

## 경기 지역 농경지 하부로의 해수 침투에 관한 지구물리 및 지구화학적 연구

이상호<sup>1)</sup> · 김경웅<sup>1)</sup> · 이상규<sup>2)</sup>

### Geophysical and Geochemical Studies for the Saline Water Intrusion under the Paddy Field in Kyoung-gi area, Korea

Sang-Ho Lee, Kyoung-Woong Kim and Sang-Kyu Lee

**요약** : 현재까지의 해수침투에 관한 대부분의 연구들은 조사방법상, 지구물리적 방법과 지구화학적 방법으로 뚜렷이 구분지어 접근되어왔다. 본 논문에서는 경기도에 위치한 해안 경작지 하부로의 해수침투 문제를 경제적이면서 효율적으로 접근하기 위하여 한 조사 지역에 대하여 두 탐사 방법을 동시에 적용하고자 하였다. 본 연구에서는 슬럼버저 배열의 전기비저항 수직탐사, 주파수 영역 전자탐사 그리고 대상 지역 내 지하수에 대한 지화학 분석 등의 탐사방법이 적용되었다. 지구물리적 방법으로 적용된 전기비저항 수직탐사는 관개 경작지에 물이 없을 때 실시하였으며, 전자탐사는 경작지 내 관개수가 유입된 후에 측정하였다. 이러한 동일 조사 지역에서의 시기를 달리한 측정은 지하수량의 변화에 따른 전기 비저항 이상 지역의 분포 변화를 살피기 위하여 실행되었으며 결과적으로 지하수량의 증가로 인해 전기비저항이 낮아진 지역을 동일한 양상을 보이는 해수침투 지역으로부터 구분할 수 있었다. 앞의 지구물리 탐사결과를 뒷받침하기 위하여 대상 지역 내에 23곳의 사용중인 지하수를 채집하여 지구화학적 분석을 실시하였다. 지구화학 분석결과, 앞의 지구물리 탐사결과에서 밝혀진 해수침투 지역과 가장 가까운 곳의 물시료에서 농업용수 기준(250 mg/l)을 초과하는 높은 염도를 나타내었으며 수소와 산소원소를 이용한 동위원소 분석과 통계방법인 주성분 분석을 통하여 내륙 지역에서 나타난 지하수 내의 높은 염분은 상부 주맥으로부터 유입되었음을 알 수 있었다.

**Abstract** : Most of saline water intrusions have been diagnosed by geophysical or geochemical approach independently. The objective of this study is to provide the effective method to detect the saline water intrusion on the ground water in the vicinity of seashore using these two methods. Schulumberger sounding, frequency domain electromagnetic sounding and geochemical analysis of ground water were carried out to explore saline water intrusion. Schulumberger sounding was implemented in dry surface condition before irrigation water was introduced into the field, while electromagnetic sounding was carried out in wet ground condition after the irrigation. The purpose of duplicated measurements on the equivalent spot at different times was to investigate the variation of anomaly zone depending on the amount of ground water. It was possible to discriminate the anomalous zone due to high water saturation from the low electric resistivity zone by high salt concentrations through this way. For the verification of the geophysical result, the ground water samples in the study area were collected and analysed at the 23 points near the measuring spots. The groundwater at the spot nearest to the sea water intrusion identified by geophysical method indicates higher salinity than the standard limit concentration for agricultural irrigation water (250 mg/l). Isotope analysis of D(<sup>2</sup>H) vs. <sup>18</sup>O and PCA analysis were used to discriminate the anthropogenic pollution from those of high salinity from sea water intrusion.

## 서론

해수침투 조사를 위한 지금까지의 지구물리탐사에서는 전기, 전자 탐사를 주로 사용하여 해수 침투의 경로와 해수침투로 인한 오염영역을 파악하고자 하였다(Hagemeyer and Stewart, 1990). 반면에, 지화학 탐사는 해수의 원소 함량과 조사 지역 지하수의 원소 함량을 분석, 비교하여 해수침투 여부를 직접 판정하려는 목적(Richter and Kreiter, 1993)으로 사용되어 왔다.

해수침투에 의한 오염여부 판단에 있어서 지구물리탐사에 의하여 공간적으로 얻어진 낮은 전기 비저항 이상대가 지하수의 지화학 분석을 통하여 해수침투에 의한 영향으로 판명된다면 두 방법을 조화롭게 사용하여 경제적이고 효율적인 조사 수단으로 이용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 임해지역에 위치한 농경지 하부로의 해수침투 여부를 물리탐사와 지화학적 분석을 병행하여 밝히고자 하였다. 농경지에 관개수가 공급되기 이전에 하부의 비저항 분

\*1999년 5월 7일 접수

1) 광주과학기술원(Kwangju Institute of Science and Technology)

2) 한국자원연구소(Korea Institute of Geology, Mining and Materials)

포를 알기위하여 슬림버저 배열을 이용한 전기 비저항 수직 탐사를 수행하였으며 약 40일 후, 관개수가 공급된 환경에서 비저항 분포의 공간적 변화를 확인하기 위해 동일 장소에서 주파수 영역 전자탐사를 수행하였다. 조사 지역내 해수침투 여부 및 해수침투 정도를 판단하기 위하여 연구지역의 지하수에 용존하는 해수의 주원소(major elements)양을 분석하였고 분석 결과 해석이 어려운 몇몇 시료에 대해서는 동위원소 분석(Hoef, 1987)을 수행하였다.

**연구 지역**

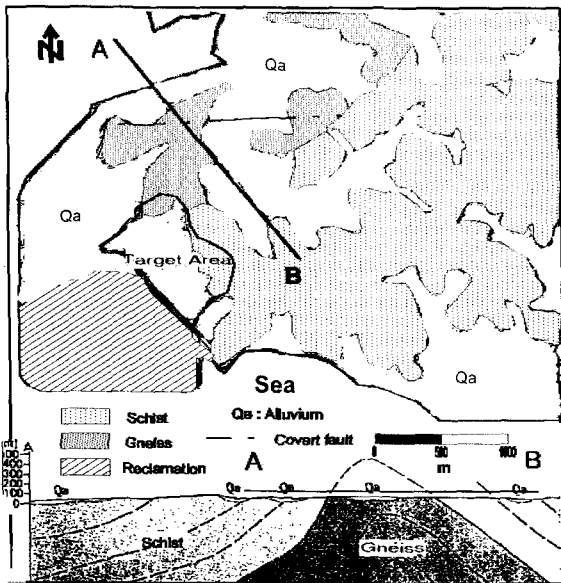


Fig. 1. Geological map of the study area (Lee et al., 1993).

