

참조채널 유도분극탐사기술에 의한 해수침투대 인지

이상규¹⁾ · 황학수¹⁾ · 황세호¹⁾ · 박인화¹⁾ · 신제현¹⁾

Recognition of Seawater Intrusion Using Reference IP Technique

Sang Kyu Lee¹⁾, Hak Soo Hwang¹⁾, Se Ho Hwang¹⁾, In Hwa Park¹⁾ and Je Hyun Shin¹⁾

요 약 : 해수침투에 관한 연구는 해수침투대가 저비저항 이상대로 나타나기 때문에 주로 전기탐사를 이용한 방법이 있었으나, 우리 나라 서·남해안 대부분의 침해 지역은 실트층 또는 점토층과 같은 양전도성 지층을 협재하고 있기 때문에 전기비저항의 대비만으로 해수침투의 여부에 대한 판정을 할 경우 오류를 범할 수도 있다. 따라서 본 논문에서는 해수침투대와 양전도성 지층을 효과적으로 식별하여 해수침투대를 정확히 파악하고자 전라북도 김제와 전라남도 영광 지역에 참조채널 유도분극탐사를 실시하였다. 전자결합을 최소화하는 차폐 전선을 사용하였으며 수신전위 파형은 물론 송신전류 파형도 참조채널에서 함께 측정하는 주파수 영역 참조채널 유도분극탐사기술을 적용하여 겉보기 비저항은 물론 유도분극 효과도 보다 정밀하게 산출하였다. 이러한 현장 탐사에서 참조채널 유도분극탐사를 활용하여 저비저항 특성만으로는 구별할 수 없었던 유도분극 효과가 큰 점토층과 유도분극 효과가 낮은 해수침투대를 구분함으로써 보다 정확한 해석을 가능하게 하였다.

주요어 : 해수침투, 양전도성 지층, 참조채널 유도분극 탐사

Abstract : Tracing the history of study, problems of seawater intrusion are commonly investigated with electrical techniques because seawater saturated zone is indicative of the low resistivity anomaly. There are, however, silt and mud layers in the western and southern coastal areas of Korea, so we may make a mistake in case we determine seawater intrusion only with resistivity survey. Hence, reference IP survey was carried out in Kimje, Jeollabuk-Do and Youngkwang, Jeollanam-Do in order to decide whether or not the area is under the influence of seawater intrusion. With the use of a electric field cable to minimize EM coupling, we obtained more accurate results by applying reference IP technique measuring simultaneously wavelet of current as well as potential. With the aid of reference IP technique, it is possible that we can exactly evaluate seawater intrusion by discriminating seawater saturated area (no IP effect) from very highly conductive layer composed of clay mineral (high IP effect).

Keywords : seawater intrusion, conductive layer, reference IP

서 론

해안선 부근에서 해수가 대수층을 따라 담수 지하수계로 침입하는 해수침투는 강우량, 증발산량 변화에 따른 지하수면의 높이 변화, 조석에 의한 해수면 변화, 해수와 담수간의 밀도차 등 주로 자연적인 요인에 의하여 발생하며 투수성 퇴적층이나 단층파쇄대의 공간적 분포 등 지질학적 특성에 의하여 그 정도가 좌우되는데, 최근에는 침해지역에서의 무분별한 지하수 개발과 과다 양수 등 인위적인 요인에 의하여 내륙으로 확산되고 있어 문제가 커지고 있다.

이 같은 해수침투의 대표적인 피해는 토양의 염분화에 의한 농작물 수확 감소 및 침해지역에서 지하수 염분화에 따른 생

활, 공업 그리고 농업용수의 부족 등이 있는데, 일단 해수침투가 일어난 지역은 복구에 있어서 막대한 경비 뿐만 아니라 매우 장기간의 복구기간이 소요된다.

우리 나라의 지형 특성상 서해 연안 지역은 지하수의 광역적 유동에 있어 하류 지역에 속하고 있으며, 따라서 자연적 기원(물/암석 반응)의 용존 성분이 부화되는 조건에 있다. 지하수 이용량의 점진적 증가와 더불어 자연 수위 강하가 발생함에 따라 광범위하게 분포하는 미고화 퇴적층과 바다로 연장된 암반의 열극을 통하여 해수가 유입 침투될 수 있는 가능성을 내포하고 있다.

침해지역에서의 해수침투 경로 및 해수침투 영역 탐지에 대하여 그 동안 국내·외에서 전기, 전자탐사를 활용한 많은 연

*2002년 1월 11일 접수

1) 한국지질자원연구원(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

구(이상규 등, 1988; 이태섭 등, 1995; 이희순 등, 1995; Buselli *et al.*, 1986; Flathe, 1964; Hoekstra *et al.*, 1990; Mills *et al.*, 1988)가 있었다. 해수침투의 양상을 규명하기 위하여 주로 전기, 전자탐사를 활용하는 이유는 해수의 영향으로 주변보다 전기비저항이 낮아지므로 해수침투대가 저비저항 이상대로 작용하기 때문이다.

그러나 전기비저항(또는 전기전도도)을 매개 변수로 하는 해수침투 영역 탐지에서의 문제점은 해수침투 영역을 해수침투가 없는 양도성 지층과 구별하는 것이다.

