

우리나라 서남해 도서지역의 암반대수층을 통한 해수침투 사례

김진호, 송성호, 이규상, 우명하 | 농업기반공사 농어촌연구원 지하수연구실

1. 서론

일반적으로 해안지역에서 지하수의 양수에 의해 해수가 담수 대수층으로 유입되는 현상을 해수침투(seawater intrusion)라고 하는데 (Freeze and Cherry, 1979), 이러한 해수침투 현상은 강우량, 지하수면의 높이 변화, 조석에 의한 해수면 변화, 해수와 담수간의 밀도차 등 자연적인 요인에 의해서도 발생된다.

따라서 해수침투의 원인은 대수층을 포함한 소유역에서 다양한 수리 지질학적 특성을 기초로 규명되어야 하지만, 지금까지는 체계적인 분석이 없는 상태에서 수량 위주로 지하수를 개발함으로써, 해수 유입에 의해 방치공 및 폐공이 발생되고 있는 상황이다. 이에 따라서 대수층으로의 해수 유입은 취수정에서 지하수를 과다하게 양수함에 따라 발달되는 양상을 보이고 있으며, 최근에는 임해지역에서의 무분별한 지하수 개발과 과잉 양수 등 인위적인 요인에 의해 내륙으로 확산되고 있어 문제가 커지고 있다.

국내에서는 현재 국책사업의 일환으로 자연재해방재기술개발사업단이 주관하는 “해수침투 평가, 예측 및 방지 기술 개발(2000)”에서 해안 및 도서지역에 대한 해수침투 확산 예측기술 개발 및 광역 해수침투 가능 분포도를 작성하고 있으며, 농림부와 농업기반공사(1996)에서는 제주도 지하수 수자원 개발 및 이

용 보전관리에 필요한 기초자료 제공 목적으로 43곳의 해안변에 관측정을 운영 중이다. 또한 1998년 이후에는 제주도 수자원사업소에서 총 70곳의 관측망을 새롭게 설치하는 작업을 진행 중이다.

한편 농림부와 농업기반공사(2002)에서는 1998년 이후 서남해안 도서지역 중 강화, 신안, 진도, 완도, 남해, 거제에 각각 6개소씩 총 36개소의 관측망을 설치하여 지하수에 대한 수위, 전기전도도, 수온의 장기관측을 실시하고 있다. 이러한 해수침투 관측망에서 얻어진 자료는 다양한 수리지질학적 특성을 고려한 분석과정을 통해 지하수개발 이용으로 인한 해수침투 영향을 사전에 파악하고 피해예방을 수립하며 합리적인 지하수이용 관리 계획 수립에 필요한 기초 자료로 활용되는데 매년 단계적으로 적용지역을 넓혀가고 있다.

본 연구에서는 이러한 해수침투 관측망에 대한 대략적인 소개와 더불어 두 곳의 해안변 소유역에 대하여 예비적인 조사결과를 토대로 해수침투 관측망 운영 사례를 분석하여 제시하였다.

2. 해수침투 관측망 개요

해수침투 조사 사업에 따른 해수침투 관측망 대상 지역의 선정은 상수도가 설치되지 않아 지하수 의존

표 1. 해수침투 조사용 관측망 위치

시·군	세부 지역 및 관측망 수
강화군	송뇌리(3), 홍왕리(2), 상방리(1)
신안군	감정리(2), 효지리(2), 자동리(2)
진도군	나리(2), 신기리(2), 지막리(2)
완도군	화홍리(3), 고금면(2), 정도리(1)
남해군	서상리(2), 갈화리(2), 가인리(2)
거제시	덕호리(2), 시방리(2), 사동리(1), 신현리(1)

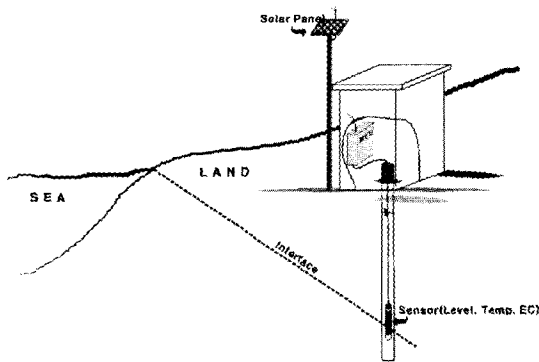


그림 1. 해수침투 관측망 시스템 구성도

이 높은 지역으로 해수침투의 우려가 있는 곳을 1차적으로 해당 시·군의 추천을 받았으며, 이후 현지답사 과정을 거쳐 선정하였다 (표 1).

