

## 임해지역 해수침투 평가를 위한 물리검층의 적용성

이상규<sup>1)</sup> · 황세호<sup>1)</sup> · 황학수<sup>1)</sup> · 박인화<sup>1)</sup>

### Applicability of Geophysical Well Logging in the Assessment of Seawater Intrusion

Sang-Gyu Lee, Sae-Ho Hwang, Hak-Su Hwang and In-Hwa Park

**요 약 :** 임해지역에서의 해수침투 평가를 위하여 서로 다른 수리지질학적 특성을 갖고 있는 3개의 연구지역, 9개의 시추공에서 전자유도검층, 공내수의 온도 및 전기전도도검층, 자연감마선검층을 수행하였다. 지표 물리탐사 이외에 물리검층을 추가로 활용함으로써 3개 연구지역의 해수침투와 관련된 지질학적 특성을 해석하는데 큰 도움을 얻을 수 있었다. 즉, 해수침투 평가에 물리검층을 활용함으로써 지표 물리탐사자료 해석의 정확성을 높일 수 있고, 지하수의 장기 모니터링을 위한 최적심도를 알아 낼 수 있으며, 지층의 투수성 여부에 관한 수리지질학적 단위를 구분할 수 있음을 보였으며 그밖에 물리검층 모니터링의 적용성에 대하여도 예시하였다. 시추공내 염수의 영향을 비교적 작게 받으면서 지층의 전기비저항을 측정하고, PVC 케이싱이 설치된 소구경의 시추공 내에서도 공극율을 측정할 수 있는 방법이 모색되면 물리검층으로 보다 정량적인 해수침투 관련 정보를 얻을 수 있을 것이다.

**Abstract :** In order to assess the seawater intrusion, induction, temperature and conductivity of fluid, and natural gamma logs were obtained in nine wells at the three study areas having different hydrogeologic characteristics. Besides surface geophysical exploration, supplementary geophysical well logs were carried out to understand the hydrogeological characteristics related to the seawater intrusion in the study areas. The geophysical well logs have been proved to increase the accuracy of interpretation of the surface geophysical exploration's data for assessment of seawater intrusion, and to get the optimum depth for a long monitoring of groundwater. They, also, revealed that the identification of hydrogeological units for strata's porosity was able to be achieved and were illustrated the applicability of geophysical well logs monitoring. Finally, geophysical well logs are expected to play to get the more quantitative information of seawater intrusion, if it is fully collaborated with a better method that is strata's resistivity determination with not relatively much effected by seawater within the drilled borehole and that is the porosity measurement with built on small diameter PVC casing

**Keywords :** Applicability, geophysical well logging, seawater intrusion

## 서 론

해안선 부근에서 해수가 대수층을 따라 담수 지하수계로 침입하는 해수침투는 강수량과 증발산량 변화에 따른 지하수면의 높이 변화, 지구 조석에 의한 해수면 변화 등 주로 자연적인 요인에 의하여 발생하며, 투수성 퇴적층이나 단층파쇄대의 공간적 분포 등 지질학적 특성에 의하여 그 정도와 범위가 좌우되는데, 최근에는 임해지역에서의 무분별한 지하수 개발과 과도한 양수 등 인위적인 요인에 의하여 해수침투가 내륙으로 점차 확산되고 있다.

해수침투에 의한 지질오염 피해와 수자원의 확보에 어려움을 겪고 있는 미국, 영국, 호주 등 많은 선진국에서는 국가 차원에서 연구비를 조성하여 해수침투 현상에 대한 연구를 지속

적으로 수행하고 있으며, 우리나라에서는 제주도의 물부족 문제 해결을 위하여 관정에 의한 지하수 개발이 추진된 1970년 이후 용수의 지하수 의존도가 증대되면서 1980년대 중반 이후부터 지하수내 고염분 현상에 대한 연구가 수행되기 시작하였다(한규언과 신희섭, 2000).

해수침투 문제에서 물리검층은 공내수의 전기전도도 분포 파악과 수리지질학적 단위의 구분(Morin and Urish, 1995), 전기비저항값을 등가염분농도로 환산하기 위한 변환식 도출(Barker, 1990)에 이용되기도 한다. 우리 나라에서 해수침투 문제에 물리검층을 적용한 사례는 거의 찾아 볼 수 없으나, 지하수(먹는 샘물)와 온천(지열) 조사에서는 최근 물리검층이 활발히 이용되고 있다(이상규 외, 1996; 임정웅 외, 1996; 성익환 외, 1997; 임정우 외, 1997; 이대하 외, 1999).

\*2000년 8월 3일 접수

1) 한국자원연구소(Korea Institute of Geology, Mining & Materials)

시추공 주변의 지층이나 공내수의 다양한 물성을 시추공 전 구간에 걸쳐 연속적으로 측정할 수 있는 물리검층은 지층평가 (formation evaluation), 공내수의 특성 측정(fluid logging), 지표탐사 자료 해석의 신뢰성 확인, 수리모델링에 필요한 수리지 질학적인 단위 구분 등 다양한 목적으로 활용될 수 있을 것이라는 판단에서, 본 연구에서는 해수침투 평가에 대한 물리검층의 적용성을 다각적인 관점에서 검토하고자 하였다.

**연구지역에서의 물리검층 자료취득**

**연구지역**

물리검층은 경기도 화성군 우정면 석천리 일대, 전라북도 김제시 죽산면 대창리 일대와 전라남도 영광군 백수읍 하사리 일대 등 3개의 연구지역에서 해수침투 평가를 위해 연구용으로 굴착한 모니터링 시추공에서 수행되었다.

경기도 화성군 연구지역(Fig. 1 참조)은 평탄한 노년기 구릉 지형으로, 집수분지 내에서 가장 높은 곳이 30~40 m 정도이기 때문에 지하수의 흐름이 매우 느릴 것으로 판단된다. 지질은 대체로 선캠브리아대의 편마암과 이를 피복하는 제4기 충적층으로 구성되어 있으며 편마암은 주로 중립질에서 세립질의 흑운모편마암과 호상편마암이며 편암과의 접촉면에서 점진적으로 변한다. 연구지역의 수위 및 지형자료에 의하면 지하수는 연구지역의 중앙에 위치하고 있는 낮은 산지에서 충전된 후 방사상의 형태로 하천과 바다로 빠져나가는 것으로 예상된다.

이 지역의 특징은 과거에는 바다와 접해 있었으나 간척사업으로 현재는 내륙에 위치해 있다는 점이다.

전라북도 김제시 연구지역(Fig. 2 참조)은 평야지대로서 서쪽에서 바다와 접한다. 전반적으로 평탄한 지형을 이루고 있어 지하수의 수위 구배가 매우 완만한 특성을 가지고 있다. 이 지역은 해안방향으로 담수의 이동이 매우 느리기 때문에 상대적으로 해수와 담수의 농도차에 의한 확산현상이 지하수의 조성에 큰 변화 요인으로 작용할 수 있다. 연구 지역의 지질은 시추 결과, 대략 지표에서부터 2~3 m까지는 담회색의 빨층이, 그리고 대략 15 m까지는 세립질 모래층으로 보여지는 실트층이 존재하며, 25 m까지는 조립질의 황토색 모래층이 존재하는데, 이는 기반암인 화강암의 풍화산물로 보여진다.

전라남도 영광군 연구지역(Fig. 3 참조)은 전반적으로 평탄한 지형을 이루고 있는데, 중앙부는 평야지대이고 서쪽으로는 바다에 접해있으며 북동부에는 해발 50 m 이상의 가지산을 포함하는 산지 지형이 분포하고 있다. 연구지역의 중앙부에는 수로와 불갑천이 있으나 이들을 통하여 해수가 역류하는 정도는 무시할 만하다. 해안에 인접한 곳에서는 담수 지하수의 흐름이 매우 느리기 때문에 상대적으로 해수와 농도차에 의한 확산현상이 지하수 조성에 큰 변화요인으로 작용할 수 있으며 산에 접해있는 지역은 상대적으로 지하수의 흐름이 빠를 것이다. 연구지역의 지질은 시추 결과, 대략 지표에서부터 10~15 m까지는 빨층이, 25 m 정도까지는 모래층이 존재하며, 25 m 이하에서는 기반암인 화강암이 존재한다.