연구지역은 Fig. 1과 같이 경기도 화성군 우정면에 위치한 해안 경작지대로서 해안으로 갯벌이 위치하고 내륙으로는 낮은 구릉지대를 이루고 있다. 1977년에 완공된 남양 간척지와 1986년에 완공된 기아 아산 공장이 연구 지역 주변에 위치하고 있으며 연구 지역의 조사 면적은 약 1 km<sup>2</sup>이다. 해안에서 내륙으로 600m까지 논 농사가 수행되고 있으며 내륙의 구릉지대에서는 밭 농사가 부분적으로 수행되고 있고 기아 공장이 조성되면서 연구 지역 해안이 직접 해수와 접하지는 않지만 공장 조성 이전의 구해안선을 따라 해수가 침투되었을 가능성이 충분히 크다.

탐문 조사시, 연구지역 내 지하수는 대부분 식수 이외의 용도로 쓰이고 있었으며 대체적으로 해안에 위치한 지하수의 맛이 짠 것으로 보고되었으나 염분 함량이 해안선으로부터의 거리와 뚜렷한 일관성을 보이지 않았다.

대상지역의 지질은 천부로부터 제4기 충적층, 편리가 발달된 편암과 편마암 순으로 습곡구조(이병주 외, 1993)를 이루고 있으며 Fig. 1의 단면도에서 알 수 있듯이 습곡면이 해안으로 노출되어 있다. 따라서 충적층을 포함한 상부 기반암으로 생각되는 편암층까지 갯벌로 인하여 구해안선을 따라 해수로 오염되었을 가능성이 크다. 그리고 지질도상 북쪽 해안으로는 수직 단층이 내륙쪽으로 발달되어 있어 이 지역의 해수 침투가 하부 지층에 발달된 열극(fissure)이나 균열(fracture)을 통하여 국부적으로 일어났을 가능성도 배제할 수 없다.

**자료획득 및 실험방법**

연구 지역 내의 41개 측정점(Fig. 2)에서 슬림버저 배열을 이용하여 전기비저항 수직탐사를 수행하였다. 측정점에서 최대

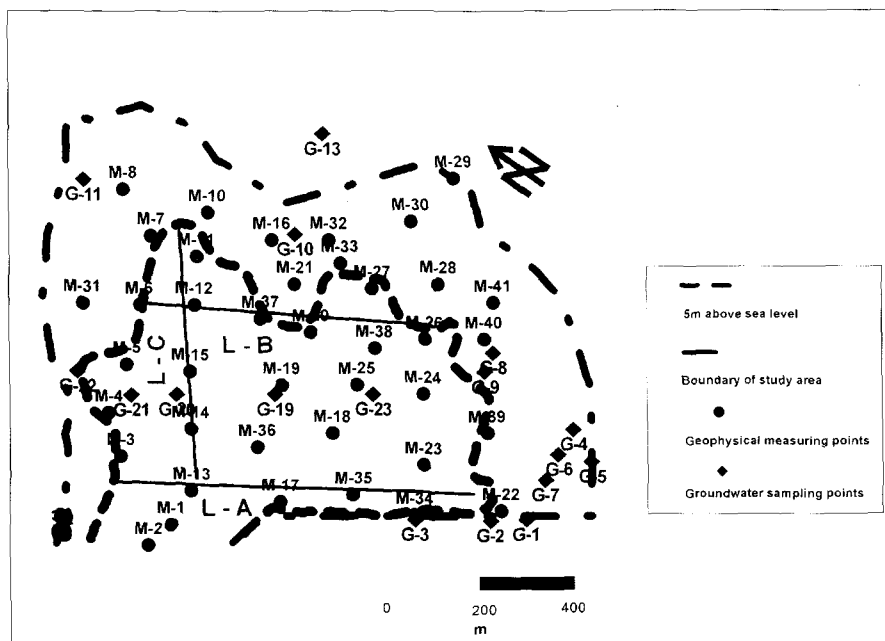


Fig. 2. Geophysical measuring and geochemical sampling points of the study area.

전극전개거리(AB/2)는 100m로 하였으며 탐사장비는 ABEM사의 Terrameter SAS 300을 사용하였다. 전기 비저항 수직탐사를 수행한 동일 측점들에서 Geonics사의 EM31, EM34-3xl 탐사기를 이용하여 루프-루프 배열의 주파수영역 전자탐사를 수행하였다. 본 전자탐사 기기는 각각 측정 거리와 사용주파수가 low induction number 조건에 부합하도록 고정되어 있다. EM31은 3.75m의 송 수신기 거리와 9800 Hz의 주파수를 사용하며, EM34-3xl은 10m, 20m, 40m의 송 수신기 거리에서 각각 6400 Hz, 1600 Hz, 400 Hz의 주파수를 사용한다(McNeill, 1980).

지하수 시료는 조사지역 내에서 사용되고 있는 용수를 23 지점(Fig. 2)에서 채수하였다. 자료의 신빙성을 위해 각 지점에서 시료를 100 ml씩 반복 채취하였으며 4개의 공시료(blank sample)를 따로 취하였다. 채취한 지하수 시료는 0.45  $\mu\text{m}$  여과지로 현장에서 여과하였고 동시에 시료의 온도, pH 및 전기전도도를 측정하였다. 분석대상원소는 해수의 주원소(major element)를 위시하여 양이온 5종류( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ )와 음이온 5종류( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ )로 선정하였고 분석기기는 I.C.(Ion Chromatograph)를 이용하였다.

동위원소 분석용 시료는 지하수 분석작업이 끝난 약 보름 후, 지하수 채취 23 지점 중 해석 상 중요한 네 지점에서 다시 채취하였으며 역시 현장에서 0.45  $\mu\text{m}$  여과지로 여과하여 15 mL의 밀봉 용기에 담았고 분석 시까지 5°C 이하에서 보관하였다. 대기중 수분과의 접촉 시간이 분석 결과에 큰 영향을 주므로 채수된 시점에서 분석시까지 3일이 넘지 않도록 하여 인근 해안에서 채취한 해수시료와 함께 고려대학교 동위원소 분석실험실에 수소( $\delta\text{D}$ )와 산소( $\delta\text{ }^{18}\text{O}$ ) 동위원소 분석을 의뢰하였다.

