

경북-강원일대 탄산약수의 수질화학과 탄산 및 영족기체 기원

정찬호^{1*} · 유상우¹ · 김규한² · Keisuke Nagao³

¹대전대학교 지반방재공학과, ²이화여자대학교 과학교육과, ³동경대학교 지진화학연구소

Hydrochemistry and Origin of Noble Gases and CO₂ Gas Within Carbonated Mineral Waters in the Kyeoungbuk-Kangwon Province, Korea

Chan Ho Jeong^{1*}, Sang Woo Yoo¹, Kyu Han Kim², and Keisuke Nagao³

¹Dept. of Geotechnical Engineering, Daejeon University, Korea

²Dept of Science Education, Ewha Womans University, Korea

³Laboratory for Earthquake Chemistry, University of Tokyo, Japan

본 연구에서는 경북 봉화지역, 강원도 오대산 및 춘천지역에서 산출되는 8개 탄산약수터에서 11개 탄산약수 시료를 대상으로 수리화학적 특성을 규명하고, 용존무기탄소의 동위원소($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)분석을 통해 탄산가스의 기원을 해석하며, 영족기체 동위원소($^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$)의 동위원소 존재비를 분석하여 탄산가스의 기원과 연계한 영족기체의 기원을 밝히고자 하였다. 연구결과 탄산약수의 수리화학적 특성은 pH 5.59~6.04 범위로 약산성의 특성을 보이고, 전기전도도는 302~864 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위를 보인다. 모든 탄산약수의 수리화학적 유형은 Ca-HCO_3 형에 속한다. 특히 Fe, Mn의 함량이 높아 음용수 수질기준치를 초과한다. 연구지역 탄산약수의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 값은 -2.84~5.3‰ 범위를 보이므로 CO₂의 기원은 주로 심부기원이며, 물-암석 반응과정에서 탄산염광물등의 영향을 일부 받은 것으로 해석된다. 탄산약수의 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 동위원소비와 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 동위원소비 상관관계에서 탄산약수는 기원상 3개의 군으로 분류된다. 맨틀과 같은 심부기원의 영역, 대기기원에 가까운 영역, 맨틀기원과 대기기원의 혼합영역으로 도시된다. 이는 심부기원의 영족기체가 천부지하수와 지표노출에 의해 대기기원과 혼합된 것으로 해석되며, 맨틀과 같은 심부기원의 헬륨가스의 공급은 지질경계 및 단층과 같은 지질구조와 밀접한 관계가 있는 것으로 추정된다.

주요어 : 탄산광천수, 수리화학적 특성, 탄소동위원소, $^3\text{He}/^4\text{He}$, 심부기원

Hydrochemical and carbon isotopic ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) analyses of 11 water samples, and noble gas isotopic analyses of 8 water samples collected in the Kyeoungbuk and Kangwon areas of Korea were performed to determine their hydrochemical characteristics and to interpret the source of noble gases and CO₂ gas in the water. The carbonated mineral waters are weakly acidic (pH = 5.59-6.04), and electrical conductivity ranges from 302 to 864 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The chemical composition of all the water samples is Ca-HCO_3 type. The high contents of Fe and Mn exceed the safe limits for drinking water. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values of the samples range from -5.30‰ to -2.84‰, indicating that the carbon is supplied mainly from a deep-seated source and to a lesser degree from an inorganic carbonate source. The $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios of the samples range from 1.51×10^{-6} to 6.45×10^{-6} . The samples plot into three groups on a $^3\text{He}/^4\text{He}$ versus $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ diagram: the deep-seated field (e.g., a mantle source), the atmospheric field, and the air-mantle mixing field. A wide range of $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ratios is observed (0.036×10^{-6} to 1.76×10^{-6}), indicating that while radiogenic ^4He is dominant in these water samples, mantle-origin He is also present. The supply of CO₂ gas and noble gases from a deep-seated source to carbonated waters is inferred to be controlled by geological structures such as faults and geological boundaries.

Key words: carbonated mineral waters, hydrochemical composition, carbon isotope, $^3\text{He}/^4\text{He}$, deep-seated origin

*Corresponding author: chjeong@dju.kr

서론

탄산약수는 인체의 필요한 다량의 광물질을 함유하고 있으며, 탄산 및 중탄산의 적절한 조화로 소화기능 개선 및 위장병 치료에 대한 효능이 공통적으로 알려져 있고, 피부병에도 효능이 있는 것으로 알려져 있다. 특히 유럽에서는 어린이에게도 탄산광천수의 음용을 권장하여 탄산음료를 대체하고 있다.

국내에서도 다양한 지역에서 산출되는 탄산약수의 국가적 차원에서 개발 및 상업화를 위해서는 탄산약수에 대한 수질화학적 특성뿐만 아니라 지질학적 생성메커니즘과 수리지화학적 진화과정에 대한 규명이 선행되어야 할 것이다.

국내에서 그 동안 진행된 탄산약수에 대한 연구결과를 종합하면, 탄산약수는 충청지역, 강원지역, 경북 북부지역에 주로 한정되어 산출되며, 탄산약수에 대한 수질화학적 특성 규명과 $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$ 동위원소 분석을 통하여 탄산가스의 기원과 탄산약수의 지질학적 생성기작에 관한 연구가 진행된 바 있다(고용권의 1999a; 1999b; 2000, 정찬호와 정기영, 1999; 정찬호와 이진국, 2000; 정찬호의, 2001; 정찬호, 2002; 정찬호, 2004).

그 중 $\delta^{13}\text{C}$ 동위원소 분석과 지질구조와의 관계를 기초하여 탄산약수의 CO_2 는 지하 심부에서 기원하였고, 순환수와의 반응에 의해 생성된 것으로 해석되어졌다. 특히 정찬호등(2002)은 탄산수의 산출이 단층, 지질경계 및 암맥과 같은 지질구조를 따라 지배되는 것으로 보고하였고, 이러한 지질구조는 지하심부의 CO_2 가스가 지하수계로 상승하기에 좋은 이동통로가 된 것으로 설명하였다.

다른나라의 연구를 예를 보면 탄산수의 생성은 단층대나 지진대와 같은 지체구조, 그리고 화산활동과 성인적으로 밀접하게 관련되어 있는 것으로 알려져 있다(Comides and Kecskes, 1974; 1982; Barnes et al., 1978; Irwin and Barnes, 1980; Comides and Comides, 1983; Griesshaber et al., 1992; Ishibashi et al., 1995; Mayo and Muller, 1997; Aires-Barros et al., 1998; Ceron et al., 1998; Marques et al., 2001). 외국의 연구사례에서는 탄산수 연구에 지구화학적 연구방법과 지구물리탐사 방법을 병행한 연구를 통하여 지질구조와 탄산가스의 기원을 연계하여 해석을 시도하고 있다. 아울러 탄산가스의 심부기원을 보다 명확하게 해석하기 위해서는 헬륨가스등 영족기체의 동위원소 연구가 필요한 것으로 제시하였다.

불활성 가스인 헬륨등 영족기체는 그들의 기원(대기, 맨틀, 지각)에 따라서 고유한 동위원소 조성값을 보이며

로 지구내에서 그들의 순환 및 기원해석에 매우 유용한 도구가 된다. 일본과 같은 온천국가에서는 온천수내 함유된 영족기체의 동위원소 특성을 이용한 온천수 기원 및 생성과정과 지체구조와의 관계 등의 해석연구가 진행되어 있다(Aka et al., 2000). 국내에서도 온천수내 헬륨, 네온등의 동위원소 조성에 대한 연구를 통하여 온천수내에서 그들의 기원과 온천수와 냉수와와의 혼합관계, 온천의 진화과정에 대한 연구가 진행되어 있다(정찬호외, 2007; 김규한외, 2008; 정찬호외, 2008; 2009).

국내 탄산약수 연구에서도 탄산가스 기원에 대한 명확한 기원을 규명하기 위해서는 영족기체 동위원소 조성에 대한 연구가 병행되어야 한다. 탄산약수의 지화학적 특성, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 동위원소의 분석과 병행하여 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 동위원소 조성비에 대한 연구를 종합하면 보다 명확한 탄산약수의 기원해석이 가능할 것이다.

본 연구에서는 경상북도 봉화지역과 강원도 오대산지역, 그리고 춘천일대 탄산약수를 대상으로 수리지화학적 특성 분석, $\delta^{13}\text{C}$ 분석과 아울러 국내 최초로 탄산약수내 영족기체 동위원소($^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$)의 존재비를 분석하여 탄산약수내 탄산가스 및 영족기체의 기원을 해석하고자 하였다.