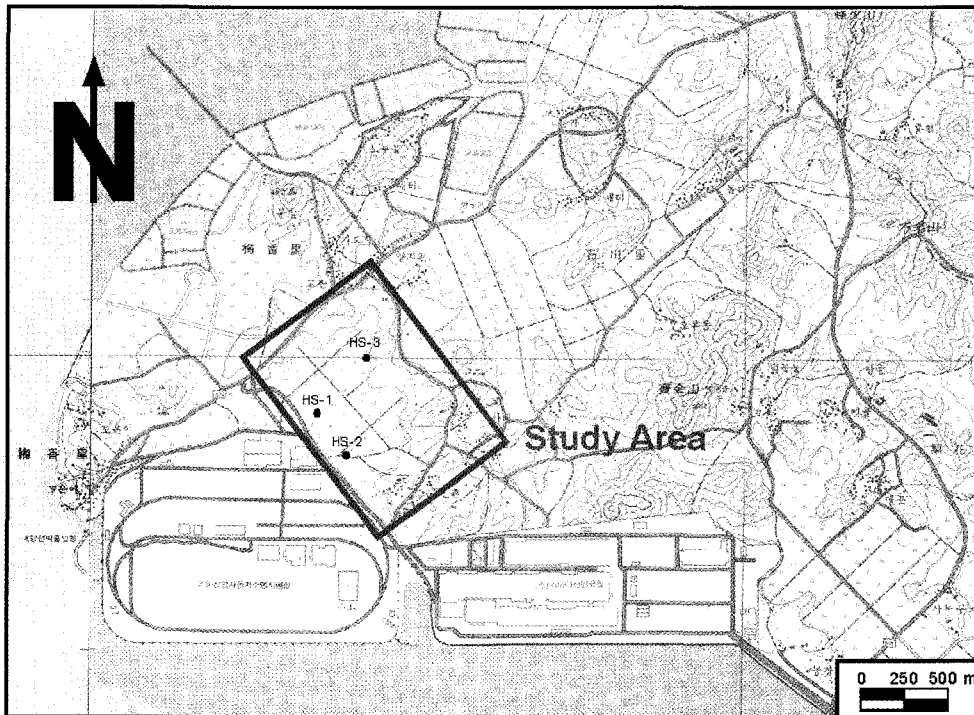


Fig. 1. Locations of monitoring wells in Woojung-myun, Hwasung.

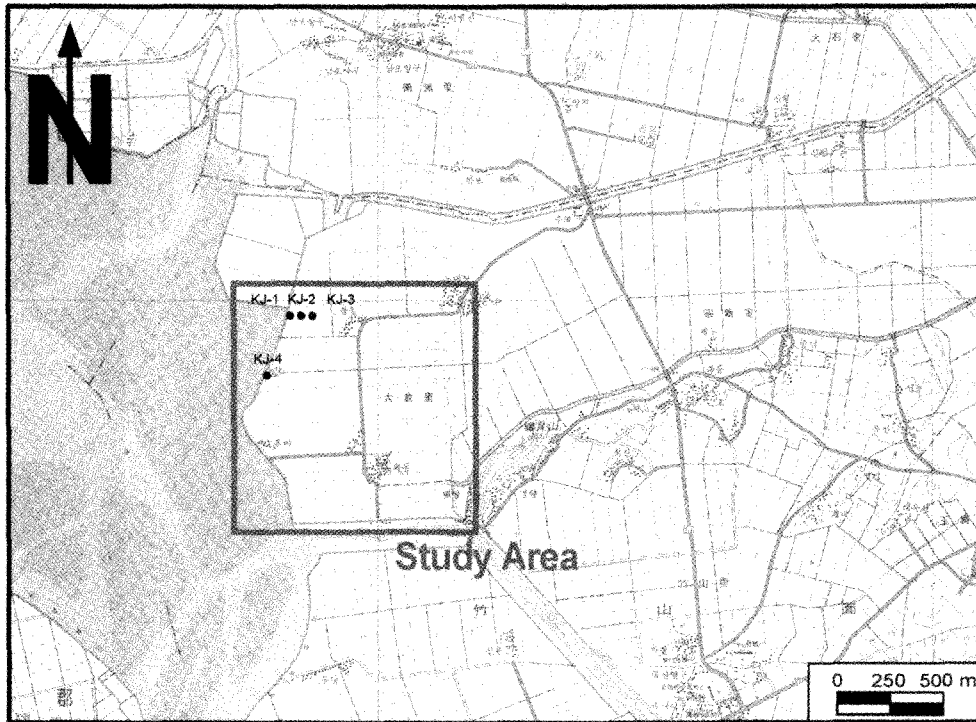


Fig. 2. Locations of monitoring wells in Juksan-myun, Kimje.

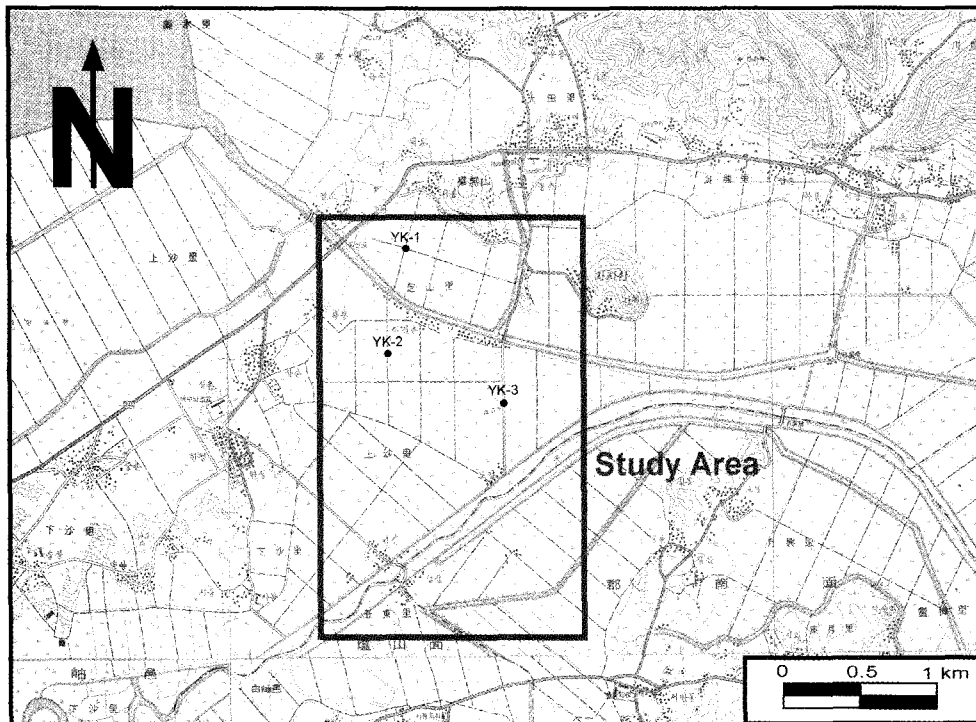


Fig. 3. Locations of monitoring wells in Baeksu-eup, Youngkwang.

**물리검층 자료취득**

물리검층 자료는 영국 Robertson Geologging사의 Prologger II 물리검층시스템(Robertson, 1995)으로 취득하였다. 물리검층

시스템은 본체(surface equipment), 윈치와 케이블, 그리고 다양한 계수형 검출기(probe 또는 sonde)들로 구성된다. 검출기에서 감지된 값이 케이블을 통하여 계수형으로 본체에 전송되

며 동시에 6개까지 물리검층 자료 획득이 가능하다. 자료 획득에 이용한 검층기는 시추공 주변 지층의 전기전도도를 측정하는 전자유도 검층기, 공내수의 온도/전기전도도와 자연감마선검층을 수행할 수 있는 검층기이다. 측정 간격은 1 cm이며 온도/전기전도도 검층은 검층기를 내리면서 전자유도검층은 검층기를 올리면서 측정하였다.

