

경북지역 탄산수의 생성기원과 수리화학적 특성

정찬호*

대전대학교 지구시스템공학과

Genesis and Hydrochemistry of CO₂-rich Springs from Kyungpook Province, Korea

Chan Ho Jeong*

Department of Geological Engineering, Daejeon University, Daejeon, 300-716, Korea

The CO₂-rich springs in the Kyungpook Province has been found at 16 locations. Most of the CO₂-rich springs outflow along either fault zones or the geologic boundary between Mesozoic granites and their adjacent rocks. The CO₂-rich water samples show a high CO₂ concentration (P_{CO₂} 0.46 to 5.21 atm), weak acidic pHs, wide electrical conductivity values ranging from 422 to 2,280 μS/cm, and high Fe content. They are classified into the Ca-HCO₃ type in chemical composition. δ¹⁸O and δ²H data indicate that CO₂-rich water is meteoric origin. The δ¹³C values (-1.5‰ to -6.1‰ PDB) suggest that dissolved H₂CO₃⁰ and HCO₃⁻ are mainly derived from a deep-seated CO₂ and carbonate minerals. The thermodynamic equilibrium state between CO₂-rich water and major minerals, and hydrochemical characteristics indicate that major source minerals determining the chemical composition of CO₂-rich water are carbonate minerals, plagioclase, K-feldspar and Fe-oxides. Under high CO₂ pressure and the weak acidic condition, most of the CO₂-rich water samples are thermodynamically in the dissolution state with respect to albite and carbonate minerals.

Key words : CO₂-rich springs, fault, chemical composition, δ¹³C, deep-seated CO₂

경북에서는 16개 지역에서 탄산수가 산출된다. 탄산수의 산출은 중생대 화강암과 경상누층군의 퇴적암류(또는 선캄브리아기 변성암)의 지질경계부 또는 단층대를 따라서 집중된다. 경북지역 탄산수는 매우 높은 CO₂의 함량(P_{CO₂} = 0.46~5.21 atm)과 422~2,280 μS/cm 범위의 전기전도도, Ca-HCO₃형의 수리화학적 특성을 보인다. 아울러 대부분의 탄산수는 다량의 Fe를 함유하는 것이 특징이다. 탄산수에 대한 δD과 δ¹⁸O 분석 값은 탄산수가 순환수 기원임을 지시한다. 탄산수의 높은 CO₂ 압력과 탄산염 침전물에 대한 δ¹³C 값이 -1.5 ~ -6.1‰ PDB 범위를 보여 탄산성분은 지하 심부에서 상승한 CO₂ 가스와 탄산염광물의 용해반응에 기원한 것으로 해석된다. 탄산수와 광물사이에 열역학적 평형관계와 탄산수의 수리화학적 특성을 보면 탄산수의 화학성분을 결정한 주요 근원광물은 사장석, 정장석, 탄산염 광물 및 철산화물임을 지시한다. pH가 약산성이고, 높은 CO₂ 압력하에서 일부 탄산수를 제외한 대부분의 탄산수는 탄산염광물 및 엘바이트에 대해서 열역학적으로 용해성 환경에 있다.

주요어 : 탄산천, 단층, 화학성분, 탄소동위원소, 심부기원

1. 서 론

국내의 탄산수는 충청남·북도 일원, 경상북도 북부 지역, 강원도 지역에서 주로 산출되고, 서울의 천호동과 울릉도 등 일부지역에서도 탄산수가 산출되는 것으로

알려져 있다. 국내 탄산수에 대한 지질학적 연구는 최근 몇 년 사이에 일부 연구자에 의해 진행되어 왔다. 지금까지 탄산수에 대한 연구결과를 보면 경북 청송일대의 달기, 신촌, 고란 탄산수에 대해서 정찬호와 정기영(1999), 정찬호와 이진국(2000) 그리고 김진영 등(2001) 등에 의해서 이루어진 바 있다. 충청지역 탄산수에 대한 연구로 충북의 앙성 온천탄산수에 대한

*Corresponding author: chjeong@dju.ac.kr

연구가 Yun *et al.*(1998), 고용권 등(1999a)에 의해 이루어졌고, 충북 청원군 초정리 탄산수에 대해서는 고용권 등(1999b; 1999c)에 의해 진행된 바 있다. 충청 지역 5개 탄산천(양성, 조정, 명암, 부강, 대평)에 대한 연구는 정찬호 등(2001)에 의해 수행되었다. 그리고 강원지역 탄산수에 대해서는 최현수 등(2000), 문경온천 탄산수에 대해서는 고용권 등(2000)에 의해 발표된 바 있다.

그 동안의 연구결과를 종합하면, 연구 초기에 탄산수의 생성은 탄산염광물과 산성수의 반응에 의한 것으로 일부 연구자들이 제안하였으나, 이후 탄산동위원소 분석결과와 지질구조와의 관계 등을 기초로 하여 탄산수의 CO₂는 지하 심부에서 기원하였고 순환수와의 반응에 의해 생성된 것으로 해석되어 졌다. 특히 정찬호 등(2001)은 탄산수의 산출이 단층, 지질경계 및 암맥과 같은 지질구조를 따라 지배되는 것으로 보고하였고, 이러한 지질구조는 지하심부의 CO₂ 가스가 지하수계로 상승하기에 좋은 이동통로가 된 것으로 설명하였다. 그리고 탄산수의 화학적 유형은 대부분이 Ca-HCO₃형에 속하며, 일부는 Ca(Na)-HCO₃형 및 Na-HCO₃형으로 분류된다. 탄산수는 높은 P_{CO₂} 값을 보이고 pH는 6.0 내외의 약산성이다. 대부분의 탄산수는 일반 지하수에 비하여 상당히 높은 TDS와 다량의 Fe 성분을 함유한다.

탄산수는 세계 곳곳에서 산출되는 것으로 보고되었고, 그에 대한 생성기원과 수리화학적 및 동위원소적 연구가 많이 진행된 바 있다. 다른 나라의 연구 예를 보면 탄산수의 생성은 단층대나 지진대와 같은 지체구조 그리고 화산활동과 성인적으로 밀접하게 관련되어 있는 것으로 알려져 있고, 탄산수의 화학적 특성으로는 약산성의 pH, 높은 TDS와 CO₂ 압력을 갖는 것으로 보고되었다(Cornides and Kecskés, 1974; 1982; Barnes *et al.*, 1978; Irwin and Barnes, 1980; Griesshaber *et al.*, 1992; Cornides and Cornides, 1983; Ishibashi *et al.*, 1995; Mayo and Muller, 1997; Ceron *et al.*, 1998; Aires-Barros *et al.*, 1998, Marques *et al.*, 2001).

그 동안 국내 탄산수에 대한 연구는 탄산수의 화학적 특성, 동위원소 조성에 의한 CO₂ 가스의 기원, 그리고 충청권 지역의 탄산수 생성과 지질구조와의 관계에 대해서 다루어졌다. 본 연구에서는 경상북도 지역에서 산출되는 탄산수중 아직까지 연구된 바 없는 탄산수를 대상으로 기존의 알려진 탄산수와의 수리지질학적 비교를 포함한 경북지역 전체 탄산수의 산출상태, 수리화학적 특성, 생성과정을 종합적으로 해석하고자 하였다.

2. 지질 및 탄산수 산출특성

본 연구의 대상지역인 경북 북부 및 북동부 지역의 지질은 백악기 경상누층군에 속하는 퇴적암류와 화산암류, 그리고 중생대 화강암류 등으로 주로 구성된다(Fig. 1). 경북에서 탄산천이 산출되는 지역은 문경지역(P1), 봉화지역(P2, P3, P4), 청송지역(P5, P6, P7), 영덕-영양지역(P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14), 영천지역(P15, P16)으로 총 16 곳에서 산출된다. 탄산수가 산출되는 지역의 지질특성과 구조는 탄산수의 생성을 해석하는 데 중요한 열쇠가 될 수 있다. 탄산수 산출지역의 세부적인 지질 및 산출특성은 다음과 같다.

2.1. 문경지역

문경 탄산온천 지역의 지질은 선캄브리아기의 변성암류를 기반암으로 하여 시대미상의 옥천누층군, 고생대 캄브리아-오도비스기 조선누층군과 이들을 관입한 백악기 화강암으로 이루어져 있다(김남장 등, 1967)(Fig. 2a). 조선누층군의 부곡리층은 석회암과 석회규산염암으로 구성되며 화강암과 접하고 있다. 옥천누층군은 이화령층, 조봉층, 백화산층 등의 변성퇴적암류로 구성되어 있으며, 주향은 북동방향이고 경사는 북서쪽으로 완만하다. 백악기 화강암류는 문경읍을 중심으로 암주상 암체로 산출되며, 흑운모화강암과 각섬석화강암으로 이루어진다. 탄산온천수가 산출되는 화강암 분포 지역의 지질구조는 야외에서는 확인되지 않으나 소규모의 단층 혹은 비교적 규모가 크고 연장이 양호한 절리로 여겨지는 선구조들이 항공사진에서 인지된다(고용권 등, 2000).

문경읍 지역의 화강암류는 관입시기가 다른 두 종류의 화강암류로 구분된다. 즉, 문경읍 지역의 화강암은 K-Ar 각섬석 연령에 의하면 142.3±2.2 Ma으로 주라기말에 관입한 것으로 보인다. 문경읍 동쪽외곽부의 화강암은 K-Ar 각섬석 연령측정에 의하면 114.8±1.7 Ma으로 백악기 초에 관입한 것으로 보인다(송어촌진홍공사, 1999). 부곡리층과 접하고 있는 화강암체에는 소규모의 석회암이 곳곳에 협재되어 있다. 탄산온천은 화강암체 남쪽에 넓게 발달된 충적층 분포지역에 6개공이 개발되어 있다. 탄산온천수의 수리화학적 특성은 화강암의 광물조성 뿐만 아니라 화강암내 포획된 석회암에 의해서도 영향을 받은 것으로 판단된다.

