

경북 청송지역 달기 탄산약수의 지화학적 수질특성과 생성기원

정찬호* · 정기영**

Geochemical Water Quality and Genesis of Carbonated Dalki Mineral Water in the Chungsong Area, Kyungpook

Chan-Ho Jeong* and Gi-Young Jeong**

ABSTRACT: Carbonated mineral waters of Ca(Mg)-HCO₃ type spring out along the fissure of Jurassic granite in the valley floor of the Chungsong area. The water has been long known as a Dalki medicinal water because of its unique therapeutic effect against calcium deficit, stomach and skin troubles, etc. The water has a high CO₂ concentration (P_{CO₂}=0.51~1.12 atm) and exhibits strong pH buffering (5.9~6.26) by H₂CO₃/HCO₃ couple. Electrical conductivity ranges from 1,700 to 3100 μS/cm. Environmental isotopic data (²H/¹H, ¹⁸O/¹⁶O and ³H) indicates that the water is of meteoric origin recharged in the Cretaceous sedimentary strata distributed in upper part of the catchment area at least before 1950s. The high P_{CO₂} and carbon isotope data (δ¹³C = -3 ~ -0.2‰) suggest that the potential source of carbon of carbonated mineral water was originated in deep-seated CO₂ as well as abundant carbonate minerals of sedimentary rocks. The major source minerals of the dissolved species in the carbonated mineral water appear to be carbonate minerals, albite and K-feldspar in sedimentary rocks.

서 론

국내에서 약수로 알려진 광천수의 대부분은 다량의 용존 이온성분과 탄산을 함유하는 탄산지하수이며, 충청북도 일원, 경상북도 북부 일원, 강원도 일원에서 주로 산출된다. 그중 경북 청송지역의 달기약수 (Fig. 1)는 수질특성상 탄산과 용존 이온성분의 함량이 높아서 탄산음료수와 유사한 독특한 물맛을 내며, 위장병, 부인병, 피부병, 안질과 같은 질병 치료에 효과가 있는 물로 약 120년 전부터 알려져 왔다.

탄산 약수란 일반 음용수와는 다른 독특한 맛과 수질특성을 갖고 있어서, 음용할 경우 인체에 부족한 영양분을 공급하고, 함유된 특정원소로 인하여 특정질병

치료에 대한 효능이 있는 광천수를 통칭하는 민간 용어이다. 많은 사람들이 약수를 이용하고 있고, 음용수(생수)의 수질기준이 엄격히 관리되고 있는 실정에 비추어, 아직도 불분명한 약수의 정의와 수질기준을 명확히 하고, 약수의 수질특성이 인체에 미치는 약리효과와 장기간 음용할 경우 인체에 미치는 유해성 여부에 대한 과학적이고 체계적인 연구가 시급히 요청되고 있다.

미국의 식품의약국 (FDA)기준에 의하면 광천수(mineral water)는 총고형물질 (TDS)이 250 mg/l 이상인 물로 정의하고 있으며, 그 상한선은 특별히 정하지 않고 있다 (Zuane, 1996). 다만 인체에 유해한 중금속, 오염물질, 방사성원소에 대한 기준치와 권장치가 정해져 있을 뿐이다. 유럽에서는 광천수에 대한 관련법이 제정되어 있다. 세계시장에서 유명한 광천수들은 각자 독특한 수질특성과 미량원소 (Se, Li, Ge, Ba)를 함유하고 있으며, 수질이 인체에 미치는 효능에 대해서도 자세히 설명되어 있다 (Internet, 1998). 국내에서도 약

* 대전대학교 지질공학과 (Department of Engineering Geology, The University of Taejon, Taejon, 300-716, Korea, chjeong@dragon.taejon.ac.kr)

** 안동대학교 지구환경학과 (Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong, 760-749, Korea)

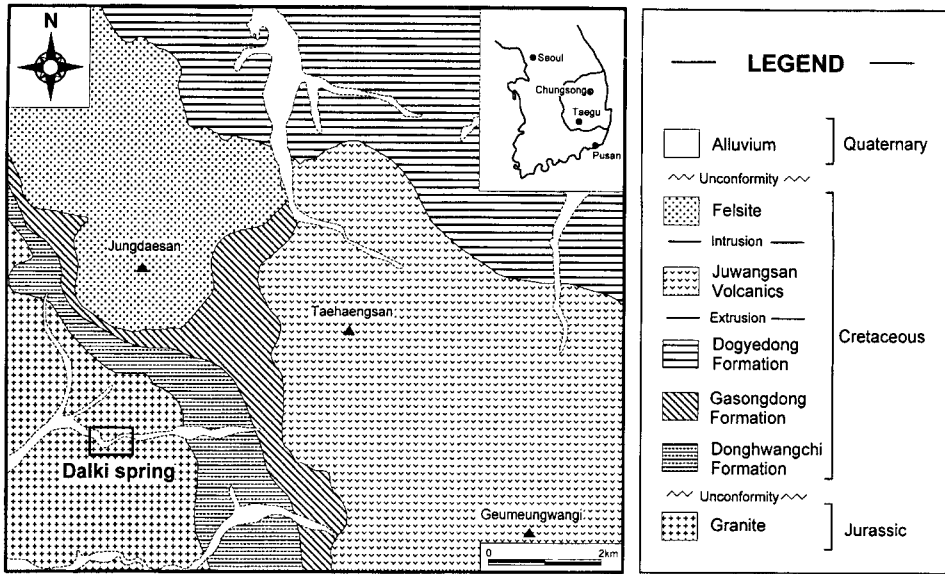


Fig. 1. Location and geologic map of the study area.

수를 찾는 많은 관광객과 질병치료 목적의 방문객들의 보건을 고려할 때, 약수에 대한 수질특성을 체계적으로 조사하여 산출지역별, 그리고 수질특성별로 분류하고 그에 따른 약리적 효능에 대한 과학적인 연구결과를 제시할 필요가 있다.

한편 수리지질학적 측면에서 국내에서 산출되는 약수의 지질학적 생성과정에 대해서도 연구되지 않은 상태이다. 지하수의 화학성분은 인위적 오염과정을 제외하면 강수의 특성, 물-토양, 물-암석 상호작용 등에 지배된다. 달기약수는 계곡 하상의 화강암 노두의 단열틈을 따라서 간헐적으로 솟아나는 용천수 (spring)로서, 계곡을 따라 약 1km에 걸쳐 7개 지점의 주요 약수터가 분포하고 있고, 그 외 하상 곳곳의 암반 단열틈에서 약수가 솟아나고 있다. 기존에 발표된 국내 화강암에서 산출되는 지하수의 화학적 자료를 검토하면 심도에 따라서 차이가 있으나 대체적으로 pH 7~9, 총용존고형물질(TDS)의 농도가 100~300 mg/l 내외의 Ca(Na)-HCO₃ 형의 지하수가 대부분이다 (한국자원연구소, 1993; 1996; 한국원자력연구소, 1994; 이종운, 1997). 그리고 경상계 백악기 퇴적암지역 500~700 m 심도의 심부 지하수의 평균 pH는 8.7±0.68, 전기전도도는 404±163 μS/cm이며, Na(Ca)-HCO₃(SO₄) 유형의 화학특성을 보인다 (한국자원연구소, 1993). 달기약수터 입구에 제시한 청송군에서 분석한 수질자료에 의하면 2,260 mg/l의 높은 중발산류물과 1,122 mg/l 이상의 높은 경도, 그리고 다량의 탄산을 함유하는 것으로 알려

져, 탄산약수의 생성은 일반적인 화강암 및 퇴적암에서 진행되는 일반적인 물-암석 상호작용에 의한 진화과정과는 다른 국지적으로 특이한 진화과정을 겪은 것으로 추측된다.

본 연구의 목적은 (1)달기약수의 지화학적 수질특성을 밝혀 용존 성분이 인체에 미치는 효용성 및 유해성에 대해 토의하고, (2) 환경동위원소 분석을 통하여 약수의 기원 및 체재시간에 대한 해석과, (3) 약수내 다량으로 존재하는 CO₂의 기원을 밝히고, (4) 약수의 지화학적 수질특성을 결정한 근원광물과의 관계를 해석하는데 있다.

지 질

달기 약수탕과 상류 집수역은 1:50,000 청송 도폭 (이홍규와 홍승호, 1973)의 중앙부에 위치하며, 백악기 영양 소분지의 남측부에 해당된다. 연구지역의 지질도는 Fig. 1과 같다. 청송도폭에 의하면 연구지역의 기반암은 쥐라기의 대보 화강암류인 흑운모화강암이며, 달기약수는 쥐라기 화강암에서 산출된다. 화강암체는 백악기 경상 누층군의 하양층군에 해당되는 퇴적암지층들로 피복되어 있는데, 달기 약수탕 좌측부에 동화치층, 기송동층 도계동층이 화강암과 부정합적인 관계를 보이며 피복되어 있다. 퇴적암류는 다시 유천층군의 두터운 주왕산 화산암류에 의하여 정합적으로 피복되어 있다. 그리고 달기약수탕 상부지역에는 규장암 (felsite)

가 퇴적암류를 관입하고 있다.

