

국내 연구진의 지하수를 이용한 지진 연구 동향 분석

윤설민¹ · 함세영^{2,*} · 정재열³ · 이현아⁴

¹부산대학교 BK21지구환경시스템 교육연구단 지질환경과학과, 46241, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

²부산대학교 지질환경과학과, 46241, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

³한국원자력환경공단, 38062, 경북 경주시 충효천길 19

⁴연세대학교 지구시스템과학연구소, 03722, 서울특별시 서대문구 연세로 50

Review of Earthquake Studies Associated with Groundwater by Korean Researchers

Sul-Min Yun¹, Se-Yeong Hamm^{2,*}, Jae-Yeol Cheong³, and Hyun A Lee⁴

¹BK21 School of Earth and Environmental Systems, Department of Geological Sciences,
Pusan National University, Busan 46241, Korea

²Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

³Korea Radioactive Waste Agency, Gyeongju 38062, Korea

⁴Earth System Sciences Research Center, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

Abstract: Earthquakes have occurred owing to movements on a fault since several billion years ago. Research on the relationship between earthquakes and groundwater began in the 1960s in the United States, but related works, including hydrogeochemistry research, only began in the 2010s in South Korea. In this study, domestic studies on the relationship between earthquakes and groundwater until 2021 were collected from the Web of Science and characterized by subject area (groundwater level, hydrogeochemistry, combination of the two, and others). The results showed that the number of published articles per year was positively correlated with the 2011 Tohoku earthquake, 2016 Gyeongju earthquake, and 2017 Pohang earthquake, with the maximum numbers observed in 2011, 2018, 2019, and 2020. Most studies on the relationship between earthquakes and groundwater level addressed groundwater level fluctuations in the duration of the subject earthquake, with little consideration of the precursors. Groundwater level monitoring data, as well as hydrogeochemical information and microbial communities, may contribute to a more detailed understanding of groundwater flow and chemical reactions in bedrock caused by earthquakes. Therefore, the establishment of a national groundwater monitoring network for seismic monitoring and prediction is required.

Keywords: Research trend, groundwater level, hydrogeochemistry, Gyeongju earthquake, Pohang earthquake, seismic monitoring system

요약: 지진은 지각내 단층운동과 함께 수십억 년 전부터 발생하여 왔다. 1960년대부터는 미국에서는 지진과 지하수위의 연관성 연구를 본격적으로 시작하였으나, 국내에서는 2010년 경부터 지진과 지하수위 및 수리지화학적 연관성에 대한 연구를 시작하였다. 본 연구에서는 국내학자들이 과거부터 2021년까지 연도별로 지진과 지하수의 관련성을 연구한 논문을 Web of Science에서 검색하고, 분야별(지하수위, 수리지화학, 지하수위와 수리지화학 병행, 그 외 분야) 연구 특성을 검토하였다. 국내학술지에 게재된 지진과 지하수 관련성 연구 논문을 보면, 연도별 논문 편수는 2011년에 동일본

*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-2252

대지진, 2016년에 경주지진, 2017년에 포항지진과 발생과 관련되며, 이에 따라 2011년, 2018년, 2019년, 2020년에 국내 및 국제학술지 게재 논문수가 증가하였다. 대부분의 지하수위와 지진의 관련성 연구는 지진과 동시기의 지하수위 변화에 관한 연구이며, 지진 전조와 관련한 연구는 거의 없다. 지하수위 관측자료와 함께 여러가지 수리지화학적 정보와 미생물은 지진에 의한 기반암내 지하수의 유동과 화학적인 반응을 보다 상세하게 이해하는데 도움을 줄 수 있다. 지진 감시 및 예측을 위해서는 지진감시를 위한 지하수관측공 네트워크를 전국적으로 구축할 필요가 있다.

주요어: 지진연구 동향, 지하수위, 수리지화학, 경주 지진, 포항 지진, 지진감시시스템

서 론

지진은 수십억 년 전부터 지각의 단층운동과 함께 발생하여 왔다(Vilova et al., 2016). 아리스토텔레스는 최초로 지진을 자연현상에 기반하여 설명하였으며 지구내부의 바람이 휘몰아치면서 지구 표면의 흔들림이 가끔씩 발생한다고 하였다(<https://projects.eri.ucsb.edu/understanding/history.html>). 1850, 1860, 1870년대에, 세명의 유럽 과학자는 지진학의 초석을 다졌다. 로버트 말레트(Robert Mallet)는 더블린 출신의 공학자로서 화약을 폭발시켜 지진과 속도를 측정하였으며, 최초로 지진의 깊이를 측정하는 사람 중의 한명이다. 말레트와 동시기에, 프랑스의 알렉시스 페레이(Alexis Perrey)는 계절과 달의 위상에 따라 지진의 주기적인 변동을 분석하는 연구를 하고 있었다. 그리고 이탈리아에서는 루이지 팔미에리(Luigi Palmieri)가 전자기 지진계를 발명하여 이를 베수비우스 화산 근처와 나폴리대학교에 설치하였다. 이 지진계는 인간이 감지할 수 없는 정도의 지진을 계속적으로 관측하는 최초의 지진계였다. 판구조론이 정립된 이후 지구조적인 관점에서 지각의 운동을 이해하고, 판 경계부의 지진발생 메커니즘이 밝혀지며 1960년대 중반부터 지진 예측의 가능성이 커지게 되었다(Korea Meteorological Administration, 2010).

미국에서는 Blanchard and Byerly (1935)가 1934년 12월 30일 멕시코의 바하 캘리포니아에서 발생한 Mw 6.3 지진에 의한 캘리포니아의 Lodi시의 지하수공에서의 지하수위 변화를 보고한 바 있다. 1960년대부터는 미국 지질조사소를 중심으로 지진과 지하수위의 연관성 연구를 본격적으로 시작하였으며(Vorhis, 1967), 그 뒤 다양한 연구기관과 대학에서 연구를 해 오고 있다(Muir-Wood and King, 1993; Wang and Chia, 2008). Vorhis (1967)는 1964년 3월 27일 발생한 알래스카 지진에 수반하여 코네티컷, 델라웨어, 로드아일랜드 주를 제외한 미국 전역의 1,450개 이상

의 수위 기록계 자료(절반은 지하수위 자료, 절반은 하천수위 자료)로부터 수리적 반응을 보고하였다. Muir-Wood and King (1993)는 정단층에 의한 지진은 하천유량과 샘의 용출량을 증대시키고, 순수한 역단층의 지진은 지하수위와 샘의 용출량을 감소시키거나 변화시키지 않는다고 하였다. 일본에서 지진과 연관한 지하수 관측 연구는 1970년대 중반에 시작되었다(Wakita, 1975, 1977). Wachita (1975)은 1974년 5월 9일 발생한 이즈-한토-오키(Izu-Hanto-Oki) 지진에 수반된 지하수위 변동을 지진 동시기 지각 변형에 의한 것이라고 제안하였다. Gordon (1970)은 호주에서 1968년에 발생한 규모 6.6의 Meckering 지진이 발생하기 이전의 지하수위 상승을 보고하였으나, Gregson et al. (1976)은 그 지하수위 상승이 강우의 결과라는 것을 밝혔다. 중국에서는 Du (1989)가 Huabei 지역에서 지진 전에 라돈 농도 변화가 발생함을 확인하였다. 또한 Wan (1992)는 Yunnan 지역의 10여년간의 라돈 측정 자료로부터 지진 전에 농도 변화가 발생함을 제시하였다. 이와 같이 외국에서는 1960년대부터 지진에 의한 지하수 변동을 연구해 오고 있다.