2.2. 봉화지역

봉화지역에서 산출되는 탄산천은 오전약수터(P2), 두

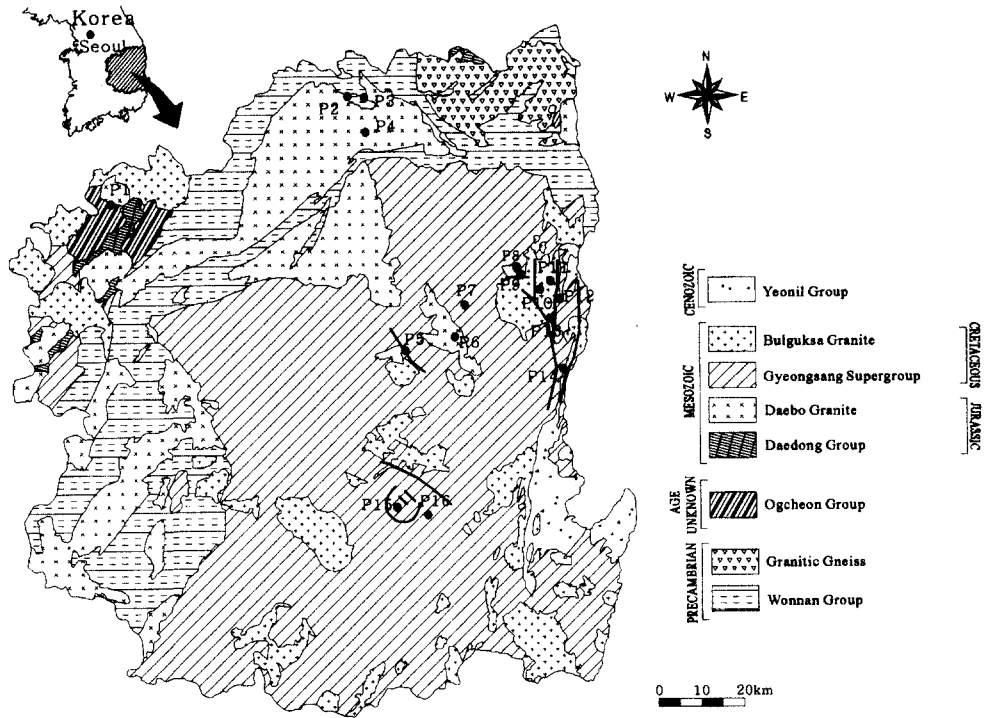


Fig. 1. Regional geologic map of the Kyoungpook Province showing the locations of CO₂-rich springs. P1: Moonkyung spring, P2: Ohjeon spring, P3: Doonae spring, P4: Daduk spring, P5: Kohran spring, P6: Dalki spring, P7: Shinchon spring, P8: Madangdoodul spring, P9: Bangkagol spring, P10: Weejeong spring, P10: Gasan spring, P12: Chosoogol spring, P13: Hansil spring, P14: Nulmee spring, P15: Hwasan spring, P16: Shinan spring.

내약수터(P3), 다덕약수터(P4)가 있다. 이 지역의 지질은 선캠브리아기의 변성암류가 기반암을 이루고 있고, 이를 백악기 춘양화강암이 관입하고 있다. 변성암류는 혼성암화된 편마암, 반상변정질 편마암, 울리층군과 원남층군으로 구성된다. 본 역의 지질도 및 지질에 대한 설명은 춘양 지질도폭 설명서(손치무와 김수진, 1963)와 풍기도폭 지질보고서(이종혁 등, 1989)를 참고하였다. 오전탄산천과 두내탄산천은 춘양화강암에 의해 포획되어 있는 울리층군과 화강암 접촉부에서 산출된다(Fig. 2b). 울리층군은 각화사층과 고선리층으로 구분된다. 각화사층은 녹리석 편암으로 구성되며, 고선리층은 흑운모·실리마니이트 편암, 규암, 석회암, 석영·흑운모편암, 견운모·녹리석 편암으로 구성된다. 오전탄산천이 산출되는 지역은 고선리층의 편암류와 석영·흑운모 편암이 분포한다. 오전약수터에는 두 곳에서 탄산수가 산출되는데 원탕은 작은 계곡에서 산출되고, 다른 한 곳은 원탕에서 약 200 m 떨어진 곳의 심도 100 m 시추공에서 산출된다. 두내탄산천도 작은 계곡에서 산출된다.

다덕탄산천은 봉화에서 법진으로 이어지는 36번 국도변 몇 곳에서 산출된다. 다덕탄산천이 산출되는 지점은 춘양화강암과 시대미상의 각섬석화강암이 접하고 있는 경계부로 36번 국도변에서 산출된다. 각섬석화강암은 원남층을 관입하였고, 춘양화강암에 의해 단절되어 있다. 춘양 지질도폭 설명서에 의하면 화강암내 소규모의 단층이 인지되나 연장선의 추적이 어려워 기재하지 않은 것으로 설명되어 있고, 발견된 단층중 현저한 것은 N 10°E의 단층과 EW단층이다. 따라서 다덕탄산수가 산출되는 EW 방향의 36번 국도가 단층일 가능성을 배제할 수 없다.

2.3. 청송지역

청송지역에는 고란약수터(P5), 달기약수터(P6), 신촌약수터(P7)가 분포하고 이 지역의 지질은 청송도폭(이홍규와 홍승호, 1973)과 영양도폭(김상욱과 박봉순, 1970)에 의해 자세히 기술되어 있다. 달기탄산수는 쥐라기 흑운모화강암의 계곡하상을 따라 작은 단열틈사이로 십여곳에서 자연적으로 솟아난다. 달기약수터의

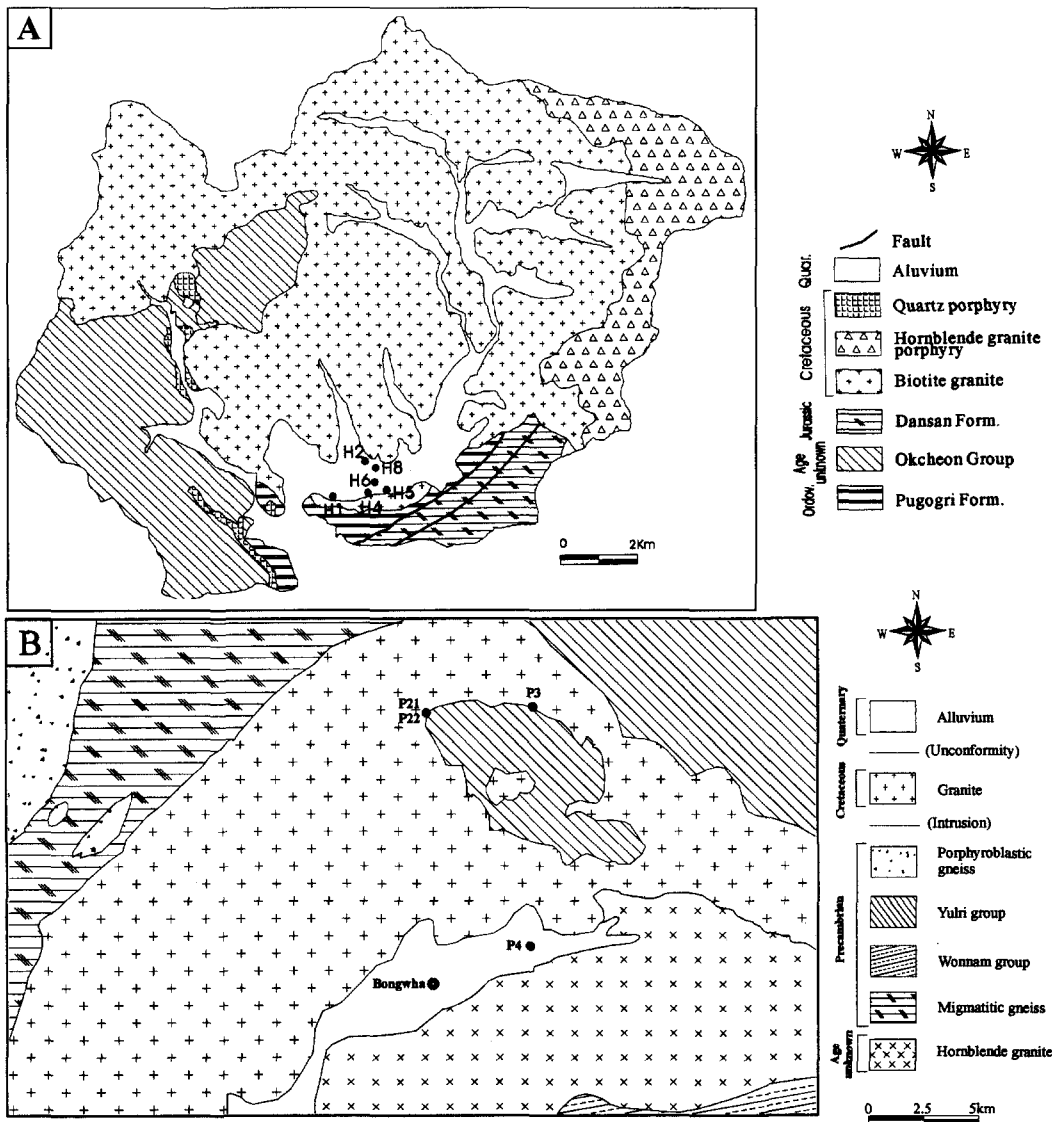


Fig. 2. Geologic map of the Moonkyung area(a), the Bongwha area(b), the Chungsong-Youngduk-Youngyang area(c), and the Youngchun area(d).

집수유역 상부는 백악기 경상누층군의 하양층군에 해당되는 동화치층, 가송동층, 도계동층이 분포하며 이들은 화강암과 부정합적인 관계를 가지며 피복되어 있다. 퇴적암류는 다시 유천층군의 두터운 주왕산 화산암류에 의하여 정합적으로 피복되어 있다. 그리고 달기약수탕 상류지역에는 규장암(felsite)이 퇴적암류를 관입하고 있다(Fig. 2c).