암석의 광물조성

달기 약수탕이 분포하는 화강암체는 흑운모 화강암으로 0.5~1 cm 크기의 분홍색 K-장석 반정들과 석영, 사장석, 흑운모로 구성되며 현미경하에서 소량의 백운모, 저어콘, 녹니석, 방해석, 불투명 광물들이 확인된다. K-장석은 석영이나 사장석을 포획하고 있으며, 변형작용으로 인한 석영의 파동 소광 현상 및 알바이트 쌍정면의 만곡 현상이 관찰된다. 사장석은 심한 견운모화작용을 받아 매우 지저분하다 (Fig. 2a).

동화치층은 주로 회백색 또는 담홍색의 사암으로 구성되며 적갈색 사암, 셰일 등이 협재되어 있다. 현미경 관찰에 의하면 사암은 분급과 구성 입자의 원마도가 매우 불량하며 입자 간극은 방해석과 백운석 등의 탄산염 광물로 충전되어 있다 (Fig. 2b). 사장석은 흔히 탄산염 광물로 부분적으로 교대되어 있으며 전자현미 분석에 의하면 단성분에 가까운 알바이트의 화학 조성

을 보인다. 사암내 사장석의 함량은 층위에 따라 변화가 심한데, 염산 반응을 이용하여 탄산염 광물 함량이 특히 높은 사암시료 1점을 선정하여 점계수 모드 분석을 시행한 결과, 석영 33.4%, 사장석 22.8%, K-장석 5.2%, 탄산염광물 (방해석+백운석) 36.9%, 백운모 0.6%, 불투명 광물 0.1%로 구성되어 있다. 적갈색 셰일은 주로 석영, 백운모, 장석과 간극을 충전하는 적철석으로 구성되어 있으며, 시료에 따라 상당량의 탄산염 광물이 충전되어 있는 경우도 있다 (Fig. 2c).

가송동층의 퇴적암은 동화치층 위에 놓이며 주로 적갈색 사암, 셰일, 장석질 사암 등으로 이루어져 있다. 적갈색 사암은 분급이 불량하고 사장석이 풍부하며 역시 심한 알바이트화 작용을 받았다. 적갈색 사암 중에는 탄산염 광물의 함량이 높은 것이 있으며 현미경 관찰에 의하면 일부 미립의 적철석과 함께 석영이나 사장석의 입간 공극을 충전한다. 특히 탄산염 광물의 함량이 높은 시료의 모드 분석에 의하면 석영 20.5%, 사장석 17.6%, K-장석 0.7%, 탄산염 광물 44.6%, 불투명 광물 16.4%로 구성되어 있다.

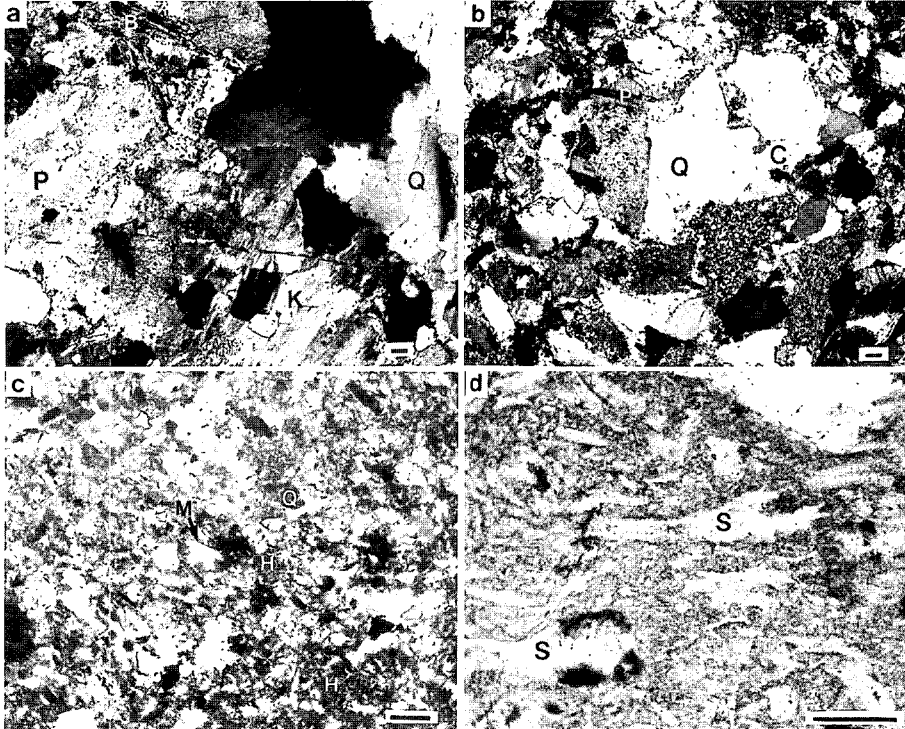


Fig. 2. Photomicrographs of thin section of major rocks in the study area. a) Biotite granite (crossed polarizers). b) Gray arkose sandstone showing the replacement of plagioclase by calcite (crossed polarizers). c) Reddish shale showing the hematite cement (crossed polarizers). d) Welded tuff showing oriented glass shards (parallel polarizers). C: carbonates including calcite and dolomite, H: hematite, P: plagioclase, Q: quartz, S: glass shard. Scale=0.1 mm.

주왕산 화산암류는 유문암질 응회암, 용결 응회암, 함결정 응회암으로 구성되어 있다. 현미경하에서 상당히 치밀하게 용결된 화산 유리 파편들과 세립 기질, 길게 늘어난 기공들로 구성되어 있다 (Fig. 2d).

연구방법

물시료 채취 및 현장측정

본 연구를 위하여 채취된 물시료는 달기 약수터에서 약수 7점 (D-1, D-2, D-3, D-4, D-5, D-6, D-7), 집수유역내 하천계곡수 4점 (DS-1, DS-2, DS-4, DS-5), 저수지 물 1점 (DS-3)을 각각 채취하였다. D-7 약수터에서 약 1 km 떨어진 화강암지역에서 심도 약 150 m의 시추공으로부터 일반지하수 1점 (DG-1)을 채취하였다. 달기약수터 집수유역내의 물시료 채취지점은 Fig. 3에 제시되어 있다.

물시료는 양이온 및 미량원소 분석용 60 ml, 음이온 분석용 60 ml, 안정동위원소 분석용 60 ml, 삼중수소 분석용 1,000 ml로 각각 구별하여 채취되었다. 양이온 분석용 시료는 농질산을 가하여 pH 2 이하가 되도록 하여 시료의 변질을 방지하고자 하였다. 지표수 및 일반지하수는 0.45 µm의 여과지를 이용하여 여과한 후 채취하였으나, 약수는 지표에 노출되는 순간부터 CO₂의 일출로 침전물이 생기므로 지하 자연상태에서 약수의 지화학적 특성을 알아보기 위해서 여과과정을 생략하고 채취 즉시 밀봉하여 이동식 냉장고에 냉장보관하여 실험실로 운반되었다.

현장에서 물시료에 대한 pH는 Orion 290A 모델의 휴대용 pH 측정기, Eh는 동종의 기기로 백금전극을 이용하여 측정하였다. 전기전도도는 Orion model 142, 용존산소 함량은 Orion model 835 모델의 측정기로

각각 측정하였다. 약수의 HCO₃⁻ 함량은 0.5 N농도의 HCl로, 일반지하수 및 지표수의 HCO₃⁻ 함량은 0.05 N 농도의 HCl로 적정하였다.

화학분석

물시료의 용존성분중 K 원소는 원자흡광분광분석기 (Unicam model 989)로, Fe는 동종의 기기를 이용하여 무염방식으로 분석하였다. Na, Ca, Mg, Sr, Si 등의 원소와 Li, Mn, Al, Ba, Pb, Cu, Ni, Cr, Co, Zn, As, Cs, Ti 등의 미량원소중 100 ppb 이상을 함유한 시료는 유도결합쌍 프라즈마 원자방출분광분석기 (Shimadzu model ICPS-1000 III)로 분석하였고, 100 ppb 이하의 극미량원소는 유도결합쌍 프라즈마 질량분석기 (Fison model PQ III)로 분석하였다. 이상의 이온 분석은 기초과학 지원연구소에서 진행되었다. SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, F⁻ 등의 음이온은 이온크로마토그래피 (Dyonex 4500 i)로 분석하였다. 화학분석자료에서 총 양이온과 총 음이온의 전하불균형을 계산하여 오차가 ±5% 이내인 것들만 신뢰성 있는 자료로 활용하였다.

동위원소 분석

수문순환의 관점에서 지하수의 충전 및 대재시간에 대한 정보를 얻기 위하여 물분자의 산소 및 수소 안정 동위원소인 ¹⁸O/¹⁶O, ²H/¹H과 방사성동위원소인 트리튬 (Tritium, ³H) 및 용존 탄산성분의 탄소동위원소비 (¹³C/¹⁶C)를 분석하였다. 물시료에 대한 ¹⁸O/¹⁶O 분석은 25°C (±0.1°C)에서 물시료와 동위원소 교환반응을 거친 CO₂ 가스의 ¹⁸O/¹⁶O 비를 측정하였다. ²H/¹H 분석은 물시료로부터 Zinc촉매제를 사용한 환원반응을 통하여 수소 가스를 추출한 후, 수소 가스를 표

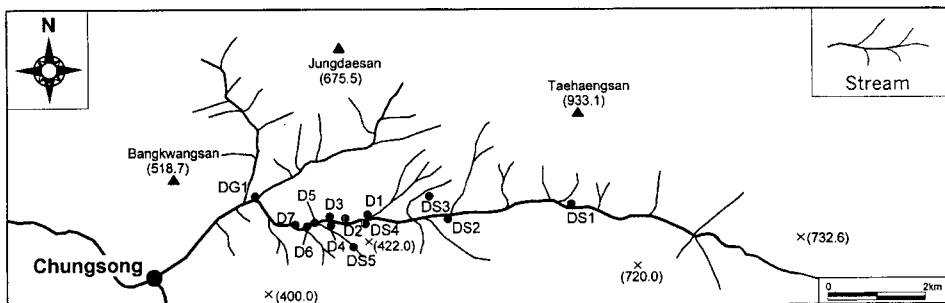


Fig. 3. Location map showing sampling points of carbonated mineral water, surface water, groundwater in the catchment area of the Dalki spring.

