

지구통계분석을 이용한 해수침투지역에서의 전기비저항탐사 자료 해석

송성호¹⁾, 이규상¹⁾, 용환호²⁾, 김진성¹⁾, 성백옥¹⁾, 우명하¹⁾

¹⁾농업기반공사 농어촌연구원, shsong@karico.co.kr

²⁾농업기반공사 환경지질사업처

Interpretation of Vertical Electrical Sounding Data in Saltwater Intrusion Area using Geostatistical Method

Sung-Ho Song¹⁾, Gyu-Sang Lee¹⁾, Hwan-Ho Yong²⁾, Jin-Sung Kim¹⁾,
Baek-Uk Seong¹⁾, Myung-Ha Woo¹⁾

¹⁾Rural Research Institute, KARICO

²⁾Office of Environmental Geology, KARICO

요약 : 해안지역 대수층을 통한 해수침투 현상의 규명은 지하수 분석법이 가장 효율적이지만, 관정수의 제한이나 시료 분석의 어려움으로 염분 농도의 지속적인 변화를 위한 모니터링에 제한이 있다. 따라서 이 연구에서는 해수침투 관측망이 위치한 전라북도 부안군 해안지역의 소유역에 대하여 전기비저항 수직탐사를 수행한 후 역산결과를 지구통계학적 방법을 이용하여 층별 등고선도를 작성하였으며, 각 층별 전기비저항 변화를 분석하여 해수침투의 공간분포를 확인코자 하였다. 수직탐사 자료의 1차원 역산 결과를 토대로 지구통계방법인 베리오그램을 이용하여 분석한 결과 기존의 수리지질학적 방법에서 얻어진 해수침투와 담수체의 경계부 확인에 유용한 것으로 밝혀졌다. 따라서 향후 이 연구결과를 기존의 광역지역에 대한 등가염분농도분포도 작성 방법에 적용할 경우 해수침투의 범위 확인 및 예측을 위한 정량적인 평가에 활용될 것으로 판단된다.

주요어 : 해안지역, 해수침투, 전기비저항 수직탐사, 지구통계방법, 베리오그램

Abstract : Although experimental analysis for groundwater sample at wells located systematically are very effective to delineate seawater intrusion region at coastal area, this method is restricted in few wells and time. We have conducted electrical resistivity sounding at 30 points in the study areas to analyze the region of seawater intrusion and found the boundary between salt wedge and fresh water lens from the analysis results of geostatistical method using variogram for one-dimensional inversion results. The methodology adopted in this study would be useful for finding the seawater intrusion region and evaluating quantitatively.

Keywords : coastal area, seawater intrusion, electrical resistivity sounding, geostatistical method, variogram

1. 서론

해안지역에서 대수층을 통한 해수침투 현상을 규명할 수 있는 가장 확실한 방법은 관정에서 지하수를 채취한 후 분석하는 것이 가장 효율적이지만, 염분의 농도가 높은 지역에서는 지하수 채수를 위한 관정 분포가 상대적으로 적어 해수침투 현상의 공간적인 분포 파악이 불가능하다. 또한 사용중인 관정의 경우도 시료 분석에 소모되는 시간 및 경제적인 부담으로 인하여 염분 농도의 지속적인 변화를 위한 모니터링이 불가능하므로, 시계열의 양상을 나타내고 있는 해수침투 현상을 규명하는데 한계가 있다.