삼국사기에 서기 2년부터 1904년까지 기록된 2,161회의 국내 역사지진 중 진도 V 이상의 지진은 440회(20.4%)로 기록되어 있으며, 이 중에서 인명피해와 건물 파괴를 일으킨 진도 VIII-IX의 지진은 15 회였다(Briefing report of Korea Meteorological Administration on 16 April 2012, <https://www.kma.go.kr/kma/news/press.jsp?bid=press&mode=view&num=1192306&page=10&&field1=&text1=&field2=subject&text2=%EC%A7%80%EC%A7%84>). 일본에서 2011년 3월 11일에 발생한 동일본대지진과 이에 수반된 지진해일로 인한 후쿠시마 원전사고는 다량의 방사성 물질(¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁶⁰Co 등) 방출을 유발하였다. 이는 우리나라 국민들에게 방사성 물질에 의한 해양오염과 수산물 오염 그리고 해안지역 피해의 위험성을 상기시켰다(Ha et al., 2015; Yu et al., 2015). 그

이후 2016년 9월 12일의 경주지진(M_w 5.4)과 2017년 11월 15일의 포항지진(M_w 5.4)은 국민들에게 지진의 위협성에 경각심을 확실하게 심어주었다. 국내에서는 2009년에 Hamm et al. (2009)와 Lee et al. (2009)이 한반도 주변 지진활동에 의한 제주도에서의 지하수위 변동을 최초로 보고하였다. 그 이후 2010년에 Ok et al. (2010)이 제주도 서부의 지질과 지진에 의한 지하수위 변동 특성에 관한 논문을 최초로 국내 학술지에 게재하였다. 그리고 2011년부터 지하수와 지진의 연관성에 대한 논문들이 본격적으로 나오기 시작하였다(Jeon et al., 2011; Lee, S.-H. et al., 2011; Lee, H. A et al., 2011). Yun et al. (2019)은 양산단층 지역과 제주도의 지하수위 자료로부터 경주 지진과 포항지진의 영향을 분석한 바 있고, Jeong et al.(2018)는 2017년 포항지진과 대전, 청원 지역 지하수내 라돈 및 화학성분의 상관성을 제시하였다.

Lee, H. A et al. (2017)은 우리나라에서 지진을 감시, 예측하기 위해서 지하수 관측망을 활용하는 방안을 제시하였으며, Lee, H. A et al. (2021)은 국내시범지역의 지하수 모니터링 네트워크의 2018년부터 2020년 까지의 지하수위 및 수온 자료로부터 지진 감시 및 예측의 가능성을 제시하였다. Lee, J. H. et al. (2020)은 지진에 의한 지하수의 주요 이온, 물 안정동위원소, 미량원소의 변화에 대한 결과들을 고찰하였다. 한편, Yun et al. (2021)은 2001년부터 2020년까지 전세계에서 수행된 지진과 관련된 지하수 수위, 수질, 라돈, 원격탐사, 전기비저항, 중력, 지자기 연구의 분야별 동향을 분석 결과를 제시하였다. Lee, J. Y. et al. (2017)은 지난 50년간의 국내 지하수 분야의 전체적인 연구 동향을 고찰하였다.

본 연구에서는 지하수와 지진의 연관성에 대한 국내 연구의 특성을 살펴보고자 하였다. 이에 따라 과거부터 2021년까지 국내 학자들이 국내 및 국제 학술지에 게재한 논문들을 Web of Science (<https://apps.webofknowledge.com/>)에서 검색하였다. 그리고 연도별로 연구의 경향성을 분석하고, 분야별 (지하수위, 수리지화학, 지하수위와 수리지화학 병행, 그 외 분야) 연구 특성을 분석해 보았다.

연구 방법

국내학자들이 지하수를 이용한 지진 연구를 과거부터 현재까지 국내외 국제 학술지에 게재한 논문을

Web of Science (<https://apps.webofknowledge.com/>)에서 검색하였다. 검색방법은 필드 검색 키워드에서 저자 키워드 검색 방식인 AK 필드 태그와 초록 검색 방식인 AB 필드 태그를 이용하였다. 그리고 논문을 검색에서는 키워드와 초록에 earthquake를 반드시 포함시키고, 지하수(groundwater)를 포함시켰다. 국내학술지(KCI)와 국제학술지(SCIE) 검색식은 아래와 같다.

국내학술지(KCI) 논문 세트 #1: (AK=(지진)) AND AK=(지하수) OR (AB=(지진) AND AB=(지하수))

국제학술지(SCIE) 논문 세트 #2: (AK=(earthquake*) AND AK=(groundwater)) OR (AB=(earthquake*) AND AB=(groundwater))

국내학자의 논문을 검색하기 위해 국가 필터는 South Korea로 제한하였으며, 지질학 관련 연구만을 검색하기 위해 Web of Science에서 제공하는 분야 중 Geology, Geosciences Multidisciplinary, Water Resources, Multidisciplinary Sciences를 설정하였다. 중복되는 논문을 목록에서 제외하기 위해 국제저널로 인식되는 국내저널을 제외하였으며, 논문의 주제가 지진과 지하수의 관련성이 아닌 논문은 검색에서 제외하였다.