준가스와 함께 질량분석기로 주입하여 측정하였다. 물 시료의 산소 및 수소동위원소 분석결과는 비엔나 표준 시료와 비교된 δ 값 (V-SMOW, ‰)로 표현되었다. 산소 및 수소동위원소는 한국원자력연구소의 안정동위원소 질량분석기 (Model No: VG SIRA II)를 이용하였다. 안정동위원소 시료처리 및 분석절차는 Coleman *et al.* (1982)과 Kendall and Coplen (1985)의 방법이 적용되었다. 분석의 정밀도는 산소동위원소 ± 0.1 , 수소동위원소는 약 ± 0.5 이다.

삼중수소 (Tritium) 분석은 증류, 농축, 계측의 단계로 이루어진다. 먼저 물시료를 증류하여 600 ml 시료를 취하여 전기분해조에서 20 g까지 농축하였다. 농축된 물시료에 Instagel을 가하여 카테일 용액을 만들어 삼중수소 붕괴에 따른 β 방사선을 액체섬광계측기

(Parkard 2500 Model)로 시료당 20분간 25번 계측하여 평균치를 구하였다 (Calf *et al.*, 1976). 계측된 값은 삼중수소단위인 Tritium Unit (TU)로 환산하였다. 삼중수소의 분석은 한국원자력연구소에서 수행되었고, 분석에 대한 정밀도는 약 ± 0.5 TU이다.

약수내 CO₂의 기원을 알아보기 위해 약수내 탄소성분을 침전시킨 후 침전물에 대해 ¹³C/¹²C, ¹⁸O/¹⁶O 동위원소 조성비를 분석하였다. 약수내 탄소성분은 SrCl₂ 용액을 이용하여 SrCO₃으로 침전시켰다. 침전물을 자연 건조시킨 후 약 104% H₃PO₄와 90°C에서 반응시켜 발생하는 CO₂ 가스를 포집하여 $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$ 동위원소를 분석하였다. 분석결과는 $\delta^{13}C$ (PDB, ‰)로 표현되었다. 분석방법은 Swart *et al.* (1991)의 방법이 적용되었다. 분석기기는 기초과학지원센터의 동위원소 질량분

Table 1. Geochemical compositions of carbonated mineral water, groundwater, and surface water in the study area.

	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	DS-1	DS-2	DS-3	DS-4	DS-5	DG-1
pH	6.03	6.26	6.26	5.89	6.13	6.11	6.17	7.34	7.46	7.60	6.76	7.39	9.23
Eh (mV)	58	-8.1	-8.0	99	28	34	9	203	165	166	87	55	74
*E.C. (μS/cm)	2010	3000	3100	1442	2570	2380	2650	66.3	78.3	190.8	100.3	154.8	535
**DO (ppm/%)	0.77	2.1/20	3.0/21	0.8/7	1.2/12	1.8/17	1.7/16	9.1/81	9.2/82	8.1/75	10.0/93	7.6/71	5.5/55
***P _{CO2} (atm)	1.12	0.959	0.961	0.914	0.375	0.939	1.00	4.64E-4	5.18E-4	1.46E-3	3.16E-3	7.1E-4	1.16E-4
Temp (°C)	12.1	13.0	10.0	10.1	9.6	8.5	10.6	9.2	9.1	11.4	10.6	10.2	13.9
Na (mg/l)	80.2	142.2	153.9	62.3	118.2	107.1	148.1	5.2	5.3	4.8	5.7	6.5	127.6
K (mg/l)	2.7	6.8	7.8	4.9	5.1	7.2	5.8	0.9	0.3	2.0	1.6	0.4	0.1
Ca (mg/l)	319.4	394.5	413.2	176.4	347.8	295.7	281.0	4.9	6.2	20.4	8.2	15.1	1.4
Mg (mg/l)	56.9	102.7	110.4	48.9	93.0	83.0	133.0	1.2	1.7	8.3	2.4	3.3	0.5
HCO ₃ (mg/l)	1604.8	2395.1	2477.4	939.7	1925.2	1693.3	2059.4	12.2	18.3	70.2	21.4	21.3	268.5
Cl (mg/l)	16.0	25.4	28.0	19.0	25.0	27.0	23.6	5.7	5.8	5.5	6.6	9.1	8.2
SO ₄ (mg/l)	26.1	33.8	35.3	38.1	34.8	38.6	27.2	5.9	6.2	11.4	6.8	19.9	28.6
F (mg/l)	1.0	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	1.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	2.7
PO ₄ (mg/l)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
NO ₃ (mg/l)	0.1	0.1	0.1	10.2	2.6	48.0	0.1	6.4	7.0	2.2	9.5	21.8	1.1
Si (mg/l)	32.6	43.6	45.2	29.5	37.1	30.4	33.0	6.0	5.8	2.8	5.5	5.3	6.3
Fe (mg/l)	1.5	15.8	2.4	1.3	0.9	0.3	0.9	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.1
Li (μg/l)	152	347	442	170	305	272	551	0.8	0.7	1.3	0.7	0.8	108
Mn (μg/l)	683	718	752	591	755	950	918	1	4	40	1	2	1
Sr (μg/l)	1266	1676	1779	568	1489	1355	1662	32	59	142	77	76	94
Al (μg/l)	39	50	46	196	35	31	64	27	188	554	82	203	9
Ba (μg/l)	795	319	175	116	148	191	148	5	11	307	15	55	28
Pb (μg/l)	0.5	0.6	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.6	0.1	0.2	0.1
Cu (μg/l)	35.4	6.7	3.0	2.3	2.3	2.8	1.4	0.3	0.4	2.5	0.4	0.4	1.0
Ni (μg/l)	16.7	16.0	21.2	11.3	17.1	23.7	18.5	<0.2	0.2	1.9	0.2	0.4	<0.2
Ti (μg/l)	2.6	10.5	11.6	4.7	8.8	8.4	2.5	1.3	4.8	12.9	2.0	6.6	0.8
Cr (μg/l)	119.0	51.2	95.5	45.7	106.2	97.8	213.6	2.5	1.2	5.3	1.5	3.3	5.6
Co (μg/l)	1.6	2.2	2.5	3.7	2.2	4.3	2.2	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1
Zn (μg/l)	35.7	21.4	21.6	250.0	21.7	142.3	16.2	0.6	0.7	3.5	0.2	0.4	2.1
As (μg/l)	29.5	64.2	45.8	4.4	15.0	4.3	119.7	0.6	1.3	0.8	0.6	0.6	50.1
Cs (μg/l)	6.9	8.8	10.0	5.9	6.8	6.5	5.9	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.7

+ E.C. : Electrical Conductance, ** DO : Dissolved Oxygen, *** P_{CO2}(atm) : Partial pressure of CO₂ calculated by the WATEQ4F program

석기 (VG Isotech PRISM II model)를 이용하였다. 분석의 정밀도는 $\pm 0.2\%$ 이내이다.

지화학적 수질특성

달기약수, 약수터주변 지표수 및 일반 지하수에 대한 pH, Eh, 전기전도도, 용존산소, 용존 양이온과 음이온 성분, 그리고 미량원소등과 같은 지화학적 특성 분석결과는 Table 1에 요약되어 있다. 여기서는 약수의 지화학적 수질특성을 설명하고 지표수 및 일반지하수의 특성과 비교 검토하였다. 아울러 약수의 약리작용에 대해서도 토의하였다.

pH-Eh

달기약수의 pH는 5.9~6.3 범위로 약산성의 일정한 값을 보여준다. 달기약수가 솟아나는 하천의 상류에서 하류지역 계곡수의 pH는 6.8~7.6으로 약수보다 약간 높은 값을 보인다. 약수의 Eh는 -8~+99 mV 범위를 지표수는 55~203 mV의 값을 보인다. 약수지역으로 부터 약 1 km 정도 떨어진 화강암에서 150 m 심도의 지하수는 pH 9.2의 알칼리성이며, Eh는 74 mV로 측정되어 약수와는 전혀 다른 pH-Eh 환경을 보인다.

전기전도도

달기약수의 전기전도도는 1,442~3,100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위로 산출 지점별로 큰 차이를 보인다. 국내 화강암내 지하수의 평균 전기전도도는 100 m 이하 심도에서 141 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 100~300 m 심도에서 185 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 300 m 이상 심부에서는 282 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 보이는 것으로 알려져 (이종윤, 1997) 있으므로, 약수의 전기전도도는 매우 높은 값을 보인다. 한편 약수터 인근의 일반 지하수시료 (DG-1)의 전기전도도는 535 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 약수보다는 낮은 값을 보이나 국내 화강암지역 지하수의 평균값보다 높은 값을 보인다. 하천수의 전기전도도는 66.3~154.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 상류에서 하류로 갈수록 증가한다. 저수지의 전기전도도값은 190.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 값을 보인다.