우리 나라 서·남해안 대부분의 임해 지역은 실트층 또는 점토층과 같은 양전도성 지층을 협재하고 있기 때문에 전기비저항의 대비만으로 해수침투의 여부에 대한 판정은 한계를 가진다. 해수침투에 의한 염수화를 확인해 줄만한 지하수 지화학 자료가 별도로 존재하지 않는다면 해수침투에 의한 저비저항대와 점토층과 같은 양전도성 지층을 식별하기 위하여 전기비저항 탐사법 이외에 또 다른 지구물리학적 방법이 요구된다.

일반적으로 유도분극탐사는 점토광물이 섞여 있는 층에서는 IP 효과가 증가하고, 전기전도도 증가에 따라 IP 효과가 줄어들기 때문에 해수침투대와 점토 광물 같은 양전도성 지층을 구별할 수 있다. 이러한 지하수 조사에 대한 유도분극탐사는 Vacquier 등(1957) 이후로 많은 연구가 진행되어 왔는데 Ogilvy and Kuzmina(1972), Roy and Elliott(1980), Olorounfemi(1985), Barker(1990) 등은 전기비저항 및 유도분극탐사를 동시에 실시함으로써 염분이 없는 신선한 물을 함유한 층과 염분을 함유하고 있는 층을 구분하는 방법으로 전기비저항 감소, 유도분극 효과 감소의 부분이 염분을 함유하고 있는 지역임을 제시하였다. Barker(1990)은 해수침투에 의해 지하수 오염이 심각한 지역, 중간 정도의 오염된 지역, 쓰레기 매립장 주변의 지하수가 비교적 적게 오염된 지역 등에서 전기비저항 및 유도분극 탐사를 수행함으로써, 전기비저항탐사의 한계성 및 유도분극 탐사의 적용성을 논의한 바 있다.

본 논문은 수신전위 파형은 물론 송신전류 파형도 참조채널에서 함께 측정하는 주파수 영역 참조채널 유도분극탐사 기법을 활용함으로써 저비저항 특성만으로는 구별할 수 없었던 점토광물의 분극 효과와 해수에 침윤된 지층의 분극효과 감소현상을 이용하여 해수침투대와 양전도성 지층을 효과적으로 식별하는 기술을 개발하는데 목적이 있다.

유도분극탐사

유도분극(IP, Induced Polarization) 탐사법은 1920년경 Schlumberger에 의하여 연구된 이래로 황화광물 조사에 많이 이용되며 발달해 왔다. 최근 일본에서 황성단층 조사에 그 적용성이 뛰어나다는 사실이 트랜치조사와 시추조사의 결과로 확인(Takahashi *et al.*, 1996)된 이후 다시 널리 사용되기 시작하였다.

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

유도분극탐사는 지하에 전류를 흘려보내 분극현상을 유도하고 이 유도분극 현상을 측정함으로써 지하구조를 탐사하는 방법으로서 측정요소에 따라서 시간영역법과 주파수영역법으로 나누어진다.

시간영역 유도분극탐사는 전류를 차단하는 순간부터 전위전극간의 전위차로부터 걸보기 충전성(apparent chargeability)을 측정하는 방법이며, 주파수영역 유도분극탐사는 2개 이상의 저주파(대략 0.1~10 Hz)를 사용하여 걸보기 비저항을 측정하고 이로부터 주파수 효과(PFE, Percent Frequency Effect), 금속 계수(Metal Factor) 등을 추출하거나, 전류를 낮은 주파수에서 보낸 뒤 전류의 위상에 대한 측정 전위의 위상차를 측정하는 방법이다(현병구 등, 1994).

주파수영역법에서 저주파를 사용하는 이유는 고주파를 사용할 경우 전자탐사의 원리로 이용되는 전자 결합(EM coupling)이 발생할 우려가 있기 때문이다.

주파수 효과는 저주파를 사용했을 때의 걸보기 비저항과 고주파를 사용했을 때의 걸보기 비저항의 차를 고주파수 걸보기 비저항에 대한 백분율로 표시하는데 그 식은 다음과 같다.

$$PFE = \frac{\rho_{f_1} - \rho_{f_2}}{\rho_{f_2}} \times 100(\%)$$

여기서, ρ_{f_1} 은 낮은 주파수를 사용했을 때의 걸보기 비저항, ρ_{f_2} 는 높은 주파수를 사용했을 때의 걸보기 비저항을 의미한다.

유도분극법의 현장탐사는 전체적으로 전기비저항법과 유사하다. 사용되는 전류전극은 전기비저항탐사와 마찬가지로 금속전극을 사용하며 대지와와의 접촉 저항을 줄이기 위하여 구리망을 사용하기도 한다. 전위전극은 전극분극현상을 막기 위하여 비분극전극(porous pot)을 사용하는 것이 바람직하다.

