

지진 전조인자로서 지하수내 라돈 및 화학성분의 상관성 연구

정찬호^{1*} · 박준식¹ · 이용천¹ · 이유진¹ · 양재하² · 김영석³ · 오송민¹

¹대전대학교 건설안전방재공학과

²이지아이 컨설팅

³부경대학교 지구환경과학부

Relationship of Radon-222 and Chemical Composition of Groundwater as a Precursor of Earthquake

Chan Ho Jeong^{1*} · Jun Sik Park¹ · Yong Cheon Lee¹ · Yu Jin Lee¹ · Jae Ha Yang² · Young Suk Kim³ · Song Min Ou¹

¹Department of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University

²EGI Consulting

³Department of Geological Environment, Bukyoung National University

Abstract

In order to study the earthquake precursor in the Korean peninsula, long-term variations of chemical composition, radon-222, and water level were measured at depths (-60 m, -100 m) in the groundwater monitoring wells of the Daejeon and the Cheongwon area. The pH and electrical conductivity of groundwater in the monitoring wells showed some relationship with the Pohang earthquake. The HCO_3^- and Cl^- concentration of groundwater in the Daejeon and Mg^{2+} , Cl^- and NO_3^- in the Cheongwon showed some relation with the Pohang earthquake. However, it is not distinct to find the relationship between their variation and earthquake. The radon-222 concentration in Daejeon was observed a significant increase from a minimum of 162 Bq/L prior to the earthquake to 573 Bq/L right after the earthquake, that indicating a strong correlation with earthquakes. In the case of groundwater levels, it can not find some correlation between earthquakes and continuous decreasing trend in the monitoring wells of Daejeon and Cheongwon area. However, water level of a national groundwater observation well within 10 kilometers of Pohang epicenter was recorded as an abrupt drop right before the earthquake. Conclusively, although the location of monitoring wells is more than 180 kilometers apart from the epicenter of the Pohang earthquake, the radon gas in groundwater can be considered as a reliable candidate among earthquake precursors. The pH, electrical conductivity, HCO_3^- and Cl^- among hydrochemicals showed some correlation with earthquake should be monitored during a longer term to recognize distinctly as a precursor of earthquake.

Keywords: Earthquake, Groundwater, Radon-222, Chemical composition, Precursor

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Chan Ho Jeong
E-mail: chjeong@dju.kr

Received: 11 June, 2018

Revised: 18 June, 2018

Accepted: 21 June, 2018

© 2018 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.

초 록

한반도 지진에 대한 전조인자 연구를 위해 대전, 청원지역 지하수 관측정에서 심도별(-60 m, -100 m)로 화학성분과 라돈, 수위변화를 주기적으로 측정하였다. 관측정 특정심도 지하수의 pH와 전기전도도 값 이 포항지진 발생에 따라 큰 폭으로 증가하는 등 비교적 뚜렷한 상관성을 보였다. 주요화학 성분 중에는

대전관측정에서는 HCO_3^- , Cl^- 의 농도가 지진과의 연관성 있는 변동을 보이며, 청원지역 관측정에서는 Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- 의 농도가 변화를 보였다. 그러나 지하수의 주요 화학성분의 변화는 지진발생과의 상관성이 명확하지는 않다. 대전관측정 지하수내 라돈 함량은 지진 발생 전 최저 162 Bq/L에서 지진발생 직후 573 Bq/L로 크게 증가하는 경향을 보여 지진과의 뚜렷한 상관성을 보여주었다. 지하수위의 경우에는 지진발생과의 상관성은 확인되지 않고 갈수기로 인한 지속적인 하강의 양상을 보여주었다. 그러나 포항 진앙지 10 km 이내 국가 지하수 관측정에서는 지진발생 직전 뚜렷한 지하수위의 하강 현상을 보여주었다. 결론적으로 포항지진 진앙지와 약 180 km 이상 떨어진 지역이지만 대전 관측정에서 라돈가스는 지진과 가장 뚜렷한 상관성을 보여 지진전조인자로서의 신뢰성할 수 있는 후보로서 가능성을 확인하였다. pH, 전기전도도, HCO_3^- , Cl^- 성분은 지진과 일정 부분 상관성을 보여주었지만 보다 더 장기적인 모니터링을 통하여 지진전조로서 가능성을 확인할 수 있을 것으로 보인다.

주요어: 지진, 지하수, 라돈-222, 화학조성, 전조인자

서론

지난 2016년 9월 12일 경주에서 규모 5.8의 지진이, 2017년 11월 15일 포항에서는 규모 5.4의 지진이 발생하였다. 그 후 2018년 2월 28일까지 97회의 여진이 발생하였고, 2018년 2월 11일에는 포항에서 규모 4.6의 여진이 발생하였다. 이와 같은 큰 규모의 지진으로 인하여 국민들의 피해와 불안감이 높아지고 있다. 이와 관련하여 한반도 지진의 발생원인과 향후 지진 발생가능성에 대한 연구는 국가적 차원의 관심 연구 분야가 되었다. 특히, 지진발생 가능성에 대한 규모와 발생 시기에 대한 예측은 지진연구에서 핵심적으로 관심을 가져야할 주제이다.

국내에서 지진예측과 관련한 지진전조 인자에 대한 연구로는 대기와 지하수내 자연기원의 라돈의 산출농도를 지속적으로 모니터링하여 주변지역의 지진 발생자료와의 분석결과를 제시한 바 있으며(Kim et al., 2003), 일본에서 발생한 규모 9.0 (MI)의 지진이 우리나라 지하수위에 미치는 영향을 조사하여 수리전도도와 투수량 계수와 지하수위 변화와의 상관성을 제시하였다(Jeon et al., 2011). Jeong and Senapathi (2016)는 국가지하수 관측망 수위자료 변화와 경주지진과의 상관관계를 제시하였다. Lee et al. (2017)은 지진감시 및 예측을 위해 국외의 관측시설 현황 및 국내 지진예측 연구의 연구방향을 제시하였다. 국내에서 운용되고 있는 지하수 장기관측망의 관측자료를 이용하여 규모 3.0내외의 발생빈도가 상대적으로 높은 소규모 지진에 의한 영향 및 지진 전조현상에 의한 지하수의 지하수위, 수온, 전기전도도의 변화와의 상관성을 해석한 바 있다(Woo et al., 2015).

