

## 해수침투 평가를 위한 물리탐사기술의 진전

이상규, 황학수, 황세호, 박인화, 성낙훈(한국자원연구소)

### Advance of geophysical exploration techniques for investigation of seawater intrusion

Sang Kyu Lee, Hak Soo Hwang, Se Ho Hwang, In Hwa Park and Nak Hoon Sung  
(Korea Institute of Geology, Mining and Materials)

**요약** : 해수침투 연구의 국·내외 동향을 분석하고 물리탐사기술의 역할과 현재의 위치를 점검하였다. 과학기술부 자연재해방재기술개발사업의 일환으로 수행한 '해수침투 평가, 예측 및 방지기술 개발' 과제를 통하여 과거보다 진전된 기술의 내용과 향상된 수준을 적용 사례를 통하여 예시하였다. 해수침투 문제에 계수형 물리검층 기술을 활용함으로써 해석의 정밀성을 제고하였으며, 해수침투의 영역을 확정하는 기술과 해수침투의 주 경로를 해석한 연구 사례를 예시하였다. 해수침투의 지속여부를 판정할 수 있는 기술로 개발된 전기비저항 모니터링과 시간영역 전자탐사(TEM) 모니터링 기술의 특징을 설명하였으며 해수침투대와 양전도성 지층의 구별을 위하여 개발된 참조채널 유도분극탐사기술을 소개하였다. 해수침투 확산 예측 과정에서 연구지역 지질의 개념모형을 제시하기 위한 해수침투대의 공간적 분포 파악 기술을 예시하였다. 마지막으로, 현재의 기술수준을 토대로 한 물리탐사기술의 향후 발전 방향도 제안하였다.

**주요어**: 해수침투, 물리탐사, 물리검층, 모니터링

**Abstract** : This paper presents the state of art and the role of geophysical exploration techniques with evaluating the trend of domestic and worldwide seawater intrusion research, and illustrates advanced techniques obtained through the project of 'Development of the techniques for estimation, prediction, and prevention of seawater intrusion' funded by the Ministry of Science and Technology of Korea. The advanced geophysical interpretation was achieved by adding the digital geophysical logging data. DC resistivity and TEM monitorings were applied to determine whether or not the seawater intrusion was in progress. Induced Polarization technique using electric current monitoring channel was introduced to discriminate seawater contaminated zone from highly conductive layer caused by clay minerals. A conceptual model was suggested with spatial visualization of the study area to predict the diffusion of seawater contamination. Finally, the future work of the development of geophysical techniques was suggested with the base of the present level of them.

**Keywords**: seawater intrusion, geophysical exploration, geophysical logging, monitoring

## 1. 해수침투 연구의 국·내외 동향

### 1.1 국외 동향

임해지역에서 해수침투에 의한 지하수의 염수화로 수자원 확보에 어려움을 겪고 있는 많은 나라 중에 해수침투의 확산 예측 및 방지를 위하여 국가적 차원의 연구비를 확보하고 지속적으로 연구를 수행하는 대표적인 선진국으로는 미국, 영국, 호주 등을 들 수 있다.

특히, 미국의 경우, 대서양, 카리브해 및 태평양과 접하는 대부분의 주에서 해수침투 경로 등을 포함한 해수침투 현황 파악 뿐 만 아니라 관측망의 설치 및 운영을 통한 해수침투 확산예측 그리고 염수에 의해 오염된 지질의 복원기술 등, 장기적인 연구가 체계적으로 진행되고 있다(<http://www.usgs.gov> 참조). 해수침투와 관련된 대부분의 연구들은 정부 부처인 Department of Interior (DOI)에서 연구비가 조성되어, 미국연방지질조사소(USGS)에 의해 수행되고 있다. 또한, 해수침투는 환경오염 그리고 농작물 피해 등과 직접적인 연관이 있으므로 Environmental Protection Agency (EPA) 그리고 Department of Agriculture (USDA)에서도 독자적으로 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 미국연방지질조사소에서 진행 중에 있는 해수침투와 관련된 대규모 국가적 차원의 연구로는 National Water Quality Assessment Program (NAWQA), The National Marine and Coastal Geology Program 등이 있다. 해수침투 문제는 미국 상원의 제105차 회의(1997년 2월 27일의 법안 H.R. 870으로 캘리포니아 Pajaro 유역의 해수침투 사안)에서 논의될 정도로 중요한 사안으로서, 최근 장기적인 수자원 개발 및 확보를 위한 미국의 지하수자원 개발법(1999년; S.507)에서도 해수침투는 주요한 항목중의 하나로 포함되었다.

영국에서도 장기적이고 체계적인 수자원 확보 및 염수에 의한 지질오염 방지책 확보를 위한 정부차원의 노력으로 Department for International Development (DFID)에서 연구비를 조성하여, 세계 여러 지역에서 발생하는 해수침투의 현황조사와 연구가 영연방지질조사소(BGS)에 의해 수행 중에 있다(<http://www.bgs.ac.uk> 참조). 예로서, 영국에서 발간된 수리지질도 23개 도폭 중에서 18개 도폭이 해수침투가 발생하는 해안지역을 포함하고 있으며, 또한 이들 지역에서 해수침투에 의한 지하수 및 지질오염의 확산을 관측하기 위하여 장기적인 모니터링이 진행되고 있다.

호주의 경우, 연안지역에서 발생하는 해수침투와 내륙지역의 토양 염분화 방지 및 예측에 관한 대부분의 연구는 주로 호주의 국립과학연구소인 CSIRO에서 농림부의 재원으로 지속적으로 수행 중에 있다(<http://www.clw.csiro.au> 참조). CSIRO의 해수침투 관련 데이터베이스(Database)자료는 호주 국내의 연구 사례 뿐 만 아니라 세계 여러 지역에서 수행된 해수침투 관련연구 및 조사에 대한 사례를 수록하고 또한, 매년 입력된 연구자료를 갱신(update)하고 있다. 예로서, 1996년 인도의 Madras에서 국립지구물리연구소에 의한 해수침투의 양상 파악, 1996년 아르헨티나 Mardel Plata지역에서 연안지질센타에 의해 수행된 도심지역 15km<sup>2</sup>에 대한 해수침투와 환경오염의 복합적인 조사, 1999년 베네수엘라 Trinidad and Tobago 항구에서의 해수침투대 조사 등이 있으며, 호주 내에서 수행된 대표적인 조사로는 1996년 호주 서부지역인 Perth에서 해수침투에 의한 지하수 및 지질오염 현황과 침투 경로 조사 등이 있다.

## 1.2 국내 동향

과학기술부 “자연재해방재기술개발사업”의 일환으로 해수침투에 관한 체계적인 연구가 한국자원연구소에서 수행되기 이전에는 국내의 해수침투에 관련된 연구는 한국원자력연구소, 수자원공사, 농업기반공사(구 농어촌진흥공사) 등 공공기관과 국내 각 대학의 지질학과, 환경공학과 그리고 자원공학과에서 독자적이고 단편적으로 수행되어 왔다.

한국원자력연구소는 “방사능폐기물 처분기술개발” 연구사업의 일부 요소기술로서, 1985년부터 1987년까지 연안지역 또는 도서지역에서의 지하 핵폐기물처분장 건설 시 발생할 수 있는 해수침투에 대한 연구가 특정지역에 국한하여 한시적으로 수행되었다.

농업기반공사(구 농어촌진흥공사)는 1998년부터 2년의 기간동안 “물리탐사에 의한 지하수오염범위 추적방안 연구” 사업을 수행하였다. 사업의 목표는 지구물리탐사법을 이용한 지하수계의 해수침투 현황 파악이었으나, 기존 광물자원탐사에 사용되어 오던 물리탐사기술을 원용하는 수준을 벗어나지는 못하였다. 농어촌진흥공사 제주도지사에서는 1980년대 초반부터 제주도에서 농업용 지하수를 개발하면서 해수침투의 문제에 봉착하여 관정 지하수의 수질 분석을 통한 도 전역의 현황파악이 상당한 수준으로 이루어져 있다.

한국수자원공사는 임해지역에서 농업 및 생활 용수 확보를 위한 다량의 지하수 개발에 따른 해수침투 문제 등을 해결하기 위하여 건설교통부 재원으로 “해수의 지하수 침투예측 모형연구”를 1993년에 수행한 바 있다.

전북대학교는 1996년도 과학재단의 연구비 지원으로 부안과 위도지역을 중심으로 해수침투에 의한 지하수 수질오염 판별을 위한 환경 지구화학적 연구를 수행하였다(김옥배, 1996).