### 물리탐사 자료의 해석

연구지역 기반암으로 알려진 편암과 편마암의 전기비저항은 각각 20 (wet)~ $10^4$  (dry)  $\Omega\text{-m}$ 와  $6.8 \times 10^4$  (wet)~ $3 \times 10^6$  (dry)  $\Omega\text{-m}$ 로서 작게는 50배에서 크게는 5000배까지 차이를 보인다(McNeill, 1980a). 지질도상 편암이 편마암에 비해 지상에 더 가깝기 때문에 편암의 비저항 범위를 기반암의 배경값으로 잡는 것이 합당하다고 본다. 편암의 경우 균열의 분포와 밀도에 따라 겉보기 비저항 값이 크게 변하므로 어떤 한정된 값으로 배경치를 언급하기는 힘들다(Keller and Frischnecht, 1966). 따

라서 기존에 국내외에서 수행된 해수 침투에 관한 지구물리탐사의 결과 자료들을 검토하여 해수침투에 의해 오염된 암석과 오염되지 않은 암석의 전기비저항 측정값들을 정리하였다(Table 1). 표에서 동일한 암종일지라도 신선한 지하수로 충전된 암석과 해수가 침투한 암석의 전기비저항 값은 차이가 크게 남을 알 수 있다. 조사 지역의 기반암으로 생각되는 편암에 관한 현장 자료가 누락되었으나 변성암인 편암이 표에 나타난 화성암과 퇴적암에 비교하여 공극률이 일반적으로 작으므로(McNeill, 1980b) 해수침투가 일어난 곳의 전기 비저항값을 30  $\Omega\text{-m}$  이하로 가정한 것은 타당하리라 본다.

### 물리탐사 자료의 역산 결과

전기비저항 수직탐사 결과, 대부분의 측점에서 3~4층의 층서구조에 의한 겉보기 비저항 곡선을 나타낼 수 있었다. 전기비저항 탐사자료 역산에 사용한 프로그램은 호주에서 제작된 GRENDL(Raiche *et al.*, 1985)이며 역산 결과와 측정값의 비교는 최소자승법을 근간으로한 Damped Marquart법을 채택하고 있다. 전자탐사 자료의 역산은 상용 프로그램인 EMIX 34 프로그램(Stoyer, 1994)을 사용하여 전기비저항 수직탐사와 동일하게 4층 이내의 층서 구조로서 역산 결과를 얻었다.

전기 비저항 수직탐사 결과로부터 연구지역 전체적으로 3, 4층의 지전기적 층서 구조로 해석되었으며, 각 측점마다 층별 비저항이 심도에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다(Table 2). 논 지역에 해당되는 측점들의 역산결과에서 함수율이 높은 표토층으로 해석되는 1층(평균 전기비저항 27.0  $\Omega\text{-m}$ )과 층적층으로 해석되는 2층(평균 45.9  $\Omega\text{-m}$ )의 평균 해석 심도는 각각 1.2m, 14.3m로, 기반암의 풍화대로 보이는 3층(평균 169.2  $\Omega\text{-m}$ )의 평균 두께는 19m로 해석되었다. 최하부의 전기비저항(평균 231.7  $\Omega\text{-m}$ )은 앞서 기술한 바와 같이 기반암인 편암의 평균 비저항으로 해석된다. 한편, 내륙지역에 위치한 발지역에서의 역산 결과는 논 지역의 층별 평균 비저항 값과 많은 차이를 보이고 있다. 각 층별로 논 지역보다 2배에서 5배 가량 높은 평균 비저항을 나타내며 3층(평균 147.1  $\Omega\text{-m}$ )과 4층(평균 455.8  $\Omega\text{-m}$ )간의 전기비저항 차이는 논 지역의 기반암 경계면에서의 평균 비저항 값 차이에 비해 큰 대조(contrast)를 보인다. 측점별 역산 결과를 해안으로부터의 거리별로 해석하면 바다에 인접했던 측점들(M-2, 13, 17, 35, 34, 22)에서 심부 심도에 나타

Table 1. Background and anomalous values of resistivity for several types of rock

(Unit:  $\Omega\text{-m}$ )

Location	Rock type	Resistivity of rock		
		with fresh water	with saline water	of transition zone
Florida, U.S. <sup>(1)</sup>	Carbonate rock	> 150	< 75	~
Hawaii island, U.S. <sup>(2)</sup>	Weathered basalt	30-60	30-40	~
Juju island, KOREA <sup>(3)</sup>	Basalt	300-700	< 40	40-300

<sup>(1)</sup>Hagemeyer *et al.*, 1990

<sup>(2)</sup>Zhody *et al.*, 1969

<sup>(3)</sup>Cho *et al.*, 1998

**Table 2.** Mean and standard deviation of the geophysical inversion results for layered earth model (unit: R ( $\Omega$ -m), t (m), RMS (%))

site	method		R1	t1	R2	t2	R3	t3	R4	RMS
Dry field	Electrical sounding	Mean	121.0	1.5	131.8	13.3	147.1	21.2	455.8	7.3
		STDev	84.5	2.0	83.2	14.8	118.9	8.4	248.6	4.6
	Electromagnetic sounding	Mean	82.3	1.5	85.7	9.0	119.1	17.1	513.6	20.7
		STDev	38.7	0.9	90.7	9.1	65.2	16.4	367.6	11.0
Paddy field	Electrical sounding	Mean	27.0	1.2	45.9	14.3	169.2	19.0	231.7	5.9
		STDev	29.3	1.6	52.2	13.7	113.5	9.1	163.3	4.0
	Electromagnetic sounding	Mean	13.7	1.2	25.2	9.7	118.5	12.8	137.6	19.7
		STDev	16.7	0.7	38.8	7.4	63.8	13.0	69.4	16.7
Coast line	Electrical sounding	Mean	13.6	0.6	31.6	12.9	74.5	12.8	71.9	6.5
		STDev	5.7	0.8	13.2	11.4	59.3	7.9	42.7	5.8
	Electromagnetic sounding	Mean	12.5	1.0	33.8	7.5	83.0	12.1	67.5	32.4
		STDev	9.4	0.3	20.4	3.5	72.9	6.5	71.8	23.4