물리검층 자료를 취득하기 전에 현장에서 검층기 교정을 실시하였다. 검층기의 교정은 제작년수에 따라서 변하는 검층기의 민감도를 보정하거나 물리적으로 의미가 있는 값을 측정하기 위하여 실시하였다. 검층기 교정은 제작사에서 제공한 2차 교정장치를 이용하여 전자유도 검층기와 자연감마선 검층기에 대하여 실시하였으며, 이에 관한 자세한 내용은 이상규 외 (1998)에 기술되어 있다.

경기도 화성지역의 3개 시추공(HS-1, HS-2, HS-3)에 대한 물리검층은 1998년 4월 21에서 5월 8일 사이에 실시하였다. 공내수의 온도/전기전도도 검층은 물리검층시스템의 문제로 연속측정이 불가능하여 1 m 간격으로 측정하였다. 전라북도 김제지역의 4개 시추공 중에서 지압에 의하여 PVC 케이싱이 변형된 KJ-4공을 제외한 3개의 시추공(KJ-1, KJ-2, KJ-3)은 1999년 7월 중순과 12월말에 두 번에 걸쳐서 물리검층을 실시하였다. 전라남도 영광지역 3개의 시추공(YK-1, YK-2, YJ-3)에 대한 물리검층은 2000년 5월 25일~30일에 실시하였는데 시추공 YK-3에서는 PVC 케이싱의 변형으로 약 19 m까지만 자료를 취득할 수 있었다.

모든 시추공은 NX 구경으로 굴착한 직후 봉락 방지를 위하여 PVC 케이싱을 전구간에 설치하였으며 공내수의 유동이 가능하도록 PVC 케이싱에 strainer를 설치하였다. 4종의 물리검층은 모두 2회씩 측정하여 자료의 반복성을 확인하였으며 측정 속도는 2 m/min의 일정한 속도를 유지하였다.

### 적용한 물리검층 방법

#### 전자유도검층

전자유도검층은 일련의 송·수신코일 배열에 의한 전자유도이론을 이용하여 지층의 전기전도도를 측정하는 물리검층법이다. 코일간의 간격은 높은 수직적 분해능과 깊은 탐지 반경을 얻을 수 있도록 최적화되어 있다. 송신코일에 공급된 30~40 kHz(Robertson Geologging사의 전자유도검층기는 39 kHz)의 정현파 교류 전류는 주변에 1차 자장을 형성하여 시추공 축 주변에 원형의 유도전류가 흐르게 된다. 유도전류에 의한 2차 자장은 수신코일에 이상성분의 유도기전력을 일으키는데 이것은 주변 지층의 전기전도도 정보를 포함한다. 전자유도검층은 접촉식 전극을 이용하지 않으므로 지하수가 없는 시추공(dry hole)이나 PVC 케이싱 내에서도 지층의 전기전도도를 측정할 수 있는 유일한 수단이다. 시추공 내 지하수의 전기전도도가 측정된 전기전도도에 영향을 미치므로 지하수 수질을 평가하는 데에도 사용할 수 있다(이상규 외,

1996).

#### 자연감마선검층

자연감마선검층은 자연 방사능에 의한 감마선의 총량을 측정하는 물리검층법이다. 암석으로부터 방출되는 대부분의 방사능은 우라늄( $U^{238}$ ,  $U^{235}$ ), 토륨( $Th^{232}$ ), 포타슘( $K^{40}$ ) 등의 방사능 물질과 각각의 붕괴계열 원소에 기인한다. 우라늄이나 토륨으로부터 방출되는 감마선 에너지는 포타슘에 비하여 훨씬 크지만, 일반적으로 암석 내의 포타슘의 함량이 우라늄이나 토륨보다 훨씬 높기 때문에 지층의 자연감마선량은 세 원소에 의해 대체로 비슷하게 영향을 받는다. 암석 내에서의 광물조성의 미세한 변화는 보통 이러한 방사성 광물의 함량과 관련되어 있으므로 자연감마선검층 자료는 시추공을 따르는 지층의 암석 구성에 상응한다. 감마선은 비교적 높은 에너지를 가지고 쉽게 물체를 투과하기 때문에 지하수가 없는 시추공이나 케이싱이 설치되어 있는 시추공에서도 측정이 가능하며 측정 센서로부터 약 15 cm 이내의 지층에서 방출되는 감마선이 반응의 90%를 차지한다(이상규 외, 1996).

#### 지하수의 온도/전기전도도 검층

온도검층은 공내수가 교란 받지않은 상태에서 온도를 측정하는 검층법으로 시추공을 따라 내리면서 수행하며 통상적으로 모든 검층 중에서 가장 먼저 수행한다. 심도 별 온도 측정 결과로부터 단위 심도 변화에 따른 온도 변화율(differential temperature)을 계산할 수 있는데 이것은 한 개의 센서에 의한 시간 지연 비교를 통하여 이루어지는 것이 보통이며 이를 위해서는 매우 높은 정밀도를 요한다. 안정상태의 공내수 온도는 주위 암석의 온도와 같고, 따라서 공내에서 측정된 온도 증가는 주변 지층의 지열구배와 같게 된다. 이 온도구배는 지리학적 위치, 지층의 열전도율에 따라 변하며, 일반적으로 높은 열전도율의 지층에서는 낮고 반대의 경우에는 높다. 일정한 비율의 온도구배로부터 벗어난 온도구배 이상대는 파쇄대로부터의 지하수의 유입이나 유출, 공내에서의 물의 이동 등을 반영한다. 즉, 시추공 내 여러 심도에서의 지하수의 유입이나 유출은 그 지점에서 매우 높거나 낮을 또는 계단함수적인 온도 변화를 보이게 된다. 또, 시추공벽을 따르는 공내수의 이동은 시추공과 만나는 각 투수성 파쇄대의 수두의 함수이며, 이러한 이동은 열적 평형 도달의 용이성 때문에 낮은 온도구배를 보이게 된다(Drury, 1984). 시추가 끝난 직후, 온도검층은 시추 자체의 영향을 받는데, 이는 시추 이수의 순환 때문에 파쇄대 주변에 온도 이상을 유기하기 때문이며, 이 온도 이상은 정상상태의 물 이동을 유기할 파쇄대간 수두 차이가 없을 경우에는 시간이 지남에 따라 소멸한다. 그러므로, 시추가 끝난 뒤 여러 차례에 걸쳐서 온도검층을 수행하면 우세한 수두 조건하에서의 열적 평형의 형성을 조사할 수 있다.

전기전도도는 전기장이 가해졌을 때 전류를 흐르게 할 수 있는 물질의 능력을 의미하며 그 단위는  $\mu S/cm$ 를 사용한다. 전기전도도검층은 시추공을 따라 가면서 공내수의 전기전도도

를 연속적으로 측정, 기록하는 검층법으로서 센서는 검층기의 맨 아래 부분에 위치하면서, 교류 극성의 일정한 전압으로 구동되는 3개의 탄소 접촉 링으로 구성된 전기전도도 셀(cell)이 공내수의 전기전도도를 감지한다. 공내수가 교란 받지 않은 상태에서 전기전도도를 측정하기 위하여 검층은 시추공을 따라 내려가면서 수행한다. 전기전도도 변화율검층(differential conductivity)은 온도차검층과 같은 원리로 수행된다(이상규 외, 1996).

