

동해안지역 온천유형별 수리화학적 특성 및 영족기체 기원

정찬호^{1*} · K. Nagao² · 김규한³ · 최훈공³ · H. Sumino² · 박지선² · 박충화¹ · 이종익⁴ · 허순도⁴

¹대전대학교 지반설계정보공학과, ²동경대학교 지각화학연구소,

³이화여자대학교 과학교육학과, ⁴한국해양연구원 극지연구소

Hydrochemistry and Noble Gas Origin of Various Hot Spring Waters from the Eastern area in South Korea

Chan Ho Jeong^{1*} · Keisuke Nagao² · Kyu Han Kim³ · Hun Kong Choi³ · Hirochika Sumino²
Jisun Park² · Chung hwa Park¹ · Jong Ig Lee⁴ · Soon Do Hur⁴

¹Department of Geotechnical Design Engineering, Daejeon University

²Laboratory for Earthquake of Chemistry, Graduate School of Science, University

³Department of Science Education, Ehwa Woman University

⁴Korea Polar Research Institute, Korea Ocean Research & Development Institute

ABSTRACT

The purpose of this study is to characterize the hydrogeochemical characteristics of hot spring waters and to interpret the source of noble gases and the geochemical environment of the hot spring waters distributed along the eastern area of the Korean peninsula. For this purpose, We carried out the chemical, stable isotopic and noble gas isotopic analyses for eleven hot spring water and fourteen hot spring gas samples collected from six hot spring sites. The hot spring waters except the Osaek hot spring water show the pH range of 7.0 to 9.1. However, the Osaek CO₂-rich hot spring water shows a weak acid of pH 5.7. The temperature of hot spring waters in the study area ranges from 25.7°C to 68.3°C. Electrical conductivity of hot spring waters varies widely from 202 to 7,130 μ S/cm. High electrical conductivity (av., 3,890 μ S/sm) by high Na and Cl contents of the Haeundae and the Dongrae hot spring waters indicates that the hot spring waters were mixed with seawater in the subsurface thermal system. The type of hot springs in the viewpoint of dissolved components can be grouped into three types: (1) alkaline Na-HCO₃ type including sulfur gas of the Osaek, Baekam, Dukgu and Chuksan hot springs, and (2) saline Na-Cl type of the Haeundae and Dongrae hot springs, and (3) weak acid CO₂-rich Na-HCO₃ type of Osaek hot spring. Tritium ratios of the Haeundae and the Dongrae hot springs indicate different residence time in their aquifers of older water of 0.0~0.3 TU and younger water of 5.9~8.8 TU. The $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of hot spring waters indicate that they originate from the meteoric water, and that the values also reflect a latitude effect according to their locations. $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios of the hot spring waters except Osaek CO₂-rich hot spring water range from 0.1×10^{-6} to 1.1×10^{-6} which are plotted above the mixing line between air and crustal components. It means that the He gas in hot spring waters was originated mainly from atmosphere and crust sources, and partly from mantle sources. The Osaek CO₂-rich hot spring water shows 3.3×10^{-6} in $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio that is 2.4 times higher than those of atmosphere. It provides clearly a helium source from the deep mantle. $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios of hot spring water are in the range of an atmosphere source.

Key words : Hot spring water, Chemical composition, Helium gas, Mantle origin, Residence time

요 약 문

이 연구는 한반도 동해안 일대에 분포하고 있는 주요 온천에 대하여 화학성분, 안정동위원소, 삼중수소 그리고 헬륨과 아르곤 같은 영족기체의 동위원소 특성을 분석하여 온천유형별 온천수의 지화학적 특성을 밝히고, 영족기체의 기

*Corresponding author : chjeong@dju.ac.kr

원고접수일 : 2007. 6. 21 게재승인일 : 2007. 11. 5

질의 및 토의 : 2008. 4. 30 까지

원을 규명하고자 하였다. 이를 위하여 동해안 일대의 6개 온천지에서 11개의 온천수 시료와 14개의 가스시료를 채취하여 분석하였다. 온천수의 수리화학적 특성을 보면 오색탄산온천수를 제외한 모든 온천수의 pH는 7.0~9.1 범위의 약알카리성 내지 알카리성을 보이며 오색탄산온천의 pH는 5.7의 약산성의 특성을 보였다. 온천수의 토출온도는 25.7~68.3°C 범위를 보였으며 전기전도도는 202~7,130 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 넓은 범위로 해운대와 동래온천은 평균 3,890 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 높은 값을 보인다. 온천을 용존성분에 따른 분류하면 오색, 척산, 백암, 덕구온천은 소량의 유황가스 함유한 알카리성의 Na-HCO_3 형으로 분류되고, 해운대와 동래온천은 높은 TDS(총용존고형물질)의 해수형 Na-Cl 형을 보인다. 그리고 오색탄산온천은 약산성으로 탄산을 함유한 Na-HCO_3 형으로 분류된다. 연구지역 온천수의 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 값은 각각 -7.8~-11.7‰과 -57.3~-86.4‰의 범위를 보여 온천수가 순환수 기원임을 지시한다. 위도가 높아질수록 낮은 동위원소 조성 값을 보이는 위도효과가 잘 나타난다. 일부 해수형온천수의 삼중수소 함량은 거의 0 TU에 가까운 값을 보여 최소 약 50년 이상 체류한 물임을 알 수 있다. 오색탄산온천수를 제외한 온천수의 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 동위원소비는 0.1×10^{-6} ~ 1.1×10^{-6} 범위를 보여, 대기-지각 혼합선보다 상위에 분포한다. 이는 온천수내 He 가스가 대부분 대기와 지각기원이며, 일부는 맨틀기원의 He 가스가 부분적으로 존재한다는 것을 의미한다. 판 경계부에 위치한 일본의 온천수내 He가스는 대부분이 맨틀기원으로 알려져 있어 판 경계부에서 떨어진 우리나라의 경우와 뚜렷한 차이를 보인다. 그러나, 오색탄산온천에서는 대기기원 He 동위원소비보다 2.4배 높은 값인 3.3×10^{-6} 을 보여주어 지하 심부의 맨틀기원의 가스가 지각상부 대수층까지 공급된 것으로 해석된다. 온천수의 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비는 대기기원의 값과 유사한 범위를 보인다.

주제어 : 온천수, 화학성분, 헬륨가스, 맨틀기원, 체류시간

1. 서 론

국내 온천에 대한 수리지구화학적 및 동위원소적 특성에 대한 연구가 1980년대 중반이후 몇몇 연구자에 의해서 진행된 바 있다(Yun et al., 1998; 심형수 등, 2000; 고용권 등, 2001a; 2001b; 성규열 등, 2001; 고용권 등, 2003). 주요 연구사례를 보면 부산해운대와 동래온천에 대한 연구는 수리화학적 특성의 규명과 해수와의 혼합관계, 지열수의 진화과정, 열원의 온도추정에 대해서 보고된 바 있으며(심형수 등, 2000; 성규열 등, 2001; 고용권 등, 2003), 국내에서 가장 높은 수온을 보이는 부곡온천에 대한 연구로는 온천의 온도와 심부환경과의 관계, 그리고 황성분의 기원에 대해서 보고된 바 있다(Yun et al., 1988; 고용권 등, 2001a, 2001b). 그 외 유성온천, 문경탄산온천, 중원지역 탄산온천의 수리화학적 특성 및 동위원소적 특성에 대한 연구가 진행된 바 있다(정지곤 등, 1997; 고용권 등, 1999a; 김건영 등, 2000; 배대석 등, 2000).

지금까지 국내 온천수에 대한 연구는 주로 지구화학적 특성규명, 동위원소를 이용한 환경해석, 물-암석 반응에 의한 온천수의 진화과정, 열원의 온도 추정 등으로 요약된다. 그러나 일본과 같은 온천국가에서는 오래 전부터 온천수 내 함유된 영족기체(noble gas)의 동위원소 특성을 이용한 온천수 기원 및 생성과정, 지체구조와의 관계 등의 해석연구가 진행되어 왔다(Aka, et al., 2000; Kusakabe, 2003). 특히 영족기체와 같은 비활성기체는 유력한 추적자(tracer)의 역할을 할 수 있다. 영족기체, 특히

헬륨 동위원소비($^3\text{He}/^4\text{He}$)가 대기, 지각, 맨틀사이에 큰 차이가 있고, 이 동위원소비를 측정하여 맨틀로부터 지구 표층으로의 영족기체의 이동과정을 추적하고자 하는 연구가 수행되어 왔다. 이후 영족기체의 동위원소 조성비를 이용해 운석연구, 대기형성론, 맨틀물질 순환과정, 화산활동, 지열수 분야의 연구가 많이 이루어지고 있다(Nakamura, et al., 1999a; 1996b; Matsuda, et al., 1999; Nagao, et al., 1999; Osawa, et al., 2000; Okazaki, et al., 2001; Osawa, et al., 2002a; 2002b). 일본에서는 이 분야 연구가 매우 활발하여 일본열도의 화산, 온천, 지열지대에서 용출되는 비활성기체에 대한 많은 동위원소 자료가 축적되어 있다(Aka, et al., 2000; Kusakabe, et al., 2003).

