

지구물리 탐사자료의 지구통계학적 분석에 의한 부산 동남해안 지역의 해수침투 특성

심병완¹ · 정상용^{1*} · 김희준² · 성익환³ · 김병우¹

¹부경대학교 환경지질과학과 · ²부경대학교 탐사공학과 · ³한국지질자원연구원

Characteristics of Sea Water Intrusion Using Geostatistical Analysis of Geophysical Surveys at the Southeastern Coastal Area of Busan, Korea

Byoung Ohan Shim¹, Sang Yong Chung^{1*}, Hee Joon Kim², Ig Hwan Sung³, Byong Woo Kim¹

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

²Department of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

Data analysis of groundwater monitoring wells and geostatistical methods are used to identify the local characteristics of sea water intrusion and the range of sea water intrusion at the southeastern coastal area of Busan, Korea. Rainfall and groundwater level of two monitoring wells show a linear correlation because of the direct groundwater recharge by the precipitation. However, rainfall and electric conductivity have the inverse relationship because of the increase of groundwater. Electric conductivity rapidly increased at 24m depth and exceeded 20,000µS/cm near 26m depth in the monitoring wells. The variations of groundwater level and electric conductivity show that the interface between sea water and fresh water tends to move upward when groundwater level goes down. In the cross correlation analysis, groundwater level versus rainfall represents the largest cross correlation coefficient in 0 time lag, but the cross correlation coefficient of electric conductivity versus rainfall is the largest when the time lag is 9 days. This suggests that the fluctuations of groundwater level respond to rainfall in a short time, but the interface between sea water and fresh water respond very slow to rainfall. Horizontal extents of

* Corresponding author : chungsy@pknu.ac.kr

원고접수일 : 2002. 5.20 계재승인일 : 2002. 8.23

sea water intrusion are estimated to 14 m from the east of Line 1, and 25 m from the southeast end of Line 2 in the inversion of dipole-dipole profiling data of two survey lines. The data of VES by the Schlumberger array in May and July show lognormal distributions. In the kriged apparent resistivity and earth resistivity distributions, the resistivities of July are increased comparing to those of May. This reflects that the concentration of sea water in aquifer is reduced due to the increased groundwater recharge from the rainfall in June and July. In analyzing the vertical and horizontal apparent resistivities and earth resistivity distributions, the geostatistical methods are very useful to identify the variations of earth resistivity distributions at the coastal area.

Key Words : Sea water intrusion, electric conductivity, vertical electrical sounding (VES), resistivity, kriging

요 약 문

본 연구는 부산시 동남해안 지역에서 해수침입의 지역적 특성과 해수침입의 범위를 파악하기 위하여 지하수 모니터링공의 자료분석과 지구통계학적 기법을 이용하였다. 강수에 의한 직접적인 지하수의 충전으로 모니터링 우물에서의 지하수위는 강수량과 비례하지만 전기전도도는 강수량과 대체로 반비례하는 것으로 나타났다. 모니터링 우물에서 전기전도도는 약 24m 심도에서 급격히 증가되어 26m 전후에서 20,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 초과하였고, 지하수위와 전기전도도를 비교한 결과, 지하수위가 낮아질수록 해수와 담수의 경계면이 상승하는 경향을 보인다. 교차상관성 분석에 의하면 지하수위와 강수량은 시차가 0일 때 교차상관 계수가 최대이지만, 전기전도도와 강수량의 교차상관계수는 시차가 9일 때 최대로 나타났다. 이것은 지하수위 변동이 강수에 의하여 단시간에 영향을 받고 있으나, 해수와 담수의 경계면은 강수에 의하여 매우 느리게 반응한다는 것을 나타낸다. 2개의 측선에서 실시된 수평전기탐사 자료의 역산결과, Line 1에서는 동쪽 끝에서 내륙으로 약 14m 지점까지, Line 2에서는 동남쪽 끝에서 내륙으로 약 25m 지점까지 해수가 침투한 것으로 나타났다. 5월과 7월에 슬럼버져 배열의 수직전기탐사를 실시하여 획득한 자료는 각각 대수정규분포를 나타내었고, 크리깅에 의한 겉보기비저항 분포도와 전기비저항 분포도를 비교하면 5월보다 7월에 비저항치가 상승한 것으로 나타났다. 이것은 6, 7월에 내린 강수로 지하수의 함양량이 증가하여 대수층내 해수의 농도가 감소하였기 때문이다. 겉보기비저항의 수직단면도 및 평면도 그리고 전기비저항 분포도를 분석한 결과, 지구통계학적 기법은 해안 지역에서의 전기비저항 분포 변화를 파악하는데 매우 유용하였다.

주제어 : 해수침입, 수직전기탐사(VES), 겉보기비저항, 전기비저항, 크리깅

1. 서 론

최근에 지하수의 고갈과 해안선의 변화, 각종 건설 공사 등으로 인하여 담수와 해수의 자연적인 균형이 무너지면서 해안가 지하수의 염수화가 급속히 진행되고 있다. 세계적으로 전 인구의 70% 정도가 해안가 지역에 거주하고 있으며, 이들 지역의 인구증가와 경

제성장으로 인하여 수자원의 수요는 더욱 증가되었다. 게다가 지구온난화와 기상변화 등으로 인한 해수면 상승으로 해수침입 피해는 보다 광역화되고 있다.

해안지역에서 담수를 함유한 대수층이 해수면 밑에 있을 때, 담수는 바다로 유출되고 해수는 담수 아래로 쪼개기 모양으로 침입한다. 이들 담수와 해수는 서로 동적 평형을 이루고 있을 때, 해수와 담수의 전이대인

경계면은 내륙으로 향하여 내려가며 아래방향으로 불록한 형태를 가진다. 이러한 것을 정역학적으로 설명한 것이 Ghyben-Herzberg 법칙으로, 해안이나 도서 등의 여러 지역에 적용되어 왔다. 그러나 실제 지하수는 이러한 정적 평형상태에 있지 않고 연속적으로 이동하고 있기 때문에, 해수와 담수의 경계면도 변동하게 된다. 해수와 담수의 경계면을 이동시키는 일반적인 요인으로는 지하수위 변동, 대수층의 특성변화, 지하수 양수, 지하수 함양량 변화 등이 있다. 그리고 담수 밑으로 침투한 해수에 미치는 영향으로서는 해수면 변동, 조석 운동, 해저지형의 형태, 조류의 방향 등이 있다.

해수의 경계면은 계절적인 요인 및 환경적 변화에 민감하게 반응하기 때문에 측정시점에 따라 많은 차이가 나타날 수 있다. 그러므로 해수와 담수의 정밀한 경계면 설정이나 해수침입의 범위를 설정하는데 많은 어려움이 따른다. 해수침입의 분포를 추정하기 위해서는 먼저 관측정에서 측정된 기본적인 자료를 이용할 수 있지만, 관측정 자료로는 광범위한 해수침입 분포를 추정하는데 한계가 있다. 따라서 대수층의 염수화 연구에 전기비저항 탐사를 많이 이용하고 있다. 그러나 암석과 지층의 전기비저항은 공극수의 전기비저항, 공극률, 점토광물의 함량 등 많은 요인에 의해 지배되므로 전기비저항 분포와 지질구분이 바로 직접적인 상관관계를 가지는 경우는 드물며, 같은 암종이라도 공극률이나 함수상태, 점토함량에 따라 전기비저항은 달라지게 된다. 그리고 전기비저항 분포가 지층의 풍화 상태와 정도, 혹은 단층 파쇄대를 반영하는 경우가 많다¹⁾. 이러한 성질에도 불구하고 해수의 침투양상을 밝히는데 전기·전자 탐사가 가장 많이 이용되는 이유는 해수 혹은 염분을 함유한 물의 전기전도도가 일반적인 암석의 전기전도도에 비하여 매우 높아 이를 탐지하는데 유리하며, 자료를 획득하는데 타 방법들에 비하여 매우 경제적이기 때문이다²⁾.