### 물리검층 결과

#### 경기도 화성지역

Fig. 4는 시추공 HS-1, HS-2, HS-3에서의 물리검층 결과로서, 그림의 왼쪽으로부터 전자유도검층에 의한 전기비저항(RES로 표기, 단위는 ohm · m), 자연감마선검층(NGAM으로 표기, 단위는 API), 공내수의 온도검층(TEMP로 표기, 단위는 °C)과 전기전도도검층(COND로 표기, 단위는  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 기록이

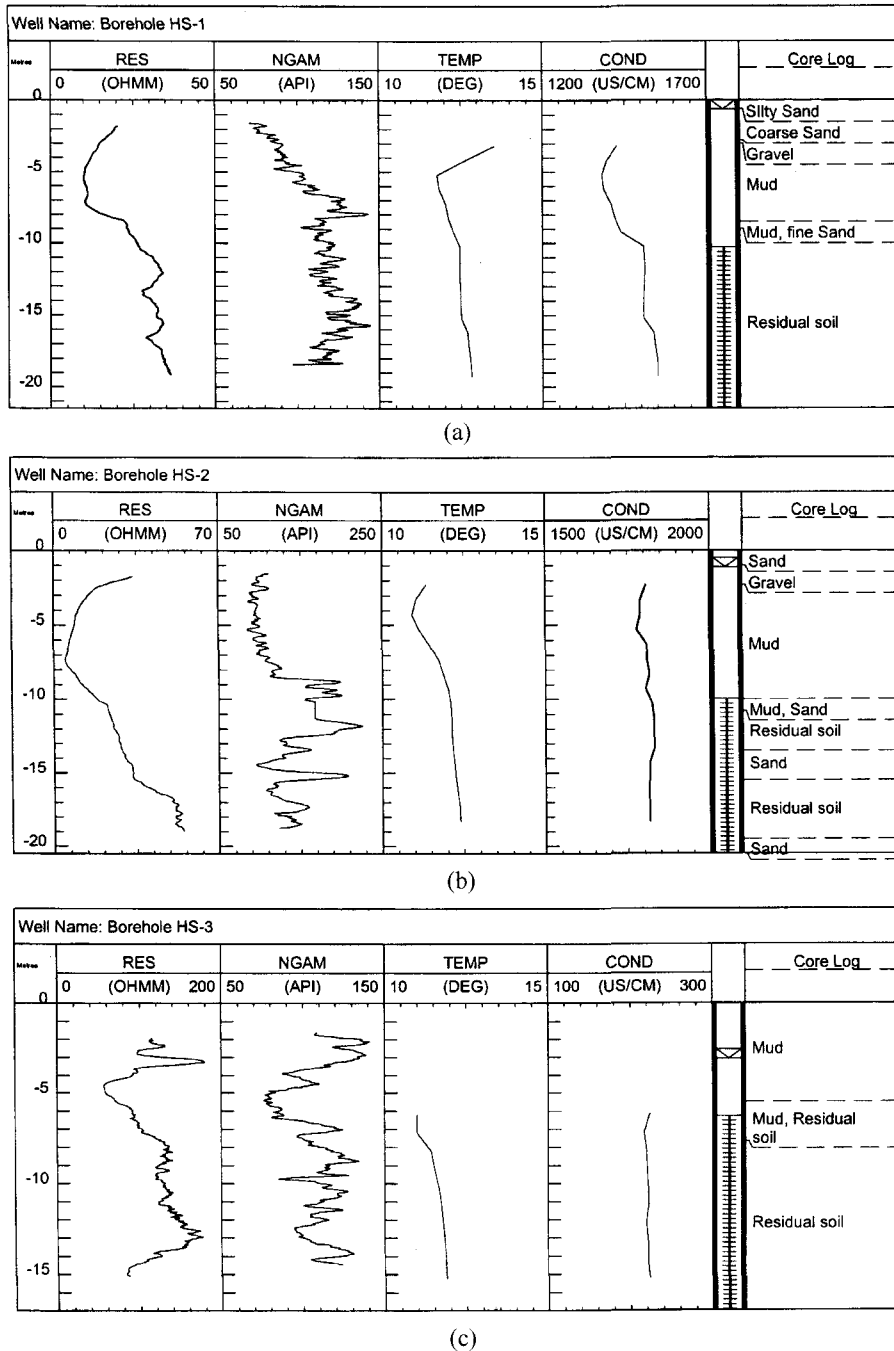


Fig. 4. Log composite from borehole HS-1 (a), HS-2 (b), and HS-3 (c), Hwasung.

다. 공내수의 온도 및 전기전도도는 앞에서 언급한 바와 같이 1 m 간격으로 측정된 값을 직선으로 연결한 것이다.

3개 시추공에 대한 물리검층 중, 공내수 전기전도도검층 기록을 보면 구 해안선에 인접하여 있는 시추공 HS-1과 HS-2에서는 각각 1350~1550  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 1750~1850  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로, 비교적 높은 전기전도도를 나타내며 내륙 쪽에 위치한 시추공 HS-3은 약 220  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 인 담수 지하수의 범위로 내륙 방향으로 갈수록 공내수의 전기전도도가 감소함을 알 수 있다. 시추공 HS-2에

서 특히 공내수의 전기전도도가 제일 높고, 심도 변화에 따른 편차가 크지 않은 점은 이 시추공의 위치가 해수침투의 주요 경로인 급경사 단층 파쇄대 부근에 위치해 있기 때문인 것으로 해석된다. 전자유도검층에 의한 시추공 주변의 전기비저항 분포를 보면 내륙쪽에서 해안가로 갈수록 전기비저항이 감소하는 경향을 보인다. 해안쪽에 위치하는 2개 시추공의 경우 뿔층에 해당하는 심도 8~10 m까지는 매우 낮은 전기비저항을 보이는 반면, 내륙쪽에 위치하는 시추공 HS-3의 경우 상대적

