

<Review>

지진에 의한 지하수의 수리지구화학적 변동에 대한 고찰

이정훈^{1,‡} · 김영석² · 정혜정¹

¹이화여자대학교 과학교육과

²부경대학교 지구환경과학과

요 약

지하수 모니터링을 통해 지진과 연관된 수리지구화학적 변동을 관찰하고 지진의 전조로서의 가능성을 알아보기 위해서 해외에서는 20여년 동안 지하수 및 샘물의 주요이온, 물 안정동위원소, 미량원소를 측정하고 있으며, 수리지구화학 변동성을 설명하기 위한 기작을 제시하고 있다. 해외에서는 지진과 연관된 물리적인 변동은 많이 보고되어 있고, 화학적인 변동은 많지 않지만 꾸준히 보고되고 있다. 본 논평에서는 지진 전후로 관찰된 지하수의 주요 이온, 물 안정동위원소, 미량원소에 대한 연구를 소개하고 지하수의 수리지구화학 변동성을 설명하는 기작을 제시하고자 한다. 주요 이온 농도, 물 안정동위원소 값, 미량원소 농도는 지진 전과 지진 후에 지역에 따라 변동성(증가 및 감소)을 보였다. 이러한 수리지구화학 변동성을 이해하기 위하여 제시된 기작에는 지진의 정적 변형(static strain)에 의한 팽창(dilation) 및 압축(compaction), 퇴적물의 액상화(liquefaction) 또는 고화(consolidation of sediments), 지진동에 의한 투수율(permeability)의 변화 등이 있다. 하지만, 지역별로 지진 발생 이전과 이후로 수리지질학적인 특성과 지하수의 물리적-화학적 환경도 같이 변하기 때문에 종합적인 해석이 필요하며, 지진 주변 지역의 수리지구화학적 장기적인 모니터링이 필요하다.

주요어: 주요 이온, 미량원소, 지하수, 지진, 동위원소

Jeonghoon Lee, Young-Seog Kim and Hyejung Jung, 2020, Effects of an earthquake on the variations of hydrogeochemistry of groundwater – A review. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 2, p. 265-271

ABSTRACT: As a possible precursor of earthquakes, major ions, stable water isotopes and trace elements of groundwater and spring water have been monitored and analyzed for twenty years and mechanisms for the variations of hydrogeochemistry of groundwater have been suggested over the world. Although numerous physical variations associated with earthquakes are reported, the numbers of studies on hydrogeochemical variations of groundwater are not many, but continuously increasing. We will review the studies on responses of hydrogeochemistry of groundwater before and after earthquakes including major ions, stable water isotopes and trace elements and introduce mechanisms to explain the variations of hydrogeochemistry. Major ions, stable water isotopes and trace elements before and after earthquakes show some variabilities (increase or decrease), depending on the specific sites. Several mechanisms have been proposed to explain the variability and the mechanisms include co-seismic static strain inducing dilation and compaction; liquefaction or consolidation of sediments; and permeability changed caused by shaking. However, it is required for comprehensive interpretation with long-term hydrogeochemical monitorings in the vicinity of areas related to seismic activities due to hydrogeological characteristics and the physical-chemical environment of groundwater covary for the specific sites.

Key words: major ion, trace elements, groundwater, earthquake, isotopes

(Jeonghoon Lee and Hyejung Jung, Dept. of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 03760, Republic of Korea; Young-Seog Kim, Dept. of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea)