용존산소

물속의 용존산소는 수질 및 유기오염의 정도를 평가하는 요소가 되며, 오염되지 않은 지하수와 지표수사이의 구별도 가능하다. 용존산소는 공기중 유리산소가

물에 용해되거나, 식물의 광합성으로 부터 분리 농집된 산소로 부터 기원한다 (최석원, 김억수, 1996). 달기약수내 용존산소의 농도는 0.7~3.0 mg/l 범위이며, 포화율은 7~21% 범위를 보인다. 약수가 대기에 노출된 상태에서 측정되었음을 고려하면 지하환경에서는 보다 낮은 용존산소함량을 보일 것이다. 지표수의 용존산소 함량은 7.6~10 mg/l 농도범위를 그리고 75~93%의 비교적 높은 포화율을 보인다. 일반지하수의 경우에는 5.5 mg/l, 55%의 용존산소 농도와 포화율을 각각 보인다.

용존이온성분

지표수 및 일반지하수

약수터 주변 하천수 및 저수지 물시료에 대한 용존이온을 보면 Na^+ 4.8~6.5 mg/l, Ca_2 4.9~20.4 mg/l, Mg^{2+} 1.2~8.3 mg/l, K^+ 0.3~2.0 mg/l 범위의 농도를 각각 보인다. Si의 농도는 2.8~6.0 mg/l의 농도 범위를 갖는다. 저수지 물시료의 양이온 함량은 하천수보다 높다. 하천수의 음이온으로 HCO_3^- 12.2~21.4 mg/l, SO_4^{2-} 5.9~19.9 mg/l, Cl^- 5.7~9.1 mg/l, F^- 0.05 mg/l 이하이다. NO_3^- 는 6.4~21.8 mg/l 범위를 보이는데 하류 하천수에서 높은 농도를 보여, 계곡주변 상가 및 숙박시설로부터 오염물질의 유입된 것으로 보인다. 그리고 저수지 물시료의 HCO_3^- 가 70.2 mg/l로 하천수보다 높으나 다른 음이온은 하천수와 비슷한 함량을 보인다. 미량원소로는 Al, Ba, Sr이 다소 높은 수습에서 수백 ppb를 보이고 나머지 Li, Mn, Pb, Cu, Ni, Ti, Cr, Co, Zn, As, Cs 등의 미량원소는 일부 시료를 제외하고 대부분 10 ppb 이하로 극미량을 보인다.

일반지하수는 Na^+ 127.6 mg/l, HCO_3^- 268.5 mg/l 농도로 각각 우세한 양이온 및 음이온이다. 그의 양이온으로서 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 은 1 mg/l 내외로 매우 낮은 함량을 보이며, 음이온으로서 SO_4^{2-} 28.6 mg/l, Cl^- 8.2 mg/l, F^- 2.7 mg/l, NO_3^- 1.1 mg/l의 농도를 보인다. 미량원소로 Li, Sr, Ba, As이 수습에서 수백 ppb로 다소 높은 값을 보이나, 다른 미량원소는 10 ppb 이하로 극미량이다.

약수

약수내 가장 풍부한 양이온 성분인 Ca^{2+} 은 176~412 mg/l 범위를 보여 약수에 따라 큰 함량차이를 보인다. D-3에서 Ca^{2+} 함량이 가장 높고, D-2, D-5, D-

1 시료도 300 mg/l 이상의 Ca^{2+} 함량을 보인다. 가장 낮은 Ca^{2+} 함량을 보이는 약수는 D-4 약수이다. Mg^{2+} 도 풍부하여 49~133 mg/l 농도 범위를 보인다. D-7, D-3, D-2가 100 mg/l 이상의 높은 Mg^{2+} 함량을 보이며, D-5, D-6, D-1, D-4 순으로 Mg^{2+} 농도가 감소함을 보인다. Na^+ 함량도 비교적 높아 62~154 mg/l 범위를 갖는다. D-3, D-7, D-2 약수가 140 mg/l 이상의 높은 Na^+ 함량을 보이며, D-5, D-6, D-1, D-4의 순으로 Na^+ 함량이 감소한다. 약수내 K^+ 함량은 2.7~7.8 mg/l 범위를 보인다. D-1를 제외하고 모두 5 mg/l 이상으로 일반 지하수 (DG-1)보다 높은 값을 보인다. 약수내 Si 농도는 29.5~45.8 mg/l 범위 값을 보여 상당히 높은 값을 보인다.

약수의 수질특성중 가장 뚜렷한 특징은 다량의 H_2CO_3 성분을 함유한다는 것이다. CO_2 는 자연수에서 pH 조건에 따라서 H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , 그리고 free CO_2 의 형태로 존재한다. WATEQ4F 프로그램 (Ball and Nordstrom, 1992)으로 계산한 약수중 P_{CO_2} 는 0.51~1.12 atm으로 지표수 및 일반지하수의 1.16E-4~3.16E-3보다 훨씬 높은 수준을 보인다 (Table 1). 약수내 HCO_3^- 의 농도는 939~2,477 mg/l로 국내 화강암 지하수 (심도 100~300 m)의 HCO_3^- 평균농도 68.6 mg/l 비교하면 매우 높다 (이종운외, 1997). D-3, D-2, D-7의 HCO_3^- 함량이 2,000 mg/l 이상으로 상당히 높고 D-4가 939 mg/l로 가장 낮다. 약수내 다른 음이온으로 SO_4^{2-} 함량은 21.2~38.6 mg/l, Cl^- 은 7.1~43.6 mg/l 농도 범위에 속하여, 국내 화강암지역 지하수 (심도 100~300 m)의 SO_4^{2-} 및 Cl^- 각각의 평균농도 29.79 mg/l, 7.15 mg/l 에 비해 SO_4^{2-} 농도는 비슷하며, Cl^- 은 약간 높다 (이종운외, 1997). 약수내 F^- 함량은 1.1 mg/l 이하로 낮다. 오염의 지시자인 NO_3^- 의 함량은 대부분 10 mg/l 이하로 낮으나, D-6의 NO_3^- 함량은 48 mg/l로 음용수 수질 기준 약 44 mg/l 보다 높아 약수터 주변 상가 및 숙박시설로부터 유입되는 오염 물질에 상당히 노출되어 있음을 의미한다.

약수내 미량원소의 특성을 보면 Fe가 15.8~0.1 mg/l 범위를 보여 대부분의 약수에서 높은 함량을 보인다. Fe 농도는 D-2에서 15.8 mg/l로 가장 높다. Fe는 대기에 노출되면 곧바로 산화되어 약수터 주변에 붉은 철산화물로 침된다. Mn은 276~950 μ g/l의 함량을 보인다. 기타 미량원소로 Sr이 1,779~568 μ g/l 농도를, Ba이 795~116 μ g/l 농도를 보여 함량이 높다. 독성이 강한 As는 4.4~119.7 μ g/l 농도

범위를 보이며, 특히 D-2, D-7에는 음용수 수질기준치 50 μ g/l을 초과한다. Zn는 21.4~250 μ g/l, Li이 125~551 μ g/l, Al은 대부분 31~196 μ g/l를 보여, 모두 음용수 기준치보다 낮은 값을 보인다. Ni은 수십 μ g/l 함유되어 있고, Cr은 약수내 45.7~213 μ g/l 함량을 보인다. 그외 중금속인 Pb, Cu, Co, Ti 등은 일부 약수를 제외하고 대부분 10 μ g/l 이하로 미량의 농도를 보인다.

약수의 약리적 효능

물은 인체의 신진대사를 촉진하고 진정, 강장, 이뇨, 발한, 토제, 하제, 흥분, 해열, 희석제, 최면작용등의 약리효과가 있는 것으로 알려져 있다 (종근당, 1995). 뿐만 아니라 물속에 용존된 성분은 각종 질병치료에 효과가 있다. 약수를 음용하여 질병을 치료하고자 하는 것은 다음과 같은 원리에 근거를 두고 있다: 인체에 부족한 영양분을 보충하는 것, 인체의 생리.생화학 기능을 조절하는 것, 병증세 맞는 치료를 하는 것, 상호해독 및 화학적으로 유독원소를 배출하는 것 등이다 (최석원과 김억수, 1996).

다음에서 설명되는 약수의 용존성분에 대한 약리적 효과 및 부작용에 대한 설명은 미국의 환경보호국 (EPA)의 자료, Zuane (1996)의 문헌, 그리고 최석원과 김억수 (1996)의 문헌을 주로 인용하였다.

약수 성분중 가장 풍부한 Ca^{2+} 은 인간의 성장 및 발육, 정상적인 신진대사에 필수적인 원소이다. Ca^{2+} 이 풍부한 약수는 갱년기 이후 부인들의 Ca^{2+} 부족으로 인한 골다공증 예방에 효과가 있을 것이다. Mg^{2+} 은 생명의 필수원소의 일종으로 동맥혈압을 낮추고 콜레스테롤의 함량을 낮추는 역할을 한다. Na^+ 성분은 만성 위장염 치료에 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 아울러 Na^+ 성분이 적당한 물로 목욕할 때 허리근육, 피로회복, 류마티스관절염, 신경염 치료에 효과가 있는 것으로 알려져 있다. K^+ 은 신체내 삼투압을 조절하고 근육수축과 신경전달에 도움을 주며, 요산제거나 용해작용, 신체의 수분균형을 유지하는데 작용을 한다.