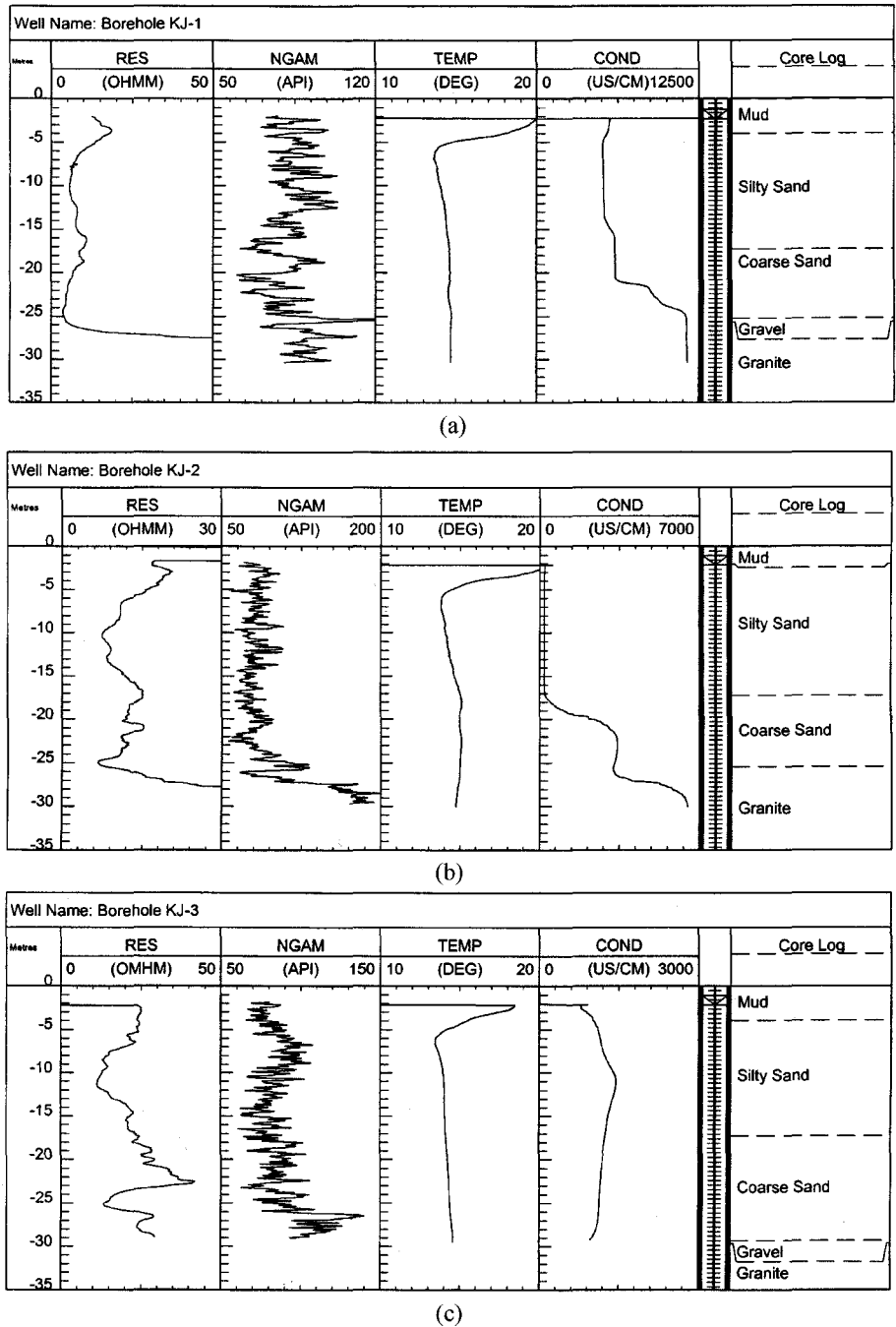


Fig. 5. Log composite from borehole KJ-1 (a), KJ-2 (b), and KJ-3 (c), Kimje.

으로 전기비저항이 높은 것을 알 수 있다. 이와 같은 전기비저항의 분포는 팽층 내의 염분 함량이 해안선 쪽으로 갈수록 높은 것과 잘 일치한다. 자연감마선검층 기록을 보면 이 지역의 기반암인 편마암이 심하게 풍화된 구간(주상도에서 residual soil로 표기하기도 함)에서는 편마암의 평균치인 약 120 API 정도를 나타내고 있으며 천부 층적층에서 자연감마선의 변화는 육안으로는 구별할 수 없는 점토의 미세한 변화를 반영하고 있다고 해석된다.

**전라북도 김제지역**

Fig. 5는 KJ-1, KJ-2, KJ-3의 3개 시추공에 대한 물리검층 기록으로 그림의 왼쪽으로부터 전자유도검층에 의한 전기비저항, 자연감마선검층, 공내수의 온도검층 및 전기전도도검층 기록이다. 3개의 시추공은 해안선으로부터 직선거리로 각각 25 m, 140 m 및 280 m에 위치한다.

전기전도도검층 기록을 보면 해안가에서 가장 먼 거리에 위치하는 시추공 KJ-3에서는 900~1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 시추공 전구간

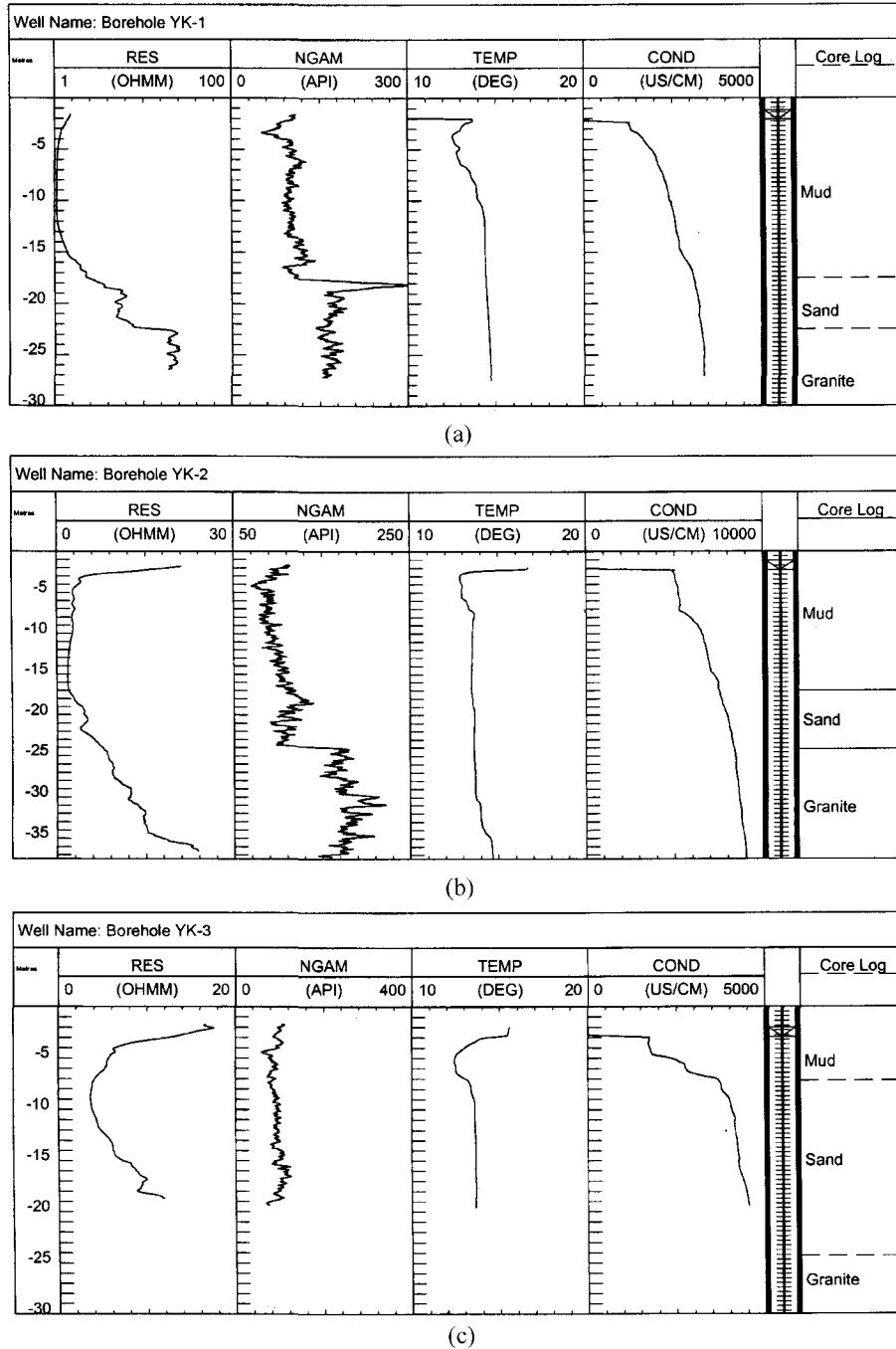


Fig. 6. Log composite from borholel YK-1 (a), YK-2 (b), and YK-3 (c), Youngkwang.

에서 비교적 완만한 변화를 보인다. 중간 지점에 위치하는 시추공 KJ-2에서는 18 m까지는  $200 \mu\text{S}/\text{cm}$  이하, 21m~26.5 m 심도 구간에서는 약  $3300 \mu\text{S}/\text{cm}$ , 심도 29 m 이하에서는  $6000 \mu\text{S}/\text{cm}$  이상을 보이고 있으며, 해안가에 인접한 시추공 KJ-1에서는 심도 21 m까지는  $5000\sim 6000 \mu\text{S}/\text{cm}$ , 21~24.5 m 심도 구간에서는 약  $9000 \mu\text{S}/\text{cm}$ , 심도 24.5 m 이하에서는  $11000 \mu\text{S}/\text{cm}$  이상을 나타내고 있다. 시추공 KJ-3의 경우, 시추공 전구간에 걸쳐 전기전도도가 일정함에 비하여 시추공 KJ-1과 KJ-2의 경우에는 전기전도도가 심도에 따라서 계단형태로 뚜렷하게 증가한다.

