외, 1989)와 지하수 추정유로.

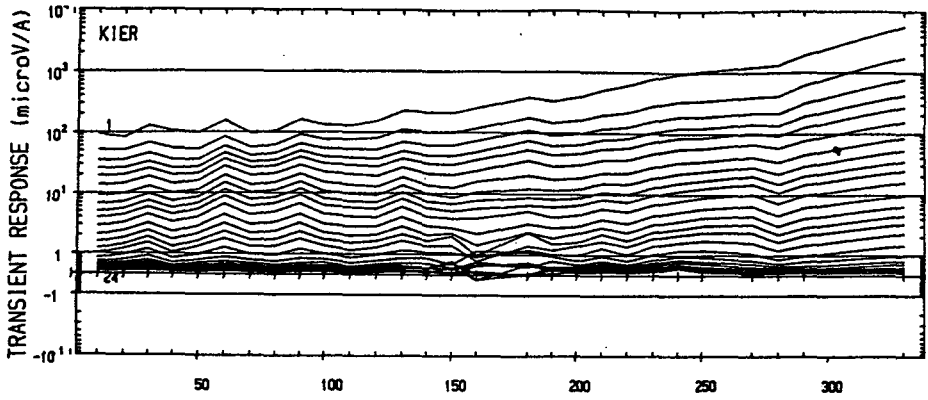


## 탐사결과 및 해석

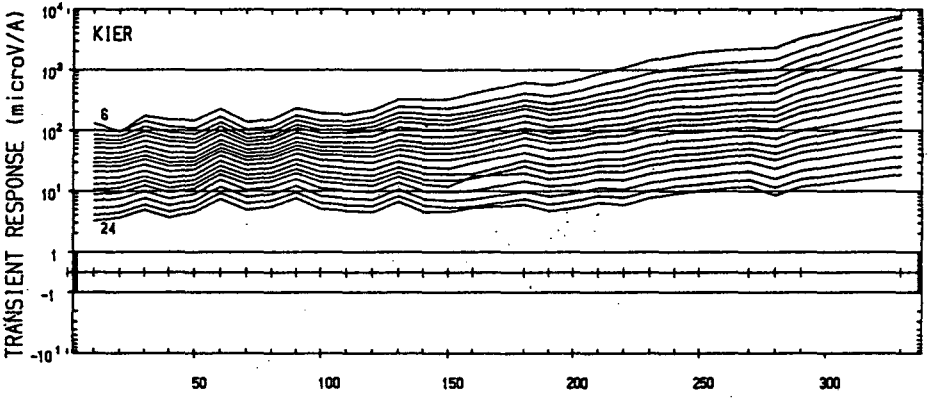
전장 6Km의 측선, TEMPL-1 상, 200m 간격의 측정점에서 TEM 수직탐사를 수행하였다. 사용한 송수신루프 배열은 동위치 송.수신루프 및 in-loop 배열이었다. 양자의 경우 송수신루프는 80m x 80m의 정방형 루프를 사용하였고 SIROTEM 탐사기의 standard time과 early time 양 시간대(delay time)에서 반응을 측정하였다. 그림 7은 동위치 송.수신루프배열에 의한 TEM 반응 프로파일로서 a)는 standard time, b)는 early time 지연시간대에서의 측정결과이다. 반응 프로파일의 특징은 측선 전장을 통하여 현저한 국지적 이상 없이 점이적인 변화양상을 보임으로서, 본역의 층서구조적 환경을 잘 반영하고 있으며, 또한 내륙(측점 #10)으로부터 해안(측점 #330)으로 갈수록 반응의 값(transient voltage)이 큰 것은 해안 쪽으로 갈수록 대지의 전기전도도가 커지고 있음을 반영하고 있다. early time 프로파일은 standard time 프로파일에 비하여 채널 간 간격만 좁아져 있을 뿐 반응형태에 있어서는 큰 차이점이 없는 바, 이것은 당초 early time 지연시간대에서의 측정으로 얻으려 했던 지하 천부에서의 분해능(전기비저항 및 두께) 향상을 이루지 못했음을 의미한다. 동위치 송.수신루프배열에서 수신루프의 면적이 6400m<sup>2</sup>이고 in-loop 배열에서 수신기로 사용한 RVR(Roving Vector Receiver)의 유효면적이 10000m<sup>2</sup> 인데서 기인한 양반응의 크기의 비가 1:1.5 정도라는 점을 감안하면, 두종의 루프배열에 의한 특별한 차이점은 발견할 수 없다. 그러나 in-loop 배열 측정에서의 잡음이 동위치 송.수신루프 배열에 비하여, standard time 프로파일에서의 8채널 이후, early time 프로파일에서는 21채널 이후에서 큰 것을 볼 수 있었다. 이러한 원인은 in-loop 배열의 수신기 실크기(55cm x 55cm x 25cm)가 작아서 발생하는 부정적 요인 즉, 바람에 의한 잡음(wind noise)이 상대적으로 크며 지표부근의 불균질성(inhomogeneity)에 의한 영향을 많이 받은 것으로 판단된다.

