



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

제주도 서귀포지역 탄산온천수 및 탄산수의 기원과 수리화학특성

Origin and Hydrochemical Characteristics of Carbonated hot
spring water and Carbonated-water at Seoqwipo, Jeju island

대전대학교 대학원

건설안전방재공학과 건설안전방재공학 전공

이 용 천 (Lee, Yong Cheon)

2017년

석사학위논문

제주도 서귀포지역 탄산온천수 및 탄산수의 기원과 수리화학특성

Origin and Hydrochemical Characteristics of Carbonated hot
spring water and Carbonated-water at Seoqwipo, Jeju island

대전대학교 대학원

건설안전방재공학과 건설안전방재공학 전공

이 용 천 (Lee, Yong Cheon)

2017년 2월

제주도서귀포지역탄산온천수
및탄산수의기원과과수리화학특성

이
용
천

2
0
1
7

석사학위 청구논문

제주도 서귀포지역 탄산온천수 및
탄산수의 기원과 수리화학특성

Origin and Hydrochemical Characteristics of Carbonated hot
spring water and Carbonated-water at Seoqwipo, Jeju island

지도교수 정 찬 호

이 논문을 공학석사학위 청구논문으로 제출함

2016 년 10 월

대전대학교 대학원

건설안전방재공학과 건설안전방재공학전공

이 용 천 (Lee, Yong Cheon)

이용천의 공학석사학위 청구논문을 인준함

2016 년 12 월

심사위원장

심사위원

심사위원

대전대학교 대학원

목 차

목 차	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
제1장 서 론	1
제2장 연구지역	3
2.1 지질특성	3
제3장 연구방법	6
3.1 물 시료 채취 및 화학성분 분석	6
3.2 동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$) 분석	8
3.3 CFCs(Chlorofluoro carbons) 분석	9
3.4 삼중수소(Tritium) 분석	10
3.5 영족기체(Noble gas) 분석	11
제4장 수리지화학 특성	12
4.1 현장수질측정 결과	12
4.2 주요 화학 성분	16
4.3 미량원소 성분	18
4.4 수리화학적 유형	21
제5장 안정동위원소 특성	23

5.1 산소-수소 동위원소	23
5.2 탄소 동위원소	27
5.3 CFCs 동위원소	30
5.4 삼중수소(Tritium) 동위원소	33
5.5 영족기체(Noble gas) 동위원소	38
제6장 결 론	42
참고문헌	43
Abstract	50
감사의 글	

List of Tables

Table 1. Geochemical compositions of water samples collected in the Jeju island	13
Table 2. Trace elements of water samples collected in the study area	19
Table 3. $\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$ composition of water samples collected in the study area	25
Table 4. Recharge age and concentration of water samples collected in the study area	31
Table. 5. Tritium concentration of precipitation in Jeju area	35
Table. 6. Recharge age and Tritium concentration of carbonated water collected in the study area	40
Table. 7. The isotopic ratio of noble gases of water samples collected in the study area	39

List of Figures

- Fig. 1.** Geological section and location map showing the points collection of carbonated water, groundwater, surface water, ocean water in the study area at the Jeju island 6
- Fig. 2.** Geological section and location map showing the points collection of carbonated water, groundwater, surface water, ocean water in the study area at the Jeju island 15
- Fig. 3.** Box-whisker plots showing the statistical variations of major ions in carbonated groundwater(CG) and groundwater(G) samples collected in the study area 17
- Fig. 4.** Trilinear plots showing the chemical types of water samples in the study area 22
- Fig. 5.** The correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and δD isotopes of water samples collected in the study area 26
- Fig. 6.** The correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ isotopes of samples collected in the study area 29
- Fig. 7.** CFCs North American average curve 32
- Fig. 8.** Hourly variation for tritium concentration of respectively regional precipitation 37
- Fig. 9.** Origin of noble gases of carbonated groundwater(CG) and groundwater(G) samples collected in the study area 41

논문요약

제주도 서귀포지역 탄산온천수 및 탄산수의 기원과 수리화학특성

본 연구에서는 제주 서귀포지역에서 산출되는 탄산수의 수리화학적 성분, CFCs(Chlorofluoro carbons), $\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, 영족기체(Noble gases) 동위원소 분석을 통하여 탄산온천수의 생성연령, CO_2 가스 기원, 영족기체 기원을 해석하고자 하였다.

연구지역인 서귀포 중산간 지역의 지질은 범정동조면현무암, 광해악현무암이 분포하며, 산방산 탄산온천일대에 분포하는 지질은 한라산조면암, 대포동조면현무암, 강정동현무암질조면안산암이 분포한다.

본 연구를 위하여 탄산수 13점, 지하수 11점, 지표수 1점, 해수 1점의 시료를 1차 ~ 3차로 나누어 채취하였으며, 지하수공의 심도는 탄산수 460 ~ 2,000 m, 지하수 240 ~ 550 m로 다양한 심도를 보인다.

연구결과 제주지역 탄산수는 약산성의 pH, 평균 3,704 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 높은 전기전도도로 내륙의 탄산수에 비해 3배 이상 높은 전기전도도의 특성으로 이온함량이 매우 높은 특성을 보인다. 탄산수의 화학적 유형은 $\text{Mg}(\text{Ca},\text{Na})\text{-HCO}_3$ 유형과 $\text{Na}(\text{Ca},\text{Mg})\text{-HCO}_3$ 유형을 보이며, 지하수의 경우 $\text{Mg}(\text{Ca})\text{-HCO}_3$ 유형에서 $\text{Na}(\text{K})\text{-HCO}_3$ 유형에 걸쳐 넓게 분포한다.

CFCs를 통하여 생성연령을 분석한 결과, 탄산수는 약 47.5 ~ 57.2년, 지하수는 약 30.3 ~ 49.5년으로 추정되었다. 탄산수의 연령이 지하수보다 더 오래된 것으로 밝혀졌다.

$\delta^{13}\text{C}$ 동위원소 분석결과 탄산온천수는 맨틀과 마그마 기원과 같은 심부기원으로 확인되었고, 일부 탄산수는 심부기원과 무기기원의 혼합된 특성을 보인다. 또한 영족기체 동위원소 분석결과, 제주지역 탄산수와 지하수는 맨틀 마그마와 같은 심부

기원-대기기원 혼합선상에 도시되나, 헬륨가스가 대기기원보다 심부기원의 농도가 절대적으로 높은 값을 보여준다. 따라서, 영족기체 동위원소 조성관계($^3\text{He}/^4\text{He}$, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$)에서 헬륨 등이 심부기원으로 확인되어 CO_2 가스의 기원이 화산활동과 관련한 심부 마그마 기원임을 시사한다.

주제어 : 수리화학 , CFCs(Chlorofluoro carbons), $\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$,
영족기체(Noble gas), 생성연령

제1장 서론

국내 천연탄산수는 경북 북부지역, 강원도 오대산-설악산 일대, 충청지역 청원-충주일대에 걸쳐 주로 산출되는 것으로 알려져 있으며, 그들의 산출은 대부분 유라기화강암과 밀접한 관계를 보인다. 즉, 유라기화강암과 편마암 내지는 백악기 퇴적암과의 지질경계, 그리고 화강암내 단층대, 그리고 암맥군 등을 따라서 주로 산출된다(정찬호, 2002, 2004, 정찬호 외, 2001, 2011, 2012; Park et al., 2016).

국내 탄산수의 수리화학적 특성은 pH 6.0 내외의 약산성으로 이온성분의 함량이 일반지하수에 비하여 높고, 탄산과 중탄산의 조화로 소화기능 개선 및 피부병, 위장병 치료등 효능이 있는 것으로 알려져 있다. 국내의 일부 산출지역에서는 철, 불소, 망간의 함량이 음용수 수질기준보다 초과하는 지역도 있으나(Jeong et al., 2005), 탄산수는 약수로서 일반음용수의 수질기준과는 다르게 접근되어야 할 것이다.

국내에서 진행된 탄산수 연구는 탄산수의 산출과 지질구조와의 관계, 약수에 대한 수질화학적 특성과 지화학적 진화특성 해석, 안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$) 분석을 통하여 CO_2 가스의 기원에 대한 해석등의 연구가 진행된 바 있다(고동찬 외, 1999a, 1999b; 최현수 외, 2000; 정찬호와 정기영, 1999; 정찬호, 2002, 2004).

그 중 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 동위원소와 지질구조와의 관계를 기초하여, 탄산약수의 CO_2 는 지하 심부기원이며, 순환수와의 반응 및 생성된 것으로 해석되어 왔다. 특히 정찬호(2002)은 탄산수 산출은 단층, 암맥 및 지질경계와 같은 지질구조를 따라 지배된다고 보고하였고, 다양한 지질구조가 지하심부의 탄산가스가 지하수계로 상승하는데 유리한 이동통로로서의 역할을 한다고 설명하였다.

국외의 연구에서는 탄산수의 생성은 단층대 및 지진대와 같은 지체구조, 화산활동과 성인적으로 밀접하게 관련되어 있는 것으로 알려져 왔다(Cornides and Kecskes,

1974; Barnes et al., 1978; Irwin and Barnes, 1980; Cornides and Cornides, 1983; Griesshaber et al., 1992; Ishibashi et al., 1995; Cerón et al., 1998; Marques et al., 2001). 국외의 연구에서는 탄산수 연구에 지구화학적 연구방법과 지구물리탐사 방법을 병행한 연구를 통하여 지질구조와 CO₂가스의 심부기원 해석을 명확하게 해석하기 위해서는 헬륨(³He, ⁴He)가스등 영족기체(Noble gas) 동위원소 연구가 필요하다고 제시하였다.

국내 탄산수 연구에서도 CO₂가스 기원에 대한 명확한 기원을 규명하고자 영족기체 동위원소 조성에 대한 연구가 병행된 바 있다. δ¹³C_{DIC} 동위원소의 분석, ³He/⁴He 동위원소 조성비와 관련하여 진행된 연구를 종합하면 보다 명확한 탄산약수의 기원 해석이 가능하다. 정찬호 외(2011)에서는 강원 및 경북 일부지역 탄산약수내 영족기체 동위원소(³He/⁴He, ²⁰Ne/²²Ne)의 존재비 분석을 통하여 CO₂가스 및 헬륨등 영족기체의 기원을 심부기원으로 해석하였다.

본 연구에서는 제주 서귀포지역에 산출되는 산방산 탄산온천, 디아넥스 탄산온천, 그리고 제주개발공사에서 개발한 탄산지하수를 대상으로 수리화학 특성과 함양시기, 그리고 CO₂ 가스의 기원을 밝히고자하였다. 이를 위하여 환경추적자인 CFCs 동위원소 분석을 통하여 지하수의 연대를 측정하였으며, δ¹³C_{DIC} 동위원소와 ³He/⁴He 동위원소비를 포함한 영족기체 분석을 통하여 탄산가스의 기원을 해석하였다.

제2장 연구지역

2.1 지질특성

지하수의 수리화학적 특성은 수리순환과정에서 모암과의 상호반응을 통한 지화학적 특성, 심부환경에서의 다양한 지질학적 환경에 의해서 지배된다. 탄산수의 수리지화학적 특성을 해석하기 위한 지질특성에 대한 조사는 기존의 지질도 및 도폭 설명서(제주도, 2000; 한국자원연구소, 2000)를 인용하였다. 연구지역의 지질도와 지질단면도는 **Fig. 1**에서 제시하였다.

제주개발공사에서 개발된 탄산수 산출지역의 지표지질은 법정동조면현무암, 광해악현무암이 분포하며, 산방산 탄산온천일대에 분포하는 지질은 한라산조면암, 대포동조면현무암, 강정동현무암질조면안산암이 주를 이룬다.

법정동조면현무암은 회색에서 암회색으로 1.0 mm 크기의 기공이 약 40% 정도 함유되어 있으나 노두에 따라 변화가 크며, 부분적으로 1.0 cm 크기의 기공이 신장된 양상을 보이기도 한다. 반정으로 장석이 우세하고 소량의 휘석과 감람석이 함유되어 있다.

광해악현무암은 회색에서 암회색으로 1~10 mm 크기의 기공이 약 20% 정도 함유하고 있으나 노두에 따라 변화가 크며, 부분적으로 2.0 cm 크기로 신장되어 있기도 한다. 반정으로 감람석이 우세하고 일부 소량의 휘석과 장석이 함유되어 있다.

한라산조면암은 회색의 암색으로 풍화면에서 담홍색 또는 담회색을 띤다. 직경이 1~2 m 내외의 주상절리 발달이 특징이며, 반정이 없이 치밀한 양상으로 나타나며, 장석이 반정 내지는 취반을 이루어 나타나기도 한다.

대포동조면현무암은 암회색으로 두께가 대략 5 m 내외이며 용암류 사이에는 1

m 내외의 크링커가 형성되어 있다. 5~10 mm 크기의 기공이 10% 정도 함유되어 있으며 반상조직을 보이며, 반정광물은 감람석, 휘석, 사장석으로 반정의 함량은 대략 20% 내외이다. 전체적으로 휘석이 우세하며, 부위에 따라서는 휘석이 대부분을 차지하기도 한다.

강정동현무암질조면안산암은 회색 내지는 암회색으로 하천 바닥에서 유동구조와 다량의 자파쇄각력을 함유하는 것이 특징이다. 부분적으로 치밀한 암상과 2 mm 크기의 기공이 다량 함유된 암상이 교호하면서 유동구조를 형성하기도 한다. 중문해 수욕장 해안에서 약 20 m의 두께를 갖고 직경이 1 m 인 주상절리가 발달되어 있다.

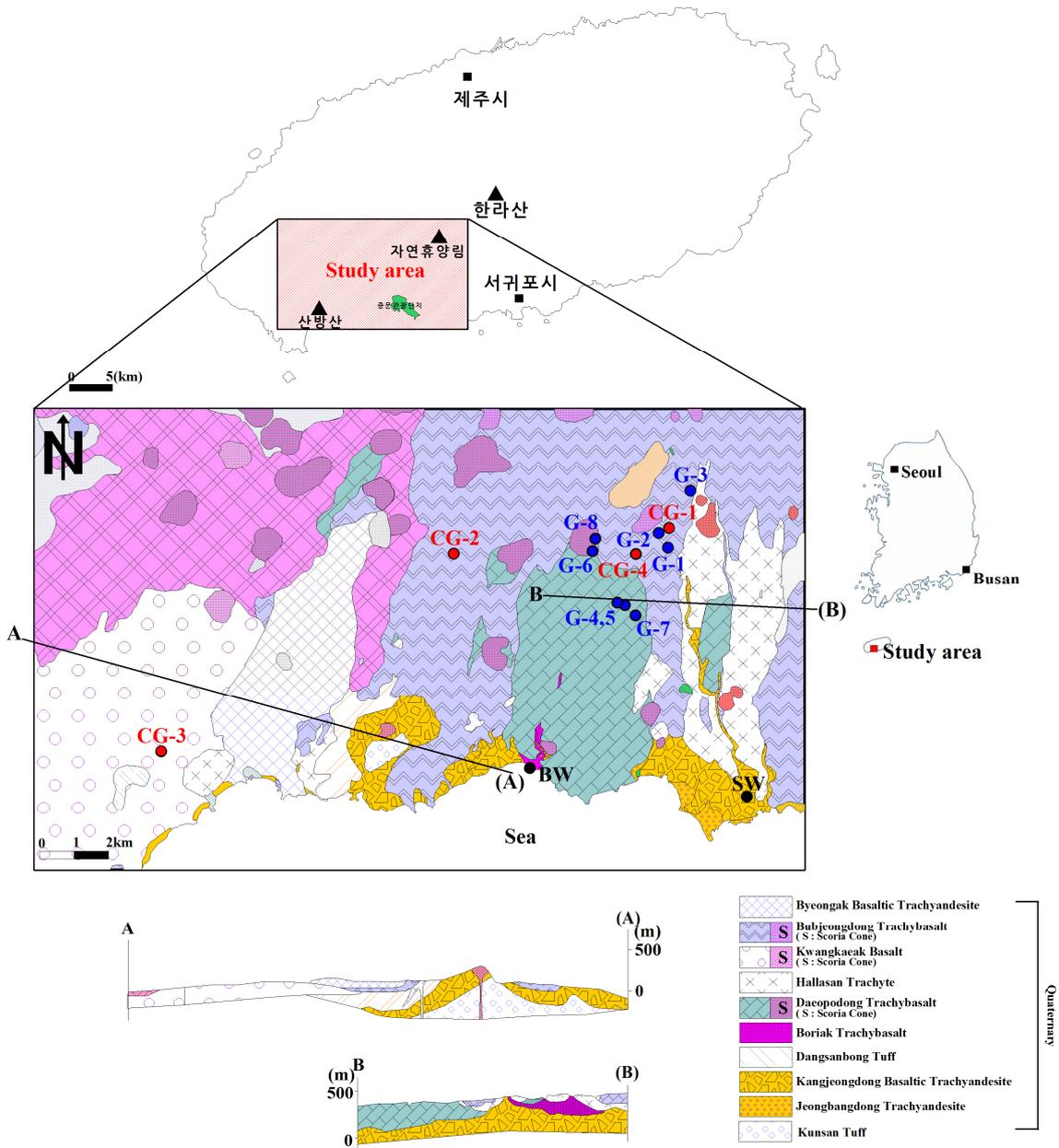


Fig. 1. Location and geologic map showing the sampling points of carbonated water, groundwater, surface water, ocean water in the study area of the Jeju island.

제3장 연구방법

3.1 물 시료 채취 및 화학성분 분석

탄산온천을 비롯한 물 시료 채취는 3차례에 걸쳐 이루어졌다. 1차는 2015년 9월 25일과 11월 21일 사이에 실시되었으며, 연구지역에서 탄산지하수 2점, 일반지하수 8점으로 총 10점을 채취하였다. 2차는 2016년 1월 21-22일에 걸쳐 실시되었으며, 탄산지하수와 해수, 지표수를 각각 3점, 1점, 1점으로 총 5점을 채취하였다. 3차는 2016년 4월 6일~12일에 실시되었으며, 탄산지하수 8점, 일반지하수 3점으로 총 11점 채취하였다. 특히 3차 시료채취시 제주개발공사에서 개발한 탄산지하수공(CG1)을 대상으로 싱글패커를 사용하여 상하부 구간을 구분하여 시료를 채취하였다. 시료 채취지점은 Fig. 1에서 도시되었다. 물 시료를 채취한 지하수공의 심도는 탄산지하수 460~2000 m, 일반지하수 240~550 m로 다양한 심도를 보인다.

물 시료의 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 산화환원전위(ORP), 용존산소함량(DO), 중탄산(HCO_3)함량은 현장에서 즉시 측정하였다. 지하수 현장수질측정은 Orion 3 star 모델과 Orion 5 star 모델의 휴대용 측정기를 이용하였으며, 중탄산(HCO_3)은 탄산온천수의 경우 0.5 N 농도의 염산을 일반지하수의 경우 0.05 N 농도의 염산을 이용하여 산중화적정법으로 구하였다. 물 시료의 주요 양이온과 미량원소 분석, 음이온 분석을 위하여 물 시료 원수를 0.45 μm 의 공극을 갖는 여과지를 통과시켜 부유물질을 제거 후, 각각 60 mL의 폴리에틸렌 용기에 취하였다. 양이온 시료에는 용존된 이온이 용기에 흡착 및 침전을 방지하고자 적정량의 농질산을 첨가하여 pH를 약 2 이하로 유지하였다(Greenberg et al, 1992). 채취된 물 시료는 분석전까지 0~4°C에서 냉장 보관하였고, 물 시료내 주요 양이온(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})과 미량원소(B, Li, Al, Cr, Zn, Cu, As, Rb, Cs, Cd, Ba, U, etc.)는 한국기초과학지원연구원(Korea

Basic Science Institute) 오창센터의 유도결합 플라즈마 원자방출분광기(ICP-mass optima 4300DV, ICP-AES)와 유도결합 플라즈마질량분석기(Fision model PQ III, ICP-MS)등의 장비로 분석하였으며, 음이온 성분(Cl^- , NO_3^- , F^- , SO_4^{2-})도 한국기초과학 지원연구원 오창센터에서 분석하였다.

3.2 동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$) 분석

탄산수의 탄소 동위원소 분석을 위한 물 시료는 수산화나트륨(NaOH)을 탄산수 시료에 첨가하여 pH를 11 이상으로 조절한 뒤, 염화바륨(BaCl_2)을 첨가하여 시료내 탄산염 성분을 BaCO_3 의 형태로 침전시켰다. 침전물은 여과기를 이용하여 $0.45\ \mu\text{m}$ 공극의 여과지로 거른 후 건조하여 분말형태로 시료를 준비하여 탄소동위원소 분석을 실시하였다. 탄소동위원소는 한국기초과학지원연구원 오창센터에서 분석되었다. DIC의 분리는 Atekwana and Krishnamurthy (1998)의 방법에 따라 실험하였으며, 한국기초과학지원연구원의 안정동위원소질량분석기(Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer, 영국 GV Instruments사의 Isoprime 모델)를 이용하여 탄소 동위원소 조성을 측정하였다. 탄소 동위원소의 분석정밀도는 약 $\pm 0.2\%$ 이다.

산소-수소 동위원소 분석을 위한 시료는 $0.45\ \mu\text{m}$ 여과지로 여과한 후, 60 mL 폴리에틸렌 용기에 별다른 전처리 과정없이 채취하였다. 물의 산소동위원소 분석은 시료 0.3 mL를 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 평형법(Epstein and Mayeda, 1953)으로 25°C 에서 CO_2 와 동위원소교환반응을 시킨 후에 한국기초과학지원연구원의 안정동위원소 질량분석기(Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer, 영국 GV Instruments사의 Isoprime 모델)로 분석하였다. 표준시료를 반복측정한 분석정밀도는 약 $\pm 0.1\%$ 이다.

물 시료의 수소동위원소 분석은 Morrison et al.(2001)의 방법에 따라 분석하였다. 온라인수소전처리장치(PyrOH 모델)를 이용하여 약 $0.2\ \mu\text{l}$ 의 물 시료와 Cr과 반응시켜 발생시킨 수소가스를 한국기초과학지원연구원의 산소안정동위원소 질량분석기와 동일한 기종으로 분석하였다. 표준시료를 반복측정한 분석정밀도는 약 $\pm 1.0\%$ 이다. 산소-수소 동위원소 분석 결과는 표준평균해수(SMOW)에 표준화한 천분율(‰)로 표현하였다.

3.3 CFCs(Chlorofluoro carbons) 분석

CFCs 분석용 시료는 Bottle method(Szabo et al., 1996)를 이용하여 채취하였다. 분석용 시료는 고무호수를 이용하여 지하수를 채취하고, 대기와의 접촉을 피하기 위하여 고무호스를 이용하여 유리시료병에 주입하였다. 이때 큰 비커에 동일한 물 시료를 담아 그 속에서 지하수 시료를 채우고 기포가 발생하지 않도록 주의하여 알루미늄 캡으로 시료병을 밀봉하였다. 샘플시료는 삼중복시료(triplicate)로 채취하였으며, 3개를 1 set으로 하여 총 8 set 분석하였다. CFCs 분석은 미국 유타대학 노블가스 실험실에서 전자포획검출기-가스크로마토그래피(GC-ECD)장비를 이용하였다.

3.4 삼중수소(Tritium) 분석

삼중수소(Tritium) 동위원소 분석을 위한 시료는 1 L 폴리에틸렌 재질의 시료채취용기에 특별한 전처리 과정없이 시료를 채취하였으며, 미국 Utah대학 노블가스 실험실의 모델 215-50 Magnetic Sector Mass Spectrometer 질량분석기를 이용하여 분석하였다. 삼중수소 붕괴를 위한 충분한 시간이 경과한 뒤, 붕괴된 삼중수소의 양에 대한 연관성을 즉시 보여주는 ^3He 을 이용하여 삼중수소 농도를 측정하였다.

3.5 영족기체(Noble gas) 분석

영족기체(He, Ne, Ar) 동위원소 분석을 위하여 7점 탄산수 시료(CG-1시료 구간별 4점, CG-2 시료 1점, CG-3시료 1점, G-1시료 1점)를 채취하였다. 시료채취용 장비는 미국 유타대학교 노블가스실험실의 구리관(Copper tube)과 클램프(Clamp)를 이용하였다. 시료채취과정은 구리관 양쪽 끝에 고무호스를 끼워서 호스 클램프로 고정 한 후, 배출부분을 구리관보다 높은 위치를 유지하여 약 1 L의 물을 통과시킨 후, 구리관내 공기를 제거한 후 볼트를 이용하여 구리관을 조인 후, 클램프를 최대한 평행하게 압착방법으로 밀봉시켰다.

모든 영족기체의 절대량과 He, Ne 동위원소비는 미국 Utah대학 노블가스실험실의 모델 215-50 Magnetic Sector-Field Mass Spectrometer 질량분석기를 이용하여 분석하였다.

제4장 수리지화학 특성

4.1 현장수질측정 결과

연구지역의 탄산수(CG1~CG4), 지하수(G1~G8), 지표수(SW), 해수(OW)의 시료에 대한 수소이온농도(pH), 용존산소량(DO), 전기전도도(EC), 산화환원전위(ORP) 측정결과가 Table 1과 통계적 특성을 보여주는 박스-휘스커도(Box-Whisker plot)로 Fig. 2에 제시되어 있다.

현장수질 측정결과, 탄산수의 pH는 6.21~6.80의 범위를 보이며, 모두 약산성을 보인다(Fig. 2a). 주변지역 지하수의 pH는 6.18~8.40의 범위를 보이며, 약산성에서 약알칼리성으로 넓은 범위를 보인다. 전기전도도의 경우 탄산수온천수는 1,928~4,720 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보이며, 주변지역 지하수의 64.4~733 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위보다 매우 높은 이온함량을 보인다(Fig. 2b). 탄산수의 ORP는 -318~307 mV의 범위를 보여 시료에 따라서 환원환경과 산화환경을 각각 보이며, 지하수의 ORP는 -43.2~441 mV의 범위를 보여, G1(2)와 G5(2)를 제외하고는 모두 산화환경을 보인다(Fig. 2c). 탄산수의 용존산소는 0.24~11.6 mg/L의 범위를 보이며, 지하수의 용존산소는 4.39~10.5 mg/L의 범위를 보인다(Fig. 2d). 비교용으로 지표수와 해수도 각각 1점씩 분석하였다.