해수침투 현상은 지반의 불균질성으로 인하여 해수와 담수의 일정한 정역학적 경계면으로 나타내기 어려우므로, 지질조건에 적합한 여러 조사방법들이 실시되어 왔다. 우리나라에서는 대부분 물리탐사와 수질분

석, 모니터링 등에 의하여 조사가 이루어지고 있으나, 해수침입의 정밀한 분석을 위하여 조사자료에 적합한 통계적 해석은 아직 부족한 실정이다. 지하수의 수질과 공극율이 같이 변할 때, 전기비저항으로부터 대수층을 해석하는 것은 매우 어렵다. 그리고 수리지질학적 환경에서는 변수들이 공간적으로 매우 다양하고 복잡하므로 몇 개의 측정된 지점의 자료들로부터 전체적인 분포를 나태내기 어렵다. 이러한 경우 전기비저항 분포도를 작성하여 염수의 분포를 추정하는데 최선의 선형불편추정자(best linear unbiased estimator)로서 불편조건과 최소추정분산을 갖는 크리깅(kriging)은 매우 유용하다. 그 적용범위는 매우 다양하며, 최근에는 지구통계학적 기법을 적용하여 대수층의 오염범위를 추정할 뿐만 아니라^{3~10)}, 전기비저항탐사에서 해수침입 범위에 대한 분포도를 작성하는데도 이용되고 있다^{12~16)}.

본 연구의 목적은 제한된 전기비저항 자료에 대하여 지구통계학적 기법인 크리깅을 이용하여 겉보기비저항 및 전기비저항 분포도를 작성하고 연구지역내 염수침입의 범위를 추정하며, 강수량에 따른 해수와 담수의 경계면 변화 및 염수침입의 변화를 파악하는데 있다. 아울러 강수량의 변화에 따른 지하수위 변동 및 전기전도도의 변화를 분석하였다.

2. 모니터링 관측공 자료분석

본 연구지역은 부산광역시 부경대학교 대연 캠퍼스 내에 위치하며(Fig. 1), 응회질퇴적암과 안산암 및 안산암질 화산각력암이 분포한다. 시추자료¹⁷⁾에 의하면 매립퇴적물의 두께가 연구지역의 서쪽은 대부분 5m이하이나 동쪽 및 남동부지역은 10m 내외의 두께이다. 이와 같은 양상은 매립 이전의 과거지형이 대체적으로 서쪽에서 동쪽방향으로 경사지어 있었기 때문이다.

연구지역은 동남해안가에 위치하여 동쪽으로는 광안리 해수욕장 근처의 바다에 인접하고 있다. 인근지역의 수계분수령(watershed boundary)을 고려하면 지하수 유동방향은 동쪽으로 추정된다. 해안에서 내륙쪽으로 약 180m 위치에 설치된 심도 120m의 모니터링

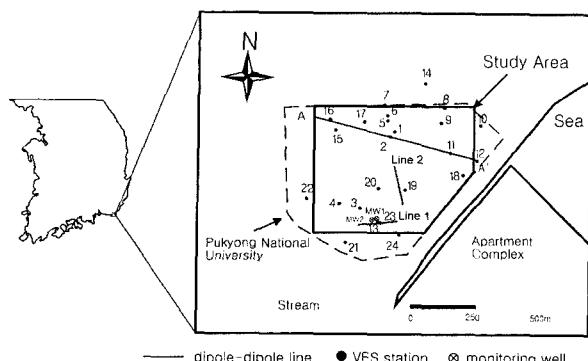


Fig. 1. Location map of study site with DC resistivity lines and VES (Vertical Electrical Sounding) stations.

우물에서 전기인 2001년 3월 14일부터 6월 중순까지는 주 1회, 그리고 우기인 6월 말에서 8월 15일 까지는 주 3회 이상 지하수위와 전기전도도를 측정하였다.

모니터링 우물에서 측정된 지하수위(Fig. 2) 변동은 지표하 3.1m ~ 4.1m 범위로 나타났으며, 강수량과

지하수위 그리고 26m 심도에서 측정된 전기전도도의 상관관계는 다음과 같다. 첫째, 비가 오면 24시간 이내에 지하수위가 상승하는 것으로 나타나므로, 강수량과 지하수위는 전체적으로 비례관계를 보인다. 둘째, 강수량과 전기전도도가 대체로 반비례 관계를 보이는 것은 강수량이 적으면 지하수의 충진이 적으므로 해수의 유입이 증가되어 전기전도도가 증가하기 때문이다. 셋째, 지하수위와 전기전도도가 반비례 관계를 나타내는 것은 지하수위가 하강하면 상대적으로 해수와 담수의 경계면이 상승하여 전기전도도는 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 3은 모니터링 우물에서 전기전도도를 1m 간격으로 측정한 것으로서, 지표하 약 24m 깊이에서 급격히 증가되어 26m 전후에서 20,000 μ S/cm를 초과하였다. 따라서 해수와 담수 전이대가 약 24m 심도에서 시작되는 것으로 추정되며, 20,000 μ S/cm의 전기전도도를 나타내는 변동폭은 약 80cm로 나타났다. 모니터링 우물에서 지하수위와 전기전도도를 비교한 결과, 지하수위가 낮아질수록 해수와 담수의 경계면이 상승하는 경향을 보인다.

강수량에 따른 지하수의 농도 변화를 파악하기 위하

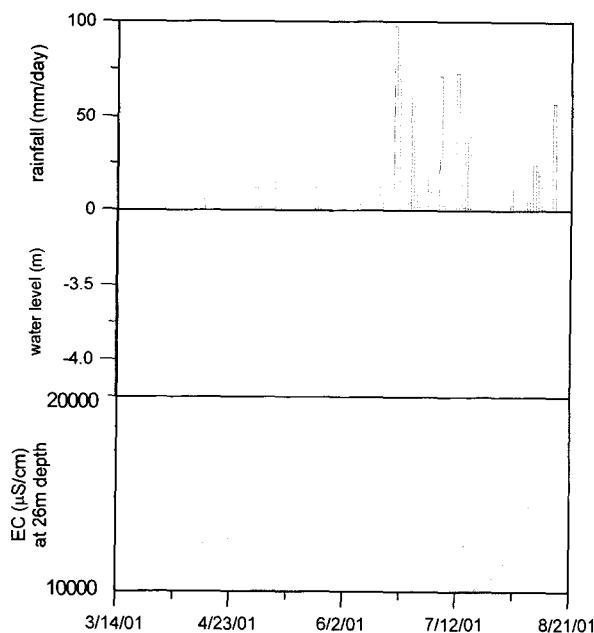


Fig. 2. The relation of rainfall with water level and EC at 26 m depth at the MW1 monitoring well.

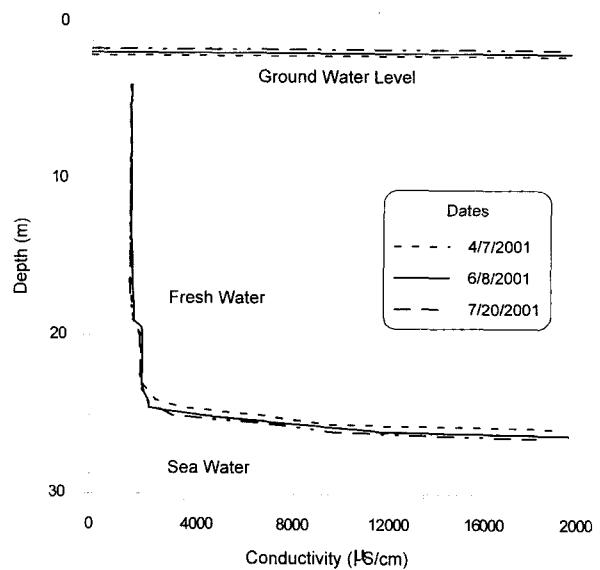


Fig 3. Depth profiles of electric conductivity and ground water levels at the MW1 monitoring well in April, June and July, 2001.