약수내 다량으로 존재하는 HCO_3^- 은 위산을 중화조절하여 만성위장병 개선과 혈당을 내리는 효과로 잘 알려져 있다. 약수내 $H_2CO_3^*$ (= $H_2CO_3 + CO_2$)는 살균력과 함께 피부병 및 안질 치료에 효과가 있는 것으로 알려져 있다. NO_3^- 성분이 음용수 기준치를 초과하는 D-6 약수와 As가 음용수기준치를 초과하는 D-2,

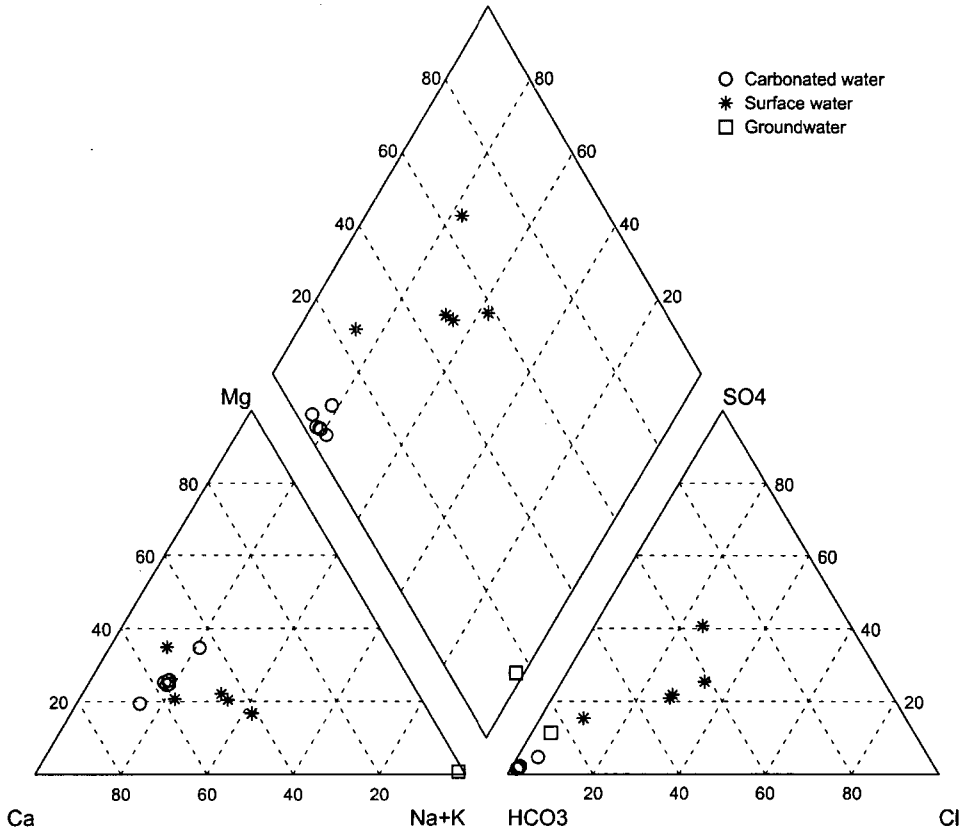


Fig. 4. Trilinear diagram of major ion composition (miliequivalents) of carbonated mineral water, surface water and groundwater samples in the study area.

D-7 약수는 이용하기에는 부적합하다. 약수는 강한 철분 맛을 가진다. Fe는 생물의 필수 원소로 피를 만들고 산소 흡입의 주요 작용을 하여 빈혈 치료에 효과적이나 Fe (III)상태의 철분이 인체에 흡수가 빠르고 유익하나 지표 환경에 노출된 약수의 철은 대부분 Fe (III) 또는 철 수산화물로 존재할 가능성이 높다. 따라서 가장 높은 Fe 성분을 함유하는 D-2 약수내 Fe는 인체에 흡수되지 못하고 인체내 축적되면 철 중독과 같은 부작용도 우려된다. 그 외 인체에 필요한 Li, Mn, Ba, Sr 등의 미량원소가 적당한 량 함유되어 있으며, 나머지 미량원소는 음용수 음용수 수질기준 이하이거나 10 $\mu\text{g/l}$ 이하의 미량으로 존재하므로 수질에 큰 영향을 미치지 못한다.

달기약수의 약리적 효능을 종합하면 As, Fe, NO_3^- 성분이 음용수의 수질 기준치를 초과하는 D-2, D-6, D-7 약수는 약수로서의 효용성 보다 다른 부작용이 우려되며, 나머지 약수는 적당량 음용시 인체에 유익한 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- 등이

다량으로 함유되어 있어 천연 광천수로서의 가치가 있을 것이다.

화학적 유형

화학분석값을 당량비로 환산하여 파이퍼도 (Piper diagram) (Piper, 1944)에 도시하였다 (Fig. 4). 지표수는 파이퍼도 좌중앙부에 넓게 분포하여 특정한 유형으로 분류하기 어려우나 달기약수는 전형적인 Ca-HCO_3 형으로 분류된다. 화강암내 일반 지하수 (DG-1)는 Na-HCO_3 형으로 약수와는 완전히 다른 화학적 유형을 보여주지만, 국내 화강암지역 심부 지하수의 일반적인 유형과 잘 일치한다. 이와같은 약수와 일반 지하수 사이에 화학적 유형의 차이는 그들의 물-암석 상호 반응 및 진화과정이 완전히 다른 조건에 있었음을 의미한다. 아울러 달기약수가 화강암 단열틈을 따라서 산출되지만 약수의 수질 특성을 결정한 근원암은 화강암에 국한되지 않는다는 것을 의미한다.

환경동위원소 특성

산소와 수소의 동위원소인 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^3\text{H}/^1\text{H}$ 조성비는 물분자 구성원소로서 물의 거동 그 자체를 반영하므로 지구의 기온변화, 대기의 순환, 지하수의 유동과 같은 환경관련 문제 해결에 이용되는 환경동위원소 (environmental isotope)이다. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$ 은 지하수의 기원, 충전에 대한 정보, 물-암석 상호반응, 담수-해수 혼합 관계에 대한 정량적인 정보를 제시할 수 있다. 12.43년의 반감기를 갖는 삼중수소 (^3H)는 약 70년 이하의 연령을 갖는 지하수의 연대측정에 유용하게 활용되고 있다. 그리고 탄산수내 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 는 탄소의 기원에 대한 정보를 제공한다.

달기약수의 $\delta^{18}\text{O}$ 조성은 $-10.1\sim-9.5$ (V-SMOW) 범위를 보이고, δD (deuterium)는 $-68\sim-63$ (V-SMOW)의 범위를 보여준다. 지표수의 산소동위원소 조성은 $-9.2\sim-7.9$ 을, 중수소는 $-60\sim-51$ 범위를 각각 보여준다 (Table 2). 일반지하수는 -10‰ , -72‰ 의 $\delta^{18}\text{O}$ 및 δD 값을 각각 갖는다. 약수, 지하수, 지표수의 동위원소 조성을 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 상관관계에 도시하면 순환수선 (meteoric water line)을 따라 분포하므로 약수는 순환수중 강수가 함유되어 진화된 것임을 지시한다 (Fig. 5a). δD 와 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 대체적으로 지표수, 달기약수, 일반 지하수 순으로 낮아지는 경향을 보인다. 계곡 하천수는 시료채취지점에 따라서 δD 및 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 각각 -1‰ , -7‰ 차이를 보인다. Fig. 5a에서와 같이 상류지역 하천수와 약수의 동위원소 조성비가 비슷하거나 약수가 약간 더 결핍되어 약수를 생성시킨 강수의 함양 지역은 집수구역 상부인 경상계 퇴적암 분포지역인 것

으로 보인다. 이는 강수의 동위원소 조성비의 평균치가 현재나 과거 함양당시나 큰 차이가 없다는 전제하에서 가능하다.

삼중수소는 반감기가 12.43년이고 붕괴를 하는 수소의 방사성 동위원소이다. 삼중수소는 물분자 동위원소이므로 지하수내 용존성분같이 화학적 반응을 하지 않으므로 물의 거동을 가장 잘 파악할 수 있는 추적자의 역할을 한다.

달기약수, 지하수, 지표수의 삼중수소함량은 Table 2와 같다. 지표수의 경우 6.9~12.6 TU 범위를 보이고, 달기약수는 0~3.7 TU, 일반 지하수의 경우 0.8 TU를 각각 보인다. 삼중수소의 반감기를 고려하면 2 TU

Table 2. Isotopic composition of carbonated mineral water, surface water and groundwater in the study area.