신촌탄산천은 백악기 퇴적암류인 도계동층에서 산출되고, 고란탄산수 역시 경상누층군 퇴적암층인 일직층

에서 산출된다. 신촌탄산수는 주로 도계동층에 발달하는 구조선과 관련된 약선대를 따라 용출하는 것으로 설명된 바 있다(김상욱과 박봉순, 1970). 신촌탄산수는 경상누층군에 속하는 도계동층에서 산출되는데, 35번 국도변의 음식점 등에서 개발한 지하 150 m 내외의 시추공에서 양수된다. 신촌탄산수 중 한 곳은 도계동층과 이를 후기에 관입한 화강암과의 지질경계부에서 산출된다. 신촌탄산천 좌측부는 산성 반암류가 관입하고 있다. 신촌탄산수가 산출되는 도계동층은 회백색 사

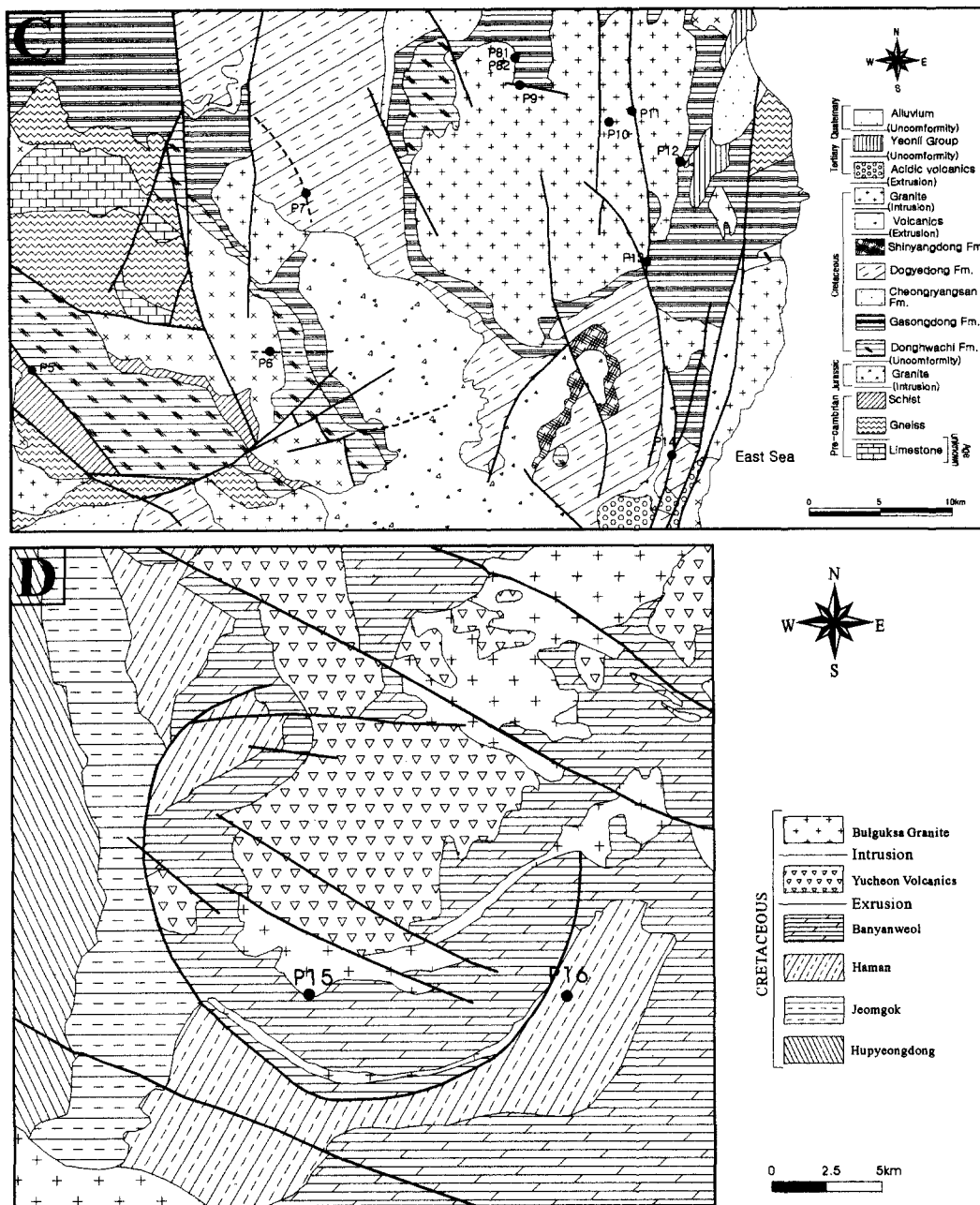


Fig. 2. Continued.

암, 적색 셰일 등으로 주로 구성되며, 대부분의 사암과 셰일의 입자 간극은 방해석과 백운석 등의 탄산염 광물로 충전되어 있고, 암석내 사장석은 흔히 탄산염 광물로 상당히 교대되어 있으며 알바이트 단성분에 가까운 화학 조성을 보이는 것으로 알려져 있다(정찬호와

정기영, 1999). 고란탄산천은 경상누층군 퇴적암층과 편암접촉부의 단층을 따라서 산출된다.

2.4. 영양-영덕지역

영양-영덕 사이에 분포하는 탄산천으로는 마당두들

약수터(P8), 방가골약수터(P9), 위정약수터(P10), 가산약수터(P11), 묘곡(초수골)약수터(P12), 한실약수터(P13), 눌미약수터(P14) 등이다(Fig. 1). 대부분의 약수터 산출지는 영양군 청수면 일대로 영양·영덕으로 이어지는 918번 국도변 주변에 분포한다. 눌미약수터는 영덕군 강구면에 위치한다. 탄산수가 산출되는 지역의 지질은 경상누층군의 동화치층, 가송동층, 청양산층과 도계동층과 백악기 후기에 이를 관입한 화강암으로 구성된다(김상욱과 박봉순, 1970)(Fig. 2c).

마당두들탄산천은 화강암과 가송동층의 접촉부인 작은 하천에서 간헐적으로 솟아나는 용천수와 그 곳으로부터 약 50 m 떨어진 시추공(심도 70 m)에서 산출된다. 방가골 탄산천은 산중턱에서 산출되는데 화강암과 가송동층을 자른 단층선을 따라 자연적으로 솟아난다. 방가골약수터는 주변 위생상태가 매우 불량한 탄산천이다. 위정탄산천은 918번 국도변의 농원 시추공에서 양수되는데 화강암에서 산출되며, 지질도상에 뚜렷한 지질구조는 확인되지 않는다. 가산탄산수는 화강암과 하천이 만나는 경계부에서 산출되는데 화강암은 단층에 의해 잘려져 하천을 이루고 있다. 초수골탄산천은 화강암과 가송동층의 지질경계부에서 자연적으로 솟아난다. 한실탄산천은 화강암과 가송동층의 경계부분으로 단층선상에 놓여 있다. 눌미탄산천은 경상누층군의 도계동층에서 산출되나 역시 단층을 따라 산출된다.

이 일대 탄산수의 산출특성은 경상누층군의 퇴적암층을 관입한 백악기 화강암체 주변부의 지질경계부나 단층을 따라 산출되는 특징을 보인다. 이와 같은 산출특성은 탄산수의 생성이 화강암 및 단층과 밀접한 관계가 있음을 시사한다.

2.5. 영천지역

영천에서는 2곳의 탄산천이 확인되는데 화산약수탕(P15)과 신안약수탕(P16)이 그것이다. 행정구역상 신안약수탕은 영천시 화남면 안천리에 해당되고, 화산약수탕은 군위군 고로면 괴산리이다. 연구지역의 지질은 경상누층군의 신라층군에 해당되는 함안층, 반아월층 및 화산층이 분포하고, 이들 퇴적암층을 유문암질 반암 또는 석영반암과 화강암류가 관입하고 있다(Fig. 2d). 이곳의 지질설명은 신령도폭(원종관, 1980)을 참고로 하였다. 신안탄산수는 적색 세일을 주 암석으로 하는 함안층에서 산출되고, 화산탄산수는 신라층군의 화산층과 이를 관입한 석영반암 사이에 분포하는 호온펠스에서 산출된다. 신안탄산수는 개천과 인접한 저지형에서 자연적으로 솟아난다.

2.6. 산출특성에 대한 종합토의

이상에서 설명된 바와 같이 경북지역 탄산수의 중요한 산출특성은 지질구조 및 중생대화강암과의 관련성이다. 즉, 이 지역 탄산수는 중생대 화강암과 경상누층군의 퇴적암(또는 선캠브리아기의 편마암)과의 지질경계부와 단층대를 따라 산출된다. 일부 탄산천의 경우 그들의 산출과 지질구조와의 관계가 명확하게 확인되지는 않지만 단층과의 관련성을 배제할 수 없다. 충청지역 탄산천도 단층대, 지질경계부, 암맥을 따라서 산출되는 것으로 이미 보고된 바 있다(정찬호 등, 2001). 따라서 이와 같은 지질구조는 지하 심부의 가스 성분이 지표 부근으로 상승하기에 좋은 연결통로의 역할을 함으로서 탄산천의 성인과 밀접한 관련이 있을 것이다. 지하심부의 가스 성분이 지표 부근으로 상승하기 위해서는 단층과 지질경계부등 구조선이 지하심부까지 연장되는 큰 규모를 가져야 할 것이다.

3. 시료채취 및 분석방법

3.1. 시료채취 및 현장측정

본 연구에서 탄산수(CO₂-rich water)의 시료채취는 2000년 2월에 채취되었다. 문경지역 탄산원천수 1점(P1), 봉화지역 탄산수 4점(P21, P22, P3, P4), 영양·영덕지역에서 탄산수 8점(P81, P82, P9, P10, P11, P12, P13, P14), 영천지역에서 탄산수 1점(P16)이 채취되었다. 탄산수의 시료채취 지점은 Fig. 2의 지질도상에 표시되어 있다.

물시료는 양이온 및 미량원소 분석용 60 ml, 음이온 분석용 60 ml, 안정동위원소 분석용 60 ml로 각각 구별하여 채취되었다. 양이온 분석용 시료는 농질산을 가하여 pH 2 이하가 되도록 산성화시켜 분석 전까지 냉장 보관하였다. 물시료 채취시 0.45 μm의 여과지를 이용하여 이물질 등을 여과하였다. 탄산수의 pH, Eh, 용존산소함량, 전기전도도, 온도 등은 휴대용 측정기를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다. 그리고 탄산수내 HCO₃⁻ 농도는 0.5N 농도의 염산을 이용한 산중화적정법으로 현장에서 측정하였다.