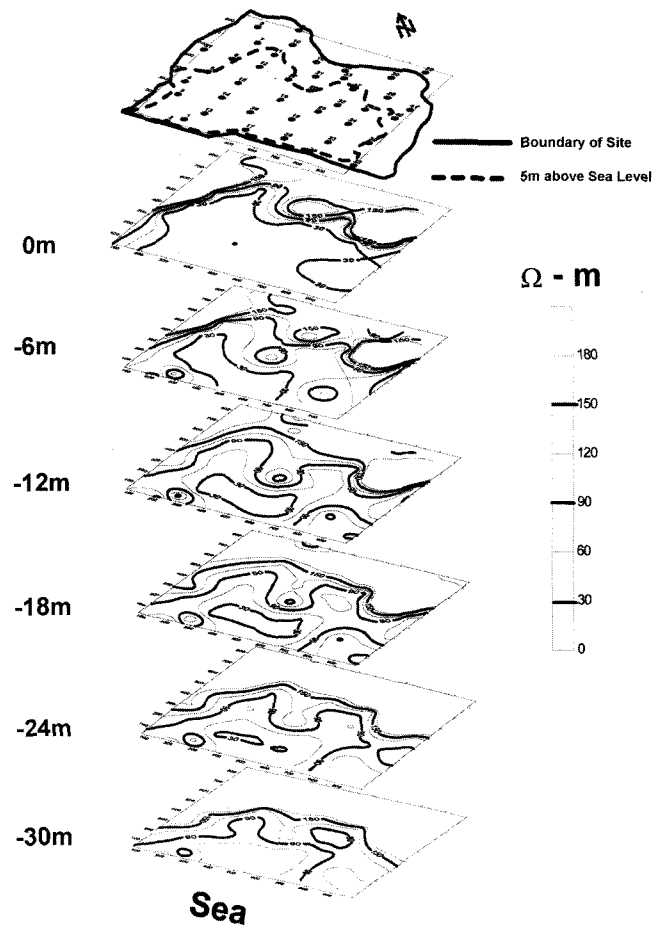
R: electrical resistivities of layers, t: thicknesses of layers

나는 평균 비저항값(73.0  $\Omega$ -m)이 논 지역 기반암을 나타내는 평균 비저항값(231.7  $\Omega$ -m)과 해수가 미치기 힘든 구릉지역 M-30 측점의 심부 비저항값(1263  $\Omega$ -m)에 비하여 매우 낮음을 알 수 있다. 따라서 기아 공장이 들어서기 전, 구해안선을 따라 인접한갯벌로부터 해수가 해안 전역에 걸쳐 심부 깊숙히 침투한 것으로 해석된다.

논 지역 내의 전자탐사 역산결과 역시 전기비저항 수직탐사 결과와 비교할 때 각층의 평균 두께는 1.2m, 9.4m, 12.8m로서 전체적으로 각 층의 해석 심도가 작아졌으며 논 지역 내 지표 수 유입으로 1층 구간(평균 심도 1.2m)의 전기비저항만이 급격한 감소를 보였다, 그리고 하부 3, 4층의 평균 전기비저항 값이 절반 정도로 감소된 것을 감안할 때 약 40일간의 탐사 시간 차 동안에 심부 영역 내 지하수량도 함께 증대되었음을 추측할 수 있다. 반면에 내륙의 발지역에서 실시된 전자탐사의 역산 결과는 논 지역과 비교할 때 전기비저항 탐사 결과와 거의 다른 모습의 전기비저항 분포를 보인다.

**물리탐사 자료의 공간 해석**

41 측점의 역산 결과를 이용하여 해발 고도 -6m 마다 수평 단면상에서 등비저항선도를 작성하였다(Fig. 3). 각 측점에서의 측정 표고를 감안하여 해발고도 0m 기준동일 고도에서 측정 자료들 간의 비교가 되도록 하였다. 해발고도 0m를 나타내는 수평 단면의 등비저항선도에서 저 비저항대(30  $\Omega$ -m 이하)는 전체적으로 논외의 경계(해발 고도 5m 이내)와 일치하는 분포를 보이므로 토양 내 염분과 더불어 논 토양의 높은 함수량까지 나타낸다고 볼 수 있다. -6m부터는 해수의 침투경로를 나타내기 시작하여 심도가 내려갈수록 해안으로부터 해수 성분이 지도상 북쪽 방향으로 침투하고 있으며 -30m에서는 고 비저항대가 해안 부근까지 넓게 존재하여 상부층보다 해수의 침투가 억제되고 있음을 알 수 있다. 따라서 기반암의 풍화대로 추정되는 고비저항대(180  $\Omega$ -m 이상)는 하부로 갈수록 면적이 넓어짐으로 층적층과 기반암 사이의 경계가 해안에서 멀어질수록 지표에 가까이 존재함을 알 수 있다. 수평단면 해석에서 해수



**Fig. 3.** Electrical resistivity maps obtained with Schlumberger DC soundings.

침투의 정도는 M-17을 기준으로 좌측 편이 더욱 심하며 해수 침투 구간의 평균 전기비저항을 30  $\Omega$ -m 이하로 정한다면 해수의 염분이 하부에서 상부로 갈수록 점점 확산되어 논 지역의 해안 부근 1/3 정도가 이미 해발 기준 -6m까지 해수에 의해 오염되었음을 알 수 있다.

전자탐사의 결과를 전기비저항 수직탐사 결과와 동일하게 해

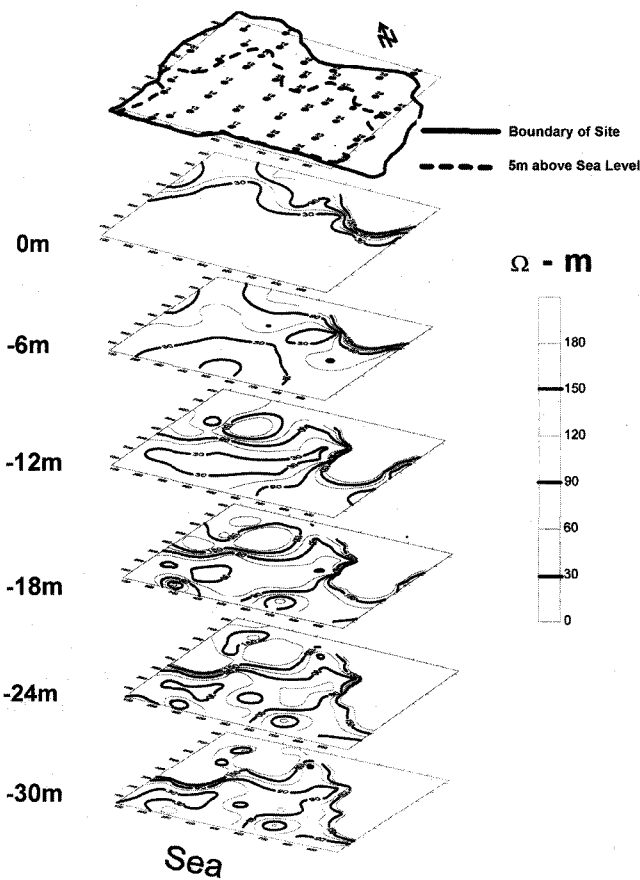


Fig. 4. Electrical resistivity maps obtained with FDEM soundings.