그러나, 해수침투는 수리지질, 지화학, 또는 지구물리탐사 등과 같은 각 학문 분야의 독자적이고 단편적인 연구를 통하여 해결될 수 있는 간단한 연구과제는 아니다. 한국적 지질 특성에 따른 효과적인 해수침투대 파악 그리고 메카니즘 규명을 통한 해수침투에 대한 항구적인 방지기술을 개발하기 위해서는 각 학문간에 체계적이고 유기적인 연구가 장기적으로 수행되어야 한다.

한국자원연구소는 1980년대 말부터 해수침투와 관련된 연구로서, “제주도 해수영향권 조사연구(I), (II)”, “지하수 관련연구”, “지구물리·지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술개발 연구(I), (III)” 등을 수행하였다. 또한, 1997년도부터 “자연재해방재기술개발사업”의 일환인 “해수침투 평가, 예측 및 방지기술 개발” 과제의 1단계(’97년~’99년) 연구를 통하여 해수침투 평가를 위한 요소기술(지구물리탐사, 지화학 및 수리지질 조사)을 개발하고 있다.

## 2. 해수침투 관련 기존 물리탐사기술

바닷가에 인접해 있는 지역에서 해수가 내륙쪽의 지하로 침투하는 것은 흔히 발생하는 현상이다. 이러한 해수침투의 양상을 지구물리탐사기술을 활용하여 밝혀내고자 하는 시도들

이 있어 왔으며, 이러한 시도들에서는 주로 전기탐사나 전자탐사법을 이용하여 왔다(Buselli et al., 1986; Flathe, 1964; Hoekstra et al., 1990; Mills et al., 1998). Flathe(1964)는 지하의 담수-염수의 경계를 구분하는데 전기나 전자탐사법이 효과적임을 보였고, Mills et al.(1988)는 미국의 Salinas Valley에서 TEM 탐사법을 이용하여 4개의 대수층을 효과적으로 분리하는데 성공하였다. Mills et al.(1988)는 60 m 깊이의 염수로 이루어진 대수층의 전기비저항이 해안에서부터 내륙쪽으로 들어갈수록 1.5 ohm·m에서 18 ohm·m로 증가함을 보였다. 이러한 TEM 자료를 해석하는 데는 모니터링 시추공의 정보가 중요한 역할을 하였는데, 이는 역산으로 얻어진 전기비저항 분포로부터 동가(equivalent)의 염소 함량비로 환산시키는데 쓰였다. 그들의 결과에 의하면 8 ohm·m의 전기비저항치는 500 ppm의 염소농도로 환산될 수 있다고 한다. 이러한 연구결과는 해수침투 뿐 만 아니라 모든 지하수 수질문제에서 모니터링공(monitering well)의 운영이 필수적임을 말해 주는 것이다.

Hagemeyer et al.(1990)은 해수면 높이의 수로를 통해서 해수가 침투하는 것을 전기탐사 방법으로 탐지하였다. 조사 지역은 미국 동남부의 Florida로, 이 지역은 주변이 바다로 둘러싸여 있는 반도처럼 되어 있어서 육지로의 해수침투는 상당히 민감한 문제가 되고 있는 지역이다. 이 수로(Cross-Florida Barge Canal)는 군사용 목적으로 건설되다가 담수층에 영향을 준다는 문제로 Folrida의 서부 쪽 만 건설이 되고 그 이후로 중지된 상태이다. Hagemeyer et al.(1990)은 슬림버저 배열 전기비저항 수직탐사를 실시하여 수로를 통한 해수의 침투를 밝히고자 하였다. 전기비저항 탐사로부터 얻어진 자료를 모니터링공에서의 자료와 비교하여 “동가의 염분농도(equivalent salinity)”로 환산할 수 있었다. 이러한 해석 결과로 매우 신선한 담수는 전기비저항이 150 ohm·m 이상이었고, 해수가 침투한 영역은 대략 25 ohm·m의 전기비저항치를 나타냄을 확인하였다. 수로의 하부에 썩기모양의 해수침투대가 존재하였으며 이러한 썩기 모양은 바다 쪽에서는 두껍고 수로를 따라 내륙쪽으로 들어가면서 얇아지고 있었다. 또한 이 썩기는 수로의 바닥에 깔리는 형태를 보였는데 이는 해수와 담수의 밀도차에 기인하기도 하지만 수로의 표면에서 계속되는 경우에 의해 담수가 공급되기 때문임을 밝혔다. 수로를 따라 썩기모양의 염수대는 수 km 까지도 확장되고 계절과 강우량에 따라 규모가 변하며 주위의 담수대에 염분을 공급하는 효과를 발생시켜 지속적인 모니터링이 필요하다고 결론지었다.

우리나라에서, 해수침투 평가를 위하여 물리탐사기술의 적용이 시도된 것은 1987년 제주도의 동부 성산리에서 였다(조진동 외, 1988). 비교적 넓은 지역에서 슬림버저 전극배열을 이용하여 전기비저항 수직탐사를 수행하고 1차원 자동역산을 통하여 측정 하부의 수직적 전기비저항 분포를 파악하고자 하였으며 10 ohm·m 이하의 저비저항 부위를 해수가 침투한 함수대로 해석하고 이들의 평면적 분포를 관정 지하수의 전기전도도 분포와 유사함을 보임으로써 해수침투 평가에 있어서 전기비저항 수직탐사 적용의 타당성을 입증하고자 하였다. 동일한 연구의 일환으로 이상규 등(1998)은 해안에서 내륙으로 연장되는 6km의 측선상에서 in-loop 및 coincident loop 배열 등 두가지의 송-수신 루프배열과 early time 및 standard time 에서의 반응을 상호 비교함으로써 해수침투 평가에 적용하기 위한 과도현상 전자탐사법(TEM: Transient Electromagnetic)에서 최적 자료취득 방법을 도출하고자 하였으며 측정 결과를 curve matching에 의한 역산을 수행함으로써 해수침투 평가에 대한 TEM 수직탐사의 적용성을 입증하고자 하였다.

이후, 1989년에는 제주도의 서부 고산지역에서 쌍극자-쌍극자 배열을 이용한 2차원 전기비저항탐사의 자동역산을 통하여 해수침투의 2차원 분포를 파악하고자 시도(조진동 외, 1990)하였으며 동일한 축선에서 TEM 수직탐사 프로파일링을 수행하여 양자를 상호 비교함으로써 전기비저항탐사와 전자탐사의 복합적용에 의한 상호 보완적 이점을 얻으려고 노력하였다. 1990년에는 제주도에서 수행된 TEM 수직탐사 자료에 대하여 1차원 자동역산을 수행하여 TEM 수직탐사에 의한 진비저항을 해수침투 평가에 사용하는 시도가 이루어 졌는 바(조진동 외, 1991) 이는 동위치 송·수신루프 배열에 의한 과도전자파 수직탐사자료의 비선형 최소자승 역해 프로그램이 국산화 된데 힘입은 바 있었다(이상규와 황학수, 1990).

1990년대 중반에는 TEM탐사와 전기비저항 수직탐사를 동일한 측정점에서 수행하고 이의 복합 역산을 통하여 측정하부의 1차원적 전기비저항 변화를 보다 정확하게 분해함으로써 해수침투대 해석의 신뢰성을 높이고자 하였다(이태섭 외, 1995). 이러한 시도는 전기비저항탐사는 상대적으로 비저항이 높은 지층을 분해하는데 정확도가 높고, 전자유도이론을 이용하는 TEM탐사는 양전도성 지층을 분해하는데 보다 높은 정확도를 보이는 두가지 탐사법의 장점을 동시에 취하고자(이희순 외, 1995) 하는 의도였다.

임해지역의 동일한 영역에서 1년 반이라는 시차를 두고 쌍극자-쌍극자 배열에 의한 전기비저항탐사를 반복 수행(이태섭 외, 1995; 이태섭 외, 1996)하여 그 반응을 비교 분석한 연구사례가 있다. 해수침투의 정도가 심화되고 있는지 아니면 완화되고 있는지의 여부를 정량적으로 확인하지는 못하였으나 탐사 시기상의 오랜 간격에도 불구하고 전기비저항 자료의 일관성이 매우 돋보여 해수침투 평가에서 전기비저항탐사의 적용성을 재확인하는 계기가 되었다. 시간영역에서 유도분극 효과를 나타내는 매개변수인 충전성을 쌍극자-쌍극자 배열에서 추가로 측정하여 해수침투가 없는 양전도성 지층(실트, 점토)과 해수침투 영역을 구별하려는 시도가 있었으나(이태섭 외, 1996) 탐사자료의 질이 만족스럽지는 못하였다. 유사한 시기에 슬림버저 배열을 이용한 시간영역 유도분극탐사도 시도(송영수, 1995)되었으나 역시 탐사자료의 질면에서 개선의 여지가 있어 보였다.

