The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169
Vol. 31, No. 4, December, 2021, pp. 647-658
https://doi.org/10.9720/kseg.2021.4.647

RESEARCH ARTICLE

포항 지열수의 지진에 의한 수온, 화학성분 및 헬륨가스의 변화

이용천[1] · 정찬호[2*] · 이유진[1*] · 김영석[3] · 강태섭[3]

[1]대전대학교 건설안전공학과 박사과정, [2]대전대학교 건설안전공학과 교수, [3]부경대학교 지구환경과학과 교수

Variations of Temperature, Chemical Component and Helium Gas of Geothermal Water by Earthquake Events in Pohang Area

Yong Cheon Lee[1] · Chan Ho Jeong[2*] · Yu Jin Lee[1*] · Young-Seog Kim[3] · Tae-Seob Kang[3]

[1]Ph.D. Student, Department of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University
[2]Professor, Department of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University
[3]Professor, Department of Geological Environmental, Pukyong National University

Abstract

In this study, the change of temperature, chemical composition, and helium gas of thermal water in Pohang area was observed from January 2018 to June 2019 in order to interpret the relationship with earthquake events. During observation period earthquakes above M 2.0 within 100 km in a radius from a geothermal well occurred 58 including two earthquake events with a magnitude of 3.0~3.9 and two earthquake events with a magnitude of 4.0~4.9. We introduce a q-factor and earthquake effectiveness (ε) to express the influence of each earthquake as magnitude and distance factors. The geothermal well of 715 m deep was developed in the Bulguksa biotite granite, and the water temperature was observed in the variation from 51.8 to 56.3°C during monitoring period. At M 4.1 and M 4.6 earthquake events, the increase of geothermal water temperature (ΔT 2.6~4.5°C) was recorded, and slight change in specific ionic components such as SO_4 and Cl, and of chemical types on the Piper diagram were observed. In the $^3He/^4He$ vs $^4He/^{20}Ne$ diagram, the original mixing ratio of helium isotope before and after the magnitude 4.1 earthquake was slightly changed from 83.0% to 83.2% of crust-origin ^4He, and the from 16.3% to 16.7% of mantle-origin ^3He. Hot-cold water mixing ratio before and after earthquakes by using the quartz and chalcedony solubility curves of the silica-enthalpy mixing model was calculated to interpret the temperature change of geothermal water. The model calculation shows the increase of 6.93~7.72% and 1.65~4.94% of hot water ratio at E1 and E2 earthquakes, respectively. Conclusively, the magnitude of earthquake for observable change in the temperature and helium isotope of thermal water is of 4.1 or higher and q-factor value of 30.0 or higher in the study site.

Keywords: thermal water, water temperature, helium gas, silica-enthalpy mixing model, q-factor

초 록

본 연구는 지진발생에 따른 지열수의 수온, 화학성분, 헬륨가스 성분 변화를 알아보기 위하여 포항 신광 지역 지열수를 대상으로 2018년 1월부터 2019년 6월까지 추적 관찰하였다. 연구기간 중 지열수 관측정

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Chan Ho Jeong
E-mail: chjeong@dju.kr
***Co-corresponding author:** Yu Jin Lee
E-mail: geoabby20@naver.com

Received: 10 December, 2021
Revised: 13 December, 2021
Accepted: 14 December, 2021

Ⓒ 2021 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

100 km 이내 규모 2.0 이상 지진은 총 58회이며, 그 중 규모 3.0~3.9의 지진은 2회, 규모 4.0~4.9의 지진은 2회가 발생하였다. 지열수에 미치는 지진의 영향력을 지진규모와 진앙-지열수공 거리를 반영한 q-factor와 earthquake effectiveness(ε)값으로 변환하여 지진영향지수로 사용하였다. 지열수공은 불국사 흑운모화강암지질로 심도 715 m 온천공으로 관측기간 중 수온은 51.8~56.3°C 범위에서 변동이 확인되었으며, 규모 4.1, 4.6 지진발생 시 뚜렷한 수온 상승(⊿T 2.6~4.5°C)이 관찰되었고, SO_4, Cl과 같은 특정 이온성분의 변화와 파이퍼도 상에서의 화학적 유형의 미세한 변화가 관찰되었다. 지열수의 헬륨의 변화는 규모 4.1 지진 전후 헬륨가스의 기원별 혼합을 보여주는 $^3He/^4He$ vs. $^4He/^{20}Ne$ 관계도에서 지각 기원의 ^4He의 값이 83.0%에서 83.2%로 미세하게 증가하였고 맨틀 기원의 ^3He은 16.3%에서 16.7%으로 미세한 증가를 보였다. 지열수의 온도변화에 따른 실리카-엔탈피 혼합모델의 석영 및 칼세도니 용해도 곡선을 이용하여 지진으로 인한 열수-냉수 혼합비를 계산한 결과, E1, E2 지진발생 후 열수의 비가 각각 6.9~7.72%, 1.65~4.94% 증가하는 것으로 계산되었다. 지열수의 온도와 헬륨가스가 관측될 정도의 변화를 유발하는 지진은 규모 4.1 이상, 유효 q-factor 값은 30.0 이상으로 확인되었다.

주요어: 지열수, 수온, 헬륨가스, 지진, 실리카-엔탈피 혼합모델, q-factor

서론

2016년과 2017년에 두 차례의 9월 12일 경주지진(규모 5.4), 11월 15일 포항지진(규모 4.9)과 이와 수반된 많은 여진이 한반도에서 발생함에 따라 경제적 및 인적 피해가 발생하였다. 이에 한반도는 지진재해로부터 안전지대가 아니라는 인식과 더불어 국민들의 불안감을 해소하고 지진피해에 대한 다양한 정책을 포함한 1차 지진방재 종합대책(2016), 2차 지진방재 종합계획(2019)을 수립하였다(MPSS, 2016; MOIS, 2019). 이러한 정책과 더불어 활성단층대 연구, 지구물리 및 지진파 연구 등이 국가적 차원에서 진행되고 있다. 그러나 상대적으로 다양한 지질학적 및 지구화학적 지진전조 현상연구를 통한 중장기 및 단기 지진예측을 위한 연구는 미흡한 실정이다.

