

제주도 동부지역의 수문지질에 관한 연구(II)

고기원* · 박윤석* · 박원배** · 문덕철**

*제주도광역수자원관리본부 수자원연구실

**제주발전연구원

요 약 문

제주도 동부지역에 설치한 심부관측정과 지하수 개발공에 대한 시추코아 지질검층, EC 및 수온검층, 지하수위 관측, 수질조사 등의 자료를 기초로 이 지역의 지하지질 분포와 지하수 부존특성에 대해 해석을 실시하였다. 제주도 동부 해발 200m 이하지역은 평균 해수면 하 90~120m 깊이까지 투수성이 좋은 용암류 누층으로 이뤄져 있으며, 일부지역에서는 서귀포층 상부에 유리쇄설성 각력암층(hyaloclastite breccia)이 두껍게 분포하고 있어 담수지하수의 확산과 해수의 유입이 잘 일어날 수 있는 지질상태를 이루고 있다. 특히 서귀포층은 G-H비에 의한 담·염수 경계면 분포 깊이보다 깊은 위치에 존재하고 있어 제주도 서부지역에서처럼 담수지하수를 저류 해주는 역할을 기대하기 어려운 것으로 판단된다.

제주도 동부지역 지하수체는 수직적으로 담수지하수, 저염지하수, 염수지하수로 구분할 수 있으며, Ghyben-Herzberg 원리가 적용되는 담수렌즈(기저지하수) 두께는 일반적인 G-H비 보다 훨씬 얇은 평균 1:20의 비율을 나타냈다. 담수렌즈는 대체로 해안으로부터 내륙쪽 8km 지역까지 광범위하게 발달하고 있으며, 담수렌즈 포장량은 822백만톤(공극율 5%)에서 1,970백만톤(공극율 12%)의 범위로 추정되었다.

Key word : 서귀포층, 담·염수 경계면, 담수렌즈 포장량

I. 서 론

수문지질학적 측면에서 제주도 동부지역은 특이한 지역이다. 강우량이 많음에도 불구하고 내륙 지역에서 해안까지 이어지는 하천이 없으며, 분석구의 분포 밀도도 도내에서 가장 높다. 특히, 오래전부터 지하수 중의 염분함량이 높아 이용에 큰 불편을 겪어 왔으며, 담·염수 경계면을 갖는 기저지하수체가 도내에서 가장 광범위하게 분포하고 있다. 또한, 해안가의 모래가 바람에 의해 내륙으로 운반·퇴적된 사구층도 내륙 깊숙한 곳까지 분포하고 있으며, 지형경사도 비교적 완만한 상태를 이루고 있다. 이러한 수문지질학적 특징 중에서도 지하수 중의 염분함량이 높은 현상은 연구자들로 하여금 관심의 대상이 되어 왔으며 다양한 원인분석이 이루어졌다(최순학, 1986, 1988, 1989, 1991; Choi et al., 1991; 윤정수, 1986; 한국동력자원연구소, 1987; 농업진흥공사, 1989; 고기원, 1991; 고기원 외, 1993; 고기원외 2인, 1994; 한국수자원공사, 1993; 제주도, 2001, 2002; 박윤석외 3인, 2002 등). 그러나, 이들 연구의 대부분은 한계성 때문에 수문지질학적 측면에서 충분한 연구가 이루어졌다고 보기는 어렵다. 즉, 조사대상 관정 수 및 착정깊이 부족으로 인하여 담·염수 경계면 형성 및 변동현상에 대한 연구가 곤란하였을 뿐만 아니라, 지하수의 수직적인 부존상태를 비롯하여 지하심부의 지질분포상태에 대한 확인도 이루어지지 못하였다. 아울러, 기저지하수체의 내륙 쪽 분포경계 설정 및 담수렌즈(G-H렌즈)의 포장량 산정도 곤란하였다.

본 연구는 2002년 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회시 박윤석외 3인에 의해 발표된 “제주도 동부지역 수문지질에 관한 연구(I)”에 뒤이은 연구로서 2001년부터 제주도에서 추진하고 있는 심부관측정 설치 및 조사사업과 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사에서 얻어진 자료

를 토대로 제주도 동부지역의 수문지질과 지하수 부존특성을 제시하는데 중점을 두었다.