### 3. 물리탐사 기술의 진전

#### 3.1 물리검층의 활용과 그 역할

물리검층은 시추공 내에 센서를 삽입하여 다양한 물성을 원위치에서 연속적으로 측정하는 탐사법으로서 해수침투와 관련해서는 지표 물리탐사 자료 역산의 초기 입력자료 제공과 해석의 정확성 확인, 공내수의 전기전도도 분포, 수리모델링에 필요한 수리지질학적 단위 구분 등 다양한 목적으로 이용되고 있다(Morin and Urish, 1995, 이상규 외, 2000).

Fig. 1은 경기도 화성군 우정면 석천리에 위치한 해수침투 조사지역의 시추공에서의 물리검층 결과와 시추주상도 및 슬림버저 전극배열을 이용한 전기비저항 수직탐사 결과를 비교하여 보인 것이다. 제 1층의 전기비저항과 두께는 79 ohm·m 와 1.6 m로서, 이는 주상도

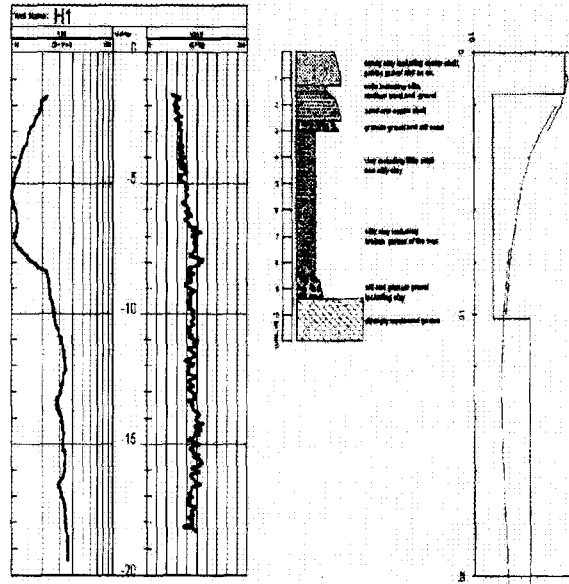


Fig.1. Comparison of geophysical well logging, core log, and DC sounding result(modified from Hwang et al., 2000 and Lee et al., 2000).

에서 다량의 모래와 자갈로 구성된 지하수면 상부의 표토층에 대응된다. 전기비저항이 20 ohm·m 이고 심도 약 10 m 까지 지속되는 제 2층은 지하수면 하부의 실트질 점토, 실트, 점토층을 총체적으로 나타낸다. 40 ohm·m 내외의 전기비저항을 보이는 제 3층은 심하게 풍화된 편마암이 해수로 침윤된 상태인 것으로 해석된다. 이와 같은 전기비저항 수직탐사의 역산 결과는 기반암의 심도에서 약 10% 정도의 오차 이내로 잘 일치하며 매우 높은 분해능으로 심도에 따른 전기비저항을 측정하는 전자유도검층은 주상도 상의 기반암 심도와 비교 적절히 일치하는 것을 볼 수 있다. 전기비저항 수직탐사는 심도의 변화에 따른 전기비저항의 구조를 지표에서 수행한 탐사자료를 통하여 파악하기 때문에 심도나 비저항에서 오차가 발생할 수 있다. 따라서, 시추공이 있는 위치에서 시추주상도나 물리검층의 결과를 전기비저항 수직탐사의 역산 결과와 비교하여 물리탐사의 신뢰성을 확인하거나 주변 측점에 대한 역산의 초기 입력자료로 사용하여 전기비저항 수직탐사의 정확도를 제고할 수 있다.

Fig. 2는 전라북도 김제시 죽산면 대창리의 시추공에서 수행한 전자유도검층, 자연감마선검층 및 지하수의 온도/전기전도도 검층기록으로부터 해수침투의 통로가 되는 모래층과 불투수성 점토층을 구별한 예를 보인 것인데 전기비저항이 낮고 자연감마선이 낮으며 지하수의 온도나 전기전도도에 변화가 있는 층군은 해수의 침투가 있는 투수성 모래층이며 전기비저항이 낮지만 자연감마선이 높고 지하수의 온도나 전기전도도에 큰 변화가 없는 층군은 점토함량이 많은 불투수층이라는 해석지침(민경덕외, 1986)을 이용한 것이다.

### 3.2 해수침투 영역확정 및 경로탐지 기술

해수침투에 의한 지하수의 염수화 영역을 확정할 목적으로 경기도 화성군 석천리에서 물리탐사가 수행되었다. 탐사지역은 지금의 해안선이 있는 방향으로 기아자동차 화성공장이 접해있으나 과거에는 해안선과 직접 접해 있던 곳이다. 약 1km<sup>2</sup> 면적의 탐사지역 내에서 측

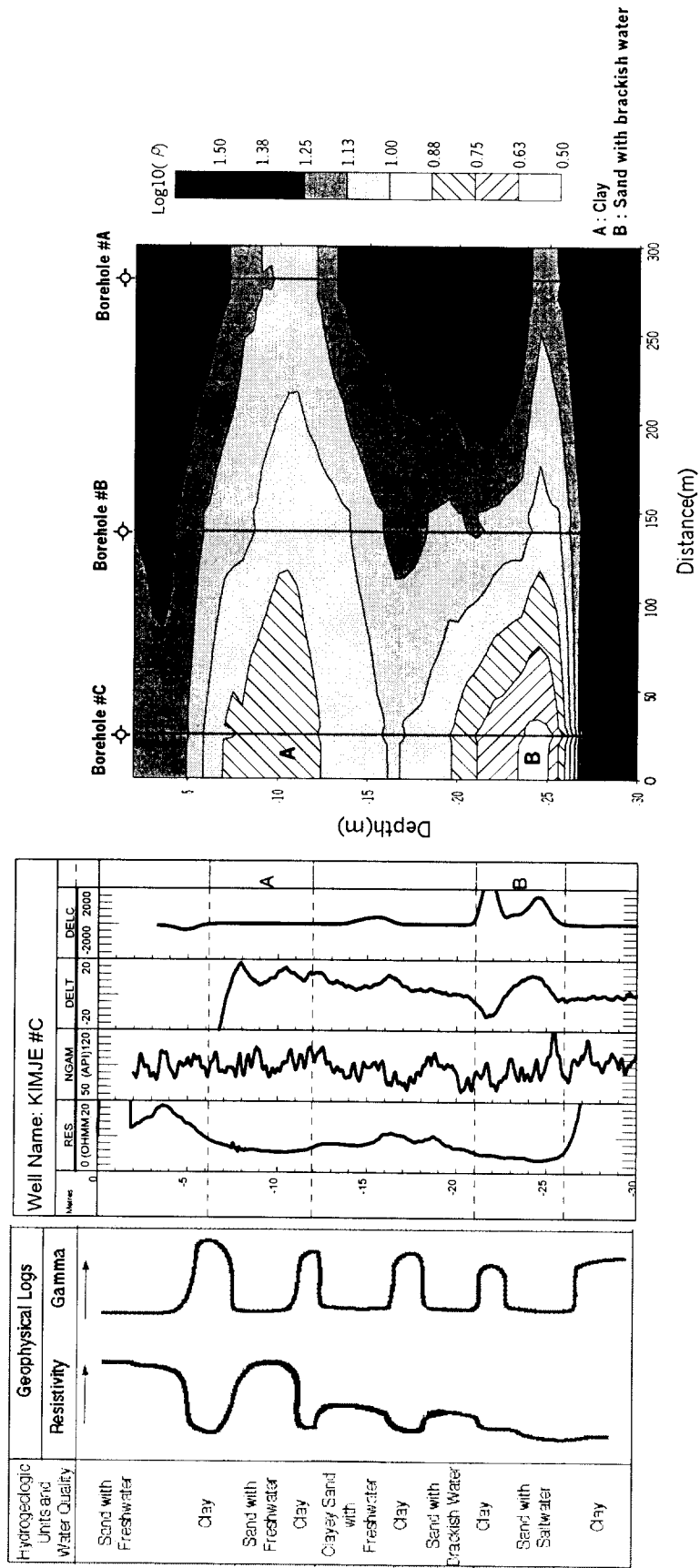


Fig. 2. Determination of seawater intrusion's interval using borehole geophysical logging, Kimje(modified from Lee et al., 2000a).