탄산수온천수는 일반지하수보다 낮은 pH, 환원성 조건을 보이고, 전기전도도는 10 배 이상 높은 특징을 보인다. 이러한 특성은 탄산수온천수가 다량의 탄산을 함유함으로써 물-암석 반응에서 높은 용해성으로 높은 광물질을 함유하며, 탄산의 용해로 약산성의 특성을 보인다. 아울러 탄산수는 지하수와 지표수와의 잘 격리된 환경이므로 환원성 환경내지는 환원성에 가까운 특성을 보인다.

Table 1. Geochemical compositions of carbonated hot spring water, groundwater, surface water and sea water collected in the Jeju island.

unit : mg/L

Sample ID.	Sampling Date (Y/M/D)	pH	ORP (mV)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	DO	Na	Ca	Mg	Si	K	Sr	Fe	F	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	E.N (%)	T (°C)
CG1(1)	2015/09/25	6.65	307	4,720	3.69	210	269	602	38.1	71.3	2.99	N.D	0.03	16.1	N.D	1.58	4,219	2.98	17.1
CG1(2)	2016/01/22	6.25	20.7	4,530	1.03	183	215	510	38.0	60.7	2.63	1.58	0.03	21.8	0.05	1.83	3,509	3.36	15.6
CG1(3)	2016/04/06	6.21	-1.10	2,858	5.36	132	159	371	35.1	44.4	1.98	0.69	N.D	16.2	N.D	1.92	2,719	0.31	15.2
CG1(4)	2016/04/06	6.84	32.9	2,969	9.65	133	159	372	33.8	45.7	2.01	0.004	N.D	22.1	N.D	N.D	2,819	-1.44	-
CG1(5)	2016/04/11	6.72	53.7	1,928	8.86	80.3	97.9	221	30.5	28.4	1.24	0.00	N.D	16.7	N.D	2.39	1,565	2.09	-
CG1(6)	2016/04/11	6.70	48.3	3,070	9.68	141	172	403	36.2	48.9	2.13	0.007	N.D	14.8	N.D	N.D	2,599	6.63	-
CG1(7)	2016/04/12	6.64	52.5	2,499	9.16	110	135	131	32.5	39.5	1.67	0.002	N.D	23.8	N.D	6.02	1,615	-7.82	-
CG1(8)	2016/04/12	6.80	-1.10	3,680	11.6	130	159	376	34.5	45.0	1.98	0.004	N.D	18.0	N.D	N.D	2,380	7.23	-
CG2(1)	2016/01/22	6.24	-123	3,480	0.24	338	259	160	69.7	32.0	2.93	0.49	0.08	64.7	N.D	26.9	2,227	3.39	32.2
CG2(2)	2016/04/08	6.30	-318	2,931	0.25	339	258	159	75.9	35.1	3.15	1.26	N.D	70.9	N.D	38.8	2,242	2.52	33.4
CG3(1)	2016/01/22	6.24	-131	3,570	1.92	418	273	114	32.7	39.0	3.03	0.52	0.12	120	N.D	36.5	2,227	1.86	28.7
CG3(2)	2016/04/08	6.28	14.6	2,981	0.76	421	288	118	36.3	44.5	3.16	3.56	N.D	126	N.D	49.5	2,166	4.12	28.2
CG4	2015/10/19	6.24	-	2,716	2.40	114	143	358	28.1	44.4	1.03	0.02	0.04	13.5	0.22	0.87	2,124	9.59	18.1

N.D. : Not detected(below detection limit), E.N. (%) : Electro Neutrality(%)

Table 1. (continued)

Sample ID.	Sampling Date (Y/M/D)	pH	ORP (mV)	EC ($\mu\text{S/cm}$)	DO	Na	Ca	Mg	Si	K	Sr	Fe	F	Cl	Br	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	unit : mg/L	
																			E.N (%)	T (°C)
G1(1)	2015/10/17	8.08	225	512	6.21	73.8	7.71	17.0	16.1	14.3	0.09	0.01	0.05	7.83	N.D	0.20	2.58	305	0.78	18.7
G1(2)	2016/04/06	8.40	-36.0	435	9.47	78.0	8.75	20.5	18.7	15.5	0.11	0.05	0.25	10.8	-	N.D	4.52	305	4.56	17.7
G2	2015/10/15	6.66	208	733	5.41	24.9	27.6	59.0	21.0	9.40	0.32	0.01	0.04	5.40	N.D	0.67	1.22	438	1.26	15.6
G3	2015/11/07	8.16	441	271	6.97	18.8	5.94	17.7	13.5	6.69	0.06	N.D	0.05	5.26	N.D	0.32	1.28	144	3.81	15.6
G4(1)	2015/10/19	7.46	-	90.0	8.96	5.64	4.64	4.21	15.1	2.36	0.04	0.00	0.07	6.06	-	1.55	0.88	42.1	-1.15	15.5
G4(2)	2016/04/08	6.13	79.6	89.2	6.09	7.80	8.52	6.22	19.6	3.56	0.09	0.13	0.29	7.30	-	2.37	2.27	50.0	10.4	16.6
G5(1)	2015/10/19	7.91	-	330	9.08	20.2	14.7	17.6	15.3	9.08	0.09	0.00	0.05	6.72	-	0.32	0.76	184	1.02	15.5
G5(2)	2016/04/08	8.01	-43.2	301	10.5	27.3	17.1	22.0	20.7	11.3	0.11	0.04	0.14	11.2	-	0.54	1.99	209	4.39	16.0
G6	2015/10/19	7.88	-	635	4.39	74.9	14.9	31.7	24.0	21.9	0.16	0.01	0.29	12.0	-	0.07	1.44	397	2.09	19.5
G7	2015/10/19	7.94	-	660	7.32	79.3	14.0	38.9	17.4	20.5	0.16	0.00	0.10	9.84	-	0.23	1.25	442	2.09	18.3
G8	2015/10/19	8.18	-	64.4	9.17	5.08	3.53	1.96	13.7	1.88	0.03	0.00	0.06	6.09	-	0.58	0.85	26.5	-2.15	14.8
SW	2016/01/22	7.39	112	86.5	9.96	6.98	4.79	2.89	13.7	2.25	0.04	0.02	0.02	5.88	N.D	4.97	1.70	29.0	5.10	13.6
OW	2016/01/22	8.12	203	46,400	3.65	8,797	350	1,069	3.40	335	5.92	0.22	0.36	17,428	48.4	6.99	2,118	125	-3.99	14.0

N.D. : Not Detected(below detection limit), E.N. (%) : Electro Neutrality(%)

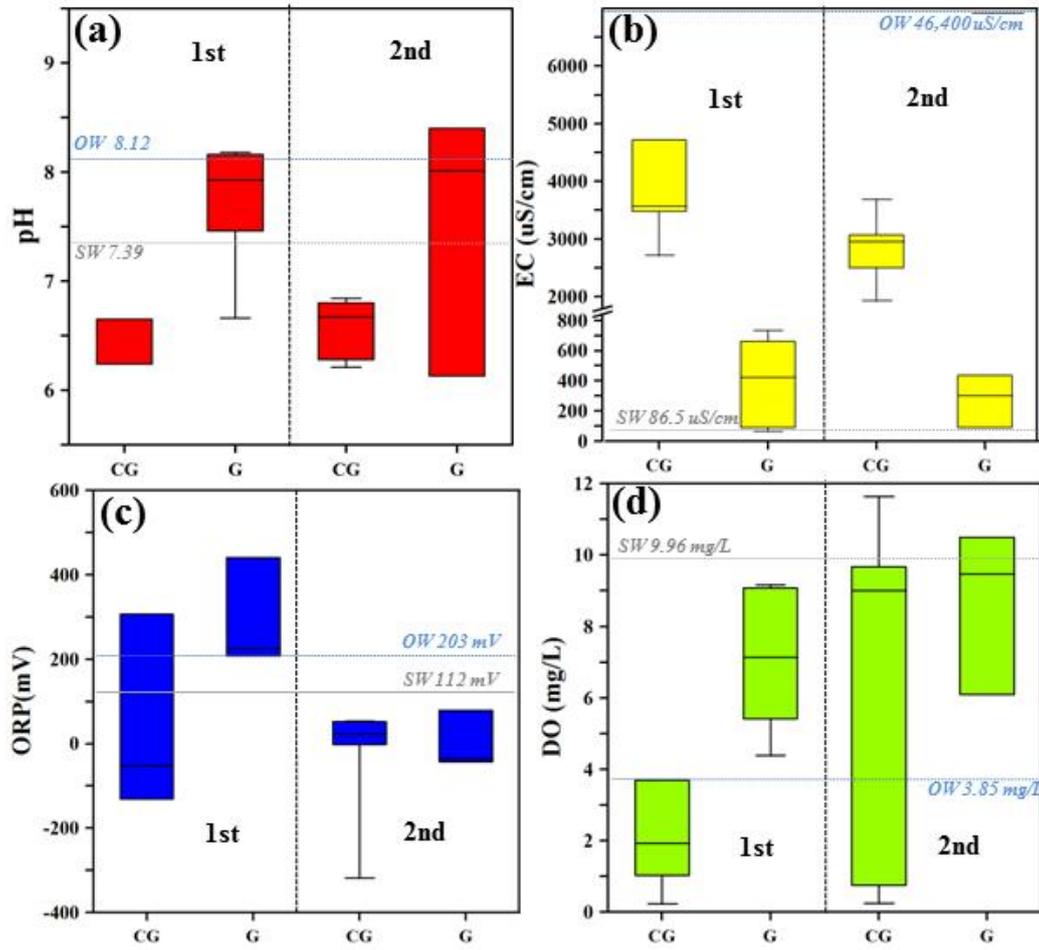


Fig 2. Box-whisker plots showing the statistical variations of In-situ measurement data of carbonated waters(CG) and groundwater(G) samples collected in the study area.

4.2 주요 화학 성분

연구지역의 탄산온천수, 지하수, 지표수, 해수의 주요 화학성분은 **Table 1**에 제시되어 있다. 주요 화학성분 함량 특성을 통계분석 기법인 박스-휘스커도(Box-Whisker plot)로 제시하였다(**Fig. 3**). 제주지역 탄산온천수는 Mg과 K의 함량이 매우 높은 것이 특징이며, Ca, Na 등 전반적인 주요 양이온의 함량이 높은 것이 특징이다.

주요 음이온인 HCO_3^- 성분은 탄산온천수의 주요성분으로 최대 4,219 mg/L의 고농도를 보이며, 그 외 Cl 의 성분이 최대 126 mg/L 높은 것이 특징이다. 아울러 NO_3^- 성분이 탄산온천수에서 0.22 mg/L이하로 지표오염물질로부터의 영향이 거의 없는 것으로 보인다. 탄산수 CG1(1~8) 시료는 채취시기 및 패커를 이용한 심도별 채취과정에서 주요 이온함량이 큰 변화를 보여 이는 상부구간의 일반지하수와 혼합정도에 기인하는 것으로 보인다. 지표수의 주요 이온 성분은 대체로 낮은 편으로 일반적인 지표수의 특성을 보인다.

탄산온천수와 지하수의 1차와 2차를 박스-휘스커도로 비교하였을 때, 주요 양이온과 음이온이 1차에 비해 2차에서 감소하는 경향을 보여준다(**Fig. 3**). 그리고 탄산수가 주변지하수보다 높은 농도의 이온함량과 약산성의 특성을 보인다.

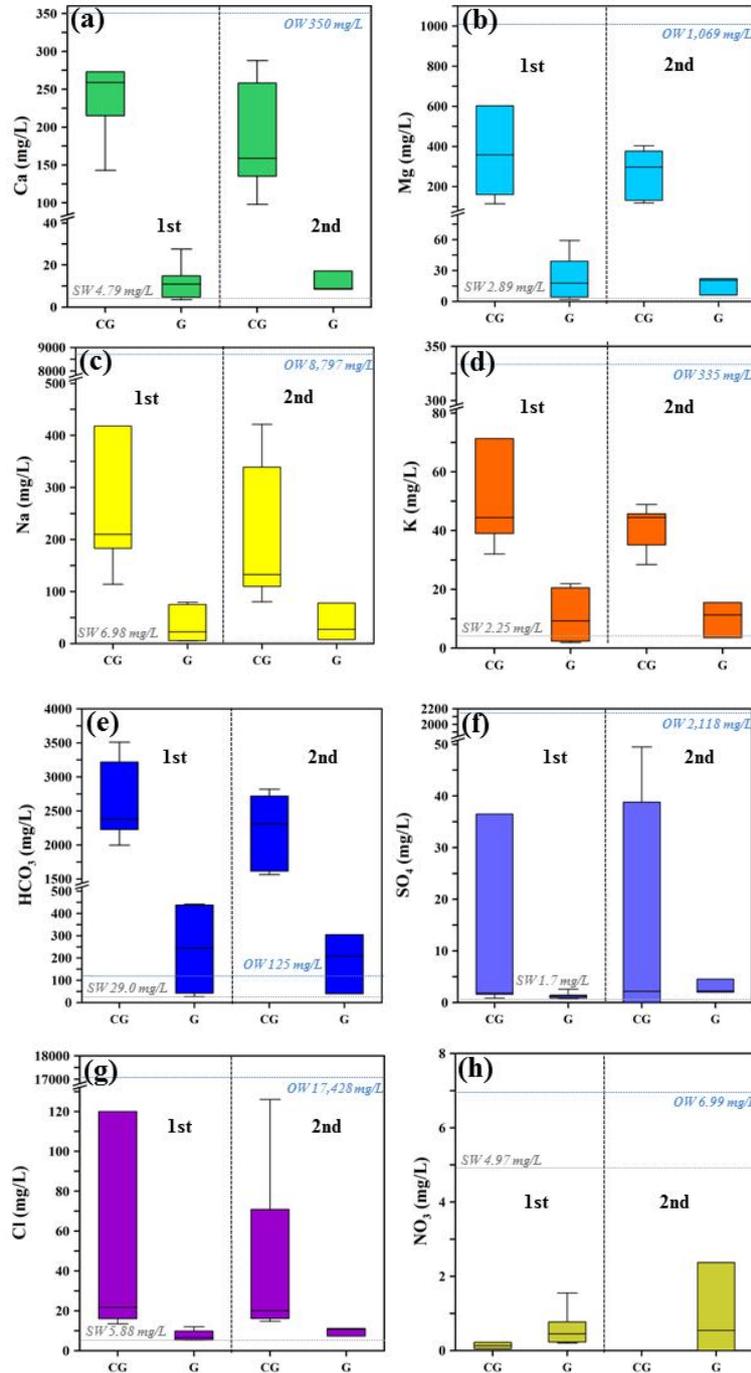


Fig 3. Box-whisker plots showing the statistical variations of major ions in carbonated water(CG) and groundwater(G) samples collected in the study area.

