

대수층을 통한 해수침투의 정량적 평가를 위한 전기비저항 탐사 적용

송성호*, 이규상, 김진성, 성백옥, 우명하
(농업기반공사 농어촌연구원; shsong@karico.co.kr)
설민구, 이병호 (농업기반공사 환경지질사업처)
권병두 (서울대학교 지구과학교육과)

초록

변산반도 서부 해안지역의 소규모 유역에 대하여 대수층을 통한 해수침투의 범위를 공간적으로 규명하기 위하여, 시추자료를 포함한 전기비저항 탐사와 지하수의 수질분석을 실시하였다. 전기비저항 탐사는 다층 구조로 되어있는 대수층 내 지하수의 수질 변화 특성을 효과적으로 탐지해 낼 수 있는 수직탐사법을 이용하였으며, 탐사결과 겹보기비저항 곡선은 H type에 해당함을 알았다. 시추에 의해 3층 구조로 밝혀진 연구지역에 대하여 총 30 지점에 대한 H type 수직탐사 자료의 1차원 역산결과, 중간층과 상/하부층의 비저항 크기 차이가 크게 나타남에 따라 이 연구에서는 고전도도 지역, 중간지역, 저전도도지역 등 3가지의 영역으로 구분하였다. 15개 지점의 천부 지하수 관정에서 채취된 지하수 시료 분석결과를 TDS에 대한 HCO₃/Cl과 Ca/Na 몰비로 도시하였는데, 그래프의 기울기에 따라 크게 2가지 그룹으로 구분되었다. 수직탐사의 3가지 영역과 지하수 수질 분석에 의한 2가지 그룹을 비교한 결과 낮은 농도의 HCO₃/Cl과 Ca/Na를 나타내는 관정은 고전도도 지역에 위치하며, 높은 농도의 HCO₃/Cl과 Ca/Na를 나타내는 관정은 저전도도 지역에 위치하는 것으로 나타났다. 따라서 이 연구에서 제시한 바와 같이 전기비저항 수직탐사 결과와 지하수 수질분석 결과를 복합 해석하는 경우 시추자료가 제한적인 해안지역 대수층을 통한 해수침투 범위를 효과적으로 규명할 수 있는 것으로 밝혀졌다.

서론

해수는 해안지역의 담수를 오염시킬 수 있는 대표적인 오염원이다. 이러한 오염은 대수층내에서 담수체와 해수체가 만나는 경우 발생되는데, 대개의 경우 관정을 개발하여 지하수 시료를 정기적으로 분석하여 오염 여부를 확인하는 것이 일반적이다. 일반적으로 대수층에서 해수침투에 의해 높은 염분이 관측되는 경우, 지하수에서는 총고형

물질 (Total Dissolved Solids, TDS)과 주요이온 농도가 높게 나타난다 (Richter and Kreitler, 1993).

해안변의 대수층에서 지하수위는 조석의 영향을 반영하는데 (Todd, 1980), 해안선으로부터 멀어지는 경우에는 변동폭이 작아지며, 시간지연은 증가하는 양상을 보여준다. 따라서 해수침투나 조석변화에 따른 지하수위 및 수질 변화를 분석하기 위해서는 장기간의 관측을 위한 측정 시스템이 필요하다. 그러나 관측정의 효과적인 위치 선정을 위해서는 해수침투 범위 파악이 선행되어야 한다.

따라서 해수빼기 파악을 위한 여러지점의 시추를 피하기 위해서는 전기비저항 탐사와 전자기 탐사법 등 지구물리 탐사법이 현장에서 적용이 필요한데, 이 중 전기비저항 탐사는 지표면에 전극을 설치하여 지층의 전기전도도 변화를 측정하는데 간편하고 유용한 방법이다. 전기비저항 탐사법 중 1차원 탐사법인 수직탐사는 2차원 탐사법에 비해 신호대 잡음비가 높아 특히 해수침투 지역을 탐사하는데 적합하다. 그러나 탐사 결과는 지층을 구성하는 매질이나 간극수 등의 영향을 복합적으로 반영하므로, 이 연구에서는 지하수 수질분석 결과를 병행하였다.