II. 조사지역 및 연구방법

본 연구는 제주도에서 2001년부터 설치한 심부관측정 8개소와 농업기반공사(1971~2002) 및 고기원(미발표 자료)에 의해 실시된 120공의 동부지역 시추코아 지질검층자료를 활용하여 이 지역 용암류의 수직적인 분포상태 및 구성비율, 용암류 사이에 협재된 퇴적층의 두께, 서귀포층의 포착심도 및 두께, U층의 포착심도 등 전반적인 지하지질구조를 해석하였다. 지표를 이루고 있는 지질의 수문지질학적 특성을 파악하기 위하여 축적 1/5만 제주도 지질도상의 암석을 수문지질단위로 재분류하고, GIS를 이용하여 공간적 분포 및 면적을 분석하였다. 아울러, 각 관측정에서의 심도별 수온 및 전기전도도 검층자료를 활용하여 담·염수 경계면을 갖는 기저지하수체의 내륙 쪽 분포경계, 지하수의 수직적 부존상태, G-H렌즈(담수렌즈)의 포장량 등을 산정하였다.

III. 조사결과

1. 조사지역의 수문지질

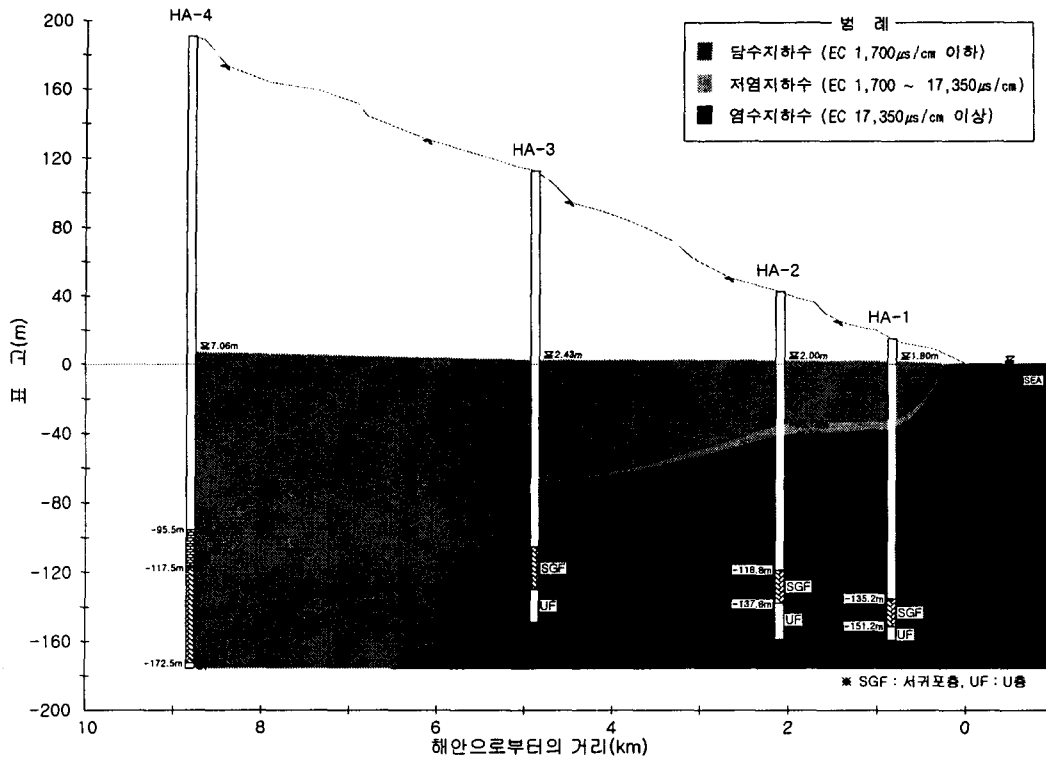
- 한동-송당지구 4개공과 온평-궁대약지구 4공 등 8개소에서 진행된 심부시추공에 대한 지질검층자료를 근거로 용암류 매수를 분석한 결과, 한동-송당지구의 경우 최소 15회, 최대 30회를 나타내었고, 온평-궁대약지구는 최소 17회, 최대 20회로 조사되었다. 따라서, 동부지역 해발 200m 이하지역에서의 용암류 분출횟수는 약 20회 정도 되고 있음을 알 수 있다.
- 박기화(2002)에 의해 수정·보완된 축적 1/5만 제주도 지질도를 근거로 동부지역 지표지질을 파호에호에(pahoehoe) 용암류, 아아(aa) 용암류, 분석구, 퇴적암류의 4가지 유형으로 분류한 결과, 제주도 동부지역(제주·성산·표선도폭)에서 가장 넓은 면적을 점유하고 있는 것은 아아 용암류로서 약 552km² 지역을 피복하고 있으며, 파호에호에 용암류는 약 237km², 분석구는 약 62km², 퇴적암류(웅회구 퇴적층, 역암층, 사구층 등)는 약 5km²를 점유하고 있는 것으로 분석되었다. 