

지하수 수질 관측에 의한 제주도 대정수역의 지하수계 및 오염특성 분석

우남철^{1*} · 김형돈¹ · 이광식² · 박원배³ · 고기원⁴ · 문영석⁴

¹연세대학교 지구시스템과학과, ²한국기초과학지원연구원, ³제주발전연구원, ⁴제주도 광역수자원관리본부

Interpretation of Groundwater System and Contamination by Water-Quality Monitoring in the Daejung Watershed, Jeju Island

Nam-Chil Woo^{1*}, Hyung-Don Kim¹, Kwang-Sik Lee², Won-Bae Park³, Gi-Won Koh⁴
and Young-Suk Moon⁴

¹Dept. Earth System Sciences, Yonsei University, Shinchon-Dong, Sudaemoon-Gu, Seoul 120-749

²Korea Basic Science Institute, ³Jeju Development Institute

⁴Jeju Provincial Water Resources Management Office

This study was objected to identify the temporal and spatial variations of groundwater quality and contamination using monthly groundwater monitoring data collected from 30 wells in Daejung watershed, Jeju Island. Water samples were analyzed for major cations, anions, and environmental isotopes including $^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$, $^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ and $^{15}\text{N}-\text{NO}_3$. The groundwater represented mostly $\text{Na}(\text{Mg})-\text{HCO}_3$ type, with local change toward $\text{Ca}-\text{HCO}_3$ type and $\text{Na}-\text{Cl}$ type. Groundwater quality depends upon various factors such as the local groundwater flowpaths, input of surface contaminants with recharge events, and sea-water intrusion along the coastal area. Nitrate contamination changed temporally according to recharge events and spatially. $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$ data for monthly sampled groundwaters showed distinctive clusters, implying that groundwater was originated from independent precipitation, and subsequently recharged very fast. Using $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3$ data, major sources of nitrate and its areas of influence could be identified. The areas under influence of livestock farms showed relatively high NO_3-N concentrations and $\delta^{15}\text{N}$ values higher than 5‰. The agricultural areas in southeastern part showed very high concentrations of NO_3-N with the $\delta^{15}\text{N}$ values of lower than 5‰.

Key words: water-quality monitoring, environmental isotopes, sea-water intrusion, groundwater contamination, nitrate

본 연구는 제주도 남서부의 대정수역 30개의 우물에 대하여 지하수 수질의 주기적 관측을 통하여 이 지역의 지하수 수질과 오염의 시공간적 변화 특성을 규명하고자 실시되었다. 수질 분석은 주 양·음이온 및 산소·수소·질소 동위원소에 대하여 이루어졌다. 연구지역의 지하수 수질은 $\text{Na}(\text{Mg})-\text{HCO}_3$ 유형이 우세하며, 국지적으로는 $\text{Ca}-\text{HCO}_3$, $\text{Na}-\text{Cl}$ 유형 등도 나타난다. 지하수 시료의 주 이온함량 및 EC 값의 변화, 질산성질소와 염소이온과의 상관관계 등으로부터 지하수 수질의 시공간적 변화는 국지적으로 발달된 지하수 유동경로의 변화, 강우의 함양과 이에 따른 지표오염 물질의 유입, 해안지역에서의 해수침투 등에 의해 복합적으로 영향을 받고 있는 것으로 해석된다. 질산성질소에 의한 오염도의 변화는 강우의 함양사건에 직접적으로 관계된다. 질산성질소의 월별 농도를 보면, 정도의 차이는 있으나 강우 후 2~8배의 농도 증가를 보이고 있다. 지하수의 산소·수소 동위원소비는 시기별로 채취된 지하수가 서로 다른 강우로부터 기인하였음을 지시한다. 질소 동위원소 자료를 사용하여 지하수의 질산성질소 오염원을 정성적으로 구분하고, 공간적인 오염 영향범위를 평가하였다. 축산폐수의 영향을 받은 것으로 사료되는 지역에서는 상대적으로 NO_3-N 농도가 높고 $\delta^{15}\text{N}$ 의 값도 5‰ 이상으로 나타난다. 동남부의 농작지에서는 NO_3-N 농도는 높으나 $\delta^{15}\text{N}$ 의 값은 5‰ 이하로 나타난다. 지하수의 지속적인 수질관측 자료는 지하수 함양과 이에 따른 지표오염물질의 유입에 의한 지하수 오염현상을 시·공간적으로 평가하고 예측하는데 중요한 요소로 활용될 수 있다.

주요어 : 지하수질 관측, 환경동위원소, 해수침투, 지하수 오염, 질산성질소

*Corresponding author: ncwoo@ysgeo.yonsei.ac.kr

1. 서 론

제주도는 화산암으로 구성된 독특한 지질 특성 및 도서 지역이라는 특성으로 인하여 예로부터 식수 문제로 많은 어려움을 겪어왔으며, 도시화에 따른 인구 증가와 관광산업 개발 등으로 이러한 어려움이 점차 심화되고 있다. 이를 해결하기 위해 1960년대 초부터 지하수 개발을 위한 본격적인 시추탐사가 시작되었으며, 이로부터 제주도의 지질구조 및 지하수 특성에 관한 많은 연구들이 수행되어 지하수의 효율적인 이용을 위한 다양한 이론들이 제시되어 왔다. 현재까지의 연구들을 목적별로 구분해보면, i) 제주도의 지질을 층서적인 입장에서 규명한 연구(김봉균, 1969; 김인수와 이동호, 2000; 김정률과 허원혁, 1995; 오진용 등, 2000; 이문원 등, 1994), ii) 지하수 부존 특성과 함양량 등 지하수 이용 측면의 연구(고기원, 1997; 김옥준, 1969; 농업기반공사, 2000; 최순학과 김영기, 1989; 한정상 등, 1994; Hahn *et al.*, 1997), iii) 동부 지역의 해수 침입과 관련된 연구(고기원 등, 1998; 부성안과 정교철, 2000; 최순학 등, 1991), iv) 지하수 오염방지에 관한 연구(진성원, 1994; 한정상, 1994; 현해남과 오상실, 1994), v) 동위원소 기법을 활용한 강우와 지하수의 순환과 기원에 관한 연구(Davis *et al.*, 1970; 안종성 등, 1984; Ahn *et al.*, 1992; 이광식 등, 1997; Lee *et al.*, 1999) 등으로 크게 구분할 수 있다. 최근에는 지하수 수질오염에 대한 잠재오염원의 영향

을 평가하는데 환경동위원소를 적용한 연구들(오윤근 등, 1997; 송영철 등, 1999)이 발표된 바 있다.

화산암으로 구성된 하와이 Oahu 섬의 경우 지하수 유동속도가 457 m/day이며, 이와 유사한 제주도의 경우 440 m/day로 추정되고 있다(Mink, 1993). 따라서, 본 연구지역 집수분지의 최장거리를 대략 10 km로 본다면 약 20 일 내외로 지하수가 이동할 수 있다고 볼 수 있다. 그러므로, 지하수의 함양사건(강우현상)과 더불어 오염물질의 이동이 빠르게 진행될 것임을 예상할 수 있다. 그러나 그 동안의 많은 연구들이 대부분 장기적이며 지속적인 관측 없이 일회성 관측자료만을 사용함으로써 현상의 설명에만 그치고 있고, 제주도 전반에 대한 광역적인 연구를 위주로 하였기 때문에, 그 결과를 국지적으로 적용하는데 한계가 있었다.

본 연구는 지하수가 유일 상수원으로 활용되는 제주도에서의 지하수 오염 문제를 해결하기 위한 초기 연구로, 제주도 남서부의 대정수역(모슬포 지역)에 대하여 집중적으로 수행되었다. 이 지역은 양돈축사, 밀감 과수원, 채소 재배용 전답 및 생활하수 지역이 비교적 좁은 지역에 혼재하는 특성을 지니고 있어서, Stewart *et al.*(1967)과 Hem(1992) 등에 의해 보고된 바와 같은 질산성질소의 잠재오염원들이 산재하여 있다. 따라서 이 지역의 지하수에서 질산성질소의 오염 발생 가능성이 상대적으로 높기 때문에 연구대상지역으로 설정하였다. 본 연구에서는 주기적이고 지속적인 지하수 관측 자료를 활용하여, 이 지역에서의 지하수 수질과

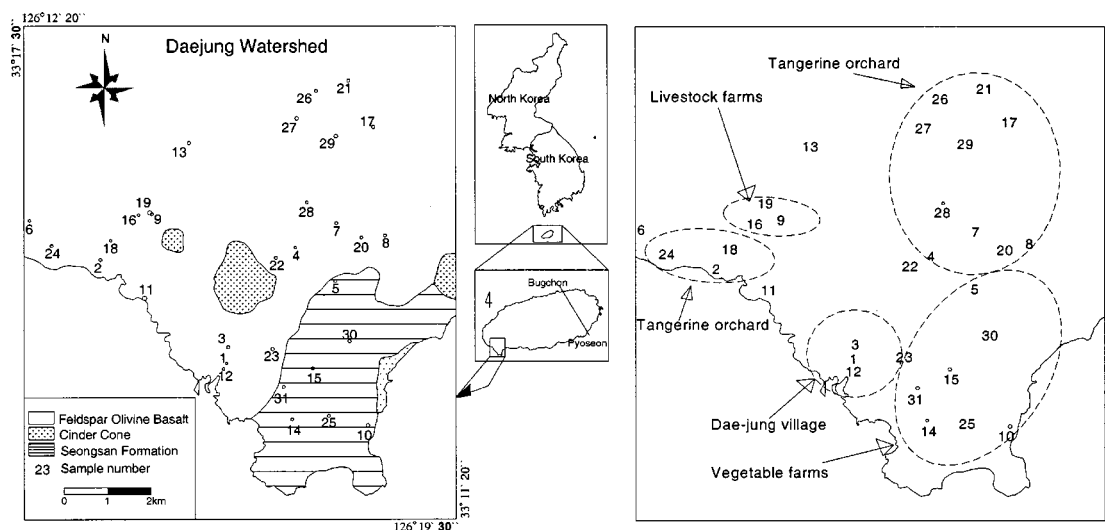


Fig. 1. Geology, sampling locations, and potential sources of groundwater contamination in the Daejung Watershed, Jeju Island.