점의 밀도를 비교적 고르게 하여 총 41개 측정점에서 슬럼버저 전극배열을 이용한 전기비저항 수직탐사를 수행하였다(Fig. 3에서 ○가 측정점을 나타냄). 각 측정점에서 탐사의 목표심도가 50 m 이상이 되도록 하기 위하여 최대 전류전극간 거리의 반( $AB/2$ )을 100~150 m 까지 전개 하였으며, 모든 측정점에서 전극의 전개 방향은  $N20^{\circ}\sim 30^{\circ}W$ 로 유지하였다. 41개 측정점에서의 수직탐사 결과를 호주 CSIRO에서 개발한 GRENDL 프로그램으로 1차원 역산한 결과에 의하면 각 측정 하부는 2~4층의 수평층서구조로 해석된다. 해수침투에 의하여 지하수가 염수화 된 영역과 해수침투에 의한 염수화 영향을 받지 않은 영역의 경계를 확정하기 위하여 역산의 결과로 얻은 최저 비저항층의 비저항을 매개변수로 하여 전기비저항 분포도를 작성하고 이를 Fig. 4에 나타내었는 바, 비저항은 2~250  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ 의 범위에 있다. 전기비저항 수직탐사의 원리에 따라서, 해수침투에 의한 최저 비저항층이 있는 영역과 해수침투 없는 최저 비저항층의 경계부에서는 비저항분포의 급격한 횡적 변화가 있을 것이므로 등비저항선도에서 선의 간격이 매우 조밀한 즉, 비저항의 변화율이 급격한 부분을 양 영역의 경계부로 해석할 수 있다. 본 탐사지역에서는 이와 같은 경계부가 그림에서 굵은 선으로 표시한 30  $\text{ohm}\cdot\text{m}$  내외인 것으로 해석

된다. Telford et al.(1976)과 Stewart and Gay(1986)는 해수 자체의 전기비저항이 0.2  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ , 해수가 완전히 침윤된 다공질 암층의 전기비저항이 약 3  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ , 그리고 담수-해수 혼합수대의 전기비저항이 약 5~30  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ 인 것으로 보고하고 있으므로 상기한 해석에 신뢰성이 있다. 앞에서 보인 예와 같은 해석법은 지전기적 불연속면을 해석하는데 매우 유용한 방법으로서, 슬럼버저 전극배열에 의한 전기비저항 수직탐사에서 뿐 만 아니라 전기, 전자 탐사법에 의한 모든 1차원 수직탐사 자료의 해석에 확대 적용할 수 있는데, 이는 최저 전기비저항의 등고선이나 최저전기비저항을 나타내는 심도 분포도 상에서 등고선이 조밀한 부분에 지전기적인 불연속이 있을 가능성이 높기 때문이다.

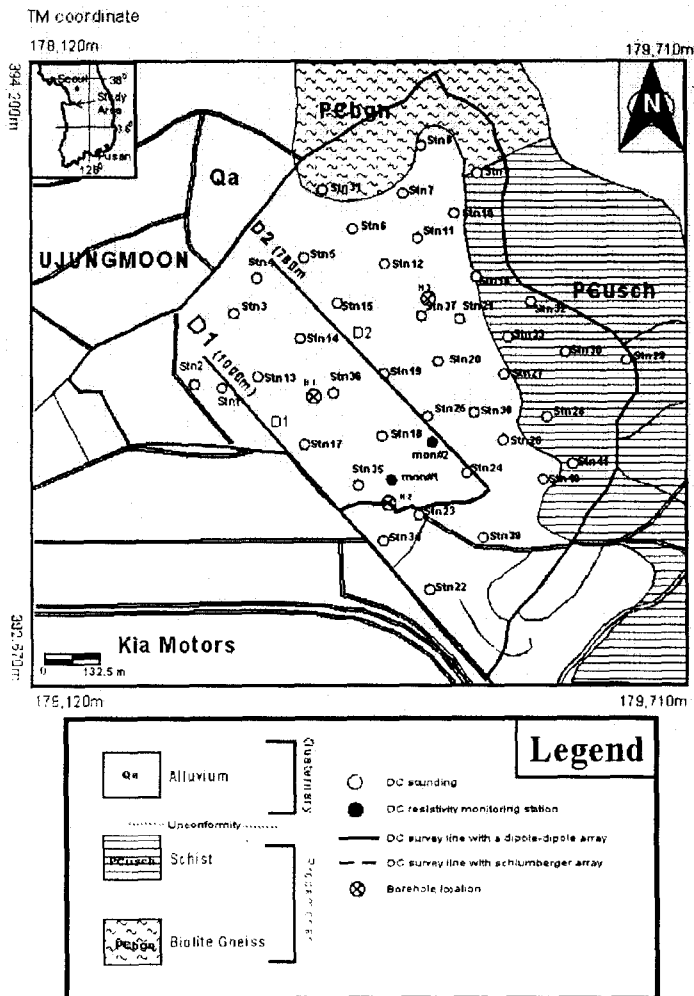


Fig. 3. Geology and Geophysical survey map of the study area(Hwang et al., 2000).



Fig. 4에서 북동 방향의 주향(등고선도 상에서 화살표로 표시)을 갖는 두 개의 전기비저항 이상대는 구 해안선으로부터 내륙으로 갈수록 높아지는 전기비저항의 평면적 분포 양상으로 보아 해수침투의 경로일 가능성이 있다. 북동방향의 주향을 갖는 두 개의 저비저항 이상대를 가로지르는 평행한 D1, D2 축선에서 쌍극자-쌍극자 전극배열을 이용한 2차원 전기비저항탐사를 수행하고 이를 해석하면 평면도에서의 저비저항 이상대가 해수침투의 주 경로인지를 확인할 수 있으며 그들의 심부 연장을 파악할 수 있다. Fig. 4에는 D1, D2 축선에서의 2차원 역산 결과를 겹쳐 보였는데, 축선 D2에서 수직적인 저비저항 분포를 보이는 축점 #12~#14 구간에서 심부까지 발달한 해수침투의 통로를 확인할 수 있다.

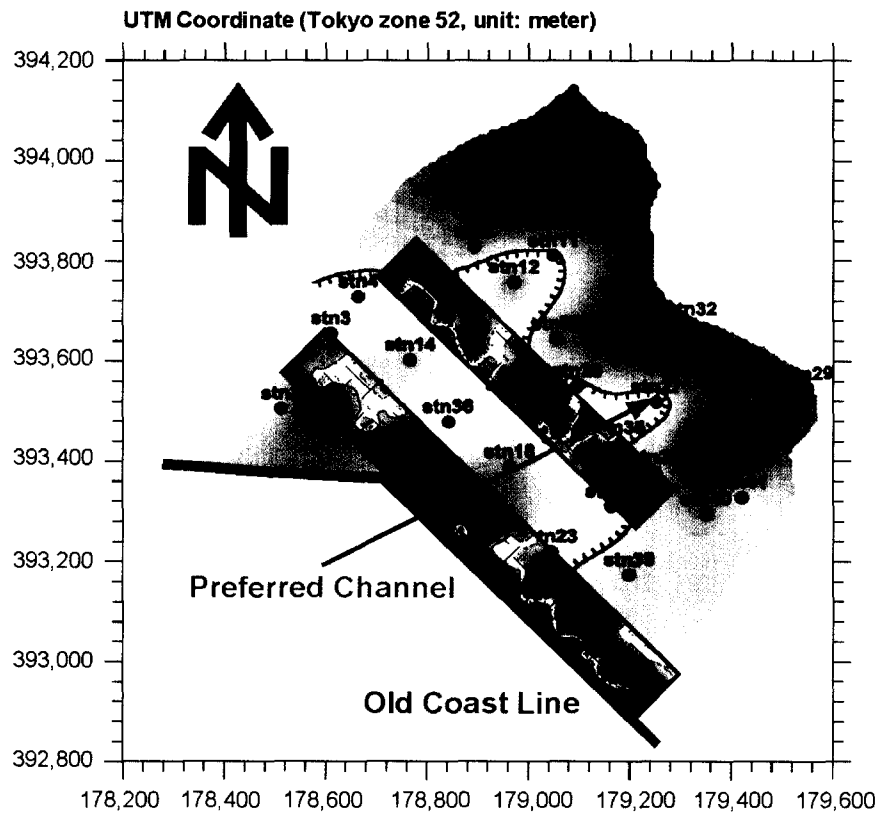


Fig. 4. Horizontal distribution of the lowest resistivity obtained with DC soundings overlaid by 2-D resistivity section from dipole-dipole resistivity survey.

### 3.3 해수침투 지속여부 확인을 위한 모니터링 기술

#### 3.3.1 전기비저항 모니터링에 의한 해수침투 지속여부 확인

전 절에서 확정한 염수화 영역에서 현재도 해수침투가 지속되고 있는지의 여부를 판단하는 것은 해수침투 방지 대책을 세우는데 매우 중요한 요소이다. 이와 같은 정보는 통상 시추공을 이용하여 지하수의 수위와 전기전도도(EC)를 모니터링함으로써 얻을 수 있다. 그러나 여기서는 시추공을 이용하지 않고 동일 지점에서 물리탐사를 반복적으로 수행하는 즉, 물리탐사에 모니터링의 개념을 도입함으로써 얻을 수 있는 방법을 모색하였다. 구 해안선으로부터 거리가 다른 두 지점, mon#1, mon#2(Fig. 3에서 ●로 표시)에서 8일간 평균 2시간

간격으로 슬림버저 전극배열을 이용한 전기비저항 모니터링을 수행하였다. 전극의 위치 변화에 의한 오차를 최소화 하고 땅과의 접촉저항을 일정하게 유지하기 위하여 모든 전극은 모니터링 수행 기간동안 고정적으로 설치하였다. 모니터링을 수행한 두 측점은 전기비저항 분포도(Fig. 4)와 D1 및 D2에서 수행한 쌍극자-쌍극자배열 전기비저항탐사의 결과로 해수 침투의 통로 역할을 할 것으로 해석한 북동방향의 수직적 저비저항대의 연장선 위에 선정하였다. Fig. 5는 mon#1 및 mon#2에서의 전기비저항 모니터링 결과와, 같은 기간에 인천관측소에서 측정된 조석변화(국립해양조사원, 1997) 자료를 함께 보인 것이다. 시간 변화에 따른 결보기 전기비저항은 전류전극간 거리의 반( $AB/2$ )이 30 m인 경우의 값을 보인 것이다. mon#1에서의 결보기 전기비저항은 조석운동과 상관성을 발견하기 어렵지만 mon#2에서의 결보기 전기비저항은 24(12)시간의 주기를 보이며 조석운동과 뚜렷한 음의 상관성을 나타내고 있다. 이와 같은 결과로부터 mon#1 지점은 염수가 지속적으로 유지되는 지점으로, mon#2는 조석운동에 의하여 해수와 담수가 혼재하는 전이대(transition zone)로 해석된다. 즉, 담수의 수두가 일정하다고 가정할 때, 만조일 때는 해수의 수두가 상대적으로 높아서 전이대의 위치가 내륙으로 이동하고 간조일 때는 반대로 바다쪽으로 이동하고 있음을 보이는 것이며 이와같은 결과는 탐사지역이 현재도 해수침투가 지속되고 있음을 의미하고 있다.

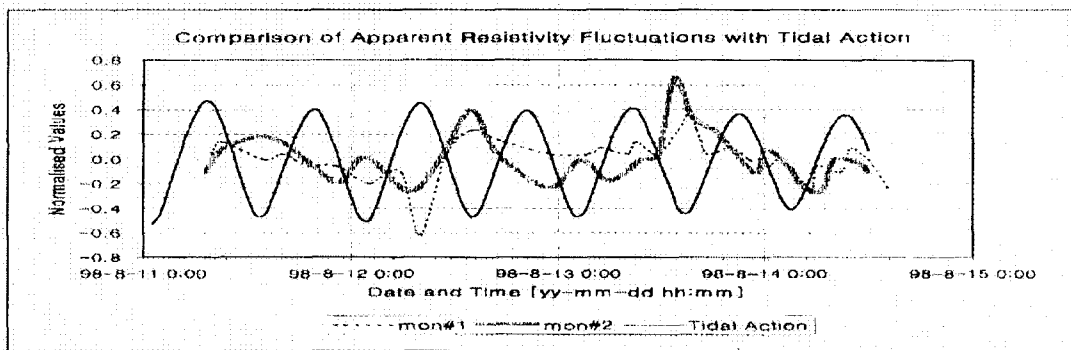


Fig. 5. Correlation of DC resistivity data with tidal action(Hwang et al., 2000).

### 3.3.2 TEM 모니터링에 의한 해수침투 지속여부 확인

전기비저항 수직탐사를 활용하는 모니터링 기법은 여러개의 전극 간격에서 가장 짧은 시간에 반복적으로 측정하여야 하는 탐사작업상의 번거로움이 있다. 전자유도 이론을 이용하는 시간영역 전자탐사(TEM)를 활용하여 조석운동에 의한 수두 변화의 주기성을 탐지할 수 있다면 전극간격을 변화시키지 않고 1회의 측정으로 지표로부터 탐사 가능심도까지의 수직적인 전기전도도 변화에 대한 자료를 한꺼번에 얻을 수 있다는 점에서 괄목할 만한 기술적 진전이 될 것이다. Fig. 3의 mon#2에서 한번의 길이가 10m인 정방향의 동위치 송수신루프배열(coincident loop)을 이용하여 약 한시간 간격으로 총 32시간 동안 TEM 모니터링을 수행하였다. 탐사장비는 호주 MCI사의 SIROTEM MKIII였으며 측정시간대는 0.008~4.877msec였다. Fig. 6은 TEM 모니터링 결과 중에서 0.293msec 지연시간에서의 TEM 반응을 나타 낸 것인데 조석운동의 주기와 같은 약 24(12)시간의 주기를 갖고 변화하는 것을 볼 수 있다.

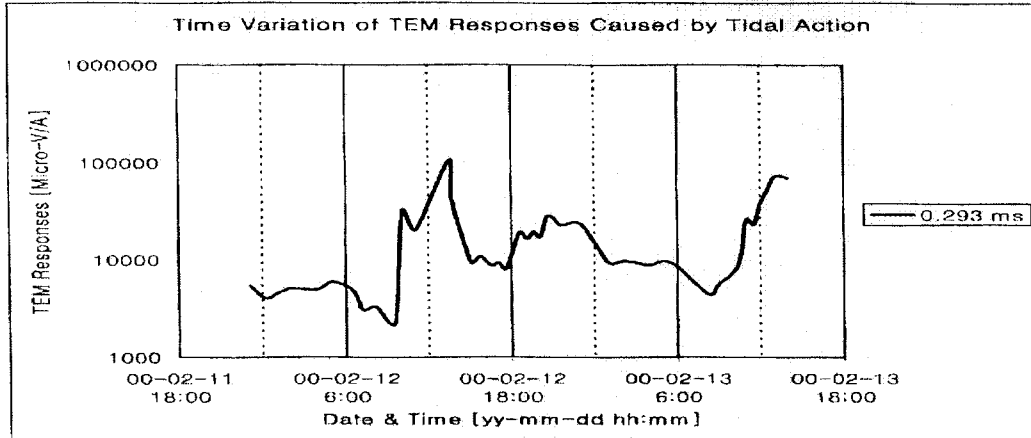


Fig. 6. Time variation of TEM responses with a period of 24(12) hours.

### 3.4 해수침투대와 양전도성 지층의 구별기술

해수침투의 양상을 규명하기 위하여 주로 전기, 전자탐사를 활용하는 이유는, 해수의 영향으로 해수침투대의 전기비저항이 주변보다 낮아져서 저비저항 이상대로 작용하기 때문이다. 전기비저항(또는 전기전도도)을 매개변수로 하는 해수침투 영역 탐지에서의 난제는 해수침투 영역을 해수침투가 없는 양전도성 지층과 구별하는 것이다. Oldorunfemi(1985), Barker(1990), 송영수(1995), 이태섭 등(1996)은 높은 염도 때문에 전기비저항이 낮은 지역에서 유도분극효과가 감소하게 되는 현상을 이용하여 이에 대한 해법을 얻고자 한 바 있다.

우리나라 서, 남해안 대부분의 임해지역은 실트층 또는 점토층과 같은 양전도성 지층을 협재하고 있다. 그러므로 전기비저항의 높고 낮음만으로 해수침투의 여부를 판정하는 경우에는 불확실성을 피할 수 없다. 해수침투에 의한 염수화를 확인해 줄 만한 지하수 지화학자료가 별도로 존재하지 않는다면 해수침투에 의한 저비저항대와 점토층과 같은 양전도성 지층을 구별하기 위하여 전기비저항탐사법 이외에 또 다른 지구물리학적 방법이 요구된다. 여기서는 참조채널을 사용하는 유도분극탐사 기법을 활용함으로써 해수침투대와 점토층과 같은 양전도성 지층을 효과적으로 구별할 수 있음을 보이고자 한다.

유도분극탐사법은 최근 일본에서, 활성단층 조사에 그 적용성이 뛰어나다는 사실이 트랜치조사와 시추조사의 결과로 확인(Takahashi, et al., 1996)된 이후, 다시 널리 사용되기 시작하였다. Takahashi는 IP image profiling 이라는 이름으로 활용하였는데 이것은 단극-쌍극자 전극배열을 이용하여 2차원 유도분극탐사를 수행하고 역산을 통하여 지하 2차원 단면에 대한 유도분극효과의 영상을 산출하는 방법을 일컫는다.

우리나라에서는 주로 1980년대 이전에 금속광상탐사가 활발할 때에 널리 사용되었고 1980년대 중반에 일시적으로 다주파수 유도분극탐사법(Spectral IP)이 도입되면서(이상규와 구자학, 1986) 주목을 받다가 자원산업의 쇠퇴와 더불어 사용이 중단되었으나 해수침투(송영수, 1995; 이태섭 외, 1995), 산성 광산폐수에 의한 지하수 오염(이상규 외, 1997) 등의 적용에 기술적인 수요로 떠오르면서 다시 활용되기 시작하였다.

참조채널을 이용하는 유도분극탐사 기법은 주파수영역에서 수행되는데, 두 개의 주파수를 이용하여 수신 전위파형을 측정할 때마다 송신 전류파형을 동시에 측정한 후, 수신 전위파형을 송신 전류파형으로 디콘(deconvolve)하는 방법이다. ‘파형을 측정한다’는 의미는 수신 전위나 송신 전류의 크기(magnitude) 뿐 만 아니라 그 위상(phase)도 함께 측정한다는 의미이며 송신 전류파형을 reference로 사용하기 때문에 참조채널 유도분극탐사법이라고 부른다. 이러한 방법으로 탐사자료를 취득하면 겉보기 비저항은 물론 주파수 효과(PFE) 등의 유도분극효과도 보다 정밀하게 산출하게 된다. 이 때, 송신전류와 수신전위의 위상으로부터 얻은 위상차 자료는 주파수 효과에 비례하므로(Whitelet and Tyne, 1981; 이상규와 구자학, 1986) 이러한 사실에 기초하여 측정된 주파수 효과의 신뢰성을 검증하는 척도로 사용된다. 참조채널을 이용하는 유도분극탐사법은 궁극적으로 유도분극탐사를 매우 정교하게 수행하려는 방법이므로 전자결합(EM coupling)(이상규, 1982)을 일으킬 수 있는 기존의 다중전선을 사용하지 않으며 사용 주파수도 매우 신중하게 선택한다. Fig. 7은 전기비저항탐사에서 사용하던 비차폐 다중선을 이용했을 때(청색선)와 차폐전선을 사용했을 때(적색선) 주파수 변화에 따른 위상차의 변화를 비교하여 보인 것이다. 비차폐 다중전선을 사용했을 때, 전위전극과 전류전극 사이의 거리가 멀어질수록 즉,  $n$ 이 커질수록 전자결합의 영향에 의한 위상 변화가 커짐을 잘 보이고 있으며 따라서 유도분극탐사에서는 전기비저항탐사에서 사용하던 기존의 비차폐 다중전선을 사용하면 안 된다는 사실과 주파수 선택의 중요성을 함께 보이고 있다.

해수침투대와 양전도성 지층을 구별하는 물리탐사기법의 개발을 위하여 쌍극자-쌍극자 전극배열을 이용하여 주파수 영역에서 참조채널 유도분극탐사를 수행하였다. 탐사기기는 미국 Zonge Engineering & Research Organization, Inc의 탐사 시스템(1994)을 사용하였는데, 이 시스템의 송신부는 발전기(Motor/Generator Set), 전위조절기(Voltage regulator), 송신기(Transmitter), 송신조정기(Transmitter Controller)와 전류전극으로 구성되며 수신부는 탐사자료 수신 및 처리기(Geophysical Data Processor), 송신전류 분로기(Current Shunt) 및 비분극 전극으로 구성된다. 탐사자료 취득 시에 전류전극을 통하여 땅에 주입한 전류는 평균 700 mAmpere 이었고, 주파수는 0.25 Hz와 8 Hz를 사용하였으며 16 주기(cycle) 동안 측정하여 평균하였다.

Fig. 8은 해수침투의 가능성이 전혀 없는 내륙지역에서, 쌍극자의 길이를 20 m로 하여 취득한 탐사자료를 Interpex 사의 Resixip2DI 프로그램으로 2차원 역산하여 얻은 결과를 보인 것으로서 위 그림은 진비저항 단면도이며 아래 그림은 주파수효과 단면도이다. 단층 점토대가 낮은 전기비저항과 매우 높은 주파수효과를 나타냄을 보이고 있다. Fig. 9는 해수침투에 의하여 지하수가 염수화 되어 있는 전라북도 김제시 대창리 지역에서 수행한 참조채널 유도분극탐사 결과를 보인 것인데, 이 때의 쌍극자 길이는 20 m 였다. 낮은 전기비저항과 다소 높은 주파수효과를 나타내는 점토층이 해안선 쪽으로 가까워지면서 해수침투로 인한 염수화에 의하여 전기비저항은 더욱 낮아지지만 주파수효과는 상, 하 지층에서와 유사한 값을 갖게됨을 보이고 있으며 이를 바탕으로 해수침투대와 해수침투 없는 양전도성 지층을 구별할 수 있음을 보이고 있다.

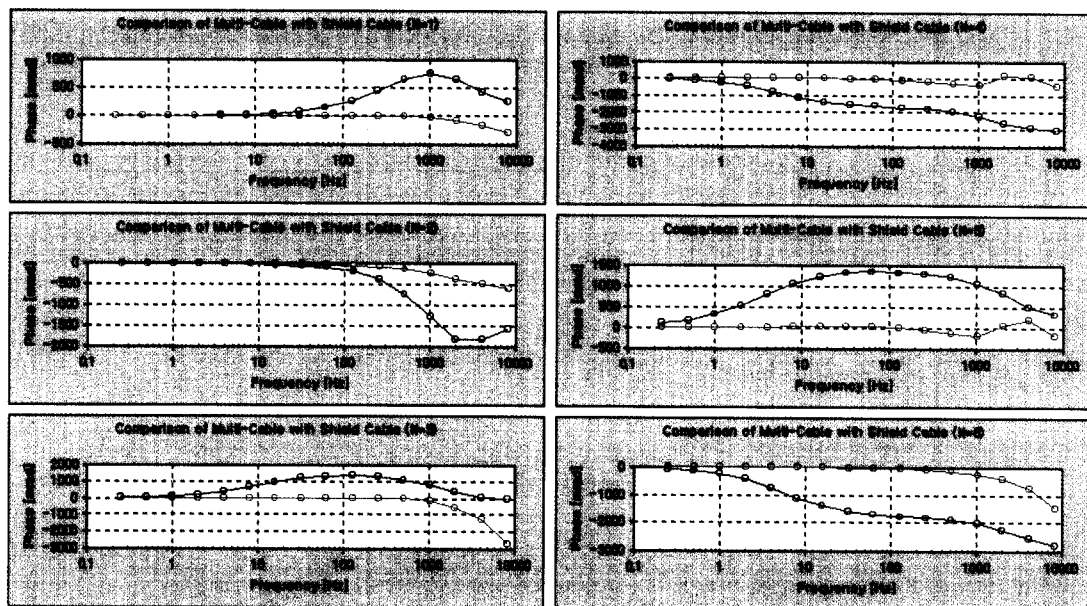


Fig. 7. Comparison of phase change between using multi-cable and using shielded wire (red line: shielded wire, blue line: multi-cable)(Lee et al., 2000).

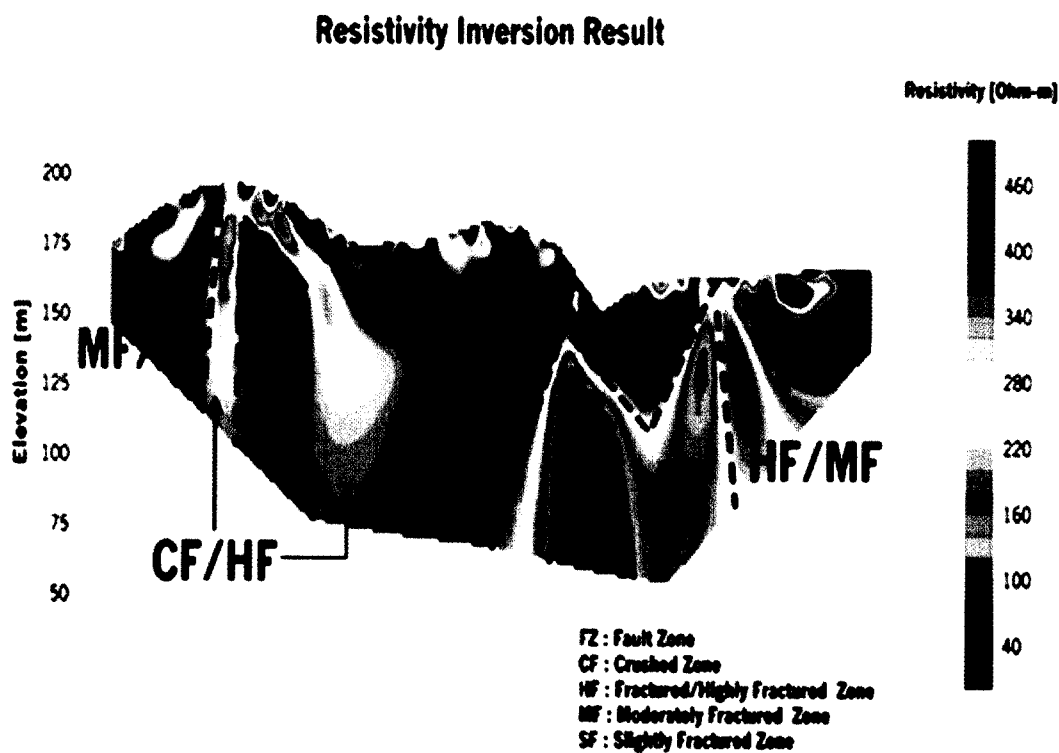


Fig. 8. Inversion result of a reference IP survey using dipole-dipole array across fault zone(Lee et al., 2000b).

### 3.5 해수침투대의 공간적 분포 파악 기술

임해지역의 지하수가 해수침투에 의하여 염수화 되면 원상회복이 불가능하거나 가능하더라도 엄청난 복구비용이 소요된다. 뿐만 아니라 임해지역의 산업화나 도시화에 따라서 용수의 수요가 급증함으로써 과다 양수에 의한 내륙으로의 해수침투 확산이 우려되기도 한다. 해수침투의 확산 예측 과정에서의 물리탐사의 역할 중에 가장 중요한 것은 대상지역 지질의 3차원적 개념모형(conceptual model)을 제시하는 것이다. Fig. 10은 전라남도 영광군 백수읍에 소재한 연구지역 지질의 3차원적 개념모형을 보인 것이다. 개념모형을 구성하기 위하여는 연구지역에서 얻을 수 있는 모든 자료를 활용한다. 여기에는 3개 시추공의 주상도와 물리검층으로 얻은 정보, 82개 측정에서의 전기비저항 수직탐사 정보, 쌍극자-쌍극자 전극배열에 의한 총 6 line-km의 유도분극탐사 정보와 또 다른 6 line-km에 대한 쌍극자-쌍극자 전극배열의 전기비저항탐사 정보 등이 포함되어 있다. 이와 같은 정보들은 쌍극자-쌍극자 전극배열에 의한 전기비저항탐사 결과의 3차원 역산에 의하여 최종적으로 점검되었는데, 본역에서는 10ohm·m 이하의 전기비저항을 나타내는 모래층의 3차원적 분포가 해수침투대의 공간적 분포를 대변하는 것으로 해석하였다.

## 4. 물리탐사기술의 발전방향

임해지역에서 해수침투의 여부나 그 영역을 확정할 때, 관정이나 우물의 지하수 시료에 대한 화학분석을 이용하는 방법은 그 정량성에 있어서 이를 대체할 방법이 없을 만큼 탁월하다. 그러나 해수침투의 정도가 심한 지역에서는 시추 중에 염수를 확인하게 되면 폐공을 하는 것이 상례이므로 지하수 시료를 채취할 관정이나 우물이 남아 있지 않은 경우가 대부분이다. 따라서 역설적으로 지하수 시료의 화학분석 결과에 의하여 작성한 해수침투분포도로는 해수침투가 심한 지역을 표현하지 못하는 우를 범할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하려면 관정이나 우물이 없는 경우에도 해수침투분포를 표현할 수 있어야 한다. 이를 위하여 측정 위치에서 해수면 아래까지 충분히 가탐심도의 범위에 포함되는 전기탐사 또는 전자탐사를 이용한 광역적인 걸보기 등비저항선도 작성이 요구된다. 이 때, 측정의 밀도는 내,외삽의 유의성과 소요경비의 한계성을 고려하여 선택하여야 할 것이다.

임해지역에서 해수침투 범위와 그 정도를 표현할 때, 전기 또는 전자탐사 결과에 의하여 얻은 특정 지층이나 특정 심도에서의 전기비저항 값과 해수침투의 여부를 가르는 문턱값으로 그 영역을 표현할 수 있다. 그러나 일반인들이 이해하기 쉬운 해수침투의 정도는 전기비저항보다는 등가염분농도(equivalent salinity)이다. 지표에서 물리탐사법으로 측정된 암석의 전기비저항(bulk resistivity)으로부터 포화된 지하수의 등가염분농도를 환산하는 기술의 개발이 필요하다. 이를 위하여 암석의 종류에 따른 지하수의 전기비저항(또는 전기전도도)과 지하수로 포화된 암석의 전기비저항간의 관계식을 밝혀야 하며 현장 지하수 시료의 분석에 의하여 지하수의 전기전도도와 염분농도간의 관계도 밝혀야 한다. 제안된 등가염분농도 환산기술은 지하수 시료에 대하여 직접 측정된 전기전도도를 통하여 그 신뢰성이 입증되어야 할 것이다.

관정 또는 우물의 지하수 시료에 대한 물리, 화학적 자료가 없는 상황에서 해수침투 여

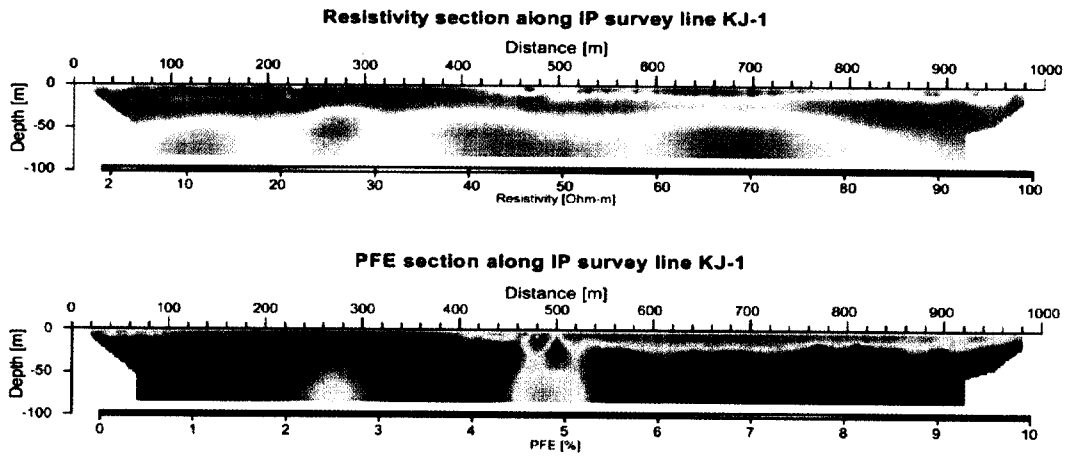


Fig. 9. Inversion result of a reference IP survey dipole-dipole array in the zone of sea water intrusion(Lee et al., 2000a).

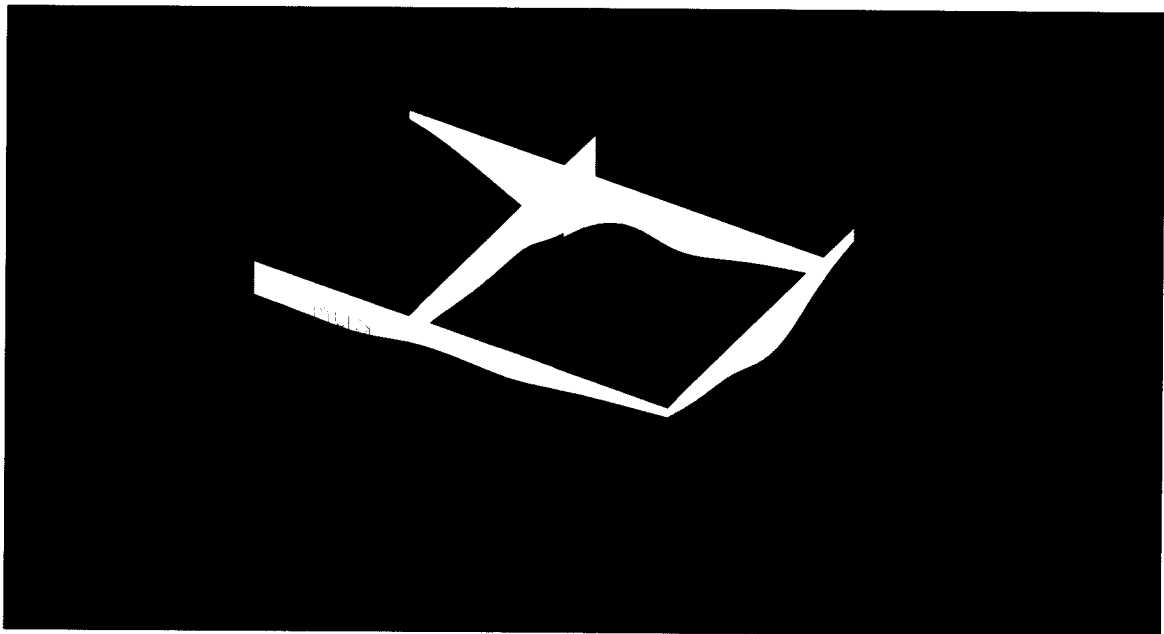


Fig. 10. A 3-D geophysical conceptual model.