## 비저항 가단면도

각 측정에서의 TEM반응을 대지가 균질 반무한공간이라는 가정 하에 각 측정, 매 지연시간에서의 과도전압(transient voltage)을 외견비저항으로 환산하고, 이들을 측선을 따라 취합함으로써 외견비저항 가단면도로 나타낼 수 있다. 그림 8은 동위치 송.수신루프배열에 의한 standard time과 early time 양 지연시간대에서의 측정 결과를 외견비저항 가단면도로 나타낸 것이다. 그림에서 실선과 점선 화살표는 상호 같은 지연시간을 갖는 채널들을 표시하고 있다. 외견비저항 가단면도에서도 early time 측정에 의한 지하 천부 분해능 향상은 특별히 눈에 띄지 않는다. 측선 전구간을 통하여, 측정 #160 - #200 사이의 채널 10 이후 고비저항 이상역을 제외하면 전형적인 층서구조의 양상을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 특히 측정 #10 부터 측정 #130의 구간은 횡적인 변화가 거의 없는 수평층서적 구조이며 측정 #210 이후 해안(측점 #330)까지는 외견비저항이 점이적으로 감소하는 층서구조임을 볼 수 있다. 반응 프로파일과 외견비저항 가단면도에서 볼 수 있는 층서구조적 특징과 측정 #330이 해안선으로 부터 50여 m 밖에 떨어져 있지 않은점, 그리고 측선 우측, 즉 해안쪽으로 갈수록 외견비저항이 점이적으로 낮아지는 점 등은 측선 우측부위가 해수침입 또는 토양 내 염분축적(soil salinity)에 의한 영향이 보다 강하다는 해석을 가능하게 한다.



(a)



(b)

그림 7. 동위치 송·수신루프배열에 의한 TEM 반응 프로파일: a) Standard delay time, b) Early delay time.

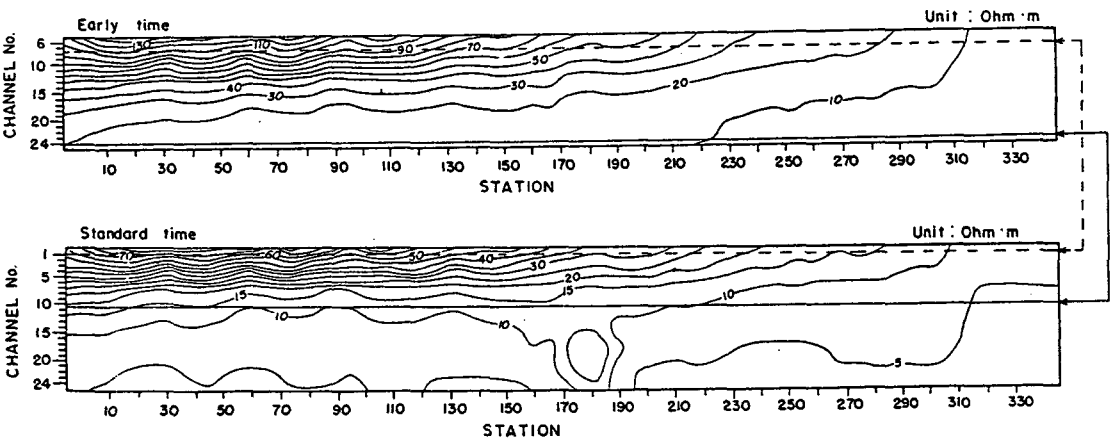


그림 8) TEM탐사에 의한 외견비저항 가단면도.