오염 현상의 시공간적 변화를 규명함으로써 연구지역의 지하수 관리에 필수적인 기초정보를 제공하고자 하였다.

2. 연구지역의 수리지질 개요

지질 현황 : 연구지역은 제주도의 수역 구분 상 대정수역으로(Fig. 1), 모슬봉을 중심으로 동쪽에 단산, 산방산이 있으며, 남쪽으로는 송악산이 있다. 연구지역을 포함하는 제주도 서부 지역에서는 26매 이상의 용암류가 확인되었다. 이 지역 해발 약 40 m 위치에서의 시추자료에 의하면 지표로부터 약 100 m 가량 침상장석 감람석현무암(acicular feldspar olivine basalt)이 분포하고 있으며, 해발 20 m부터 -30 m 까지는 절리 및 균열이 발달한 조면암질암이 분포하는 것으로 보고되었다(제주발전연구원, 1999).

연구지역의 동남쪽으로는 김봉균(1969)에 의해서 명명된 “신양리층”이 분포하는데, 이 층은 미화석 연구에 의해 플라이스토세에 여러 번의 해침과 해퇴에 의해 생성된 해성 기원의 준고결층으로 추정되었다. 그러나, 농업진흥공사(1971)는 이 층을 침상장석 감람석현무암의 분출 후 해침을 수반하는 국부적인 화산활동에 의해 퇴적된 화성쇄설성퇴적층으로 인식하여 “성산층”으로 규정하고, 대정읍 신도리 해안 일대에만 소규모로 분포하고 있는 해성기원 준고결층에 한정하여 신양리층으로 인정한 바 있다.

산방산과 단산 사이에서 시추한 자료에 의하면 해수면 아래 19~54 m 사이에 서귀포층이 존재하고 있다(고기원, 1997). 서귀포층은 서귀포시 천지연폭포 남측 해안절벽의 높이 약 30 m에 노두가 약 1 km 연장되어 나타나는 층으로, 역질 사암, 사암, 사질이암, 이암 및 유리질 쇄설암으로 이루어져 있고, 패류화석을 비롯하여 성게, 유공충, 완족류 개형충 등 화석을 다량 포함하고 있다. Fig. 1에 표시된 북촌-표선선은 서귀포층의 존재유무를 구별하는 선으로서, 이 선을 기준으로 서쪽의 해발고도 400 m 이하 지역의 지하에 서귀포층이 약 100 m의 두께로 분포하고 있음이 확인되었으며, 이 선의 동측으로는 결층되어 있다. 서귀포층의 결층은 제주도 동부 해안 지역에서 집중적으로 발생하고 있는 해수 침입의 주요 원인으로 고려되고 있다. 본 연구지역에서는 서귀포층의 분포 심도가 북동쪽에서 남서쪽으로 갈수록 점차 깊어지며(고기원, 1997), 이로 인해 국지적인 지하수의 흐름 및 수질에 영향을 줄 것으로 예상된다.

제주도의 토양은 크게 화산회토와 비화산회토로 구분되며(현해남과 오상실, 1994), 본 연구지역에서는 비화산회토가 서쪽 지역에, 화산회토가 동쪽 지역에 분포하고 있다. 화산회토는 비화산회토에 비하여 유기물 함량 및 이온교환능력이 상대적으로 높아 오염물질의 저감에 긍정적인 역할을 할 것으로 여겨진다. 그러나, 투수성 역시 화산회토가 200 cm/day로 비화산회토의 50 cm/day에 비하여 높아, 강우 또는 지하수를 통한 오염물질의 이동은 상대적으로 쉽게 일어날 수 있음을 보여준다. 따라서 제주도에서 지표 오염물질의 지하 이동 현상은 토양에서의 지화학적 반응에 의한 오염 지체 현상과 함께 토양매체의 물리적인 투수성에 의해 복합적으로 영향을 받게 될 것이다.

지하수 유동특성 : 화산암류로 구성된 제주도에서는 용암류 사이에 협재된 화산쇄설층과 크링커층이 대수층 역할을 하고 있는데, 그 두께는 화산암의 20%에 해당한다(농업진흥공사, 1989). 용암터널 및 용암튜브 등은 지하수의 선택적 이동경로 역할을 하여, 지하수가 해안지역에서 용천수로 배출되고 있음이 확인되었으며(이문원 등, 1994), 화산암내에 발달한 균열, 절리 등을 통해 지하수의 수직흐름도 활발하게 이루어지고 있다(한정상 등, 1994; Hahn *et al.*, 1997). 따라서 이러한 균열과 절리, 용암 터널과 튜브 등을 통해 지표의 오염물질이 유입되는 경우, 오염물질은 지하수를 통해 매우 빨리 이동·확산될 것이다.

제주도의 지하수 부존 양상에 대하여는 많은 논란이 있어왔다. 이를 요약하면, 상위 및 기저지하수의 두 가지 특성으로 구분하는 연구들(김옥준, 1969; 농업진흥공사, 1989; 최순학, 1992)과 여기에 준기저 지하수 개념을 추가한 연구들(고기원, 1997; Hahn *et al.*, 1997)로 크게 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 지하수계의 부존 특성이 지하수의 흐름에 영향을 미쳐, 결과적으로 지하수의 수질에 어떠한 변화가 나타나는지를 지역적인 규모에서 고찰하였다. 전술한 지하수의 구분과 각각의 구체적인 정의에 대해서는 인용한 관련 문헌들을 참고하기 바란다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 제주도 남서부에 위치한 모슬포-대정지역을 중심으로 30개의 우물을 선정하여 2000년 3월, 7월, 10월에 봄, 여름, 가을을 대표하는 지하수 시료를 채취하였으며, 물 시료는 주 양·음이온 및 환경동위원소($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$)를 분석하였다(Fig. 1). 시료는 우물에

서 지하수를 약 10여분간 양수하여 수온과 전기전도도가 일정하게 된 후에 채취하였고, 시료채취 후 즉시 pH, 산화환원전위, 수온, 전기전도도(EC)를 측정하였으며, 양이온과 음이온 시료는 0.45 μm 멤브레인 여과지로 여과한 후 폴리에틸렌 병에 채취하여 분석 전까지 4°C 이하로 냉장 보존하였다. 양이온은 농축질산을 첨가하여 pH 2 이하로 보존하였다.

양이온(Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Al) 및 Si 함량은 한국기초과학지원연구원(KBSI) 서울분소의 ICP-AES를 사용하여 분석하였고, 음이온(Cl , NO_3 , SO_4)은 연세대학교 지하수·토양환경연구소에서 이온크로마토그래피로 분석하였으며, HCO_3 는 적정분석법으로 현장에서 측정하였다. 실내분석 자료의 신뢰성은 주 양이온과 음이온을 이용한 전하균형법(charge balance method)으

로 평가하여 오차범위 10% 이내에서 확인하였다. 산소와 수소 동위원소 분석은 한국기초과학지원연구원(KBSI)과 한국원자력연구소에서 분석하였으며, 산소와 수소의 재현성은 각각 $\pm 0.1\text{‰}$ 과 $\pm 1\text{‰}$ 이다. 또한 장기적인 관측자료로서, 제주도 광역수자원관리본부가 2000년 2월부터 10월까지 매월 관측한 지하수 수질 관측자료(음이온, 양이온 및 $\delta^{15}\text{N-NO}_3$)와 우물에 관한 자료를 종합 해석에 함께 활용하였다.