각 시추공에서의 전기비저항 분포를 보면 해안가로 갈수록 전기비저항이 감소하며 KJ-1, KJ-2, KJ-3 시추공에서의 최소 비저항은 각각  $3 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ ,  $6 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ ,  $10 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ 로 매우 낮고 대체로 기반암 직상부 심도구간에서 낮은 비저항을 보이고 있다. 시추 주상도를 보면 지표 부근은 빨층으로 구성되며 심도의 증가에 따라서 세립질 모래층, 입도가 큰 모래층과 기반암 순으로 분포하고 있다. 일반적으로 입도가 클수록 수리전도도가 증가하고 입도가 작아질수록 수리전도도가 감소하는 경향을 보이므로(Shepherd, 1989), 입도가 큰 모래층이 해수의 침투통로인 투수성 지층의 역할을 하여 전기비저항이 더 낮은 경향을 보이는 것으로 해석된다. 자연감마선검층 기록을 보면 입도가 작은 모래층이 입도가 큰 모래층보다 더 높은 자연 감마선 값을 보이는데 이것은 입도가 작은 모래층에 점도가 많이 협재되어 있는 사실과 잘 일치하고 있다.

### 전라남도 영광지역

Fig. 6은 전남 영광지역 시추공에서 수행한 물리검층 결과로서, 그림의 왼쪽으로부터 전자유도검층에 의한 전기비저항, 자연감마선검층, 공내수의 온도검층 및 전기전도도검층 기록이다. 3개 시추공은 불갑천을 중심으로 북쪽에 YK-1호공이, YK-1호공 남쪽으로 불갑천 건너편에 KY-2호공이, 그리고 YK-3호공은 불갑천 다리를 지나 도로 옆에 위치한다(Fig. 3 참조).

이 지역에서 실시한 물리검층 자료 중, 공내수의 전기전도도 검층 기록을 보면 YK-1호공은  $1000\sim 3300 \mu\text{S}/\text{cm}$ , YK-2호공은  $5000\sim 8500 \mu\text{S}/\text{cm}$ , YK-3호공은  $1600\sim 3500 \mu\text{S}/\text{cm}$ 로 YK-2호공이 가장 높은 전기전도도를 보이며 YK-1호공과 YK-3호공은 비슷한 범위를 나타낸다. 전자유도검층에 의한 시추공 주변의 전기비저항 분포를 보면 심도 10~17 m까지  $1\sim 3 \text{ ohm} \cdot \text{m}$  범위로 매우 낮다. 이와 같이 전기비저항이 낮은 것은 기반암(화강암) 상부층이 지표 부근까지 염수로 침윤되어 있기 때문인 것으로 해석된다. 이 지역의 주상도에 표시된 빨층과 모래층에서의 물성이 적용한 물리검층 자료만으로는 뚜렷이 구별되지 않으며 기반암과 상부 퇴적층과의 경계도 물리검층 자료와 일관성이 미흡하여 해석이 어려움이 있는 곳이다.

## 물리검층의 적용성 검토

### 지표 물리탐사 자료 해석의 정확성 제고

물리검층은 동일지역에서 실시된 전기비저항탐사의 역산 해석에 대한 신뢰성을 확인하는데에 이용될 수 있다. Fig. 7은 해안가에 인접한 시추공 HS-1에서의 물리검층기록(a)과 상세 시추주상도(b), 그리고 직선거리 5 m 이내의 인접 지점에서 수행한 슬립버저 전극배열을 이용한 전기비저항 수직탐사의 역산 결과(c)를 비교한 것이다.

제 1층의 전기비저항과 두께는  $79 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ 와 1.6 m로서, 이는 주상도에서 다량의 모래와 자갈로 구성된 지하수면 상부의 표토층에 대응된다. 전기비저항이  $20 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ 이고 심도 약 10 m까지 지속되는 제 2층은 지하수면 하부의 실트질 점토, 실트, 점토층을 총체적으로 나타낸다.  $40 \text{ ohm} \cdot \text{m}$  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 내로 잘 일치하며 매우 높은 분해능으로 심도에 따른 전기비저항을 측정하는 전자유도검층은 주상도 상의 기반암 심도와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 전기비저항 수직탐사는 심도의 변화에 따른 전기비저항의 1차원 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 정확성을 제고할 수 있다.

### 지하수 모니터링을 위한 최적 심도 선정

어느 지점에서 해수침투가 지금도 지속되고 있는지를 확인하는 방법 중에서 가장 확실한 방법은 시추공 내에서 지하수의 전기전도도를 장기간 모니터링하여 조석운동과 같은 주기성을 확인함으로써 모니터링 위치에서의 지하수가 조석운동에 직접 영향을 받고 있음을 보이는 것이다. 그러나 지하수 모니터링을 위한 센서의 심도를 잘못 선택하면 조석운동과 동일한 주기성을 감지하지 못하는 경우가 있다. 이것은 구경이 작은 시추공에서 조석 영향에 의한 염수의 상하 혼합이 원활하지 못한 것으로 생각된다.

물리검층 자료를 이용하면 지하수의 전기전도도 장기 모니터링을 위한 최적 심도를 결정할 수 있다. Fig. 8은 시추공 KJ-1에서 수위, 온도 및 전기전도도를 모니터링하기 위하여 지표에서 10 m 하부에 센서를 위치시키고 측정된 결과인데, 전기전도도자료에서는 조석 주기와 같은 주기성을 감지하지 못했음을 알 수 있다. 본 연구지역에서 장기 모니터링을 위한 센서의 위치로서 지표 하 10 m는 수위를 측정하기에는 적당한 위치이지만 전기전도도를 측정하기에는 좋은 위치가 아님을 물



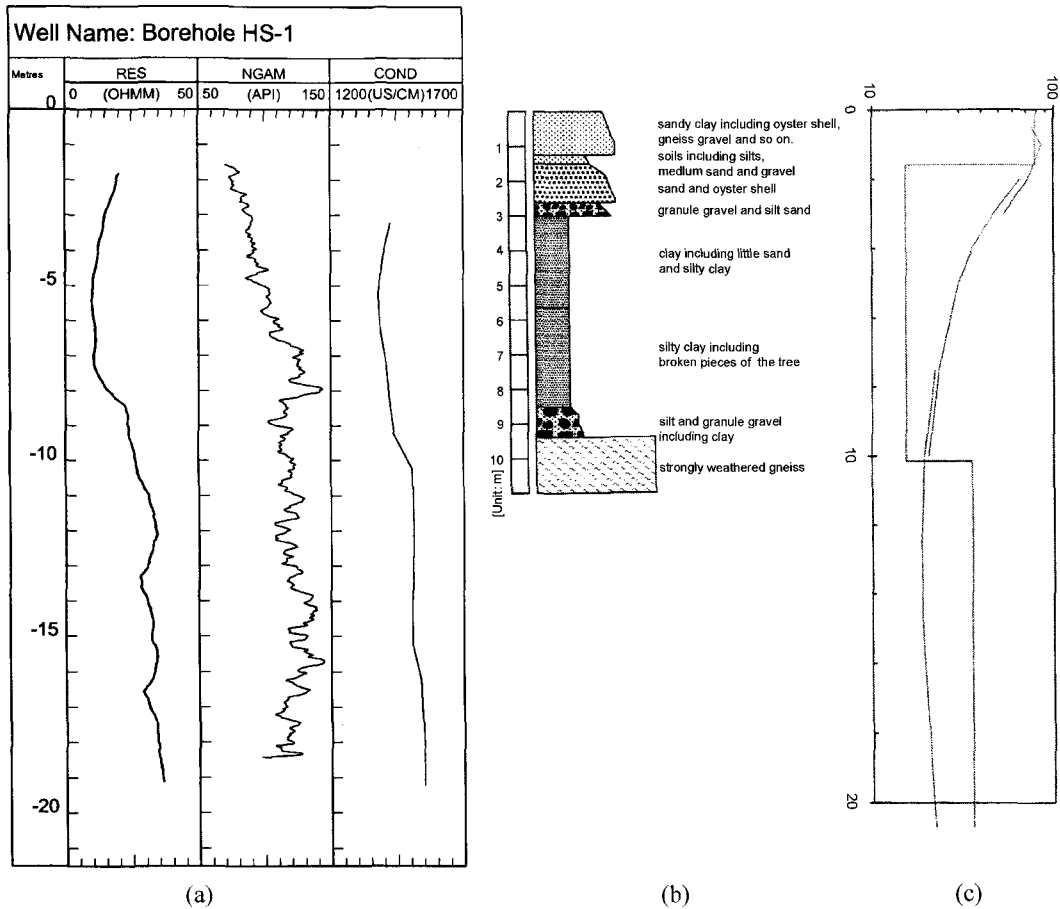


Fig. 7. Comparison of geophysical well logging (a), core log (b), and DC sounding result (c).