### 1차원 비선형 최소자승 역산

PC용 자동역산 프로그램(이상규, 황학수, 1988)을 이용하여 전 측점에 대한 standard time 반응의 1차원 자동역산을 수행하고 이를 그림 9에 나타내었다. 진비저항 단면도에서 보면 해안선 쪽(측점 #330)에서의 2층구조로 부터 내륙쪽(측점 #10)의 4층구조 까지 강제 분층되지만 층간의 전기전도도 대비는 내륙방향의 상부층으로 갈수록 커지는 경향이 뚜렷하다. 해수 자체의 전기전도도가 약 5S/m 이고, 해수가 침입한 다공성 암층의 전기전도도가 약 0.33S/m 인 점을 염두에 두고, 상부층의 전기전도도가 해수침입에 의한 전기전도도를 나타내는 것으로 볼 수 없는 0.1S/m 이하 이면서 그 하부층과의 전기전도도 대비가 1:10 이상인 층의 경계를 침투한 해수의 상부 경계면으로 상정함으로써 그림 9에 나타낸 것과 같은 실선 경계선을 얻었다.

### 앞으로의 과제

본 역은 기존자료에 의하여 해수침입이 확실한 지역으로 간주되긴하나 불행하게도 TEM 수직탐사가 수행된 측선 상에는 TEM 수직탐사의 해석결과를 재확인할 만한 관정이 없었으며 연구비의 제약으로 시추에 의한 차후 확인도 이루어지지 않았다. 그럼에도 불구하고, 앞으로 몇가지의 문제점을 보완하면 제주도의 해수침입 영역을 mapping 하는데 본 TEM 수직탐사가 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이라는 점을 강조한다. TEM 수직탐사는 비파괴 탐사법이며 확인 시추공의 수를 최소화 하여 결과적으로 최소의 비용으로 해수침입 영역을 광역적으로 확인할 수 있기 때문이다. 현무암, 해성퇴적층 등의 전기전도도와 이들이 담수, 또는 농도를 달리하는 침입해수에 침윤되어 있을 때의 전기전도도에 대한 자료들을 축적한다면 보다 정밀한 해석이 가능하다는 점도 강조한다.

## 4. 물리탐사에 의한 선구조 인식

제주도는 제4기 동안의 화산활동에 의하여 형성되었다. 퇴적암류로 구성되어 있는 일부 해안지역을 제외하고는 섬 전체가 화산암류로 덮혀 있어서 칼데라나 단층 등 지구조 변형과 관련된 지질구조선의 확인이 용이하지 않다. 제주도에는 현재까지 칼데라라고 할만한 화구는 없는 것으로(이문원, 손인석, 1983) 알려져 있으며 도의 남서부 산방산과 용머리봉 간에서 관찰되는 소규모단층들(황재하 외, 1994) 이외에는 지구조 변형에 의한 단층도 확인되지 않고 있다. 제주도에서의 광역탐사자료들을 종합검토하던(이상규 외, 1994) 중에 인식된 두개의 특이 선구조에 대하여 논하고자 한다. 이들 중 하나는 함몰이 수반된 칼데라로, 다른 하나는 단층선으로 추정하고 관련 근거자료들을 보완함으로써 화산암류로 피복되어 지표에서는 확인이 용이하지 않은 두 특이 구조선의 실존 가능성에 대하여 기술한다.