해수침투 관측망의 구성은 지하수위 및 수질 자료를 측정하는 자동 측정장치, 측정 자료저장 및 전송 등의 각종 제어 업무를 수행하는 제어장치(RTU, Remote Terminal Unit), 전원 장치 및 중앙감시시스템 등 네 부분으로 구성된다 (그림 1).

3. 해수침투 조사 사례

해수침투 조사 사례는 전체 관측망 운영지역 중 해안면 소유역을 대상으로 한인천광역시 강화도의 송뇌지역과 전남 완도군 화홍지역에 대하여 관측망 위치 파악을 위한 GPS(Global Positioning System) 측위, 수리지질구조 파악을 위한 2차원 전기비저항 탐사, 각 관측정의 심도별 염수침입 상태 파악을 위한 공내 전기전도도 검층, 공내 지하수의 수질특성 파악

을 위한 이온분석 및 장기간의 지하수위 및 전기전도도 변화 모니터링 결과를 체계적으로 분석하였다.

3.1 강화도 송뇌지역

가. 기초조사

이 지역에서 수리지질 특성을 파악하기 위한 현장 기초조사로 관측정 위치 및 전기비저항 탐사 위치에

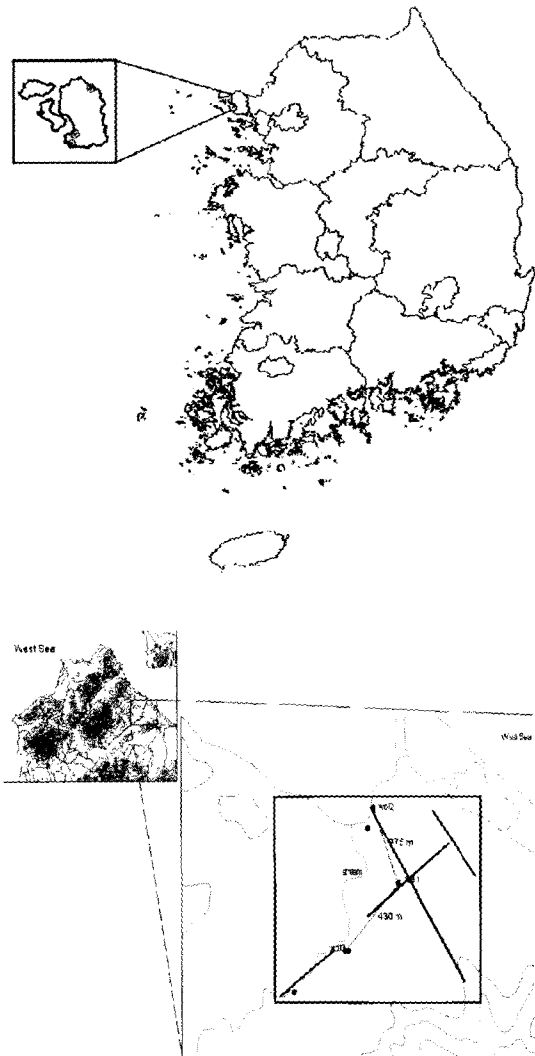


그림 2. 송뇌지역 해수침투 관측망 위치도 및 탐사측선

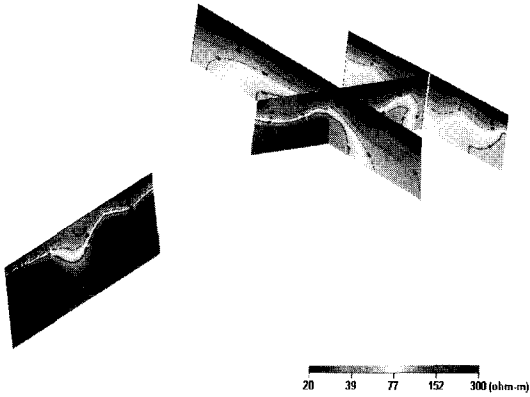


그림 3. 송뇌지역에 대한 전기비저항 탐사 결과도

대한 정확한 좌표 및 해발고도 측정을 위하여 Trimble 2000SSi 기종을 이용한 GPS 측위를 수행하였으며, 염수침입 현상을 규명하기 위하여 김정호 등 (2001)이 제시한 변형된 단극배열(modified pole-pole array) 전기비저항 탐사를 수행하여 이 지역에 대한 수리지질 특성에 대한 2차원 영상을 구현하였다 <그림 2>.

전기비저항 탐사 결과 연구지역의 지표하부 약 20~30 m 까지 전기비저항이 5 ohm-m 이하의 매우 낮은 지층과 그 이하로 수십 ohm-m 내외의 상대적으로 높은 비저항 분포가 나타나는데, 전체적인 전기 비저항 분포가 해수에 포화된 정도로 나타남에 따라

이 지역이 과거 조간대였음을 알 수 있다 <그림 3>.