파호에호에 용암류를 비롯하여 아아 용암류와 분석구 모두가 투수성이 좋음을 고려하면 제주도 동부지역 지표의 99.4%에 달하는 거의 대부분의 지역은 빗물의 침투가 잘 이루어지는 지질로 구성되어 있다고 할 수 있다
- 제주도 동부지역에서 서귀포층이 포착되었거나 관통한 시추공의 자료를 활용하여 평균 해수면 기준의 서귀포층 포착심도 분포를 모델링 한 결과, 김녕에서 성산에 이르는 동부지역의 해안으로부터 9~12km 사이 지역은 평균 해수면 하 90~120m 범위에서 서귀포층이 포착되고 있다. 또한 EL. -60m 등심선은 조천읍 조천리에서 성산읍 난산리 쪽으로 이어지다 해안 가까이에 이르러 표선과 남원읍 태흥리 쪽으로 만곡되는 모습을 보여주고 있다. 동부지역에서 서귀포층은 해안에서 내륙 쪽으로 거리가 멀어짐에 따라 분포심도가 점진적으로 상승하는 경향을 보여주고 있는데, 대체로 해안에서 약 18km 떨어진 조천읍 대천동 주변(해발 300m)에서 평균 해수면 근처에 위치할 것으로 추정된다. 동부지역에서 서귀포층은 서부지역과 비교할 때, 대략 2~3배 정도 깊은 위치에 분포하고 있다.
- 용암류의 수직적인 구성비율은 평균 96%를 나타내어 동부지역 지하는 거의 대부분이 용암류 누층으로 이뤄져 있음을 알 수 있다. 특히, 조천에서 구좌에 이르는 지역은 용암류 구성비율이 98% 이상을 보이고 있는 반면, 성산읍 신양리에서 종달리에 이르는 비교적 좁은 지역은 90~92%로 비교적 낮은 비율을 보이고 있는데, 이는 두산봉 및 일출봉 형성과 관련된 웅회질 퇴적층이 용암류 사이에 협재되어 있는 데서 비롯된 것으로 해석된다.
- 용암류 사이에 협재돼 있는 이암, 역암, 사암 등의 퇴적층의 두께를 합산한 결과, 동부지역의 퇴적층 평균두께는 6.7m로 분석되었고, 지역별로는 구좌지역이 평균 3m이고 성산지역