질소안정동위원소비($\delta^{15}\text{N}$)는 정밀동위원소비 측정용 질량분석계(Finnigan Delta-Plus)를 이용하여 분석하였다. 시료처리과정은 약 1L의 지하수 시료를 Kjeldahl법에 따라 산화마그네슘을 가하여 암모니아성 질소를 제거하고, 데발다합금 분말을 가한 후 증류하여 농축하였다. 농축된 시료는 Rittenberg법에 의하여 질소가스

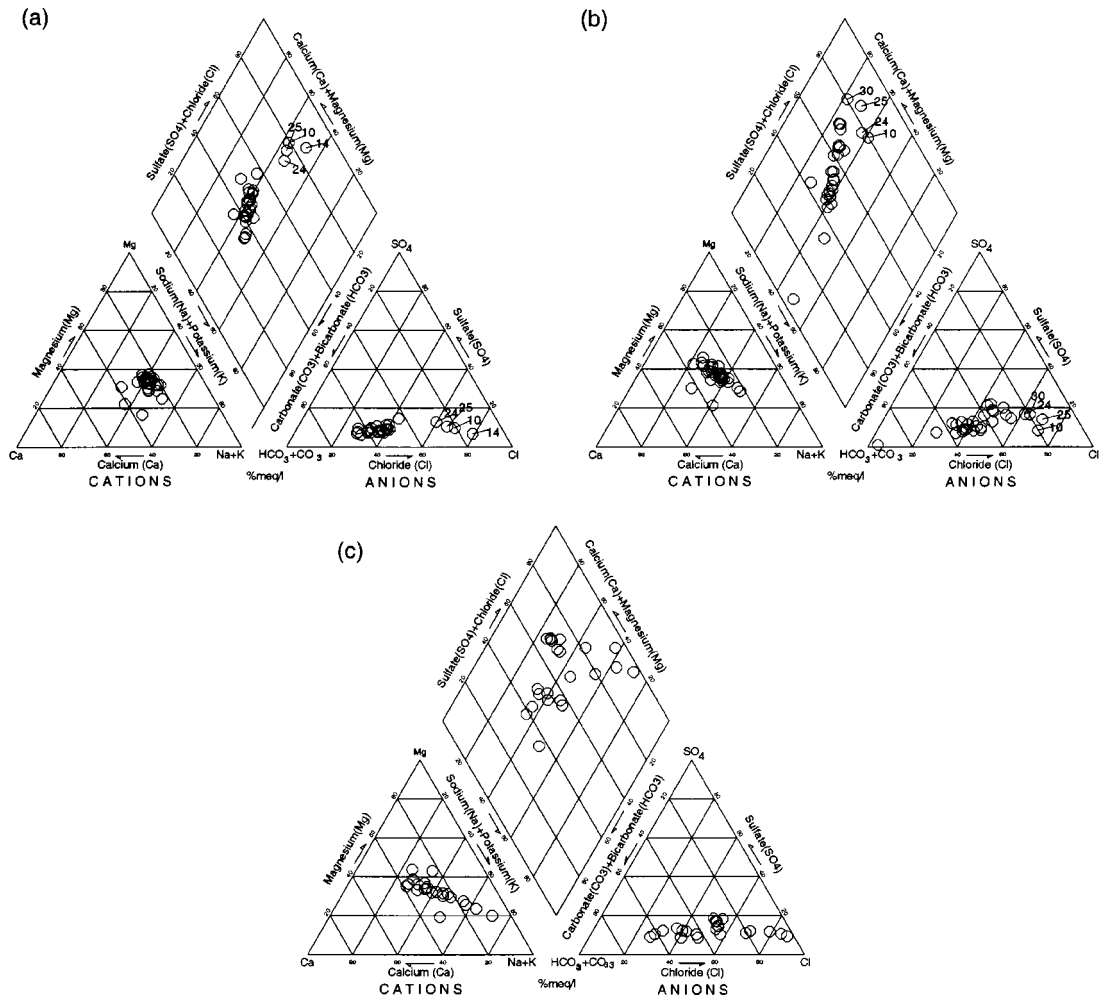


Fig. 2. Piper plots of major ionic compositions of groundwater samples collected in (a) March, (b) July, and (c) Spring.

를 발생시킨 후 포집된 가스를 전술한 질량분석계를 이용하여 질소질량의 29와 28($^{15}\text{N}^{14}\text{N}/^{14}\text{N}^{14}\text{N}$)을 비교하여 질소안정동위원소비를 측정하였다. 보다 상세한 분석방법에 대해서는 김길성 외(1999)에 기재되어 있다.

4. 결과 및 토의

4.1. 지하수의 수질 특성과 시공간적 변화

지하수의 배경수질을 확인하기 위하여 3월, 7월의 시료 분석결과와 이 지역에 분포하는 용천수의 수질분석결과(제주도, 1999)를 Piper 도표에 도시하였다(Fig. 2). 지하수 수질의 유형은 양이온에서는 Na와 Mg가

주를 이루고 미량의 Ca가 함유되며, 음이온은 중탄산이온(HCO_3^-)이 주를 이루는 $\text{Na}(\text{Mg})\cdot\text{HCO}_3$ 유형을 보여준다. 또한 일부 우물(10, 14, 24, 25)에서는 Cl이 특징적으로 부화되어 Na-Cl 유형을 나타낸다. 전체적인 수질 유형은 봄(3월)과 여름(7월)에 유사하게 나타났으며, 그림에는 도시하지 않았으나 가을(10월)시료에서도 동일하게 나타났다. 7월 시료의 분석결과는 음이온 성분에서 염소농도가 부화된 것을 보여주는데, 이에 대한 원인은 본 논문의 후반부에 기술하였다. 이와 같은 지역적인 지하수의 수질은 최순학과 김영기(1989), 윤정수와 박상윤(1998)이 발표한 제주도 광역적인 지하수 수질에 대한 연구 결과와도 일치하였으며,

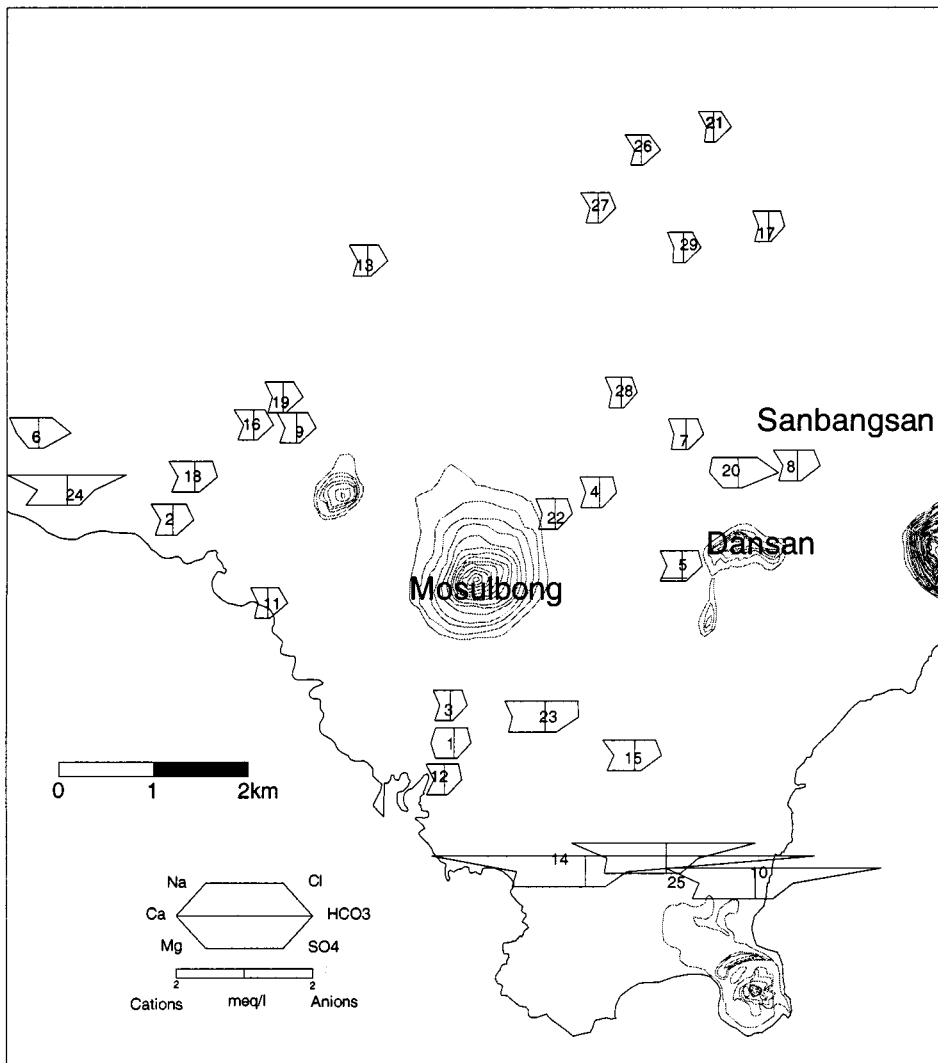


Fig. 3. Spatial distribution of groundwater types represented by Stiff diagrams.

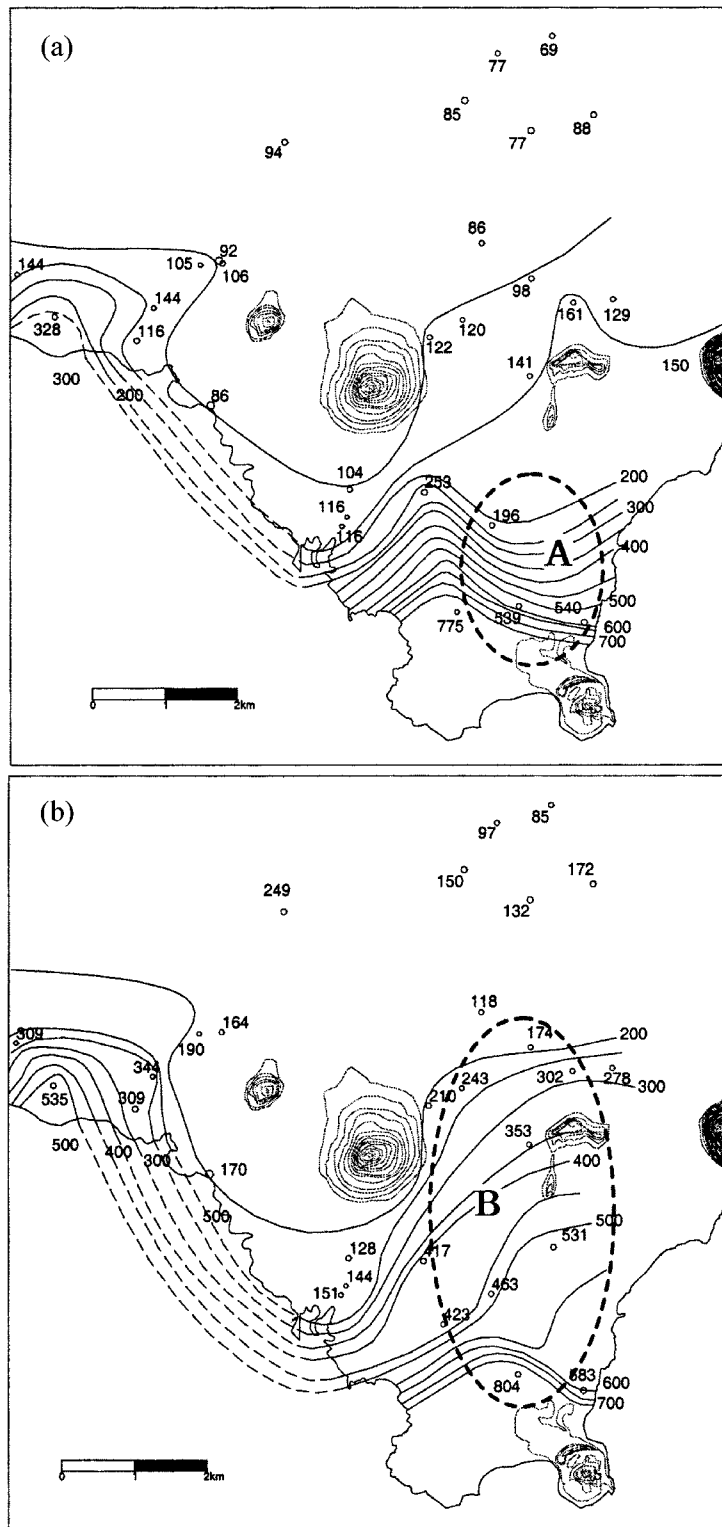


Fig. 4. Spatial variation of electric conductivity of groundwater: (a) March, (b) July.

이 지역의 용천수 수질과도 크게 다르지 않았다.

지하수 수질의 지역적 분포는 Stiff 도표에서 확인하였다(Fig. 3). Piper 도표에서 보이듯이, $\text{Na}(\text{Mg})\text{-HCO}_3$ 유형이 대부분의 지역에서 주를 이루고 있으나, 국지적으로 우물 10, 14, 24, 25에서는 Na-Cl 유형이 보이며, 우물 1과 20번에서는 Ca-HCO_3 유형이 보인다. 서로 다른 유형의 지하수의 존재는 지하수의 유동 경로에서 발생하는 물리화학적 반응의 상이함을 지시한다. 따라서, 면적이 약 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ 되는 소유역으로서의 본 연구지역에서도 지하수의 유동경로 뿐 아니라, 흐름 중의 수리지화학적 반응이 복잡하게 나타남을 알 수 있다.

본 연구지역의 우물에서 관측된 지하수의 3월, 7월의 EC 등고선도는 내륙으로부터 해안지역으로 가면서 점진적으로 EC 값이 증가하는 형상을 보인다(Fig. 4). 지하수가 함양지역에서 배출지역으로 이동하면서 물-암석반응의 결과로 지하수의 용존물질의 함량이 증가함에 따라서 EC 값이 증가하는 것은 일반적인 현상이며, 연구지역에서도 이러한 특징을 보이고 있다. 그러나, 연구지역의 동남부지역에서는 전기전도도 값이 약 $200 \mu\text{S/cm}$ 에서 $700 \mu\text{S/cm}$ 로 급격히 증가한다(Fig. 4(a)의 A지역). 이는 단순히 지하수의 유동경로 연장에 따른 물-암석반응에 의한 용존물질의 증가 외에도, 다른 메커니즘에 의한 용존물질의 함량증가가 일어나고

있음을 지시한다. 이 지역에 위치하는 우물들의 수질이 Na-Cl 유형으로 나타나는 것으로 보아, 이 지역의 지하수가 담수/염수의 전이대에 위치하거나, 적어도 해수침투의 영향을 받고 있음을 의미한다.

또한 3월 분석자료에는 나타나지 않으나 7월 자료에서는 동부 지역(Fig. 4(b)의 B)에서 EC 등고선이 상류로 향해서 광범위하게 확산되며 증가하는 추세를 보인다. 이는 후반부에 자세히 설명하겠으나, 강우에 의한 지표수의 유입과 이로 인한 지하수의 수질 변화가 서부 지역에 비하여 상대적으로 크게 나타나는 것으로 해석된다. 따라서, 본 연구지역에서 지하수 용존이온의 함량을 증가시키는 주 원인으로 전술한 바와 같이 해수침입에 의한 영향과 지표 오염물질의 유입을 들 수 있다.

지하수 수질에 영향을 미치는 지표오염물질의 유입과 해수침입의 관계를 규명하기 위해서, 지하수 중의 질산성질소와 염소농도 변화를 비교하였다(Fig. 5). 염소농도가 약 50 mg/L 이하로 나타나는 대부분의 우물에서는 질산성질소와 염소농도는 정의 양호한 상관관계($r^2=0.9143$)를 보이며, $[\text{NO}_3\text{-N}(\text{mg/L})]=0.81 \times [\text{Cl}(\text{mg/L})]-6.09$ 로 표시된다. 이러한 관계는 염소 농도가 높게 나타나는 우물 25의 7월 이후 시료들과 우물 10의 9월 시료에서도 관측된다(Fig. 5의 점선부분). 따라서, 지하수 중의 염소농도는 질산성질소와 함께 지표로부터

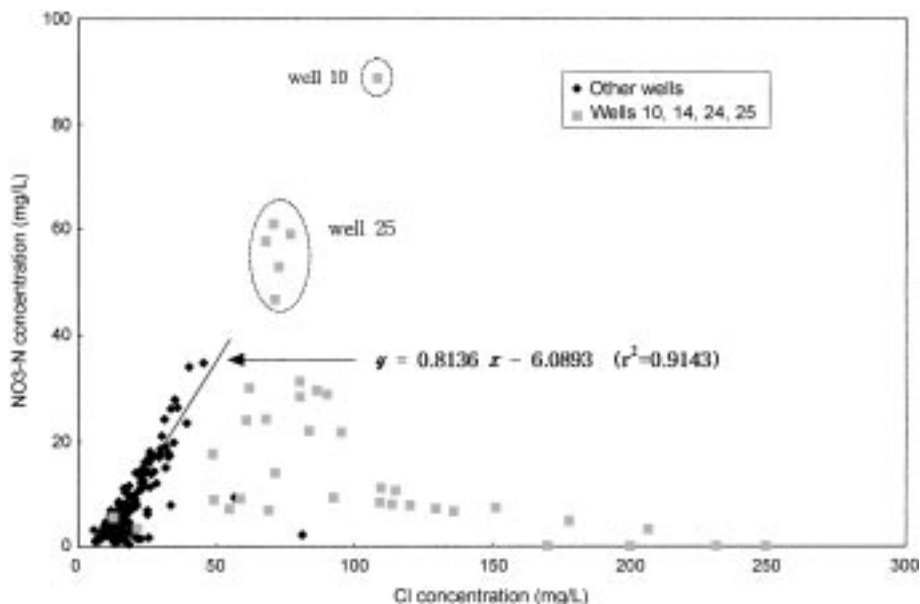


Fig. 5. Relationship between Cl and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations in groundwater: The best-fit line was drawn only for the data with Cl concentration less than 50 mg/L .

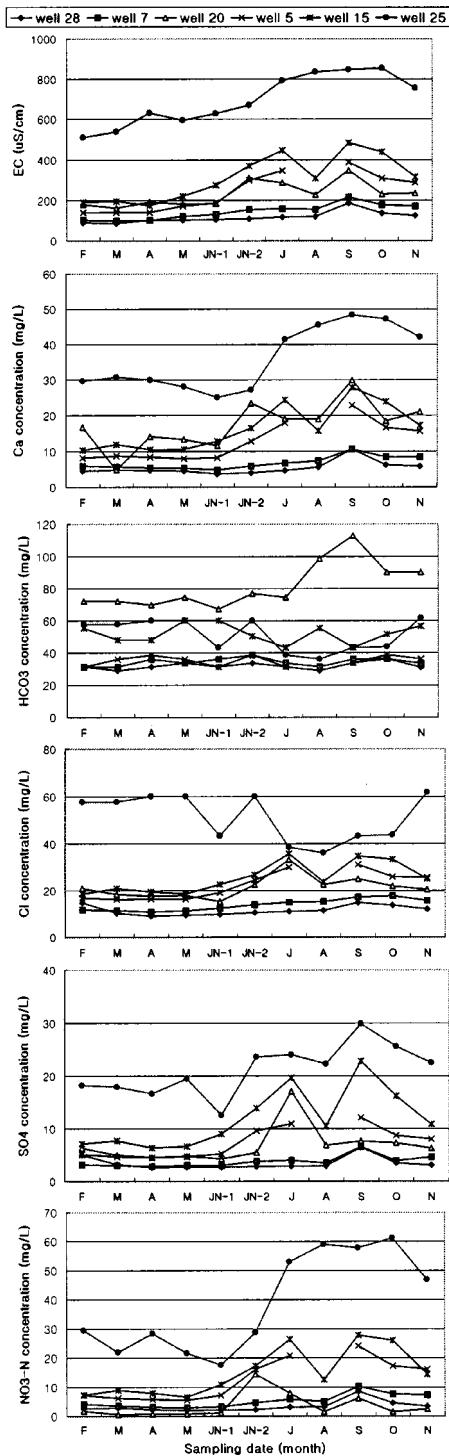


Fig. 6. Temporal variations of EC and major ionic compositions (Ca , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- -N) in groundwater from selected wells (28, 7, 20, 5, 15, 25): JN-1 and JN-2 indicate that there were two sampling rounds in June.