연구 결과

국내 및 국제 학술지 게재논문 동향

국내학술지에 게재된 지진과 지하수 관련성 연구 논문 편수를 보면, 과거부터 2021년까지 총 22편의 논문이 게재되었다(Fig. 1). 보면, 2011년, 2018년, 2020년에 각각 5편의 논문이 게재되었다. 한편, 국내 학자들이 국제 SCIE 학술지에 게재한 지진과 지하수 관련성 연구 논문 편수는 과거부터 2021년까지 게재된 논문 편수는 총 24편이며, 연도별 논문 편수는 2020년이 6편으로 가장 많고, 2019년이 5편 그리고 2021년 4편, 2013년, 2017년이 각 3편씩이다(Fig. 1). 따라서, 국내와 국제 학술지에 게재된 논문 편수는 거의 같다. 국내 학술지 게재 논문을 보면, 2012년과 2013년에는 논문 발표가 없었으며, 그 이외의 연도에는 각 1편씩만 게재되었다(Fig. 1). 이는 논문 편수가 지진 발생과 크게 연관되는 것을 지시한다. 즉, 2011년에는 동일본대지진이 발생한 해이며, 2016년에는 경주지진 그리고 2017년에는 포항지진이 발생하였다. 따라서 2018년과 2020년에는 경주지진, 포항지진 그리고 그 여진들과 관련된 연구로 인해서 논문 편수

가 증가하였다(Jang et al., 2020; Kim et al., 2018; Lee, 2016; Lee et al., 2018; Lee, H.A et al., 2020; Choi et al., 2018). Lee, S.-H. et al. (2011)은 2010년 6월 13일 M_w 7.7 수마트라지진에 의한 제주도의 지하수 관측공의 지하수위 변화를 보고하였으며, Lee, H. A et al. (2011)은 2007년 1월 20일 규모 4.7의 오대산지진에 의한 국가지하수관측망 자료상의 지하수위 변동을 보고하였다. Lee (2016)는 2016년 경주지진에 의한 지하수위 변동을 진앙에 인접하고 있는 국가지하수관측망 5개소의 자료를 이용하여 해석하였으며, 경주산내 관측소 암반관측정의 지하수위 변화는 지진의 영향으로 보였다. Lee et al (2018)은 양산지역 지하수 관측공에서의 수위 상승을 지진전조 현상일 가능성이 있다고 보았다. Kim et al. (2018)은 국가지하수관측망 자료와 경주지진의 연관성을 제시하였으나, 지하수위 측정 간격이 1시간이므로 지진에 의한 지하수위 변동의 정확한 해석에는 한계성이 있다. Choi et al. (2018)은 포항지진이 발생하기 약 한 달 전부터 국가지하수관측망 6개소에서 5분 간격으로 측정된 지하수위와 함께 형산강의 5개 지점의 수위와 하천 유량을 이용하여 포항지진과의 연관성을 고찰하였다. 그 밖에도 Woo et al. (2015)는 2012년 4월부터 6월까지 3개월간 국가지하수관측망의 김천지좌, 강진성전, 공주정안3개소 자료를 이용하여 M3.0 내외의 소규모 지진에 의한 영향을 제시하였다.

국제학술지에 게재된 연도별 논문 편수를 보면, 2012년부터 논문이 게재되기 시작하였으며, 국내학술지의 경우와 같이 지진 발생과 논문 편수가 밀접하게 연관됨을 지시한다. 2012년과 2013년에는 외국에서 발생한 대규모지진과 관련된다(Lee and Woo, 2012; Lee et al., 2012; Lee, S.-H. et al., 2013a, 2013b). Won et al. (2019)을 제외하면, 지진규모 2011년 동일본대지진과 관련된 지하수위 변화 연구는 모두 2012년과 2013년에 발표되었다. Lee and Woo (2012)는 동일본대지진과 관련된 국가지하수관측망에서 1시간 간격으로 측정된 지하수위 변화를 분석하였으며, 320개소 중 46개소에서 지하수위 변화를 확인하였다. 한편, Lee et al. (2012)에 의하면, 진앙이 3,000 km 이내 거리의 규모 7.0 이상의 지진들에 의해서 제주도내 대부분의 관측공의 지하수위가 반응하였다. 특히, 두개의 관측공에서는 지진에 의한 지하수위 변화와 지진과의 진폭 간의 상관관계수가 0.9 이상의 매우 높은 상관성을 보여주었다. Lee, S.-H. et

al. (2013a)은 제주도 화산암지역의 관측공의 지하수위, 수온, 전기전도도를 이용하여 2011년 동일본대지진에 의한 영향을 분석한 결과를 제시하였다. Lee, S.-H. et al. (2013b)은 동일본대지진의 전진, 본진, 여진에 의한 제주도 화산암지역 관측공의 지하수위 변화 특성을 제시하였다. Cheong et al. (2013)은 2004년 12월 26일에 발생한 규모 9.0의 수마트라지진에 의한 제주도의 지하수 관측공에서의 지하수위, 수온, 전기전도도 변화를 분석하였다.

2017, 2019, 2020년에는 경주지진, 포항지진과 관련하여 상대적으로 많은 논문들이 발표되었다(Lee, S.-H. et al., 2017; Yun et al., 2019; Kaown et al., 2019; Kim, J. et al., 2019; Hwang et al., 2020; Kim, H. et al., 2020; Lee, J.M. et al., 2020). Lee, S.-H. et al. (2017)는 제주도에서 관측된 2016년 경주지진과 구마모토지진에 의한 지하수위 변화를 비교 분석하였다. Hong et al. (2017)은 M_L 5.1 및 M_L 5.8 경주지진에 의한 Coulomb 응력 변화(-4.9~2.5 bar)의 연구에서 정적 응력이 감소하는 지역에서 지하수위가 상승한다고 보고하였다. Kaown et al. (2019)는 2016년 경주지진의 영향을 진앙 주변의 국가지하수관측망의 총적대수층과 암반대수층 지하수위와 전기전도도, 비활성 기체, $\delta^{18}O$, δD , 3H , ^{13}C , ^{222}Rn 를 이용하여 분석하였다. Hwang et al. (2020)은 제주도의 지하수위 자료를 이용하여 경주지진 발생 이전의 지하수위 변화로부터 전처리(3점 필터링, 밴드-패스 필터링, 스펙트럼 분석)와 후처리(가중 이동평균법, 히스토그램, 스펙트럼 분석)를 통해서 지진을 예측하는 기법을 제안하였다. Lee, J. M. et al. (2020)은 2016년 경주지진의 진앙 주위에 위치하는 국가지하수관측망의 총적대수층과 암반대수층의 1시간 간격으로 측정된 지하수위를 이용하여 지진의 영향을 분석하였다. Kim, J. et al. (2019)은 2016년 경주지진의 진앙 주변에 위치하는 국가지하수관측망의 지하수 관측공으로부터 지하수위, 수온, 전기전도도, 수리지화학적 인자, ^{222}Rn , 스트론튬 동위원소 자료를 획득하여 경주지진에 의한 지하수계의 반응을 분석하였다. Kim, H. et al. (2020)은 2016년 경주지진의 진앙지 주변의 국가지하수관측망으로부터 총적대수층과 암반대수층내 지하수위, 수리지화학, 라돈, 스트론튬, 미생물 자료를 이용하여 지진과의 관련성을 분석하였으며, 지하수내 미생물이 지진의 영향을 나타내는 좋은 지시자가 될 수 있다고 제안하였다. 또한, Kim (2021)은 심부 지각유체의