3.2. 화학분석 및 동위원소분석

물 시료에 대한 화학성분은 원자흡광분광분석기(Unicam model 989 Flame AAS and Flameless AAS)를 이용하여 K, Fe 원소를 분석하였고, 유도결합쌍 프라즈마 원자방출분광분석기(Shimadzu 모델 ICPS-1000 III, ICP-AES)와 유도결합쌍 프라즈마 질량

분석기(Fison model PQ III, ICP-mass)로 Na, Ca, Mg, Sr, Si 등의 주요원소와 Li, Mn, Al, Ba, Pb, Cu, Cr, Co, Zn, As, Cs 등의 미량원소를 각각 분석하였다. 이상의 성분분석은 기초과학지원연구원에서 실시되었다. 물 시료에서 HCO_3^- 를 제외한 용존 음이온 성분인 SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , F^- 등은 이온크로마토그래피(Dionex 4500i)로 분석하였다.

탄산수의 기원을 알아보기 위하여 산소 및 수소동위원소 분석을 실시하였다. 안정동위원소 분석절차는 Coleman *et al.*(1982)과 Kendall and Coplen(1985)의 방법이 적용되었다. 동위원소 분석은 기초과학지원연구원의 안정동위원소 질량분석기(Model VG SIRA II)를 이용하였다. 분석의 정밀도는 산소동위원소 $\pm 0.1\%$, 수소동위원소는 약 $\pm 0.5\%$ 이다.

탄산수내 CO_2 기원을 밝히기 위하여 탄산수의 탄소동위원소 분석을 실시하였다. 동위원소 분석용 시료 수집을 위해 채취된 탄산수에 NaOH 를 첨가하여 pH를 11이상으로 알칼리화시킨 후 적당량의 BaCl_2 를 첨가하여 탄산성분을 BaCO_3 로 침전시켰다. 침전물은 여과지에 모아 실험실에서 자연 건조시킨 다음 약 104% H_3PO_4 와 90°C에서 하룻밤 동안 반응시켜 발생한 CO_2 가스를 포집하여 $\delta^{13}\text{C}$ 동위원소를 분석하였다. 분석방법은 Swart *et al.*(1991)의 방법이 적용되었다. 분석은 기초과학지원연구원의 VG Isotech(PRISM II model) 동위원소 질량분석기를 이용하였다. 분석의 정밀도는 탄소와 산소 모두 $\pm 0.1\%$ 이내이다.

4. 수리화학적 특성

탄산수에 대한 pH, Eh(산화환원전위), 전기전도도, 용존산소함량, 온도, 양이온과 음이온 성분, 그리고 미량원소 등과 같은 수리화학적 특성에 대한 분석결과는 Table 1에 정리되어 있다. 화학분석자료의 정확성을 검토하기 위해서 분석된 총양이온과 총음이온의 당량으로 환산하여 전하균형을 계산하였다.

4.1. 현장측정자료

탄산천 현장에서 탄산수의 pH, Eh, 전기전도도, 온도, 용존산소 함량을 측정하였다. 탄산수의 pH는 5.19~6.44 범위로 약산성의 특성을 보여준다. 이는 국내 다른 지역 탄산수와 비슷한 범위에 해당된다. 문경지역 탄산온천수(P1)와 놀미탄산수(P14)가 pH 6.4 이상을 보이고, 마당뚜들탄산수(P81)가 가장 낮은 pH 5.19을 보인다. 탄산수의 Eh는 -25.2~+107 mV 범위를

보인다.

탄산수의 전기전도도는 산출지에 따라서 상당한 차이를 보이는데 한실약수(P13)가 2,280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 가장 높은 값을 보이며, 오전탄산수(P21)가 422 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 가장 낮은 값을 보인다. 그리고 P1, P3, P82, P9, P10, P12, P13, P14, P16 탄산수는 전기전도도 값이 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상을 보이는 반면 P21, P22, P5, P81, P11 탄산수는 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하의 전기전도도 값을 보인다.

탄산수중 문경 탄산수가 25.8°C로 온천수로 사용된다. 용존산소의 함량은 0.25~4.71 mg/l의 범위를 보이며, P14를 제외한 탄산수는 비교적 낮은 용존산소 함량을 보인다.

4.2. 화학조성

탄산수의 가장 풍부한 양이온 성분인 Ca^{2+} 은 27.8~521 mg/l 범위를 보여 산출지역에 따라 큰 함량 차이를 보인다. P2, P3 탄산수가 27.8 mg/l와 59 mg/l으로 가장 낮은 Ca^{2+} 함량을 보이고, P12와 P13 시료가 521 mg/l와 400 mg/l의 높은 Ca^{2+} 함량을 보인다. Na^+ 함량도 10.9~97 mg/l 범위를 보여 탄산수 산출지에 따라 함량차이가 크다. P1, P7, P12, P13 탄산수가 90 mg/l 내외의 비교적 높은 Na^+ 함량을 보인다. K^+ 함량은 0.8~24.6 mg/l의 넓은 범위를 보이는데 P6, P8 탄산수는 20 mg/l이상의 높은 농도를 보이는 것이 특징적이다. Mg^{2+} 의 함량은 12.2~87.1 mg/l의 범위를 보인다. P3 탄산수는 높은 전기전도도와 Ca 함량에 비해 상대적으로 매우 낮은 Mg 함량을 보인다. SiO_2 농도는 47.3~132 mg/l 범위를 보인다.

탄산수의 수질화학 특성중 가장 뚜렷한 특징으로는 다량의 탄산성분을 함유하는 것인데, CO_2 는 자연수에서 pH와 압력 조건에 따라 H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} 의 형태로 존재한다. 탄산수내 CO_2 의 농도를 pH, 중탄산이온농도등의 자료를 이용하여 WATEQ4F 프로그램(Ball and Nordstrom, 1992)으로 계산한 결과 탄산수의 P_{CO_2} 는 0.316~5.21 atm으로 일반지하수의 평균 10^{-3} atm 보다 훨씬 높은 값을 보인다. 탄산수내 가장 풍부한 음이온인 HCO_3^- 의 농도는 225~2,263 mg/l 범위로 산출지별 큰 농도 차이를 보인다. 가장 높은 함량을 보이는 탄산수는 P12 이다. 탄산수내 HCO_3^- 의 농도는 공급되는 CO_2 의 량과 직접적인 관계가 있는 것으로 보인다. 다른 음이온으로는 SO_4^{2-} 함량이 7.97~31.5 mg/l 농도 범위를, Cl^- 은 1.3~14.1 mg/l 농도 범위를 각각 보인다. 불소의 함량은 문경탄산수(P1)

Table 1. Physicochemical data of CO₂-rich springs from the Kyungpook Province.

Sample No.	P1	P21	P22	P3	P4	P81	P82	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P16
pH	6.44	5.31	5.32	5.22	5.43	5.19	5.75	5.65	5.60	5.80	5.60	5.87	6.41	6.24
Eh(mV)	100	107	93	29	57	57	10	14	7	19	9	-25	-23	
T(°C)	25.8	13.4	11.5	3.90	11.3	8.20	12.9	10.1	7.90	8.60	10.8	14.0	11.2	16.7
*E.C.(μS/cm)	1705	422	559	1391	988	625	1520	1156	1452	908	1442	2280	1736	1045
P _{CO2} (atm)	0.494	1.00	1.46	5.21	2.41	2.83	1.88	1.75	2.44	0.925	2.23	2.23	0.461	0.316
**D.O.	1.27	0.73	0.30	2.58	0.25	1.78	0.42	0.85	0.80	2.60	2.32	1.83	4.71	1.99
Na	91.9	17.3	31.7	48.9	44.6	25	89.5	23.2	81.6	10.9	36.0	97	86.0	41.8
K	2.70	8.40	7.20	16.8	3.90	22.0	4.10	24.6	2.60	0.80	16.8	4.70	4.50	2.66
Ca	376	27.8	59.0	361	191	113	279	235	286	241	355	521	400	146.3
Mg	40.2	22.9	28.8	12.2	31.1	30.6	68.4	56.3	56.3	14.8	37.6	87.1	54	31
SiO ₂	132	80.2	77.0	79.6	80.7	69.3	70.6	87.5	52.6	47.3	76.4	90.1	53.1	40.2
HCO ₃	1579	255	381	1246	849	572	1407	1053	1354	779	1358	2263	1624	663
SO ₄	12.3	7.14	13.1	15.4	15.0	22.7	11.2	14.8	17.1	15.0	7.97	14.0	31.5	38.4
Cl	14.1	1.3	2.6	5.1	8.0	4.8	7.5	6.5	6.7	6.4	8.8	8.6	8.3	21.3
F	1.60	N.D.	N.D.	1.41	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.74	N.D.	N.D.	0.73
NO ₃	N.D.	6.6	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Fe	7.2	48.7	34.6	17.6	16.2	6.2	11.9	12.8	7.50	N.D.	18.0	6.70	N.D.	2.54
Sr	1.77	0.36	0.52	2.43	1.05	1.40	4.69	1.75	5.94	1.03	3.06	3.67	1.81	1.25
E.N(%)	-0.84	-2.58	2.19	1.57	-1.05	-0.73	0.31	0.79	-0.19	1.85	0.36	-0.05	1.42	-2.25
Li	950	65.0	122	96.4	151	53.9	353	87.5	232	21.3	118	371	186	264
Al	0.26	N.D.	N.D.	0.39	0.17	0.20	0.27	0.17	0.19	0.16	0.27	0.35	0.24	27
Cr	22.4	14.4	20.8	32.9	25.0	15.7	21.0	18.6	26.2	17.6	4.49	25.8	60.7	836
Mn	0.48	1.03	0.90	1.41	1.77	1.10	1.37	0.52	1.22	0.01	2.15	1.20	1.96	15
Cu	54.0	10.9	45.2	18.4	44.2	47.1	32.2	33.5	25.2	31.2	35.5	8.71	8.28	836
Zn	74.9	35.5	39.7	17.4	60.4	111	69.5	34.7	29.8	17.9	66.7	35.6	30.8	33
Ge	3.97	3.98	2.77	1.87	1.57	0.49	1.20	1.09	0.69	0.25	1.55	1.04	0.56	1.2
As	1.48	2.77	N.D.	0.89	9.56	2.37	16.3	8.6	0.40	1.54	2.87	0.93	1.72	2.7
Se	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.10	0.07	N.D.	N.D.	N.D.	0.27	0.21	N.D.	0.1
Ba	0.12	5.90	4.57	2.98	7.81	6.20	2.42	1.50	3.69	1.13	2.29	2.46	2.61	141
Pb	1.37	1.32	0.86	0.41	2.71	2.33	1.97	1.56	N.D.	1.19	1.23	N.D.	N.D.	1.6
U	1.06	0.18	0.06	0.37	0.11	0.35	4.94	1.33	18.4	4.31	23.9	8.21	0.36	2.3

*E.C.: Electrical Conductance, **D.O.: Dissolved Oxygen.