이러한 문제점을 기초로 농업기반공사(2004)에서는 “해수침투조사사업”의 일환으로 우리나라 해안 및 도서지역에 대하여 연차적으로 해수침투 관측공을 설치하여 해수침투 양상을 지속적으로 모니터링하고 있다. 또한 한국지질자원연구원(2003)에서는 “해수침투 평가, 예측 및 방지기술 개발”의 일환으로 우리나라 서, 남해안 일대의 9개 해안지역에 대하여 전기비저항 수직탐사 자료를 이용한 등가염분농도분포도를 작성하여 제시한 바 있다. 그러나 이 경우는 광역지역에 대한 결과를 제시한 것으로 소유역별 수리지질학적 특성변화에 따른 해수침투의 공간적인 분포를 확인하는데 한계가 있을 것으로 판단된다. 물리탐사 기법을 이용하여 해안지역에 대한 해수침투 현상을 규명하기 위한 연구는 국내 외에서 지속적으로 진행되어 왔으며, 해수침투 현상은 탐사대상체의 전기전도도 변화를 발생시키기 때문에 전기 및 전자탐사 기법이 주로 이용되고 있다(Choudhury and Saha, 2004; Land *et al.*, 2004; Goldman *et al.*, 1991; Hwang *et al.*, 2004).

이 연구에서는 해수침투 현상을 시, 공간적으로 모니터링하고 있는 전라북도 부안군 변산면 격포리 해안지역의 소유역에 대하여 수행된 총 30지점에 대한 전기비저항 수직탐사의 역산결과를 지구통계학적 방법을 이용하여 분석하여 층별 심도에 대한 등고선도를 작성하였으며, 시추결과를 대비하여 분석기법의 정밀도를 검증하였다.

2. 전기비저항 수직탐사

전기비저항 수직탐사는 지표면의 한 점에서 그 하부의 심도에 따른 전기비저항의 변화를 측정하고, 그 결과를 다른 지질학적 정보 내지는 지식과 대비시켜 지하의 구조를 더욱 상세하게 파악하는 방법으로, 대지에 공급되는 전류가 전류전극 사이의 간격이 넓어질수록 더 깊은 곳을 통과하는 성질을 이용하는 전기비저항 탐사의 일종이다. 따라서 전류전극 간의 간격이 넓을수록 심부의 정보를 반영하게 된다. 이러한 수직탐사법은 전극 배열 방식에 따라 여러가지로 분류되지만, 이 연구에서는 슬림버저 배열법을 이용하였다.

이 연구에서 수직탐사는 대상지역 소유역의 평지 지역을 대상으로 총 30 지점을 균등하게 분포시켜 수행하였으며, 기존의 수리지질조사 결과 분석된 해수침투와 담수체의 수직적인 경계부를 확인하기 위하여 수직방향으로 4개 축선을 일렬로 배열하였다. 전류전극 간격($AB/2$)은 이 지역의 기반암 심도인 약 15m 내외를 감안하여 50m까지 설정하였다. 현장에서 획득된 자료의 해석을 위하여 지하를 수평 다층구조로 가정하고 감쇄최소자승법을 이용한 1차원 역산을 동원하였는데, 층은 4개로 가정하여 시추공 자료와 역산에 의한 이론치가 일치할 때까지 조건을 변화시키면서 반복적인 역산을 실시하였다.

수리지질학적 조사를 위해 설치한 8곳의 시추공내 지하수의 비전도도(specific conductance) 측정 결과에 의하면, 이 지역의 경우 서측 해안으로부터 동쪽 내륙방향으로 해수침투 현상이 관측되며, 두 지점에 설치된 해수침투 관측망의 시계열 측정 자료를 분석한 결과 해수침투의 변화가 지속적으로 관측되고 있다(Fig. 1). 앞서 분석된 총 30 지점의 전기비저항 수직탐사의 역산 결과를 단면도로 작성하여 분석한 결과 비전도도값

이 수~수십 mS/cm 이상으로 나타난 지역에 위치한 측점들의 경우 지표 아래 수 m 지점까지 전기비저항이 10 ohm-m 이하의 해수침투로 추정되는 지층이 분포하는 것으로 나타났으며, 상대적으로 내륙지역에 위치한 측점들의 경우는 수십 ohm-m 이상의 상대적 인 고비저항대가 분포하는 것으로 나타났다 (Fig. 2). 따라서 수직 탐사의 역산 결과 실제 해수침투의 공간적인 분포 범위를 확인하는데 유용함을 확인할 수 있다.