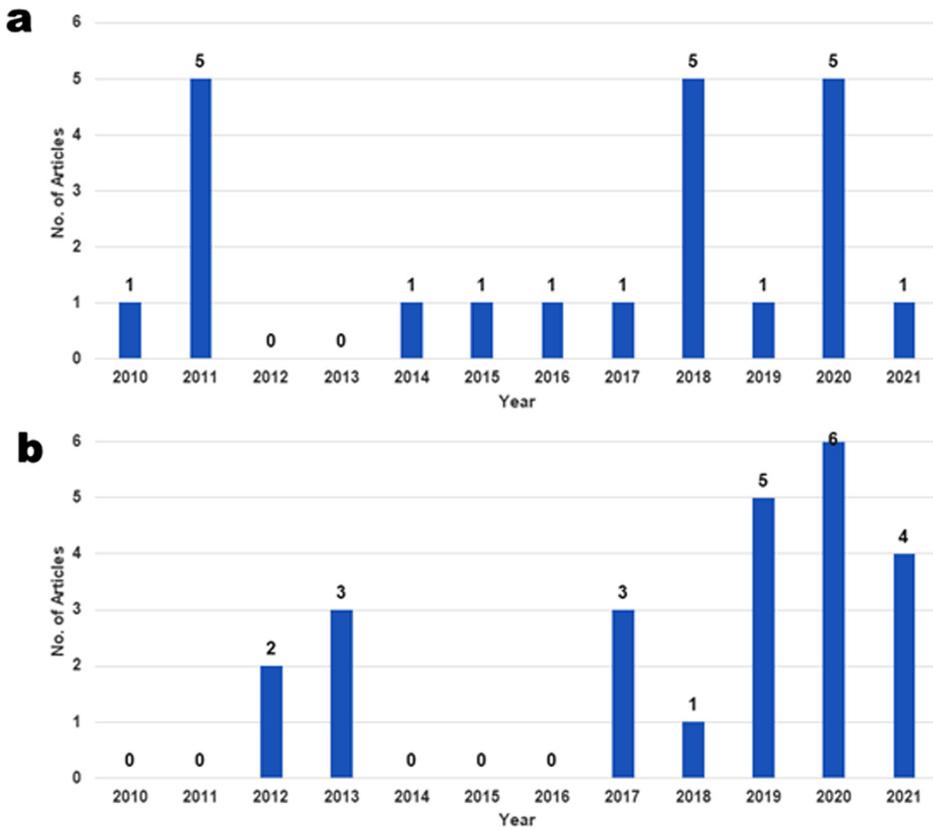


Fig. 1. Numbers of articles published in (a) domestic journals and (b) SCIE (Science Citation Index Expanded) journals.

수리지화학적 및 미생물 군집의 변화를 이용하여 지진을 예측할 수 있으며, 단층대의 대수층을 모니터링함으로써 지진의 위험성을 평가할 수 있을 것이라고 하였다. Lee, S.-H. et al. (2020)는 한반도 서해안의 지하수 관측공에서 지하수위, 수온 및 전기전도도 공내검층 그리고 담-염수 경계 모니터링을 통하여 의해서 경주지진에 대한 대수층의 반응을 분석하였다. Lee, S.-H. et al. (2021)은 2016년 경주지진에 의한 충북 영동군의 지하수 관측공의 지하수위와 수온 변화 특성을 분석하였다.

Yun et al. (2019)은 양산단층대에 위치하는 지하수 관측공에서 측정된 지하수위로부터 국내 경주지진과 포항지진을 포함하는 국내외 지진에 의한 영향을 분석하였다. 이 연구에서는 관측공과의 거리가 18000 km 떨어진 칠레지진(M_w 8.3, 2015년 9월 16일 발생)에 의해서도 지하수위 변화(3.7 cm)가 감지되었다. Kim, J et al. (2020)은 국가지하수관측망의 총적대수층과 암반대수층 지하수위와 수리지화학 분석자료

(Na, K, Ca, Mg, Cl, NO_3 , SO_4 , HCO_3), 동위원소 분석자료(^{18}O , 2H , Sr, ^{222}Rn)를 이용하여 2017년 포항지진의 영향을 분석한 바 있다. 포항지진의 발생원인은 지열증진시스템(enhanced geothermal system)과 관련하여 인위적인 균열대 생성을 위한 물 주입 때문이라는 연구 결과가 Kim et al. (2018)의 의해서 보고되었다. Lee et al. (2019)은 주입된 물에 의한 압력이 지진을 일으킬 수 있으므로 개선된 지열시스템 적용시에 신중한 관리가 요구된다는 점을 상기시켰다. 또한, Yeo et al. (2020)은 물 주입에 의한 포항지진의 발생 메커니즘을 공극압력 모델링과 쿨롱 정적 응력전이(stress transfer) 모델링으로 해석하였다.

연구 분야별 경향성

지하수와 지진의 연관성 연구는 분야별로 크게 지하수위, 수리지화학, 지하수위와 수리지화학 병행, 그 외 분야)로 구분할 수 있다. 그리고 수리지화학 분야에는 화학성분, 전기전도도, 동위원소, ^{222}Rn , 미생물

을 포함하였다. 국내학술지 논문을 살펴보면, 총 22편 중 지하수위 연구가 9편으로 가장 많고, 지하수위와 수리지화학을 병행한 연구까지 포함하면 13편으로서 과반수를 넘는다(Fig. 2). 한편, 국제 SCIE 학술지 논문을 살펴보면, 총 23편 중 지하수위 연구가 10편으로 가장 많고, 지하수위와 수리지화학을 병행한 연구까지 포함하면 17편으로서 대부분의 논문이 지하수위와 지진의 관련성에 관한 논문이다. 따라서 국내의 학술지에 게재된 논문 중 지하수위와 지진의 관련성 연구가 대부분임을 알 수 있다. 또한 지하수위와 지진의 관련성 연구는 중 대부분은 지진과 동시기의 지하수위 변화에 관한 연구이며(Lee, S.-H. et al., 2011; Lee, H. A et al., 2011, 2020; Jang et al., 2020; Kim et al., 2018; Lee, 2016; Lee et al., 2018; Choi et al., 2018), 지진 전조에 관한 연구는 거의 없다(Hwang et al., 2019; Lee, H. A et al., 2017). Lee, H. A et al. (2017)은 지진 발생 이전의 지하수위 변동 양상으로 지진 예측 가능성을 제안하였다. Hwang et al. (2019)은 경주지진 발생 이전에 제주도에서 관측된 1분 간격의 지하수위 관측자료를 주파수 영역에서 분석하여 지진 발생 적어도 8시간 이전에 지하수위의 이상변동을 감지할 수 있었음을 보고하였다. 이는 지하수위 관측이 본진 발생 이전에 지하수위의 이상변동을 보여줌을 제시한 것이며, 분석 기법을 개선하면 지진 예측이 실제로 가능하다는 것을 보여주는 것이다.