4.3 미량원소 성분

탄산온천수, 지하수, 지표수, 해수내 함유된 미량원소는 Li, B, Al, Ti, Cr, Mn, Ni, Zn, As, Rb, Ba, U 등의 자료는 **Table 2**에 제시되어 있다. 이들 중 Li, B, Mn, Zn, Rb, Ba, U 원소가 비교적 높은 함량을 보인다.

탄산온천수의 미량원소는 전반적으로 1차시기에 비해 2차시기에 증가하는 경향을 보이고, 패커를 이용한 탄산수의 심도별 채취시료에서 Li, B, Ni, Zn, Rb, Ba, U 등의 함량에서 큰 변화를 보이며, 특히 CG1(2)에서 CG1(3)의 Zn, Ba, U의 함량이 각각 1.65 $\mu\text{g/L}$ 에서 7,240 $\mu\text{g/L}$, 315 $\mu\text{g/L}$ 에서 42,150 $\mu\text{g/L}$, 10.9 $\mu\text{g/L}$ 에서 101 $\mu\text{g/L}$ 로 증가하였다. 특히 우라늄과 같은 일부성분은 먹는물 기준인 30 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하였다. B는 CG2(2)과 CG3(2)에서 각각 5,530 $\mu\text{g/L}$, 6,670 $\mu\text{g/L}$ 로 먹는물 기준인 1,000 $\mu\text{g/L}$ 초과하였고, Zn은 CG1(3)과 CG1(7)에서 7,240 $\mu\text{g/L}$, 3,130 $\mu\text{g/L}$ 로 먹는물 기준인 3,000 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하였다. 그러나 우라늄을 제외하고 다량의 주요 이온성분과 미량성분은 약수로서의 기능성을 부여하면 차별화된 기능수로서 역할을 할 수 있을 것이다.

Table 2. Minor and trace elements of water samples collected in the study area.

unit : μ g/L

Sample ID.	Sampling Date (Y/M/D)	Li	B	Al	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Ge	As	Rb	Mo	Ba	U
CG1(1)	2015/09/25	36.4	88.7	61.2	5.24	1.54	45.4	406	17.8	2.98	3.10	<0.1	0.86	102	16.4	85.0	12.5
CG1(2)	2016/01/22	34.4	60.0	0.48	0.97	1.06	<0.1	400	11.7	0.90	1.65	<0.1	1.31	94.6	2.47	315	10.9
CG1(3)	2016/04/06	340	660	6.38	14.3	6.26	0.15	270	99.9	3.37	7,240	<0.2	4.01	883	49.2	42,150	101
CG1(4)	2016/04/06	330	660	5.47	5.18	15.7	0.51	240	104	3.29	1,090	<0.2	2.76	956	39.4	9,030	39.8
CG1(5)	2016/04/11	200	450	3.63	9.70	19.6	0.24	180	72.0	3.70	2,390	<0.2	1.09	596	25.7	16,080	51.8
CG1(6)	2016/04/11	320	660	5.48	10.2	11.5	0.15	300	96.1	2.15	1,480	<0.2	4.21	898	31.8	8,620	88.5
CG1(7)	2016/04/12	260	560	4.77	11.0	11.2	0.28	260	90.0	0.59	3,130	<0.2	1.96	752	28.6	13,340	92.8
CG1(8)	2016/04/12	330	670	6.01	3.86	11.8	0.25	260	101	0.95	1,880	<0.2	5.01	905	30.0	10,430	18.6
CG2(1)	2016/01/22	728	482	0.51	<0.5	<0.5	<0.1	189	3.08	0.15	5.04	1.63	12.7	85.7	2.55	721	0.11
CG2(2)	2016/04/08	8,360	5,530	8.76	9.31	1.48	0.71	160	14.5	0.54	100	9.28	110	872	42.6	24,160	1.03
CG3(1)	2016/01/22	508	485	0.20	<0.5	<0.5	<0.1	1,464	0.27	0.10	10.2	0.64	5.12	69.0	1.34	309	1.22
CG3(2)	2016/04/08	6,670	6,020	45.1	28.6	1.42	2.09	1,600	13.0	91.3	790	5.34	114	816	19.1	18,510	16.0
CG-4	2015/10/19	20.2	68.7	1.80	-	8.20	-	1,726	3.20	6.90	24.5	-	0.70	93.1	3.00	21.0	7.70

Table 2. (continued)

Sample ID.	Sampling Date (Y/M/D)	unit : μ g/L															
		Li	B	Al	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Ge	As	Rb	Mo	Ba	U
G1(1)	2015/10/17	6.31	41.7	3.97	3.16	25.6	1.16	0.74	0.72	0.64	1.46	<0.1	2.67	21.1	6.30	0.80	0.94
G1(2)	2016/04/06	70.0	600	88.9	2.79	361	3.97	15.0	2.10	7.60	330	<0.2	22.1	245	95.7	22,350	7.80
G2	2015/10/15	2.98	14.6	2.34	4.24	8.14	1.07	46.1	2.45	2.85	1,000	<0.1	1.61	26.9	2.59	7.04	2.81
G3	2015/11/07	2.29	14.4	4.48	<0.5	3.96	0.48	0.13	0.26	0.92	2.86	<0.1	0.99	23.5	3.97	1,430	2.05
G4(1)	2015/10/19	0.50	9.50	1.40	-	8.30	-	0.50	0.50	0.70	16.3	-	0.60	14.7	0.90	0.70	0.20
G4(2)	2016/04/08	10.0	80.0	33.1	2.53	85.3	14.8	9.00	0.96	6.19	50.0	<0.2	5.90	109	5.40	17,200	1.40
G5(1)	2015/10/19	0.90	16.4	1.30	-	13.2	-	0.40	2.00	0.30	57.1	-	0.50	14.5	1.90	0.40	0.40
G5(2)	2016/04/08	10.0	150	60.2	3.50	153	8.03	6.00	4.28	8.61	80.0	<0.2	5.09	118	11.5	60,720	8.83
G6	2015/10/19	14.7	66.1	2.70	-	0.60	-	30.7	0.50	0.50	7.70	-	3.00	32.2	10.9	6.60	0.60
G7	2015/10/19	13.8	79.4	3.00	-	16.6	-	2.10	1.20	10.0	30.0	-	1.70	32.0	8.10	2.10	1.30
G8	2015/10/19	0.30	9.90	5.10	-	5.60	-	0.90	1.50	32.3	46.3	-	0.60	13.5	0.70	1.10	0.10
SW	2016/01/22	1.41	8.87	4.11	<0.5	3.61	<0.1	4.68	0.23	0.88	6.81	<0.1	<0.5	8.33	0.36	109	0.04
OW	2016/01/22	116	2,421	7.57	<0.5	3.14	0.38	19.0	0.61	1.40	<0.2	<0.1	1.44	74.4	6.00	149	2.03

4.4 수리화학적 유형

탄산온천수의 화학성분을 파이퍼도(Piper, 1944)에 도시한 결과, $Mg(Ca,Na)-HCO_3$ 에서 $Na(Ca,Mg)-HCO_3$ 의 유형을 보인다. 그 중에 CG1은 $Mg(Ca,Na)-HCO_3$ 의 유형을 보이며, 그 외 3점은 산출지역에 따라 서로 다른 화학성분의 특성을 보인다. 지표수는 상·하류 구분 없이 거의 일정한 형태를 보인다. 대부분의 지하수 시료는 유사한 지점에 도시되어 수리지화학적 유형상 뚜렷한 차이를 보여주지는 않으며 지하수는 $Ca(Mg)-HCO_3$ 유형에서 $Na(K)-HCO_3$ 유형에 걸쳐 넓게 분포한다(Fig. 4).

일반적으로 화강암과 화강편마암지역 지하수의 지화학적 진화과정은 진화초기에 중성 또는 약산성의 $Ca-HCO_3$ 유형에서 $Ca(Na)-HCO_3$ 의 유형을 거쳐 진화의 마지막 단계에는 고알카리성의 $Na-HCO_3$ 유형의 단계를 거친다(정찬호 외, 1997). 그러나 제주지역 화산암 지질 지하수에서는 진화에 따른 화학적 유형의 변화를 명확하게 밝혀진바 없다.

지표수는 $Ca-HCO_3$ 와 $Ca(Na)-NO_3(HCO_3)$ 의 유형으로 한천의 상·하류(SW4~SW5)에 따른 유형의 차이는 거의 보이지 않으며 다만 앞에서 설명된 바와 같이 하류에서 전기전도도가 높은 값을 보인다.

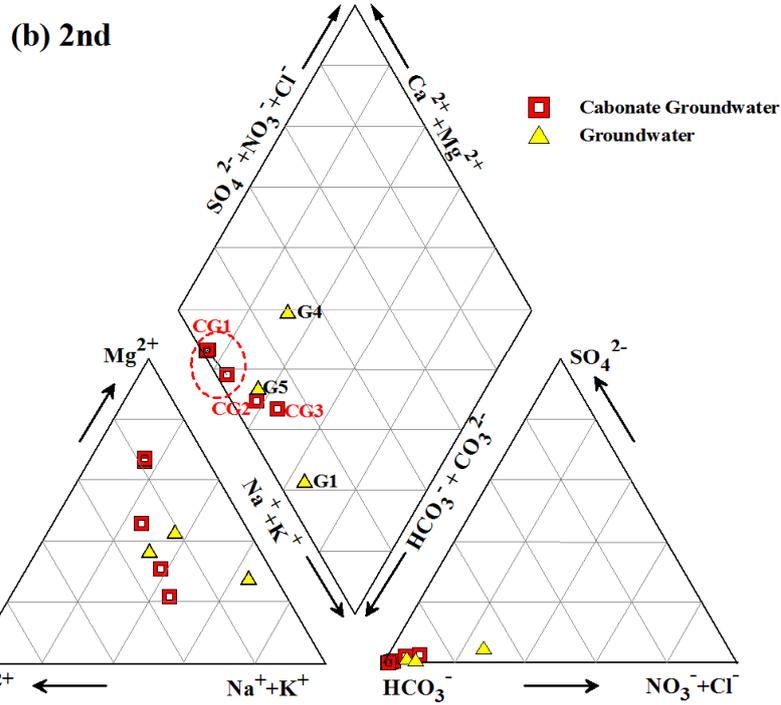
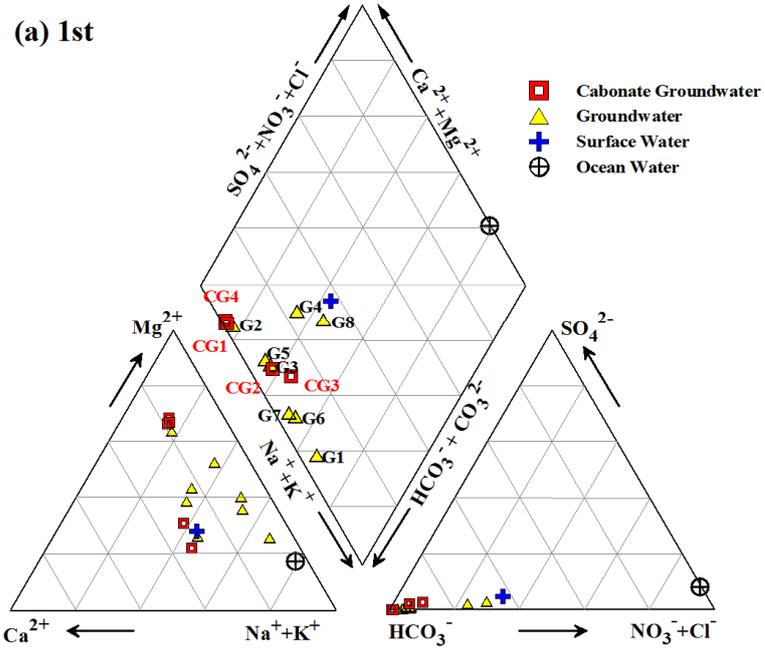


Fig 4. Trilinear plots showing the chemical types of water samples in the study area.