Sample No.	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW, ‰)	$\delta^2\text{H}$ (V-SMOW, ‰)	Tritium (TU)
D1	-9.48	-66	0.00
D2	-10.00	-67	1.5
D3	-10.09	-67	1.1
D4	-9.48	-63	3.7
D5	-9.89	-66	0.4
D6	-9.75	-64	2.2
D7	-10.13	-68	1.4
DS1	-9.33	-60	6.9
DS2	-9.25	-59	7.0
DS3	-7.94	-51	9.1
DS4	-9.19	-59	11.6
DS5	-8.39	-53	12.6
DG1	-10.03	-72	0.8

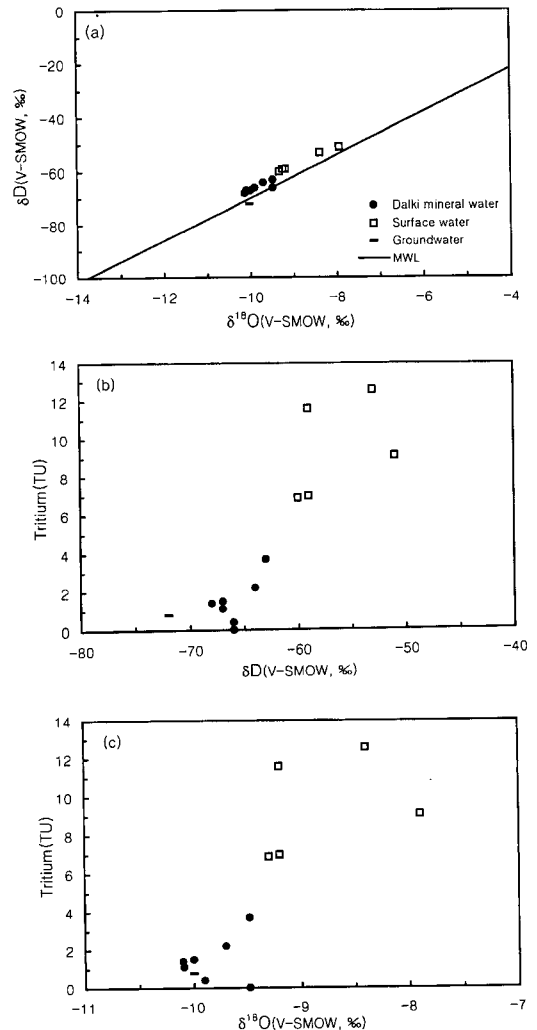


Fig. 5. Diagrams showing the relationships among δD , $\delta^{18}\text{O}$ and tritium.

Table 3. Carbon and oxygen isotopes of carbonated mineral water, and carbonate-rich sedimentary rocks in the study area.

Sample No.	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, PDB)
D1	-1.6	-7.5
D2	-0.9	-7.3
D3	-2.8	-7.3
D6	-1.1	-7.3
D7	-3.0	-6.9
*SS1	-2.9	-11
*SS2	-2.1	-7.9
**ST1	-0.8	-12

* Sandstone, ** Siltstone

이하의 지하수는 1950년대 핵실험이전에 함양된 최소 40년 이상의 체제시간을 갖는 물이며, 반면 2 TU 이상의 삼중수소 함량을 갖는 지하수는 1950년대 이후의 함양된 비교적 젊은 연령의 지하수로 구분할 수 있다. 따라서 D-4 약수를 제외한 달기약수는 40년 이상의 체제시간을 갖는 지하수로 판단된다. 삼중수소- $\delta^{18}\text{O}$ 및 삼중수소- δD 관계를 보면 삼중수소 값이 낮을수록 $\delta^{18}\text{O}$ 및 δD 값이 비례적으로 낮아지는 경향을 보인다 (Fig. 5b and c). 이는 청송지역 자연수의 산소 및 수소동위원소 조성비의 변화가 고도효과를 반영하므로, 고지대에서 함양된 물일수록 긴 유동거리와 함께 지하수의 체제시간이 오래된 연령의 지하수임을 의미한다.

달기약수의 탄소동위원소 분석결과 $\delta^{13}\text{C}$ 은 $-3.0 \sim -0.9\%$ (PDB) 범위를 보여주었다 (Table 3). 국내 화강편마암에서 산출되는 일반지하수의 $\delta^{13}\text{C}$ 분석값은 $-10.7 \sim -14.3\%$ 범위이고 (윤성택 외 1998), 정찬호의 미발표 자료에 의하면 국내 주라기 화강암 및 선캄브리아기 편마암 지역 지하수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-11.5 \sim -19.3\%$ 으로 알려져 있어, 이들보다 약수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 훨씬 높은 조성비를 보인다. 그리고 청송지역 퇴적암중 탄산염광물을 풍부히 함유한 사암 및 실트암에 대한 $\delta^{13}\text{C}$ 분석값은 $-2.9 \sim -0.8\%$ 범위를 보이고 (Table 3), 김규환 (1989)에 의하면 경상분지 석회암의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 $+1\%$ 이상에서 최저 -6.5% 까지 분포하는 것으로 보고되어 있다. 약수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 심부기원의 범위보다는 약간 높고, 탄산염암의 $\delta^{13}\text{C}$ 값과 비슷하거나 약간 낮은 범위를 보인다 (Fig. 6).

약수의 생성과정

달기약수의 수질 특성은 높은 H_2CO_3^* ($\equiv \text{H}_2$

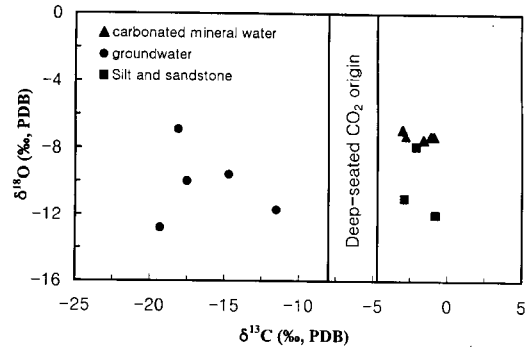


Fig. 6. Diagram showing the distribution of carbon and oxygen isotopes of sandstone and silt stone of Cretaceous sedimentary rocks, carbonated Dalki mineral water, and groundwater. Isotope data of groundwater is unpublished results of Jeong.

$\text{CO}_3 + \text{CO}_2$)함량, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- 등 용존이온의 높은 함량, pH 6.0 내외의 약산성으로 요약된다. 지하수의 수질을 결정하는 요인은 크게 지하수 유동경로를 따른 물-암석 상호반응에 의한 자연적인 반응과 인간활동과 관련한 오염물질의 유입에 기인한다. 약수터의 집수유역내 상가 및 숙박시설로부터 유입되는 것으로 보이는 NO_3^- 성분이 일부 약수에서 약간 높은 함량을 보이지만, 그외 특별한 오염원이나 오염성분이 검출되지 않으므로 전반적인 수질 특성에 대한 해석은 물-암석 반응의 관점에서 접근하여야 한다. 달기약수의 생성과정을 해석하기 위하여 다음 두 가지 관점에서 접근하였다: (1) 약수의 CO_2 공급원은 무엇인가, (2) 약수 지화학적 수질특성을 결정한 근원광물은 무엇인가?

CO_2 의 기원

약수의 높은 H_2CO_3 , HCO_3^- 의 함량과 5.9~6.26 사이의 일정한 pH 조건을 해석하기 위해서는 CO_2 공급원에 대한 설명이 필요하다. 자연수내 CO_2 는 H_2CO_3^* ($\equiv \text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2$) 형태로 존재한다. 지하수내 CO_2 의 공급원은 대기중의 CO_2 , 토양유기물로부터의 CO_2 , 그리고 탄산염광물의 변성작용시 생성되는 CO_2 , 탄산염광물과 산성용액의 반응에 의한 CO_2 의 생성, 그리고 맨틀, 마그마와 같은 심부기원등이다 (Irwin and Barnes, 1980). 대기중의 평균 P_{CO_2} 는 $10^{-3.5}$ atm 정도이고, 토양내 평균 P_{CO_2} 는 $10^{-1.5}$ atm 정도이다. 그러나 약수의 P_{CO_2} 는 0.51~1.12 atm 범위를 보여주므로 대기와 토양으로부터 공급되는 CO_2 만으로는 약수의

높은 P_{CO_2} 를 설명하기에는 불충분하다. 그리고 탄산염 광물의 변성작용에 의한 CO_2 의 생성은 연구지역내에서 변성작용에 대한 증거가 없으므로 논외이다. 다른 가능성으로 산성용액과 탄산염광물과의 반응에 의한 CO_2 발생인데, 산성용액을 공급할 수 있는 퇴적암 또는 화강암내 황철석등의 유화광물의 분포가 뚜렷이 확인되지 않고, SO_4^{2-} 와 같은 음이온의 농도가 일반지하수와 비교시에 별차이를 보이지 않아 이에 대한 가능성도 매우 희박하다. 따라서 약수내 CO_2 의 공급은 심부기원의 가능성을 고려할 수 있다.

자연수와 탄산염광물에 대한 $^{13}C/^{12}C$ 동위원소비는 탄소기원에 대한 정보를 제공한다. 대략적으로 자연수의 $\delta^{13}C$ 값이 PDB (Peedee belemnite standard)와 비교하여 -10% 이하이면 가벼운 유기기원 (light organic source)의 탄소로 -10% 이상이면 무거운 무기질 기원 (heavy inorganic source)의 탄소로 구분한다. 대기중 탄소의 $\delta^{13}C$ 값은 -7% 정도로 알려져 있다. 그리고 해양탄산염암의 $\delta^{13}C$ 값은 대략 0% 을 가지며 (Craig, 1953), 맨틀과 같은 심부기원의 $\delta^{13}C$ 값은 $-4.7\sim-8\%$ 범위를 보이는 것으로 알려져 있다 (Moore *et al.*, 1977; Pineau *et al.*, 1976). 유기물기원은 -12% 이하의 값을 보인다 (Craig, 1953). Istvan and Arpad (1982)은 스로바키아 신제 3기 화산지역을 포함한 4개 지역에서 89 개의 탄산광천수에 대한 탄소 동위원소 분석결과 평균 $\delta^{13}C$ 값을 $-6\pm 1.5\%$ 로 제시하고 이를 심부기원의 CO_2 가 혼합된 것으로 해석하였다. 또한 헝가리지역 탄산광천수의 $\delta^{13}C$ 값도 $-7\sim-2\%$ 범위로 유사한 값을 보여주어 후기 화산활동 (post volcanic activity)과 관련한 심부기원의 CO_2 와 탄산염광물의 용해시 생성된 탄소가 혼합된 것으로 해석하였다 (Cornides and Cornides, 1983; Cornides and Kecskes, 1984; 1974). Schofield and Jankowski (1998)는 호주의 Ballimore지역 일반지하수와 탄산지하수의 $\delta^{13}C$ 값을 $-14.1\sim+17.2\%$ 범위와 $-0.21\sim-2.07\%$ 범위로 각각 제시하였다. 전자는 유기기원의 탄소로 해석하고 후자를 심부기원의 탄소로 해석하였다.

달기약수의 $\delta^{13}C$ ($-3.0\sim-0.9\%$)과 퇴적암의 $\delta^{13}C$ ($-2.9\sim-0.8\%$)는 약수내 탄소가 유기기원보다는 퇴적암내 탄산염광물과 같은 무기질 기원임을 지시한다. 그리고 약수의 화학조성이 $Ca(Mg)-HCO_3$ 형이므로 탄소가 탄산염광물 기원일 가능성이 충분히 높다. 그러나 단순한 탄산염광물의 용해반응은 지하수의 pH를 상승시키는 반응인데, 약수의 pH가 6.0 내외로 지표수보다 더 낮은 약산성이며, 단순한 탄산염광물과 지하수의 반

응이라면 1 atm 내외의 높은 P_{CO_2} 가 유지되기 어렵다. 따라서 약수내 CO_2 의 기원으로 다른 무기질 기원을 고려해야 한다. 현재 가장 가능성이 높은 외부근원은 지하 심부기원의 CO_2 이다. 달기약수가 산출되는 집수구역내 정상계 퇴적암하부에 놓인 주라기 화강암의 약대를 따라서 지하심부에서 CO_2 가 상승하여 지하수계로 유입된 것으로 보이며, 유입된 CO_2 는 순환하는 지하수와 혼합되어 $H_2CO_3^*$ 를 형성하고, 아울러 CO_2 는 퇴적암내 탄산염광물, 엘바이트, K-장석과 같은 광물과 반응하여 다량의 HCO_3^- , 용존 무기질 성분을 용해시킨 것으로 보인다. Fig. 6에서 약수의 $\delta^{13}C$ 값은 분석된 탄산염광물의 $\delta^{13}C$ 값과 비슷한 범위를 보이지만 탄산염광물의 $\delta^{13}C$ 값이 $+5\%$ 이상도 국내에서 보고되어 있으며 (김규한, 1989), 앞서 소개한 문헌들에서 보고된 심부기원의 CO_2 의 $\delta^{13}C$ 값과도 유사하다. 따라서 실제로 탄산약수에는 심부기원의 CO_2 와 탄산염광물 기원의 탄소성분이 혼합되었을 가능성이 매우 높다.

근원광물 및 물-암석 상호반응

달기약수에 용존성분을 공급하는 모암은 앞에서 언급한바와 같이 화강암에 국한되지 않는다. 달기약수담 집수구역내 지질은 앞에서 언급된 바와 같이 화강암, 정상계 퇴적암의 사암 및 셰일, 그리고 화산암류이다. 현미경 관찰결과 구성광물군은 다음과 같이 크게 3개의 그룹으로 구분하였다: (1) 석영, K-장석, 사장석, 흑운모와 같은 규산염광물군, (2) 사암 및 셰일내 충전상 또는 교대상의 방해석, 백운석과 같은 탄산염광물군, (3) 그리고 적철석, 녹리석, 불투명 광물 등 기타 광물군이다.

퇴적암내 층준에 따라 체적비로 33~45% 정도의 높은 함량을 보이는 탄산염광물은 EPMA분석에 의한 화학조성이 방해석과 백운석의 영역에 분포하며, 대부분이 Fe를 다소 함유한다 (Fig. 7). 일반적으로 경상분지의 퇴적암은 오랜 속성작용에 의한 점토광물의 변질과정, 엘바이트화 작용과 Ca 성분을 다량 함유한 천수의 유입등에 의해 대부분의 사암 및 셰일내 10% 내외에서 최고 20% 이상까지 탄산염광물을 함유하는 것으로 알려져 있다 (노진환과 박현수, 1990; 고인석과 이용태, 1993; 고인석의, 1994; 고인석과 신영식, 1995; 신영식, 1998).

달기약수 집수구역내 화강암의 약대를 따라 심부에서 상승한 CO_2 는 순환하는 지하수에 용해되어 $H_2CO_3^*$ 를 형성하여 광물의 용해를 촉진시키는 풍화제

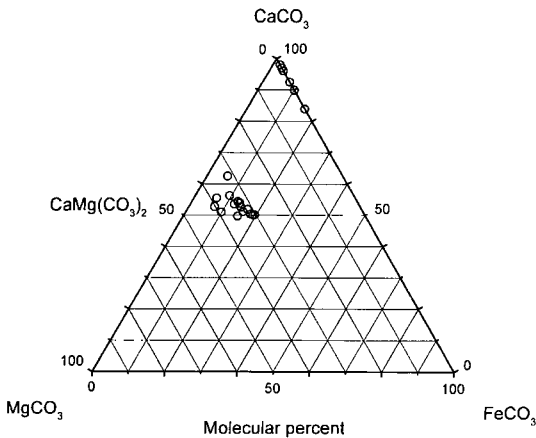
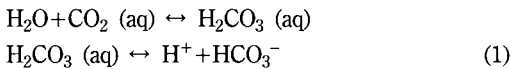
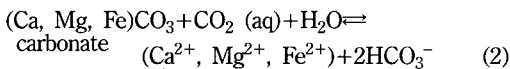


Fig. 7. Diagram showing the chemical composition of carbonate minerals in shale and sandstone of Cretaceous sedimentary rocks.

의 역할을 한 것으로 보인다. 동위원소 결과에서와 같이 약수의 함양지역은 집수구역 상부에 있는 퇴적암층으로 생각되며, 퇴적암은 사암 및 이질암이 교호하므로 불투수층인 이질암층내 협재된 사암은 CO₂의 저장고(reservoir)가 될 수 있다. 즉, 이질암내 협재된 사암층은 피압대수층(confined aquifer)의 역할을 하는 경우에 높은 P_{CO₂} 환경에서



반응을 통하여 지하수내 다량의 H₂CO₃, HCO₃⁻ 형성하고, 반응 (1) 과정을 거치면서 H₂CO₃/HCO₃⁻ 평형반응에 의해 pH는 6.0내외로 완충되었을 것이다. H₂CO₃*은 퇴적암내 풍부한 탄산염광물과 반응 (2)를 거치면서 HCO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ 등을 지하수내 용해된 것으로 보인다:



그리고 약수내 상당히 높은 함량치를 보이는 Na⁺, K⁺ 등의 성분은 퇴적암 및 화강암내 사장석, 칼리장석 등의 규산염광물과 CO₂ 반응으로부터 기원된 것으로 해석된다:

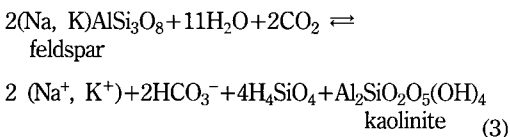


Fig. 8에서 불시료의 전기전도도와 주요 이온과의 관계를 도시화하였다. 전기전도도의 증가와 함께 Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺+K⁺ 함량이 비례적으로 증가하는 반면 음이온의 경우 HCO₃⁻만이 전기전도도와 뚜렷한 비례적 관계를 보이며, SO₄²⁻ 및 Cl⁻는 뚜렷한 경향을 보이지 않는다. 이는 약수의 진화과정이 CO₂와 탄산염광물에 의해 주도됨을 의미한다. 약수는 이질암내 사암층과 같은 피압대수층(confined aquifer)에서 물-암석 상호반응을 거치면서 지형적 동수구배를 따라서 유동하여 청송화강암으로 유입된 후 화강암의 단열틈을 따라서 용천수(spring)로 기저유출(base flow)되는 것으로 보인다.

결론

청송지역 달기약수의 지화학적 수질특성은 pH 6.0 내외의 약산성이며, 1 atm 내외의 높은 P_{CO₂}를 보이고, HCO₃⁻ 함량이 2,477~949 mg/l 으로 상당히 높은 함량을 보인다. 아울러 인체의 성장, 신진대사에 필수 무기성분인 Ca, Mg, Na, K 등을 풍부히 함유하고 있으며, 전기전도도가 3,100~1,442 μS/cm의 범위로 높아 일반지하수와는 다른 독특한 수질특성을 보인다. 일부 약수는 NO₃⁻, As, Fe의 함량이 음용수 기준치를 초과한다.