연구지역 지질특성

지하수의 수리화학적 특성은 물의 순환과정에서 모암과의 지화학적 상호반응과 심부환경에서의 다양한 지질학적 환경에 의해서 지배된다. 여기서는 탄산약수의 수리화학적 특성을 해석하는데 필요한 연구지역의 지질을 기존의 지질도 및 도폭설명서를 인용해 간략하게 제시하고자 하였다. 지질설명은 크게 강원도 춘천일대를 A지역, 강원도 오대산일대를 B지역, 경상북도 봉화군 일대를 C지역으로 나누어 제시하였다. 연구지역 위치도와 지질도는 Fig. 1에 제시하였다(손치무와 김수진, 1963; 이동우와 김상욱, 1965; 김봉균외, 1975; 김옥준외, 1975; 이대성의, 1975; 이종혁외, 1989; 김정찬외, 1999; 최범영외, 2007).

강원도 춘천일대 (A지역)

이 지역은 경기육괴와 영남육괴의 경계에 있으며, 가장 오래된 암석으로는 호상편마암으로 석영과 장석의 우백질대 혹은모의 우흑질대가 교호하는 호상구조가 특징이다. 함석류석화강편마암은 다수의 석류석 반응을 포함하고 있으며 변성작용과 이에 수반된 화강암화작용에 의해 생성된 일종의 S유형의 화강암이다. 그리고 쥘라기의 북동-

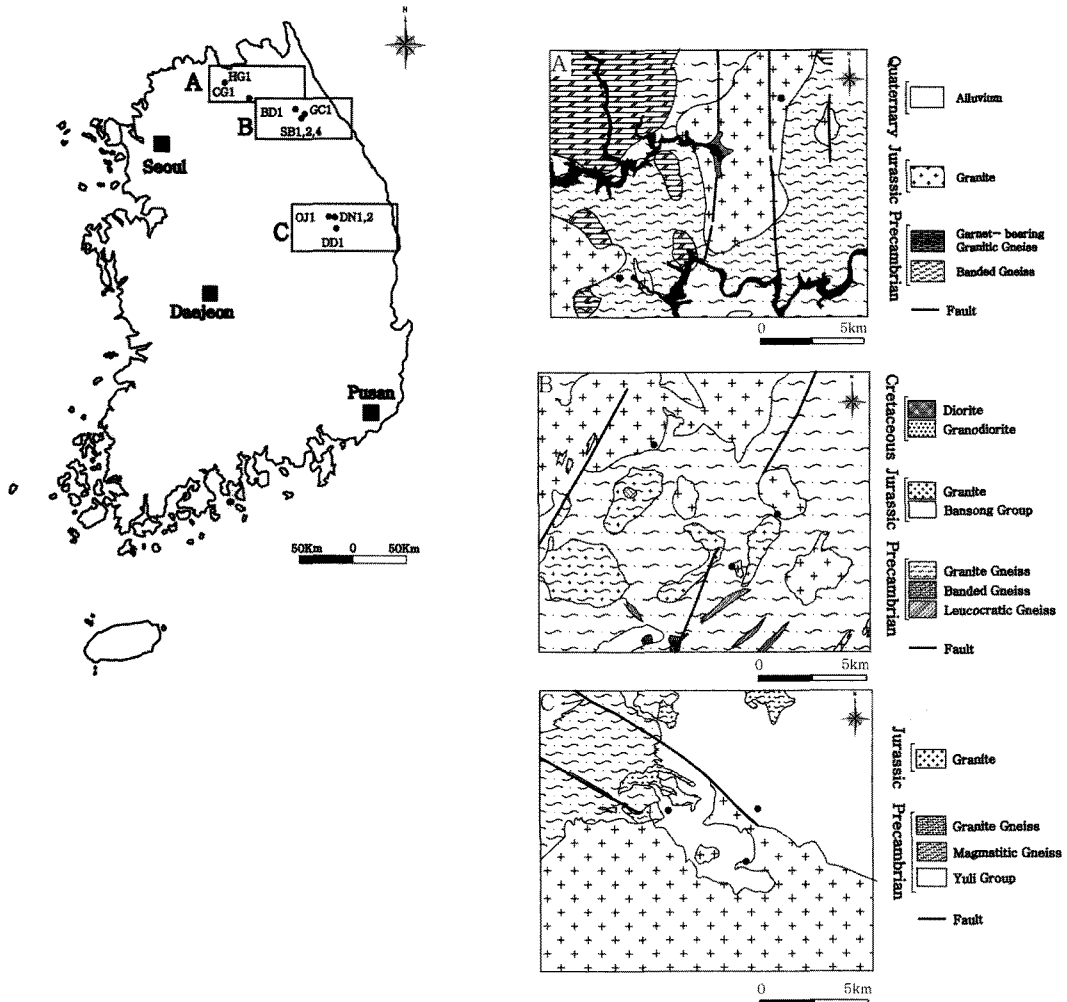


Fig. 1. Geological map showing the sampling locations of the studied carbonated mineral waters: (A) Kangwon-Chuncheon area, (B) Kangwon-Odaesan area, and (C) Kyeongbuk-Bonghwa area.

남서방향으로 분포하는 저반형 화강암체가 이들을 관입 하였다. 선캠브리아시대에 형성된 단층은 대부분 이후의 변형작용동안 재활성되었거나 단층작용의 증거가 미미하기 때문에 인지하기가 매우 어렵다. 그러나 편마암내의 연성전단대 존재와 상이한 변성도를 갖는 암석들이 인접한 분포상황 등을 근거로 단층의 존재를 추정할 수 있다(김봉균외, 1975; 김정찬외, 1999).

강원도 오대산일대 (B지역)

이 지역은 호상편마암이 가장 오랜된 암석이고, 선캠브리아기의 화강편마암과 우백질 편마암이 국부적으로 분포한다. 특히 우백질 편마암은 소규모 백상으로 나타난다.

이 지역 일부 우백질편마암에서는 압쇄작용에 의한 편마 구조를 보이거나 전기석을 특징적으로 함유하기도 한다. 반송층군은 연구지역 좌측 하단부에 국부적으로 확인된다. 주향은 N40°E이며, 북서쪽으로 경사진다. A 지역과 같이 쥬라기의 대보화강암이 관입을 하였으며, 후에 불국사운동으로 인한 화강섬록암의 관입이 있었다. 화강섬록암은 백악기 불국사관입암류중 상대적으로 고철질에 해당하는 분화의 산물로 보이며, 대부분이 소규모의 암주상으로 관입하고 있다. 또 다른 불국사관입암체인 섬록암은 중립질의 괴상 관입암체로 사장석 반정과 각섬석 주상결정이 특징적으로 관찰된다. 이 지역에는 N20°-30°방향으로 매우 뚜렷한 선형구조가 잘 발달하는데, 이들 대부분은

주향이동 단층으로서 경기육괴와 영남육괴, 옥천대가 서로 하나의 블록으로 합쳐진 이후인 백악기 말에서 제3기초에 활동하였다. 이 지역의 단층은 북북동-남남서 방향의 좌수향의 운동특성을 보인다(김옥준외, 1975; 이대성의외, 1975; 김정찬외, 1999; 최범영외, 2007).

경상북도 봉화일대 (C지역)

본 지역에 분포하는 울리층군의 퇴적시기에 대한 절대 연령자료는 없으나, 관입시기가 1,930 Ma 정도로 알려진 분천화강편마암을 포함하는 화강편마암에 의해 관입당하고 있기 때문에 이 시기보다 오래된 암석으로 판단된다. 울리층군은 약 1.85 Ga 시기의 우백질 화강암에 의해 재차 관입되어 있기 때문에 광역 변성작용의 시기는 원남층군의 변성시기와 유사 할 것으로 추측되어진다. 마그마타이트질 편마암은 울리층군과 밀접한 관련을 가지며 분포한다. 연관성으로 미루어 이 암석은 울리층군의 광역변성작용과 이에 수반된 화강암화작용의 산물로 생각되며, 그 생성시기는 울리층군의 변성시기와 밀접한 관련을 가질 것으로 보인다. 연구지역내 선크브리아시기의 화강편마암은 대부분이 암주상으로 산출된다, 대부분이 등립질 내지 중립질이나, 암체의 연변부에서는 일부 세립질로 나타나기도 한다. 후에 주라기에 있었던 대보조산활동의 일환으로 대보화강암이 대규모 관입이 이루어 졌다. 이 지역의 단층은 북서-남동방향의 방향성을 보인다. 이는 송림-배도 조산 운동에 발생한 트러스트 운동때문으로 해석된다(손치무와 김수진, 1963; 이동우와 김상욱, 1965; 이종혁외, 1989).