### 특이한 선구조의 인식

그림 10은 제주도의 계수형 지형자료를 캐나다 PG & W 사의 Geosoft geophysical

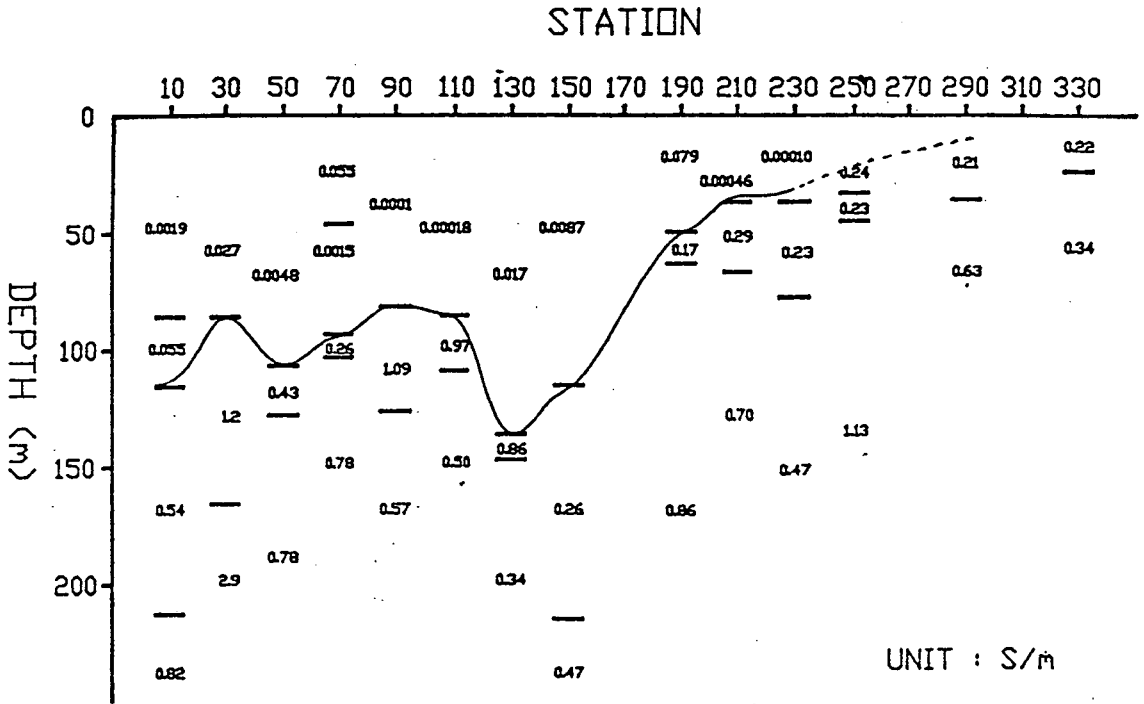


그림 9) TEM탐사자료의 1차원 역산 결과와 추정된 침입해수의 상부 경계면.

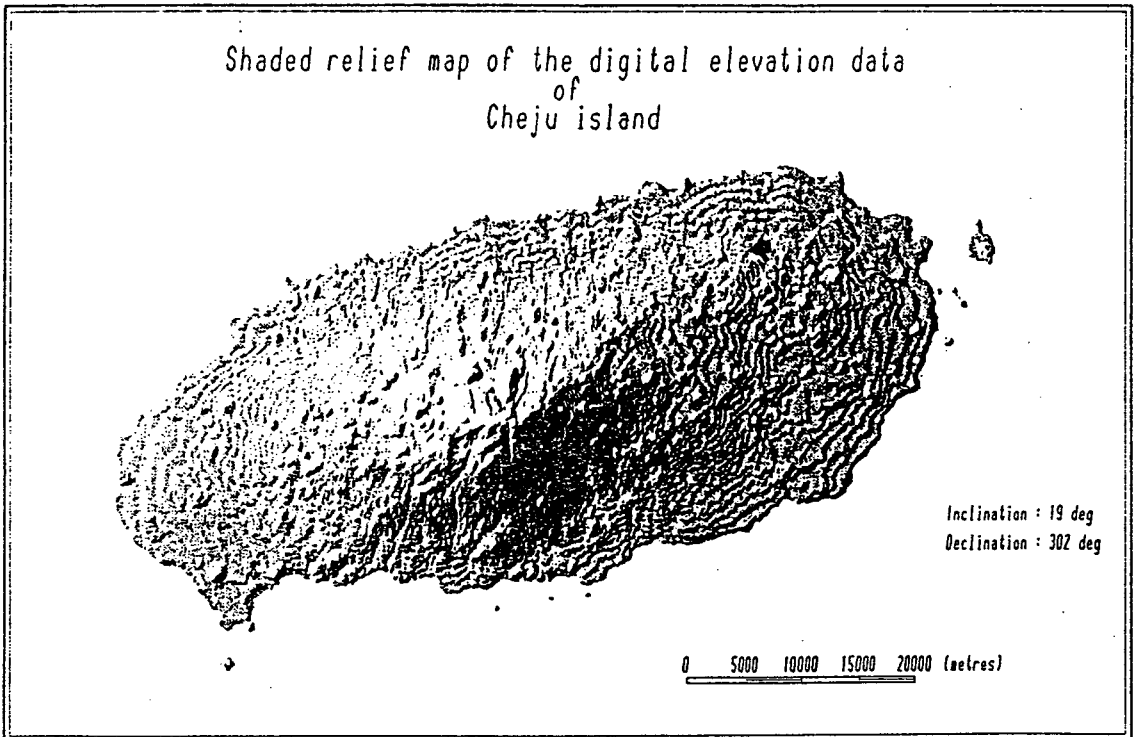


그림 10) 계수형 지형자료를 이용하여 작성한 제주도의 음영도.