부를 판정하려는 경우, 광범위한 탐사 면적과 이에 따른 탐사 소요기간에 기인하는 과도한 탐사비용의 문제에 부딪치게 된다. 이를 해결하기 위하여는 어떤 형태로든 현재의 전기, 전자탐사 자료취득의 경우보다 빠른 시간에 자료를 취득할 수 있는 방법이 모색되어야 한다. 예로써 capacitive type의 전기탐사를 활용한다면가 또는 송수신 안테나를 걸음걸이의 속도로 끌고다니면서 탐사할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

해수와 담수가 혼재하는 전이대로부터의 물리탐사 반응이 조석운동에 의하여 주기성을 나타

념을 확인함으로써 해수침투의 지속 여부를 판정할 수 있는 물리탐사 모니터링 방법은 그 기술의 독창성에도 불구하고 한 측정에서 매우 오랫동안 측정을 반복해야 하는 단점을 갖고 있다. 해수침투 여부 판정 탐사기술에 대한 앞으로의 개발 방향은 모니터링에 소요되는 총 탐사시간을 최대한 줄이면서 그 주기성을 확인할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

**사 사 :** 이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재 기술개발사업으로 수행된 것입니다. 연구비를 지원해 준 정부에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- 국립해양조사원, 1997, 조석표, 서지 제510호
- 김옥배, 1996, 해수침투에 의한 지하수 수질오염 판별을 위한 환경지구화학적 연구(부안과 위도지역을 중심으로), 전북대학교, 한국과학재단 과제번호 961-0406-019-2
- 민경덕, 서정희, 권병두, 1986, 응용지구물리학: 우성문화사, 서울
- 송영수, 1995, 해수침투에 의한 지하수 오염 지역에서의 전기비저항 및 유도분극 탐사: 한국 자원공학회지, 32, 400-408
- 이상규, 1982, EM coupling에 관한 소고: 대한광산학회지, 19, 39-44
- 이상규, 구자학, 1986, RP 및 SIP 시험탐사 보고: 대한광산학회지, 23, 1-8
- 이상규, 조진동, 구성본, 1988, 해수오염 조사를 위한 TEM sounding의 시험적용: 대한지질학회지, 24, 71-81
- 이상규, 황학수, 1990, 동위치 송·수신루프 배열에 의한 과도전자파 수직탐사자료의 비선형 최소자승 역해: 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-89-2A-2, 47-74
- 이상규, 황세호, 이태섭, 1997, 폐광산의 토양오염영역 및 폐기된 광미의 탐지: 자원환경지질, 30, 371-377
- 이상규, 황세호, 박인화, 황학수, 2000a, 임해지역에서 해수침투 평가를 위한 물리탐사에서 물리검층의 역할: 사례중심: 대한지질공학회 창립 10주년기념 학술발표회, 39-45
- 이상규, 황학수, 성낙훈, 황세호, 박인화, 2000b, 참조채널유도분극 탐사법에 의한 해수침투대 영상화: 제1회 ITRL-SILC 학술발표회, 95-104.
- 이태섭, 이상규, 홍영국, 구자학, 박영수, 김통권, 이희일, 임무택, 김성재, 김광은, 지세정, 최종호, 정영욱, 이희순, 김승오, 박인화, 1995, 지구물리·지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술개발 연구(I): 한국자원연구소 연구보고서 KR-95(T)-3, 과학기술처, 422
- 이태섭, 이상규, 홍영국, 황세호, 신성천, 지세정, 임무택, 김통권, 박인화, 김광은, 구성본, 최종호, 문상호, 박영수, 이희일, 성낙훈, 1996, 지구물리·지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술개발 연구(III): 한국자원연구소 연구보고서 KR-96(T)-10, 과학기술처, 667
- 이희순, 이명중, 이상규, 이태섭, 서정희, 1995, TEM과 DC 수직탐사자료의 복합역산에 의한 해수침투대 해석: 한국자원공학회지, 32, 462-470
- 조진동, 구성본, 이상규, 1988, 산업응용 지구물리탐사 연구: 제주지역 해수영향권 조사연구(I), 국토이용지질조사연구: 한국자원연구소 연구보고서 KR-87-29, 189-231
- 조진동, 정현기, 이명민, 박인화, 성낙훈, 신인철, 1990, 제주도 서부지역의 지하수 부존 및 해수유입 파악을 위한 비저항 및 TEM법 복합물리탐사, 국토이용지질조사연구: 한국자원연구소 연구보고서 KR-89-1B, 133-175
- 조진동, 최종호, 정현기, 박인화, 1991, 제주지역의 TDEM 반응특성 고찰, 국토이용지질조사연구: 한국자원연구소 연구보고서 KR-90-1D, 129-169



- 황학수, 이상규, 고동찬, 김양수, 박인화, 2000. 2. 전기비저항 모니터링을 이용한 해수침투 파악. 한국지구물리탐사학회지, 3(1), 1-6
- Barker, R. D., 1990, Investigation of groundwater salinity by geophysical methods: in Geophysical and Environmental Geophysics, ed. by Ward, S. H., SEG, v. 2, p. 201-212
- Buselli, G., Barber, C. and Williamson, D. R., 1986, The mapping of groundwater contamination and soil salinity by electromagnetic methods: National Hydrology and Water Resources Symposium, Australia
- Flathe, H., 1964, New ways for interpretation of geoelectric resistivity measurements in the search for and delineation of aquifers: Internat. Ass. of Sci. Hydrology Bull., 9th year, 1. 52
- Hagemeyer, R. T. and Stewart, M., 1990, Resistivity investigation of salt-water intrusion near a major sea-level canal: in Geotechnical and Environmental Geophysics, ed. by Ward, S. H., SEG, v. 2, p. 67-77
- Hoekstra, P. and Blohm, M. W., 1990, Case histories of time-domain electromagnetic soundings in environmental geophysics: in Geotechnical and Environmental Geophysics, ed. by Ward, S. H., SEG, v. 2, p. 1-16
- Mills, T., Hoekstra, P., Blohm, M. and Evans, L., 1988, Time domain electromagnetic soundings for mapping sea water intrusion in Monterey County, CA: Ground Water, v. 26, p. 771-782
- Morin, R. H. and Urish, D. W., 1995, Hydrostratigraphic characterization of a coastal aquifer by geophysical log analysis, Cape cod national seashore, Massachusetts: The log analyst, v. 35, p. 27-37
- Olorunferni, M. O, 1985, Computer model studies of IP and resistivity response of a typically saline sandstone aquifer (Wenner electrode array depth sounding): Geopl., v. 23, p. 193-205
- Stewart, M. T. and Gay, M. C., 1986, Evaluation of transient electromagnetic soundings for deep detection of conductive fluids: Ground Water, v.24, p.351-356
- Takahashi, T, Nozaki, K., Shima, H., Yamane, M and Igarashi, T., 1996, Field experiments of various geophysical methods at the Nojima Fault: Geoph. Expl., v. 49, p. 498-510
- Telford, W. M., Geldar, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., 1976, Applied Geophysics: Cambridge Press, Cambridge
- Zonge Engineering and Research Organization, Inc., 1994, GDP-16 Multi-Function Receiver Instruction Manual
- Whiteley R. J. and Tyne, E. D., 1981, Phase angle induced polarization survey and computer modelling of the Woodlawn Orebody, in Geophysical Case Study of the Woodlawn Orebody, New South Wales, Australia, ed. by Whiteley, R. J. , p. 423-450