참조채널 유도분극탐사

참조채널 유도분극탐사는 주파수영역에서 수행되는데, 두 개의 주파수를 이용하여 수신 전위파형을 측정할 때마다 송신 전류파형을 동시에 측정한 후 수신 전위파형을 송신 전류파형으로 디콘(deconvolve) 함으로써 두 개 주파수에서의 걸보기 비저항들을 보다 정밀하게 산출하는 방법이며 송신 전류파형을 reference로 사용하기 때문에 참조채널 유도분극탐사법이라

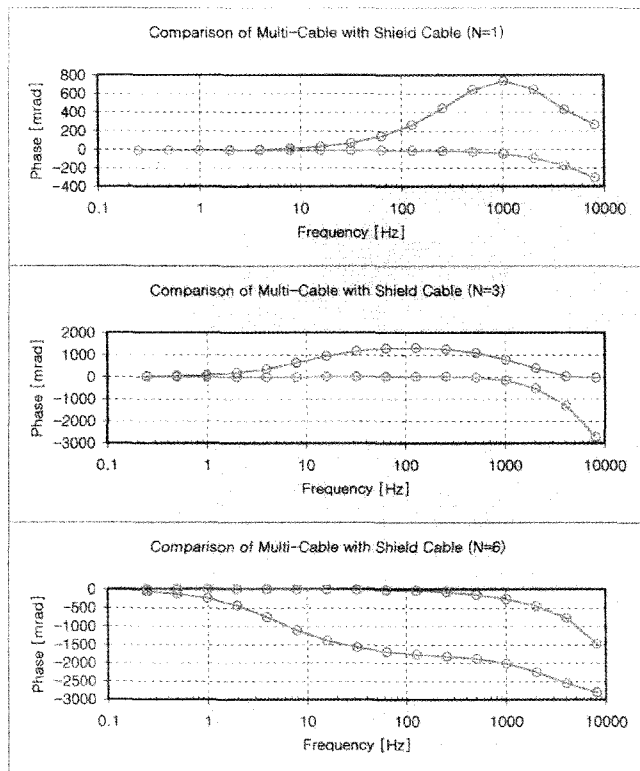


Fig. 1. Comparison of multi cable with shield cable.

고 부른다(이상규 등, 2000). ‘파형을 측정한다’는 의미는 수신 전위나 송신 전류의 크기(magnitude) 뿐만 아니라 각각의 위상(phase)도 함께 측정한다는 의미이다.

이러한 방법으로 탐사자료를 취득하면 겉보기 저비저항은 물론 주파수 효과(PFE) 등의 유도분극효과도 보다 정밀하게 산출할 수 있으며, 송신전류와 수신전위의 위상으로부터 얻은 위상차가 주파수 효과에 비례(Whitelet and Tyne, 1981; 이상규와 구자학, 1986) 한다는 사실에 기초하여 산출한 주파수 효과의 신뢰성을 검증하는 척도로 활용할 수 있다. 참조채널 유도분극탐사법은 궁극적으로 유도분극탐사를 극히 정교하게 수행하려는 방법이므로 전자결합(EM coupling) (이상규, 1982)을 일으킬 수 있는 기존의 다중전선을 사용하지 않으며 사용 주파수도 매우 신중하게 선택한다.

Fig. 1은 전기비저항탐사에서 사용하던 비차폐 다중전선을 이용했을 때(청색 곡선)와 차폐전선을 사용했을 때(적색 곡선)의 주파수 변화에 따른 위상차의 변화를 비교하여 보인 것이다. 비차폐 다중전선을 이용했을 때, 전위전극과 전류전극 사이의 거리가 멀어질수록 즉, n 이 커질수록 전자결합의 영향에 의한 위상변화가 커짐을 알 수 있다. 따라서 유도분극탐사에서는 전기비저항탐사에서 사용하던 기존의 비차폐 다중전선을 사용하면 안되며, 또한 지질특성에 따른 사용 주파수 선택이 매우 중요하다.

현장 적용

단층점토대에서의 실험

해수침투의 영향이 전혀 없는 지역에서, 양전도성 지층인 점토층의 분극효과를 파악하기 위하여 단층대를 가로질러 쌍극자-쌍극자 전극배열을 이용한 참조채널 유도분극탐사를 수행하였다. 탐사 기기는 미국 Zonge Engineering & Research Organization, Inc의 탐사 시스템(1994)을 사용하였다. 송신부는 발전기(Motor/Generator Set), 전위 조절기(Voltage regulator), 송신기(Transmitter), 송신조정기(Transmitter Controller)와 전류전극으로 구성되며 수신부는 탐사자료 수신 및 처리기(Geophysical Data Processor), 송신전류 분리기(Current Shunt) 및 비분극 전극으로 구성된다.

탐사자료 취득 시에 쌍극자의 길이 (a)는 20m로 하였으며 전류전극을 통하여 땅에 주입한 전류는 평균 700 mA이었고 주파수는 0.25 Hz와 8 Hz를 사용하였으며 16주기(cycle) 동안 측정하여 평균하였다. Fig. 2의 상부 그림은 Interpex사의 Resixip2DI 프로그램으로 2차원 역산하여 얻어진 저주파수 전기비저항 단면도이며, 하부 그림은 주파수 효과에 대한 단면도이다. 시추조사를 통하여 단층점토대로 밝혀진 두 저비저항대(Fig. 2 상부 그림의 FZ 지역)가 부분적으로 매우 높은 주파수 효과(Fig. 2 하부 그림의 A, B)를 나타냄을 볼 수 있다.