[‡] Corresponding author: +82-2-3277-3794, E-mail: jeonghoon.d.lee@gmail.com

1. 서론

지진에 의해 발생된 지하수의 수위 변화, 주요 이온의 화학성분 변화, 하천 흐름(stream flow)의 변동 등이 지난 10여년간 보고되어 왔다(Thomas, 1988; Montgomery and Manga, 2003; Shi *et al.*, 2020; Barberio *et al.*, 2017; Jeon *et al.*, 2011). 자동으로 측정하는 장치의 발전으로 인해, 지진에 의한 지하수의 수위(groundwater level), 온도(temperature), 하천의 흐름(stream flow), 라돈의 농도 등의 변화를 상대적으로 쉽게 측정하고 보고하고 있다(Wakita, 1996). 예를 들어, 아이슬란드에서는 지진 전과 후에 지하수의 수리지구화학 변동을 살펴보기 위하여 Húsavík (2002년 이후)과 Hafnarlækur (2008년 이후) 두 지역에서 모니터링을 지속적으로 실시하고 있다(Skelton *et al.*, 2019). 이러한 지하수 모니터링을 통해 지진과 연관된 수리지구화학적 변동을 관찰하고 이를 지진의 전조로서의 가능성을 타진할 수 있게 되었다(Shi *et al.*, 2020). 하지만, 지하수 화학성분의 변화는 지각의 응력변화에 민감하여 지진을 예측하는 데에 매우 도움이 될 수 있음에도 불구하고, 지진에 의한 지하수의 화학성분 변화는 물리적인 변동(수위변화)에 비해 많이 보고되지 않았다. 이는 국내에서 더욱 두드러지는데, 수리지구화학 성분을 주기적으로 측정하기에는 지속적인 관측시스템을 구축하기 어려우며, 인력으로 시료를 채취하기 때문에 비용이 많이 들고, 실험실에서의 분석으로 인해 시간이 많이 소모되는 단점이 있기 때문이다.

이러한 단점에도 불구하고, 지진과 관련된 수리지구화학적 변동은 암석과 물의 상호작용 및 지각 깊은 곳에서의 정보를 제공해 줄 수 있기 때문에 매우 중요하다. Claesson *et al.* (2007)에서는 지진 전과 후에 주요 이온(major ion), 미량원소(trace element), 동위원소(isotopes) 값이 모두 변하는 것을 보고하였다. 또한, 철이나 납 등 중금속의 농도 및 동위원소가 지진에 어떻게 반응하는가에 대한 연구도 보고되어 있다(Poitrasson *et al.*, 1999; Schuessler *et al.*, 2016). 아이슬란드의 경우에는 3번의 지진을 통해 5개의 수리지구화학 변수($\delta^{18}\text{O}$, δD , Na, Si, K)가 지진 전에 변동이 있었으며, 7개의 변수(Ca, Na, Si, Cl, SO_4 , $\delta^{18}\text{O}$, δD)가 지진 후에 변화하였음을 보고하였다(Skelton *et al.*, 2019). 2016-2017의 이태리 중부에서 발생한

지진에서 4개의 온천에서의 미량원소(Al, Cu, Pb, Mn, Sr)의 농도가 크게 변화했으나, 주요 이온은 크지 않은 변화를 나타내었다. 지하수의 주요 이온, 미량원소 및 동위원소들이 지진에 어떻게 반응하는가를 이해하는 것은 어떤 지하수의 성분을 모니터링할 것인가를 정하는 데 매우 중요하다. 대부분의 지진 관련 연구에서 주요 이온을 지속적으로 관찰하고 있지만 미량원소를 모니터링하는 연구는 그리 많지 않다. 미량원소는 지진에 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있지만, 경우에 따라 특정 원소만 민감하게 반응하는 것으로도 보고되어 있다(Skelton *et al.*, 2019). 따라서, 주요 이온 및 미량원소가 지진에 어떻게 반응하는가에 대한 이해 및 비교가 필요하며, 어떠한 기작(mechanism)에 의해 변동이 발생하는지에 대한 고찰이 필요할 것이다. 본 논평에서는 해외연구사례에서 보고되어 있는 주요 이온, 미량원소 및 동위원소가 지진 전과 후에 어떻게 반응하는지와 어떠한 기작으로 수리지구화학적 변동이 일어나는지에 대해 고찰하고자 한다. 이는 수리지구화학적 인 요소가 향후 지진을 감지하기 위한 전조로서 장기적인 모니터링의 필요성에 당위성을 부여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 지진과 수리지구화학적 변동과의 관련성 및 사례