수면으로부터 -6m 심도마다 수평 단면도에 나타난 전기비저항 분포는 Fig. 4와 같다. 논 지역 전체적으로 전기비저항 수직탐사 결과와 유사하게 심도가 낮아질수록 저 비저항 지역이 해안 쪽으로 수렴함을 알 수 있다. 그러나 전기비저항 수직탐사 결과와 비교할 때 심도별 등비저항선도에서 나타나는 전체적 경향은 주위의 전선에 의한 것으로 보이는 측정오류로 발생한 몇 곳의 이상대를 제외하면 눈에 물이 들어오기 전 양상과 차이가 뚜렷이 남을 알 수 있다.

두 결과간의 분명한 차이는 이후에 실시된 전자탐사에서 30 Ω-m에서 90 Ω-m까지의 비저항대가 각 심도별로 매우 확산되어 나타난다는 점이며 앞서 언급한 바와 같이 두 번의 탐사 사이에 강우량이 많은 관계로 심부의 지하수량이 증대되어 나타난 현상이라 해석된다. 그러나 심부의 지하수량이 증가하였더라도 해수 침입 구간으로 해석되는 해안 쪽 저비저항대(30 Ω-m 이하)의 위치는 변함이 없음을 알 수 있다.

해안과 내륙의 전기비저항 수직분포를 비교하기 위해 해안으로부터 50, 400m 떨어진 구간(Fig. 2의 L-A, B)의 가상단면상의 전기비저항의 수직분포를 표로서 나타내어 보았다(Table 3, 4). 내륙으로 50m 떨어진 곳의 수직 단면 L-A 상에서 전기, 전자탐사 결과 모두 층적층의 평균 전기 비저항값 100 Ω-m 이하의 낮은 비저항값이 M-17 기준으로 해안 좌측 측점들에서

Table 3. Vertical section analysis of the geophysical sounding results along the line L-A in Fig. 2 (50m apart from seashore)

(a) Schullumberger sounding result (Unit: Ω-m)							
level (m)	2	13	27	35	34	22	Ave
0	13.8	8.2	14.3	12.4	9.1	24.0	13.6
-3	17.4	14.4	29.8	9.8	42.5	43.9	28.1
-6	17.4	14.4	29.8	9.8	42.5	43.9	28.1
-9	17.4	14.4	29.8	9.8	125.2	167.8	69.4
-12	17.4	14.4	29.8	126.7	125.2	167.8	92.8
-15	17.4	47.2	29.8	126.7	125.2	167.8	99.3
-18	45.6	47.2	29.8	126.7	81.7	167.8	90.6
-21	45.6	47.2	29.8	126.7	81.7	56.7	68.4
-24	45.6	47.2	29.8	126.7	81.7	56.7	68.4
-27	45.6	47.2	29.8	126.7	81.7	56.7	68.4
-30	45.6	47.2	29.8	126.7	81.7	56.7	68.4
(b) Frequency domain EM sounding result (Unit: Ω-m)							
level (m)	2	13	17	35	34	22	Ave
0	1.7	6.1	4.6	23.5	18.0	21.2	12.5
-3	59.5	16.2	47.6	8.4	24.1	46.5	33.7
-6	59.5	16.2	24.2	8.4	24.1	46.5	29.8
-9	59.5	16.2	24.2	200.0	24.1	46.5	61.7
-12	59.5	19.3	24.2	200.0	116.3	109.9	88.2
-15	59.5	19.3	24.2	200.0	116.3	109.9	88.2
-18	26.7	19.3	24.2	200.0	8.0	25.6	50.6
-21	26.7	19.3	24.2	200.0	8.0	25.6	50.6
-24	26.7	19.3	24.2	200.0	53.5	25.6	58.2
-27	26.7	19.3	24.2	172.4	53.5	25.6	53.6
-30	26.7	19.3	24.2	172.4	53.5	25.6	53.6

Over 100 Ω-m

전 심도에 걸쳐 나타남을 알 수 있는 반면, 우측 세 지점에서는 상대적으로 높은 전기비저항 구역(100 Ω-m 이상)이 중간 심도에서 나타남을 알 수 있다(Table 3). 따라서 수평단면 분석과 같이 갯벌이 매립되기 전, 논 지역으로의 해수침투가 측점 M-17 기준으로 좌측으로 더욱 활발했으리라 추정된다. 해안으로부터 400m 떨어진 곳의 L-B 단면은 두 탐사 결과 모두 100 Ω-m 이상의 높은 비저항대가 해발고도 -6m 이하에 고루 분포함을 알 수 있다(Table 4). 그러므로 해안에서 멀어질수록 비교적 해수 침투가 용이한 층적층의 두께가 얇아지고, 따라서 염분의 침투량도 감소됨을 알 수 있으며 해안으로부터 해수침투가 더욱 활발했으리라 생각되는 좌측 종단면 L-C 상에서도 이를 확인할 수 있다(Table 5).