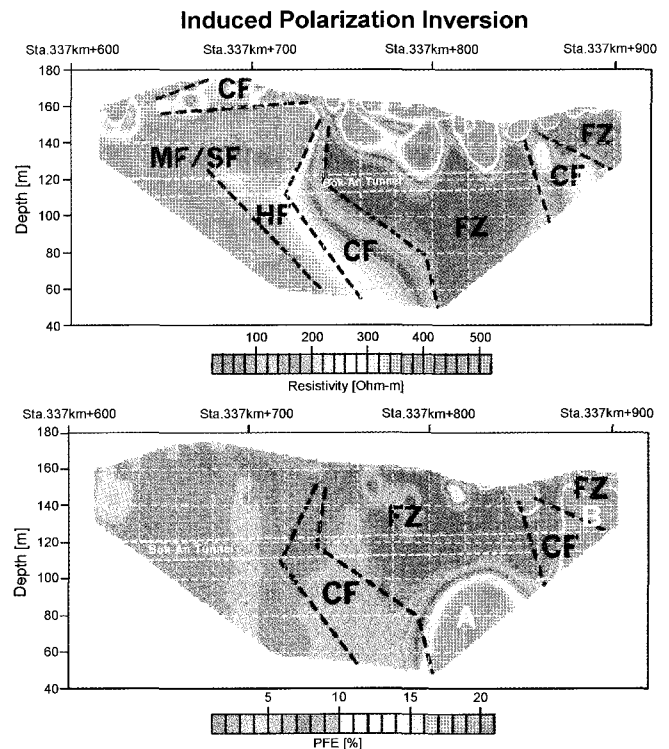


Fig. 2. Induced polarization effect over fault area.

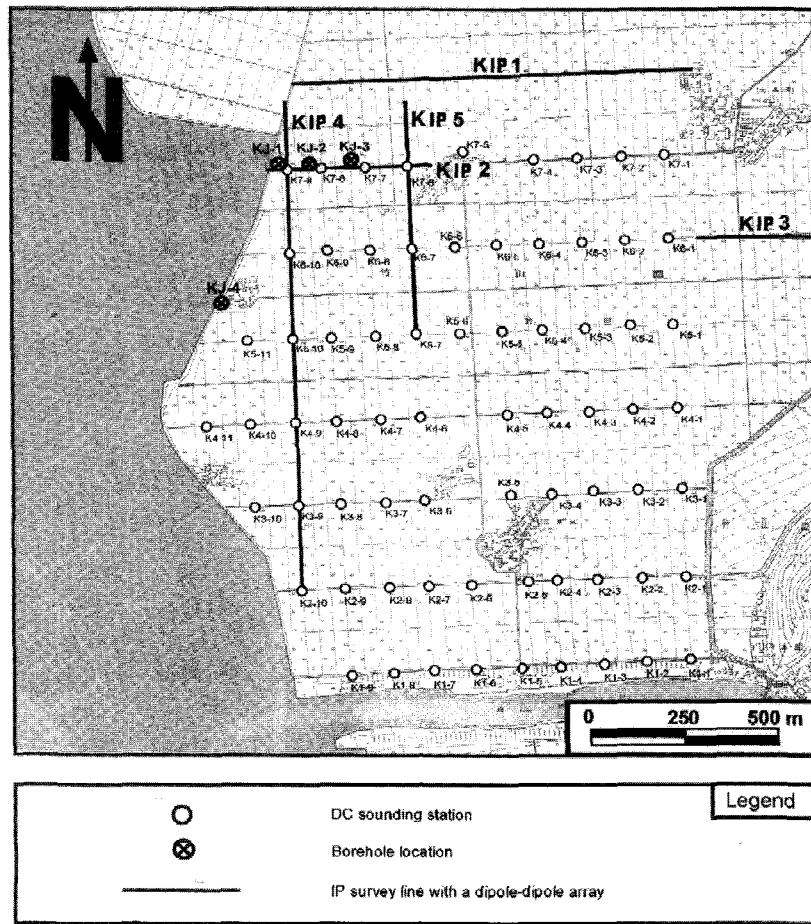


Fig. 3. Geophysical survey map in Kimje.

전라북도 김제 해수침투 지역에서의 적용

전라북도 김제시 연구지역(Fig. 3 참조)은 평야지대로 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 시추공 KJ-1~KJ-4에서의 시추 결과, 대략 지표에서부터 2~3 m까지는 담회색의 점토층이, 그리고 대략 15 m 정도까지는 세립질 모래층으로 보여지는 silt층이 존재하며, 그리고 25 m 정도까지는 조립질의 황토색 모래층이 존재하는데, 이는 기반암인 화강암의 풍화산물로 보인다(이상규 등, 2000).