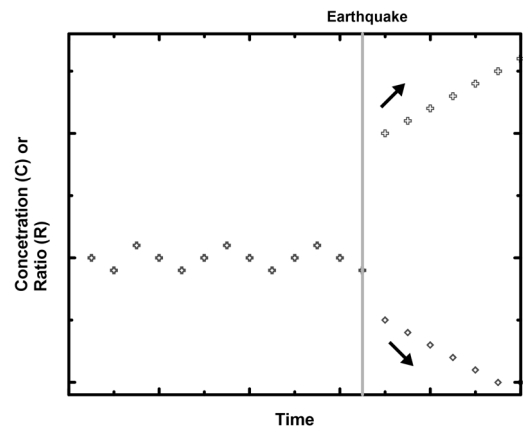
지진과 수리지구화학성분의 변동성과의 관련성에 대하여 표 1에 해외연구사례를 정리하였다. 본 논문은 지진과 지하수의 수리지구화학 변동과의 상관성에 대하여 초점을 두었기 때문에 주요 이온, 미량원소 및 동위원소의 분석법에 대해서는 언급하지 않을 것이다. 약 30년 전, 지진의 전조로서 활성단층 주변에서 특정 성분의 가스 및 휘발성 물질의 농도가 높아진다는 것을 선행연구를 통해 확인하였다(King, 1986). 국내에서도 지하수의 라돈 함량이 지진과 상관성이 있다는 연구결과가 보고 되어 있다(Jeong *et al.*, 2018). 지하수의 수위는 갈수기의 영향으로 인해 지속적으로 줄어드는 데 비해, 라돈의 농도는 지진 발생 직후 급격히 증가하는 양상을 나타내었다.

한편, M5.2 지진을 전후로 Poitrasson *et al.* (1999)에서는 납 농도 및 납 동위원소를 이용하였다. 지진 4일 전에 납 농도는 10배 정도 증가한 반면, 납 동위

Table 1. Studies of earthquake-related hydrogeochemical responses.

	Measured elements	Response to earthquakes	Mechanisms
Poitrasson <i>et al.</i> (1999)	Lead isotopes and ion	Isotopes: Decreased Ion: Increased	Mixing and pre-seismic strain
Skelton <i>et al.</i> (2019)	Major ions and trace elements	Increase before and after earthquake	Mixing
Rosen <i>et al.</i> (2018)	Major ions and trace elements	Al, Cu, Pb, Sr, Rb, Mn increased for all springs, but Mg, Na, and K changed slightly	Shaking and fracture clearing
Schuessler <i>et al.</i> (2016)	Fe isotope and ions	Increase	Abiotic and biotic process
Claesson <i>et al.</i> (2007)	Major ions and trace elements	B, Ca, K, Li, Mo, Na, Rb, Si, Cl, Sr, SO ₄ changed	Earthquake ruptured a hydrological barrier, permitting mixing
Woith <i>et al.</i> (2013)	Major ions	Increase	Mixing and permeability change
Barberio <i>et al.</i> (2017)	Major ions and trace elements	As, Fe, V and Cr increased, but no changes in major ions	Desorption/dissolution of trace elements from oxide
Shi <i>et al.</i> (2020)	Major ions and trace elements	Trace elements changed, but no significant changes in major ions	Mixing with isolated reservoir
Taran <i>et al.</i> (2005)	Major ions and isotopes	Increase	Mixing
Onda <i>et al.</i> (2018)	Isotopes	Only oxygen isotopes increased	Water-rock interaction and mixing
King (1981)	Radon	Variable	Large scale strain

원소 값은 감소하였다. 이 연구에서는 수리지구화학 변동과 지진 간의 지연 시간(lag time)을 이용하여 서로 다른 수괴의 혼합 발생 지점을 추정하였다. 이 계산에서는 1) 대수층의 수리전도도(hydraulic conductivity)가 알려져 있어야 하며, 2) 지진이 물 혼합을 막을 수 있을 만큼의 어느 정도 큰 탄성 변형(elastic strain)을 방출하였다고 가정하였다. 이를 이용하여, 지하수의 이동속도를 계산하고 지연 시간을 이용하여 혼합 발생 지점을 계산하였다. 지하수의 화학성분과 동위원소 성분을 이용하여 지진 발생 이후 단층 닫힘(fault sealing)을 Claesson *et al.* (2007)에서는 보고하였다. 단층에 의해 연결성이 없는 두 대수층이 M5.8 (2002년 9월 16일) 지진 이후 연결성을 보이면서 빙하기(Ice Age)에 충전된 물의 특성을 나타내었다. 지진 이후 2년이 지나면서 지진 발생 전의 수리지구화학 조성을 나타내었지만, 두 번의 작은 지진 이후 다시 연결성이 생기면서 빙하기에 충전된 물의 동위원소 특성을 나타낸 것이다. 이를 통해 단층 닫힘이 발생하는 데에 걸리는 시간

**Fig. 1.** A schematic diagram for variations of major ions, trace elements isotopic compositions after an earthquake.

을 2년 정도로 규정하였다. 그림 1에서는 지진 이후 지하수의 화학성분 또는 동위원소 성분이 증가하거나 감소하는 것을 모식도로 나타내었다.

Taran *et al.* (2005)에서 지진의 규모 및 지역에 따라 “지진과 물의 상호작용(hydro-seismo interaction)”

이 다름을 보였다. 멕시코에서 일 년 반 동안 일주일 을 주기로 지진 활동이 많이 일어나는 네 곳의 샘물 (spring water)에서 시료를 채취하고 화학성분 및 동 위원소 성분을 분석하였다. 연구기간 동안 M3.8에서 M5.3 사이의 지진이 200회 이상 발생했으며, 수 리지구화학 성분 중에서 Cl^- , SO_4^{2-} , δD , $\delta^{18}O$ 이 특히 지진에 민감하였으며, 다시 원래 농도 수준을 돌아가 는 완화시간(relaxation time)은 3주에서 4주 정도 걸렸다. 이 연구에서는 규모 M5.3 이하에서는 일주일 시간 간격으로 측정하는 이온이나 동위원소 값은 지진의 전조가 될 수 없으며, 특정한 두 곳(Dos Arroyos 와 Paso Real)만이 지진에 민감하여, 향후 지진과 물 의 상호작용의 기작을 이해하는 데에 도움이 될 수 있는 지역으로 선정하였다. Song *et al.* (2006)에서는 중서부 대만의 온천지역의 화학성분과 동위원소 성분을 분석하여 화학성분은 지진에 민감하지만 물 안정동위원소는 거의 변화가 없음을 보고하였다 (1999년 7월부터 2001년 8월). 이 연구에 따르면 염 화이온과 황산이온은 주요 지진이 발생하기 며칠 전 부터 지진 발생 이후 2-3일 정도 평균보다 높은 값이 지속되었다. 지진에 의해 응력/변형률(stress/strain)의 변화에 의해 지하수의 이온 농도가 높은 분리된 영역이 만들어지고 이후 이 영역의 물과 혼합되면서 지진의 전조가 될 수 있다고 설명하고 있다. 하지만, 물 안정동위원소에는 변화가 없으면서 염소이온에 는 변화가 있는 것에 대해서는 새로운 기작이 추가 되어야 한다.

