

전기비저항 모니터링을 이용한 해수침투 파악

황학수¹⁾ · 이상규¹⁾ · 고동찬²⁾ · 김양수³⁾ · 박인화¹⁾

Detection of Sea-water Intrusion Caused by Tidal Action Using DC Resistivity Monitoring

Hak Soo Hwang, Sang Kyu Lee, Dong Chan Ko, Yang Soo Kim and In Hwa Park

요약 : 조사지역은 해안과 인접한 경기도 화성군 석천리에 위치하고 있으며, 그 면적은 약 1 km²이다. 이 지역은 기아 자동차 화성공장 건설 이전에 이미 해수침투에 의해 오염된 지역으로 알려져 왔으나, 지구물리적 또는 지구화학적 방법을 통하여 해수침투에 의한 오염분포 현황과 오염의 계속적인 진행 여부가 체계적으로 연구되지 않은 지역이다. 그러므로 본 연구에서는 지구물리적 방법(슬럼버저배열의 전기비저항 수직탐사, 쌍극자-쌍극자배열의 2차원 전기비저항탐사)을 사용하여 해수침투에 의해 오염된 범위 및 해수침투의 주 경로를 파악하고자 하였으며, 또한 해수침투의 진행 여부를 판단할 수 있는 하나의 증거인 조석운동에 의한 해수의 유동을 확인하기 위하여 슬럼버저배열을 사용한 전기비저항 모니터링도 수행하였다. 전기비저항 수직탐사의 결과로부터 조사지역은 2개의 영역, 즉 ~30 ohm-m 이하 그리고 그 이상의 전기비저항 분포를 나타내는 영역으로 구분된다. 여기서, ~30 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항을 보이는 부분은 조사지역의 천부에 존재하는 점토층의 분포와 일치하며, 구 해안선으로 갈수록 점토층의 전기비저항은 매우 낮은 값을 갖는다. 수리 지질학적 분석에 의하면 구 해안선으로부터 약 200 m 내에 분포하는 점토층은 해수에 의해 이미 오염되었으며, 이 같은 점토층은 하부에 존재하는 사질층의 전기전도도보다 약 8배 정도 높은 것으로 확인되었다. 북서-남동방향으로 평행하게 설정된 2개의 축선에서 수행된 2차원 전기비저항탐사의 해석 결과에 의하면 구 해안선으로부터 북동방향으로 서로 평행하게 발달된 2개의 가능한 해수침투 경로가 확인되었으며, 그 중 상대적으로 남쪽에 존재하는 침투경로는 심부 80 m 이상까지 낮은 전기비저항대가 연장 발달된 것으로 해석되었다. 구 해안선으로부터 내륙으로 약 260 m되는 지점(2차원 전기비저항탐사로부터 심부 80 m 이상까지 연장 발달된 것으로 해석된 침투경로 상의 한 측정점에서 실시한 전기비저항 모니터링 자료에서 조석운동에 의한 12시간의 주기를 갖는 걸보기비저항의 변화를 확인할 수 있었다. 이 같은 사실로 보아 2차원 전기비저항탐사에서 해석된 낮은 전기비저항 이상대는 암반 내에 발달한 파쇄대로서, 조석운동에 의한 해수의 유동통로이며, 이같은 파쇄대를 따라 현재에도 해수침투가 진행되고 있다는 결론을 유추할 수 있다.

Abstract : The 1 km² area studied is located in Sukchun-ri, Hwasung-koon, the southern part of Kyeonggi-do. Even though this site has been known as a contaminated area caused by seawater intrusions, geophysical and geochemical surveys have never been carried out at the site to determine the extent of the seawater contamination and to investigate whether the seawater intrusion is in progress. The purpose of this study is to determine the extent of seawater contamination and a preferred channel of the seawater intrusion using geophysical methods such as DC resistivity surveys with Schlumberger array and a dipole-dipole array. In order to determine whether the seawater intrusion is in progress in the area, DC resistivity monitoring with Schlumberger array was performed. According to the resistivity map obtained from the inversion of the resistivity data measured with Schlumberger array, the study area is divided into two districts as relatively lowly resistive (less than 30 ohm-m) and highly resistive (more than 30 ohm-m) areas. The distribution of the lowly resistive area is consistent with the distribution of the layer composed of clay minerals, and the resistivity of this layer decreases slowly as approaching to the old seashore. Hydrogeological analysis shows that the clay layer within a distance of about 200 m from the seashore has been already contaminated by sea-water and its electric conductivity is 8 times higher than that of the sand layer covered by the clay layer. According to the results of the 2-dimensional DC resistivity surveys with a dipole-dipole array, there are two preferred channels of the seawater intrusion in the site, and both the channels are in the NW-SE direction from the old seashore. The lowly resistive zone in the southern channel extends to a depth of 80 m. The DC resistivity monitoring with Schlumberger array was carried out along the preferred channel which has the low resistivity zone (fracture zone) that extended to a depth of 80 m. The time series of apparent resistivity, measured at a distance of 260 m from the old coast line, fluctuates with a period of 12 hours. From these