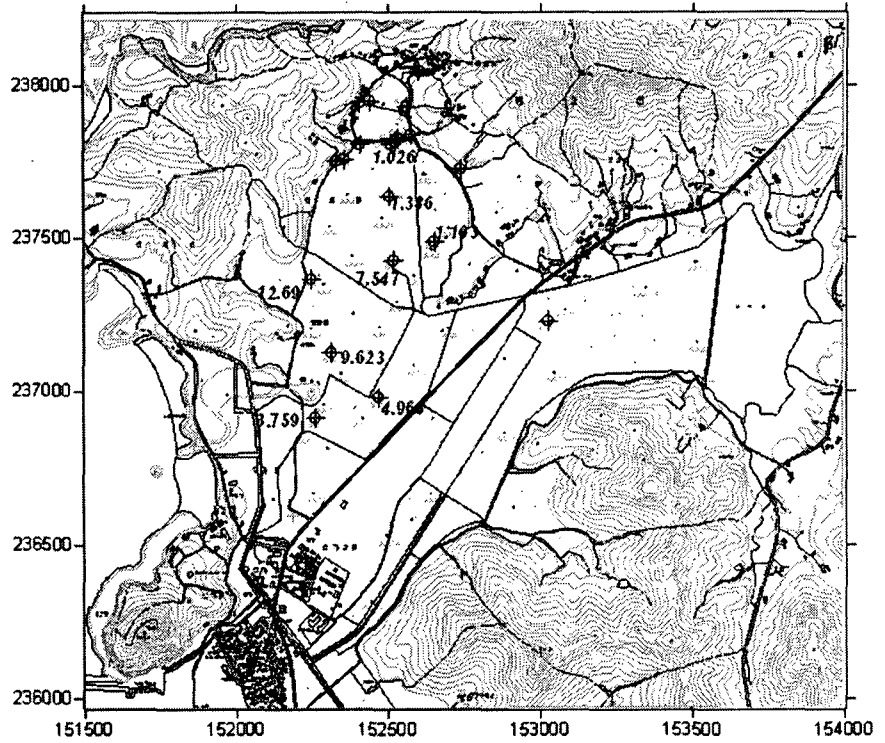


Fig. 1. Measuring results of specific conductance at eight wells in the study area.(unit of conductance : mS/cm)