이 연구의 목적은 해안지역 소유역의 대수층을 통한 해수침투 범위 파악을 위하여 제한된 시추자료를 이용한 전기비저항 수직탐사와 지하수 수질 분석 자료의 적용성을 밝히는 것으로, 7공의 시추, 30 지점의 수직탐사 및 15공의 지하수 수질 분석을 수행하였다. 또한 대수층의 균질성과 이방성을 확인하기 위하여 2곳의 장기 관측망에서의 지하수위와 비전도도 (specific conductance) 관측 결과를 이용하였다.

수리지질 현황

연구지역은 변산반도 서측 해안지역으로 주변의 소규모 산지로 둘러싸인 약 4 km²의 평지 지역이다 (Fig. 1). 이 지역의 수리지질 구조는 포토를 포함한 충적층, 풍화대 및 기반암 등 3층으로 구성되어 있으며, 상부 두 층은 지하수를 함유하고 있는 대수층이다. 기반암은 중생대 퇴적암과 이를 관입한 화산암으로 구성된다.

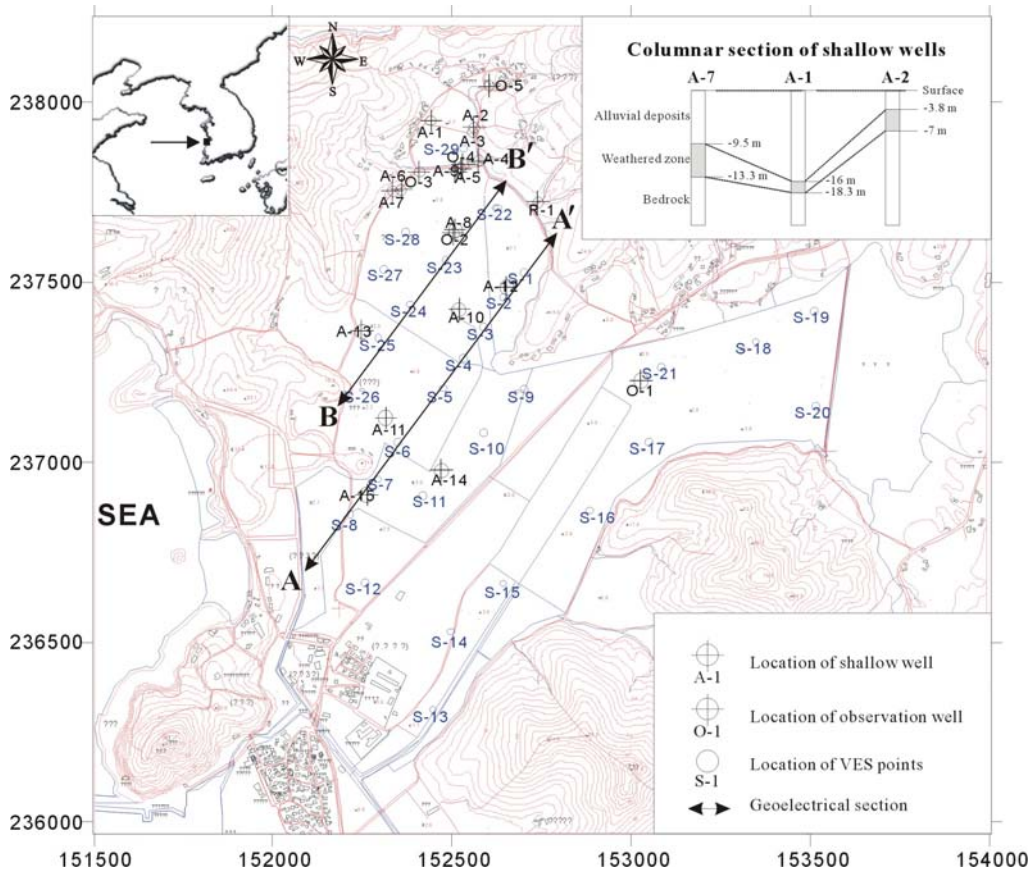


Fig. 1. Location map with the columnar section of shallow wells. Coordinates along axis are TM in meter.