터 유입되어 증가된 것임을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 해수침투의 영향을 보이는 우물 10과 25에서도 살펴 볼 수 있다. 즉, 강우의 영향이 크게 나타나는 경우에 지표로부터 유입된 염분의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 염소 농도가 50 mg/L 이상으로 높게 나타나는 우물들(10, 24, 25)은, 강우의 영향이 직접적으로 나타나지 않는 경우에는, 질산성질소와 염소의 농도가 상관성이 없으며, 결국 이들 우물에서의 높은 염소농도는 해수에 의한 영향임을 지시한다. 특히 우물 14에서는 높은 염소 농도에도 불구하고 질산성질소는 전혀 검출되지 않고 있다.

연구지역의 동부에서 지하수 수질의 시공간적 분포와 변화특성을 연구하기 위하여 지하수 유동경로의 상류로부터 하류로 가면서 일련의 우물들(28, 7, 20, 5, 15, 25)을 선정하여 이들의 시간별 수질변화를 고찰하여 보았다. 이들 우물에서의 EC와 주성분 이온(Ca , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- -N)들의 월별 농도 변화를 보면, 국지적으로 수질의 변화가 3가지 유형으로 다르게 나타남을 볼 수 있다(Fig. 6). 즉, 지하수의 EC 값이 거의 강우에 근접한 수준에서 일정하게 유지되면서 다른 주이온들의 함량이 전체 시기에 걸쳐 비교적 일정하게 나타나는 상류 지역(우물 28, 7)과, 시료채취 시기와 강우시기의 관계에 따라 EC값과 주이온함량의 변화가 비교적 크게 나타나는 중류(우물 20, 5, 15)와 하류(우물 25) 지역으로 구분된다.

중류와 하류지역에서는 6월 중순 이후 강우의 영향이 주이온 농도들의 급격한 증가로 잘 반영되고 있으며, 결과적으로 EC 값도 상승한다. 하류 해안지역에 위치한 우물 25에서는 전술한 바와 같이 강우의 유입에 의해 질산성질소의 농도는 증가하나, 오히려 지하수 중의 염소농도는 감소하며, 반면에 EC 값은 지속적으로 증가한다. 또한 Ca 와 SO_4^{2-} 는 유사한 변화경향을 나타내었다. 따라서, 해수의 영향을 받아 상대적으로 높은 염소농도를 유지하던 지하수가 강우의 유입에 의해 희석되면서 염소농도는 낮아지지만, 상류에서 함양된 지하수가 이동하는 과정에서 지표오염물질의 유입과 물-암석반응의 결과로 용존이온의 총함량은 증가된 것으로 해석된다.

중류지역의 우물들에서는 6월에서 9월 사이의 풍수기에 주이온들이 동일한 증감양상을 보인다. 특이한 것은 우물 20으로, 다른 지점의 우물들에 비하여 HCO_3^- 의 함량이 월등히 높게 나타나며, 그 변화 역시 9월에 가장 높게 나타난다. 이러한 특징은 후술하는 동위원소의 함량에서도 잘 나타난다. 따라서, 비록 작은 소유

역 내에 지형적으로 비슷한 중류지역에 위치한 우물이 라도 지하수의 유동계는 국지적으로 다를 수 있으며, 궁극적으로 서로 다른 물-암석반응의 결과로 나타나는 지하수 수질 특성 역시 서로 다를 수 있음을 보여준다.

이러한 지역적 수질 특성에 근거하여 판단하여 보면, 본 연구지역의 상류 지역에서는 강우의 함양이 주로 일어나 지하수의 수질이 강우의 수질과 유사하게 유지 되는 반면, 중류 지역에서는 상류에서 함양된 지하수 뿐 아니라 국지적으로 분포하는 퇴적암층과 투수성 화산회토 등을 통하여 국지적으로 함양된 지하수에 의하여 지하수 수질이 결정됨을 알 수 있다. 나아가, 하류 지역은 상류에서 유입된 지하수와 인근지역에서 함양된 지하수 및 해수와 경계를 이루고 있는 담수성 기저 지하수가 함께 산출되는 지역으로서, 다른 지역에 비

하여 상대적으로 염소농도가 높게 나타나는 담수/해수 의 전이대 특성을 보이는 것으로 해석된다.

강우현상이 지하수 수질변화에 영향을 미치는데 걸 리는 시간을 평가하기 위하여, 연구지역 남부 송악산 에 위치하는 제주 고층관측소에서 관측된 강우 자료 (2000년 1월~11월)와 본 연구에서 수행된 지하수 시 료 채취시점을 비교하여 분석하였다(Table 1). 이 표에 의하면 7월 지하수 시료채취 시점의 3일 전에는 56 mm의 많은 강우가 있었다. 3월 시료채취 시점에도 시 료채취 6일 전에 18 mm의 강우가 있었으나 그 영향 은 수질 변화에 나타나지 않았다. 6월의 두 번째 시료 채취는 강우와 동시에 수행되었다. 시료채취 전날(Table 1; 6월 27일)과 당일(6월 28일)에 각각 11.6 mm와 25 mm의 강우가 있었으나, 이들이 지하수 수질에 미

Table 1. Daily precipitation at the Kocheng Weather Station of Jeju island in 2000

(unit : mm)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov
1	-	0.3	-	-	0.2	-	22.5	-	-	0	21
2	0.4	-	-	0.2	-	1.3	-	-	0.2	18	3.1
3	-	-	3.1	0	-	7	-	1.3	0	-	-
4	-	-	10.9	5	-	0.5	-	0.8	6.6	-	-
5	3.5	2.7	-	-	-	-	-	1.2	-	-	-
6	0.5	-	-	-	0.9	-	-	-	-	-	-
7	-	1.8	-	-	0.1	-	-	1.6	-	0.6	-
8	-	0.4	0	-	-	9.3	-	5.7	-	23.5	-
9	20	-	-	1.5	-	-	-	-	0	-	-
10	-	-	-	0.2	3.3	0.3	56	0.2	1.1	-	-
11	6	-	2.8	-	-	3.1	0.8	0	0.3	-	-
12	0.9	-	-	-	0.1	-	-	-	1.7	0	0
13	1	-	-	-	0.1	-	0.4	-	4.2	-	-
14	-	-	-	-	-	-	0.7	-	3.3	-	0
15	0	0.1	18	1.9	8.3	-	-	6.4	154.5	-	0.5
16	0.6	-	0.2	-	0.2	2.3	-	45	2.5	-	18.5
17	-	-	-	-	-	5.9	-	12.5	-	2	0
18	-	0.2	-	-	-	-	-	0	-	-	-
19	0.1	1.3	0	0	-	-	-	0	-	-	11.3
20	0.1	-	-	0	-	38.5	-	59	-	0	22.5
21	-	-	-	0.6	-	-	-	-	0	-	0
22	19.5	-	-	-	-	0.6	-	0.8	0	0.5	-
23	2.1	-	0.2	-	-	8.6	-	0.2	-	7.8	-
24	2	-	-	-	-	6.7	13.2	1.2	-	6.5	-
25	0.4	-	-	2.5	-	0.2	-	0.5	0.3	0.1	-
26	0.3	0.6	-	0.1	25	0	-	1.1	-	-	-
27	0.3	-	0.2	-	-	11.6	-	0	-	-	-
28	-	-	1.4	-	-	25	-	-	0.4	-	-
29	-	-	-	-	-	0	0.1	-	13	0	-
30	0	-	0	16.5	18.5	0.6	0.7	1.2	10.1	-	13.1
31	0	-	0.4	-	11	-	-	90.5	-	12.3	-

*Shaded dates indicate sampling periods.

치는 영향은 7월 시료채취 시점에 비해 적게 나타났다 (Fig. 6). 9월에는 시료채취 4일 전에 154.5 mm의 강우가 있었으며, 수질에 미치는 그 영향은 7월에 상응하게 나타났다. 이러한 사실은 이 지역의 지하수 흐름에 대하여 몇 가지 중요한 점을 시사한다.