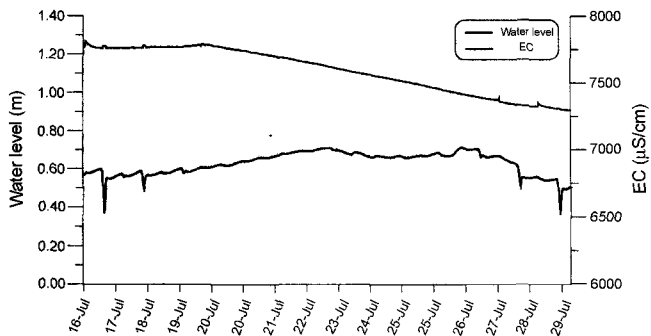


Fig. 8. Results of electrical conductivity and water level monitoring at 10 m depth in borehole KJ-1.

리검층 자료를 통하여 알 수 있다. Fig. 9는 물리검층의 해석 결과에 근거하여 시추공 KJ-1의 서로 다른 심도(10 m, 23 m 및 28 m)에서 전기전도도를 모니터링한 결과를 나타낸 것이다. 전기비저항이 낮고 자연감마선이 낮아서 투수성 모래층으로 해석되는 심도 23 m에서 조석운동 영향에 의한 전기전도도의 주기성을 확인할 수 있었다.

#### 수리지질학적 단위의 구분

Fig. 10은 전라북도 김제시 죽산면 대창리의 시추공에서 수행한 전자유도검층, 자연감마선검층 및 지하수의 온도/전기전도도 검층기록으로부터 해수침투의 통로가 되는 모래층과 불투수성 점토층을 구별한 예를 보인 것이다. (a)는 왼쪽으로부터 전자유도검층에 의한 전기비저항, 자연감마선검층, 공내수의 온도검층 및 전기전도도검층 기록을 가공한 온도변화율검층(DELT로 표기, 단위는  $\text{degree}/100\text{ m}$ 로 1 m씩 심도가 증가할 때의 온도 변화율에 100을 곱한 것이다)과 전기전도도 변화율검층(DELC로 표기, 단위는  $\mu\text{S/cm/m}$ ) 기록이다. (b)는 일직선상에 놓여 있는 KJ-1, KJ-2, KJ-3 시추공들을 잇는 직선 하부에 대하여 전자유도검층에 의한 전기비저항을 단면도로 표현한 것이다. 심도 10 m와 24 m 부근에 중심을 둔 두 개의 저비저항층이 존재함을 볼 수 있으며 이를 근거로 수리지질학적 단위를 구분하였다. 전기비저항이 낮고 자연감마선이 낮으며 지하수의 온도나 전기전도도에 변화가 있는 층은 해수 침투가 있는 투수성 모래층이며('B'로 표기) 전기비저항이 낮지만 자연감마선이 높고 지하수의 온도나 전기전도도에 큰 변화가 없는 층은 점토 함량이 많은 불투수층으로 해석된다(민경덕 외, 1987).

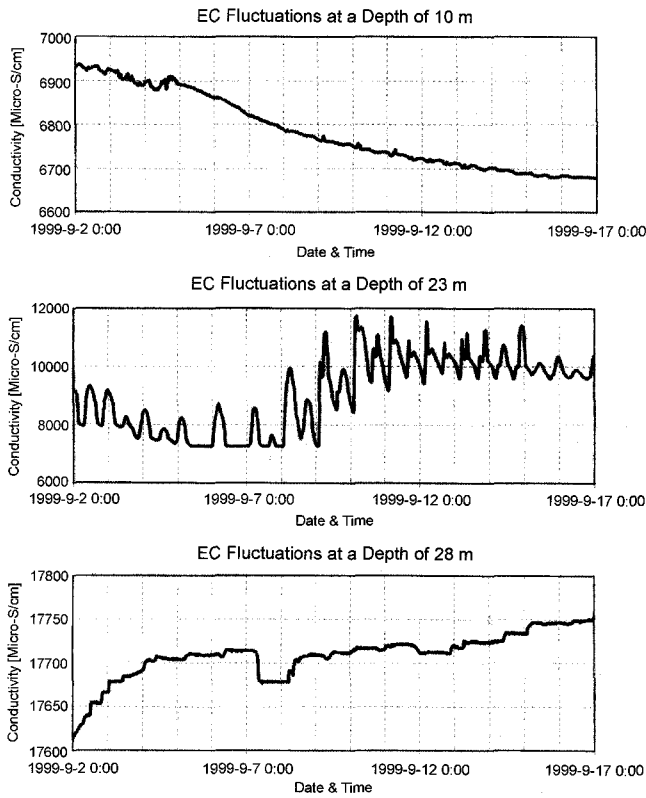


Fig. 9. Results of electrical conductivity monitoring at 10 m, 23 m, and 28 m depth in borehole KJ-1.

물리검층을 이용한 모니터링

전자유도검층을 이용한 모니터링으로 조석영향을 받는 구간을 판별할 수 있는가를 확인하기 위하여 김제 연구지역의 KJ-

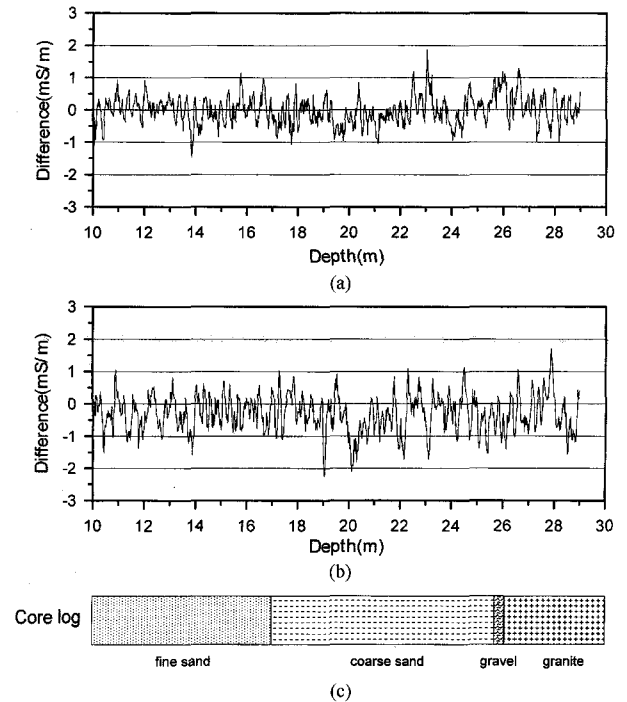


Fig. 11. Monitoring of induction logging for detecting seawater intrusion's interval at borehole KJ-1. (a) Repeatability test of induction log, (b) Difference of induction log at flow and ebb time. (c) Core log of borehole KJ-1.

1호공에서 1999년 7월 15~16일 사이에 매 2시간마다 전자유도검층을 수행하였다. Fig. 11의 (a)는 전자유도검층의 반복성을 나타내는 자료로서 2회 측정된 자료의 차를 보인 것인데 대체로 검출기의 분해능( $\pm 1$  mS/m) 이내인 것을 알 수 있다.

