

해수침투지역에서 1차원 전기비저항 탐사 자료의 공간분석

Spatial Analysis of One-dimensional Electrical Resistivity Sounding Data in Saline Water Intrusion Areas

송성호* 이규상** 김진성***
Song, Sung-Ho · Lee, Gyu-Sang · Kim, Jin-Sung

성백옥**** 박남식***** 홍성훈*****
Seong, Baek-Uk · Park, Namsik · Hong, Sung-Hun

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.

1. 서론

최근 들어 각 분야별로 환경에 대한 관심이 높아지면서, 물과 관련하여 환경 친화적인 수자원의 개발 및 이용에 대한 요구가 증대되고 있다. 우리나라의 서, 남해안 지역은 지표수의 공급이 부족하여 대체 수자원으로 지하수를 이용하고

있지만, 개별공 당 이용할 수 있는 수량은 부족한 것으로 알려져 있다. 이에따라 지형학적으로 삼면이 바다와 접하고 있는 우리나라의 경우는, 해안 및 도서지방에서 지하수의 염수화가 가장 흔한 오염현상으로 알려져 있다³⁾.

이러한 해안 및 도서지역에서 대수층을 통한 해수침투 현상을 규명할 수 있는 가장 확실한

*농업기반공사 농어촌연구원 (shsong@karico.co.kr)
**농업기반공사 농어촌연구원 (leegs@karico.co.kr)
***농업기반공사 농어촌연구원 (jinsungk@karico.co.kr)
****농업기반공사 농어촌연구원 (seongbaekuk@hotmail.com)
*****동아대학교 토목공학과 (nspark@mail.donga.ac.kr)
*****동아대학교 토목공학과 (wghsh72@donga.ac.kr)

키워드 : 해안지역, 전기비저항 수질탐사, 해수침투, 지구통계학적 방법, 베리오그램

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 1998년 이래로 “해수침투조사사업”을 수행하고 있으며, 이 사업의 일환으로 우리나라 해안 및 도서지역에 대하여 연차적으로 해수침투 관측공을 설치하여 해수침투 양상을 지속적으로 모니터링하고 있다¹⁾. 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 있다²⁾. 그러나 이 경우는 광역지역에 대한 결과를 제시한 것으로 소유역별 수리지질학적 특성변화에 따른 해수침투의 공간적인 분포를 확인하는데 한계가 있다.

일반적으로 해수침투에 의한 염수화 과정은 대상지구의 수리지질학적 특성에 따라 다양하게 나타나는데 크게 해수체의 이동에 따른 침투 과정과 담수체와의 혼합(mixing) 과정으로 구분할 수 있다³⁾. 이러한 이론적 배경을 기초로 바닷가와 인접한 지역의 대수층이 다공질 매체(porous medium)로 구성되어 있는 경우의 해수침투 모형은 1900년 전후에 Ghyben과 Herzberg에 의해 각각 발표된 논문을 기초로 구성된 Ghyben-Herzberg(G-H) 이론이 대표적으로, 자유면 대수층의 경우 해수면 아래 담

수체의 깊이는 해수면을 기준으로 지하수위 높이의 약 40배에 해당되는 것으로 알려져 있다. 이러한 경계면 비확산(sharp-interface) 모델 접근법은 수리동역학적으로 분산(dispersion)의 효과가 크지 않은 경우에 적합한 것으로 우리나라와 같이 균열대로 이루어진 암반대수층의 경우는 그 침투양상이 상대적으로 복잡하기 때문에 기존의 이론을 적용하는데 한계가 있으며, 이와 관련한 뚜렷한 연구결과가 제시되지 못하고 있는 실정이다.

이러한 해수침투의 범위 및 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 물리탐사 기법을 이용한 해안지역의 해수침투 현상을 규명하기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있으며, 해수침투 현상은 탐사대상체의 전기전도도 변화를 발생시키기 때문에 전기 및 전자탐사 기법이 주로 이용되고 있다^{4,6,8,13)}.

따라서 이 연구에서는 해수침투 현상을 시, 공간적으로 모니터링하고 있는 전라북도 부안군 변산면 격포리 해안지역의 소유역에 대하여 총 30지점에 대한 전기비저항 수직탐사를 실시하였으며, 탐사자료의 역산결과를 지구통계학적 방법을 이용하여 분석하여 층별 심도에 대한 등고선도를 작성 및 시추결과를 대비하여 분석기법의 정밀도를 검증하였다.