15개의 천부 지하수관정 (A-1~A-15)의 심도는 4.5~18.3 m 범위로, 충적층과 풍화대 시료 분석 결과를 USDA 분류기준에 도시하면 sandy loam, loam, silty loam 및 silty clay loam에 해당된다 (USDI, 1974).

해안지역 대수층의 지하수위 변동은 조석의 영향을 받는다. 따라서 이 연구에서는 지하수위 및 비전도도와 같은 시계열 (time series) 자료를 시간 영역에서 분석하였는데, 심도 60 m의 두 곳의 관측정 (O-1과 O-2)에 대하여 지하수 이용량이 적은 2004년 12월의 자료를 이용하였다. Fig. 2(a)는 약 700 m 떨어진 관측정 두 곳에서의 지하수위 변화로 유사한 변동 양상을 보여주며, 12월 4일의 강수에 대한 지하수위 반응도 같은 결과를 보여주므로, 이 지역의 대수층이 균질한 것으로 판단된다. Fig. 2(b)는 O-2 관측

정의 지하수위와 비전도도의 변화 경향을 도시한 것으로 두 요소 사이에 직접적인 상관성이 있는 것으로 나타났다.

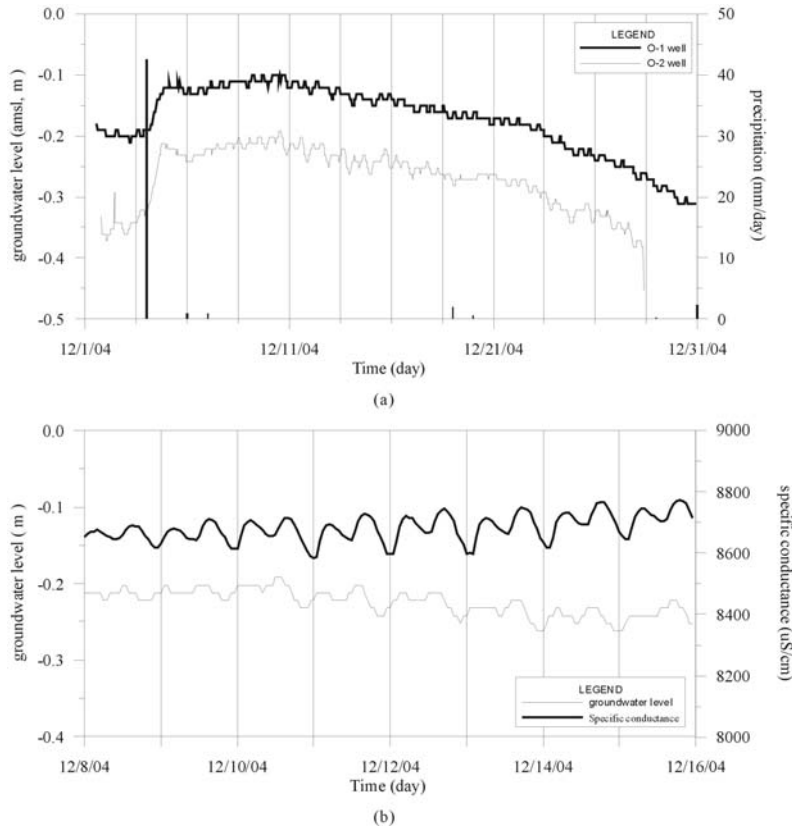


Fig. 2. (a) Water level fluctuations in O-1 and O-2 observation wells with precipitation records during Dec. 2004. Solid lines indicate the amounts of precipitation. (b) Typical relationship between groundwater level fluctuation and specific conductance variation at O-2 observation well.

지하수위와 비전도도의 변화 양상을 분석하기 위하여 교차상관 분석을 실시하였다. 교차상관분석은 입력변수에 따른 출력값 사이의 상관성을 분석하는 기법으로, -1과 1 사이의 값을 가지며, 상관성이 커질수록 값이 증가하는 특징이 있다 (Yaffee and

McGee, 2000). Fig. 3에 의하면 지하수위는 시간지연 없이 조석에 큰 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 반면에 비전도도는 약 2시간의 지연을 가지며 조석에 상관성이 있는 것으로 나타났다. 이때 교차상관계수는 각각 0.3421과 0.6766이며, 이 결과에 따르면 이 지역의 지하수위는 조석에 직접적으로 영향을 받고 있는 것으로 나타났다.

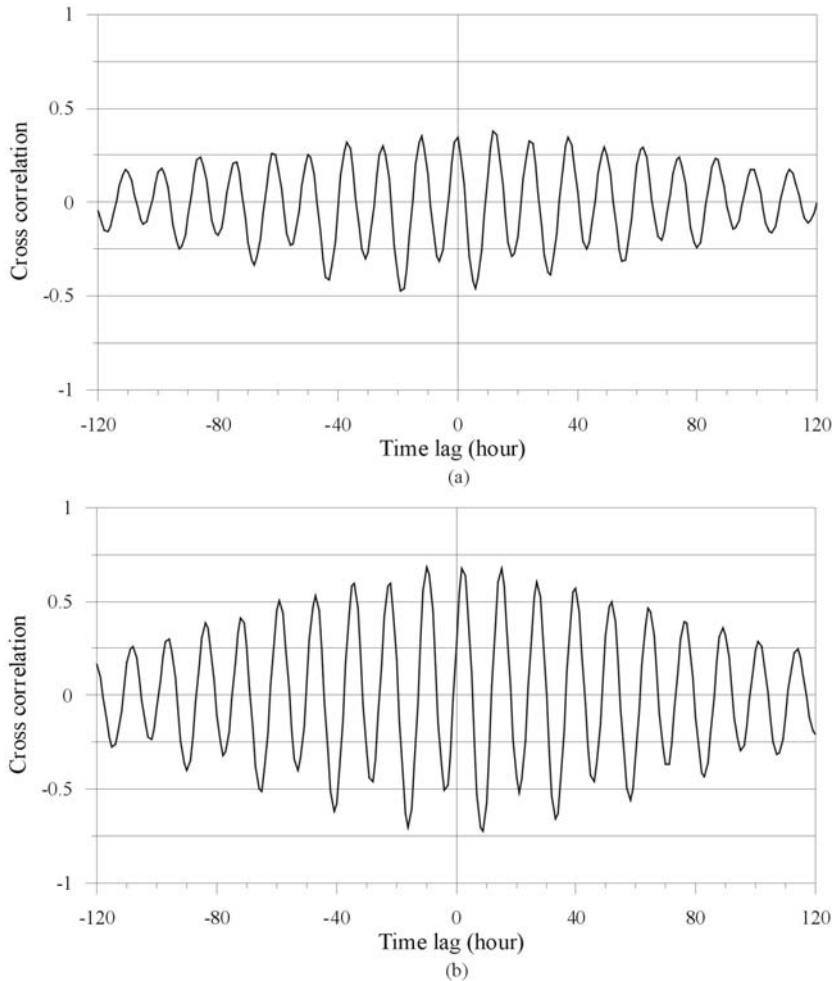


Figure 3. Cross correlation results at O-2 observation well during December. (a) Groundwater level with tide, (b) Specific conductance with tide.

전기비저항 탐사 해석

포화된 지층에서 전류의 흐름은 주로 공극율, 공극의 연결성 (connectivity) 및 공극수의 비전도도 등 세 가지 요소에 지배를 받는다 (Telford et al., 1990). 그러므로 지하수의 화학적 특성은 특히 지층을 통한 전류의 흐름에 매우 중요한 요인이다. 지층의 전기전도도는 이러한 지하수의 비전도도 (비저항의 역수)로 표현된다. 따라서 공극율, 수리전도도 및 지하수의 염도가 증가하는 경우 비저항은 감소하는 경향이 나타난다. 이 연구에서는 균등하게 분포시킨 30 지점에 대하여 술럼버저 배열의 수직탐사를 이용하였으며, 최대 전류간격 (AB/2)은 50m로 설정하였다. 또한 해수짜기의 단면을 분석하기 위하여 두 축선에 대하여 일렬로 배열하여 탐사하였다 (Fig. 1).

겉보기비저항은 전류에 대한 전위의 비를 거리계수에 곱해 얻어지므로, 다층구조 지층의 전기전도도의 구조를 대표할 수 있다. 일반적으로 3층 구조의 겉보기비저항의 비저항 곡선은 각 지층간의 비저항 차이에 따라 K, H, A 및 Q type 등 4가지로 구분된다 (Telford et al., 1990). 이들 가운데 H type은 $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ (ρ_1 은 최상부층의 겉보기비저항)의 구조를 가지며, AB/2가 증가함에 따라 겉보기비저항은 초기에 감소하다가 차차 증가하는 경향을 보여준다. 이는 중간층이 양질의 전도체 구실을 하기 때문이다. 수직탐사 자료는 각 지층의 비저항과 층두께를 정확하게 알 수 없으므로, 이 연구에서는 각 지층의 비저항값을 정량적으로 계산하기 위하여 감쇄최소자승법을 이용한 1차원 역산을 수행하였다.

Fig. 4는 30지점의 수직탐사 결과 겉보기비저항과 계산된 비저항을 AB/2에 대하여 도시한 결과로 전형적인 H type에 해당됨을 알 수 있다.

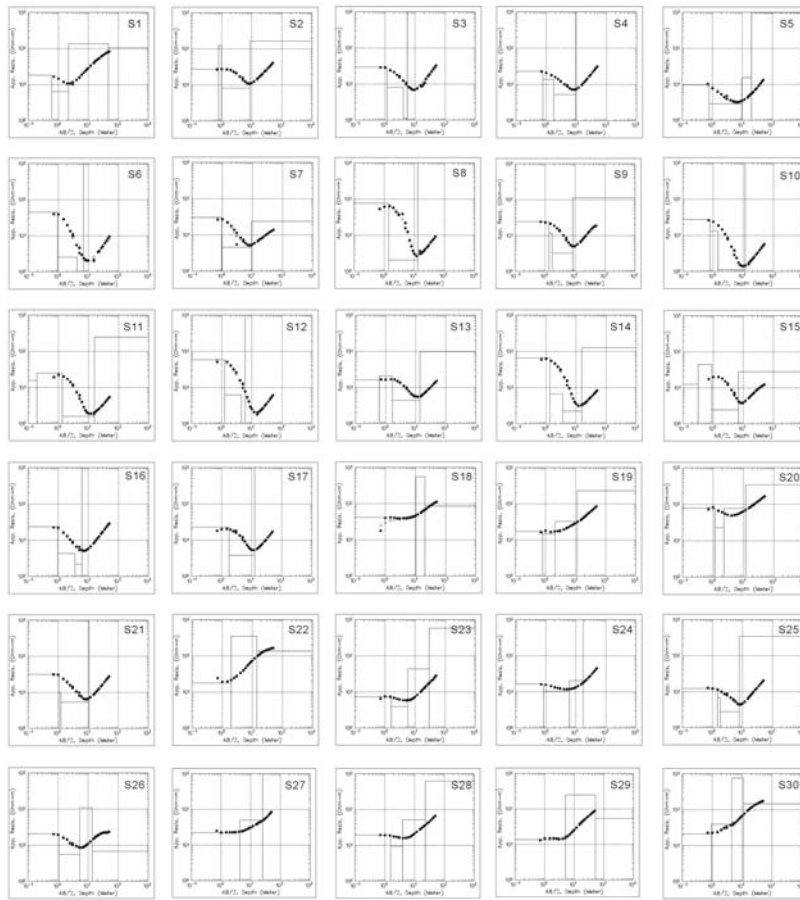


Fig. 4. Inversion results from VES data with Schlumberger array at 30 points.

각 지점의 곡선들은 2차원 역산 결과 얻어진 각 지층의 비저항 차이를 기초로 다시 3개의 그룹으로 구분되는데, type 1은 $\rho_3 \ll \rho_1$ 과 $\rho_2 < 5$ ohm-m에 해당된다. type 3은 $\rho_3 > \rho_1$ 과 $\rho_2 > 10$ ohm-m 조건을 갖고 AB/2가 증가함에 따라 겉보기비저항이 증가하는 경우에 해당된다. type 1과 3에 포함되는 지점들은 각 해안변과 내륙쪽에 해당된다. type 2는 앞서 두 그룹의 중간의 전이대로 해석된다.

Fig. 1에서의 AA'와 BB'에 해당하는 2차원 겉보기비저항 단면도에 의하면 5 ohm-m 이하의 비저항을 갖는 영역은 해안변에 위치하는데, 이는 대수층을 통한 해수침투의 영향으로 판단된다 (Fig. 5). 이에비해 S-1과 S-22 주변에 형성되는 저비저항과 고비저

항의 경계부는 해수침투에 의한 담수체와 해수체의 경계로 판단된다.

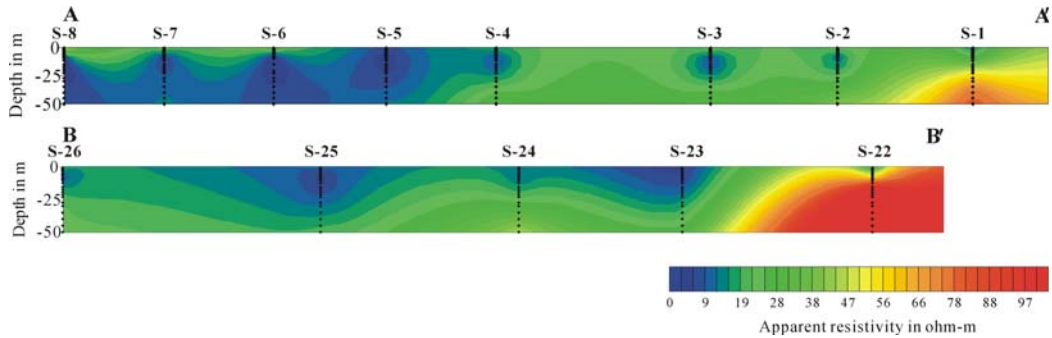


Fig. 5. Apparent resistivity profiles showing the low resistivity zones due to the intrusion of seawater wedge. S indicated the location of VES points and dots represent the spacing of current electrodes (AB/2).

지하수 시료의 화학분석 결과

일반적으로 해수침투에 의한 지하수의 염분 증가는 TDS와 주요이온 함량의 증가로 나타난다. 2005년 1월과 4월에 채취한 15개의 천부 지하수 시료에 대하여 화학분석을 수행한 결과 지하수의 전기전도도는 456~11,590 uS/cm (0.9~21.9 ohm-m) 범위로 높은 전도도 분포를 보여주고 있다.

Hem (1989)은 지하수 내에서 Na와 Cl은 해수체에서 우세한 이온이고, Ca와 HCO₃는 담수체에서 우세한 이온으로 제시한 바 있다. TDS에 대한 HCO₃/Cl 그래프는 2,000 mg/l 이상의 TDS 농도 범위에서는 기울기가 (-) 이지만, 1,000 mg/l 이하의 낮은 영역에서는 (+)의 기울기를 나타내고 있다 (Fig. 6(a)). 이는 지하수가 높은 TDS를 가지는 경우에는 Cl 이온이 상대적으로 높게 나타나는 것을 의미하며, 이러한 원인은 해수에 의한 영향인 것으로 해석된다. Fig. 6(b) 또한 앞선 그래프의 결과를 지시하고 있다. 따라서 두 가지의 기울기를 기초로 이 연구에서는 해수에 의한 영향을 직접 받는 지하수와 영향이 없는 지하수로 구분하였다.

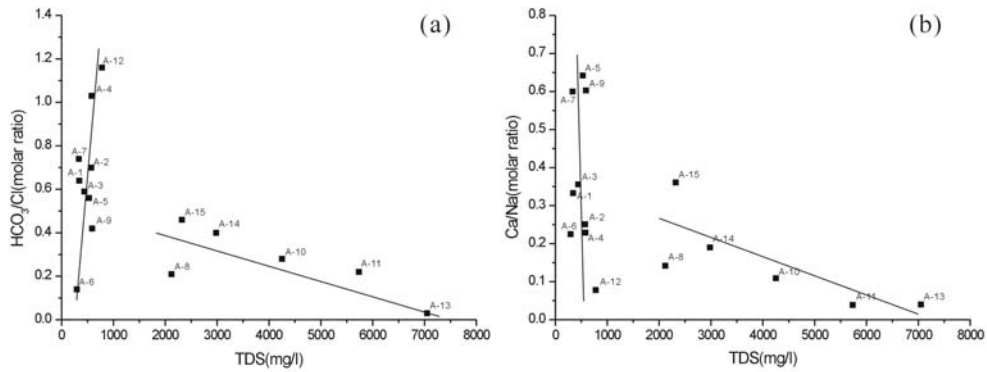


Figure 6. Molar ratios of (a) HCO_3/Cl and TDS concentration and (b) Ca/Na and TDS concentration.

결론

이 연구결과에 따르면 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전기비저항 수직탐사에서 얻어진 겉보기비저항과 계산된 비저항 값을 해안지역의 대수층에 적용한 결과 3가지의 곡선 type을 얻을 수 있었으며, 각 탐사위치를 mapping 하면 해수침투의 공간적인 범위를 확인할 수 있는 것으로 나타났다.

2. 지하수 시료의 화학분석 자료를 기초로 TDS와 Na/Ca 및 HCO_3/Cl 몰비를 도시한 결과 TDS가 높은 경우는 Ca 와 Cl 이 상대적으로 농집되며, 낮은 경우에는 Na 와 HCO_3 가 농집되는 것으로 나타남에 따라 지하수 채취 지점을 도시하면 해수침투의 범위를 파악하는데 유용한 것으로 나타났다.

3. 따라서 전기비저항 수직탐사와 지하수 화학분석 자료를 복합적으로 적용하는 경우 시추자료가 부족한 해안지역 소유역에 대하여 대수층을 통한 해수침투 범위의 공간적인 파악에 유용한 것으로 밝혀졌다.

사사

이 연구는 21세기 프론티어연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비 (과제번호 3-3-2)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

Hem, J.D. 1989. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural

water. U.S.G.S. Water-Supply Paper 2254, 117-120.

Richter, B.C., and C.W. Kreitler. 1993. Geochemical Techniques for Identifying Sources of Ground-Water Salinization. CRC Press, 258.

Telford, W.M., L.P. Geldart, and R.E. Sheriff. 1990. Applied geophysics, 2nd ed. Cambridge University Press.

Todd, D.K. 1980. Groundwater Hydrology, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc.

Yaffee, R., and M. McGee. 2000. Introduction to time series analysis and forecasting. Academic Press, Inc.

U.S. Department of the Interior. 1974. Earth manual, A water resources technical publication, 2nd ed. U.S. Government Printing Office. Washington. 14-17.

Zohdy, A.A.R. 1965. The auxiliary point method of electrical sounding interpretation and its relationship to the Dar Zarrouk parameter. Geophysics 30, 644-660.