한편으로, 물의 안정동위원소는 추적자(tracer)로 서 물 환경에서 물의 이동과정을 규명하는 데에 매우 효과적으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2019). 상온에서는 물 안정동위원소는 암석과 반응하지 않기 때문에 물-암석 반응(water-rock interaction)이 수소 및 산소의 물 안정동위원소 값을 변화시키지 않는다. 물의 증발(evaporation) 또는 다른 물과의 혼합(mixing)만이 물 안정동위원소 값을 변화시킬 수 있기 때문에 물 자체를 추적하는 데에 좋은 추적자가 될 수 있다. 한 가지 예외가 있는 경우가 높은 온도(200°C)에서는 암석과 물이 동위원소 교환반응을 하는 것으로 알려져 있으며, 이 때 산소동위원소만 물과 규산염이 반응하면서 변하는 것으로 알려져 있다. Onda *et al.* (2018)에서는 지하수의 안정동위원소만을 이용하여 지진의 예측 가능성

에 대하여 보고하였다. M6.6의 지진이 발생하기 전 에 지하수의 수소 동위원소 값(δD)은 변동이 크게 없지만, 지하수의 산소 동위원소 값($\delta^{18}O$)은 분석의 오차범위를 넘어서는 값의 변동을 나타내었다(그림 2). 헬륨 동위원소를 측정하여 체적변형률(volumetric strain)을 제시하였으며, 산소 동위원소의 변동을 체적변형률의 변화와 관련이 있을 것으로 추정하였다.

많지 않은 연구에서 주요 이온과 미량원소를 동 시에 분석하여 제시하였다. Barberio *et al.* (2017)에 서는 2016-2017년의 일련의 지진 동안 미량원소(As, Fe, V, Cr)의 변동은 있었지만 주요 이온 및 특정 미량원소(Li, B, Sr)에는 변동이 없는 것을 보고하였다. 미량원소가 지진에 좀 더 민감하게 반응하는 것으로 관찰되었지만, 지역별로 미량원소의 변동은 다르게 나타날 수 있음을 시사하고 있다. 따라서, 주요 이온 과 미량원소를 동시에 분석하고 지진에 어떻게 반응 하는가를 관찰하고 이에 대한 기작을 고찰하는 것은 매우 중요할 것이다.

3. 화학성분변동의 기작(mechanism) 및 제언

지진 이전 및 이후 지하수의 수위 및 화학성분의 변화에 대하여 몇 가지 기작 제시하고 있다. 하지만, 지진과 지하수의 수리지구화학 성분 간의 관계를 설명할 수 있는 일반적인 이론 및 기작은 아직 없으며, 개별 지진 및 장소별로 서로 다른 기작이 제시되고 있다(Skelton *et al.*, 2019). 이렇게 제시된 기작들을

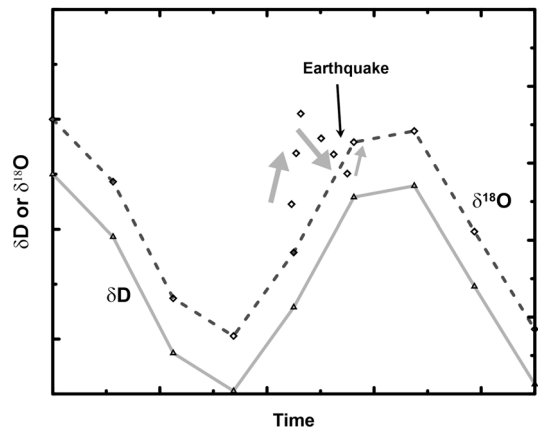


Fig. 2. A conceptual model for temporal variations of isotopic compositions of groundwater before and after an earthquake.

정리하면 지진의 정적 변형(static strain)에 의한 팽창(dilation) 및 압축(compaction), 퇴적물의 액상화(liquefaction) 또는 고화(consolidation of sediments), 지진동에 의한 투수율(permeability)의 변화 등이 있다. 이 중에서 지각 변형 팽창(crustal strain dilation)과 대수층의 투수성 변동으로 인해 다른 물들의 혼합이 화학성분의 변동을 설명하는 주요 원인이 될 수 있다(Woith *et al.*, 2013). 그러나, 많지 않은 데이터를 기반으로 제시한 기작이며, 지하수 수위와 화학적인 변동을 동시에 고려한 연구는 그다지 많지 않다. 또한, 지하수 수위와 미량원소를 지진과 연관시킨 연구는 거의 없는 실정이다.