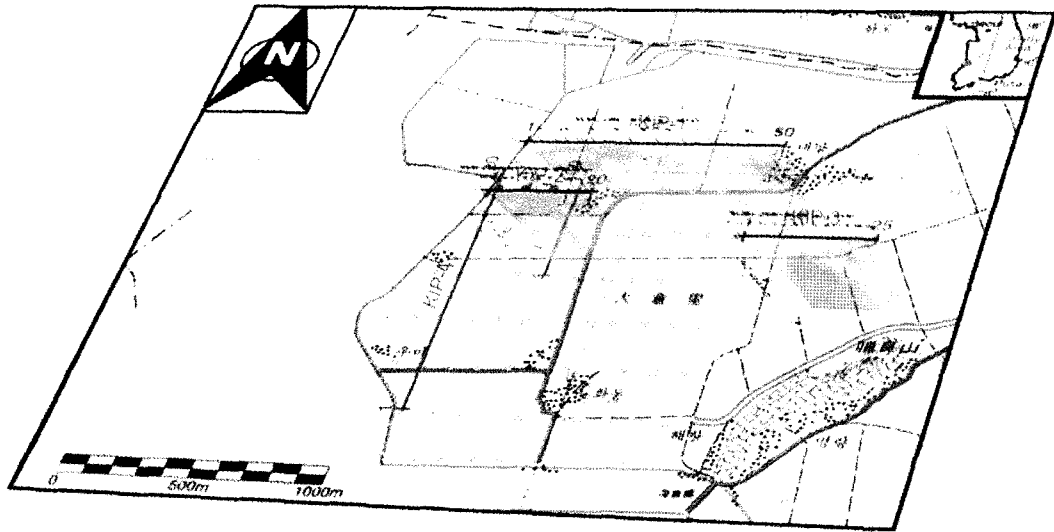
참조채널 유도분극탐사가 수행된 5개의 측선(KIP1, KIP2, KIP3, KIP4, KIP5)은 전기비저항 수직탐사로부터 해석된 낮은 전기비저항 이상대에서 천부에 존재하는 점토층 내의 해수침투대를 구별할 수 있도록 설정하였다(이상규 등, 2000). 단위 쌍극자길이 (a)는 20 m로 하여 전극전개수 (n)를 6까지 하였으며 주파수는 0.25 Hz와 8 Hz를 사용하였다.

Fig. 4는 측선 KIP1~KIP3에서의 저주파 전기비저항과 주파

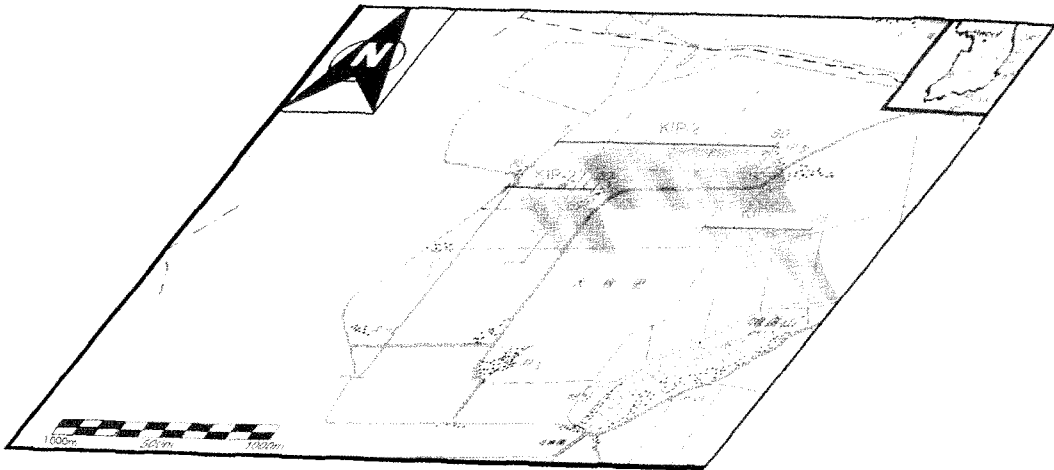
수효과에 대한 단면도이다. 각 측선 상의 전기비저항 단면도는 지질학적 층서구조를 잘 반영하고 있으며 전기비저항의 수평적 분포와도 잘 일치한다.

KIP1과 KIP2의 측점 1~20에서의 천부 40 m 이내에 나타나는 낮은 전기비저항대의 분포(녹색)는 천부에 존재하는 점토층에서 주파수효과가 거의 없는 것(파란색)으로 보아 해수침투에 의한 염수화가 일어난 것으로 해석된다. 반면 전기비저항 분포도에서 북동쪽으로 형성된 30 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항 이상대(KIP1의 측점 40~50에 해당하는 저비저항대)는 주파수효과 단면도(녹색 : 높은 주파수 효과)로부터 천부 10 m 이내에 존재하는 점토층은 해수에 의한 영향이 없는 것으로 해석된다. 또한 해수침투 가능성이 거의 없는 지역에 위치한 KIP3에 대한 전기비저항 단면도에서 기반암으로 해석되는 상대적으로 높은 전기비저항대까지의 심도는 측선의 서단에서는 약 20 m 내외이지만 동쪽으로 갈수록 그 심도가 증가하고 있고, 천부 10 m 내외에 존재하는 점토층은 분극효과 단면도 상에서 분극효과가 상대적으로 큰 것으로 보아 해수에 의한 염수화가 발생하지 않은 것으로 해석된다.

Fig. 5는 측선 KIP4와 KIP5에서 수행한 참조채널 유도분극



(a) Resistivity sections



(b) Frequency effect sections

Fig. 4. IP results along KIP1, KIP2 and KIP3 in Kimje.

탐사의 결과인데 전체적인 전기비저항의 분포는 북서 방향으로 갈수록 낮아지며, 또한 주파수효과도 감소함을 볼 수 있다.

결과적으로, 조사지역의 북서쪽 모서리 부근에 분포하는 전기비저항 이상대(10 ohm-m 이하는 해수침투에 의해 염분 농도가 높은 지역이고, 북쪽 경계면에서 내륙으로 분포하는 낮은 전기비저항 이상대는 주파수효과가 상대적으로 높은 것으로 보아 해수에 의한 침투대가 아닌 단지 점토층과 호층을 이루며 분포하는 사질층으로 해석된다.

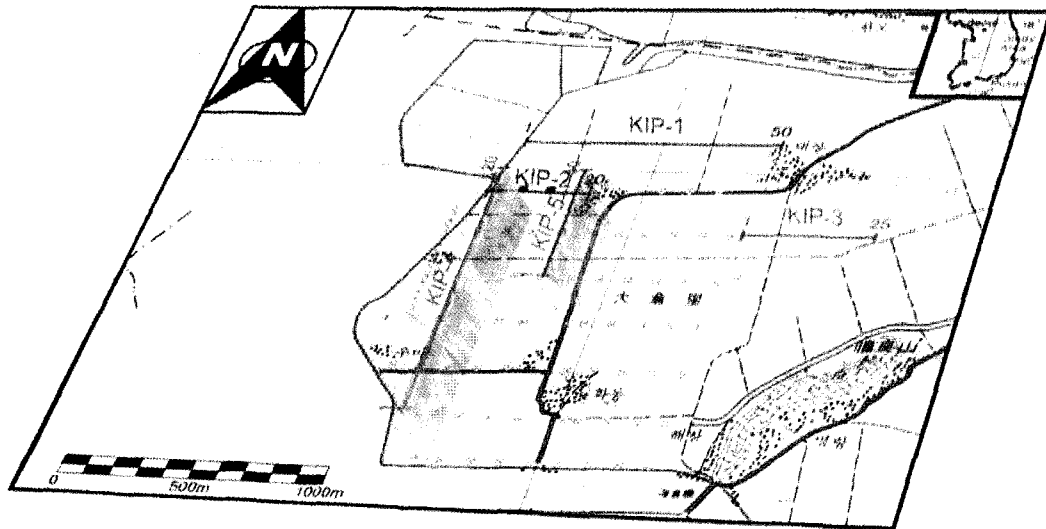
전라남도 영광 해수침투 지역에서의 적용

Fig. 6은 전라남도 영광에서 수행한 참조채널 유도분극탐사의 측선들을 조사지역의 지형과 함께 나타낸 도면이다. YK-1~YK-3에서 실시한 시추결과에 의하면 이 지역의 지질구조는 3층 구조로서, 지표로부터 15~18m까지의 제 1층은 점토층이

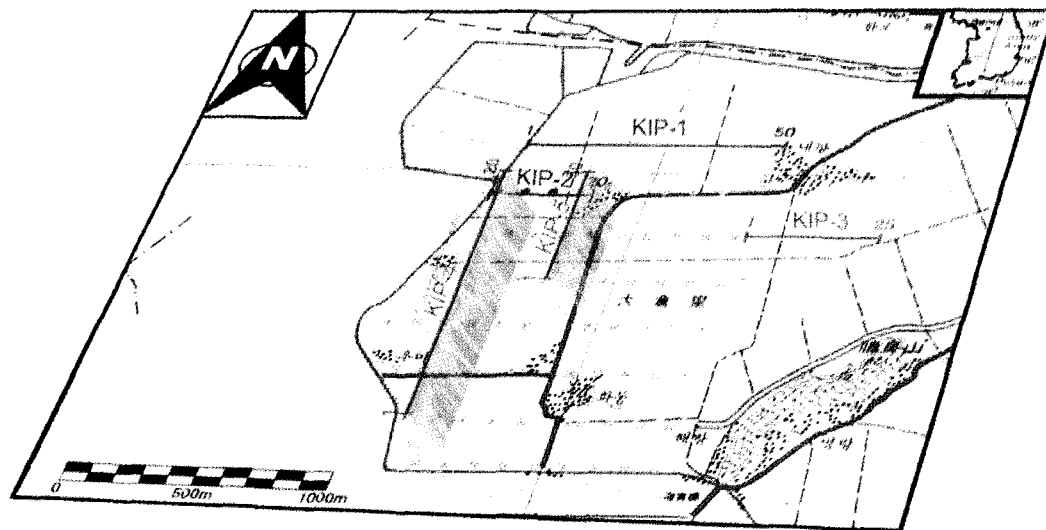
존재하고 점토층 하부로부터 기반암이 존재하는 심도 약 30~40m까지는 주로 모래로 구성된 사질층이다(이상규 등, 2000).

낮은 전기비저항 이상대의 유도분극 효과를 파악하기 위하여 길이가 1040m인 측선 5개(YIP1~YIP5)와 520m인 1개 측선(YIP6)에서 동쪽으로부터 서쪽으로 탐사자료를 측정하였다. 전극간 거리와 전극전개수는 각각 20m와 6으로 하였고 사용한 주파수는 0.125 Hz와 4 Hz 이었다.