processing and interpretation software 가 내장된 Sun workstation으로 음영처리한 도면으로서 빛의 수직각은 19도, 수평각은 302도 이었다. 사용된 지형자료는 1:50,000 지형도를 경, 위도 방향으로 각각 1초 간격으로 샘플링하여 도폭당 811801(901 x 901) 개의 고도값으로 이루어져 있다. 음영도가 계수형 지형자료의 효율적인 해석도구로서 갖는 가장 큰 장점은 비추는 빛의 방향을 달리함으로써 자료값 자체의 크기와 관계없이 방향성을 갖는 지표에 표출된 지질학적 선형구조를 쉽게 판별할 수 있다는 점이다. 그림에서 제주도의 지표지형 형상을 등고선도에 비하여 보다 일목요연하게 볼 수 있으며, 특히 기생화산들의 형상과 위치 그리고 한라산을 정점으로 북서, 북북동 및 남으로 발달된 계곡의 연장방향을 쉽게 판별할 수 있다. 이들 중, 두개의 특이한 선구조를 인식할 수 있는데, 하나는 도의 북동부에 화살표로 표시한 반원형 구조로서 기생화산을 중앙에 두고 그 주변 원주상에 부분적으로 나타나며 원의 내부측에서 저고도를 보이는 반원형의 지형기복을 보이고 있는 것이며 다른 하나는 섬의 동쪽에 있는 우도를 북북서-남남동으로 가로지르는 선구조이다.

그림 11은 지하장강도를 제거한 잔여자력의 자력이상 중심이 자성체의 직상부에 위치하게 한 후, 비행고도에 따른 불필요한 고주파수 대역의 잡음을 제거한 자극화변환도이다. 본 항공자력탐사자료는 평균 비행고도 약 300m, 축선간격 1Km의 남북방향 170개 축선, 축선간격 5Km의 동서방향 7개 축선에서 1985년에 Geometrics 사의 항공자력탐사 시스템 (모델 G-813)으로 취득한 자료(구자학 외, 1986)를 캐나다 PG & W 사의 Geosoft geophysical processing and interpretation software 가 내장된 Sun Workstation으로 재처리한 것이다. 자극화변환 이전의 주요 자료처리는 IGRF 제거, Central Meridian 129°를 기준으로 실시한 UTM 좌표변환, 150m 축점간격으로의 random gridding 등이었다. 앞의 계수형 지형음영도에서 추출한 두개의 특이 선구조 중, 반원형 선구조가 자극화변환도 상의 상대적 고자력 반원형 선구조와 위치 및 형태 양면에서 일치하고 있음을 볼 수 있다. 제주도에서의 자력탐사시 우도는 제외되었으므로 양자의 관련성을 확인할 수는 없었다.

그림 12는 2장에서 논한 바 있는 항공원격탐사에 의한 제주도 연안의 겉보기 방사온도 분포도 중 우도부근을 확대하여 보인 것인데, 우도의 동남쪽 해안가인 소머리 오름에서 남남동쪽으로 연장되는 낮은 온도의 선형양상을 확인할 수 있다. 이는 앞절의 계수형 지형음영도로부터 추출된 우도 내 선구조의 남남동쪽 연장선상에 위치함을 알 수 있다. 이는 일견 선박의 이동흔적과 유사하게 보이나, 주변에 산재한 선박들이 해수의 온도보다 월등히 높은 온도를 보임에 비하여 선박으로 생각될 수 있는 지점이 해수보다 오히려 매우 낮은 온도를 보이고 있다는 점에서 선박의 이동 흔적이 아닌 것으로 판단된다. 그림 12의 A-A' 축선을 따른 후속의 온도측정을 통하여, 온도측정 축선이 항공원격탐사의 저온 선형이상과 교차하는 동경 126°58.36', 북위 33°28.37' 지점에서 주변보다 약 1°C 정도 낮은 저온 분포를 확인한 바 있다.