기본적으로 단층대는 지하수의 흐름과 분포에 매우 중요한 역할을 한다. 단층은 지각에서 지하수의 이동에 통로(conduit)가 되거나 장애물(barrier)이 되기도 한다. 단층의 수리지질학적인 특성은 지진 활동의 결과로 바뀔 수도 있다. 지진동에 의한 투수율 및 변형률의 변화에 따른 대수층의 팽창 또는 압축에 의해 지하수의 유동에 변화가 발생하게 된다. 따라서, 동위원소 적으로나 화학적으로 완전히 다른 조성의 많은 물과 원래 있던 물과의 혼합이 발생하게 되면 수위에 변화와 함께 수리지구화학적 변동이 발생하게 된다. 수위 변화가 강수에 의해 일어나지 않는다는 가정하에, 수위 변화와 함께 주요 이온의 변화가 발생한다면 이전에 전술한 기작으로 설명할 수 있다. 한편, 대수층을 둘러싼 암석에 지진에 의한 단열(fracture)이 많아지게 되면, 물과 암석의 상호작용이 증가하게 되어 용존이온의 농도가 증가하게 된다(Claesson *et al.*, 2007). 즉, 활성표면지역(reactive surface area)이 증가하게 되며 화학적 또는 동위원소적으로 평형상태가 깨지게 되고, 이로

인해 더 많은 물과 암석의 상호작용이 발생하고 이로 인해 이온의 농도가 증가할 수 있다. 하지만, 이온의 농도가 증가하는 경우보다는 감소하는 경우가 많아서 다른 기작이 요구된다.

지진 이전과 이후에 지하수 및 샘플의 미량원소를 측정하는 연구는 많지 않지만, 미량원소를 측정하는 연구결과를 바탕으로 다른 기작을 제시할 수 있다(Shi *et al.*, 2020). 미량원소에 따라서 지진에 대해 다른 반응을 보여 주기 때문에 특정 대수층에서 지하수의 수리지구화학에 미치는 요인이 다양할 것으로 예상할 수 있다. 국내에서는 아직 지진과 관련하여 미량원소에 대한 연구가 거의 없기 때문에 해외사례를 이용하여 다른 기작에 대하여 설명할 것이다. 또한, 국내에서도 지진의 전조로서의 가능성이나 지진에 대해 지하수가 어떻게 반응하는지 이해하기 위하여 지진 주변 지역에서의 주요 이온 및 미량원소에 대한 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

Rosen *et al.* (2018)에서는 그림 3과 같이 미량원소의 변동은 서로 다른 공극(pore space) 또는 단열에 있는 물이 서로 다른 체류시간 또는 잔류시간(residence time)을 가지면서 혼합에 의해 의한 것으로 제시하였다. Shi *et al.* (2020)에서도 이러한 기작을 제시하였는데, 그 근거로 주요 이온의 농도는 크게 변하지 않았는데, 미량원소의 농도가 크게 변한 것을 제시하였다. 지진에 의한 진동은 대수층의 투수율의 변화를 가져오게 되고, 대수층과 주변에 고립되어 있던 공극(isolated pore 또는 dead pore)과의 연결성을 발생시킬 수 있다. 이는 주변 대수층과 매우 상이한 물이 혼합될 가능성이 있으며, 이로 인해 다양한 미량원소의 변동이 나타날 수 있다. 고립되어 있는 공극은 대수층에 비해 물의 양이 작기