국내학술지 중 순수하게 수리지화학만 연구한 논문은 4편이고, 국제 SCIE 학술지에서는 순수하게 수리지화학만 연구한 논문은 1편 뿐이다. 한편, 국내학술지 중에서는 지하수위와 수리지화학을 병행한 논문은 3편인 반면에 국제 SCIE 학술지에서는 지하수위와 수리지화학을 병행한 논문은 7편으로서 국내학술지 보다 배 이상 많다. 이는 국제학술지에서는 지하수위와 함께 여러가지 수리지화학적 방법들을 이용함으로써 지진과 지하수의 관련성을 보다 잘 이해하고자 한 결과이다. 지하수위만을 이용한 연구는 많으나 수리지화학만을 이용한 연구는 상대적으로 적다. 지하수위가 지진을 영향을 가장 잘 대표하기 때문이며, 수리지화학적 방법들은 지하수위를 보완하여 지진의 영향을 보다 상세하게 규명하는 도구가 되기 때문이다. Cheong et al. (2013)의 2004년 규모 9.0의 수마트라지진에 의한 제주도의 지하수위, 수온, 전기전도도 변화 분석에서는 총 111개 관측공 중 지하수위는

25개 관측공에서, 그리고 전기전도도와 수온은 각각 11개공과 9개공에서만 변화를 보였다. 이는 수온과 전기전도도보다는 지하수위가 지진에 대해서 더 민감하게 반응한다는 것을 지지한다. Lee, S.-H. et al. (2020)은 M_L 5.8과 5.1경주지진에 의한 지하수위, 수온, 전기전도도의 시간적인 변화와 수온-전기전도도의 수직적인 변화, 그리고 담-염수 경계 변화를 분석하였다. Kim, H. et al. (2020)은 진양 주변의 충적대수층과 암반대수층내 지하수위, Na, K, Ca, Mg, Cl, NO_3 , SO_4 , HCO_3 , ^{18}O , ^2H , Sr, ^{222}Rn , ^3H , ^4He , 미생물 분석을 이용하여 2016년 경주지진의 지진이 대수층을 변화시켰다는 것을 보고하였으며 *Flavobacterium*와 *Pseudomonas*가 우점함을 보고하였다. 또한 Ryu et al. (2022)은 지열증진시스템을 위한 지열공들에서 지하수위, 수온, 미생물 자료로부터 2017년 포항지진 발생 전후의 변화를 비교·분석하였다. Kim, H. et al. (2020)과 Ryu et al. (2022)은 지진의 영향으로 특정 미생물이 우점함을 보고하였다. Kim, J et al. (2020)은 지하수위, 수온, 전기전도도, Na, K, Ca, Mg, Cl, NO_3 , SO_4 , HCO_3 , ^{18}O , ^2H , Sr, ^{222}Rn 와 2017년 포항지진의 관련성 연구에서 지화학적 자료들에 의해서 지진에 의한 담-염수 혼합, 수암반응(water-rock interaction), 심부 유체의 상승, 기반암의 단열 열개를 설명하였다. 따라서, 여러가지 수리지화학적 정보와 미생물 군집구조는 지진에 의한 기반암내 지하수의 유동과 화학적인 반응을 보다 상세하게 이해하는데 도움을 줄 수 있다. 주기적인 지하수 시료 채취에 의해서 특정 시기의 수리지화학적 특성(무기용존성분, ^{18}O , ^2H , Sr, ^{222}Rn , ^3H , ^4He 등을 알 수 있으므로 (Jeong et al., 2018; Kim, J. et al., 2019, 2020), 시간적인 연속성을 가지고 지진과의 관련성을 정확하게 판단하는데는 어려움이 있다. Jeong et al. (2018)은 대전과 청원 지역 지하수공에서 2017년 5월 25일부터 2018년 2월까지 주기적으로 -60 m, -100 m 심도에서 채취한 지하수의 ^{222}Rn 및 화학성분과 지진의 연관성을 제시한 바 있다.

토 의

지하수위 관측을 이용한 지진 감시 및 예측을 위해서는 원칙적으로 관측 시간간격이 충분히 짧아야 한다(Sugisaki, 1978; Lee and Woo, 2012). 그러나, 현재까지 국내에서는 대부분 국가지하수관측망에서 1

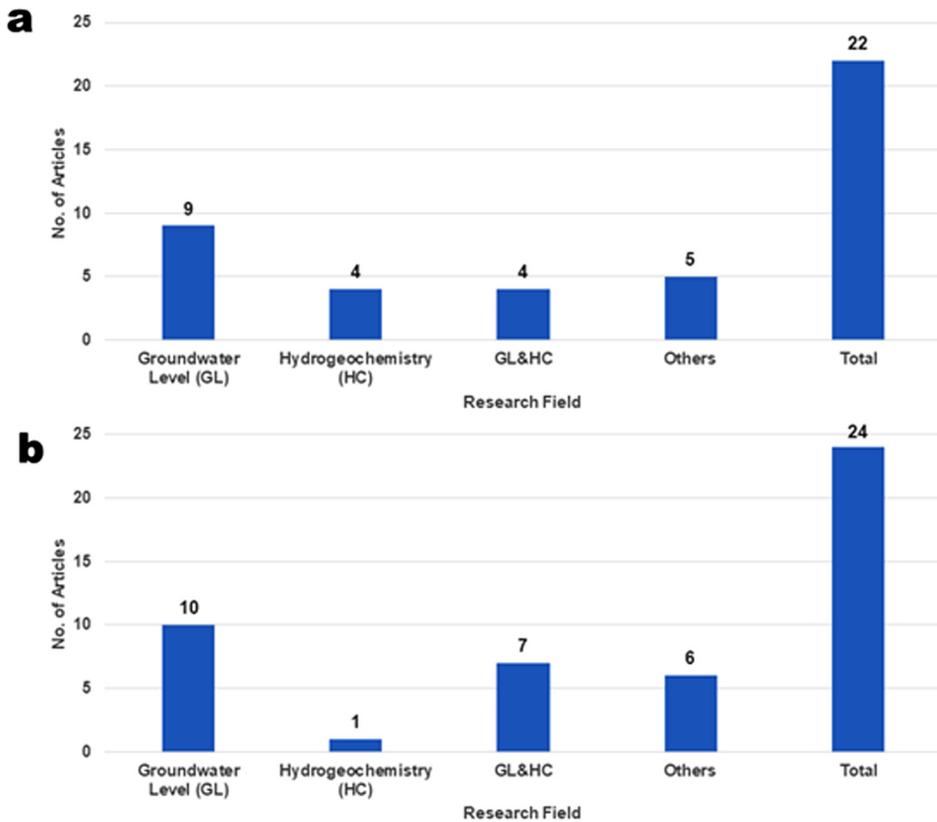


Fig. 2. Numbers of articles published depending on research fields (groundwater level, hydrogeochemistry, groundwater level & hydrogeochemistry, the rest) in (a) domestic journals and (b) SCIE (Science Citation Index Expanded) journals.