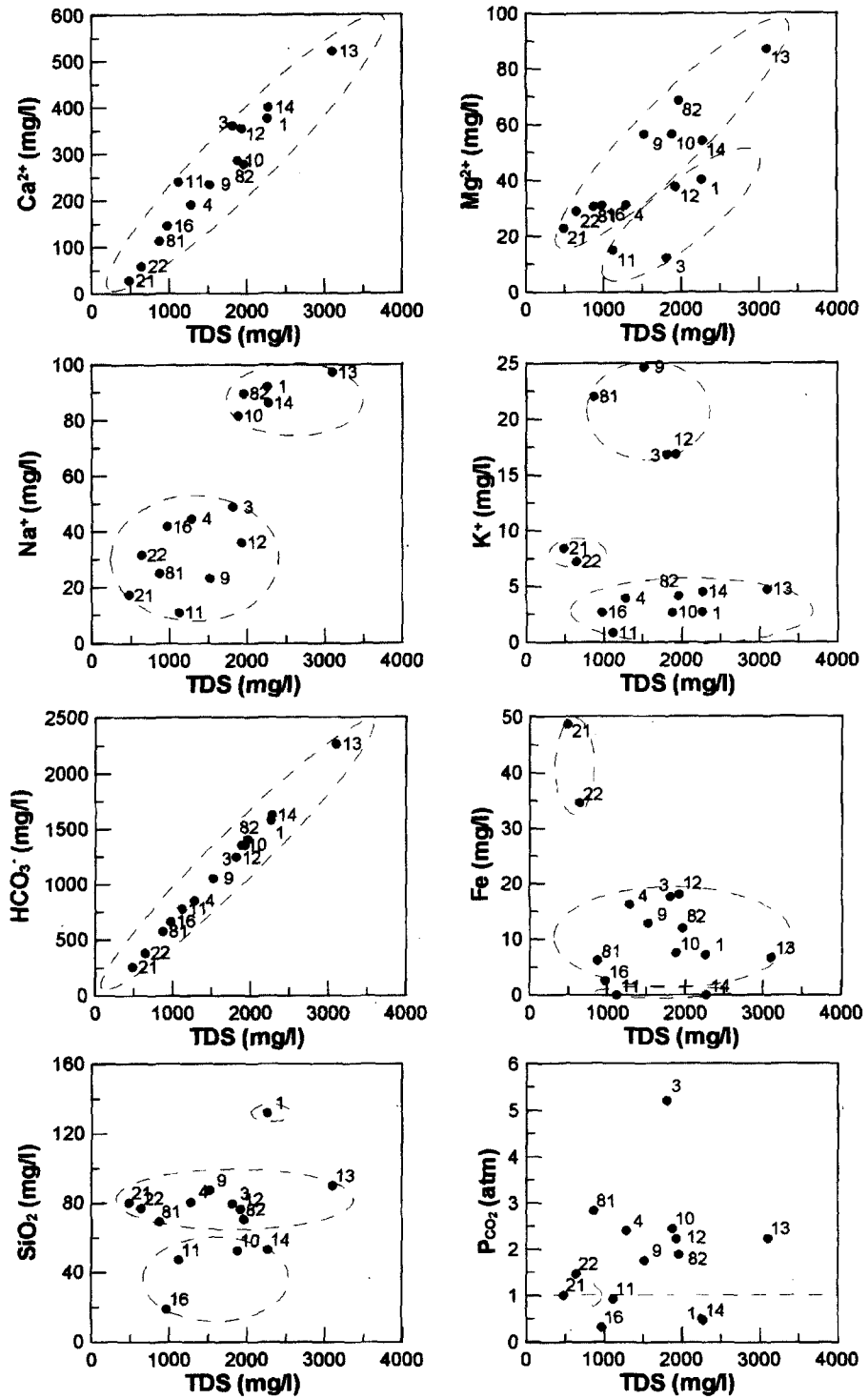


Fig. 3. Relationship between major components and TDS of CO₂-rich springs.

가 1.6 mg/l, 두내탄산수가 1.41 mg/l, 초수골탄산수(P12)가 0.7 mg/l을 보이고 나머지 탄산수에서는 검출 한계이하를 보인다. 탄산수내 NO_3^- 의 함량은 오전탄산수(P21) 6.6 mg/l를 제외하고는 불검출되어 탄산수내로 인간활동과 관련된 오염물질의 유입은 아직까지 진행 되지 않은 것으로 보인다.

경북지역 탄산수의 특성중 하나는 다량의 철분을 함유한다는 것이다. 탄산수의 용존 Fe의 함량을 보면 가산탄산수(P11), 놀미탄산수(P14)가 0.05 mg/l 이하로 극 미량이고, 나머지 탄산수는 6.2 mg/l~48.7 mg/l 범위를 보여 매우 높은 철의 함량을 보인다. 따라서 약수터 주변은 대기에 노출된 후 Fe의 산화로 인해 붉은 색의 철수산화물이 침전되어 있다. 탄산수의 Sr 함량도 비교적 높아 0.36~5.94 mg/l의 농도 범위를 보인다.

탄산수내 다른 미량원소 성분으로는 Li, Cu, Zn가 다른 미량원소 보다 비교적 높은 수 십에서 수 백 $\mu\text{g/l}$ 함량을 보이고, 다른 미량원소인 Mn, Al, Cr, As, Ge, Ba, Pb, U 등은 수 십 $\mu\text{g/l}$ 이하로 매우 낮은 함량을 보인다.

탄산수의 TDS와 용존 이온 성분사이의 관계는 Fig. 3에 제시되어 있다. 탄산수의 Ca^{2+} , HCO_3^- 의 농도는 TDS와 일정한 정의 비례관계를 보인다. 탄산수내

Mg^{2+} , Na^+ 성분과 TDS와의 관계는 두 개의 그룹으로 구분할 수 있다. Mg^{2+} 성분과 TDS 관계를 두 그룹으로 구분하여 보면 각 그룹별로 대체적으로 비례적 관계를 보인다. P1, P82, P10, P13, P14 탄산수는 80 mg/l 이상의 높은 Na^+ 함량을 보이는 그룹이고, 나머지 탄산수는 50 mg/l 이하의 Na^+ 함량이 낮은 그룹이다. 탄산수의 K^+ 함량은 TDS와 일정한 관계를 보이지 않고, 함량만으로 3개의 그룹으로 구분된다. P3, P9, P81, P12탄산수는 16 mg/l 이상의 높은 함량을 보이는 그룹이고, P21, P22 탄산수는 7~8 mg/l 정도의 중간정도의 함량을 보이며, 나머지 탄산수는 5 mg/l 이하로 낮은 그룹이다. 탄산수의 Fe 함량은 TDS와 일정한 관계를 보여주지 않는다. Fe 함량을 기준으로 탄산수는 3개의 그룹으로 구분된다. P21와 P22 탄산수는 Fe 함량이 35~48 mg/l으로 매우 높은 Fe 함량을 보이고, P11, P14 탄산수는 0.05 mg/l 이하의 매우 낮은 Fe 함량을 보인다. 그리고 나머지 탄산수는 6~18 mg/l 범위의 Fe 함량을 보여 중간그룹으로 구분된다. 탄산수의 SiO_2 의 함량, P_{CO_2} 는 TDS와 뚜렷한 관계를 보이지 않는다.

이상의 관계를 종합하여 보면 탄산수의 용존무기이온 함량은 경상누층군의 퇴적암내 탄산염 광물의 영향

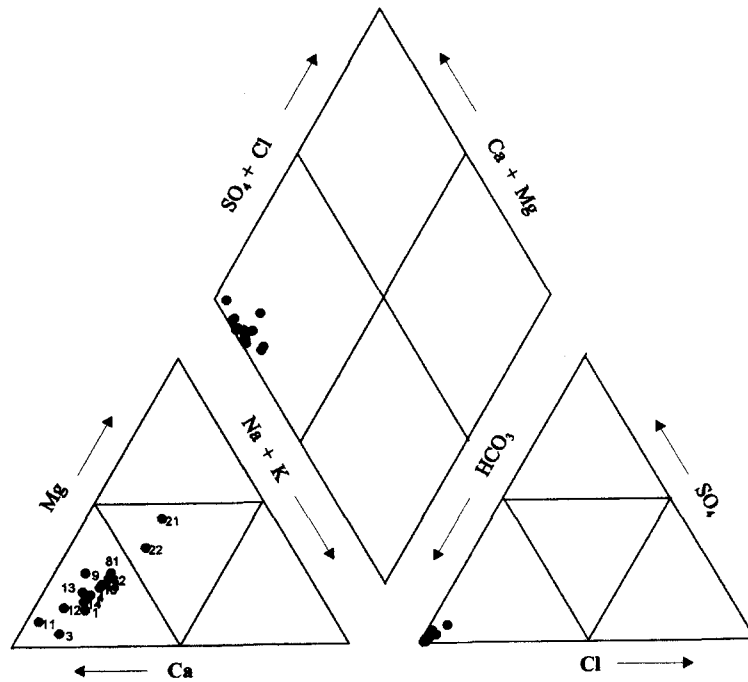


Fig. 4. Trilinear plot of the chemical composition of CO_2 -rich springs in the Kyungpook Province.

을 많이 받은 것으로 보이며, 아울러 주변 화강암의 Ca-장석, 운모류와 같은 규산염광물에 의해서도 어느 정도 영향을 받은 것으로 보인다. 특히 탄산수내 높은 K과 Na 함량은 장석류를 많이 함유한 화강암과의 반응에 의해 기원한 것으로 보인다.