또한 해안변과 상대적으로 인접한 well 2 지역 경우는 과거 갯골로 의심되는 매우 낮은 전기비저항대가 수직적으로 수십 m 이하까지 발달되는데, 이러한 결과는 전기전도도 검층에서 나타난 바와 같이 well 1과 well 2에서 5,000~10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 매우 높은 전기전도도의 발달과 일치된다 <그림 4(a)(b)>. 이에 비하여 해안선으로부터 상대적으로 멀리 떨어진 well 3 관측정의 경우는 전기전도도가 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 정도로 상대적으로 낮게 나타났다 <그림 4(c)>.

이 연구에서는 해수유입에 의해 전기전도도가 약 4,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 9,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 급격한 증가가 나타난 well 2 관측정의 42~52 m 구간의 네지점에 대하여 조석 변화에 의한 전기전도도 변화를 측정하기 위하여 24시간 동안의 전기전도도 변화를 모니터링 하였다 <그림 5>. 분석 결과 네 지점에서 시간 경과에 따른 전기전도도의 변화 양상은 나타나지 않았으며, 지하수위 변화가 조위변화와 무관한 장주기의 변화를 나타내는 것으로 보아 향후 추가로 정밀한 조사가 필요한 것으로 판단된다.

나. 수질특성조사

이 연구에서는 각 관측정 지하수에 대해 지구화학

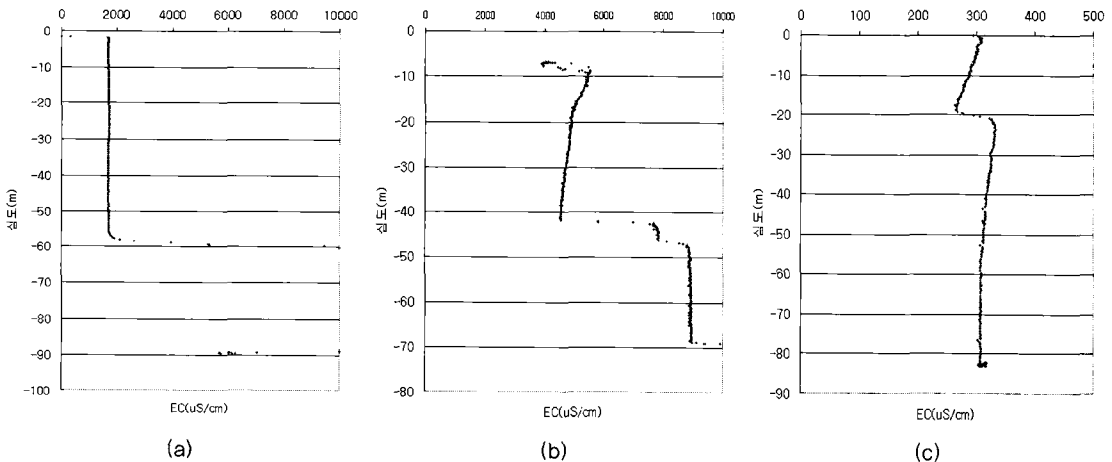


그림 4. 송뇌지역 각 관측정에 대한 심도별 전기전도도 검층 결과도
(a) well 1, (b) well 2, (c) well 3

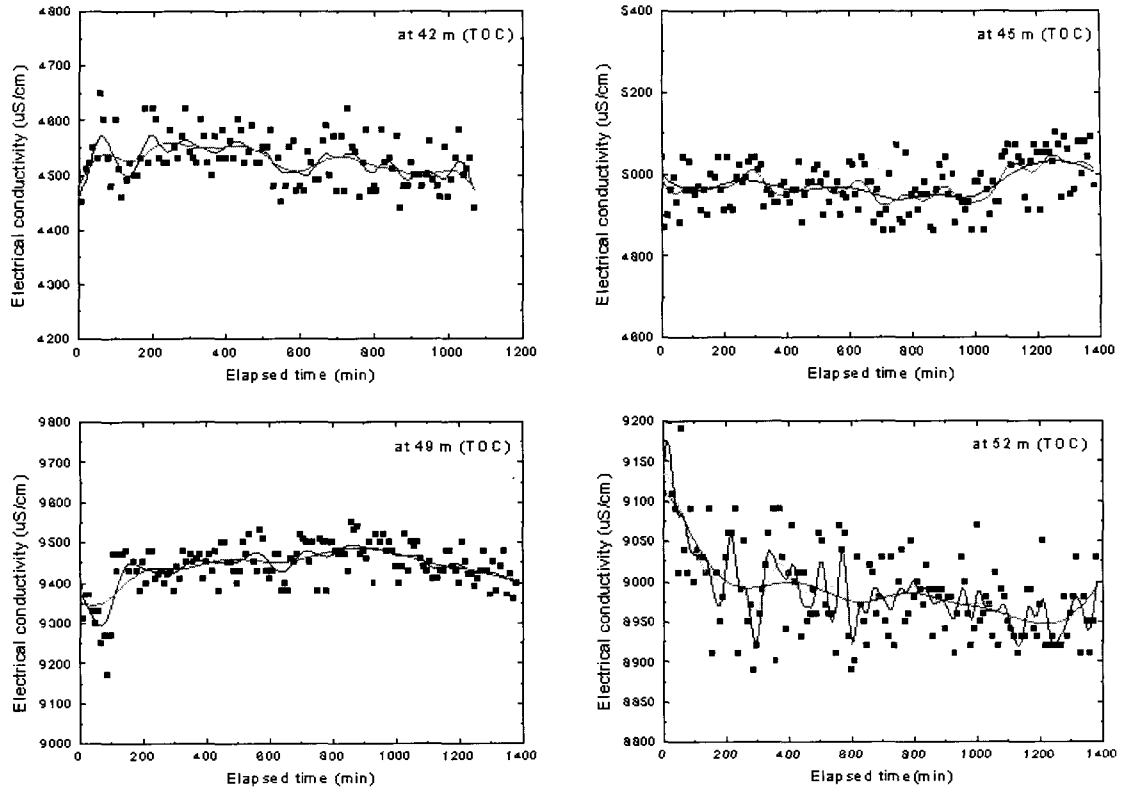


그림 5. 송내지역 well2 관측정에 대한 심도별 전기전도도 모니터링 결과도
(a) 42 m, (b) 45 m, (c) 49 m, (d) 52 m