### 지하수 자료의 해석

#### 해수 및 지하수 내 분석원소 함량

해수 침입의 지시자로 삼을 수 있는 원소를 찾기 위하여 연구 대상지역 해안에서 해수를 채취하여 분석하였다. 분석결과 Cl<sup>-</sup>이 가장 많이 포함되어 있으며 다음은 Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> 순으로 나왔다(Table 6). 분석 값과 세계 평균 해수 값과 비교해보면 Cl<sup>-</sup>에서 4,390 mg/kg brine으로 약 23%까지 차

**Table 4.** Vertical section analysis of the geophysical sounding results along the line L-B in Fig. 2 (400m apart from seashore)

(a) Schullumberger sounding result (Unit: Ω-m)

level (m)	6	12	37	20	38	26	40	Ave
0	49.7	17.0	80.4	21.8	15.1	45.2	48.3	39.6
-3	49.7	56.4	41.9	40.0	30.0	45.2	48.3	44.5
-6	49.7	56.4	112.6	40.0	110.7	184.4	60.8	87.8
-9	49.7	151.8	112.6	40.0	110.7	184.4	60.8	101.4
-12	49.7	151.8	112.6	131.1	110.7	184.4	60.8	114.5
-15	783.3	151.8	204.6	131.1	110.7	184.4	60.8	232.4
-18	783.3	151.8	204.6	131.1	110.7	198.9	60.8	234.5
-21	783.3	151.8	204.6	131.1	110.7	198.9	60.8	234.5
-24	783.3	151.8	204.6	131.1	110.7	198.9	60.8	234.5
-27	783.3	151.8	204.6	131.1	110.7	198.9	60.8	234.5
-30	783.3	141.8	204.6	131.1	110.7	198.9	60.8	234.5

(B) Frequency domain EM sounding result (Unit: W-m)

level (m)	6	12	37	20	38	26	40	Ave
0	10.5	15.2	32.8	5.0	17.7	9.8	30.1	17.3
-3	24.8	15.2	35.8	57.8	35.1	142.9	30.1	48.8
-6	119.0	384.6	104.2	57.8	35.1	142.9	41.7	126.5
-9	119.0	384.6	104.2	57.8	222.2	142.9	41.7	153.2
-12	119.0	384.6	294.1	57.8	222.2	142.9	41.7	180.3
-15	119.0	384.6	294.1	57.8	222.2	142.9	111.1	190.3
-18	119.0	384.6	294.1	178.6	222.2	142.9	111.1	207.5
-21	119.0	384.6	294.1	178.6	222.2	142.9	111.1	207.5
-24	119.0	52.6	294.1	178.6	222.2	142.9	111.1	160.1
-27	119.0	52.6	294.1	178.6	222.2	106.4	111.1	154.9
-30	119.0	52.6	294.1	178.6	222.2	106.4	111.1	154.9

Over 100 Ω-m

**Table 5.** Vertical section analysis of the geophysical sounding results along the line L-C in Fig. 2 (transverse line of seashore)

(a) Schullumberger sounding result (Unit: Ω-m)

level(m)	13	14	15	12	11	10	9	Ave
0	8.2	12.2	16.8	17.0	20.5	218.4	153.2	63.8
-3	14.4	24.7	35.6	56.4	140.6	218.4	153.2	91.9
-6	14.4	24.7	94.0	56.4	140.6	218.4	98.4	92.4
-9	14.4	24.7	94.0	151.8	140.6	218.4	98.4	106.1
-12	14.4	24.7	94.0	151.8	140.6	218.4	98.4	106.1
-15	47.2	24.7	94.0	151.8	140.6	218.4	98.4	110.7
-18	47.2	24.7	94.0	151.8	140.6	218.4	310.8	141.1
-21	47.2	24.7	94.0	151.8	140.6	218.4	310.8	141.1
-24	47.2	24.7	94.0	151.8	140.6	218.4	310.8	141.1
-27	47.2	24.7	94.0	151.8	140.6	218.4	310.8	141.1
-30	47.2	390.4	94.0	151.8	140.6	218.4	310.8	193.3

(b) Frequency domain EM sounding result (Unit: Ω-m)

level(m)	13	14	15	12	11	10	9	Ave
0	6.1	6.0	12.4	15.2	3.6	65.8	112.4	31.6
-3	16.2	35.5	34.4	15.2	61.7	116.3	47.2	46.6
-6	16.2	35.5	34.4	15.2	61.7	116.3	47.2	99.4
-9	16.2	35.5	54.1	384.6	178.6	178.6	188.7	148.0
-12	19.3	35.5	54.1	384.6	178.6	178.6	188.7	148.5
-15	19.3	12.3	54.1	384.6	178.6	178.6	188.7	145.2
-18	19.3	12.3	54.1	384.6	178.6	178.6	188.7	145.2
-21	19.3	12.3	54.1	384.6	178.6	178.6	188.7	145.2
-24	19.3	12.3	54.1	384.6	178.6	178.6	188.7	145.2
-27	19.3	12.3	54.1	52.6	178.6	178.6	188.7	97.7
-30	19.3	12.3	54.1	52.6	178.6	178.6	188.7	97.7

Over 100 Ω-m

**Table 6.** Concentrations of major ions in sea water near study area (Unit: mg/l)

	Na	Mg	Ca	K	Cl	SO4
Analytical result (/K ratio)	8,580 (24)	1,120 (3)	367 (1)	353 (1)	14,610 (41)	1,964 (5)
World mean level*	10,500 (27)	1,350 (3)	410 (1)	390 (1)	19,000 (49)	2,700 (7)

\*Glodberg (1971), Hem (1985)

분석원소 10개 중 함량이 낮은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>와 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>를 제외한 8개 원소의 지하수내 함량비를 공간적으로 해석한 결과, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>과 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>를 제외한 양이온, 음이온 모두 물리탐사 심부 해석 결과와 같이 해수가 해안으로부터 좌측면으로 활발히 침투하였고 지도상 북쪽 방향으로 오염되고 있음을 알 수 있다(Fig. 5). 심부의 해수 침투 근원지라 생각되는 지점(M-1, 2, 13, 17)은 이미 10년 전 관개용 지하수를 개발하려다 높은 농도의 염수가 인하여 시추공을 모두 폐쇄시킨 관계로 시료를 얻을 수 없었다. 한편, 해수에는 거의 존재하지 않는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>과 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>은 주로 인간의 활동에 기인한 성분들로 민가가 밀집한 지역에서만 높은 수치들을 보이고 있다. 따라서 해안에서 먼 G-11 시료도 높은 염분 함량을 나타내고 있는데 이는 연구지역 북쪽에 위치한 해안에서 다른 침투경로로 침투되었거나 상부에 위치한 주택가로

이가 있으나 가장 작은 농도를 보이는 K<sup>+</sup>를 기준으로 한 성분비는 오차 범위가 최대 10%로 차이가 줄어들음을 알 수 있다. 두 성분비 사이가 차이나는 원인은 대상 지역 주변의 담수가 채수 지점 근처에서 해수와 섞이면서 낮아진 것으로 생각되며 공통적으로 나타나는 해수의 뚜렷한 특성은 [Na<sup>+</sup>]와 [Cl<sup>-</sup>]의 값이 다른 원소들에 비해 월등히 큰 비율을 차지하는 것이라 할 수 있다.