Fig. 7은 각 측선에서 참조채널 유도분극탐사를 통하여 얻은 전기비저항 단면도(왼쪽)와 주파수효과 단면도(오른쪽)를 나타낸다. 전기비저항단면도를 보면 탐사지역의 남쪽 경계(측선 YIP1)와 북쪽 경계(측선 YIP6)로부터 중앙부(측선 YIP3)로 갈수록 대체적으로 전기비저항이 낮아지며, 기반암(풍화가 심한 화강암)까지의 심도는 탐사지역의 남쪽으로 갈수록 깊어지는



(a) Resistivity sections



(b) Frequency effect sections

Fig. 5. IP results along KIP4 and KIP5 in Kimje.

양상을 보이고 있다. 주파수효과 단면도 중 측선 YIP5의 단면도 상에서 부분적으로 나타나는 비교적 높은 주파수효과를 제외하고는 모든 측선에서 주파수효과가 1% 이하의 매우 작은 값을 보이고 있는데 이는 탐사지역에서 심도 15~18m까지 분포하는 점토층과 그 하부 사질층이 대부분 해수침투에 의한 염분 농도의 증가로 인하여 분극효과가 감소한 것으로 해석된다.

결론

전기비저항 탐사에서 저비저항대 이상대를 보이는 해수침투대와 양전도성 지층을 구별하기 위하여 참조채널 유도분극탐사를 전라북도 김제와 전라남도 영광에서 실시하였다.

전자결합(EM coupling)을 최소화하는 차폐 전선을 사용하였으며 수신전위 파형은 물론 송신전류 파형도 참조채널에서 함께 측정하는 주파수영역 참조채널 유도분극탐사기술을 적용하여 겉보기 비저항은 물론 유도분극효과도 보다 정밀하게 산출하였다.

그 결과로 첫째, 전라북도 김제 지역은 조사지역의 북서쪽 모서리 부분에 분포하는 전기비저항 이상대(10 ohm-m 이하)는 해수침투에 의해 염분 농도가 높은 지역이고, 그 외의 다른 낮은 전기비저항 이상대(만경강과 접한 서쪽 경계면을 따라 발달한 이상대 및 조사지역의 북쪽 경계면에서 내륙으로 분포하는 이상대)는 주파수 효과가 상대적으로 높은 것으로 보아 해수에 의한 침투대가 아닌 단지 점토층과 호층을 이루며 분포하는 사질층으로 해석된다. 둘째, 전라남도 영광지역은 참조

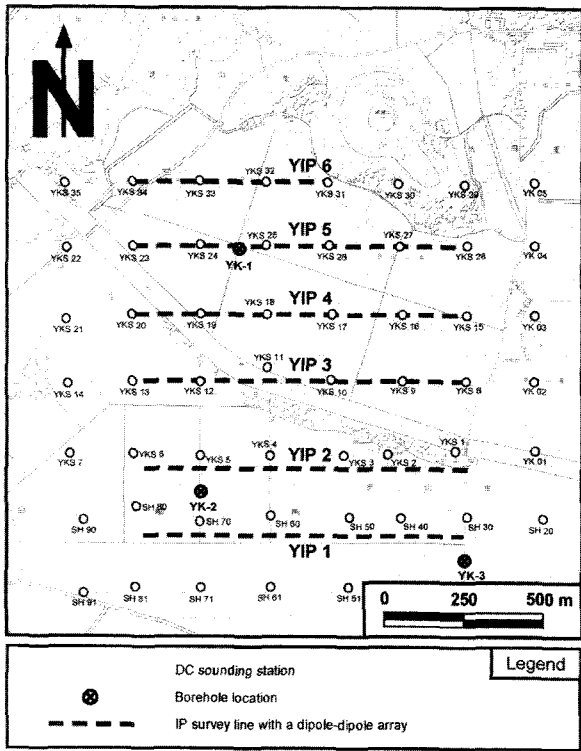


Fig. 6. Geophysical survey map in Youngkwang.

채널 유도분극 탐사의 역산결과로부터 산출된 주파수 효과가 1% 이하인 것으로 보아 지하 18 m 이내에 분포하는 점토층에서는 해수에 의해 염분농도의 증가로 인하여 점토광물의 분극 효과가 감소한 것으로 판단된다.

해수침투 우려지역에서 유도분극 탐사를 적용한 결과, 저비저항 특성만으로는 구별할 수 없었던 유도분극 효과가 큰 점토층과 유도분극 효과가 낮은 해수침투대를 구별할 수 있었다.

따라서 점토성 광물이 존재하는 지역의 해수침투 영향 평가에는 유도분극탐사가 필요하며, 임해지역 지하수 조사시 전기비저항 탐사 뿐만 아니라 참조채널 유도분극탐사를 동시에 수행함으로써 보다 정확한 해수침투대의 해석이 가능해질 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것입니다.