첫째는, 강우가 지하로 함양되면서 지하수의 수질에 영향을 미치는데 걸리는 시간(즉, 강우가 지하수면에 도달하여 지하수의 수질을 변화시키는데 걸리는 시간)은 빠르면 3일 이내에 나타난다는 것이다. 농업기반공사(2000)에 의하면, 본 연구지역에 설치된 장기 지하수 관측공인 안성 관측공에서는 강우현상 이후에 최대 지하수위에 도달하는 지체시간이 6일 14시간으로 보고된 바 있다. 그러나 하나의 강우사건에 의해 나타나는 지하수위의 변화는 관측지점이 포함되는 해당 수역 전체의 함양에 관계되며, 특히 최대지하수위란 관측지점 상류지역에서 함양된 강우가 유동되는 시간이 누적되어 나타난 것이다. 그러나, 강우에 의해 유입되는 지표오염물질에 의해 지하수 수질이 좌우되고 있는 본 연구지역의 특성을 고려한다면, 수질보전과 오염관리 측면에서는 국지적인 오염원으로부터 강우에 의해 유입된 오염물질이 지하수면까지 도달하는데 걸리는 함양시간이 중요한 의미를 갖게 될 것이다.

둘째로는, 현재까지 수행된 월별 시료채취와 강우자료를 비교할 때, 연구지역에서 지하수로 함양되어 수질에 변화를 일으킬 수 있는 강우량은 적어도 20 mm/일 이상이 되어야 한다는 것이다. 그러나, 이 논거를 입증하기 위해서는 다양한 강우현상에 대하여 강우의 시작부터 최소 1주일 정도에 걸치는 연속적인 모니터링, 즉 event sampling 이 수행되어야 할 것이다. 현재 본 연구진에 의해 이러한 추가 연구가 준비되고 있다.

4.2. $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ 동위원소 분석자료

물의 산소와 수소 동위원소 자료는 주로 대기의 순환과 기후의 변화 그리고 강우로부터 기원된 지하수의 함양과 이동 특성에 관련된 연구에 활발히 이용되어 왔다. 대부분의 지하수는 강우가 함양되어 만들어지며, 세계의 많은 지역에서 지하수의 산소와 수소 동위원소 조성은 그 지역에 오랜 기간 동안 내린 강우의 연가중 평균값(mean weighted annual composition)과 유사한 것으로 보고되고 있다(Clark and Fritz, 1997). 이런 이유로 어떤 지역에서 산소와 수소 동위원소를 이용하여 지하수의 함양, 혼합 및 이동 특성을 연구하기 위해서는 그 지역에 내리는 강우의 산소와 수소 동위

원소 자료가 필요하다.

육지에서 약 100 km 떨어진 화산섬인 제주도에서는 생활에 필요한 물을 강우에 의하여 함양된 지하수에 전적으로 의존하고 있다. 투수성이 양호한 화산쇄설물과 미고결 퇴적암 등이 화산암내에 분포하고 있으며, 지하수의 흐름을 용이하게 하는 수직절리 등이 잘 발달되어 있기 때문에 강우는 지상에 내리자마자 지하로 침투하여 사라져버리는 독특한 수리지질 특성을 보인다. 이러한 특징 때문에 제주도는 산소와 수소 동위원소를 이용하여 강우의 지하수 함양 특성과 지하수의 이동을 연구하기에 효과적인 지역이다.

제주도에서 동위원소 기법을 적용한 연구는 1966~1968년에 처음으로 한국원자력연구소와 국제원자력기구(IAEA)에 의해 공동 수행되었다. 이 연구에서 얻은 삼중수소와 산소 동위원소 자료를 이용하여 Davis *et al.*(1970)은 제주도 지하수의 평균체류시간을 2~9년으로 추정한 바 있다. Ahn *et al.*(1992)은 제주도 동부 지역과 서부 지역 지하수의 산소와 수소 동위원소 조성을 비교하여 동부 지역 지하수는 해수 침입에 의하여 동위원소 조성이 부화되었다고 주장하였다.

이광식 등 (1997)은 제주도 성산에서 1995~1996년에 채취한 개별 강우의 산소와 수소 동위원소 조성이 계절 변화를 보이지 않지만 $d_{\text{값}}(d=\delta^2\text{H}-8\delta^{18}\text{O}; \text{Dansgaard, 1964})$ 이 뚜렷한 계절 변화를 보이는 현상을 발견하였다. 후에 Lee *et al.*(1999)은 이러한 $d_{\text{값}}$ 의 계절 변화를 이용하여 제주도에서 강우의 지하수 함양 특성을 연구하였다. 그들은, 많은 온대 지역과는 달리, 제주도에서는 특정한 계절에 편중되어 지하수가 함양되는 것이 아니고 연중 내내 내리는 강우가 모두 지하수 함양에 영향을 주고 있음을 발견하였다. 또한 그들은 제주도 용천수에 고도효과($-0.15\text{‰}/100 \text{ m}$ for $\delta^{18}\text{O}$, $n=6$, $r^2=0.98$)가 뚜렷하게 나타남을 보고하고, 이 고도효과는 지하수가 함양된 평균고도를 추정하는데 유용하게 이용될 수 있음을 제안하였다. 본 연구에서 얻은 3월, 7월, 10월 지하수의 동위원소 조성은 $\delta^{18}\text{O}$ 는 $-7.7\text{‰} \sim -6.0\text{‰}$ 이고 $\delta^2\text{H}$ 는 $-53\text{‰} \sim -38\text{‰}$ 로서 앞서 언급된 기존 연구자들의 범위 안에 속한다(Table 2). 이들 자료는 모두 제주도 우기 강우(rainy season precipitation)에서 얻은 지역순환수선($\delta^2\text{H}=7.94\delta^{18}\text{O}+8.84$; Lee *et al.*, 1999) 주변에 도시되며(Fig. 7), 따라서 이들 지하수가 강우에서 기원된 것임을 지시한다. 이 둘 동위원소 조성은 전체적으로는 유사한 값을 지니는 것으로 보이지만, 자세히 보면 이들은 각기 서로 다른 그룹으로 구분됨을 알 수 있다. 즉, 3월, 7월, 10

Table 2. $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values of groundwater samples.

	March, 2000		July, 2000		October, 2000	
	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$
Mean	-6.8	-46.5	-7.2	-50.0	-7.1	-46.3
STD	0.2	1.3	0.3	1.9	0.3	2.1
Max	-6.1	-43.6	-6.2	-44.3	-6.0	-38.2
Min	-7.1	-48.7	-7.7	-52.9	-7.4	-49.4

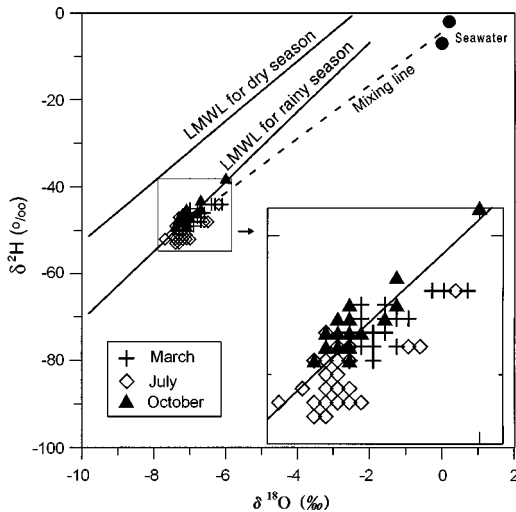


Fig. 7. $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ plots for groundwater samples collected in March, July and October: LMWL denotes the Local Meteoric Water Line. LWMLs for dry and rainy seasons were defined as $\delta^2\text{H}=6.92\delta^{18}\text{O}+16.60$ and $\delta^2\text{H}=7.94\delta^{18}\text{O}+8.84$, respectively (Lee *et al.*, 1999).

월의 $\delta^2\text{H}$ 값과 $\delta^{18}\text{O}$ 값을 도시한 점들은 시기별로 서로 다른 군집을 이루고 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 7). 이중 7월 지하수가 산소와 수소 동위원소 조성이 가장 가벼운 특징을 보인다. 3월과 10월 자료는 산소 동위원소는 유사한 범위에 해당되지만 10월 강우의 수소 동위원소 조성이 3월 강우보다 좀더 부화된 특징을 보인다. 7월 자료가 가장 동위원소 조성이 가벼운 것은, 여름철 강우에 나타나는 우량효과(amount effect)를 반영하기 때문이다(이광식 등, 1997; Lee *et al.*, 1999). 제주도에서 여름철이 6월부터 9월까지 지속된다고 생각할 때 7월 지하수에 우량효과가 나타나는 것은 강우에 의하여 지하수가 빠르게 영향을 받고 있음을 의미한다. 아울러 3월, 7월, 10월 지하수의 동위원소 자료가 각기 다른 군집으로 도시되는 점은 강우가 지하수면에 도달되는 속도가 한달 이내로 매우 빠름을 의미하는데, 이 점은 화학분석 결과에서 얻은 해석을 지지

하는 것이다.

10번, 20번, 25번 우물에서 채취한 지하수들은 다른 우물에서 얻은 시료들보다 산소와 수소 동위원소 조성이 뚜렷이 부화되어 도시된다. 이들 우물과 해안선과의 거리로 보면 우물 20이 해안에 가장 멀리 위치하고 우물 10번이 해안에 가장 근접하여 위치하고 있다. 그리고 우물 25는 이들 사이에 위치한다(Fig. 1).

우물 10번에서 얻은 화학분석 자료는 이 우물이 해수에 의한 영향을 가장 많이 받았음을 지시한다. 즉, 이 우물의 EC, Na, Ca, Mg, Cl, SO_4 농도는 다른 우물에 비해 뚜렷이 높다. 앞서 기재한 바와 같이, 이들 성분의 높은 농도는 인위적인 오염의 결과가 아니라 주로 해수유입에 의한 변화로 판단된다. 따라서 우물 10에서 채취한 지하수의 산소와 수소 동위원소 조성의 부화는 해수의 혼합에 의하여 일어난 현상으로 판단된다. 한편, 우물 10의 월별 지하수 동위원소 값을 보면 다른 우물에서 얻은 자료들에서 벗어나는 정도가 월별로 다르다. 이는 이 우물에서 해수와 강우기원 지하수와의 혼합비율이 일정하지 않음을 의미한다.

또한, 우물 25의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 다른 우물에 비해 매우 높아(17.6~61.2 mg/L) 지역적이고 인위적 오염원에 의하여 오염이 진행되고 있음을 의미한다. 그러나, 다른 화학분석 자료 및 산소와 수소 동위원소 조성은 이 우물이 인위적인 오염뿐만 아니라 해수에 의한 영향을 받았음을 보여준다.

3개의 우물 중 해안에서 가장 먼 곳에 위치하는 우물 20의 화학분석 자료는 우물 10과 25에 비해 해수에 의한 영향이 훨씬 적음을 지시한다. 하지만 건기인 3월과 특히 10월의 동위원소 조성은 우물 10과 25에 비해 더 부화된 특징을 보인다. 이러한 특징은 해수에 의한 오염만으로 설명하기가 불가능하다. 제주도 용천수가 강우의 동위원소 고도효과를 잘 반영하고 있음을 고려할 때(Lee *et al.*, 1999), 이 우물의 지하수는 다른 우물보다 평균고도가 낮은 지역에서 함양된 지하수에서 유래하였을 가능성이 크다. 즉, 연구 지역에서 우물 20은 다른 우물들과는 함양 지역이 뚜렷이 다르며,

함양지역에서 우물 20으로 이동하는 중에 다른 우물로 이동하는 지하수와 별로 혼합되지 않음을 의미한다.

4.3. 질산성질소에 의한 지하수 오염

전 세계적으로 대부분의 국가에서 질산성질소의 먹는물 수질기준은 10 mg/L 이며, 이 기준치를 초과하는 물을 신생아가 섭취할 경우 청색증(blue-baby syndrome)을 유발하는 것으로 알려져 있다(Follett and Walker, 1989). 일반적으로 지하수 중의 질산성질소는 자연상태에서 3 mg/L 이하인데, 그 이상의 농도는 화학비료, 축산시설의 분뇨 및 폐수, 생활하수, 부패된 음식물 등으로부터 생기는 유기질소가 유입되어 발생된다.

연구지역은 대부분 밭작물과 하우스(시설작물) 재배 지역, 민가가 집중된 대정 마을, 대형 축사 등이 산재하고 있어, 지하수 중에 질산성질소의 농도는 국지적인 오염원의 영향을 받아 비교적 높게 나타나리라 예상되었다. 그러나 질산성질소 농도 분포를 월별로 확인한 결과, 먹는물 기준치 이상으로 나오는 지점은 2월의 경우 3곳(우물 23, 24, 25) 뿐이며, 3월부터 6월까지의 유사한 농도분포를 보인다. 반면, 7월의 질산성질소 농도는 다른 달에 비해서 전체적으로 높은 값을 보이는데, 특히 지하수 염도가 비교적 높은 동남부 지역(우물 10, 25, 30, 15, 31, 5, 4)과 서부의 양돈축사 및 그 하류구간(우물 13, 9, 19, 16, 18, 2, 24)에서 높게 나타났다(Fig. 1). 대정 마을에서는 지하수의 흐름상 하류지역에 해당됨에도 불구하고 질산성질소의 농도 변화가 거의 없으며, 오히려 상류에 비해 낮은 농도를 보이고 있다. 이러한 질산성질소의 시공간적 분포와 변화는, 본 연구지역 지하수에서 검출되는 질산성질소가 국지적인 지표오염원으로부터 기인하지만, 지하수의 유동경로에 따라 그 확산 범위가 변할 수 있음을 시사한다. 예를 들어, 우물 14와 25는 서로 인접해 있으면서도, 25에서는 높은 질산성질소가 검출되나 14에서는 월별 관측자료 모두에서 질산성질소가 분석기기의 검출한계 이하로 거의 검출되지 않고 있다. 상부 토지가 밭작물 재배로 동일하게 이용되고 있으면서도 두 우물에서 현격한 질산성질소의 농도 차를 보이는 것은 각 우물이 서로 다른 지하수 유동경로에 설치되어 있음을 시사한다.

제주도 광역수자원본부에 의해 본 연구지역에서 관측된 지하수 중의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 관측기간 중에 최소 0.0‰부터 최대 17.3‰로 평균치는 4.5‰ 이었다. Komor and Anderson(1993)에 의하면 질산성질소의 오염원별 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 화학비료인 경우에 $-4\sim+4\%$, 자연적 토양

유기물에서는 $+4\sim+9\%$, 동물분변으로 추정되는 경우에는 $+10\sim+22\%$ 정도로 보고하고 있다. 본 연구에서 10‰ 이상으로 관측된 지점은 우물 6과 11로 축산단지의 하류 지역에 위치하는 지점이었으며, 오히려 축산 인근에 위치하는 우물 16, 19에서는 최소 4.7‰에서 최대 6.0‰로 나타났다. 이러한 분포는, 지표에 위치한 특정한 오염원에서 배출된 오염물질이 지하수로 유입되는 경우, 특히 제주도과 같이 선택적 지하수 유동경로가 주 지하수의 흐름경로로 발달된 지역에서는, 오염원과 상당한 거리를 두고 있는 우물에서도 그 영향이 나타날 수 있음을 보여준다. 나아가, 지하수 수질 관리측면에서도, 오염원 인근의 우물에 대한 관측과 조사를 실시할 때, 정확히 지하수의 유동경로를 통과하는 우물에 대한 관측자료만이 적절한 오염대책 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있음을 보여준다.

질산성질소의 오염원을 규명하기 위하여 질소동위원소($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3$) 값과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도를 비교하여 도시한 그림(Fig. 8)을 보면, 우선적으로 질산성질소의 농도가 약 10 mg/L 이상(먹는물 수질기준)으로 나타나는 부분들과 그 이하의 지역으로 구분이 가능하다. 이 그림에서 연구지역의 서부 축산단지 하류에 위치하는 지역(우물 13, 9, 19, 16, 18, 2, 24; Fig. 1 참조)과 동남부의 성산층이 분포하는 지역(우물 10, 25, 30, 15, 31, 5, 4)의 우물들에서 대체적으로 질산성질소의 농도가 10 mg/L 이상으로 나타났다. 상류에 개간된 지역과 중

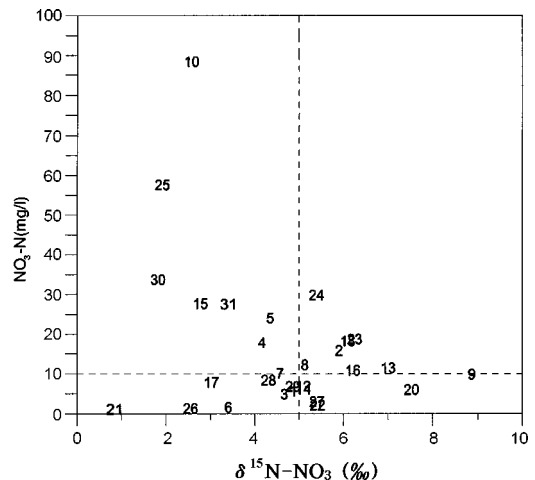


Fig. 8. Plots of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations versus $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3$ in groundwater: Horizontal dashed line indicates the drinking water standard for $\text{NO}_3\text{-N}$, and vertical one implies the boundary of possibly different sources for nitrate in groundwater.

부의 대정 마을 지역은 비교적 농도가 낮게 나타났다. 질소동위원소 자료에 의하면, 오염이 확인된 서부와 동남부 지역이 확연히 구분된다. 발작물 재배를 주로 하는 농지인 동남부 지역에서는 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 5‰ 이하로 나타나고 있어 화학비료의 영향을 반영한다. 반면, 서부의 축산단지 하류 지역에서는 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 5‰ 이상으로 나타나고 있어, 축산폐수의 영향을 일부 받은 것으로 평가된다. 국지적으로 질산성질소의 농도가 먹는물 기준치인 10 mg/L에 근접하며 질소 동위원소의 값이 4-6‰ 범위에 나타나는 우물(1, 7, 8, 11, 12, 28) 등은 대정 마을 지역의 생활오폐수의 영향(우물 1, 12)과 농지의 비료 영향(우물 7, 8, 11, 28)이 나타나고 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서 질산성질소의 질소 동위원소 자료를 사용하여 질산성질소 오염원의 영향을 정량적으로 평가하지는 못하였으나, 지하수 중 질산염의 오염원이 무엇이며, 이들이 어느 정도 영향을 미칠 수 있는가 하는 정성적인 영향 범위는 확인할 수 있었다. 이러한 자료를 기초로 하여 유역 특성을 감안하여 지역적으로 일 단위의 연속적인 모니터링을 수행한다면, 지역적 오염원과 오염 확산 영역 및 지하수 오염에 대한 상대적인 영향도를 보다 정확하게 규명할 수 있을 것이며, 결국 지하수 사용자를 위한 오염 예보 내지 조기 경보 체계 구축에 기여하게 될 것이다.

5. 결 론

본 연구 결과로부터 유추된 내용을 정리하면 다음과 같다:

1. 연구지역 지하수의 배경수질은 전반적으로 $\text{Na}(\text{Mg})\text{-HCO}_3$ 유형이 우세하나, 국지적으로는 Ca-HCO_3 및 Na-Cl 유형 등도 나타난다.

2. 주 이온함량 및 EC 값의 변화, 질산성질소와 염소이온과의 상관관계 등 시·공간적 지하수 수질 변화 자료는 연구지역에서 강우의 지하수 함양시간이 3일 이내임을 지시하며, 서부 지역보다 동부 지역에서 그 변화가 심하게 나타났다. 이러한 지하수 수질의 시공간적 변화는 국지적으로 발달된 지하수 유동경로의 변화, 강우의 함양과 이에 따른 지표오염물질의 유입, 해안지역에서의 해수침투 등에 의해 복합적으로 영향을 받고 있는 것으로 해석된다.

3. 질산성질소에 의한 오염도의 시간적 변화는 강우의 함양사건에 직접적으로 관계된다. 실제로 질산성질소의 월별 농도변화를 보면, 강우 후 정도의 차이는

있으나 2~8배의 농도 증가를 보였다. 오염도의 지역적 변화는 국지적 오염원의 분포와 더불어, 화산암체에서 전형적으로 나타나는 선택적 지하수 흐름경로의 문제가 복합적으로 작용하는 것으로 해석된다.

4. 지하수의 산소·수소 동위원소비는 시기별로 채취된 지하수가 근본적으로 서로 다른 강우로부터 기인하였음을 지시하며, 이는 결국 강우로부터의 지하수 함양이 빨리 일어남을 의미한다.

5. 질소동위원소 자료를 사용하여, 질산성질소에 의한 지하수 오염원을 정성적으로 구분할 수 있으며, 궁극적으로 공간적인 오염 영향 범위를 파악할 수 있었다. 연구지역의 동남부에서는 발작물 재배를 주로 하는 농지이므로 비료의 영향에 의하여 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 5‰ 이하로 나타나고 있으며, 서부의 축산단지 하류 지역에서는 축산폐수의 영향으로 인해 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 5‰ 이상으로 나타난다.

6. 결론적으로, 지하수의 지속적인 수질 관측 자료는 지하수 함양과 이에 따른 지표오염물질의 유입에 의한 지하수 오염현상을 시·공간적으로 평가하고 예측하는데 중요한 요소로 활용할 수 있다. 특히, 지하수에 함유된 환경동위원소의 분석자료는 함양된 지하수의 근원을 추정하고 지하수의 유동경로를 유추하는데 중요한 정보를 제시하며, 지하수 오염의 영향범위 등을 평가·예측하는데 활용이 가능하다.

사 사

본 연구의 현장 시료 채취 및 분석에 도움을 주신 제주도 광역수자원관리본부, 제주발전연구원, 제주도 보건환경연구원 관계자 및 지역주민 여러분들과, 보다 좋은 논문을 위해 친절한 제안을 해주신 전북대 오창환 교수님과 고려대 윤성택 교수님께 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-13200-003-3)와 연세대 학술과제(2000-1-0075)의 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 고기원 (1997) 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성. 박사학위논문. 부산대학교, 325p.
- 고기원, 문영석, 강봉래 (1998) 제주도 해안지역에서 담·염수 혼합대 하부에 발달한 담수 대수층에 관한 사례연구. 대한자연환경지질학회·(사)대한지하수환경학회 공동학술발표회 발표논문 요약집, p. 155-156.
- 김길성, 김성홍, 이창환, 오순미, 김태현, 김세라, 김민진, 고용구 (1999) 지하수의 질산성질소 오염원조사. 제주

- 도보건환경연구원보 10권, p.167-182.
- 김봉균 (1969) 제주도 신양리 및 고산리지구의 신양리층에 대한 층서 및 고생물학적 연구. 지질학회지 5권, p. 103-121.
- 김옥준 (1969) 제주도 수자원의 특수성과 개발방안. 광산지질, 2권, p. 71-80.
- 김인수, 이동호 (2000) 제주도 서귀포층과 서귀포조면암층 노두의 자기층서와 대자율. 지질학회지, 36권, p. 163-180.
- 김정률, 허원철 (1995) 제주도에 분포하는 서귀포층의 퇴적구조와 생흔 화석의 고환경적 의의. 한국지구과학회지, 16권, p. 232-246.
- 농업기반공사 (2000) 제주도 지하수 보전·관리계획 보고서. 제주도, 588 p.
- 농업진흥공사 (1971) 제주도 지하수보고서. 382p.
- 농업진흥공사 (1989) 제주도 지하수 장기개발계획 조사보고서. 396p.
- 부성안, 정교철 (2000) 제주도 동부권역 담지하수 대수층에서의 염수침입. 지질공학, 10권, p. 115-130.
- 송영철, 고용구, 유장걸 (1999) $\delta^{15}\text{N}$ 을 이용한 제주도 지하수 중의 질산염 오염원조사. 지하수환경, 6권, p. 107-110.
- 안종성, 한정상, 이정호, 정창조, 유장걸 (1984) 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구. 한국수문학회지, 17권, p. 72-79.
- 오윤근, 현익현 (1997) $\delta^{15}\text{N}$ 값을 이용한 제주도 지하수 중의 질산성질소 오염원추정에 관한 연구. 지하수환경, 4권, p. 1-4.
- 오진용, 이성숙, 윤선, 고기원, 윤혜수, 이종덕 (2000) 제주도 지하층서. 지질학회지, 36권, p. 181-194.
- 윤정수, 박상운 (1998) 제주도 용천수의 수리화학적 특성. 지하수환경, 5권, p. 66-79.
- 이광식, 이인성, 최만식, 박은주 (1997) 제주도 강수의 환경 동위원소 연구. 지질학회지, 33권, p. 139-147.
- 이문원, 원종관, 이동영, 박계현, 김문섭 (1994) 제주도 남사면 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 지질학회지, 30권, p. 521-541.
- 제주도 (1999) 제주의 물: 용천수. 392p.
- 제주발전연구원 (1999) 제주도 지하수순환시스템 조사. 제주도, 446p.
- 진성원 (1994) 제주 지하수 장기관측조사. “제주도 지하수 자원의 환경학적 보전과 개발이용” 심포지엄 자료집, 1994, 7. 29-30, 서울, 대한지하수환경학회, p. 116-144.
- 최순학, 김영기 (1989) 제주도 지하수의 수질특성. 지질학회지, 25권, p. 230-238.
- 최순학, 김영기, 이동영 (1991) 제주도 임해지역에서의 해수침입. 광산지질, 24권, p. 319-327.
- 최순학 (1992) 제주도와 Oahu도의 지질구조 및 수자원의 특성. 지질공학, 2권, p. 70-91.
- 한정상 (1994) 제주도 지하수 자원의 보호 전략에 관한 연구. 지질학회지, 30권, p. 325-340.
- 한정상, 한규상, 김창길, 김남중, 한찬 (1994) 제주도 지하수 자원의 최적개발 가능량. 지하수환경, 1권, p. 33-50.
- 현해남, 오상실 (1994) 제주도 토양의 오염물질 흡착능과 지하수 오염. “제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발이용” 심포지엄 자료집, 서울, 대한지하수환경학회, p. 26-53.
- Ahn, J.S., Kim, S.J., Kim, J.W. (1992) Environmental isotope studies on seawater intrusion into the south-eastern coastal aquifer on Cheju Island. In Isotope Techniques in Water Resources Development, IAEA Symposium 319, March 1991, Vienna, p. 740-747.
- Clark, I.D. and Fritz, P. (1997) Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, New York, 328p.
- Dansgaard, W. (1964) Stable isotopes in precipitation, Tellus, v. 16, p. 436-468.
- Davis, G.H., Lee, C.K., Bradley, E. and Payne, B.R. (1970) Geohydrologic interpretations of a volcanic island from environmental isotopes. Water Resources Research, v. 6, p. 99-109.
- Follett, R.F. and Walker, D.J. (1989) Ground water quality concerns about nitrogen. In Follett, R.F.(ed) Nitrogen management and ground water protection, developments in agricultural and managed-forest. Ecology 21, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands. p. 1-22.
- Hahn, J., Lee, Y., Kim, N., Hahn, C. and Lee, S. (1997) The groundwater resources and sustainable yield of Cheju volcanic island, Korea. Environmental Geology, v. 33, p. 43-53.
- Hem, J.D. (1992) Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. USGS Water-Supply Paper 2254 (3rd ed.)
- Komor, S.C. and Anderson Jr., H.W. (1993) Nitrogen isotope as indicators of nitrate sources in Minnesota Sand-Plain Aquifers. Ground Water, v. 31, p.260-270.
- Lee, K.S., Wenner, D.B. and Lee, I. (1999) Using H- and O-isotopic data for estimating the relative contributions of rainy and dry season precipitation to groundwater: example from Cheju Island, Korea. Journal of Hydrology, v. 222, p. 65-74.
- Mink, J.F. (1993) Groundwater Occurrence and Behavior (unpublished report).
- Stewart, B.A., Viets, F.G. Jr., Hutchinson, G.L. and Kemper, W.D. (1967) Nitrate and Other Water Pollutants under Fields and Feedlots. Environmental Science & Technology, v. 1, p. 736-739.

2001년 8월 31일 원고접수, 2001년 10월 23일 게재승인.