연구지역 내 지하수 시료 23곳 중 몇 군데는 이미 농업용수로도 쓰기 힘들 정도로 오염이 심각한 것으로 나타났다. 특히 오염이 심할 것이라 생각되는 해수침투 예상 지점과 가장 가까운 지하수 시료(G-20)의 Cl<sup>-</sup> 함량은 음용수 기준 농도(150 mg/l)를 초과할 뿐만 아니라 생활용수나 농업용수 기준(250 mg/l)도 초과하였다. 지하수 전체 시료의 각 원소별 함량비가 Ca<sup>2+</sup>와 Mg<sup>2+</sup>를 제외하고는 거의 해수 성분비와 유사함을 보이며 ([Na<sup>+</sup>] : [Mg<sup>2+</sup>] : [Ca<sup>2+</sup>] : [K<sup>+</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] : [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] = 15 : 8 : 14 : 1 : 43 : 9) 지하수 시료 중 전체 염분량이 많은 시료들(G-11, 20, 21)이 전반적으로 해수와 유사한 성분비를 나타낸다. 그러나 [Ca<sup>2+</sup>]의 비가 상대적으로 매우 높은 이유는 해수에 다량으로 포함된 Na<sup>+</sup>가 해수가 침투된 지역 암반 성분의 Ca<sup>2+</sup>를 치환하는 작용에서 비롯한 것으로 해석된다(박희열, 1998).

**지하수 자료의 공간 해석**

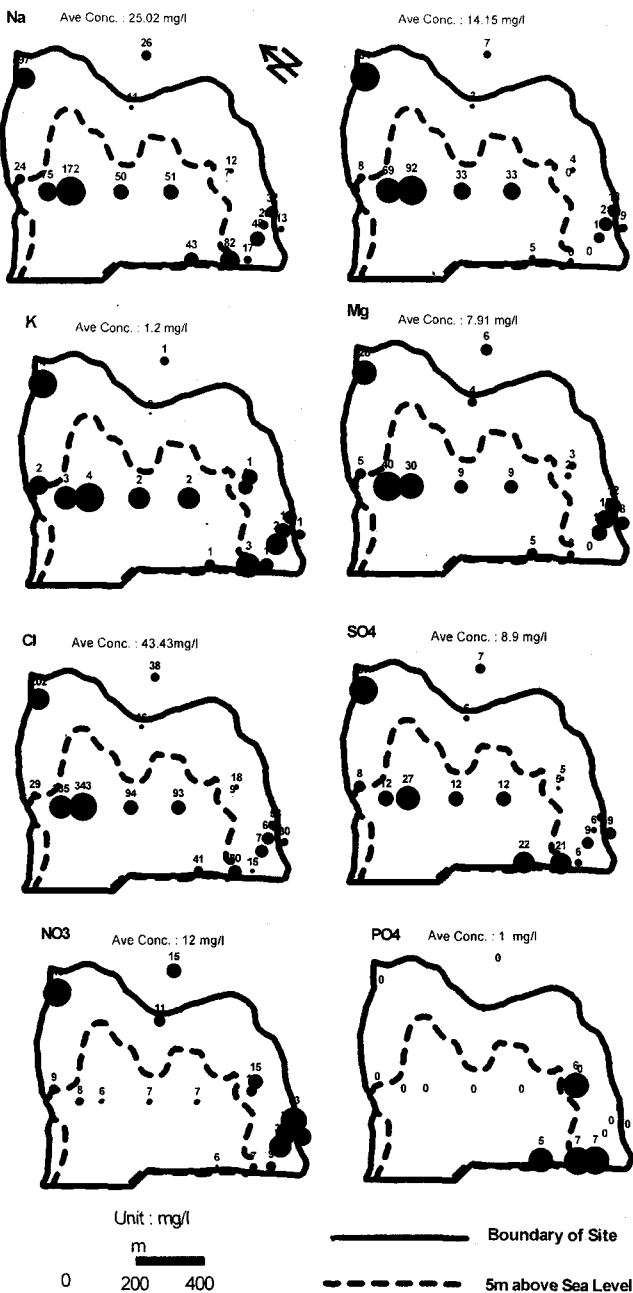


Fig. 5. Concentrations of cations and anions in the groundwater samples of the study area.

부터 유입된 것으로 추정된다.

확실한 해수 침입의 증거를 찾기 위해 지하수 시료 중에서 높은 염도를 보이는 G-11과 G-20 시료와 해수 침입이 없다고 판단되는 G-14, G-3 시료 그리고 인근해안에서 채취한 해수를 갖고 D(<sup>2</sup>H)와 <sup>18</sup>O에 대한 동위원소 분석을 실시하였다(Fig. 6). 전반적인 분석결과는 분석 자료 전체가 천수 기원을 나타내는 MWL(Meteoric Water Line)과 다른 기울기를 이루며 아래쪽으로 분리되어 있고 그 연장선 상에 해수의 분석값이 위치함을 알 수 있다. Fig. 6에서 해수의 침투가 예상되는 G-20 시료의

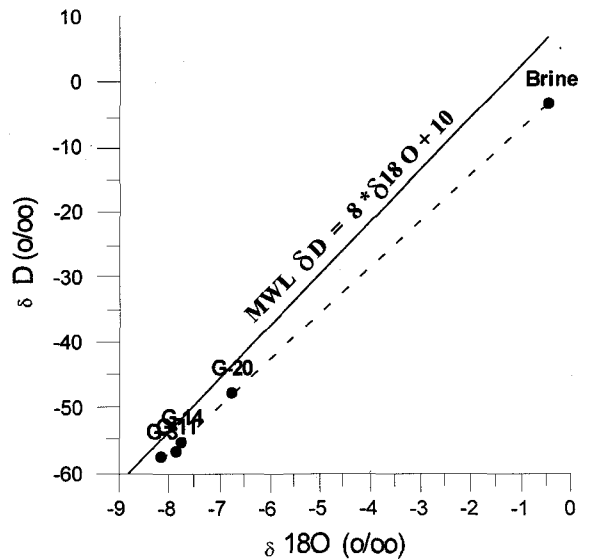


Fig. 6. The result of Isotope analysis for 4 groundwater samples collected in the study area.