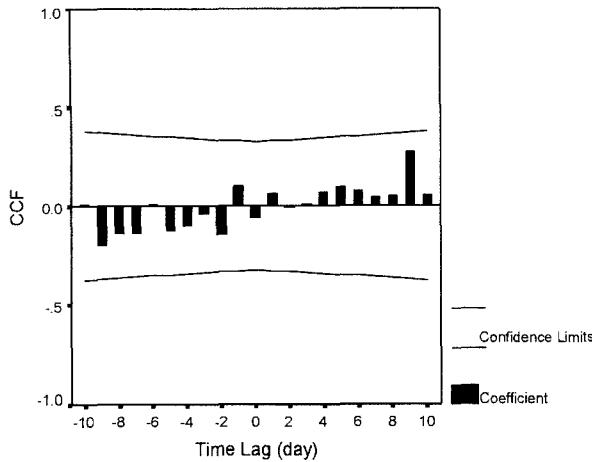


Fig. 4. Cross correlation function (CCF) of rainfall versus EC at 26 m depth at the MW1 monitoring well.

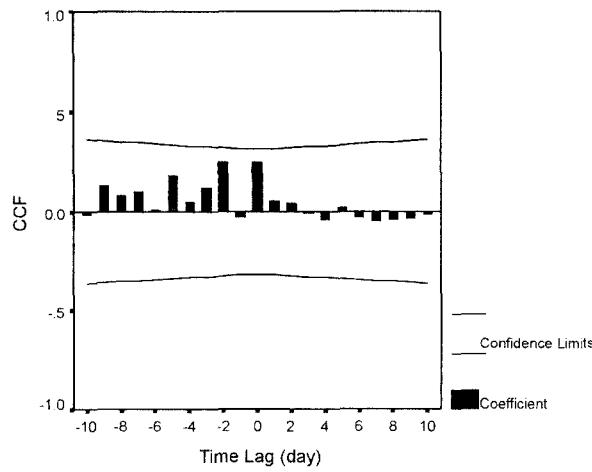


Fig. 5. Cross correlation function (CCF) of rainfall versus water level at the MW1 monitoring well.

여 교차상관(cross correlation) 분석을 실시하였다. Fig. 4에 의하면 강수량 변동에 따른 26m 심도의 전기전도도는 9일의 시차(time lag)에서 최대의 상관계수를 나타내므로, 지하수의 함양에 따른 해수와 담수 경계면 변화가 다소 느리게 나타나고 있다. 이것은 해수와 담수의 경계면이 형성되어 있는 지반의 투수계수가 $1.51 \times 10^{-7} \sim 3.86 \times 10^{-9}$ %의 낮은 값을 가지기

때문이며¹⁷⁾, 경계면에서의 염수침투현상은 대부분 확산에 의한 것으로 판단된다. Fig. 5에서 강수량과 지하수위의 교차상관계수는 최대치가 0.253으로 비교적 크지 않지만, 시차가 0일 때 교차상관계수가 최대치를 나타내므로 지하수위 변동은 강수에 의하여 단시간에 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다.

3. 전기비저항 탐사

3.1 수평탐사

수평탐사는 천부의 해수침투 범위를 파악하는데 목적이 있다. 수평탐사 결과를 모니터링 우물의 검증자료 및 수직탐사 자료와 비교·분석하기 위하여 모니터링 우물을 중심으로 1개의 측선(Line 1)과 우측에 다른 1개의 측선(Line 2)에서 탐사를 실시하였다. 탐사 방법은 전극 간격이 7m인 쌍극자 배열(dipole-dipole)로서 측선길이를 각각 140m로 설정하였다. 비

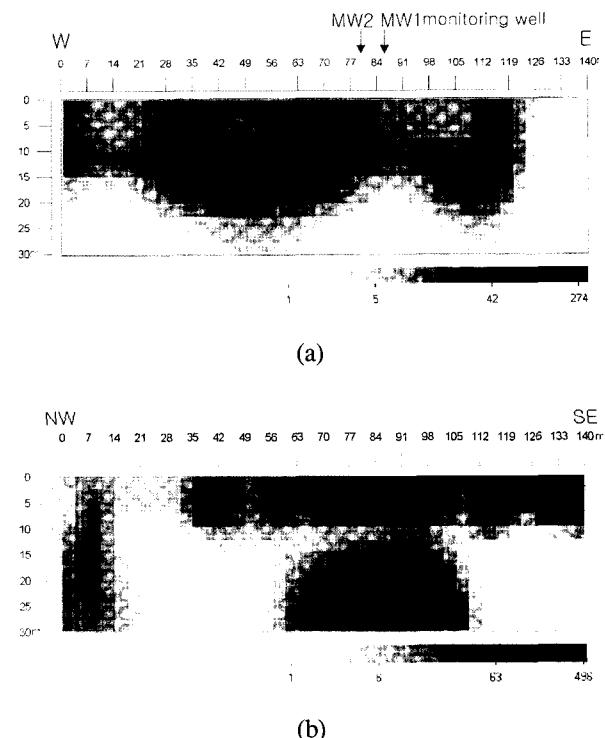


Fig. 6. Resistivity sections along (a) Line 1 and (b) Line 2. The unit of scale is ohm-m.

저항 자료해석을 위하여 비선형 최소자승법에서 최소 자승해를 안정화시키는데 유용한 평활화 제약(smoothness constraint)을 이용한 2차원 비저항 역산¹⁸을 실시하였다. Fig. 6은 역산결과에 의한 비저항 단면도로서, Line 1은 동쪽으로 126m 지점에서 140m 지점까지, 그리고 Line 2에서는 남동쪽 115m 지점에서 140m 지점까지 낮은 비저항대가 나타난다. 이러한 낮은 비저항대는 수평적인 해수침투의 가능성 을 나타내는 것으로 사료되며, 약 10m 하부에서 두드러지게 나타난다. 전체적인 수평탐사 단면에서 20m 심도 하부의 낮은 비저抵抗대는 해수침투에 의한 영향으로 판단되며, Fig. 3의 지하수 모니터링공에서 전기전 도도의 수직적인 분포와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3.2 수직탐사

술럼버저 배열의 수직 전기비저抵抗탐사는 갈수기인 5월과 우기인 7월에 24 개 지점에서 전류전극 간격(AB)을 최대 200m로 설정하여 두차례 실시하였다. 5월과 7월의 수직탐사 겉보기비저抵抗치는 각각 대수정규 분포(lognormal distribution)를 보이고 있다(Fig. 7). 해수침투현상이 대부분 기반암의 단층이나 단열을 따라 하부로 침투하므로 AB/2의 전극간격이 넓은 곳에서 자료의 편차가 심하게 나타났다. 그리고 각 측점들의 탐사곡선들이 모두 같은 형태로 나타나지 않으므로, 같은 수평적인 층서로 해석되기 어렵다. 그러므로 전기비저抵抗 수직탐사 곡선을 해석하는데 정성적인 해석 방법을 이용한 겉보기비저抵抗의 평면도와 단면도의 분석이 요구된다¹⁹. 이를 위하여 심도별 겉보기비저抵抗 평면도와 단면도는 전체적인 전기비저抵抗 분포를 추정하고 정량적인 전기비저抵抗 해석을 하는데 매우 유용하므로 정확한 분포도 작성이 필요하다.

조사지역의 지반을 불균질한 등방성 매질이라 가정하면 겉보기비저抵抗으로 지하의 개략적인 전기비저抵抗 분포를 추정할 수 있다. 따라서 침투된 염수의 공간적인 분포를 파악하기 위하여 측정된 자료를 A-A' 단면과 전류전극 간격에 따라 분리하였다. 겉보기비저抵抗 자료를 전류 전극간격 AB/2가 21m, 30m, 50m,

70m의 수평 평면들로 분리하여 대수크리깅(lognormal kriging)에 이용하였으며, A-A' 단면의 겉보기비저抵抗 분포는 VES-2, 11, 12, 16의 자료를 이용하였다. 그리고 크리깅 기법들을 이용하여 작성된 분포도들을 비교하여 해수와 담수의 경계면 위치와 그 경계면의 계절적인 변화를 분석하였다.