적 분석을 위하여 장기 양수 후 시료를 채취하여 주 성분 및 부성분 이온을 분석하였다. 분석 결과는 해수 침입의 영향을 효과적으로 판단할 수 있는 방법으로 Revelle(1941)이 제시한 Cl/HCO₃ 몰비를 이용하였는데, well 1과 well 2의 경우는 3~11 정도의 범위로 상대적으로 해수침입에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다 (표 2)(표 3). 또한 분석 결과를 이용하여 piper diagram상에 도시한 결과 well 1과 well 2 관측정의 지하수질은 Na-Cl 유형에 해당되는 지점에 도시됨에 따라 본 지하수가 해수에 의한 영향을 크게 받고 있는 것으로 나타났으며, well 3의 경우는 상대적으로 해수에 의한 영향은 적게 받는 것으로 나타났다 (그림 6).

다. 장기관측 결과

송내지역 관측정 3곳에 대하여 2002년 1년 동안 장기관측자료를 분석하였는데, 이때 수문자료는 강하기상대의 관측 자료를 이용하였다. 강수 자료를 분석한 결과 2~4월에는 상대적으로 강수량이 적었지만, 5월 초에서 중순까지 그리고 6월 중순 이후부터 강수량이 집중되었으며 8월경에는 태풍 루사 등으로 인해 특히 많은 강수량을 보였다 (그림 7(a)).

연중 지하수위의 변화는 강수량이 집중된 5월 초와 7월 이후에 세 관측정 모두에서 증가하고 있으며, 양수가 직접 이루어지는 well 1에서는 20 m 이상 수위가 연중 변화했다. 특히 용수수요가 많은 6월 중순까지는 지속적으로 수위가 낮아지는 경향이 나타나지만, 그 이후에는 수위가 회복되는 결과가 나타났다 (그림 7(b)).

표 2. Cl/HCO₃ 비에 따른 해수침입 영향범위 (Revelle, 1941)

Cl/HCO ₃ 비	Interpretation
0.4 이하	None of Seawater Intrusion
0.5~1.3	A little Problem
1.3~2.8	A little Impact
2.8~6.6	Serious Impact
6.7 이상	Very Serious Impact

표 3. 승뇌지역의 각 관정에 대한 Cl/HCO₃ 비

well	Cl/HCO ₃ 비
well 1	2.91
well 2	10.916
well 3	0.108

연간 지하수위 변화량은 well 1이 25 m로 가장 크며, well 2는 약 9 m, well 3이 7 m 정도다. 또한 well 1의 양수에 의해 다른 관측정들도 영향을 받는 것으로 판단된다. well 1 관측정의 경우는 전기전도도 측정 센서위치가 지표하부 65 m 지점으로 수중모터 위치보다 5 m 깊기 때문에 양수와 상관없이 연 11,000~12,000 μ