그러나 일본, 대만, 중국, 인도, 아일랜드, 터키, 미국 등 외국의 연구사례를 보면 지진의 전조인자로서 지하수위의 변동, 라돈 함량의 변동뿐만 아니라 지하수 화학성분의 변화, 물 분자의 수소동위원소의 변화, 헬륨 등 노블가스의 유출량의 변화와 그들의 동위원소 조성비의 변화 연구 등 다양한 각도에서 연구가 진행되어 지진의 전조현상과의 상관성과 지진후의 변화에 대한 연구결과를 제시한 바 있다(Cartigny et al., 2001; Kuo et al., 2006; Skelton et al., 2014; Tsunomori and Tanaka, 2014; Ye et al., 2015; Sano et al., 2016; Fu et al., 2017; Goto et al., 2017).

특히 중국은 인구가 밀집된 동부지역의 도시 및 지구조적 경계를 중심으로 관측시설 1,278개소를 설치하였으며(Huang et al., 2017), 실시간으로 관측하고 있다(Che et al., 2002; Huang et al., 2004; Liu et al., 2009).

이 연구에서는 대전, 청원 지역에 설치된 관측공에서 지진발생에 따른 지하수위, 라돈의 함량변화, 지하수 화학성분 변화 등의 상관성을 알아보기 위하여 이들 성분에 대해서 장기적으로 측정 및 분석하였다. 특히, 2017년 11월 15일(규모 5.4), 2018년 2월 15일(규모 4.6)에 발생한 포항지진 전후 지하수의 화학성분, 지하수위, 라돈농도 등의 변화를 분석하여 지진전조 인자로서의 가능성을 해석하였다.

연구지역 및 지질

대전 및 청원지역 모니터링용 시추공(Fig. 1a)은 2000년과 2001년에 각각 개발되었으며, 개발당시 지하수의 화학성분, 라돈의 함량, 시추주상도 등은 Jeong et al. (2011,2013)에 의해 보고된바 있으며 지하수의 라돈과 우라늄 함량이 높은 것으로 알려졌다.

대전지역 관측정은 대전광역시 서구 갈마동 한마음어린이공원내에 위치하며, 시추심도는 -121 m이다(Fig. 1b). 시추코어 주상도에 의하면 구성암석은 중립질 내지 세립질 복운모화강암이 주요 암질이며, 부분적으로 편상조직이 보이며, 맥암류가 관입하고 있다(Jeong et al., 2013). 청원지역 관측정은 충청북도 청원군 부용면 갈산리 12-2번지에 위치하며, 시추심도는 지하 -120 m이다(Fig. 1c). 시추코어에 의한 지질특성은 시대미상의 흑운모편암과 이를 관입한 주라기 반상화강암, 흑운모화강암이 차례대로 관입하고 있다(Jeong et al., 2011).

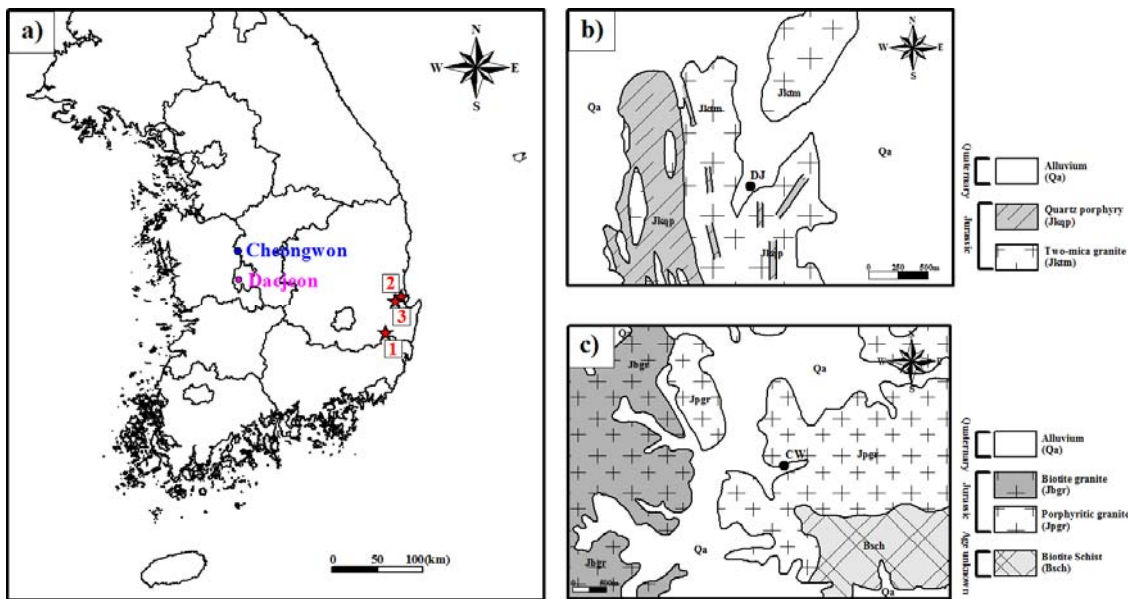


Fig. 1. Map showing the epicenters of earthquake(a), and location of monitoring wells in the geologic map of the Daejeon (b) and Cheongwon (c) area. 1, 2 and 3 in map A are the epicenters of Gyeongju earthquake (Sept. 12, 2016), Pohang earthquake (Nov. 15, 2017) and Pohang aftershock (Feb. 11, 2018), respectively.