지진과 전조인자에 대한 연구는 국내에서는 일부 연구자에 한하여 수행되었다(Kim et al., 2018a, Jeong et al., 2018; Hwang et al., 2020). Kim et al.(2018a)은 경주지역 12개의 지하수 관측정의 일부 관측정에서 지하수위가 9.12 경주지진 전후로 뚜렷한 변동에 대해 보고하였다. 대전, 청원지역의 관측정에서 지하수위, Rn-222, HCO_3^-, Cl^-의 변동을 통해 지진 전조인자로서의 가능성을 제시한 바 있다(Jeong et al., 2018). 지진전조와 관련된 연구는 지진이 빈번하게 발생하는 국가에서 활발하게 수행되어왔다. 다양한 지진전조에 대한 연구로 일본, 대만, 중국, 인도에서 지하수위, 화학성분, 물 분자의 수소동위원소, 헬륨가스의 유출량 및 조성비 등의 다양한 전조인자를 대상으로 연구가 수행되었다(Cartigny et al., 2001; Kuo et al., 2006; Tsunomori and Tanaka, 2014; Ye et al., 2015; Sano et al., 2016; Skelton et al., 2016; Fu et al., 2017; Goto et al., 2017). 일본, 미국, 뉴질랜드 등에서 1997년까지 보고된 자료를 이용하여 지표변형과 지하수 변화를 포함한 19개의 전조인자로 구분하고 지진 전 이상변동이 나타나는 시각과 지진규모의 예측가능성을 평가한 바 있으며(Rikitake, 1979), 지하수 내 헬륨, 네온과 같은 노블가스와 관련된 연구로 인도의 Bakreswas 지역의 지열수에서 1991년 10월 20일 M 6.8의 Uttarkashi 지진발생 이틀전에 헬륨의 농도가 증가하는 것을 보고하였다(Ghose et al., 1996). Sano et al.(2016)은 2016년 4월 16일 M 7.3의 Kumamoto 지진발생 시 심부 지하수에서 헬륨 동위원소의 변동을 단층 모델에서 추정된 체적 변형률과 연계함으로서, 지하수 내 헬륨 동위원소가 지진이 발생하기전에 응력변화를 감지하는 새로운 모니터링 인자로서 가능성을 제시하였다.

한편 관측지점에서 지진영향을 지진의 규모와 거리의 함수로서 표기되는 Earthquake effectiveness(ε)와 q-factor로 정량화할 수 있다(Dobrovolsky et al., 1979; Miklavcic et al., 2008). 이를 적용한 연구로 9.12 경주 지진발생 시 토양 내 라돈농도의 변동에 대해 두 정량화 지수를 활용하여 지진감시로서 높은 가능성을 보고하였으며(Kim et al., 2018b), 경주 활성단층대 관측정에서 수위 변동과 Earthquake effectiveness(ε)와 q-factor에 대한 상관관계 분석을 통해 지진 감지의

가능성을 정량화하여 제시하였다(Jang et al., 2020). 지진발생 기록과 지진 전조인자의 변동에 대한 연구는 진앙과 관측지점과 거리 지진의 규모를 고려하는 q-factor, Earthquake effectiveness(ε)와 같은 인자를 통하여 지진에 의한 영향력에 대한 지수 값을 이용할 필요가 있다.

또한 지진발생에 따른 수온 변화에 대한 연구로는 러시아 캄차카 반도에서 발생한 지진으로 인하여 강유역 지하수에서 열 이상 반응을 확인하였으며, 지진에 대한 반응으로 수온, 토출량, pH 변화가 관찰되었다(Tronin et al., 2004). 중국 Yidun Litang 단층과 Litang Dewu 단층 사이에 위치한 마야 온천수는 Sichuan-Yunnan 지역에서 발생한 지진과 수온변화가 일치하였으며, 대부분 지진 전에 먼저 변화가 나타났다(Zhang, 2018). 이처럼 화산지역이나 지열수 지역에서 지진발생에 따른 유의미한 수온 변화가 확인되므로 지진전조인자로서 활용성이 높은 인자가 될 수 있다.

본 연구에서는 양산단층대에서 발생되는 지진에 의한 지열수의 수온과 헬륨가스의 변동을 관측하기 위하여 양산단층대가 발달한 포항 신광지역 심도 715 m의 지열수공을 조사공으로 선정하였다. 이 연구의 목적은 지진에 의한 지열수의 수온, 헬륨 가스의 변화를 추적하여 지진 규모와 거리의 함수인 q-factor, earthquake effectiveness(ε)로 제시되는 지진영향지수 유효한계치를 도출하고자 하였으며, 아울러 실리카-엔탈피 모델을 통해 지진전후 지열수의 온도변화에 따른 냉수와 혼합비율 산정, $^{3}He/^{4}He$의 기원적 혼합모델을 통해 지진발생에 따른 동위원소 조성 변화를 해석하는데 있다.

연구 방법

현장수질 및 화학성분 분석

포항 신광 지열수는 2018년 1월부터 2019년 6월까지 주기적으로 시료채취 및 측정하였으며, 지열수의 수소이온농도(pH), 중탄산(HCO_3) 함량 등은 현장에서 정기적으로 측정하였다. 현장수질측정은 Thermo사의 Orion A221 모델과 Orion A227 모델의 휴대용 측정기를 이용하였으며, 중탄산은 0.05 N 농도의 염산을 이용하여 산중화적정법으로 구하였다. 물 시료의 주요 이온 성분분석을 위하여 물 시료의 원수를 0.45 μm 공극의 여과지를 통과시켜 부유물질을 제거한 후 각각 60 mL씩 폴리에틸렌 용기에 담아 0~4°C 냉장 보관 상태로 보관하였다. 양이온 시료는 용존 이온이 용기에 흡착하거나 침전을 방지하고자 적정량의 농질산을 첨가하여 pH 2 이하로 유지하였다(Greenberg et al., 1992). 주요 양이온과 음이온은 한국기초과학지원연구원(Korea Basic Science Institute) 부산센터에서 유도결합플라즈마 원자발광분광기(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrophotometer)와 연소형 이온크로마토그래피 시스템(Combustion Ion Chromatograph System)으로 분석하였다.

노블가스 동위원소 분석

노블가스(He, Ne) 동위원소 분석을 위하여 구리관(Copper tube)과 클램프(Clamp)를 이용하여 채취하였다. 시료채취는 구리관 양쪽 끝에 고무호스를 연결하고 호스 클램프로 고정한 후, 배출부분을 구리관보다 높은 위치를 유지하여 약 1 L의 물을 통과시킨 후, 구리관 내 공기를 제거한 후 볼트를 이용하여 구리관을 조인 후, 클램프를 평행하게 압착방법으로 밀봉시켰다. 모든 영족기체의 절대량과 He, Ne 동위원소 비는 미국 Utah University Noblegas Lab의 모델 215-50 Magnetic Sector-Field Mass Spectrometer를 이용하여 분석하였다.