4.3. 수리화학적 유형

경북지역 탄산수의 주요 화학성분을 파이프도(Piper, 1944)에 도시하였다(Fig. 4). 탄산수의 화학적 유형은 모두 Ca-HCO₃형으로 분류된다. 탄산수의 음이온 성분으로는 HCO₃⁻의 함량이 절대적으로 우세한 반면 양이온의 경우 지역별 탄산수에 따라 다소의 차이를 보인다. P21, P22 탄산수의 경우 Mg, Na+K의 함량이 상대적으로 가장 높다. 그리고 P11 탄산수는 Mg와 Na+K의 상대적 함량이 매우 낮고 Ca의 함량이 우세한 탄산수임을 보여준다. P3의 경우에는 Mg의 상대적 함량이 가장 낮은 탄산수이다. 경북지역 탄산수의 수리화학적 유형이 산출지역별로 약간의 차이를 보이는 것은 궁극적으로 탄산수 산출지별로 대수층을 형성하는 퇴적암과 화강암(혹은 편마암)류의 광물조성 차이를 반영한다고 볼 수 있다.

5. 탄산수의 생성과 진화

5.1. 산소와 수소 동위원소

탄산수의 기원을 알아보기 위하여 산소, 수소, 탄소 동위원소를 분석하였다. 먼저 탄산수의 산소 및 수소

Table 2. Isotopic data of CO₂-rich springs from the Kyungpook Province.

(unit : permil)

Sampling No.	$\delta^{13}C_{PDB}$	$\delta^{18}O_{SMOW}$	δD_{SMOW}
P1	-2.6	-10.1	-73
P21	-5.4	-9.7	-67
P22	-4.1	-10.0	-67
P3	-1.8	-9.9	-67
P4	-4.1	-9.2	-66
P81	-6.1	-9.3	-61
P82	-3.7	-10.0	-62
P9	-3.9	-9.5	-63
P10	-4.6	-9.4	-65
P11	-4.5	-8.6	-64
P12	-3.5	-9.1	-60
P13	-1.5	-9.2	-61
P14	-2.8	-8.6	-58
P16	-4.8	-8.1	-56

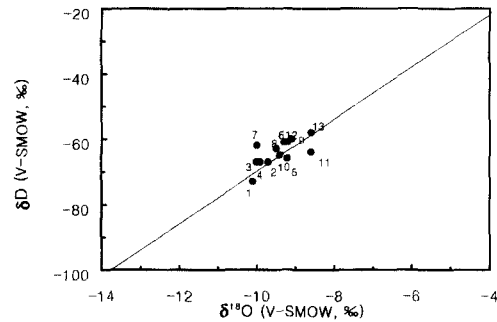


Fig. 5. The $\delta^{18}O$ - δ^2H relationship of CO₂-rich water springs in the Kyungpook Province.

동위원소 분석결과를 보면 $\delta^{18}O$ 값이 -10.1 ~ -8.6‰ 범위를 보이고, δD 값은 -73 ~ -58‰의 범위를 보여준다(Table 2). 탄산수의 동위원소 조성을 D, ¹⁸O의 함수로 도시하여 보면 순환수선(meteoric water line)을 따라서 분포하므로 탄산수는 강수가 함양되어 진화된 것임을 지시한다(Fig. 5). 문경지역 온천탄산수는 열수 환경에서 나타날 수 있는 산소편이(oxygen shift) 현상이 나타나지 않고 순환수선상에 도시되므로 일반지하수와 유사한 물-암석반응을 통하여 진화되었음을 지시한다. Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 전반적인 동위원소의 조성은 탄산수 산출지의 위도효과를 반영한다. 즉, 위도가 낮은 지역에서 높은 지역으로 갈수록 탄산수의 $\delta^{18}O$ 와 δ^2H 값이 보다 결핍되는 경향을 보여준다. 가장 낮은 값을 보이는 P1의 경우에는 심부 지하수이므로 함양지역이 지형적으로 고지대의 가능성이 있으므로 고도효과를 무시할 수 없을 것이다. 가장 북부 지역에 있는 P1, P2 탄산수와 가장 남쪽에 위치하는 P16 사이에는 -2‰ 이상의 $\delta^{18}O$ 값의 차이를 δ^2H 의 경우에는 -11% 동위원소 조성차이를 보인다.

5.2. CO₂의 공급원

지하수내 탄산과 중탄산 이온은 일반적으로 대기중의 이산화탄소의 용해, 방해석의 용해반응 등을 통하여 공급된다. 뿐만 아니라 토양층 및 대수층내 존재할 수 있는 유기물의 산화반응에 의해서 이산화탄소가 생성될 수 있고, 유기물의 황산염 환원반응에 의해서도 중탄산이온이 생성된다(Clark and Fritz, 1997).

자연수내 CO₂는 pH조건에 따라서 H₂CO₃* (≡H₂CO₃⁰+CO₂⁰), HCO₃⁻, CO₃²⁻ 형태로 존재한다(Appelo and Postma, 1993). 지하수내 CO₂의 공급원은 대기중의 CO₂, 토양유기물로부터의 CO₂, 탄산염광물의 변성작용시 생성되는 CO₂, 탄산염광물과 산성용

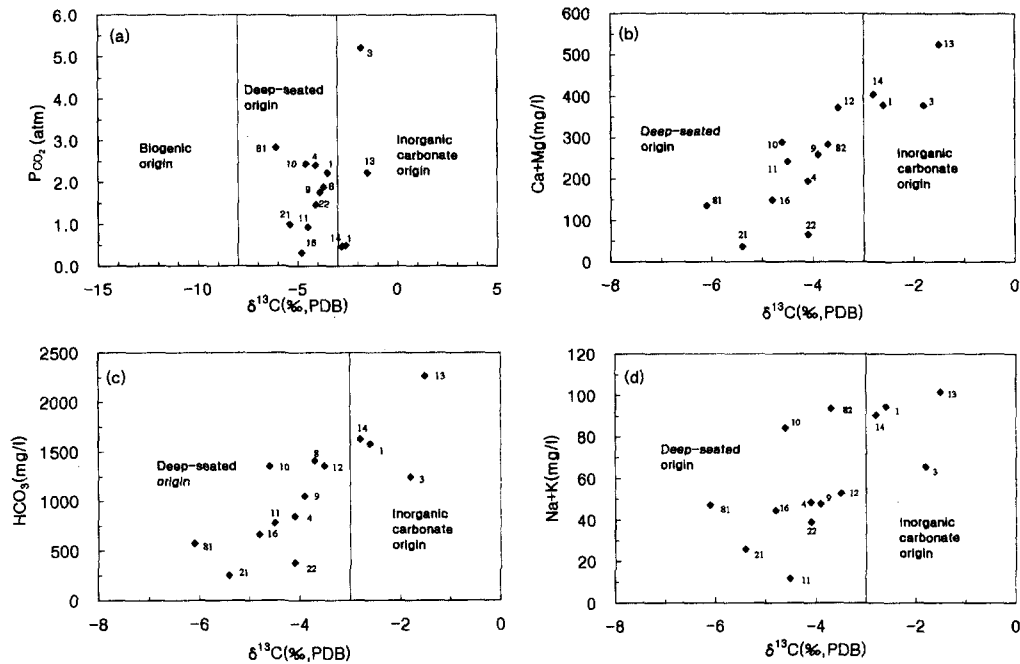


Fig. 6. Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and major components of CO_2 -rich springs in the Kyungpook Province. $\delta^{13}\text{C}$ range of deep-seated CO_2 origin by Blavoux *et al.* (1982).

액의 반응에 의해 생성되는 CO_2 , 그리고 맨틀, 마그마와 같은 심부기원의 CO_2 등이 있다(Irwin and Barnes, 1980). 대기의 평균 P_{CO_2} 는 $10^{-3.5}$ atm 정도이고, 토양 내의 P_{CO_2} 는 $10^{-1.5} \sim 10^{-2.5}$ atm 범위가 일반적이다(Clark and Fritz, 1997). 탄산수는 강수의 기원이므로 대기중의 이산화탄소와 평형상태에 있는 강수가 토양층을 통과하여 암반 대수층으로 유동된다. 일반적으로 지하 암반은 닫힌계(closed system) 환경이므로 CO_2 는 광물의 용해반응에 참여하여 지속적으로 소모될 것이다. 따라서 유기오염물 등이 유입되지 않는다면 탄산수의 P_{CO_2} 는 토양층의 P_{CO_2} 조건을 초과하지는 못할 것이다. 그러나 경북지역 탄산수의 P_{CO_2} 는 0.46~5.21 atm 범위로 대기와 토양으로부터 공급될 수 있는 CO_2 의 최대량보다 훨씬 높다. 따라서 탄산수의 형성을 위해서는 대기와 토양 CO_2 외 다른 공급원이 필요하다.

공급원으로 만약 탄산염광물이 산성용액과 반응한다면 CO_2 가 생성될 수 있는데 산성용액의 공급은 황화광물의 산화작용 등을 고려할 수 있다. 그러나 연구지역에서 이에 대한 증거가 뚜렷하지 않다. 즉, 탄산수의 산출지 부근에 광화대의 발달과 황화광물의 산화작용이 진행되었다면 탄산수내 SO_4^{2-} 함량이 높아야 하는데, 탄산수내 SO_4^{2-} 의 함량이 최고 31.5 mg/l의 함량

을 보여 이에 대한 가능성은 희박하다. 아울러 탄산염 광물의 변성작용에 의한 CO_2 생성도 본 연구지역에서는 고려하기가 어렵다.

마지막으로 고려할 수 있는 탄산수의 CO_2 의 공급은 심부기원의 CO_2 공급 가능성이다. 자연수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 탄소함유물질의 CO_2 기원에 대한 정보를 제공한다. Craig(1953)는 해양탄산염암의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 약 0을, 유기물 기원의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -12 이하의 값을 가진다고 발표하였고, Bakalowicz(1979)는 토양내 유기물 기원의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -22.0 ~ -25.0 범위를 가진다고 발표하였다. 또한 Moore *et al.*(1977)와 Pineau *et al.*(1976)는 맨틀과 같은 심부기원의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -4.7 ~ -8 범위를, Blavoux *et al.*(1982)은 -4.0 ~ -8.0 범위를 Cornides and Kecskes(1982)는 -6.0 ± 1.5 범위를 가진다고 발표하였다. 그리고 Cornides and Cornides(1983)와 Cornides and Kecskes(1974)는 헝가리 지역 탄산수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -7 ~ -2‰ 범위를 보여 화산활동과 관련한 심부기원의 CO_2 와 탄산염 광물의 용해시 생성된 탄소가 혼합된 것으로 해석하였다.