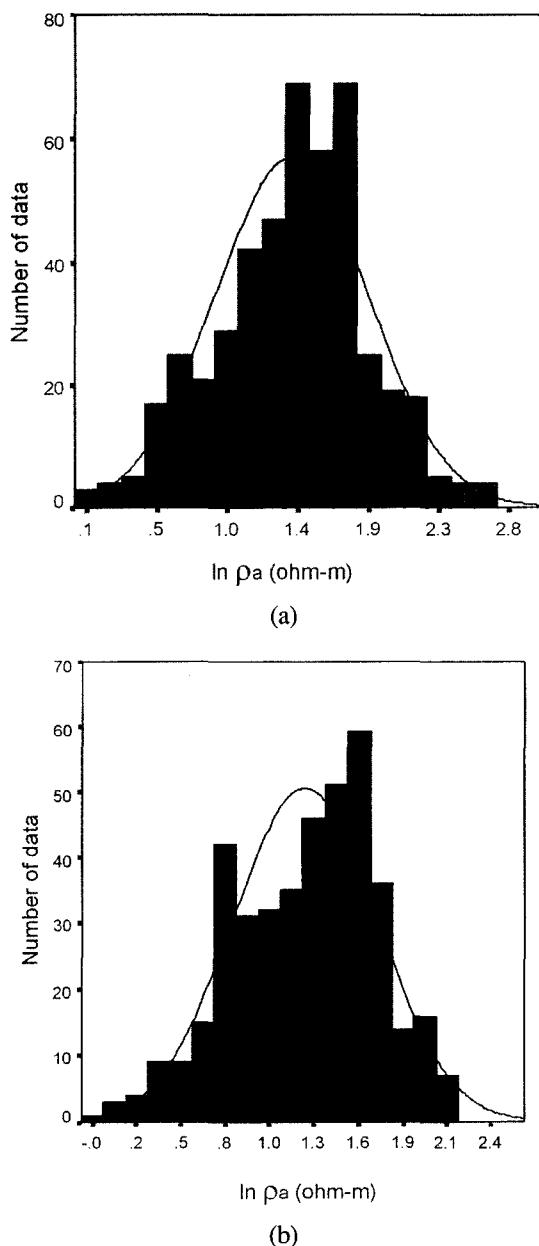


Fig. 7. Histograms of VES data in (a) May and (b) July, 2001.

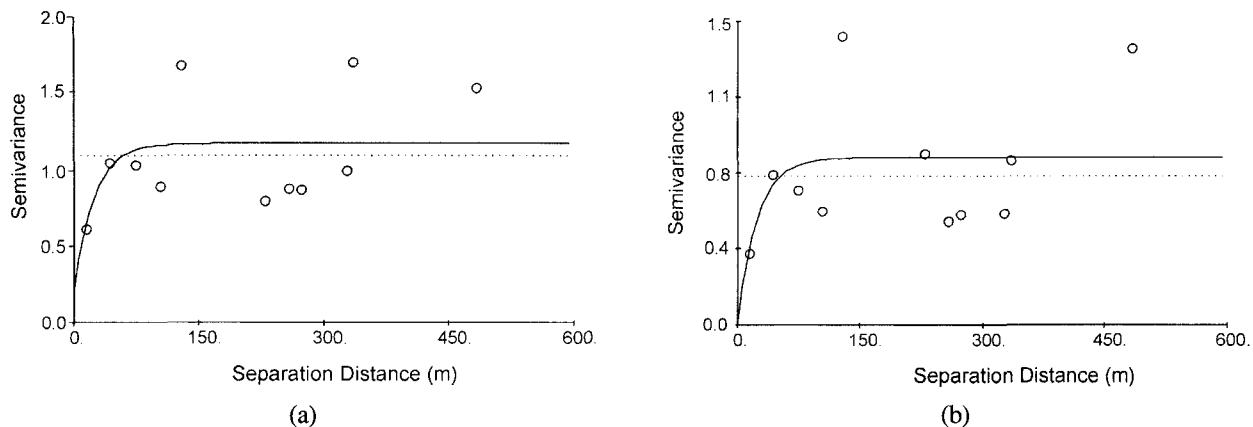


Fig. 8. Semivariograms of VES data along A-A' line in (a) May and (b) July, 2001.

3.2.1 걸보기비저항치의 지구통계기법 적용

1) 베리오그램 분석

베리오그램은 공간상에 분포하는 두 자료간의 분산으로, 자료의 공간적 특성은 반베리오그램(semivariogram)으로 나타내진다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{\sum [Z(x)-Z(x+h)]^2\} \quad (1)$$

여기서 $\gamma(h)$ 는 반베리오그램, $Z(x)$ 는 임의의 지점 x 에 있는 자료, 그리고 $Z(x+h)$ 는 $Z(x)$ 에서 h 만큼 떨어진 지점의 자료이다. (1)식은 다음과 같이 변형된다.

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

여기서 $N(h)$ 는 거리 h 만큼 떨어진 자료수이고 $Z(x_i)$ 는 x_i 지점에서의 값이다. 크리깅에 의한 추정치를 구하기 위해서는 자료들간의 공분산값이 요구된다. 이는 자료들의 반베리오그램 모델로부터 얻어질 수 있다. 즉

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

여기서 $C(h)$ 는 거리 h 만큼 떨어진 자료들간의 공분산이며, sill은 일정한 범위(range)를 넘어서 반베리오그램간의 상관관계는 없어진 안정된 상태의 반베리오그램 값이다.

A-A' 단면에서 5월과 7월에 측정된 자료들은 정상화률함수의 베리오그램 형태를 나타내어(Fig. 8), 지수형 모델을 적용한 정규크리깅을 실시하였다. 그리고 상관범위는 두 시기에 측정된 자료들이 같은 값을 나타내었으며, 베리오그램의 다른 매개변수들도 비슷한 값을 나타내고 있다(Table 1). 그러나 각 깊이별 걸보기비저항 평면들의 반베리오그램(Fig. 9)은 대부분 거리에 따라 증가하는 비정상화률함수의 형태를 나타내므로, 이를 적절히 반영할 수 있는 일반적 공분산(generalized covariance: GC)을 이용하는 k 계 고유화률함수(intrinsic random functions of order k : IRF- k)의 만능크리깅을 적용하였다.

2) 정규크리깅 적용

크리깅은 측정자료들의 선형적인 조합(linear combination)으로 최선의 선형 불편 추정자(Best

Table 1. Variogram models and parameters of A-A' section

Month	Model	Nugget	Sill	Range (m)
May	exponential	0.203	1.161	72
July	exponential	0	0.823	72