참고문헌

송영수, 1995, 해수침입에 의한 지하수 오염 지역에서의 전기비

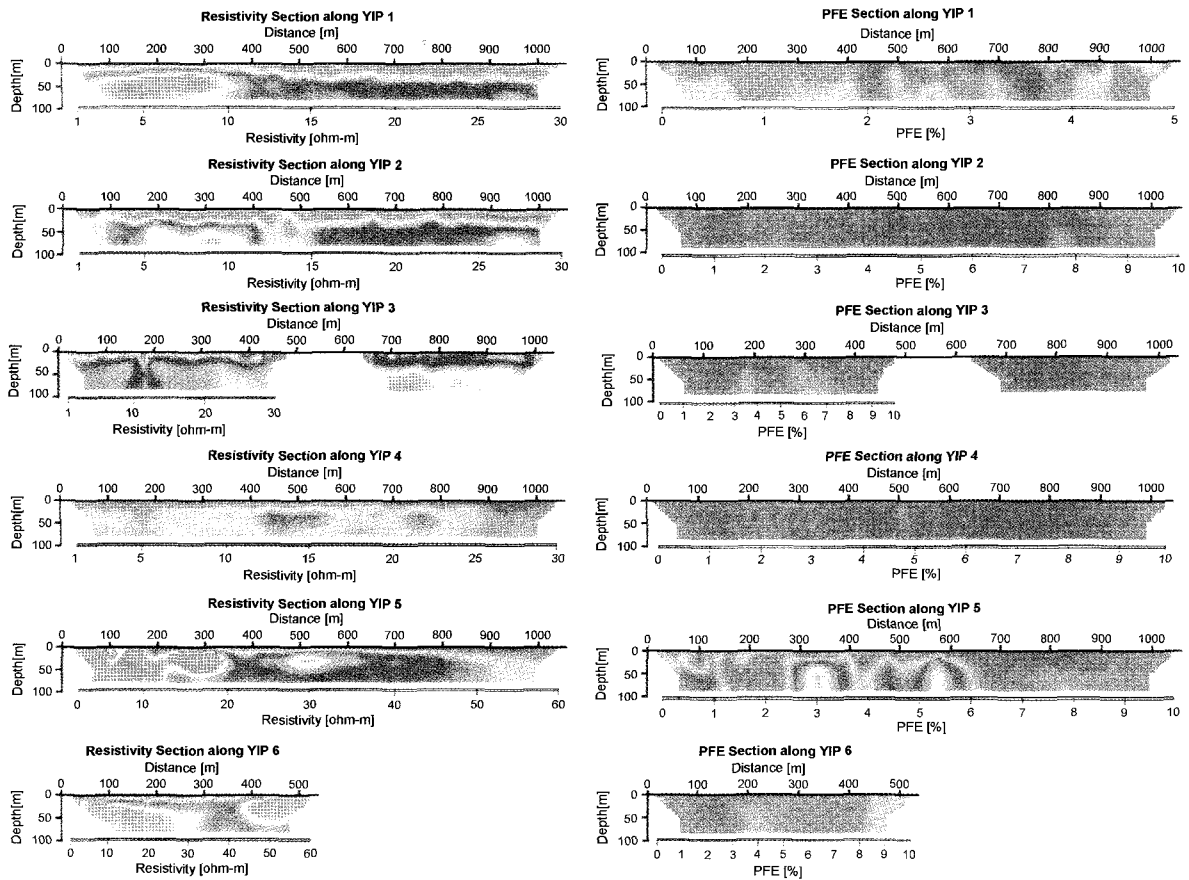


Fig. 7. Resistivity sections and Frequency effect sections along YIP1, YIP2, YIP3, YIP4, YIP5 and YIP6 in Youngkwang.

- 저항 및 유도분극 탐사: 한국자원공학회지, **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, 구성분, 1988, 해수오염 조사를 위한 TEM sounding의 시험적용: 지질학회지, **24**, 71-81.
- 이상규, 황세호, 이태섭, 1997, 폐광산의 토양오염영역 및 폐기된 광미의 탐지: 자원 환경지질, **30**, 371-377.
- 이희순, 이명종, 이상규, 이태섭, 서정희, 1995, TEM과 DC 수직 탐사자료의 복합 역산에 의한 해수침투대 해석: 한국자원공학회지, **32**, 462-470.
- Barker, R. D., 1990, Investigation of groundwater salinity by geophysical methods: in *Geotechnical and environmental Geophysics*, ed by Ward, S. H., SEG, **2**, 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.
- 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., **2**, 1-16.
- Lee, S. K., Park, I. H., Yun, S. T., Hwang, H. S., Hwang, S. H., and Shin, J. H., 2001, Assessment of Seawater Intrusion from Geophysical Data in the Western Coastal Area of Korea: *2001 International Symposium on Application of Geosystem Engineering for Optimal Design of Underground Development and Environmental in 21 st Century*, KIME, 145-155.
- 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*, **26**, 771-782.
- Ogilvy, A. A., and Kuzmina, E. N., 1972, Hydrogeologic and engineering-geologic possibilities for employing the method of induced potentials: *Geophysics*, **37**, 839-861.
- Olorunferni, M. O., 1985, Computer model studies of IP and resistivity response of a typically saline sandstone aquifer (Wenner electrode array depth sounding): *Geoexpl.*, **23**, 193-205.
- Roy, K. K., and Elliott, H. M., 1980, Resistivity and IP survey delineating saline water and fresh water zones: *Geoexpl.*, **18**, 145-162.
- Takahashi, T., Nozaki, K., Shima, H., Yamane, M., and Igarashi, T., 1996, Field experiments of various geophysical methods at the Nojima Fault: *Geoph. Expl.*, **49**, 498-510.