이 연구에서는 우리나라 동해안 일대에 분포하고 있는 주요 온천의 유형별 수리화학적 특성, 안정동위원소 특성, 그리고 영족기체의 기원을 밝히하고자 하였다. 연구대상 온천으로는 강원도 오색탄산온천과 오색알카리온천, 척산온천, 경북 울진지역의 덕구온천, 백암온천, 그리고 부산지역의 해수혼합형 특성을 보여주는 동래온천과 해운대온천을 선정하였다(Fig. 1). 특히 이번 연구에서는 그 동안 국내에서 소개되지 않았던 온천수내 헬륨가스와 같은 영족기체 동위원소 분석을 통하여 그들의 기원을 정량적으로 해석하고 이를 바탕으로 온천유형별 기원 및 진화특성에 대한 정보를 얻고자 하였다. 그리고 해양지각이 섭입되는 해구로부터 비교적 멀리 떨어진 한반도에서의 휘발성 원소의 기원과 판 경계부에 위치한 일본의 영족기체 기원을 비교하고자 하였다.

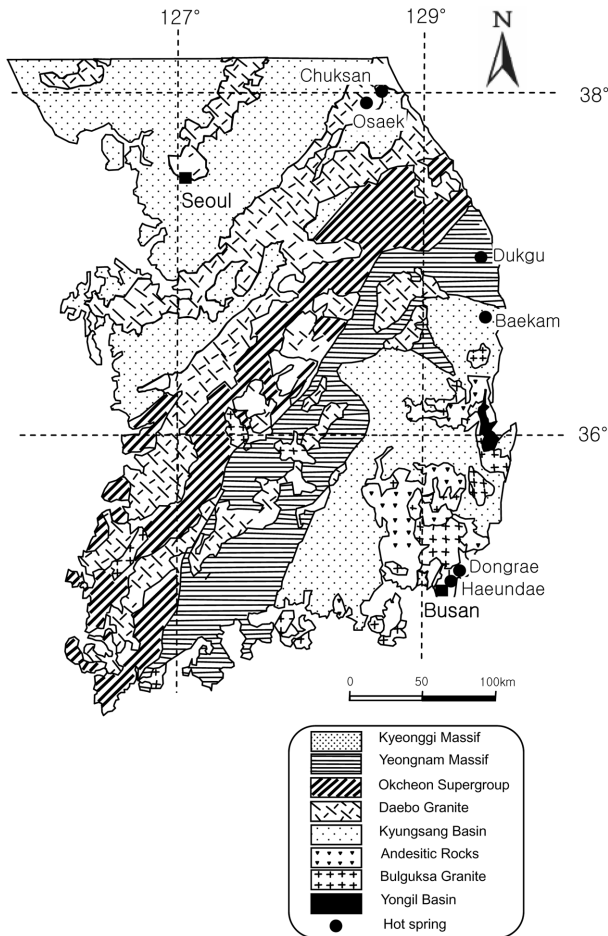


Fig. 1. Regional geologic map of the Korean peninsula, including sampling locations of hot springs.

2. 지 질

동해일대 연구대상 6개 온천지역의 분포와 광역적인 지질은 Fig. 1과 같다. 여기서는 온천지역의 지질특성을 기존 지질도폭 설명서를 인용하여 간략하게 설명하고자 한다. 강원도 설악산지역 오색 및 척산 온천일대의 지질은 선캄브리아기의 호상편마암, 쥐라기 흑운모화강암이 대부분을 차지하고 있으며, 부분적으로 화강편마암과 반상변정 편마암이 분포하며 곳에 따라 소규모의 맥암이 관입하고 있다. 오색온천일대의 화강암은 주로 정장석, 사장석 및 석영, 흑운모로 구성되어 있으며 곳에 따라 정장석과 사장석 결정 중에 이들이 변질되어 견운모, 백운모화 되어 있다(Nahm, 1970). 척산 온천지역의 기반암은 온천 남쪽지역 일대에 선캄브리아기에 속하는 우리나라에서 가장 오래된 지층 중 하나인 편마암이 분포하고 있으며, 후기에 화강암이 이를 관입하고 있다. 온천 부근의 화강암은 주로 석영, 정장석,

사장석, 흑운모로 구성되어 있다(Nahm, 1970).

덕구온천지역의 지질은 홍제사화강암과 류코크래틱(lecucocratic)으로 주로 구성되며 이들 화강암은 조선계의 퇴적암을 관입하고 있다.

백암온천지역은 경상분지의 연변부에 위치하며 지질은 경상계 퇴적암과 이를 관입한 화강암으로 이루어져 있다. 경상계 선미리층은 서부에 소규모로 분포하며 쥐라기의 각섬석-흑운모 화강암이 이를 관입하고 있다. 온천은 이 화강암 저반내에 위치하고 있다. 온천의 동부에 상당한 연장을 갖는 서화산 단층이 $N30^{\circ}W$ 방향으로 발달하고 있으며, 온천의 북부 계곡에 $N69^{\circ}W$, $70^{\circ}SW$ 방향의 소규모 단층이 발달하고 있다(김옥준 외, 1999).

해운대와 동래온천은 한반도 동남부 남단인 부산광역시 에 위치한다. 해운대 온천지역은 백악기 유천층군에 속하는 안산암질암이 하부에 위치하고 있으며, 그 위로 유천층군에 속하는 유문암질 화산각력암, 용결응회암, 구과상 유문암, 유문반암이 놓여 있고, 저지대는 제4기 충적층으로 피복되어 있다(손치무 외, 1999; 장태우 외, 1999). 동래 온천은 백악기 화강암류 지역에서 산출되며, 화강암류는 안산암과 화강섬록암, 각섬석화강암들을 관입하고 있으며 중앙부에는 마산암류의 토나라이트(tonalite)가 관입암체로 분포하고 있다.

3. 연구방법

3.1. 시료채취 및 현장측정

이 연구를 위하여 2004년 7월 동해안 일대에 분포하는 6개 온천지역에서 11개의 온천수 시료와 14개의 영족기체 분석용 시료를 채취하였다. 채취된 온천수 시료는 오색탄산온천(OS1) 오색알카리온천(OS2), 척산온천(CS1), 덕구온천(DU1), 백암온천(BA1, BA3), 해운대온천(HD1, HD2, HD3) 그리고 동래온천(DR1, DR2) 등이다. 영족기체 분석을 위한 시료채취는 상기 온천수 시료 외에 덕구온천에서 1개(DU2), 백암온천에서 2개(BA2, BA4)의 시료를 추가로 채취하였다.

온천수 시료는 심도 100~400 m 범위의 온천공에서 직접 채취되었다. 시료채취 현장에서 온천수의 pH와 산화환원전위(Eh)는 휴대용측정기 (Orion 290A 모델)로 측정하였으며, 온도 및 전기전도도는 Orion 130A 모델의 휴대용 전기전도도측정기로 측정하였다. 온천수의 용존산소량은 Orion 830 모델의 휴대용 측정기로 측정하였다. 온천수의 알칼리도는 0.05N 혹은 0.5N HCl을 이용하여 현장에서 산중화적정법으로 구하였다.

모든 시료는 채취 즉시, $0.45 \mu\text{S}/\text{cm}$ 질산염막필터를 이용하여 부유물질 등 이물질을 제거하였다. 양이온, 음이온, 안정동위원소 분석용 시료는 60 mL 폴리에틸렌용기에 채취하여 밀봉한 후 냉장 보관하여 실험실로 옮겨졌다. 양이온 분석을 위한 시료는 시료용기에 이온성분들의 흡착과 침전 등의 변질을 막기 위하여 농질산 첨가하여 pH 2 이하가 되도록 조정한 후 보관하였다.

영족기체 분석용 시료는 동경대학교 지각화학연구실에서 특수 제작된 진공용기를 이용하였다. 온천공 토출관과 진공용기를 고무튜브로 직접 연결하여 온천수가 대기에 접촉하지 않도록 하여 가스시료를 채취하였다.

3.2 화학성분 및 동위원소 분석

온천수 시료에 대한 주요 양이온(Na, K, Ca, Mg, Si)은 한국기초과학지원연구원의 원자흡광분광분석기(Unicam 모델 989, AAS), 유도결합플라즈마방출 분광분석기(Shimadzu ICPS-1000 모델)를 이용하여 분석되었다. 미량원소(Fe, Mn, Sr, Zn, Li, Ba, Al, Cr, Cu, Ge, As, Pb, U)는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 유도결합플라즈마 질량분석기(Fison PQ III 모델, ICP-mass)로 분석하였다. 주요 음이온인 SO_4 , Cl, NO_3 , F 등은 대전대학교의 이온크로마토그래피(Dionex DX-120 모델)로 분석하였다. 분석의 신뢰도는 양이온과 음이온 사이에 전하균형을 계산하여 확인하였다.