- 평균 11m, 표선지역 평균 6m, 조천지역 평균 7m로 분석되었다.
- 동부지역은 해안으로부터 9~12km에 이르는 지역이 투수성이 좋은 용암류가 누층을 이루고 있으며, 평균 해수면 하 90m 이하까지 깊숙히 용암누층이 분포하고 있으므로 인하여 지하수가 저류하거나 해수의 압력에 의해 바닷물이 내륙 쪽으로 유입할 수 있는 공극 또는 틈이 잘 발달되어 있다고 할 수 있다. 특히, 서귀포층 상부에는 뜨거운 용암이 바다로 흘러들어 갈 때 형성된 유리쇄설성 각력암층(hyaloclastite breccia)이 부분적으로 발달하고 있는 것도 염수 지하수의 부존을 용이하게 해주는 요인으로 해석된다.

2. 지하수 부존특성

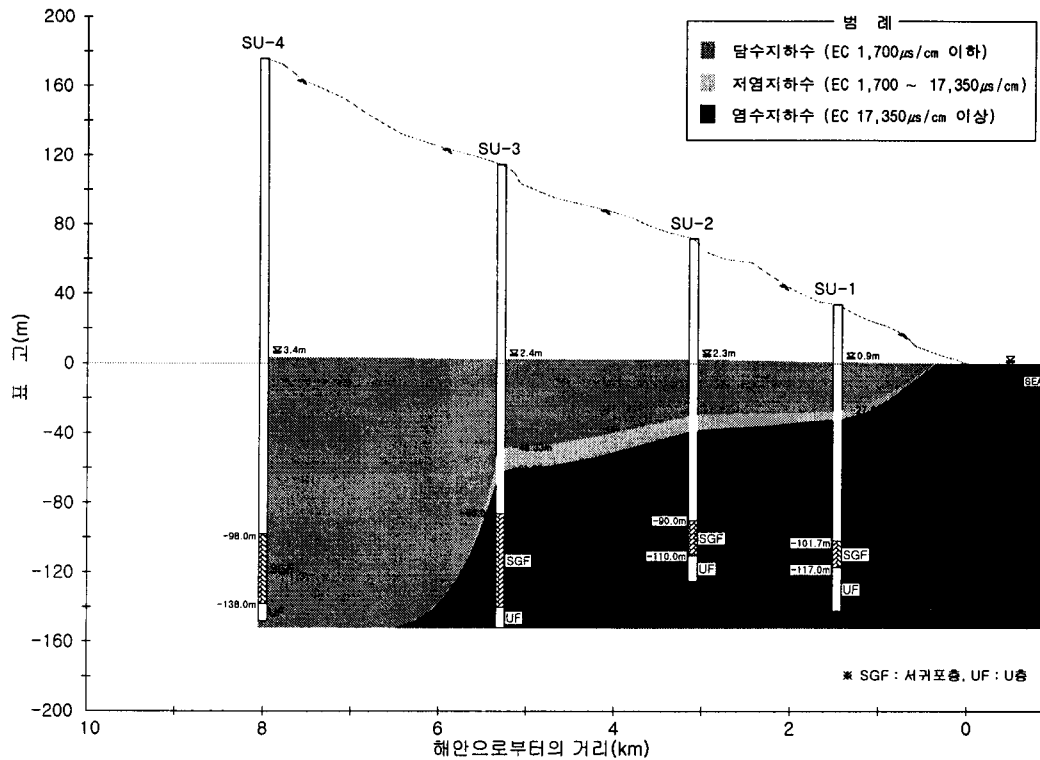
① 지하수의 수직적 구분

- 구좌읍 한동-송당지구와 온평-궁대약지구, 신촌·조천·구좌1·태흥·신흥 영구관측정을 대상으로 수직적인 전기전도도의 변화를 조사한 결과, 동부지역 지하수체는 크게 담수지하수체, 저염지하수체, 염수지하수체의 3가지 유형의 지하수로 수직적인 구분이 가능하였다.
- 해안선에서 약 0.9km 내륙 쪽에 위치한 한동1호공에서 담수지하수는 평균 해수면 하 33.6m 까지 형성되어 있으나 약 2.5km 내륙 쪽에 위치한 한동2호공에서는 평균 해수면 하 35.3m로 다소 두터워지며, 내륙 쪽 5.2km 지점에 위치한 한동3호공에서는 평균 해수면 하 68.2m를 나타내어 내륙 쪽으로 거리가 멀어짐에 따라 담수 지하수체의 두께가 두꺼워지는 현상을 나타내었다. 온평-궁대약지구에서도 1호공(해안에서의 거리 1.4km)의 경우는 평균 해수면 하 26.84m, 2호공(해안에서의 거리 3.2km)은 평균 해수면 하 28.95m, 3호공(해안에서의 거리 5.5km)은 48.34m를 각각 나타내었다. 또한, 신촌영구정(해안에서의 거리 0.32km)의 경우는 23.40m이고 신흥영구정(해안에서의 거리 0.95km)은 42.15m, 태흥영구정(해안에서의 거리 0.28km)은 38.60m의 담수 지하수체 두께를 나타냈다. 그러나, 한동4호공(해안에서의 거리 8.8km)과 수산4호공(해안에서의 거리 8.1km)에서는 담·염수 경계면을 갖는 지하수체 즉, “담수렌즈(freshwater lens)”는 형성되지 않고 자연수위에서 공저까지 담수지하수로 이루어져 있다.



(그림 1) 제주도 동부지역 한동-송당을 잇는 단면상의 지하수의 수직적 분포도

- 제주도 동부지역의 담수렌즈의 경우 일반적인 G-H비가 적용되지 않고 있는데, 한동1호 공의 경우, 해수면 상부에 위치하는 수위가 1.8m이기 때문에 평균 해수면 하 72m까지 담수지하수체가 형성되어야 하지만 본 연구에서 관측된 값은 평균 해수면 하 33.18m 깊이까지만 담수렌즈가 형성되어 있어 약 38m의 차이를 보이고 있다. 이처럼, 제주도 동부지역에서 담수렌즈가 형성되고 있는 수직적 비율(G-H비)은 최소 1 : 13, 최대 1 : 31, 평균 1 : 19의 값을 나타내어 일반적인 G-H비에 의한 담수렌즈 보다 두께가 훨씬 얇게 형성되고 있다.