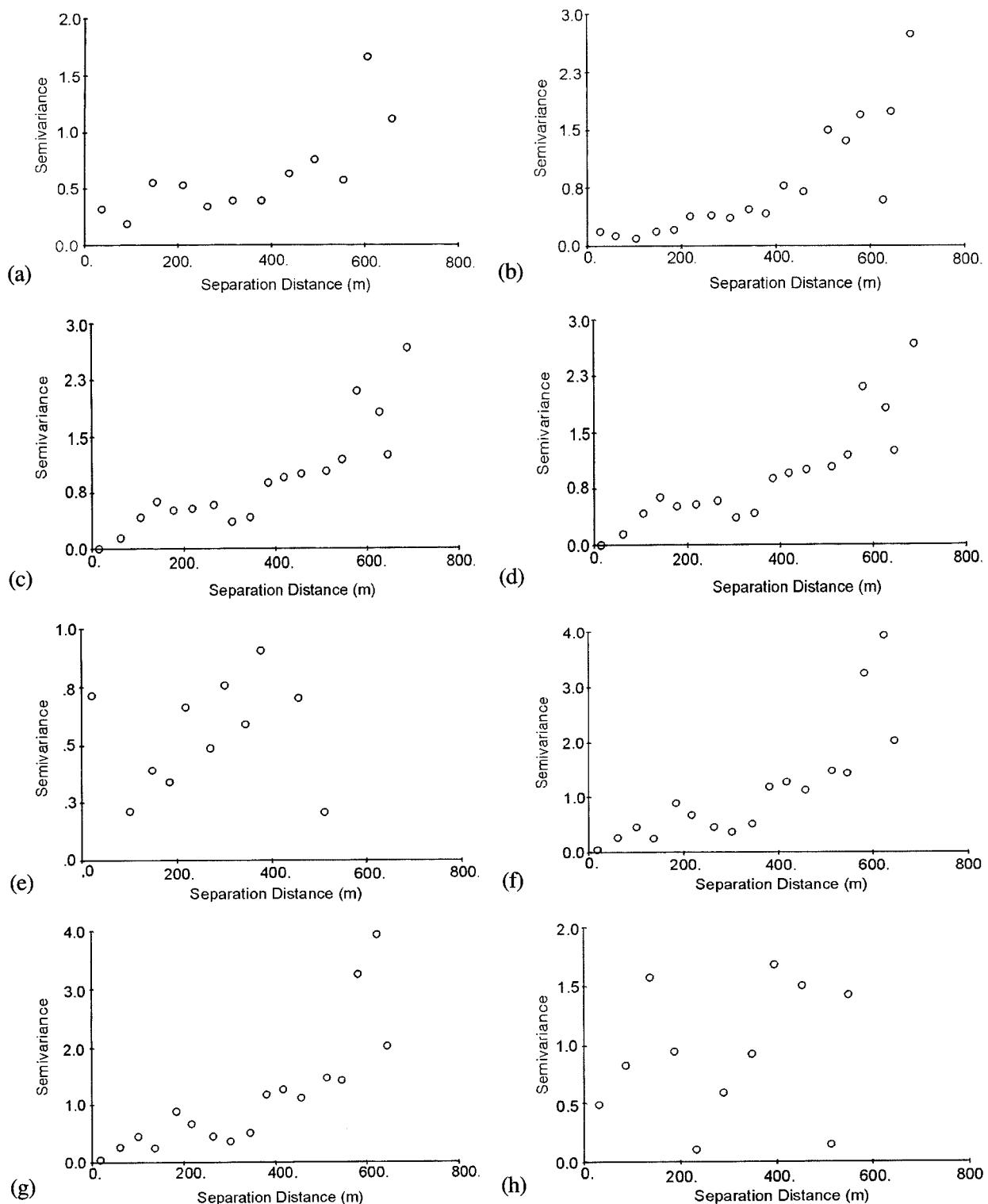


Fig. 9. Semivariograms of VES data for AB/2 = (a), (b) 21m, (c), (d) 30m, (e), (f) 50m and (g), (h) 70m in May and July, 2001, respectively.

Linear Unbiased Estimator: BLUE)를 계산하는 방법이다. 크리깅에 의한 추정치 Z_K^* 는

$$Z_K^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (4)$$

이다. 여기서 Z_i 는 공간상에 분포하는 자료값, λ_i 는 가중치이다. 크리깅의 가중치는 추정치가 불편이고, 추정분산이 최소가 되도록 결정되어야 한다. 크리깅의 불편조건은

$$E[Z_V - Z_K^*] = 0 \quad (5)$$

이므로,

$$\sum \lambda_i = 1.0 \quad (6)$$

이다. 추정분산 또는 크리깅분산은 다음과 같다.

$$\sigma_K^2 = E\{[Z_V - Z_K^*]^2\} = \bar{C}(V, V) + \mu - \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{C}(v_i, V) \quad (7)$$

여기서 $\bar{C}(V, V)$ 는 측정자료들간 공분산이고, $\bar{C}(v_i, V)$

V)는 측정자료와 추정치와의 공분산이다. 그리고 μ 는 Lagrangian parameter이다.

크리깅에서는 확율변수가 정규분포를 나타낼 때 가장 정밀한 추정값을 계산할 수 있으며, 왜도(skewness)가 큰 경우에는 대수변환을 실시하여 추정분산값의 오차를 줄일 수 있다²⁰⁾. 본 연구에서는 겉보기비저항 자료가 대수정규분포를 보이므로 대수변환된 값에 크리깅을 응용하여 겉보기비저항 수직단면도를 작성하였다. Fig. 10에서 상부는 담수의 영향으로 하부보다 전체적으로 높게 겉보기비저항치가 나타나지만 하부 분포와 급격한 변화는 보이지 않는다. 전류전극 간격 AB/2는 지표면으로부터의 심도로 볼 수 있으며, 본 연구지역에서 20m 이하는 대부분 암반으로 이루어져 있다. 일반적으로 해수가 침투하지 않은 암반으로 이루어진 지역에서 겉보기비저항치는 매우 높은 분포를 보인다. 그러나 본 연구지역은 낮은 투수성의 암반지대임에도 불구하고 겉보기비저항 분포가 매우 낮다. 따라서 낮은 겉보기비저항 분포로 미루어 본 연구지역에 해수가 광범위하게 침투하고 있을 가능성은 매우

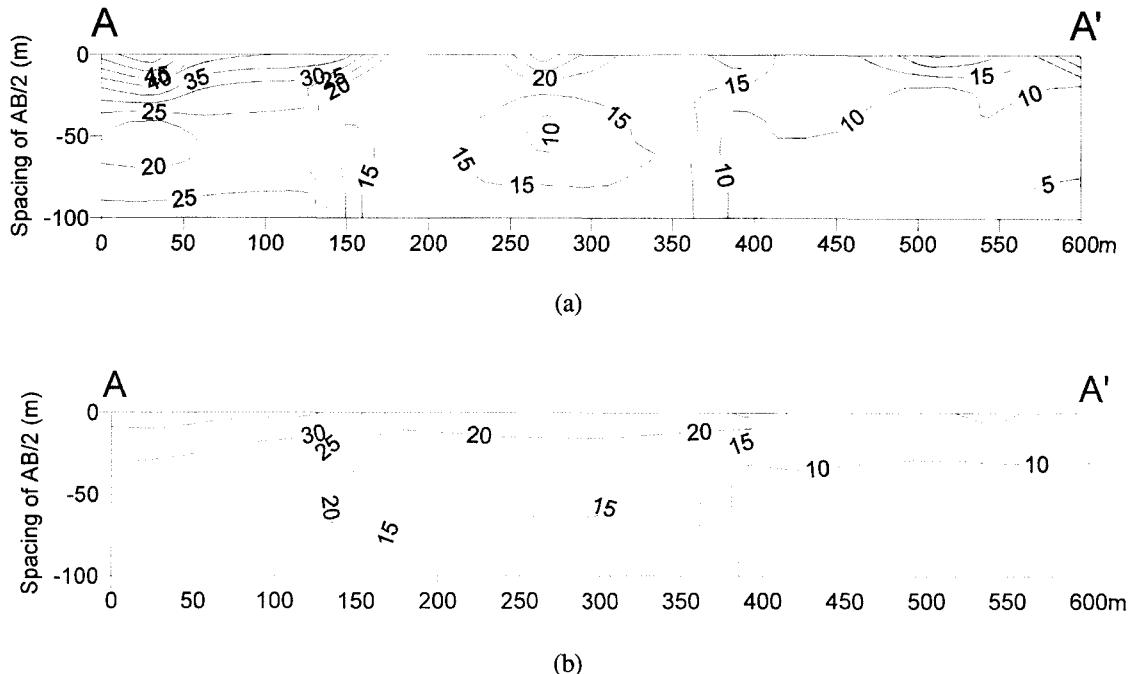


Fig. 10. Isopleth maps of apparent resistivity sections using the lognormal ordinary kriging in (a) May and (b) July, 2001. Contour values are in ohm-m.

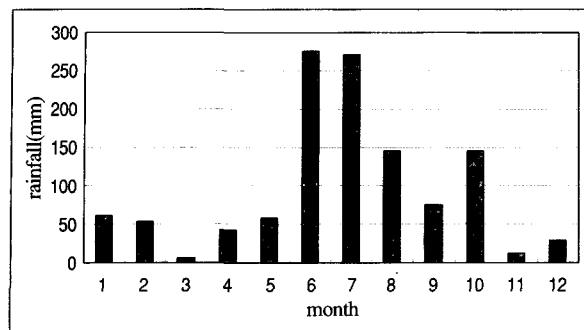


Fig. 11. Histogram of rainfall at the Pusan area in 2001.

크다. 5월의 수직단면도와 7월의 수직단면도를 비교하면, 5월의 단면도에는 우단 하부에 5 ohm-m 등치선이 있으며, 좌단부에 20 ohm-m 등치선과 중간부분에서 10 ohm-m 등치선도 나타난다. 그리고 7월의 겉보기비저항치가 5월에 측정된 것보다 전체적인 구간에서 약간 높게 나타난다. 이러한 변화는 6, 7월의 높은 강수량(Fig. 11)으로 지하수의 함양이 크게 증가함으로써 연구지역의 해수농도가 다소 낮아진 것에 기인하는 것으로 판단된다.