연구방법

시료채취 및 현장 수질측정

이번 연구는 경북 봉화지역과 강원도 오대산 및 춘천 일대에서 산출되는 탄산약수를 연구대상으로 하였다. 봉화지역에서는 3개 약수터에서 4개의 시료를 채취하였다. 약수터와 각각의 시료명은 다덕약수(DD1), 두내약수(DN1, DN2), 오전약수(OJ1) 등이다. DN2 시료는 지하120m 시추를 통하여 토출되는 탄산약수이고, 나머지 약수는 모두 암반틈을 따라 자연용출되는 탄산약수이다. 강원도 오대산 일대에서 3곳의 약수터에서 5개의 시료를 채취하였다. 약수터와 시료명은 갈천약수(GC1), 방동약수(BD1), 삼봉약수(SB1, SB2, SB4) 등이다. 모든 약수는 암반틈을 따라 자연적으로 솟아나는 자연천이며, 삼봉약수의 특징은 하나의 지점에서 3개의 약수가 각각 다르게 솟아나고, 이곳에서 약 50m 떨어진 곳에서도 약수가 솟아난다. 춘천시

역은 2개 약수터(후곡약수, 추곡약수)에서 각각 1개씩의 시료(HG1, CG1)를 채취하였다. 이 지역 약수도 모두 자연적으로 솟아나는 샘의 형태이다. 시료채취 지점도는 Fig 1에 도시하였다. 탄산약수는 현재 일반인들에게 개방되어 음용되고 있으며, 지하체에서 수질을 관리하고 있다.

현장조사시 탄산약수에 대한 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 용존산소(DO), 전기전도도, 온도, 그리고 HCO_3^- 농도를 측정하였다. 측정항목 모두 Thermo사의 Orion 5 star 휴대용 측정기를 이용하여 측정하였다. 탄산광천수의 HCO_3^- 함량은 0.05 N(혹은 0.5 N)농도의 HCl을 이용하여 산중화적정법으로 분석하였다.

탄산약수내 이온성분을 분석을 위하여 현장에서 채취된 시료는 0.45 μm 여과지를 이용해 부유물과 이물질을 제거한 후 양이온 및 미량원소 분석용 60 mL, 음이온 분석용 60 mL로 각각 구별하여 채취하였다. 양이온 분석용 시료에는 폴리에틸렌 용기에 담은 후 농질산을 첨가하여 pH 2이하로 산성화시켜 이온들의 침전과 용기내 흡착을 방지하였다. 모든 시료는 화학분석전까지 냉장 보관하였다. 탄소 동위원소 및 영속기체 분석용 시료를 채취한 방법과 전처리하는 후술된다.

화학분석

탄산약수에 대한 화학성분분석중 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+)과 일부원소(Fe, Mn, Sr)성분은 원자흡광분광분석기(Unicam model 989, AAS), 유도결합쌍 플라즈마 원자방출분광분석기(Shimadzu model ICPS-1000 III, ICP-AES)로 분석하였으며, 미량원소(Li, B, Al, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Rb, Cd, Sn, Cs, Ba, Pb, Th, U)는 유도결합쌍 플라즈마 질량분석기(Fison model PQ, ICP-MS)로 분석되었으며, 이상의 분석은 한국기초과학지원연구원 대덕본원에서 이루어졌다. 음이온성분(SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , F^-)은 한국기초과학지원연구원 부산지부의 Dionex 120 모델의 이온크로마토그래피로 분석하였다. 화학분석자료의 정확성을 검토하기 위해서 분석된 총 양이온과 총 음이온 함량을 당량으로 환산하여 전하 균형을 계산하였다.

동위원소 분석

탄소 동위원소 분석을 위하여 현장에서 시료를 채취한 뒤 수산화나트륨(NaOH)을 이용하여 pH를 11이상으로 조절한 후 염화바륨(BaCl_2)을 첨가하여 시료내 탄산염 성분을 BaCO_3 형태로 침전시켰다. 침전물은 여과기를 이용하여 여과지로 거른 후 건조하여 분말로 시료를 준비하여

탄소동위원소 분석을 실시했다. 탄소동위원소는 한국기초 과학연구원 대덕본원에서 분석되었다. 분말시료 약 2 mg 을 100%인산(H₃PO₄)과 25°C에서 반응시킨 후 발생된 CO₂가스를 안정동위원소 질량분석기(Stable isotope ratio mass spectrometer (GV Instruments사의 Isoprime 모델)로 분석하였다(McCrea, 1950). NBS 18과 NBS 19 표준시료를 반복 측정하여 얻은 탄소 동위원소 분석정밀도는 약 ±0.1%이다.

영족기체 분석

영족기체 동위원소 분석을 위하여 경북 봉화지역에서 4개 시료(OJ1, DD1, DN1, DN2)를 채취하였으며, 강원도 오대산 일대에서 2개 시료(BD1, SB1), 그리고 춘천지역에서 2개(HG1, CG1)의 물 혹은 가스시료를 채취하였다. 영족기체 동위원소 분석을 위한 시료는 동경대학교 지진 화학연구소에서 특수 개발한 양쪽편에 고진공의 개폐기가 있는 진공유리용기를 이용하여 채취하였다. 용기의 체적은 약 50 cc이고 물속에 용존된 영족기체는 금속재질로 제작된 토폴러펌프시스템으로 추출하였다. 이 시스템은 극 저준위의 노블가스 배정치를 가진 환경하에서 노블가스를 측정할 수 있는 장치이다. 토폴러 펌프를 이용하여 탄산수에서 노블가스는 두 개의 Ti-Zr 포집자를 이용하여 정화시켰다. 그리고 참숫 포집자와 저온 냉각된 스테인레스 강철 포집자를 이용하여 He, Ne과 Ar-Kr, 그리고 Xe 등 3개의 가스군으로 분리하였다.

모든 영족기체의 절대량과 He, Ne 동위원소비는 VG5400(MS-III) 동경대학교 지진화학연구소의 노블가스 질량분석기로 분석하였다. 질량분석기의 민감도와 동위원소 질량분리능의 수정요소는 알려진 표준대기의 가스함량을 측정함으로써 결정하였다.

수리지화학적 특성

현장수질측정자료

연구지역내 탄산약수의 pH, 산화환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존산소량(DO), 온도 등의 현장측정자료는 Table 1에 제시하였다. 탄산약수의 pH는 5.59~6.04의 범위로 약산성의 특성으로 기존 연구에서 제시된 국내 탄산약수의 pH범위와 유사하다(Jeong et al., 2005). 탄산약수의 산화-환원전위(Eh)는 11.6~97.3 mV의 범위로 산화환경을 보인다. 전기전도도(EC)는 302~864 μS/cm의 범위를 보인다. Fig. 2(a)에서 보여주는 것과 같이 pH와 EC의 상관관계에서 pH가 증가함에 따라 전기전도도값도 증가하는 경향을 보인다. 이는 물-암석의 반응 과정에서 수소가 온 소모로 통해 용존이온의 용출이 증가하는 지화학적 특성을 반영하는 것으로 보인다. 탄산광천수의 pH와 Eh사이에는 뚜렷한 상관관계를 보여주지는 않는다(Fig. 2(b)). 용존산소는 0.43~3.47 mg/L의 범위를 보이며, 평균 1.4 mg/L로 낮은 값을 보인다. 수온은 9.5~15.4°C의 온도 범위를 보인다.

주요이온 특성

탄산약수의 주요성분에 대해서 Table 1에 정리하였다. 탄산약수내에 용존 양이온은 일반지하수에 비해 전반적으로 높은 함량을 보인다. 중요성분중 하나인 Na⁺은 지역에 따라서 20.6~50 mg/L의 범위를 보인다. K⁺의 농도는 1.7~6.1 mg/L 범위를 보이며, OJ1 시료에서 가장 높은 함량을 보인다. 탄산약수내 Na⁺, K⁺ 성분은 화강암과 편마암내 사장석과 정장석의 용해작용으로부터 주로 공급된 것으로 볼 수 있으며, 일부 운모류의 층간양이온으로 존재하는 K⁺으로부터 공급될 수 있을 것이다.