경북지역 탄산수에 대한 탄소동위원소 분석결과, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)값은 -1.5 ~ -6.1‰ 범위를 보인다. 탄소동위원소 $\delta^{13}\text{C}$ 값과 P_{CO_2} , Ca+Mg 함량, HCO_3 함량,

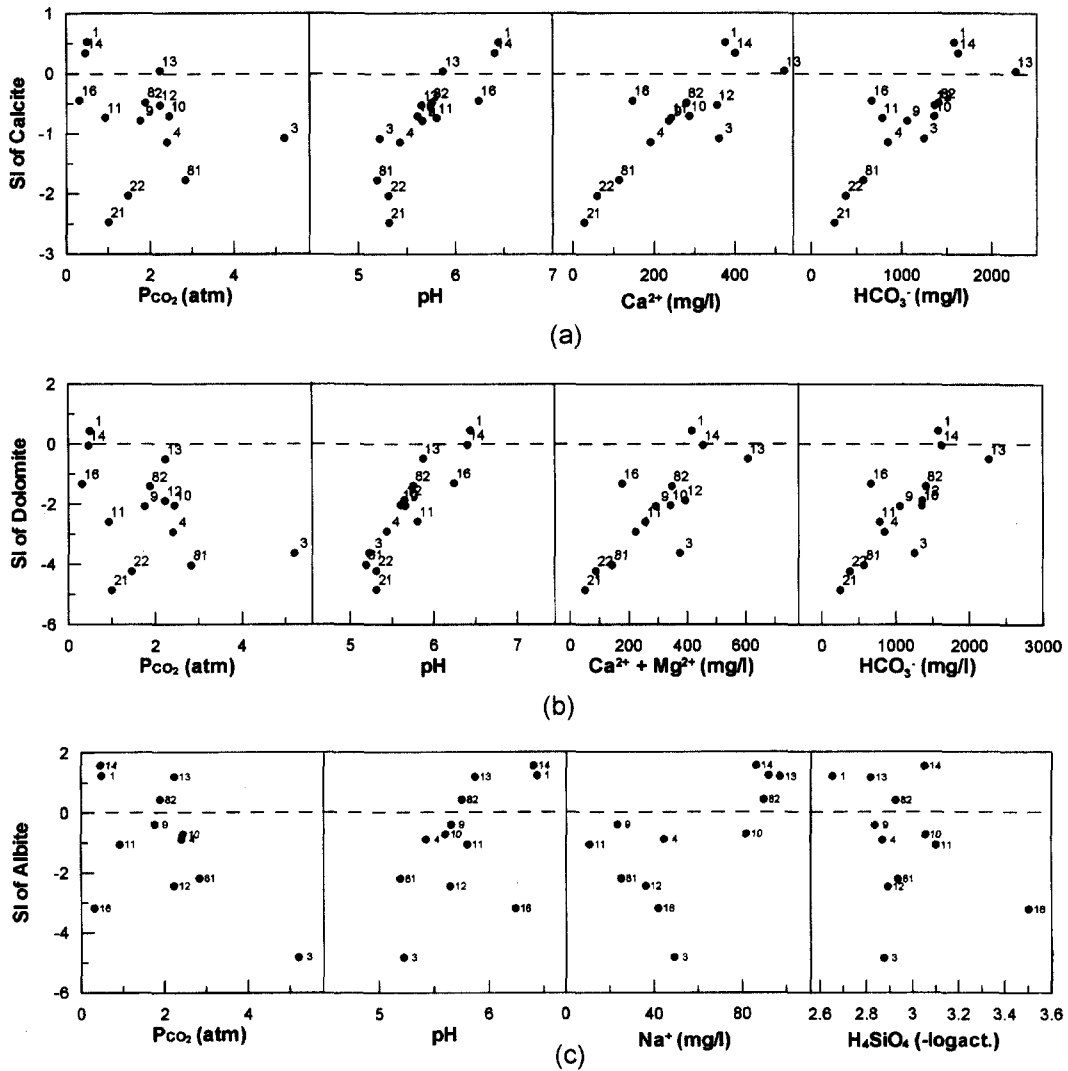


Fig. 7. Thermodynamic equilibrium state between major minerals and chemical components of CO₂-rich springs.

Na+K 함량과의 관계로 도시하였다(Fig. 6). Fig. 6a는 탄산수가 높은 P_{CO₂}의 영역과 함께 δ¹³C 값이 마그마나 맨틀과 같은 지하 심부기원과 일부 탄산염암 기원의 영역에 도시됨을 보여준다. 이는 탄산수의 높은 H₂CO₃⁰와 HCO₃⁻ 기원이 주로 심부에서 공급된 CO₂와 일부는 탄산염광물의 용해반응에 영향을 받은 것으로 해석된다. 비록 P1, P3, P13, P14 탄산수의 δ¹³C 값이 탄산염광물의 영역에 해당되지만 높은 CO₂ 분압으로 보아 심부기원의 혼합된 것으로 보아야 할 것이다. 탄산염광물의 영향을 알아보기 위하여 탄산수의 δ¹³C값을 Ca+Mg농도, HCO₃농도와와의 관계로 도시하

였다(Fig. 6b and 6c). 탄산수내 Ca, Mg, HCO₃ 성분은 주요 근원광물로 경상누층군 퇴적암의 탄산염광물이나 변성암내 석회암 등을 고려할 수 있다. Fig. 6b와 6c에서 보면 탄산수의 Ca+Mg농도와 HCO₃농도가 증가함에 따라 δ¹³C값이 대체적으로 증가하면서 심부기원 영역에서 탄산염암 영역으로 전환되는 경향을 보인다. 이는 H₂CO₃⁰와 HCO₃⁻의 함량이 상대적으로 낮은 탄산수는 심부에서 공급되는 CO₂의 영향이 크고, 그들의 농도가 높은 탄산수는 심부에서 공급되는 CO₂의 영향뿐만 아니라 대수층내 탄산염광물의 영향도 상당히 받는 것으로 해석된다. 탄산수의 Na+K 농도와

$\delta^{13}\text{C}$ 값의 관계는 뚜렷하지는 않다(Fig. 6d).

탄산수가 중생대 화강암과 관련하여 산출되므로 지하 심부의 CO_2 공급원과 중생대 화강암과의 관련성 여부에 대해서도 향후 연구해 볼 가치가 있을 것이다. 아울러 지하심부의 CO_2 는 화강암과 퇴적암의 지질경계부와 단층 등의 지질구조를 따라 지표부까지 상승한 후 순환하는 지하수로 유입되어 물-암석 반응에 참여되었을 것이다.

5.3. 물-광물 반응관계

지하수의 화학조성은 토양-물, 암석-물 상호반응과 같은 자연적 요인 이외에도 인위적인 요인에 의한 영향을 받을 수 있다. 탄산수 산출지의 집수구역내에 주택 및 음식점 등 일부 상가를 제외하고는 큰 오염원이 없고, 화학성분상 특별한 오염성분이 검출되지 않으므로 탄산수의 생성과정에 인위적 유입은 없는 것으로 보아야 할 것이다. 아울러 탄산수의 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 값은 탄산수가 모두 순환수 기원임을 지시하므로 외적인 요소에 의한 영향보다는 순환수 기원의 물과 암석의 상호반응 관점에서 해석되어야 할 것이다.

탄산수는 산출지역에 따라 무기이온의 함량과 P_{CO_2} 에서 큰 차이를 보인다. 심부에서 공급되는 다량의 CO_2 는 물의 pH를 약산성으로 유도하였을 것이다. 탄산수의 Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- 성분의 주요 근원광물로는 화강암내 방해석, 석회암, 퇴적암내 탄산염광물 등을 고려할 수 있다. 아울러 화강암, 편마암의 구성광물인 Ca-장석, 운모류 등의 영향도 어느 정도 있을 것으로 보인다. 문경지역 탄산온천수는 화강암에서 산출되지만 화강암내 국부적으로 포획된 석회암이 탄산수의 화학성분에 상당한 영향을 미친 것으로 보인다. 정찬호와 정기영(1999), 신영식(1998) 등에 의하면 경상 누층군의 퇴적암은 속성변질의 산물로 상당한 양의 탄산염광물과 철산화물이 함유된 것으로 보고되었다. 그리고 탄산염광물은 성분상 방해석과 백운석이 같이 존재하며, 대부분은 철성분을 함유하는 것으로 보고되었다. 따라서 영양-영덕지역 탄산수는 퇴적암내 함유된 탄산염광물과 철산화물이 탄산수의 Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Fe성분을 조절한 주요 근원광물로 해석된다. 그러나 오전탄산수(P21, P22)는 Fe 함량이 34.6 mg/l와 48.7 mg/l로 매우 높은 값을 보이는데, 이는 탄산수의 대수층이 국지적으로 함철광물이 풍부한 지질 조건임을 추정하게 한다.

사장석은 탄산수내 Ca^{2+} 뿐만 아니라 Na^+ 성분을 공급하는 주요 공급원의 역할을 하였을 것이다. 즉, 화

강암 및 편마암내 사장석의 불합치용해(incongruent dissolution) 반응이 탄산수내 Ca^{2+} , Na^+ 을 공급하는 주요 공급원이 되었을 것이다. 아울러 탄산수는 일반 지하수에 비해 높은 K^+ 함량을 보인다. 이는 퇴적암과 화강암내 K-장석이 주요 근원광물로 보인다.

Ca^{2+} 와 HCO_3^- 의 주요 공급원인 탄산염광물(방해석과 백운석)과 탄산수와의 열역학적 평형관계를 pH, P_{CO_2} , Ca^{2+} 와 HCO_3^- 농도의 변수로 알아보았다(Fig. 7a and b). 탄산수의 pH와 Ca^{2+} (or $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), HCO_3^- 의 농도는 방해석과 백운석의 포화지수와 비례적인 관계를 보이는 반면, 탄산수의 P_{CO_2} 와 방해석과 백운석의 포화지수는 P21, P22를 제외하면 뚜렷하지는 않지만 대체적으로 역비례 관계를 보인다. P1, P3, P14 탄산수는 방해석과 백운석에 대해서 평형내지는 과포화 상태를 보이고 나머지 탄산수는 불포화 상태를 보인다. Fig. 7c는 탄산수와 Na^+ 의 주요 공급원인 엘바이트(albite)와 열역학적 평형관계를 pH, P_{CO_2} , Na^+ 농도, H_4SiO_4 활동도의 변수로 제시하였다. P1, P13, P14, P82 탄산수는 엘바이트에 대해서 평형 내지는 과포화상태에 있고 나머지 탄산수는 용해성 환경을 보인다. P_{CO_2} 는 엘바이트의 포화지수와 P16탄산수를 제외하면 대체적으로 반비례적인 관계를 보인다.