*1999년 7월 28일 접수

1) 한국자원연구소 자원연구부(Resource Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials)

2) 한국자원연구소 지구환경부(Earth and Environmental Division)

3) 충남대학교 지질학과(Dept. of Geology, Chungnam National University)

observations, it can be concluded that the seawater intrusion caused by tidal action is still in progress along the fractured zone interpreted by the DC resistivity surveys with a dipole-dipole array.

Keywords : 전기비저항 모니터링, 해수침투

서 론

일반적으로, 해안가의 자유면 또는 준피압 대수층에서 담수의 흐름은 조석운동에 대하여 민감하게 반응한다. 만약 담수의 수두가 해수의 수두에 비하여 충분히 크다면, 해안으로 연결 개방된 대수층 내의 해수는 밀려나가며, 대수층이 노출된 해저(sea floor)에서는 담수가 용출할 것이다. 이에 반하여, 담수의 수두가 해수를 밀어낼 만큼 크지 못하면, 해안가로부터 내륙지역에 담수와 해수간의 동적평형을 유지하는, 즉 담수와 해수가 혼재하는 전이대(transition zone)가 존재할 것이다. 담수와 해수가 혼재하는 전이대의 위치와 공간적 형태는 조석운동(tidal action) 그리고 담수의 배출(discharge) 및 함양(recharge)에 따른 수두의 변화에 의하여 결정된다(Melloul and Goldenberg, 1997; Freeze and Cherry, 1979). 그러므로, 조석운동에 의한 전이대의 위치 변화를 확인하는 것은 해수침투의 지속 여부를 파악하는 가장 직접적인 정보가 될 것이다.

조사지역은 경기도 화성군 석천리 지방의 해안가로서, 기아자동차 화성공장과 접해있다. 기아자동차 공장이 건립되기 이전에는 현재의 공장부지가 바다였으며, 그 당시 조사지역은 이미 지하로의 해수침투 및 태풍에 의한 해수범람에 의해 지하수, 지질 및 지표토양이 염해를 입고 있었다. 기아자동차 공장 건설 당시 공장부지 내로 해수의 침투를 차단하기 위하여 차수벽 설치 등을 포함한 대규모 토목공사가 이루어졌다. 그러므로 해안방향으로 기아자동차 공장과 접한 조사지역은 기아자동차 건설 후 더 이상의 해수침투에 의한 오염이 진행 되지 않고 기존에 이루어졌던 해수침투에 의한 잔류 염분을 담수가 희석 배출하는 중에 있는 지역으로 생각되어 왔다. 그러나 현재까지 이를 증명할 지구물리 그리고 지구화학적인 체계적인 연구가 수행되지 않은 지역이다.

그러므로 본 연구에서는 지구물리탐사의 일종인 전기비저항 탐사를 사용하여 기아자동차 공장건설 전에 이루어진 해수침투에 의한 오염영역과 우세한 침투경로 그리고 현재도 해수침투가 지속되고 있는가를 파악하는 것을 목적으로 한다.

지질 및 지형

조사지역의 면적은 약 1 km²로서, 해안과 인접한 경기도 화성군 석천리에 위치하고 있다(Fig. 1). 조사지역과 인접한 북서방향 지역에는 과거 염전이 있었으며, 현재에도 가행 중에 있는 염전이 있다. 조사지역을 포함한 인근 지역은 이미 해수침투에 의해 오염된 지역으로 알려져 있으나, 지구물리적 그리고 지구화학적 방법을 통하여 해수에 의한 오염분포 현황과 오염

의 지속적인 진행 여부에 대하여 체계적으로 연구되지 않은 지역이다. 막연히, 조사지역의 한쪽 경계면과 접해 있는 기아자동차 공장이 건설될 1988년 당시에 지반공사와 차수벽 설치 등에 의해 더 이상의 해수침투에 의한 지하수 및 지질의 오염의 진행이 없는 지역으로 알려져 왔다.

물리탐사가 수행된 조사지역은 해발고도가 약 30 m 내외의 비교적 평탄한 구릉지를 이루고 있는 노년기 지형이다. 조사지역은 점토, 모래, 실트 그리고 소량의 자갈 등으로 구성된 제4기 충적층으로 덮여 있기 때문에 암석의 노두는 발견되지 않으나 대부분의 암석은 한반도에 분포하고 있는 고기암층의 일부인 선크브리아기의 편마암류와 편암류가 분포하고 있는 것으로 이병주 등(1993)에 의해 보고 되었다(Fig. 1).

물리탐사 자료 획득

조사지역의 전기비저항 분포를 파악하기 위하여 총 41개 측정점에서 슬럼버져배열(Schlumberger array)을 이용한 전기비저항(DC resistivity) 수직탐사를 수행하였다. 전기비저항 수직탐사가 수행된 총 41개 측정점들(Fig. 1에서 ○으로 표시)은 조사지역 내에서 전체적으로 격자망을 형성하도록 설정하였다. 각 측정점에서 탐사의 목표심도가 50 m 이상이 되도록 최대 전류전극간 거리의 반을 100~150 m까지 전개하였으며, 모든 측정점에서 전류전극의 전개방향을 N20°~30°W로 유지하였다.

전기비저항 수직탐사와 더불어 조사지역의 2차원 전기비저항 분포, 즉 해수침투의 우세한 통로를 파악하기 위하여 조사지역 내에 2개의 축선(Fig. 1에서 굵은 실선으로 표시)을 설정하여 쌍극자-쌍극자배열(dipole-dipole array)의 전기비저항탐사를 수행하였다. 축선 D1은 조사지역의 남서방향 경계면과 기아자동차 공장이 접하는, 즉 구 해안선을 따라 설정하였고 축선 D2는 축선 D1으로부터 내륙으로 약 320 m되는 곳에 축선 D1과 평행하게 설정하였다. 축선 D1(축선거리: 1000 m)과 D2(축선거리: 780 m)에서 측정 시 사용한 전극간 거리(a)와 전극전개수(n)는 각각 20 m와 10이며, 측정방향은 남동방향에서 북서방향으로 하였다.

총 41개의 측정점에서 수행된 전기비저항 수직탐사와 쌍극자-쌍극자배열 전기비저항 2차원탐사의 자료해석으로부터 2개의 측정점(Fig. 1에서 ●로 표시함)을 선정하여 총 8일 동안(1998년 8월 11일~1998년 8월 18일) 슬럼버져배열을 사용한 전기비저항 모니터링을 실시하였다. 모니터링 수행기간 동안 전류, 전위전극의 위치 변화에 의한 측정오차를 최소화하고 대지와외 접촉저항을 일정하게 유지하기 위하여 모든 전류전극과 전위전극을 대지에 고정 설치하였다.

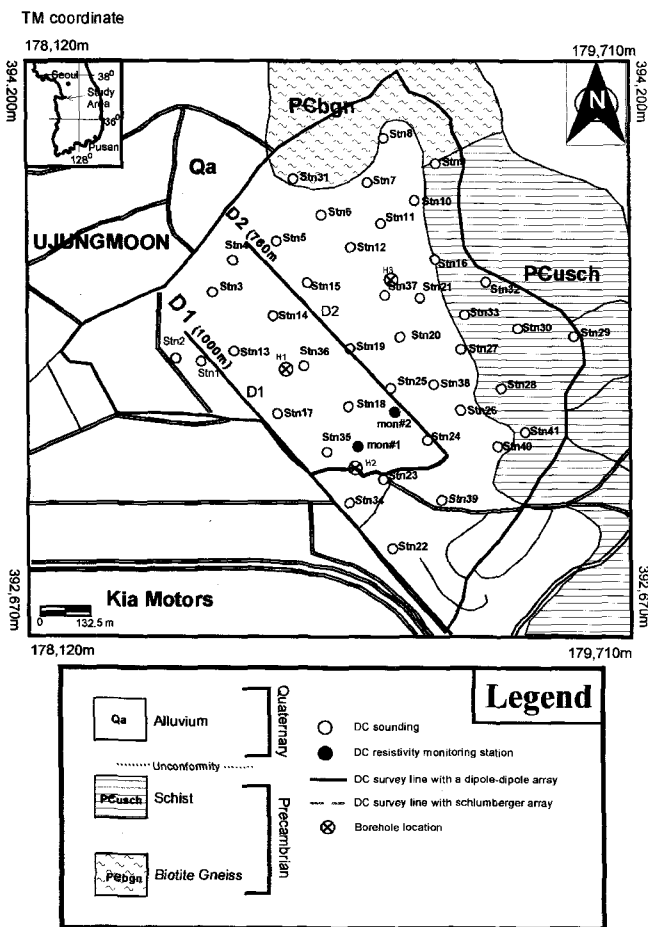


Fig. 1. Geology and geophysical survey map of the study area.

물리탐사 자료처리 및 해석

Fig. 2는 조사지역의 지전기적 구조를 1차원 층서구조로 가정하여 적용한 슬러브저배열 전기비저항 수직탐사의 신뢰성을 검토한 것으로서, 왼쪽 그림은 시추공 H1(Fig. 1에서 ⊗로 표시함)의 주상도이며, 오른쪽 그림은 시추공 H1로부터 서쪽으로 약 5 m 떨어진 곳에서 수행한 전기비저항 수직탐사의 겉보기비저항 곡선과 역산 결과이다. 주상도에 표시한 것과 같이 깊이 3 m까지는 대부분이 모래와 자갈로 구성된 층으로서 소량의 조개껍질과 점토 및 실트를 포함하고 있다. 깊이 3~9.25 m까지는 주로 점토층으로서 소량의 모래와 자갈 그리고 식물 파편을 포함하고 있으며, 점토층은 다량의 염분을 포함하고 있는 것으로 지구화학적 분석에 의해 밝혀졌다(염병우, 1998: Pers. Comm.; 장호완, 1998). 점토층 하부에는 풍화가 매우 심한 편마암이 존재하고 있으며, 시추공의 최종 굴진 깊이는 지표로부터 21.5 m이다.

전기비저항탐사 자료의 역산 결과에 의하면 시추공(H1)과 인접한 측점 하부의 지전기적(geo-electric) 구조는 3층구조로 해석된다. 제1층의 전기비저항과 두께는 각각 79 ohm-m와 1.6 m로서, 이는 시추주상도에서 다량의 모래와 자갈로 구성된

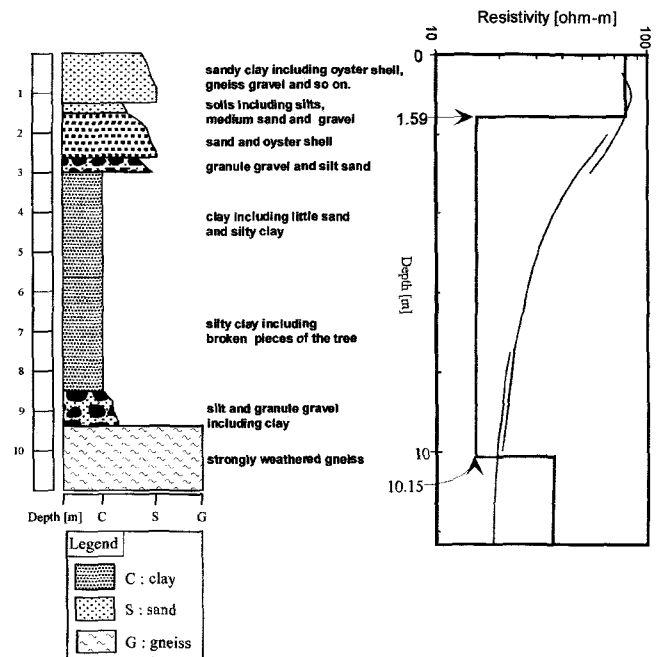


Fig. 2. Comparison of DC sounding result with geological logging data.

표토층에 해당된다. 비저항이 20 ohm-m 이하이고 심도가 약 10 m까지 지속되는 제2층은 소량의 폐각과 실트로 구성된 모래층의 하부로부터 편마암의 상부까지 존재하는 시추주상도 상에서 점토층이다. 전기비저항이 약 40 ohm-m내외를 보이는 제3층은 풍화가 심한 편마암 층으로서, 비저항 값이 비교적 낮은 이유는 풍화된 편마암을 피복하고 있으며, 또한 다량의 염분을 포함한 점토층으로부터 용해되어 흘러나온 염분, 또는 점토층과 편마암의 경계면이나 풍화된 편마암내의 공극을 따라 해수의 침투 등과 같은 요인들에 의한 것으로 추정된다. 전기비저항탐사의 역산결과와 시추주상도 간의 비교 검토를 통하여 연구지역에 대한 지전기적 층서구조의 가정과 슬러브저배열 전기비저항 수직탐사의 적용성을 입증하였다.

Fig. 3은 총 41개 측정에서 수행한 전기비저항 수직탐사 자료의 역산을 통하여 얻은 조사지역의 전기비저항 분포도이다. 전기비저항 분포도 작성에 사용한 값은 각 측정점에서 해석된 지전기적 층서구조 중에서 가장 낮은 전기비저항 값을 갖는 층의 전기비저항 값으로서, 그 범위는 약 2~250 ohm-m이다. Telford 등(1976)과 Stewart and Gay(1986)는 해수자체의 전기전도도가 5 S/m(전기비저항: 0.2 ohm-m), 해수가 완전히 침투한 다공질 암층의 전기전도도는 0.33 S/m(전기비저항: ~3 ohm-m) 그리고 해수-담수 혼합수대의 전기비저항이 약 5~30 ohm-m인 것으로 보고하고 있다.

그러므로 등고선도 상에서 굵은 선으로 표시한 등고선(전기비저항이 30 ohm-m)을 기준으로 해수에 의해 오염된 지역(30 ohm-m 이하의 영역)과 오염이 되지 않은 지역(30 ohm-m 이상의 영역)으로 구분할 수 있으며, 또한 구 해안선으로부터 북동

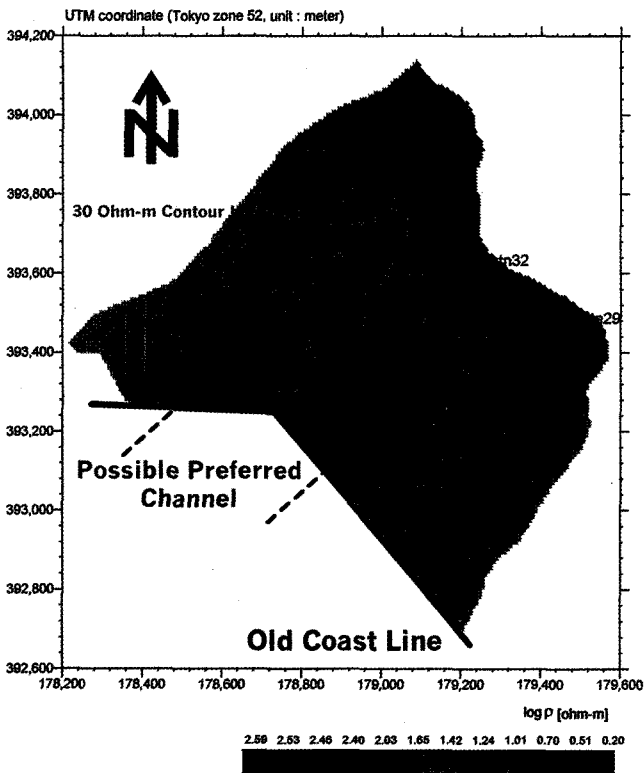


Fig. 3. Horizontal distribution of the lowest resistivity obtained with DC inversions.

방향의 주향(등고선도 상에서 빨강색 굵은 점선으로 표시)을 갖는 2개의 낮은 전기비저항 이상대가 존재함을 알 수 있다. 조사지역 내에서 실시한 시추조사 및 현지 주민에 대한 탐문조사(예, 관정 개발 시의 지질구조)로부터 30 ohm-m 이하의 전기비저항 분포를 보이는 영역은 천부 20 m 내에 존재하는 점토층인 것으로 판단되며, 점토층의 전기비저항 값은 일반적으로 내륙에서 해안으로 갈수록 낮아진다.

전기비저항 분포도에서 인지된 낮은 전기비저항 이상대의 심부 연장을 파악하고, 또한 이같은 이상대가 해수침투의 주 경로인지를 확인하기 위하여 실시한 전기비저항 2차원 탐사 결과는 Fig. 4와 Fig. 5에 도시하였다. 각 그림에서 상단에 도시한 그림은 현장에서 측정된 겉보기비저항의 가단면도(pseudo-section)이고, 중앙 그림은 탐사가 수행된 측선 하부의 지전기적인 2차원 구조가 하단에 도시한 그림과 같을 때 이론적으로 계산한 겉보기비저항의 가단면도이다. 각 단면도에서 전기비저항은 빨강색에서 노랑색을 지나 파랑색으로 갈수록 차차 낮아짐을 의미한다.

역산에 의해 도출된 측선 D1의 2차원 지전기적 단면도(Fig. 4)에서 측선의 중앙부(측점 24~49)에 30 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항이 넓게 분포하고 있으며, 특히 측점 28~34에서는 15 ohm-m 이하의 매우 낮은 전기비저항 이상대가 지하 80 m 까지 연장되어 나타나고 있다. 시작 측정점으로부터 측정점 20까지, 즉 측선의 남동부에는 100 ohm-m 이상의 상대적으로 높은 전



Fig. 4. Inversion results of DC surveys with a dipole-dipole array carried out along survey line D1.

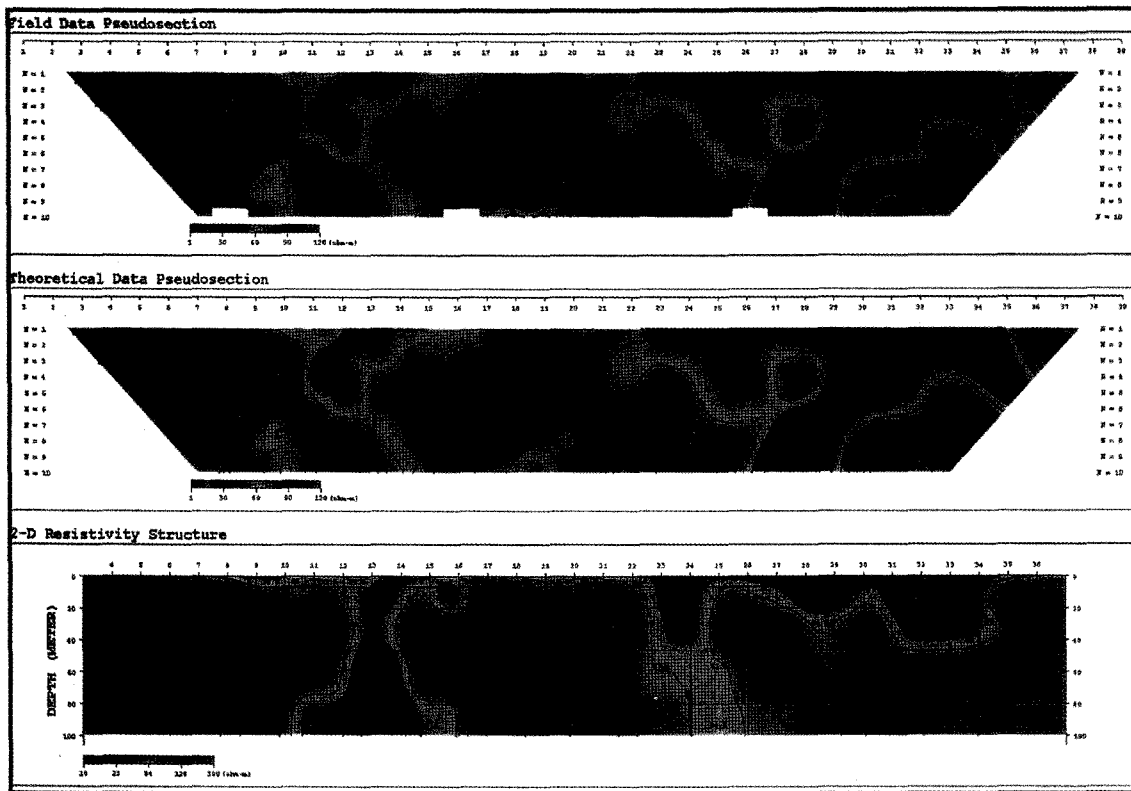


Fig. 5. Inversion results of DC surveys with a dipole-dipole array carried out along survey line D2.

기비저항이 분포하고 있다. 이 같은 2차원 전기비저항탐사의 결과는 Fig. 3의 전기비저항 분포도 결과와 매우 잘 일치한다. 예로서, 전기비저항 수직탐사 측정 stn35에서부터 북서방향의 측정 stn2까지가 2차원 전기비저항탐사에서 30 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항을 나타내는 부분에 해당된다.