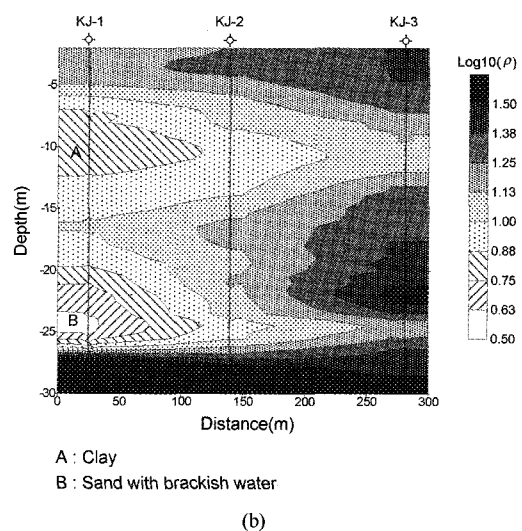
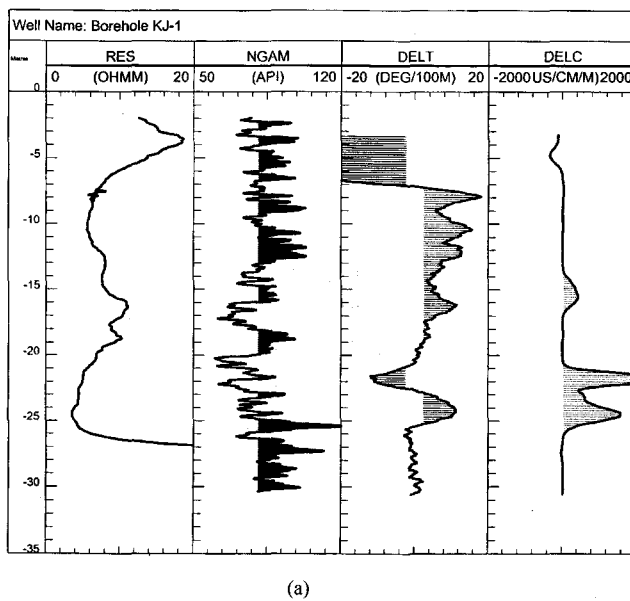


Fig. 10. Determination of seawater intrusion's interval using geophysical well logging. (a) Geophysical well logs at borehole KJ-1, and (b) Resistivity section by induction logs

Fig. 11의 (b)는 만조(7월 16일 새벽 4시)와 간조(7월 15일 22시) 때에 측정된 전기전도도(시추공 주변 지층의 비저항의 역수)의 차를 보인 것이고 (c)에는 주상도와 비교하여 나타내었다. 만조와 간조에 측정된 전기전도도의 차이가 검출기의 분해능 이상으로 크게 나타나는 구간이 없어서 조석에 의한 영향을 직접 확인할 수는 없었다. 이와 같은 이유로는 조석 영향에 의한 간극수의 전기전도도의 변화가 체적 비저항의 변화에 미치는 영향이 매우 작거나 시추공 KJ-1의 위치가 해수와 담수의 전이대에 있지 않고 바다 쪽에 더 가까이 있기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

### 결 론

임해지역의 해수침투 평가를 위하여 서로 다른 지질학적 특성을 갖고 있는 3개의 연구지역에서 전자유도검층, 공내수의 온도 및 전기전도도검층, 자연감마선검층을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지표물리탐사 이외에 물리검층을 추가로 활용함으로써 해수침투와 관련된 지질학적 특성의 해석에 큰 도움을 얻을 수 있었다. 화성지역은 수직적 단층과쇄대가 해수침투의 주 경로 역할을 하고 있으며, 전남 김제지역은 기반암 상부의 입도가 큰 모래층이 해수침투의 수평적 통로 역할을 하고 있고, 전남 영광지역 역시, 기반암 상부의 모래층이 해수침투의 수평적 통로 역할을 하고 있으나, 그 상부 뺨층의 물성과 큰 차이를 나타내지 않는 특징을 보이고 있었다.

2. 연안지역의 해수침투 평가를 위하여 물리검층을 활용함으로써 지표 물리탐사자료 해석의 정확성을 높일 수 있고, 지하수의 장기 모니터링을 위한 최적심도를 알아낼 수 있으며, 지층의 투수성 여부에 관한 수리지질학적 단위를 구분할 수 있음을 보였으며 그 밖에 물리검층을 이용한 모니터링의 적용성에 대하여도 예시하였다.

3. 시추공내의 염수의 영향을 비교적 적게 받으면서 지층의 전기비저항(bulk resistivity)을 측정할 수 있고, PVC 케이싱이 설치된 NX 구경의 시추공 내에서도 공극율을 측정할 수 있는 방법을 적용하면 물리검층으로 보다 정량적인 해수침투 관련 정보를 얻을 수 있을 것이다. 이를 위하여 송·수신 거리가 2중 이상인 전자유도검층과 소구경 중성자검층의 기술개발이 필요하다.

### 사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것입니다.

연구비를 지원해 준 과학기술부와 자료획득을 위해 많은 도움을 준 한국자원연구소 책임기술원 최종호씨, 논문의 심사와 좋은 의견을 제시한 심사위원께 진심으로 감사드립니다.

### 참고문헌

민경덕, 서정희, 권병두, 1987, 응용지구물리학, 우성문화사.  
 성익환, 조병욱, 김통권, 이병대, 이병주, 임무택, 이봉주, 이상규, 정현기, 최종호, 박인화, 최순학, 김연기, 1997, 순창군 탐동리 먹는 샘물 개발 타당성 및 환경영향조사 보고서: 한국자원연구소, 먹는샘물조사 보고서 97-1(no.1).  
 이대하, 김원영, 이승구, 염병우, 기원서, 채병곤, 김용제, 김형찬, 문상호, 이철우, 고동찬, 이평구, 조민조, 최범영, 권석기, 허대기, 김현태, 김세준, 김중열, 김유성, 현혜자, 이상규, 황세호, 박인화, 이길용, 윤운열, 한종규, 1999, 암반내의 열극해석과 지하수 유동 및 흡착연구: 한국자원연구소 연구보고서, KR-99(B)-05.  
 이상규, 황세호, 이태섭, 구성분, 최종호, 박인화, 김광은, 송윤호, 성낙훈, 성기성, 이진수, 진명식, 지세정, 이동영, 김주용, 양동윤, 성익환, 최순학, 조병욱, 김민규, 박철환, 박연준, 최성웅, 박찬, 이현철, 김태유, 양문희, 오경준, 박경민, 김연배, 송영수, 채효석, 백길남, 송승엽, 오세영, 1996, 제주도 지열자원탐사 및 최적 활용방안 연구(III): 한국자원연구소 연구보고서, 951K101113AG1.  
 이상규, 황세호, 황학수, 박인화, 1998, 지하물성의 정보화를 위한 물리검층 품질관리 연구: 한국자원연구소, KR-98(C)-10.  
 임정웅, 문상호, 최위찬, 김형찬, 염병우, 이철우, 이승구, 이종철, 성기성, 최성자, 박기화, 1997, 포천(수입)지구 온천자원평가 조사보고서: 한국자원연구소 온천조사보고서 97-1(No. 231), 324p.  
 임정웅, 염병우, 이승구, 김형찬, 최위찬, 최성자, 조동룡, 이상규, 황세호, 박인화, 1996, 충주 수안보지구 온천수자원조사보고서: 한국자원연구소 온천조사보고서 96-28(No. 228), 178p.  
 한규언, 신희섭, 2000, 제주도 해안지역 고염분 현상에 대한 고찰: 지질재해 관측 및 방지기술 심포지엄, 2000년도 자연재해 방지기술개발사업단·(사)대한지질공학회 공동학술발표회 논문집 150-171.  
 Barker, R. D., 1990, Investigation of groundwater salinity by geophysical methods, in Geotechnical and Environmental Geophysics, Ward, S. H. ed., Vol. II, SEG, 201-211.  
 Drury, M. J., 1984, Borehole temperature logging for detection of water flow: *Geoexploration*, **22**, 231-243.  
 Morin, R. H., Urish, D. W., 1995, Hydrostratigraphic characterization of a coastal aquifer by geophysical log analysis, Cape Cod national seashore, Massachusetts: *The log Analyst*, **35**, 27-37.  
 Robertson Geologging Limited, 1995, Robertson Geologging Limited Software PCL2 (Prologger system II).  
 Shepherd, R. G., 1989, Correlations of permeability and grain size: *Ground Water*, **27**, 633-639.