연구지역

연구지역은 경상북도 포항시 신광면 기반길 일대로 이 지역의 지질 설명은 포항 지질도폭(1:50,000)을 참조하였다(Um et al., 1964). 지질은 중생대 백악기 흑운모화강암이 주로 분포하며, 주변부에는 신라층군 적색 셰일 및 회색 사암, 불국사층군 집괴암질 석영반암이 분포하고 있다. 연구지역의 단층은 1:5만 포항 지질도폭에서 양산단층의 연장선 확인이 되지 않으나, 1:100만 지질도폭에서 양산단층대가 지열수공 남남서-북북동 방향으로 발달한 것을 확인하였다(Fig. 1).

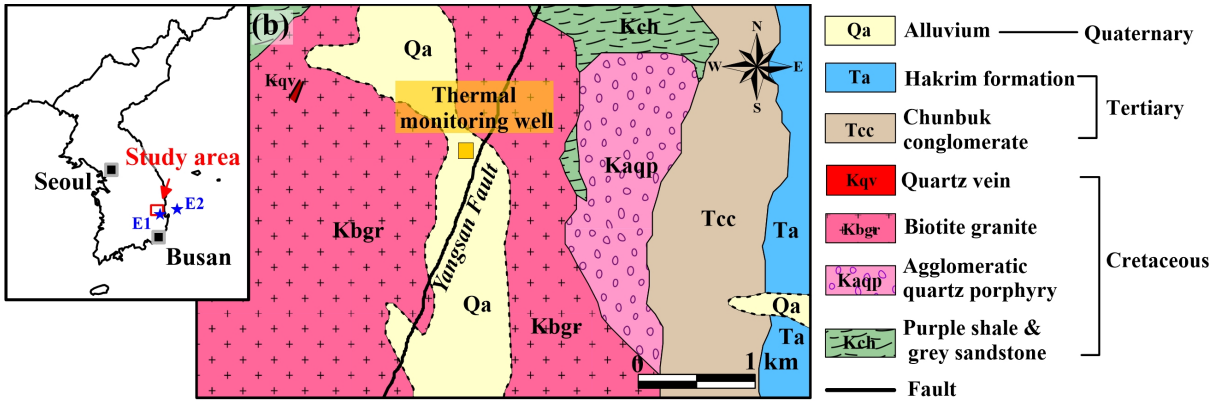

Fig. 1. Location and geologic map of study area.

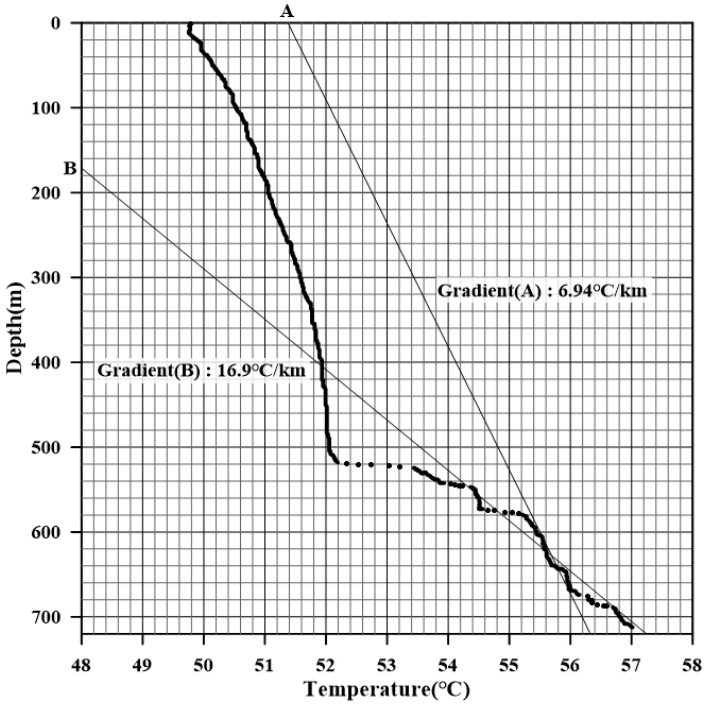

Fig. 2. Temperature logging data of the thermal well in the study area (Korea Central Hot Spring Institute, 2002).

한국중앙온천연구소의 포항 · 신광지구 한국온천조사보고서에 따르면, 지열 모니터링 관측정 내 온도는 지표면에서 49.7°C이며, 최고온도는 715 m의 공저에서 57.1°C로 확인되었다(Fig. 2). 심부에서 지표로 분출하는 과정에서 온도 손실

은 약 7°C 정도로 확인되며, 지표로부터 심도 515 m까지는 온도가 서서히 상승하고 있는데, 이는 514 m 부근에 큰 균열이 있어 대부분의 지열수가 이 구간에서 용출되는 것으로 보고하였다. 균열대는 심부의 일부 구간(540 m, 571~578 m, 640 m, 680 m)에서도 확인되었다. 또한, 지온경사는 전체구간에서 6.94°C/km이며, 550~715 m 구간에서 16.9°C/km로 높은 증온률을 보여 1,000 m까지 굴진할 경우 61.9°C정도가 될 것으로 추정되었다. 심부 550 m부터 온도가 계속 증가함에 따라 심부에 새로운 균열층이 존재할 가능성이 높은 것으로 제시하였다(Korea Central Hot Spring Institute, 2002).

결과 및 토의

지진영향지수 산정

2018년 1월에서 2019년 6월까지 포항 지열수의 반경 100 km 내에 발생한 M 2.0 이상의 지진은 58회 발생하였으며, M 3.0~3.9의 지진은 2회, M 4.0~4.9의 지진은 2회 발생하였다. 지진의 최대 규모는 2018년 2월 11일에 발생한 M 4.6 포항지진이다. 연구기간 중 발생한 지진에 의한 포항지열수 관측정에 미치는 영향지수를 규모(M)와 거리(d)의 함수로 정량화하였다. 즉, q-factor와 Earthquake effectiveness(ε)를 이용하여 산정하였다(식 (1)과 (2)).

$$q - factor = M_2 \times 100/R \quad (1)$$

$$Earthquake\ effectiveness\ (\varepsilon) = 10^{(1.3M - 8.19)} \times R^{(-3)} \quad (2)$$

여기서, M : 지진의 규모

R : 관측정과 진앙지와의 거리

연구기간 중 발생한 58회 지진에 대한 q-factor와 Earthquake effectiveness(ε)은 각각 4.07~203, 2.71×10^{-12}~5.45×10^{-6}의 범위를 보였다. 지진규모별 q-factor, Earthquake effectiveness(ε)의 최대값, 최소값, 평균값은 Table 1에 제시되었다. q-factor와 Earthquake effectiveness(ε)의 상관계수인 R^2는 0.82로 높은 정의 상관관계를 보여(Fig. 3), 본 연구에서는 값이 단순화된 q-factor를 사용하였다.