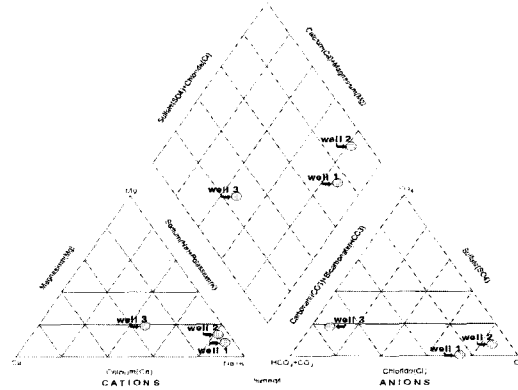
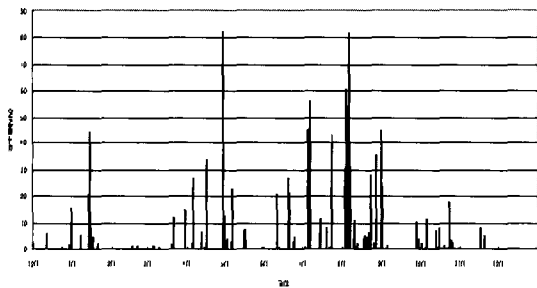
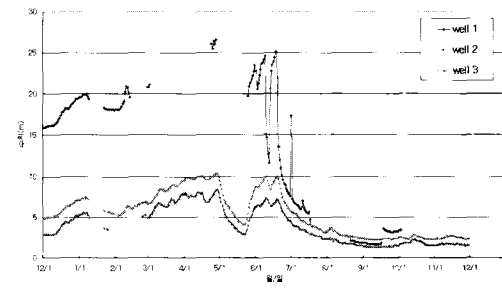


그림 6. Piper diagram을 이용한 승뇌지역 관측정들의 수질분석 결과도

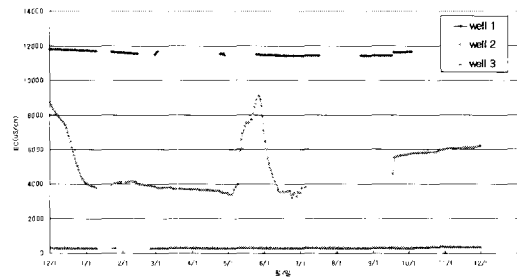
S/cm 정도로 일정하게 유지되고 있어 해수에 의한 영향이 상시 지속되는 것으로 판단되지만, 해안에서 가장 먼 거리에 위치한 well 3 관측정의 경우 약 300 μ S/cm 정도를 유지하고 있어 해수침투의 영향이 크지 않음을 보여주고 있는데 이러한 결과들은 전기전도도 검층 결과와 일치한 것으로 나타나고 있다 <그림 7(c)>.



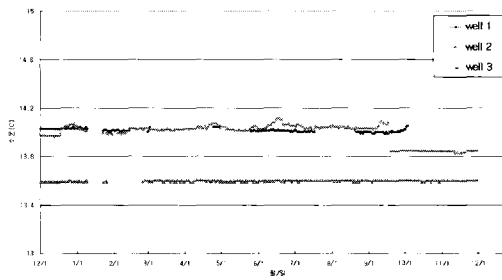
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. 승뇌지역 각 관측정에 대한 장기관측 결과도 - (a)연간 강수량, (b)수위, (c)전기전도도, (d)수온

3.2 완도군 화홍지역

가. 기초조사

이 지역은 완도의 남서쪽에 위치한 해안변의 소유역으로, 방조제 축조로 인한 농경지 평야지대에 3개의 관측정이 설치되어 있는 지역이다. 전체적인 수리지질구조 파악을 위한 물리탐사는 승뇌지역과 마찬가지로 단극배열 전기비저항 탐사를 수행하였으며,