선구조의 실존을 뒷받침하는 자료

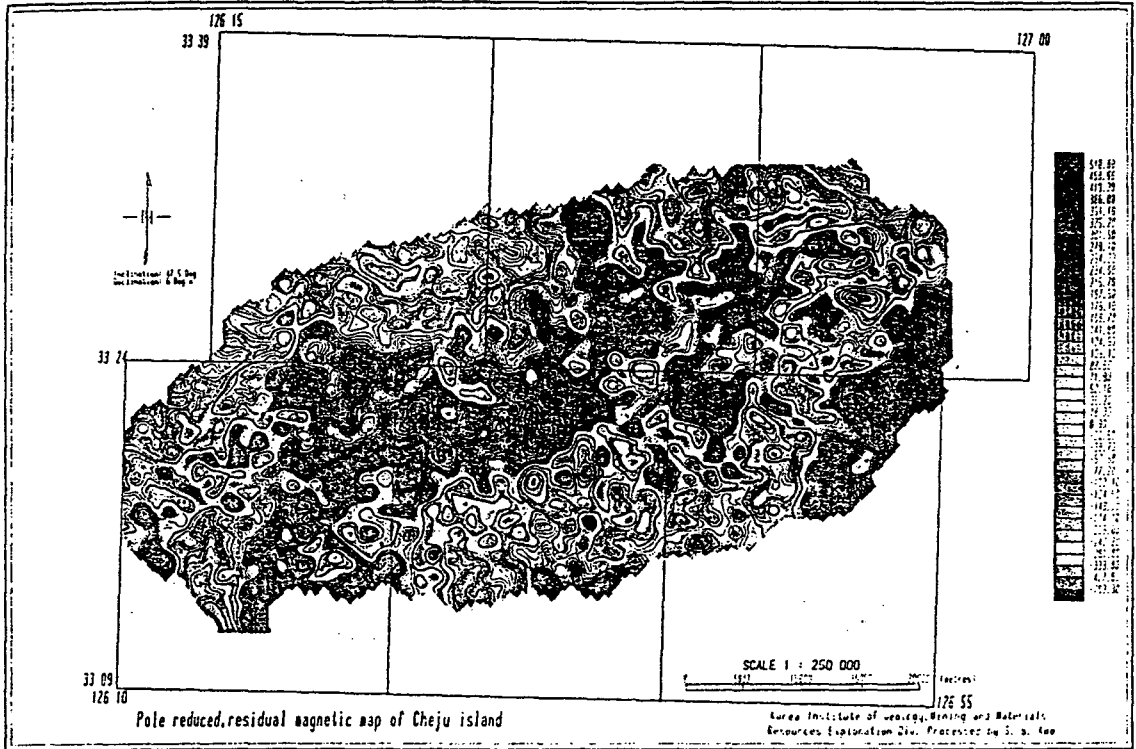


그림 11) 제주도의 잔여자력 자극화변환도.

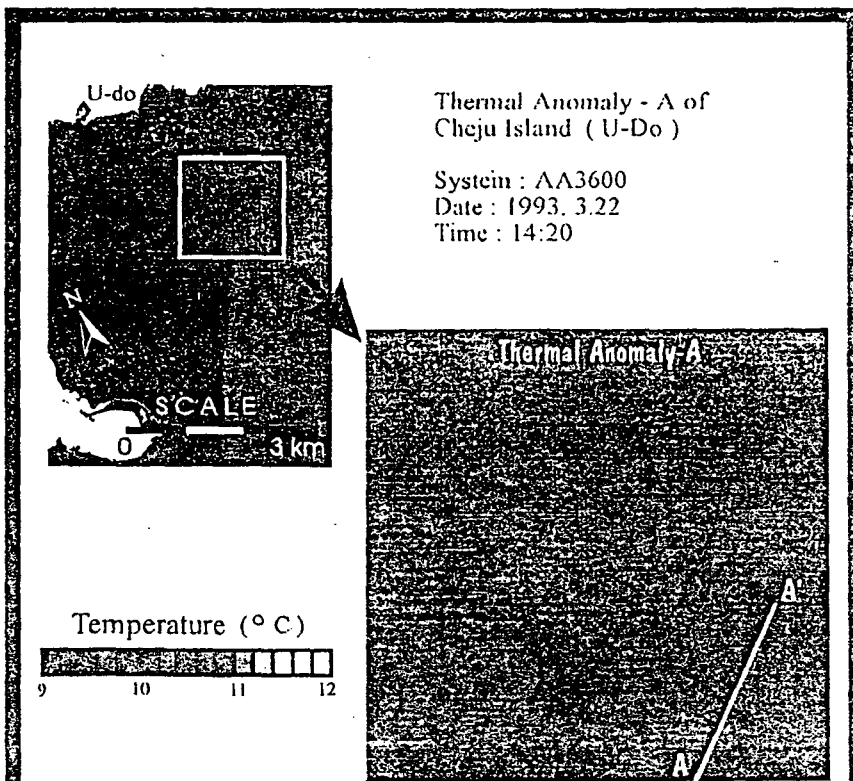


그림 12) 항공원격탐사 자료로부터 포착된 우도 부근의 해수면 온도 이상대.