제5장 안정동위원소 특성

5.1 산소-수소 동위원소

연구지역 탄산온천수와 지하수의 산소, 수소 동위원소를 분석하여 Table 3에 제시하였다. 동위원소 조성은 1차 시료(겨울)와 2차 시료(봄)로 계절별로 구분하였다.

겨울과 봄 계절별 동위원소 조성은 탄산온천수는 각각 $\delta D=2.45\delta^{18}O-30.6$, $\delta D=7.67\delta^{18}O+12.6$ 로 계산되었으며, 1차 겨울시기에 지하수의 경우 $\delta D=7.72\delta^{18}O+14.2$ 로 계산되었다. 탄산온천수와 지하수의 동위원소 조성에서 탄산온천수가 보다 결핍된 값을 보여 보다 심부의 지하수로 보인다. 이광식 등(2002)에 의하면 제주도의 월별 강수의 산소동위원소의 경우 기온이 높은 여름철에 $\delta^{18}O$ 값이 낮고, 기온이 낮은 겨울철과 봄철에 $\delta^{18}O$ 값이 높은 것으로 알려져 있으며, 겨울철의 산소-수소 동위원소 값이 순환수선 상부에 도시되었고, $\delta D=8.22\delta^{18}O+12.36$ 으로 계산되었다.

본 연구에서 12월과 1월의 시료는 $\delta^{18}O$ 값이 강우의 계절적인 특성과 비교적 잘 일치하는 결과를 보인다. 지하수도 유사한 관계식을 보인다. 연구지역 탄산수와 탄산온천수는 온도효과와 반대되는 현상을 보였다(Yurtsever and Gat, 1981; Rozanski, et al., 1993). 해수를 제외한 모든 시료가 지구순환수선(Global Meteoric Water Line, GMWL) 상부에 도시되는 특성을 보였으며, 해수는 일반적으로 알려진 해수의 범위에 해당되며 지구순환수선 하부에 도시되었다(Fig. 5).

연구지역의 6월~9월의 여름철 동위원소 조성은 다른 계절의 동위원소 값보다 낮은 값을 보이는 우량효과를 나타내는데(이동립, 2005), 이는 고온다습한 북태평양 기단이 여름철에 열대 저기압형 강수를 일으키는 영향을 미치기 때문이다. 태풍과 같은 강수발생에 영향을 주는 북태평양 기단은 초기강수에 의하여 무거운 동위원소가 수증기에 의해 급격하게 제거되기 때문에, 나중에 내리는 강수는 가벼운 동위원소가 뚜렷하게 농축되게 된다(Lee et al., 1999). 즉, 이동 중에 흔하게 폭우를 동

반하는 열대 저기압형 강수를 일으키는 기단은 연구지역에 도착하기 전에 이미 많은 폭우를 동반하기 때문에 연구지역에는 동위원소 조성이 낮은 강수가 내리게 되는 것이다. 본 연구기간중인 10월~4월의 강수는 한랭 건조한 시베리아 기단의 영향으로 지구순환수선보다 위쪽에 분포한다. 지구순환수선의 위쪽에 분포하는 것은 중수소과잉값(d -값)이 지구순환수보다 크다는 것을 의미하는데 이는 제주도 겨울강수의 일반적인 특징으로 알려져 있다(Lee et al., 1999).

Table 3. $\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$ composition of water samples collected in the study area.

Sample	Date (Y/M/D)	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$d^*(\text{‰})$
CG1(1)	15/09/25	-8.50	-51.1	-1.77	16.9
CG1(2)	16/01/22	-8.48	-51.4	-5.63	16.4
CG1(3)	16/04/06	-8.33	-51.2	-5.64	15.4
CG1(4)	16/04/06	-8.31	-50.2	-4.74	16.3
CG1(5)	16/04/11	-8.07	-49.4	-	15.2
CG1(6)	16/04/11	-8.37	-51.0	-5.35	16.0
CG1(7)	16/04/12	-8.21	-50.2	-7.27	15.5
CG1(8)	16/04/12	-8.33	-50.7	-5.05	15.9
CG2(1)	16/01/22	-8.67	-52.1	-1.75	17.3
CG2(2)	16/04/08	-8.72	-54.4	-2.61	15.4
CG3(1)	16/01/22	-8.25	-51.0	-1.57	15.0
CG3(2)	16/04/08	-8.31	-52.9	-2.28	13.6
G1(1)	15/10/17	-8.03	-47.9	-7.31	16.3
G1(2)	16/04/06	-8.02	-48.5	-12.9	15.7
G2	15/10/15	-7.72	-45.4	-4.57	16.6
G3	15/11/07	-8.14	-48.6	-12.6	16.5
G5	16/04/08	-8.02	-43.1	-	21.1
SW	16/01/22	-7.30	-42.6	-	15.8
OW	16/01/22	-1.41	-9.30	-	1.98

$d^* = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ (Defind by Dansgaard, 1964).

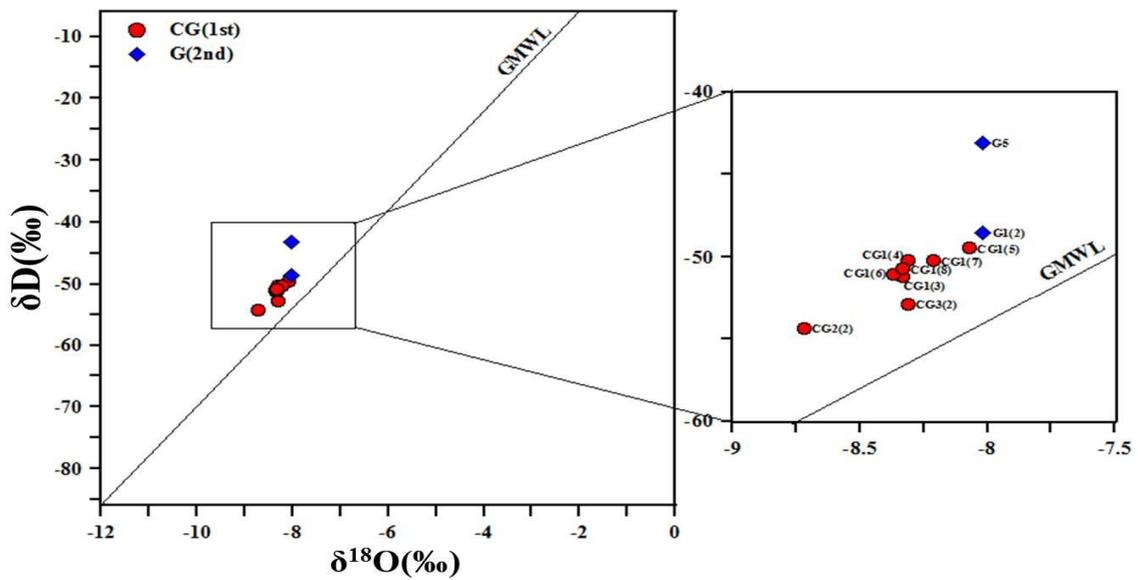
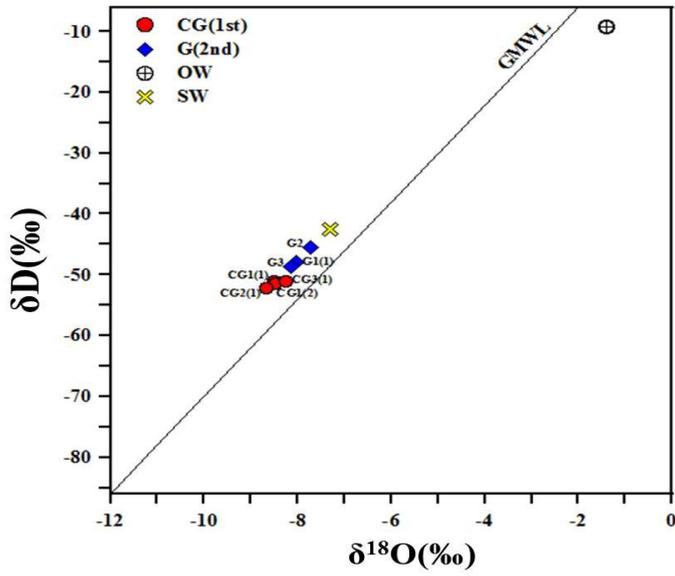


Fig 5. $\delta^{18}\text{O}$ and δD isotopes of water samples collected in the study area.

5.2 탄소 동위원소

탄산온천수내 함유되어 있는 CO₂의 공급원을 해석하는데 있어서 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 동위원소는 유용한 도구로 사용된다(Clark and Fritz, 1997; Hoefe, 1997; 정찬호 외., 2011).

탄산온천수의 탄산과 중탄산 이온은 일반적으로 대기중의 방해석의 용해반응, 이산화탄소의 용해등을 통하여 공급될 뿐만 아니라 토양층과 대수층내 존재할 수 있는 유기물의 산화반응에서 CO₂가 생성될 수 있으며, 유기물의 황산염 환원반응에서도 CO₃²⁻ 이온이 생성된다(Clark and Fritz, 1997). 자연수내 CO₂는 pH조건에 따라서 H₂CO₃^{*}($\equiv\text{H}_2\text{CO}_3^0+\text{CO}_2^+$), HCO₃⁻, CO₃²⁻ 형태로 존재한다(Appelo and Postma, 1993). 지하수내 이산화탄소의 공급원은 대기, 토양유기물, 탄산염광물의 변성작용시 생성, 탄산염광물과 산성용액 반응에 의해 생성, 그리고 맨틀, 마그마와 같은 심부기원의 CO₂ 등이 있다(Irwin and Barnes, 1980). 자연수의 탄소 동위원소 값은 탄소함유물질의 이산화탄소 기원에 대한 정보를 제공한다. Craig(1953)는 해양탄산염암의 탄소 동위원소 값이 약 0‰이며, 유기물 기원은 -12‰ 이하의 값을 가진다고 발표하였고, Bakalowicz(1979)는 토양내 유기물 기원의 탄소 동위원소 값은 -25.0~-22.0‰ 범위를 가진다고 발표하였다. Kendall and McDonnell(1998)은 대기중 이산화탄소의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 약 -6.4‰로 알려져 있다. 또한 Moore et al.(1997)와 Pineau et al.(1976)은 CO₂에 $\delta^{13}\text{C}$ 이 맨틀 및 마그마와 같은 심부기원에서는 -8.0~-4.7‰ 범위를, Cornides and Kecsles(1974)는 -6.0±1.5 범위를, Blavoux et al.(1982)은 -8.0~-4.0‰의 범위를 가진다고 발표하였다. 그리고 Cornides and Kecsles(1974)와 Cornides and Cornides(1983)는 헝가리의 탄산수내 탄소 동위원소 값이 -7~-2‰ 범위를 보여 화산활동과 관련한 심부기원의 이산화탄소와 탄산염 광물의 용해반응시 생성된 탄소가 일부 혼합된 것으로 해석하였다. 그리고 무기기원의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 대체적으로 -4.0‰ 이상의 값을 가지는 것으로 보고되었다(Clark and Fritz, 1997).

제주도 서귀포지역 탄산수에 대한 1차 시료에 대한 탄소동위원소 분석결과 $\delta^{13}\text{C}$ 의

범위는 $-5.63 \sim -1.57\%$ 범위로 CG1 시료는 CO_2 가 무기기원의 영역에 속하며, CG2, CG3 탄산수도 무기영역으로 분류되었다. 2차 시료에서는 $\delta^{13}\text{C}$ 의 값이 $-7.27 \sim -2.28\%$ 의 범위를 보여, CG1(2)~(8) 탄산수는 맨틀과 마그마와 같은 심부기원으로 확인되며, CG2, CG3 탄산수는 무기기원의 영역이지만 심부기원의 영역과의 경계부분이므로 심부기원의 CO_2 와 탄산염광물의 기원이 혼합된 것으로 보인다. 지하수의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 범위는 $-12.9 \sim -4.57\%$ 의 범위로 일부 심부기원과 유기기원에 의한 것으로 보인다. 특히 G1(2) 지하수에서 -12.9% 로 가장 낮은 값을 보여 유기기원의 CO_2 가 공급되어 탄산과 중탄산을 형성한 것으로 보인다(Fig. 6).