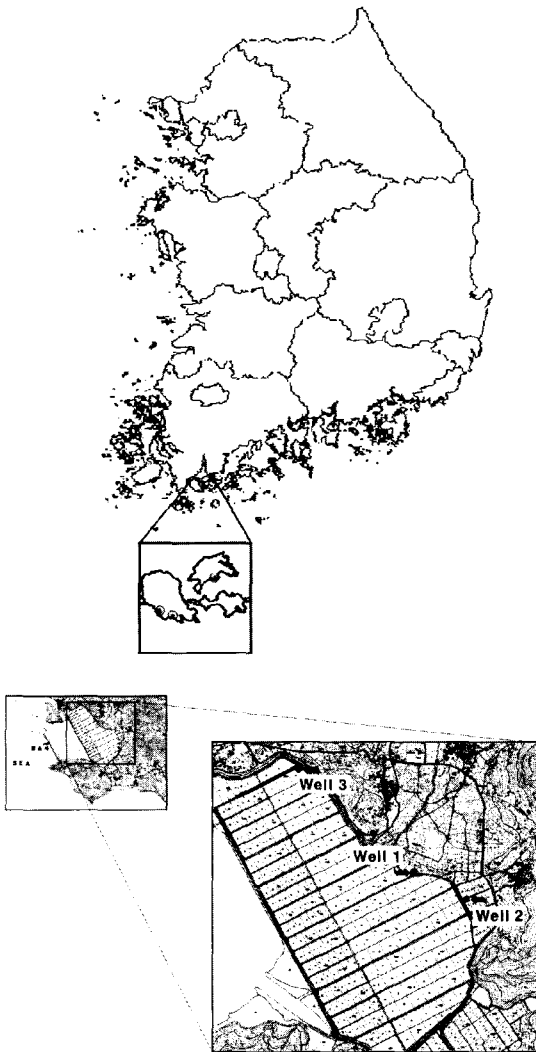


그림 8. 화홍지역 해수침투 관측망 위치도 및 탐사 축선

GPS 측위 조사를 수행하여 각 관측정의 위치 및 해발고도를 측정하였다 (그림 8). 이때 전기비저항 탐사는 현장 여건상 well 2와 well 3 관측정 주변지역에 대하여 수행하였다.

전체적인 전기비저항 탐사 자료의 2차원 역산 결과는 지표하부 1.5 m 까지 해수의 전기비저항 범위인 0.2 ohm-m (Telford et al., 1990)와 유사한 0.5 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항 분포가 나타남에 따라 해수유입에 의한 영향으로 판단되며, 그 이하 심도에서는 well 2 관측정 주변에서의 전기비저항이 well 3 관측정 주변에서의 결과 보다 약 20배 가량 높게 나타나고 있다 (그림 9).

이는 well 3 관측정의 위치가 과거 갯벌이었으나 방조제 건설 이후 간척지 조성에 의해 육지화가 진행되었기 때문으로 판단된다. 또한 well 2 주변에서의 전기비저항 탐사의 경우에서 가장 높은 곳의 전기비저항이 30 ohm-m 내외로 일반적인 암석이나 미고결층에 대한 전기비저항보다 낮은 값을 보이며, 전기전도도 검층 결과가 1,000~10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 담수의 범위보다 높게 나타남에 따라 전반적으로 해수유입 현상이 있는 것으로 판단된다 (그림 10(a)). 이러한 결과는 well 3 관측정에 대한 전기전도도 검층 결과에서도 나타나는데, 35 m 지점에서 전기전도도값이 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 대에서 8,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 대로 급격히 증가하고 있어 이 지점을 통해 해수가 유입되고 있을 가능성이 높은 것으로 나타났다 (그림 10(b)).