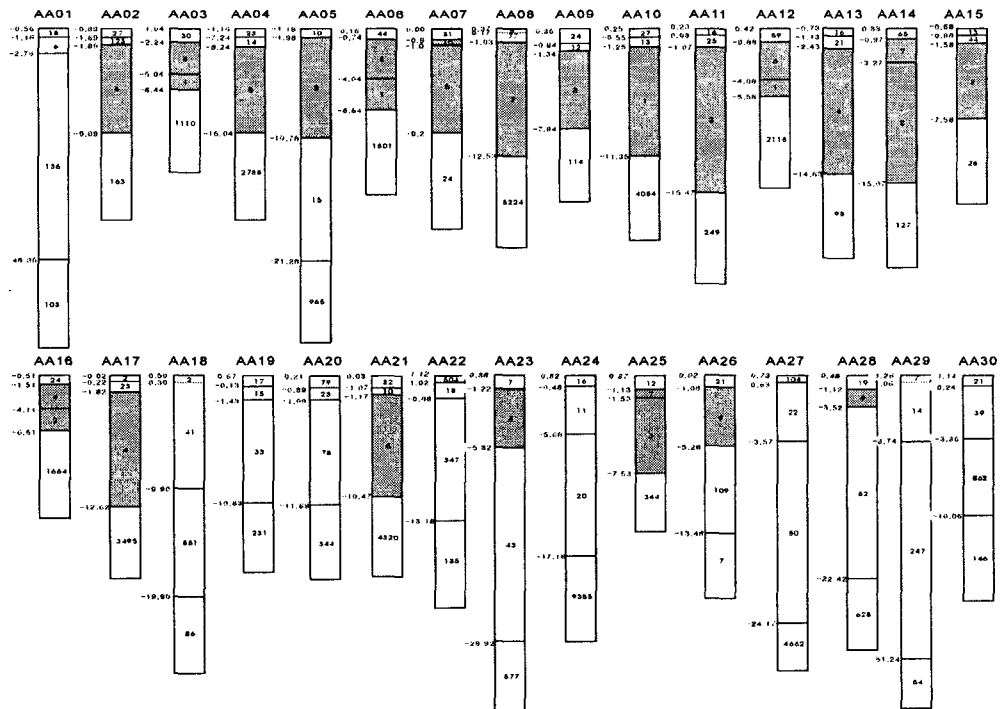


Fig. 2. Interpreted geoelectrical section from one-dimensional inversion

3. 지구통계분석법을 이용한 전기비저항 수직탐사 자료 해석

지구통계학적 분석법은 지하수위, 수리전도도, 저류계수 등의 수리지질학적 자료들을 추정하는데 이용되는데, 특히 지형 및 지질의 변화가 심해서 수리지질학적 구분이 어려운 경우 수치모델링을 용이하게 하기 위하여 주로 사용되고 있다(Neuman, 1984). 또한 공간적으로 분포하는 자료 취득 시에 자료취득에 한계가 있는 경우는 불충분한 자료의 추가획득 또는 공간자료의 구조적인 분석을 위하여 지구통계학적 접근이 필수적으로 알려져 있다(Journel and Huijbregts, 1978). 공간상에 분포하는 표본자료의 특성은 식(1)과 같이 베리오그램(variogram)에 의해서 나타나는데, 베리오그램은 공간상에 분포하는 임의의 두 자료 값의 차이의 분산으로 구해지므로 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도로 이용된다(Matheron, 1963).

$$\begin{aligned} 2\gamma(h) &= E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} \\ &= \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \end{aligned} \quad (1)$$

크리깅에 의한 자료 추정에는 표본자료의 공분산이 필요한데, 식(2)와 같이 표본자료의 반베리오그램(semivariogram)으로부터 얻어진다.

$$C(h) = sill - \gamma(h) \quad (2)$$

여기서 $C(h)$ 는 거리 h 만큼 떨어진 자료들 간의 공분산, $\gamma(h)$ 는 반베리오그램이다. *sill* (문턱값)은 일정한 범위(range)를 넘어서 반베리오그램의 상관성이 없어지고 안정된 상태의 반베리오그램 값을 나타낸다. 반베리오그램의 모델은 *sill*의 존재 유무에 따라 구분되는데, 일반적으로 수리지질과 관련된 자료의 경우는 문턱값이 있는 경우의 모델을 이용하며 선형 모델(linear model), 구형 모델(spherical model), 지수 모델(exponential model), 가우스 모델(Gaussian model), 너깃모델(nugget model) 등이 대표적이다.

이 연구에서는 적합한 베리오그램 모델을 결정하기 위하여 Robertson(1998)이 제시한 추정치와 실제 자료의 평균값과의 차이의 제곱인 SSR(sum of squares regression)과 SSR과 SST(실제값과 실제 자료 평균값과의 차이의 제곱)의 비율로 회귀식에서 적합도를 나타내는 R^2 (goodness of fit)를 이용하여 최적의 모델을 적용하였다. Davis(1986)은 SSR의 경우 값이 적을수록, R^2 는 1에 가까울수록 베리오그램의 모델이 우수한 것으로 제시한 바 있다.

이 연구지역의 전기비저항 수직탐사의 역산결과를 이용하여 제1층과 제2층에 대한 베리오그램 모델링을 수행하였는데, 제1층의 경우는 상대적으로 지수 모델이, 제2층의 경우는 가우스 모델이 상대적으로 적합한 것으로 분석되었다(Table 1).