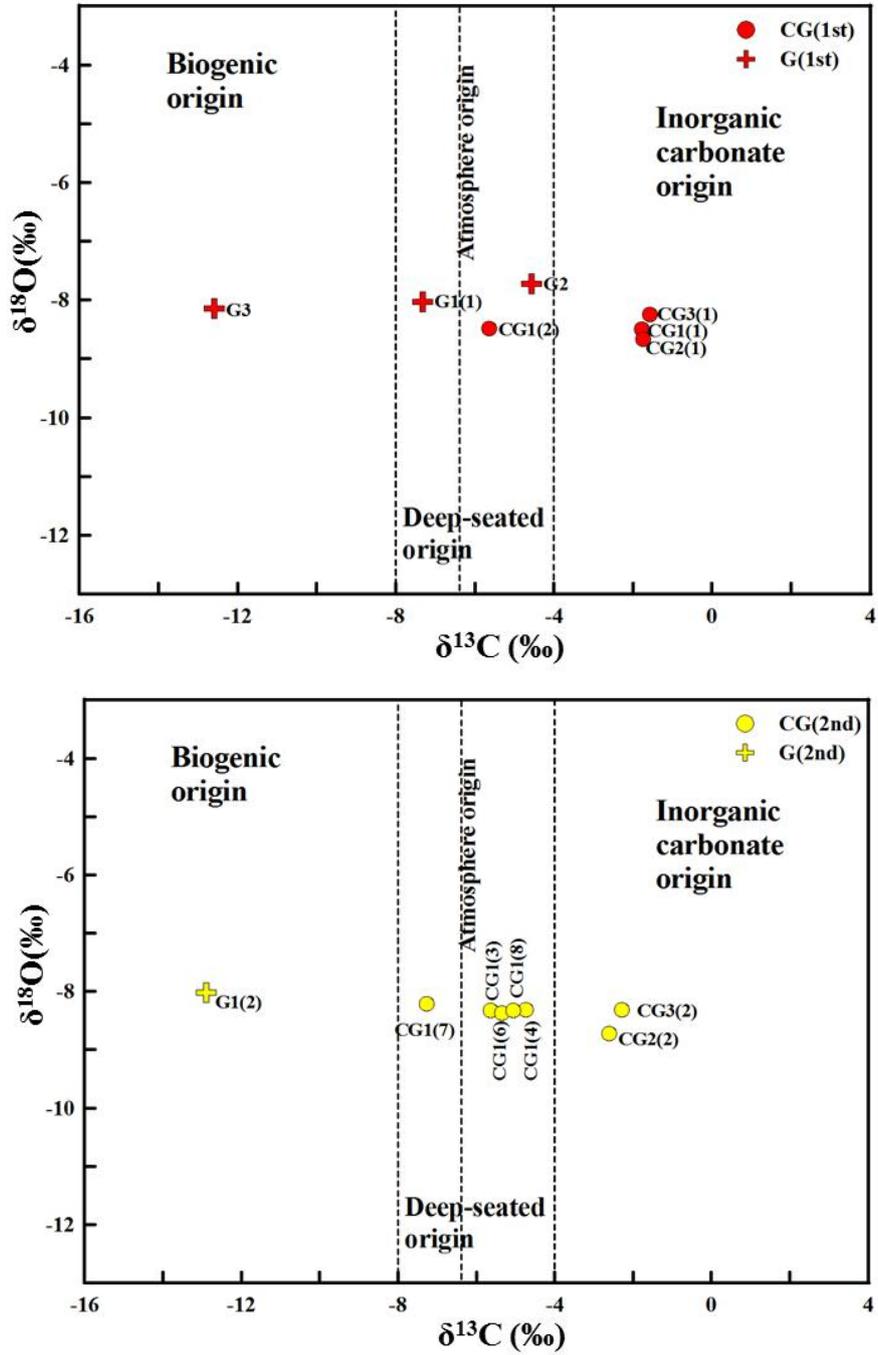


Fig 6. $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ isotopes of water samples collected in the study area.

5.3 CFCs 동위원소

Bottle method(Busenbergr and Plummer, 1992)에 의해 1, 2차 조사에서 채취된 시료의 CFC-11, CFC-12, CFC-113의 분석 결과, 시료의 농도와 연령은 Table 4에 제시되어 있다. 탄산수(CG1)의 CFCs 농도는 CFC-11(0.163~0.885 pmol/kg), CFC-12(0.116~0.434 pmol/kg), CFC-113(0.022~0.046 pmol/kg)의 범위를 보이며, 탄산온천수(CG2, CG3)의 CFCs 농도는 CFC-11(각 0.814, 0.062 pmol/kg), CFC-12(0.288 pmol/kg(CG2)), CFC-113(각 0.019, 0.014 pmol/kg)의 범위를 보인다. 지하수(G1~G3)의 CFCs 농도는 CFC-11(0.064~1.116 pg/kg), CFC-12(0.047~1.524 pmol/kg), CFC-113(0.033~0.166 pmol/kg)의 범위를 보인다. 연령 측정에 이용된 대기 CFCs 농도 이력 곡선은 북미 평균곡선(USGS, 2015)을 이용하였다(Fig. 7). 연령 측정 결과, 탄산수는 47.5~57.2년, 지하수는 약 30.3~49.5년으로 추정되었으며, 지하수보다 탄산온천수의 연령이 보다 더 오래되었음을 보여준다. 1, 2차간의 연대의 차이는 뚜렷하지 않고, 일부 연령의 차이를 보인다.

Table 4. Recharge age and CFCs concentration of water samples collected in the study area.

Sample	Date (Y/M/D)	Concentration(pmol/kg)			Recharge age(year)		
		CFC-11	CFC-12	CFC-113	CFC-11	CFC-12	CFC-113
CG1(1)	15/09/25	0.163	0.116	0.060	55.5	57.2	41.3
CG1(4)	16/04/06	0.663	-	0.022	48.3	-	47.5
CG1(6)	16/04/11	0.554	-	0.027	49.3	-	46.0
CG1(7)	16/04/12	0.885	0.434	0.046	46.3	47.5	42.2
CG1(8)	16/04/12	0.665	0.420	0.034	48.2	48.2	44.7
CG2(2)	16/04/08	0.814	0.288	0.019	48.2	54.5	49.0
CG3(2)	16/04/08	0.062	-	0.014	61.5	-	52.3
G1(1)	15/10/17	0.412	0.406	0.043	50.7	47.7	42.3
G1(2)	16/04/06	0.913	0.034	0.033	46.2	49.5	44.7
G-2(1)	15/10/15	1.694	1.524	0.166	41.0	30.3	31.8
G-3	15/11/21	1.116	0.783	0.083	44.0	41.7	37.2
G-5(2)	16/04/08	0.064	0.047	0.052	48.7	47.3	41.7

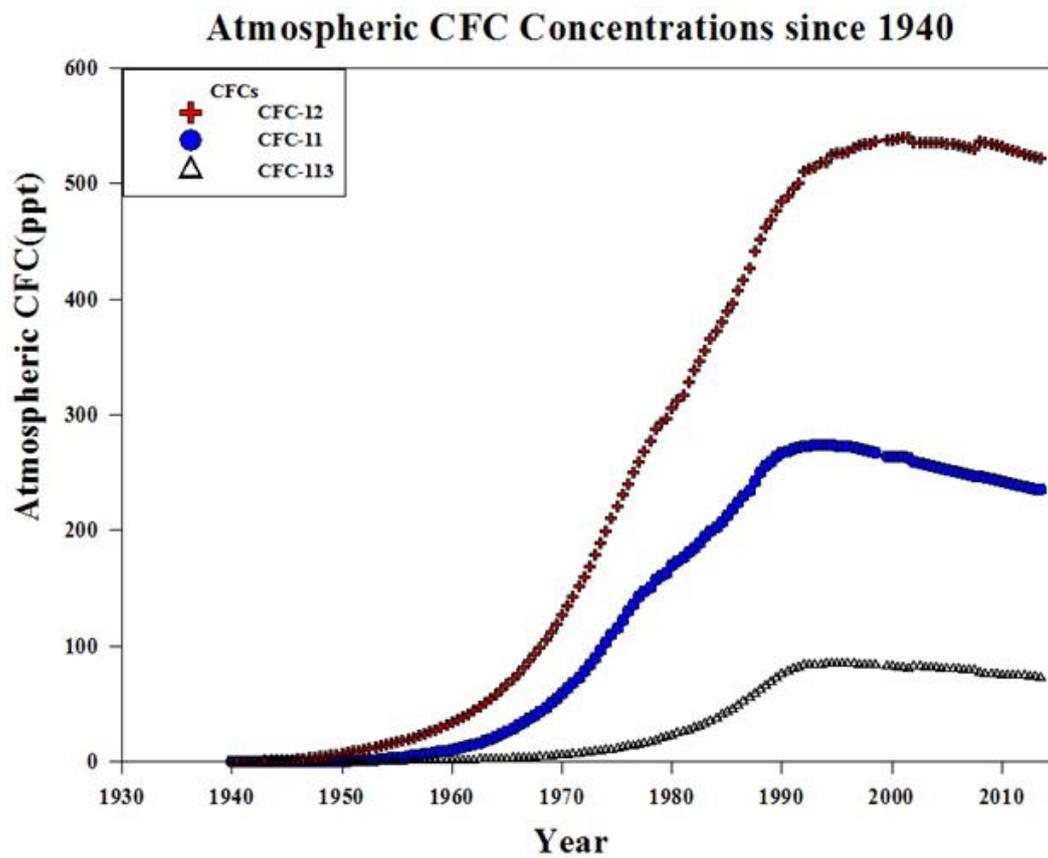


Fig 7. CFCs North American average curve.

(Refernece :http://water.usgs.gov/lab/software/air_curve/index.html)

5.4 삼중수소(Tritium) 동위원소

수소의 방사성 동위체인 삼중수소는 반감기가 12.43년이며, 베타선을 방출하여 ^3He 로 변화한다. 자연수에서 삼중수소는 TU(Tritium Unit)로 표시하며, 1 TU는 10^{18} 개의 수소원자 중에 한 개의 삼중수소가 존재하는 것을 의미한다.

우주선에 의하여 생성되는 중성자와 대기의 질소와 중수소가 반응하여 생성된 삼중수소의 2/3는 성층권에서 생성, 1/3은 대기권에서 생성되어 물과 같은 형태로 산화되어 강수를 통해 지표로 이동한다. 대기중 삼중수소는 우주선, 핵실험 및 원자력발전소에 의해 생성된다. 과거에 지상 핵실험이 가능하였던 때 삼중수소의 주요 생성원인이었으며, 현재는 우주선에 의해 발생될 뿐 대기 중 함량은 자연준위로 회복되었다.

성층권과 대류권을 통해 이동하는 양의 차이로 지표상에서 관측되는 삼중수소 함량은 북반구에서 약 10~20 TU, 남반구에서 10 TU 이하로 위도 효과가 나타난다. 자연 중에 존재하는 천연 동위원소인 삼중수소는 100년 미만의 물의 유동연구와 연대측정에 추적자로서 Begemann과 Libby(1957)에 의해 지하수 연대측정을 시도된 이후 환경분야에서 다양하게 활용되고 있으며, 지하수 연령측정에서 강수의 일부분으로 대수층에 유입되는 삼중수소는 시간에 따라 변하며 물 자체로 이동하므로 강수와 지하수 순환연구에 있어서 매우 유용한 추적자로 활용가능하다(윤윤열 외, 2010). IAEA 주관하에 환경변화에 대응하기 위해 전 세계의 강우중 삼중수소 변화를 연구하고 있다(Fig. 8).

삼중수소 값으로 지하수 체류시간을 구하는 방법은 2008년에 이광식 등이 제시한 아래의 관계식을 적용하여 조사지역 지하수의 체류 시간을 계산하였다.

$$T = -17.93 \ln\left(\frac{a_t^3H}{a_0^3H}\right) \quad \text{식 1}$$

여기서 T는 지하수의 체류시간 a_t^3H 는 물 시료 중에 남아 있는 삼중수소의 농도,

a_0^3H 는 삼중수소의 초기 유입량을 의미한다. 즉, 강수로부터 지하수로 함양되는 삼중수소 초기 유입량을 알면, 삼중수소의 방사성붕괴 방정식(식 1)을 이용하여 지하수의 체류시간을 구할 수 있게 된다.

제주도지역의 강수의 삼중수소에 대한 선행연구는 한국지질자원연구원에서 2009년 ~ 2010년까지 해안가, 중산간과 동서남북 방향에 따른 9곳과 대전지역간의 삼중수소 함량변화를 비교한 결과, 제주지역은 지역에 따른 삼중수소의 함량 변화는 크지 나타나지 않았으며, 대전지역에 비해 낮은 3 TU 미만의 삼중수소 함량을 나타내었다. 2003년 용천수 및 상부 현무암 대수층 지하수의 삼중수소 농도는 2~5 TU로 기존의 용천수 등에 대한 지하수 체류시간(<20년)과 상충되지 않으며, 서귀포충부근에 설치된 관정들의 지하수는 매우 낮은 농도(<0.5 TU)를 보여주는데, 이러한 특성은 서귀포층의 낮은 투수성에 의해 지하수 유동이 제한되어 지하수 연령이 오래되었기 때문인 것으로 보인다고 보고되었다.

이러한 선행연구결과를 바탕으로, 강수의 삼중수소 농도는 Ahn et al.(1992)에서 보고된 농도로 Table 5에 제시되어 있고, 탄산수와 지하수의 삼중수소 농도는 Table 6에 제시되어 있다. 강수는 5.9~ 17.4 TU, 탄산수는 0.48 TU, 지하수는 0.10~1.56 TU의 범위를 보인다. 강수로부터 지하로 함양되는 삼중수소 초기 유입량은 1983년 제주지역 강수의 삼중수소 자료(Ahn et al, 1992)를 이용한 결과 반감기에 따른 방사성붕괴에 의한 잔류 삼중수소를 계산하면 현재 확인되는 삼중수소 값과 잘 일치한다. 따라서 식 1에 의거하여 계산된 탄산수의 연령은 약 58.2년, 지하수의 연령은 약 37.1~86.3년으로 계산되었다.

Table 5. Tritium concentration of precipitation in Jeju area(Ahn et al., 1992).

Sample	Date	TU*
PW	Mar.	5.9
	Apr.	13.9
	May.	12.1
	Jun.	17.4

* (제주지역, 한국원자력연구소에서 측정한 강수 중 삼중수소 농도)

Table 6. Recharge age and Tritium concentration of carbonated water collected in the study area.

Sample	Date	TU	1-sigma error(+/-)	T
CG-1	2015.09.25	0.48	0.05	58.2
G-1	2015.10.17	0.10	0.04	86.3
G-2	2015.10.15	1.56	0.09	37.1
G-3	2015.11.21	0.91	0.09	46.7

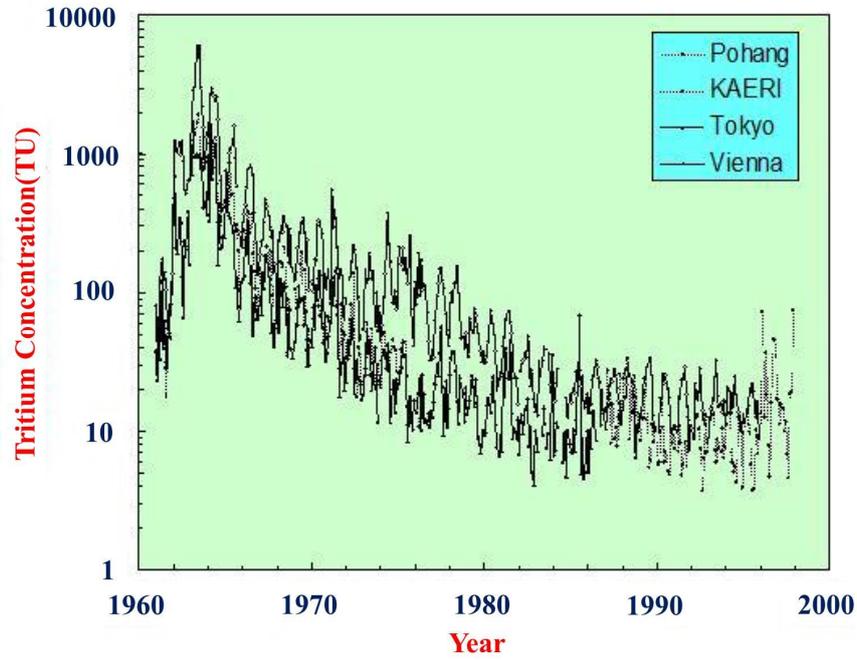


Fig 8. Hourly variation for tritium concentration of respectively regional precipitation.

(포항, 대전원자력연구원, 동경, IAEA 관측지점에서 강수의 삼중수소 자료)

5.5 영족기체(Noble gas) 동위원소

비활성기체인 영족기체(noble gas)는 대기, 지구표층 및 지구내부에 존재하는 휘발성 원소의 물질 순환과정 연구에서 유력한 추적자(tracer) 역할을 하고 있다(Aka et al., 2001). 특히 헬륨 동위원소(^3He , ^4He), 아르곤 동위원소(^{36}Ar , ^{38}Ar , ^{40}Ar), 네온 동위원소(^{20}Ne , ^{22}Ne)를 이용하여 화산가스, 온천가스, 지하수, 해수, 암석, 광물등의 기원 연구에 유용하게 이용되고 있으며, 특히 헬륨 동위원소비($^3\text{He}/^4\text{He}$)는 대기에서 측정된 조성비와 지각내부에서 측정한 조성비가 큰 차이를 이용하여 맨틀로부터 지구표층으로의 휘발성원소의 이동과정 추적에 활용될 수 있다(Ishibashi et al., 1995).

국내에서는 청송지역 탄산수의 영족기체 동위원소($^3\text{He}/^4\text{He}$, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$) 분석을 통하여 헬륨가스와 CO_2 가스는 맨틀, 마그마와 같은 심부기원임을 밝힌 바 있다(정찬호 외, 2012). 경북-강원지역 탄산수의 탄산가스는 대기-맨틀 혼합기원이며, 일부탄산수는 천부지하수와 혼합의 영향으로 대기 기원의 헬륨이 혼합된 것으로 해석되었다. 맨틀과 같은 심부기원의 헬륨가스와 CO_2 가스의 공급은 지질경계, 단층과 같은 지질구조와 밀접하게 관계가 있는 것으로 보인다고 보고하였다(정찬호 외, 2011). 온천연구에서도 영족기체 동위원소 분석을 통한 그들의 기원연구가 진행된바 있다. 이천지역 온천수는 맨틀(마그마)등 심부기원의 헬륨 혼합율이 높고, 포천지역 온천수는 지각기원의 헬륨동위원소가 우세함을 제시하였다(정찬호 외, 2009).

연구지역에서 채취한 탄산수 및 지하수내 헬륨과 네온 동위원소 값을 Table 6에 제시되어 있다. 탄산수의 경우 $\text{R/Ra}(^3\text{He}/^4\text{He})$ 값은 2.39~6.07의 범위를 보이며, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 값은 18.77~126.3의 범위를 보인다. 지하수의 경우 $\text{R/Ra}(^3\text{He}/^4\text{He})$ 값은 6.04의 값을 보이며, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 값은 32.2의 값을 보인다. Fig. 8에서 대기-맨틀 혼합선은 대기기원의 He, Ne과 상부 맨틀기원($^3\text{He}/^4\text{He} = 11 \times 10^{-6}$ with $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} > 10,000$)간 혼합에 대한 동위원소비의 특성을 보여주는 반면에 대기-지각 혼합선은 대기와 지각기원($^3\text{He}/^4\text{He} = 5 \times 10^{-9}$ with $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} > 10,000$)간 혼합의 정도를 나타낸다. 제주지역 탄산온천수와 탄산수는 맨틀 마그마와 같은 심부기원-대기기원 혼합선상에 도시되나 대기기원의 헬륨가스보다는 심부기원의 헬륨가스의 농도가 절대적으로 높은 값을 보여 제주 탄산온천수와 탄산수의 헬륨가스는 심부기원으로 해석되며, 이는 화산지역인 제주지역 지질특성을 고

려할 때 일본의 화산성 마그마 기원의 영역과 유사한 특성을 보인다. 따라서 제주 탄산수의 CO₂ 가스의 기원은 $\delta^{13}\text{C}$ 동위원소에 의한 심부 기원과 일부 심부-무기기원 혼합 기원을 제시하였으나, 헬륨 등 영족기체 동위원소 조성관계는 헬륨 등이 심부기원임을 밝혀져 CO₂ 가스의 기원이 화산활동과 관련한 심부 마그마 기원임을 시사한다.

Table. 6. The isotopic ratio of noble gases of carbonated water and groundwater samples collected in the study area.

Sample No.	Date (Y/M/D)	Ar total (ccSTP/g)	Ne total (ccSTP/g)	Kr total (ccSTP/g)	Xe total (ccSTP/g)	⁴ He (ccSTP/g)	R/Ra	⁴ He/ ²⁰ Ne
CG1(6)	16/04/11	3.65E-04	1.71E-07	3.31E-07	1.61E-08	2.16E-05	5.97	126.32
CG1(7)	16/04/12	5.25E-04	4.88E-07	-	-	2.62E-05	6.07	53.689
CG1(8)	16/04/12	3.31E-04	1.63E-07	-	-	3.06E-06	2.39	18.773
CG2(2)	16/04/08	1.38E-05	2.59E-09	-	-	2.36E-07	5.38	91.120
G1(2)	16/04/06	3.75E-04	2.05E-07	9.23E-08	1.17E-08	6.61E-06	6.04	32.244

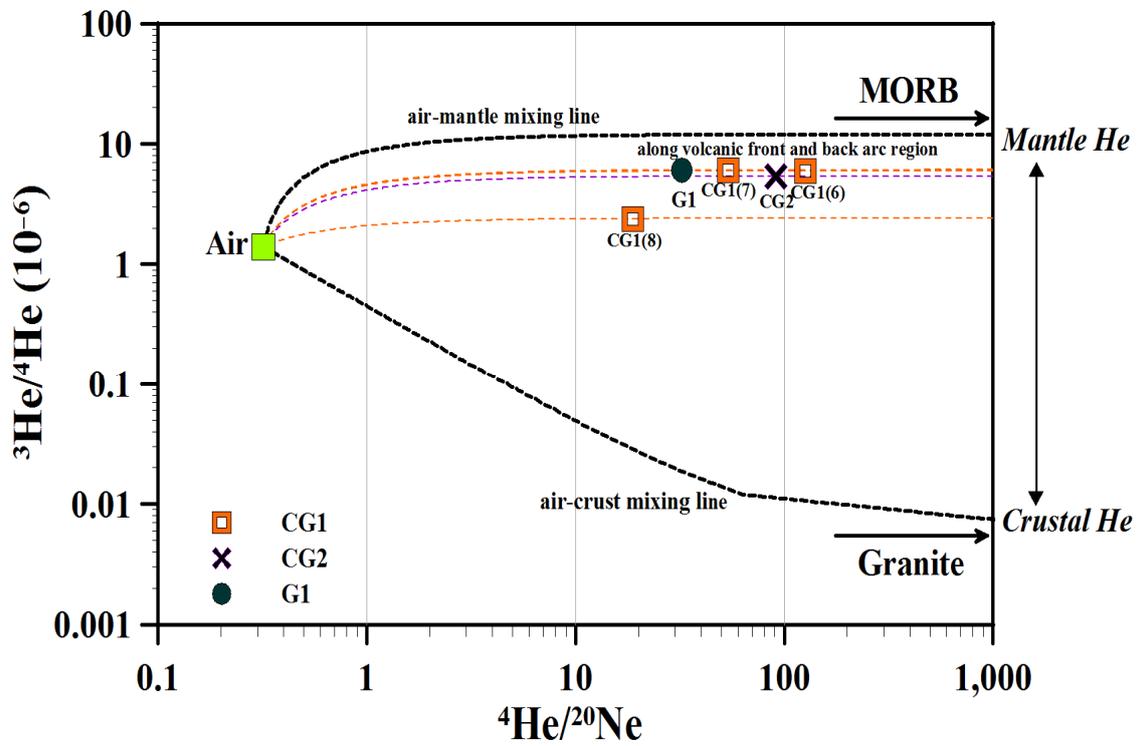


Fig 9. $^3\text{He}/^4\text{He}$ vs $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ plot showing the origin of noble gases of carbonated groundwater(CG) and groundwater(G) samples collected in the study area.

제6장 결 론

제주 서귀포지역 탄산온천수와 탄산수를 대상으로 한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 제주지역 탄산온천수와 탄산수의 pH는 6.21~6.84의 범위와 평균 3,704 μ S/cm 높은 전기전도도로 지하수에 비해 약산성과 높은 전기전도도의 특성으로 이온 함량이 매우 높은 특성을 보인다.

(2) 탄산수의 화학적 유형은 Mg(Ca,Na)-HCO₃유형에서 Na(Ca,Mg)-HCO₃유형을 보인다. 지하수의 경우 Mg(Ca)-HCO₃에서 Na(K)-HCO₃의 유형으로 걸쳐 넓게 분포한다. 내륙탄산수에 비하여 Mg의 함량이 높은 것이 특징이며, F, Fe의 함량이 상대적으로 낮은 특성을 보인다. 이는 이지역의 주구성 암석인 현무암질 암석내 염기성 광물의 영향으로 보인다. 그리고 아연 등 일부 미량원소 성분이 높은 값을 보인다.

(3) 탄산온천수와 지하수의 동위원소 조성은 GMWL선 상부에 도시되며, 여름철 강수의 동위원소 특성을 반영하여 탄산수와 지하수의 누적된 함량은 여름철 강수량이 겨울철 강수량 보다 우세함을 보인다.

(4) 탄산온천수와 탄산수에 대한 탄소동위원소 분석결과 시기별 약간의 차이를 보이거나 $\delta^{13}\text{C}$ 의 범위가 -7.27~-2.28 ‰의 범위를 보이며, 맨틀과 마그마 기원과 같은 심부기원으로 또는 심부기원과 무기기원의 혼합된 특성을 보인다.

(5) CFCs 분석결과, 탄산온천수와 탄산수는 47.5~57.2년의 연령을 보이고, 지하수는 약 30.3~49.5 년전의 강우가 함량된 것으로 계산되었다. 삼중수소 분석결과 탄산수는 0.48 TU, 지하수는 0.10~1.56 TU의 범위를 보인다. 연령측정 결과, 탄산수는 약 58.2년, 지하수는 약 37.1~86.3년의 대재시간이 계산되어 탄산수의 연령은 CFCs와 삼중수소 동위원소 방법이 유사한 값을 보여주었다.

(6) 영쪽기체 동위원소비(³He/⁴He, ⁴He/²⁰Ne) 분석결과 제주지역 탄산수는 맨틀 마그마와 같은 심부기원으로 확인되어 CO₂ 가스의 기원이 화산활동과 관련한 심부 마그마 기원임을 뒷받침한다.

참고문헌

- 고용권, 윤성택, 김천수, 최현수, 김건영, 1999(a), 중원 지역 탄산수의 지구화학적 진화, 대한자원환경지질학회지, 32(5), 469-483.
- 고용권, 김천수, 배대석, 김건영, 정형재, 1999(b), 초정지역 탄산수의 지화학적 연구 I. 수리화학, 한국지하수토양환경학회지, 6(4), 159-170.
- 박기화, 조등룡, 김정찬, 모슬포·한림도폭 지질보고서 1:50,000(한국자원연구소, 2000), 56p.
- 박기화, 이병주, 조등룡, 김정찬, 이승렬, 김유봉, 이한영, 조병욱, 장영남, 손병국, 전희영, 김용욱, 서귀포·하효리도폭 지질보고서 1:50,000(제주도, 2000), 163p.
- 윤윤열, 김경자, 이길용, 고경석, 2010, 계절에 따른 강우중 삼중수소 함량변화, 한국분석과학회지, 23(2), 161-164.
- 이광식, 고동찬, 김용제, 염병우, 2008, 환경 추적자를 이용한 지하수 연대측정: 논평, 대한지질학회지, 44(4), 573-588.
- 이광식, 고동찬, 이대하, 박원배, 2002, 제주도 강수의 동위원소 조성의 시공간적 분포: 지하수 함양에의 응용, 대한지질학회지, 38(2), 151-161.
- 이동립, 2005, 안정동위원소를 이용한 제주지역 토양수의 이동특성 연구, 석사학위논문, 제주대학교 대학원, 제주특별자치도, 46p.

- 정찬호, 김천수, 김통권, 김수진, 1997, 편마암-물 반응계에서 지하수의 지화학적 진화 및 이차광물 생성에 관한 반응경로 모델링, 한국광물학회지, 10(1), 33-44.
- 정찬호, 정기영, 1999, 경북 청송지역 달기 탄산약수의 지화학적 수질특성과 생성기원, 대한자원환경지질학회지, 32(5), 455-468.
- 정찬호, 김종근, 이재영, 2001, 충청지역 탄산수의 산출양상, 지화학적 특성 및 생성기원, 대한자원환경지질학회지, 34(2), 227-241.
- 정찬호, 2002, 경북지역 탄산수의 생성기원과 수리화학적 특성, 대한자원환경지질학회지, 35(2), 121-136.
- 정찬호, 2004, 강원지역에서 산출되는 탄산천의 수리화학 및 생성환경, 한국광물학회지, 17(1), 61-73.
- 정찬호, 고용권, 신선호, Keisuke Nagao, 김규한, 김건영, 2009, 이천 및 포천지역 온천수의 수리화학적 특성 및 영족기체 기원, 대한지질공학회지, 19(4), 529-541.
- 정찬호, 유상우, 김규한, Keisuke Nagao, 2011, 경북-강원일대 탄산약수의 수질화학과 탄산 및 영족기체 기원, 대한지질공학회지, 21(1), 65-77.
- 정찬호, 김규한, Keisuke Nagao, 2012, 청송 달기탄산약수의 수리지화학과 탄산 및 영족기체 기원, 대한지질공학회지, 22(1), 123-134.
- 최현수, 고용권, 김천수, 배대석, 윤성택, 2000, 강원도 지역 탄산수의 환경동위원소적 특성, 대한자원환경지질학회지, 33(6), 491-504.

- Ahn, J. S., Kim, S. j., U, Z. K., and Song, S. J, 1992, Environmental isotope-aided studies in sea water contamination of eastern coastal aquifer in Cheju Island, The Korean Journal of Environmental Agriculture, 11(1), 26-40.
- Aka, F. T., Kusakabe, M., Nagiouang, K. and Tanyileke, G., 2001, Noble gas isotopic compositions and water/gas chemistry of soda springs from the islands of bioko, Sotome and Annobon, along with Cameroon Volcanic Line, West Africa. Applied Geochemistry, 16(3), 323-338.
- Appelo, C. P. J. and Postma, D., 1993, Geochemistry, groundwater and pollution, A. A. Balkema Publisher, 90-94.
- Atekwana E.A. and Krishnamurthy R.V., 1998, Seasonal variations of dissolved inorganic carbon and $\delta^{13}\text{C}$ of surface waters: application of a modified gas evolution technique, Journal of Hydrology 205(3), 265-278.
- Bakalowicz, M., 1979, Contribution de geochime deseaux a la connaissance de láquifere karstque et de la karstification, PhD thesis, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, France.
- Barnes, I., Irwin, W. P. and White, D. E., 1978, Global distribution of carbon dioxide discharges and major zones of seismicity. Water Resources investigations 78-39 open-file report., U.S geological survey, 1-12.
- Begemann, F and Libby, W. F., 1957, Continental water balance, groundwater inventory and storage times, surface ocean mixing rates and world-wide water circulation patterns from cosmic-ray and bomb tritium, Geochimica et Cosmochmica Acta, 12(4), 277-296.

- Blavoux, B., Dazy, J. and Sarrot-Reynauld, J., 1982, Information about the origin of thermomineral waters and gas by means of environment isotopes in eastern Azerbaijan, Iran and Southeast France, *Journal of Hydrology*, 56(1), 23-28.
- Busenberg, E. and Plummer, L. N., 1992, Use of chlorofluorocarbons (CCl₃F and CCl₂F₂) as hydrologic tracers and age-dating tools: The alluvium and terrace system of central Oklahoma, *Water Resources Research*, 28(9), 2257-2283.
- Cerón, J. C., Bosch, A. P. and Galdeano, C. S., 1998, Isotopic identification of CO₂ from a deep origin in thermomineral waters of southeastern Spain, *Chemical Geology*, 149(3), 251-258.
- Clark, I. and Fritz, P., 1997, *Environmental Isotopes in Hydrology*, Lewis publishers, 323p.
- Cornides, I. and Cornides, M., 1983, Isotope geochemical study of the CO₂ occurrences in the Eastern Carpathians. *Foldt. Kozl, Budapest*, 121-125.
- Cornides, I. and Kecskes, A., 1974, A genetic investigation of the carbon dioxide occurrences in the Carpathian Basin, Part II : Hungarian Mining Research Institute Pub., 17, 263-266.
- Craig, H., 1953, The geochemistry of the stable carbon isotopes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 3(2-3), 53-92.
- Dansgaard, W., 1964, Stable isotopes in precipitation, *Tellus*, 16, 1702-1703.
- Epstein, S. and Mayeda, T. K., 1953, Variation of ¹⁸O content of waters from natural sources, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4(5), 213-224.

- Greenberg, A. E., Clesceri, L. S., and Eaton, A. D., 1992, Standard methods for the examination of water and waste water, The American Public Health Association, Washington DC, 4-55.
- Griesshaber, E., O'Nions, R. K. and Oxburgh, E. R., 1992, Helium and carbon isotope systematics in crustal fluids from the Eifel, the Rhine Graben and Black Forest, F.R.G. *Chemical Geology*, 99(4), 213-235.
- Hoefe, J., 1997, *Stable Isotope Geochemistry*, Springer-Verlag Pub., 212p.
- Irwin, W. P. and Barnes, I., 1980, Tectonic relation of carbon dioxide discharges and earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 85(B6), 3115-3121.
- Inshibashi, J., Sano, Y., Wakita, H., Gamo, T., Tsutsumi, M., and Sakai, H., 1995, Helium and carbon geochemistry of hydrothermal fluids from the Mid-Okinawa Trough Bak Arc Basin, southwest of Japan, *Chemical Geology*, 123(1), 1-15.
- Jeong, C. H., Kim, H. J., and Lee, S. Y., 2005, Hydrochemistry and genesis of CO₂-rich springs from Mesozoic granitoids and their adjacent rocks in South Korea, *Geochemical Journal*, 39(6), 517-530.
- Kendall, C. and McDonnell, J. J., 1998, *Isotope tracers in catchment hydrology*, Elsevier, Amsterdam, 839p.
- 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*, 222(1), 65-74.

- Marques, J. M., Monteiro Santos F. A., Graca, R. C., Castro, R., Aires-Barros, L. and Mendes Victor, L. A., 2001, A geochemical and geophysical approach to derive a conceptual circulation model of CO₂-rich mineral waters: A case study of Vilarelho da Raia, Northern Portugal, *Journal of Hydrogeology* , 9(6), 584-596.
- Moore, J. G., Bachelder, J. N., and Cunningham, C. G., 1997, CO₂-filled vesicles in mid-ocean basalt, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2(4), 309-327.
- Morrison, J., Brockwell, T., Merren, T., Fourel, F., Phillips, A. M., 2001. On-line high-precision stable hydrogen isotopic analyses on nanoliter water samples, *Analytical Chemistry*, 73(15), 3570-3575.
- Park, J. S., Jeong, C. J., Nagao, K., Yang J. H., Sumino, H., Kim K. H., Kim, M. S., Lee, J . I., Park. C. H., Koh, Y. K., and Hur, S. D., 2016, Hydrochemistry and noble gas geochemistry of geothermal waters in Chungcheong Province, South Korea, *Geochemical Journal*, Vol. 50(1), 89-103.
- Pineau, F., Javoy, M., and Bottinga, Y., 1976, ¹³C/¹²C ratios of rocks and inclusions in popping rocks of the Mid-Atlantic Ridge and their bearing on the problem of isotopic compositions of deep seated carbon, *Earth and Planetary Science Letters*, 29(2), 413-421.
- Piper. A. M., 1944, A Graphic procedure in the geochemical interpretation of Water-analyses, *Transactions, American Geophysical Union*, 25(6), 914-923.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L. and Gonfiantini, R., 1993, Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart, P. K., Lohman, K. C., Mckenzie, J. and

Savin, S. (eds.), Climate Change in Continental Isotopic Records, Geophysical Monograph 78, American Geophysical Union, 1-36.

Szabo, Z., Rice, D. E., Plummer, L. N., Busenberg, E., Drenkard, S., and Schollosser, P., 1996, Age dating of shallow groundwater with chlorofluorocarbons, tritium/helium 3, and flow path analysis, southern New Jersey coastal plain, Water Resources Research, 32(4), 1023-1038.

U.S. Geological Survey, 2015, CFCs North American average curve, Retrieved from http://water.usgs.gov/lab/software/air_curve/index.html.

Yurtsever, Y., and Gat, J. R., 1981, Atmospheric waters. In: Gat, J. R. and Gonfiantini, R. (eds.), Stable Isotope Hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle, IAEA Technical Reports Series, 13(12). 103-142.

ABSTRACT

Origin and Hydrochemical Characteristics of Carbonated hot spring water and Carbonated-water at Seoqwipo, Jeju island.

Lee, Yong Cheon

Dept. of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering

Graduate School, Daejeon University

(Directed by Prof. Jeong Chan Ho Ph. D)

In this study, geochemical composition, CFCs(Chlorofluoro carbons), $\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$ isotopes and noble gases isotopes (He, Ne) were analyzed to determine their recharge age, source of CO_2 gas and noble gases of carbonated hot spring water and carbonated-water samples collected in the Seoqwipo of the Jeju island.

The pH of the carbonated hot spring waters ranges from 6.21 to 6.84, and the high electrical conductivity range(1,928~4,720 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Their chemical composition is classified as $\text{Mg}(\text{Ca}, \text{Na})\text{-HCO}_3$ and $\text{Na}(\text{Ca}, \text{Mg})\text{-HCO}_3$ types. As a result of the calculation of groundwater age using CFCs concentrations as an environmental tracer, the hot spring water and groundwater were estimated to be about 47.5~57.2 years and about 30.3~49.5 years, respectively. The $\delta^{13}\text{C}$ values of carbonated hot spring range from -1.77 to -7.27‰, and are plotted on the deep-seated field or the mixing field of the deep-seated and inorganic origin. Noble gases isotopic ($^3\text{He}/^4\text{He}$, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$) ratio shows that helium gas of carbonated hot waters comes from deep-seated magma origin.

감사의 글

본 논문에 대하여 세심한 관심과 지도를 해주신 정찬호 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

석사학위논문을 완성하는데 논문지도와 학부시절부터 석사과정까지 큰 가르침을 주신 황정 교수님, 김학준 교수님, 박충화 교수님, 윤형구 교수님, 김승준 교수님, 임명혁 교수님, 김규범 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

학부시절부터 많은 인연으로 함께했던 건설안전방재공학과 선후배, 동기들에게도 감사의 말을 전합니다. 대학원 동기로서 큰 힘과 버팀목이 되어준 유진이, 석사과정에 함께한 대홍이와 지환이, 학부때부터 평생지기 친구인 승우, 실험실에서 나의 일을 대신하여 도움을 많이 준 재한이와 상문이, 석사학위논문과 관련하여 현장 조사에 참여한 실험실 후배들(준식, 상진, 송민, 진성)에게도 감사합니다.

그리고 지금까지 이 자리에 있도록 저에게 큰 힘이 되어주신 아버지, 어머니, 누나에게 감사의 인사를 드립니다.

마지막으로 학교에서 만난 수많은 인연에 대해 소중하게 생각하고 있습니다. 앞으로도 끊기지 않고 이어갔으면 좋겠습니다.