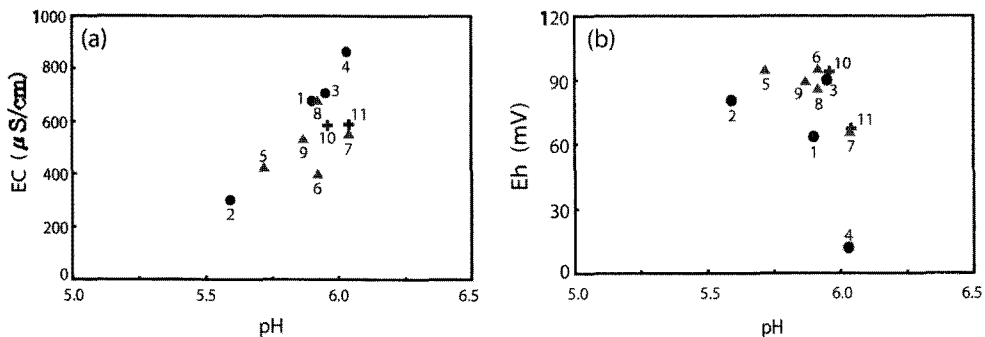


Fig. 2. Relation between pH and Eh (and EC) of carbonated mineral waters from the study areas. Sample numbers 1-11 on the figure indicate samples DD1, OJ1, DN1, DN2, SB1, SB2, SB4, GC1, BD1, HG1, and CG1, respectively.

Table 1. Chemical data for samples of carbonated mineral water collected from the study area.

Sample ID	Sampling date	Temp (°C)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Sr ²⁺	Si	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	E (%)
DD1	10.07.06	14.8	5.90	63.5	764	0.43	47.5	4.56	258	34.0	10.2	2.35	1.15	36.8	1007	16.3	8.76	0.42	0.07	N.D	3.42
OJ1	10.07.06	12.1	5.59	80.4	302	3.47	27.7	6.10	63.4	24.7	29.1	0.91	0.43	31.9	397	17.4	2.88	0.23	0.18	N.D	4.61
DN1	10.07.03	13.5	5.95	90.0	704	0.67	41.0	1.67	322	9.48	11.4	1.21	1.98	35.0	1022	5.15	4.79	1.29	0.12	N.D	5.80
DN2	10.07.06	15.4	6.03	11.6	864	0.47	50.0	2.20	411	11.8	17.9	1.34	2.49	40.4	1434	1.92	2.79	1.23	N.D	N.D	1.59
SB1	10.07.07	9.50	5.72	93.9	422	0.43	21.9	2.41	153	15.1	24.8	1.26	0.79	21.2	549	6.99	1.2	1.57	N.D	N.D	5.20
SB2	10.07.07	11.0	5.92	94.6	395	3.17	20.6	2.82	152	13.9	8.10	1.19	0.72	29.1	534	13.0	2.22	1.50	0.05	N.D	4.57
SB4	10.07.07	15.7	6.04	65.6	546	0.92	36.7	4.15	231	17.8	15.3	2.15	1.13	22.8	534	4.68	2.61	0.72	0.41	N.D	7.00
GC1	10.07.07	11.3	5.92	85.3	674	0.94	32.8	2.78	286	20.9	12.6	1.35	1.46	29.9	717	15.5	2.32	0.42	0.49	N.D	4.65
BD1	10.07.07	9.7	5.87	89.2	527	1.05	32.6	2.66	211	16.9	12.2	1.41	1.67	21.0	976	5.83	2.24	0.29	N.D	4.28	6.90
HG1	10.07.08	15.0	5.96	93.9	587	0.90	25.8	2.86	283	10.6	10.7	0.5	1.29	29.7	732	4.32	2.36	1.16	0.13	N.D	5.21
CG1	10.07.08	13.3	6.04	67.8	590	2.02	40.6	1.90	249	10.3	18.8	2.37	1.41	23.1	885	4.75	2.54	3.13	0.09	N.D	3.36

*E(%): ion balance error

Table 2. Concentrations of trace elements in samples of carbonated mineral water collected from the study area.

Sample ID	Li	B	Al	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ge	As	Rb	Cd	Sn	Cs	Ba	Pb	Th	U
DD1	183	21.3	25.3	<0.5	2.3	1.0	4.3	5.8	24.3	38.8	<0.2	0.3	18.5	<0.1	0.7	1.6	223	<0.1	<0.05	0.13
OJ1	126	9.6	57.6	<0.5	3.2	1.4	9.4	24.8	42.4	77.6	<0.2	0.4	54.1	<0.1	0.9	1.4	380	1.0	<0.05	0.28
DN1	101	40.5	217	<0.5	2.6	3.3	0.5	3.1	30.7	24.6	0.7	0.9	9.5	<0.1	0.7	1.4	2906	1.4	<0.05	0.22
DN2	122	46.3	224	1.5	3	1.9	0.5	5.6	63.4	112	1.1	0.1	13.4	<0.1	<0.1	1.8	377	3.2	<0.05	0.11
SB1	119	11.2	764	1.7	3.2	2.5	3.3	10.3	17.4	25.2	<0.2	2.1	19.7	<0.1	0.8	4.8	346	1.5	<0.05	0.08
SB2	112	10.9	650	3.9	1.7	0.9	4.3	12.1	44.5	44.4	<0.2	0.3	21.1	<0.1	3.8	4.4	1229	2.5	<0.05	0.14
SB4	202	18.6	288	<0.5	2.0	1.0	3.6	7.3	22.2	22.2	<0.2	3.1	24.5	<0.1	2.1	1.7	2181	1.0	<0.05	0.36
GC1	79.2	17.3	46.0	<0.5	3.4	1.4	0.9	6.8	3.0	14.8	<0.2	11.7	12.7	<0.1	0.2	1.4	419	0.4	<0.05	0.23
BD1	219	10.9	26.3	<0.5	3.1	2.1	2.9	12.1	49.8	48.5	<0.2	1.7	9.0	<0.1	0.9	0.1	380	2.2	<0.05	0.19
HG1	68.0	59.6	46.1	1.2	2.2	1.1	0.6	4.8	9.9	22.5	<0.2	1.8	13.9	<0.1	0.2	0.5	5467	0.5	<0.05	0.34
CG1	0.8	32.7	464	<0.5	2	0.9	0.3	5.6	10.8	10.2	<0.2	N.D	7.8	<0.1	0.7	0.4	207	0.7	<0.05	0.06

탄산약수내 Ca^{2+} 의 농도는 63.4-411 mg/L의 범위를 보여 산출지역에 따라서 상당히 큰 함량의 차이를 보이며 탄산광천수의 가장 풍부한 양이온이다. 두내약수중 DN2 시료가 가장 높은 Ca^{2+} 의 함량(411 mg/L)을 보이며, DN1 시료에서도 상당히 높은 값인 322 mg/L의 농도를 보인다. OJ1시료에서 가장 낮은 값(63.4 mg/L)을 보인다. 삼봉약수의 경우 SB1, SB2의 시료는 각각 153 mg/L와 152 mg/L로 거의 유사한 값을 보이지만, 이들과 산출위치상 떨어진 SB4시료는 231 mg/L의 함량으로 상대적으로 높은 값을 보인다. 다른지역 약수의 경우 211~286.4 mg/L의 농도범위를 보인다. Mg의 농도는 9.5~34 mg/L 범위로 다덕약수인 DD1시료에서 가장 높은 값인 34 mg/L의 농도를 보이며, 두내약수인 DN1 시료에서 가장 낮은 9.48 mg/L의 농도를 보인다.

Fig. 3에서는 pH와 주요 이온성분들과의 상관관계를 보여준다. pH가 증가함에 따라 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 과 HCO_3^- 의 함량은 비례하여 증가하는 경향을 보여주는 반면 Na+K와 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 의 함량은 뚜렷한 상관성을 보이지는 않는다. 국내 화강암과 편마암 대수층에서 지하수의 pH는 지화학적 진화과정을 지시하는 지시자의 역할을 할 수 있다(정찬호외, 1997). 탄산약수의 pH도 지화학적 진화과정에 따라서 작은 폭이지만 상승하는 경향을 볼 수 있다(Jeong et al., 2005). 따라서 연구지역 탄산약수의 지화학적 특성은 물-암석 반응과정에서 Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- 성분을 주로 공급하는 탄산염광물과 Ca-장석의 용해반응에 주로 지배된 것으로 보인다. 즉, 연구지역 지질은 모두 화강암과 선캠브리아 편마암과의 경계부에 위치한다. 정찬호외(2001)에 의하면 선캠브리아기의 편마암내 사장석 성분은