Table 1. Earthquake events within 100 km in radius from the geothermal well and q-factor and effectiveness converted from earthquake magnitude and distance

		Magnitude			
		2.0~2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	Total
Earthquake frequency		54	2	2	58
q-factor	Max.	88.8	18.0	203	203
	Min.	4.07	15.9	30.0	4.07
	Ave.	29.5	17.0	116.5	32.1
Earthquake effectiveness (ε)	Max.	4.17×10^{-08}	7.57×10^{-10}	5.45×10^{-06}	5.45×10^{-06}
	Min.	2.71×10^{-12}	4.55×10^{-10}	7.85×10^{-09}	2.71×10^{-12}
	Ave.	4.43×10^{-09}	6.06×10^{-10}	2.73×10^{-06}	9.82×10^{-08}

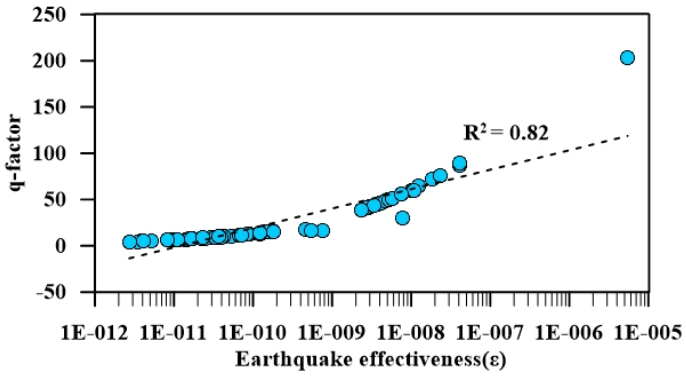

Fig. 3. Relationship between q-factor and earthquake effectiveness (ε) of converted from earthquake.

지진발생에 따른 수온 및 지화학성분의 변화

연구기간 동안 지열수의 수온변화는 최저 51.8°C에서 최고 56.3°C의 범위이며, 지열수의 뚜렷한 온도 변화는 2018년 2월 11일 M 4.6 포항지진(E1)과 2019년 2월 10일 M 4.1 포항지진(E2)이 발생하였을 때 확인되었다. E1 지진발생 전 지열수의 수온이 51.8°C에서 56.3°C로 4.5°C 상승하였으며, E2 지진발생 전 51.8°C에서 54.4°C까지 점진적으로 상승하였다가 감소하였다(Fig. 4). 규모 3.0~3.9 이상 지진이 발생하였을 때 수온의 뚜렷한 변화는 확인이 되지 않았으나, 지진발생에 따른 지열수의 수온변화는 M 4.1 이상의 지진과 q-factor 값이 30.0 이상일 때 지열수의 수온변화가 명확하게 확인된다. E1 지진발생 시 pH, SO_4^{2-}, Cl^-의 농도가 약간 증가하였으며, E2 지진발생 시 SO_4^{2-}, Cl^-의 농도가 약간 증가하였다(Fig. 5). 이는 지진발생 시 대수층의 교란 및 심부지열수의 유입 등에 대한 것으로 추측되나, 제한된 시료의 수와 지질자료로 인해 변화에 대한 명확한 증거를 제시하는데 한계가 있다.

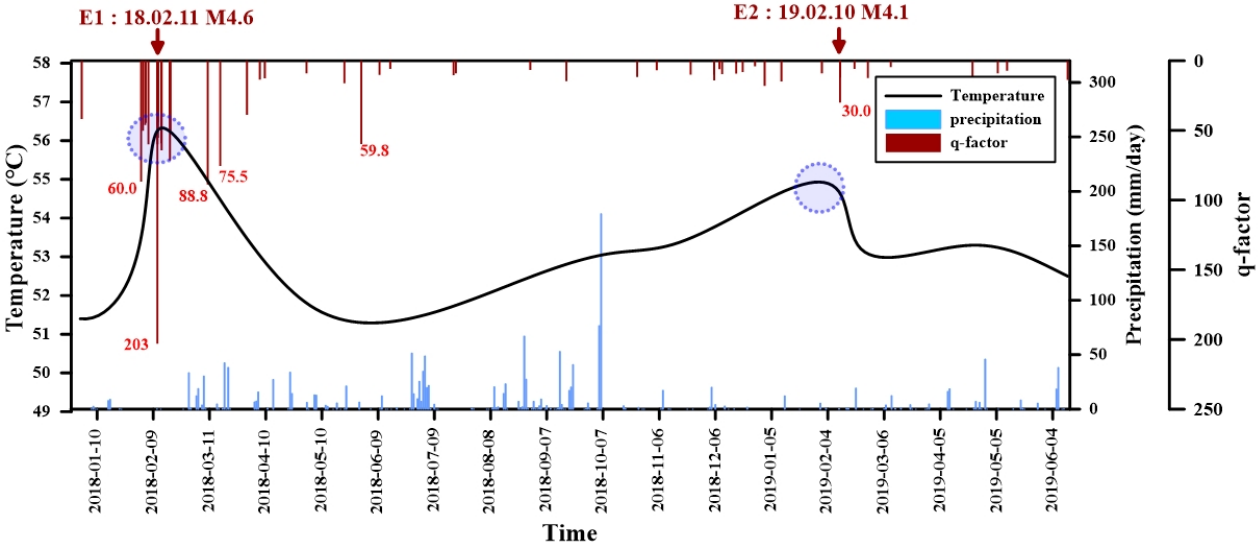

Fig. 4. Temperature fluctuation of thermal water as a function of time.