연구방법

시료채취 및 현장수질측정

본 연구를 위하여 대전, 청원 지역 지하수공에서 2017년 5월 25일부터 2018년 2월 까지 주기적으로 -60 m, -100 m의 심도에서 라돈과 화학성분의 분석을 위한 시료를 채취하였다. 라돈 분석을 위한 시료는 심도별로 각각 15점, 화학성분 시료는 심도별로 각각 5점 채취하였고, 지하수 시료 채취는 심도별로 더블 패커(double-packer)와 베일러를 사용하여 이루어졌고, 18회에 걸쳐 수소이온농도, 전기전도도, 산화환원전위, 용존산소함량, 중탄산(HCO_3^-) 함량을 측정하였다. 연구지역 지하수의 현장수질측정은 Thermo사의 Orion A221과 5 star 모델의 휴대용 측정기를 이용하였으며, 중탄산(HCO_3^-)의 함량은 0.05 N 농도의 HCl로 산중화적정법으로 측정하였다. 화학성분 분석을 위한 시료는 현장에서 Nalgene 용기에

직수를 채취한 후 0.45 μm 막필터(cellulose nitrate membrane filter)와 진공펌프를 이용해 지하수에 존재하는 이물질들을 여과하여 양·음이온을 각각 60 mL 폴리에틸렌 용기에 나누어 채취했다. 양이온 시료에는 용존 이온성분이 용기에 침전 또는 흡착을 방지하기 위하여 적정량의 농질산을 용해시켜 pH를 2 이하로 유지하였다(Greenberg, 1992). 라돈의 분석을 위한 시료는 라돈이 대기 중으로 휘발하는 것을 방지하기 위해 대기와의 접촉을 최소화하여 20 mL 바이알에 지하수 15 mL와 액체섬광물질(mineral oil scintillator) 5 mL를 첨가하여 약 5분간 혼합시킨 후 채수 즉시 밀봉하였다.

화학적 성분 및 라돈 분석

채취된 지하수 시료는 분석하기 전까지 4°C 이하로 냉장 보관하였으며, 주요 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Si^+) 성분은 유도결합 플라즈마 원자발광분광기(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrophotometer)를 이용하여 분석하였고 음이온(SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , F^-) 성분은 유도결합플라즈마 시스템(Inductively Coupled Plasma System)을 이용하여 분석하였다. 분석은 한국기초과학지원연구원 오창센터에서 이루어졌다. 화학분석의 정확성을 검토하기 위해 분석된 총 양이온과 총 음이온 합량을 당량(meq/L)으로 환산하여 이온밸런스를 표기하였다.

라돈의 측정은 한국기초과학지원연구원 오창센터의 환경방사능측정시스템(Environment Radioactivity Measurement System)을 이용해 분석하였다.

결과 및 토론

연구기간 중 2017년 11월 15일 포항지진(M 5.4), 2018년 2월 4일 옥천지진(M 2.8), 2018년 2월 11일 포항 여진(M 4.6) 등의 주요지진이 발생하였으며, 지진과 현장수질측정 자료, 주요 화학성분, 라돈가스, 지하수위 등의 변화와의 상관성을 분석하였다.

현장수질 측정 자료의 변화

연구지역의 관측정 -60 m, -100 m 심도에서 연구기간 중 총 18차례에 걸쳐 지하수 시료에 대한 수소이온농도, 산화환원전위, 전기전도도, 용존산소 함량을 측정하였다.

대전 관측정 지하수의 pH의 변화는 2017년 5월 25일 관측 시작 당시 심도별로 7.45, 7.58이었으나 이후 지속적으로 증가하는 경향을 보이다가 포항지진 발생 1주일 전 8.04, 8.13까지 증가한 후 지진발생이후 7.24, 7.70으로 각각 낮아졌으며 이후 다시 증가하는 경향을 보였다. 그러나 옥천지진(M 2.4) 발생 시에는 큰 변화를 보이지 않았고 2018년 2월 11일 포항 여진시 pH는 약간 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2a).

청원 관측정 지하수의 pH의 변화는 관측 시작 당시는 심도별로 각각 5.93, 5.99이었으나 이후 지속적으로 증가하는 경향을 보이다가 포항지진발생 1주일 전 6.61, 6.62로 이후 지속적으로 증가하는 경향을 보이다가 포항지진발생 하루 전에는 7.67, 6.73으로 각각 증가 하였으며 이후 다시 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2b).

전기전도도의 변화는 대전 관측정 지하수에서 초기 관측 당시 심도별 303, 303 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 지진발생이후 537, 582 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 보이고, 옥천지진과 포항 여진 발생시 큰 변화를 보이지 않았다(Fig. 2c).

청원지역 지하수에서 전기전도도는 관측 시작 당시 심도별 340, 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 이후 지속적으로 증가를 보이며 포항 지진발생 이전에는 425, 463 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지 증가하는 하였으며 이후 다시 감소하는 경향을 보이고, 포항 여진시 약간 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2d).

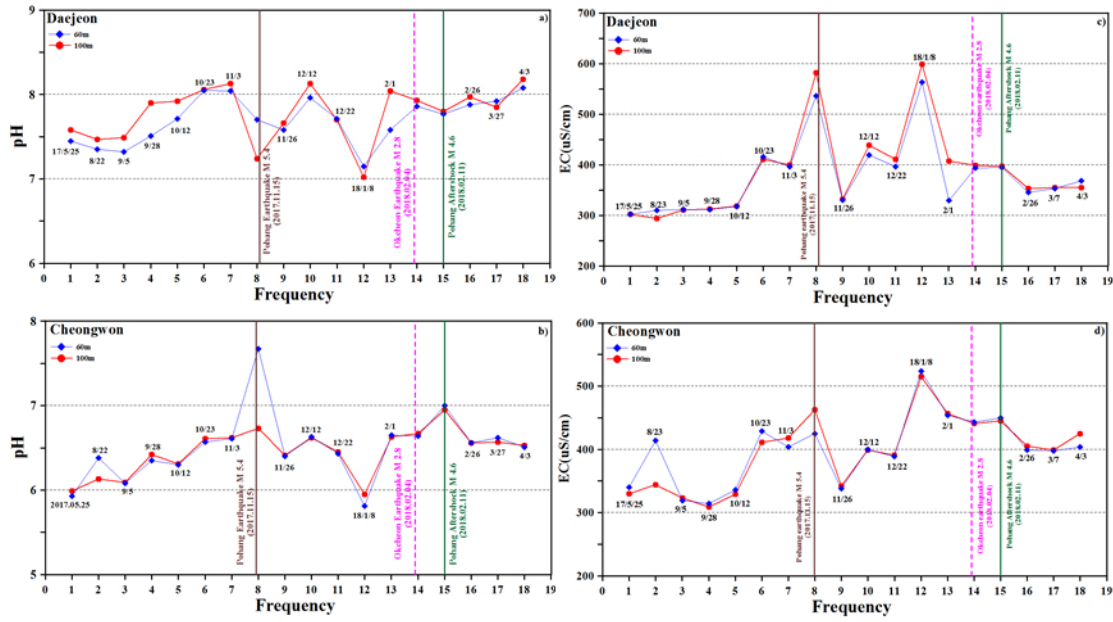


Fig. 2. Long-term variations of the pH and electrical conductivity of groundwater samples collected from monitoring wells in the Daejeon (a, c) and Cheongwon area (b, d).