Fig. 5는 측선 D1에서 내륙으로 약 320 m 떨어진 곳에 설정된 측선 D2에서 수행한 2차원 전기비저항탐사의 역산 결과이다. 30 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항대는 지전기적 단면도에서 측정 12~14(이를 앞으로 “이상대A”라 명명함)와 측정 31~43(이를 앞으로 “이상대B”라 명명함)에 분포하고 있으며, 이상대A와 이상대B는 전기비저항 분포도(Fig. 3)에서 인지된 주향이 북동방향인 2개의 전기비저항 이상대 위에 위치하고 있다. 여기서 이상대A는 심부 80 m 이상, 즉 조사지역의 최하부 층인 편마암 내의 심부까지 발달한 것으로 보아 암반 내에 발달한 파쇄대인 것으로 판단되며, 이와는 다르게 지하 30 m 이내의 천부에 분포하는 이상대B는 해수에 의한 염분농도가 높은 점토층인 것으로 인접지역에서 실시한 시추결과와 장호완(1998)에 의한 지구화학적 분석 결과로부터 유추 해석할 수 있다.

지하 약 30 m까지 낮은 전기비저항이 분포하는 이상대B와는 다르게 그러므로, 경로 중 남쪽에 위치한 침투경로의 실존을 강하게 시사하고 있다. 이에 반하여, 전기비저항 분포도 상의 북쪽에 존재하는 해수침투의 경로에 대해서는 2차원 전기

비저항탐사의 역산 결과를 통하여 심부 발달을 확인할 수 없는 것으로 보아 천부 20 m 내에 존재하며, 부분적으로 해수에 의한 염분농도가 높은 점토층인 것으로 해석된다.

조석운동에 의한 지하매질 내의 해수유동 현상을 관찰하기 위하여 2개의 측정점(Fig. 1에서 ●로 표시함)에서 슬럼버저배열을 이용한 전기비저항 모니터링을 실시하였다. 모니터링을 위한 측정점은 조사지역의 전기비저항 분포도(Fig. 3)와 전기비저항 2차원탐사 결과(Fig. 4와 Fig. 5)로부터 해석된 암반 내에 발달한 파쇄대, 즉 주향이 구 해안선에서 북동방향 그리고 심도 80 m까지 연장 발달된 낮은 전기비저항 이상대가 존재하는 부근을 따라 설정하였다.

Fig. 6은 2개의 모니터링 측정점 mon#1(해안가에 가까운 측정점)와 mon#2(해안가로부터 먼 측정점)에서 실시한 전기비저항 모니터링 자료와 모니터링이 이루어진 동일 시간대에 인천 관측소에서 측정된 조석변화(국립해양조사원, 1997)의 자료를 함께 도시한 그림이다. 시간변화에 따른 걸보기 전기비저항의 변화는 각 측정점에서 전류전극간 거리의 반이 30 m일때 측정된 값들이다. 측정점 mon#1에서의 걸보기 전기비저항 변화는 조석운동과 비교하여 전반적으로 상관성을 찾을 수 없지만, 측정점 mon#2에서 측정된 걸보기 전기비저항 값의 시간적 변화는 12 시간의 주기를 갖고 조석운동과 뚜렷한 음의 상관성을 보이고 있다. 그러므로 측정점 mon#1과 mon#2에서 측정된 걸보기 전기비저항의 비교(mon#2의 걸보기비저항이 mon#1의 걸보기비

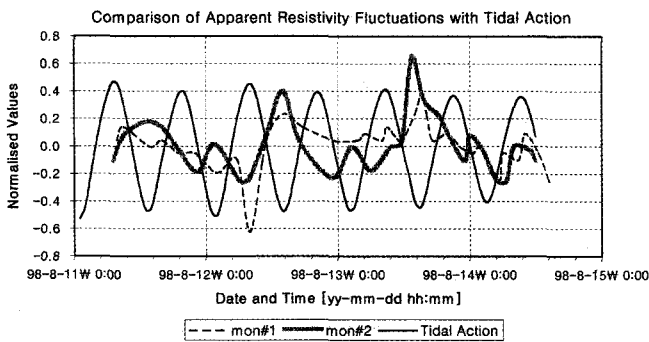


Fig. 6. Correlation of DC resistivity data with tidal action.