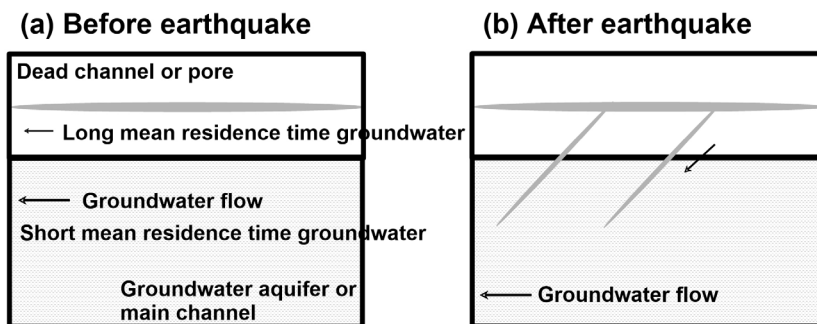


Fig. 3. A conceptual model of earthquake-induced hydrogeochemical changes of groundwater.

때문에 지하수 수위를 크게 변화시키지 않으며 주요 이온 역시 크게 변화시키지 않으나 미량원소의 농도는 크게 변화시킬 수 있다. 보통의 지하수의 미량원소 양은 매우 낮거나 분석한계 이하이기 때문에, 연결성이 없던 공극에서의 물이 혼합되게 되면 미량원소의 농도를 변화시킬 수 있다. 이는 연결성이 없는 공극에서는 물과 암석의 상호작용이 거의 평형에 도달하였다고 가정할 것이다. 하지만, 이러한 경우에는 미량원소의 농도가 지진동 이후 증가하여야 하므로, 지진동 이후 농도가 감소하는 경우에는 완전히 고립되어 있는 공극이 아니므로 공극에서 꾸준히 혼합이 일어나서 희석이 발생하여야 한다(Lee *et al.*, 2008).

미량원소는 pH 및 산화-환원환경(redox environment)에 민감하기 때문에 대수층의 물리적-화학적 환경에도 주의하여야 한다(Barberio *et al.*, 2017). 예를 들어, 주변 지표수가 지진에 의해 수리학적 연결성(hydraulic connection)이 발생하게 되어 지하수가 혼합될 수 있다. 동위원소 또는 화학적으로 지표수와 지하수는 매우 다를 수 있으므로, 지하수의 수리지구화학적 변동이 발생하였을 때 지표수 및 지하수의 특정 대수층과의 혼합 가능성을 고려해야 할 것이다. 또한, 지역별로 지질과 수리지질학적인 환경이 다르기 때문에 어떠한 미량원소가 지진에 민감한지는 암석의 종류 및 연구지역의 물리적-화학적 환경에 따라 다를 것이다. 특별히, 산화-환원 환경이 바뀌는 지역이나 여러 대수층이 혼재되어있는 지역의 경우 미량원소가 지진에 민감할 가능성이 높기 때문에 이러한 지역을 중심으로 지진의 전조로서 미량원소 및 주요 이온을 모니터링하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원으로 이루어졌습니다(No.20171510101960).