(그림 2) 제주도 동부지역 온평-궁대약을 잇는 단면상의 지하수의 수직적 분포도

- 동부지역에 담수렌즈 두께가 얇게 형성되는 주된 원인은 자연수위 하부에 분포하는 저투수성의 서귀포층 분포심도와 밀접한 관련성이 있는 것으로 판단된다. 즉, 한동 1·2·3호 공에서 서귀포층은 각각 El. -135.2m, El. -118.8m, El. -105.3m에 분포하고 있으며, 수산 1·2·3호공에서는 각각 El. -101.7m, El. -90m, El. -86m에 분포하고 있어서 이론적인 G-H비에 의해 담수렌즈가 형성될 수 있는 깊이 이하에 서귀포층이 분포하므로써 저투수성 지층으로서의 역할을 하지 못하고 있다.
 - 담수지하수 하부에 존재하는 저염지하수는 한동-송당지구 경우 1.4~6.4m의 두께를 나타냈고, 온평-궁대약지구의 경우는 4.4~13.06m의 범위를 나타냈는데 한동-송당지구에서는 해안에서 내륙 쪽으로 향함에 따라 두께가 감소하는 경향을 나타낸 반면, 온평-궁대약지구에서는 반대의 현상을 나타내 대조를 보였다.
 - 염지하수체의 분포 깊이는 한동-송당지구의 경우 해수면 하 38~69m 범위이고, 온평-궁대약지구에서는 31~61m 범위이다.
- ② 기저지하수의 분포 경계
- 본 연구에서 시추조사를 비롯하여 담·염수 경계면조사와 지질검층, 동부지역 120개 시추공에 대한 지질검층 자료 및 지하수 관정에 대한 수질·수위조사 자료 등에 대한 종합적인 검토를 통하여 기저지하수(담·염수 경계면을 갖는 지하수체 또는 담수렌즈)의 내륙 쪽 경계를 검토한 결과, 대체로 4m 등수위선을 기저지하수체의 내륙 쪽 경계로 설정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.
 - 동부지역에서 기저지하수체의 내륙 쪽 경계는 한동3호공 및 수산3호공이 위치한 지점보다 다소 내륙 쪽인 해안으로부터 최대 7~8km 지역에 이르는 것으로 판단되는데, 이 경계는 1993년 한국수자원공사가 제시한 기저지하수 경계와 거의 유사하며, 분포지역 면적은 332.9km² 이다.

③ 기저지하수 포장량(담수렌즈 포장량)

- 동부지역에 설치된 심부 관측정에서 측정된 담수지하수 즉, 담수렌즈의 실측 두께자료를 이용하여 기저지하수 부존지역 내의 포장량(체적)을 산출한 결과, 공극율을 5% 적용했을 때 최소 602백만m³, 최대 822백만m³, 평균 734백만m³으로 산정되었다. 해수면 상부의 담수 포장량은 25~39백만m³의 범위로서 해수면 하부 포장량(577~783백만m³)의 4~5%에 불과하였다. 또한, 공극율을 12% 적용했을 때, 담수 포장량은 1,442~1,970백만m³범위로 산정되었다.

※ 참고 문헌

1. 고기원, “제주도 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성”, 부산대학교 대학원 박사학위 논문, (1997)
2. 고기원, “제주도 서귀포층의 지하분포상태와 지하수와의 관계”, 지질학회지, 제27권 5호, (1991)
3. 고기원, 박윤석, 김태윤, 1998, 제주도 서북부 귀덕리 해안지역에 발달한 심부 담수대수층에 관한 연구, 제주발전연구 제2호, (1998)
4. Wentworth, C. K., The specific gravity of sea water and the Ghyben- Herzberg ratio at Honolulu, Univ. of Hawaii, Occas. Paper 39, (1939)
5. Meinzer, O. E., Ground water in the Hawaiian Islands, in Stearns, H. T., and Clark, W. O., Geology and water resources of the Kau District, hawaii(including parts of Kilauea and Mauna Loa Volcanoes): U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 616, (1930)
6. Oki, D.S., Geohydrology of the central Oahu, Hawaii, ground-water flow system and numerical simulation of additional pumping, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 97-4276, (1998)