저항보다 2배 이상 높음)와 전기비저항 분포도(Fig. 3)로부터 측정점 mon#1의 지하 하부는 해수에 의해 완전히 오염된 구간임을 유추할 수 있고, 또한 12시간 주기를 갖는 조석운동에 대하여 정확한 음의 상관관을 보이는 측정점 mon#2 부근에는 해수와 담수가 혼재하고 있는 전이대가 존재하는 것으로 해석된다. 그 이유로는 담수의 수두가 일정하다는 가정 하에 바닷물이 만조일 때는 간조일 때에 비하여 해수의 수두가 상대적으로 높기 때문에 해수-담수 전이대의 위치는 내륙으로 이동할 것(즉, 동일 측정에서의 겉보기 전기비저항은 낮아짐)이며, 간조일 때는 반대로 전이대의 위치가 바다쪽으로 밀려 나갈 것(즉, 동일 측정에서의 겉보기 전기비저항은 상대적으로 높아짐)이다. 그러므로 측정점 mon#2 부근에서는 현재에도 해수침투가 진행 중에 있으며, 오염원의 이동 통로로는 기반암내에 존재하는 파쇄대인 것으로 해석된다.

결 론

해수침투에 의한 오염분포 및 해수침투의 주 경로 파악 그리고 조석운동에 의한 지하매질 내의 해수 유동을 확인하기 위하여 전기비저항탐사를 수행하고 자료해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다:

1. 슬럼버저배열을 이용한 전기비저항 수직탐사의 자료 역산을 통하여 얻어진 전기비저항 등고선도에 의하면 조사지역은 (30 ohm-m 이하(해수에 의해 오염된 구역)와 이상(해수의 영향이 없는 구역)의 전기비저항 분포를 갖는 2개의 영역으로 구분된다. 여기서, (30 ohm-m 이하의 전기비저항 분포를 갖는 영역은 천부 20 m 내에 존재하는 점토층의 분포와 일치하며, 점토층의 전기비저항은 구 해안선으로 갈수록 매우 낮은 값을 갖는다.

2. 전기비저항 수직탐사 및 쌍극자-쌍극자배열의 2차원 전기비저항탐사 결과에 따라 조사지역에는 구 해안선으로부터 북

동방향의 주향을 갖는 2개의 낮은 전기비저항 이상대가 존재한다. 그 중 심부 발달이 없는 북쪽의 이상대는 인접한 곳에서 실시한 시추결과 그리고 보고된 지구화학적 분석 결과에 의하면, 해수에 의해 염분농도가 높고 천부 30 m 이내에 존재하는 점토층인 것으로 확인되었다. 이와 비교하여, 남쪽에 위치한 전기비저항 이상대는 지하 80 m 이상, 즉 기반암 내의 심부까지 연장 발달된 것으로 보아 암반 내에 발달한 파쇄대인 것으로 판단된다.

3. 구 해안선으로부터 내륙으로 약 260 m되는 지점에서 조석운동에 의한 12시간의 주기를 갖는 겉보기비저항의 시간적 변화가 전기비저항 모니터링자료에서 확인되었다. 겉보기비저항의 시간적 변화를 보이는 모니터링 측점은 2차원 전기비저항탐사의 결과로부터 해석된 파쇄대 부근이다. 그러므로 조사 지역에 존재하는 해수의 유동통로는 해안선으로부터 북동방향의 주향을 갖고 형성된 파쇄대로서, 현재에도 이 파쇄대를 통하여 해수침투에 의한 지질 그리고 지하수의 오염이 진행 중에 있는 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것이다.

참고문헌

- 국립해양조사원, 1997, 조석표. 서지 제510호, Pub. No. 510.
 이병주, 박기화, 윤옥, 윤윤영, 김남장, 황상기, 1993, 한국지질도 (1:50,000), 발안도폭 지질보고서: 한국자원연구소, 107pp.
 장호완, 1998, 해수침투에 의한 지하수의 염수화가 원소의 거동에 미치는 영향 연구, 한국자원연구소 위탁연구 최종보고서, 서울대학교 기초과학연구소.
 Freeze, R. A., and Cherry, J. A., 1979, *Ground Water*: Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ. 601pp.
 Melloul, A. J., and Goldenberg, L. C., 1997, Monitoring of seawater intrusion in coastal aquifers: *Journal of Environmental Management*, **51**, p. 73-86.
 Mills, T., Hoekstra, P., Blohm, M., and Evans, L., 1988, Time domain electromagnetic sounding for mapping sea water intrusion in Monterey County, CA: *Ground water*, **26**, p. 771-782.
 Stewart, M. T., and Gay, M. C., 1986, Evaluation of transient electromagnetic soundings for deep detection of conductive fluids: *Ground Water*, **24**, p. 351-356.
 Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., 1976, *Applied Geophysics*: Cambridge Press, Cambridge.