REFERENCES

- Barberio, M.D., Barbieri, M., Billi, A., Doöglioni, C. and Petitta, M., 2017, Hydrogeochemical changes before and during the 2016 Amatrice-Norcia seismic sequence (central Italy). *Scientific Reports*, 7, 11735.
- Claesson, L., Skelton, A., Graham, C. and Mörth, C.M., 2007, The timescale and mechanisms of fault sealing and water-rock interaction after an earthquake. *Geofluids*, 7, 427-440.
- 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, 695-706 (in Korean with English abstract).
- Jeong, C.H., Park, J.S., Lee, Y.J., Yang, J.H., Kim, Y.S. and Ou, S.M., 2018, Relationship of Rado-222 and chemical composition of groundwater as a precursor of earthquake. *The Journal of Engineering Geology*, 28, 313-324.
- Kim, S., Han, Y., Hur, S.D., Yoshimura, K. and Lee, J., 2019, Relating moisture transport to stable water vapor isotopic variations of ambient wintertime along the western coast of Korea. *Atmosphere*, 10, 806.
- King, C.Y., 1981, Do radon anomalies predict earthquakes?. *Nature*, 293, 262.
- King, C.Y., 1986, Gas geochemistry applied to earthquake prediction: an overview. *Journal of Geophysical Research*, 91, 12269-12281.
- Lee, J., Feng, X., Faiia, A.M., Posmentier, E.S., Kirchner, J.W., Osterhuber, R. and Taylor, S., 2010, Isotopic evolution of a seasonal snowcover and its melt by isotopic exchange between liquid water and ice. *Chemical Geology*, 270, 126-134.
- Lee, J., Feng, X., Posmentier, E.S., Faiia, A.M., Osterhuber, R. and Kirchner, J.W., 2008, Modeling of solute transport in snow using conservative tracers and artificial rain-on-snow experiments. *Water Resources Research*, 44, W02411.
- Montgomery, D. R. and Manga, M., 2003, Streamflow and water well responses to earthquakes. *Science*, 300, 2047-2049.
- Onda, S., Sano, Y., Takahata, N., Kagoshima, T., Miyajima, T., Shibata, T., Pinti, D. L., Lan, T., Kim, N. K., Kusakabe, M. and Nishio, Y., 2018, Groundwater oxygen isotope anomaly before the M6.3 Tottori earthquake in Southwest Japan. *Scientific Reports*, 8, 4800.
- Poitrasson, F., Dundas, S.H., Toutain, J.P., Munoz, M. and Rigo, A., 1999, Earthquake-related elemental and isotopic lead anomaly in a springwater. *Earth and planetary science letters*, 169, 269-276.
- Rosen, M.R., Binda, G., Archer, C., Pozzi, A., Michetti, A.M. and Noble, P.J. 2018, Mechanisms of Earthquake-Induced Chemical and Fluid Transport to Carbonate Groundwater Springs After Earthquakes. *Water Resources Research*, 54, 5225-5244.

Barberio, M.D., Barbieri, M., Billi, A., Doöglioni, C. and Petitta, M., 2017, Hydrogeochemical changes before and during the 2016 Amatrice-Norcia seismic sequence

- Schuessler, J.A., Kämpf, H., Koch, U. and Alawi, M., 2016, Earthquake impact on iron isotope signatures recorded in mineral spring water. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121, 8548-8568.
- Shi, Z., Zhang, H. and Wang, G., 2020, Groundwater trace elements change induced by M5.0 earthquake in Yunnan. *Journal of Hydrology*, 581, 124424.
- Skelton, A., Liljedahl-Claesson, L., Wästeby, N., Andrén, M., Stockmann, G., Sturkell, E., Mörth, C.M., Stefansson, A., Tollefsen, E., Siegmund, H. and Keller, N., 2019, Hydrochemical changes before and after earthquakes based on long-term measurements of multiple parameters at two sites in Northern Iceland-A review. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 2702-2720.
- Song, S.R., Ku, W.Y., Chen, Y.L., Liu, C.M., Chen, H.F., Chan, P.S., Chen, Y.G., Yang, T.F., Chen, C.H., Liu, T.K. and Lee, M., 2006, Hydrogeochemical anomalies in the springs of the Chiayi area in west-central Taiwan as possible precursors to earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 163, 675-691.
- Taran, Y.A., Ramirez-Guzman, A., Bernard, R., Cienfuegos, E. and Morales, P., 2005, Seismic-related variations in the chemical and isotopic composition of thermal springs near Acapulco, Guerrero, Mexico. *Geophysical Research Letters*, 32, L14317.
- Thomas, D., 1998, Geochemical precursors to seismic activity. *Pure and Applied Geophysics*, 126, 241-266.
- Wakita, H., 1996, Geochemical challenge to earthquake prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 93, 3781-3786.
- Woith, H., Wang, R., Maiwald, U., Pekdeger, A. and Zschau, J., 2013, On the origin of geochemical anomalies in groundwaters induced by the Adana 1998 earthquake. *Chemical Geology*, 339, 177-186.
-
- Received : March 19, 2020
Revised : April 20, 2020
Accepted : April 27, 2020