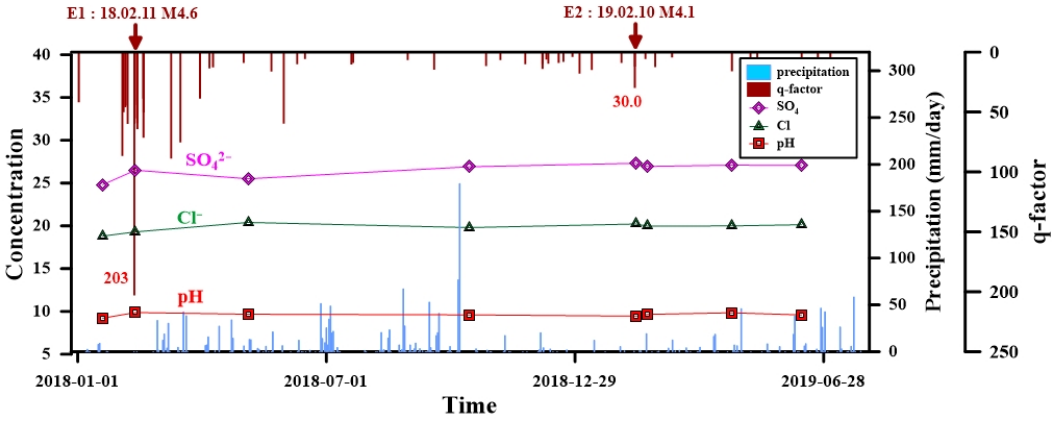

Fig. 5. The change of pH, SO42− and Cl− of thermal water as a function of time.

지진발생에 따른 수리화학 특성 변화

포항 지열수 및 인근 지하수의 수리화학적 유형을 파이퍼도(Piper, 1944)에 도시하였다. 지하수는 Na(Ca)-HCO_3 유형을 보여주며, 지열수는 pH 10.1의 알카리성 Na-HCO_3 유형으로 화강암 심부에서 물-암석 반응을 통하여 지화학적 진화의 마지막 단계 가까이 도달했음을 지시한다(Fig. 6). E1과 E2 지진발생 시 지열수의 수리화학적 유형의 미세한 변화가 확인되었다. E1 지진발생 시 지열수의 수리화학적 유형은 음이온의 변화방향으로 약간의 전이를 보이고(Fig. 6b), E2 지진의 경우 양이온의 변화방향으로 미세한 전이를 보인다(Fig. 6c).

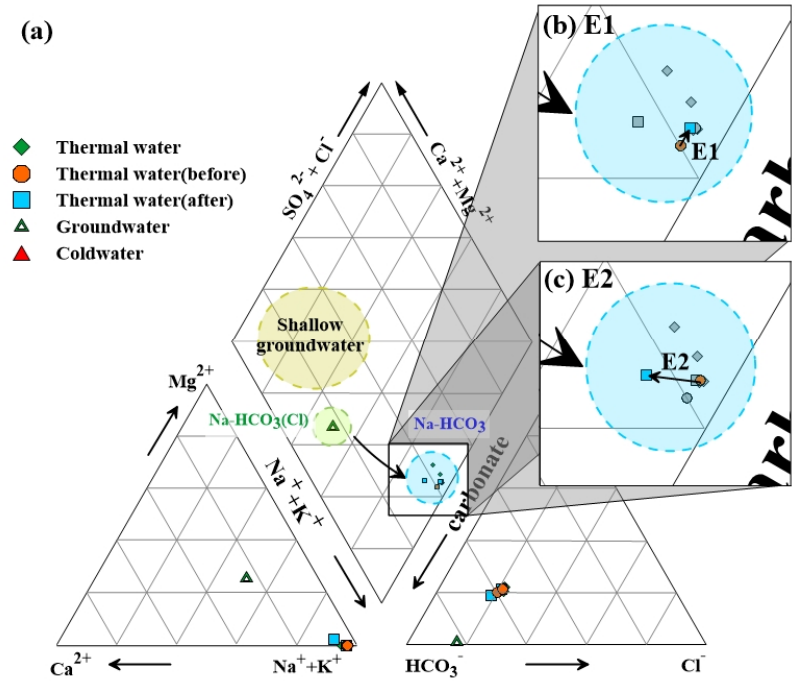

Fig. 6. Trilinear plot showing the chemical type of shallow groundwater and deep geothermal water in Pohang area.

심부 저장소 온도 추정 및 열수-냉수 혼합비

실리카-엔탈피(Silica-enthalpy) 혼합모델은 열과 실리카 평형을 근거하여 지열저장소 온도추정, 혼합된 지열수의 열수와 냉수 혼합비를 평가하는데 이용되어왔다(Henley et al., 1984; Arnórsson and Gunnlaugsson, 1985; Jeong et al., 2019). 고온형 지열저장소온도 추정에는 석영 용해도 곡선을 이용하며, 저온형 지열저장소 온도 추정에는 칼세도니 용해도 곡선을 이용하는 것으로 알려져 있다(Fournier, 1977). 포항지열수의 지열저장소 온도는 뚜렷한 수온 변화가 있는 E1 지진(2018년 2월 11일 M 4.6)과 E2 지진(2019년 2월 10일 M 4.1)을 대상으로 추정하였다. 추정된 지열저장소, 용출온도, 차가운 지표수의 온도는 Gupta and Roy(2006)에 의해 제시된 열수-냉수 혼합비 계산에 적용하였으며, 계산식은 아래와 같다:

$$\text{Mixing ratio}\ (\%) = \frac{\text{Temp.}_{(\text{reservoir})} - \text{Temp.}_{(\text{outlet})}}{\text{Temp.}_{(\text{reservoir})} - \text{Temp.}_{(\text{outlet})}} \times 100 \quad (3)$$

여기서, Temp.(reservoir) : 추정된 지열저장소 온도

Temp.(outlet) : 지열수의 토출온도

Temp.(coldwater) : 차가운 지표수의 온도

차가운 지표수는 곡강천의 연평균 온도(16.2°C)와 SiO_2(20.6 mg/L)를 사용하였으며, E1, E2 지진발생 전후의 추정된 지열수의 지열저장소 온도와 열수-냉수 혼합비율은 Table 2에 제시되어 있다. E1, E2 지진발생 전 지열저장소 온도는 석영 및 칼세도니 용해도 곡선으로 추정된 온도로 각각 228~244°C, 183~186°C의 범위이다(Fig. 7). 지진발생 전 지열저장소 온도는 steam loss에 도달하여 정확하게 추정하는데 한계가 있다. 열수-냉수 혼합비(Gupta and Roy, 2006)를 계산한 결과 E1 지진발생 전 냉수 혼합비는 79.0~84.4%에서 E1 지진발생 후71.3~77.4%로 감소하였으며, E2 지진발생 전 냉수 혼합비가 77.9~82.6%에서 E2 지진발생 후 72.9~80.9%로 약간 감소하였다. 즉, 열수 혼합비의 최대증가율은 E1 지진발생 시 칼세도니 용해도 곡선으로 추정하였을 때 7.72% 증가하였다. 이러한 열수 혼합비의 증가와 지진발생 전후의 추정된 지열저장소 온도변화의 차이는 지진의 규모와 진앙지와의 거리에 대해 정량화된 함수인 q-factor 값과 잘 일치한다. E1, E2 지진의 q-factor 값은 각각 203, 30.0으로 E1지진이 E2 지진보다 약 6.77배 차이가 있으며, q-factor 값이 클수록 대수층 교란, 심부 열수의 유입량 등에 크게 영향을 미치는 것으로 보인다. 따라서 지열수의 온도변동의 요인인, 열수-냉수 혼합비의 변화는 q-factor 값(지진의 규모와 진앙지와의 거리의 함수)과의 상관성을 확인하였다.

Table 2. Estimated reservoir temperatures of thermal waters and their mixing ratio with cold water based on the enthalpy-silica mixing model

	Methods	Earth-quake	Temperature (°C)			SiO_2 (mgL^{-1})			Mixing ratio (%)
			Outflow	Reservoir	Coldwater	Outflow	Reservoir	Coldwater	
E1 (2018.02.11. M 4.6)	Quartz	Before	51.8	244	16.2	89.0	459	20.6	84.4
		After	56.3	194	16.2	71.3	245	20.6	77.4
	Chalcedony	Before	51.8	186	16.2	89.0	343	20.6	79.0
		After	56.3	156	16.2	71.3	198	20.6	71.3
E2 (2019.02.10. M 4.1)	Quartz	Before	53.1	228	16.2	82.2	376	20.6	82.6
		After	54.3	216	16.2	78.3	322	20.6	80.9
	Chalcedony	Before	53.1	183	16.2	82.2	295	20.6	77.9
		After	54.3	157	16.2	78.3	261	20.6	72.9

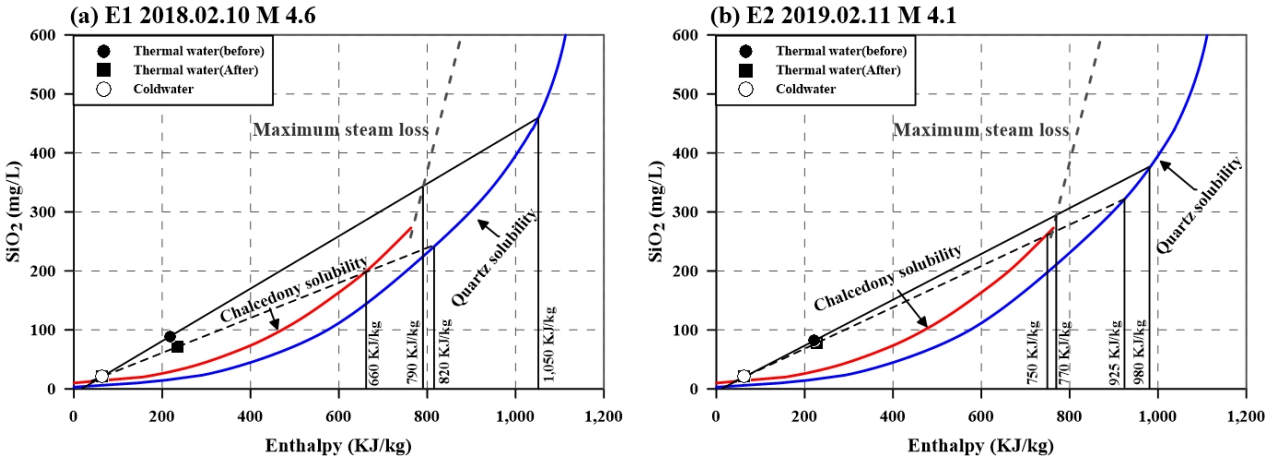

Fig. 7. Estimation of thermal reservoir temperature by enthalpy-silica mixing model.

지열수의 헬륨가스 조성 변화

비활성기체인 영족기체(Noble gas)는 맨틀, 지각, 대기에 존재하는 휘발성 원소의 물질순환과정 연구에서 유력한 추적자(tracer)의 역할로 알려져 있다. ^{3}He은 지구 형성 초기, 운석 내 포획되어 있는 원시 헬륨이며, ^{4}He은 U, Th 등의 방사성 원소가 α-붕괴 시에 생성된다. 그리고 헬륨 동위원소비(^{3}He/^{4}He)는 맨틀, 지각, 대기 환경에서 동위원소의 비율이 각각 다르므로 휘발성 원소의 이동과정을 추적하는데 용이하다(Aka et al., 2001). 맨틀, 지각, 대기 환경에서 ^{3}He/^{4}He 비는 각각 12×10^{-6}, 0.005×10^{-6}, 1.4×10^{-6}이며, ^{4}He/^{20}Ne 비는 각각 10,000, 10,000, 0.317로 알려져 있다(Ballentine and Burnard, 2002; Graham, 2002; Ozima and Podosek, 2002).

지진발생 전후의 헬륨 및 네온 동위원소 비의 변화를 확인하기 위하여 2차례 분석하였으며(Table 3), 포항지열수의 노블가스 동위원소의 조성은 ^{3}He/^{4}He 비는 1.38~1.42의 범위이다. 대기기원의 헬륨이 약 1%로 무시할 수 있는 정도이므로, 맨틀과 지각기원의 헬륨 동위원소비를 100%로 계산 하였을 때 맨틀기원 ^{3}He의 기여도가 16.3~16.7%의 비율을 보인다. ^{4}He/^{20}Ne 비는 13.0~41.7의 범위로 시료 간 큰 차이를 보이며, 맨틀-대기와 지각-대기 혼합선 사이에 도시된다. 또한, 2019년 2월 10일 M 4.1 포항 지진발생 전후 노블가스 동위원소 조성비를 비교하면 ^{4}He/^{20}Ne 비가 오른쪽으로 전이 현상을 보였다. 이는 지진발생으로 인한 심부 지각 내 ^{4}He 공급의 증가에 기인한 것으로 보인다(Fig. 8).