3) IRF-k 크리깅 적용

k계의 고유확률함수 이론은 Matheron(1973)²¹이 개발하였고 Delfiner(1976)²²에 의하여 재구성되었다. 이 이론은 정규크리깅의 공분산이 일반적 공분산으로 대체된 것으로 추정분산은 다음과 같다.

$$\sigma_e^2 = E(\sum_i \lambda_i Z(x_i))^2 = \sum_j \sum_j \lambda_i \lambda_j K_{ij} \quad (8)$$

여기서 K 는 거리에 따른 두 지점 사이의 공분산이고, $\sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i$ 는 n 개의 실험자료의 선형결합인 일반적 증가(generalized increment: GI)로서 다음과 같은 조건을 갖는다.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i x_{i_1}^{p_1} x_{i_2}^{p_2} \cdots x_{i_d}^{p_d} = 0 \quad (9)$$

여기서 정수 $p_1, p_2, \dots, p_n \geq 0$ 이며, $p_1 + p_2 + \dots + p_n \leq k$ 이다. d 는 공간의 차원이고, k 는 다항식의

계(order)이다. 임의의 확률함수에 있어서 k 계의 GI의 평균이 0이고 약한 정상(weakly stationary)일 경우 그 확률함수는 IRF-k라고 한다. IRF-k는 추정치의 계산을 특정한 베리오그램 모델 대신에 $2j+1$ 차의 다항식을 갖는 GC를 이용한다.

$$K(h) = C \delta(h) + \sum_{j=0}^k a_j |h|^{2j+1} \quad (10)$$

여기서

$$\delta(h) = \begin{cases} 0 & \text{if } |h| > 0 \\ 1 & \text{if } |h| = 0 \end{cases} \quad (11)$$

모델에 대한 상수들의 적합성을 평가하기 위하여 Delfiner(1976)²²의 알고리즘을 이용한 교차타당성(cross validation: jackknife)을 이용한다. 교차타당성은 추정치가 참값에 근사하는 정도를 판별할 수 있는 방법으로서, 동일 위치에 참값과 주변의 자료들로서 계산된 추정치의 오차를 비교하여 나타낸 것으로 식 (12)와 같이 나타낸다.

$$\rho = \left[\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{j=1}^n \{(Z(x_j) - Z_{-j}(x_j)) / \delta_{-j}(x_j)\}^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

여기서 $Z(x_j)$ 는 공간상에 분포하는 자료값이고, $Z_{-j}(x_j)$, $\delta_{-j}(x_j)$ 는 참값 $Z(x_j)$ 를 제외하고 나머지 자료들로 계산된 추정치와 그 분산이다. ρ 는 1.0에 가까울수록 설정된 GC모델이 참값과 근사한 추정치를 나타낸다. 교차타당성 결과로 얻은 IRF-k 크리깅 모델들은 7월에 측정된 겉보기비저항 자료 가운데 AB/2가 50m에서 k 의 값이 1인 GC 모델이, 나머지는 0차의 GC 모델을 가지는 것으로 나타났다(Table 2).

Table 2의 GC 모델들로 IRF-k 크리깅을 실시하여 겉보기비저항 평면도를 작성하였다. 교차타당성 검증에서 AB/2가 21m의 겉보기비저항 분포는 ρ 가 다른 전류전극 간격의 자료보다 1에서 큰 편차를 보이지만, 그 편차가 각각 0.111, 0.100로서 비교적 작은 값이다. 그리고 AB/2가 30m 이상의 전류전극 간격에서도 ρ 가 1로부터 0.1이하의 매우 작은 편차를 나타내므로 적용된 GC모델들이 적합한 것으로 판단된다. Fig. 12는 전류전극 간격에 따라 크리깅한 겉보기비저항 평

Table 2. Models for IRF-k kriging of VES data for AB/2 = 21m, 30m, 50m and 70m in May and July 2001

AB/2	k	GC model	Cross Validation (ρ)
21m (May)	0	0.37251	0.889
21m (July)	0	0.34561	1.100
30m (May)	0	0.57515	1.000
30m (July)	0	0.53354	1.012
50m (May)	0	0.58450	0.993
50m (July)	1	0.05483 - 0.0022h	1.014
70m (May)	0	0.90334	0.989
70m (July)	0	0.18400	1.055

면도로서 AB/2가 21m에서는 7월의 분포가 서쪽에는 25와 30 ohm-m 등치선도가 있으나, 5월에 측정된 것은 20 ohm-m 이상의 등치선은 나타나지 않는다. 그리고 AB/2가 30, 50m에서도 서쪽의 겉보기비저항 분포가 5월보다 7월이 높게 나타난다. AB/2가 70m에서는 겉보기비저항 분포도의 최대 등치선이 15 ohm-m으로서 다른 전류전극간격들에 비하여 낮은 겉보기비저항 분포를 형성한다. 그리고 등치선간의 간격도 매우 넓게 형성되어 있으며, 5월의 분포도보다 7월의 분포도에서 10 ohm-m 등치선이 동쪽으로 많이 이동한 형태를 나타내고 있다. 이러한 것들은 6월과 7월에 내린 강수로 인하여 함양된 지하수의 유입이 증가하여 해수와 담수의 경계면이 다소 동쪽으로 이동하였기 때문인 것으로 판단된다.

3.2.2 전기비저항치의 지구통계기법 적용

해수가 침입된 지역에서는 층서적으로 균질한 같은 암층에서도 지하수의 염도에 따라, 여러개의 다른 지전기적 층들로 해석될 수 있다²⁰. 그러므로 연구지역의 지질조사 자료와 탐사자료의 해석결과를 비교하여 해수침입의 가능성을 분석하여야 한다. 이를 위하여 시추자료²¹를 분석한 결과 전반적으로 본 지역은 매립퇴

적층, 풍화토층, 풍화각력층, 기반암 순으로 나타나며, 부분적으로 풍화토와 풍화각력이 교호하며 나타나는 경우도 있다. 매립퇴적층은 전반적으로 6m 이하이며 지역적으로 서쪽에서 동쪽으로 가면서 증가하는 양상을 보인다. 그리고 풍화토층은 대체적으로 지표하 10 ~ 30m 심도까지 발달되어 있고, 풍화정도에 따라 두 개의 층으로 나눌 수 있다. 풍화각력층의 발달심도는 약 18 ~ 52m에 이르는 것으로 대부분 30m 내외의 발달심도를 나타내며 남측으로 갈수록 얕아지는 경향을 보인다.

전기비저항 수직탐사 자료의 역산 결과에서는 대부분이 3 내지 4개의 지전기적 층서로 이루어져 있는 것으로 보인다. 그러나 동쪽으로 갈수록 염수의 영향으로 인하여 전기비저항치가 매우 낮기 때문에 지질적인 층서로 구분되기는 어렵다. 그리고 해수가 침입되는 것으로 추정되는 동쪽에 가까운 지점들(VES-8, 9, 10, 11, 12, 14)에서는 맨 하부층의 비저항이 10 ohm-m 이하로 낮게 나타났다.