산소 및 수소 환경동위원소 분석결과 모든 약수는 강수기원이며, 동위원소의 고도효과차이를 볼 때 달기약수는 집수구역내 경상계 퇴적암층에서 함유된 것으로 보인다. 삼중수소 분석결과 대부분 2TU 이하를 보이는 달기약수는 1950년대 이전의 강수가 함유되어 진화된 것으로 보인다.

탄산약수의 δ¹³C 값이 -3~-0.2‰ 범위이며, 1 atm 내외의 높은 P_{CO₂} 값을 볼 때 약수내 탄소성분은 탄산염광물의 탄소와 심부로 부터의 기원한 CO₂가 혼합된 것으로 추정된다. 심부기원의 CO₂는 퇴적암과 화강암 접촉부의 약대를 따라서 지표로 상승하여 순환하는 지하수에 용해되어 탄산을 형성하고, 공급된 CO₂는 퇴적암내 존재하는 탄산염광물과 엘바이트 등의 규산염광물을 용해하여 다량의 이온성분을 용출시킨 것으로 보인다. 특히 불투수성인 세일층내 협재된 사암은 CO₂의 저장고(reservoir)가 된다. 이러한 사암층이 피압대수층(confined aquifer)의 역할을 하는 경우에 높은 P_{CO₂}는 광물의 용해반응을 촉진시킨 것으로 보인다. 탄산지하수는 지형적 동수구배를 따라서 유동하다가 화강암의 단열틈을 따라서 기저유출되는 것으로 보인다.

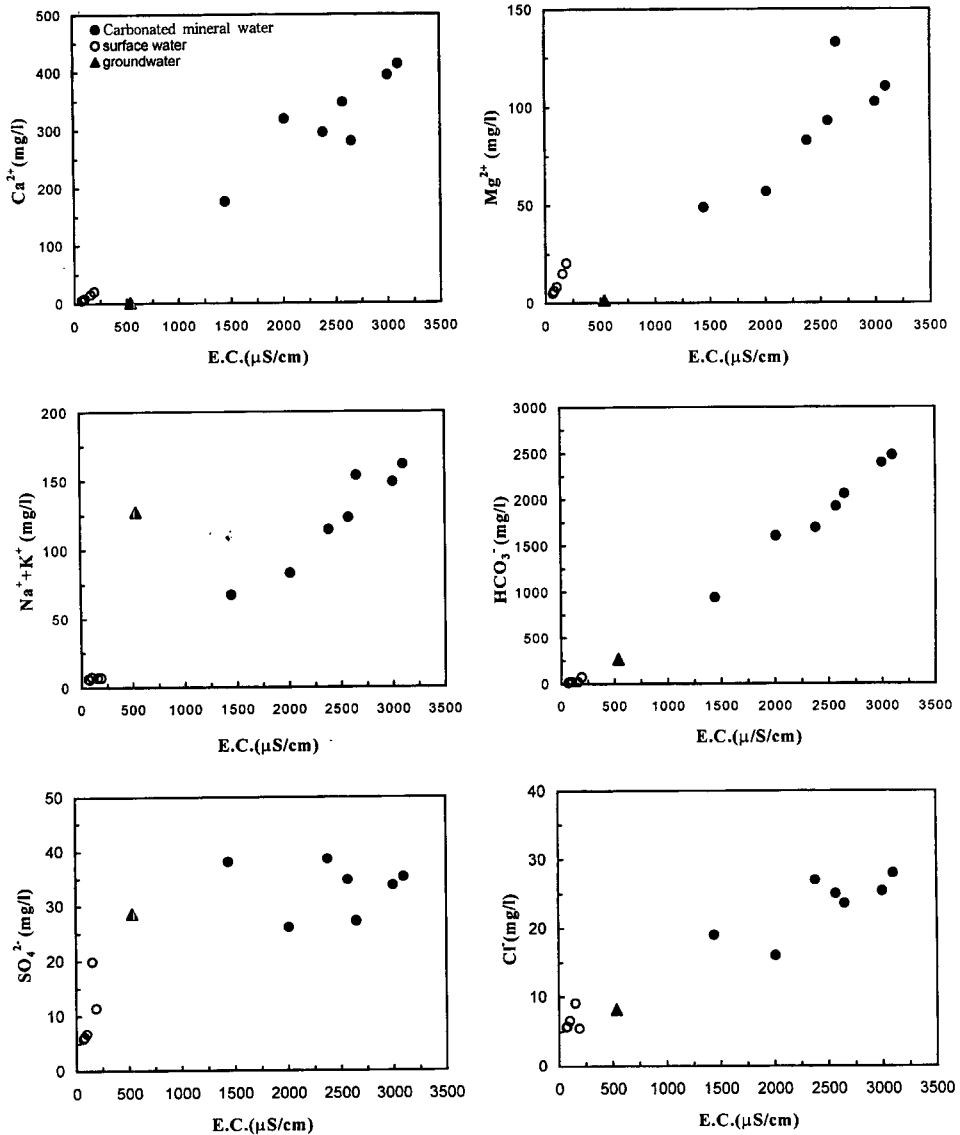


Fig. 8. Diagrams showing the relationships between electrical conductance and major ions of water samples.

이상의 연구결과는 향후 국내 탄산지하수의 생성연구에 기초적인 모델로 활용될수 있을 것이다.

참고문헌

고인석, 신영식 (1995) 한국 남동부 고령지역 백악기 사암의 화학조성. 한국지구과학회지, 15권, p. 408-419.
 고인석, 이용태 (1993) 의성소분지 남단부 백악기 사암의 퇴적암석학적 연구. 지질학회지, 29권, p. 225-245.
 고인석, 이용태, 김중근 (1994) 경상분지 백악기 상부 경상누층군 사암의 퇴적변질. 한국 석유지질학회지, 2권,

p. 19-31.
 김규한 (1991) 동위원소 지질학. 민음사, 252p.
 노진환, 박현수 (1990) 고령지역 경상누층군 사암의 속성 작용 및 속성광물. 지질학회지, 26권, p.371-392.
 신영식 (1998) 한국 경상분지 중앙부 백악기 하부 하양층군의 적색층에 관한 연구. 경북 대학교 대학원 이학박사학위논문, 151p.
 윤성택, 채기탁, 고용권, 김상렬, 최병영, 이병호, 김성용 (1998) 풍기지역 지하수의 수리 지구화학 및 환경동위원소 특성연구, 5권, p. 177-191.
 이종윤, 진효택, 전용원 (1997) 국내 화강암질내내 심부지하수의 지구화학적 특성. 지하수 환경학회지, 4권, p. 199-211.
 이흥규, 홍승호 (1973) 한국의 지질도:청송도폭 (1:50,000).

- 국립지질광물 연구소. 23p.
- 종근당 (1996) 물과 건강. 종근당, 49p.
- 최석원, 김억수 (1996) 의학환경 지구화학. 춘광. 434p.
- 한국원자력연구소 (1994) 자연방벽 안전성 평가 : 수문환
경평가기술개발. KAERI-NEMAC/RR-125/94, 69p.
- 한국자원연구소 (1993) 지질환경에서 유해원소들의 지화
학적 분산연구 (I). 과학기술처, 464p.
- 한국자원연구소 (1996) 지구물리 · 지구화학적 오염영역
탐지 및 감시기술 개발 연구 (III). 과학기술처, 667p.
- 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 dis-
tribution 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.
- Calf, G.E., Seatonberry, B.W. and Smith, L.M. (1976) The
measurement of natural levels of tritium in water.
AAEC/E, 373p.
- 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 geochem-
ical study of the CO₂ occurrences in the Eastern Car-
pathians. Földt. Kőzl., Budapest, p. 121-125.
- Cornides, I. and Kecskés. Á. (1974) A genetic inves-
tigation of the carbon dioxide occurrences in the Car-
pathian 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. Carpahtica, v. 33. p. 183-190.
- Craig, H. (1953) The geochemistry of the stable carbon
isotopes. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 3, p. 53-92.
- Internet (1998) <http://www.lithiaspring.com>, <http://www.colfax-mineral-water.com>, <http://www.lupotour.co.th>,
<http://www.whatershed.net>, <http://www.btt.org>.
- Irwin, W.P. and Barnes, I. (1980) Tectonic Relations of
Carbon Dioxide discharges and Earthquakes. Journal
of Geophysical Research, v. 85, p. 3115-3121.
- Kendall, C. and Coplen, T.B. (1985) Multisample con-
version of water to hydrogen by zinc for stable isotope
determination. Anal. Chem., v. 57, p. 1438-1440.
- Moore, J.G., J.N. Bachelder, and C.G. Cunningham (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 iso-
topic compositions of deep seated carbon. Earth
Planet. Sci. Lett., v. 29, p. 413-421.
- Piper, A.M. (1944) A graphic procedure in the geochem-
ical interpretation of water analyses. Transactions of
American Geophysical Union, v. 25, p. 914-923.
- Schofield, S. and Jankowski, J. (1998) The origin of
sodium-bicarbonate groundwaters in a fractured aqui-
fer experiencing magmatic carbon dioxide degassing,
the Ballimore region, central New South Wales, Aus-
tralia. Proceeding of the 9th international symposium
on water-rock interaction-WRI-9/Taupo/NewZealand,
p. 271-274.
- 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.
- Zuane, J.D. (1996) Handbook of drinking water quality
(2nd ed.). Van Nostrand Reinhold, 575p.

1999년 5월 11일 원고접수, 1999년 7월 13일 게재승인.