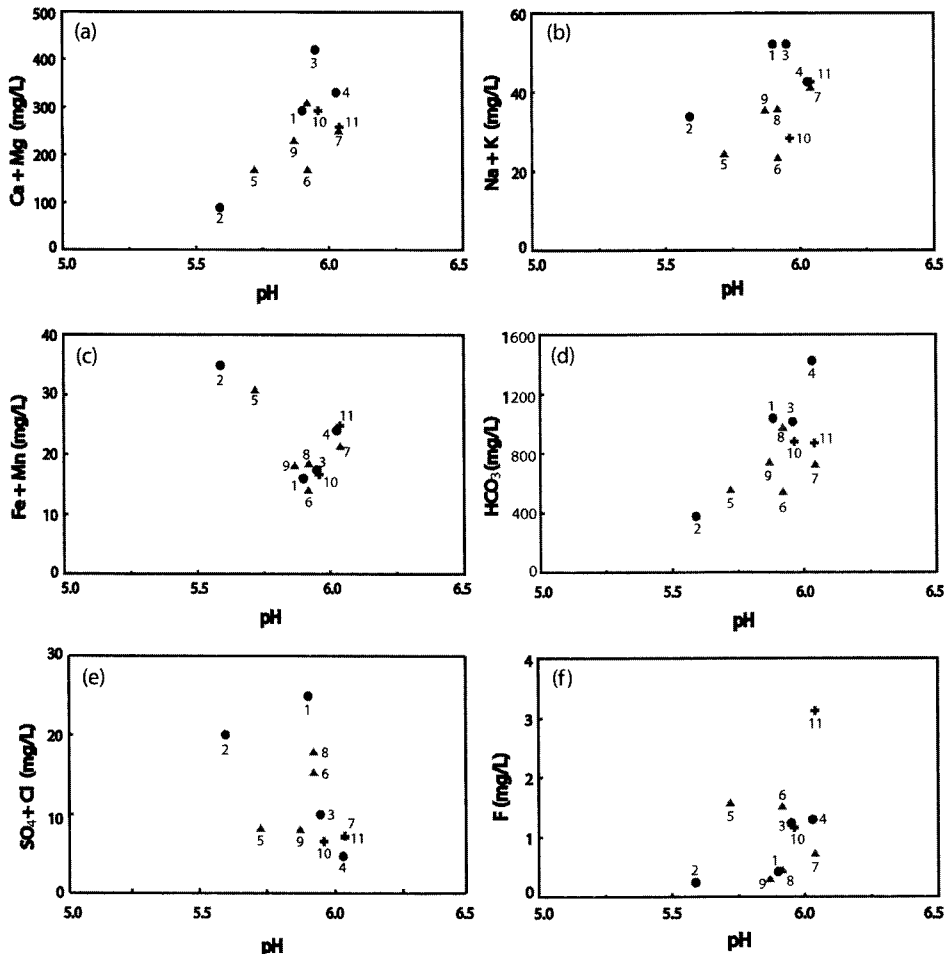


Fig. 3. Relation between pH and major ions for samples of carbonated mineral waters from the study area. The sample numbers are the same as those in Fig. 2.

오랜 지질시대를 거치면서 알바이트화작용(Albitization)이 진행되고 그 과정에서 용출되는 Ca^{2+} 성분이 공극수의 탄산염(CO_3^{2-}) 성분과 반응하여 주변 공간에 탄산염광물을 침전시키는 것으로 보고되었다. 따라서 탄산염수의 Ca^{2+} 의 함량과 pH와의 상관성은 편마암내 함유된 탄산염광물과 산성의 탄산수의 화학반응에서 수소이온의 소모로 인한 pH는 상승하고, Ca^{2+} 의 용출이 증가하게 되었을 것이다. 그리고 장석류와 탄산수와의 용해반응을 거치면서 Na, K 등의 이온성분들이 용출된 것으로 해석된다.

일반지하수의와는 다르게 탄산염수는 Fe의 함량이 매우 높은 것이 특징으로 연구지역 탄산염수내 Fe의 함량은 8.1~29.1 mg/L의 농도 범위로 일반지하수에 비해서 수십 배에서 수백배 높은 농도를 보인다. 그리고 먹는물 수질 기준인 0.3 mg/L 이하를 모두 초과한다. 탄산염수 내 높은 Fe, Mn과 기원을 해석하기 위해서 향후 암석 광물학적 연구가 진행되어야 할 것이다. 모든 약수터 주변에는 약수가 대기에 노출된 후 Fe의 산화로 인해 붉은 색의 철수산화물과 철산화물의 침전물이 확인되었다. Fig. 3의 pH와 Fe+Mn와의 상관관계를 보면 pH가 증가함에 따라 Fe+Mn의 함량은 감소하는 경향을 보여준다. 이는 pH와 HCO_3^- 농도의 증가에 따라 수산화물 또는 탄산염과의 복합체를 형성하여 Fe, Mn 성분이 침전하기 때문으로 해석된다.

탄산염수의 음이온 성분인 HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , F의 함량 특성은 다음과 같다. HCO_3^- 는 연구지역 탄산염수에서 397~1,434 mg/L로 가장 풍부한 음이온이며 산출지역에 따라 큰 농도 차이를 보인다. DN2 약수에서 가장 높은 값을 보이고, OJ1 약수에서 가장 낮은 값을 보인다. CO_2 는 자연수에서 pH와 압력 조건에 따라서 free CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} 의 형태로 존재한다. 탄산염수의 pH가 5.59~6.04 범위이므로 탄산염수내 CO_2 는 free CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- 의 형태로 존재할 것이며, 총 CO_2 농도(T_{CO_2}) 값은 PHREEQC 프로그램으로 계산하였다. 계산된 T_{CO_2} 값은 $3.56\text{--}8.61 \times 10^{-2}$ mol/Kg의 농도 범위를 보인다.

탄산염수의 Cl^- 농도는 1.2~8.76 mg/L의 범위이고, SO_4^{2-} 농도는 1.9~17.4 mg/L의 범위로 전반적으로 낮은 값을 보이고 지역별로 약간의 함량차이로 특별한 특징을 보이지는 않는다. NO_3^- 의 농도는 0~0.49 mg/L의 농도로 매우 낮은 값을 보여 오랜기간 이용되어진 탄산염수가 인위적인 오염원과는 잘 격리되어 있음을 보인다.

탄산염수의 F는 0.23~3.13 mg/L의 농도를 보이며, 음용수 수질기준인 1.5 mg/L를 초과하는 약수는 CG1, SB1, SB2 등 3개 약수이며, 나머지는 음용수 수질기준

이하의 농도를 보인다. Jeong et al. (2005)에 의해 제시된 강원지역 다른 약수의 F 함량 1.55~9.60 mg/L 농도범위와 비교하면 비교적 낮은 불소의 함량을 보인다. F의 기원은 형석(CaF_2)의 용해와 운모류, 각섬석류, 인회석등의 O^{2-} 또는 OH^- 치환하여 광물 용해시 용탈될 수 있으나(Hem, 1992). 연구지역은 화강암과 편마암을 모암으로 하므로 운모류의 OH기를 치환한 F⁻ 성분의 용해가 주요 기원으로 해석된다. Fig. 3에서 pH와 F의 상관관계를 보면 pH가 증가함에 따라서 F의 농도도 대체적으로 증가하는 경향을 보인다. 이는 물-암석 반응과정에서 F의 주요 공급원으로 추정되는 운모류의 용해반응이 지속적으로 진행에 의한 것으로 보인다.

미량원소 특성

연구지역 탄산염수내 함유된 미량원소로는 Li, B, Al, Ni, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Rb, Cd, Sn, Cs, Ba, Pb, Th, U 등이며, 분석값은 Table 2에 제시하였다. 이들중 Li, B, Al, Cu, Zn, Sr, Ba 원소가 비교적 높은 함량을 보이는 원소이다.

규산염광물의 용해작용으로부터 용출될 수 있는 Al은 25.3~764 μ g/L의 함량을 보이며, 약수중 DN1, DN2, SB1, SB2, SB3 시료는 음용수 수질기준인 200 μ g/L를 초과한다. Ba의 함량은 207~5,467 μ g/L의 함량 범위로 비교적 높은 농도를 보이며, Sr의 경우 0.43~2.49 mg/L의 함량 범위로 역시 높은 농도를 보인다. 탄산염수내 높은 농도의 Ba 및 Sr의 공급은 탄산염광물내 같은 2+ 금속이온인 Ca를 치환하고 있던 Ba, Sr 성분이 탄산염광물의 용해시 Ca 및 Mg와 함께 용출된 것으로 보인다. 중금속류인 Zn은 4.8~112 μ g/L의 범위를 Cu는 3.0~63.4 mg/L의 범위를 보이고, 나머지 Pb, Cd, As, Cr, Co 등 인체에 유해한 성분은 수질기준치 이하의 매우 낮은 농도를 보인다. B은 9.6~46.3 mg/L의 범위를 보여 음용수 수질기준 1.0 mg/L 이하를 보인다. Li 함량은 79.2~219 μ g/L 범위를 보이며, Li은 휘석, 각섬석, 운모에 함유되어 있으며, 특히 운모류에 많이 함유되어 있어 이들로 부터 용해되어 기인하는 것으로 보인다.