Table 1. Semivariogram parameters of the study area.

	model	nugget(C_0)	sill(C_0+C)	R ²	SSR
1st_layer	exponential	0.53	1.065	0.39	0.304
2nd_layer	Gaussian	0.60	36.49	0.83	290.0

Fig. 3은 두층의 모델링 결과를 기존의 정규 크리깅(ordinary kriging) 결과와 비교한 것으로, 제1층의 경우 지수 모델링 결과로 나타난 급격한 두께의 변화 위치가 이 지역의 해수빼기와 담수체의 경계부 주변에 형성되는 것으로 나타났으며, 기존의 정규 크리깅 방법에 비해 상대적으로 지형적인 분포양상에 근사적인 것으로 나타났다. 또한 이러한 결과는 앞서 제시된 수직탐사 자료의 1차원 역산에서 얻어진 10 ohm-m 이하 범위를 나타내는 해수침투 예측 지점과 일치되게 나타났다. 이에 비해 제2층의 경우는 정규 크리깅과 가우스 모델링 결과가 유사한 것으로 나타나므로, 각 지점의 역산 결과가 공간적인 유사성이 크지 않은 것으로 판단된다.

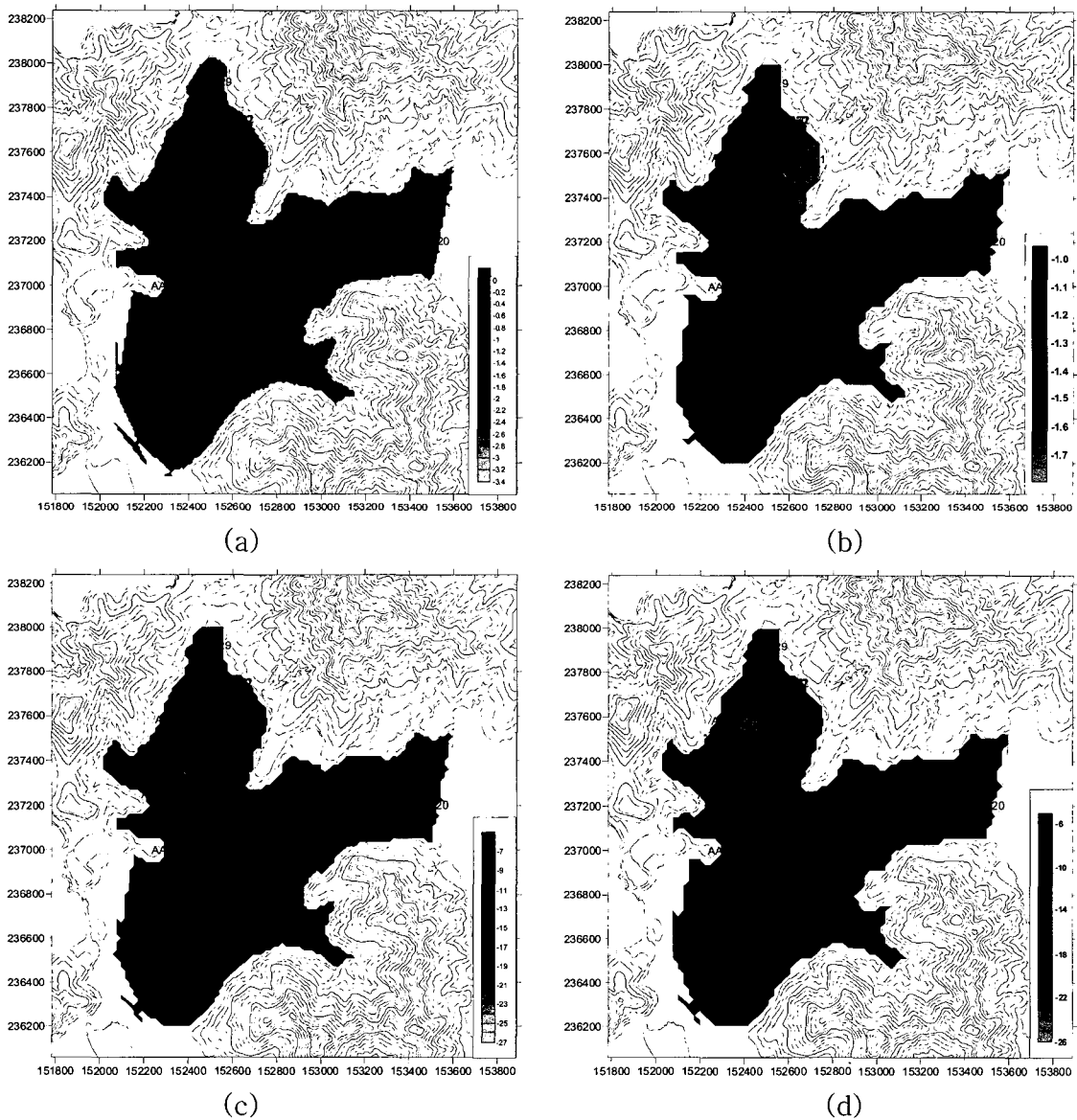


Fig. 3. Contour maps of each layers using inversion results of one-dimensional resistivity survey. (a) ordinary kriging of 1st layer, (b) exponential model of 1st layer, (c) ordinary kriging of 2nd layer, (d) Gaussian model of 2nd layer.

4. 결론

해수침투가 진행되고 있는 해안지역의 소유역에 대하여 총 30 지점의 전기비저항 수직탐사를 수행하였다. 탐사 자료의 1차원 역산 결과를 토대로 지구통계방법인 베리오그램 분석을 이용하여 분석한 결과 기존의 수리지질학적 방법에서 얻어진 해수빼기와 담수체의 경계부를 유용하게 확인할 수 있었다. 또한 이러한 결과를 기존의 광역지역에 대한 등가염분농도분포도 작성 방법에 적용할 경우 해수침투의 범위 확인 및 예측을 위한 정량적인 평가에 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비(과제번호 3-3-2)와 농림부의 해수침투조사사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 농업기반공사, 2004, 2004해수침투조사사업 보고서.
- 한국지질자원연구원, 2003, 해수침투 평가, 예측 및 방지기술 개발, 과학기술부00-J-ND-01-B-14, 167-210.
- Choudhury, K. and Saha, D.K., 2004, Integrated geophysical and chemical study of saline water intrusion, *Groundwater*, 42, 671-677.
- Davis, C.J., 1986, Statistics and data analysis in geology, 2nd edition, John Wiley & Sons, 646p.
- Goldman, M.D., Ronen, G.A., and Melloul, A., 1991, Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method, *Geoexploration*, 28, 153-174.
- Journel, A.G. and Huijbregts, C.J., 1978, Mining Geostatistics, Academic Press, 600p.
- Land, L.A., Lautier, J.C., Wilson, N.C., Chianese, G., and Webb, S., Geophysical Monitoring and Evaluation of Coastal Plain Aquifers, *Groundwater*, 42, 59-67.
- Matheron, G., 1963, Principles of geostatistics, *Economic Geology*, 58, 1246-1266.
- Neuman, S.P., 1984, Role of geostatistics in subsurface hydrology, *Geostatistics for Natural Resources Characterization, Parts 2*, edited by Verly et al., 287-816.
- Robertson, G.P., 1998, GS+: Geostatistics for the environmental sciences, Gamma Design Software, Plainwell, Michigan, U.S.A.
- Hwang, S., Shin, J., Park, I., and Lee, S., 2004, Assessment of seawater intrusion using geophysical well logging and electrical soundings in a coastal aquifer, Youngkwang-gun, Korea, *Exploration Geophysics*, 35, 99-104.