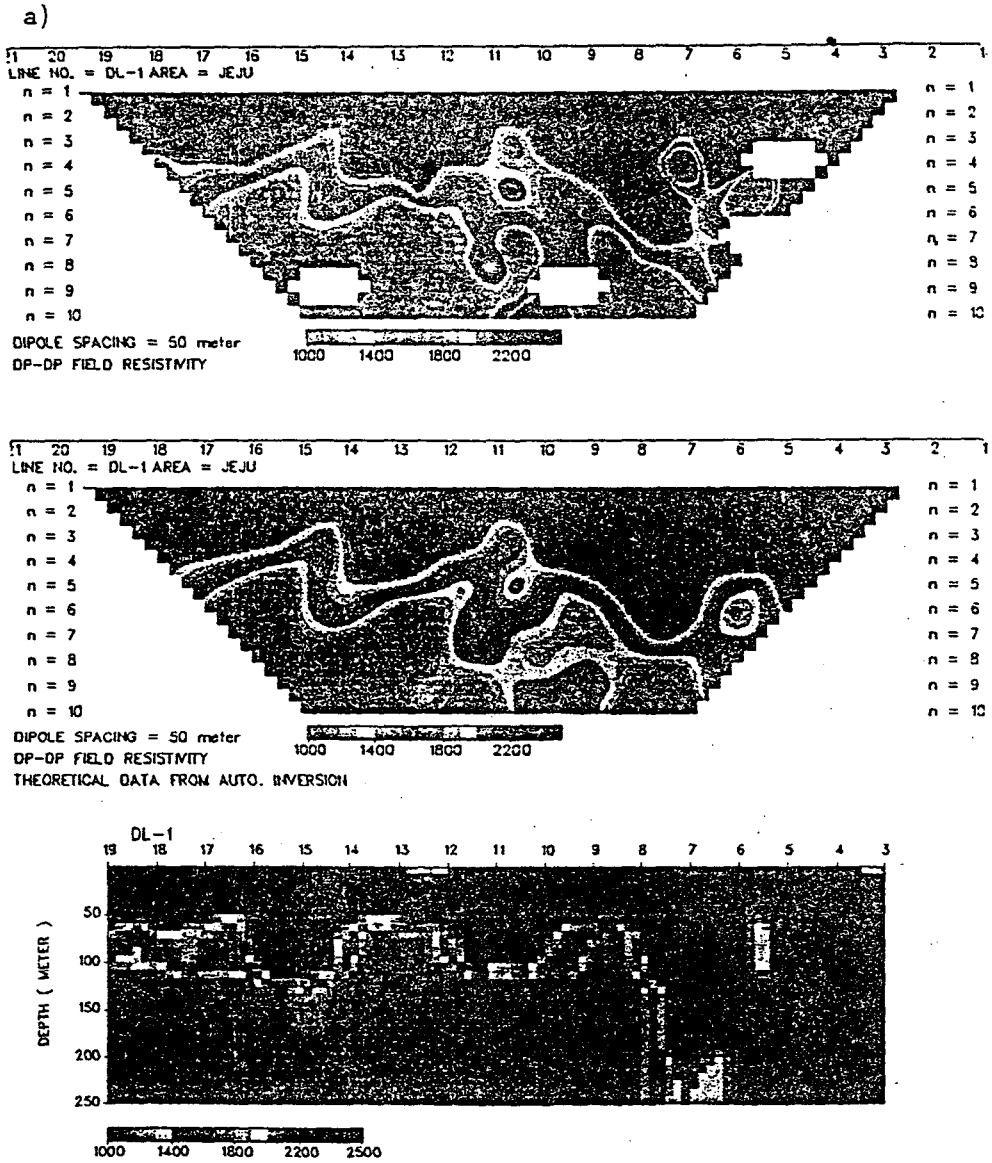


그림 13) 반원형 선구조를 가로지르는 축선에서의 쌍극자배열 전기비저항탐사 결과

계수형 지형음영도와 항공자력탐사에서 그 위치와 형상이 일치하는 반원형 선구조가 화산암류로 피복된 칼데라일 가능성을 뒷받침하기 위하여 제주도의 자연수위 등고선도(그림 6)를 검토하였다. 반원형 선구조의 내측(즉, 좌측)에서 자연수위가 주변보다 현격히 낮은 것을 볼 수 있는 바, 이는 반원형 선구조의 내측이 함몰파쇄대일 가능성을 뒷받침하는 하나의 근거로 판단한다.