Kotarba and Nagao(2008)가 제시한 계산법을 이용하여 3개의 성분(맨틀, 지각, 대기)에 대한 ^{3}He과 ^{4}He의 기여도를 계산하였다(Table 3). 2019년 2월 10일 M 4.1 포항 지진발생 이후 ^{3}He과 ^{4}He 함량은 공통적으로 대기기원의 함량이 0.5~0.6% 감소하였다. 또한 ^{3}He의 경우 지진발생 이후에 맨틀의 기여도가 98.8%에서 99.4%로 0.6% 증가하였으며, ^{4}He의 경우 지각과 맨틀 기여도가 각각 83.2%, 16.3%로 각각 0.2%와 0.6%가 미세하게 증가하였다. 이는 지진의 발생으로 지하 심부의 헬륨가스 유출의 변화에 대한 증거가 된다. 지진의 발생과 ^{4}He의 상관관계는 2016년 4월 M 7.3의 Kumamoto 지진발생 후 ^{4}He의 함량이 진원지 인근 지역에서 지각에 가해지는 응력이 높아짐에 따라 지열수 내 ^{4}He의 농도가 증가하며, 변화량의 차이는 규모와 거리에 따라 비례한 것으로 보고하였다(Sano et al., 2016). 따라서, 지열수 내 16.3~16.7% 범위로 존재하는 마그마나 맨틀과 같은 심부기원의 ^{3}He의 공급은 양산단층대를 통하여 지하 심부의 휘발성 가스가 상승하여 지열수로 유입된 것으로 추정된다.

Table 3. Original percentage of helium isotopes and helium and neon gas composition of thermal water

Earthquake	$^3He/^4He$	$^4He/^{20}Ne$	^3He (%)			^4He (%)		
			Air	Mantle	Crust	Air	Mantle	Crust
Before	1.38	13.0	0.9	98.8	0.2	1.3	15.7	83.0
After	1.42	41.7	0.4	99.4	0.2	0.6	16.3	83.2

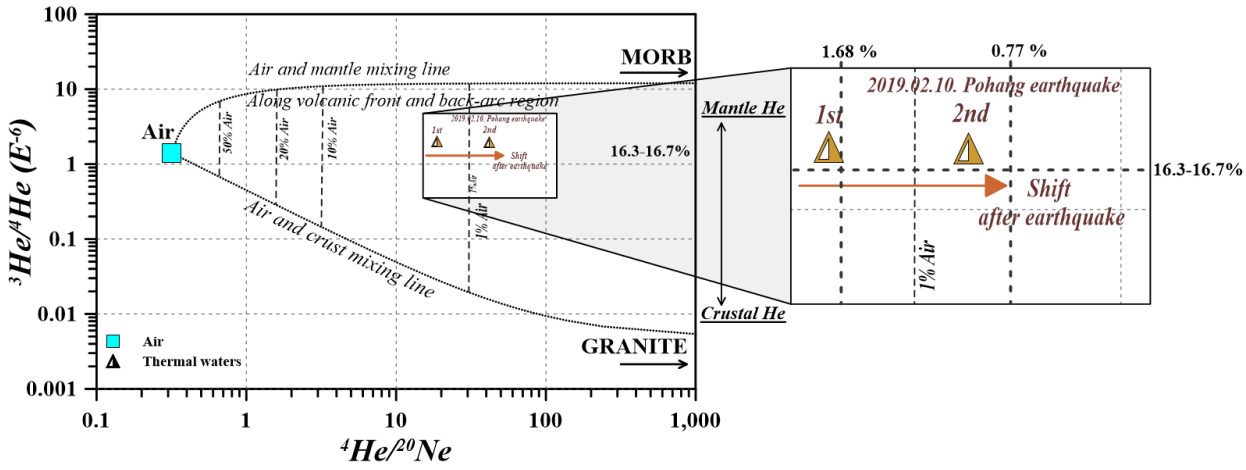

Fig. 8. Helium original plot of Pohang thermal water on the $^3He/^4He$ versus $^4He/^{20}Ne$ diagram.

결 론

포항지열수 관측정에서 2018년 1월부터 2019년 6월까지 수온, 화학성분, 헬륨가스의 변화와 지진과의 상관성에 대한 연구결과를 결론적으로 요약하면 다음과 같다.

(1) 포항 신광지역 지열수의 수온은 51.8~56.3°C의 범위에서 변동이 관찰되었으며, E1 지진(2018년 2월 11일 M 4.6) 발생 시 발생 전 51.8°C에서 최고 56.3°C까지 상승하였다. 이러한 변화는 지진의 규모가 4.1 이상, q-factor는 30.0일 때 유의미한 변화가 확인된다.

(2) 지열저장소의 추정온도는 석영 및 칼세도니 용해도 곡선에 의해 각각 228~244°C, 183~186°C의 범위로 추되며, 열수-냉수 혼합비는 E1 지진발생 후 열수의 혼합비가 최대 7.72% 증가하였으며, 열수의 증가량은 q-factor 값의 크기와 비례하게 증가하는 것으로 확인된다.

(3) 헬륨동위원소 조성 변화는 $^3He/^4He$ vs. $^4He/^{20}Ne$ 상관도에서 E2(2019년 2월 10일 M 4.1) 지진발생 후 맨틀기원의 ^3He이 16.3에서 16.7%로 증가하였으며, 지각기원의 ^4He이 83.0%에서 83.2%로 증가하는 변화가 확인되었다. 이는 E2 지진으로 열수의 혼합비가 높아짐에 따라서 지각기원 ^4He의 공급이 증가한 것으로 보인다.

(4) 결론적으로 포항지열수 관측정에서 q-factor 30 이상의 영향지수를 갖는 지진발생 시 지열수의 수온 및 헬륨가스의 변화가 확인되어 향후 지진전조인자로서의 활용가능성을 보여준다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(과제번호: 20201510100020)을 받아 수행되었습니다.

References

Aka, F.T., Kusakabe, M., Nagao, K., Tanyileke, G., 2001, Noble gas isotopic compositions and water/gas chemistry of soda springs from the islands of Bioko, São Tomé and Annobon, along with Cameroon Volcanic Line, West Africa, Applied Geochemistry, 16, 323-338.

Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., 1985, New gas geothermometers for geothermal exploration—calibration and application, Geochimica et Cosmochimica Acta, 49, 1307-1325.

Ballentine, C.J., Burnard, P.G., 2002, Production, release and transport of noble gases in continental crust, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 47, 481-538.

Cartigny, P., Jendrzejewski, N., Pineau, F., Petit, E., Javoy, M., 2001, Volatile (C, N, Ar) variability in MORB and the respective roles of mantle source heterogeneity and degassing: The case of the Southwest Indian Ridge, Earth and Planetary Science Letters, 194(1-2), 241-257.

Dobrovolsky, I.P., Zubkov, S.I., Miachkin, V.I., 1979, Estimation of the size of earthquake preparation zones, Pure and Applied Geophysics, 117, 1025-1044.

Fournier, R.O., 1977, Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems, Geothermics, 5, 41-50.

Fu, C.C., Yang, T.F., Chen, C.H., Lee, L.C., Liu, T.K., Walia, V., Kumar, A., Lai, T.H., 2017, Spatial and temporal anomalies of soil gas in northern Taiwan and its tectonic and seismic implications, Journal of Asian Earth Sciences, 149, 64-77.

Ghose, D., Kr. Das, N., Sinha, B., 1996, Anomalous helium emission: Precursor to earthquakes, Current Science, 71(1), 56-58.

Goto, M., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Moto, J., Omori, Y., Ihara, H., Mukai, T., 2017, Anomalous changes in atmospheric radon concentration before and after the 2011 northern Wakayama Earthquake (MJ 5.5), Radiation Protection Dosimetry, 174(3), 412-418.

Graham, D.W., 2002, Noble gas isotope geochemistry of mid-ocean ridge and ocean island basalts: Characterization of mantle source reservoirs, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 47, 247-317.

Greenberg, A.E., Clesceri, L.S., Eaton, A.D., 1992, Standard methods for the examination of water and waste water, The American Public Health Association, Washington DC, 4-55.

Gupta, H.K., Roy, S., 2006, Geothermal energy: An alternative resource for the 21st century, Elsevier Science & Technology, 279p.

Henley, R.W., Truesdell, A.H., Barten, Jr., P.B., Whitney, J.A., 1984, Fluid-mineral equilibria in hydrothermal system, Society of Economic Geologist, 267p.

Hwang, H.S., Hamm, S.Y., Cheong, J.Y., Lee, S.H., Ha, K., Lee, C., Woo, N.C., Yun, S.M., Kim, K.H., 2020, Effective time- and frequency-domain techniques for interpreting seismic precursors in groundwater level fluctuations on Jeju Island, Korea, Scientific Reports, 10, 7866.

Jang, H.W., Jeong, C.H., Lee, Y.C., Lee, Y.J., Hong, J.W., Kim, C.H., Kim, Y.S., Kang, T.S., 2020, Relationship between earthquake and fluctuation of water level in active fault zonee and national groundwater monitoring wells of Gyeongju area, 30(4), 617-634 (in Korean with English abstract).

Jeong, C.H., Lee, B.D., Yang, J.H., Nagao, K., Kim, K.H., Ahn, S.W., Lee, Y.C., Lee, Y.J., Jang, H.W., 2019, Geochemical and isotopic compositions and geothermometry of thermal waters in the Magumsan area, South Korea, Water, 11(9), 1774.

Jeong, C.H., Park, J.S., Lee, Y.C., Lee, Y.J., Yang, J.H., Kim, Y.S., Ou, S.M., 2018, Relationship of radon-222 and chemical composition of groundwater as a precursor of earthquake, The Journal of Engineering Geology, 28(2), 313-324 (in Korean with English abstract).

Kim, G.B., Choi, M.R., Lee, C.J., Shin, S.H., Kim, H.J., 2018a, Characteristics of spatio-temporal distribution of groundwater level's change after 2016 Gyeong-ju earthquake, Journal of the Geological Society of Korea, 54(1), 93-105 (in Korean with English abstract).

Kim, J.S., Kim, M., Kim, S., Lee, H., 2018b, An analysis of anomalous radon variation caused by M5.8 Gyeong-ju Earthquake, Economic and Environmental Geology, 51(1), 1-13 (in Korean with English abstract).

Korea Central Hot Spring Institute, 2002, Thermal water investigation report of Pohang Singwang district, 89p.

Kotarba, M.J., Nagao, K., 2008, Composition and origin of natural gases accumulated in the Polish and Ukrainian parts of the Carpathian region: Gaseous hydrocarbons, noble gases, carbon dioxide and nitrogen, Chemical Geology, 255, 426-438.

Kuo, M., Fan, K., Kuochen, H., Chen, W., 2006, A mechanism for anomalous decline in radon precursory to an earthquake, Groundwater, 44(5), 642-647.

Miklavcic, I., Radolic, V., Vukovic, B., Poje, M., Varga, M., Stanic, D., Planinic, J., 2008, Radon anomaly in soil gas as an earthquake precursor, Applied Radiation and Isotopes, 66(10), 1459-1466.

MOIS (Ministry of the Interior and Safety), 2018, The second comprehensive earthquake preparedness plan, Retrieved from https://www.xn—le5b23c9wbqa.com/plan/earthquake.php?ptype=view&idx=418&page=1&code=earthquake.

MPSS (Ministry of the Public Safety and Security), 2016, The first comprehensive earthquake preparedness plan, 136p.

Ozima, M., Podosek, F.A., 2002, Noble gas geochemistry, 2nd ed., Cambridge University Press, 302p.

Piper, A.M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses, Transactions of American Geophysical Union, 25(6), 914-923.

Rikitake, T., 1979, Classification of earthquake precursors, Tectonophysics, 54(3-4), 293-309.

Sano, Y., Takahata, N., Kagoshima, T., Shibata, T., Onoue, T., Zhao, D., 2016, Groundwater helium anomaly reflects strain change during the 2016 Kumamoto earthquake in Southwest Japan, Scientific Reports, 6, 37939.

Skelton, A., Stockmann, G., Andrén, M., Tollefsen, E., Sturkell, E., Mörth, C.M., Guðrúnardóttir, H.R., Kristmannsdóttir, H., Sveinbjörnsdóttir, Á, Jónsson, S., Balic-Zunic, T., Hjartarson, H., Siegmund, H., Keller, N.S., Odling, N., Broman, C., Dahrén, B., Kockum, I., 2016, Chemical changes in groundwater before and after earthquakes in northern Iceland, Proceedings of the International Workshop on Earthquakes in North Iceland, Húsavík.

Tronin, A.A., Biagi, P.F., Molhanov, O.A., Khatkevich, Y.M., Gordeev, E.L., 2004, Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area, Physics and Chemistry of the Earth, 29, 501-506.

Tsunomori, F., Tanaka, H., 2014, Anomalous change of groundwater radon concentration monitored at Nakaizu well in 2011, Radiation Measurements, 60, 35-41.

Um, S.H., Lee, D.W., Bak, B.S., 1964, Explanatory text of the geological map of pohang sheet, 39p.

Ye, Q., Singh, R.P., He, A., Ji, S., Liu, C., 2015, Characteristic behavior of water radon associated with Wenchuan and Lushan earthquakes along Longmenshan fault, Radiation Measurements, 76, 44-53.

Zhang, B., 2018, Relationship between the temperature abnormal changes of Maoya hot spring water and earthquakes in Sichuan-Yunnan area, American Geophyical Union, Fall Meeting 2018 Abstract #T23B-0351.