시간 간격으로 지하수위를 측정된 자료를 이용하여 지진 연구를 한 사례가 많다(Kim et al., 2018; Kaown et al., 2019; Lee and Woo, 2012; Lee, J.M. et al., 2020; Woo et al., 2015). 예외적으로 제주도의 지하수관측공(Lee, S.-H. et al., 2011, 2012, 2013a, 2013b, 2017; Hwang et al., 2019)과 국내시범지역 지하수관측공 네트워크에서는 1분 간격으로 지하수위를 측정된 예가 있다(Yun et al., 2019; Lee, H.A et al., 2021). 따라서, 앞으로는 지진 감시 및 예측을 위한 지진감시를 위한 지하수관측공 네트워크를 전국적으로 구축할 필요가 있다. 이때 지하수위 관측을 위한 시간 간격은 적어도 1분 또는 초 단위로 하여야 할 것이다. 또한 지하수위 관측시에는 수온과 전기전도도를 함께 측정하여, 지하수위, 수온, 전기전도도를 같이 분석하여 지진 예측의 정밀도를 높일 수 있을 것이다. 단열대나 대수층의 발달상태에 따라서 지진에 의한 지하수위 변동이 달라지므로, 지진감시를 위

한 지하수관측공의 케이싱과 스크린 설치 구간 결정에는 세심한 주의를 요한다. 국내시범지역의 지하수 모니터링 네트워크에서는 지표에서 최하부 심도의 직상부까지는 무공관의 케이싱을 설치하고 최하부 심도의 지하수위를 관측하도록 관측공을 설계하였다(Lee, H.A et al., 2021).

무기용존물질, ^{18}O , ^2H , Sr, ^{222}Rn , ^3H , ^4He , 미생물 군집구조 등의 수리지화학적 및 수리생태학적 자료를 이용한 지진 연구는 지진에 의한 지하의 수리지질상태 변화에 관한 정보를 줄 수 있다. 그러나, 현재까지의 기술로는 연속적인 측정이 어렵고 주기적인 물시료 채취에 의해서만 분석이 가능하다. 따라서 지진 발생 시기의 상세한 변화를 알아내는데는 한계가 있다.

결론

본 연구는 국내학자들이 연도별로 지진과 지하수의

관련성 연구의 동향을 Web of Science (<https://apps.wobofknowledge.com/>)에서 검색하고, 분야별 (지하수위, 수리지화학, 지하수위와 수리지화학 병행, 그 외 분야) 연구 특성을 검토하였다. 과거부터 2021년까지 연도별로 국내학술지에 게재된 지진과 지하수 관련성 연구 논문은 총 22편이며, 2011, 2018, 2020년에 가장 많은 각 5편씩이다. 한편, 같은 기간 국내학자들이 국제 SCIE 학술지에 게재한 지진과 지하수 관련성 연구 논문 편수는 과거부터 2021년까지 게재된 논문 편수는 총 24편이며, 연도별 논문 편수는 2020년이 6편으로 가장 많고, 2019년이 5편 그리고 2021년 4편, 2013, 2017년이 각 3편씩이다. 연도별 논문 편수는 지진 발생과 크게 연관된다. 즉, 2011년에는 동일본대지진, 2016년에는 경주지진, 그리고 2017년에는 포항지진이 발생하였으며, 이에 따라 2011, 2018, 2019, 2020년에 국내, 국제학술지 게재 논문수가 증가하였다.

지하수와 지진의 연관성 연구는 분야별로 크게 지하수위, 수리지화학, 지하수위와 수리지화학 병행, 그 외 분야)로 구분할 수 있다. 그리고 수리지화학 분야에는 화학성분, 전기전도도, 동위원소, ^{222}Rn , 미생물을 포함하였다. 대부분의 지하수위와 지진의 관련성 연구는 지진과 동시기의 지하수위 변화에 관한 연구이며, 지진 전조와 관련한 연구는 거의 없다. 지진에 의한 지하수위 변화를 지질 및 대수층의 발달 상태에 따라 해석하였으나, 복잡한 지하 지질로 인해서 해석에 어려움이 있다. 국내시범지역 지하수관측공 네트워크와 제주도의 지하수공에서 1분 간격으로 지하수위를 측정할 예를 제외하고는 현재까지 국내에서는 대부분 국가지하수관측망에서 1시간 간격으로 지하수위를 측정할 자료를 이용하여 지진 연구를 한 사례가 많다. 따라서, 지진에 의한 지하수위 변화를 정확하게 관측하는데 한계가 있었다.

순수하게 수리지화학만 연구한 논문은 국내학술지에는 4편이고, 국제 SCIE 학술지에서는 1편이다. 지하수위만 이용한 연구는 많으나 수리지화학만을 이용한 연구는 상대적으로 적다. 한편, 지하수위와 수리지화학을 병행한 논문은 국내학술지 중에서는 3편, 국제 SCIE 학술지에서는 7편이다. 지진을 영향을 가장 잘 나타내는 지하수위와 함께 수리지화학적 특성(무기용존물질, ^{18}O , ^2H , Sr, ^{222}Rn , ^3H , ^4He)을 이용함으로써 지진에 의한 수리지질 상태 변화 및 대수층의 반응을 보다 상세하게 규명하기 위한 것이다.

또한, 지진의 영향으로 특정 미생물이 우점하는 변화가 보고된 바 있다. 그러나, 현재까지는 수리지화학적 성분들의 연속적인 측정이 어렵고 주기적인 물 시료 채취에 의해서만 분석이 가능하므로, 지진 발생 시기의 상세한 수리지질 변화를 알아내는 데는 한계가 있다.

앞에서 살펴본 바와 같이, 현재까지 지하수위를 이용한 지진 연구는 국가지하수관측망 자료를 이용하였으나, 국가지하수관측망은 지하수 관리를 위한 목적으로 설치되어 지진 감시 및 예측을 위한 목적에는 맞지 않다. 따라서, 지진 감시 및 예측을 위한 지진 감시를 위한 전국적인 지하수관측공 네트워크를 전국적으로 구축할 필요가 있다. 이때 지하수위 및 수온, 전기전도도 관측 시간 간격은 적어도 1분 또는 초단위로 하여야 할 것이다. 아울러서, 무기용존물질, ^{222}Rn 등 수리지화학적 성분의 실시간 연속 측정 시스템을 도입하면 좋을 것이다.

사 사

이 연구는 과학기술정보통신부의 한국연구재단 중견연구사업(No. NRF-2020R1A2B5B02002198)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다

References

- Blanchard, F.G. and Byerly, P., 1935, A study of a well gage as a seismograph. Bulletin of the Seismological Society of America, 25, 313-321.
- Cheong, J.-Y., Hamm, S.-Y., Kim, S.H., Lee, S.-H., Woo, N.C., and Kim, G.B., 2013, Analyzing groundwater change on a volcanic island caused by the impact of the M9 Sumatra earthquake. Geosciences Journal, 17(2), 183-195.
- Choi, M.R., Lee H.J., and Kim, G.B., 2018, Characteristics of short term changes of groundwater level and stream flow rate during 2017 Pohang earthquakes. Journal of the Geological Society of Korea, 54(5), 557-566.
- Du, J., Amita, K., Ohsawa, S., Zhang, Y., Kang, C., and Yamada, M., 2010, Experimental evidence on formation of imminent and short-term hydrochemical precursors for earthquakes. Applied Geochemistry, 25, 586-592.
- Gordon, F.R., 1970, Water level changes preceding the Meckering, Western Australia, earthquake of October 14, 1968. Bulletin of the Seismological Society of America, 60, 1739-1740.
- Gregson, P.J., Smith, R.S, and McCue, K.F., 1976, An

- explanation of water level changes preceding the Meckering earthquake of October 14, 1968. Bulletin of the Seismological Society of America, 66, 631-632, 1976.
- Ha, J.C. and Song, Y.J., 2015, An investigation of awareness on the Fukushima nuclear accident and radioactive contamination. Journal of Radiation Protection and Research, 41, 7-14.
- Hamm, S.-Y., Lee, S.-H., Park, Y.S., Koh, K.W., Cheong, J.-Y., Lee, J.H., 2009, Relationship between earthquake and groundwater change observed in Jeju Island, Korea. Proceedings of the Asia Oceania Geosciences Society 6th Annual Meeting, Singapore, No.110.
- Hong, T.-G., Lee, J., Kim, W., Hahm, I.-K., Woo, N.C., and Park, S., 2017, The 12 September 2016 M_L 5.8 midcrustal earthquake in the Korean Peninsula and its seismic implications, Geophysical Research Letters, 44, 3131-3138.
- Hwang, H.S., Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Lee, S.-H., Ha, K., Lee, C., Woo, N.C., Yun, S.-M., and 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(1), 1-14.
- Jang, H.W., Jeong, C.H., Lee, Y.C., Lee, Y.J., Hong, J.W., Kim, C.H., Kim, Y.S., and Kang, T.S. 2020, Relationship between Earthquake and Fluctuation of Water Level in Active Fault Zone and National Groundwater Monitoring Wells of Gyeongju Area. The Journal of Engineering Geology, 30(4), 617-634.
- Jang, S.H., Lee, J.K., Lee, S.Y., and Oh, K.D., 2020, Basic study on development of the radon measurement system in groundwater stations for the seismic monitoring and prediction. Journal of Korea Water Resources Association, 53(7), 507-519.
- 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). Journal of the Geological Society of Korea, 47(6), 695-706.
- Jeong, C.H., Park, J.S., Lee, Y.C., Lee Y.J., Yang, J.H., Kim, Y.S. and 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.
- Kaown, D., Koh, D. C., Kim, H., Koh, H.J., Kim, J., Lee, S., Park, I., and Lee, K.-K., 2019, Evaluating the responses of alluvial and bedrock aquifers to earthquakes (M_L 5.1 and M_L 5.8) using hydrological and environmental tracer data. Hydrogeology Journal, 27(6), 2011-2025.
- Kim, G.B., Choi, M.R., Lee, C.J., Shin, S.H., and Kim, H.J., 2018, Characteristics of spatio-temporal distribution of groundwater level's change after 2016 Gyeongju earthquake. Journal of the Geological Society of Korea, 54(1), 93-105.
- Kim, H., 2021, Need for seismic hydrology research with a geomicrobiological focus. Sustainability, 13(16), 8704.
- Kim, H., Kaown, D., Kim, J., Park, I.W., Joun, W.T., and Lee, K.-K., 2020, Impact of earthquake on the communities of bacteria and archaea in groundwater ecosystems. Journal of Hydrology 583, 124563.
- Kim, J., Joun, W.T., Lee, S., Kaown, D., and Lee, K.-K., 2020, Hydrogeochemical Evidence of Earthquake-Induced Anomalies in Response to the 2017 M_W 5.5 Pohang Earthquake in Korea. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 21(12), e2020GC009532.
- Kim, J., Lee, J., Petitta, M., Kim, H., Kaown, D., Park, I.W., Lee, S., and Lee, K.-K., 2019, Groundwater system responses to the 2016 M_L 5.8 Gyeongju earthquake, South Korea. Journal of Hydrology, 576, 150-163.
- Kim, K.-H., Ree, J.-H., Kim, Y.H., Kim, S.S., Kang, S.Y., and Seo, W.S., 2018, Assessing whether the 2017 M_w 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. Science 360(6392), 1007-1009.
- Korea Meteorological Administration, 2010, A study on the evaluation of earthquake-precognition cases and the feasibility to develop monitoring systems to observe earthquake precursors. 158p.
- Lee, H.A, Kim, M., Hong, T.-K. and Woo, N.C., 2011, Earthquake observation through groundwater monitoring: A case of $M_4.9$ Odaesan earthquake. Journal of Soil Groundwater Environment, 16(3), 38-47 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.A, and Woo, N.C., 2012, Influence of the $M_9.0$ Tohoku Earthquake on groundwater in Korea. Geosciences Journal, 16(1), 1-6.
- Lee, H.A, Hamm, S.-Y., and Woo, N.C., 2017, Groundwater monitoring network for earthquake surveillance and prediction. Economic and Environmental Geology, 50(5), 401-414.
- Lee, H.A, Hamm, S.-Y., and Woo, N.C., 2018, The abnormal groundwater changes as potential precursors of 2016 M_L 5.8 Gyeongju earthquake in Korea. Economic and Environmental Geology, 51(4), 393-400.
- Lee, H.A, Lee, H., Kwon, E., Park, J., and Woo, N.C., 2020, Natural baseline groundwater quality in Shingwang-myeon and Heunghae-eup, Pohang, Korea. The Journal of Engineering Geology, 30(4), 469-483.
- Lee, H.A, Hamm, S.-Y., and Woo, N.C., 2021, Pilot-scale groundwater monitoring network for earthquake surveillance and forecasting research in Korea. Water, 13(17), 2448.
- Lee, J.H., Kim, Y.S., and Jung, H.J., 2020, Effects of an earthquake on the variations of hydrogeochemistry of groundwater-A review. Journal of the Geological