온천수 시료의 산소 및 수소 안정동위원소비 분석은 한국원자력연구원의 동위원소질량분석기(VG SIRA II 모델)를 이용하였고, 산소 및 수소동위원소비 분석결과는 표준평균해수(SMOW)에 표준화한 천분율(‰)로 표현하였다. 산소동위원소의 분석오차는 $\pm 0.1\%$ 이고 수소동위원소는 $\pm 1.0\%$ 이었다.

온천수중 해운대온천과 동래온천에서 채취된 시료에 대해서만 삼중수소 분석이 이루어졌다. 삼중수소는 자연수 내에 극미량이 포함되어 있어, 농축과정을 거쳐야만 분석이 가능하다. 삼중수소 농축은 전기분해를 통해 시료 600 g을 최종적으로 20 g으로 농축하였다. 농축된 시료 10 g을 취하여 Cocktail 용액(Ultra Gold LLT, Packard사) 10 mL와 혼합하여 액체섬광계측기(Packard 2250과 Packard 2770TR/SL)로 계측하였다(Calf, 1976). 삼중수소 단위는 TU(Tritium Unit)로 표시하고, 1 TU는 수소원자 10^{18} 개당 1개의 삼중수소를 의미한다. 1 L 물시료에 1 TU는 방사능 단위로 0.118 Bq(7.2 dpm)에 해당된다. 삼중수소의 분석은 한국원자력연구원에서 수행되었다.

3.3 헬륨, 아르곤, 네온 동위원소 분석

온천수내 함유된 영족기체(He, Ar, Ne) 동위원소 분석은 동경대학교 지각화학연구실에서 진행되었다. 채취된 물-가스 혼합시료에서 가스의 추출은 동경대학에서 직접 제작한 금속으로 제작된 토플러펌프(Toepler Pump) 시스템을 이용하였다. 이 시스템은 극저준위의 영족기체 배정치를 가진 환경하에서 영족기체를 측정할 수 있는 장치이다. 토플러펌프를 이용하여 온천수로부터 추출한 영족기체는 두 개의 Ti-Zr 포집자를 이용하여 정화시켰다. 그리고 He, Ne 그리고 Ar-Kr-Xe 3개 가스군으로 분리한 후 질량분석기(VG5400 MS-III 모델)로 분석하였다.

4. 수리화학적 특성

물 시료에 대한 pH, Eh, 전기전도도, 용존산소함량, 양이온과 음이온 성분, 그리고 미량원소 등과 같은 수리화학적 특성에 대한 분석결과는 Table 1에 정리되어 있다. 화학분석자료의 정확성을 검토하기 위해서 분석된 총양이온과 총음이온 함량을 당량으로 환산하여 전하균형을 계산하였다.

4.1. 현장측정자료

동해안 지역에 분포하고 있는 온천의 수온은 25.7~68.3 °C의 범위를 보였다. 오색탄산온천(시료 OS1)의 수온이 25.7°C로 가장 낮은 온도를 보여주며, 동래온천(시료 DR1)이 68.3°C로 가장 높은 수온을 보였다. 탄산온천을 제외한 다른 온천에서 50°C 이상의 높은 수온을 보여 고온형 온천으로 분류된다.

온천수의 pH는 온천별로 차이를 보이는데 오색탄산온천수(OS1)는 pH 5.7로 약산성을 보이고, 오색온천수(OS2)는 pH 7.7, 척산온천수는 pH 8.0, 덕구온천수는 pH 9.0, 백암온천수는 pH 9.0~9.1, 해운대와 동래온천수는 pH 7.0~8.0의 범위를 각각 보인다. 온천수의 산화-환원전위(Eh)는 -24~128 mV의 범위를 보인다.

온천수의 전기전도도는 온천유형별로 큰 차이를 보인다. 해운대와 동래 온천수의 전기전도도는 각각 2,570~7,130 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 987~1,683 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위로 높은 값을 보인다. 이들 온천은 해수의 혼합에 의해 높은 전기전도도를 보이는 것으로 이에 대한 자세한 내용은 후술된다. 온천수에서 용존산소(DO) 함량은 0.0~8.9 mg/L 범위를 보인다. 저온형 온천에서 높은 용존산소 함량을 보인다.

4.2. 화학조성

온천수의 수리화학적 특성은 온천유형별로 구분하여 탄

Table 1. Chemical composition of hot water samples collected from various hot springs in the eastern area of Korean peninsula

	OS1	OS2	CS1	DU1	BA1	BA3	HD1	HD2	HD3	DR1	DR2
Temp (°C)	25.7	33.2	45.8	40.3	52	51.4	54	55	33.4	68.3	45.8
pH	5.71	7.65	7.98	8.95	9.14	9.09	7.14	7.33	7.0	7.98	7.75
Eh (mV)	42	31	5.9	6.0	137	-24	65	6.0	128	6.2	5.6
EC (μS/cm)	1090	202	331	229	258	240	7080	7130	2570	1683	987
DO (mg/L)	8.87	2.03	1.25	8.29	0.81	3.01	0.59	0.0	0.42	1.05	0.63
Na ⁺ (mg/L)	276	31.5	52.7	42.8	52.3	44.3	817	921	286	227	157
K ⁺ (mg/L)	20.22	0.53	1.28	1.4	1.38	0.89	28.3	32.7	9.47	7.52	3.51
Ca ²⁺ (mg/L)	21.6	17.2	14.3	3.53	1.57	1.09	508	556	182	63.2	35.3
Mg ²⁺ (mg/L)	1.15	0.16	0.08	0.05	0.11	0.03	3.36	2.24	1.94	0.17	0.21
Sr (mg/L)	1.02	0.15	0.13	0.04	0.08	0.02	6.91	7.58	2.47	1.23	0.67
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	793	76.3	130	80.9	97.6	86.9	38.1	32.1	143.4	45.8	122
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	31.99	10.17	12.66	6.76	15.59	17.95	143	133	76.1	47.69	50.16
Cl ⁻ (mg/L)	7.81	2.62	20.44	6.93	11.96	10.79	2401	2409	553	364	180
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.0	0.74	2.32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.03
SiO ₂ (mg/L)	69.5	51.9	54	50.7	76	66.9	63.7	63.2	53.2	58.2	53.1
F ⁻ (mg/L)	7.04	8.29	8.26	12.4	4.15	3.89	5.31	1.35	5.75	3.97	0.38
*EN (%)	-2.04	6.43	-6.06	-5.41	-1.66	-6.94	-7.08	-1.67	5.54	4.15	3.07
(unit: μg/L)											
U	11.7	0.3	16.5	6.4	0.0	0.2	1.0	0.8	2.1	3.2	20.2
Y	6.5	1.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0
Ba	57.2	0.5	0.1	0.1	0.3	0.5	207	204	84.2	13.9	6.4
Li	282	85.5	110	93.5	40.7	48.9	218	218	128	139	121
Al	760	121	13.9	20.3	14.7	19.4	1.7	1.4	0.7	9.0	5.4
Be	97.8	2.5	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
Cs	14.5	7.7	0.2	1.1	4.2	2.6	151	125	29.9	25.8	10.0
Ga	0.0	0.8	2.1	2.2	4.2	3.6	0.1	0.1	0.0	0.8	0.3
Rb	157	9.3	2.2	3.4	7.6	5.3	230	195	61.4	36.3	15.5
Ge	2.8	0.7	1.1	1.4	1.7	1.3	1.3	1.5	0.9	1.8	1.2
Mo	22.3	42.6	12.2	28.3	31.9	49.4	11.5	15.0	2.9	33.0	8.2
Nb	13.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.6	0.5	0.4	0.1	0.0
Sn	0.2	0.1	0.1	0.1	0.5	0.2	0.8	0.8	0.1	0.0	0.0
W	3.0	4.6	6.6	54.0	18.9	14.6	3.0	3.2	0.9	4.5	1.0
Co	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.4	0.1	0.2
Cd	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
Mn	565	283	0.5	0.1	0.5	3.1	103	75.0	32.7	0.4	1.6
Ni	4.9	2.0	0.6	0.5	0.2	0.6	2.6	3.3	3.0	0.6	13.5
Fe	10254	94	187	4.5	4.3	10.3	2045	1735	629	229	267
Cr	3.1	0.0	0.5	0.2	0.3	0.0	0.4	0.3	1.1	0.2	7.0
Cu	15.6	11.1	0.7	0.5	0.5	0.8	7.6	7.4	3.1	2.4	2.8
Pb	0.3	0.1	0.3	0.1	0.0	0.1	0.4	3.6	0.2	0.1	0.2
V	0.6	0.5	2.0	1.4	1.7	1.1	12.1	12.9	5.4	3.3	1.3
Zn	50.1	1.4	23.9	0.3	1.0	7.3	3.3	12.1	15.2	2.4	10.5
Ion balance error											

산온천(시료번호 OS1), 알카리성 온천(시료번호 OS2, CS1, DU1, BA1, BA3), 해수형 온천(시료번호 HD1~

HD3, DR1, DR2)으로 설명하였다.