Fig. 13은 각 측점에서 심도 30 ~ 70m 범위의 지전기적 층서구조에서 가장 낮은 전기비저항값의 배리오그램이며, 정상화율함수 형태로서 5월과 7월에 각각 구상형 모델과 지수형 모델을 적용하였다. 30 ~ 70m

Table 3. Variogram models and parameters of VES data in May and July, 2001

Month	Model	Nugget	Sill	Range (m)
May	spherical	0.458	1.14	301
July	Exponential	0.437	1.58	1,772

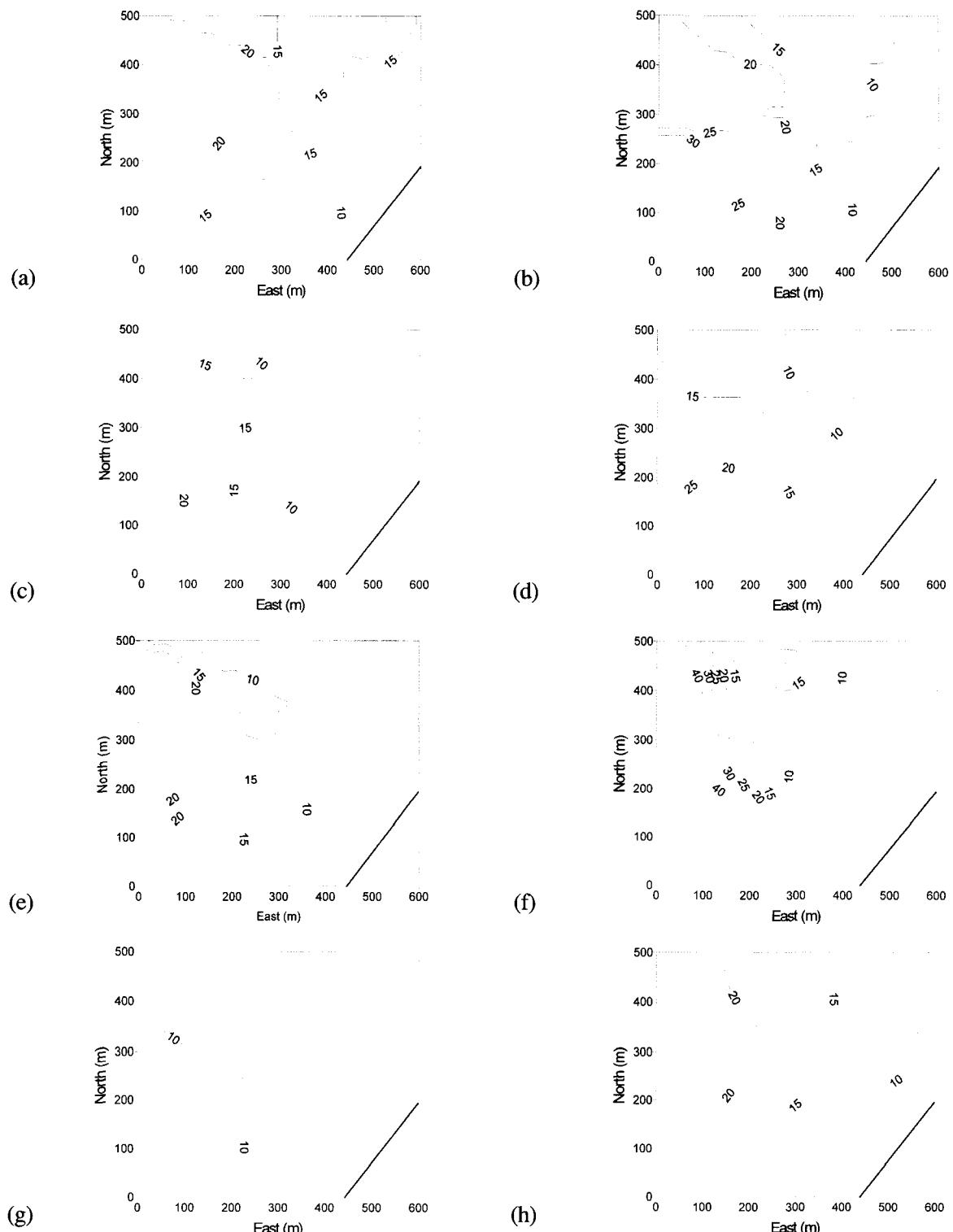


Fig. 12. Apparent resistivity contour maps for $AB/2 =$ (a, b) 21m, (c, d) 30m, (e, f) 50m and (g, h) 70m in May and July, 2001. Contour values are in ohm-m.

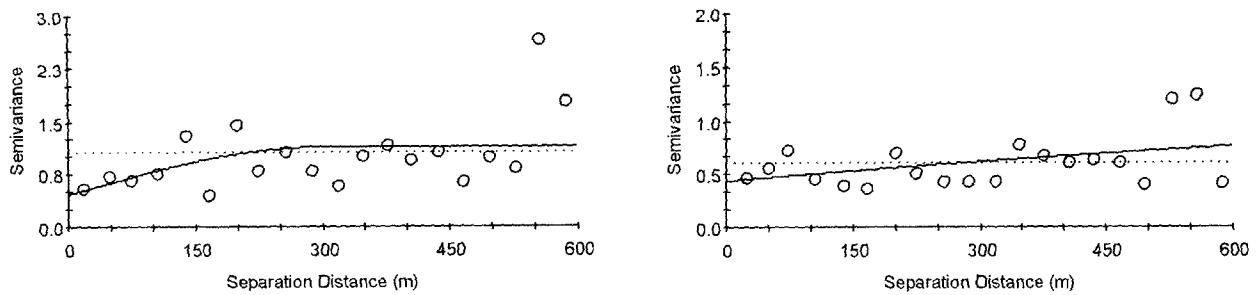


Fig. 13. Semivariograms of VES data in (a) May and (b) July, 2001.

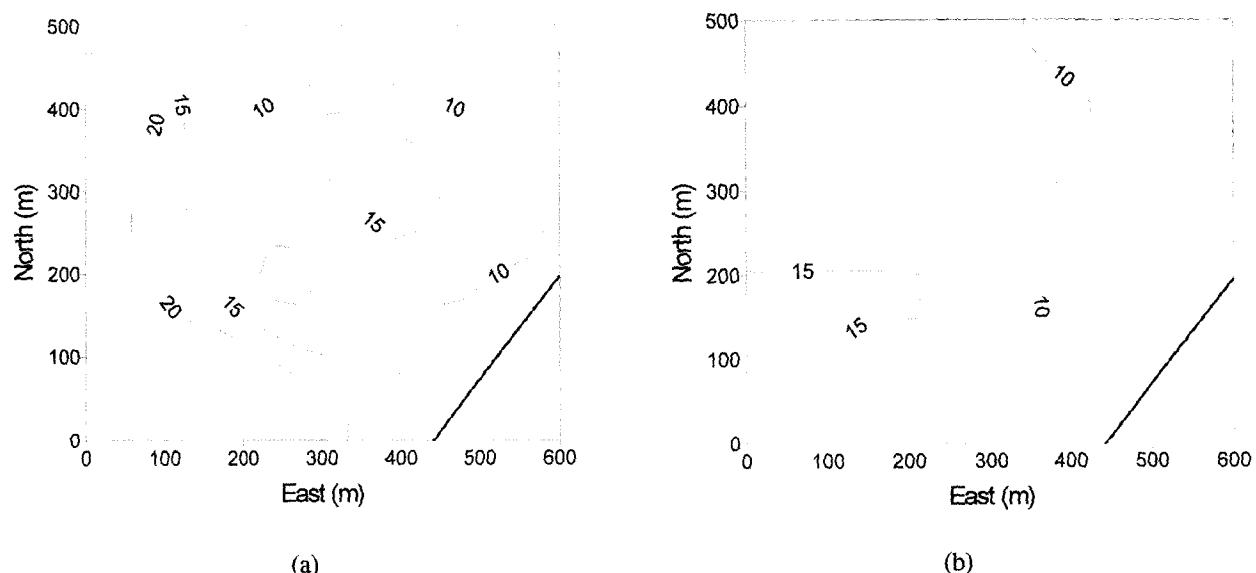


Fig. 14. Resistivity distributions from the inversion of VES data in (a) May and (b) July, 2001. Contour values are in ohm-m.

의 심도에 대한 각 측점의 최소 전기비저항값을 이용한 이유는 결보기비저항 분포를 분석한 결과 해수침입의 영향이 대부분 30m 이하에서 나타나고 있으며, 70m 하부는 측정지점의 수가 적고, 불확실성이 크기 때문에 제외하였다. Table 3에서 5월과 7월 자료의 상관거리(range)는 차이가 크지만, nugget과 sill은 비슷한 값을 나타낸다. Fig. 14는 대수정규크리깅을 이용하여 작성한 전기비저항 분포도이며, 전기비저항의 분포는 전체적으로 동쪽방향이 낮게 나타났다. 5월의 전기저항 분포도에서 북쪽의 10 ohm-m 등치선이 7월에는 동쪽으로 많이 이동한 형태를 보이며, 15

ohm-m와 10 ohm-m 등치선도 연구지역의 중심에서 동쪽으로 이동한 것으로 나타났다. 이러한 현상들은 결보기비저항 분포에서와 마찬가지로 6, 7월의 강수에 의한 지하수 함양으로 지반내 침입된 해수의 농도가 감소한 것으로 판단된다. 등치선의 방향은 결보기비저항 분포와 유사하며, 전체적으로 남동쪽의 경계부와 동쪽이 낮게 나타났다. Ebraheem 등(1997)¹³⁾은 모래를 함유한 사질과 실트질 지반에서 해수가 완전히 침투한 다공질 암층의 전기전도도는 5 ohm-m 이하, 그리고 해수-담수 혼합수대의 전기비저항은 5 ~ 15 ohm-m인 것으로 설정하였다. 그러나 본 연구지역에

서는 모니터링 우물의 수직적인 전기전도도(Fig. 3)를 고려하면, 15 ohm-m의 등치선보다 내륙으로 더 깊게 해수가 침입되어 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 모니터링 우물에서 지하수위와 전기전도도를 측정하여 강수량에 따른 담수와 해수의 경계면 변화를 파악하였으며, 지구물리 탐사자료의 지구통계학적 분석에 의한 부산 동남해안 지역의 해수침투 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 강수에 의한 직접적인 지하수의 충진으로 모니터링 우물에서의 지하수위는 강수량과 비례하는 것으로 나타났다. 그러나 강수량이 적으면 해수의 유입이 증가되어 강수량과 전기전도도는 대체로 반비례 관계를 보인다. 모니터링 우물에서 전기전도도는 약 24m 심도에서 급격히 증가되어 26m 전후에서 $20,000\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 초과하였다. 그리고 지하수위와 전기전도도를 비교한 결과, 지하수위가 낮아질수록 해수와 담수의 경계면이 상승하는 것으로 나타났다.
2. 강수량과 지하수위의 교차상관성 분석에 의하면 지하수위 변동은 강수에 의하여 단시간에 영향을 받고 있으며, 강수량과 전기전도도와의 교차상관성 분석에 의하면 지반의 낮은 투수성과 확산이 우세한 염수침입에 의하여 해수와 담수의 경계면 변화가 느리게 나타나고 있다.
3. 수평탐사의 역산결과 측선 Line 1에서는 동쪽끝에서 내륙으로 약 14m 지점까지, Line 2에서는 남동쪽 끝에서 내륙으로 25m 지점까지 해수침입의 영향이 나타났다. 대수 정규크리깅한 겉보기비저항 단면도에 의하면 7월에는 지하수의 함양으로 해수농도가 낮아져 5월보다 겉보기비저항치가 다소 높게 나타난다. 그리고 대수 IRF-k 크리깅을 이용한 심도 30m 이상의 겉보기비저항 평면도에서도 7월에 저비저항대가 약간 해안가로 이동하여 5월 보다 겉보기비저항치가 높아졌다.
4. 전기비저항 분포도에서는 겉보기비저항 분포도와

같이 전체적인 해수침입의 방향성이 비슷하게 나타났다. 그리고 7월에 측정된 전기비저항 분포가 5월 보다 높게 나타나는 것은 6, 7월에 내린 강수에 의해 지하수의 함양이 증가하여 해수와 담수의 경계면이 다소 해안가로 이동하였기 때문이다. 겉보기비저항의 수직단면도 및 평면도 그리고 전기비저항 평면도를 분석한 결과, 지구통계학적 기법은 해수의 경계면에서 전기비저항 분포의 변화를 파악하는데 매우 유용하였다.

사 사

전기비저항 탐사의 현장자료 획득 및 해석에 도움을 준 부경대학교 탐사공학과의 이동성 박사님에게 감사드립니다. 그리고 본 연구는 2000년도 부경대학교 발전기금의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이치섭, 김희준, 공영세, 이정모, 장태우, 2001, 2차원 전기비저항 탐사를 이용한 경주 개곡리 지역의 단층조사, 물리탐사, 4(4), pp124-132 (2001).
2. 대한광업진흥공사, 해남지역 지하수 기초조사 보고서, (2000).
3. 정상용, 심병완, 김규범, 강동환, 박희영, 지구통계기법을 이용한 영산강·섬진강 유역의 지하수 수질특성 연구, 지하수환경, 7(3), pp.125-132 (2000).
4. 정상용, 강동환, 박희영, 심병완, 부산지역 지하수 오염현황 분석을 위한 지구통계기법의 응용, 지질공학, 10(3), pp.247-261 (2000).
5. Figueira, R., Space-Time Geostatistical Modeling: A Case Study of Sea-Salt Measured on Lichens, Geoenv II -Geostatistics for Environmental Applications, pp.53-64(1999).
6. Isaaks, E.H., and Srivastava, R.M. Applied Geostatistics, Oxford Univ., (1989).
7. Istok, J.D., Smyth, J.D., and Flint, A.L. Multivariate

- geostatistical analysis of ground-water contamination: a case history, *Ground Water*, 31, pp.63-74 (1993).
8. Juang, K.W., and Lee, D.Y., Simple indicator kriging for estimating the probability of incorrectly delineating hazardous areas in a contaminated site, *Environ. Sci. Technol.*, 32, pp.2487-2493 (1998).
9. Smith, M.L., and Williams R.E., Examination of methods for evaluating remining a mine waste site. Part II. Indicator kriging for selective remediation, *Eng. Geol.*, 41, pp.23-30 (1996).
10. Weber, D., Easley D., and Englund E., Probability of plume interception using conditional simulation of hydraulic head and inverse modeling, *Math. Geol.*, 23, pp.219-239 (1991).
11. Woldt, W., Hagemeister M.E., and Jones, D.D., Characterization of an unregulated landfill using surface-based geophysics and geostatistics, *Ground Water*, 36, pp.966-974 (1998).
12. Abdul Nassir S.S., Loke M.M, Lee C.Y., and Nawawi M.N.M, Salt-water intrusion mapping by geostatistical imaging surveys, *Geophys. Prosp.*, 48, pp .647-661 (2000).
13. Ebraheem, A.M., Senosy M.M., and Dahab K.A., Geoelectrical and hydrogeochemical studies for delineating ground-water contamination due to salt-water intrusion in the north part of the Nile delta, Egypt, *Ground water*, 35, pp.216-222 (1976).
14. Kalinski, R.J., and Kelly, W.E., and Bogardi, I., Combined use of geoelectric sounding and profiling to quantify aquifer protection properties, *Ground water*, 31, pp.538-544 (1993).
15. Stewart, M., Layton M, and Lizanec T., Application of resistivity survey to regional hydraulic reconnaissance, *Ground Water*, 21, pp.42-48 (1983).
16. Stewart, M., and Gay M.C., Evaluation of transient electromagnetic soundings for deep detection of conductive fluids, *Ground Water*, 24, pp.351-356 (1986).
17. 부경대학교, 대연 전화국 연결 통신구 공사로 인한 부경대학교 시설물 피해영향조사 연구(2/4), (1997).
18. Kim, H. J., Two-dimensional resistivity inversion with smoothness constraint, *J. Geol. Soc. Korea.*, 26, pp.12-17 (1990).
19. Zohdy, A.A.R., Eaton,G.P. and Mabey, D.R., Application of surface geophysics to ground-water investigations, USGS--TWRI Book 2, Chapter D1. (1974).
20. Hohn, M.E., *Geostatistics and Petroleum Geology*, (1999).
21. Matheron, G., The intrinsic random functions and their applications, *Advanced Applied Probability*, 5, pp.439-468 (1973).
22. Delfiner, P., Linear Estimation of Non Stationary Spatial Phenomena, *Advanced Geostatistics in the Mining Industry*, edited by M. Guarascio, M. David, and C. Huijbregts, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht-Holland, pp.49-68 (1976).
23. 부경대학교, 대연 전화국 연결 통신구 공사로 인한 부경대학교 시설물 피해영향조사 연구(4/4), (1997).