- Society of Korea. 56(2), 265-271.
- Lee, J.M., Woo, N.C., Koh, D.C., Kim, K.Y., and Ko, K.S., 2020, Assessing aquifer responses to earthquakes using temporal variations in groundwater monitoring data in alluvial and sedimentary bedrock aquifers. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 742-765.
- Lee, J.-Y., 2016, Gyeongju Earthquakes Recorded in Daily Groundwater Data at National Groundwater Monitoring Stations in Gyeongju. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 21(6), 80-86.
- Lee, J.-Y., Lee, K.-K., Hamm, S.-Y., and Kim, Y., 2017, Fifty years of groundwater science in Korea: a review and perspective. *Geosciences Journal*, 21(6), 951-969.
- Lee, K.-K., Ellsworth, W. L., Giardini, D., Townend, J., Ge, S., Shimamoto, T., Yeo, I.-W., Kang, T.-S., Rhie, J., Sheen, D.-H., Chang, C., Woo, J.-U., and Langenbruch, C., 2019, Managing injection-induced seismic risks. *Science*, 364(6442), 730-732.
- Lee, S.-H., Hamm, S.-Y., Park, Y.S., Koh, G.W., Cheong, J.-Y., Kim, and Lee, J.-H., 2009, Characteristics of groundwater level change in Jeju Island by seismic activity around Korean Peninsula. Spring Conference of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment, 103-104.
- Lee, S.-H., Hamm, S.-Y., Ha, K., Kim, Y.C., Cheong, B.-K., Ko, K.-S., Ko, G.W. and Kim, G.P., 2011, Analysis of groundwater level changes due to earthquake in Jeju Island (For the Indonesian earthquake with magnitude 7.7 in 2010). *Journal of Soil Groundwater Environment*, 16(2), 41-51 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-H., Hamm, S.-Y., Ha, K., Ko, K.S., and Cheong, J.-Y., 2012, Groundwater response analysis to multiple earthquakes on Jeju volcanic island. *Geosciences Journal*, 16(4), 469-478.
- Lee, S.-H., Ha, K., Hamm, S.-Y., and Ko, K.S., 2013a, Groundwater responses to the 2011 Tohoku earthquake on Jeju Island, Korea. *Hydrological Processes*, 27(8), 1147-1157.
- Lee, S.-H., Ha, K., Shin, J.S., Ko, K.S., and Hamm, S.-Y., 2013b, Successive groundwater level changes on Jeju Island due to the Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2B), 1614-1621.
- Lee, S.-H., Cheong, J.-Y., Park, Y.S., Ha, K., Kim, Y., Kim, S.W., and Hamm, S.-Y., 2017, Groundwater level changes on Jeju Island associated with the Kumamoto and Gyeongju earthquakes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1783-1791.
- Lee, S.-H., Lee, J.M., Yoon, H., Kim, Y., Hwang, S., Ha, K., and Kim, Y., 2020, Groundwater Impacts from the M5.8 Earthquake in Korea as determined by integrated monitoring systems. *Groundwater*, 58(6), 951-961.
- Lee, S.-H., Lee, J.M., Moon, S.H., Ha, K., Kim, Y., Jeong, D.B., and Kim, Y., 2021, Seismically induced changes in groundwater levels and temperatures following the M_L 5.8 (M_L 5.1) Gyeongju earthquake in South Korea. *Hydrogeology Journal*, 29(4), 1679-1689.
- Muir-Wood, R. and King, G.C.P., 1993, Hydrological signatures of earthquake strain. *Journal of Geophysical Research*, 98, 22035-22068.
- Ok, S.I., Hamm, S.-Y., Kim, B.S., Cheong, J.-Y., Woo, N.C., Lee, S.-H., Koh, G.W. and Park, Y.S., 2010, Characteristics of aquifer system and change of groundwater level due to earthquake in the western half of Jeju Island. *Economic and Environmental Geology*, 43(4), 359-369.
- Ryu, H.-S., Kim, H., Lee, J.-Y., Kaown, D., Lee, K.-K., 2022, Abnormal groundwater levels and microbial communities in the Pohang Enhanced Geothermal System site wells pre- and post-Mw 5.5 earthquake in Korea. *Science of the Total Environment*, 810, 152305.
- Sugisaki, R., 1978, Changing He/Ar and N₂/Ar ratios of fault air may be earthquake precursors. *Nature*, 275, 209-211.
- Viola, G., Scheiber, T., Fredin, O., Zwingmann, H., Margreth, A., and Knies, J., 2016, Deconvoluting complex structural histories archived in brittle fault zones. *Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms13448.
- Vorhis, R.C., 1967, Hydrologic effects of the earthquake of March 27, 1964, outside Alaska. U.S. Geological Survey Professional Paper 544-C, C1-C53.
- Wakita, H., 1975, Water wells as possible indicators of tectonic strain. *Science*, 189, 553-555.
- Wakita, H., 1977, Geochemistry as a tool for earthquake prediction. *Journal of Phys. Earth*, 25, 175-183.
- Wan, D., 1992, Recording capacity variation of water level in wells and its relation to large earthquake. *Journal of Seismol. Res.*, 15(4), 381-391 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C.Y. and Chia, Y., 2008, Mechanism of water level changes during earthquakes: near field versus intermediate field. *Geophysical Research Letters*, 35, L12402.
- Won, B., Hamm, S.-Y., Kim, K.Y., Ha, K., Shin, J., Hwang, S., and Lee, S.-H., 2019, Response analysis of multi-layered volcanic aquifers in Jeju Island to the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Water*, 11(5), 942.
- Woo, N.C., Piao, J., Lee, J.M., Lee, C. Jin, Kang, I.O., and Choi, D.H., 2015, Abnormal Changes in Groundwater Monitoring Data Due to Small-Magnitude Earthquakes. *The Journal of Engineering Geology*, 25(1), 21-33.
- Yeo, I.W., Brown, M.R.M., Ge, S., and Lee, K.K., 2020, Causal mechanism of injection-induced earthquakes through the M_w 5.5 Pohang earthquake case study. *Nature Communications*, 11, 2614.

Yu, W., He, J., Lin, W., Li, Y., Men, W., Wang, F. and Huang, J., 2015, Distribution and risk assessment of radionuclides released by Fukushima nuclear accident at the Northwest Pacific. *Journal of Environmental Radioactivity*, 142, 54-61.

Yun, S.-M., Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Lee, C.-M., Seo, W.S. and Woo, N.C., 2019, Analyzing groundwater

level anomalies in a fault zone in Korea caused by local and offshore earthquakes. *Geosciences Journal*, 23(1), 137-148.

Yun, S.-M., Hamm, S.-Y., Jeon, H.-T., and Cheong, J.-Y., 2021, Trend analysis of earthquake researches in the world. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 42(1), 76-87.

Manuscript received: January 25, 2022

Revised manuscript received: February 11, 2022

Manuscript accepted: February 12, 2022