연구지역 온천수의 주요 양이온인 Na의 함량은 31.5~

921 mg/L의 범위를 보인다. 오색탄산온천수의 Na 함량은 276 mg/L로 상당히 높은 함량을 보이는 반면 인근에 위치한 오색알카리온천공의 온천수에서는 31.5 mg/L으로 큰 농도 차이를 보인다. 유사한 지질조건에서도 탄산의 존재 여부에 따라서 Na의 함량이 큰 차이를 보인다. 다른 알카리 온천수에서 Na의 함량은 42.8~52.7 mg/L의 범위를 보인다. 해수형 온천인 해운대와 동래온천의 Na 함량이 평균 674.7 mg/L과 192 mg/L을 각각 보여주며, 특히, 해운대 온천수 시료인 HD1(817 mg/L)과 HD2(921 mg/L)에서는 상당히 높은 농도를 보인다. 이들 온천은 해수의 혼합 또는 해침과 해퇴후 지층내 잔류해수의 혼합으로 높은 Na의 함량을 보이는 것으로 판단된다(성규열, 2001). 화강암과 편마암지역 온천수내 Na 성분은 해수의 혼합이나 오염원이 존재하지 않는다면 주로 엘바이트 장석이 물-광물 반응과정을 거치면서 온천수에 공급된 것으로 해석될 수 있다.

온천수의 K 함량은 0.5~32.7 mg/L의 범위를 보인다. 오색탄산온천수내에는 20.2 mg/L로 높은 함량을 보이고, 알카리성 온천수에서는 0.53~1.4 mg/L의 낮은 함량을 보인다. 그리고 해운대온천에서는 28.3~32.7 mg/L으로 높은 함량을 보이고, 동래온천에서는 3.51~9.47 mg/L의 농도범위를 보인다. K의 기원은 칼리장석 또는 운모류의 용해에 의해 온천수에 공급될 수 있다.

온천수내 주요 양이온중 하나인 Ca 함량은 1.1~556 mg/L 범위를 보인다. 오색탄산온천수의 Ca 함량은 21.6 mg/L를, 오색알카리성 온천수는 17.2 mg/L의 농도를 각각 보인다. 다른 알카리성 온천수중 CS1에서는 14.3 mg/L 농도로 OS2와 유사한 농도값을 보이나 경북지역에 분포하는 온천인 BA1, BA3, DU1 온천수에서는 1.09~3.53 mg/L의 농도 범위를 보여 상당히 낮은 Ca 함량을 보인다.

해수형 온천의 해운대 온천수의 Ca 함량은 평균 415 mg/L로 연구지역 중에서 가장 높고, 동래온천수의 Ca 함량은 평균 49.2 mg/L을 보인다. 온천수내 Ca의 공급은 탄산염광물이나 사장석의 용해 그리고 염수와 관련될 수 있다. 해수형 온천에서 상대적으로 높은 Ca 함량은 사장석이나 방해석의 용해뿐만 아니라 염수의 유입이 주요 요인으로 보인다.

온천수내 Mg의 함량은 0.0~3.4 mg/L(평균 0.9 mg/L)로 매우 낮은 농도를 보인다. Mg 이온의 주요 기원으로는 돌로마이트의 용해, Mg-산화 광물이나 각섬석, 휘석 등의 규산염 광물의 용해에 의한 것이 일반적이다.

규산염 광물로부터 주로 용해 공급되는 SiO_2 함량은 50.7~69.5 mg/L 범위를 보인다.

온천수의 주요 음이온인 HCO_3^- 함량은 32.1~793 mg/L의 범위를 보인다. 오색탄산온천수의 HCO_3^- 함량은 793 mg/L로 가장 높은 값을 보이며, 알카리 온천수와 해수형 온천수에서의 HCO_3^- 함량은 각각 평균 94.4 mg/L, 76.3 mg/L로 오색탄산온천수에 비하여 낮은 값을 보인다.

Cl 함량은 2.6~2,409 mg/L 범위를 보인다. Nordstrom et al.(1989)에 의하면 지하수내 Cl의 기원은 해수의 혼합, 규산염 광물(흑운모 및 각섬석 등)의 수화반응 그리고 유체포유물로부터의 공급을 제시하였다. 앞에서 Na의 공급원에 대해 언급된바와 같이 해운대와 동래 해수형 온천수에서 Cl의 높은 함량은 유체포유물의 용해나 규산염광물의 물-암석 반응에 의한 공급보다는 인접한 해수의 침투에 의한 해수혼합이 주된 공급으로 볼 수 있다. 이는 후술될 온천수의 산소 및 수소 동위원소 구성에 의해서도 뒷받침된다.

SO_4 함량은 6.8~143 mg/L 범위를 보인다. 알카리 온천수와 해수형 온천수의 SO_4 함량은 각각 6.8~18.0 mg/L, 47.7~143 mg/L 범위를 보여 온천 유형별로 함량차이를 뚜렷이 보인다(Fig. 6b). SO_4 이온은 해수에서 공급되거나 황화광물의 산화 및 용해로부터 주로 기원된다. 해수형 온천수의 SO_4 가 부화된 것은 해수의 혼합에 의한 것으로 보인다.

온천수의 F 함량은 0.38~12.4 mg/L의 범위로 일부 해수형 온천수(HD2, DR2)를 제외한 대부분의 온천수에서 높은 불소의 함량을 보인다. 온천수내 불소의 기원은 형석(CaF_2)의 용해와 운모류, 각섬석류, 인회석($\text{Ca}_5(\text{Cl}, \text{F}, \text{OH})(\text{PO}_4)_3$) 등의 OH^- 치환한 불소의 용해에 기인한다(Hem, 1985). 연구지역 온천은 대부분 화강암을 모암으로 하기 때문에 온천수내 F 공급은 운모류의 OH^- 기를 치환한 F^- 성분의 용해가 주요 기원으로 해석된다(Apambire, 1997). 지하수보다 높은 온도조건의 심부암반에서 오랜 물-암석 상호반응의 결과로 불소의 함량이 높은 것으로 보인다.

온천수내 NO_3^- 성분은 0.0~2.3 mg/L의 범위를 보여 인위적 오염에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다. 연구지역의 온천공은 위락시설지역에서 수년에서 수십 년간 개발 이용되어 왔지만 주변의 인위적인 오염원으로부터 대수층이 잘 격리되어 있음을 지시한다.

Fig. 2에서는 온천수의 pH와 주요 이온과의 관계를 도시하였다. pH의 증가와 함께 Ca + Mg의 함량은 뚜렷이 탄산온천을 제외하고는 대부분의 온천수가 반비례적 관계를 보이며, Na + K 함량의 경우에는 알카리성 온천은 증가하는 경향을 보이지만 해수형 온천의 경우에는 감소하는 경향을 보인다. $\text{SO}_4 + \text{Cl}$ 함량은 pH와 대체적으로 반

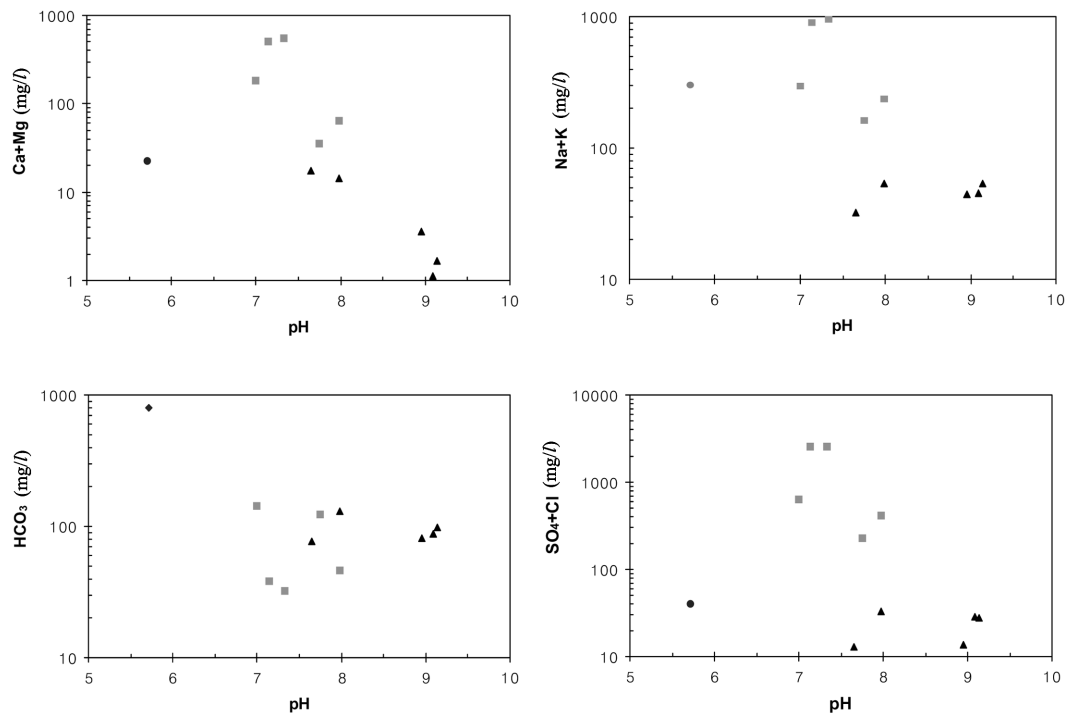


Fig. 2. Diagram showing the relationship between major ions (Ca + Mg, Na + K, HCO₃, SO₄ + Cl) contents and pH variation of the hot spring water samples in the study area.

비례적인 관계를 보이고, HCO₃ 함량은 뚜렷한 경향을 보이지 않는다. 온천수의 pH 상승은 화강암과 편마암과 같은 결정질암에서 지하수의 진화의 결과로 알려져 있다(정찬호, 1997). 따라서 온천수의 pH상승에 따른 Ca + Mg 함량의 감소와 알칼리성 온천수에서의 Na + K함량의 증가는 온천수의 진화에 따라 진행되는 지하수의 유형변화를 반영한다고 볼 수 있다. 즉, 정찬호(1997)에 의하면 열역학적 물-암석 반응 프로그램인 EQ3/6를 이용하여 화강편마암에서의 지하수의 진화과정을 모델링한바, 지하수는 물-암석 반응의 진행에 따라 Ca, Mg의 성분은 이차광물의 생성에 소모되고, 비반응성 원소인 Na성분이 지속적으로 농축되어 지하수의 유형이 Ca-HCO₃에서 Na-HCO₃의 유형으로 전이되는 제시한바 있다.

4.3. 미량원소

온천수내 풍부한 미량원소는 Li, Al, Rb, Mn, Fe 등이다. 온천수내 Li 농도는 40.7~282 ppb의 범위를 보인다. 오색탄산온천수의 Li 농도가 282 ppb로 가장 높은 농도값을 보여주며, 알칼리 온천수와 해수형 온천수는 각각 평균 76 ppb, 165 ppb이다. 온천수와 온천 주변지역 지하수내 Al 농도는 각각 0.7~760 ppb 0~0.7 ppb의 범위를 보인다. 오색탄산온천수에서 760 ppb로 가장 높은 값을 보

이며, 알칼리 온천수에서는 평균 37.8 ppb, 해수형 온천수에서는 평균 3.6 ppb이다. 온천수의 Rb 농도는 2.2~230 ppb의 범위로 오색탄산온천수는 157 ppb, 알칼리 온천수는 평균 5.6 ppb, 해수형 온천수는 평균 107 ppb를 보인다. 온천수내 Mn의 함량은 오색탄산온천수와 알칼리온천수에서 565 ppb, 283 ppb의 농도를 각각 보여 비교적 높은 함량을 보인다. 그리고 해운대온천수인 HD2, HD3 시료에서 약간 높은 75 ppb와 32.7 ppb의 농도를 각각 보인다. 그 외 온천수에서는 매우 낮은 함량을 보인다. Fe 농도는 4.3~10,254 ppb 범위로 오색탄산온천수에서 Fe 농도가 가장 높은 값을 보인다. 알칼리 온천수와 해수형 온천수에서의 Fe의 농도는 각각 평균 60 ppb과 981 ppb를 보인다. 이들의 미량원소의 함량은 온천유형에 따라서 차이를 보인다.

4.4 수리화학유형

온천수의 수리화학적 유형을 파악하기 위해 주요 화학성분을 파이퍼도(Piper, 1944)에 도시하였다(Fig. 3). 파이퍼도상에서 온천수의 화학적 유형은 Na-HCO₃형과 Na-Cl형으로 구분되었다. Na-HCO₃ 유형에는 OS, CS, DU, BA 온천수 시료가 속하고, HD, DR 온천수는 Na-Cl 유형에 속한다. 고용권 외(2003)에 의하면 동래온천수의 Cl

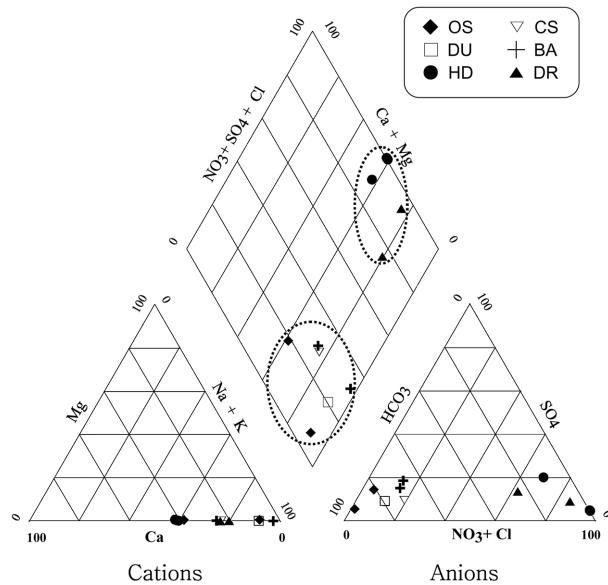


Fig. 3. Trilinear plot showing chemical composition of hot spring water samples collected in the study area.

함량과 Ca, SO₄, Br 등이 Cl 함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주며, 특히 Cl과 함께 해수 혼합의 지시자로 이용되는 Br과 Cl과의 상관관계는 해수 혼합선상에 동래온천수가 도시되고 있어, 동래온천수의 높은 염분 함량은 해수로부터 유래되었음을 명확하게 보여주고 있다.

5. 안정동위원소 및 삼중수소

연구지역 온천수의 동위원소 분석결과 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 $-11.7 \sim -7.8\text{‰}$ 의 범위를 보이고, δD 값은 $-86.4 \sim -57.3\text{‰}$ 의 범위를 보인다(Table 2). 온천수의 산소 및 수소동위원소 조성은 순환수선(Craig, 1961)에서 크게 벗어나지 않고 주변에 도시된다(Fig. 4). 온천수의 동위원소 조성은 위도효과를 반영해 주고 있다. 한반도 동남부의 해운대 온천은 $\delta^{18}\text{O} = -7.8\text{‰}$ 과 $\delta\text{D} = -57.1\text{‰}$ 의 값을 보이고, 동북부의 오색 온천은 $\delta^{18}\text{O} = -11.7\text{‰}$ 과 $\delta\text{D} = -86.4\text{‰}$ 의 조성을 보여 위도의 차이가 1.5°로 이에 따른 산소동위원소는 3.9‰, 수소동위원소는 29.3‰의 차이를 보이는 위도효과(latitude effect)를 반영하고 있다.

삼중수소(³H, Tritium)는 12.43년의 반감기를 가지는 방사성동위원소로 지하수의 연대측정에 많이 이용되고 있다(고용권 등, 1999b). 본 연구에서는 해수형 온천인 해운대 온천과 동래온천 시료에 대해서만 삼중수소를 분석하였다. 분석결과는 Table 2에 정리하였다. 분석결과를 보면 HD1, HD2, DR1 온천수의 삼중수소 함량은 0.00~0.33 TU 범

Table 2. Tritium level and hydrogen and oxygen isotopic compositions of hot spring waters in the study area

Sample No.	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW, ‰)	δD (V-SMOW, ‰)	d-parameter	Tritium (TU)
OS1	-11.7	-86.4	7.2	—
OS2	-11.4	-80.7	10.5	—
CS1	—	—	—	—
DU1	-10.3	-72.0	10.4	—
BA1	-10.2	-70.5	11.1	—
BA3	-10.3	-72.9	9.5	—
HD1	-7.9	-57.3	5.9	0.28
HD2	-7.9	-58.7	4.5	0.00
HD3	-7.8	-57.1	5.3	8.85
DR1	-8.2	-61.2	4.4	0.33
DR2	-7.8	-58.5	3.9	5.91

— : not measured

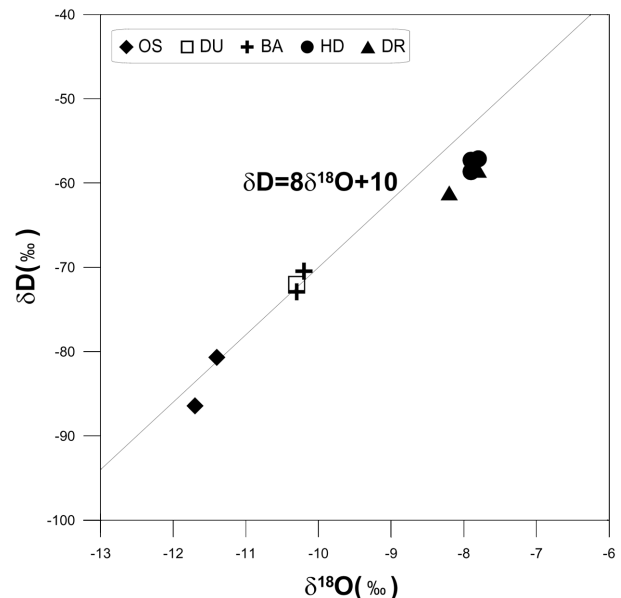


Fig. 4. Plots for $\delta^{18}\text{O}$ and δD of hot spring water samples in the study area. Abbreviations are the same as in Fig. 3.

위로 고용권 등(1999b)에 의해 제시된 우리나라 연도별 강수 중 삼중수소 농도의 변화를 고려하면 지하로 함양된 후 최소 약 50년 이상 체류시간을 갖는 것으로 해석된다. 반면 HD3와 DR2의 온천수의 삼중수소 함량은 각각 5.91, 8.85 TU의 높은 함량을 나타내어 체류시간이 오래 되지 않은 젊은 연령의 온천수임을 지시한다.

6. 영족기체 동위원소

대기, 지구표층, 지구내부에 존재하는 휘발성원소의 물

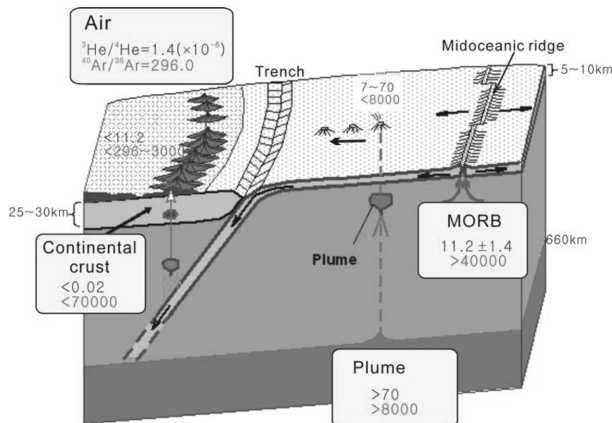


Fig. 5. Schematic diagram showing helium and argon isotopic ratios in the different geological settings of Earth system (Sumino, 2002). MORB : abbreviation of Mid Oceanic Ridge Basalt.

질 순화과정 연구에서 비활성기체인 영족기체(noble gas)는 유력한 추적자(tracer)의 역할을 하고 있다(Aka et al., 2000). 비활성기체, 특히 헬륨 동위원소비($^3\text{He}/^4\text{He}$)가 대기와 지각중의 값과 큰 차이가 있으므로 헬륨 동위원소비를 측정함에 따라 맨틀로부터 지구표층부로 나오는 휘발성 원소의 이동과정을 추적할 수 있다. 대기, 지각, 맨틀 등 다양한 지구조 환경에서 상이한 헬륨, 아르곤 동위원소비를 보여준다(Fig. 5).

한반도 주변 태평양 및 필리핀 해·지각판이 일본열도 아래로 섭입하는 것으로 이 섭입의 깊이가 100 km를 넘는 곳에 화산 열선(Volcanic front)이라 불리는 화산열이 형성되어 있다. 일본열도의 화산·온천 활동은 이 화산열선보다 깊은 곳에 호상열도에서 일어나고 있으며, 맨틀로부터 용출되어 나오는 영족기체 및 질소, 탄산가스 등 화산가스와 더불어 온천가스 속에서 검출되고 있다. 상부맨틀 기원 헬륨(MORB형)은 화산 열선으로부터 호상열도에 걸쳐 용출되고 있으며 특히 화산활동이 활발한 지역에 현저히 나타난다.

이에 반해 화산열선으로부터 지각판이 섭입해 들어가는 해구쪽의 비화산지역이나 대륙지역에서는 맨틀기원 영족기체의 용출은 잘 나타나지 않고 헬륨 동위원소비($^3\text{He}/^4\text{He}$)는 맨틀 헬륨에 비해 낮은 수치를 나타낸다. 이는 지각속에 축적되어 있는 우라늄, 토륨의 α 붕괴에 의한 방사성 ^4He 이 심부 맨틀로부터의 헬륨비에 비하여 많이 용출되고 있는 것을 의미한다. 이와 같이 헬륨 동위원소비는 판의 섭입 깊이, 화산활동과 명료한 관련이 있으며 맨틀과 지각으로부터 지표에 방출되는 휘발성 원소의 경향을 알아내는 중요한 지표에 해당된다.

지금까지의 일본 열도에 걸친 영족기체 자료는 호상열도에 따른 연구로서 지각 판의 깊이가 거의 같은 곳으로 지각 판의 깊이가 크게 다른 동해와 한반도에 걸친 영족기체 동위원소 자료는 한반도 남쪽에 위치한 제주도의 화산암을 제외하고는 아직 없다.

헬륨가스 동위원소 연구의 목표 중 하나는 판이 깊어짐에 있어서 영족기체의 동위원소 분포를 조사하여, 맨틀과 지각으로부터의 휘발성 원소의 용출이 판의 깊이와 어떤 관련이 있는가를 알아보는 데 있다. 한반도 지각 판의 깊이 존재 여부가 잘 알려져 있지 않지만 태평양 판이 심부까지 도달되어 있을 가능성이 있다. 한반도로부터 약 100 km 남쪽에 위치한 제주도 화산을 포함하여 현재 활동하고 있는 화산이 없으며 지열활동도 나타나지 않지만, 심부기원 물질이 용출될 가능성이 있는 온천과 화산가스를 포함한 용천수가 있으며, 제 4기 화산활동이라고 여겨지는 용암이 존재하므로 강렬하지는 않았지만 화산활동이 있었음을 시사하고 있다.

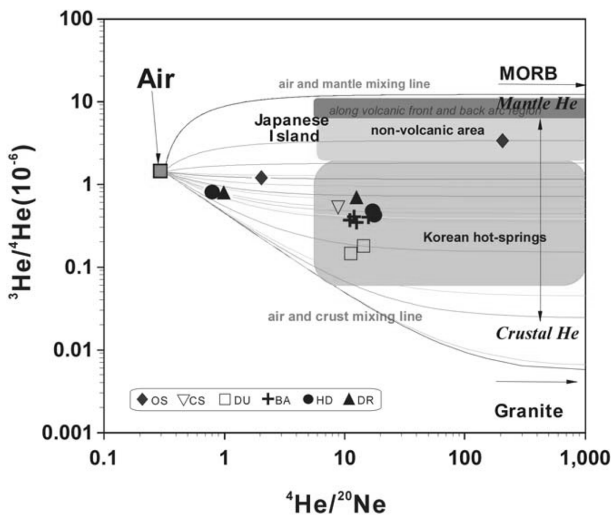
두 번째 목표로 온천수에 용존하는 영족기체의 동위원소 조성을 조사하여 온천수의 진화특성과 열원에 대한 정보를 얻는데 있다. 헬륨가스의 기원지로 대기, 지각, 맨틀 3곳의 단성분의 동위원소 조성을 가정한 모델계산을 통하여 이번 연구에서 채취된 온천수내 헬륨 동위원소 값을 Table 3에서 정리되었다. Fig. 6에서는 He의 3가지 기원 대기, 상부맨틀, 지각에 대한 기준값(end member value)을 보여준다. 대기-맨틀 혼합선은 대기기원 He, Ne과 상부맨틀기원($^3\text{He}/^4\text{He} = 11 \times 10^{-6}$ with $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} > 10000$) 사이에 혼합에 대한 동위원소비의 특성을 나타낸다. 반면에 대기-지각 혼합선은 대기와 지각기원($^3\text{He}/^4\text{He} = 5 \times 10^{-9}$, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} > 10000$) 사이에 혼합의 정도를 나타낸다.

온천가스에 대한 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비는 0.146×10^{-6} (시료 DU2)에서 3.310×10^{-6} (시료 OS1)까지 넓은 범위를 보여준다(Fig. 6). 대부분의 온천수 내 가스의 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비는 대기 기원인 1.4×10^{-6} 값보다 낮은 값을 보인다. 이는 지각암 석기원의 방사선 ^4He 이 온천수로의 유입이 우세하였음을 지시한다. $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 비는 지구내부로부터 He 농도에 대한 대기기원 He의 혼합의 정도를 지시하는 지시자로 간주된다. 모든 자료는 두 단성분의 혼합선(맨틀-대기, 지각-대기) 사이에 도시된다(Fig. 6). 이는 온천수의 He, Ne 동위원소가 3개의 단성분 사이에 혼합되어 있음을 의미한다.

헬륨 동위원소 중 ^4He 은 대기기원 He의 기여가 비교적 큰 시료를 제외하고는 80% 이상이 지각기원 암석으로부터 유래한 것을 알 수 있다. 그러나 지각 물질 중의 존재도가 극히 적은 ^3He 의 경우에는 ^3He 의 90% 이상이

Table 3. Noble gas isotope data of hot spring water samples in the study area

Sample	type	$^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$ (e^{-6})	$\text{e}^{-3/4}$	$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	$\text{e}^{-20/22}$	$^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	$\text{e}^{-21/22}$	$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$\text{e}^{-38/36}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$\text{e}^{-40/36}$
OS1	Gas	205.	3.317	0.051	9.784	0.029	0.02937	0.00092	0.18802	0.00059	309.5	0.31
OS2	Water	2.04	1.183	0.022	9.750	0.029	0.02910	0.00090	0.18826	0.00058	296.78	0.32
CS1	Water	8.87	0.530	0.012	9.703	0.029	0.02903	0.00090	0.18848	0.00065	297.56	0.40
DU1	Water	14.4	0.178	0.017	9.717	0.030	0.02907	0.00090	0.18769	0.00056	297.96	0.27
DU2	Water	11.3	0.146	0.005	9.678	0.030	0.02903	0.00090	0.18837	0.00059	298.06	0.24
BA1	Water	15.8	0.399	0.013	9.761	0.029	0.02911	0.00090	0.18781	0.00066	296.16	0.26
BA2	Water	12.3	0.340	0.031	9.600	0.029	0.02906	0.00090	0.18847	0.00057	297.09	0.38
BA3	Water	11.3	0.369	0.008	9.748	0.029	0.02905	0.00090	0.18813	0.00054	296.02	0.25
BA4	Water	12.1	0.39	0.012	9.791	0.029	0.02914	0.0009	0.18787	0.00055	295.49	0.35
HD1	Water	17.2	0.458	0.142	9.715	0.029	0.02902	0.00090	0.18835	0.00058	297.39	0.27
HD2	Water	17.7	0.423	0.019	9.540	0.029	0.02898	0.00090	0.18815	0.00061	297.62	0.28
HD3	Water	0.795	0.793	0.016	9.725	0.030	0.02937	0.00093	0.18797	0.00063	296.12	0.27
DR1	Water	12.7	0.656	0.014	9.689	0.030	0.02902	0.00090	0.18751	0.00067	297.60	0.40
DR2	Water	0.99	0.766	0.014	9.734	0.029	0.02907	0.00090	0.18830	0.00071	296.77	0.30

**Fig. 6.** He and Ne isotopic ratios of the hot spring waters and gases collected from hot springs in the study area.

상부맨틀로부터 공급된 것이다. 일본열도의 온천 자료와 비교하면 헬륨 동위원소비가 상대적으로 낮지만, 많은 시료가 의미하는 것처럼 맨틀기원의 헬륨이 온천수에 공급되어 있는 것을 알 수 있다. Ne, Ar 등의 동위원소 조성을 함께 고려해 보면 이와 같은 온천수의 대부분이 대기와 차단된 상태에서 지하 깊은 곳에서 저류층의 암석으로부터 발생한 영족기체가스를 함유하고 있다. 방사성 ^4He 가 이 풍부한 온천수와는 달리, 오색탄산온천에서는 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비가 대기기원의 He 동위원소비의 2.4배 이상 높은 값인 3.3×10^{-6} 을 보여준다. 높은 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비는 맨틀기원의 ^3He 의 공급이 큰 것을 의미한다. 이와 같이 맨틀기원의

He 공급이 큰 특성은 일반적으로 화산활동이 활발한 지역에서 관찰되는 것이다. 그러나 이 지역은 화강암과 편마암을 기반암으로 하는 지역으로 화산활동에 대한 어떠한 증거도 없는 지역이다. 이 온천지역은 단층과 지질경계 등의 지질구조선을 따라 지하 심부의 맨틀기원의 가스가 지표상으로 공급되는 것으로 보인다. 탄산가스 농도가 높은 오색탄산온천에서 검출된 고농도의 맨틀기원 헬륨은 지금까지 탄소동위원소에 의해서만 제시된 탄산수 내 이산화탄소의 기원이 맨틀과 같은 심부에서 기원하였음을 뒷받침 할 수 있는 중요한 자료이다. 이와 같이 온천수 내 영족기체의 동위원소비 분석을 통하여 맨틀기원의 헬륨가스가 온천수에 용해되어 있다는 사실은 국내에서 확인되었다. 비록 대부분의 시료에서 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비가 대기기원보다 낮은 값을 보이지만 이들은 대기-지각 혼합선보다 상위에 분포한다. 이는 온천수 내 맨틀기원의 He 가스가 부분적으로 존재하고 있음을 의미한다. 국내 온천수에 대한 노블가스 동위원소 분석자료는 정찬호등(2007)에 의해 발표된 호남지역 온천수에 대한 자료로 동해안 온천수에서의 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비 보다 다소 낮은 값을 보이는 것이 특징이며, 대부분의 온천수에서 헬륨가스의 기원이 지각기원으로 밝혀진바 있다. 호남지역 온천수는 대부분 30°C 미만의 저온형 온천으로 동해안 온천보다 수온이 낮으며 헬륨 및 네온가스의 기원에서 차이를 보이는바 온천열원과 헬륨가스 기원과의 상관관계는 보다 많은 온천수 자료가 완성되면 시도해볼 만한 가치가 있을 것으로 판단된다.

연구지역의 온천수의 헬륨 동위원소비와 아르곤 동위원소비($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$)는 Fig. 7에 도시되었다. 온천수내 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$

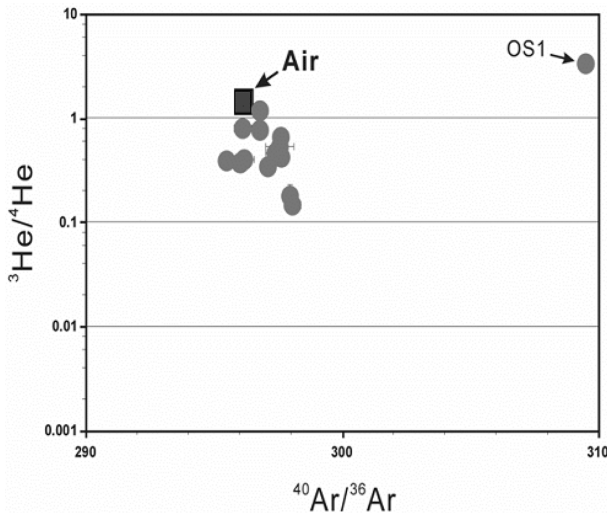


Fig. 7. Diagram showing the relative ratio of argon isotopic compositions of hot spring waters in the study area.

^{36}Ar 동위원소비는 295.5×10^{-6} (시료 OS1)에서 309.5×10^{-6} (BA4 시료)까지로 대기기원의 값과 매우 유사하다. 대기기원 Ar에 대한 방사성 ^{40}Ar 의 소량 공급과 동위원소 분별화작용 등의 작은 영향이 관찰된다. 온천 시료에서 ^{40}Ar 초과분은 아마도 K이 풍부한 화강암에서 기원한 것으로 해석된다.

7. 결 론

한반도 동해안 일대의 6개의 온천지역에서 11개의 온천 수시료와, 14개의 온천가스시료에 대한 화학성분, 안정동위원소비, 영축기체 동위원소비 분석에 대한 연구결과는 다음과 같다.

(1) 한반도 동해안 지역에 분포하는 온천의 온천수는 pH 7.0~9.1 범위의 약알칼리성 내지 알칼리성이며 오색탄산온천수는 pH 5.71의 약산성의 특성을 보인다. 온천수의 온도는 22.7~68.3°C 범위이다. 온천수의 전기전도도는 202~7,130 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 넓은 범위가 나타나며 해수형 온천수의 평균 전기전도도는 3,890 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 높은 값을 보인다. 온천수의 화학적 유형은 $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 형인 오색, 척산, 백암, 덕구온천과 $\text{Na}-\text{Cl}$ 형인 해운대와 동래온천으로 구분된다. 온천수의 용존 이온(K, Ca, Na, F 등)은 모암인 화강암에서 유래된 것으로 해석되며 동래와 해운대 온천수는 해수혼입 영향이 현저하게 나타나고 있다.

(2) 온천수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 dD값은 각각 $-7.8 \sim -11.7\%$ 과 $-57.3 \sim -86.4\%$ 의 범위로 순환수선에도시되고 있다. 또한 위도가 높아질수록 낮은 동위원소 조성 값을 보이는 위도

효과가 현저하게 나타나고 있다.

(3) 해운대와 동래온천수의 삼중수소 값은 0.0~0.3 TU와 5.9~8.8 TU의 두 그룹이 확인되어 이 지역 온천수의 대재시간이 다른 두시기의 물이 존재함이 확인되었다.

(4) 온천가스의 영축기체 동위원소비 분석 결과 오색탄산온천을 제외한 온천에서 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 동위원소비는 $0.1 \times 10^{-6} \sim 1.1 \times 10^{-6}$ 범위를 보인다. 대부분 온천수의 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 동위원소비는 대기의 1.4×10^{-6} 값보다 낮은 값을 보이지만 대기-지각 혼합선보다 상위에 분포한다. 이는 온천수 내 맨틀기원의 He 가스가 부분적으로 존재하고 있음을 의미한다. 오색탄산온천에서는 대기기원 He 동위원소비의 2.4배 높은 값인 3.3×10^{-6} 을 보여준다. 이는 지하 심부의 맨틀기원의 헬륨가스 기원으로 해석된다. 온천수의 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비는 대기의 동위원소비 296보다 약간 높거나 유사함을 보인다. 비록 오색탄산온천의 경우 상대적으로 다른 온천에 비해 다소 높은 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비를 보이지만 대기기원의 영역에 속한다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구 과제번호R01-2004-000-10759-0과 과학재단 한일공동연구 과제번호F01-2004-000-10189-0의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사한다.

참 고 문 헌

- 고용권, 윤성택, 김천수, 최현수, 김건영, 1999a, 중원지역 탄산수의 지구화학적 진화, 자원환경지질, 32, 469-483.
- 고용권, 배대석, 김천수, 김건영, 1999b, 포항 및 대전지역 강수의 삼중수소 함량, 지하수환경, 6, 126-132.
- 고용권, 김천수, 배대석, 이동익, 2000, 문경지역 심부지하수의 수리화학 및 환경동위원소 연구, 자원환경지질, 33(6), 469-489.
- 고용권, 김성용, 김천수, 김건영, 최현수, 2001a, 부곡지열수의 지화학적 진화과정, 대한지질학회지, 한국지질학회, 한국지구물리탐사학회, 대한지질학회 춘계공동학술발표회 논문집.
- 고용권, 윤성택, 김천수, 배대석, 박성숙, 2001b, 부곡 지열수의 심부환경과 지화학적 진화: 유황형 지열수의 생성과정 재해석, 자원환경지질, 34(4), 329-343.
- 고용권, 김건영, 김천수, 배대석, 성규열, 2003, 부산 동래온천수의 심부환경, 2003년 한국지하수도환경 추계학술발표회, 한국지하수도환경학회, p. 583-586.
- 김건영, 고용권, 최현수, 김천수, 배대석, 2000, 중원지역 탄산온천수의 탄산염 침전물에 관한 광물학적 지구화학적연구, 한국광

물학, **13**(1), 22-36.

김옥준, 홍만섭, 원종관, 박희인, 박양대, 김기태, 1999, 평해리도 폭, 한국지질자원연구원 국가지질자원정보센터.

배대석, 최현수, 고용권, 박맹언, 정을필, 2000, 문경지역 탄산온천수의 지구화학적 및 동위원소적 특성연구, 한국지하수토양환경학회 2000년 추계학술대회, 한국지하수토양환경학회, p. 87-90.

성규열, 박맹언, 고용권, 김천수, 2001, 부산지역 지열수의 기원과 진화: I. 가열된 해수-암수와 지하수의 혼입에 따른 희석과 냉각, 자원환경지질, **34**(5), 447-460.

손치무, 이상만, 김상욱, 김형식, 1999, 동래도폭, 한국지질자원연구원 국가지질자원 정보센터.

심형수, 함세영, 성익환, 이병대, 조병욱, 황진연, 2000, 부산 해운대지역 지하수와 지열수의 수리화학적 특성, 환경과학, **9**(3), 241-252.

정지곤, 서만철, 김경수, 황영중, 1997, 유성온천지역의 지질구조 및 지온분포 연구, 지질공학, **7**(3), 173-189.

정찬호, 김천수, 김동권, 김수진, 1997, 편마암-물 반응계에서 지하수의 지화학적 진화 및 이차광물 생성에 관한 반응경로 모델링, 한국광물학회지, **10**(1), 33-44.

정찬호, 허현성, K. Nagao, 김규한, 2007, 호남지역 저온형 온천수의 수리지구화학적 및 안정동위원소 특성과 영죽기체의 기원에 관한 연구 자원환경지질, **40**(5), 635-649.

장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1999, 부산도폭, 한국지질자원연구원 국가 지질자원정보센터.

Aka, F.T., Kusakabe, M., Nagao, K., and Tanyileke, G., 2000, Noble gas isotopic compositions and water/gas chemistry of soda springs from the islands of Bioko, So Tom and Annobon, along with Cameroon Volcanic Line, West Africa, *App. Geochem.*, **16**, 323-338.

Apambire, W.B., Boyle, D.R., and Michel, F.A., 1997, Geochemistry, genesis, and health implications of fluoriferous groundwaters in the upper regions of Ghana, *Environ. Geol.*, **33**, 13-24.

Calf, G.E., Seatonberry, B.W., Smith, L.W., 1976, The measurement of natural levels of tritium in water, Australian Atomic Energy Commission, AAEC/E373, 26.

Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric water, *Science*, **133**, 1702-1703.

Hem, J.D., 1985, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, U.S. Geological Survey water supply paper 2254, 263.

Kusakabe, M., Ohwada, M., Satake, H., Nagao, K., and Kawasaki, I., 2003, Helium isotope ratios and geochemistry of volcanic fluids from the Norikura Volcanic Chain, central Japan: Implications for crustal structures and seismicity, *Economic Geologists*, **10**, 75-89.

Matsuda, J., Amari, S., and Nagao, K., 1999, Purely physical

separation of a small fraction of the Allende meteorite highly enriched in noble gases, *Meteoritics and Planet. Sci.*, **34**, 129-136.

Nagao, K., Okazaki, R., Sawada, S., and Nakamura, N., 1999, Noble gases and K-Ar ages of five Rumuruti chondrites Yamato(Y)-75302, Y-791827, Y-793575, Y-82002, and Asuka-881988, *Antarct. Meteorite Res.*, **12**, 81-93.

Nahm, G.Y., 1970, The Tectonics in Korean peninsula shown on the 1/250,000 scale relief maps, *The Journal of Geological Society of Korea*, **6**(1), 53-60.

Nakamura, T., Nagao, K., Metzler, K., and Takaoka, N., 1999a, Heterogeneous distribution of solar and cosmogenic noble gases in CM chondrites and implications for the formation of CM parent bodies, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**, 257-273.

Nakamura, T., Nagao, K., and Takaoka, N., 1999b, Microdistribution of primordial noble gases in CM chondrites determined by in situ laser microprobe analysis: Decipherment of nebular processes, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**, 241-255.

Nordstrom, D.K., Ball, J.W., Donahoe, R.J., and Whittemore, D., 1989, Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**, 1727-1740.

Okazaki, R., Takaoka, N., Nakamura, T., and Nagao, K., 2000, Cosmic-ray exposure ages of enstatite chondrites, *Antarctic Meteorite Res.*, **13**, 153-169.

Okazaki, R., Takaoka, N., Nagao, K., Sekiya, M., and Nakamura, T., 2001, Noble-gas-rich chondrules in an enstatite chondrite, *Nature*, **412**, 795-798.

Osawa, T., Nagao, K., Nakamura, T., and Takaoka, N., 2000, Noble gas measurement in individual micrometeorites using laser gas-extraction system, *Antarctic Meteorite Res.*, **13**, 322-341.

Osawa, T. and Nagao, K., 2002a, On low noble gas concentrations in Antarctic micrometeorites collected from Kuwagata Nunatak in the Yamato meteorite ice field, *Antarct. Meteorite Res.*, **15**, 165-177.

Osawa, T. and Nagao, K., 2002b, Noble gas compositions of Antarctic micrometeorites collected at the Dome Fuji Station in 1996 and 1997, *Meteorit. Planet. Sci.*, **37**, 911-936.

Piper, A.M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses, *Transactions of American Geophysical Union*, **29**, 413-421.

Sumino, H., 2000, Origin of alkali basalt volcanism in ferred from noble gas isotopic systematics: Implications for mantle dynamics in back arc region of subduction zone, PhD dissertation, University of Tokyo, Japan, p. 185.

Yun, S.T., Koh, Y.K., Kim, C.S., So, C.S., 1998, Geochemistry of Geothermal Waters in Korea: Environmental Isotope and Hydrochemical Characteristics I, Bugok Area, *Econ. Environ. Geol.* **31**(3), 185-199.