II. 연구지역 개요

1. 지역현황

연구지역은 전라북도 부안군 변산면 격포리 일대의 채석강을 포함한 분지지역으로, 변산반도의 서쪽 해안변 평야지역의 표고 1m 내외의 지역이다(Fig. 1). 이 지역의 용수이용 현황은 부안댐으로부터 상수도를 통한 생활용수가

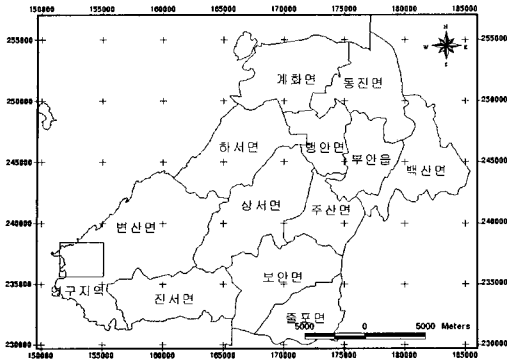


Fig. 1. Map of the study area

공급되며, 변산면의 경우 생활용수를 목적으로 한 상수도 보급율은 약 69% 정도이다. 그러나 농업용수의 경우 지하수의 의존율이 높는데 변산반도 전체적으로 농업용이 약 59%를 차지하고 있다. 연구지역의 수리지질은 중생대 백악기 상부의 신라층군에 속하는 국포리층 퇴적암류와 이를 관입 분출한 중생대 백악기 말의 산성 화산암으로 구성되며, 북동-남서 방향의 단층이 평행하게 분포하고 있다.

2. 해수침투 관측망 자료 분석

연구지역에 설치된 해수침투관측용 O-1과

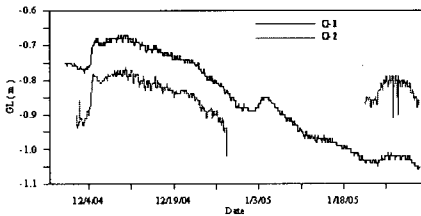


Fig. 2. Variation of groundwater level at two monitoring wells for detecting seawater intrusion

O-2 관정에 대하여 장기간 관측된 자료를 분석하였다. Fig. 2는 O-1과 O-2 관정에 대한 2개월 간의 지하수위 변화를 도시한 결과로, O-1 관정의 경우 O-2에 비해 약 10cm 정도 지하수위가 높게 나타난 것을 제외하고는 전체적인 지하수위 변화 양상이 유사하므로, 연구지역의 암반대수층의 수리특성은 전체적으로 균질한 것으로 판단된다. 또한 두 관정의 지하수위는 일변화가 나타남에 따라 조석의 영향을 지속적으로 받는 것으로 나타났다. 이러한 조석변화와 대수층을 통한 해수침투의 영향을 분석하기 위하여 O-2 관정의 지하수위와 전기전도도의 변화를 도시한 결과 약 4시간의 시간지연을 보이면서 해수면의 변화에 따른 지속적인 영향이 나타남을 확인하였다(Fig. 3).

III. 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

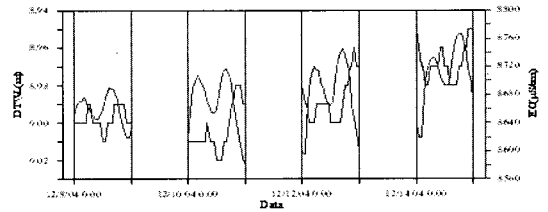


Fig. 3. Analysis of relationship between groundwater level and electrical conductivity at O-2 well

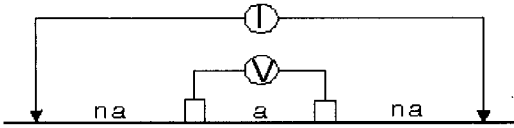


Fig. 4. Schematic diagram of Schlumberger array for vertical electric sounding

일종이다. 따라서 전류전극 간의 간격이 넓을수록 심부의 정보를 반영하게 된다. 이러한 수직탐사법은 전극 배열 방식에 따라 여러가지로 분류되지만, 이 연구에서는 슬럼버저 배열법을 이용하였다. 슬럼버저 배열 수직탐사는 전위전극 간격을 일정하게 고정(ω)하고, 전류전극 간격을 전위간격에 따라 증가(na) 시키면서 측정을 하는데 이때 측정되는 겐보기비저항은 식(1)과 같이 계산된다(Fig. 4).

$$p = n(n+1)\pi\alpha \times \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

이 연구에서 수직탐사는 대상지역 소유역의 평지 지역을 대상으로 총 30 지점을 균등하게 분포시켜 수행하였으며, 기존의 수리지질조사 결과 분석된 해수썩기와 담수체의 수직적인 경계부를 확인하기 위하여 수직방향으로 4개 측선을 일렬로 배열하였다(Fig. 5). 전류전극 간격 (AB/2)은 이 지역의 기반암 심도인 약 15m 내외를 감안하여 50m까지 설정하였다. 현장에서 획득된 자료의 해석을 위하여 지하를 수평 다층 구조로 가정하고 감쇄최소자승법을 이용한 1차원 역산을 동원하였는데, 층은 4개로 가정하여 시추공 자료와 역산에 의한 이론치가 일치할 때까지 조건을 변화시키면서 반복적인 역산을 실시하였다(Fig. 6). 역산결과 상대적으로 내륙쪽에 위치한 AA18~AA20과 AA25~AA30 지점의

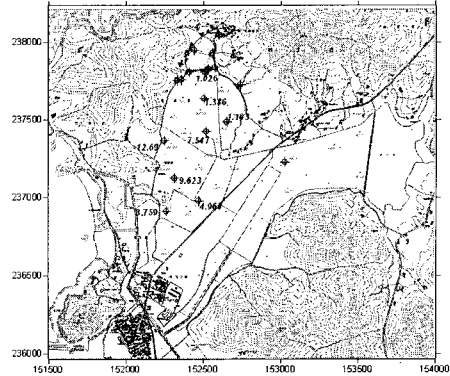


Fig. 5. Measuring results of specific conductance at eight wells in the study area (unit of conductance: mS/cm)

전극간격에 따른 전기비저항의 경향이 그 이외의 지점에서의 전기비저항의 경향과 달리 지속적으로 증가하는 것으로 나타남에 따라 이들 지점의 경우는 대수층을 통한 해수침투의 영향이 나타나지 않은 것으로 판단된다. 이러한 역산 결과와 수리지질학적 조사를 위해 설치한 8곳의 시추공 내 지하수의 비전도도(specific conductance) 측정 결과를 비교한 결과, 이 지역의 경우는 서측 해안으로부터 동쪽 내륙방향으로 해수침투 현상이 발생되는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 수직탐사 측정자료에 대하여 거리계수를 곱하여 얻어진 겐보기 비저항값을 기초로 4개 측선에 대하여 2차원 단면을 작성한 결과로, 지하수의 비전도도값의 분포결과에서 제시된 해수썩기와 담수체의 경계부를 확인할 수 있다. 전체적으로 서쪽의 해안선 방향으로 진행할수록 저비저항대가 발달한 결과가 나타남에 따라 해수침투의 확산이 크게 나타나는 것으로 판단되며, 연구지역의 중앙부로부터 종암저수지 방향으로는 해수썩기의 발달이 내륙쪽으로 깊은곳까지 진행된 것으로 판단된다.

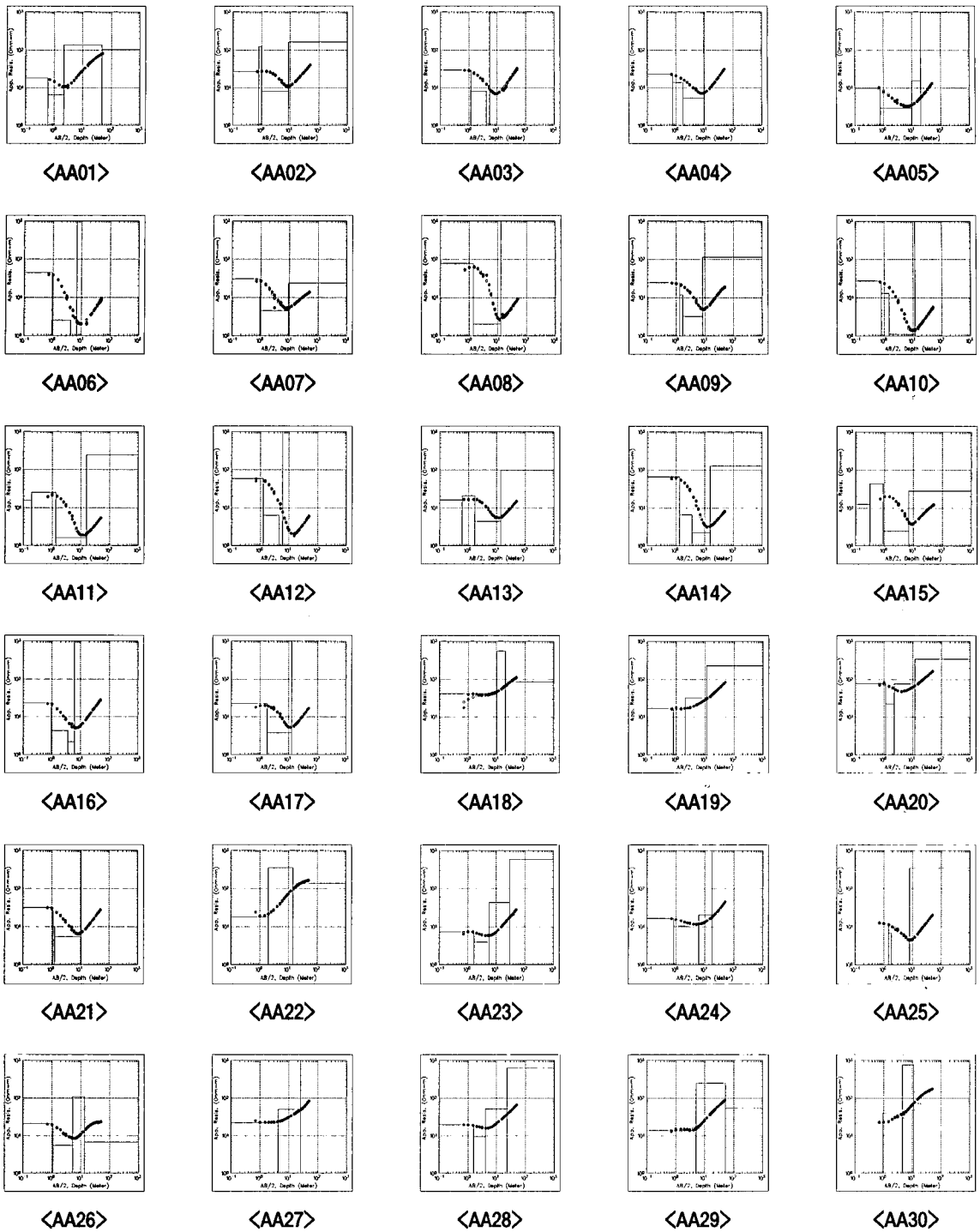


Fig. 6. DC sounding data and one-dimensional inversion results at 30 points

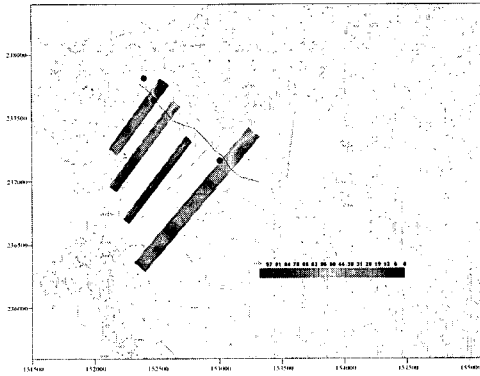


Fig. 7. Two-dimensional section of apparent resistivity in the study area(solid line: inferred boundary between salt wedge and fresh lens)

총 30 지점의 전기비저항 수직탐사의 역산 결과를 단면도로 작성하여 분석한 결과 비전도도 값이 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 상대적인 고비저항대가 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 8). 따라서 수직탐사의 역산 결과 실제 해수침투의 공간적인 분포 범위를 확인하는데 유용한 것으로 나타났다.

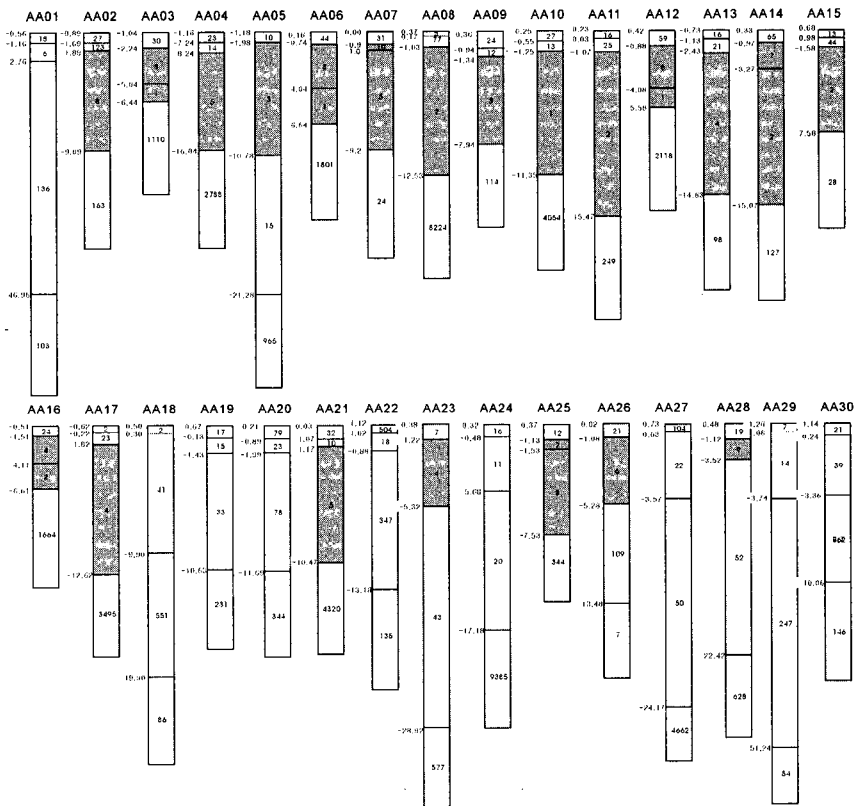


Fig. 8. Interpreted geoelectrical section from one-dimensional inversion

IV. 지구통계분석법을 이용한 전기비저항 수직탐사 자료 해석

지구통계학적 분석법은 지하수위, 수리전도도, 저류계수 등의 수리지질학적 자료들을 추정하는데 이용되며, 특히 지형 및 지질의 변화가 심해서 수리지질학적 구분이 어려운 경우 수치모델링을 용이하게 하기 위하여 주로 사용되고 있다¹⁰⁾. 또한 공간적으로 분포하는 자료 취득시에 자료취득에 한계가 있는 경우는 불충분한 자료의 추가획득 또는 공간자료의 구조적인 분석을 위하여 지구통계학적 접근이 필수적으로 알려져 있다¹¹⁾. 공간상에 분포하는 표본자료의 특성은 식(2)와 같이 베리오그램(variogram)에 의해서 나타나는데, 베리오그램은 공간상에 분포하는 임의의 두 자료 값의 차이의 분산으로 구해지므로 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도로 이용된다¹²⁾.

$$2\gamma(h) = E\{\sum [Z(x) - Z(x+h)]^2\}$$

$$= \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (2)$$

크리깅에 의한 자료 추정에는 표본자료의 공분산이 필요한데, 식(3)과 같이 표본자료의 반베리오그램(semivariogram)으로부터 얻어진다.

$$C(h) = sill - \gamma(h) \quad (3)$$

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) 등이 대표적이다.

1. 구형 모델

$$\gamma(h) = C_0 + C[1.5 \frac{h}{\alpha} - 0.5 \frac{h^3}{\alpha^3}], (h \leq \alpha)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C, (h \leq \alpha) \quad (4)$$

여기서 C_0 는 nugget, C 는 $sill$ -nugget, α 는 반베리오그램이 상관관계를 갖는 범위, 그리고 h 는 자료들간의 거리이다.

2. 지수 모델

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-\frac{h}{\alpha})], (h \leq 3\alpha) \quad (5)$$

이 모델은 $sill$ 값에 근사적으로 접근하며, 실질적인 반베리오그램의 범위 α' 는 3α 이다. 이 모델은 수문학과 관련된 자료에 널리 이용되고 있다.

3. 가우스 모델

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-\frac{h^2}{\alpha^2})], (h \leq \alpha\sqrt{3}) \quad (6)$$

이 모델 역시 $sill$ 값에 근사적으로 접근하며, 실질적인 반베리오그램의 범위 α' 는 $\alpha\sqrt{3}$ 이다.

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(Sum of Squares Total)의 비율로, 회귀식에서 적합도를 나타내는 R^2 (goodness of fit)를 이용하여 최적의 모델을 적용하였다⁹⁾.

Davis(1986)은 SSR의 경우 값이 적을수록, R^2 는 1에 가까울수록 베리오그램의 모델이 우수한 것으로 제시한 바 있다⁹⁾.

$$SSR = \sum_{i=0}^n (Y_i^* - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

$$SST = \sum_{i=0}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (9)$$

여기서 Y_i 는 표본자료의 값, \bar{Y} 는 표본자료의 평균값, Y_i^* 는 회귀선에 의한 자료의 추정치이다.

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>.

Fig. 9는 두층의 모델링 결과를 정규 크리깅(ordinary kriging) 결과와 비교한 것으로, 제1층의 경우 지수 모델링 결과로 나타난 급격한 두께의 변화 위치가 이 지역의 해수썰기와 담수체의 경계부 주변에 형성되는 것으로 나타났으며, 정규 크리깅 방법에 비해 상대적으로 지형적인

분포양상에 근사적인 것으로 나타났다. 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.

V. 결론

현재 해수침투 현상이 지속적으로 모니터링되고 있는 전라북도 부안군 해안지역의 소유역에 대하여 총 30 지점의 전기비저항 수직탐사를 수행하였다. 탐사자료는 연구지역의 지하를 수평 다층구조로 가정하고 감쇄최소사승법을 이용한 1차원 역산을 동원하였는데, 층은 4개로 가정하여 시추공 자료와 역산에 의한 이론치가 일치할 때까지 조건을 변화시키면서 반복적인 역산을 실시하였다. 각 지점별 심도별로 계산된 전기비저항 결과에 대하여 지구통계방법인 베리오그램 분석을 이용하여 공간분석을 실시하였는데, 1층과 2층은 각각 지수 모델과 가우스 모델이 가장 적합한 것으로 분석되었으며, 두층의 모델링 결과를 기존의 정규 크리깅 해석결과와 비교하였다. 제1층의 경우 이 지역의 해수썰기와 담수체의 경계부 주변에서 급격한 두께 변화가 나타남에 따라, 기존의 정규 크리깅 방법에

Table 1. Semivariogram parameters of the study area

	model	nugget(Co)	sill(Co+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

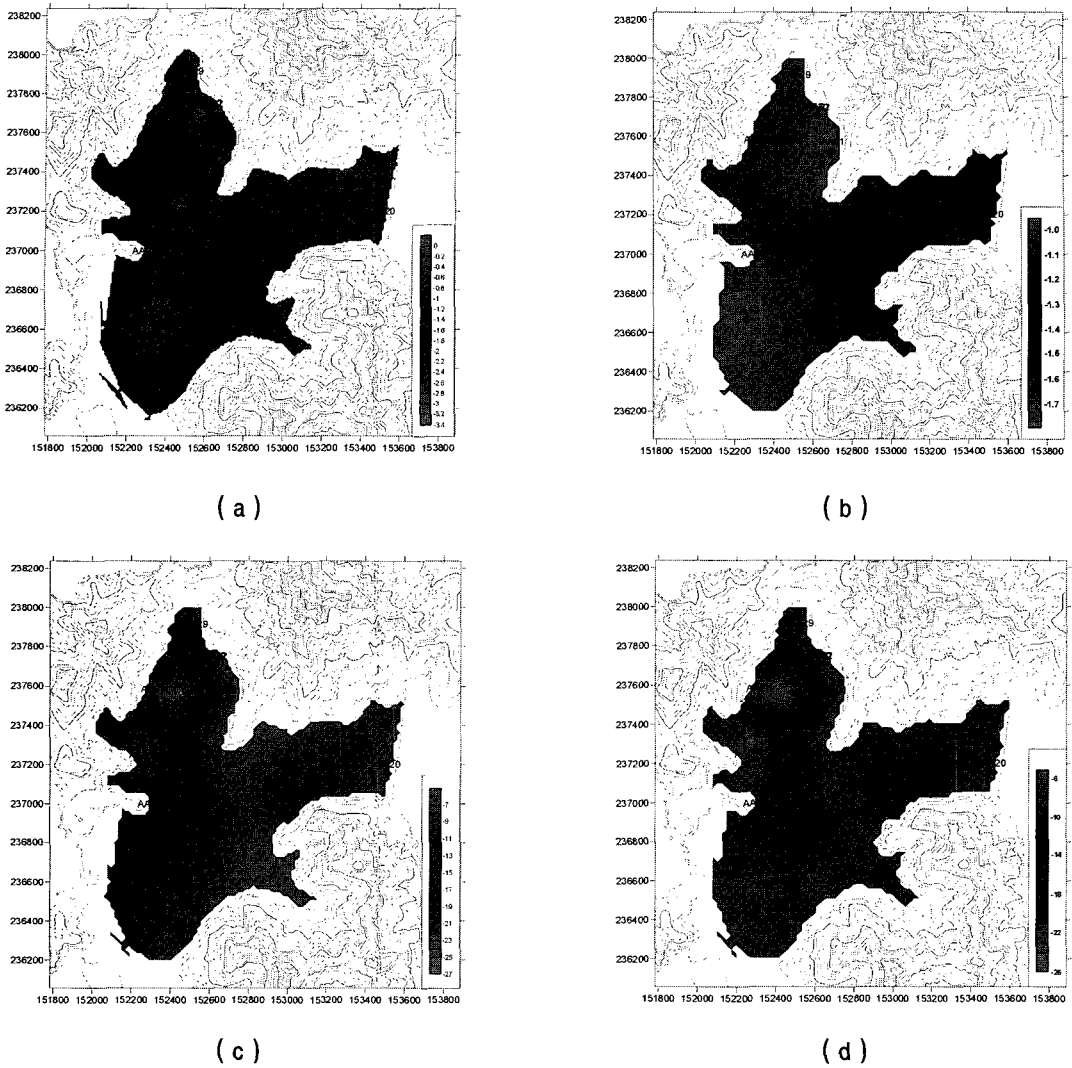


Fig. 9. Contour maps of each layers using inversion results of one-dimensional resistivity survey
 (a) ordinary kriging of 1st layer, (b) exponential model of 1st layer,
 (c) ordinary kriging of 2nd layer, (d) Gaussian model of 2nd layer

비해 상대적으로 지형적인 분포양상에 근사적인 것으로 나타났다. 이 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. 따라서 이 연구에 적용된 방법을 이용하는 경우 해안지역 대수층에 형성되는 해수빼기와

담수체의 경계부를 유용하게 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 이러한 결과를 기존의 광역지역에 대한 등가염분농도분포도 작성 방법에 적용할 경우 해수침투의 범위 확인 및 예측을 위한 정량적인 평가에 활용될 것으로 판단된다.

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

참고문헌

1. 농업기반공사, 2004, 2004 해수침투조사사업 보고서.
2. 송성호, 이규상, 용환호, 김진성, 성백옥, 우명하, 2005, 지구통계분석을 이용한 해수침투지역에서의 전기비저항탐사 자료 해석, 제2회 한국물리탐사학회·대한지구물리학회 공동학술대회 논문집.
3. 한국지질자원연구원, 2003, 해수침투 평가, 예측 및 방지기술 개발, 과학기술부00- J-ND-01-B-14, 167-210.
4. Choudhury, K. and Saha, D.K., 2004, Integrated geophysical and chemical study of saline water intrusion, *Groundwater*, 42, pp.671-677.
5. Davis, C.J., 1986, *Statistics and data analysis in geology*, 2nd edition, John Wiley & Sons, p.646.
6. 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, pp.153-174.
7. Journel, A.G. and Huijbregts, C.J., 1978, *Mining Geostatistics*, Academic Press, p.600.
8. Land, L.A., Lautier, J.C., Wilson, N.C., Chianese, G., and Webb, S., 2004, Geophysical Monitoring and Evaluation of Coastal Plain Aquifers, *Groundwater*, 42, pp.59-67.
9. Matheron, G., 1963, Principles of geostatistics, *Economic Geology*, 58, pp.1246-1266.
10. Neuman, S.P., 1984, Role of geostatistics in subsurface hydrology, *Geostatistics for Natural Resources Characterization, Parts 2*, edited by Verly et al., pp.287-816.
11. Robertson, G.P., 1998, *GS+: Geostatistics for the environmental sciences*, Gamma Design Software, Plainwell, Michigan, U.S.A.
12. Todd, D.K., 1976, *Groundwater Hydrology*, 2nd edition, John Wiley & Sons.
13. 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, pp.99-104.