이상의 내용을 정리하면 대수층내 높은 CO_2 분압은 약산성의 pH 조건의 유지와 광물-탄산수의 반응을 열역학적 용해환경으로 유도한 것으로 보인다. 탄산수-광물 반응이 진행됨에 따라 일부 탄산수는 pH가 증가하고 탄산수내 Na, Ca, Mg, HCO_3^- 의 농도가 증가하여 엘바이트 혹은 탄산염광물에 대해서 평형 내지는 과포화 상태까지 도달한 것으로 보인다. 그러나 몇 지역의 탄산수를 제외한 대부분의 탄산수는 높은 CO_2 분압과 약산성의 pH 환경하에 있으며 탄산염광물과 엘바이트 광물에 대해서 열역학적으로 용해성 환경에 놓여 있다.

6. 결 론

경북지역의 탄산수는 북부 및 동부 경북지역에서 주로 산출된다. 탄산수의 산출특성을 지질학적 측면에서 보면 중생대 화강암과 퇴적암 또는 변성암의 경계부나 단층대를 따라 산출된다. 탄산수의 탄소동위원소를 분석한 결과 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -6.1 ~ -1.5% 범위를 보이고, P_{CO_2} 값이 최고 5.21 atm으로 높은 값을 보이므로 탄산수내 H_2CO_3 와 HCO_3^- 은 심부기원의 CO_2 뿐만 아니라 탄산염광물의 용해에 의해 공급된 것임을 지시한다. 아울러 산소 및 수소동위원소의 분석결과 탄산수

가 모두 강수의 기원을 보이므로 지하심부의 CO₂가 지질구조적 약대를 따라 지표부근으로 상승하다가 순환하는 지하수에 용존되어 탄산수를 형성한 것으로 보인다.

탄산수의 수리화학적 특성으로 pH는 5.19~6.4 범위의 약산성이며, 화학조성은 Ca-HCO₃ 형을 보인다. 전기전도도는 422~2,280 μS/cm의 범위로 일반지하수에 비해 높은 값을 보인다. 아울러 대부분의 탄산수는 Fe를 다량으로 함유한다. 탄산수의 화학성분을 결정할 주요 광물로는 탄산염광물, 사장석, 정장석, 함철광물 등인 것으로 보인다. 탄산수의 광물에 대한 포화지수 계산 결과 일부 탄산수를 제외한 대부분의 탄산수는 탄산염광물 및 사장석에 대해서 용해성 환경에 있다.

경북지역 탄산수가 중생대화강암과 관련된 단층이나 지질경계부를 따라 산출되는 것이 구조지질학적 및 지체구조적으로 어떤 의미가 있는 것인지에 대해서는 향후 구체적인 연구가 있어야 할 것이다.

참고문헌

고용권, 윤성택, 김천수, 최현수, 김건영 (1999a) 중원지역 탄산수의 지화학적 진화, 자원환경지질학회지, 32권, p. 469-483.
 고용권, 김천수, 배대석, 김건영, 정형재 (1999b) 초정지역 탄산수의 지화학적 연구 I. 수리화학, 지하수 환경학회지, 6권 p. 159-170.
 고용권, 김천수, 배대석, 최현수 (1999c) 초정지역 탄산수의 지화학적 연구 II. 동위원소, 지하수환경학회지, 6권 4호, p. 171-179.
 고용권, 김천수, 배대석, 이동익 (2000) 문경지역 심부 지하수의 수리화학 및 환경동위원소 연구, 자원환경지질학회지, 33권 6호, p. 469-489.
 김건영, 고용권, 김천수, 배대석, 박맹언 (2001) 경상지역 신촌 탄산약수의 지화학 및 동위원소 특성, 자원환경지질학회지, 34권 1호, p. 71-88.
 김남장, 최승오, 강필중 (1967) 한국지질도 문경도폭(1:50,000), 국립지질조사소, 37p.
 김상욱, 박봉순 (1970) 지질도폭설명서 영양(1:50,000), 국립지질조사소, 25p.
 농어촌진흥공사 (1999) 경북 문경지구 온천자원조사 보고서, 539p.
 손치무, 김수진 (1963) 한국지질도 춘양도폭(1:50,000), 국립지질조사소, 28p.
 신영식 (1998) 한국 경상분지 중앙부 백악기 하부 하양층군의 적색층에 관한 연구. 경북대학교 대학원 이학박사학위논문, 151p.
 원종관, 윤 선, 소철섭, (1980) 지질도폭설명서(신령 1:50,000), 자원개발연구소, 21p.
 이종혁, 이상현, 장태우, (1989) 풍기도폭 지질보고서(1:50,000), 한국동력자원연구소, 14p.
 이흥규, 홍승호 (1973) 한국의 지질도 : 청송도폭(1:50,000), 국립지질광물 연구소. 23p.
 정찬호, 김종근, 이재영 (2001) 충청지역 탄산수의 산출양상, 지화학적 특성 및 생성기원, 자원환경지질 학회지,

34권, p. 227-241.
 정찬호, 이진국 (2000) 경상계 퇴적암에서 산출되는 탄산 지하수의 지화학적 특성과 생성기원, 지질공학 회지, 10권, p. 51-62.
 정찬호, 정기영 (1999) 청송지역 달기 탄산약수의 지화학적 수질특성과 생성기원, 자원환경지질학회지, 32권, p. 455-468.
 최현수, 고용권, 김천수, 배대석, 윤성택 (2000) 강원도지역 탄산수의 환경동위원소적 특성, 자원환경지 질학회지, 33권, p. 491-504.
 Aires-Barros, L., Marques, J.M., Graca, R.C., Matias, M.J., Van Der Weijden, C. Kreulen, H.R. and Eggkamp, H.G. (1998) Hot and cold CO₂-rich mineral waters in Chaves geothermal area (Northern Portugal), Geothermics, v. 27, p. 89-107.
 Appelo, C.P.J. and Postma, D. (1993) Geochemistry, groundwater and pollution, A.A. Balkema Publisher, p. 90-94.
 Bakalowicz, M. (1979) Contribution de geochimie des eaux a la connaissance de l'aquifere karstque et de la karstification. PhD thesis, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, France.
 Ball, J.W. and Nordstrom, D.K. (1992) User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of minor, tracer and redox elements in natural waters, U.S., Geol. Surv., Open File Rep. 91-183, 189p.
 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, p. 1-12.
 Blavoux, B., Dazy, J. and Sarrot-Reynauld, J. (1982) Information about the origin of thermomineral waters and gas by means of environmental isotopes in eastern Azerbaijan, Iran and southeast France. J. Hydrol., v. 56, p. 23-28.
 Cero'n, J.C., Bosch, A.P. and Galdeano, C.S. (1998) Isotopic identification of CO₂ from a deep origin in thermomineral waters of southeastern Spain. Chem. Geol., v. 149, p. 251-258.
 Clark, I. and Fritz, P. (1997) Environmental isotopes in hydrology, Lewis Publishers, 328p.
 Coleman, M.L., Shepherd, T.J., Druham, J.J., Rouse, J.E. and Moore, G.R. (1982) Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. Anal. Chem., v. 54, p. 993-995.
 Cornides, I. and Cornides, M. (1983) Isotope geochemical study of the CO₂ occurrences in the Eastern Carpathians. Földt. Közl., Budapest, p. 121-125.
 Cornides, I. and Kecskés. Á. (1974) A genetic investigation of the carbon dioxide occurrences in the Carpathian Basin. Part II. Publ. Hung. Mining Res. Inst., Budapest, v. 17, p. 263-266.
 Cornides, I. and Kecskés. Á. (1982) Deep-seated carbon dioxide in Slovakia : the problem of its origin. Geol. Zbornik. Geol. Carpathica, v. 33, p. 183-190.
 Craig, H. (1953) The geochemistry of the stable carbon isotopes. Geochim. et Cosmochim. Acta, v. 3, p. 53-92.
 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 For-

- est, F.R.G. Chem. Geol., v. 99, p. 213-235.
- Irwin, W.P. and Barnes, I. (1980) Tectonic relations of carbon dioxide discharges and earthquakes, J. Geophys. Res., v. 85, p. 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 Back Arc Basin, southwest of Japan, Chem. Geol., v. 123, p. 1-15.
- Kendall, C. and Coplen, T.B. (1985) Multisample conversion of water to hydrogen by zinc for stable isotope determination. Anal. Chem., v. 57, p. 1438-1440.
- 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, v. 9, p. 584-596.
- Mayo, A.L. and Muller, A.B. (1997) Low temperature diagenetic-metamorphic and magmatic contributions of external CO₂ gas to shallow groundwater system, J. of Hydrology, v. 197, p. 286-304.
- Moore, J.G., Bachelder, J.N. and Cunningham, C.G. (1997) CO₂-filled vesicles in mid-ocean basalt. J. Volcanol. Geothermal Res., v. 2, p. 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., v. 29, p. 413-421.
- Piper, A.M. (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Transactions of American Geophysical Union, v. 25, p. 914-923.
- Swart, P.K., Burns S.J. and Leder J.J. (1991) Fractionation of the stable isotopes of oxygen and carbon in carbon dioxide during the reaction of calcite with phosphoric acid as a function of temperature and technique. Chem. Geol. (Isotope Geoscience Section), v. 86, p. 89-96.
- Yun, S.T., Koh, Y.K., Choi, H.S., Youm, S.J. and So, C.S. (1998) Geochemistry of geothermal waters in Korea: environmental isotope and hydrochemical characteristics. II. Jungwon and Mynkyeong area. Econ. Environ. Geol., v. 31, p. 201-213.

2001년 11월 30일 원고접수, 2002년 4월 26일 게재승인.