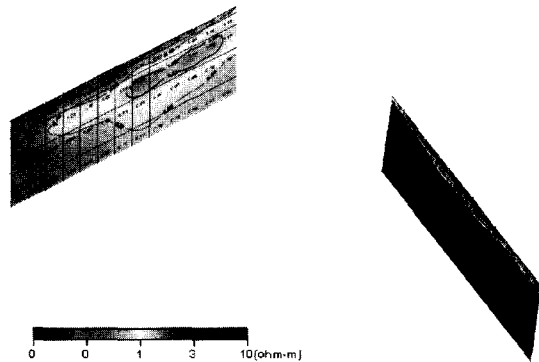


그림 9. 완도 화홍지역에 대한 전기비저항 탐사 결과도

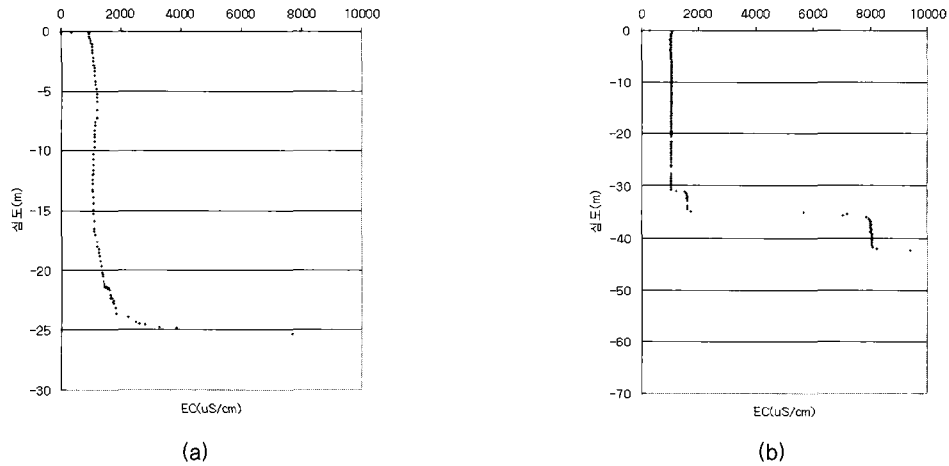


그림 10. 화흥지역 각 관측정에 대한 심도별전기전도도 검측 결과도 - (a) well 2, (b) well 3

나. 수질특성조사

이온분석 결과를 기초로 Revelle(1941)이 제시한 Cl/HCO₃ 몰비 계산한 결과 두 곳 모두에서 8~10의 범위를 보여줌에 따라 해수침투 가능성이 매우 높은 것으로 나타났으며 (표 4), Piper diagram 에 도시한 결과 강화도 송뇌지역에서와 마찬가지로 Na-Cl 유형

표 4. 화흥지역의 각 관정에 대한 Cl/HCO₃ 비

well	Cl/HCO ₃ 비
well 2	9.753
well 3	8.594

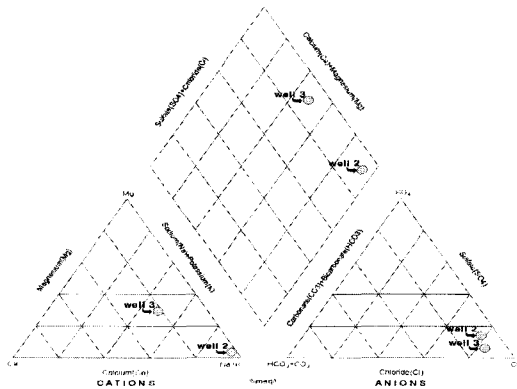


그림 11. Piper diagram을 이용한 화흥지역 관측정들의 수질분석 결과도

으로 나타났다 (그림 11). 그러나 기존의 육지지역에 위치한 well 3 관측정의 경우는 well 2 관측정에 비해 Na+K의 농도가 낮게 나타남에 따라 상대적으로 해수침투의 영향을 덜 받은 것으로 나타났다.

다. 장기관측 결과

화흥지역 수문자료는 완도기상대의 관측 자료를 이용하였는데, 이 지역의 경우는 2002년 7~9월에 최고 300 mm까지 많은 강우량이 있었고, 2월, 6월 전후 및 11월에는 상대적으로 건조했었던 것으로 관측되었다 (그림 12(a)).

이 지역의 관측정은 해안선으로부터 약 650 m의 거리에 위치한 well 2 관측정과 약 730 m의 거리에 위치한 well 3 관측정으로 구성되어 있는데, well 2 관측정의 경우는 평상시는 자분 상태에서 5월 중순에서 7월초의 양수시에 3 m 가량 수위가 하강하는 것으로 나타나고 있다 (그림 12(b)). 전기전도도는 1,000~4,000 μ S/cm 범위로 상대적으로 낮으며, 지하수 사용이 감소되는 연 말로 갈수록 낮아지는 경향을 보인다 (그림 12(c)).

well 3 관측정은 well 2 관측정과 마찬가지로 양수량이 많아지는 6월 이후부터 지하수위 변동이 크게 나타남에 따라 인근 관정의 양수에 직접적인 영향을