수리화학적 유형

탄산염수의 주요 용존이온의 수리화학적 유형은 Fig. 4의 파이퍼도를 도시하였다. 시료번호는 도면에서 편리상 1번부터 11번까지는 DD1, OJ1, DN1, DN2, SB1, SB2, SB4, GC1, BD1, HG1, CG1의 순서이다. 음이온 성분으로는 HCO_3^- 의 함량이 절대적으로 우세한 반면 양이온의

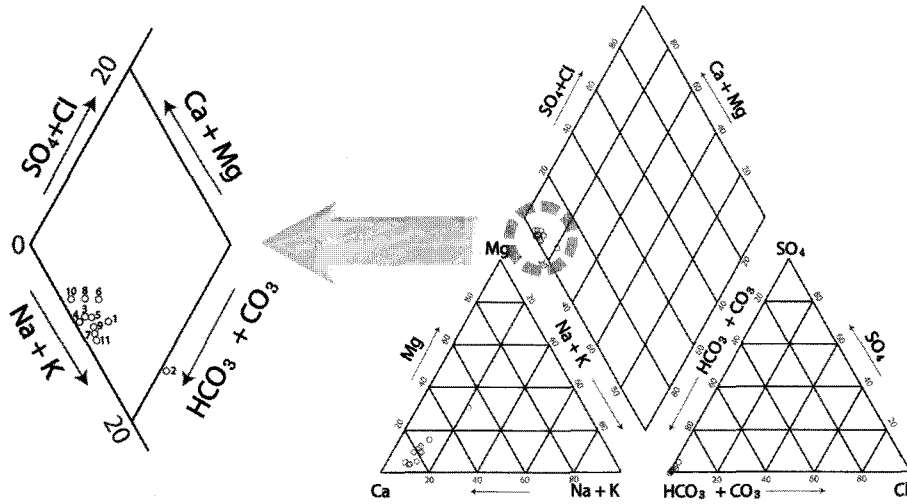


Fig. 4. Trilinear plots of the chemical composition of samples of carbonated mineral water from the study area. The sample numbers are the same as those in Fig. 2.

경우 지역별 탄산약수에 따라 다소 차이가 있지만 Na+K는 상대적으로 함량이 낮고, Ca²⁺가 우세한 전형적인 Ca-HCO₃ 유형을 보인다. 정찬호 외(1997)에 의하면 일반적으로 화강암과 화강편마암 대수층에서 지하수의 지화학적 진화단계는 초기 단계에서는 Ca-HCO₃유형에서 시작하여 진화과정을 거치면서 Na(Ca)-HCO₃유형과 Na-HCO₃유형으로 점진적으로 진화되는 경향을 보인다. 그러나 탄산약수는 물-암석 상호반응과정에서 고농도의 CO₂ 압력 하에서 지화학적 반응이 진행되므로 일반적인 지하수의 진화단계를 적용하기는 어렵다. 탄산약수는 편마암이 함유하는 탄산염광물과 세맥, 암맥 등으로 산출되는 방해석과 같은 탄산염광물이 높은 CO₂ 환경의 산성의 pH 조건 하에서 초기 물-암석 반응단계에서 탄산수와의 활발한 지화학적 반응을 통하여 다량의 Ca²⁺, Mg²⁺이 용출된 것으로 보인다.

탄소동위원소 및 영족기체 특성

탄소동위원소 특성

탄산약수내 함유되어 있는 CO₂의 공급원을 밝히는데 있어서 탄소동위원소는 유용한 도구로 사용된다(Clark and Fritz, 1997; Hoefl, 1997). 대기중 이산화탄소의 δ¹³C는 현재 약 -6.4‰로 알려져 있다(Kendall and McDonnell, 1998). Craig (1953)은 유기기원과 δ¹³C 값의 관계를 조사하여 유기물 기원의 δ¹³C 값은 -12‰ 이하의 값을 가진다고 발표하였고, Bakalowicz (1979)는 토

양내 유기물 기원의 δ¹³C값은 -25.0~22.0‰ 범위를 가진다고 제시하였다. 또한 Moore et al. (1997)과 Pineau et al. (1976)은 맨틀과 마그마 기원과 같은 심부기원의 CO₂에 대한 δ¹³C 값은 -8.0~4.7‰ 범위를, Blavoux et al. (1982)은 -8.0~4.0‰ 범위의 값을 제시하였다.

연구지역 탄산약수의 δ¹³C_{DIC} 값은 -2.84~5.30‰의 범위를 보이고, PHREEQC 프로그램으로 계산된 탄산약수내 총이산화탄소 함량(T_{CO2})값은 3.56 × 10⁻²~8.61 × 10⁻² mol/Kg 범위로 Table 3에 제시되었다. 연구지역내 탄산약수의 δ¹³C 값은 심부기원 영역과 무기기원 영역에

Table 3. Carbon isotope composition and total CO₂ concentration in samples of carbonated mineral water collected from the study area.

Sample ID	δ ¹³ C(PDB)	T _{CO2} (mol/Kg)
DN-1	-3.34	6.73 × 10 ⁻²
DN-2	-2.84	4.81 × 10 ⁻²
DD-1	-4.47	5.53 × 10 ⁻²
OJ-1	-5.10	8.61 × 10 ⁻²
SB-1	-5.18	5.10 × 10 ⁻²
SB-2	-3.94	3.56 × 10 ⁻²
SB-4	-3.62	3.88 × 10 ⁻²
BD-1	-5.30	6.29 × 10 ⁻²
GC-1	-4.77	5.20 × 10 ⁻²
HG-1	-4.52	5.36 × 10 ⁻²
CG-1	-4.02	4.69 × 10 ⁻²

걸쳐 도시된다(Fig. 5). 이는 탄산약수내 높은 함량을 보이는 H₂CO₃와 HCO₃⁻의 기원이 주로 심부에서 공급된 CO₂와 일부는 탄산염광물의 용해반응에 의한 영향으로 해석된다.

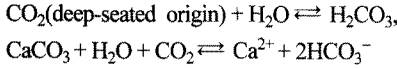


Fig. 5에서는 δ¹³C과 T_{CO2} 농도값, 전기전도도, Ca + Mg 및 HCO₃⁻ 함량과의 상관관계를 도시하였다. 전기전도도, Ca + Mg, HCO₃⁻ 함량과 δ¹³C 상관관계는 뚜렷하지는 않지만 미약하나마 음의 상관관계를 보인다. 이는 물-암석 반응을 통한 탄산약수내 주요이온의 함량의 증가는 심부기원의 CO₂공급과 상관관계가 있음을 시사한다.

영축기체 특성

대기, 지구표층, 지구내부에 존재하는 휘발성원소의 물질 순환과정 연구에서 비활성기체인 영축기체(Noble gas)는 유력한 추적자(Tracer)의 역할을 하고 있다(Aka et al., 2000). 특히 헬륨 동위원소비(³He/⁴He)는 대기환경에서 측정된 값과 지각내부 환경에서 측정된 값이 큰 차이를 보여 맨틀로부터 지구표층으로의 휘발성원소의 이동과정을 추적에 활용될 수 있다. 대기, 지각, 맨틀 등 다양한 지구조 환경에서 상이한 헬륨, 아르곤 동위원소비를 보여

준다(Sumino, 2001). 영축기체중 ³He 동위원소는 대부분 지구형성 초기나 운석 형성시에 포획되어 있는 원시 헬륨이다. ⁴He 동위원소는 U(Th)의 α붕괴 시에 생성된다. 원시 기원보다 방사성기원의 동위원소 성분이 높다. ³He/⁴He 비는 대상물질이 존재하는 지질환경이나 시간에 따라 크게 다르기 때문에 각종 지질현상 해석에 중요한 정보자료가 되고 있다. 화산가스, 온천가스, 지하수, 해수, 암석, 광물 등의 ³He/⁴He비 특성으로 아르곤 동위원소비(⁴⁰Ar/³⁶Ar)와 함께 이들 물질의 기원 연구에 유용하게 이용되고 있다.

Sumino (2001)는 헬륨 및 아르곤가스의 기원지로 대기, 지각, 맨틀 3곳의 단성분의 동위원소 조성을 제시한 바 있다. 즉, 대기에서 ³He/⁴He비는 1.4(× 10⁻⁶)이며 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 비는 296으로 제시하였고, 대륙지각에서는 ³He/⁴He비가 0.02 이하이고 ⁴⁰Ar/³⁶Ar비는 70,000이하으로 제시하였다. 일본과 같이 화산지역의 화산성 기원은 ³He/⁴He비가 11.2 이하이며, ⁴⁰Ar/³⁶Ar비는 296~3,000 범위이다. 그리고 중앙 해령현무암(MORB)의 경우 ³He/⁴He비는 11.2 ± 1.4, ⁴⁰Ar/³⁶Ar비는 40,000이상으로 제시하였다.