앞에서 추출한 두개의 특이 선구조에 대한 지상에서의 물리탐사적인 확인을 위하여 쌍극자 전극배열을 이용한 전기비저항탐사를 반원형 선구조를 가로지르는 1Km 길이의 1개측선과 우도 중앙부를 동-서로 가로지르는 1Km 길이의 1개측선에서 각각 수행하였다. 측정간격(a)는 50m, 전류전극쌍과 전위전극쌍 간의 간격(n)은 10까지 전개하여 ABEM 사의 전비저항탐사기(모델 terrameter SAS300)로 자료취득이 이루어졌다. 그림 13은 반원형 선구조를 가로지르는 측선에서의 탐사결과로서 a)는 현장취득자료로서의 외견비저항단면도이고 c)는 2차원 수치역산 결과로 얻은 진비저항단면도이며, b)는 역산결과인 진비저항 분포로부터 이론적 계산을 통하여 얻은 외견비저항 단면도이다. 그림 a), b)의 유사성은 수치역산결과의 신뢰성을 입증하고 있다.

측선 하부의 진비저항 분포특성을 보면, 측정 #8을 경계로 하여 좌측(서측)에는 심도 약 100m 하부에 저비저항대가 분포하는 반면 우측(동측)에는 1800 ohm.m 이상의 고비저항대가 지표로부터 심도 250m 까지 지속되고 있음을 볼 수 있어서 측정 #8 직하부가 지질학적 구조선, 즉 계수형 지형자료와 항공자력탐사자료에서의 반원형 구조선이 측정 #8을 통과하고 있을 가능성을 높혀주고 있으며 특히 측정 #8의 좌측이 우측보다 저비저항으로 나타나는 것은 이구조선의 좌측부가 함몰대일 가능성이 높다는 것을 시사하고 있다. 우도에서의 탐사결과도 지질구조선의 실존 가능성을 높히고 있다.

\* 본 내용 중에는 상공자원부에서 시행한 대체에너지 기술개발사업 결과의 일부가 인용되어 있습니다.

## 참고문헌

- 1) 구자학, 박영수, 임무택, 서상용, 최종호, 1986, 항공방사능 및 자력탐사 연구, 한국동력자원연구소 연구보고, KR-86-3, p.7-20.
- 2) 농업진흥공사, 1971, 제주도 지하수보고서.
- 3) 농업진흥공사, 1973, 제주도 지하수 개발보고서.
- 4) 농수산부, 농업진흥공사, 1985, 제주도 지하수 개발과 현황
- 5) 농림수산부, 제주도, 농업진흥공사, 1989, 제주도 지하수장기개발계획 조사보고서, 396p.
- 6) 이문원, 손인석, 1983, 제주도는 어떻게 만들어진 섬일까 -제주화산도의 지질과 암석-, 도서출판 춘광



- 7) 이상규, 정성남, 김호원, 김동준, 외, 1994, 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안 연구 (I), 상공자원부, 235p.
- 8) 이상규, 조진동, 구성본, 1988, 해수오염조사를 위한 TEM sounding의 시험적용, 지질학회지, v.24, p.71-81.
- 9) 이상규, 황학수, 1990, 동위치 송·수신루프 배열에 의한 과도전자파 수직탐사자료의 비선형 최소자승 역해, 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-89-2A-2, p.47-74.
- 10) 정승환, 조진동, 이상규, 최종호, 구성본, 1992, 성정작목 종합시범단지 심층 지하수 물리탐사(북제주 지구), 한국자원연구소 용역보고서.
- 11) 조진동, 구성본, 성낙훈, 성기성, 1989, 제주지역 해수영향권 조사연구(II), 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-88-1B, p.315-348.
- 12) 황재하, 이병주, 송교영, 1994, 제주도의 제4기 지구조운동, 대한지질학회지, in press.
- 13) Zodhy, A. A. R. and Jackson, D. B., 1969, Application of deep electrical sounding for groundwater exploration in Hawaii, Geophysics, v.34, p.584-600.