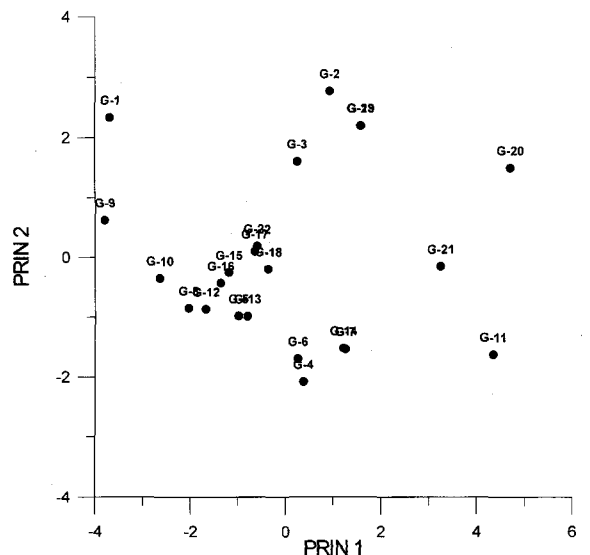


Fig. 7. The result of Principal Component Analysis using 6 elemental concentrations, pH and conductivity of ground water in the study area.

$\delta D$ 와  $\delta 18O$ 의 값만이 해수의 분석 값과 가장 가까이 위치하고 있다. 따라서 이 지역에서만 어느 정도 해수의 혼입이 있었던 것으로 분석된다. 나머지 지하수 시료들은 뚜렷한 특징 없이 모두 MWL에 가까이 위치하고 있으므로 연구 지역의 본래 지하수 특성을 나타내는 것으로 보이며 G-11 시료는 다른 두 시료와 마찬가지로 지표로부터 기인되었을 가능성이 크다고 할 수 있다.

각 측정에서 나타난 지하수의 pH와 원소량의 관계를 알기 위하여 통계분석의 일환으로 주성분 분석을 실시한 결과는 Fig. 7과 같다. 투입된 요소는 모두 8개로 6개의 해수 주원소(Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 분석값과 현장에서 측정된 pH와 전

기전도도(EC) 등이 포함되었다. 벡터 고유치(eigen vector) 분석결과, 가로축(PRIN1)은 pH를 제외한 6개의 원소와 전기전도도를 대변하는 총량 개념으로 해석되며, 세로축(PRIN2)은 지하수의 pH를 대변하는 축으로 해석된다. 따라서 해안에 가깝게 위치하면서 침투 예상 지역에 위치한 시료 G-20, 21 지점이 분석 원소 총량을 대변하는 축으로 뚜렷이 구분됨을 알 수 있고 높은 염분을 보이는 G-11 지점의 pH가 G-20과 G-21의 것에 비하여 상대적으로 낮음에서 동위원소 분석결과와 같이 천부로부터의 오염이 존재할 수 있음을 알았다.

## 결 론

1. 물리탐사 결과로부터 대상 지역으로의 해수 침투대를 전기 비저항 30  $\Omega$ -m 이하로 설정했을 때 대상 지역의 해수 침투대는 고 비저항대가 존재하는 우측 지역보다 좌측 해안 지역으로 특히 측정 M-1번, M-13번 하부(최소 -30m 심도까지)를 기점으로 활발히 침투하여 상부의 지하수대와 혼입되면서 확산되는 것으로 해석된다.

2. 지하수 원소별 분석 결과, 해수 혼입대의 진행 방향은 해안 지역에서 북쪽 방향으로 측정 M-15번까지 오염이 진행되었으며 근방의 G-20에서의 오염의 정도는 이미  $[Cl^-]$ 이 농업용수 기준치(250 mg/l)를 크게 넘어서고 있다. 이와 같은 결과는 앞의 물리탐사 결과와 잘 부합한다.

3. 고염분을 나타내는 G-11번 시료 지역은 주성분 분석과 동위원소 분석에 의해 지표로부터 오염이 되었을 가능성이 크며 해수 이외에 인간 활동에 의한 오염물질로 생각되는  $[NO_3^-]$ ,  $[PO_4^{3-}]$ 이 높은 측정들 역시 연구지역 내 주택가 및 축사의 위치와 일치하고 있다.

## 참고문헌

- 박희열, 1998, 국내화강암질 및 해수 침투 지역의 지하수 오염에 관한 환경 지구화학적 연구: 전북대학교 박사학위 논문, 112.
- 이병주, 박기화, 윤 욱, 윤윤영, 김남장, 황상기, 1993, 발안도폭 지질보고서: 한국자원연구소, 7.
- 조진동, 구성분, 성낙훈, 성기성, 1988, 제주지역 해수영향권 조사연구(II): 국토이용지질조사 연구, 과학기술처, KR-88-1B, 315-348.
- Goldberg, E. D., Broecker, W. S., Gross, M. G. and Turekian, K. K., 1971, Marine chemistry in radioactivity in the marine environment: Washington D.C., National Academy of Science, 137-146.
- Hagemeyer, R. T. and Stewart, M., 1990, Resistivity investigation of salt water intrusion near a major sea-level canal: Geotechnical and Environmental geophysics vol. 5, Society of Exploration Geophysics, 67-77.
- Hem, J. D., 1985, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 263.
- Hoefs, J., 1987, Stable isotope geochemistry, Springer-Verlag, Berlin, 118-120.
- Keller, G. V. and Frischknecht, F. C., 1966, Electrical methods in Geophysical Prospecting: Pergamon Press, 136-142.
- McNeill, J. D., 1980, Electrical conductivity of soil and rock (TN-5): Geonics Limit, 15.
- McNeill, J. D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers (TN-6): Geonics Limit, 14-15.
- Raiche, A. P., Jupp, D. L. B., Rutter, H., Vozoff, K., 1985, The joint use of coincident loop transient electromagnetic and Schulerberger sounding to resolve layered structures: *Geophysics*, **50**, 1618-1627.
- Richter, B. C. and Kreitler, C. W., 1993, Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization: USEPA, 103.
- Stoyer, C. and Butler, M. S., 1994, EMIX 34 manual: Interpex, 5-10.
- Zhody, A. A. R. and Jackson, D. B., 1969, Application of electrical sounding for groundwater exploration in Hawaii: *Geophysics*, **34**, 584-600.

1. 박희열, 1998, 국내화강암질 및 해수 침투 지역의 지하수 오염에 관한 환경 지구화학적 연구: 전북대학교 박사학위