경북북부와 강원지역 8개 탄산약수 시료에 대한 영축기체 분석결과는 Table 4와 같다. 탄산약수의 ³He/⁴He비는 1.51~6.45를 보이고, ⁴⁰Ar/³⁶Ar비는 265.5~320.9의 범위를 보인다. 그리고 0.894~225의 범위를 보이는 ⁴He/²⁰Ne비는 지구내부와 대기기원 He의 혼합정도를 지시하는 지시자

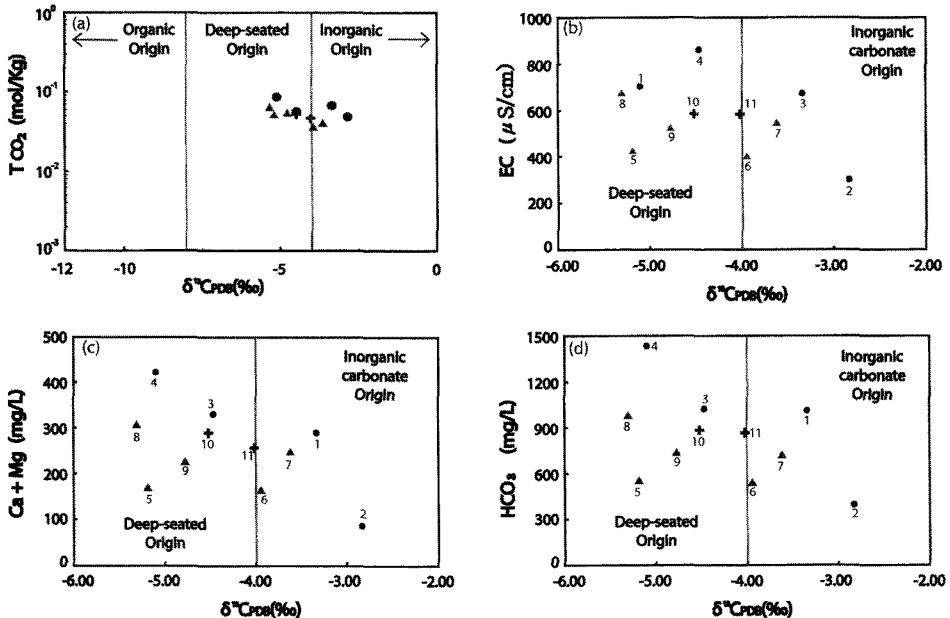


Fig. 5. Relation between major chemical components and δ¹³C values for samples of carbonated mineral water from the study area.

Table 4. Noble gas isotope data for carbonated mineral water collected from the study area.

Sample ID	$^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$	$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	$^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
DD1	0.894	1.51	9.884	0.02921	0.18786	294.31
OJ1	5.14	5.52	9.789	0.02924	0.1877	265.52
DN2	7.59	4.44	9.796	0.02922	0.1875	302.88
DN1	203	5.19	9.744	0.02940	0.1879	319.76
SB1	0.75	1.61	9.797	0.02921	0.1876	293.74
BD1	7.00	3.68	9.741	0.02955	0.1879	297.59
HG1	169	6.45	9.686	0.02922	0.1885	317.00
CG1	225	1.98	9.689	0.02921	0.1887	320.92

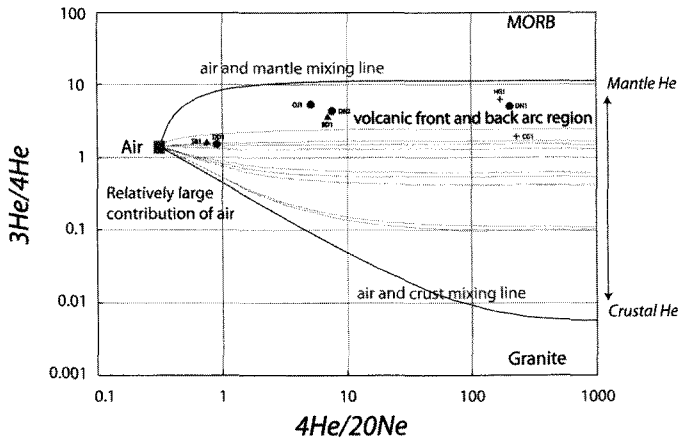


Fig. 6. Noble gas isotopic ratios of samples of carbonated mineral water and gas plotted on the diagram of $^3\text{He}/^4\text{He}$ vs. $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ isotopic ratios.

로 이용된다. Fig. 6은 탄산약수의 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 동위원소비와 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 동위원소비 상관관계와 대기-맨틀-지각 기원사이에 그들의 혼합관계를 보여준다. Fig. 6에 도시된 탄산약수는 3개의 군으로 분류된다. HG1, DN1, CG1 시료는 맨틀과 같은 심부기원의 영역에 도시되며, SB1, DD1 시료는 대기기원 영역에 도시된다. 그리고 OJ1, BD1, DN2 시료는 맨틀기원과 대기기원의 혼합영역에 도시된다.

경북 봉화지역의 두내약수인 DN1과 DN2의 경우 DN1 약수는 절리면을 따라 자연적으로 솟아나는 자연천이며, 약 20m 이격거리에 있는 DN2의 경우 약 120m 심도의 시추공에서 양수되는 약수로 이들의 영족기체 동위원소비 서로 다른 영역에 도시된다. DN1은 심부기원으로 도시되고, DN2의 경우 심부기원과 대기기원의 혼합선상에 도시된다. 이는 심부기원 헬륨가스가 시추공을 통하여 천부의 지하수가 유입되면서 대기기원의 헬륨가스가 혼합된 결과로 해석된다. SB1과 DD1의 경우 자연적으로 솟아

자연천 약수이지만 지표부의 천부지하수가 상당히 유입되어 대기기원의 영역 가까이 도시되는 것으로 보인다. 춘천 지역에서 산출되는 HG1, CG1 시료는 모두 맨틀등 심부기원 영역에 도시된다. 특히 추곡약수의 경우 단층면을 따라서 약수가 솟아나는 것이 현장에서 확인된 바 단층이 심부기원의 헬륨가스의 이동통로 역할을 하는 것으로 보인다. OJ1, BD1의 시료의 경우 대기와 심부기원의 혼합영역에 속하지만 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비가 높은 것이 특징적이다.

탄산동위원소 조성값과 영족기체 조성값 특성을 종합하면 탄산약수의 헬륨가스와 CO_2 는 주로 심부에서 기원되고 일부 시료에서 천부지하수와 혼합에 영향을 받은 것으로 보인다. 그동안 탄산약수의 탄산가스 심부기원설에 대해서 이번 헬륨동위원소 연구결과로 보다 신뢰성을 갖게 되었으며, 심부기원의 CO_2 및 헬륨동위원소비는 지질경계 및 단층과 같은 지질구조와 밀접한 관계가 있는 것으로 추정된다.

결론

강원도 춘천일대, 오대산일대, 경상북도 봉화군 일대의 탄산약수에 대해 수리화학적 특성, CO₂가스 및 영족기체의 기원에 대한 연구결과를 다음과 같이 결론적으로 요약하였다.

(1) 탄산약수의 수리화학적 특성은 pH 5.59~6.04 범위의 약산성을 보이며, 전기전도도 값은 302~864 μS/cm 범위를 보인다. 수리화학적 유형은 Ca-HCO₃ 유형에 모두 속한다. 특히 Fe, Mn의 함량이 높아 음용수 수질기준치를 초과한다. 일부에서는 불소의 함량도 음용수 수질기준치를 초과한다. 그러나 탄산약수는 치료용 목적의 기능수이므로 일반적인 음용수 수질기준의 별도의 기준이 마련되어야 할 것이다.

(2) 연구지역 탄산약수의 δ¹³C_{DIC}값은 -5.3~-2.84‰의 범위를 보여 CO₂의 기원은 주로 심부기원 영역과 무기기원 영역에 속하므로 탄산약수의 CO₂는 주로 심부기원이며, 물-암석 반응과정에서 탄산염광물들의 영향을 일부 받은 것으로 해석된다. 그리고 총CO₂ 농도는 3.56 × 10⁻²~8.61 × 10⁻² mol/Kg 범위이다.

(3) 탄산약수의 ³He/⁴He동위원소비와 ⁴He/²⁰Ne동위원소비 상관관계에서 탄산약수는 기원상 3개의 군으로 분류된다. 맨틀과 같은 심부기원 영역, 대기기원영역, 맨틀-대기 혼합영역으로 구분된다. 탄산광천수내 헬륨가스는 주로 심부에서 기원되나 일부는 천부지하수와 혼합의 영향을 받은 것으로 해석된다. 맨틀과 같은 심부기원의 헬륨가스 및 CO₂가스의 공급은 지질경계 및 단층과 같은 지질구조와 밀접한 관계가 있는 것으로 추정된다.