화학성분의 변화

연구지역내 규모 5.4의 포항지진 발생 전후의 심도 및 기간별 화학성분(Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻) 결과 Tables 1과 2에 있으며, 변화양상은 Figs. 3와 4에 제시하였다.

대전 관측정 지하수의 주요이온 성분중 양이온 성분은 지진과의 상관성이 뚜렷하지 않았으나 음이온 성분 중 Cl⁻와 SO₄²⁻에서 변화를 보였으며 Cl⁻ 성분은 포항지진이 발생하기 약 3개월 전 심도별 36.5, 37.7 mg/L로 포항지진발생 이후 30.8, 29.6 mg/L로 감소하였고 이후 다시 증가하는 경향을 보이며(Fig. 3c), SO₄²⁻ 성분은 포항지진 약 3개월 전 심도별 40.1, 40.3 mg/L로 포항지진 발생 이후 30.9, 34.4 mg/L로 감소하다 다시 회복하는 경향을 보였다(Fig. 3d).

Table 1. Geochemical compositions of groundwater samples collected from a monitoring well of the Daejeon area. (Unit : mg/L)

Sample ID.	Sampling date (Y/M/D)	Sampling depth (m)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Sr ²⁺	Fe	Si	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	E.N (%)
DJ2-01	17/05/25		59.6	1.67	16.7	1.25	0.63	0.25	11.6	124	36.3	30.9	0.37	1.53	1.63
DJ2-02	17/08/22		52.5	1.32	15.7	1.04	0.58	0.06	10.8	111	40.1	36.5	0.42	1.72	-4.75
DJ2-08	17/11/16	60	59.5	1.37	16.0	1.14	0.54	0.09	11.4	159	30.9	30.8	0.78	1.29	-4.89
DJ2-09	17/11/26		60.6	1.61	17.7	1.61	0.62	0.40	11.4	127	31.7	28.4	0.25	1.16	4.75
DJ2-10	17/12/12		67.7	2.11	21.5	2.49	0.70	0.15	13.7	148	34.5	32.4	0.57	1.26	4.81
DJ3-01	17/05/25		56.7	2.12	17.7	1.97	0.58	0.11	6.37	127	31.0	31.5	0.28	1.45	1.70
DJ3-02	17/08/22		50.1	1.26	15.3	1.00	0.59	0.02	10.8	95.0	40.3	37.7	0.54	1.77	-3.89
DJ3-08	17/11/16	100	61.7	1.65	17.6	2.09	0.59	0.11	10.5	128	34.4	29.6	0.38	1.24	0.47
DJ3-09	17/11/26		62.9	1.65	17.7	1.41	0.63	0.32	12.2	134	31.9	28.1	0.26	1.16	4.65
DJ3-10	17/12/12		67.9	2.37	25.9	1.68	0.66	0.16	11.9	152	33.4	37.4	0.15	1.28	4.87

Table 2. Geochemical compositions of groundwater samples collected from a monitoring well of the Cheongwon area. (Unit : mg/L)

Sample ID.	Sampling date (Y/M/D)	Sampling depth (m)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Sr ²⁺	Fe	Si	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	E.N (%)
CW2-01	17/05/25	60	37.4	14.1	21.6	4.14	0.28	0.18	13.8	124	25.2	32.9	23.7	0.15	2.48
CW2-02	17/08/23		58.3	10.9	24.3	3.23	0.24	0.02	11.7	192	28.9	34.3	27.0	0.27	-2.17
CW2-08	17/11/14		53.4	5.98	22.9	2.69	0.17	0.05	7.90	180	20.4	13.7	1.09	0.89	4.92
CW2-09	17/11/26		31.7	12.2	20.3	4.06	0.22	0.05	12.3	119	21.9	27.7	23.2	0.11	0.07
CW2-10	17/12/12		37.8	14.5	24.3	4.65	0.27	0.07	15.2	139	21.8	25.8	25.0	0.09	4.77
CW3-01	17/05/25	100	37.3	14.1	21.7	4.49	0.28	0.03	13.8	119	25.1	33.2	24.8	0.14	3.34
CW3-02	17/08/23		34.2	13.9	23.8	4.40	0.27	0.03	12.2	122	32.3	38.7	36.3	0.14	-4.29
CW3-08	17/11/14		45.6	11.3	25.1	4.18	0.23	0.06	10.9	151	23.5	25.7	18.8	0.36	4.67
CW3-09	17/11/26		36.8	14.3	23.9	4.62	0.26	0.07	14.1	130	21.9	28.2	24.2	0.11	4.94
CW3-10	17/12/12		38.6	14.2	24.8	4.72	0.27	0.07	14.8	142	21.5	25.3	24.3	0.10	4.99

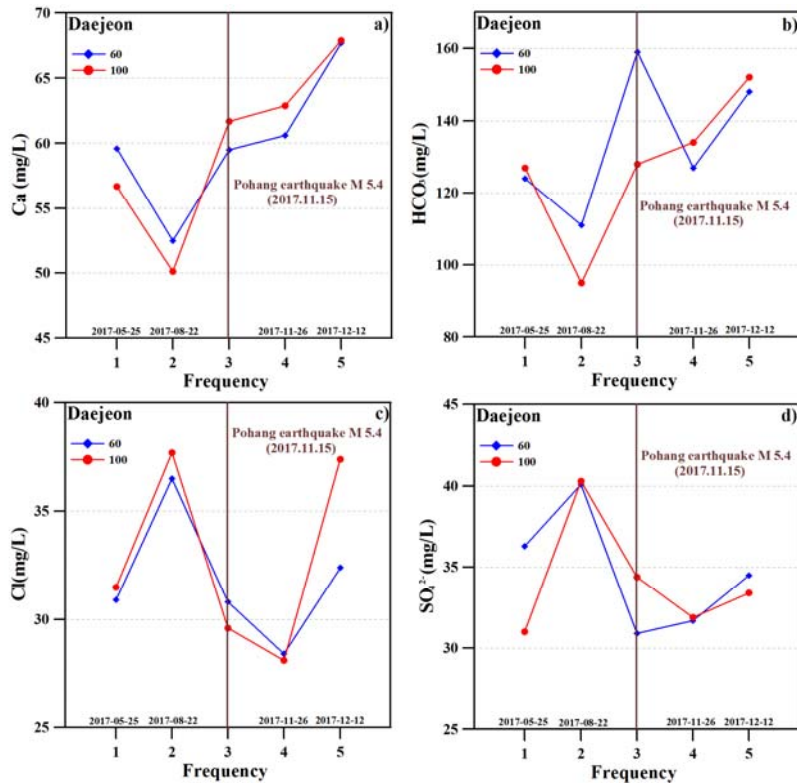


Fig. 3. Variations of chemical composition of groundwater samples collected from the Daejeon monitoring well (DJ) during sampling period.

청원 관측정 지하수의 양이온 성분중 Mg²⁺과 K⁺을 제외한 나머지 성분은 지진과의 상관성은 보이지 않았으며, Mg²⁺ 성분은 관측시작 당시 심도별 14.1, 14.1mg/L로 포항지진 발생 이후 5.98, 11.3 mg/L로 감소하였고 이후 농도가 증가하는 경향을 보였으며(Fig. 4b), K⁺ 성분은 관측시작 당시 심도별 4.14, 4.49 mg/L로 포항지진 발생 이후 2.69, 4.18 mg/L로 감소하였고 이후 농도가 다시 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4c).

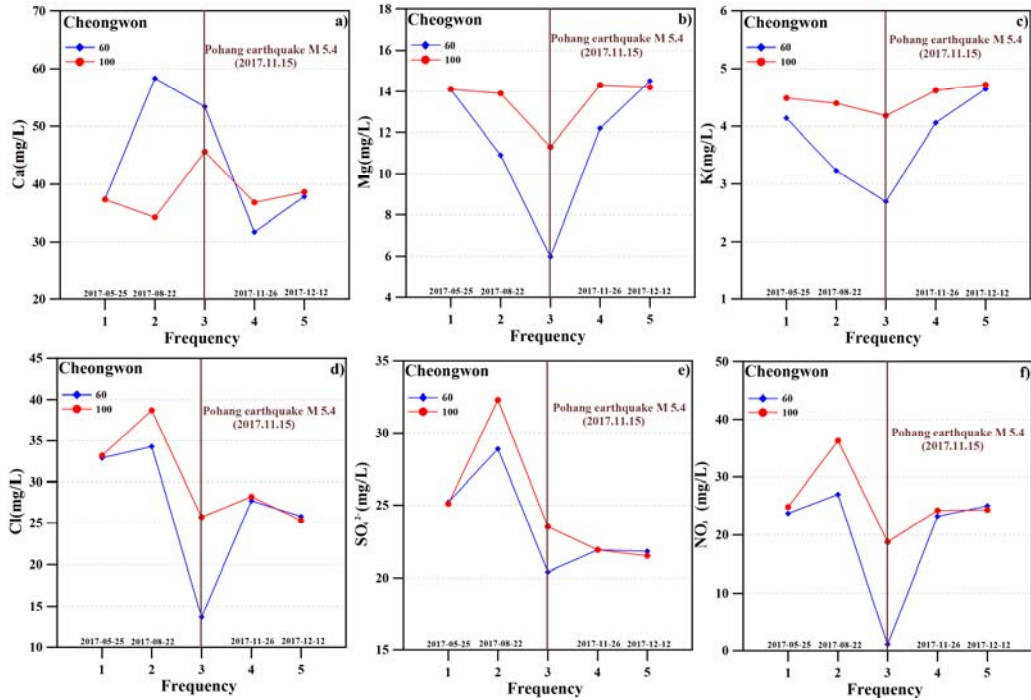


Fig. 4. Variations of chemical composition of groundwater samples collected from the Cheongwon monitoring well (CW) during sampling period.

음이온 성분 중 Cl^- 과, NO_3^- 성분을 제외한 나머지 성분은 지진과의 뚜렷한 상관성을 보이지 않았으며, Cl^- 성분은 포항 지진이 발생하기 3개월 전 심도별 34.3, 38.7 mg/L에서 포항지진 발생 이후 13.7, 25.7 mg/L로 감소하였고 이후 증가하는 경향을 보이며(Fig. 4d), NO_3^- 성분은 포항지진이 발생하기 3개월 전 심도별 27.0, 36.3 mg/L에서 포항지진 발생 이후 1.09, 18.8 mg/L로 감소하였고 이후 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4f).

이와 같은 변화 양상은 지진에 의한 영향인지 강우량과 계절적인 영향인지에 대해서는 현재의 자료만으로는 명확하지는 않지만, 지진발생에 따른 변화양상을 보이므로 보다 짧은 간격의 분석주기와 장기간의 분석을 통한 지진과의 관련성 연구가 필요할 것으로 보인다.

라돈의 변화

연구지역 지하수내 심도별 라돈 함량은 Table 3에 제시되어 있으며, 포항지진 및 여진 그리고 옥천지진 발생에 따른 상관성을 분석하였다(Fig. 5).

대전 관측공의 지하수 라돈농도는 심도별 127~636 Bq/L, 107~617 Bq/L의 높은 라돈농도를 보인다. 라돈농도는 관측 시작 당시 심도별 231, 137 Bq/L에서 포항지진(2017년 11월 15일)발생 이후 636, 573 Bq/L로 크게 증가하는 경향을 보이고 이후 다시 감소하는 경향을 보였다. 이후 상대적으로 규모가 작은 옥천 지진과는 뚜렷한 상관성을 보이지 않았으나 포항 여진이 발생했을 시 라돈의 농도가 소폭 증가하는 경향을 보인다.

청원지역 관측공에서 지진에 따른 지하수 내 라돈농도의 변화는 관측시작 당시 심도별 50.7, 29.6 Bq/L에서 포항지진(2017년 11월 15일)발생 이후 68.0, 65.0 Bq/L로 증가하는 경향을 보였고 이후 감소하였다가 포항 여진(2018년 2월 11일) 발생 시 농도가 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 대전, 청원지역 지하수내 라돈의 농도변화는 지진발생과 뚜렷한 상관

Table 3. Radon-222 content of groundwater samples collected from the monitoring wells.

Sample ID	Depth (m)	Sampling Date (Y/M/D)	Rn-222 (Bq/L)	Sample ID	Depth (m)	Sampling Date (Y/M/D)	Rn-222 (Bq/L)
DJ2-01	60	17/05/25	231	CW2-01	60	17/05/25	50.7
DJ2-02		17/08/22	369	CW2-02		17/08/23	58.5
DJ2-03		17/09/05	249	CW2-03		17/09/05	21.8
DJ2-04		17/09/28	127	CW2-04		17/09/28	36.3
DJ2-05		17/10/12	195	CW2-05		17/10/12	31.4
DJ2-06		17/10/23	209	CW2-06		17/10/23	43.7
DJ2-07		17/11/03	352	CW2-07		17/11/03	38.5
DJ2-09		17/11/26	636	CW2-09		17/11/26	68.0
DJ2-10		17/12/12	635	CW2-10		17/12/12	67.0
DJ2-11		17/12/22	331	CW2-11		17/12/22	32.2
DJ2-12		18/01/08	368	CW2-12		18/01/08	38.5
DJ2-13		18/02/01	368	CW2-13		18/02/01	28.5
DJ2-14		18/02/05	324	CW2-14		18/02/05	32.9
DJ2-15		18/02/11	407	CW2-15		18/02/11	55.9
DJ3-01		100	17/05/25	137		CW3-01	100
DJ3-02	17/08/22		617	CW3-02	17/08/23	18.9	
DJ3-03	17/09/05		154	CW3-03	17/09/05	23.7	
DJ3-04	17/09/28		165	CW3-04	17/09/28	38.5	
DJ3-05	17/10/12		107	CW3-05	17/10/12	35.2	
DJ3-06	17/10/23		199	CW3-06	17/10/23	37.4	
DJ3-07	17/11/03		162	CW3-07	17/11/03	41.4	
DJ3-09	17/11/26		573	CW3-09	17/11/26	65.0	
DJ3-10	17/12/12		314	CW3-10	17/12/12	64.0	
DJ3-11	17/12/22		239	CW3-11	17/12/22	29.2	
DJ3-12	18/01/08		368	CW3-12	18/01/08	20.3	
DJ3-13	18/02/01		368	CW3-13	18/02/01	22.6	
DJ3-14	18/02/05		324	CW3-14	18/02/05	42.2	
DJ3-15	18/02/11		407	CW3-15	18/02/11	81.0	

성을 보여주었다.

이는 국내외 라돈과 지진과의 상관성 연구경향과 잘 일치하는 것으로 보인다. 일본 고베지진과 라돈변화 상관성을 보고한 Igarashi(1995)의 연구결과를 보면 1993년 11월부터 1995년 3월 까지 라돈의 농도에 대한 장기관측 자료에서 1994년 11월 말까지 약 60 Bq/L로 1년간 3배의 증가를 보였으며, 이후 약 250 Bq/L로 급격한 증가를 보인다 1995년 2월 규모 7.2의 고베지진이 발생하기 7일 전인 1월 10일 20 Bq/L로 급격하게 감소하는 변화를 보여주었다. 한반도 및 주변지역의 지진 발생자료와 라돈의 산출농도를 지속적인 모니터링을 통해 분석한 연구(Kim et al., 2003) 사례 등을 참고할 때 라돈의 변화량은 지진전조 인자로서 높은 가능성을 보여준다.

지진발생으로 인한 라돈가스의 농도 방출량의 변화는 지금까지 보고된 연구에 의하면 전체적으로 약 80% 정도가 증가하며, 약 20% 정도는 감소하는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 라돈가스의 증가와 감소는 지반응력의 변화에 의한 증가와

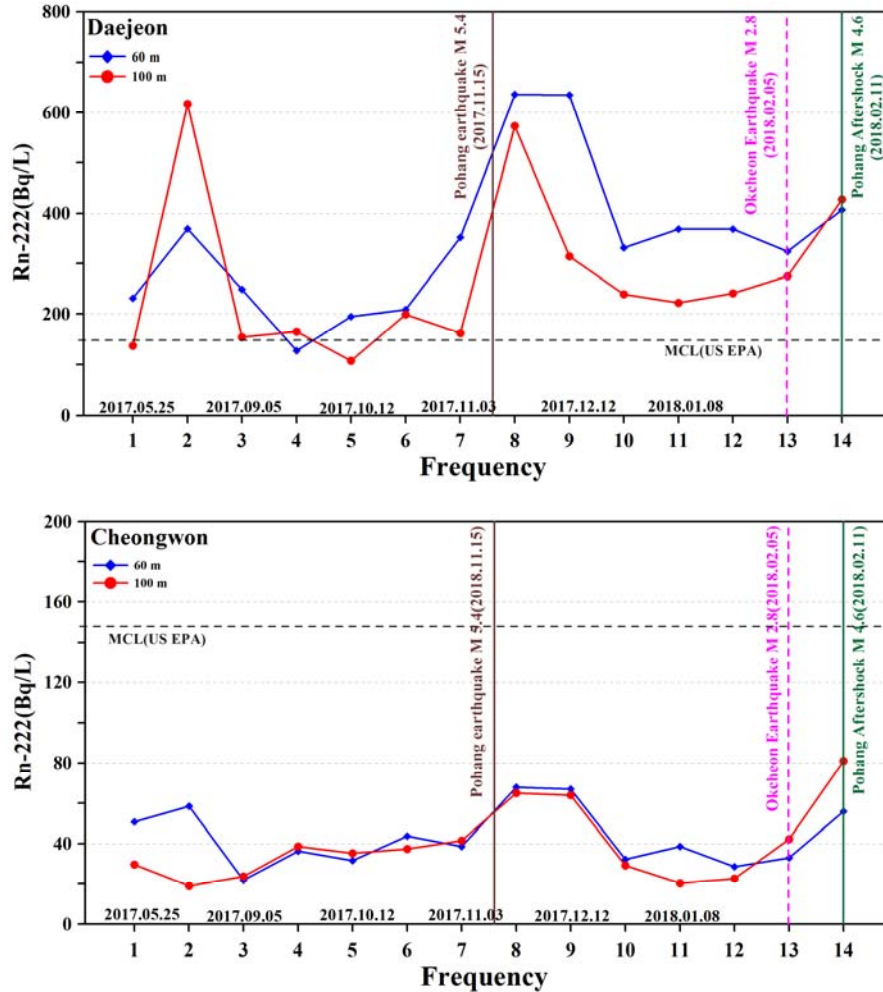


Fig. 5. Long-term variations of Rn-222 level in groundwater samples collected from the monitoring wells.

지반균열의 추가적인 발달로 인한 라돈가스의 확산으로 인한 감소 등으로 해석된바 있다(Kuo and Tsunomori, 2010).

다만 대전, 청원지역 지하수내 초기의 라돈의 농도가 국내 평균치보다 훨씬 높아 그들의 변동 폭이 상대적으로 큰 경향을 보여 지진전조 인자로서의 평가에 유용한 측면이 있다. 따라서 향후 라돈을 지진전조 연구의 인자로 활용시 초기(배경) 농도값의 높은 지하수공의 선정이 중요할 것으로 보인다.

지하수위의 변동

연구기간동안 포항지진과 여진 발생에 따른 지하수위의 변화를 지속적으로 하였다. 대전지역의 지하수위는 -2.96 ~ -2.30 m의 범위를 보이고, 평균 수위는 -2.81 m이며 청원지역의 지하수위는 -4.27 ~ -1.23 m의 범위를 보이고 평균 수위는 -3.07 m이다.

포항지진(M 5.4) 및 여진(M 4.6)의 영향으로 인한 지하수위의 변화 양상은 보이지 않으며 지하수위가 점점 강하하는 경향을 보이는데 이는 갈수기로 인한 지하수위가 감소하는 것으로 보인다. 그러나 2018년 2월 5일 옥천지진(M 2.8) 발생 이후 대전지역 관측정의 지하수위가 지진발생 전 -2.86 m에서 지진발생 후 -2.96 m로 수위가 증가했다가 다시 감소하는 것을 보이는데 이는 옥천지진(M 2.8) 진앙지와 대전 관측공과의 거리가 가깝기 때문으로 판단된다(Fig. 6a). 포항시 신광

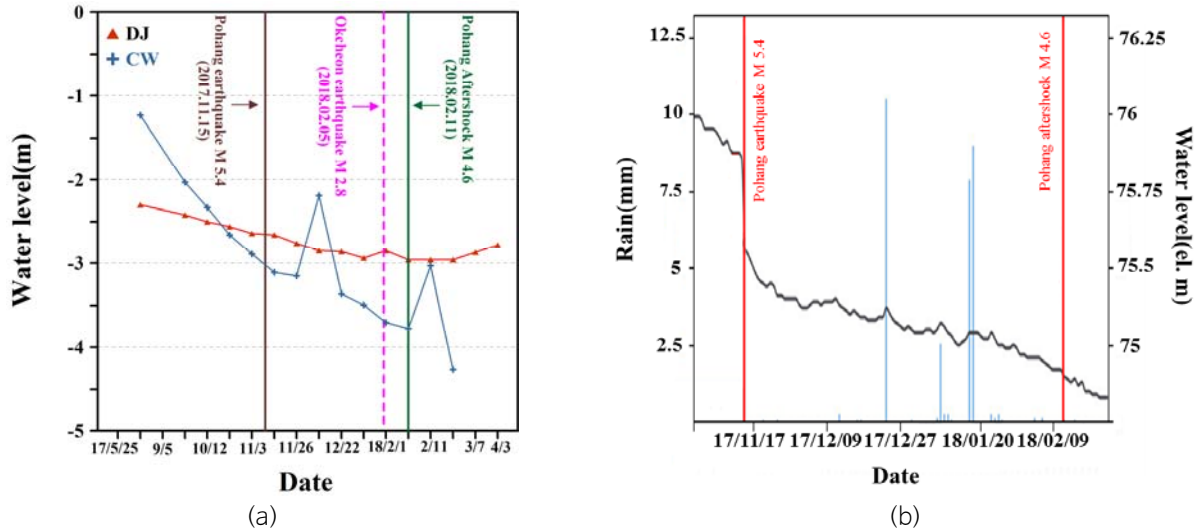


Fig. 6. Long-term variations of water level of the monitoring wells in the Daejeon and the Cheongwon area (a) and Pohang area (b) before and after Pohang earthquake.

면 부근에 있는 국가지하수 관측망에서 관측된 지하수위의 변화는 포항지진이 발생하기 전 -6.51 m에서 지진발생 직후 -6.87 m로 하강하는 양상을 보여주며 지진에 대한 민감한 반응성을 보였다(Fig. 6a). 국내외 연구 사례로 중국의 Huize 지역 관측공에서 Wenchan 지진($M_s=8.0$)이 발생 하였을 때 지하수위가 상승하였고 Lushan 지진($M_s=7.0$)이 발생하였을 때 지진 발생 이후 지하수위가 상승하는 것을 분석한 연구 사례와(Ye at al., 2015) 경주시 산내면 의곡리에 위치한 관측소에서 2016년 9월 경주지진 발생에 의해 지진발생 하루 전보다 0.49 m가 상승하는 것을 관측한 연구사례(Jeong 2016)가 있다. 이들 사례와 비교해 볼 때 지하수위 또한 주요 지진전조 인자로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

결론

한반도 지진에 대한 전조인자 연구로 대전, 청원지역 지하수 관측정에서의 심도별(-60 m, -100 m)로 화학성분과 라돈, 수위변화를 장기적으로 측정한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대전관측정의 특정심도에서 pH와 전기전도도는 포항지진발생 시기와 연관하여 비교적 일정한 상관성을 보였고, 그 외 현장 수질측정항목은 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다.
2. 주요화학 성분으로는 대전지역 관측정에서 지진발생시 Cl^- , SO_4^{2-} 의 농도가 감소와 증가의 비교적 뚜렷한 변화를 보이나, 청원지역 관측정에서의 Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- 의 농도 변화는 지진에 의한 변화인지, 강우량 혹은 계절적 영향 등의 영향인지 현재까지 자료로만 명확하지 않다.
3. 지하수내 라돈농도와 지진과의 상관성은 대전 및 청원 관측정에서 포항지진 발생이후 최대 약 3배 이상의 농도 증가를 보이는 등 지진과의 가장 뚜렷한 상관성을 보여주었다.
4. 지진발생에 따른 지하수위 변화는 확인되지 않는다. 그러나 옥천지진 이후 대전관측정에서 지하수위가 소폭 증가했다가 다시 감소하는 경향을 보이는데 이는 진앙지와 대전관측공과의 거리가 인접하여 수위의 변화를 보인 것으로 판단된다. 포항지역 국가지하수 관측망에서는 지진발생 직전부터 발생 직후까지 30.6 cm의 큰 폭의 하락을 보였다.

결론적으로 지진전조인자로서 지하수내 라돈의 함량 변화가 지진과의 가장 뚜렷한 상관성을 보이며, 수리화학 성분 중 pH, 전기전도도, HCO_3^- , Cl^- 성분이 비교적 일정한 상관성을 보여주었다. 지하수위는 포항지진 진앙지 10 km 이내 국가

지하수 관측망에서만 뚜렷한 변화를 보여주었다. 이 연구를 통하여 라돈가스, 지하수위, 특정화학성분이 지진전조 인자로서 활용 가능성을 확인하였으며, 이들 변화에 대한 지질학적 메카니즘에 대한 해석은 향후 추가적으로 연구해야할 방향이다.

사사

본 연구는 에너지기술평가원(과제번호: 20171510101960)의 연구비 지원으로 수행되었다.

References

- Cartigny, P., Jendrzewski, 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.
- Che, Y., Yu, J., Zhang, S., Fan, X., Guo, J., Zhang, T., Yang, J., 2002, A discussion on the records of water level “precursors” and their discussion in well Shuozhou, Shanxi province. *Acta Seismol. Sin.*, 15(2), 226-233.
- 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.
- 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 (M_J 5.5), *Radiation Protection Dosimetry*, 174(3), 412-418.
- Greenberg, A.E., Clesceri, L.S., Eaton, E.E., 1992, Standard methods for the examination of water and waste water, The American Public Health Association, Washington DC, 4-55 (in Korean with English abstract).
- Huang, F.Q., Jian, C.L., Tang, Y., Xu, G.M., Deng, Z.H., Chi, G.C., 2004, Response changes of some wells in the mainland subsurface fluid monitoring network of China, due to the September 21, 1999, MS7.6 Chi-Chi earthquake. *Tectonophysics*, 390(1-4), 217-234.
- Huang, F., Li, M., Ma, Y., Han, Y., Tian, L., Yan, W., Li, X., 2017, Studies on earthquake precursors in China: A review for recent 50 years. *Geodesy Geodyn.*, 8, 1-12.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., Sano, Y., 1995, Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan, *Science (New York)*, 269, 60-61.
- Jeon, W.H., Kwon, K.S., and Lee, J.Y., 2011, Evaluation of groundwater level changes in Korea due to the earthquake in Japan (magnitude 9.0 in 2011), *The Geological Society of Korea*, 47(6), 695-706. (in Korean with English abstract).
- Jeong, C.H., Kim, M.S., Lee, Y.J., Han, J.S., Jang, H.G., Jo, B.U., 2011, Hydrochemistry and occurrence of natural radioactive materials within borehole groundwater in the Cheongwon Area, *The Journal of Engineering Geology*, 21(2), 163-178 (in Korean with English abstract).
- Jeong, C.H., Ryu, K.S., Kim, T.S., Han, J.S., and Jo, B.U., 2013, Geochemical occurrence of uranium and Radon-222 in groundwater at test borehole Site in the daejeon area, *The Journal of Engineering Geology*, 23(2), 171-186 (in Korean with English abstract).
- Jeong, S.Y., Senapathi, 2016, A relationship between water level of national groundwater monitoring wells and Kyeongju earthquake, *The Journal of Engineering Geology*, 3-4.
- Kim, Y.S., Lee, C.M., Lee, S.I., Iida, T., Yoshioka, K., 2003, A Study of the prediction of earthquake occurrence by detecting radon radioactivity, *Journal of the Environmental Sciences*, 12(6), 677-688. (in Korean with English abstract).

- Kuo, M., Fan, K., Kuochen, H., Chen, W., 2006, A mechanism for anomalous decline in radon precursory to an earthquake, *Groundwater*, 44(5), 642-7.
- Kuo, T., Tsunomori, F., 2010, A mechanism for radon decline prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake in Japan, *Radiation Measurements*, 45(1), 139-142.
- Lee, H.A., Hamm, S.Y., Woo, N.C., 2017, Groundwater monitoring network for earthquake surveillance and prediction, *Econ. Environ. Geol.*, 50(5), 401-414 (in Korean with English abstract).
- Liu, C., Wang, G., Zhang, W., Mei, J., 2009, Coseismic responses of groundwater levels in the three gorges well-network to the Wenchuan Ms8.0 earthquake. *Earthq. Sci.*, 22(2), 143-148.
- 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, doi: 10.1038/srep37939.
- 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, *International Workshop on Earthquakes in North Iceland*.
- Tsunomori, F., Tanaka, H., 2014, Anomalous change of groundwater radon concentration monitored at Nakaizu well in 2011, *Radiation Measurements*, 60, 35-41.
- Woo, N.C., Piao, J., Lee, J., M., Lee, C.J., Kang, I.O., Choi, D.H., 2015, Abnormal changes in groundwater monitoring data due to small magnitude earthquakes, *The Journal of Engineering Geology*, 25(1), 21-33 (in Korean with English abstract).
- 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.