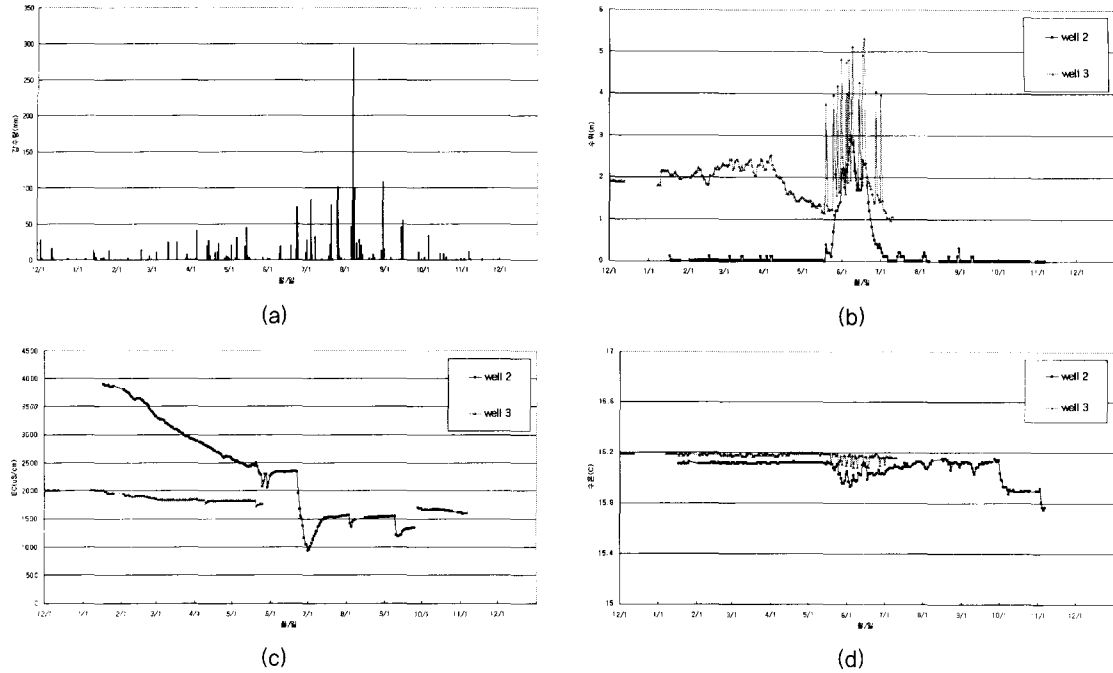


그림 12. 화홍지역 각 관측점에 대한 장기관측 결과도 - (a)연간 강수량, (b)수위, (c)전기전도도, (d)수온

받고 있는 것으로 판단되며, 전기전도도는 초기에 2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 점차 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 감소함에 따라 well 2 관측점과 유사한 경향을 보이고 있다.

4. 토의 및 결과

이 연구는 우리나라 서남해 도서지역의 암반대수층을 통한 해수침투 실태 파악과 합리적인 지하수 이용 관리 계획을 수립하기 위하여 농림부와 농업기반공사가 수행중인 해수침투 관측망에 대한 대략적인 소개와 일부 지역의 운영 사례를 제시하였다.

두 지역에 대한 운영사례에서는 수위, 전기전도도, 수온 등 세 항목의 장기관측 결과와 전기전도도 검층, 변형된 단극배열 전기비저항 탐사 및 지하수 시료들의 이온분석 결과를 바탕으로 관측점의 해수유입 실태를 파악하였으며, 인근 관측점간의 연계성도 알아 보았다. 두 지역에 대한 해수침투 유형 및 범위 등은 향후 정밀한 조사 결과가 추가되어야 하지만 예비적

인 조사결과를 토대로 다음과 같은 결과를 얻었다.

강화도의 송뇌지역에서는 해수에 의해 오염된 well 1 관측점의 양수가 인근의 well 2 관측점까지 영향을 미쳐 수위를 강하시키고 그에 따른 전기전도도의 변화도 수반되어 나타난 것으로 볼 때 이 지역의 경우 해수침투의 유형은 양수량에 의해 직접적인 영향이 나타나는 것으로 파악되었다. 완도의 화홍지역에서는 방조제에 의해 매립된 지역에 위치한 well 3 관측점에서의 전기전도도가 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 내외로 해수의 영향을 지속적으로 받는 것으로 나타났으며, 기존 육지 지역에 위치한 well 2 관측점의 경우는 상대적으로 해수에 의한 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

이러한 해수침투 관측망 운영 사례를 검토한 결과 각 유역별로 정밀한 추가 조사가 필요하지만, 수리지질 구조파악을 위한 전기비저항 탐사, 관측점에 대한 전기전도도 검층, 수질 분석 및 장기 관측 자료등을 적절하게 분석하는 경우 소유역에 대한 개략적인 해수침투 유형파악이 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 농림부와 농업기반공사에서 수행 중인

해수침투 조사사업과 21세기 프론티어연구개발사업
인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지
원(과제번호 3-3-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 과학기술부, 한국자원연구소 (2000) 해수침투 평가, 예측 및 방지기술 개발.
- 김정호, 이명종, 송운호, 정승환 (2001) 2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극배열법에 관한 연구: 물리탐사, 4, 59-69.
- 농림부, 농업기반공사 (1996) 제주도 '96 장기 관측망 설치 및 조사 실적보고서.
- 농림부, 농업기반공사 (2002) 2002해수침투조사 보고서.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater. Prentice-Hall, 375p.
- Revelle, R. (1941) Criteria for recognition of seawater in groundwaters: Trans. Amer. Geophysical Union, 22, 593p.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990) Applied geophysics. 2nd ed. Cambridge University Press. Cambridge. 285p.