감사의 글

본 연구과제는 연구재단 과제번호(2009-0073876)의 연구비 지원으로 수행되었다. 현장조사와 실내자료 처리에 도움을 준 김동욱, 정태양, 김대상군에게 감사한다.

참고문헌

고용권, 김천수, 배대석, 김건영, 정형재, 1999a, 초정지역 탄산수의 지화학적 연구, 지하수환경 6(4), 171-179.
 고용권, 김천수, 배대석, 이동익, 2000, 문경지역 심부지하수의 수리화학 및 환경동위원소 연구, 자원환경지질, 33(6), 469-489.
 고용권, 윤성택, 김천수, 최현수, 김건영, 1999b, 중원지역 탄산수의 지화학적 진화, 자원환경지질, 32(5), 469-483.
 김규한, 정윤정, 정찬호, 長尾敏介, 2008, 강화 석모도 지역

온천수와 지하수의 수리지 구화학 및 동위원소 연구, 자원환경지질, 41(1), 15-32.
 김봉균, 지정만, 이돈영, 소철섭, 1975, 한국지질도 1:50,000(현리도폭), 국립지질광물연구소, 19p.
 김옥준, 김서운, 유병화, 박병권, 김규호, 1975, 한국지질도 1:50,000(북분리도폭), 국립지질광물연구소, 17p.
 김정찬, 고희재, 이승렬, 이창범, 최성자, 박기화, 1999, 지질도폭설명서 1:250,000, 강릉-속초도폭, 한국지질자원연구원, 68p.
 손치무, 김수진, 1963, 한국지질도 1:50,000(춘양도폭), 국립지질조사소, 28p.
 이대성, 윤석규, 김정진, 1975, 한국지질도 1:50,000(창춘도폭), 국립지질광물연구소, 19p.
 이동우, 김상욱, 1965, 한국지질도 1:50,000(서벽리도폭), 국립지질조사소, 25p.
 이종혁, 이상현, 이태우, 1989, 한국지질도, 1:50,000(풍기도폭), 한국동력자원연구소, 28p.
 정찬호, 2002, 경북지역 탄산수의 생성기원과 수리화학적 특성, 자원환경지질, 35(2), 121-136.
 정찬호, 2004, 강원지역에서 산출되는 탄산천의 수리화학적 및 생성환경, 한국광물학회지, 17(1), 61-73.
 정찬호, 고용권, 신선호, Nagao, K., 김규한, 김건영, 2009, 이천 및 포천지역 온천수의 수리화학적 특성 및 영족기체 기원, 지질공학, 19(4), 529-541.
 정찬호, 김종근, 이재영, 2001, 충청지역 탄산수의 산출양상, 지화학적 특성 및 생성기원, 자원환경지질, 34(2), 227-241.
 정찬호, 김통권, 김천수, 김수진, 1997, 편마암-물 상호반응에 의한 지하수의 지화학적 진화 및 이차광물 생성에 대한 반응경로 모델링, 한국광물학회지, 10(1).
 정찬호, 이진국, 2000, 경상계 퇴적암에서 산출되는 탄산 지하수의 지화학적 특성과 생성기원, 지질공학, 10(1), 51-62.
 정찬호, 정기영, 1999, 청송지역 달기 탄산약수의 지화학적 수질특성과 생성기원, 자원 환경지질, 32(5), 455-468.
 정찬호, 허현성, Nagao, K., 김규한, 2007, 호남지역 저온형 온천수의 수리지화학적 및 안정동위원소 특성과 영족기체의 기원에 관한 연구, 자원환경지질, 40(5), 635-649.
 정찬호, Nagao, K., 김규한, 최훈공, Sumino, H., 박지선, 박중화, 이동익, 허순도, 2008, 동해안지역 온천 유형별 수리화학적 특성 및 영족기체 기원, 지하수도양 환경, 13(1), 1-12.
 최범영, 이승렬, 임순복, 2007, 한국지질도 1:50,000(양구도폭), 한국지질자원연구원, 29p.
 Aires-Barros, L., Marques, J. M., Graca, R. C., Matias, M. J., Van Der Weijden, C., Kreulen, H. R. and Eggenkamp, H. C., 1998, Hot and cold CO₂-rich mineral waters in Chaves geothermal area(Northern Portugal), Geothermic 27, 89-107.
 Aka, F. T., Kusakabe, M., Nagiouang, K. and Tanyileke, G., 2000, Noble gas isotopic compositions and water/gas chemistry of soda springs from the islands of bioko, Sotom and Annobon, along with Cameroon Volcanic Line, West Africa. App Geochem., 16, 323-338.
 Bakalowicz, M., 1979, Contribution de geocheme desaux a la connaissance de Iaquifere karstque et de la karstification. PhD thesis, Univ, Pierre et Marie Curie, Paris, France. 153p.
 Barnes, I., Irwin, W. P. and White, D. E., 1978, Global distribution of carbon dioxide discharges and major

- zones of seismicity. Open-File Rept. Water Resources investigations, 78-39. Menlo park, Calif., US Geol. Survey, 1-12.
- Blavoux, B., Dazy, J. and Sarrot-Reynaud, J., 1982, Information about the origin of thermomineral waters and gas by means of environment isotopes in eastern Azerbaijan, Iran and southeast France. *J. Hydrol.*, 56, 23-28.
- Cerón, J. C., Bosch, A. P. and Galdeano, C. S., 1998, Isotopic identification of CO₂ from a deep origin in thermomineral water of southeastern Spain. *Chem. Geol.*, 149, 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 . *Publ. Hung. Mining Res. Inst., Budapest*, 17, 263-266.
- Cornides, I. and Kecskes, A., 1982, Deep-seated carbon dioxide in Slovakia : the problem of its origin. *Geol. Zbornik. Geol. Carpathica*, 33, 183-190.
- Craig, H., 1953, The geochemistry of the stable carbon isotopes. *Geochem. et Cosmochim. Acta*, 3, 53-92.
- Griesshaber, E., ÖNions, R. K. and Oxburgh, E. R., 1992, Helium and carbon isotope systematics in crustal fluids from the Eifel, the Rhine Graben and Black Forest, *FR.G. Chem., Geol.*, 99, 213-235.
- Hem, J. D., 1992, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, 4rd ed., US Government printing office, Washington, 182p.
- Hoef, J., 1997, Stable Isotope Geochemistry, Springer, 201p.
- Irwin, W. P. and Barnes, I., 1980, Tectonic relation of carbon dioxide discharges and earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 85, 3115-3121.
- Ishibashi, 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, *Chem. Geol.*, 123, 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, 517-530.
- Kendall, C. and McDonnell, J. J., 1998, Isotope tracers in catchment hydrology, Elsevier, Amsterdam, 839p.
- 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 de Raia, Northern Portugal. *Hydrogeology Journal*, 9, 584-596.
- Mayo, A. L. and Muller, A. B., 1997, Low temperature diagenetic-metamorphic and magmatic and magmatic contributions of external CO₂ gas to shallow groundwater system, *J. of Hydrology*, 197, 286-304.
- McCrea, J. M., 1950, The isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale, *J. Chem. Phys.*, 18, 849-857.
- Moore, J. G., Bachelder, J. N. and Cunningham, C. G., 1997, CO₂-filled vesicles in mid-ocean basalt. *J. Volcanol. Geothermal Res.*, 2, 309-327.
- Pineau, P., 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 Planet. Sci. Lett.*, 29, 914-923.
- Sumino, H., 2001, Origin of alkali basalt volcanism inferred from noble gas isotopic systematics: Implications for mantle dynamics in back arc region of subduction zone. Ph. D. thesis, Univ. Tokyo, Japan. 185p.

2011년 3월 9일 원고접수, 2011년 3월 21일 게재승인

정찬호

대전대학교 지반방재공학과
300-716 대전광역시 동구 용운동 96-3
Tel: 042-280-2573
Fax: 042-280-2576
E-mail: chjeong@dju.kr

유상우

대전대학교 지반방재공학과
300-716 대전광역시 동구 용운동 96-3
Tel: 042-280-2577
Fax: 042-280-2576
E-mail: sangwoosun@hanmail.net

김규한

이화여자대학교 과학교육학과
120-750 서울특별시 서대문구 대현동 11-1
Tel: 02-3277-2696
E-mail: kyuhan@ewha.ac.kr

K. Nagao

Laboratory for Earthquake Chemistry
Graduate School of Science University of Tokyo
Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan
TEL: +81-3-5841-4621
FAX: +81-3-5841-4119
E-mail: nagao@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp